

高温渗碳对硬质合金涂层刀具高温力学性能 及干式切削性能的影响

谭君国, 李季飞, 叶谱生, 张腾飞, 王启民

(广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006)

摘要: **目的** 探究硬质合金基体渗碳处理对涂层刀具高温元素扩散、高温力学性能和切削性能的影响。**方法** 通过高温渗碳和 PVD 方法制备了渗碳涂层刀具。采用 SEM 观察渗碳前后基体的表面形貌。采用维氏硬度计表征渗碳硬质合金基体截面的硬度分布。采用 EDS 对基体截面进行成分分析。采用 XRD 对涂层进行物相分析。利用纳米压痕仪对涂层高温退火硬度、弹性模量进行了表征。选用 SKD-11 冷作模具钢进行了干式切削实验。**结果** 经过渗碳处理后, 硬质合金车刀基体形成了表面层贫 Co、近表面层富 Co 的梯度结构, 在距基体表面 0~900 μm 的深度范围内, 基体硬度呈现梯度变化。高温下, 在均质硬质合金基体上沉积的涂层中检测到 Co 元素, 而渗碳硬质合金基体的涂层中未检测到明显的 Co 元素。在沉积态、800 $^{\circ}\text{C}$ 真空退火和 1100 $^{\circ}\text{C}$ 真空退火 3 种条件下, 渗碳涂层车刀的硬度 (分别为 33、32、22.5 GPa) 均高于均质硬质合金涂层车刀 (分别为 31、30、18.5 GPa)。均质硬质合金裸刀的车削长度为~80 m 时达到磨钝标准, 渗碳涂层车刀的车削长度为~1100 m 时达到磨钝标准。**结论** 渗碳处理显著抑制了硬质合金基体中的 Co 在高温下向涂层内部扩散, 增强了涂层高温稳定性, 使得涂层在高温下仍能维持较高的力学性能, 同时显著改善了涂层刀具的干式车削寿命。

关键词: 刀具涂层; 硬质合金渗碳; 力学性能; 切削性能

中图分类号: TG156.8; TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)03-0271-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.03.029

Effect of High Temperature Carburizing on High Temperature Mechanical Properties and Dry Cutting Performance of Carbide Coated Tools

TAN Jun-guo, LI Ji-fei, YE Pu-sheng, ZHANG Teng-fei, WANG Qi-min

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: This paper aims to investigate the effect of carburizing treatment of cemented carbide substrates on the

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-08-29

Received: 2021-05-21; **Revised:** 2021-08-29

作者简介: 谭君国 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 PVD 硬质涂层。

Biography: TAN Jun-guo (1995—), Male, Postgraduate, Research focus: PVD hard coating.

通讯作者: 张腾飞 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为多功能纳米多层/复合硬质涂层、类金刚石薄膜、MAX 相薄膜。

Corresponding author: ZHANG Teng-fei (1986—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: multifunctional nano-multilayer/nano-composite hard coating, DLC film, MAX phase film.

通讯作者: 王启民 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为硬质涂层、高温防护涂层和新型硬质功能薄膜。

Corresponding author: WANG Qi-min (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: hard coating, high temperature protective coating, new hard functional film.

引文格式: 谭君国, 李季飞, 叶谱生, 等. 高温渗碳对硬质合金涂层刀具高温力学性能及干式切削性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 271-277.

TAN Jun-guo, LI Ji-fei, YE Pu-sheng, et al. Effect of High Temperature Carburizing on High Temperature Mechanical Properties and Dry Cutting Performance of Carbide Coated Tools[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 271-277.

high-temperature element diffusion, high-temperature mechanical properties and cutting performance of coating tools, carburized and coated tools were prepared by high temperature carburizing and PVD method. SEM was used to observe the surface morphology of the substrate before and after carburizing, Vickers hardness and EDS was used to characterize the hardness distribution and composition of the substrate cross-section of the carburized cemented carbide, respectively. XRD was used to analyze the phase of the coating. The coating hardness and elastic modulus of the coating annealed at high temperature were characterized by nano-indentation, and the dry cutting experiments were carried out with SKD-11 cold work die steel. The experimental results show that, after carburizing treatment, the cemented carbide turning tool substrate formed a gradient structure of Co-poor top-surface layer and Co-rich near-surface layer, in the depth range of 0~900 μm from the substrate surface, the hardness of the substrate changed in a gradient. At high temperatures, Co element was detected in the coating of homogeneous cemented carbide substrate, but no obvious Co element was detected in the coating deposited on carburized cemented carbide substrate. The hardness of carburized turning tool (33 GPa, 32 GPa and 22.5 GPa, respectively) was higher than that of the homogeneous carbide-coated turning tool (31 GPa, 30 GPa and 18.5 GPa, respectively) at the deposition state, 800 $^{\circ}\text{C}$ and 1100 $^{\circ}\text{C}$. When the length of turning was $\sim 80\text{ m}$, the uniform carbide bare tool reached the blunt standard, and the carburized coating turning tool reached the blunt standard at $\sim 1100\text{ m}$. In conclusion, the carburizing treatment significantly inhibited the diffusion of Co in the cemented carbide substrate into the coating at high temperature, enhanced the coating stability at high temperature, made the coating still maintain high mechanical properties at high temperature, and significantly improved the dry turning life of the coated tool.

