

不同后处理对 AlCrN 涂层结构和性能的影响*

张家敏^{1,2,3} 蔡飞^{1,2} 王文健⁴ 张世宏^{1,2}

- (1. 安徽工业大学先进金属材料绿色制备与表面技术教育部重点实验室 马鞍山 243000;
2. 安徽工业大学现代表面工程研究中心 马鞍山 243000;
3. 安徽工业大学材料科学与工程学院 马鞍山 243000;
4. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司 常州 213011)

摘要: 电弧离子镀制备的 AlCrN 涂层表面存在大量的“大颗粒”, 导致其具有较高的表面粗糙度, 进而降低了涂层的摩擦磨损和切削性能。采用不同后处理方法(如离子刻蚀、湿喷砂、干喷砂和微粒子喷丸)对电弧镀 AlCrN 涂层表面进行处理, 利用 XRD、SEM、OM、摩擦磨损以及切削试验分析不同后处理方式对涂层组织结构、表面形貌、表面粗糙度、摩擦磨损以及切削性能的影响。结果显示: 不同后处理方法均可有效清除 AlCrN 涂层表面颗粒, 其中湿喷砂、微粒子喷丸和干喷砂对涂层表面颗粒数目去除效果较好, “大颗粒”分别降低了 91.1%、88.5% 和 86.9%, 离子刻蚀后处理次之, 颗粒数目降低了 21.0%。经处理的 AlCrN 涂层的 XRD 图谱与未处理的涂层相比没有明显变化, 均为固溶 (Al, Cr)N 相, 但其衍射峰均向低角度偏移。经过后处理涂层的摩擦因数相比于未处理的涂层均有不同程度降低, 涂层磨损方式为磨粒磨损并伴有少量的氧化磨损。AlCrN 涂层刀具经过后处理工艺处理后, 切削寿命均有不同程度提高, 与未处理涂层刀具相比较经微粒子喷丸、干喷砂、离子刻、湿喷砂后处理的涂层刀具切削寿命分别提高了 30%、40%、40% 和 60%。

关键词: AlCrN 涂层; 表面形貌; 后处理; 切削性能

中图分类号: TG156

Effects of Different Post-treatments on Structures and Properties of AlCrN Coating

ZHANG Jiamin^{1,2,3} CAI Fei^{1,2} WANG Wenjian⁴ ZHANG Shihong^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Advanced Metal Materials Green Preparation and Surface Technology, Ministry of Education, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China;
2. Modern Watch Interface Engineering Research Center, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Anhui 243000, China;
4. CRRC Qishuyan institute Co., LTD, Changzhou, Jiangsu 213011, China)

Abstract: There are number of "micro-particles" on the surface of the arc ion plated AlCrN coatings, which resulted in the high surface roughness, and decreased the friction, wear and cutting performance. In this paper, the AlCrN coatings were treated by different post-treatments including ion etching, wet sandblasting, dry sandblasting, and shot peening. XRD, SEM, OM, friction and wear, and cutting tests were used to examine the effects of post-treatments on phase, surface roughness, friction and wear, and cutting performance. The results showed that these four post-treatment methods could significantly remove the "micro-particles". Among them, wet sandblasting, shot peening and dry sandblasting had better effect on clearing the "micro-particles", and the number of "micro-particles" were reduced by 91.1%, 88.5% and 86.9%. While, ion etching could only reduce the "micro-particles" by 21.0%. The XRD patterns of the AlCrN coatings revealed the solid solution (Al, Cr)N phase, and all the diffraction peaks of the AlCrN coatings shifted to a low angle. The coefficient of friction of the post-treated coating reduced as compared with the untreated coating; the wear mechanism of the coatings were abrasive wear with a small amount of oxidative wear. The cutting life of the coated tools after

* 安徽省自然科学基金(1808085QE131)和清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金(SKLTkf18B13)资助项目。

Fund: Science Foundation of Anhui Province (1808085QE131) and Tribology Science Fund of State Key Laboratory of Tribology (SKLTkf18B13).

20210112 收到初稿, 20210401 收到修改稿

various post-treatments have been improved, and cutting life increased by 30%, 40%, 40% and 60% for the AlCrN coating after shot peening, dry sandblasting, ion etching and wet sandblasting treatments.

Keywords: AlCrN coating; surface morphology; post-treatments; cutting performance

0 前言

与 TiN 和 TiAlN 涂层相比, AlCrN 涂层因其良好的韧性和抗高温氧化性,在刀具尤其在高速钢刀具等领域得到了广泛应用^[1]。目前,电弧离子镀和磁控溅射技术均可制备 AlCrN 刀具涂层。其中磁控溅射技术制备的 AlCrN 涂层表面平整光滑,但其较低的电离率和沉积效率限制其在工业上推广应用^[2]。而通过电弧离子镀制备的 AlCrN 涂层沉积效率高且涂层致密^[3]。同时,在连续切削条件下能够保持较高硬度、高耐磨性、高温抗氧化性和良好的膜基结合性能,从而被广泛应用于切削加工领域^[4-5]。但电弧离子镀技术的一个缺点是,从靶材表面蒸发而出的“液滴”聚集成宏观颗粒(MPS),最终沉积在涂层表面或嵌入涂层内部^[6]。

涂层表面不同尺寸的颗粒增加了涂层表面粗糙,降低涂层的整体性能,进而导致刀具表面与工件相互作用时的摩擦阻力增大^[7-8]。近年来有研究利用不同后处理方法对涂层表面进行处理,减少涂层表面的颗粒,以期提高涂层刀具的切削性能。常用的后处理方法有喷砂以及喷丸,喷砂和喷丸处理均是用压缩空气为动力推动砂料或丸粒至工件表面进行处理的工艺,通过砂料的微切削以及丸粒的冲击作用达到去除涂层表面颗粒的目的。其中,湿喷砂的砂料是与水混合形成磨液后在磨液泵的作用下进入到喷枪中;干喷砂的砂料是以固体颗粒的形式在压缩空气作用下进入到喷枪中。MONTESANO 等^[9]指出,在沉积 CrN 涂层时,表面存在尺寸不一的金属液滴,凝固后在涂层表面形成颗粒状突起,进而形成局部应力扰动,致使涂层容易脱落,而微喷砂处理可使涂层表面液滴数量明显降低。文献[10]和文献[11]中对(Ti, Al)N 涂层进行微喷砂后处理,然后进行划痕测试,结果发现涂层的临界失效力增大,表明微喷砂后处理方式能够提高刀具涂层的附着力。文献[12]中发现,经过湿喷砂后处理的 TiCN 的涂层刀具在连续车削 AISi 4340 合金钢时寿命有明显提高。另一方面,喷丸或者喷砂均可以改变涂层或者基体的应力状态,进而影响涂层刀具的切削性能。有研究利用有限元法模拟发现,干喷砂后处理增加了 TiAlN 涂层和硬质合金基体在切削刃处的应力,从而提高了其加工 AISi 4140 合金钢时的切削

