

不同后处理对 MT-TiCN 涂层刀具组织与切削性能的影响

杜丽业¹, 邱联昌^{1,2}, 杜勇¹, 钟志强^{1,2}, 史海东²

(1.中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;

2.赣州澳克泰工具技术有限公司, 江西 赣州 341000)

摘要: **目的** 研究不同后处理工艺(包括热处理、湿喷砂和刃口处理)对 MT-TiCN 涂层组织与刀片切削性能的影响。**方法** 采用中温化学气相沉积技术在硬质合金刀片上制备 TiCN 涂层;利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、纳米压痕仪分析 MT-TiCN 涂层的组织形貌、相结构、硬度和弹性模量;在 AISI 4340 合金钢上进行车削试验。**结果** MT-TiCN 涂层呈柱状晶结构,涂层沿(422)晶面方向择优生长,且织构系数达 5.5;涂层表面和断口平均硬度分别为 26.6 GPa 和 30.7~31.8 GPa,平均弹性模量分别为 528.6 GPa 和 467.7~494.4 GPa;在连续车削条件下,经湿喷砂处理的涂层刀片切削性能最佳;在低切深、低进给断续车削工况下,湿喷砂后又经热处理和刃口处理的涂层刀片使用寿命最长;湿喷砂后再进行热处理,对刀具的切削性能影响较小。**结论** 湿喷砂和热处理对 MT-TiCN 涂层组织的影响较小;不同后处理工艺对涂层刀具切削性能的影响较大,这主要是因为刃口处理会减小涂层厚度同时提高涂层韧性。

关键词: MT-TiCN; 涂层; 热处理; 湿喷砂; 刃口处理; 切削性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.016

中图分类号: TG306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0083-06

Influences of Different Post-treatments on Microstructure and Cutting Performance of MT-TiCN Coated Cutting Tool

DU Li-ye¹, QIU Lian-chang^{1,2}, DU Yong¹, ZHONG Zhi-qiang^{1,2}, SHI Hai-dong²

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

2.Ganzhou Achtech Tool Technology Co., Ltd., Ganzhou 341000, China)

ABSTRACT: The paper aims to elucidate influences of different post treatments (heat treatment, wet blasting and brushing) on microstructure and cutting performance of MT-TiCN coating. The MTCVD was adopted to prepare TiCN coatings on the carbide blade; optical microscope (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), nano-indentation tester were used for the characterization of microstructure, phase structure, hardness and elastic modulus; turning tests were applied on alloyed steel AISI 4340. MT-TiCN coating had a columnar microstructure and highly oriented at (422) plane with a texture coefficient up to 5.5; the average hardness of the surface and the cross section were 26.6 GPa and 528.6 GPa, respectively; and the average elastic modulus were 30.7~31.8 GPa and 467.7~494.4 GPa, respectively; the coated blade after wet blasting treatment had the best cutting performance under continuous cutting; the coated blade treated by the combination of heat treatment, wet blasting and brushing had the longest service life during interrupted turning under dry conditions with small depth of cut and

收稿日期: 2017-04-28

基金项目: 2015 年工业转型升级强基工程高端装备用高性能硬质合金刀具涂层技术(TC150B5C0/31)

作者简介: 杜丽业(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为 CVD 硬质涂层制备的热力学模拟和实验。

通讯作者: 杜勇(1964—),男,博士,教授,主要研究方向为相图热力学、扩散及界面反应、材料性能测定及计算模拟、材料微结构演变模拟及梯度结构涂层技术及其应用。

feed rate. The heat treatment after wet blasting had few influences on cutting performance of cutting tools. Wet blasting and heat treatment have few influences on the MT-TiCN coating. Different post treatment processes have great influences on cutting performance of coated cutting tools, because the brushing reduces the thickness and improves the toughness of t coating.

