

基体梯度结构对 TiN 涂层硬质合金力学和 切削性能的影响

王社权^{1,2}, 陈康华¹, 徐银超¹, 祝昌军¹, 谢灿强¹, 陈响明²

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;

2. 株洲钻石切削刀具股份有限公司, 株洲 412000)

摘 要: 研究基体梯度结构对 TiN 涂层硬质合金力学和切削性能的影响; 采用阴极弧蒸发涂层工艺分别在均质和梯度硬质合金基体上制备 TiN 涂层; 运用金相观察、扫描电镜分析、三点抗弯强度测试、显微硬度测试和切削性能测试, 研究基体梯度结构对 TiN 涂层硬质合金组织结构、力学性能和切削性能的影响。结果表明: 基体结构梯度化后, TiN 涂层表面形貌由平整状变为网状结构, 显微硬度提高 19%, 抗弯强度提高 6.1%; 基体结构梯度化后, 涂层硬质合金的结构发生变化, 力学性能得到提高, 涂层刀片的抗冲击性能和切削性能分别提高 10% 和 15% 左右。

关键词: TiN 涂层硬质合金; 梯度结构; 力学性能; 显微组织; 切削性能

中图分类号: TF125.3

文献标志码: A

Effect of substrate gradient structure on mechanical and cutting properties of TiN coated cemented carbide

WANG She-quan^{1,2}, CHEN Kang-hua¹, XU Yin-chao¹, ZHU Chang-jun¹, XIE Can-qiang¹, CHEN Xiang-ming²

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Zhuzhou Cemented Carbide Cutting Tools Co. Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The effects of substrate gradient structure on the mechanical and cutting properties of TiN coated cemented carbide were studied. TiN coating was deposited on the homogeneous and gradient cemented carbide substrates by cathodic arc-evaporation. The effects of gradient structure on the microstructure, mechanical and cutting properties of TiN coated cemented carbides were investigated by optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffractometry, bending strength and micro-hardness measurements and cutting test. The results show that the surface morphology of TiN coated cemented carbides changes from flat to reticular structure after gradient of the substrate, the micro-hardness and bending strength increase by 19% and 6.1%, respectively. The structure and mechanical properties of TiN coated cemented carbide after gradient of the substrate change, which results into the impact resistance and cutting of TiN coated cemented carbide improved by 10% and 15%, respectively.

Key words: TiN coated cemented carbide; gradient structure; mechanical properties; microstructure; cutting properties

作为切削刀具使用的传统硬质合金存在强度(韧性)和硬度(耐磨性)之间的矛盾, 科研工作者一方面通过改变硬质合金微观结构的分布特征, 使材料的结构在一维、二维和三维的空间出现梯度变化, 表面形成

大约 10~15 μm 厚的缺立方相碳化物和碳氮化物韧性区, 此结构具有良好的塑性和韧性, 可提高硬质合金切削工具的使用性能^[1-4]。另一方面, 在基体结构不变化的情况下, 通过表面涂层的方法, 提高刀具的耐磨

基金项目: 国家自然科学基金基金委员会创新研究群体科学基金资助项目(50721003); 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项资助项目(2009ZX04012-021)

收稿日期: 2010-03-18; 修订日期: 2010-04-28

通信作者: 陈康华, 教授, 博士; 电话: 0731-88830714; E-mail: khchen@mail.csu.edu.cn

性能^[5-7]。尹飞等^[8]采用 CVD 沉积工艺在梯度和均质硬质合金基体的沉积 TiCN/Al₂O₃/TiN 涂层,结果表明:基体梯度化后,由于表面韧性区的形成,涂层硬质合金在保持耐磨性的同时,抗弯强度得到了提高,对应的抗冲击性能提高 83.8%。对于 PVD 涂层刀具,较多的研究集中在 TiN 涂层的基础上进行多元化涂层^[9]和多层涂层^[10]改变涂层的硬度和韧性来提高刀具的寿命,但从基体角度来改善涂层刀具性能的研究较少。本文作者从研究基体的角度出发,为提高 PVD 刀具切削性能探寻一种新的研究方法。采用阴极弧蒸发涂层工艺在均质和梯度硬质合金基体上沉积 TiN 涂层,研究硬质合金基体梯度化对 TiN 涂层硬质合金的力学性能和切削性能带来的影响,该研究结果可为新型 PVD 涂层硬质合金刀具的开发应用提供参考。