加工性能^[13]。HOU 等^[14]对 TiAlN 涂层进行喷丸处理,发现喷丸处理可以增加涂层的残余压应力,进而提高其切削性能。他们归咎于喷丸处理产生的较高残余压应力迫使裂纹沿着应力方向而不是沿解理平面扩展。TANAKA 等^[15]研究了微喷砂对 AlTiN 涂层硬质合金刀具抗断裂性能的影响,结果显示,干喷砂将残余压应力引入涂层和基体中,提高涂层的断裂韧性。同时,有研究发现,高能量 Ar 等离子体密集的轰击可以有效地消除基体表面污染,同时改善表面粗糙度,起到“离子喷丸”的作用,进而获得更好的膜-基附着力^[5]。其工作原理为阴极 Ti 靶发射热电子,热电子发射使碰撞电离及阴极发射的二次电子与炉腔内的 Ar 原子发生碰撞,产生大量的 Ar⁺, Ar⁺受负偏压牵引轰击基材,从而实现对基材的清洗。

目前,PVD 涂层后处理主要集中在研究喷砂以及喷丸的方法对 CrN、TiCN 和 TiAlN 等涂层的影响,而采用离子刻蚀以及微粒子喷丸方法对电弧离子镀制备的 AlCrN 高速钢刀具进行后处理的研究则尚未见报道,不同后处理对 AlCrN 涂层结构和性能的影响仍需要进一步研究。文中先在 M42 高速钢基体和刀具表面利用离子镀技术制备 AlCrN 涂层,然后利用不同后处理方法(包括干喷砂、湿喷砂、离子刻蚀和微粒子喷丸)对 AlCrN 涂层表面进行处理,讨论不同后处理方式对涂层刀具表面形貌和切削性能的影响。

1 试验过程

1.1 涂层制备和后处理

试验所采用镀膜设备为自主研发的离子源-平面弧-柱弧复合 PVD 镀膜装置^[5],试验选用尺寸为 18 mm×18 mm×5 mm 的 M42 高速钢试样片作为基体材料和直径为 10 mm 的 M42 高速钢直柄立铣刀。所有试样均先用砂纸研磨至 2000 目,然后利用金刚石研磨膏抛光,随后放入超声波清洗机中用酒精清洗 15 min 并烘干,最后将试样置于镀膜设备转架上。试验采用两个对称分布的 AlCr(原子比 Al:Cr=70:30,纯度 99.5%)合金靶材。镀膜前,用高能 Ar⁺对基材表面进行轰击,即对基材表面进行刻蚀清洗处理,电流 90 A,时间 30 min;镀膜时,温度为 450 °C, N₂ 压力 4.0×10⁻² mbar, AlCr 合金靶材电流均为 130 A,沉积时间为 2 h。

制备完成的 AlCrN 涂层厚度约为 3.8 μm,如图

1所示。对制备完成后的 AlCrN 涂层分别进行离子刻蚀、湿喷砂、干喷砂和微粒子喷丸后续处理,具体参数见表 1。

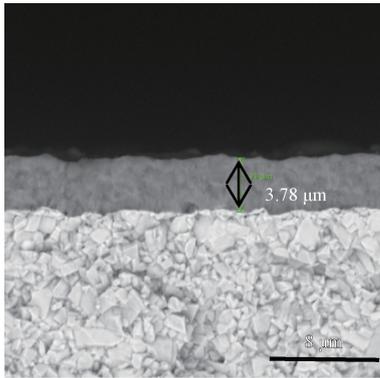


图 1 AlCrN 涂层横截面形貌

Fig. 1 Cross-sectional morphology of AlCrN coating

表 1 不同后处理方法具体参数

Table 1 Specific parameters of different post-treatment methods

Post-treatments	Specific parameters
Ion etching	Ti cylindrical target, current of 90 A, voltage of -200 V, time of 1 h
Wet sandblasting	Pressure of 0.6 MPa, white corundum (500#), time of 10 s
Dry sandblasting	Pressure of 0.2 MPa, white corundum (400#), time of 10 s
Shot peening	Pressure of 0.55 MPa, high speed steel shot (80~150 μm), time of 30 s

1.2 涂层表征

使用扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope) 观察 AlCrN 涂层和刀具表面形貌,利用能谱仪分析涂层微区元素成分及含量;使用台阶仪 (P-7 型) 检测、分析不同后处理前后的 AlCrN 涂层表面的三维形貌和粗糙度;利用 X 射线衍射仪 (型号为 Rigaku Ultima IV X-ray diffractometer) 检测分析后处理前后 AlCrN 涂层的物相及晶体结构;采用显微硬度计表征 AlCrN 涂层的显微硬度。利用摩擦磨损仪器 (球盘式-THT 型) 测试涂层摩擦磨损性能,试验过程选用直径 6 mm 的 Al₂O₃ 球作为对磨材料,载荷设置为 5 N,磨痕半径为 2 mm,转速 600 r/min,时间 40 min,温度 25 °C,湿度 50%~60%,并结合 SEM 观察到的磨痕形貌对各涂层的磨损机理进行分析。根据国际标准 ISO 21874^[16] 中所涉及 PVD 涂层表面缺陷/颗粒密度的计算标准对本文文中的 AlCrN 涂层表面颗粒密度进行分析。

通过在 MCV850 立式铣床上对上述后处理前后

的 AlCrN 涂层刀具进行切削试验。被加工材料为 20CrMo,布氏硬度为 190 HB。切削参数如表 2 所示。每切削 2 m,使用便携式体式显微镜 (ISM 型) 测量刀具后刀面的平均磨损宽度,当后刀面磨损宽度(后刀面磨损的中间区域)达到磨顿标准 0.2 mm^[5],认为刀具失效,停止切削,并使用 SEM 对磨损后的涂层刀具后刀面进行分析。

表 2 切削参数

Table 2 Cutting parameters

Cutting parameters	Specific parameters
Cutting speed/(r/min)	1 910
Feed per revolution/(mm/r)	0.2
Tool overhang/mm	40
Axial cutting depth/mm	2
Radial cutting depth/mm	2