KEY WORDS: tool coating; carburization of cemented carbide; mechanical properties; cutting performance

硬质合金由于其高硬度和高耐磨性,被广泛应用于制造业中的切削刀具材料^[1]。随着现代先进制造业对切削效率和切削质量的要求不断提高,单一硬质合金刀具已越来越难以满足需求。在刀具表面镀覆一层高硬、耐磨的涂层,能有效延长刀具切削使役寿命,提高加工效率和质量。TiAlN 涂层具有硬度高、耐磨性好等优点,是目前工业应用的主流刀具涂层,尤其适用于切削不锈钢、钛合金、镍基合金等材料^[2]。

硬质合金通常由 WC 硬质相和 Co 粘结相组成。Co 粘结相对涂层高温稳定性和涂层刀具的使役寿命具有显著影响。Wu 等人^[3]和耿东森等人^[4]发现硬质合金刀具基体中的 Co 组元在高温下会向外扩散至涂层内部,导致涂层硬度及抗氧化性急剧降低,进而导致涂层刀具快速失效。桑远洋等人^[5]研究了硬质合金基体成分对 TiSiN/TiAlSiN/AlTiN 涂层膜基结合力的影响,发现随着硬质合金中 Co 含量的减少,涂层结合力显著增强。李之旭等人^[6]和刘萍等人^[7]在不同 Co 含量的硬质合金基体表面沉积涂层,发现涂层/基体界面处高温元素扩散会影响涂层结构,进而影响涂层的硬度和耐磨性。

为了抑制硬质合金基体中的 Co 向涂层扩散,可以通过两种方式进行改善:一种是通过化学脱钴法、等离子体(金属阳离子)刻蚀法^[8-9]等对基体表面进行预处理,降低基体表面的 Co 含量,改善涂层初期的生长方式^[10];另一种是添加过渡层,在基体与涂层之间预镀 Ti、Cr 等金属中间层,增大结合力,减小涂层与基体的内应力,同时阻碍 Co 向涂层扩散。然而上述抑制 Co 扩散的方法都具有一定的局限性。化学脱钴法虽然可以去除硬质合金表层的 Co,但也会

造成基体表层结构疏松,在沉积涂层后易引起涂层开裂失效^[11]。等离子体刻蚀法仅能去除硬质合金基体浅表层的 Co,且不适于处理形状复杂的基体^[12-13]。在硬质合金基体上预镀中间层可以获得表面不含钴的新表面层,但是中间层厚度较小,对抑制高温 Co 扩散的效果有限,长期高温服役条件下,硬质合金基体中的 Co 仍会向涂层扩散,造成涂层失效。硬质合金的表面渗碳或渗氮强化可以获得表层贫 Co 的梯度结构,而且这种表层贫 Co 且近表层富 Co 的特殊结构,既能提高表层的耐磨性,又保持了整体的韧性^[14]。

干式切削为在无冷却液条件下进行切削加工。干式切削加工过程中的热量累积造成涂层刀具持续处于高温工况下,因此研究涂层刀具在高温下的结构、性能演变,对实现高的刀具耐用度具有实际意义。目前对于硬质合金刀具涂层的报道主要集中在硬质合金成分的选择和涂层制备的优化,而基体渗碳处理对高温 Co 扩散以及对涂层高温力学性能和切削性能的影响还鲜有报道。因此,本文通过表面渗碳的方法获得具有表面贫 Co 近表层富 Co 的梯度结构的硬质合金车刀,并在其表面沉积 TiAlN 涂层,研究涂层刀具高温元素扩散、高温力学性能和切削性能,为提高涂层刀具使役寿命提供一种新的思路和方法。

1 试验

1.1 硬质合金渗碳及 TiAlN 涂层沉积

选用牌号为 TNMG160404-MA 的车刀作为渗碳和镀膜基体,外形为三角形,刀尖圆弧半径为 0.4 mm。

车刀基体成分见表 1。将车刀装入密闭的渗碳炉中，将炉内温度加热到 1320 ℃，通入 H₂ 和 CH₄ 的混合气体（V(H₂): V(CH₄)=100:2），保持 45 min，随炉冷却后取出，即得到渗碳硬质合金刀具。

