

纳米 TiN 改性 Ti(C, N)基金属陶瓷的组织 and 性能

章晓波, 刘 宁, 陈 焱, 于 超, 李 勇

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 采用真空烧结法制备纳米 TiN 改性的 Ti(C, N)基金属陶瓷, 研究不同金属相对纳米改性 Ti(C, N)基金属陶瓷组织和力学性能的影响。结果表明: 除经典的黑芯/灰壳组织外, 添加纳米 TiN 的金属陶瓷在黑芯内还出现灰芯结构; 纳米 TiN 主要分布在陶瓷相颗粒的晶界处; 相对于未添加纳米 TiN 的金属陶瓷, 添加纳米 TiN 粉末能明显提高金属陶瓷的抗弯强度、硬度与断裂韧性; 对纳米 TiN 改性的金属陶瓷而言, 金属相 Ni 能提供更好的抗弯强度与断裂韧性, 而金属相 Co 则能带来更高的硬度。

关键词: 金属陶瓷; 硬质相; 粘结相; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TB 333

文献标识码: A

Microstructure and properties of nano-TiN modified Ti(C, N)-based cermets

ZHANG Xiao-bo, LIU Ning, CHEN Yan, YU Chao, LI Yong

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The nano-TiN modified Ti(C, N)-based cermets were fabricated by vacuum sintering, and the effects of different metallic phases on the microstructure and mechanical properties of nano-TiN modified cermets were studied. The results show that the grey core microstructure exists in black core besides typical black core/grey rim, the nano-TiN locates at the ceramic phase boundaries. The results of mechanical properties show that the addition of nano-TiN powder can improve transverse rupture strength, hardness and fracture toughness of cermets clearly compared with that without TiN. The metallic phase Ni can bring much better transverse rupture strength and toughness while Co can offer much higher hardness in cermets modified by nano-TiN.

Key words: cermets; hard phase; binder phase; microstructure; mechanical properties

Ti(C, N)基金属陶瓷是在 TiC 基金属陶瓷基础上发展起来的一种具有高硬度、高强度、优良的高温 and 耐磨性能、良好的韧性以及密度小、导热率高的新型金属陶瓷。其主要硬质相成分为 TiC、TiN 或 Ti(C, N), 粘结相成分为 Ni/Co。其中 TiC 主要提高材料的硬度, TiN 提高材料的耐磨性, 而 Ni/Co 提高材料的韧性。为调节材料的综合性能, 可适当添加其他碳化物, 如 Mo₂C、WC 和 (Ta, Nb)C 等。Mo₂C 和 WC 可改善金属相对陶瓷相的润湿性并抑制碳化物晶粒长

大, (Ta, Nb)C 可提高材料的抗热震性能^[1]。虽然金属陶瓷材料制作的刀具硬度高、耐磨损, 具有较高的高温抗软化能力和抗氧化能力, 但也存在抗破损性能差及韧性低等问题。近年来, 以纳米粉末为原料制备出的高性能金属陶瓷, 为进一步提高金属陶瓷材料的综合性能提供了新途径。已有研究表明^[2-6], 纳米 TiN 改性的 Ti(C, N)基金属陶瓷刀具是一种具有高技术含量、高附加值的新型刀具, 与普通硬质合金刀具相比, 刀具耐用度和使用寿命成倍提高。

基金项目: 日本玻璃板基金资助项目(301-00287)

收稿日期: 2007-10-21; **修订日期:** 2008-03-31

通讯作者: 刘 宁, 教授, 博士; 电话: 13013061306; E-mail: ningliu@mail.hf.ah.cn

然而, 目前关于纳米金属陶瓷的研究主要集中在陶瓷相粒度对金属陶瓷组织和性能的影响^[7-10], 而有关金属相对纳米改性 Ti(C, N)基金属陶瓷组织和性能的影响却未见报道。因此, 本文作者在纳米 TiN 改性 Ti(C, N)基金属陶瓷的基础上, 研究了不同金属相对其显微组织和力学性能的影响, 以便为进一步改善金属陶瓷的组织与性能、优化金属相成分提供实验依据。