2 结果分析

2.1 涂层厚度和显微硬度

图 2 为经过不同方法后处理的 AlCrN 涂层的截面形貌。可以发现,经过湿喷砂、干喷砂和微粒子喷丸处理之后的 AlCrN 涂层平均厚度分别为 1.54 μm、1.50 μm 和 3.05 μm,即涂层发生不同程度的减薄,而经离子刻蚀处理后的涂层厚度几乎没有发生变化,厚度保持在 3.78 μm。这是因为后处理介质对涂层表面具有冲击和“切削”作用,涂层表面颗粒被清除的同时,涂层材料也被不同程度的去除,从而导致涂层厚度的减少。其他文献也报道过类似的现象,如经喷砂处理之后的 Al₂O₃ 涂层厚度由 4.2 μm 降低至 2.5 μm^[17],TiAlN 涂层在压强为 0.6 MPa 喷砂处理后,厚度仅为 1.3 μm,且在局部区域出现基体^[18]。从图 2 中还可以看出,喷丸处理后涂层厚度显著大于喷砂(干喷砂和湿喷砂)后处理的涂层厚度,其原因在于喷砂所用介质为带有棱角的白刚玉,而喷丸处理所用介质为高速钢圆粒粒

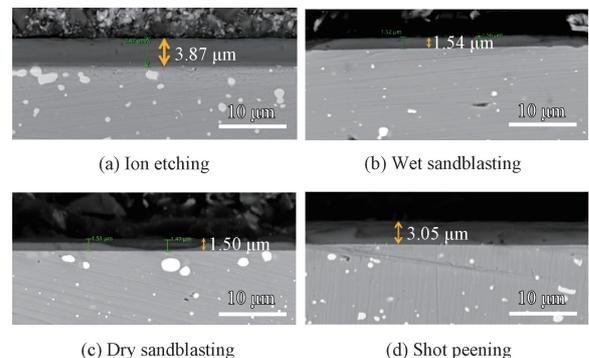


图 2 不同方法处理后涂层的截面 SEM 形貌

Fig. 2 Cross-sectional SEM morphology of post-treated coating

子,其材料去除能力弱于白刚玉。

图 3 为经过不同方法处理后 AlCrN 涂层的显微硬度。从图中可以看出,在 0.25 N 的载荷力下,后处理前后 AlCrN 涂层的硬度值没有较大差异,为 3 350 HK。这是因为在较小的载荷作用下,压头主要作用在涂层表面。当载荷增加至 0.5 N 时,未经处理和经离子刻蚀的 AlCrN 涂层依旧表现出较高的显微硬度;而经过喷砂和喷丸后处理方法处理的涂层的显微硬度则大幅度降低,这和涂层厚度减薄以及压痕变深有关,涂层硬度受较软的基体影响增大。随着载荷进一步增加至 1 N 时,压痕进一步变深,所有 AlCrN 涂层均受到较软基体影响,显微硬度均呈现不同程度的降低。其中,经湿喷砂和干喷砂后处理方法处理的 AlCrN 涂层的显微硬度降低至 1 700 HK。

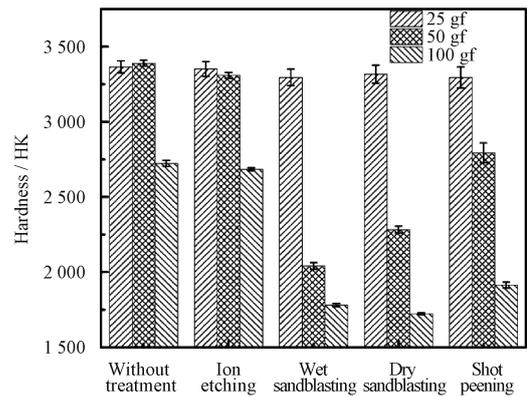


图 3 不同方法处理后 AlCrN 涂层的显微硬度

Fig. 3 Micro-hardness of AlCrN coating after different post-treatments

2.2 涂层表面形貌及粗糙度

图 4 为经过不同方式后处理的 AlCrN 涂层的表面 SEM 形貌。

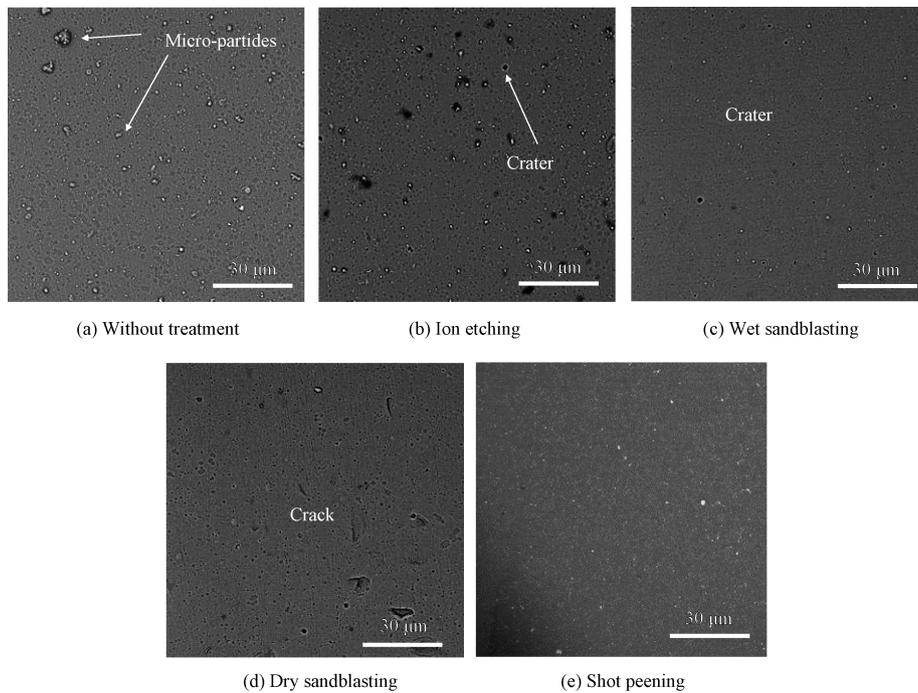


图 4 不同方式处理后 AlCrN 涂层表面形貌

Fig. 4 Surface morphologies of AlCrN coating after different post-treatments

从图 4a 可以看出,未处理 AlCrN 涂层表面存在较多尺寸不一的液滴颗粒和凹坑,这是多弧离子镀膜技术所制备涂层表面形貌的典型特征^[11]。液滴生成的主要原因是,镀膜过程中熔融态的金属液滴在涂层表面固化所致。图 4b~4e 分别为经过离子刻蚀、湿喷砂、干喷砂以及微粒子喷丸处理后的 AlCrN 涂层表面形貌。可以明显看出,涂层表面颗粒的数目明显变少,即后处理可以显著降低涂层表面的颗粒。特别的,经干喷砂后处理的 AlCrN 涂层表面出现裂纹和凹坑,见图 4d。离子刻蚀后处理过

