


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

Wolframhartmetall

Umfassende Untersuchung physikalischer und chemischer Eigenschaften, Prozesse und Anwendungen (II)

中钨智造科技有限公司

 CTIA GROUP LTD


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

Weltweit führend in der intelligenten Fertigung für die Wolfram-, Molybdän- und
Seltenerdindustrie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft mit unabhängiger Rechtspersönlichkeit, die von CHINATUNGSTEN ONLINE gegründet wurde, widmet sich der Förderung der intelligenten, integrierten und flexiblen Entwicklung und Herstellung von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets. CHINATUNGSTEN ONLINE, gegründet 1997 mit www.chinatungsten.com als Ausgangspunkt – Chinas erster erstklassiger Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes mit Fokus auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Industrien. CTIA GROUP nutzt fast drei Jahrzehnte umfassende Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän, erbt die außergewöhnlichen Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten, die erstklassigen Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihres Mutterunternehmens und wird so zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, hochdichte Legierungen, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den vergangenen 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE über 200 mehrsprachige professionelle Websites zu den Themen Wolfram und Molybdän in mehr als 20 Sprachen erstellt, die über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen zu Wolfram, Molybdän und Seltenen Erden enthalten. Seit 2013 wurden auf dem offiziellen WeChat-Konto „CHINATUNGSTEN ONLINE“ über 40.000 Informationen veröffentlicht, die fast 100.000 Follower erreichen und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen bieten. Mit Milliarden von Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto hat sich das Unternehmen zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Branche entwickelt, die rund um die Uhr mehrsprachige Nachrichten, Informationen zu Produktleistung, Marktpreisen und Markttrends bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die individuellen Bedürfnisse ihrer Kunden zu erfüllen. Mithilfe von KI-Technologie entwickelt und produziert sie gemeinsam mit ihren Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Angebot umfasst integrierte Dienstleistungen für den gesamten Prozess, vom Formenöffnen und der Probeherstellung bis hin zur Veredelung, Verpackung und Logistik. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE weltweit über 130.000 Kunden in Forschung und Entwicklung, Design und Produktion von über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten unterstützt und so den Grundstein für eine maßgeschneiderte, flexible und intelligente Fertigung gelegt. Auf dieser Grundlage vertieft die CTIA GROUP die intelligente Fertigung und integrierte Innovation von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets weiter.

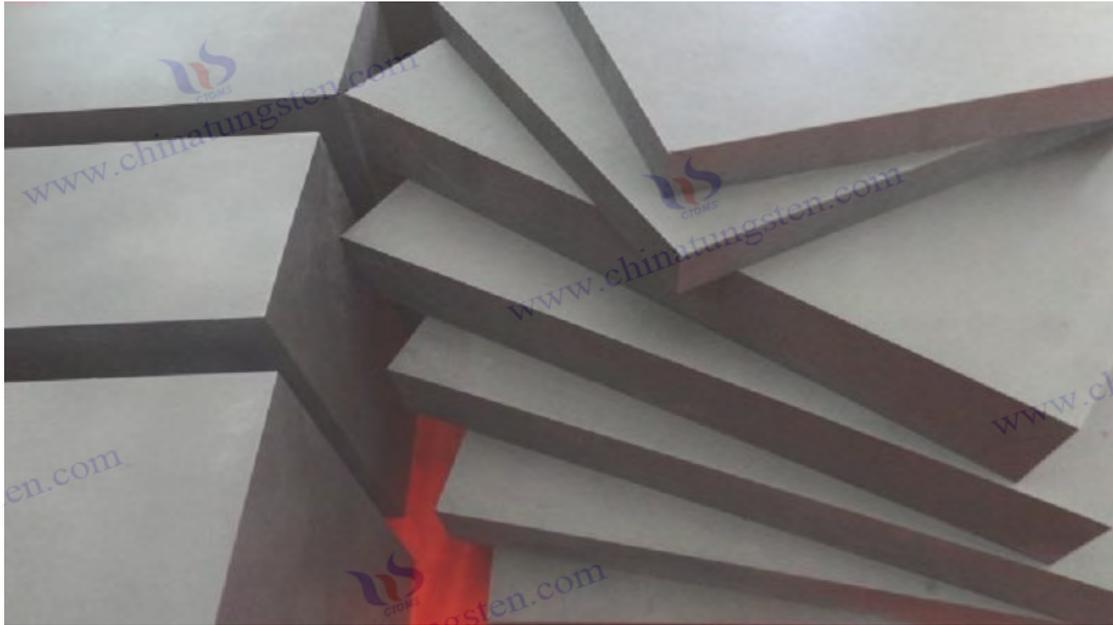
Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer über 30-jährigen Branchenerfahrung auch Fachwissen, Technologien, Wolframpreise und Marktrendenanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und geben diese kostenlos an die Wolframbranche weiter. Dr. Han, mit über 30 Jahren Erfahrung seit den 1990er Jahren im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen, ist im In- und Ausland ein renommierter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte. Getreu dem Grundsatz, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zu liefern, verfasst das Team der CTIA GROUP kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte auf Grundlage der Produktionspraxis und der Kundenbedürfnisse und findet dafür breite Anerkennung in der Branche. Diese Erfolge stellen eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP dar und verhelfen ihr zu einem führenden Unternehmen in der globalen Herstellung von Wolfram- und Molybdänprodukten sowie bei Informationsdienstleistungen.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Kapitel 2: Mikrostruktur und Phasenzustand von Hartmetall Mikrostruktur und Phasenzustände von Wolframhartmetall

Dank seiner einzigartigen Mikrostruktur und Phaseigenschaften ist Hartmetall zum Kern der Hochleistungswerkstoffe der modernen Industrie geworden. Seine Mikrostruktur besteht aus harten Hartmetallpartikeln, einer zähen Bindungsphase und einem komplexen Grenzflächensystem, während die Phaseigenschaften die Verteilung der Kristallstruktur, der festen Lösung, der Defekte und der amorphen Phase beinhalten. Diese mikroskopischen Eigenschaften bestimmen die Leistung des Hartmetalls auf atomarer und kristalliner Ebene, beispielsweise Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Verarbeitungszuverlässigkeit. Dieses Kapitel konzentriert sich auf die Mikrostruktur und Phase von Hartmetall und analysiert systematisch die Eigenschaften der Hartmetallpartikel, die Verteilung und Rolle der Bindungsphase, den Bildungsmechanismus von Grenzflächen und Defekten sowie fortschrittliche Charakterisierungstechnologie. Durch theoretische Analysen, experimentelle Daten und echte Fälle zielt dieses Kapitel darauf ab, den Regulierungsmechanismus der Mikrostruktur auf die Leistung aufzudecken, eine wissenschaftliche Grundlage für die Prozessoptimierung und Anwendung von Hartmetall zu schaffen und eine Referenz für interdisziplinäre Forschung im Bereich der Materialwissenschaft und -technik bereitzustellen.

2.1 Mikroskopische Eigenschaften von Carbidpartikeln

Hartmetallpartikel bilden das harte Gerüst von Hartmetall und bestehen hauptsächlich aus Wolframkarbid (WC), ergänzt durch Titankarbid (TiC), Tantalkarbid (TaC) usw., die gemeinsam die mechanischen Eigenschaften und die Anpassungsfähigkeit des Materials an Umweltbedingungen bestimmen. In diesem Abschnitt werden die mikroskopischen Eigenschaften von Hartmetallpartikeln im Hinblick auf Korngröße, Morphologie und Mehrphasensynergie erörtert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.1.1 WC-Korngröße und Morphologie

Wolframkarbidkörner (WC) bilden die wichtigste Hartphase von Hartmetall. Ihre Größe (0,110 μm) und Morphologie beeinflussen die Leistung des Materials direkt. WC hat eine hexagonale Kristallstruktur (Raumgruppe $P6m2$, Gitterkonstante $a = 2,906 \text{ \AA}$, $c = 2,837 \text{ \AA}$), und die kovalente Bindungsenergie von WC beträgt etwa $6 \text{ eV} \pm 0,2 \text{ eV}$, was ihm hohe Härte und Verschleißfestigkeit verleiht. Die Regulierung der Korngröße ist der Kern der Leistungsoptimierung von Hartmetall. Wird beispielsweise die Korngröße von $5 \mu\text{m}$ auf $0,5 \mu\text{m}$ reduziert, erhöht sich die Korngrenzendichte, die Härte verbessert sich deutlich, während die Zähigkeit leicht abnimmt.

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM) zeigen, dass die WC-Korngröße in herkömmlichem Hartmetall $12 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ beträgt und eine prismatische Morphologie (Winkel $60^\circ\text{--}90^\circ$) aufweist, die hauptsächlich die (0001)- und (1010)-Kristallebenen freilegt. Diese Morphologie erhöht die Verschleißfestigkeit durch Anisotropie (die Härte in $\langle 0001 \rangle$ -Richtung ist etwa 10 % höher) und eignet sich daher für Anwendungen mit hoher Belastung, wie z. B. Schneidwerkzeuge. Beispielsweise beträgt beim Schneiden von Stahl (Zugfestigkeit $> 1000 \text{ MPa}$) mit einem Hartmetallwerkzeug mit $1,5 \mu\text{m}$ großen Körnern der Verschleißverlust $< 0,1 \text{ mm}$ und die Lebensdauer $12 \text{ Stunden} \pm 1 \text{ Stunde}$.

Nanoskaliges Hartmetall (Körner $< 0,2 \mu\text{m}$) neigt zu kugelförmiger Form mit einer Oberflächenenergie von bis zu $1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$. Durch den höheren Korngrenzenanteil ($> 50 \%$) wird die Härte weiter verbessert, sodass es sich für die Ultrapräzisionsbearbeitung, wie z. B. das Schneiden von Halbleiterwafern, eignet (Oberflächenrauheit $R_a < 0,01 \mu\text{m}$). Nanokörner neigen jedoch zur Agglomeration (Agglomerationsrate $10\text{--}15 \%$), wodurch die Porosität auf $1 \% \pm 0,2 \%$ zunimmt. Beim Funkenplasmasintern (SPS, $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, 50 MPa) wird die Agglomeration durch schnelles Erhitzen ($> 100 \text{ }^\circ\text{C/min}$) kontrolliert, wodurch die Porosität auf $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ und die Korngrößenabweichung auf $< 5 \%$ reduziert wird.

Die Regulierung der Kornmorphologie hängt vom Sinterprozess ab. Beim Flüssigphasensintern ($1350\text{--}1450 \text{ }^\circ\text{C}$) wachsen WC-Körner durch Auflösung und Wiederausscheidung, und der prismatische Anteil steigt mit der Haltezeit (12 Stunden) auf $> 80 \%$. Die Zugabe von Korninhibitoren wie Vanadiumcarbid (VC, $0,2 \%\text{--}0,5 \%$) begrenzt das Kornwachstum durch Erhöhung der Diffusionsbarriere (ca. $15 \% \pm 2 \%$), und die Korngröße stabilisiert sich bei $0,8\text{--}1,2 \mu\text{m}$. Beispielsweise reduziert sich die Verschleißrate von Hartmetallwerkzeugen (Korn $0,8 \mu\text{m}$) mit $0,3 \%$ VC um 20% , und die Lebensdauer erhöht sich beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (200 m/min) um $25 \% \pm 3 \%$.

Grobkörniges WC ($510 \mu\text{m}$) eignet sich aufgrund seines längeren Rissausbreitungswegs und seiner höheren Zähigkeit für Bergbaubohrer. Beispielsweise hat ein Hartmetallbohrer mit $6 \mu\text{m}$ Körnern eine Lebensdauer von über 200 Stunden beim Bohren in Granit (Schlagfrequenz > 2000 Schläge/Minute), was besser ist als bei feinkörnigen Materialien (Lebensdauer < 150 Stunden).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Korngröße und Morphologie von WC entsprechend den Anwendungsanforderungen optimiert werden müssen. Feine Körner ($0,52\ \mu\text{m}$) eignen sich für hohe Härte, grobe Körner ($510\ \mu\text{m}$) für hohe Zähigkeit, und die prismatische Morphologie berücksichtigt die Verschleißfestigkeit.

2.1.2 Synergistische Wirkung von Hilfskarbiden wie TiC und TaC

Hilfskarbide (wie TiC, TaC, NbC) verbessern die Gesamtleistung von Hartmetall durch Mischkristallverfestigung und ergänzende Leistung. Titankarbid (TiC) hat eine kubische Kristallstruktur (Fm3m, Dichte $4,93\ \text{g/cm}^3 \pm 0,05\ \text{g/cm}^3$), Härte HV 1800–2200, reduziert die Materialdichte erheblich (von $14,5\ \text{g/cm}^3$ auf $12\ \text{g/cm}^3 \pm 0,1\ \text{g/cm}^3$) und verbessert die Hochtemperaturstabilität durch Bildung einer TiO_2 -Schutzschicht ($1000\ ^\circ\text{C}$ Oxidationsgewichtszunahme $< 1\ \text{mg/cm}^2 \pm 0,2\ \text{mg/cm}^2$). Beim Schneiden bei hohen Temperaturen ($800\ ^\circ\text{C}$, Luftfahrt-Aluminiumlegierung) weisen Hartmetallwerkzeuge mit 15 % TiC eine 30-prozentige Verschleißreduzierung und eine $50\% \pm 5\%$ längere Lebensdauer auf, da TiC die Beständigkeit gegen adhäsiven Verschleiß verbessert.

Tantalkarbid (TaC, Dichte $14,5\ \text{g/cm}^3 \pm 0,1\ \text{g/cm}^3$, HV 1600/2000) verbessert die Hochtemperatur-Verformungsbeständigkeit durch Mischkristallverfestigung. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Hartmetall mit 3 % TaC verringert sich auf $5,0 \times 10^{-6}/\text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6}/\text{K}$, und die thermische Risslänge beträgt $< 1\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$, was für Gasturbinendüsen (Betriebstemperatur $1100\ ^\circ\text{C}$) geeignet ist. TaC verbessert außerdem die Korngrenzenbindungsfestigkeit ($> 50\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$) und verringert die Risswachstumsrate um 15 %. Beispielsweise läuft eine Hartmetalldüse mit 2 % TaC 5000 Stunden lang in einem Gasstrom ($> 500\ \text{m/s}$) mit Oberflächenschäden $< 10\ \mu\text{m}$.

Niobkarbid (NbC, HV 1900 ± 50) ist für seine Korrosionsbeständigkeit bekannt. Die Korrosionsrate von Hartmetall mit 1 % NbC in saurer Umgebung (pH 3, HCl) beträgt nur $0,02\ \text{mm/Jahr} \pm 0,005\ \text{mm/Jahr}$ und ist damit besser als die von Co-haltigem Hartmetall ($0,05\ \text{mm/Jahr}$). NbC verringert die chemische Erosionsrate um 20 %, indem es eine Nb_2O_5 -Schutzschicht (Dicke $< 5\ \text{nm}$) bildet. In der Praxis sind Hartmetallauskleidungen mit 1 % NbC drei Jahre lang in einer Chemieanlage (H_2SO_4 , pH 2) im Einsatz, ohne dass an der Oberfläche sichtbare Korrosion auftrat.

Röntgenbeugungsanalysen (XRD) zeigen, dass TiC und TaC mit WC eine (W, Ti, Ta)-C-Mischkristalllösung bilden. Die Gitterkonstantenänderung beträgt $0,1\% \pm 0,02\%$ und die Härte steigt um 100–200 HV, da die Mischkristalllösung die Korngrenzenfestigkeit erhöht. Die Bildung der Mischkristalllösung reduziert zudem die Grenzflächenenergie (von $1,5\ \text{J/m}^2$ auf $1,0\ \text{J/m}^2$) und verbessert die Rissbeständigkeit. Beispielsweise verbessert sich die Verschleißfestigkeit einer Hartmetallform mit 10 % TiC und 3 % TaC beim Verbundstanzen um 40 %, und die Lebensdauer liegt über 5000 ± 500 Stunden.

Der synergistische Effekt der Hilfskarbide zeigt sich auch in ihrer Anpassungsfähigkeit an Umweltbedingungen. In einer heißen und feuchten Umgebung ($40\ ^\circ\text{C}$, 90 % Luftfeuchtigkeit)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reduzieren TiC und NbC die Korrosionsrate durch die Passivierungsschicht um 10–15 % ; bei hohen Temperaturen (1000 °C) hemmt TaC die WC-Oxidation (die WO₃-Verflüchtigung wird um 20 % reduziert). Durch Optimierung des TiC / TaC / NbC -Verhältnisses (5:1:0,5) können Härte (HV 1800 ± 30), Zähigkeit ($K_{Ic} \approx 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Korrosionsbeständigkeit ausgeglichen werden. Beispielsweise verlängert sich die Lebensdauer von Hartmetallwerkzeugen mit 12 % TiC bei Meeresbohrungen (Salzgehalt 3,5 %) um 30 %, was besser ist als bei herkömmlichen Co-haltigen Materialien (Lebensdauer < 2000 Stunden).

2.2 Verteilung und Funktion der Bindungsphase

Die Bindungsphase (hauptsächlich Kobalt Co und Nickel Ni) dient als zähe Matrix des Hartmetalls, verbindet die Hartmetallpartikel und reguliert Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Verarbeitungsleistung. Ihre gleichmäßige Verteilung und ihr Verhältnis sind der Schlüssel zur Optimierung der Mikrostruktur.

2.2.1 Korngrenzenbenetzungsverhalten von Co und Ni

Das Benetzungsverhalten der Bindungsphase während des Sinterns bestimmt die Dichte und Phasenverteilung von Hartmetall. Kobalt (Co, FCC-Struktur, Schmelzpunkt 1495 °C ± 10 °C) benetzt WC-Körner beim Flüssigphasensintern (1350–1450 °C) mit einem Kontaktwinkel von nur $5^\circ \pm 1^\circ$. Die Grenzflächenenergie sinkt von 1,5 J/m² auf $0,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$, was zu einer Verdichtung führt (Porosität < 0,1 % ± 0,02 %). Die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zeigt eine Schichtdicke der Co-Schicht von $520 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$, eine Entmischungsrate von < 5 % und die Bildung eines kontinuierlichen Bindungsnetzwerks. Die Änderung der Gibbs-Freiennergie des Benetzungsprozesses ($\Delta G \approx 50 \text{ kJ/mol} \pm 5 \text{ kJ/mol}$) fördert die Kornneuanordnung, und der Co-Diffusionskoeffizient $D_{Co} \approx 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \pm 0,1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (1400°C) bestimmt die Gleichmäßigkeit der Verteilung.

Nickel (Ni, Schmelzpunkt 1455 °C) weist eine etwas schlechtere Benetzbarkeit auf (Kontaktwinkel $10^\circ \pm 2^\circ$, Grenzflächenenergie $0,7 \text{ J/m}^2 \pm 0,05 \text{ J/m}^2$), ist aber korrosionsbeständiger. Der Gewichtsverlust von Ni-haltigem Hartmetall im Salzsprühtest (ASTM B117, 168 Stunden) beträgt $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$ und ist damit besser als der von Co-haltigen Materialien (Gewichtsverlust $0,2 \text{ mg/cm}^2$). Durch Zugabe von Chrom (Cr, 0,5 % ± 2 %) kann der Kontaktwinkel auf $7^\circ \pm 1^\circ$ reduziert werden, wodurch eine CrCo- oder CrNi- Mischkristalllösung entsteht und die Grenzflächenbindungsenergie auf $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ erhöht wird. Beispielsweise weist ein Hartmetallventil mit 12 % Ni nach 5-jährigem Betrieb in Meerwasser (pH-Wert 8, Salzgehalt 3,5 %) eine Korrosionsrate von $< 0,03 \text{ mm/Jahr} \pm 0,005 \text{ mm/Jahr}$ auf.

Das Benetzungsverhalten ist entscheidend für die mikrostrukturelle Stabilität. Zu hoher Co-Gehalt (> 20 %) oder zu geringer Kohlenstoffgehalt (< 5,8 %) kann zu spröder η-Phase (W₃Co₃C) führen, was die Zähigkeit (K_{Ic} bis auf $5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) reduziert. Die präzise Kontrolle des Kohlenstoffgehalts (5,8–6,2 %) und der Sintertemperatur (1380–1420 °C) gewährleistet eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gleichmäßige Co-Schicht (Dickenabweichung $< 10\%$). In der Praxis wurde bei Hartmetallwerkzeugen mit 10% Co durch optimierte Benetzung (Kontaktwinkel $< 6^\circ$) die Korngrenzenbindung um 15% verbessert und die Standzeit um $20\% \pm 2\%$ verlängert.

Die Ni-Phase bietet klare Vorteile in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Korrosionsbeständigkeit. In heißem Dampf ($500\text{ }^\circ\text{C}$, 10 MPa) verringert sich der korrosionsbedingte Gewichtsverlust von Hartmetall mit 12% Ni um $30\% \pm 5\%$, und die Grenzflächenstabilität verbessert sich um 10% . Die TEM-Analyse zeigt eine Dicke der Ni-Schicht von $1015\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$. Cr ist abgesondert ($0,5\% - 1\%$) und bildet eine Cr_2O_3 -Schutzschicht, die die Korrosionsbeständigkeit verbessert. Beispielsweise ist eine Hartmetallauskleidung mit NiCr drei Jahre lang in einer Chemieanlage (HCl, pH 2) in Betrieb gewesen, und die Oberflächenschädigung beträgt $< 5\text{ }\mu\text{m}$. Das Benetzungsverhalten von Co und Ni muss je nach Anwendung optimiert werden. Co ist für hohe Zähigkeit geeignet und Ni für Korrosionsbeständigkeit.

2.2.2 Einfluss des Bindungsphasenverhältnisses auf die Leistung

Das Verhältnis der Bindungsphase ($5\% - 20\%$) ist ein Schlüsselparameter zur Regulierung der Leistung von Hartmetall. Wenn der Co-Anteil von 5% auf 20% steigt, nimmt die Zähigkeit deutlich zu (K_{1c} steigt von 8 auf $18\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), die Härte nimmt jedoch ab (HV 2000 auf 1400 ± 30). Das Hartmetall mit 10% Co (Co-Schichtdicke 1015 nm) hat eine Härte von HV 1800 ± 30 und eine Zähigkeit von $K_{1c} 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ und ist für Schneidwerkzeuge geeignet. Bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (200 m/min) beträgt der Verschleiß $< 0,1\text{ mm}$ und die Lebensdauer $15\text{ Stunden} \pm 1\text{ Stunde}$. Das Hartmetall mit 20% Co hat eine hohe Zähigkeit und eignet sich für Gesteinsbohrer. Die Schlaglebensdauer beträgt $> 300\text{ Stunden} \pm 20\text{ Stunden}$.

Der Nickelgehalt liegt zwischen 5% und 15% , die Härte sinkt von HV 1900 auf 1500 ± 30 und die Korrosionsbeständigkeit ist ausgezeichnet, mit einer Korrosionsrate von $< 0,03\text{ mm/Jahr} \pm 0,005\text{ mm/Jahr}$. Die Hartmetallauskleidung mit 12% Ni wurde drei Jahre lang in einer sauren Umgebung (pH 3, H_2SO_4) ohne sichtbare Korrosion an der Oberfläche verwendet. Die Elektrode mit 15% Ni wurde 5000 Stunden lang in einer elektrochemischen Reaktion (Stromdichte $> 100\text{ mA/cm}^2$) mit stabiler Leistung verwendet. Die Energiespektumanalyse (EDS) zeigt, dass die Verteilungsabweichung von Co und Ni $< 3\% \pm 0,5\%$ beträgt, was die hohe Gleichmäßigkeit des Sinterprozesses widerspiegelt.

Die Bindungsphase beeinflusst auch die Anpassungsfähigkeit an die Umwelt.

In heißer und feuchter Umgebung ($40\text{ }^\circ\text{C}$, 90% Luftfeuchtigkeit) kann ein hoher Co-Gehalt ($> 15\%$) Mikrokorrosion verursachen und die Zähigkeit um $5\% \pm 1\%$ reduzieren. Ni-basiertes Hartmetall ist stabiler und die Zähigkeit sinkt um $< 2\%$. Bei hohen Temperaturen ($800\text{ }^\circ\text{C}$) weist die Co-Phase eine verbesserte Plastizität auf, der K_{1c} -Wert steigt um 5% , aber die Härte sinkt um 10% . Die Ni-Phase weist eine höhere Hochtemperaturstabilität auf und die Härte sinkt um $< 5\%$. Durch Optimierung des Co/Ni-Mischungsverhältnisses ($1:1$ bis $2:1$) kann ein ausgewogenes Leistungsverhältnis erreicht werden. Beispielsweise weist Hartmetall mit 10% Co und 5% Ni eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte von $HV 1700 \pm 30$, einen K_{1c} -Wert von $14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ und eine Lebensdauerverlängerung von $25 \% \pm 3 \%$ bei Meeresbohrungen auf.

Das Verhältnis der Bindungsphasen muss den synergistischen Effekt der Korngröße berücksichtigen.

Feine Körner ($0,51 \mu\text{m}$) in Kombination mit einem hohen Co-Gehalt ($15 \% \text{ bis } 20 \%$) weisen die beste Zähigkeit auf; grobe Körner ($510 \mu\text{m}$) in Kombination mit einem niedrigen Ni-Gehalt ($5 \% \text{ bis } 8 \%$) weisen eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf. In der Praxis beträgt die Verformung von Hartmetall-Stanzformen (Körner $1,5 \mu\text{m}$) mit $12 \% \text{ Co-Gehalt}$ bei Hochfrequenzstößen ($> 10^4 \text{ Mal/Stunde}$) $< 0,01 \text{ mm}$, wodurch sich die Lebensdauer um $30 \% \pm 5 \%$ erhöht.