KEY WORDS: MT-TiCN; coating; heat treatment; wet blasting; brushing; cutting performance

化学气相沉积技术的历史可追溯至 19 世纪 80 年代, SAWYER 和 MAN 为了增加灯丝的使用寿命,把碳和金属沉积到灯丝表面。进入 20 世纪 30 年代, MOERS 开启了对硬质材料表面涂覆 TiC 涂层的研究^[1]。在 1970 年之后, TiC 涂层技术发展才足够成熟,可用于硬质合金工具的工业化涂层中^[2]。经过一百多年的发展,化学气相沉积已经成为一种比较成熟的技术,多种涂层得到研究和应用,其中 TiCN 涂层作为硬质合金刀具改性涂层,一直是人们关注的重点^[3-7]。化学气相沉积 TiCN 是一种典型的硬质合金刀具涂层,具有高硬度、高韧性以及良好的粘附性等各种优良性能^[8]。最先发展起来的是高温 TiCN(HT-TiCN)涂层,一般是由 $\text{TiCl}_4\text{-CH}_4\text{-N}_2\text{-H}_2$ 作为反应气体,在 950~1050 °C 沉积得到;随着 TiCN 涂层技术的不断发展,到 20 世纪 90 年代中期,出现了中温化学气相沉积(MT-CVD)技术,使 CVD 技术发生了革命性的变革。MT-CVD 技术是以 CH_3CN , $\text{CH}_3(\text{NH})_2\text{CH}_3$, $(\text{CH}_3)_3\text{N}$, HCN 等含有 C/N 原子团的有机物作为反应气体,代替 N_2 和 CH_4 来提供 C 源和 N 源,与 TiCl_4 , H_2 , N_2 在 700~900 °C 以下发生一系列分解、化合等沉积反应,生成 TiCN 涂层的一种工艺方法,这种 $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ 涂层方法可以有效控制 η 脆性相 ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$) 的生成。与采用 HT-CVD 方法得到的 $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ 相比,MT-CVD 沉积的 $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ 涂层更加致密、并呈柱状结晶,涂层具有更高的耐磨损性、抗热震性能及韧性。影响涂层性能的主要因素有 2 个,一方面是 TiCN 涂层中 C 和 N 的含量^[9-10],KARLSSON 等指出,随着 $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ 中 x 值由 0.4 增加到 0.7,涂层硬度也会随之提高;另一方面是涂层的显微结构和织构取向,柱状晶结构可以使涂层在剧烈的载荷作用下,通过颗粒间的剪切滑移,降低应力集中,从而提高涂层的抗磨损性能。有研究指出,蓝宝石单晶的棱柱和棱锥平面的磨损率显著低于基面,这类似于织构对涂层抗磨损性能的影响^[11-12]。

目前,调整 MT-TiCN 涂层性能的研究主要集中在降低晶粒尺寸,优化涂层的碳氮比,控制涂层显微结构以及元素掺杂,而后处理工艺对 MT-TiCN 涂层刀片性能的研究较少。文中采用商用化学气相沉积设备,在硬质合金刀片上沉积了 MT-TiCN 涂层,涂层后对刀片进行热处理、湿喷砂和刃口处理,最后对涂层刀具进行切削实验,研究不同后处理工艺对 MT-TiCN 涂层刀具切削性能的影响。

1 实验

使用商用热壁 CVD 涂层炉,在硬质合金(WC-10 Co-3.5Ta(Nb)C)刀片基体上,以 $\text{TiCl}_4\text{-CH}_3\text{CN-H}_2$ 为前驱体制备了 MT-TiCN 涂层。涂层前,刀片经过湿喷砂和超声波清洗前处理。为提高基体与涂层之间的结合强度,首先在基体上沉积厚度为 0.3~0.5 μm 的 TiN 作为结合层^[13],随后沉积厚度约为 25 μm 的 MT-TiCN 涂层。采用光学显微镜(Olympus)测量涂层的厚度并观察涂层在刃口处的均匀性,使用扫描电子显微镜(SEM, Zeiss, SUPAR 55)观察涂层表面和断口形貌,使用 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku D-max 2500)检测涂层的相结构,采用纳米压痕仪(Anton Paar, TTX-NHT²)测量涂层表面和断口的硬度。