程中,涂层表面的颗粒被 Ar⁺轰击去除,而喷砂和喷丸后处理过程中,涂层表面的颗粒则在喷料切削作用下被去除。

根据国际标准 ISO 21874^[16]统计涂层表面液滴数目,可定量分析不同后处理方法对涂层表面液滴的清除效果,统计结果见表 3。

由表 3 可以看出,AlCrN 涂层经过不同方式处理后,表面液滴均不同程度减少,表明不同后处理方法均对涂层表面液滴具有清除效果。其中,湿喷砂效果最佳,涂层表面颗粒减少 91.1%;微粒子喷丸

表3 不同方式处理后 AlCrN 涂层表面液滴数目统计结果和表面粗糙度

Table 3 Statistical results of the number of droplets on the surface of the AlCrN coating and the surface roughness after different post-treatments

Post-treatments	Number of micro-particles	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$
Without treatment	314±11	0.274±0.050	0.531±0.061
Ion etching	248±9	0.221±0.013	0.412±0.024
Wet sandblasting	28±6	0.0384±0.022	0.0605±0.031
Dry sandblasting	41±7	0.186±0.011	0.314±0.009
Shot peening	36±10	0.114±0.16	0.228±0.017

和干喷砂效果次之,涂层表面颗粒分别减少 88.5% 和 86.9%;而离子刻蚀后处理方法可使涂层表面颗

粒数目减少 21.0%。清除效果的差异是因为带有棱角的白刚玉去除颗粒能力要强于喷丸处理所用的高速钢球形粒子以及离子刻蚀的 Ar^+ 轰击。

图 5 为不同方法处理后的 AlCrN 涂层表面三维形貌,表 3 列出了相应的表面粗糙度结果。由表 3 可知,经不同方式处理后,AlCrN 涂层的表面粗糙度均有所降低。其中湿喷砂后处理的涂层具有最小的粗糙度,微粒子喷丸、干喷砂后处理的涂层次之,而经离子刻蚀后处理的涂层粗糙度降低不明显。因干喷砂可使涂层表面产生凹坑及裂纹,因此其表面粗糙度大于湿喷砂和微粒子喷丸后处理的涂层表面粗糙度。

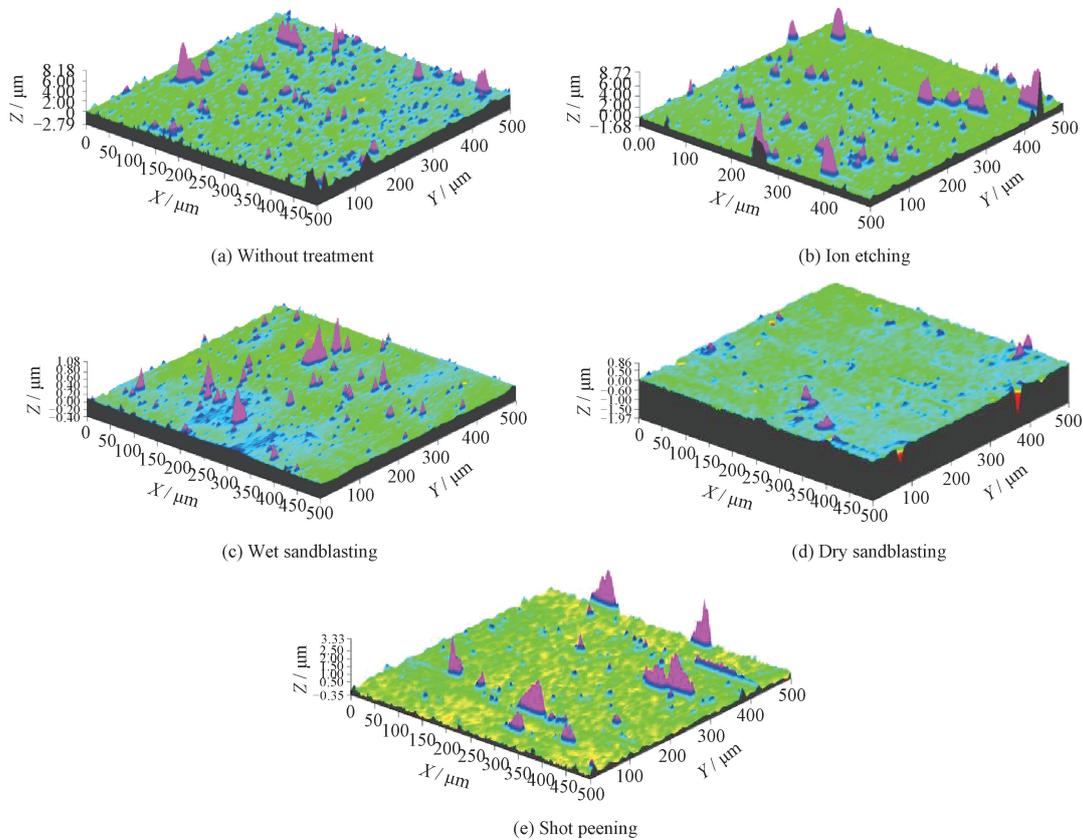


图 5 不同方法处理后 AlCrN 涂层的表面三维形貌

Fig. 5 Three-dimensional surface morphology of AlCrN coating after different post-treatments

由上述表面形貌结果可知,不同方法后处理均可有效减少 AlCrN 涂层表面颗粒,降低其粗糙度。

2.3 涂层 XRD 物相

图 6 为不同方法处理后 AlCrN 涂层的 XRD 衍射图谱。由图中可以看出,经不同方法处理后 AlCrN 涂层的 XRD 图谱与未处理涂层类似,所有 AlCrN 涂层的主要物相为固溶的 $\text{fcc}-(\text{Cr}, \text{Al})\text{N}$ 相^[2],不同方式后处理对 AlCrN 涂层和基体的相组成没有影响。此外,可以发现经湿喷砂和干喷砂后处理的涂层在 (111) 处和 (200) 处的特征衍射峰强

度相对于未处理涂层的衍射峰强度均明显降低,而 (200) 处衍射峰强度相比于 (111) 大幅度提高。这是因为经过不同后处理的 AlCrN 涂层厚度均有所降低(图 2),参与衍射的涂层体积减少,从而引起 (111) 和 (200) 晶面处的特征衍射峰强度的降低。通常, (111) 和 (200) 是电弧镀 AlCrN 涂层的两个主要衍射峰,并且随着沉积过程呈现出不同的优先生长。在沉积初期涂层的优先生长为 (200) 晶面,随着厚度的增加,基于涂层体系能量最低原则, (111) 晶面成为涂层的优先生长晶面。而干喷砂和湿喷砂