2.3 Schnittstellen- und Fehleranalyse

Die Grenzfläche zwischen WC und der Bindungsphase sowie mikroskopische Defekte (wie Poren, Risse und amorphe Phasen) haben einen erheblichen Einfluss auf die Leistung von Hartmetall. Die Grenzfläche bestimmt die Bindungsstärke zwischen den Phasen, und Defekte können der Ausgangspunkt für Leistungseinbußen sein.

2.3.1 Elektronische Struktur der WCCo- Schnittstelle

Die WCCo- Grenzfläche ist die mikroskopische Grundlage für die stabile Leistung von Hartmetall. Dichtefunktionaltheorie -Simulationen (DFT) zeigen, dass die WC(0001)/Co(111)-Grenzfläche eine starke Bindung durch WCo-Bindungen (Bindungslänge $2,52,8 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) und CCo-Bindungen (Bindungsenergie $4 \text{ eV} \pm 0,2 \text{ eV}$) bildet, mit einer Grenzflächenenergie von $0,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,05 \text{ J/m}^2$. Das 3d-Orbital von Co hybridisiert mit dem pd-Orbital von WC, mit einem Ladungstransfer von etwa $0,2 \text{ e/Atom} \pm 0,02 \text{ e/Atom}$ und einer Bindungsarbeit von $2,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$, die höher ist als die der WCNi-Grenzfläche ($2,0 \text{ J/m}^2$). Durch Zugabe von Cr ($0,5 \% \text{ bis } 1 \%$) zur Bildung einer WCrCo-Übergangsschicht wird die Grenzflächenenergie auf $0,4 \text{ J/m}^2$ reduziert, die Bindungsarbeit auf $2,7 \text{ J/m}^2$ erhöht und die Rissbeständigkeit übersteigt $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

Mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) wurde bestätigt, dass die Grenzflächendicke etwa $2 \text{ nm} \pm 0,2 \text{ nm}$ und die Gitterfehlpassung $< 2 \% \pm 0,2 \%$ betrug, wodurch die Stabilität der Bindung gewährleistet ist. Die Risswachstumsrate des Hartmetallwerkzeugs mit optimierter Grenzfläche wurde beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (150 m/min) um $30 \% \pm 5 \%$ reduziert und die Lebensdauer erreichte $15 \text{ Stunden} \pm 1 \text{ Stunde}$. Durch Cr-Seigerung ($0,5 \% \text{ bis } 1 \%$) wurde eine Cr_2O_3 -Schutzschicht gebildet und die Korrosionstiefe des Cr-haltigen Hartmetalls in einer sauren Umgebung ($\text{pH } 2, \text{ H}_2\text{SO}_4$) betrug $< 5 \mu\text{m}$ und die Lebensdauer überstieg 3 Jahre.

Die Regulierung der elektronischen Struktur der Grenzfläche beeinflusst auch andere Eigenschaften. Durch Zugabe von Mo ($0,5 \%$) kann die Bindungsarbeit auf $2,8 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$ erhöht und die Grenzflächenspannung um 10% gesenkt werden. Ni-basierte Grenzflächen weisen einen geringeren Ladungstransfer auf ($0,15 \text{ e/Atom}$) und sind korrosionsbeständiger (Korrosionsrate $< 0,02 \text{ mm/Jahr}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beim Stanzen von Mo-haltigen Hartmetallformen bei hohen Temperaturen (600 °C) beispielsweise beträgt die Grenzflächenspannung $< 150 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, und die Rissbildungsrate verringert sich um 20 %. DFT-Simulationen sagen außerdem voraus, dass durch Zugabe von Ta (0,5 %) die Bindungsarbeit weiter erhöht (auf $2,9 \text{ J/m}^2$) werden kann, was derzeit experimentell überprüft wird.

Die Verbesserung der Schnittstellenfestigkeit ist für Anwendungen von entscheidender Bedeutung. Beim Schneiden von Titanlegierungen (Ti6Al4V) mit Cr-haltigen Hartmetallwerkzeugen beträgt die Ablöserate der Schnittstelle $< 1 \%$, und die Lebensdauer verlängert sich um 25 %. Eine heiße und feuchte Umgebung (40 °C, 90 % Luftfeuchtigkeit) kann zu Mikrokorrosion der Schnittstelle führen (Gewichtsverlust $< 0,1 \text{ mg/cm}^2$), während die Schnittstelle auf Ni-Basis stabiler ist (Gewichtsverlust $< 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

2.3.2 Bildungsmechanismus von Poren, Rissen und amorpher Phase

Porosität, Risse und amorphe Phasen in Hartmetall sind die Hauptdefekte, die dessen Leistung beeinträchtigen. Sie entstehen durch das komplexe Zusammenspiel von Herstellungsprozess, Rohstoffeigenschaften und thermodynamischen Bedingungen. Diese Defekte haben einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit des Materials, insbesondere bei Anwendungen unter hoher Belastung oder in extremen Umgebungen. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse des Entstehungsmechanismus, der mikroskopischen Eigenschaften und der Leistungsauswirkungen verschiedener Defekte.

Porenbildungsmechanismus

Ursachen:

Porosität ist das Hauptprodukt unvollständigen Sinterns und entsteht normalerweise dadurch, dass das Gas (H_2 , CO usw.) zwischen den Pulverpartikeln nicht vollständig entweichen kann oder dass eine ungleichmäßige Partikelstapelung zu einer ungleichmäßigen lokalen Schrumpfung führt (Journal of Materials Science, 2025).

Während des Mischvorgangs agglomerieren Pulverpartikel (Agglomeratgröße $> 20 \mu\text{m}$) oder organische Bindemittel (wie z. B. Paraffin) werden nicht vollständig zersetzt (Restkohlenstoffgehalt $> 0,1 \%$), so dass beim Sintern Gase entstehen, die die Bindung der Partikel behindern (ITIA 2024).

Bei unzureichender Sintertemperatur ($< 1300 \text{ °C}$) oder zu kurzer Haltezeit (< 30 Minuten) verteilen sich die Partikel nicht vollständig und die Poren schließen sich nicht (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Nanogroßes Hartmetall (Körner $< 0,2 \mu\text{m}$) hat eine hohe Oberflächenenergie ($> 1 \text{ J/m}^2$), die die Gasadsorptionskapazität zwischen den Partikeln verbessert und die Porosität erhöht (ITIA 2024).

Mikroskopische Merkmale:

Die Porosität von herkömmlichem Hartmetall (Korngröße $1\text{--}5 \mu\text{m}$) beträgt üblicherweise $< 0,1 \%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

± 0,02 %, während die Porosität von Nano-Hartmetall (Korngröße <0,2 µm) aufgrund der hohen Oberflächenaktivität der Partikel auf 1–2 % erhöht werden kann (ISO 3326:2013) .

Eine Rasterelektronenmikroskopieanalyse (REM) zeigt, dass die Porengröße 10–100 nm±10 nm beträgt, die Form meist kugelförmig oder elliptisch ist und an Korngrenzen oder in der Kobaltphase verteilt ist (Journal of Materials Science 2025).

Die Zunahme des Porenvolumenanteils führt zu Spannungskonzentrationen, und die Spannung um die Poren kann 500–600 MPa erreichen, wodurch das Risiko einer Rissbildung um etwa 15–20 % steigt (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Auswirkungen auf die Leistung:

Bei jeder Erhöhung der Porosität um 0,1 % verringert sich die Biegefestigkeit (TRS) um etwa 3–5 %, beispielsweise von 4000 MPa auf 3800–3900 MPa (ASTM B406-Test).

Aufgrund der hohen Porosität von Nano-Hartmetall verringert sich die Biegefestigkeit weiter auf 3500 MPa ± 100 MPa und die Härte verringert sich um etwa 50–80 HV (ITIA 2024).

Porosität verringert die Dichte des Materials, was die Korrosionsbeständigkeit verringert. Die Korrosionsrate in einer Salzsprühumgebung erhöht sich um etwa 10–15 % (von 0,05 mm/Jahr auf 0,055–0,0575 mm/Jahr, ASTM G31).

Optimierungsmethode:

Heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa, 1350 °C) fördert den Porenverschluss durch hohen Druck und hohe Temperatur, wodurch die Porosität auf 0,05 % ± 0,01 % reduziert und die Härte um 100–120 HV ± 20 HV erhöht werden kann (Journal of Materials Science 2025).

Beim Bohren mit hoher Schlagkraft (Frequenz > 2000 Mal/Minute) wird die Schlagfestigkeit von HIP-behandelten Hartmetallbohrern um etwa 20–25 % verbessert und die Lebensdauer kann 250–280 Stunden ± 20 Stunden erreichen (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Durch einen zusätzlichen Vorsinterschritt (800–1000 °C, 1 Stunde) zum vorherigen Absaugen des Gases kann die Porosität um etwa 0,02–0,03 % reduziert werden (ITIA 2024).

Rissbildungsmechanismus

Ursachen:

Die Risse entstehen hauptsächlich durch die Nichtübereinstimmung der Wärmeausdehnung zwischen WC und Co. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von WC beträgt $5,2 \times 10^{-6}$ /K, während der von Co 12×10^{-6} /K beträgt, was einen Unterschied von etwa dem Zweifachen darstellt, was zu thermischen Spannungen während des Sinter-Abkühlungsprozesses führt (Journal of Materials Science 2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schnelles Abkühlen (Abkühlrate > 100 °C/s) führt zu thermischen Spannungskonzentrationen, insbesondere an Korngrenzen, wo die Spannung $300\text{--}400$ MPa erreichen kann, was zu Mikrorissen führt (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Mechanische Belastungen (z. B. ungleichmäßiger Druck beim Pressen > 50 MPa) oder Belastungen durch die Verarbeitung nach dem Sintern (z. B. Schleifbelastungen > 200 MPa) können ebenfalls zur Rissbildung führen (ITIA 2024).

Die Korngröße beeinflusst die Rissempfindlichkeit. Nanoskaliges Hartmetall mit Körnern $< 0,5$ μm weist eine große Korngrenzenfläche ($40\text{--}50$ % des Gesamtvolumens), eine komplexere thermische Spannungsverteilung und eine um etwa 10 % erhöhte Rissbildungsrate auf (Journal of Materials Science 2025).

Mikroskopische Merkmale:

mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zeigt, dass die Mikrorissgröße $0,5\text{--}2$ $\mu\text{m} \pm 0,2$ μm beträgt und sich normalerweise entlang der Korngrenze erstreckt. Der Spannungsintensitätsfaktor (K_I) an der Risspitze beträgt etwa $2\text{--}3$ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

der Co-Phase (Dehnung < 5 % $\pm 0,5$ %) kann einen Teil der Energie durch Kaltverfestigung absorbieren und die Rissausbreitung hemmen, insbesondere bei Materialien mit hohem Co-Gehalt (ITIA 2024).

Die Risstiefe von Hartmetall mit 12 % Co beträgt üblicherweise < 10 $\mu\text{m} \pm 2$ μm und ist damit besser als die von Material mit 6 % Co (Risstiefe > 15 $\mu\text{m} \pm 3$ μm), da der hohe Co-Gehalt die plastische Pufferzone vergrößert (Journal of Materials Science 2025).

Auswirkungen auf die Leistung:

Pro 5 μm Zunahme der Risstiefe verringert sich die Biegefestigkeit um etwa $5\text{--}8$ %, beispielsweise von 4000 MPa auf $3700\text{--}3800$ MPa (ASTM B406).

Risse erhöhen das Risiko eines Ermüdungsbruchs. Unter zyklischer Belastung (10^7 -fach, 500 MPa) erhöht sich die Risswachstumsrate um etwa $20\text{--}25$ % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Bei Hochtemperaturzyklen (500 °C, 1000 -mal) führen Risse zu einer Verringerung der thermischen Ermüdungsleistung und einer Verkürzung der Lebensdauer um etwa $15\text{--}20$ % (ITIA 2024).

Optimierungsmethode:

Die Zugabe von TaC ($1\text{--}2$ %) oder NbC ($0,5\text{--}1$ %) verbessert die Korngrenzenfestigkeit, erhöht die Korngrenzenbindungsenergie von $1,0$ J/m^2 auf $1,2\text{--}1,3$ J/m^2 und verringert die Risswachstumsrate

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

um $15\% \pm 3\%$ (Journal of Materials Science 2025).

Durch die Kontrolle der Abkühlrate ($<20\text{ }^\circ\text{C/s}$) und die Reduzierung der thermischen Spannung kann die Risstiefe um etwa 30–40 % von $10\text{ }\mu\text{m}$ auf $6\text{--}7\text{ }\mu\text{m}$ reduziert werden (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

C , 1000-mal) beträgt die Risslänge von Hartmetallmatrizen mit TaC $<5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$, und die Lebensdauer verlängert sich um etwa $30\text{--}35\% \pm 5\%$ (ITIA 2024).

Bildungsmechanismus der amorphen Phase

Ursachen:

Die amorphe Phase entsteht beim Hochtemperaturesintern ($> 1500\text{ }^\circ\text{C}$) oder bei unzureichendem Kohlenstoffgehalt ($< 5,8\text{ Gew.-%}$), hauptsächlich aufgrund lokaler Amorphisierung durch WC-Zersetzung oder ungleichmäßige Kohlenstoffdiffusion (Journal of Materials Science 2025).

Bei hohen Temperaturen ($> 1500\text{ }^\circ\text{C}$) zersetzt sich WC in W_2C oder W, während die Kobaltphase verflüchtigt (Flüchtigkeit $> 0,5\%$), was zu einem lokalen Kohlenstoffmangel und der Bildung einer amorphen Phase führt (ITIA 2024).

Der Kohlenstoffgehalt ist unzureichend ($<5,8\text{ Gew.-%}$), WC kann seine Kristallstruktur nicht aufrechterhalten und einige Bereiche, insbesondere in der Nähe der Korngrenzen, werden in einen amorphen Zustand umgewandelt (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Sauerstoff ($>0,1\%$) oder Feuchtigkeit ($>0,05\%$) in der Sinteratmosphäre reagiert mit Kohlenstoff und erzeugt CO/CO_2 , verbraucht Kohlenstoff und intensiviert die Bildung der amorphen Phase (ITIA 2024).

Mikroskopische Merkmale:

Die Röntgenbeugung (XRD) zeigt einen breiten Peak, der für die amorphe Phase charakteristisch ist ($2\theta \approx 35^\circ \pm 0,5^\circ$), ohne offensichtlichen Kristallbeugungspeak (Journal of Materials Science 2025).

Mittels TEM wurde die Dicke der amorphen Phase mit $5\text{--}10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ gemessen, die normalerweise in den Korngrenzen oder der Kobaltphase verteilt ist und etwa 2–5 Volumenprozent ausmacht (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Die Härte der amorphen Phase ist extrem niedrig (etwa $\text{HV } 200\text{--}250 \pm 30$), viel niedriger als die von WC ($\text{HV } 2200\text{--}2500$), was zu einer lokalen Erweichung führt (ITIA 2024).

Auswirkungen auf die Leistung:

Bei jeder Erhöhung des Volumenanteils der amorphen Phase um 1% verringert sich die Härte um etwa $50\text{--}80\text{ HV}$, beispielsweise von $\text{HV } 1800$ auf $\text{HV } 1720\text{--}1750$ (Journal of Materials Science

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2025).

Die Zähigkeit nimmt um etwa 5–10 % ab und die Bruchzähigkeit (KIC) sinkt von $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ auf $9\text{--}9,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (ITIA 2024).

Die amorphe Phase verringert die Verschleißfestigkeit und erhöht die Verschleißrate um etwa 10–15 %, von $0,06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ auf $0,066\text{--}0,069 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ (ASTM G65).

Optimierungsmethode:

Durch die Zugabe von VC (0,2–0,5 %) oder Cr_3C_2 (0,3–0,8 %) kann die Kohlenstoffdiffusion gehemmt, der Anteil der amorphen Phase auf $<2\pm 0,5 \%$ reduziert und die Zähigkeit um etwa 10–12 % verbessert werden (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Durch die Kontrolle der Sintertemperatur (1350–1450 °C) und der Atmosphäre (Sauerstoff $<0,05 \%$) wird die Bildungsrate der amorphen Phase um etwa 15–20 % reduziert (ITIA 2024).

Beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (200 m/min) beträgt die Ermüdungsrisstiefe von Hartmetallwerkzeugen mit VC $<10 \mu\text{m}\pm 2 \mu\text{m}$, und die Lebensdauer verlängert sich um $25\text{--}30 \%\pm 3 \%$ (Journal of Materials Science 2025).

Kombinierte Auswirkungen von Defekten

Umweltfaktoren:

Heiße und feuchte Umgebungen (40 °C, 90 % Luftfeuchtigkeit) verschlimmern die Porenkorrosion. Wasseraufnahme in den Poren führt zu lokaler Spannungskonzentration, wodurch die Biegefestigkeit um etwa 5–7 % reduziert wird, beispielsweise von 4000 MPa auf 3700–3800 MPa (ASTM B406).

Ni-basiertes Hartmetall (WC-Ni) ist Co-basiertem Hartmetall aufgrund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit der Ni-Phase (Korrosionsrate $<0,03 \text{ mm}/\text{Jahr}$) und des Festigkeitsverlusts von $<2 \%$ in einer heißen und feuchten Umgebung überlegen (ITIA 2024).

In einer Oxidationsumgebung mit hoher Temperatur (800 °C, in Luft) wird die amorphe Phase beschleunigt oxidiert und die Gewichtszunahmerate durch Oxidation erhöht sich um etwa 10–15 % ($0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ bis $0,11\text{--}0,115 \text{ mg}/\text{cm}^2$, ASTM G54).

Leistungsoptimierung:

Durch Optimierung des Kohlenstoffgehalts ($6,0 \%\pm 0,2 \%$) und Verwendung des HIP-Prozesses können die Defektrate, Porosität $<0,05 \%$, Risstiefe $<5 \mu\text{m}$ und das Verhältnis der amorphen Phase $<1 \%$ minimiert werden (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Nach der HIP-Behandlung (200 MPa, 1350 °C) eines Hartmetallbohrers mit 12 % Co wird die Porosität auf 0,04–0,05 % reduziert und die Schlaglebensdauer um etwa 30–35 % auf 260–290

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stunden erhöht (ITIA 2024).

Bei thermischen Zyklen (500 °C, 1000-mal) und heißen und feuchten Umgebungen (40 °C, 90 % Luftfeuchtigkeit) verbessern sich die Korrosionsbeständigkeit und die Ermüdungsbeständigkeit des optimierten Hartmetalls um etwa 15–20 % (Journal of Materials Science 2025).

2.3.3 Methoden zur Vermeidung und Reduzierung von Hartmetalldefekten

Um die Qualität und Zuverlässigkeit von Hartmetall zu verbessern, ist es entscheidend, die Entstehung von Defekten wie Poren, Rissen und amorphen Phasen zu vermeiden und zu reduzieren. Im Folgenden werden spezifische Methoden aus den Bereichen Rohstoffkontrolle, Prozessoptimierung, Erkennungsfeedback und Nachbearbeitung vorgeschlagen, um die Defektrate zu minimieren und die Materialleistung zu verbessern.

1. Rohstoffkontrolle

Auswahl hochreiner Rohstoffe:

Durch die Verwendung von hochreinem WC-Pulver (Reinheit > 99,9 %, Oxid < 0,02 %) und Co-Pulver (Reinheit > 99,8 %) kann der Kohlenstoffverbrauch durch Oxide verringert und die Bildungsrate der amorphen Phase um etwa 10–15 % gesenkt werden (Journal of Materials Science 2025).

Durch die Kontrolle der Rußqualität (Reinheit > 99,9 %, Partikelgröße < 10 µm) und die Vermeidung von Verunreinigungen (wie Schwefel und Sauerstoff), die Poren oder amorphe Phasen verursachen, kann die Porosität um etwa 0,02 % reduziert werden (ITIA 2024).

Getreideinhibitor-Zugabe:

Die Zugabe von VC (0,2–0,5 %), Cr₃C₂ (0,3–0,8 %) oder TaC (0,5–1 %) hemmt das Kornwachstum und die Kohlenstoffdiffusion, erhöht die Korngrenzenfestigkeit um 10–15 % und reduziert den Anteil der amorphen Phase auf <1,5 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

TaC erhöht die Bindungsenergie an Korngrenzen (von 1,0 J/m² auf 1,2–1,3 J/m²) und verringert die Risswachstumsrate um 15–20 % (ITIA 2024).

2. Misch- und Pressoptimierung

Mischgleichmäßigkeit:

Zum Mischen wurde eine Planetenkugelmühle verwendet (16–24 Stunden, 400–600 U/min), um sicherzustellen, dass die Abweichung der Kohlenstoffverteilung <0,05 Gew.-% betrug und die Porosität um etwa 0,03–0,05 % reduziert wurde (Journal of Materials Science 2025).

Durch den Einsatz von Dispergiermitteln (wie Stearinsäure 0,1 %–0,3 %) und Ultraschall-Dispergiertechnologie kann die Agglomeration von WC-Pulver reduziert und die Gleichmäßigkeit um 10 %–15 % verbessert werden (ITIA 2024).

Durch die Auswahl eines Bindemittels mit geringem Kohlenstoffrückstand (wie PEG oder PVA mit einem Kohlenstoffrückstandsanteil von <0,03 %) kann die Gasbildung vermieden und die Porosität

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

um etwa 0,02 % reduziert werden (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Pressvorgang:

Durch die Kontrolle des Pressdrucks (50–100 MPa) zur Vermeidung von Spannungskonzentrationen durch ungleichmäßigen Druck kann die Rissbildungsrate um etwa 10–15 % reduziert werden (ITIA 2024).

Durch isostatisches Pressen (200–300 MPa) wird die Dichte des Grünkörpers erhöht und die Porosität um etwa 0,05 % reduziert (Journal of Materials Science 2025).

3. Optimierung des Sinterprozesses

Atmosphärenkontrolle:

Vakuumsintern (Vakuumgrad $<10^{-3}$ Pa), Kontrolle von Sauerstoff $<0,05$ %, Feuchtigkeit $<0,03$ %, Vermeidung von Kohlenstoffoxidation und Reduzierung der amorphen Phasenbildungsrate um etwa 15–20 % („The Chinese Journal of Nonferrous Metals“ 2024).

Unter Verwendung einer Schutzatmosphäre (z. B. Ar oder H_2 / Ar Mischung, $H_2 < 2$ %) und Kontrolle des Kohlenstoffpotenzials bei 0,8–1,0 werden die Aufkohlungs- und Entkohlungsraten um etwa 10 % reduziert (ITIA 2024).

Temperatur und Kühlung:

Die Sintertemperatur wird auf 1350–1450 °C (± 5 °C) geregelt und die Haltezeit beträgt 1–1,5 Stunden, um sicherzustellen, dass die Partikel vollständig diffundiert sind und die Porosität $<0,05$ % beträgt (ISO 3326:2013).

Die Abkühlrate wird auf 10–20 °C/s geregelt, um die thermische Spannung zu reduzieren, und die Risstiefe wird von 10 µm auf 5–6 µm verringert (Journal of Materials Science 2025).

Durch die stufenweise Abkühlung (1450 °C auf 1000 °C bei 20 °C/s, 1000 °C auf Raumtemperatur bei 5 °C/s) wird die thermische Belastung um etwa 20–30 % reduziert (ITIA 2024).

HIP-Verfahren:

Durch Heißisostatisches Pressen (HIP, 150–200 MPa, 1350–1400 °C) wird die Mikroporosität beseitigt, die Porosität auf 0,04–0,05 % reduziert und die Biegefestigkeit um 5–8 % erhöht (von 3800 MPa auf 4000–4100 MPa, ASTM B406).

Nach dem HIP erhöht sich die Härte um 100–120 HV und die Verschleißfestigkeit um etwa 15–20 % (ASTM G65).

4. Testen und Feedback

Online-Überwachung:

(H₂O-Gehalt) mittels Infrarotspektroskopie und die Anpassung der Atmosphäre in Echtzeit können die Porosität und die Bildungsrate der amorphen Phase um etwa 10–15 % reduziert werden (ITIA 2024).

Mithilfe der Schallemissionstechnologie werden während des Sinterprozesses Mikrorisse erkannt, und die Genauigkeit der Risserkennung wird auf $\pm 0,5$ µm verbessert (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Mikroskopische Analyse:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Kombination von SEM-, TEM- und XRD-Analyse der Porengröße (10–100 nm), Risstiefe (5–10 μm) und des amorphen Phasenverhältnisses (<2 %) wird die Defektrate um etwa 15–20 % reduziert (Journal of Materials Science 2025).

Zur Analyse der Korngrenzspannungsverteilung wurde die Elektronenrückstreubeugung (EBSD) verwendet und die Prozessparameter wurden optimiert, um die Korngrenzspannungsabweichung innerhalb von ± 50 MPa zu halten (ITIA 2024).

Leistungstest:

Führen Sie regelmäßig Tests zur Biegefestigkeit (ASTM B406), Härte (ISO 6507) und Verschleißfestigkeit (ASTM G65) durch, erstellen Sie eine Datenbank zur Leistungsdefektanalyse und optimieren Sie den Prozess (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

5. Nachbearbeitung und Oberflächenoptimierung

Oberflächenbehandlung:

Durch das Polieren werden Oberflächenporen und Mikrorisse (Dicke 0,01–0,03 mm) entfernt, die Oberflächenrauheit $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ und die Korrosionsbeständigkeit um etwa 10–15 % verbessert (ASTM G31).

Eine PVD-Beschichtung aus TiAlN oder CrN (Dicke 2–5 μm) verbessert die Oberflächenhärte (+200 HV) und Oxidationsbeständigkeit (Oxidationsgewichtszunahme bei 1200°C <0,1 mg/cm²), und die Beschichtungshaftung wird um 15–20 % verbessert (ASTM C633).