1 实验

采用市售 WC 粉末、(W,Ti)C、(Ta,Nb)C、TiCN 固溶体粉末、Co 粉为实验原材料,按表 1 所示配制 2 种不同成分的混合料,混合料通过湿磨、喷雾干燥,压制成长、宽、高分别为 21.00 mm、6.50 mm、5.25 mm 的试样条,然后压坯、烧结,并通过控制气氛得到均质基体和梯度基体。采用工业化生产的涂层设备(Balzers Oerlikon rapid cooling system, RSC)在两种基体上采用阴极弧蒸发涂层工艺制备 TiN 涂层,所用的靶材为粉末冶金方法制备的 Ti 靶通入氮气反应,温度为 350℃,真空时压力为 0.5 MPa,沉积时,压力为 580 MPa,得到均质和梯度基体 TiN 涂层硬质合金样品,分别记为试样 1 和试样 2。

表 1 混合料成分

Alloy	Mass fraction/%				
	WC	(W,Ti)C	(Ta,Nb)C	TiCN	Co
Homogeneous substrate	81.5%	6%	6.5%		6%
Gradient substrate	80.3%	6%	6.5%	1.2%	6%

采用 DMRE 金相显微镜观察显微组织,SEM 对涂层硬质合金形貌进行观察。用二次离子质谱仪测量样品从表面到内部钴元素成分分布,采用 Buehler MicroMet5104 型显微硬度计,在不同载荷下对样品的

显微硬度进行测试,加载时间为 15 s。在 WD-5A 万能材料试验机上用三点弯曲法测量抗弯强度,用 TNMG120408 型号的涂层刀片连续切削不锈钢(1Cr18Ni9Ti)比较涂层硬质合金的耐磨性,刀具几何参数: $\gamma_0=-6^\circ$ 、 $\alpha_0=6^\circ$ 、 $\lambda_s=-5^\circ$ 、 $\kappa_r=90^\circ$, $f=0.2\text{ mm/r}$, $a_p=0.2\text{ mm}$,在 160 m/min 和 280 m/min 不同速度下进行切削实验。后刀面的磨损量每隔 3 min 被测量一次,当磨损量超过 0.2 mm 时,认为刀片失效。

为了更全面地评价涂层硬质合金的性能,本文作者对合金进行冲击韧性的实验。实验的方法是采用端面车削,在一根圆棒中间钻直径 40 mm 的孔,并在棒料的外圆铣 4 个对称槽。端面车削的切削条件为 $v=150\text{ m/min}$, $f=0.2\text{ mm/r}$, $a_p=1.0\text{ mm}$ 。刀片出现崩刃或破损时认为刀片失效,刀片切过槽的数量来评价刀片的冲击韧性,即所能承受的冲击次数。

2 结果和分析

2.1 涂层硬质合金的组织结构

图 1 所示为两种基体的金相组织。由图 1 可以看出,均质基体合金的结构组织由 WC、Co、(W,Ti)C 固溶体以及(Ta,Nb)C 固溶体组成,其中(W,Ti)C 固溶

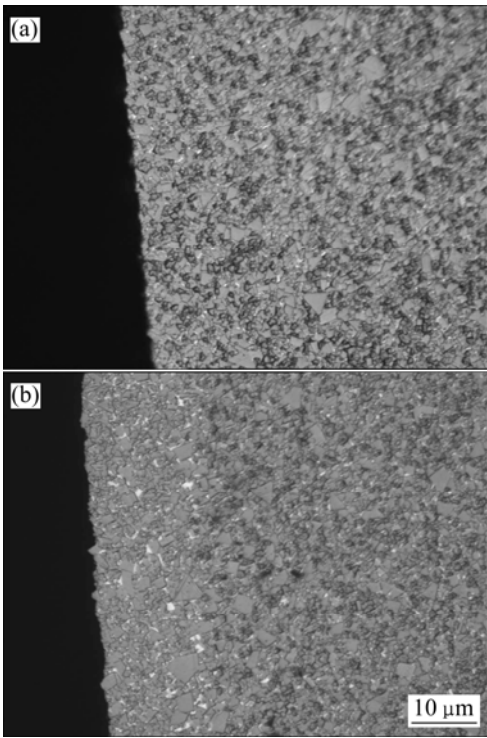


图 1 均质和梯度基体合金的金相组织
Fig.1 Optical microstructures of homogeneous(a) and gradient(b) substrates

