

微喷砂处理对 TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 多层涂层摩擦磨损性能的影响

刘庆露¹, 朱丽慧¹, 刘振宇²

(1.上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072; 2. Kennametal Inc, 美国拉特罗布 PA15650)

摘要: **目的** 采用微喷砂的方法对 TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 多层涂层进行后处理, 研究其对涂层摩擦磨损性能的影响。 **方法** 采用化学气相沉积 (CVD) 的方法在硬质合金基体上沉积多层涂层, 并进行微喷砂处理。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 表征涂层的显微组织结构, 利用显微维氏硬度计、纳米压痕仪、X 射线应力仪以及划痕仪测试涂层的硬度、应力和结合力, 采用往复式多功能摩擦磨损试验机 (UMT-3T) 研究涂层的摩擦磨损性能。 **结果** TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 多层涂层经过微喷砂处理后, 表层粗糙度改善, 显微硬度提高 21.4%, 顶层 TiOCN 的纳米压痕硬度由微喷砂前的 36.31 GPa 增大至 39.32 GPa, 摩擦系数降低, 磨损体积由微喷砂前的 $1.95 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 增大至 $2.26 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, 磨损率由微喷砂前的 $1.81 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 增大至 $2.10 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。微喷砂后处理在提高 TiOCN 顶层硬度的同时, 也减薄了 TiOCN 顶层的厚度, 并使得 TiOCN 层表面出现明显的裂纹, Al₂O₃ 层的抗塑性变形能力变弱, 从而使顶层 TiOCN 被提早磨穿, Al₂O₃ 层产生大量磨屑, 加剧了磨损, 微喷砂后涂层表现出较差的耐磨性。 **结论** 微喷砂处理可以有效改善涂层力学性能。但在涂层较薄的情况下, 微喷砂处理造成的裂纹和减薄现象会使其整体耐磨性能下降。

关键词: 微喷砂处理; 化学气相沉积; TiOCN; 多层涂层; 力学性能; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)07-0371-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.07.043

Effect of Micro-blasting Post-treatment on the Friction and Wear Properties of TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN Multilayer Coatings

LIU Qing-lu¹, ZHU Li-hui¹, LIU Zhen-yu²

(1.School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2.Kennametal Inc, Latrobe PA15650, USA)

ABSTRACT: The work aims to treat the TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN multilayer coatings through micro-blasting and study the effect of micro-blasting post-treatment on the friction and wear properties of coatings. Multilayer coatings were deposited on cemented carbides by chemical vapor deposition (CVD). X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were applied to characterize the microstructure of coatings. The hardness, stress and adhesion strength of coatings were tested by mi-

收稿日期: 2018-10-23; 修订日期: 2019-02-21

Received: 2018-10-23; Revised: 2019-02-21

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2016YFB0300403); 美国 kennametal 公司资助项目

Fund: Supported by National Key R&D Program of China (2016YFB0300403), Kennametal Corporation Funded Projects in the United States

作者简介: 刘庆露 (1993—), 男, 研究生, 主要研究方向为硬质合金刀具涂层。

Biography: LIU Qing-lu (1993—), Male, Master, Research focus: coated inserts of cemented carbides.

通讯作者: 朱丽慧 (1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为硬质合金刀具涂层。邮箱: lh Zhu@mail.shu.edu.cn

Corresponding author: ZHU Li-hui (1971—), Female, Doctor, Professor, Research focus: coated inserts of cemented carbides. E-mail: lh Zhu@mail.shu.edu.cn

crohardness tester, nanoindentation, X-ray stress tester and scratch tester. The friction and wear properties of coatings were investigated by UMT-3MT tribometer. After micro-blasting treatment, the roughness of TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN multilayer coating was improved, the micro-hardness increased by 21.4% and the nano-hardness of TiOCN layer increased from 36.31 GPa to 39.32 GPa. Meanwhile, the friction coefficient decreased, the wear volume increased from $1.95 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ to $2.26 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ and the wear rate increased from $1.81 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ to $2.10 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. Micro-blasting post-treatment improved the hardness of TiOCN top layer, but reduced the thickness of TiOCN top layer. Moreover, many obvious cracks were formed on the surface of TiOCN layer, and the plastic resistance of Al₂O₃ layer became weak. Therefore, the TiOCN layer was worn out in advance, and a large amount of debris were produced on the Al₂O₃ layer. Consequently, the wear was aggravated and the coating showed poor wear property after micro-blasting. The micro-blasting treatment can effectively improve the mechanical properties of TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN coatings. However, the cracking and thinning caused by micro-blasting treatment reduce the wear resistance of the TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN multilayer coatings when coatings are thinner.