1 实验

1.1 试样的制备

实验所用粉末 TiC (2.56 μm)、TiN (0.04 μm)、WC (3.52 μm)、Mo (2.33 μm)、Ni (2.95 μm)、Co (2.46 μm) 和 C (3.25 μm)均为市售粉末, 其中, 主要硬质相纳米 TiN 和微米 TiC 的原始粉末 SEM 像如图 1 所示。金属陶瓷的成分配比如表 1 所列。将粉末按表 1 质量配比

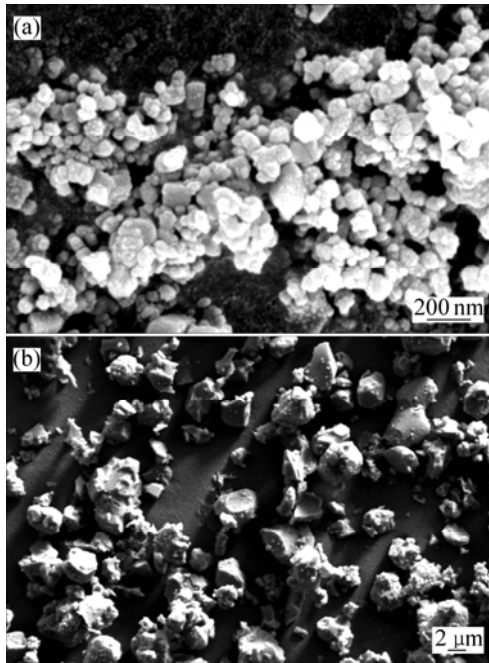


图 1 纳米 TiN 和微米 TiC 原始粉末的 SEM 像
Fig.1 SEM images of nano TiN(a) and micro TiC(b) raw powders

表 1 原始粉末成分配比

Table 1 Composition component of raw powders (mass fraction, %)

Sample	TiC	TiN	WC	Mo	Ni	Co	C
A	50	0	15	14	20	0	1
B	40	10	15	14	20	0	1
C	50	10	15	4	10	10	1
D	50	10	15	4	0	20	1

称取质量, 然后以球料比为 5:1 放入尼龙罐中, 在无乙醇介质中以 175 r/min 球磨 24 h, 干燥后加入汽油橡胶成形剂进行造粒, 在陶瓷压机上压制成形, 压强约为 200 MPa, 然后在真空烧结炉中脱胶、烧结, 最终在烧结温度为 1 430 ℃下真空烧结保温 1 h 得到烧结试样, 试样尺寸为 30 mm×5 mm×5 mm。

1.2 测试方法

用日本产 Rigaku, D/max-rB 型旋转阳极 X 射线衍射仪(XRD)对物相进行分析。用德国产 LEO-1530VP 型场发射扫描电子显微镜(SEM)在背散射电子(BSE)模式下观察试样组织及裂纹扩展路径, 并用能谱仪(EDS)进行显微结构元素组成定量分析。试样经减薄后在 H-800 型透射电镜上观察纳米 TiN 颗粒的形态。

采用三点弯曲法测量金属陶瓷试样的抗弯强度, 试样尺寸为 30 mm×5 mm×5 mm。采用单边切口梁法测量断裂韧性, 试样尺寸为 30 mm×2.5 mm×5 mm, 其操作均在 CMT5105 型微机控制电子万能试验机上完成。用洛氏硬度计测量材料的硬度。