体与(Ta, Nb)C 固溶体为立方结构相,而梯度基体结构合金中除含上述结构基体外,其表面有一层平均厚度为 15~20 μm 左右的物质,研究发现,该层物质是缺碳化物和碳氮化物立方相混合区域。图 2 所示为梯度基体合金中 Co 元素的分布曲线。由图 2 可以看出,由表及里 Co 元素含量不断增加,距离表面 10 μm 处,Co 元素含量最高,随后趋于名义成分。上述结果表明,基体合金通过可控气氛烧结后,在表面层与基体形成了一种化学成分的梯度结构。

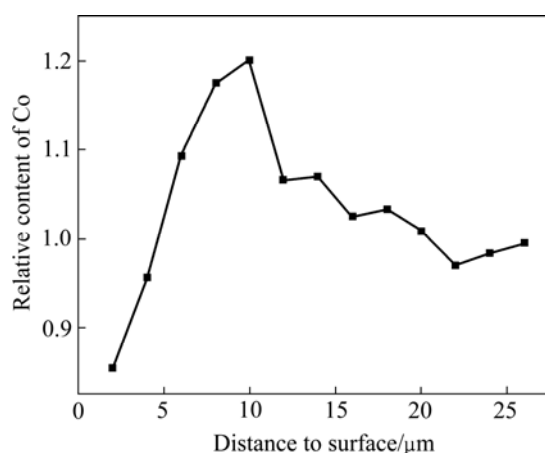


图 2 梯度基体中 Co 元素的分布图

Fig.2 Co elements distribution on surface of gradient substrate

图 3 所示为两种基体合金的表面形貌,其中,白色的为 WC 颗粒,黑色的为 Co 相。从图 3 可知:均质基体表面的 Co 含量相对较多,而梯度基体表面主要为 WC 颗粒,只有少量的 Co 相存在,均质基体表面比较平整,而梯度基体表面 WC 颗粒成不规则分布,表面成分和形貌的不同,对涂层的生长方式可能产生一定的影响。

图 4 所示为不同基体结构 TiN 涂层硬质合金沉积态表面形貌。由图 4 可知,两种样品表面都存在白色的微粒和微孔。这是由于阴弧沉积过程中,靶材宏观粒子的蒸发引起的,这些缺陷对涂层的力学性能会产生一定的影响^[11]。两种涂层硬质合金表面形态存在明显差异,均质基体 TiN 涂层硬质合金表面平整,梯度基体 TiN 涂层硬质合金表面呈现网状分布,显得比较粗糙,原因是由于不同基体表面 Co 含量差异,导致基体表面成分和形貌发生变化,基体和涂层之间的润湿性也产生了变化,影响 TiN 涂层早期的生长方式。梯度基体 TiN 涂层硬质合金表面比较粗糙,呈网状分布,这是薄膜岛状生长的一般特征。

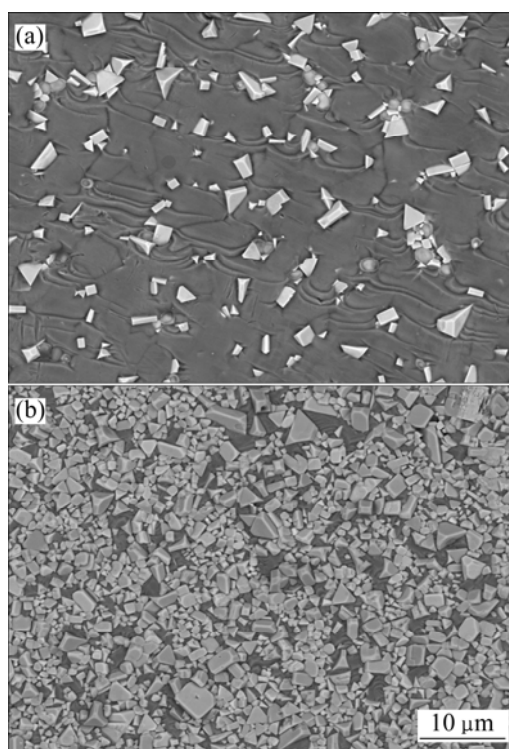


图 3 硬质合金基体的表面形貌

Fig.3 SEM images of cement carbides surface: (a) Homogeneous substrate; (b) Gradient substrate