全部刀片涂层后,首先使用 220—400 目刚玉砂子进行湿喷砂处理,然后依据是否进行了热处理和刃口处理分为 1[#], 2[#], 3[#] 样品,其中 1[#] 样品进行了热处理,2[#] 样品进行了热处理和刃口处理,3[#] 样品则未进行其他后处理。热处理温度为 1050 °C,压强为 75 Pa,保温时长为 5 h;刃口处理采用 320 目、质量分数为 30% 的 SiC 刷涂刷。为了研究不同后处理对切削性能的影响,以 AISI 4340 合金钢为切削材料,采用不同的切削参数(见表 1)进行了车削实验。在切削实验前,采用 3D 轮廓仪(Alicona)检测了不同后处理的涂层刀片刃口值。

表 1 车削实验工艺参数
Tab.1 Turning test conditions

参数		切削速度 /(m·min ⁻¹)	每转进给 /mm	切削深度 /mm	冷却液
连续	Test1	260	0.28	2	是
	Test2	370	0.40	1.6	是
	Test3	180	0.30	2	是
断续	Test4	240	0.25	1	否
	Test5	260	0.18	1.6	是

2 结果与讨论

2.1 涂层结构

2.1.1 表面和断口形貌

MT-TiCN 涂层表面晶粒近似等轴状(见图 1a),

长轴约为 $2.5\ \mu\text{m}$, 短轴约为 $2.0\ \mu\text{m}$ 。涂层断口形貌见图 1b, MT-TiCN 涂层呈柱状生长, 从 TiN 表面开始贯穿整个涂层, 柱状晶宽度随涂层厚度增加而增大。晶粒尺寸和形状与文献^[5]中的非等轴晶、平均长轴 $1\ \mu\text{m}$ 、短轴 $250\ \text{nm}$ 略有不同。这可能是由于实验中制备的 TiCN 较厚($25\ \mu\text{m}$)、沉积时间较长^[14]。此外, 在涂层表面存在裂纹, 这是由于冷却过程中涂层与基体的热膨胀系数不同。

经湿喷砂处理后, 涂层表面光滑、裂纹闭合(见图 2a), 但涂层厚度减小了约 $2\ \mu\text{m}$ (见图 2b)。除厚度减小外, 湿喷砂处理后的涂层断口形貌与未处理的断口类似, 这表明湿喷砂后处理对涂层的影响仅限于表面几微米的范围内。湿喷砂是一种基于表面冲击处理的精加工工艺, 一般来讲, 湿喷砂用于对涂层表面进行清洁、平滑处理以及对锋利的切削刃进行钝化^[15]。

MT-TiCN 涂层刀片刃口金相组织见图 3, 涂层沿切削刃分布均匀, 且基体和涂层之间没有 η 相($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$)的存在。实验中沉积速率为 $1.34\ \mu\text{m}/\text{h}$, 低于文献^[10]的 $2.0\sim 2.2\ \mu\text{m}/\text{h}$, 这可能是由于实验中的沉积温度相对较低。沉积速率的影响因素较多, 如沉积炉的结构、装炉量、样品摆放位置、沉积工艺参数等。

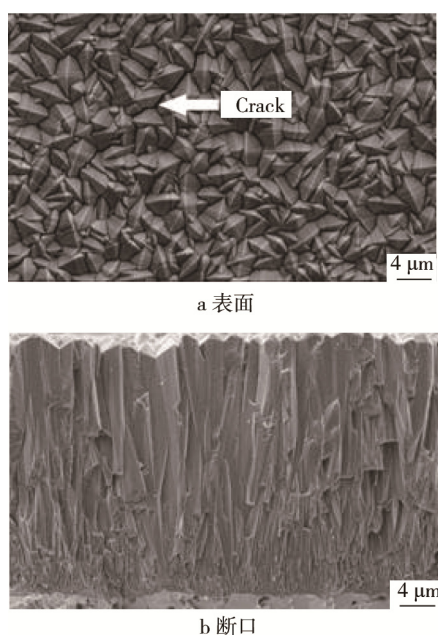


图 1 MT-TiCN 涂层后表面和断口形貌
Fig.1 Morphology of MT-TiCN coating as deposited

2.1.2 涂层织构和晶粒尺寸

MT-TiCN 涂层的 XRD 分析结果见图 4, 其中 a 区域和 b 区域是未经后处理和经过热处理的 MT-TiCN 涂层的 XRD 图谱。涂层沿(422)晶面方向择优取向生长, 织构系数见式(1)。

$$T_{C(hkl)} = \frac{I_{m(hkl)} / I_{0(hkl)}}{(1/n) \sum_{i=0}^n I_{m(hkl)} / I_{0(hkl)}} \quad (1)$$