KEY WORDS: micro-blasting post treatment; chemical vapor deposition; TiOCN; multilayer coatings; mechanical properties; friction and wear

TiCN 涂层同时兼有 TiN 良好的韧性和 TiC 高的硬度和耐磨损性能, 通常被用于提高刀具的寿命^[1-2]。随着现代工业的发展, TiCN 涂层已不能满足高速切削、干式切削对刀具涂层提出的高硬度、高韧性、耐磨损、抗高温氧化等性能的要求^[3]。J. H. Hsieh 等人^[4]研究发现, 在 TiCN 涂层中添加 O 元素, 由于 O 原子的尺寸小, 并且具有氧化惰性, 因此少量 O 元素的掺入不但不会恶化涂层的性能, 反而能改善涂层的抗氧化性能和耐磨损性能。S. Ruppia 等人^[4-8]还发现, 含有一定量 O 的 TiOCN 涂层具有比 TiCN 更细小、更致密的组织, 硬度和结合强度皆优于 TiCN 涂层。与单层涂层相比, 多层涂层因能更好地兼备各子涂层的优点, 具有明显优势。陈响明^[9]设计并研究了 TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiN 多层涂层, 研究发现, 采用 TiN 作基底涂层, 可有效减小涂层刀具抗弯强度的下降幅度, 增大抗冲击韧性; 采用 TiN 作顶层, 不易与被加工材料产生粘结现象。采用 MT-TiCN 作为主涂层得到的复合涂层耐磨性好、韧性高、抗热震性能好, 高温下使用不易产生热裂纹。Al₂O₃ 层的加入能提高多层涂层整体的抗高温氧化和热稳定性。此外, 该多层涂层还具有良好的综合性能, 但顶层的 TiN 硬度较低, 如果顶层选用性能优于 TiN 的 TiOCN 层, 可能将进一步提高多层复合涂层的整体性能。

后处理可以增强涂层刀具的性能。微喷砂后处理是利用磨料颗粒对涂层表面进行冲击处理, 它能增加涂层内部的压应力状态, 增强刀具涂层的抗疲劳剥落能力和表面强度, 有效提高涂层的结合强度, 是一种高效且低成本的性能提升方法^[10-12]。影响微喷砂后处理性能的主要工艺参数包括压强、喷砂时间和磨料。随着喷砂压强的提高和时间的延长, 涂层表面强度得到提高, 内部的残余应力增大^[13]。采用 Al₂O₃ 磨料颗粒进行微喷砂处理时, 涂层的结合力可以得到有效改善^[14]。

目前国内外对于 TiOCN 多层涂层体系摩擦学性

能的研究尚未见报道。基于此, 本文采用 CVD 在硬质合金基体上沉积 TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 多层复合涂层, 对比微喷砂处理前后涂层的显微组织结构及力学性能, 重点研究微喷砂处理对多层涂层摩擦磨损性能的影响。

1 实验材料及方法

1.1 涂层的制备

本研究所用的两种样品为采用 CVD 在 WC-Co 硬质合金基体上制备的 TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 涂层 (编号 S1 和 S2, 美国 Kennametal 公司, 其中, S1 为未经过微喷砂处理的涂层试样, S2 为经过微喷砂处理的涂层试样)。涂层制备方法如下: 沉积 TiOCN 层以 TiCl₄、N₂、CH₄ 和 CO 为反应气体, 体积百分比分别为 0.8%、38%、2.5%、1.2%, 沉积温度为 1000 °C, 沉积时间 9 min。使用 H₂、AlCl₃、CO₂ 和 H₂S 沉积 Al₂O₃ 层, 沉积温度为 970 °C, 沉积时间 18 min。使用 H₂、N₂、TiCl₄ 和 CH₃CN 沉积 MT-TiCN 层, 沉积温度为 825 °C, 沉积时间 225 min。反应过程中 H₂ 作为平衡气体存在。涂层的微喷砂处理是采用 325 目的 Al₂O₃ 颗粒冲击涂层表面, 喷砂压力为 $2.758 \times 10^5 \text{ Pa}$, 持续时间为 3~6 s, 喷砂角度为 60°。

1.2 涂层的组织表征和性能测试

采用日本 RIGAKU 公司的 D/MAX2550 型转靶 X 射线多晶衍射仪分析涂层物相。使用 Cu 靶 (0.154 06 nm), 电压 40 kV, 电流 40 mA, 扫描步长 0.02°。使用 SUI510 型钨灯丝扫描电镜 (HITACHI) 观察涂层表面和截面断口的显微形貌。使用 X-350A 型 X 射线应力仪测量涂层内部应力。涂层的硬度利用 MH-3 型显微维氏硬度计测量, 载荷为 100 g。采用 MTS Nano Indenter G200 纳米压痕仪对涂层硬度进行测试, 选用连续刚度的测试方法。为避免其他层的影响,

TiOCN 层和 Al₂O₃ 层的压入深度选择膜厚的 1/5~1/10, 分别为 200 nm 和 600 nm。采用瑞士 CSM Revetest 划痕仪对涂层与基体的结合强度进行测试, 采用金刚石针尖, 圆锥形半径为 0.2 mm, 锥角为 120°, 压头滑动速度为 2 mm/min, 加载速率为 59.6 N/min, 加载范围为 0~150 N, 划痕长度为 5 mm。采用美国 Alpha-Step IQ 型表面轮廓仪测量涂层表面粗糙度 R_a 。