表 1 基体元素成分
Tab.1 Chemical composition of the substrate wt. %

W	C	Co
82.01	8.49	9.50

采用自主研发的脉冲电弧复合离子镀设备（MC800）沉积 TiAlN 涂层。将车刀样品分别放入丙酮和无水乙醇溶液中进行超声清洗 15 min，吹干、擦拭样品并送入真空腔室。将真空腔室升温至 350 ℃，抽真空至 5.0×10⁻³ Pa，向腔室通入 300 mL/min 的 Ar 气，调节工作偏压至-1000 V，辉光清洗 30 min。之后向真空室通入 300 mL/min 的 N₂ 气，调节腔压至 1.2 Pa，调整偏压至-90 V，点燃 Cr 靶，电流设置为 80 A，沉积 CrN 过渡层 20 min。随后向真空室通入 300 mL/min 的 N₂ 气，调节真空室腔压至 1.2 Pa，点燃 Ti₅₀Al₅₀ 靶，弧电源电流设置为 80 A，沉积 TiAlN 功能层 60 min，沉积工序结束后随炉冷却，即在表面贫 Co 硬质合金基体上获得 TiAlN 涂层。沉积参数及涂层成分见表 2。

表 2 TiAlN 涂层的沉积参数和元素成分
Tab.2 Deposition parameters and composition of the TiAlN coating

Parameters	DC Etching	CrN interlayer	TiAlN
Time/min	45	40	210
Pressure/Pa	0.6	1.2	1.2
N ₂ /(mL·min ⁻¹)	0	250	250
Ar/(mL·min ⁻¹)	150	200	200
Kr/(mL·min ⁻¹)	100	0	0
Bias voltage/V	-200	-90	-90
Target		Cr	TiAl
Current/A		80	80
Ti/at. %			22.8
Al/at. %			20.4
N/at. %			56.8

1.2 成分结构表征、力学性能和切削性能测试

利用 Nova NanoSEM 430 型场发射扫描电子显微镜（SEM）观察渗碳硬质合金车刀的表面形貌，加速电压为 10 kV，用 SEM 所配备的 EDX（Oxford instruments X-MaxN）检测车刀基体表面硬化层的钴含量分布情况。采用 HVS-30Z 数显自动转塔维氏硬度计，在 2.5 kg 载荷下，测量车刀渗碳截面距表面 0~900 μm 范围内的硬度分布。利用 BRUKER D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪分别对车刀、渗碳车刀、涂层车刀和渗碳涂层车刀进行 XRD 分析，X 射线发

射源为 Cu Kα 光源，扫描速度为 0.02 (°)/s，步长为 0.01°，扫描范围为 25°~90°。采用 TYQH-48 型高真空高温钎焊炉，对涂层车刀分别进行 800 ℃保温 2 h 和 1100 ℃保温 0.5 h 的真空退火处理。退火处理完成后，采用 Anton Paar TTX-NHT² 纳米压痕仪，对未退火的样品和经过退火处理的样品进行力学性能测试，载荷为 10 mN，保载时间 10 s，每个样品测量 15 个点并取平均值。采用 GSK980TDb 的 CNC 数控车床，分别将车刀、渗碳车刀、未渗碳涂层车刀和渗碳涂层车刀装入型号为 MTJNL2525M16 的刀柄，然后将刀柄固定至数控车床刀架上，使用三爪卡盘将待加工棒料卡紧，进行外圆干式车削实验。切削参数为：切削速度 V_c=250 m/min，进给量 F_n=0.1 mm/r，背吃刀量 a_p=0.5 mm。被加工材料为 SKD-11 冷作模具钢圆柱形棒料，尺寸为 φ100 mm×150 mm。采用 OLYMPUS SZ61 体视显微镜观察并测量车刀后刀面的磨损量，将后刀面磨损 300 μm 作为磨钝标准来评价车刀的切削性能。

2 结果与讨论

2.1 硬质合金表面形貌和截面元素、硬度分布

图 1 为渗碳处理前后硬质合金车刀表面的 SEM 形貌。经过高温渗碳处理后，车刀基体表面由于缺少 Co 粘结相来填充硬质合金的孔隙而导致表面致密程度降低，同时渗碳处理时的高温环境以及 C 的富集导致 WC 晶粒长大。图 1c 为渗碳车刀截面 C、Co 含量的 EDS 结果，发现在渗碳车刀基体表面（0 μm）至基体内部距表面深度为 1000 μm 的范围内，渗碳车刀表面 Co 含量比该车刀标准 Co 含量低 34%~46%，形成了表面层贫 Co 而临近表面层相对富 Co 的梯度结构。

对硬质合金车刀基体进行渗碳处理时，渗碳介质分解形成了活性 C 原子，合金表面活性 C 原子浓度高，芯部低，形成了由表面到芯部的碳浓度梯度分布。在 1320 ℃的高温下，C 原子与 W 原子的亲和力较大，在碳浓度梯度的作用下，硬质合金中 η 相分解出的 W 原子开始向表层迁移并与 C 原子结合形成 WC，引起表层的 WC 含量增加，并在表层 WC 颗粒上结晶生长使 WC 晶粒长大。W 原子向合金表面迁移留下的体积缺陷被液相 Co 所填补，在随后的冷却过程中，这种 Co 含量梯度被保存下来，从而形成表面层贫 Co 而近表面层富 Co 的梯度结构^[15-17]。