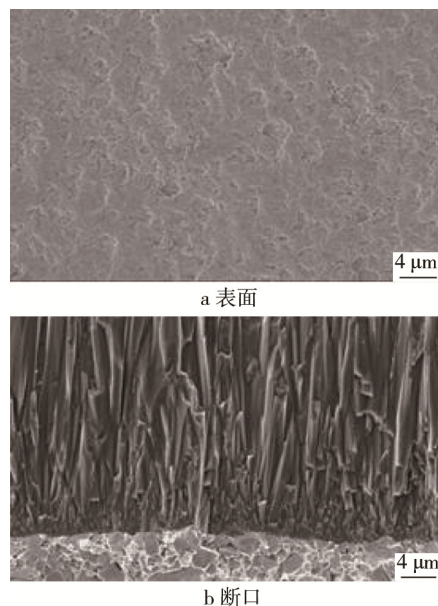


图 2 湿喷砂处理后 MT-TiCN 涂层形貌
Fig.2 Morphology of MT-TiCN coating after wet blasting

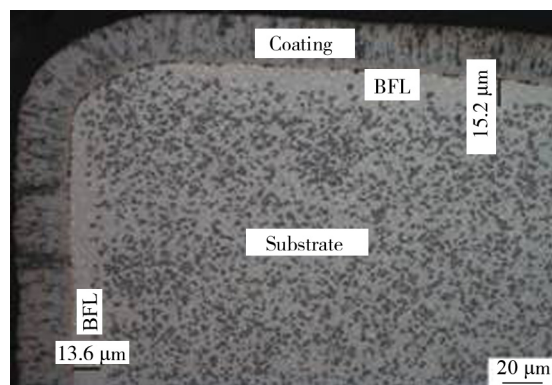


图 3 MT-TiCN 涂层刀片刃口金相组织
Fig.3 Metallographic structure of MTCVD TiCN coating on the cutting edge

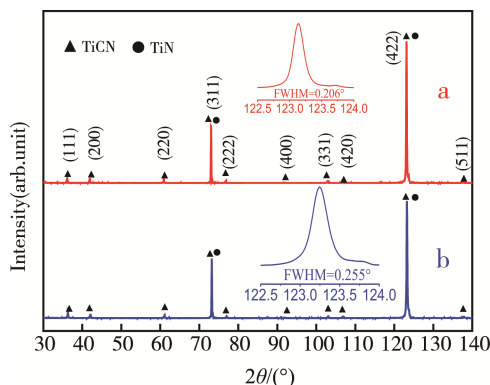


图 4 MT-TiCN 涂层 XRD 图谱及(422)方向放大
Fig.4 XRD patterns and enlarged views of (422) plane for MTCVD TiCN coatings

式中： $I_m(hkl)$ 表示测量强度， $I_{0(hkl)}$ 为 PDF 卡片(JCPDF 42-1489)所记录的标准粉末衍射强度； n 表示衍射峰数量。其中， (hkl) 取(111), (200), (220), (311), (331), (420), (422)和(511)，未经后处理的刀具织构系数分别为 0.07, 0.02, 0.08, 1.99, 0.17, 0.06, 5.54, 0.07，经热处理后的刀具织构系数分别为 0.09, 0.03, 0.07, 2.34, 0.17, 0.06, 5.17, 0.07。由此可知，未经后处理和经过热处理的样品织构系数差别较小，(422)方向的织构系数都较高，分别为 5.54 和 5.17。这表明实验条件下的热处理不会影响涂层的择优取向。据 LARSSON^[5]等的报道，由于极性的反应产物主要粘附于高极性的{111}晶面族，促进了非极性{002}面的快速生长，最终使得涂层沿(422)晶面择优取向生长。对于柱状晶结构的 MT-TiCN，沿(422)方向择优生长，使涂层具有更高的韧性和抗剥落性。