2 结果与讨论

2.1 纳米 TiN 改性 Ti(C, N)基金属陶瓷的物相标定

图 2 所示为 4 组成分试样的 XRD 谱。由图 2 可见, 未添加 TiN 的 A 组主要物相为硬质相 TiC 和粘结相 Ni; 添加纳米 TiN 后, 主要物相为硬质相 Ti(C, N)和粘结相 Ni 和 Ni/Co 和 Co; 当粘结相 Ni 含量为 20% 时, B 组试样中出现了 Ni₃Ti 相, 这是由于 TiN 在高温真空烧结时分解为 Ti 和 N 而导致脱 N, 且 B 组试样中添加的质量分数为 14%的 Mo 在生成 Mo₂C 时需要消耗一定量的碳, 而原始粉末所加入的质量分数为 1%的 C 不足以提供其反应所需要的 C, 导致缺 C, 因而 Ti 扩散进入 Ni 中和 Ni 反应生成了 Ni₃Ti 相^[11]。而 C 和 D 两组试样中的 Mo 仅为 4%, 原始粉末加入的 1%C 足以调节相成分, 因而不复出现 Ni₃Ti 或 Co₃Ti。此外, 尽管试样中加入了 Mo 和 WC, 但除了 TiC、Ti(C, N)、Ni 或 Co 的衍射峰以外, 没有出现主要成分为(Ti, W, Mo)C 及(Ti, W, Mo)(C, N)固溶体的衍射峰。由此可认为, 其衍射峰与 TiC 及 Ti(C, N)的衍射峰是重合在一起的, 这表明 Mo 和 WC 完全溶解, 主要分布在壳中, 芯和壳之间的晶体结构相同, 点阵参数也相差很小^[12]。

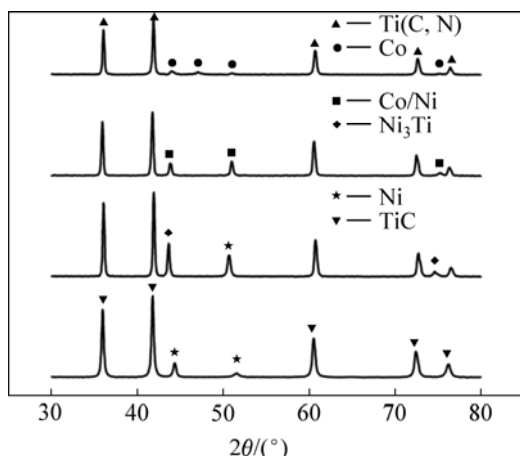


图2 金属陶瓷试样的 XRD 谱

Fig.2 XRD patterns of cermets

2.2 纳米 TiN 改性 Ti(C, N)基金属陶瓷的显微组织

图 3 所示为金属陶瓷试样的 SEM 像。由图 3 可看出, 未添加 TiN 时, 其显微组织呈现经典的黑芯/灰壳结构, 硬质相嵌入白色金属相中, 且灰壳厚度很薄, 甚至有些黑芯相互连通; 而添加纳米 TiN 之后, 黑芯明显变小, 灰壳的厚度增加, 且随着 Ni 含量的减少和 Co 含量的增加, 壳的厚度越来越厚。此外, 在添加了纳米 TiN 试样组织的一些黑芯中出现了新的组织——灰芯。而通过 XRD 分析可看出, B 组试样出现的 Ni_3Ti 主要以白色球状颗粒存在于金属粘结相中。

比较图 3(a)和(b)可看出, 添加纳米 TiN 后, 组织

更加均匀, 灰壳厚度适中, 且粘结相分布更连续, 说明纳米 TiN 的加入有利于组织的均匀化。考虑到 Co 对硬质相的润湿性更好, 当用 Co 部分或全部取代 Ni 时, Mo 的添加量减少为 4%。由图 3(c)和(d)可看出, 组织中芯的体积分数明显减少, 而壳的体积分数相对增加。说明陶瓷相在液相金属 Co 中的溶解的更多, 未溶的 TiC 数量减少, 因而黑芯减少; 而溶解在金属相中的 Ti、W 和 Mo 等元素在液相烧结阶段以溶解—再析出机制在黑芯周围形成灰壳。C 和 D 试样中芯的体积分数减少, 而壳的体积分数增加的原因为以下两个方面: 一方面陶瓷相在 Co 中的溶解度大, 更多的陶瓷相溶解在 Co 中; 另一方面与 Mo 含量的降低有关, 已有研究表明, Mo 的加入可以改善润湿性, 并可抑制烧结时碳化物晶粒的长大^[13]。而 C 和 D 试样中 Mo 含量为 4%, 少于 A 和 B 试样中 Mo 的含量(14%), 因此, 对陶瓷相生长的抑制作用相应减弱, 导致壳的厚度增加, 体积分数增加。