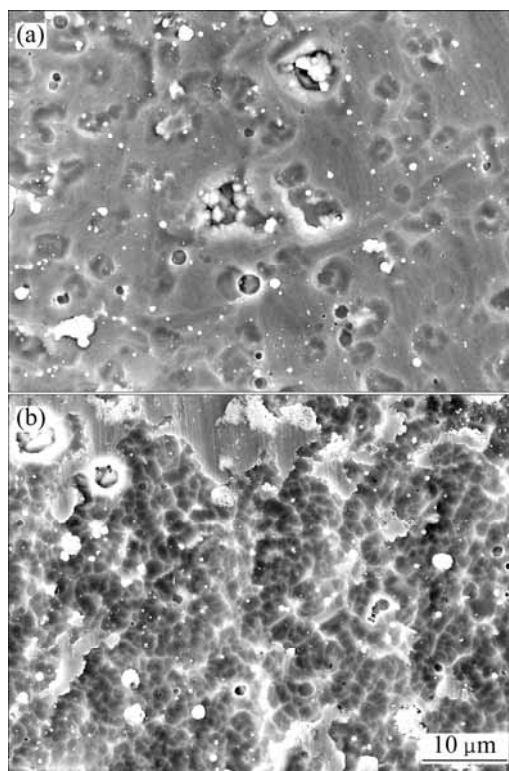


图 4 TiN 涂层硬质合金表面形貌

Fig.4 SEM image of TiN coated cement carbide: (a) Homogeneous substrate; (b) Gradient substrate coated cement carbides

2.2 梯度结构对 TiN 涂层硬质合金力学性能的影响

图 5 所示为两种涂层硬质合金在不同载荷下的显微硬度。由图 5 可知, 试样 2 的显微硬度明显高于试样 1 的, 原因是 PVD 涂层在沉积的过程中基体表面状态不同影响 TiN 的生长, 涂层中所产生的残余应力发生了变化, 残余应力 σ_r 可表示为^[12]

$$\sigma_r = \frac{E_s d_s^2}{6(1-\nu_s)d_c R} \quad (1)$$

式中: E_s 是基体的弹性模量; d_s 是基体的厚度; ν_s 是基体的泊松比; d_c 是涂层的厚度; R 是由于涂层中残余应力所引起变形表面的半径。

硬质合金 Co 含量越低, 它的弹性模量越大, 而泊松比基本相等^[13], 梯度基体表面 Co 含量低, 所以, 试样 2 的 TiN 涂层中产生的残余应力较大, 而 TiN 涂层的残余应力与硬度基本上成正比关系^[14], 所以梯度基体涂层硬质合金的硬度值较高; 另一方面, 基体的硬度对所测量的涂层硬度也有一定的影响, 可表示为^[15]

$$H_f = \frac{H_c - H_s}{2Ct/d - C^2(t/d)^2} + H_s \quad (2)$$

式中: H_f 为涂层的本身硬度; H_c 为涂层测量硬度; H_s 为基体硬度; t 为涂层的厚度; d 为压痕深度; 压痕深度大约为对角线长度的 1/7; C 为常数。所以, H_c 随着 H_s 的增大而增大。梯度基体表层 Co 含量比较低, 而 Co 的硬度比 WC 的低, 所以梯度基体表层的硬度相对高些, 沉积 TiN 涂层后, 试样 2 的显微硬度大于试样 1。