MT-TiCN 涂层晶粒尺寸的计算根据 Scherrer 方程，(422)方向衍射峰的最大半高宽的计算见式(2)。

$$D_{(422)} = \frac{K\lambda}{B \cos \theta} \tag{2}$$

式中： $D_{(422)}$ 表示取向为(422)的平均晶粒尺寸； K 为形状因子； λ 为 X 射线的波长； B 为(422)峰的最大半高宽值； θ 为布拉格角。

从图4可以看出,经过热处理后,MT-TiCN的(422)衍射峰会略有宽化(约为 0.049°)。根据式(2)计算得到，未经后处理和经热处理的 MT-TiCN 晶粒尺寸分别为 79.5 和 65.6 nm,这表明热处理有助于细化晶粒。

2.1.3 涂层刀片刃口曲线

刀片刃口曲线示意图5，其中 R 为刃口半径， S_a 和 S_r 分别代表前刀面和侧面切线垂直线的交点到前刀面和侧面之间的距离。 k 是刀片刃口的形状因子，其值等于 S_r 与 S_a 之比。

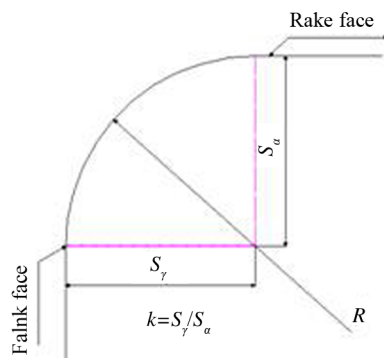


图5 经后处理后的切削刃和轮廓
Fig.5 Schematic of treated cutting edge and profile.

不同后处理工艺刀片的刃口曲线测量结果见表2。可知，1#样品和3#样品的 S_a 和 S_r 值比较接近，而2#样品的 S_a 和 S_r 值则较大。比较3个样品的后处理工艺可以看出，这是由于2#样品经过刃口处理。虽然刃口处理

可以提高刀具韧性，并使刃口更为光滑，但会使涂层厚度减小(从 25 μm 减小到 11.9 μm ，见图6)。

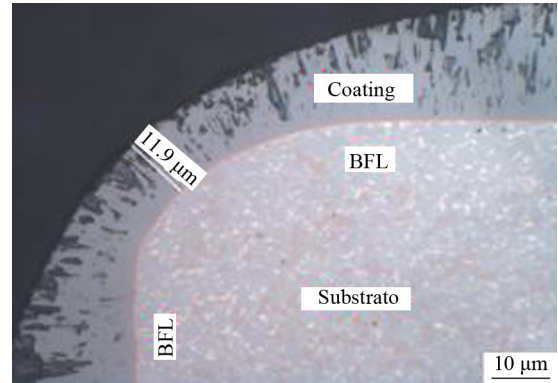


图6 经刃口处理后的涂层厚度
Fig.6 Coating thickness after brushing on the cutting edge

表2 不同后处理工艺刀片刃口曲线
Tab.2 Edge profile for coated inserts with different post-treatment

样品编号	$R/\mu\text{m}$	$S_a/\mu\text{m}$	$S_r/\mu\text{m}$	K
1#	68.76	68.73	95.76	1.39
2#	93.08	98.47	104.11	1.06
3#	59.02	65.84	67.73	1.12

2.2 未后处理涂层硬度与弹性模量

未后处理的涂层断口、表面硬度和弹性模量的检测结果见图7。相应的纳米压痕位置见图8，包括断口4个截面以及表面(截面分别标为1—4)。其中截面1—4的硬度分别为31.4, 31.8, 31.0, 30.7 GPa。可以看出，从截面2到表面，涂层的硬度不断降低，尤其是涂层表面，其硬度显著低于其他各截面。结合图1b可知，这是由于柱状晶的晶粒度不断增大。而截面1硬度则略低于截面2，原因是截面1与硬度较低的基体邻近，从而受到基体的影响。MT-TiCN 的涂层硬度影响因素主要有碳含量、晶粒度、残余应力等。