对试样 B 的透射电镜分析结果表明, 纳米 TiN 主要存在于硬质相颗粒的晶界处(见图 4), 起到钉扎晶界和细化晶粒的作用。在加入纳米 TiN 后, B、C 和 D 3 组试样的部分黑芯组织中出现了灰芯结构。EDS 分析结果表明, 灰芯成分与灰壳成分基本相同, 都是 (Ti, W, Mo)C 固溶体, 含有微量的 Ni(见图 5 及表 2)。灰芯形成原因必然与纳米 TiN 有关。在球磨过程中, 纳米 TiN 颗粒容易穿透、渗入相对粗大的 TiC 颗粒, 导致 TiC 颗粒表面出现缺陷。由于灰壳是在液相

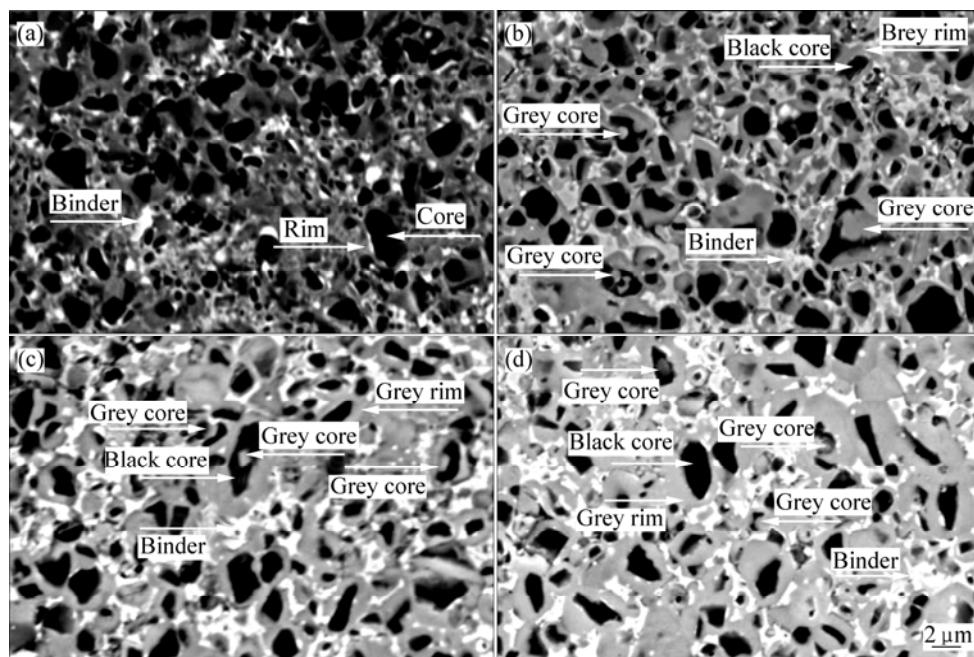


图3 金属陶瓷的 SEM-BSE 显微组织

Fig.3 SEM-BSE microstructures of cermets: (a) Sample A; (b) Sample B; (c) Sample C; (d) Sample D

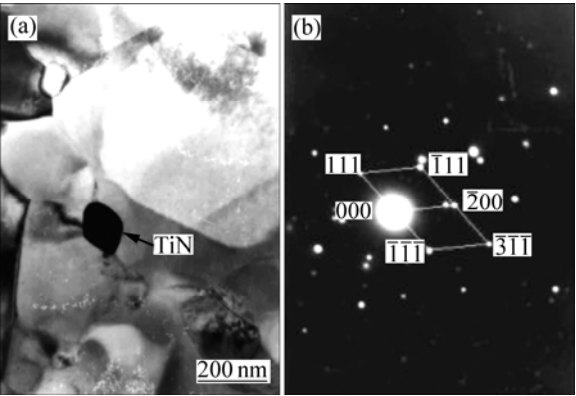


图 4 B 试样中纳米 TiN 的 TEM 像(a)及选区电子衍射(b)
Fig.4 TEM image(a) and SAED diffraction pattern(b) of TiN particles in sample B