图 1d 为渗碳车刀截面硬度分布情况，在从渗碳车刀基体表面（0 μm）至基体内部距表面深度为 900 μm 的范围内，硬度从 1780HV 线性下降至 1625HV，这与渗碳后 Co 元素分布的结果相对应。硬质合金的硬度与 WC 和 Co 的含量有关^[18-20]，Co 为韧性相，WC 为硬质相，渗碳表层 Co 含量减少，刀具表层硬度得到增强，且渗碳刀具表面硬度高于未渗碳处理的车刀硬度。

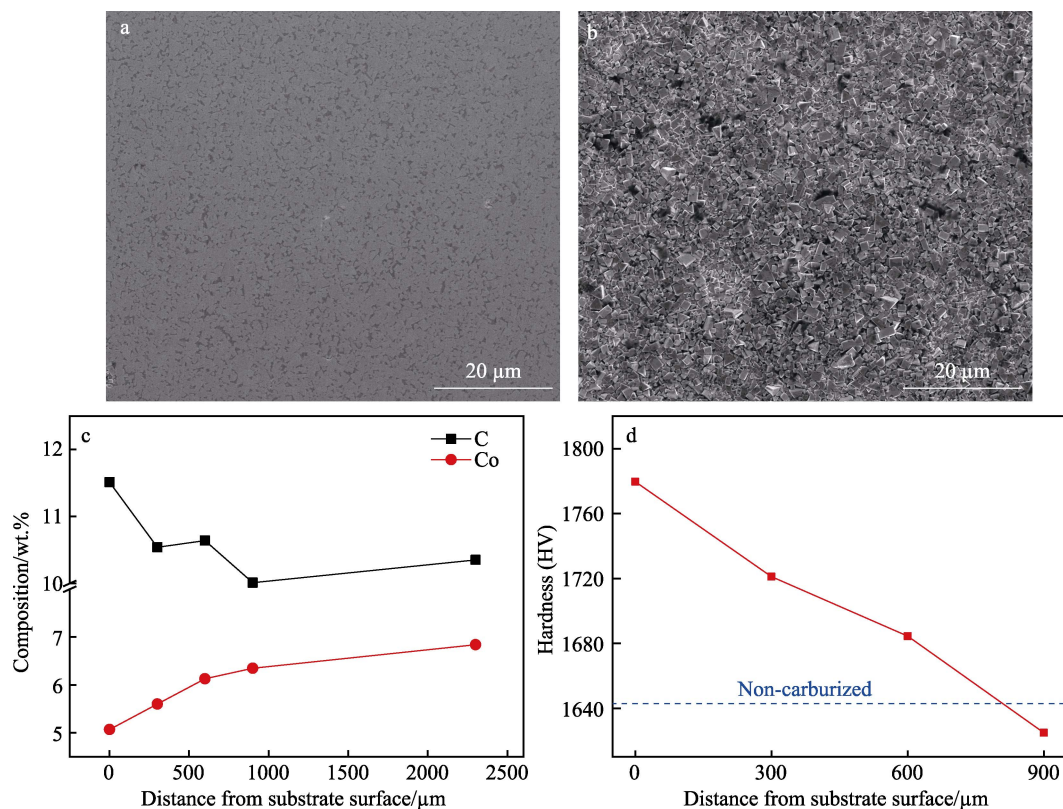


图1 车刀渗碳前(a)和渗碳后(b)表面SEM形貌图,以及渗碳后截面元素分布(c)和截面硬度分布(d)

Fig.1 SEM surface images of (a) homogeneous and (b) carburized turning tool, and cross-sectional (c) elemental distribution and (d) hardness distribution of carburized turning tool

2.2 XRD 分析

分别对裸车刀、涂层车刀和渗碳涂层车刀进行XRD分析,结果如图2所示。硬质合金车刀基体渗碳后WC衍射峰半高宽略微减小,这是由于高温渗碳过程中WC晶粒长大所致。渗碳前后涂层的衍射峰无明显差异,说明基体渗碳处理对沉积涂层的物相结构无显著影响。涂层主要由立方Ti(Al)N相结构组成,衍射峰位相较标准TiN峰位均向高角度偏移,这是由于Ti-N晶格中固溶了较小原子尺寸的Al,晶格常数减小所致^[21-23]。