使用往复式多功能摩擦磨损试验机 (UMT-3T) 进行大气环境下的摩擦磨损性能测试, 测试温度为室温。所用的摩擦副为 SiC 球, 表面粗糙度为 0.13 μm , 直径为 6 mm, 加载载荷 10 N, 测试时间 3600 s, 频率 3 Hz, 并连续记录测试过程中的摩擦因数。磨损试验后, 采用 Alpha-Step IQ 型表面轮廓仪测量磨痕表面轮廓曲线及磨痕深度, 得出磨损体积 V , 并通过公式 (1) 计算涂层的磨损率。

$$w = \frac{V}{(S \times L)} \quad (1)$$

式中: w 代表磨损率; V 代表磨痕体积 (mm^3); S 代表磨痕长度 (mm); L 代表加载载荷 (N)。

2 试验结果与分析

2.1 涂层的组织及形貌

图 1 为 S1 和 S2 涂层的 X 射线衍射图谱。两种多层涂层的物相均为 TiOCN、TiCN 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。其中, TiOCN 相和 TiCN 相均具有 NaCl 型面立方结构。由于 TiOCN 相和 TiCN 相晶格常数十分接近, 两相在低角区的衍射峰基本重合在一起, 仅在高角区衍射峰才能分辨开。对比 S1 和 S2 涂层发现, 衍射峰位略向低角度偏移, 这表明尽管微喷砂处理没有改变涂层的物相, 但可能引起涂层内部的应力变化。

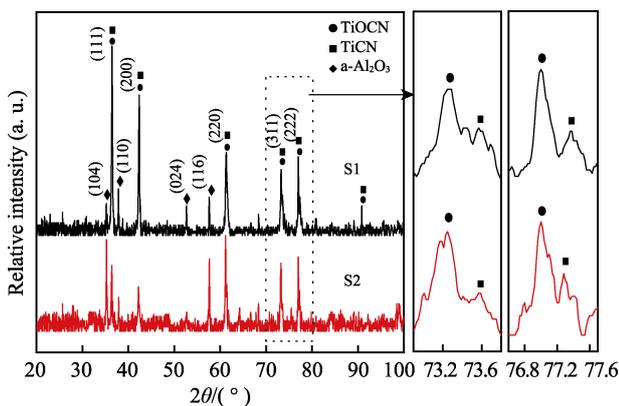
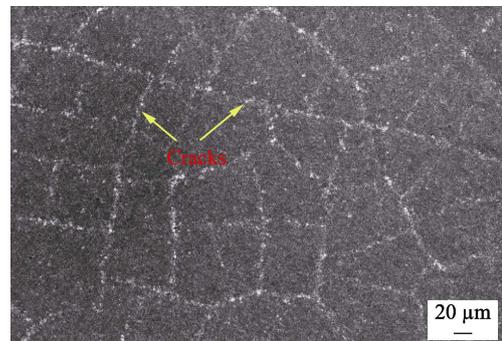


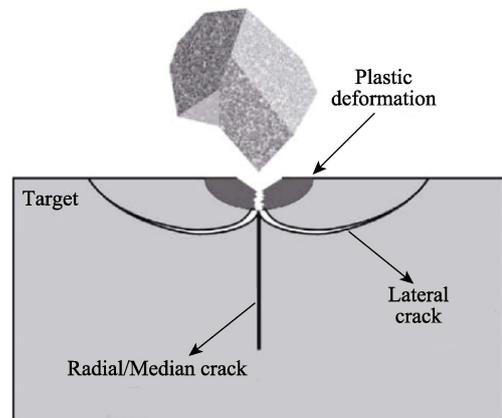
图 1 S1 和 S2 涂层试样的 X 射线衍射图谱
Fig.1 XRD patterns of S1 and S2 coatings

图 2a 为微喷砂处理后的 S2 涂层表面形貌。经微喷砂处理后, 涂层表面出现较多的裂纹。图 2b 阐释了微喷砂处理时材料表面裂纹产生的原因^[15]。当微喷砂颗粒在一定压强下撞击涂层表面时, 在局部压应力和剪切应力的作用下, 形成弹性变形区和塑性变形

区。在塑性变形区下方, 当拉应力超过材料的抗拉强度时, 会产生径向裂纹。当磨料颗粒继续压入涂层表面时, 弹性与塑性变形区的交界处附近会出现侧向裂纹。



a S2 涂层表面的裂纹形貌



b 单颗粒冲击涂层表面形成裂纹的示意图^[15]

图 2 微喷砂后的 S2 涂层表面形貌和裂纹形成示意图
Fig.2 Schematic diagram of morphology on S2 coating after micro-blasting and crack formation: a) crack morphology on coating; b) schematic diagram of crack formed on coating by impact of single particle^[15]

图 3 为 S1 和 S2 两种多层涂层的表面和截面形貌图。S1 涂层的表面呈现细针状 (图 3a)。放大观察经微喷砂处理后的 S2 涂层表面形貌发现, 细针状特征消失, 表面出现裂纹和剥落 (图 3c)。这是由于, 微喷砂处理时在侧向裂纹的交错处易产生剥落, 直接导致材料的去除和减薄^[16]。粗糙度 R_a 的测量显示, S1 平均粗糙度为 121.7 nm, 而经微喷砂处理后的 S2 表面更为光滑, 平均粗糙度为 88.4 nm, 表明微喷砂能改善涂层表面粗糙度。