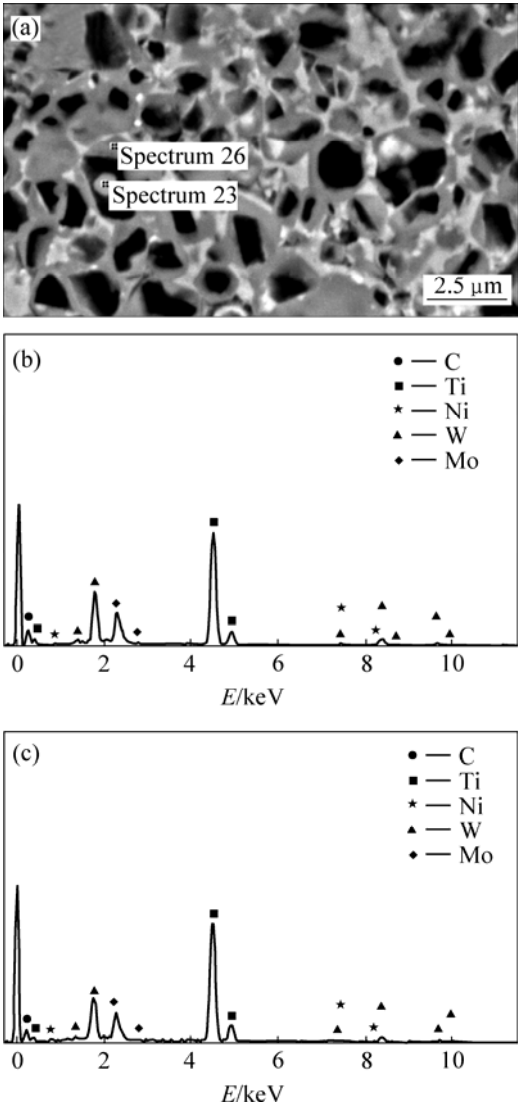


图 5 试样的 SEM 像及灰芯与灰壳的 EDS
Fig.5 SEM image of sample(a) and EDS patterns of grey core(b) and grey rim(c)

表 2 灰芯与灰壳结构的 EDS 元素分布
Table 2 EDS elements distribution of grey core and grey rim (mass fraction, %)

Position	C	Ti	Ni	Mo	W
Grey core	19.48	42.06	1.19	15.24	22.03
Grey rim	13.64	50.58	1.16	13.90	20.72

烧结过程中形成的, 其形成也同重金属元素的碳化物的溶解和在粘结相中的析出过程相关。随着烧结温度的提高, Mo 和 WC 进一步溶解到粘结相中, 当金属元素在粘结相中的溶解度达到某一温度下的饱和溶解度时, 金属元素就从粘结相中析出, 在未溶 TiC 表面形成复合固溶体(Ti, W, Mo)C^[14]。而随着金属元素不断的析出, 壳的厚度不断增加, 此时, 起钉扎作用的纳米 TiN 阻止了壳的向外生长, 迫使其通过球磨引起的缺陷向黑芯内渗透, 在黑芯内形成独立或与灰壳相连的灰芯结构。

图 6 所示为纳米 TiN 改性后 B、C 和 D 试样在背散射模式下的裂纹扩展路径。由图 6 可见, 金属相为 20%Ni 的 B 试样(见图 6(a))及 10%Ni-10%Co 的 C 试样(见图 6(b))的断裂模式是沿晶断裂, 而金属相为 20%Co 的 D 试样(见图 6(c))则是沿晶断裂和穿晶断裂共存的断裂方式。

2.3 纳米 TiN 改性 Ti(C, N)基金属陶瓷的力学性能

4 组金属陶瓷试样的力学性能如表 3 所列。比较 A 和 B 可看出, 添加纳米 TiN 后金属陶瓷 B 的力学性能—抗弯强度(Transverse rupture strength, TRS)、硬度(HRA)、断裂韧性均明显优于不含 TiN 的 A 试样。由于纳米 TiN 主要存在于硬质相颗粒的晶界处, 起到钉扎晶界和细化晶粒的作用, 同时, 在其它成分不变的情况下添加纳米 TiN, 自然就减少了微米 TiC 的含量, 这也细化了晶粒, 因而, 抗弯强度和硬度明显提高。断裂韧性主要取决于粘结相的含量, 在粘结相同含 20%Ni 的 A 和 B 试样中, A 试样组织中出现壳部过薄、黑芯相连的现象, 这对断裂韧性不利。由于壳部是一种过渡相, 可以改善粘结相对硬质相的润湿效果, 使之更好地结合, 厚度适中的壳部有利于断裂韧性的提高^[15]。因而, 添加纳米 TiN B 组试样的断裂韧性也高于未添加纳米 TiN A 组试样的。