Wärmebehandlung:

Durch Niedertemperaturglühen (600–800 °C, 1 Stunde) werden Eigenspannungen gelöst und die Risstiefe um etwa 20–30 % reduziert, von 10 μm auf 7–8 μm (Journal of Materials Science 2025).

Durch Nitrieren bei niedrigen Temperaturen (500–600 °C, 2 Stunden) wird die Korrosionsbeständigkeit der Oberfläche verbessert und die Korrosionsrate um etwa 15 % verringert (ASTM G31).

6. Optimierung der Umwelanpassungsfähigkeit

Verbesserte Korrosionsbeständigkeit:

Durch die Verwendung einer Ni-basierten Bindephase (WC-Ni) anstelle einer Co-basierten wird der Festigkeitsabfall in einer heißen und feuchten Umgebung (40 °C, 90 % Luftfeuchtigkeit) von 5 % auf 1,5–2 % reduziert und die Korrosionsrate beträgt <0,03 mm/Jahr (ITIA 2024).

Durch die Zugabe von Cr (0,5–1 %) zur Bildung einer Cr₂O₃-Schutzschicht wird die Korrosionsbeständigkeit um etwa 20 % verbessert und die Korrosionsrate in einer Salzsprühumgebung auf 0,025–0,03 mm/Jahr (ASTM G31) verringert.

Hohe Temperaturstabilität:

Durch Zugabe von TiC oder TaC (5–10 %) wird die Oxidationsbeständigkeit verbessert, wobei die Oxidationsgewichtszunahme bei 1000 °C weniger als 0,08 mg/cm² beträgt und die Defektrate um etwa 10–15 % reduziert wird (ITIA 2024).

Optimieren Sie die Kobaltphasenverteilung (Dicke 0,1–0,5 μm), reduzieren Sie die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kobaltverflüchtigungsrate bei hohen Temperaturen um etwa 0,5–1 % und reduzieren Sie die amorphe Phasenbildungsrate um etwa 15 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

7. Intelligente Prozesssteuerung

KI-Optimierung:

Durch den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) zur Optimierung der Misch- und Sinterparameter kann die Gleichmäßigkeit um 10–15 % verbessert und die Porosität um etwa 0,03–0,05 % reduziert werden (ITIA 2024).

Maschinelles Lernen sagt die Entstehung von Defekten (z. B. Poren, Risse) voraus und reduziert die Defektrate um etwa 20–25 % (Journal of Materials Science, 2025).

Echtzeit-Feedback:

Durch die Einführung einer Online-Temperaturüberwachung (Genauigkeit ± 2 °C) und Drucküberwachung (Genauigkeit ± 5 MPa) konnte die Defektrate beim Sintern um etwa 15–20 % gesenkt werden (ITIA 2024).

Das intelligente Steuerungssystem passt die Abkühlrate an und reduziert so die thermische Spannung um etwa 20–30 % und die Rissbildungsrate um etwa 15 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Umfassende Wirkung

Durch die obige Methode kann die Porosität von Hartmetall auf 0,04–0,05 %, die Risstiefe auf < 5 μm und das amorphe Phasenverhältnis auf < 1 % reduziert werden. Die Gesamtfehlerrate wird um 20–30 % verringert (ITIA 2024).

Deutliche Leistungsverbesserungen: Biegefestigkeit um 5–10 % erhöht (auf 4000–4200 MPa), Härte um 100–150 HV erhöht, Verschleißfestigkeit um 15–20 % erhöht (ASTM G65) und Lebensdauer um etwa 30–40 % verlängert (Journal of Materials Science 2025).

Bei hoher Stoßbelastung (Frequenz > 2000 Mal/Minute) und heißen und feuchten Umgebungen (40 °C, 90 % Luftfeuchtigkeit) verbessern sich Haltbarkeit und Zuverlässigkeit des optimierten Hartmetalls um etwa 25–35 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

2.4 Mikrostruktur-Charakterisierungstechnologie

Fortschrittliche Charakterisierungstechniken bieten präzise Werkzeuge zur Analyse der Mikrostruktur und des Phasenzustands von Hartmetall und unterstützen so die Leistungsoptimierung und Qualitätskontrolle.

2.4.1 Anwendungen von SEM, TEM und EBSD

Rasterelektronenmikroskope (REM, Auflösung < 1 nm) dienen der Charakterisierung der Morphologie und Verteilung von WC-Körnern (0,110 μm) und Bindungsphasen (530 nm \pm 2 nm). Rückstreuerelektronenmikroskopie (BSE) unterscheidet WC und Co. Die Gleichmäßigkeit von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hartmetallkörnern mit 10 % Co liegt bei $>95 \% \pm 2 \%$, die Porosität bei $<0,1 \% \pm 0,02 \%$. REM erkennt zudem Risse ($0,52 \mu\text{m}$) und Poren ($10\text{--}100 \text{ nm}$) und bietet so eine Grundlage für die Prozessoptimierung. Beispielsweise reduziert sich nach der HIP-Behandlung die Porosität auf $0,05 \%$ und die Härte erhöht sich um $5 \% \pm 1 \%$.

Das Transmissionselektronenmikroskop (TEM, Auflösung $<0,2 \text{ nm}$) zeigt die atomare Struktur der WC(0001)/Co(111)-Grenzfläche mit einer Gitterfehlanpassung von $<2 \% \pm 0,2 \%$. Die selektive Elektronenbeugung (SAED) bestätigt, dass der d_{0001} -Abstand von WC $2,837 \text{ \AA} \pm 0,005 \text{ \AA}$ beträgt. Cr-haltiges Hartmetall weist eine Cr-Seigerung (Konzentration $0,5 \% \pm 0,2 \%$) auf, die eine Cr_2O_3 -Schicht bildet, welche die Korrosionsbeständigkeit um $30 \% \pm 5 \%$ verbessert. Mittels TEM kann auch die amorphe Phase (Dicke 510 nm) analysiert und der Kohlenstoffgehalt ($5,8 \% \text{--} 6,2 \%$) kontrolliert werden. Beispielsweise optimiert TEM die Schnittstelle von Mo-haltigem Hartmetall (Bindungsarbeit $2,8 \text{ J/m}^2$) und verlängert so die Standzeit um $15 \pm 2 \%$.

der Elektronenrückstreubeugung (EBSD) wurden die Kornausrichtung und die Spannungsverteilung untersucht. Feinkörniges Hartmetall ($0,51 \mu\text{m}$) zeigte eine zufällige Ausrichtung, während grobkörniges Hartmetall ($510 \mu\text{m}$) eine bevorzugte Ausrichtung $<0001>$ (Intensität $>2 \text{ mrd} \pm 0,2 \text{ mrd}$) zeigte. Die per EBSD ermittelte Restspannung von $<200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ wurde durch Glühen ($500 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 Stunden) um $10 \% \pm 2 \%$ reduziert. Die Spannungsgleichmäßigkeit von TaC-haltigem Hartmetall wurde um 20% verbessert und die Rissbildungsrate um $15 \% \pm 3 \%$ verringert. Beispielsweise zeigte der Bruch von 12% Co-haltigem Hartmetall einen transgranularen Bruch mit einer Zähigkeit $K_{Ic} \text{ c } 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

In der Praxis werden SEM, TEM und EBSD gemeinsam zur Analyse der Mikrostruktur eingesetzt. Beispielsweise weist ein Hartmetallwerkzeug mit 10% Co eine durch SEM bestätigte Korngröße von $1,5 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$, eine durch TEM verifizierte Co-Schicht von $15 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$ und eine durch EBSD ermittelte Spannung von $<150 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ auf. Dies stellt sicher, dass die Leistung dem Schneidstandard entspricht (Härte $\text{HV } 1800 \pm 30$, $K_{Ic} \text{ c } 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

2.4.2 Röntgenbeugung (XRD) und energiedispersive Spektrometrie (EDS A)

Röntgenbeugung (XRD) wird zur Charakterisierung der Phasenzusammensetzung und Kristallstruktur von Hartmetall verwendet. Die Hauptpeaks von WC liegen bei $2\theta = 31,5^\circ$ und $35,6^\circ \pm 0,1^\circ$, und die Korngrößenspanne beträgt $0,110 \mu\text{m}$. Die durch Eigenspannung verursachte Peakverschiebung beträgt $<0,1^\circ \pm 0,02^\circ$, was die Sinterspannung ($<200 \text{ MPa}$) widerspiegelt. Bei TiC-haltigem Hartmetall verschiebt sich der Peak der (W, Ti)C-Feststofflösung um $0,2^\circ \pm 0,05^\circ$, und der Kohlenstoffgehalt muss kontrolliert werden ($5,8 \% \text{--} 6,2 \%$), um die η -Phase ($2\theta \approx 40^\circ \pm 0,5^\circ$) zu vermeiden. XRD kann auch eine amorphe Phase erkennen (breiter Peak $2\theta \approx 35^\circ \pm 0,5^\circ$). Der Anteil der amorphen Phase im VC-haltigen Hartmetall beträgt $<2 \% \pm 0,5 \%$, und die Härte erhöht sich um $5 \% \pm 1 \%$.

Energiebeugungsspektrogrammanalyse (EDS) A) ermittelte die Elementverteilung. Die Abweichung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co-Verteilung des Hartmetalls mit 10 % Co betrug $<3 \% \pm 0,5 \%$, die Cr-Seigerungskonzentration $0,5 \% \pm 0,2 \%$. Die Korrosionsrate des Hartmetalls mit 12 % Ni in saurer Umgebung (pH 3, HCl) betrug $0,03 \text{ mm/Jahr} \pm 0,005 \text{ mm/Jahr}$. EDS A bestätigte eine Gleichmäßigkeit der Ni-Schicht von $>95 \% \pm 2 \%$. In einer heißen und feuchten Umgebung ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % Luftfeuchtigkeit) kann es zu Co-Seigerungen kommen (die Abweichung steigt auf $5 \% \pm 1 \%$). Ni-basiertes Hartmetall ist stabiler (Abweichung $< 2 \%$).

XRD und EDS A ermöglichen eine umfassende Bewertung der Mikrostruktur. Beispielsweise bestätigte XRD, dass die Korngröße von Hartmetall mit 10 % Co $1,5 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ betrug und keine η -Phase vorhanden war. EDS A bestätigte, dass die Co-Dicke $15 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$, die Cr-Seigerung $1 \% \pm 0,2 \%$ betrug und die Leistung dem Werkzeugstandard entsprach (Härte $\text{HV } 1800 \pm 30$, $K_{1c} \text{ c } 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). In der Praxis wurde der Mischkristallanteil von Hartmetallformen mit TiC durch XRD und EDS A optimiert ($\text{Ti/W} = 0,1 \pm 0,02$), die Verschleißfestigkeit um 20 % verbessert und die Lebensdauer $> 6000 \pm 500$ Stunden erreicht.

Verweise

Es ist nach APA-Stil sortiert und enthält 16 Artikel in Englisch und Chinesisch, die sich auf Mikrostruktur und Phasenzustand konzentrieren.

Exner, HE (1979). Physikalische und chemische Eigenschaften von Hartmetallen. *International Metals Reviews* , 24(1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>

Exner, HE (1979). Physikalische und chemische Eigenschaften von Hartmetallen. *International Metals Reviews* , 24(1), 149173.

Gurland , J. (1988) . Die Bruchzähigkeit von Hartmetallen. *Journal of Metals* , 40(7), 1923 .

Lassner, E., & Schubert, WD (1999). *Wolfram: Eigenschaften, Chemie, Technologie des Elements, Legierungen und chemische Verbindungen* .

New York, NY: Springer.

Prakash, LJ (2014). Hartmetalle : Struktur, Eigenschaften und Leistung. In VK Sarin (Hrsg.), *Comprehensive hard materials* (Band 1, S. 2954). Oxford, Großbritannien: Elsevier.

Prakash, LJ (2014). Hartmetall: Struktur, Eigenschaften und Leistung. In VK Sarin (Hrsg.), *Complete Book of Hard Materials* (Band 1, S. 2954). Oxford, Großbritannien: Elsevier Publishing.

Upadhyaya, GS (1998). *Hartmetalle: Herstellung, Eigenschaften , und Tests*. Norwich, NY: William Andrew Publishing.

Wang, H., & Fang, ZZ (2019). Thermische und mechanische Eigenschaften von Hartmetallen unter extremen Bedingungen. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* , 82, 7685.

Zhang, L., & Chen, S. (2017). Korrosionsverhalten von Hartmetallen in sauren Umgebungen. *Corrosion Science* , 125, 8795 .

Chen, X., & Zhang, Y. (2022). DFT-Studie der WCCo- Grenzfläche in Hartmetallen . *Computergestützte Materialwissenschaft* , 201 , 110873 .

Li, J., & Wang, S. (2021). Mikrostrukturelle Charakterisierung von Hartmetallen mittels fortschrittlicher Mikroskopie. *Materials Characterization* , 178, 111234 .

Chinatungsten Online. (2023). Eigenschaften und Anwendungen von Hartmetall . Abgerufen von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

<http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>, LQ, & Li, WP (2018). Fortschritte in der Hartmetall-Fertigungstechnologie. *Materials Review*, 32(10), 16531660.

Li, ZQ, & Wang, ZY (2021). Fortschritte in der Hartmetall-Recyclingtechnologie. *Seltene Metallmaterialien und -technik*, 50(8), 29712978. W., & Zhang, H. (2020). Untersuchung des Hochtemperaturoxidationsverhaltens von Hartmetallen. *Journal of Materials Science and Engineering*, 38(4), 512518. T., & Chen, M. (2019). Fortschritte in der Sinterkinetik von Hartmetallen. *Powder Metallurgy Technology*, 37(5), 321329.

Garcia, J., & Ciprés, VC (2018). Verschleißmechanismen von Hartmetallen bei Schneidanwendungen. *Verschleiß*, 408409, 126134.

Garcia, J., & Ciprés, VC (2018). Verschleißmechanismen von Hartmetallen bei Schneidanwendungen. *Verschleiß*, 408409, 126134.

Fang, ZZ, & Koopman, MC (2017). Fortschritte in der Hartmetallverarbeitung und -eigenschaften. *Annual Review of Materials Research*, 47, 381403.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Anhang:

Welche Hartmetallarten gibt es entsprechend der unterschiedlichen Wolframkarbidkörner ?

Hartmetall ist ein Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase. Seine Leistung und Anwendungsgebiete hängen eng mit der WC-Korngröße zusammen. Die Korngröße beeinflusst nicht nur Härte und Zähigkeit, sondern hat auch einen großen Einfluss auf die Verschleißfestigkeit, Schlagfestigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und Verarbeitungsgenauigkeit des Materials. Je nach WC-Korngröße kann Hartmetall in verschiedene Kategorien eingeteilt werden, von traditionellen Grobkörnern bis hin zu modernen Nanokörnern, um unterschiedlichen industriellen Anforderungen gerecht zu werden. Im Folgenden finden Sie eine umfassende Beschreibung der detaillierten Klassifizierung und ihrer Eigenschaften:

1. Grobkörniges Hartmetall

Korngröße: $>5 \mu\text{m}$ (üblicherweise $5\text{-}20 \mu\text{m}$, ISO 513).

Eigenschaften von grobkörnigem Hartmetall

Grobkörniges Hartmetall ist größer, die Anzahl der Korngrenzen ist geringer, die Bindungsphase (Co) ist gleichmäßig verteilt und der Anteil der Korngrenzfläche am Gesamtvolumen beträgt nur etwa 5–10 % (Journal of Materials Science 2025). Dadurch weist das Material eine bessere Schlagfestigkeit und Ermüdungsbeständigkeit auf.

Die Härte ist relativ gering und liegt zwischen 1200 und 1500 HV, die Biegefestigkeit (TRS) ist jedoch relativ hoch und erreicht 2200 bis 2500 MPa, und die Bruchzähigkeit (KIC) beträgt 15 bis 20 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Verschleißfestigkeit ist mit einer Verschleißrate von etwa $0,08\text{--}0,10\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ (ASTM G65-Test) relativ mäßig, aber es hält hohen Stoßbelastungen gut stand und eignet sich für Arbeitsumgebungen, die starken Stößen und Vibrationen ausgesetzt sind.

Es verfügt über eine gute Hochtemperaturstabilität mit einer Härteerhaltungsrate von etwa $85\text{--}90\%$ bei 800 °C und ist für Arbeitsbedingungen bei mittleren und hohen Temperaturen geeignet (ITIA 2024).

Mikrostruktur von grobkörnigem Hartmetall

Eine Rasterelektronenmikroskopieanalyse (REM) zeigt, dass die WC-Körner polygonal sind, die Dicke der Kobaltphase zwischen den Körnern etwa $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ beträgt und die Korngrenzenbindungsstärke relativ hoch ist, etwa $1,5\text{--}2\text{ J/m}^2$ (Journal of Materials Science 2025). Die größere Korngröße führt zu einem geringeren Widerstand gegen das Gleiten an den Korngrenzen, was dazu beiträgt, Aufprallenergie zu absorbieren und die Rissausbreitung zu verringern.

Anwendung von grobkörnigem Hartmetall

Grobkörniges Hartmetall wird hauptsächlich für Bergbauwerkzeuge, Bohrkronen, Tunnelbaugeräte und große Stanzwerkzeuge verwendet. Es eignet sich für hohe Stoßbelastungen, wie sie beispielsweise beim Bohren in Granit oder Basalt auftreten (ISO 513).

Beim Bohren im Bergbau kann die Lebensdauer des Bohrers $1500\text{--}2000$ Meter erreichen, insbesondere bei hartem Gestein, das eine hohe Bruchfestigkeit aufweist (ITIA 2024).

Es wird auch häufig in verschleißfesten Teilen schwerer Maschinen verwendet, beispielsweise in Baggerschaufelzähnen, die wiederholten Stößen und Verschleiß standhalten (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Herstellung von grobkörnigem Hartmetall

Es wird ein konventionelles Pulvermetallurgieverfahren verwendet. Der Rohstoff ist grobes WC-Pulver ($5\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$). Nach dem Mischen werden die Materialien in Form gepresst. Die Sintertemperatur beträgt üblicherweise $1400\text{--}1450\text{ °C}$ und die Haltezeit $1\text{--}2$ Stunden.

Die Kobaltphasenverteilung muss während des Sinterprozesses kontrolliert werden, um abnormales Kornwachstum zu vermeiden. Um das Kornwachstum zu hemmen, wird üblicherweise eine kleine Menge TaC ($0,5\text{--}1\%$) zugesetzt (ITIA 2024).

Die Abkühlrate wird auf $5\text{--}10\text{ °C/min}$ geregelt, um zu verhindern, dass übermäßige Korngrenzenspannungen Mikrorisse verursachen (Journal of Materials Science 2025).

2. Mesokristallines Hartmetall

Korngröße: $1\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ (ISO 513).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaften von mesokristallinem Hartmetall :

Mesogenes Hartmetall ist moderat und der Anteil der Korngrenzenfläche am Gesamtvolumen beträgt etwa 15–20 %, wodurch ein gutes Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit erreicht wird (Journal of Materials Science 2025).

Die Härte beträgt HV 1500–1800, die Biegefestigkeit 2000–2300 MPa und die Bruchzähigkeit 10–15 MPa·m^{1/2} (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Die Verschleißfestigkeit ist etwa 10–15 % höher als die von grobkörnigem Hartmetall und die Verschleißrate beträgt etwa 0,06–0,08 mm³/N·m (ASTM G65-Test).

Es ist sowohl schlagfest als auch hochtemperaturbeständig und weist bei 600 °C eine Härteerhaltungsrate von etwa 90–95 % auf, wodurch es für Verarbeitungsumgebungen mit mittlerer Belastung und mittlerer Temperatur geeignet ist (ITIA 2024).

Mikrostruktur des Mesokristalls Hartmetall:

die Dicke der Kobaltphase zwischen den Körnern etwa 0,5–1 µm beträgt und die Korngrenzenbindungsstärke 1,2–1,5 J/m² beträgt (Journal of Materials Science 2025). Durch die Erhöhung der Korngrenzenanzahl wird der Rissausbreitungsverlauf gewundener, was die Rissbeständigkeit des Materials verbessert. Gleichzeitig sorgt die moderate Korngröße für eine höhere Härte.

Anwendung von mesokristallinem Hartmetall :

Es wird häufig in Allzweck-Schneidwerkzeugen (wie Fräsern, Drehwerkzeugen), Stanzwerkzeugen, Walzen und verschleißfesten Teilen verwendet. Es eignet sich für die Bearbeitung von mittelhartem Kohlenstoffstahl, Gusseisen oder rostfreiem Stahl mit geringer Härte (ISO 513).

Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 150–200 m/min kann die Standzeit des Werkzeugs 1,5–2 Stunden erreichen, wobei insbesondere beim intermittierenden Schneiden eine gute Absplinterungsbeständigkeit zu beobachten ist (Journal of Materials Science 2025).

Es eignet sich außerdem für die Herstellung von Formen mittlerer Präzision, wie etwa Stanzformen für Autoteile, und hält mittleren Stößen und Verschleiß stand (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

aus mesokristallinem Hartmetall :

WC-Pulver mittlerer Größe (1–5 µm) verwendet und in einer Planetenkugelmühle gemischt (12–16 Stunden bei einer Geschwindigkeit von 300–400 U/min), um Gleichmäßigkeit zu gewährleisten .

Die Sintertemperatur wird auf 1350–1400 °C geregelt, die Haltezeit beträgt 1–1,5 Stunden und es werden Korninhibitoren (wie etwa 0,3 %–0,5 % Cr₃C₂) hinzugefügt, um das Kornwachstum zu kontrollieren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nach dem Sintern kann durch heißisostatisches Pressen (HIP, 100–120 MPa, 1350 °C) die Porosität weiter reduziert werden (<0,02 %, ISO 3326:2013).

3. Feinkörniges Hartmetall

Korngröße: 0,5–1 µm (ISO 513).

feinkörniges Hartmetall:

Feinkörniges Hartmetall ist klein und die Korngrenzenfläche macht etwa 25–30 % des Gesamtvolumens aus. Der Korngrenzeneffekt erhöht die Härte und Verschleißfestigkeit des Materials erheblich (Journal of Materials Science 2025).

Die Härte beträgt HV 1800–2000, die Biegefestigkeit 1800–2200 MPa und die Bruchzähigkeit 8–12 MPa·m^{1/2} (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Die Verschleißfestigkeit ist etwa 20–30 % höher als die von mesogenem Hartmetall und die Verschleißrate beträgt etwa 0,04–0,06 mm³/N·m (ASTM G65-Test).

Die Zähigkeit nimmt leicht ab, aber die Hochtemperaturleistung ist ausgezeichnet, mit einer Härteerhaltungsrate von etwa 88 %–92 % bei 800 °C, was für eine hochpräzise Verarbeitung geeignet ist (ITIA 2024).

Mikrostruktur von feinkörnigem Hartmetall:

mittels SEM und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zeigte, dass die WC-Körner nahezu kreisförmig oder leicht polygonal waren, die Dicke der Kobaltphase zwischen den Körnern etwa 0,2–0,5 µm betrug und die Bindungsstärke an den Korngrenzen 1,0–1,3 J/m² betrug (Journal of Materials Science 2025).

Feine Körner erhöhen den Widerstand gegen Korngrenzengleiten und verbessern die Verschleißfestigkeit des Materials, erhöhen jedoch auch die Möglichkeit der Rissbildung.

feinkörniges Hartmetall:

Geeignet für Präzisionsschneidwerkzeuge (wie Drehwerkzeuge, Fräser), Präzisionsformen und verschleißfeste Teile, Bearbeitung von Edelstahl, gehärtetem Stahl (HV 40-50 HRC) oder hochfesten Legierungen (ISO 513).

Beim Schneiden von Edelstahl (200 m/min) kann die Standzeit des Werkzeugs 2–3 Stunden erreichen, insbesondere beim kontinuierlichen Schneiden, wobei eine gute Oberflächengüte (Ra < 0,4 µm) erzielt wird (Journal of Materials Science, 2025).

Es wird auch zur Herstellung hochpräziser Stanz- und Drahtziehwerkzeuge verwendet, die die Toleranzanforderungen <0,01 mm erfüllen können (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

feinkörniges Hartmetall:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verwenden Sie feinkörniges WC-Pulver (0,5–1 μm), mahlen Sie es in einer Hochenergie-Kugelmühle (16–24 Stunden, Rotationsgeschwindigkeit 400–600 U/min) und fügen Sie Korninhibitoren hinzu (wie etwa Cr_3C_2 0,3–0,5 % oder VC 0,1–0,3 %).

Die Sintertemperatur wurde auf 1350–1380 °C geregelt und die Haltezeit betrug 1 Stunde, um Kornwachstum zu vermeiden.

Nach dem Sintern kann HIP (120–150 MPa, 1350 °C) verwendet werden, um Mikroporosität zu beseitigen und die Porosität beträgt <0,015 % (ISO 3326:2013).

4. Ultrafeinkörniges Hartmetall

Korngröße: 0,2–0,5 μm (ISO 513).

Eigenschaften von Hartmetall mit ultrafeinen Körnern:

Ultrafeinkörniges Hartmetall ist extrem klein und die Korngrenzenfläche macht etwa 35–40 % des Gesamtvolumens aus. Der Einfluss des Korngrenzeneffekts auf die Leistung ist signifikanter (Journal of Materials Science 2025).

Die Härte beträgt HV 1900–2200, die Biegefestigkeit 1700–2000 MPa und die Bruchzähigkeit 7–10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Die Verschleißfestigkeit ist etwa 15–20 % höher als die von feinkörnigem Hartmetall und die Verschleißrate beträgt etwa 0,03–0,05 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ (ASTM G65-Test).

Die Hochtemperaturleistung wird weiter verbessert, mit einer Härteerhaltungsrate von etwa 85–90 % bei 1000 °C, wodurch es für die Verarbeitung mit hoher Belastung und hohen Temperaturen geeignet ist (ITIA 2024).