图 3b、d 分别为 S1 和 S2 两种涂层的截面形貌图, 各涂层之间分界清楚, 没有明显的孔隙或气孔, 涂层之间结合良好。S1 和 S2 涂层总厚度分别约为 16.2 μm 和 14.8 μm 。其中, S1 涂层最外层 TiOCN 层厚为 2.2 μm , Al₂O₃ 层厚为 5.6 μm ; 而 S2 涂层最外层 TiOCN 层厚度只有 1.2 μm , Al₂O₃ 层厚为 5.8 μm 。本文采用的微喷砂处理工艺明显减少了最外层 TiOCN 层的厚度。分析认为, 微喷砂过程中, 磨料颗粒高速冲击涂层, 除造成涂层塑性变形外, 还由于磨料的锋利边缘对表面起微切削作用^[17], 使涂层最外层的 TiOCN 层被减薄。

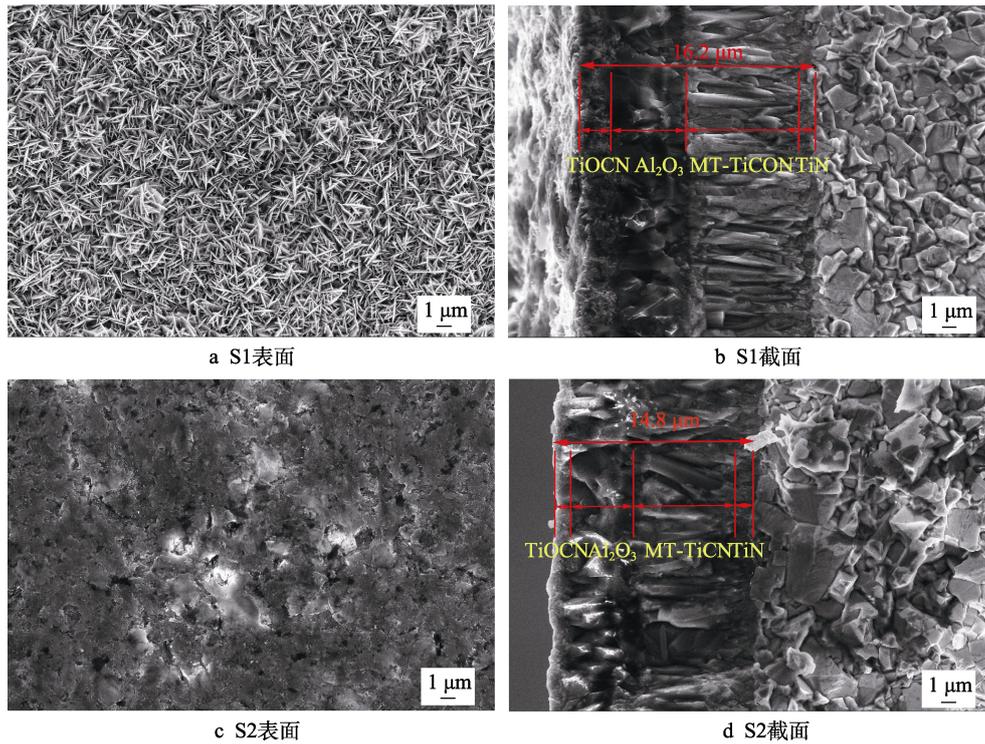


图3 S1和S2涂层的表面和截面形貌

Fig.3 Surface and cross-section morphologies of S1 and S2 coatings: a) S1 surface; b) S1 cross-section; c) S2 surface; d) S2 cross-section

2.2 涂层的力学性能

表1对比了S1和S2两种涂层显微硬度、应力和结合力。经过微喷砂处理，S2涂层显微硬度提高了21.4%，涂层压应力也同时增加。微喷砂处理过程中，喷砂颗粒对于涂层表面的冲击产生了一定的塑性变形，同时涂层内部晶格原子受压，使得S2涂层内部残余压应力增大，从而导致硬度上升^[13-14]。

表1 S1和S2两种涂层的显微硬度、应力和结合力

Tab.1 Hardness, stress and adhesion strength of S1 and S2 coatings

Samples	Hardness (HV)	Stress/MPa	Adhesion strength/N
S1	2047.3±111.6	-283.5±16.1	62.3±10.6
S2	2484.5±163.8	-817.1±21.7	97.8±16.3

经过微喷砂后处理的S2涂层的结合力提高56.9%，优于S1涂层。这是因为S2涂层硬度和内部残余压应力较大，能有效地抑制涂层在划痕测试时的裂纹萌生和扩展，使结合力提高^[13]。

为进一步探究微喷砂对涂层各单层的影响，采用纳米压痕仪测量了S1和S2两种涂层TiOCN层和Al₂O₃层的纳米压痕硬度H和弹性模量E，并计算相应的H³/E²，如表2所示。微喷砂后，TiOCN顶层的纳米压痕硬度由之前的36.31 GPa增大至39.32 GPa，Al₂O₃层硬度变化较少。H³/E²表示材料抵抗塑性变形的能力，其值越大，说明抗塑性变形能力越强，耐磨损性能越好^[18]。经过计算，S1和S2涂层的TiOCN

顶层的H³/E²分别为0.162与0.167，微喷砂对TiOCN顶层的抗塑性变形能力影响不大。而Al₂O₃层的H³/E²在微喷砂后从之前的0.104下降至0.088，抗塑性变形能力下降。