处理导致 AlCrN 涂层厚度从 3.8 μm 减少至 1.5 μm,露出底层呈现(200)优先生长的涂层。因此,喷砂后,(200)处衍射峰强度高于(111)晶面衍射峰强度。

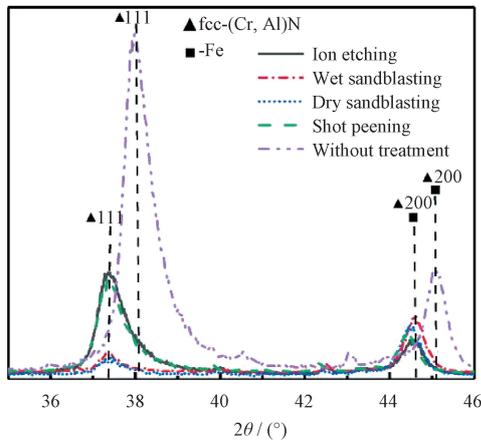


图 6 不同方法后处理 AlCrN 涂层在 35°~46°区间 XRD 图谱
Fig. 6 XRD patterns in the range of 35°~46° of AlCrN coatings after different post-treatments in the range of 35°~46°

从图 6 中还可以看出,相比于未经处理的 AlCrN 涂层,不同方法后处理的 AlCrN 的峰位均向低角度发生偏移。表 4 列出不同方法处理后 AlCrN 涂层的(111)和(200)衍射峰位角度(2θ)。可以发现,以 (Al, Cr)N 的(200)衍射峰为例,其中干喷砂和微粒子喷丸后处理后的峰位偏移值最大,分别达到了 0.561°和 0.641°;离子刻蚀和湿喷砂后处理次之,为 0.461°。同样的,相比于未经处理的 AlCrN 涂层,不同方式后处理的 AlCrN 涂层(111)衍射峰也向低角度偏移,其中湿喷砂处理后的 AlCrN 涂层峰位偏移值最大,达到了 0.680°,离子刻蚀、干喷砂和微粒子喷丸处理次之,分别偏移了 0.600°、0.559°和 0.601°。其主要原因可能是喷丸、喷砂以及高能 Ar⁺轰击可引起点缺陷,导致涂层中晶格发生畸变和膨胀^[17],晶格间距 *d* 增大,而根据布拉格衍射定律 $2d\sin\theta = n\lambda$ 可知,衍射峰相应的向低角度发生偏移。

表 4 不同方式后处理 AlCrN(111)和(200)峰对比
Table 4 Comparison of AlCrN (111) and (200) peaks after different post-treatments

Post-treatments	Peak position/(°)	
	(111)	(200)
Without treatment	37.981	45.061
Ion etching	37.381	44.600
Wet sandblasting	37.422	44.500
Dry sandblasting	37.301	44.600
Shot peening	37.380	44.420

2.4 摩擦磨损性能

图 7 为经过不同方法后处理的 AlCrN 涂层的摩擦因数。由图可知,未经处理 AlCrN 涂层的平均摩擦因数为 0.654,经离子刻蚀刻蚀后 AlCrN 涂层的平均摩擦因数降低至 0.620,经湿喷砂、干喷砂和微粒子喷丸后处理的 AlCrN 涂层的平均摩擦因数分别降低至 0.617、0.624 和 0.626。

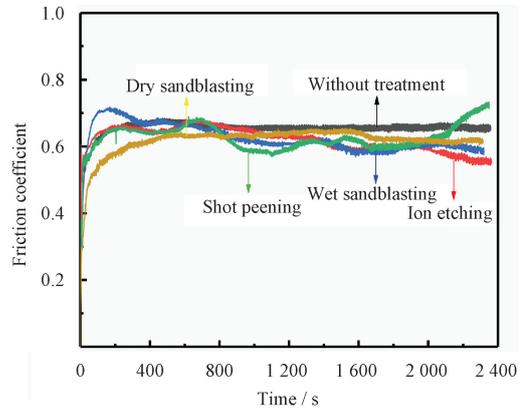


图 7 不同方式后处理 AlCrN 涂层的摩擦因数
Fig. 7 Friction coefficient of AlCrN coating after different post-treatment methods

经不同方式后处理 AlCrN 涂层的平均摩擦因数均小于原始涂层,说明不同后处理方式均可降低涂层表面粗糙度,进而降低其摩擦因数。离子刻蚀、干喷砂和湿喷砂处理后的涂层的摩擦因数随着摩擦时间逐渐降低;而微粒子喷丸处理后的涂层在磨损中段摩擦因数较低,后段逐渐增大。

通过计算,经不同方式后处理 AlCrN 涂层的磨损率分别如下:未经处理 AlCrN 涂层的磨损率为 $1.4 \times 10^{-16} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,经离子刻蚀刻蚀后 AlCrN 涂层的磨损率为 $3.5 \times 10^{-17} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,经湿喷砂、干喷砂和微粒子喷丸后处理的 AlCrN 涂层的磨损率分别为 2.4×10^{-16} 、 8.2×10^{-17} 和 $7.2 \times 10^{-16} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。经微粒子喷丸后处理的 AlCrN 涂层耐磨性最差,离子刻蚀后处理的 AlCrN 涂层磨损率最小,耐磨性最好。涂层的摩擦磨损性能受到涂层的化学成分、组织结构、表面粗糙度和硬度等多因素综合作用的结果。经离子刻蚀后处理涂层的摩擦因数在整个磨损阶段表现出稳定且降低的趋势,因此表现出最佳的摩擦磨损性能;而经微粒子喷丸后处理的涂层在磨损过程中波动较大,其原因是喷丸处理后的涂层中残余应力较大,易使涂层在摩擦载荷作用下发生剥落^[18],较硬的涂层碎片参与磨损,导致涂层表现出较高的磨损率。

图 8 为 AlCrN 涂层的磨损表面 SEM 形貌,表 5

为相应的涂层磨痕区域的 EDS 分析结果。由图 8a~8d 磨痕两侧堆积的磨屑和中部的犁沟状的磨痕,以及在磨屑中存在少量的氧化物,可以得出磨粒磨损并伴有少量的氧化磨损是涂层磨损的主要方式。从图 8d 可以发现涂层表面存在着较多的凹坑,这是干喷砂砂料对涂层表面的微切削作