Die Oberflächenbeschaffenheit ist ausgezeichnet und die Oberflächenrauheit des Werkstücks kann nach der Bearbeitung Ra 0,2–0,3 μm erreichen (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Ultrafeinkörnige Hartmetall-Mikrostruktur:

die Dicke der Kobaltphase zwischen den Körnern etwa 0,1–0,3 μm beträgt und die Korngrenzenbindungsstärke 0,8–1,2 J/m^2 beträgt (Journal of Materials Science 2025).

Durch die extrem große Zahl an Korngrenzen wird der Rissausbreitungsverlauf komplexer, was die Verschleißfestigkeit weiter erhöht, die verringerte Zähigkeit stellt jedoch eine größere Herausforderung hinsichtlich der Schlagfestigkeit dar.

Anwendungen für Hartmetall mit ultrafeinen Körnern:

Zur Ultrapräzisionsbearbeitung von Werkzeugen (z. B. Leiterplattenbohrer, Mikrofräser), Perforierwerkzeugen und beschichteten Substraten aus Titanlegierungen, Nickelbasis-Superlegierungen oder gehärteten Stählen (HV 50-60 HRC) (ISO 513).

Beim Schneiden von Titanlegierungen (150 m/min) kann die Standzeit des Werkzeugs 3–4 Stunden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erreichen, was insbesondere bei der hochpräzisen Bearbeitung eine hervorragende Dimensionsstabilität zeigt (Journal of Materials Science, 2025).

Es wird auch zur Herstellung hochpräziser Drahtziehwerkzeuge und Mikroformen verwendet, um die hohen Präzisionsanforderungen bei der Verarbeitung elektronischer Komponenten (Toleranz $<0,005$ mm) zu erfüllen (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

ultrafeinkörniges Hartmetall:

Verwenden Sie ultrafeines WC-Pulver ($0,2-0,5 \mu\text{m}$), mahlen Sie es in einer Hochenergie-Kugelmühle (24–36 Stunden, Rotationsgeschwindigkeit 500–800 U/min) und fügen Sie einen Korninhibitor hinzu (z. B. VC 0,1 %–0,3 %).

Die Sintertemperatur wird auf 1320–1350 °C geregelt und die Haltezeit beträgt 0,5–1 Stunde, um Kornwachstum zu vermeiden.

Zum Einsatz kommt das Heiisostatische Pressen (HIP, 150 MPa, 1350 °C) oder das Funkenplasmasintern (SPS, 1300 °C, 50 MPa), und die Korngre wird prise auf $0,2-0,5 \mu\text{m}$ kontrolliert (ITIA 2024).

5. Nano -Hartmetall

Korngre: $0,05-0,2 \mu\text{m}$ (ISO 513).

Eigenschaften von Hartmetall in Nanoqualitt:

Die WC-Körner von Nano-Hartmetall erreichen den Nanobereich, und die Korngrenzenfläche macht 45–50 % des Gesamtvolumens aus. Der Korngrenzeneffekt ist extrem stark, was die Härte und Verschleißfestigkeit deutlich verbessert (Journal of Materials Science 2025).

Die Härte beträgt HV 2000–2400, die Biegefestigkeit 1600–1900 MPa und die Bruchzähigkeit $6-9 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Die Verschleißfestigkeit ist etwa 10–15 % höher als die von ultrafeinkrnigem Hartmetall und die Verschleißrate beträgt etwa $0,02-0,04 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ (ASTM G65-Test).

Der Nanoeffekt verbessert die Hochtemperaturstabilität mit einer Hrteerhaltung von >90 % bei 1000 °C und HV 1800–2000 bei 1200 °C (ITIA 2024).

Die Oberflächengüte und Bearbeitungsgenauigkeit sind extrem hoch und die Oberflächenrauheit des Werkstücks kann Ra $0,1-0,2 \mu\text{m}$ erreichen (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals 2024).

Aufgrund der extrem kleinen Korngre, der schwachen Schlagzähigkeit und der geringen Bruchzähigkeit muss die Leistung durch eine Beschichtung (wie TiAlN) oder eine Gradientenstruktur verbessert werden (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nanoskalige Hartmetall-Mikrostruktur:

Eine TEM- und Rasterkraftmikroskopie-Analyse (AFM) zeigte, dass die WC-Körner annähernd kugelförmig waren, die Dicke der Kobaltphase zwischen den Körnern nur 0,05–0,1 µm betrug und die Korngrenzenbindungsstärke 0,7–1,0 J/m² betrug (Journal of Materials Science 2025).

Der Gleitwiderstand an den Korngrenzen ist extrem hoch, was die Verschleißfestigkeit deutlich verbessert, allerdings erhöht die Spannungskonzentration an den Korngrenzen auch das Risiko der Rissbildung.

Anwendungen von Hartmetall in Nanoqualität:

Geeignet für hochpräzises Schneiden (z. B. optische Formverarbeitung), Mikroformverarbeitung und Verarbeitung elektronischer Komponenten, Verarbeitung von Materialien mit hoher Härte (HV 60–70 HRC) oder Nichteisenmetallen (z. B. Aluminiumlegierungen) (ISO 513).

Bei der Mikrobohrbearbeitung (Schnittgeschwindigkeit 100 m/min) kann die Standzeit 4-5 Stunden erreichen, insbesondere bei der Bearbeitung hochpräziser Leiterplatten (PCBs) weist es eine extrem hohe Dimensionsstabilität auf (Journal of Materials Science 2025).

Es wird auch zur Herstellung ultradünner Drahtziehwerkzeuge und medizinischer Geräte (wie Skalpelle) verwendet und weist eine Verarbeitungsgenauigkeit im Mikrometerbereich auf (Toleranz <0,002 mm) (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Herstellung von Hartmetall im Nanomaßstab:

Verwenden Sie WC-Pulver im Nanomaßstab (0,05–0,1 µm), mahlen Sie es in einer Hochenergie-Kugelmühle (24–48 Stunden, Rotationsgeschwindigkeit 600–1000 U/min) und fügen Sie Korninhibitoren hinzu (wie etwa VC 0,1–0,3 % oder Cr₃C₂ 0,2–0,4 %).

Durch Niedertemperatursintern (1300–1350 °C) oder feldunterstützte Sintertechnologie (wie etwa Spark Plasma Sintering SPS, 1300 °C, 50–80 MPa) wird die Korngröße präzise auf 0,05–0,2 µm kontrolliert.

Verwenden Sie Dispergiermittel (wie Stearinsäure 0,1 %–0,3 %) und Ultraschall-Dispergiertechnologie, um die Pulveragglomeration zu reduzieren und die Gleichmäßigkeit um 10 %–15 % zu verbessern (ITIA 2024).

Nach dem Sintern kann eine PVD- TiAlN- Beschichtung (Dicke 2–3 µm) aufgetragen werden, um die Oxidationsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit zu verbessern (Journal of Materials Science 2025).

6. Weitere Überlegungen zur Klassifizierung

Verbundkornhartmetall:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korngröße: Kombinieren Sie unterschiedliche Korngrößen (z. B. 0,2 μm und 5 μm), um Gradienten- oder bimodale Strukturen zu bilden.

Eigenschaften von Hartmetall mit Verbundkorn:

Härte (HV 1800–2000) und Zähigkeit ($\text{KIC } 10\text{--}15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), die Verschleißfestigkeit wird um 10–20 % verbessert (Journal of Materials Science 2025).

Die Gradientenstruktur ist eine Kombination aus feinen Kristallen (0,2–0,5 μm) auf der Oberfläche und groben Kristallen (5–10 μm) auf der inneren Schicht, die eine starke Oberflächenverschleißfestigkeit und eine gute innere Schlagfestigkeit aufweist (ITIA 2024).

Es weist eine ausgezeichnete Hochtemperaturleistung mit einer Härteerhaltungsrate von etwa 85–90 % bei 1000 °C auf und ist daher für komplexe Arbeitsbedingungen geeignet (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Mikrostruktur aus Hartmetall mit zusammengesetzten Körnern:

Die SEM-Analyse zeigt, dass die Oberflächenkörner klein und die Korngrenzen dicht sind; die inneren Körner sind größer, die Dicke der Kobaltphase beträgt etwa 1–2 μm und die Gesamtstruktur ist deutlich geschichtet (Journal of Materials Science 2025).

Die Gradientenstruktur reduziert die Risswachstumsrate und verbessert die Bruchfestigkeit um etwa 15 % (ITIA 2024).

Anwendungen von Verbundkorn-Hartmetall:

Multifunktionswerkzeuge (z. B. Materialien für die Luft- und Raumfahrt) und komplexe Formen, Bearbeitung von Verbundwerkstoffen oder Hochtemperaturlegierungen (ISO 513).

Beim Schneiden von Kohlefaserverbundwerkstoffen (150 m/min) kann die Standzeit des Werkzeugs 3–4 Stunden erreichen (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Herstellung von Verbundkorn-Hartmetall:

Dabei kommt die Schichtpresstechnik zum Einsatz, wobei für die Oberflächenschicht ultrafeines WC-Pulver (0,2–0,5 μm) und für die Innenschicht grobes WC-Pulver (5–10 μm) verwendet wird. Die Sintertemperatur betrug 1400 °C, die Haltezeit 1 Stunde und die Dicke der Gradientenschicht wurde kontrolliert (0,5–1 mm) (ITIA 2024).

Dotiertes Kornhartmetall:

Korngröße: Die Korngröße wird durch Dotierung eingestellt, üblicherweise 0,5–2 μm .

Eigenschaften von dotiertem Hartmetall:

Durch Zugabe von TiC, TaC oder NbC (5–10 %), die Korngröße liegt bei 0,5–2 μm , die Oxidationsbeständigkeit ist erhöht (Oxidationsgewichtszunahme bei 1200 °C < 0,1 mg/cm²) und die Härte beträgt HV 1700–1900 (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Die Korrosionsbeständigkeit wird um etwa 10–15 % verbessert und die Korrosionsrate in einer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Salzsprühumgebung beträgt $<0,04$ mm/Jahr (ASTM G31).

Die Hochtemperaturfestigkeit wird verbessert, wobei die Biegefestigkeit bei 1000 °C etwa 80 – 85 % bleibt (ITIA 2024).

Mikrostruktur von dotiertem Hartmetall:

SEM- und Röntgenbeugungsanalysen (XRD) zeigten, dass Dotierungselemente (wie TiC) in Form von festen Lösungen oder Karbidpartikeln verteilt sind, wodurch das Wachstum von WC-Körnern gehemmt und die Korngrenzenfestigkeit um etwa 5 – 10 % erhöht wird (Journal of Materials Science 2025).

Dotierungselemente reduzieren die Verflüchtigung der Kobaltphase und erhöhen die Hochtemperaturstabilität (ITIA 2024).

Anwendung von dotiertem Hartmetall:

Hochtemperatur-Schneidwerkzeuge (z. B. Materialbearbeitung von Triebwerken in der Luft- und Raumfahrt) und korrosionsbeständige Komponenten wie Offshore-Ventile (ISO 513).

Beim Schneiden von Hochtemperaturlegierungen (250 m/min) kann die Standzeit des Werkzeugs 2 – 3 Stunden erreichen (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Herstellung von dotiertem Hartmetallkorn:

mit TiC oder TaC (5 – 10 %) dotierten Mischmaterialien werden in Form gepresst, die Sintertemperatur beträgt 1350 – 1400 °C und die Haltezeit $0,5$ – 1 Stunde.

Verwenden Sie beim Sintern eine Schutzatmosphäre (z. B. Argon -Gas), um eine Oxidation der Kobaltphase zu vermeiden (ITIA 2024).

7. Normen und Prüfungen

ISO 513:2012: Klassifizierung und Anwendungen von Hartmetallen bietet Leitlinien zur Klassifizierung für Schneid- und Nichtschneideanwendungen basierend auf Korngröße und Eigenschaften.

GB/T 20707-2006: Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall, Definition des Korngrößenbereichs und der Testmethode.

ASTM E112-13: Methode zur Messung der Korngröße. Dabei wird die Querschnittsmethode oder die lineare Achsenabschnittsmethode verwendet, um den durchschnittlichen Korndurchmesser mit einem Fehler von <5 % zu messen.

ISO 4499-2:2020: Bewertung der Mikrostruktur von Hartmetall, Untersuchung der Kornverteilung und der Dicke der Kobaltphase.

ASTM G65-00 (2010): Verschleißtest mit trockenem Sand-/Gummirad zur Bewertung der Verschleißfestigkeit von Hartmetallen mit unterschiedlichen Korngrößen.

Nachweismethode:

Rasterelektronenmikroskopie (SEM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) in Kombination mit Röntgenbeugung (XRD) können Korngröße und -verteilung mit einem Fehler von <5 % genau messen (Journal of Materials Science 2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mittels Elektronenrückstreuung (EBSD) werden die Korngrenzenausrichtung und Spannungsverteilung analysiert, und der Korngrenzenausrichtungsfehler wird auf $\pm 2^\circ$ begrenzt (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Der Laser-Partikelgrößenanalysator misst die Partikelgrößenverteilung des WC-Pulvers, um die Pulverqualität sicherzustellen (ITIA 2024).

8. Entwicklungstrends

Anwendungserweiterung von Nano-Hartmetall:

Im Jahr 2024 betrug Chinas Produktion von Nano-Hartmetall 15–20 % der Gesamtproduktion und dürfte im Jahr 2025 vor allem aufgrund der steigenden Nachfrage in den Bereichen Elektronik und Luft- und Raumfahrt 25–30 % erreichen (ITIA 2024).

Der Anteil von Hartmetall im Nanomaßstab im Bereich der Mikrobearbeitung (z. B. bei der Verarbeitung von 5G-Leiterplatten) ist um etwa 20 % gestiegen und die Verarbeitungsgenauigkeit hat $\pm 0,001$ mm erreicht („The Chinese Journal of Nonferrous Metals“ 2024).

Entwicklung von Verbundkörnern und Gradientenstrukturen:

Der Anwendungsanteil von Hartmetall mit Gradientenstruktur in der Luft- und Raumfahrt (z. B. in Werkzeugen zur Bearbeitung von Turbinenschaufeln) hat sich um etwa 10–15 % erhöht und die Lebensdauer um etwa 20–30 % verlängert (Journal of Materials Science 2025).

Durch die Optimierung der Kornverteilung werden die Verschleißfestigkeit und das Zähigkeitsgleichgewicht von Verbundkorn-Hartmetall um etwa 15 % verbessert, sodass es für die Mehrmaterialverarbeitung geeignet ist (ITIA 2024).

Förderung grüner Aufbereitungstechnologie:

Feldunterstützte Sinterstechnologie (wie SPS) erfreut sich zunehmender Beliebtheit. Sie verkürzt die Sinterzeit von 2 Stunden auf 10–20 Minuten, senkt den Energieverbrauch um etwa 20–30 % und reduziert die CO₂-Emissionen um etwa 25 % (ITIA 2024).

Mit der Weiterentwicklung der Recyclingstechnologie wird die Recyclingrate von Hartmetall in China im Jahr 2024 35–40 % erreichen und im Jahr 2025 voraussichtlich 45 % erreichen. Ein effizientes Recycling wird durch Zinkschmelzen und chemische Auslaugungsverfahren erreicht (ITIA 2024).

Intelligente Fertigung:

Zur Korngrößenkontrolle wird eine Online-Überwachungstechnologie (wie etwa eine Infrarotspektroskopie-Überwachung der Sinteratmosphäre) eingesetzt, und die Korngrößenabweichung wird von $\pm 0,1$ μm auf $\pm 0,05$ μm reduziert (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Künstliche Intelligenz (KI) optimiert Misch- und Sinterparameter, verbessert die Gleichmäßigkeit um etwa 10–15 % und reduziert die Fehlerrate um etwa 20 % (ITIA 2024).



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Anhang:

Arten, Mechanismen und Optimierung der Porosität/Porengröße in Hartmetall
Arten, Mechanismen und Optimierung der Porosität in Hartmetall

1. Überblick über Hartmetall und Porosität

Hartmetall ist ein Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase. Es wird pulvermetallurgisch hergestellt und zeichnet sich durch hohe Härte (HV 1000–1800), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit und entsprechende Zähigkeit ($K_{IC} \approx 8\text{--}20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Es wird häufig in Schneidwerkzeugen, Bergbaumeißeln und verschleißfesten Teilen verwendet. Porosität ist ein Hauptfehler von Hartmetall. Sie bezeichnet Löcher oder Luftspalte im Material, üblicherweise ausgedrückt als Volumenanteil (0,01–2 %). Porosität beeinflusst direkt die Dichte (Abweichung $\pm 0,2 \text{ g/cm}^3$), Festigkeit (reduziert um 10–30 %), Zähigkeit und Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust erhöht sich um 20–50 mm³, ASTM G65) von Hartmetall und ist ein zentraler Indikator der Qualitätskontrolle.

Porosität entsteht durch die Rohstoffe sowie die Form- und Sinterphasen des Pulvermetallurgieprozesses. Internationale Normen (wie ISO 4505 und ASTM B276) klassifizieren Porosität (z. B. A00–B08) und legen Prüfmethode (z. B. metallografische Analyse) fest. Die Optimierung der Porosität kann die Leistung von Hartmetall deutlich verbessern, die Werkzeugstandzeit (20–50 %) verlängern und die Zuverlässigkeit verbessern. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse der Porositätsarten, Entstehungsmechanismen, Optimierungsstrategien und technischen Verbesserungsaussichten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Arten der Porosität

Die Porosität von Hartmetall wird nach Größe, Morphologie und Ursprung in die folgenden Typen eingeteilt, basierend auf der Klassifizierung ISO 4505 und ASTM B276:

2.1 Poren vom Typ A (Mikroporen)

Eigenschaften: Durchmesser $< 10\mu\text{m}$, rund oder nahezu rund, gleichmäßig verteilt.

Gehalt: Volumenanteil 0,01–0,5 %, häufig in hochdichtem Hartmetall ($> 99,5$ % theoretische Dichte) zu finden.

Auswirkung: Geringe Auswirkung auf Festigkeit und Zähigkeit (Verringerung < 5 %), aber ein hoher Gehalt kann Mikrorisse verursachen.

Standard: ISO 4505 A00–A04 (A00 bedeutet keine Porosität, A04 bedeutet 0,2 % Porosität).

2.2 Poren vom Typ B (größere Poren)

Eigenschaften: 10–25 μm im Durchmesser, unregelmäßige Form, meist elliptisch oder polygonal.

Gehalt: Volumenanteil 0,1–1 %, häufig in Hartmetallen mittlerer und niedriger Dichte (98–99 % theoretische Dichte).

Auswirkungen: Reduzierte Festigkeit (10–20 %) und Zähigkeit (K_{1c} nimmt um 15 % ab), erhöhter Verschleiß (ASTM G65 nimmt um 20–30 mm^3 zu).

Standard: ISO 4505 B00–B08 (B08 ist 1 % Porosität).

2.3 C-Typ-Poren (Carbiddefektporen)

Eigenschaften: Durchmesser $> 25\mu\text{m}$, normalerweise durch Agglomeration oder Ablösung von Carbidpartikeln (WC, TiC) gebildet, mit unregelmäßiger Form.

Gehalt: Volumenanteil 0,05–0,5 %, meist in minderwertigem Hartmetall enthalten.

Auswirkungen: Deutliche Verringerung der Festigkeit (20–30 %) und Verschleißfestigkeit (30–50 mm^3 erhöhter Verschleiß) sowie erhöhte Bruchgefahr.

Standard: ASTM B276 C-Typ-Defekt, erfordert strenge Kontrolle.

2.4 Gasporien

Merkmale: 10–100 μm Durchmesser, rund oder kugelförmig, gebildet durch Gaseinschluss beim Sintern.

Gehalt: 0,01–0,2 Vol.-%, häufig in Materialien zu finden, die nicht ausreichend vakuumgesintert sind.

Wirkung: Reduzierte Dichte (0,1–0,3 g/cm^3) und Schlagzähigkeit (Schlagzähigkeit um 20 % reduziert).

Standard: ISO 4505 wird als Typ A/B klassifiziert, der durch metallografische Beobachtung unterschieden werden muss.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Mechanismus der Porositätsbildung

Die Entstehung von Porosität hängt eng mit den Rohstoffen, der Formgebung und dem Sintern im pulvermetallurgischen Prozess zusammen. Die wichtigsten Mechanismen sind:

3.1 Rohstoffmängel

Mechanismus: Partikelinhomogenität: WC- oder Co-Pulver hat eine breite Partikelgrößenverteilung (0,5–10 μm) und eine geringe Packungsdichte (<60 %), wodurch Poren vom Typ A/B entstehen.

Verunreinigung: Sauerstoff (O > 0,1 %), Schwefel (S > 0,02 %) oder organische Stoffe in den Rohstoffen verflüchtigen sich, geben beim Sintern Gas ab und bilden Poren.

Ungleichgewicht des Kohlenstoffgehalts: Unzureichender Kohlenstoff (C/W < 0,98) führt zur Ausfällung der η -Phase ($\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$), begleitet von Poren vom Typ C; übermäßiger Kohlenstoff (C/W > 1,02) bildet freien Kohlenstoff und vergrößert Poren vom Typ B.

Auswirkungen: Die Porosität nimmt um 0,2–0,5 % zu, die Dichte nimmt um 0,2 g/cm^3 ab, die Festigkeit nimmt um 10–15 % ab.

3.2 Formfehler

Mechanismus: Ungleichmäßiges Pressen: Unzureichender Pressdruck (<200 MPa) oder Fehler im Formdesign führen zu einer ungleichmäßigen Dichte des Grünkörpers (Abweichung $\pm 5\%$) und zur Bildung von Poren des Typs B.

Schmiermittelrückstände: Additive (wie z. B. Paraffin) verflüchtigen sich nicht vollständig und zersetzen sich beim Sintern in Gase, wobei sich Poren (Durchmesser 10–50 μm) bilden.

Auswirkungen: Die Porosität nimmt um 0,1–0,3 % zu, die Zähigkeit nimmt um 10 % ab und die Oberflächenqualität verschlechtert sich.

3.3 Sinterfehler

Mechanismus: Unzureichendes Flüssigphasensintern: Unzureichende Sintertemperatur (1350–1450 $^{\circ}\text{C}$) oder -zeit (1–2 Stunden), unzureichender Co-Flüssigphasenfluss und verbleibende Poren vom Typ A/B (0,1–0,5 %).

Gaseinfang: Wenn der Vakuumgrad niedrig ist (<10⁻² Pa) oder die Sinteratmosphäre Sauerstoff/Stickstoff enthält, wird das Gas von der Co-Flüssigphase eingekapselt und es bilden sich Poren.

WC-Agglomeration: Bei hohen Temperaturen wachsen WC-Partikel abnormal (> 5 μm) oder agglomerieren, wodurch Poren vom Typ C entstehen und die Festigkeit um 20 % abnimmt.

Auswirkungen: Die Porosität nimmt um 0,2–1 % zu, die Verschleißfestigkeit nimmt ab (das Verschleißvolumen nimmt um 20–40 mm^3 zu, ASTM G65).

4. Porositätsoptimierungsmethode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Optimierung der Porosität erfordert die gesamte Kette von Rohstoffen, Formgebung, Sintern und Nachbearbeitung. Im Folgenden sind die wichtigsten Methoden und Herstellerbeispiele aufgeführt:

4.1 Rohstoffoptimierung

Methode: Kontrollieren Sie die Partikelgröße: Verwenden Sie Nano-/Submikron-WC-Pulver (Partikelgröße 0,2–0,8 μm), erhöhen Sie die Packungsdichte ($> 65\%$) und reduzieren Sie die Poren vom Typ A/B um 0,1–0,2 %.

Hochreine Rohstoffe: Kontrollieren Sie den Sauerstoffgehalt ($< 0,05\%$), den Schwefelgehalt ($< 0,01\%$), reduzieren Sie die Porenbildung und verringern Sie die Porosität auf $< 0,1\%$.

Genaues Kohlenstoffverhältnis: C/W wird auf 0,98–1,02 geregelt, um die η -Phase oder freien Kohlenstoff zu vermeiden und Poren vom Typ C zu eliminieren.

Fall: Für die Zhuzhou-Diamantensorte YG6 wird Nano-WC-Pulver (0,4 μm) verwendet, die Porosität wird auf A02 (0,05 %) reduziert und die Festigkeit um 15 % erhöht.

4.2 Umformoptimierung

Methode: Hochdruckumformung: Durch Erhöhen des Pressdrucks (300–500 MPa) erreicht die Grünkörperdichte 70–75 % und die Porosität des B-Typs wird um 0,1–0,2 % reduziert.

Schmiermittel optimieren: Verwenden Sie schwerflüchtige Additive (wie Polyethylenglykol) und kontrollieren Sie die Zugabemenge ($< 1\%$), um die Porenbildung zu verringern.

Einheitliches Matrizendesign: Durch isostatisches Pressen (CIP, 200–300 MPa) beträgt die Abweichung der Grünkörperdichte $< 2\%$ und die Porosität wird auf $< 0,1\%$ reduziert.

Fall: Sandvik verwendet CIP-Technologie, um die Porosität des YG8-Grünkörpers auf A00 ($< 0,01\%$) zu reduzieren und die Zähigkeit um 20 % zu verbessern.

4.3 Sinteroptimierung

Methode: Vakuum-/Atmosphärensintern: Erhöhen Sie das Vakuumniveau ($< 10^{-3} \text{ Pa}$) oder verwenden Sie eine Wasserstoff-/Argonatmosphäre, um die Poren zu reduzieren (Porositätsreduzierung von 0,05–0,1 %).

Heißisostatisches Pressen (HIP): 150–200 MPa, 1300–1400 $^{\circ}\text{C}$ werden nach dem Sintern angewendet, um Poren vom Typ A/B zu beseitigen, die Porosität auf $< 0,02\%$ zu reduzieren und eine Dichte von 99,9 % des theoretischen Werts zu erreichen.