在不同的载荷下, 两种试样随着载荷的增加, 显微硬度值呈减少趋势, 这是由于随着载荷的增加, 压痕深度逐渐增加, 测量的显微硬度值由涂层向基体转

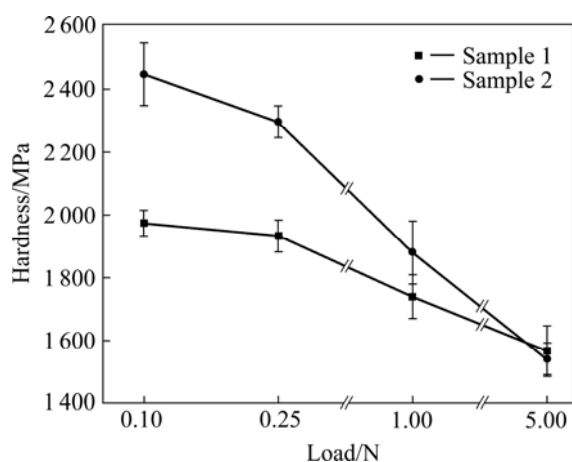


图 5 TiN 涂层硬质合金的显微硬度

Fig.5 Micro-hardness of TiN coated cemented carbides

变, 如式(2)所示, 测量硬度 H_c 与压痕深度 d 成一定的负相关的关系, 所以, 随着载荷的增加, 所测量的涂层硬质合金的显微硬度受基体的影响越来越严重。

表 2 所列为涂层硬质合金的抗弯强度实验结果。涂层前, 梯度基体比均质基体抗弯强度高 6.1%, 这是由于梯度基体表面有一层脱 β 层, 它除了阻止表面裂纹源的生成外还能有效地阻止合金内部的裂纹向表面扩展, 提高合金强度, 而涂层后, 两种涂层硬质合金的抗弯强度比涂层前都有所上升, 试样 2 的抗弯强度稍微高于试样 1。这与 CVD 涂层后抗弯强度下降的结果却是相反的^[8]。化学气相沉积是高温沉积, 涂层和基体热膨胀系数的差别产生热应力, 涂层在生长过程中会产生生长应力, 这两种应力致使 CVD 涂层表面形成拉应力, 表面会产生裂纹, 致使抗弯强度下降。而 PVD 涂层表面形成压应力^[16], 表面没有裂纹, 所以它的抗弯强度反而上升。试样 2 的抗弯强度高于试样 1 的, 这是由于梯度基体的表层韧性区域能够有效地阻止涂层中萌生的裂纹向合金基体的扩展, 提高了强度。冲击实验的结果显示, TiN 涂层硬质合金梯度化后, 冲击次数由 3 373 次提高到 3 740 次, 抗冲击性能提高 10%左右。

表 2 两种不同的基体结构在涂层前后的抗弯强度比较

Table 2 Bending strength of two kinds substrate before and after coating

Sample	Bending strength/MPa	
	Before coating	After coating
Homogeneous substrate	1 988	2 130
Gradient substrate	2 110	2 160

表 3 所列为 TiN 涂层硬质合金刀片在 160 m/min 和 280 m/min 的切削速度下连续切削不锈钢 1Cr18Ni9Ti 切削寿命对比。由表 4 可以看出, 在不同的速度下, 梯度基体涂层刀片的寿命都提高 15%左右, 这主要是由于梯度基体涂层的硬度明显高于均质基体涂层, 刀片的耐磨性得到提高。图 6 所示为 TiN 涂层硬质合金刀片在 160 m/min 速度下切削不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 12.5 min 后前、后刀面的磨损形貌。从图 6 可以看出, 刀片磨损形式为粘结磨损和磨粒磨损共存, 在前刀面上形成了一个正前角切屑瘤刀尖, 梯度基体涂层刀片的切屑瘤较少。均质基体涂层刀片前刀面的磨损比较严重, 有形成月牙洼的趋势。

表 3 TiN 涂层硬质合金刀片在不同速度下连续切削不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 的寿命

Table 3 Life-time of TiN coated inserts during continuous turning of stainless steel (1Cr18Ni9Ti) at different speeds

Sample No.	Speed/ (m·min ⁻¹)	Time/ min
1	160	12.5
	280	3.21
2	160	14.33
	280	3.70

3 讨论

硬度测试和磨损试验有共同的特征, 即两者的材料抗力都只限于发生在表面层上。在做硬度测试时, 材料抗力导致局部范围内的塑性变形, 从而形成压痕。磨损时, 在表面范围内往往也发生塑性变形, 特别是磨粒磨损时, 这种塑性变形与硬度测试时的情况很相似, 它伴随有一个压入过程。由图 6 可知: 刀具在切削过程中主要磨损形式为磨粒磨损, 所以刀具的硬度较高时, 在切削过程中也会表现出较高的寿命。基体