用造成的。从图 8e 可以发现,涂层呈灰白色,这是微粒子喷丸丸料对涂层表面的冲击作用造成的;此外,磨痕中部犁沟处及磨痕两侧的磨屑中含有较多的氧化物,以及在磨痕处涂层存在被去除的现象,因此在图 8e 中的磨损方式为磨粒磨损和氧化磨损。

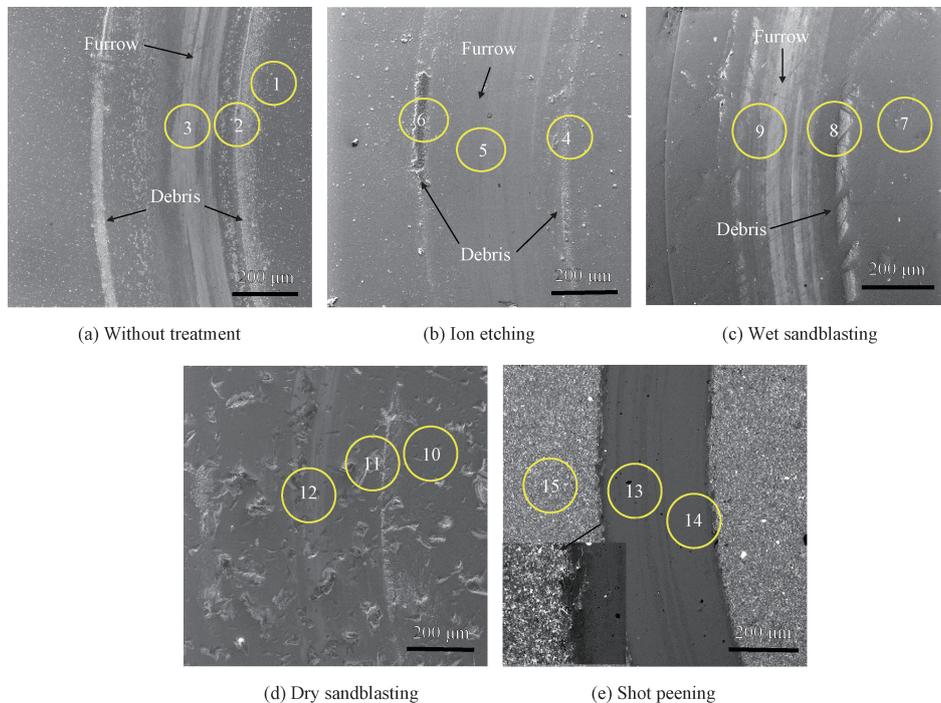


图 8 不同方式后处理 AlCrN 涂层的磨痕形貌

Fig. 8 Worn morphology of the AlCrN coatings after different post-treatments

由图 8a~8e 及表 5 可以发现,不同区域的 O 元素含量差异明显。磨痕内部 O 元素含量较高,这是因为磨损过程中此区域接触应变最大,摩擦温

表 5 不同方式后处理 AlCrN 涂层的磨痕 EDS 分析(W/%)
Table 5 EDS analysis of the wear scar of AlCrN coating after different methods (Weight content/%)

Location	Al	Cr	N	O
1	47.2	39.0	9.1	4.7
2	46.4	39.9	6.6	7.0
3	46.0	36.3	9.1	8.6
4	48.2	40.0	6.7	5.1
5	34.0	15.0	5.6	45.4
6	44.0	34.5	14.7	6.8
7	45.5	40.3	9.2	5.0
8	45.5	39.5	9.8	5.1
9	44.3	41.1	6.8	7.8
10	44.7	40.2	9.7	5.3
11	36.5	31.6	4.1	27.8
12	43.1	38.8	8.3	9.9
13	50.2	44.8	4.1	0
14	30.3	26.2	4.3	39.3
15	41.4	34.5	10.9	13.2

度较高,因此会产生较多的氧化物。在磨痕两侧区域,其主要成分是磨屑(涂层和少量 Al_2O_3),因此 O 含量相对较低。此外,在图 8b 中区域 5 处 O 含量最高,表明生成了大量的 Al_2O_3 ,而 Al_2O_3 在磨损过程中具有减摩作用,使得磨损过程中摩擦因数更稳定且平滑。因此,离子刻蚀后处理涂层在磨损过程中的摩擦因数呈现降低的趋势。

2.5 涂层切削性能

图 9 为涂层刀具切削寿命曲线。当磨钝标准 VB 为 0.2 mm 时,未处理的 AlCrN 涂层刀具切削长度为 10 m,而经过不同方法处理后的 AlCrN 涂层刀具切削长度均有明显提高。经微粒子喷丸处理的 AlCrN 涂层刀具切削长度可达 13.3 m,切削寿命提高约 30%,经干喷砂和离子刻蚀处理的 AlCrN 涂层刀具在切削长度为 14 m 时失效,切削寿命提高 40%;而经湿喷砂后处理的涂层刀具切削长度可达 16 m,提高了 60%。

图 2 中提到,经过喷砂和喷丸后处理,涂层厚度有显著下降,但刀具寿命不降反升。其原因在于涂

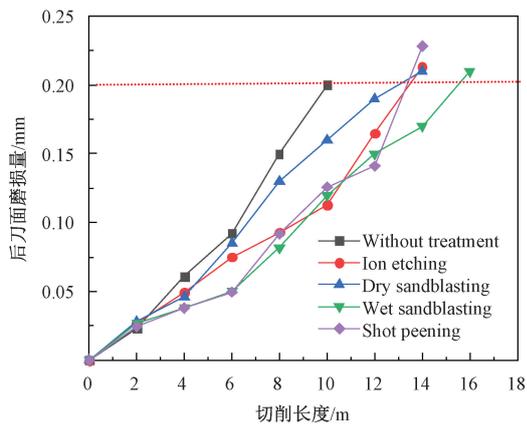


图 9 不同方法处理后 AlCrN 涂层刀具切削寿命曲线
Fig. 9 Cutting life curve of AlCrN coated tools after different treatments

层表面粗糙度的降低,减少了涂层刀具在切削时受到的应力和磨损。同时,经过喷砂和喷丸处理,刀具刃口钝圆半径增大,切削时能够大幅度降低刀尖刃

口处接触应力,减少了涂层的疲劳应力失效和机械磨损,从而可以进一步提高刀具寿命^[18]。此外,微喷砂和微粒子喷丸可以将残余压应力引入到涂层和基体中,而适当的残余压应力可以抑制切削过程切削裂纹在涂层中的扩展,提高涂层的抗断裂性能^[13],同时使得涂层具有较低的切削应力^[14]。