目前, 关于纳米颗粒的增强模型主要是基于增强颗粒与基体颗粒的尺寸匹配与残余应力增强增韧模型。纳米 TiN 能显著提高金属陶瓷综合力学性能的原因在于: 1) 细晶强化。由于纳米颗粒在粘结相中的

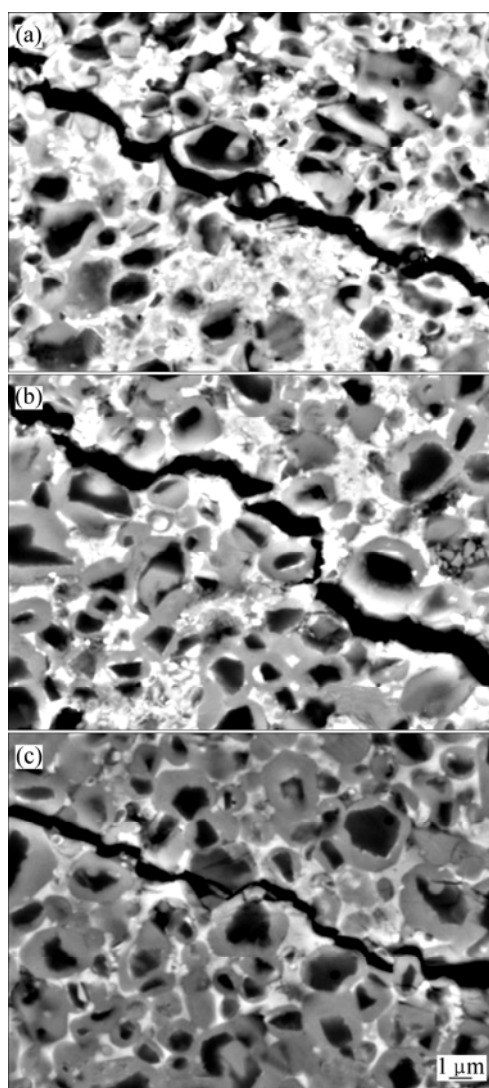


图 6 纳米 TiN 改性 Ti(C, N)基金属陶瓷试样的裂纹扩展路径

Fig.6 Crack propagation paths of Ti(C, N)-based cermet modified by nano TiN: (a) Sample B; (b) Sample C; (c) Sample D

表 3 Ti(C, N)基金属陶瓷的力学性能

Table 3 Mechanical properties of Ti(C, N)-based cermet

Cermet	TRS/MPa	HRA	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
A	1 442	89.5	11.0
B	1 521	91.4	13.0
C	1 439	91.2	12.4
D	1 251	91.8	11.8

扩散与溶解以及沿晶界分布, 阻碍了晶粒长大。由位错塞积理论的 Hall-Petch 关系可知, 晶粒细化时, 其强度与硬度均升高; 2) 弥散强化。对于纳米颗粒增强

复合材料, 当材料发生变形时, 在晶界及相界处弥散分布的纳米 TiN 颗粒对位错起到很好的钉扎作用, 从而提高了金属陶瓷的性能; 3) 固溶强化。由于纳米 TiN 颗粒易在粘结相中溶解和扩散, 使金属相中的 Ti 含量升高。由于 Ti 可以耐更高的温度, 在金属相中固溶度的增加可以提高金属相的熔点, 这对提高 Ti(C, N) 基金属陶瓷用于刀具材料时的红硬性有所帮助^[16]。