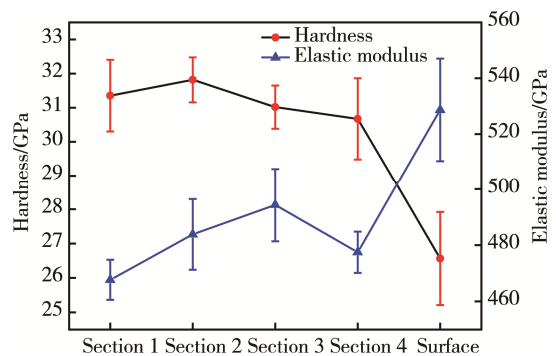


图7 未后处理涂层断口、表面硬度和弹性模量
Fig.7 Hardness and elastic modulus of MT-TiCN coating as deposited on cross sections and surface

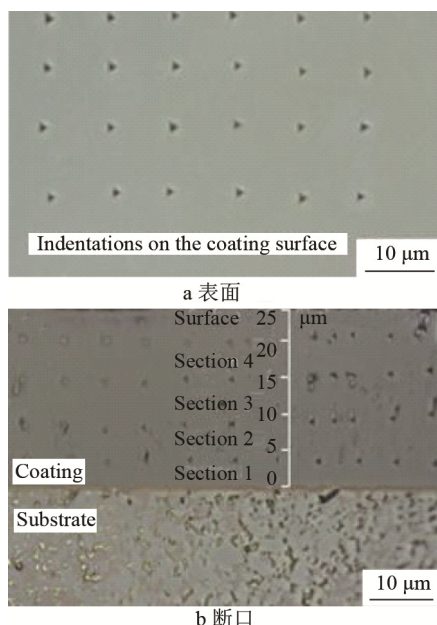


图8 涂层表面、断口的纳米压痕测试位置
Fig.8 Nano-indentations measured on coating surface and different cross sections

截面1—4与表面的弹性模量分别为467.7, 483.8, 494.4, 477.5, 528.6 GPa, 涂层表面的弹性模量显著高于横截面。对于单晶而言, 其弹性模量存在各向异性, 并且沿密排面方向最大。涂层横截面和表面之间弹性模量的较大差异, 可能是由于涂层为具有典型择优取向的柱状晶结构。

2.3 切削性能

2.3.1 连续车削

在连续车削 AISI 4340 合金钢时, 对经过不同后处理涂层刀片的使用寿命进行了测试, 测试条件分为中速连续切削和高速连续切削2种。测试结果见图9。3#样品(湿喷砂后处理)在中速切削和高速切削中的使用寿命都最长, 而2#样品(湿喷砂+热处理+刃口处理)的使用寿命最短。在连续切削过程中涂层越厚, 刀具的抗磨损性能越好, 刃口处理会减小涂层厚度。1#样品(湿喷砂+热处理)的使用寿命虽然高于2#样品, 但是显著低于3#样品。由表2可知, 热处理对涂层(422)方向的织构系数影响很小, 所以造成1#样品和3#样品使用寿命差异的原因主要在于, 1#样品刃口处理尺寸(R , S_a , S_y)略高于3#样品(见表2), 这会导致加工过程中切削应力较大, 进而加剧刀具磨损。涂层厚度和刃口曲线是影响连续湿式车削的主要因素^[16]。

2.3.2 断续车削

在断续车削 AISI 4340 合金钢时, 对经过不同后处理涂层刀片的使用寿命进行了测试, 测试条件为干式车削和湿式车削。测试结果见图10。

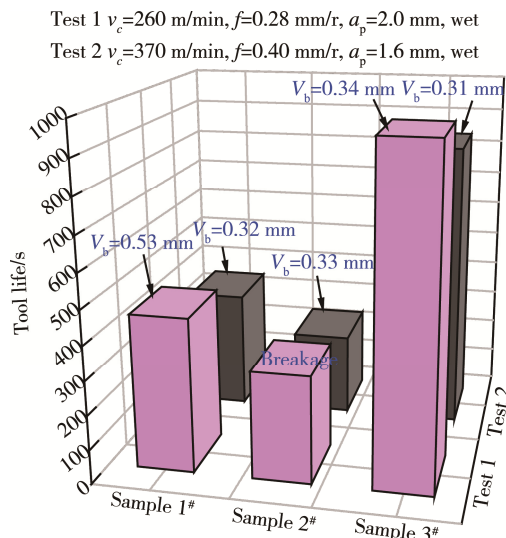


图9 不同后处理样品连续车削使用寿命
Fig.9 Tool life of different samples during continuous turning operation