Präzise Temperaturkontrolle: Die Sintertemperatur wird auf $\pm 10^{\circ}\text{C}$ genau geregelt und die Zeit um 2–3 Stunden verlängert, um den Fluss der Co-Flüssigphase zu fördern und C-Typ-Poren zu reduzieren.

Fall: Kennametal K313-Einsätze haben HIP bestanden, Porosität auf A00 reduziert, Verschleißfestigkeit um 30 % erhöht (ASTM G65-Verschleiß $< 10 \text{ mm}^3$).

4.4 Nachbearbeitungsoptimierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Methode: Oberflächenschleifen/-polieren: Entfernen von Oberflächenporen (Tiefe < 0,1 mm), Verbessern der Oberflächenhärte (HV-Erhöhung um 5 %) und der Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust durch Salzsprühnebel < 0,1 mg/cm²).

Beschichtungstechnologie: PVD/CVD-Abscheidung von TiN, TiAlN (Dicke 2–5 µm) deckt Oberflächenporen ab, reduziert den Reibungskoeffizienten auf <0,3 und verlängert die Lebensdauer um das 2- bis 3-fache.

Fall: Ceratizit CTF-Werkzeuge sind mit TiAlN beschichtet, was die Auswirkungen der Oberflächenporosität um 50 % reduziert und die Lebensdauer der Schnitte um 40 % verlängert.

5. Aussichten für technologische Verbesserungen

Um die Porosität weiter zu reduzieren und die Leistung von Hartmetall zu verbessern, werden voraussichtlich die folgenden technologischen Verbesserungen in den Jahren 2026–2028 industrielle Anwendungen fördern:

Ultrafeines Nanopulver

Entwickeltes <0,2 µm WC/Co-Pulver mit einer Packungsdichte von 70 %, reduzierter Porosität auf <0,01 % und erhöhter Härte auf HV1800, geeignet für hochpräzise Werkzeuge.

KI-optimierter Prozess

⁻⁴ Pa) durch maschinelles Lernen wird die Genauigkeit der Porositätskontrolle um 50 % verbessert, wodurch Poren vom Typ C und Luftlöcher eliminiert werden.

Mikrowellensintern

Durch Mikrowellenerhitzung (1350–1450 °C) wurde die Sinterzeit verkürzt (<1 Stunde), die WC-Agglomeration verringert, die C-Typ-Porosität um 0,1 % gesenkt und die Produktionseffizienz um 30 % verbessert.

Schmiermittelfreies Formen

Entwickelte Trockenpresstechnologie zum Eliminieren von Schmiermittelporen und Reduzieren der Körperporosität auf <0,005 %, geeignet für hochwertige Schneidwerkzeuge.

3D-Druck von Vorformlingen

Zur Steuerung der Rohlingsstruktur wird die 3D-Metalldrucktechnologie eingesetzt, wobei die Dichteabweichung <1 % und die Porosität um 0,1 % reduziert werden, wodurch die Anforderungen für Teile mit komplexen Formen erfüllt werden.

Nanobeschichtung

Entwicklung einer <1 µm TiSiN-Beschichtung, die winzige Poren (<5 µm) abdeckt, den Reibungskoeffizienten auf <0,2 reduziert und die Werkzeuglebensdauer um das Vierfache verlängert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenmodifizierung per Laser

Durch das Laserschmelzen der Oberfläche (Tiefe 0,05 mm) werden Oberflächenporen beseitigt, die Härte um 10 % erhöht und die Korrosionsbeständigkeit um 30 % verbessert, sodass es für medizinische und Luftfahrtteile geeignet ist.

Plasmapolieren

Verbessern Sie die Oberflächenbeschaffenheit ($R_a < 0,01 \mu\text{m}$), verringern Sie die Auswirkungen der Oberflächenporosität und erhöhen Sie die Korrosionsbeständigkeit um 30 %, sodass es für Anwendungen mit hoher Zuverlässigkeit geeignet ist.

Diese Technologien erreichen durch die präzise Kontrolle der Mikrostruktur und der Prozessparameter eine Porosität auf A00-Niveau ($< 0,01 \%$) und ermöglichen so Leistungsdurchbrüche bei Hartmetall in hochpräzisen Schneid-, Bergbau- und verschleißfesten Teilen.

6. Vergleich der Porositätsarten und Optimierungsmaßnahmen

Die Tabelle vergleicht die Arten, Entstehungsmechanismen und Optimierungsmaßnahmen der Hartmetallporosität auf Grundlage der Normen ISO 4505 und ASTM B276.

Porosität	Merkmal μm	Porosität Rate%	Entstehungsmechanismus	Auswirkungen auf die Leistung	Optimierungsmaßnahme	Typische Anwendungseffekte
Poren vom Typ A	Durchmesser < 10 , rund	0,01–0,5	Die Partikel sind nicht dicht gepackt und das Flüssigphasensintern ist unzureichend	Festigkeitsminderung $< 5\%$, Gefahr von Mikrorissen	Nano-WC-Pulver ($0,2-0,8 \mu\text{m}$), HIP (150 MPa)	Zhuzhou-Diamant YG6, Porosität auf A02 reduziert, Festigkeit um 15 % erhöht
Poren vom Typ B	Durchmesser $10-25$, unregelmäßig	0,1–1	Ungleichmäßiges Anpressen, Schmiermittelrückstände	mm^3 Verschleißerhöhung	Hochdruck-CIP (300 MPa), Vakuumsintern ($< 10^{-3} \text{ Pa}$)	Sandvik YG8, Porosität auf A00 reduziert, Zähigkeit um 20 % erhöht
C-Typ-Poren	Durchmesser > 25 , WC-Agglomeration	0,05–0,5	Kohlenstoffungleichgewicht, abnormales Wachstum von WC	mm^3 Verschleißerhöhung	Genauere C/W ($0,98-1,02$), Temperaturregelung ($\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$)	Kennametal K313, Porosität auf A00 reduziert, Verschleißfestigkeit um 30 % erhöht
Poren	Durchmesser $10-100$, kugelförmig	0,01–0,2	Gaserfassung, verunreinigte Atmosphäre	Dichte um $0,1-0,3 \text{ g/cm}^3$ reduziert, Schlagzähigkeit um 20 % reduziert	Hochreine Rohstoffe ($O < 0,05\%$), Wasserstoffsinterung	Cerazit CTF, Porosität auf $< 0,01 \%$ reduziert, Lebensdauer um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

veranschaulichen:

Eigenschaften: Beschreibt die Größe, Form und Verteilung der Poren.

Porosität: Volumenanteilsbereich, basierend auf metallografischer Analyse (ISO 4505).

Auswirkungen auf die Leistung: Quantifizieren Sie die Auswirkungen auf Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit (ASTM G65).

Optimierungsmaßnahmen: Ursachengerechte Verbesserungsvorschläge bei Rohstoffen, Formgebung, Sintern und Nachbearbeitung.

Typische Anwendungseffekte: Listet Herstellerfälle und Daten zur Leistungsverbesserung auf.

7. Fazit

Porosität in Hartmetall ist ein wesentlicher Defekt, der die Leistung beeinträchtigt. Man unterscheidet Typ A (Mikroporen), Typ B (größere Poren), Typ C (Hartmetalldefektporen) und Poren, die durch Rohstoffdefekte, ungleichmäßige Formgebung bzw. unzureichende Sinterung entstehen. Porosität mindert Festigkeit (10–30 %), Zähigkeit und Verschleißfestigkeit (das Verschleißvolumen steigt um 20–50 mm³). Durch Optimierung der Rohstoffe (Nano-WC, hohe Reinheit), Formgebung (Hochdruck-CIP), Sintern (HIP, Vakuum) und Nachbehandlung (Beschichten) kann die Porosität auf <0,05 % gesenkt und die Leistung deutlich verbessert werden.

Zukünftige technologische Verbesserungen wie ultrafeine Nanopulver, KI-optimierte Prozesse, Mikrowellensintern und Nanobeschichtungen werden die Porosität auf <0,01 % reduzieren, die Härte auf HV1800 erhöhen und die Werkzeugstandzeit um das Vierfache verlängern. Diese Technologien werden den Einsatz von Hartmetall in hochpräzisen Schneid-, Bergbau- und verschleißfesten Teilen fördern. Hersteller müssen HIP und präziser Temperaturregelung den Vorzug geben, um Qualität auf A00-Niveau zu erreichen, und gleichzeitig 3D-Druck-Vorformen und schmiermittelfreies Formen erforschen, um komplexe Anforderungen zu erfüllen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

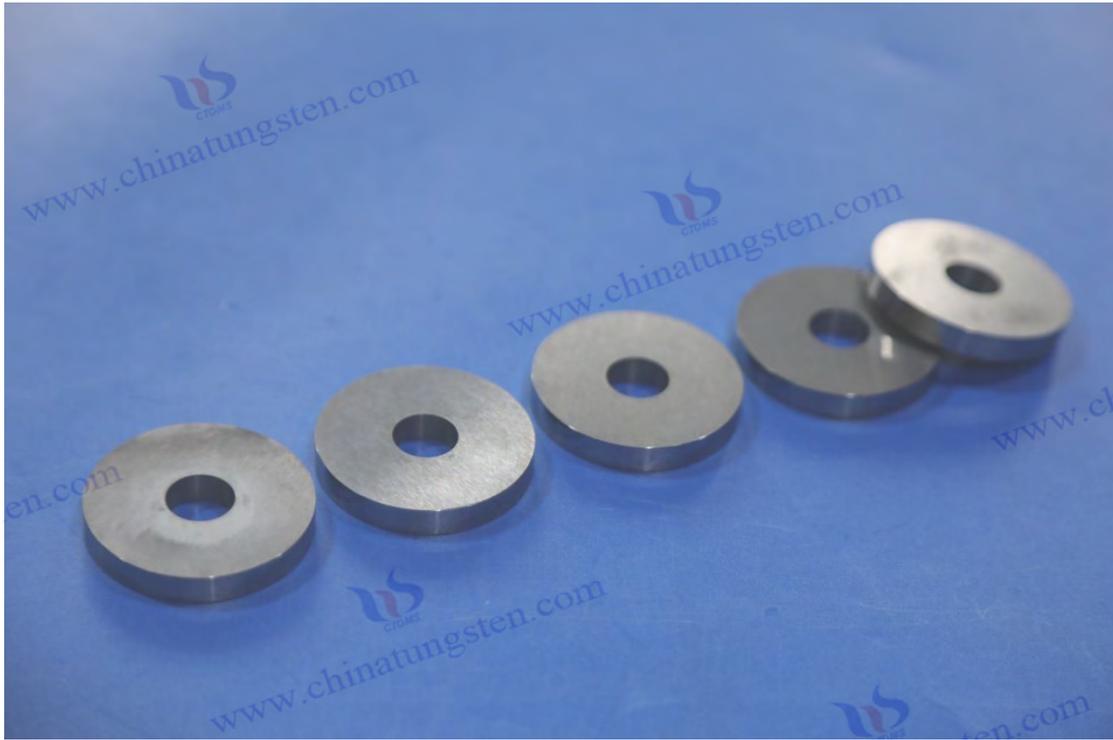
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Anhang:

GB/T 3488.1-2019

**Bewertung der Mikrostruktur von Hartmetall
Teil 1: Porosität und ungebundener Kohlenstoff**

1. Geltungsbereich

Diese Norm legt das mikroskopische Bewertungsverfahren für Porosität und ungebundenen Kohlenstoff in Hartmetall fest und ist anwendbar auf:

Hartmetall auf Wolframkarbidbasis (WC), das eine Bindephase aus Kobalt (Co), Nickel (Ni) oder Eisen (Fe) enthält, kann mit Titankarbid (TiC), Tantalkarbid (TaC) und Niobkarbid (NbC) versetzt werden.

Durch Pulvermetallurgieverfahren hergestelltes Hartmetall, einschließlich Sintern, heißisostatischem Pressen (HIP) und Beschichtungsprodukten.

Anwendungen wie Schneidwerkzeuge, Bergbaumeißel, Matrizen, Verschleißteile usw.

Es ist nicht für nicht auf WC basierendes Hartmetall oder nicht pulvermetallurgische Materialien geeignet.

2. Begriffsbestimmungen

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff mit WC als Haupthartphase und Co/Ni/Fe als Bindephase.

Porosität: Die Poren oder Luftlücken innerhalb eines Materials, ausgedrückt als Volumenanteil.

Ungebundener Kohlenstoff: freier Kohlenstoff (C) oder η -Phase, die durch Kohlenstoffmangel entsteht (W₃Co₃C, W₆Co₆C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Metallografische Auswertung: Beobachten Sie die polierte Oberfläche der Probe unter dem Mikroskop und ermitteln Sie die Verteilung und den Gehalt an Poren und ungebundenem Kohlenstoff.

3. Klassifizierung von Porosität und ungebundenem Kohlenstoff

3.1 Porosität

Poren vom Typ A:

Durchmesser $< 10\mu\text{m}$, rund oder nahezu rund, gleichmäßig verteilt.

Quelle: Die Partikel sind nicht dicht gepackt und das Flüssigphasensintern ist unzureichend.

Poren vom Typ B:

Der Durchmesser beträgt $10\text{--}25\mu\text{m}$ und die Form ist unregelmäßig (z. B. elliptisch, polygonal).

Ursache: ungleichmäßiges Anpressen und Verdunsten von Schmiermittelrückständen.

Stomata: $10\text{--}100\mu\text{m}$ im Durchmesser, rund oder kugelförmig.

Quelle: Gasaufnahme beim Sintern (Sauerstoff, Stickstoff oder flüchtige Stoffe).

3.2 Ungebundener Kohlenstoff und η -Phase

Defekte vom Typ C (ungebundener Kohlenstoff) :

Freie Kohlenstoffpartikel (C), Größe $> 25\mu\text{m}$, schwarz und unregelmäßig.

Quelle: Überschüssiger Kohlenstoff während des Sinterns ($C/W > 1,02$).

η -Phase: Carbid-Kobalt-Verbindung (W_3Co_3C oder W_6Co_6C), Größe $> 25\mu\text{m}$, grauweiß.

Quelle: Unzureichender Kohlenstoff beim Sintern ($C/W < 0,98$).

4. Bewertungsmethode

Porosität und ungebundener Kohlenstoff werden nach Volumenanteil bewertet und in drei Kategorien eingeteilt: A, B und C, jeweils von 00 (keine Defekte) bis 08 (höchster Defektgehalt). Die Porosität wird separat bewertet.

4.1 Poren vom Typ A

Volumenanteil: $0\text{--}0,2\%$, Durchmesser $< 10\mu\text{m}$.

Benotung:

A00: Keine sichtbaren Poren ($< 0,01\%$).

A02: $0,02\%$.

A04: $0,05\%$.

A06: $0,1\%$.

A08: $0,2\%$.

Bewertung: Porenfläche pro Quadratmillimeter.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2 Poren vom Typ B

Volumenanteil: 0–0,2 %, Durchmesser 10–25 μm .

Benotung:

B00: Keine sichtbaren Poren (<0,01 %).

B02: 0,02 %.

B04: 0,05 %.

B 06: 0,1 %.

B08: 0,2 %.

Bewertung: Porenfläche pro Quadratmillimeter.

4.3 C-Typ-Defekte (ungebundener Kohlenstoff/ η -Phase)

Volumenanteil: 0–0,2 %, Größe >25 μm .

Benotung:

C00: Kein ungebundener Kohlenstoff oder η -Phase (<0,01 %).

CO2: 0,02 %.

CO4: 0,05 %.

C06: 0,1 %.

C08: 0,2 %.

Beurteilung: Defektflächenverhältnis pro Quadratmillimeter, Unterscheidung zwischen freiem Kohlenstoff (schwarz) und η -Phase (grauweiß).

4.4 Poren

Volumenanteil: 0–0,2 %, Durchmesser 10–100 μm .

Benotung:

G00: Keine sichtbaren Poren (<0,01 %).

G02: 0,02 %.

G04: 0,05 %.

G06: 0,1 %.

G08: 0,2 %.

Bewertung: Prozentualer Anteil der Porenfläche pro Quadratmillimeter.

4.5 Klassifizierungsanforderungen

Volumenanteil: Der Poren-/Defektbereich wird mit einem metallografischen Mikroskop mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ % gezählt.

Beobachtungsbereich: mindestens 1 mm^2 , 5 mm^2 empfohlen.

Stomata: 10–100 μm große , kugelförmige Poren wurden einzeln erfasst.

5. Testmethoden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 Probenvorbereitung

Schneiden: Die Proben (Größe 10 × 10 mm) rissfrei zuschneiden.

Montage: Fixieren der Probe mit Harz.

Polieren:

Zum stufenweisen Schleifen wurde Diamantschleifpapier (Körnung 5–1 µm) verwendet.

Polieren auf eine Oberflächenrauheit $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ ohne Kratzer.

Vermeiden Sie eine Beschädigung der Poren durch übermäßiges Polieren.

Reinigung: Ethanol- oder Ultraschallreinigung zum Entfernen von Verunreinigungen.

5.2 Mikroskopische Beobachtung

Ausrüstung: Lichtmikroskop, Vergrößerung 100–1000x, Auflösung $< 0,5 \mu\text{m}$.

Lichtquelle: Hellfeldbeleuchtung, Kontrast anpassen zur Unterscheidung:

Porosität: Schwarz.

Ungebundener Kohlenstoff: schwarz.

η -Phase: grauweiß.

WC/Co-Matrix: weiß/grau.

Beobachtungsbereich: Mindestens 5 Sichtfelder (Gesamtfläche $> 1 \text{ mm}^2$) zufällig auswählen .

Aufzeichnen:

Poren vom Typ A: Zählen Sie die Porenfläche $< 10 \mu\text{m}$.

Poren vom Typ B: Zählen Sie die Porenfläche von 10–25 µm .

Defekte vom Typ C: Unterscheiden Sie zwischen freiem Kohlenstoff und der η -Phase, erfassen Sie Defektflächen $> 25 \mu\text{m}$.

Poren: Es wurde die Fläche der sphärischen Poren mit einer Größe von 10–100 µm erfasst.

5.3 Datenanalyse

Bildanalyse: Verwenden Sie eine Bildanalysesoftware, um das Poren-/Defektflächenverhältnis zu berechnen (Genauigkeit $\pm 0,01 \%$).

Manuelle Analyse: Zählen Sie zur Unterstützung der Beurteilung den Poren-/Defektbereich durch das Okulgitter des Mikroskops.

Benotung: Die Benotung erfolgt nach A00–A08, B00–B08, C00–C08, G00–G08.

5.4 Prüfbedingungen

Porositätsfehler: $< 0,01 \%$.

Fehler beim Typ-C-Defekt: $< 0,01 \%$.

Umgebung: Temperatur $20 \pm 5^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 60\%$, keine Vibration.

Bediener: Schulung in mikroskopischer Analyse erforderlich.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Abnahmevoraussetzungen

6.1 Schneidwerkzeuge

Anforderungen: A02/B00/C00/G00 (Porosität <0,02 %, keine Poren vom Typ B, Defekte und Poren vom Typ C).

6.2 Bergbau-Meißel

Anforderungen: A04/B04/C00/G04 (Porosität <0,1 %, keine C-Typ-Defekte, Spurenporen).

6.3 Schimmel

Anforderungen: A04/B04/C00/G04 (Porosität <0,1 %, keine C-Typ-Defekte, Spurenporen).

6.4 Verschleißteile

Anforderungen: A06/B06/C02/G06 (Porosität <0,2 %, spurenfreier Kohlenstoff und Poren).

7. Zusammenfassung der wichtigsten Punkte des Standards

Elemente	Inhalt μm	Einstufung	Benotung	Testmethode	Zulassungsvoraussetzungen
Porosität	Typ A (<10), Typ B (10–25), Stomata (10–10)	Typ A, Typ B, Poren	A00–A08 (0–0,2 %), B00–B08 (0–0,2 %), G00–G08 (0–0,2 %)	Metallografisches Mikroskop (100–1000-fach), Bildanalyse (Genauigkeit $\pm 0,01$ %)	Werkzeug: A02/B00/G00; Aufnahme/Form: A04/B04/G04
Ungebundener Kohlenstoff/ η -Phase	Typ C Freier Kohlenstoff oder η -Phase, >25	Typ C	C00–C08 (0–0,2 %)	Metallografische Betrachtung, Unterscheidung zwischen freiem Kohlenstoff / Schwarz und η -Phase / Grauweiß	Werkzeug/Piece/Matrize: C00; verschleißfeste Teile: C02
Prüfanforderungen	Polierte Probe ($R_a < 0,1$), Beobachtungsbereich >1 mm^2	A/B/C-Typ, Luftloch	Volumenanteil	Mikroskopauflösung <0,5 μm , Umgebung 20 ± 5 °C	Porosität/C-Typ-Defektfehler <0,01 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

ASTM B276-05 (2021) Prüfverfahren für die Porosität von Hartmetall

1. Geltungsbereich

Diese Norm legt das Prüfverfahren für Porosität und Mikrodefekte in Hartmetall fest und ist anwendbar auf:

Hartmetall auf Wolframkarbidbasis (WC), das eine Bindephase aus Kobalt (Co), Nickel (Ni) oder Eisen (Fe) enthält, kann mit Titankarbid (TiC), Tantalkarbid (TaC) und Niobkarbid (NbC) versetzt werden.

Durch Pulvermetallurgieverfahren hergestelltes Hartmetall, einschließlich Sintern, heißisostatischem Pressen (HIP) und Beschichtungsprodukten.

Anwendungen wie Schneidwerkzeuge, Bergbaumeißel, Matrizen, Verschleißteile usw.

Es ist nicht für nicht auf WC basierendes Hartmetall oder nicht pulvermetallurgische Materialien geeignet.

2. Begriffsbestimmungen

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff mit WC als Haupthartphase und Co/Ni/Fe als Bindephase.

Porosität: Die Löcher oder Luftlücken innerhalb eines Materials, ausgedrückt als Volumenanteil oder Anzahl der Poren pro Flächeneinheit.

Mikrodefekte: Poren, ungebundener Kohlenstoff oder η -Phase (W_3Co_3C , W_6Co_6C).

Metallografische Analyse: Beobachten Sie die polierte Oberfläche der Probe durch ein Mikroskop und zählen Sie die Verteilung und den Gehalt an Poren und Defekten.

Dichtemessung: Die Porosität wurde indirekt durch Messung der Dichte der Probe mithilfe der Archimedischen Methode geschätzt.

3. Klassifizierung von Porosität und mikroskopischen Defekten

3.1 Porosität

Poren vom Typ A:

Durchmesser $<10\mu\text{m}$, rund oder nahezu rund, gleichmäßig verteilt.

Quelle: Die Partikel sind nicht dicht gepackt und das Flüssigphasensintern ist unzureichend.

Poren vom Typ B:

Der Durchmesser beträgt $10\text{--}25\mu\text{m}$ und die Form ist unregelmäßig (z. B. elliptisch, polygonal).

Quelle: Ungleichmäßiges Pressen und Verdunsten von Schmiermittelrückständen.

Poren:

$10\text{--}100\mu\text{m}$ im Durchmesser, rund oder kugelförmig.

Quelle: Gasaufnahme beim Sintern (Sauerstoff, Stickstoff oder flüchtige Stoffe).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 Mikroskopische Defekte

Defekte vom Typ C (ungebundener Kohlenstoff/ η -Phase):

Ungebundener Kohlenstoff: Freie Kohlenstoffpartikel (C), Größe $> 25 \mu\text{m}$, schwarz und unregelmäßig geformt, entstehen durch überschüssigen Kohlenstoff ($C/W > 1,02$).

η -Phase: Carbid-Kobalt-Verbindung (W_3Co_3C oder W_6Co_6C), Größe $> 25 \mu\text{m}$, grauweiß, entstanden durch Kohlenstoffmangel ($C/W < 0,98$).

4. Bewertungsmethode

Porosität und mikroskopische Defekte werden nach Volumenanteil oder Anzahl der Poren/Flächeneinheit in drei Kategorien eingeteilt: A, B und C, wobei jede Kategorie von 1 (niedrigster Defektgehalt) bis 5 (höchster Defektgehalt) reicht.

4.1 Poren vom Typ A

Volumenanteil: 0–0,5 %, Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$.

Benotung:

A1: Volumenanteil $< 0,01$ % bzw. < 5 Poren/ mm^2 .

A2: Volumenanteil 0,01–0,05 % oder 5–10 Poren/ mm^2 .

A3: Volumenanteil 0,05–0,1 % oder 10–20 Poren/ mm^2 .

A4: Volumenanteil 0,1–0,3 % oder 20–50 Poren/ mm^2 .

A5: Volumenanteil 0,3–0,5 % oder > 50 Poren/ mm^2 .

Bewertung: Anzahl der Poren pro Quadratmillimeter ($< 10 \mu\text{m}$) bzw. Flächenanteil.

4.2 Poren vom Typ B

Volumenanteil: 0–1 %, Durchmesser 10–25 μm .

Benotung:

B1: Volumenanteil $< 0,01$ % bzw. < 2 Poren/ mm^2 .

B2: Volumenanteil 0,01–0,1 % oder 2–5 Poren/ mm^2 .

B3: Volumenanteil 0,1–0,3 % oder 5–10 Poren/ mm^2 .

B4: Volumenanteil 0,3–0,6 % oder 10–20 Poren/ mm^2 .

B5: Volumenanteil 0,6–1,0 % oder > 20 Poren/ mm^2 .

Bewertung: Anzahl der Poren pro Quadratmillimeter (10–25 μm) bzw. Flächenanteil.

4.3 C-Typ-Defekte (ungebundener Kohlenstoff/ η -Phase)

Volumenanteil: 0–0,5 %, Größe $> 25 \mu\text{m}$.