表2 S1和S2两种涂层纳米压痕硬度H和H³/E²
Tab.2 Nano-hardness H and H³/E² of S1 and S2 coatings

Samples	Layers	H/GPa	H ³ /E ²
S1	TiOCN	36.31	0.162
	Al ₂ O ₃	31.31	0.104
S2	TiOCN	39.32	0.167
	Al ₂ O ₃	29.07	0.088

2.3 涂层的摩擦磨损性能

S1和S2两种涂层的平均摩擦系数分别为0.40和0.36。S2的摩擦系数小于S1，主要原因是S2在经过微喷砂处理后，涂层粗糙度较低，在摩擦副与涂层接触摩擦的过程中产生的阻力较小。同时，经过微喷砂处理的S2涂层硬度更大，抵抗塑性变形能力和载荷承受能力增强，导致摩擦磨损的过程中摩擦系数较低^[19]。

图4为S1和S2两种涂层典型的磨痕轮廓曲线。经计算，S1和S2涂层的平均磨痕宽度分别为0.46 mm和0.51 mm，经过微喷砂处理之后的S2涂层磨痕宽度变大。S1和S2涂层平均磨痕深度分别为1.54 μm和1.49 μm。考虑到S2的TiOCN顶层厚度仅为1.2 μm，

认为此时 S2 顶层已被磨穿。由图 4 可知, S1 涂层磨损轮廓内部较为平滑, 而 S2 涂层磨损内部轮廓曲折严重, 表明磨损内部表面可能有大块状剥落现象发生。

图 5 比较了 S1 和 S2 两种涂层的磨损体积和磨损率。可见, S2 涂层的磨损体积和磨损率均大于 S1, 表现出较差的耐磨损性能。

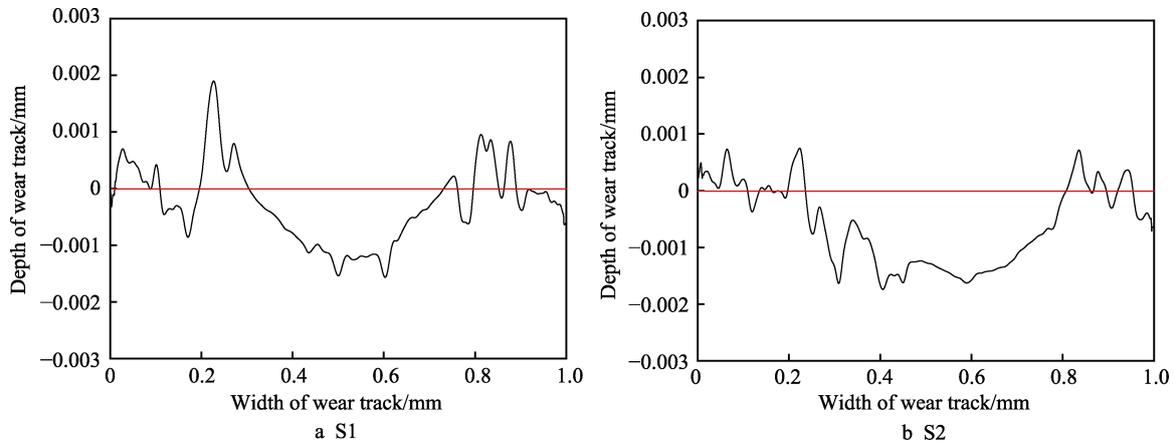


图 4 S1 和 S2 两种涂层典型的磨损轮廓曲线
Fig.4 Typical sectional profiles of wear tracks on S1 (a) and S2 (b) coatings

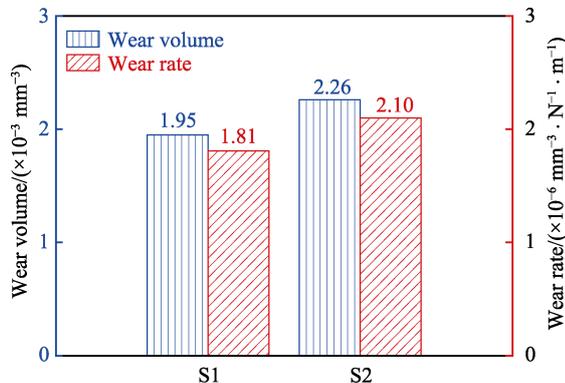


图 5 S1 和 S2 涂层磨损体积和磨损率的比较
Fig.5 Comparison in wear volume and wear rate of S1 and S2 coatings

为了进一步研究微喷砂后处理对涂层耐磨损性能的影响, 分别对 S1 和 S2 样品的磨损形貌和成分进行了分析。图 6 为 S1 涂层的磨损形貌和 EDS 能谱分析。从图 6a 中可以看出, 未经微喷砂处理的 S1 涂层的磨损内部存在多处粘着剥落, 磨损边缘的磨屑堆积明显。进一步放大发现 (见图 6b), 除涂层的粘着外, 还有少量的浅犁沟存在和剥落发生。相比其他 Ti 系涂层, TiOCN 表层的硬度较高, 磨屑颗粒与涂层尽管发生了磨粒磨损, 并未造成深的犁沟。

图 6c 为 S1 涂层磨损内部的能谱 EDS 分析。由图 6c 可知, 未经微喷砂处理的 S1 涂层通过与 SiC 磨球对磨之后, 表面磨损区域的元素主要包括 O、Si、