经过梯度化后, 涂层硬质合金的显微硬度提高 19% 左右, 所以在以磨粒磨损为主的情况下, 刀具的寿命得到相应的提高。

刀具在切削时, 在较大的正压力和适当的切削温度作用下, 切屑与前刀面和工件与后面之间的吸附薄膜被挤破, 形成新鲜表面而紧密接触, 发生粘结现象。粘结磨损的强度与接触面间的压力、温度和工件材料与刀具材料的亲合力、硬度比等有关^[17]。TiN 涂层硬质合金刀片在切削不锈钢时, 不同基体的 TiN 涂层硬质合金刀片, 在相同的切削条件下, 两者粘结磨损差异主要是刀片与切削材料的硬度比不同, 梯度基体涂层硬质合金硬度高, 刀具塑性变形相对比较困难, 刀具与不锈钢的真实接触面积较小, 发生粘结磨损的程度相对小一些。

材料的硬度和韧性是一对矛盾体, 也是刀具材料所应克服的一个关键问题。一般刀具材料硬度越高, 冲击韧性越低, 材料越脆。本文作者通过对 TiN 涂层硬质合金的基体进行梯度处理, 提高了其硬度; 梯度基体表面韧性区的形成能够有效阻止裂纹向合金基体的扩展, 提高了其冲击韧性。

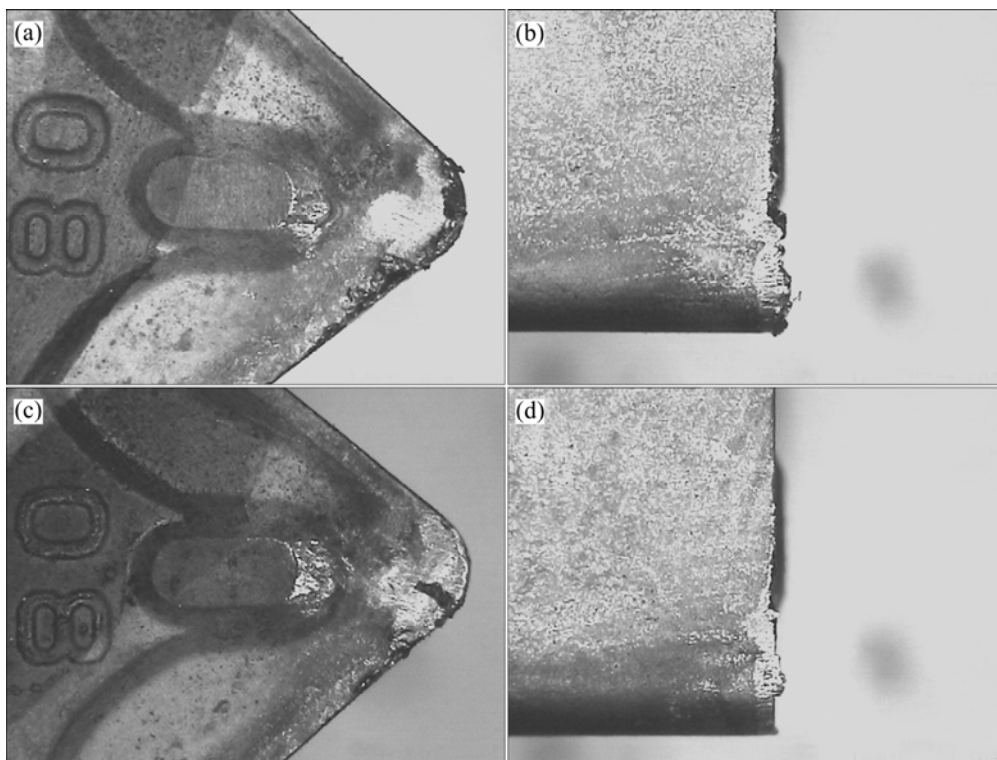


图 6 不同基体 TiN 涂层硬质合金刀片经 160 m/min 切削 12.5 min 后刀面磨损形貌

Fig.6 Wear morphologies of rake and flank of TiN coated cemented carbide after cutting for 12.5 min at 160 m/min: (a) Homogeneous substrate, rake wear; (b) Homogeneous substrate, flank wear; (c) Gradient substrate TiN coated cemented carbide tools, rake wear; (d) Gradient substrate TiN coated cemented carbide tools, flank wear