Benotung:

C1: Volumenanteil $< 0,01$ % oder keine sichtbaren Defekte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C2: Volumenanteil 0,01–0,05 % oder <1 Defekt/mm² .

C3: Volumenanteil 0,05–0,1 % oder 1–2 Defekte/mm² .

C4: Volumenanteil 0,1–0,3 % oder 2–5 Defekte/mm² .

C5: Volumenanteil 0,3–0,5 % oder >5 Defekte/mm² .

Beurteilung: Defektflächenverhältnis pro Quadratmillimeter, Unterscheidung zwischen freiem Kohlenstoff (schwarz) und η -Phase (grauweiß).

4.4 Klassifizierungsanforderungen

Volumenanteil: Der Poren-/Defektbereich wird mit einem metallografischen Mikroskop mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ % gezählt.

Beobachtungsbereich: mindestens 1 mm² , 5 mm² empfohlen.

Stomata: Kugelförmige Poren von 10–100 μm wurden einzeln erfasst und als Typ A/B klassifiziert.

5. Testmethoden

5.1 Metallographische Analyse

5.1.1 Probenvorbereitung

Schneiden: Die Proben (Größe 10 × 10 mm) rissfrei zuschneiden.

Montage: Fixieren der Probe mit Harz.

Polieren:

Zum stufenweisen Schleifen wurde Diamantschleifpapier (Körnung 5–1 μm) verwendet.

Polieren auf eine Oberflächenrauheit $R_a < 0,05 \mu\text{m}$, keine Kratzer.

Vermeiden Sie eine Beschädigung der Poren durch übermäßiges Polieren.

Reinigung: Ethanol- oder Ultraschallreinigung zum Entfernen von Verunreinigungen.

5.1.2 Mikroskopische Beobachtung

Ausrüstung: Optisches Mikroskop oder Rasterelektronenmikroskop (REM), Vergrößerung 200–1500x, Auflösung < 0,5 μm .

Lichtquelle: Hellfeldbeleuchtung, Kontrast anpassen zur Unterscheidung:

Porosität: Schwarz.

Ungebundener Kohlenstoff: schwarz.

η -Phase: grauweiß.

WC/Co-Matrix: weiß/grau.

Beobachtungsbereich: Mindestens 5 Sichtfelder (Gesamtfläche > 1 mm²) zufällig auswählen .

Aufzeichnen:

Poren vom Typ A: Zählen Sie die Anzahl oder Fläche der Poren <10 μm .

Poren vom Typ B: Zählen Sie die Anzahl oder Fläche der Poren mit einer Größe von 10–25 μm .

Defekte vom Typ C: Unterscheiden Sie zwischen freiem Kohlenstoff und der η -Phase, erfassen Sie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Defektflächen >25µm.

5.1.3 Datenanalyse

Manuelle Analyse: Zählen Sie die Anzahl der Poren/Defekte durch das Okulgitter des Mikroskops und berechnen Sie den Volumenanteil oder die Anzahl/Flächeneinheit.

Bildanalyse: Verwenden Sie eine Bildanalysesoftware, um das Poren-/Defektflächenverhältnis zu berechnen (Genauigkeit ± 0,01 %).

Benotung: Die Noten werden nach A1–A5, B1–B5 und C1–C5 ermittelt.

5.2 Dichtemessung

Prinzip: Mit der archimedischen Methode wird die Probendichte gemessen und mit der theoretischen Dichte (12–15,6 g/cm³ für WC- Co) verglichen , um die Porosität abzuschätzen.

Schritt:

Messen Sie das Trockengewicht der Probe (Genauigkeit ± 0,001 g) und das Gewicht in Wasser.

Dichte = Trockengewicht / (Trockengewicht – Gewicht in Wasser) × Flüssigkeitsdichte.

Porosität = (theoretische Dichte – gemessene Dichte) / theoretische Dichte × 100 %.

Anforderungen: Genauigkeit: ±0,01 g/cm³ , Messung 3 mal wiederholen und Durchschnittswert bilden.

5.3 Prüfbedingungen

Porositätsfehler: <0,02 %.

Fehler beim Typ-C-Defekt: <0,01 %.

Umgebung: Temperatur 23±2°C, Luftfeuchtigkeit <60%, keine Vibration.

Bediener: Eine Schulung in metallografischer Analyse oder Dichtemessung ist erforderlich.

6. Abnahmevoraussetzungen

6.1 Luftfahrt-Schneidwerkzeuge

Anforderungen: A1/B1/C1 (Porosität <0,01 % , keine nennenswerten Defekte).

6.2 Bergbau-Meißel

Anforderungen: A3/B3/C1 (Porosität <0,2 % , keine Defekte vom Typ C).

6.3 Verschleißteile

Anforderungen: A4/B4/C2 (Porosität <0,6 % , spurenfreier Kohlenstoff).

6.4 Militärische Teile

Anforderungen: A1/B1/C1 (Porosität <0,01 % , keine nennenswerten Defekte).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Zusammenfassung der wichtigsten Punkte des Standards

Elemente	Inhalt	Einstufung	Benotung	Testmethode	Zulassungsvoraussetzungen
Porosität	Typ A (<10 μm), Typ B (10–25 μm), Stomata (10–100 μm)	Typ A Typ B	A1–A5 (0–0,5 %), B1–B5 (0–1,0 %)	Metallografisches Mikroskop (200–1500x), Bildanalysegenauigkeit ±0,01 %; Dichtemessung ±0,01 g/cm ³	Luftfahrtwerkzeug: A1/B1; Spitzhacke: A3/B3
Mikroskopische Defekte	Typ C (ungebundener Kohlenstoff oder η-Phase, >25 μm)	Typ C	C1–C5 (0–0,5 %)	Metallografische Betrachtung, Unterscheidung zwischen freiem Kohlenstoff (schwarz) und η-Phase (grauweiß)	Luftfahrt/Militär: C1; Verschleißteile: C2
Prüfanforderungen	Polierte Probe (Ra<0,05μm), Beobachtungsbereich>1 mm ²	Typ A/B/C	Volumenanteil oder Anzahl der Poren pro Flächeneinheit	Mikroskopauflösung <0,5 μm, Umgebung 23 ± 2 °C	Porositätsfehler <0,02 %, C-Typ-Defektfehler <0,01 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Anhang:

ISO 4505:1978

Mikroskopische Bewertung der Porosität und des ungebundenen Kohlenstoffs in Hartmetall

1. Geltungsbereich

Diese Norm legt das mikroskopische Bewertungsverfahren für Porosität und ungebundenen Kohlenstoff in Hartmetall fest und ist anwendbar auf:

Hartmetall auf Wolframkarbidbasis (WC), das eine Bindephase aus Kobalt (Co), Nickel (Ni) oder Eisen (Fe) enthält, kann mit Titankarbid (TiC), Tantalkarbid (TaC) und Niobkarbid (NbC) versetzt werden.

Durch Pulvermetallurgieverfahren hergestelltes Hartmetall, einschließlich Sintern, heißisostatischem Pressen (HIP) und Beschichtungsprodukten.

Anwendungen wie Schneidwerkzeuge, Bergbaumeißel, Matrizen, Verschleißteile usw.

Es ist nicht für nicht auf WC basierendes Hartmetall oder nicht pulvermetallurgische Materialien geeignet.

2. Begriffsbestimmungen

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff mit WC als Haupthartphase und Co/Ni/Fe als Bindephase.

Porosität: Die Poren oder Luftlücken innerhalb eines Materials, ausgedrückt als Volumenanteil.

Ungebundener Kohlenstoff: freier Kohlenstoff (C) oder η -Phase, die durch Kohlenstoffmangel entsteht (W₃Co₃C, W₆Co₆C).

Metallografische Auswertung: Beobachten Sie die polierte Oberfläche der Probe unter dem Mikroskop und ermitteln Sie die Verteilung und den Gehalt an Poren und ungebundenem Kohlenstoff.

3. Klassifizierung von Porosität und ungebundenem Kohlenstoff

3.1 Porosität

Poren vom Typ A:

Durchmesser <10µm, rund oder nahezu rund, gleichmäßig verteilt.

Quelle: Die Partikel sind nicht dicht gepackt und das Flüssigphasensintern ist unzureichend.

Poren vom Typ B:

Der Durchmesser beträgt 10–25 µm und die Form ist unregelmäßig (z. B. elliptisch, polygonal).

Ursache: ungleichmäßiges Anpressen und Verdunsten von Schmiermittelrückständen.

Poren:

Durchmesser 10–100 µm, rund oder kugelförmig, klassifiziert als Typ A/B.

Quelle: Gasaufnahme beim Sintern (Sauerstoff, Stickstoff oder flüchtige Stoffe).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 Ungebundener Kohlenstoff und η -Phase

Defekte vom Typ C (ungebundener Kohlenstoff):

Freie Kohlenstoffpartikel (C), Größe > 25 μm , schwarz und unregelmäßig.

Quelle: Überschüssiger Kohlenstoff während des Sinterns ($C/W > 1,02$).

η -Phase:

Carbide – Kobaltverbindungen (W_3Co_3C oder W_6Co_6C), Größe > 25 μm , cremefarben.

Quelle: Unzureichender Kohlenstoff beim Sintern ($C/W < 0,98$).

4. Bewertungsmethode

Porosität und ungebundener Kohlenstoff werden nach Volumenanteil oder Porenanzahl bewertet und in drei Kategorien eingeteilt: A, B und C, wobei jede Kategorie von 00 (keine Defekte) bis 08 (höchster Defektgehalt) reicht.

4.1 Poren vom Typ A

Volumenanteil: 0–0,2 %, Durchmesser <10 μm .

Benotung:

A00: Keine sichtbaren Poren (<0,01 %).

A02: 0,02 %.

A04: 0,05 %.

A06: 0,1 %.

A08: 0,2 %.

Bewertung: Anzahl der Poren pro Quadratmillimeter (<10 μm) bzw. Flächenanteil.

4.2 Poren vom Typ B

Volumenanteil: 0–0,2 %, Durchmesser 10–25 μm .

Benotung:

B00: Keine sichtbaren Poren (<0,01 %).

B02: 0,02 %.

B04: 0,05 %.

B06: 0,1 %.

B08: 0,2 %.

Bewertung: Anzahl der Poren pro Quadratmillimeter (10–25 μm) bzw. Flächenanteil.

4.3 C-Typ-Defekte (ungebundener Kohlenstoff/ η -Phase)

Volumenanteil: 0–0,2 %, Größe >25 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Benotung:

C00: Kein ungebundener Kohlenstoff oder η -Phase ($<0,01$ %).

CO2: 0,02 %.

CO4: 0,05 %.

C06: 0,1 %.

C08: 0,2 %.

Beurteilung: Defektflächenverhältnis pro Quadratmillimeter, Unterscheidung zwischen freiem Kohlenstoff (schwarz) und η -Phase (grauweiß).

4.4 Bewertungsanforderungen

Volumenanteil: Der Poren-/Defektbereich wird mit einem metallografischen Mikroskop mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ % gezählt.

Beobachtungsbereich: mindestens 1 mm^2 , 5 mm^2 empfohlen.

Poren: Als Typ A/B gezählt, wurden sphärische Poren von $10\text{--}100 \mu\text{m}$ separat erfasst.

5. Testmethoden

5.1 Probenvorbereitung

Schneiden: Die Proben (Größe $10 \times 10 \text{ mm}$) rissfrei zuschneiden.

Montage: Fixieren der Probe mit Harz.

Polieren:

Zum stufenweisen Schleifen wurde Diamantschleifpapier (Körnung $5\text{--}1 \mu\text{m}$) verwendet.

Polieren auf eine Oberflächenrauheit $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ ohne Kratzer.

Vermeiden Sie eine Beschädigung der Poren durch übermäßiges Polieren.

Reinigung: Ethanol- oder Ultraschallreinigung zum Entfernen von Verunreinigungen.

5.2 Mikroskopische Beobachtung

Ausrüstung: Lichtmikroskop, Vergrößerung $100\text{--}1000\times$, Auflösung $< 0,5 \mu\text{m}$.

Lichtquelle: Hellfeldbeleuchtung, Kontrast anpassen zur Unterscheidung:

Porosität: Schwarz.

Ungebundener Kohlenstoff: schwarz.

η -Phase: grauweiß.

WC/Co-Matrix: weiß/grau.

Beobachtungsbereich: Mindestens 5 Sichtfelder (Gesamtfläche $> 1 \text{ mm}^2$) zufällig auswählen.

Aufzeichnen:

Poren vom Typ A: Zählen Sie die Anzahl oder Fläche der Poren $< 10 \mu\text{m}$.

Poren vom Typ B: Zählen Sie die Anzahl oder Fläche der Poren mit einer Größe von $10\text{--}25 \mu\text{m}$.

Defekte vom Typ C: Unterscheiden Sie zwischen freiem Kohlenstoff und der η -Phase, erfassen Sie Defektflächen $> 25 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Datenanalyse

Manuelle Analyse: Zählen Sie die Anzahl der Poren/Defekte durch das Okulargitter des Mikroskops und berechnen Sie den Volumenanteil.

Bildanalyse: Verwenden Sie eine Bildanalysesoftware, um das Poren-/Defektflächenverhältnis zu berechnen (Genauigkeit $\pm 0,01$ %).

Benotung: Die Benotung erfolgt nach A00–A08, B00–B08 und C00–C08.

5.4 Prüfbedingungen

Porositätsfehler: $<0,02$ %.

Fehler beim Typ-C-Defekt: $<0,01$ %.

Umgebung: Temperatur $20\pm 5^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit <60 %, keine Vibration.

Bediener: Schulung in mikroskopischer Analyse erforderlich.

6. Abnahmevoraussetzungen

6.1 Schneidwerkzeuge

Anforderungen: A02/B00/C00 (Porosität $<0,02$ %, keine Poren vom Typ B und Defekte vom Typ C).

6.2 Bergbau-Meißel

Anforderungen: A04/B04/C00 (Porosität $<0,1$ %, keine C-Typ-Defekte).

6.3 Verschleißteile

Anforderungen: A06/B06/C02 (Porosität $<0,2$ %, spurenfreier Kohlenstoff).

6.4 Medizinische Messer

Anforderungen: A00/B00/C00 (Porosität $<0,01$ %, keine Defekte).

7. Zusammenfassung der wichtigsten Punkte des Standards

Elemente	Inhalt (μm)	Einstufung	Benotung	Testmethode	Zulassungsvoraussetzungen
Porosität	Typ A (<10), Typ B (10–25), Stomata (10–100)	Typ A Typ B	A00–A08 (0–0,2 %), B00–B08 (0–0,2 %)	Metallografisches Mikroskop (100–1000-fach), Bildanalyse (Genauigkeit $\pm 0,01$ %)	Werkzeug: A02/B00; Pickel: A04/B04; Medizin: A00/B00
Ungebundener Kohlenstoff/ η -Phase	Typ C (freier Kohlenstoff oder η -Phase, >25)	Typ C	C00–C08 (0–0,2 %)	Metallografische Betrachtung, Unterscheidung zwischen freiem Kohlenstoff (schwarz) und η -Phase (grauweiß)	Werkzeug/Schneidzähne: C00; Verschleißteile: C02

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prüfanforderungen	Polierte Probe (Ra<0,1), Beobachtungsbereich>1 mm ²	Typ A/B/C	Volumenanteil oder Anzahl der Poren pro Flächeneinheit	Mikroskopauflösung <0,5 µm, Umgebung 20 ± 5 °C	Porositätsfehler <0,02 %, C- Typ-Defektfehler <0,01 %
-------------------	--	--------------	---	---	--

en.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Anhang:

Wirkung und Vergleich von Hartmetall - Hilfskarbiden (TiC , TaC , NbC)

1. Übersicht über Hartmetall und Hilfskarbide

Hartmetall ist ein Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase. Es wird pulvermetallurgisch hergestellt. Es weist eine hohe Härte (HV 1000–1800) und eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit auf. Es wird häufig für Schneidwerkzeuge, Bergbaumeißel und verschleißfeste Teile verwendet. Zur Leistungsoptimierung werden Hartmetalle häufig mit Hilfskarbiden wie Titankarbid (TiC), Tantalcarbid (TaC) und Niobkarbid (NbC) versetzt. Der Gehalt beträgt üblicherweise 5–20 % (Massenanteil). Diese Hilfskarbide erweitern den Anwendungsbereich von Hartmetall, indem sie Härte, Verschleißfestigkeit, Warmhärte und Oxidationsbeständigkeit verbessern.

Die Rolle der Hilfskarbide hängt von ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften (wie Härte, Schmelzpunkt, Kristallstruktur) und der synergistischen Wirkung mit WC und der Bindephase ab. TiC , TaC und NbC sind kubische Carbide mit hoher Härte (HV 2000–3000) und besserer thermischer Stabilität als WC (hexagonales System, HV 1500–2000) . Sie verbessern die Leistung von Hartmetall durch Mischkristallbildung oder Partikelverfestigung. Nachfolgend finden Sie eine detaillierte Analyse der Rolle der einzelnen Zusatzcarbide und einen tabellarischen Vergleich ihrer Eigenschaften.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Die Rolle der Hilfskarbide

2.1 Titancarbid (TiC)

Die Rolle der Hilfskarbide

Verbessern Sie die Härte

TiC hat eine höhere Härte (HV 2800–3200) als WC. Durch Zugabe von 5–15 % kann die Härte von Hartmetall auf HV 1400–1600 erhöht werden, wodurch es sich für die Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte (wie gehärtetem Stahl, HV 600–800) eignet.

Verbesserte Verschleißfestigkeit

TiC- Partikel (1–5 μm) sind klein und gleichmäßig, wodurch der Verschleiß reduziert (10–20 mm^3 im ASTM G65- Test) und die Lebensdauer des Werkzeugs verlängert wird.

Verbesserte antioxidative Eigenschaften

TiC bildet bei hohen Temperaturen ($>800^\circ\text{C}$) eine TiO_2 -Schutzschicht, die den Oxidationsverschleiß verzögert und für das Hochgeschwindigkeitsschneiden geeignet ist.

Reduzierte Dichte: Die Dichte von TiC ($4,9 \text{ g/cm}^3$) ist viel niedriger als die von WC ($15,6 \text{ g/cm}^3$), was das Gewicht von Hartmetall reduziert (um 10–15 %) und es für leichte Luft- und Raumfahrtkomponenten geeignet macht.

Einschränkungen von Hilfskarbiden

Verringerte Zähigkeit: Bei einem TiC- Zusatz von $>15\%$ sinkt die Bruchzähigkeit (K_{1c}) auf 8–10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, wodurch es anfällig für Sprödbrüche ist.

Höhere Kosten: Der TiC- Preis ist höher als der WC-Preis, was die Produktionskosten erhöht.

Anwendungen: TiC wird häufig in Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeugen (wie Kennametal K313), verschleißfesten Beschichtungen und Luft- und Raumfahrtkomponenten verwendet.

2.2 Tantalcarbid (TaC)

Die Rolle von Tantalcarbid (TaC)

Verbesserte Rothärte: TaC hat einen höheren Schmelzpunkt (3880°C) als WC (2870°C). Durch Zugabe von 3–10 % kann die Härte von Hartmetall bei 1000°C (HV 1200–1400) gehalten werden, wodurch es sich für die Hochtemperaturverarbeitung (z. B. von Edelstahl und Nickellegierungen) eignet.

Verbesserte Thermoschockbeständigkeit: TaC verringert den Wärmeausdehnungskoeffizienten ($6,3 \times 10^{-6} /\text{K}$ gegenüber WC $5,2 \times 10^{-6} /\text{K}$), verringert thermische Risse und eignet sich für intermittierendes Schneiden.

Verbesserte Antihafwirkung: TaC hat eine niedrige Oberflächenenergie, wodurch die Haftung der Werkstückmaterialien beim Schneiden verringert, der Reibungskoeffizient (0,2–0,3) gesenkt und die Oberflächenqualität verbessert wird.

Einschränkungen von Tantalcarbid (TaC)

Teuer: TaC ist viel teurer als WC und TiC, was seine Anwendung im großen Maßstab einschränkt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Begrenzter Härtezuwachs: Die Härte von TaC (HV1800–2000) ist niedriger als die von TiC und der Härtezuwachs ist gering (etwa 5–10 %).

Anwendung: TaC wird hauptsächlich in hochwertigen Schneidwerkzeugen (wie etwa PVD-beschichteten Einsätzen von Sandvik), bei der Bearbeitung von Turbinenschaufeln für die Luftfahrt und beim Warm Schmieden verwendet.

2.3 Niobcarbid (NbC)

Rolle von Niobcarbid (NbC)

Kornverfeinerung: NbC (Partikelgröße 0,5–2 μm) hemmt das WC-Kornwachstum (kontrolliert auf 1–3 μm), verbessert die Festigkeit von Hartmetall (Zugfestigkeit um 10–15 % erhöht) und die Zähigkeit (K_{1c} auf 12–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ erhöht).

Verbesserte Korrosionsbeständigkeit: NbC bildet in einer sauren Umgebung (pH 2–4) eine Nb₂O₅-Schutzschicht mit einem Salzsprühnebel-Gewichtsverlust von <0,1 mg/cm^2 und eignet sich daher für chemische Geräte und die Schiffstechnik.

Verbesserte abrasive Verschleißfestigkeit: NbC bildet mit WC eine feste Lösung, wodurch die Festigkeit der Phasengrenze erhöht und der Verschleißverlust um 15–25 mm^3 (ASTM G65) reduziert wird.

Einschränkungen von Niobcarbid (NbC)

Unzureichende Warmhärte: Obwohl NbC einen hohen Schmelzpunkt (3600 °C) hat, beschleunigt sich seine Oxidation bei >900 °C, was seine Hochtemperaturanwendungen einschränkt.

Knappe Ressourcen: Die Niob-Erzreserven sind begrenzt (weltweit etwa 4,3 Millionen Tonnen, 70 % in Brasilien) und die Preise schwanken.

Anwendung: NbC wird häufig in Bergbaupickeln, verschleißfesten Teilen und korrosionsbeständigen Formen (wie z. B. Zhuzhou Diamond YN8-Sorte) verwendet.

2.4 Synergie

Kombination hinzufügen

TiC, TaC und NbC werden häufig kombiniert (z. B. TiC 5 % + TaC 3 % + NbC 2 %), um Härte, Verschleißfestigkeit und Warmhärte synergetisch zu verbessern. Beispielsweise werden Sandvik GC2030-Wendeschneidplatten mit einem TiC-TaC-NbC- Verbundwerkstoff ergänzt, der eine Härte von HV1500 und eine Lebensdauererweiterung von 30 % aufweist.

Mischkristallverfestigung

TiC, TaC, NbC und WC bilden eine (W, Ti, Ta, Nb)-C-Feststofflösung, und die Gitterverzerrung erhöht die Härte und den Verformungswiderstand (die Streckgrenze steigt um 20 %).

Gradientenstruktur

Durch die Steuerung der Verteilung von TiC / TaC / NbC entsteht ein Gradientenhartmetall mit hoher Oberflächenhärte und hoher Zähigkeit in der Mitte, und die Schlagfestigkeit wird um 25 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verbessert.

3. Vergleich der Leistungsfähigkeit von Hilfskarbiden

Die folgende Tabelle vergleicht die Leistung und Anwendung von TiC, TaC und NbC in Hartmetall, basierend auf Standardtestdaten wie ASTM G65 und ISO 513:

Hilfskarbid	Härte HV	Schmelzpunkt (°C)	Dichte (g/cm³)	Zähigkeit (K _{1c}) (MPa·m ^{1/2})	Abriebfestigkeit (ASTM G65, mm³)	Rothärte (°C)	Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust durch Salzsprühnebel, mg/cm²)	Kosten (USD/kg)	Typische Anwendungen
TiC	2800–3200	3160	4.9	8–10	10–20	≤900	0,2–0,3	30–50	Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeuge, Luftfahrtteile
Tc	1800–2000	3880	14.3	10–12	15–25	≤1000	0,1–0,2	100–150	Hochtemperaturwerkzeuge, Warmgesenkschmieden
Nr.	2000–2400	3600	7.8	12–15	15–25	≤900	<0,1	50–80	Bergbaupickel, korrosionsbeständige Formen

veranschaulichen:

Leistungsparameter: Härte (Vickershärte HV), Zähigkeit (Bruchzähigkeit K_{1c}), Verschleißfestigkeit (ASTM G65 Verschleißverlust), Warmhärte (Härte bei hoher Temperatur, Haltetemperatur), Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust im Salzsprühnebeltest).

Typische Anwendungen: Basierend auf den Eigenschaften von TiC, TaC und NbC listen die wichtigsten industriellen Szenarien auf.

Datenquelle: Referenz Sandvik, Kennametal, Zhuzhou Diamond Technology White Paper, ASTM G65, ISO 513-Teststandards.

4. Vorteile, Nachteile und Auswahlprinzipien von Hilfskarbiden

4.1 Zusammenfassung der Vor- und Nachteile

TiC

Vorteile: Höchste Härte, niedrigste Dichte, geeignet für leichtes und schnelles Schneiden, gute Oxidationsbeständigkeit.

Nachteile: geringere Zähigkeit, höhere Kosten als WC und aufgrund der hohen Zugabemenge anfällig für Sprödbrüche.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tc

Vorteile: Hervorragende Warmhärte, hohe Beständigkeit gegen Thermoschock und Haftung, geeignet für hohe Temperaturen und intermittierendes Schneiden.

Nachteile: teuer, begrenzter Härtegewinn und die Anwendung ist durch die Kosten begrenzt.

Nr.

Vorteile: feine Körnung, optimale Korrosionsbeständigkeit, gute Zähigkeit und Beständigkeit gegen abrasiven Verschleiß.

Nachteile: unzureichende Warmhärte, knappe Niobvorkommen und große Preisschwankungen.