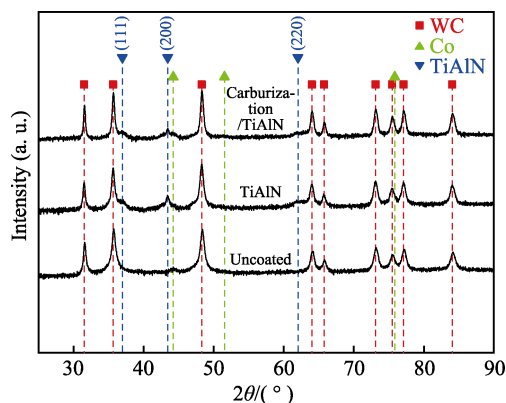


图2 车刀基体和渗碳前后涂层车刀的XRD谱图

Fig.2 XRD spectra of uncoated, TiAlN and carburization/TiAlN coated turning tools

2.3 涂层刀具高温元素扩散

分别对未渗碳和渗碳车刀沉积TiAlN涂层后的样品进行800℃和1100℃真空退火,截面元素分布如图3所示,浅蓝色箭头代表线扫描位置和方向。从图3a—c可以观察到,未渗碳处理的车刀基体表面附近Co含量较高,经过800℃真空退火后,涂层与基体界面处的Co含量明显提高,且已经扩散入CrN过渡层,1100℃真空退火后,Co已扩散到TiAlN功能层,且由于元素扩散作用,涂层基体界面变得模糊。如图3d—f所示,经过渗碳的车刀基体表面贫Co,在800℃真空退火后,过渡层中Co含量较低,元素扩散被明显抑制,1100℃退火后,Co仅在过渡层富集,而没有进一步扩散至TiAlN功能层,且涂层基体仍保持明锐界面。在高温环境下,相比于均质硬质合金基体,表面贫Co的硬质合金基体增加了Co的扩散激活能,基体中的Co更难向涂层扩散^[24]。

2.4 涂层的高温力学性能

对沉积态及800℃和1100℃真空退火后的未渗碳和渗碳涂层车刀进行力学性能检测分析,如图4所示。结果表明,渗碳处理能显著提高涂层车刀的力学性能和高温稳定性:沉积态及800℃真空退火2h后,渗碳处理的涂层车刀硬度分别为33 GPa和32 GPa,