图 10 为 AlCrN 涂层刀具失效后的后刀面磨损形貌。图 10 各图左侧为体式显微镜后刀面磨损形貌,右侧为后刀面虚线区域的 SEM 微观形貌。从图中可以看出,涂层刀具切削刃处均存在涂层磨损、剥落区域,并且裸露出刀具基体。未经处理和经离子刻蚀后处理的 AlCrN 涂层刀具后刀面出现大片的涂层剥落区域,高速钢刀具基体出现了明显磨损和变形,此时,涂层对刀具失去保护作用,刀具失效。经湿喷砂和干喷砂后处理的 AlCrN 涂层刀具后刀面处虽存在明显的磨损,但涂层保持完整。同时,刃口钝圆半径明显增大,在切削时降低接触应力,提高刀

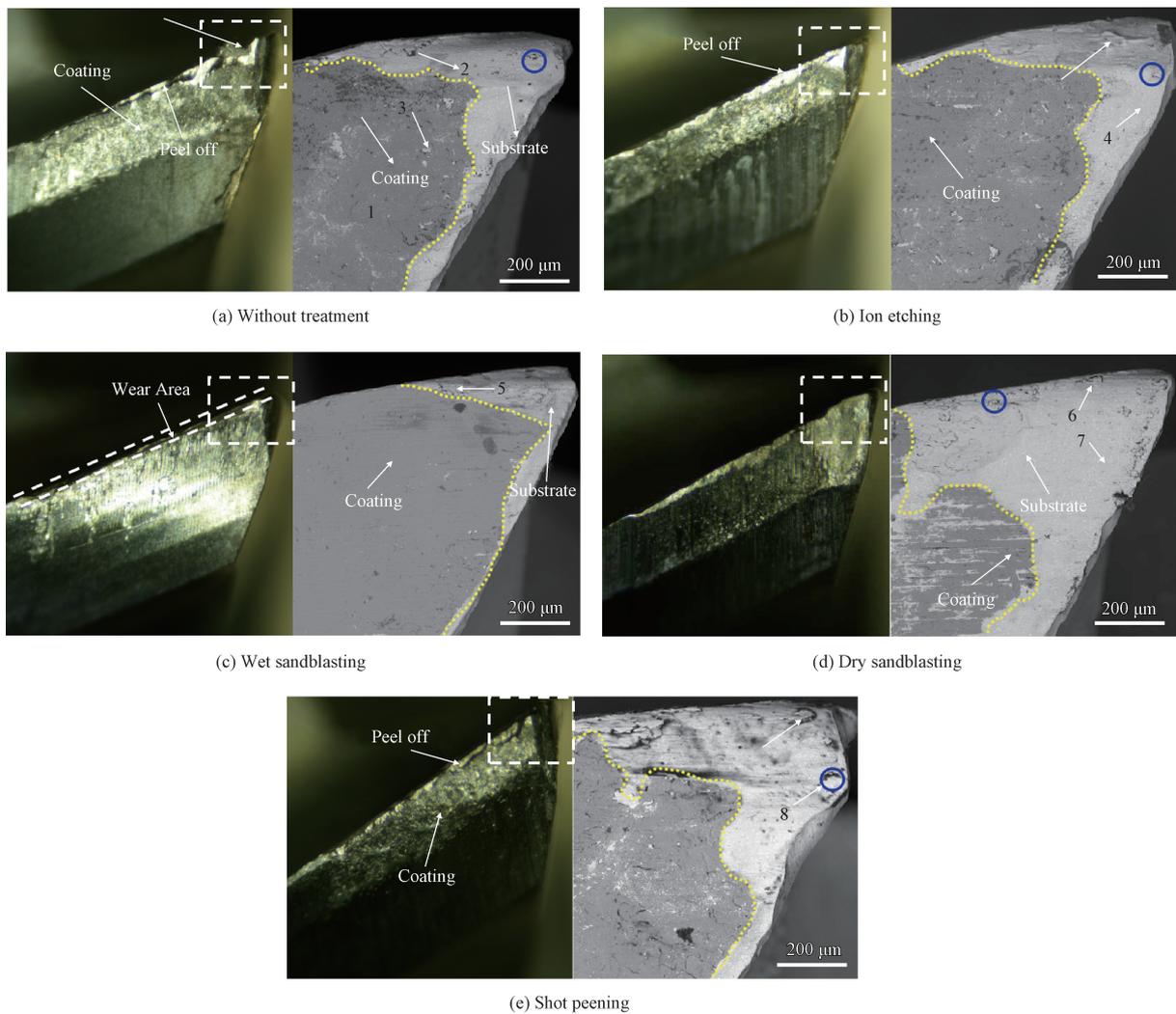


图 10 不同方法后处理 AlCrN 涂层刀具的后刀面磨损形貌

Fig. 10 Flank worn morphology of AlCrN coated tools after different post-treatments

具寿命^[16]。此外,干喷砂处理的 AlCrN 涂层刀具刃尖处存在轻微崩刃,导致涂层刀具提前失效。微粒子喷丸方式后处理的 AlCrN 涂层刀具的后刀面存在轻微的涂层剥落,结合图 7 中微粒子喷丸的摩擦因数曲线后段摩擦因数突然上升,说明在切削后段磨损速度加快,刀具提前失效。

利用扫描电子显微镜对 AlCrN 涂层刀具后刀面的磨损失效形貌进一步分析,如图 10 中右侧 SEM 图片所示。图中刀具表面白亮色区域为高速钢刀具基体,深灰色区域为未磨损的 AlCrN 涂层。涂层表面黏附的切屑,会增大切削过程中涂层所受到的剪切应力,致使涂层发生不同程度的磨损和剥落。刀具切削过程伴随着热和切削力的共同作用,涂层表面与硬质点及切屑发生粘合作用,即产生粘结磨损,当粘着力大于 AlCrN 涂层与高速钢基体膜基结合强度时,涂层被撕裂且随切屑排出^[19]。在切削过程中,当切屑不能完全随切屑排除,极易粘附在刀具切削刃处形成切屑瘤,极大增加了切削刃所受的切削力,加剧了刀具的变形和磨损^[19]。

结合磨损区域 EDS 和 SEM 形貌进行分析(见图 10 和表 6),经湿喷砂后处理的涂层刀具,在刀尖和切削刃处均未见切屑瘤生成,涂层磨损程度低且剥落面积小。未经处理的涂层刀具和离子刻蚀后处理的涂层刀具在刀尖和刀刃处均形成切屑瘤,且涂层存在较大区域剥落,加剧了刀具磨损。经干喷砂后处理的涂层刀具由于涂层脱落严重,失去了对刀具的保护作用,且刀尖处有切屑瘤生成,因此提前失效,同时,因为干喷砂对涂层表面的颗粒去除作用,刀具寿命相比于未处理涂层刀具有所增加。经微粒子喷丸后处理的涂层刀具涂层脱落严重,涂层表面附着大量白色点状切屑,增大切削时的剪切应力;同时,刀具基体存在较大磨损,在刀刃和刀尖处均有切屑瘤形成,在切屑和切屑瘤的共同作用下,加剧刀具