对比纳米 TiN 改性不同金属相的金属陶瓷(B、C 和 D)的力学性能可知, Co 部分或全部取代 Ni 后, 材料的抗弯强度呈下降趋势。其主要原因在于: 含 20%Ni 的 B 组试样中添加了 14%的 Mo, 这样硬质相 TiC 相应减少了 10%, 其强度高于 C 和 D 试样。而当 Mo 含量均为 4%时, 尽管由于 Mo 和 W 等元素在 Co 中的溶解度比 Ni 中高, 更易于形成固溶体, 有利于提高材料的抗弯强度^[12], 但由于 Mo 含量的减少, 对晶粒生长的抑制作用削弱, 材料壳部变厚, 使陶瓷相晶粒粒度变粗, 因而导致抗弯强度下降。

纳米 TiN 改性的金属陶瓷 B、C 和 D 的硬度呈先降后升的趋势。理论上来说, 硬质相越多, 硬度越高, 然而 B 组硬质相的含量低于 C 组硬质相的, 但其硬度却稍高。主要是由于 14%Mo 的加入抑制了硬质相的长大, 晶粒的细化引起了硬度的提高。由于 Co 与硬质相的润湿性好, 能减少材料的孔隙度, 但 Co 加入使得硬质相颗粒粒度变大, 此时, 主要影响金属陶瓷硬度的不再是晶粒尺寸, 而是金属粘结相比较短的平均自由程及较高的固溶硬化机制^[17]。故在其它成分均相同的情况下, Co 取代 Ni 能够获得更高的硬度。

尽管 Co 具有比 Ni 更高的韧性及更好的润湿性^[12], 然而, 正是由于 Co 对硬质相良好的润湿性及相对较低的 Mo 含量导致壳部过分发达。厚度适中的壳带来优异的性能, 但壳为脆性相, 其厚度越大, 脆性越大^[15]。因此, 本研究中 Co 部分或全部取代 Ni 后, 材料的断裂韧性呈下降趋势。

3 结论

1) 纳米 TiN 加入后, 由于缺 C 和缺 N, 在金属相为 20%Ni 的试样中出现了 Ni_3Ti , 主要存在于金属粘结相中, 该相并没有对材料力学性能产生太大影响。