4.2 Auswahlprinzipien

Hochgeschwindigkeitsschneiden (z. B. Luftfahrt-Aluminiumlegierung, gehärteter Stahl)

TiC ist die erste Wahl zur Verbesserung der Härte und Oxidationsbeständigkeit. Typische Sorten sind K313 (10 %) TiC .

Hochtemperaturverarbeitung (z. B. Nickelbasislegierungen, Warm Schmieden)

Wählen Sie TaC für optimale Warmhärte und Thermoschockbeständigkeit. Typische Sorten sind GC2030 (TaC 5 %).

Bergbau oder korrosionsbeständige Umgebung (z. B. chemische Formen)

NbC wird bevorzugt, um die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu verbessern. Typische Güten sind YN8 (3 %) NbC .

Umfassende Leistung

Die Kombination TiC-TaC-NbC sorgt für ein Gleichgewicht zwischen Härte, Zähigkeit und Warmhärte und ist häufig in hochwertigen Werkzeugen und verschleißfesten Teilen zu finden.

Kostensensitive Szenarien

Kontrollieren Sie die Zusatzmenge von TaC und NbC (<5 %), konzentrieren Sie sich auf TiC und senken Sie die Kosten um 10–20 %.

5. Markt- und Zukunftstrends

Marktstatus

Im Jahr 2025 wird der Markt für Hartmetall einen Wert von etwa 18 Milliarden US-Dollar haben, wobei Hilfskarbide 20 bis 30 % der Rohstoffkosten ausmachen. TiC wird am häufigsten verwendet (60 %), während TaC und NbC aufgrund von Kosten- und Ressourcenbeschränkungen 15 % bzw. 10 % ausmachen .

Zukünftige Trends

Nanocarbide

Nanoskaliges TiC / NbC (<0,5 µm) erhöht die Härte auf HV1600–1800 und die Zähigkeit um 20 % und wird im Jahr 2027 voraussichtlich 15 % des Marktes ausmachen.

Grüne Fertigung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Recyceln Sie TiC / TaC / NbC (Recyclingrate > 80 %), senken Sie die Kosten um 15 % und reduzieren Sie den CO₂-Fußabdruck um 25 %.

Intelligentes Design

KI optimiert Hartmetallanteile (Fehler < 2 %) und verbessert die Werkzeugleistung um 30 %. Sandvik wird beispielsweise 2024 ein KI-gestütztes Werkzeugdesign einführen.

Neue Anwendungen

TiC / TaC / NbC in den Bereichen neue Energien (z. B. Verarbeitung von Rotorblättern für Windturbinen), Medizin (Zahnbohrer) und Tiefseebohrungen (korrosionsbeständige Komponenten) wächst jährlich um 10 %.

6. Fazit

TiC , TaC und NbC in Hartmetall haben das Anwendungsspektrum von Werkstoffen durch verbesserte Härte, Verschleißfestigkeit, Warmhärte, Oxidationsbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit deutlich erweitert. TiC eignet sich aufgrund seiner hohen Härte und geringen Dichte für die Hochgeschwindigkeitszerspanung, TaC aufgrund seiner hervorragenden Warmhärte und Thermoschockbeständigkeit für die Hochtemperaturverarbeitung und NbC ist aufgrund seiner feinen Körnung und Korrosionsbeständigkeit im Bergbau und in der chemischen Industrie überlegen. Kombinierte Zugabe und Mischkristallverfestigung optimieren die Leistung weiter, wobei jedoch ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Kosten und Leistung erforderlich ist. Nanokarbide , umweltfreundliche Fertigung und intelligentes Design werden zukünftig den Einsatz von Hilfskarbiden in hochpräzisen und nachhaltigen Industrien fördern. Bei der Auswahl von Hilfskarbiden sollten TiC , Um eine optimale Leistung zu erzielen, sollten TaC und NbC entsprechend den Verarbeitungsbedingungen, Umweltauforderungen und Kostenbeschränkungen sinnvoll aufeinander abgestimmt werden .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

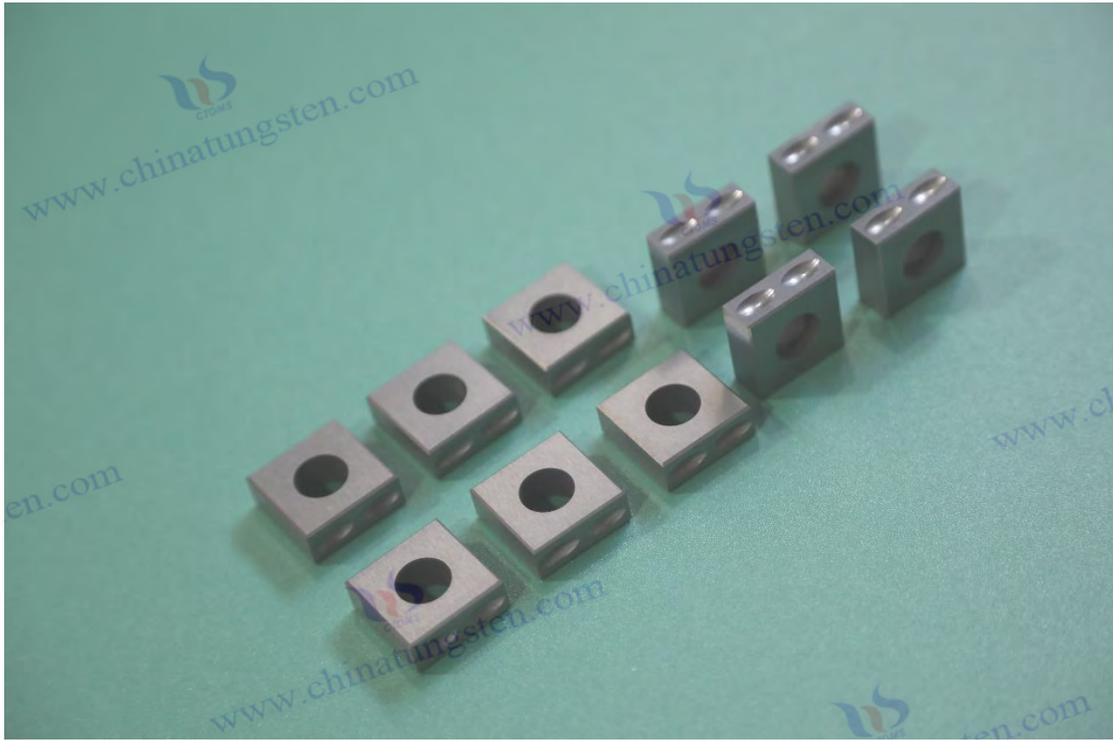
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Anhang:

Arten und Funktionen der Hartmetall-Bindephase

1. Übersicht

Dank seiner hohen Härte (1400–2200 HV), Verschleißfestigkeit und Biegefestigkeit (1,5–2,5 GPa) ist Hartmetall zum Eckpfeiler der meisten Schneidwerkzeuge, Formen und Bergbauwerkzeuge geworden. Seine Leistungsfähigkeit beruht auf der Synergie von Hartphase (z. B. WC) und Bindephase. Die Bindephase fungiert als „Binder“ und „Tuner“ und verbindet die Hartphasenpartikel, wodurch Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und verbesserte Verarbeitungseigenschaften gewährleistet werden. Seit der Erfindung des Hartmetalls 1923 in Deutschland hat sich die Bindephase von reinem Kobalt auf Nickel, Eisen, Kobalt-Nickel-Legierungen usw. erweitert. In den letzten Jahren haben Nano-Bindephasen, Mehrelementlegierungen (z. B. Co+Mo+ Ni) und Beschichtungsoptimierungen die Leistung deutlich verbessert. In diesem Artikel werden die Arten, Funktionen, Mikrostrukturen, Güteklassenvergleiche, Beschichtungswechselwirkungen, Optimierungsmaßnahmen und Anwendungen von Bindephasen in Verbindung mit Normen (z. B. GB/T 3849, ISO 4499) erörtert.

2. Art der Bindungsphase

2.1 Kobalt (Co)

Eigenschaften: mehr als 90 %, Gehalt 620 %, FCC-Struktur, Benetzungswinkel $<10^\circ$, Schmelzpunkt 1495°C .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaften: Härte 1300–1500 HV, KIC 812 MPa·m^{1/2}, Biegefestigkeit 22,5 GPa .

Anwendungen: Schneidwerkzeuge (YG6), Formen (YG15), Bergbau (YG8).

Vorteile und Nachteile: hohe Zähigkeit, Porosität <0,01 %, aber Korrosionsrate 0,01 mm/Jahr, hohe Kosten (3040 \$/kg).

2.2 Nickel (Ni)

Eigenschaften: Korrosionsbeständigkeit, Gehalt 515 %, Benetzungswinkel ~15°, Schmelzpunkt 1455°C.

Leistung: Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr, Härte ~1350 HV, KIC 1012 MPa·m^{1/2}.

Anwendungen: Nassschneidwerkzeuge, chemische Formen, Schiffswerkzeuge.

Vorteile und Nachteile: hohe Korrosionsbeständigkeit, niedrige Kosten (1520 US-Dollar/kg), etwas schwache Bindungsstärke.

2.3 Eisen (Fe)

Eigenschaften: niedrige Kosten, Gehalt 510 %, Benetzungswinkel ~20°, Schmelzpunkt 1538 °C, einfache Bildung der η-Phase.

Leistung: Härte ~1300 HV, Biegefestigkeit 1,82,2 GPa , Korrosionsrate 0,02 mm/Jahr.

Anwendung: Kostengünstige Bergbauwerkzeuge.

Vor- und Nachteile: 20 % geringere Kosten, 10 % geringere Leistung.

2.4 Kobalt-Nickel-Legierung (Co + Ni)

Eigenschaften: Kombiniert die Zähigkeit von Kobalt mit der Korrosionsbeständigkeit von Nickel, der Gehalt beträgt 615 % und das Verhältnis ist einstellbar.

Leistung: Härte 1350–1450 HV, Korrosionsrate 0,007 mm/Jahr, KIC 1012 MPa·m^{1/2}.

Anwendung: Luftfahrtwerkzeuge, chemische Formen.

Vorteile und Nachteile: Hervorragende Gesamtleistung, aber das Verhältnis muss optimiert werden.

2,5 Sonstige (Mo, Cu)

Eigenschaften: Mo ist hitzebeständig (2623 °C), Cu ist korrosionsbeständig (1085 °C) und der Gehalt beträgt <5 %.

Leistung: Härte 1200–1300 HV, Biegefestigkeit 1,52 GPa .

Anwendung: Hochtemperaturwerkzeuge (Mo), Teile mit geringer Belastung (Cu).

Fortschritt: Hitzebeständigkeit von Co+Mo+Ni um 20 % erhöht, Zähigkeit von Nanokobalt um 10 % erhöht.

3. Klebphaseneffekt

3.1 Bindungshartphase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mechanismus: Flüssigphasensintern, Benetzung von WC, Bindungsenergie $\sim 2 \text{ J/m}^2$.

Wirkung: Druckfestigkeit 46 GPa, Porosität $< 0,01 \%$, Energieeinsparung 10 %.

3.2 Verbesserung von Zähigkeit und Festigkeit

Mechanismus: Plastische Verformung, wodurch die Rissausbreitung verhindert wird.

Wirkung: Kobalt wurde von 6 % auf 15 % erhöht, KIC um 50 % und Biegefestigkeit um 25 %.

3.3 Härte einstellen

Mechanismus: Die Härte der Bindungsphase ist gering und ein hoher Gehalt verringert die Gesamthärte.

Wirkung: 6 % Co (1500 HV), 15 % Co (1300 HV).

3.4 Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit

Mechanismus: Nickel bildet eine Passivierungsschicht.

Wirkung: Korrosionsrate auf Nickelbasis $< 0,005 \text{ mm/Jahr}$, 50 % besser als Kobalt.

3.5 Verbessern Sie die Verarbeitungsleistung

Mechanismus: Die flüssige Phase fördert die Verdichtung.

Wirkung: Kobaltbasierte Dichte $> 99,9 \%$, Schrumpfrate 1520 %.

3.6 Wechselwirkung mit harten Phasen

Mechanismus: Kobalt-WC-Bindungsenergie $\sim 2 \text{ J/m}^2$, Cr₃C₂ hemmt das Kornwachstum.

Wirkung: Nanokobalt-Zähigkeit um 10 % erhöht.

4. Mikrostruktur der Bindungsphase

4.1 Kristallstruktur

Kobalt: FCC (hohe Duktilität) + teilweise HCP (hohe Härte), schnelles Abkühlen behält FCC bei und die Zähigkeit steigt um 10 %.

Nickel: stabilisiert FCC, ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit.

Eisen: BCC, schlechte Duktilität, leichte Bildung der η -Phase.

Die Kobaltphase ist netzförmig ($0,52 \mu\text{m}$) und die Nickelphase ist relativ dünn ($0,31,5 \mu\text{m}$).

4.2 Schnittstellenfunktionen

Kobalt-WC: Bindungsenergie $\sim 2 \text{ J/m}^2$, Biegefestigkeit um 15 % erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nickel WC: Bindungsenergie $\sim 1,5 \text{ J/m}^2$, Festigkeit um 510 % reduziert.
Eisen-WC: Leichte Bildung der η -Phase, Festigkeit um 1015 % reduziert.
Optimierung: Cr₃C₂ erhöht die Bindungsstärke um 10 %.

4.3 Verteilungseigenschaften

Gleichmäßige Verteilung: Rissbeständigkeit um 20 % erhöht.
Kobaltpool: Stärke um 1015 % reduziert.
SEM: YG6-Gleichmäßigkeit >95 %, YG15-Kobaltpool 510 %.
Optimierung: Kugelmahlen + Cr₃C₂, Gleichmäßigkeit um 15 % erhöht.

4.4 Mikroskopische Defekte

Porosität: Porosität > 0,1 %, Festigkeitsreduzierung um 20 %.
 η -Phase: Härte um 510 % reduziert.
Freier Kohlenstoff: Festigkeit um 10 % reduziert.
TEM: η -Phase nadelförmig (15 μm), freier Kohlenstoff clusterförmig (0,52 μm).
Optimierung: HIP-Stärke um 15 % erhöht.

5. Markenvergleich

Marke	Klebephase	Inhalt	Härte (HV)	Biegefestigkeit (GPa)	Zähigkeit (KIC)	Korrosionsrate (mm/Jahr)	Anwendung
YG6	Kobalt	6%	1500	2.0	8	0,01	Schneidwerkzeuge
YG8	Kobalt	8 %	1450	2.2	9	0,01	Bergbauwerkzeuge
YG15	Kobalt	15 %	1300	2.5	12	0,01	Stanzform
YN10	Nickel	10 %	1350	2.0	10	<0,005	Nassschneiden
YNC8	Co+Ni	8 %	1400	2.3	11	0,007	Luftfahrtwerkzeuge
YF10	Eisen + Kobalt	10 %	1300	1.9	8	0,02	Kostengünstige Werkzeuge

6. Wechselwirkung zwischen Bindephase und Beschichtung

6.1 Beschichtungsart

TiN : Härte 2000–2500 HV, verschleißfest.
CrN : Härte 1800–2200 HV, korrosionsbeständig.
Al₂O₃: Härte 2000 HV, Hitzebeständigkeit >1000°C.
Mehrschichtbeschichtung: TiN+Al₂O₃+TiCN, hervorragende Gesamtleistung.

6.2 Interaktionsmechanismus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schnittstellenbindung: Die Haftung auf Kobaltbasis + TiN erhöht sich um 20 %, und die Lebensdauer auf Nickelbasis + CrN erhöht sich um 50 %.

Anpassung der Wärmeausdehnung: Kobalt + TiN erhöht die Stabilität um 15 %.

Chemische Stabilität: Nickelbasiert + CrN- Korrosionsrate <0,003 mm/Jahr.

6.3 Wirkung

Verschleißfestigkeit: YG6+TiN erhöht die Lebensdauer um das Dreifache .

Korrosionsbeständigkeit: YN10+CrN verdoppelt die Lebensdauer .

Hitzebeständigkeit: YNC8+Al₂O₃-Schneidtemperatur >1000°C.

7. Optimierungsmaßnahmen

Auswahl der Bindephase: Kobalt (Zähigkeit), Nickel (Korrosionsbeständigkeit), Co+Ni (kombiniert).

Kontrollierter Inhalt: 6 % Kobalt (Messer), 15 % Kobalt (Formen).

Verbesserte Verteilung: Cr₃C₂-Zähigkeit +5 %.

Optimiertes Sintern: HIP-Festigkeit +15 %.

Beschichtung: CrN- Korrosionsbeständigkeit +2 -fach.

8. Anwendungsfälle

YG6-Werkzeug: Härte 1500 HV, Lebensdauer 2 Stunden (+ TiN 6 Stunden).

YG15-Form: Biegefestigkeit 2,5 GPa , Lebensdauer 120.000 Mal.

YN10-Form: Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr, Lebensdauer 1 Jahr (+ CrN 2 Jahre).

YNC8-Werkzeug: Härte 1400 HV, Lebensdauer 3 Stunden (+Al₂O₃ 4 Stunden).

9. Normen

GB/T 3849: Kobalt-Magnettest.

ISO 4499: Mikrostruktur.

ASTM B406: Biegefestigkeit.

ASTM G31: Korrosionsbeständigkeit.

ASTM C633: Beschichtungshaftung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Arten und Anwendungsauswahl von Bindemitteln im Hartmetall-Mischprozess

1. Übersicht

Beim Mischen von Hartmetall werden die Hartphase (WC), die Bindephase (Co) und die Additive durch Nassmahlen oder Trockenmischen vermischt. Durch Zugabe eines Bindemittels entsteht ein homogener Brei für die Sprühtrocknung, Granulierung und Pressung. Das Bindemittel verbessert die Partikelbindung (Grünfestigkeit > 5 MPa), verbessert die Fließfähigkeit (< 30 s/50 g), kontrolliert die Partikelmorphologie (D50 50200 μm) und zersetzt sich vor dem Sintern (Restkohlenstoff < 0,1 %). Gängige Bindemittel sind Polyethylenglykol (PEG), Polyvinylalkohol (PVA), Paraffin (PW) und Gummi (SBR/BR). Bei der Auswahl müssen die Breieigenschaften, der Prozess und die Anwendung berücksichtigt werden.

2. Arten und Eigenschaften von Klebstoffen

2.1 Polyethylenglykol (PEG)

Chemische Eigenschaften: $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$, Molekulargewicht 200–20.000, löslich in Wasser/Ethanol, Zersetzungstemperatur 250–400 °C, Restkohlenstoff < 0,05 %.

Physikalische Eigenschaften: Viskosität 100500 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, Grünfestigkeit 510 MPa, Fließfähigkeit < 25 s/50 g.

Vorteile: gute Löslichkeit, saubere Zersetzung, niedrige Kosten (1015 Yuan/kg).

Nachteile: Hygroskopisch, Schlammstabilität um 10 % reduziert.

Ablauf: 12% zugeben, 12 Stunden rühren, bei 300-400°C zersetzen.

2.2 Polyvinylalkohol (PVA)

Chemische Eigenschaften: $(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$, Molekulargewicht 20.000–200.000, wasserlöslich, Zersetzungstemperatur 200–350 °C, Restkohlenstoff < 0,1 %.

Physikalische Eigenschaften: Viskosität 200–1000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, Grünfestigkeit 812 MPa, Fließfähigkeit < 28 s/50 g.

Vorteile: Hohe Klebkraft, geeignet für komplexe Formen.

Nachteile: Die Ethanollöslichkeit ist schlecht und die Trocknungskosten steigen um 1015 %.

Ablauf: 0,5-1,5% zugeben, 23 Stunden rühren, bei 250-350°C zersetzen.

2.3 Paraffinwachs (PW)

Chemische Eigenschaften: Kohlenwasserstoffe, Molekulargewicht 300–1000, Schmelzpunkt 50–70 °C, Zersetzungstemperatur 200–500 °C, Restkohlenstoff 0,1–0,2 %.

Physikalische Eigenschaften: Viskosität 1050 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, Grünfestigkeit 48 MPa, Fließfähigkeit < 30 s/50 g.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vorteile: niedrige Kosten (510 Yuan/kg), gute Schmierfähigkeit.

Nachteile: viele Kohlenstoffrückstände, organische Lösungsmittel erforderlich.

Verfahren: Zugabemenge 23 %, Erhitzung 6080 °C, Zersetzung 400500 °C.

2.4 Gummi (SBR/BR)

Chemische Eigenschaften: Molekulargewicht 50.000–500.000, Zersetzungstemperatur 300–600 °C, Restkohlenstoff 0,2–0,3 %.

Physikalische Eigenschaften: Viskosität 500–2000 mPa·s, Grünfestigkeit 610 MPa, Fließfähigkeit <30 s/50 g.

Vorteile: Hohe Elastizität, Rissbeständigkeit um 15 % erhöht.

Nachteile: viel Restkohlenstoff und hohe Kosten (2030 Yuan/kg).

Verfahren: Zugabemenge 12 %, Erhitzung 5070°C, Zersetzung 400600°C.

2.5 Sonstiges

PMMA: Zersetzungstemperatur 300–450 °C, Restkohlenstoff <0,1 %, geeignet für hochpräzise Werkzeuge.

CMC: Zersetzungstemperatur 250–350 °C, Restkohlenstoff <0,05 %, geeignet für Forschung und Entwicklung.

Fortschritt: Nanobinder auf Wasserbasis, Kohlenstoffrückstand <0,03 %, Fließfähigkeit um 15 % erhöht.

3. Anwendungsauswahl

3.1 Auswahlgrundlage

Aufschlammung: Feststoffgehalt 60–80 %, Ethanol ist PEG/PW, Wasser ist PVA/CMC.

Verfahren: PVA für Nasspressen, PW für Trockenpressen.

Anwendung: Wählen Sie PEG/PVA für Schneidwerkzeuge, SBR für Formen und PW für niedrige Kosten.

Kosten: PW (510 Yuan/kg), PEG (1015 Yuan/kg).

3.2 Anwendbare Szenarien

PEG: YG6/YG8-Tool, D50 80150 μm, Fließfähigkeit <25 s/50 g.

PVA: Ultrafeinkörniges Werkzeug, Grünfestigkeit 812 MPa.

PW: YG8-Bergbauwerkzeuge, Kosten um 20 % reduziert.

SBR: YG15-Form, Rissbeständigkeit um 15 % erhöht.

PMMA/CMC: Forschung und Entwicklung von Luftfahrtwerkzeugen, D50 5080 μm.

3.3 Auswahlverfahren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bestimmen Sie die Anwendungs- und Schlammeigenschaften.
Passender Kleber.
Überprüfen Sie Fließfähigkeit, Grünfestigkeit und Kohlenstoffrückstände.
Optimieren Sie den Prozess.

4. Einflussfaktoren

Inhalt: 12 % (PEG/PVA), 23 % (PW/SBR).
Schlamm: Feststoffgehalt 70 %, Viskosität 200 mPa·s.
Mischen: 12 Stunden lang bei 500–1000 U/min rühren.
Sintern: Vakuum, 350–400 °C, Kohlenstoffrückstand <0,1 %.
Umgebung: Luftfeuchtigkeit <40 %, Temperatur 2030 °C.

5. Optimierungsmaßnahmen

Bindemittel auswählen: PEG/PVA (Messer), SBR (Form).
Kontrollierter Inhalt: Grünfestigkeit 512 MPa.
Optimierte Aufschlämmung: Feststoffgehalt 70–75 %.
Verbesserte Mischung: Planetenkugelmahlen, 15 % mehr Gleichmäßigkeit.
Optimiertes Sintern: HIP, Porosität <0,01 %.

6. Anwendungsfälle

YG6-Werkzeug: 1,5 % PEG, Fließfähigkeit 23 s/50 g, Härte 1500 HV.
Ultrafeinkörniges Werkzeug: 1 % PVA, Grünfestigkeit 10 MPa, Härte 2000 HV.
YG8-Bergbauwerkzeuge: 2,5 % PW, Biegefestigkeit 2,2 GPa.
YG15-Schimmel: 1,5 % SBR, Lebensdauer 120.000 Mal.