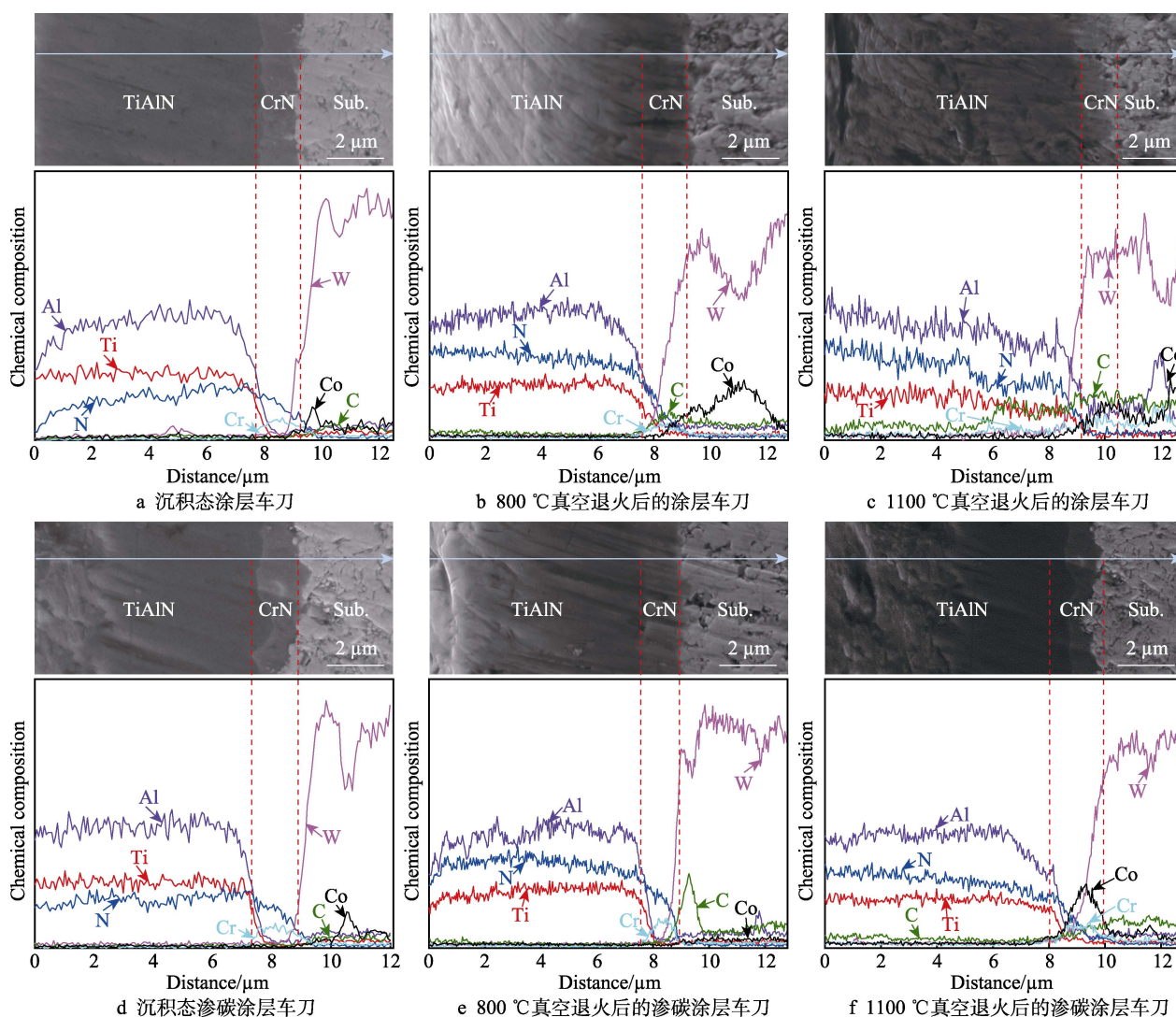


图 3 涂层车刀截面形貌和 EDS 线扫描

Fig.3 Cross-sectional morphology and EDS line scan of as-deposited (a) TiAlN and (d) carburization/TiAlN coated turning tools, 800 °C-annealed (b) TiAlN and (e) carburization/TiAlN coated turning tools, and 1100 °C-annealed (c) TiAlN and (f) carburization/TiAlN coated turning tools

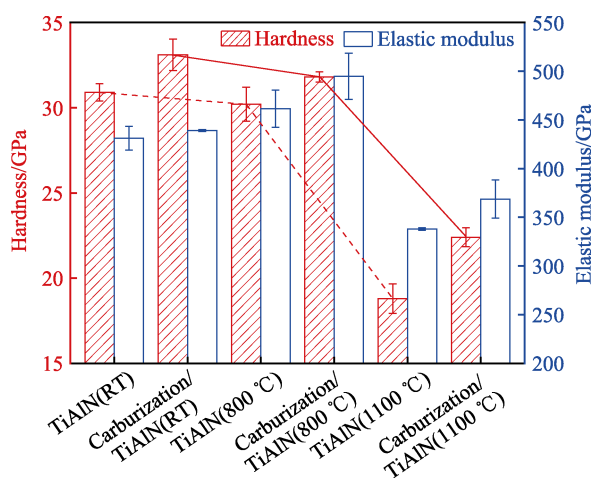


图 4 渗碳前后涂层车刀在常温、800 °C真空退火、1100 °C真空退火后的硬度和弹性模量

Fig.4 Hardness and elastic modulus of TiAlN coated tools with and without carburization after annealing at temperatures of 800 °C and 1100 °C

高于未经过渗碳处理的涂层车刀（分别为 31 GPa 和 30 GPa）；1100 °C 真空退火 0.5 h 后，渗碳处理的涂层车刀硬度仍维持较高的硬度 22.5 GPa，而未渗碳处理的涂层车刀硬度下降至 18.5 GPa，显示了渗碳涂层车刀较好的红硬性。涂层弹性模量与硬度的变化趋势相似。高温退火后，涂层硬度变化与涂层相结构的演变、涂层应力的弛豫和 Co 元素的扩散密切相关：一方面，TiAlN 在高温下分解生成六方 AlN 软质相，以及残余应力的降低，导致 2 种涂层刀具硬度下降^[25]；另一方面，Co 元素在高温下扩散至 TiAlN 涂层内部会引起涂层致密度下降，并进一步促进六方 AlN 的生成，导致涂层力学性能下降^[3-4]。由图 3 中 EDS 线扫描结果可知，渗碳处理可以形成表面贫 Co 的硬质合金基体，在高温下能有效阻挡 Co 元素由基体向涂层扩散，因此渗碳处理的涂层刀具在高温下能保持更好的力学性能。

2.5 涂层刀具的切削性能

图5为裸刀、渗碳裸刀、涂层刀具和渗碳涂层刀具外圆干式车削 SKD-11 工具钢的切削寿命曲线。均质硬质合金裸刀车削长度为~80 m 时达到磨钝标准；对车刀进行渗碳处理后，切削寿命有所增加，达到~130 m；裸刀镀覆 TiAlN 后，刀片寿命增长至~600 m；车刀渗碳处理并镀覆 TiAlN 后，刀片寿命得到显著提升，达到~1100 m。这表明渗碳处理对裸车刀和涂层车刀的切削寿命均有显著改善。

涂层刀具的寿命主要取决于刀具本身性能以及表面涂层的硬度、韧性、抗氧化性和摩擦学性能等^[26]。Co 的热膨胀系数较大（约为 WC 的 3.2 倍），扩散至涂层后，在高温下受热膨胀，产生内应力易使涂层开裂失效。同时，Co 与氧具有较高的亲和力，扩散至涂层后易氧化且阻碍致密表层氧化膜的形成，显著降低涂层的抗氧化性。由于渗碳处理的涂层车刀能有效抑制 Co 向涂层扩散，相较未渗碳处理的涂层车刀，具有更好的红硬性、抗氧化性和较小的热膨胀，因此在干式车削中展现了更高的切削寿命。