4 结论

1) 硬质合金基体经过梯度化处理后,由于表面Co含量的不同,基体表面成分和形貌发生变化,影响TiN涂层的生长方式,涂层表面形貌发生变化,由平整状变为网状结构。

2) 基体经过梯度化处理后,TiN涂层硬质合金的硬度明显提高,抗弯强度稍微提高。

3) 基体经过梯度化处理后,TiN涂层硬质合金刀具的切削寿命提高15%左右;抗冲击性能提高10%左右。

REFERENCES

- [1] XIAO Yi-feng, HE Yue-hui, FANG Ping, XIE Hong, MA Zi-xing, ZHANG Li-juan, HUANG Zi-qian, HUANG Bai-yun. Effects of carburizing process on gradient structure and hardness of WC-Co gradient cemented carbides[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(3): 465-470.
- [2] LENGAUER W, DREYER K. Functionally graded hardmetals[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 338(1/2): 194-211.
- [3] 张武装, 高海燕, 刘咏. 粘结相梯度结构硬质合金的研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(11): 62-64.
ZHANG Wu-zhuang, GAO Hai-yan, LIU Yong. Research and development of the binder gradient cemented carbides[J]. Materials Review, 2006, 20(11): 62-64.
- [4] YILBAS B, ARIF A, KARATAS C, AHSAN M. Cemented carbide cutting tool: Laser processing and thermal stress analysis[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(12): 5544-5552.
- [5] 高见, 李建平, 马文存. WC基硬质合金CVD涂层的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 331-333.
GAO Jian, LI Jian-ping, MA Wen-cun. Structure and properties of WC-based hard metal coating by CVD[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 331-333.
- [6] 蔡志海, 胡佳帅, 杜月和, 张平. TiN基复合涂层硬质合金刀具的力学性能与切削性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2007, 21(2): 87-90.
CAI Zhi-hai, HU Jia-shuai, DU Yue-he, ZHANG Ping. Research on mechanics and cutting performance of hard carbide cutting tools of TiN-based composite coatings[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2007, 21(2): 87-90.
- [7] CASAS B, WIKLUND U, HOGMARK S. Adhesion and abrasive wear resistance of TiN deposited on electrical discharge machined WC-Co cemented carbides[J]. Wear, 2008, 265(3/4): 490-496.
- [8] 尹飞, 陈康华, 王社权. 基体的梯度结构对涂层硬质合金性能的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(5): 776-779.
YIN Fei, CHEN Kang-hua, WANG She-quan. Influences of functionally graded structure of substrate on performance of coated cemented carbide[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(5): 776-779.
- [9] BOUZAKIS K D, SKORDARIS G, GERARDIS S. Ambient and elevated temperature properties of TiN, TiAlN and TiSiN PVD films and their impact on the cutting performance of coated carbide tools[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(6/7): 1061-1065.
- [10] CHEN L, WANG S Q, ZHOU S Z, LI J, ZHANG Y Z. Microstructure and mechanical properties of Ti(C, N) and TiN/Ti(C, N) multilayer PVD coatings[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2008, 26(5): 456-460.
- [11] CHANGJIE F, MINGSHENG L, LI X, SHENGLONG Z, FUHUI W. Mechanical properties and oxidation behavior of a graded (Ti,Al)N coating deposited by arc-ion plating[J]. Oxidation of Metals, 2006, 65(5/6): 307-327.
- [12] STONEY G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[C]// Proceedings of the Royal Society of London. Mathematical and Physical Character A, 1909, 82: 172-175.
- [13] 黄自谦, 贺跃辉, 蔡海涛. TiAlN涂层的热残余应力分析[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(6): 897-902.
HUANG Zi-qian, HE Yue-hui, CAI Hai-tao. Thermal residual stress analysis of TiAlN coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(6): 897-902.
- [14] PALDEY S, DEEVI S C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 342: 58-79.
- [15] JONSSON B, HOGMARK S. Hardness measurements of thin films[J]. Thin Solid Films, 1984, 114(3): 257-269.
- [16] SATO K, ICHIMIYA N, KONDO A. Microstructure and mechanical properties of cathodic arc ion-plated (Al,Ti)N coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 163/164(2): 135-143.
- [17] 许香谷, 肖诗纲. 金属切削原理与刀具[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1992: 79.
XU Xiang-gu, XIAO Si-gang. Principles and tools of cutting metal[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1992: 79.

(编辑 龙怀中)