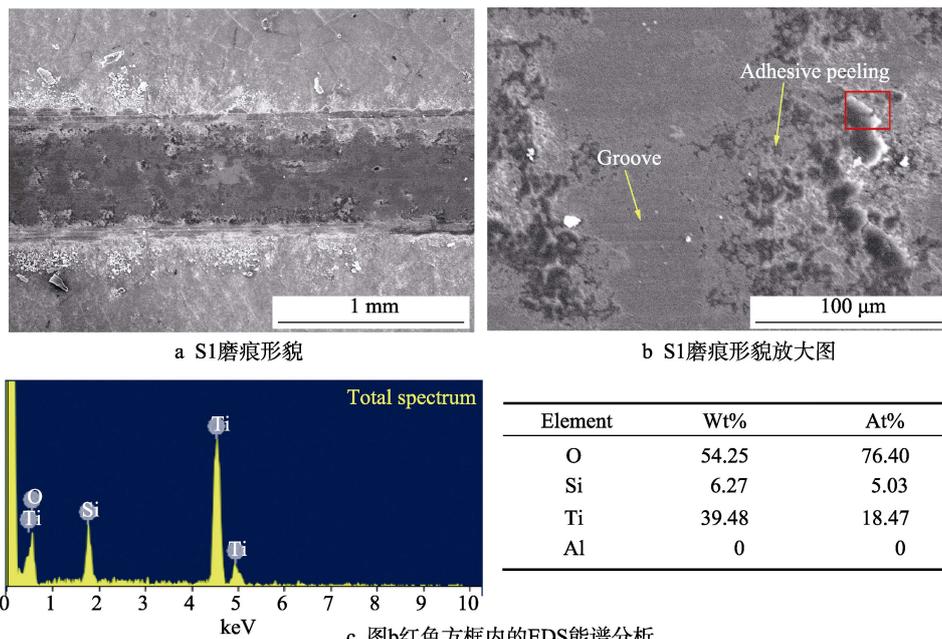


图 6 S1 涂层的磨损形貌和 EDS 能谱分析

Fig.6 Wear track morphologies and EDS analysis of S1 coating: a) wear track morphologies of S1 coating; b) enlarged view of wear track morphologies of S1 coating; c) EDS analysis of red box in Fig.6

Ti。涂层表面磨痕中存在 Si 元素，表明在摩擦过程中有小部分的 SiC 磨球磨屑粘着在磨痕表面。其原因是在室温摩擦过程中，S1 涂层与 SiC 磨球对磨时，承受了一定的正向和切向运动作用，在往复的摩擦过程中，容易形成裂纹，并在随后发生片状或块状剥落，形成剥落坑，产生的磨屑参与到摩擦的过程中，从而使得涂层发生粘着磨损。通过 EDS 分析还发现，涂层表面磨痕存在较多 O 元素，表明磨球和涂层在往复滑动接触时，发生了氧化磨损。因此，S1 多层涂层在摩擦过程中主要的磨损机理为磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损。

图 7 为 S2 涂层的磨痕形貌和 EDS 能谱分析。如图 7a 所示，S2 除了磨痕边缘有较多磨屑堆积外，磨痕内部也存在大量磨屑。S2 涂层表面硬度的提高，使得涂层与磨球对磨时不易产生犁沟，图 7b 未观察到明显的犁沟出现。但 S2 涂层的表面裂纹明显，且磨痕内部的剥落坑数量增多、尺寸变大，因而 S2 涂层的磨痕轮廓曲线曲折严重。图 7c 为图 7b 方框区域的能谱分析，可以看出，S2 涂层表面磨痕区域的元素主要包括 O、Al、Ti 和微量的 Si 元素。图 7d 元素的面扫描分析表明，图 7b 中白色颗粒为 Al₂O₃。这些实验结果进一步证实 S2 涂层的 TiOCN 顶层被磨穿，次层的 Al₂O₃ 参与到后续的磨损过程中。由于 S2 摩擦系数较低，它与磨球对磨时温度较 S1 涂层下降，O 含量的减小也表明 S2 涂层氧化磨损减轻。与 S1 相比，S2 涂层磨痕内部的 Si 含量大大减少，且从磨痕内部形貌来看，在摩擦过程中只发生了轻微的粘着磨损。综上所述，S2 涂层的磨损机制也为磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损，但粘着磨损和氧化磨损减轻，剥落加重。

到明显的犁沟出现。但 S2 涂层的表面裂纹明显，且磨痕内部的剥落坑数量增多、尺寸变大，因而 S2 涂层的磨痕轮廓曲线曲折严重。图 7c 为图 7b 方框区域的能谱分析，可以看出，S2 涂层表面磨痕区域的元素主要包括 O、Al、Ti 和微量的 Si 元素。图 7d 元素的面扫描分析表明，图 7b 中白色颗粒为 Al₂O₃。这些实验结果进一步证实 S2 涂层的 TiOCN 顶层被磨穿，次层的 Al₂O₃ 参与到后续的磨损过程中。由于 S2 摩擦系数较低，它与磨球对磨时温度较 S1 涂层下降，O 含量的减小也表明 S2 涂层氧化磨损减轻。与 S1 相比，S2 涂层磨痕内部的 Si 含量大大减少，且从磨痕内部形貌来看，在摩擦过程中只发生了轻微的粘着磨损。综上所述，S2 涂层的磨损机制也为磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损，但粘着磨损和氧化磨损减轻，剥落加重。