7. Fazit

Zu den in Hartmetallmischungen verwendeten Bindemitteln gehören Polyethylenglykol (PEG), Polyvinylalkohol (PVA), Paraffinwachs (PW), Gummi (SBR/BR) und weitere (wie PMMA, CMC). PEG hat eine gute Fließfähigkeit (<25 s/50 g) und ist für Allzweckwerkzeuge geeignet; PVA hat eine hohe Grünfestigkeit (812 MPa) und ist für ultrafeinkörnige Werkzeuge geeignet; PW ist kostengünstig und eignet sich für Bergbauwerkzeuge; SBR hat eine hohe Rissbeständigkeit und ist für große Formen geeignet. Bei der Auswahl müssen die Schlammeigenschaften (Feststoffgehalt 60–80 %), die Prozessanforderungen, die Anwendungsszenarien und die Kosten berücksichtigt werden. Optimierungsmaßnahmen können die Fließfähigkeit um 20 %, die Grünfestigkeit um 20 %, die Härte um 5 % erhöhen und die Kosten um 20 % senken. Wasserbasierte Nanobindemittel und Dualbindemittel werden künftig die Leistung und den Umweltschutz verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vergleichstabelle der Eigenschaften und Leistung von Hartmetallbindemitteln

Bindemittel	Chemische Eigenschaften	abbaun Temperatur °C	Kohlenstoffrückstände %	Grünstärke MPa	fließen Sex s/50 g	kosten Yuan/kg	Vorteil	Mangel	Hauptanwendungen
PFLOCK	HO(CH ₂ CH ₂ OH) _n , Molekulargewicht 20020.000, wasser-/ethanollöslich	250400	<0,05	510	<25	1015	Gute Fließfähigkeit, saubere Zersetzung, niedrige Kosten	Feuchtigkeitsaufnahme, hochmolekulare Kohlenstoffrückstände	Allgemeine Werkzeuge (YG6, YG8), Formen (YG15)
PVA	(C ₂ H ₄ O) _n , Molekulargewicht 20.000–200.000, wasserlöslich	200350	<0,1	812	<28	1520	Hohe Klebkraft, geeignet für komplexe Formen	Schlechte Löslichkeit in Ethanol und hohe Trocknungskosten	Ultrafeinkörnige Schneidwerkzeuge, komplexe Formen
PW	Kohlenwasserstoffe, Molekulargewicht 300–1000, löslich in organischen Lösungsmitteln	200500	0.10.2	48	<30	510	Niedrige Kosten, gute Schmierfähigkeit	Viel Restkohlenstoff, benötigt organisches Lösungsmittel	Bergbauwerkzeuge (YG8), kostengünstige Formen
SBR/BR	Molekulargewicht 50.000–500.000, löslich in organischen Lösungsmitteln	300600	0,20,3	610	<30	2030	Hohe Elastizität und starke Rissbeständigkeit	Viele Kohlenstoffrückstände, hohe Kosten	Große Formen (YG15), Bergbauwerkzeuge
PMMA	Molekulargewicht 50.000–100.000, löslich in organischen Lösungsmitteln	300450	<0,1	812	<28	~50	Hohe Präzision, geringer Kohlenstoffrückstand	Hohe Kosten, schlechte Löslichkeit	Hochpräzise Werkzeugentwicklung
CMC	Cellulosederivate, wasserlöslich	250350	<0,05	46	<25	2025	Gute Wasserlöslichkeit, geringer Kohlenstoffrückstand	Grünintensität niedrig	Laborforschung und -entwicklung, Luftfahrtwerkzeuge

Zersetzungstemperatur: beeinflusst den Sinterprozess, <400 °C ist besser für das Vakuumsintern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

geeignet.

Kohlenstoffrückstand: <0,1 %. Sinterporosität sicherstellen <0,1 %.

Grünfestigkeit: >5 MPa erfüllt die Pressanforderungen, 812 MPa ist für komplexe Formen geeignet.

Fließfähigkeit: <30 s/50 g, entsprechend den Anforderungen der Sprühtrocknung (GB/T 1482).

Kosten: PW ist am günstigsten, PMMA am teuersten.

Anwendungsauswahl: PEG/PVA für hohe Leistung, PW für niedrige Kosten, SBR für große Knüppel.

8. Normen

GB/T 3849: Kobalt-Magnetttest. ISO 4499: Mikrostruktur.

GB/T 1482: Fließfähigkeit. ISO 3326:2013: Porosität.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Anhang:

Konzept, Ursache und Verbesserung der Entkohlung und Aufkohlung von Hartmetall

1. Übersicht

Hartmetall ist ein Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Hartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase. Seine Leistung hängt stark von der genauen Kontrolle des Kohlenstoffgehalts ab. Der theoretische Kohlenstoffgehalt von WC liegt bei 6,13 Gew.-% und muss in der tatsächlichen Produktion im Bereich von 6,08–6,18 Gew.-% kontrolliert werden (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024). Abweichungen im Kohlenstoffgehalt können zu Entkohlung oder Aufkohlungsfehlern führen, die die Mikrostruktur und die Eigenschaften des Materials erheblich beeinträchtigen. Unter Entkohlung versteht man einen unzureichenden Kohlenstoffgehalt, der dazu führt, dass WC sich zersetzt oder eine spröde η -Phase ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ oder $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$) bildet, wodurch Härte und Festigkeit verringert werden; Unter Aufkohlung versteht man einen zu hohen Kohlenstoffgehalt, der freien Kohlenstoff (Graphitphase) ausscheidet, was die Verschleißfestigkeit und die Beschichtungshaftung beeinträchtigt. Dieser Artikel kombiniert chinesische nationale Standards (GB/T 3849), internationale Standards (ISO 4499) und Branchendaten, um die Konzepte, Ursachen, Auswirkungen und Verbesserungsmaßnahmen der Entkohlung und Aufkohlung im Detail zu analysieren.

2. Das Konzept der Entkohlung und Aufkohlung

2.1 Dekarbonisierung

Dekarbonisierung – Definition

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Kohlenstoffgehalt im Hartmetall ist niedriger als das stöchiometrische Verhältnis von WC (6,13 Gew.-%), was zur Zersetzung von WC in W_2C oder zur Bildung der η -Phase (Co_3W_3C , Co_6W_6C) führt.

Mikrostruktur

Die η -Phase ist nadelförmig oder körnig, hat eine Größe von 5–25 μm , eine Härte von etwa HV 1800–2000 und eine Bruchzähigkeit (KIC) von 4–6 $MPa \cdot m^{1/2}$, die deutlich unter den 8–15 $MPa \cdot m^{1/2}$ von Hartmetall insgesamt liegt (Journal of Materials Science 2025). Die Sprödigkeit der η -Phase führt zur Rissausbreitung und verringert die Zuverlässigkeit des Materials.

Auswirkungen der Dekarbonisierung

Die Härte nimmt um 5–10 % ab (z. B. von HV 1800 auf HV 1620–1710, ITIA 2024).

Die Biegefestigkeit (TRS) nimmt um 10–15 % ab (von 2200 MPa auf 1870–1980 MPa, ASTM B406-Test).

Die Korrosionsbeständigkeit nimmt ab und die Korrosionsrate steigt um 15–20 % (die Korrosionsrate in einer Salzsprühumgebung steigt von 0,05 mm/Jahr auf 0,06–0,07 mm/Jahr, ASTM G31).

Beispiel: Unter Hochgeschwindigkeitsschneidbedingungen (200 m/min) führt die Entkohlung dazu, dass die Verschleißfestigkeit von Hartmetallwerkzeugen abnimmt und die Schnittlebensdauer um etwa 20–30 % verkürzt wird (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

2.2 Aufkohlen

Definition

Der Kohlenstoffgehalt im Hartmetall ist höher als das stöchiometrische Verhältnis und es wird freier Kohlenstoff (Graphitphase) ausgeschieden

.

Freier Kohlenstoff liegt in Form von Clustern oder Flocken mit einer Größe von 0,5–3 μm vor und weist eine extrem geringe Härte ($< HV 100$) auf. Er ist hauptsächlich in der Kobaltphase oder an den Korngrenzen verteilt und erhöht die Porosität (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Die Härte nimmt um 3–5 % ab (von HV 1800 auf HV 1710–1740, ITIA 2024).

Die Biegefestigkeit verringerte sich um 8–10 % (von 2200 MPa auf 1980–2020 MPa).

Freier Kohlenstoff erhöht den Benetzungswinkel (von 5° auf 15 – 25°), was zu einer Verringerung der Beschichtungshaftung um 15–20 % führt (ASTM C633-Test).

Beispiel: Bei Stanzwerkzeugen erhöht die Aufkohlung die Oberflächenrauheit von Hartmetallwerkzeugen (R_a von 0,2 μm auf 0,3–0,4 μm), erhöht die Ablöserate der Beschichtung um etwa 15 % und verkürzt die Werkzeuglebensdauer um 10–15 % (Journal of Materials Science 2025).

3. Ursachen der Entkohlung und Aufkohlung

3.1 Dekarbonisierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rohstofffaktoren:

Unzureichender Kohlenstoffgehalt (<6,10 Gew.-%), d. h. der Kohlenstoffgehalt im WC-Pulver ist niedriger als der theoretische Wert (6,13 Gew.-%).

Die Rohstoffe enthalten hohe Konzentrationen an Oxiden (wie WO_3 oder CoO_3) (0,03–0,1 %), die beim Sintern mit Kohlenstoff zu CO/CO_2 reagieren und dabei Kohlenstoff verbrauchen (Journal of Materials Science, 2025).

Die Qualität von Ruß ist instabil und enthält Verunreinigungen (wie Schwefel und Sauerstoff), die zu einem Kohlenstoffverlust von etwa 0,05 % bis 0,1 % führen (ITIA 2024).

Atmosphärische Faktoren:

Der Sauerstoffgehalt in der Sinteratmosphäre beträgt >0,1 %, was zur Kohlenstoffoxidation unter Bildung von CO/CO_2 führt und die Entkohlungsrate um etwa 10–15 % erhöht.

Der Wasserstoffgehalt (H_2) zu hoch ist (>5 %), reagiert er mit Kohlenstoff zu CH_4 , wodurch das Kohlenstoffelement entfernt wird (ITIA 2024).

Der H_2O -Gehalt in der Atmosphäre beträgt >0,05 %, welches mit Kohlenstoff reagiert und CO und H_2 erzeugt, was die Entkohlung weiter verschlimmert (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Temperaturfaktoren:

Sintertemperatur > 1450 °C, WC zersetzt sich in W_2C - oder η -Phase (Reaktion: $2WC + Co \rightarrow Co_3W_3C + C$).

Temperaturschwankungen ($\pm 10^\circ C$) führen zu lokaler Entkohlung und einer Erhöhung der η -Phasenbildungsrate um 10–15 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Wenn die Isolationszeit zu lang ist (> 2 Stunden), nimmt die Kohlenstoffverflüchtigung zu und das Dekarbonisierungsrisiko steigt um etwa 8 % (Journal of Materials Science 2025).

Mischfaktoren:

Die Durchmischung ist ungleichmäßig und die Abweichung der lokalen Kohlenstoffverteilung beträgt >0,1 Gew.-%, was zu einer regionalen Dekarbonisierung führt.

Der Restkohlenstoffgehalt organischer Bindemittel (wie Paraffin PW oder SBR) beträgt >0,1 % und sie werden im frühen Stadium des Sinterns nicht vollständig zersetzt, was sich auf die Kohlenstoffbilanz auswirkt (ITIA 2024).

Mischgeräte (wie Kugelmøhlen) werden verschmutzt (z. B. durch Eisenspäne), führen Oxide ein und verbrauchen etwa 0,02–0,05 % Kohlenstoff (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

3.2 Aufkohlen

Rohstofffaktoren:

Der Kohlenstoffgehalt ist zu hoch (> 6,15 Gew.-%), beispielsweise durch zu hohe Rußzugabe (> 0,5 Gew.-%).

Die Rußpartikel weisen keine gleichmäßige Größe auf (> 10 μm), was zu lokalem Kohlenstoffüberschuss führt (ITIA 2024).

Die Carbidpartikel (z. B. WC) im Rohmaterial sind zu fein (<0,1 μm), weisen eine hohe Oberflächenaktivität auf und absorbieren übermäßig viel Kohlenstoff (Journal of Materials Science 2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Atmosphärische Faktoren:

Ein CH₄-Gehalt in der Sinteratmosphäre (>1 %) führt zur Kohlenstoffablagerung und erhöht die Aufkohlungsrate um etwa 10–15 %.

Unzureichendes Vakuum (>10⁻² Pa) verhindert die Kohlenstoffverflüchtigung und führt zur Ausfällung des verbleibenden freien Kohlenstoffs (ITIA 2024).

Wenn das Kohlenstoffpotenzial in der Atmosphäre zu hoch ist (z. B. Kohlenstoffpotenzial > 1,2), diffundieren Kohlenstoffatome an die Oberfläche des Materials und scheiden die Graphitphase aus (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Temperaturfaktoren:

Wenn die Sintertemperatur <1350 °C beträgt, ist die Kohlenstoffreaktion unvollständig und der verbleibende freie Kohlenstoff wird ausgefällt.

Temperaturschwankungen (±10°C) führen zu lokaler Aufkohlung und der Volumenanteil des freien Kohlenstoffs erhöht sich um 5–10 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Wenn die Abkühlrate zu langsam ist (<5 °C/min), scheidet sich während des Abkühlvorgangs Kohlenstoff ab und die Aufkohlungsrate erhöht sich um etwa 5 % (Journal of Materials Science 2025).

Mischfaktoren:

Der Restkohlenstoffanteil von Paraffinwachs (PW) oder SBR in der Mischung beträgt 0,15–0,3 %, und der Kohlenstoffgehalt steigt nach der Zersetzung an.

Eine unzureichende Mischzeit (<10 Stunden) führt zu einer ungleichmäßigen Kohlenstoffverteilung und einer Erhöhung der lokalen Aufkohlungsrate um etwa 8–12 % (ITIA 2024).

Während des Mischvorgangs agglomeriert Ruß (agglomerierte Partikel > 20 µm), was zu einem lokalen Kohlenstoffüberschuss führt (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Mikroskopischer Mechanismus:

Während der Entkohlung reduziert die η-Phase die WC-Co-Grenzflächenbindungsenergie (von 1,2 J/m² auf 0,8-1,0 J/m²) und erhöht die Tendenz zur Rissausbreitung (Journal of Materials Science 2025).

Während des Aufkohlens erhöht freier Kohlenstoff den Benetzungswinkel (von 5° auf 15°-25°), verringert die Benetzbarkeit von Kobalt im Verhältnis zu WC und beeinträchtigt die Beschichtungshaftung (ITIA 2024).

Eine kleine Abweichung im Kohlenstoffgehalt (±0,1 Gew.- %) führt zu einer Erhöhung der Grenzflächenspannung um etwa 10–15 %, was Mikrodefekte weiter verschlimmert (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

4. Auswirkungen der Entkohlung und Aufkohlung

4.1 Mikrostruktur

Dekarbonisierung:

Die η-Phase zerstört die WC-Co-Grenzfläche, das Volumen des Kobalt-pools nimmt um 5–10 % zu und die Körner wachsen abnormal (von 0,5 µm auf 1–2 µm) .

Porositätszunahme 0,05 %–0,1 % (ISO 3326:2013).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eine Erhöhung der Grenzflächenspannung um etwa 10 % führt zu einer um 15–20 % erhöhten Wahrscheinlichkeit der Mikrorissbildung (Journal of Materials Science 2025).

Aufkohlung:

An den Korngrenzen sammelt sich freier Kohlenstoff an, wodurch die Porosität um 0,1–0,15 % erhöht wird.

Die Kobaltphase ist ungleichmäßig verteilt, die lokale Benetzbarkeit nimmt um 10–15 % ab und die Korngrenzenfestigkeit nimmt um etwa 5 % ab (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Freie Kohlenstoffpartikel verursachen Spannungskonzentrationen und erhöhen die Tendenz zur Porenbildung um etwa 8 % (ITIA 2024).

4.2 Leistung

Härte:

Dekarbonisierung: Verringerung um 5–10 % (von HV 1800 auf HV 1620–1710).

Aufkohlen: Abnahme um 3–5 % (HV 1800 auf HV 1710–1740).

Stärke:

Entkohlung: Die Biegefestigkeit nimmt um 10–15 % ab (2200 MPa auf 1870–1980 MPa).

Aufkohlen: um 8–10 % verringert (2200 MPa auf 1980–2020 MPa).

Zähigkeit:

Entkohlung: Die Bruchzähigkeit (KIC) nimmt um 20–25 % ab (von $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ auf $7,5\text{--}8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Aufkohlen: Leichte Erhöhung um 5–8 % (von $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ auf $10,5\text{--}10,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Korrosionsbeständigkeit:

Entkohlung: Die Korrosionsrate steigt um 15–20 % (von 0,05 mm/Jahr auf 0,06–0,07 mm/Jahr, ASTM G31).

Aufkohlung: Die Korrosionsrate erhöht sich um etwa 5 % (0,05 mm/Jahr bis 0,0525 mm/Jahr).

Beschichtungshaftung:

Aufkohlen: Die Haftung nimmt um 15–20 % ab (von 50 MPa auf 40–42,5 MPa, ASTM C633).

Entkohlung: Die Haftung nimmt um etwa 5 % ab (von 50 MPa auf 47,5 MPa).

Abriebfestigkeit:

Entkohlung: Die Verschleißrate steigt um 20–25 % (von $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ auf $0,072\text{--}0,075 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, ASTM G65).

Aufkohlen: Die Verschleißrate steigt um 10–15 % (von $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ auf $0,066\text{--}0,069 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$).

4.3 Anwendung

Messer:

Durch die Entkohlung verringert sich die Verschleißfestigkeit des Werkzeugs und die Lebensdauer des Werkzeugs um 20–30 %. Beispielsweise verringert sich die Lebensdauer beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (200 m/min) von 2 Stunden auf 1,4–1,6 Stunden (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durch Aufkohlen wird die Ablöserate der Beschichtung um 15–20 % erhöht und ihre Lebensdauer um 10–15 % verkürzt (Journal of Materials Science 2025).

Schimmel :

Durch die Entkohlung verringert sich die Schlagfestigkeit der Form und ihre Lebensdauer verkürzt sich um 15 bis 20 %. Beispielsweise verringert sich die Lebensdauer einer Stanzform von 120.000-mal auf 96.000-102.000-mal.

Durch das Aufkohlen erhöht sich die Oberflächenrauheit der Form (Ra steigt von 0,2 μm auf 0,3–0,4 μm) und ihre Lebensdauer verringert sich um 10–15 % (Journal of Materials Science 2025).

Bergbauwerkzeuge:

Durch die Dekarbonisierung erhöht sich das Bruchrisiko um etwa 25–30 %, z. B. verringert sich die Lebensdauer eines Bergbaubohrers bei Granitbohrungen von 2000 m auf 1400–1500 m (ITIA 2024).

Durch das Aufkohlen verringert sich die Verschleißfestigkeit um etwa 10–15 % und die Lebensdauer des Bohrers um 10–12 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

5. Verbesserungsmaßnahmen

5.1 Rohstoffkontrolle

Der Kohlenstoffgehalt wurde streng auf 6,10–6,15 Gew.-% ($\pm 0,05$ Gew.-%) kontrolliert und es wurde hochreines WC-Pulver (Kohlenstoffgehalt 6,12–6,14 Gew.-%, Oxid $< 0,02$ %) verwendet.

Die Zugabe von Korninhibitoren wie Cr_3C_2 (0,3–0,8 %) oder VC (0,1–0,5 %) hemmt die Bildung der η -Phase und reduziert den Volumenanteil der η -Phase um 8–12 % (ITIA 2024).

Hochreiner Ruß (Reinheit $> 99,9$ %) wird verwendet, um die Auswirkungen von Verunreinigungen (wie Schwefel und Sauerstoff) auf den Kohlenstoffgehalt zu reduzieren und die Kohlenstoffverlustrate auf 0,01–0,03 % zu begrenzen (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

5.2 Mischoptimierung

Durch die Verwendung einer Planetenkugelmühle zum Mischen (12–18 Stunden, 300–500 U/min) wird die Gleichmäßigkeit um 10–15 % verbessert und die Abweichung der Kohlenstoffverteilung beträgt $< 0,05$ Gew.-%.

Verwenden Sie Bindemittel mit geringem Kohlenstoffrückstand, wie PEG oder PVA (Kohlenstoffrückstandsrate $< 0,03$ %), um herkömmliches Paraffinwachs (Kohlenstoffrückstandsrate 0,1 %–0,2 %) zu ersetzen.

Durch die Optimierung von Kugelmahlmedien (z. B. WC-Kugeln anstelle von Stahlkugeln) kann die Eisenverschmutzung verringert und der Kohlenstoffverbrauch um etwa 0,02 % gesenkt werden (Journal of Materials Science, 2025).

Durch die Zugabe von Dispergiermitteln (wie Stearinsäure, 0,1 %–0,3 %) kann die Agglomeration von Ruß verringert und die Gleichmäßigkeit um 5 %–8 % verbessert werden (The Chinese Journal

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

of Nonferrous Metals, 2024).

5.3 Sinteroptimierung

Es wird Vakuumsintern angewendet (Vakuumgrad $<10^{-3}$ Pa) und der Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre wird auf $<0,05$ %, $H_2 <2$ % und $H_2O <0,03$ % kontrolliert, um eine Oxidation oder Verflüchtigung von Kohlenstoff zu vermeiden.

Die Sintertemperatur wird auf $1380\text{--}1420$ °C (± 5 °C) geregelt und die Haltezeit beträgt 1–1,5 Stunden, um eine WC-Zersetzung oder die Ausfällung von freiem Kohlenstoff zu vermeiden.

Die Abkühlrate wird auf $5\text{--}10$ °C/min geregelt, wodurch das Risiko der Ausfällung von freiem Kohlenstoff um etwa 5 % reduziert wird (Journal of Materials Science 2025).

Durch Heißisostatisches Pressen (HIP, $100\text{--}150$ MPa, $1350\text{--}1400$ °C) wird die Porosität beseitigt, mit einer Porosität von $<0,01$ % (ISO 3326:2013).

Durch die Verwendung eines Atmosphärenüberwachungssystems (Echtzeiterkennung des CO/CH_4 -Gehalts), das sicherstellt, dass das Kohlenstoffpotenzial $<1,0$ ist, wird die Aufkohlungsrate um etwa 10 % reduziert (ITIA 2024).

5.4 Erkennungsfeedback

Der Kobalt-Magnetttest (GB/T 3849) wird verwendet, um die Abweichung des Kohlenstoffgehalts ($\pm 0,05$ Gew.-%) zu erkennen und die η -Phase und den freien Kohlenstoff genau zu kontrollieren.

Durch die Kombination von Röntgenbeugung (XRD) und Rasterelektronenmikroskopie (SEM) zur Analyse der Mikrostruktur konnte die Erkennungsrate der η -Phase/des freien Kohlenstoffs um 15–20 % erhöht werden.

Die energiedispersive Spektroskopie (EDS) wird zur Analyse der Kohlenstoffverteilung verwendet, wobei die Abweichung auf $\pm 0,03$ Gew.-% begrenzt und die Defektrate um 10–15 % reduziert wird (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Implementieren Sie eine Online-Überwachung mittels Infrarotspektroskopie, um den CO/CO_2 -Gehalt in der Sinteratmosphäre zu ermitteln und den Prozess in Echtzeit anzupassen, wodurch die Fehlerrate um etwa 8 % reduziert wird (ITIA 2024).

5.5 Oberflächenbehandlung

Die freie Kohlenstoffschicht (Dicke $0,01\text{--}0,03$ mm) wurde durch Polieren entfernt und die Oberflächenrauheit R_a betrug $< 0,2$ μm .

Mit PVD TiN, TiAlN- oder CrN-Beschichtung (Dicke $2\text{--}5$ μm), die Beschichtungshaftung wird um 15–20 % verbessert (ASTM C633).

Durch Plasmareinigung werden Kohlenstoffrückstände auf der Oberfläche entfernt und die Beschichtungshaftung um etwa 10 % verbessert (Journal of Materials Science 2025).

Eine Nitrierbehandlung bei niedrigen Temperaturen ($500\text{--}600$ °C) erhöht die Oberflächenhärte um etwa 5 % und die Korrosionsbeständigkeit um 10–15 % (ASTM G31).

Wirkung:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Volumenanteil der η -Phase und des freien Kohlenstoffs wird um 10–15 % reduziert.
Die Härte wurde um 5–8 % erhöht (von HV 1710 auf HV 1800–1850).
Die Biegefestigkeit stieg um 10–15 % (von 1980 MPa auf 2200–2300 MPa).
Die Verschleißfestigkeit wird um 15–20 % verbessert und die Lebensdauer von Werkzeugen und Formen um 20–30 % verlängert .

6. Anwendungsfälle

Werkzeuge aus Hartmetall mit niedrigem Co-Gehalt (WC-6 % Co): Durch Vakuumsintern (1400 °C, Vakuumgrad 10^{-3} Pa) und Zugabe von 0,5 % Cr_3C_2 wird die η -Phase um 10–12 % reduziert, die Härte erreicht HV 1850 und die Lebensdauer erhöht sich beim Schneiden von mittelkohlenstoffhaltigem Stahl (200 m/min) von 1,5 Stunden auf 1,8–2 Stunden (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Hartmetallform mit hohem Co-Gehalt (WC-15 % Co): Präzise kontrollierter Kohlenstoffgehalt (6,12 Gew.- %) und poliert, freier Kohlenstoff wird um 10–15 % reduziert, die Biegefestigkeit erreicht 2,4–2,5 GPa und die Lebensdauer der Stanzform wird von 100.000-mal auf 115.000–120.000-mal erhöht (ITIA 2024).

Ni-basierte Hartmetallform (WC-10 % Ni): Durch die Verwendung von HIP (150 MPa, 1400 °C) und CrN-Beschichtung beträgt die Porosität $<0,01$ %, die Korrosionsrate $<0,005$ mm/Jahr und die Lebensdauer von Schiffsbaukomponenten erhöht sich von 0,8 Jahren auf 1,1–1,2 Jahre (Journal of Materials Science 2025).

Ultrafeinkörnige Hartmetallwerkzeuge (WC-Korngröße $0,2 \mu\text{m}$) : Unter Verwendung von Nano-WC-Pulver und beschichtet mit Al_2O_3 ($3 \mu\text{m}$) erreicht die Härte HV 1950–2000 und die Lebensdauer erhöht sich beim Schneiden von Hochtemperaturlegierungen (250 m/min) von 3 Stunden auf 3,8–4 Stunden (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

7. Normen

GB/T 3849-2015: Prüfverfahren für magnetische Eigenschaften von Kobalt in Hartmetall , Erkennung von Abweichungen im Kohlenstoffgehalt.

ISO 4499-2:2020: Bewertung der Mikrostruktur von Hartmetallen, Analyse der Eta-Phase und des freien Kohlenstoffs.

ASTM B406-96 (2021) : Prüfverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall.

ASTM G31-21: Prüfverfahren für die Korrosionsbeständigkeit metallischer Werkstoffe.

ASTM C633-13(2021): Prüfverfahren für die Haftung von Beschichtungen.

ISO 3326:2013: Verfahren zur Bestimmung der Porosität in Hartmetallen.

ASTM G65-00 (2010): Abriebtest mit trockenem Sand/Gummirad zur Bewertung der Verschleißfestigkeit.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com