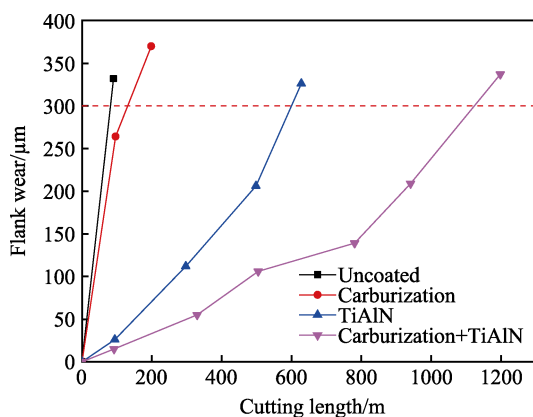


图5 车刀切削性能

Fig.5 Cutting performance of the turning tools

3 结论

本文通过高温渗碳和 PVD 方法制备了渗碳涂层刀具，研究了硬质合金基体渗碳处理对涂层刀具高温元素扩散、高温力学性能和切削性能的影响，主要研究结论如下：

1) 经过渗碳处理后，硬质合金车刀基体形成了表面层贫 Co 和近表面层富 Co 的梯度结构，基体表面得到硬化。

2) 渗碳处理显著抑制了硬质合金基体中的 Co 在高温下向涂层内部扩散，改善了涂层高温稳定性，使得涂层在高温下仍维持较高的力学性能。

3) 渗碳处理显著增强了涂层车刀的干式车削寿命，主要得益于其具有更好的红硬性、抗氧化性和较小的热膨胀。

参考文献：

- [1] 董定乾, 向新, 顾金宝, 等. 梯度硬质合金制备技术及研究现状[J]. 硬质合金, 2019, 36(5): 392-398.
DONG Ding-qian, XIANG Xin, GU Jin-bao, et al. The Fabrication Technique and Research Status of Gradient Cemented Carbide[J]. Cemented Carbide, 2019, 36(5): 392-398.
- [2] ZHANG Quan, XU Yu-xiang, ZHANG Teng-fei, et al. Tribological Properties, Oxidation Resistance and Turning Performance of AlTiN/AlCrSiN Multilayer Coatings by Arc Ion Plating[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 356: 1-10.
- [3] WU Wei-wei, CHEN Wang-lin, YANG Shu-bao, et al. Design of AlCrSiN Multilayers and Nanocomposite Coating for HSS Cutting Tools[J]. Applied Surface Science, 2015, 351: 803-810.
- [4] 耿东森, 吴正涛, 聂志伟, 等. 基体偏压对电弧离子镀 AlCrSiN 涂层结构和热稳定性的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 60-66.
GENG Dong-sen, WU Zheng-tao, NIE Zhi-wei, et al. Influence of Substrate Bias on Microstructure and Thermal Stability of AlCrSiN Coatings Deposited by Arc Ion Plating[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 60-66.
- [5] 桑远洋, 陈宜, 颜坤岳, 等. 基体特性对 TiSiN/TiAlSiN/AlTiN 涂层 WC-Co 硬质合金膜基结合力的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(6): 88-92.
SANG Yuan-yang, CHEN Yi, YAN Kun-zhe, et al. Effect of Substrate Properties on Coating-Substrate Adhesion of TiSiN/TiAlSiN/AlTiN Coated WC-Co Cemented Carbides[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(6): 88-92.
- [6] 李之旭, 范洪远, 鲜广, 等. 硬质合金基体对 TiAlN/TiAlSiCrN/TiSiN 多层涂层结构和机械性能的影响[J]. 硬质合金, 2020, 37(2): 119-126.
LI Zhi-xu, FAN Hong-yuan, XIAN Guang, et al. Effect of Cemented Carbide Substrates on Structure and Mechanical Properties of TiAlN/TiAlSiCrN/TiSiN Multilayer Coatings[J]. Cemented Carbide, 2020, 37(2): 119-126.
- [7] 刘萍, 瞿峻, 温光华, 等. 表层钴含量对基体/涂层界面组织结构和刀具切削性能的影响[J]. 硬质合金, 2019, 36(2): 116-125.
LIU Ping, QU Jun, WEN Guang-hua, et al. Effects of Surface Cobalt Content on Interfacial Microstructure of Substrate/Coating and Cutting Performance of Blade[J]. Cemented Carbide, 2019, 36(2): 116-125.
- [8] BAKOGLIDIS K D, SCHMIDT S, GRECZYNSKI G, et al. Improved Adhesion of Carbon Nitride Coatings on Steel Substrates Using Metal HiPIMS Pretreatments[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 302: 454-462.
- [9] SANTIAGO J A, FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ I, WENNERBERG A, et al. Adhesion Enhancement of DLC Hard Coatings by HiPIMS Metal Ion Etching Pretreatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 787-796.