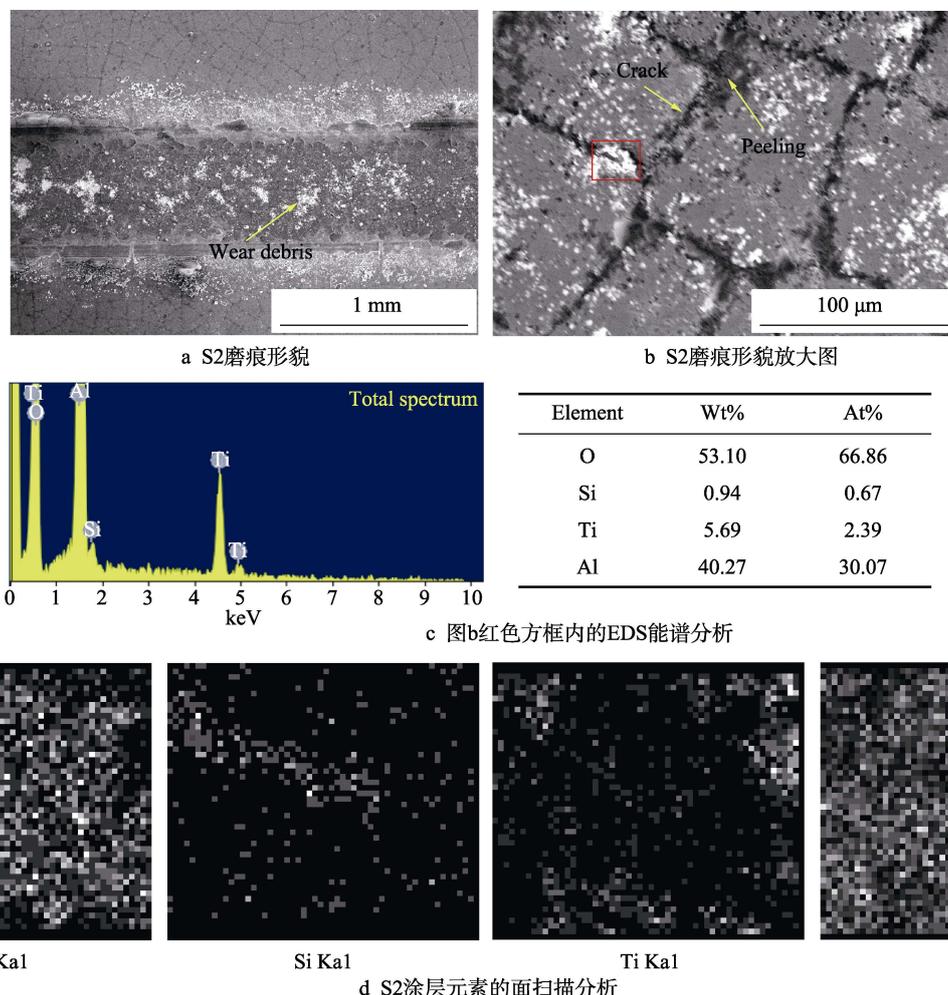


图 7 S2 涂层的磨痕形貌和 EDS 能谱分析

Fig.7 Wear track morphologies and EDS analysis of S2 coating: a) wear track morphologies of S2 coating; b) enlarged view of wear track morphologies of S2 coating; c) EDS analysis of the red box in Fig.b; d) surface scanning analysis of elements in S2 coating

微喷砂后处理对 S2 的 TiOCN 顶层影响最大。它在提高 TiOCN 顶层硬度的同时，也减薄了 TiOCN 顶层的厚度，并使得 TiOCN 层表面出现明显的裂纹。这些裂纹在摩擦磨损过程中加速了顶层 TiOCN 的大

块剥落，导致磨损加剧，加之 TiOCN 顶层本身厚度变薄，最终造成顶层 TiOCN 被提早磨穿，次层的 Al₂O₃ 层露出。微喷砂后处理对 S2 的 Al₂O₃ 层也有一定的影响。当 S2 涂层的 TiOCN 顶层磨穿后，由于

Al₂O₃ 层抵抗塑性变形能力变弱, 裂纹一旦萌生, 便迅速扩展。磨损过程中 Al₂O₃ 层易发生破裂, 大块剥落严重, 产生大量磨屑, 加剧了磨损^[18]。因此, S2 表现出比 S1 涂层差的耐磨损性能。

综上所述, 微喷砂处理可以有效改善 TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 多层涂层表面粗糙度, 提高结合力和硬度, 同时降低摩擦系数。但在 TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 多层涂层顶层较薄的情况下, 微喷砂后处理造成顶层 TiOCN 减薄, 出现明显的裂纹, 从而使其整体的耐磨损性能下降。

3 结论

1) 微喷砂处理可以有效改善 TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 多层涂层的表面粗糙度, 提高结合力和硬度, 同时降低摩擦系数。涂层的显微硬度提高了 21.4%, 顶层 TiOCN 的纳米压痕硬度由微喷砂前的 36.31 GPa 增大至 39.32 GPa。