2) 纳米 TiN 加入后主要分布在硬质相的晶界处, 可明显改善 Ti(C, N)基金属陶瓷的组织与性能, 其主要机理为细晶强化、固溶强化和弥散强化。

3) 纳米 TiN 改性的金属陶瓷组织中出现新的结构——灰芯。

4) 在纳米 TiN 改性的 Ti(C, N)基金属陶瓷中, 金属相 Co 更有利于提高金属陶瓷的硬度, 而 Ni 则能提供更好的抗弯强度和断裂韧性。

REFERENCES

- [1] ETTMAYER P, KOLASKA H, LENGAUER W, DREYER K. Ti(C, N) cermets-metallurgy and properties[J]. *International Journal of Refractory Metals Hard Materials*, 1995, 13(6): 343–351.
- [2] 刘文俊, 熊惟皓, 郑 勇. Ti(C, N)基金属陶瓷断口形貌及增韧机理[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(5): 800–804.
LIU Wen-jun, XIONG Wei-hao, ZHENG Yong. Appearance of fracture and toughening mechanisms of Ti(C, N)-based cermets[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(5): 800–804.
- [3] LIU N, XU Y D, LI H, LI G H, ZHANG L D. Effect of nano-micro TiN addition on the microstructure and mechanical properties of TiC based cermets[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, 22(13): 2409–2414.
- [4] LIU Ning, CHAO Sheng, HUANG Xin-min. Effects of TiC/TiN addition on the microstructure and mechanical properties of ultra-fine grade Ti(C, N)-Ni cermets[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, 26(16): 3861–3870.
- [5] LIU Ning, YIN Wei-hai, ZHU Long-wei. Effect of TiC/TiN powder size on microstructure and properties of Ti(C, N)-based cermets[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 445/446(15): 707–716.
- [6] ZHENG Yong, XIONG Wei-hao, LIU Wen-jun, LEI Wen, YUAN Quan. Effect of nano addition on the microstructure and mechanical properties of Ti(C, N)-based cermets [J]. *Ceramics International*, 2005, 31(1): 165–170.
- [7] LIU Ning, HAN Cheng-liang, XU Yu-dong, CHAO Sheng. Microstructures and mechanical properties of nano TiN modified TiC-based cermets for milling tools[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 382(1/2): 122–131.
- [8] LIU Ning, HAN Cheng-liang, YANG Hai-dong, XU Yu-dong, SHI Min, CHAO Sheng, XIE Feng. The milling performances of TiC-based cermet tools with TiN nanopowders addition against normalized medium carbon steel AISI1045[J]. *Wear*, 2005, 258(11/12): 1688–1695.
- [9] 石增敏, 郑 勇, 刘文俊, 袁 泉. Ti(C, N)基金属陶瓷刀具的切削性能[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(5): 805–810.
SHI Zeng-min, ZHENG Yong, LIU Wen-jun, YUAN Quan. Cutting performance of Ti(C, N)-based cermet tools[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(5): 805–810.
- [10] 许育东, 刘 宁, 曾庆梅, 谢 峰. 纳米 TiN 改性金属陶瓷刀具的磨损性能研究[J]. *机械工程材料*, 2002, 26(6): 28–31.
XU Yu-dong, LIU Ning, ZENG Qing-mei, XIE Feng. Wear properties of nano TiN modified cermet cutters[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2002, 26(6): 28–31.
- [11] 贺从训, 夏志华, 汪有明, 赵伯琅, 唐 群, 毛昌辉, 余明. Ti(C, N)基金属陶瓷的研究[J]. *稀有金属*, 1999, 23(1): 4–12.
HE Cong-xun, XIA Zhi-hua, WANG You-ming, ZHAO Bo-lang, TANG Qun, MAO Chang-hui, YU Ming. Study of Ti(C, N)-based metal ceramic[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 1999, 23(1): 4–12.
- [12] 刘 宁, 黄新民, 周 杰, 宫晨利, 石 敏, 张庶元. Ti(C, N)基金属陶瓷中陶瓷相芯/壳组织的观察与分析[J]. *硅酸盐学报*, 2000, 28(4): 381–384.
LIU Ning, HUANG Xin-min, ZHOU Jie, GONG Chen-li, SHI Min, ZHANG Shu-yuan. Observation and analysis on the core/rim structure of ceramics in Ti(C, N) based cermets[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2000, 28(4): 381–384.
- [13] 刘 宁, 吕庆荣, 姜 海, 熊惟皓. 化学成分对 Ti(C, N)基金属陶瓷力学性能的影响[J]. *硬质合金*, 1999, 16(4): 206–209.
LIU Ning, LÜ Qing-rong, JIANG Hai, XIONG Wei-hao. Effect of chemical composition on the mechanical properties of Ti(C, N) based cermets[J]. *Cemented Carbides*, 1999, 16(4): 206–209.
- [14] LINDAHL P, GUSTAFSON P, ROLANDER U, STALS L, ANDRÉN H O. Microstructure of model cermets with high Mo or W content[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 1999, 17(6): 411–421.
- [15] 刘 宁. Ti(C, N)基金属陶瓷的制备及成分、组织和性能的研究[D]. 武汉: 华中理工大学, 1994: 1–140.
LIU Ning. Research on the manufacturing process and the relationship among chemical composition, microstructure and mechanical properties of Ti(C, N) based cermets[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1994: 1–140.
- [16] 许育东, 刘 宁, 石 敏, 晁 晟, 张宝华, 刘雪敏, 刘 斌. 纳米增强金属陶瓷的组织及热冲击性能[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(5): 44–50.
XU Yu-dong, LIU Ning, SHI Min, CHAO Sheng, ZHANG Bao-hua, LIU Xue-min, LIU Bin. Microstructural characteristics and thermal shock resistance of nano-powder reinforcing cermets[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(5): 44–50.
- [17] RAHIMI D V, RAHMANI M, FAGHIHI S M, NEMATI Z, AKBARI J. Microstructure and cutting performance investigation of Ti(C, N)-based cermets containing various types of secondary carbides[J]. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 2007, 47(5): 768–772.

(编辑 李艳红)