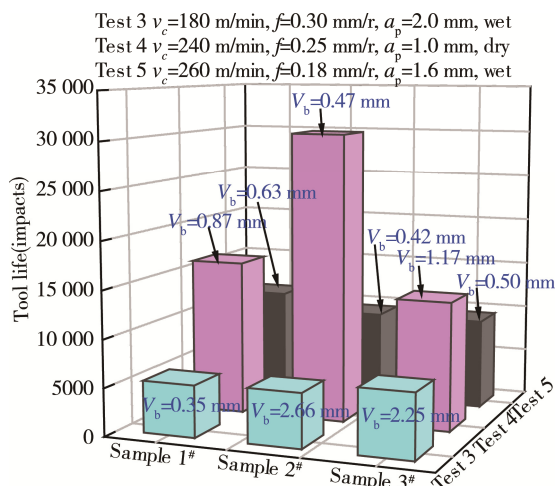


图10 不同后处理样品断续车削使用寿命
Fig.10 Tool life of different samples during interrupted turning operation

2#号样品在干式断续车削时的使用寿命最长, 在切削深度较小的干式断续车削中, 涂层刀片韧性是影响切削寿命的主要因素。有研究指出^[17], 当 MT-TiCN 涂层的厚度超过 20 μm , 刀片刃口容易崩裂; 而2#样品刃口的涂层厚度最低, 具有最高的韧性。

由图10可知, 在湿式车削过程中, 3种样品的使用寿命相差不大, 而样品在干式车削时的使用寿命长于湿式车削。这是因为涂层刀片在断续湿式车削时, 处于反复加热和冷却条件下, 容易在涂层中产生热裂纹, 从而降低涂层之间以及涂层与基体之间的结合力, 进一步导致刀片刃口处涂层剥落, 刀具的抗磨损性能显著降低。2#样品由于刃口处涂层厚度最小, 有利于降低车削过程中产生的热应力, 所以在断续干式车削中表现出更好的切削性能。

3 结论

使用 CVD 方法以 $\text{TiCl}_4\text{-CH}_3\text{CN-H}_2$ 为前驱体制备了 MT-TiCN 涂层, 利用光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、纳米压痕仪分析了涂层的显微结构、硬度和弹性模量, 探究了涂层后湿喷砂、热处理和刃口处理对涂层切削性能的影响, 从而得出以下结论。

1) MT-TiCN 为柱状晶结构, 具有(422)方向的择优取向, 且织构系数高达 5.54。涂层断口和表面处的平均硬度分别为 30.7~31.8 GPa 和 26.6 GPa, 平均弹性模量分别为 467.7~494.4 GPa 和 528.6 GPa。

2) 热处理对涂层的晶粒大小和刀片切削性能影响较小。

3) 经湿喷砂处理后的刀片在 AISI 4340 合金钢的连续湿式车削中使用寿命最长。

4) 经热处理+湿喷砂+刃口处理的涂层刀片, 在断续干式车削中使用寿命最长, 而在断续湿式车削过程中, 不同后处理的涂层刀片使用寿命相当。

参考文献:

- [1] SAWYER W E, MAN A. Pyrolytic Carbon: US, 22933529[P]. 1880.
- [2] HAUBNER R. The History of Hard CVD Coatings for Tool Applications at the University of Technology Vienna[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2013, 41(3): 22—34.
- [3] FIGUEIREDO M R D, MURATORE C, FRANZ R, et al. In Situ Studies of $\text{TiC}_{1-x}\text{N}_x$ Hard Coating Tribology[J]. Tribology Letters, 2010, 40(3): 365—373.
- [4] YASUOKA M, WANG P, MURAKAMI R I. Comparison of the Mechanical Performance of Cutting Tools Coated by either a $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$, Single-layer or a $\text{TiC}/\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}/\text{TiN}$ Multilayer Using the Hollow Cathode Discharge Ion Plating Method[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2168—2172.
- [5] LARSSON A, RUPPI S. Microstructure and Properties of $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ Coatings Produced by Moderate Temperature Chemical Vapour Deposition[J]. Thin Solid Films, 2002, 402(1/2): 203—210.
- [6] PASEUTH A, FUKUI H, YAMAGATA K. Improvement of Mechanical Properties and Cutting Performance of Modified MT- $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ Coating by Moderate Temperature Chemical Vapor Deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 291: 54—61.
- [7] 覃正海, 鲜广, 赵海波, 等. 切削刀具表面 TiCN 涂层的研究现状与发展[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 125—133.
- [8] BULL S J, BHAT D G, STAIA M H. Properties and Performance of Commercial TiCN Coatings, Part 1: Coating Architecture and Hardness Modelling[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, S163/164(2): 499—506.
- [9] 李银成, 闫少健, 韩滨, 等. 碳含量对 TiCN 涂层的结构和力学性能的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2015, 61(5): 445—448.
- [10] LI Yin-cheng, YAN Shao-jian, HAN Bin, et al. Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of TiCN Coating[J]. Journal of Wuhan University (Science Edition), 2015, 61(5): 445—448.
- [11] PASEUTH A, FUKUI H, OKUNO S, et al. Microstructure, Mechanical Properties, and Cutting Performance of $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ Coatings with Various x, Values Fabricated by Moderate Temperature Chemical Vapor Deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 260: 139—147.
- [12] 孔德军, 王进春, 郭皓元, 等. 阴极弧离子镀 TiCN 涂层的 SEM-EDS 面扫描与线扫描分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2015(12): 3000—3004.
- [13] KONG De-jun, WANG Jin-chun, GUO Hao-yuan, et al. Plane Scan and Line Scan Analysis of TiCN Coatings by Cathodic Arc Ion Plating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015(12): 3000—3004.
- [14] 孙华亮. 基于计算机仿真的涂层刀具切削性能研究[D]. 机械科学研究总院, 2013.
- [15] SUN Hua-liang. Research on Cutting Performance of Coated Tools Based on Computer Simulation[D]. China Academy of Machinery Science, 2013.
- [16] 赵嫚, 王少龙, 江南, 等. TiN 层微观结构对 CVD TiC-TiCN-TiN 多层涂层耐磨性能的影响[J]. 材料导报, 2016, 30(10): 51—56.
- [17] ZHAO Man, WANG Shao-long, JIANG Nan, et al. Effect of Microstructure of TiN Layer on the Wear Resistance of CVD TiC-TiCN-TiN Multilayer Coating[J]. Materials Review, 2016, 30(10): 51—56.
- [18] 姜波, 严宏志, 王社权, 等. $\text{TiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层厚度对刀片切削性能的影响及其磨损机理研究[J]. 硬质合金, 2015, 32(3): 188—195.
- [19] JIANG Bo, YAN Hong-zhi, WANG She-quan, et al. The Effects of Thick $\text{TiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Coating on Cutting Performance of Blade and Its Wear Mechanisms[J]. Cemented Carbide, 2015, 32(3): 188—195.
- [20] BARBATTI C, GARCIA J, PITONAK R, et al. Influence of Micro-blasting on the Microstructure and Residual Stresses of CVD $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(24): 3708—3717.
- [21] DENKENA B, KÖHLER J, BREIDENSTEIN B, et al. Influence of the Cutting Edge Preparation Method on Characteristics and Performance of PVD Coated Carbide Inserts in Hard Turning[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 254(10): 447—454.
- [22] WATANABE J. Substrate, Method of Polishing the Same and Polishing Apparatus: US, 8008203[P]. 2011.
- [23] Deposited on Cutting Tools[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 125—133.