- [10] MEINDLHUMER M, JÄGER N, SPOR S, et al. Nanoscale Residual Stress and Microstructure Gradients across the Cutting Edge Area of a TiN Coating on WCCo[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 182: 11-15.
- [11] 邓福铭, 王强, 邹波, 等. 硬质合金表面化学脱钴对金刚石涂层的影响[J]. *硬质合金*, 2013, 30(3): 113-121.
DENG Fu-ming, WANG Qiang, ZOU Bo, et al. Effects of Cobalt-Etched Surface Pretreatment of Cemented Carbide on Diamond Coatings[J]. *Cemented Carbide*, 2013, 30(3): 113-121.
- [12] 匡同春, 刘正义, 代明江, 等. 预处理工艺对硬质合金表面状态的影响[J]. *稀有金属*, 1997(5): 35-40.
KUANG Tong-chun, LIU Zheng-yi, DAI Ming-jiang, et al. Effect of Pretreatment Process on Surface State of Cemented Carbide[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 1997(5): 35-40.
- [13] 刘学深, 孙方宏, 陈明, 等. 微波等离子体刻蚀对WC-Co 硬质合金基体金刚石薄膜附着力的影响[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2001, 21(5): 5-8, 2.
LIU Xue-shen, SUN Fang-hong, CHEN Ming, et al. Effect of Microwave Plasma-Etching Decarburization Upon Adhesive Strength of CVD Diamond Film to WC-Co Substrate[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2001, 21(5): 5-8, 2.
- [14] 弓满锋, 隋广洲, 连海山, 等. 富Co-layers 硬质合金表面渗氮处理微观结构和性能研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(8): 56-61, 81.
GONG Man-feng, SUI Guang-zhou, LIAN Hai-shan, et al. Study on Microstructure and Properties for Co-Rich Layers Cemented Carbides by Surface Nitriding Treatment[J]. *Materials Review*, 2017, 31(8): 56-61, 81.
- [15] 肖逸锋, 贺跃辉, 丰平, 等. 渗碳工艺对WC-Co梯度硬质合金的梯度结构和硬度的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(3): 465-470.
XIAO Yi-feng, HE Yue-hui, FENG Ping, et al. 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.
- [16] LARSSON C, ODÉN M. Hardness Profile Measurements in Functionally Graded WC-Co Composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 382(1-2): 141-149.
- [17] 张肖肖. 渗碳法制备梯度硬质合金分析[J]. *中国科技信息*, 2015(17): 19-20, 16.
ZHANG Xiao-xiao. Analysis on Preparation of Gradient Cemented Carbide by Carburizing Method[J]. *China Science and Technology Information*, 2015(17): 19-20, 16.
- [18] 张烈华, 方志, 许林. WC-Co 硬质合金表面渗碳强化工艺研究与应用[J]. *金属热处理*, 2016, 41(2): 84-87.
ZHANG Lie-hua, FANG Zhi, XU Lin. Surface Carbonizing and Its Application on WC-Co Cemented Carbides[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(2): 84-87.
- [19] WANG Xu, HWANG K S, KOOPMAN M, et al. Mechanical Properties and Wear Resistance of Functionally Graded WC-Co[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, 36: 46-51.
- [20] LEE H C, GURLAND J. Hardness and Deformation of Cemented Tungsten Carbide[J]. *Materials Science and Engineering*, 1978, 33(1): 125-133.
- [21] BARTOSIK M, DANIEL R, ZHANG Z, et al. Lateral Gradients of Phases, Residual Stress and Hardness in a Laser Heated $\text{Ti}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{N}$ Coating on Hard Metal[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(22): 4502-4510.
- [22] KUTSCHEJ K, MAYRHOFFER P H, KATHREIN M, et al. Structure, Mechanical and Tribological Properties of Sputtered $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ Coatings with $0.5 \leq x \leq 0.75$ [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200(7): 2358-2365.
- [23] RAFAJA D, WÜSTEFELD C, DOPITA M, et al. Crystallography of Phase Transitions in Metastable Titanium Aluminium Nitride Nanocomposites[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 257: 26-37.
- [24] RAAB R, KOLLER C M, KOLOZSVÁRI S, et al. Thermal Stability of Arc Evaporated Al-Cr-O and Al-Cr-O/Al-Cr-N Multilayer Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 352: 213-221.
- [25] CHEN Li, PAULITSCH J, DU Yong, et al. Thermal Stability and Oxidation Resistance of Ti-Al-N Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(11-12): 2954-2960.
- [26] 祁志旭, 陈兴媚. 硬质合金刀具研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2019, 13(4): 347-354.
QI Zhi-xu, CHEN Xing-mei. Research Progress of Cemented Carbide Cutting Tools[J]. *Materials Research and Application*, 2019, 13(4): 347-354.