2) 本文微喷砂处理后的 S2 涂层耐磨损性能下降, 磨痕宽度增加, 磨损体积由微喷砂前的 $1.95 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 增大至 $2.26 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, 磨损率由微喷砂前的 $1.81 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 增大至 $2.10 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

3) 微喷砂处理在提高 TiOCN 顶层硬度的同时, 也减薄了 TiOCN 顶层的厚度, 并使得 TiOCN 层表面出现明显的裂纹, Al₂O₃ 层的抗塑性变形能力变弱, 从而使顶层 TiOCN 被提早磨穿, Al₂O₃ 层产生大量磨屑, 加剧了磨损, S2 涂层表现出较差的耐磨性。

参考文献:

- [1] CHEN R, TU J P, LIU D G, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of TiCN nanocomposite films deposited by DC magnetron sputtering[J]. Surface and coatings technology, 2011, 205: 5228-5234.
- [2] QIN Y F, ZHU L Y, HE J N, et al. Microstructure and tribological properties of TiCN-Al₂O₃ composite coatings fabricated by reactive plasma spraying[J]. Vacuum, 2018, 147: 149-157.
- [3] ANIRBAN N, CHATTOPADHYAY A K. Investigation on flank wear mechanism of CVD and PVD hard coatings in high speed dry turning of low and high carbon steel[J]. Wear, 2018, 396-397: 98-106.
- [4] HSIEH J H, WU W, LI C, et al. Deposition and characterization of Ti(C,N,O) coatings by unbalanced magnetron sputtering[J]. Surface and coatings technology, 2003, 163-164: 233-237.
- [5] HSIEH J H, LI C, WU W, et al. Synthesis of Ti(C,N,O) coatings by unbalanced magnetron sputtering[J]. Journal of materials processing technology, 2003, 140: 662-667.
- [6] RUPPIA S, LARSSON A. deposition, microstructure, and properties of nanocrystalline Ti(C,O,N) coatings[J]. Journal of vacuum science & technology A: Vacuum, surfaces and films, 2003, 21: 66-75.
- [7] CZETTL C, MITTERER C, MÜHLE U, et al. CO addition in low-pressure chemical vapour deposition of medium-temperature Ti_xN_{1-x} based hard coatings[J]. Surface and coatings technology, 2011, 206: 1691-1697.
- [8] ZHU Li-hui, ZHANG Yu-meng, HU Tao, et al. Oxidation resistance and thermal stability of Ti(C,N) and Ti(C,N,O) coatings deposited by chemical vapor deposition[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2016, 54: 295-303.
- [9] 陈响明. 硬质合金刀具 TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN 多层复合涂层制备与组织性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. CHEN Xiang-ming. Preparation, microstructure and properties of TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN multilayers on cemented carbide cutting tools[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [10] LIU Can-yu, LIU Zhan-qiang, WANG Bing. Modification of surface morphology to enhance tribological properties for CVD coated cutting tools through wet micro-blasting post-process[J]. Ceramics international, 2018, 44: 3430-3439.
- [11] TANAKA S, SHICROCHI T, NISHIZAWA H, et al. Micro-blasting effect on fracture resistance of PVD-AlTiN coated cemented carbide cutting tools[J]. Surface and coatings technology, 2016, 308: 337-340.
- [12] SCHALK N, MITTERER C, CZETTL C, et al. Dry-blasting of α -Al₂O₃ and κ -Al₂O₃ CVD hard coatings: Friction behavior and thermal stress relaxation[J]. Tribology letters, 2013, 52(1): 147-154.
- [13] BOUZAKIS K D, GERARDIS S, SKOEDARIS G, et al. Effect of dry micro-blasting on PVD-film properties, cutting edge geometry and tool life in milling[J]. Surface and coating technology, 2009, 204(6-7): 1081-1086.
- [14] KLOCKE F, GORGELS C, BOUZAKIS E, et al. Tool life increase of coated carbide tools by micro blasting[J]. Production engineering, 2009, 3: 453-459.
- [15] WENSINK H, ELWENSPÖCK M C. A closer look at the ductile-brittle transition in solid particle erosion[J]. Wear, 2002, 253: 1035-1043.
- [16] 刘灿宇. TiN/Al₂O₃/TiCN 和 Al₂O₃/TiCN 涂层刀具湿式微喷砂后处理工艺[D]. 济南: 山东大学, 2018. LIU Can-yu. Wet micro-blasting post-processing on TiN/Al₂O₃/TiCN and Al₂O₃/TiCN coated tools[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [17] BOUZAKIS K D, TSOUKNIDAS A, SKOEDARIS G, et al. Optimization of wet or dry micro-blasting on PVD films by various Al₂O₃ grain sizes for improving the coated tools' cutting performance[J]. Tribology in industry, 2011, 33(2): 49-56.
- [18] PHILIPPON D, GODINHO V, NAGY P M. Endurance of TiAlSiN coatings: Effect of Si and bias on wear and adhesion[J]. Wear, 2011, 270: 541-549.
- [19] 赵嫄, 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. ZHAO Man, WANG Shao-long, JIANG Nan, et al. Effect of microstructure of TiN layer on wear resistance of CVD TiC-TiCN-TiN multilayer coating[J]. Materials review, 2016, 30(10): 51-56.