磨损;此外,破碎的积屑瘤易粘附在切削刃处,在切削力的影响下,使切削刃在高速切削过程中极易发生崩裂情况,加快了切削刀具的磨损失效。在刀具表面有大量的白色斑点,其主要成分包含 Fe、Mo 和 Cr,这是被加工材料 20CrMo 黏附在刀具表面形成的,为典型的黏附磨损。由以上切削结果和形貌分析可以发现,经湿喷砂后处理的 AlCrN 涂层表面的颗粒较少,且涂层表面没有因喷砂产生裂纹和凹陷,涂层剥落面积最小,表现出最好的切削性能。

3 结论

(1) 与未经处理的 AlCrN 涂层相比,经离子刻蚀、湿喷砂、干喷砂和微粒子喷丸后处理的 AlCrN 涂层物相没有变化,均为固溶的 (Al, Cr) N 相。不同后处理方法均可以清除涂层表面颗粒,其中湿喷砂、微粒子喷丸和干喷砂对颗粒数目减少的作用最强,颗粒数分别降低了 91.1%、88.5% 和 86.9%;离子刻蚀后处理次之,涂层表面颗粒数目降低了 21.0%。相应的,湿喷砂后处理的涂层具有最小的粗糙度,微粒子喷丸、干喷砂后处理的涂层次之,而经离子刻蚀后处理的涂层粗糙度降低不明显。

(2) 经过喷砂(干喷砂和湿喷砂)处理后的涂层厚度均有明显降低,从而导致喷砂后涂层硬度有较大下降。经不同方法后处理的 AlCrN 涂层的摩擦因数均要小于未经后处理的涂层,其中干喷砂后涂层摩擦因数最低。涂层磨损方式是为磨粒磨损并伴有少量的氧化磨损。

(3) 经不同方法后处理的 AlCrN 涂层刀具切削寿命均有明显提高。相比于未经后处理的 AlCrN 涂层,经微粒子喷丸、干喷砂、离子刻、湿喷砂后处理的涂层刀具切削寿命分别提高了 30%、40%、40% 和 60%。不同后处理方式对 AlCrN 涂层刀具切削性能影响差别较大,这主要是因为不同后处理方式对涂层表面颗粒的清除效果不同。其中,经湿喷砂处理的 AlCrN 涂层表现出最好的切削性能。

表 6 不同后处理 AlCrN 涂层刀具后刀面 EDS 分析
(Weight table content/%)

Table 6 EDS analysis of flank face of AlCrN coated tools with different post-treatments (w/%)

Location	Fe	Al	Cr	Mn	O
1	0	48.54	50.31	0	0
2	95.25	0	1.62	1.07	1.68
3	94.80	0	4.70	0	0
4	45.89	0.73	4.06	13.48	0
5	92.64	2.05	5.02	0	0.28
6	89.04	0	0	0	9.67
7	67.37	0	5.32	17.97	9.34
8	79.69	1.19	5.26	6.10	2.58

参 考 文 献

- [1] KOLLA M G, KAMAKOTI R S, DHARMATEJA S S. Cutting characteristics of PVD coated cutting tools[J]. Materials Today Proceedings, 2018, 5(5): 11260-11267.
- [2] MEHRAN Q M, FAZAL M A, SAEEDRUBAIEE B A R. A critical review on physical vapor deposition coatings applied on different engine components [J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2018, 43(2): 158-175.
- [3] POLIANA S S, ANDERSON J S, MONIQUE A P, et al.

- Analysis of the surface energy interactions in the tribological behavior of AlCrN and TiAlN coatings [J]. *Tribology International*, 2020, 146: 106206.
- [4] TANG J F, LIN C Y, YANG F C, et al. Effects of nitrogen-argon flow ratio on the microstructural and mechanical properties of AlCrN coatings prepared using high power impulse magnetron sputtering [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 386: 125484.
- [5] 张世宏, 毛陶杰, 方炜, 等. 高能离子源清洗对 AlCrN 刀具涂层结构及性能的影响 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(24): 34-41.
- ZHANG S H, MAO T J, FANG W, et al. Effect of high-energy ion source cleaning on the structure and performance of AlCrN tool coating [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(24): 34-41. (in Chinese)
- [6] COL M, KIR D, ERESIR E. Wear and blanking performance of AlCrN PVD-coated punches [J]. *Materials Science*, 2013, 48(4): 514-520.
- [7] SOKOVIC M. Quality management in development of hard coatings on cutting tools [J]. *Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, 2007, 24(1): 421.
- [8] BOBZIN K. High-performance coatings for cutting tools [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016, 18: 1-9.
- [9] MONTESANO L, POLA A, GELFI M, et al. Effect of micro-blasting on cathodic arc evaporation CrN coatings [J]. *Surface Engineering*, 2013, 29(9): 683-688.
- [10] 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.
- [11] KLOCKE F, GORGELS C, STUCKENBERG A, et al. Qualification of coatings to predict wear behavior of micro blasted cutting tools [J]. *Key Engineering Materials*, 2010(438): 23-29.
- [12] 杜丽业, 邱联昌, 杜勇, 等. 不同后处理对 MT-TiCN 涂层刀具组织与切削性能的影响 [J]. *精密成形工程*, 2017, 9(3): 83-88.
- DU L Y, QIU L C, DU Y, et al. Effects of different post-treatments on the structure and cutting performance of MT-TiCN coated tools [J]. *Precision Forming Engineering*, 2017, 9(3): 83-88. (in Chinese)
- [13] BOUZAKIS K D, SKORDARIS G, MICHAELIDIS N, et al. Effect of film ion bombardment during the pvd process on the mechanical properties and cutting performance of TiAlN coated tools [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 202(4-7): 826-830.
- [14] HOU M D, MOU W P, YAN G D, et al. Effects of different distribution of residual stresses in the depth direction on cutting performance of TiAlN coated WC-10wt%Co tools in milling Ti-6Al-4V [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 397: 125972.
- [15] TANAKA S, SHIROCHI T, NISHIZAWA H, et al. Micro-blasting effect on fracture resistance of PVD-AlTiN coated cemented carbide cutting tools [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 308: 337-340.
- [16] ISO TC 107/SC 9 21874 PVD multi-layer hard coatings-composition, structure and properties [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2019.
- [17] BOUZAKIS K D, SKORDARIS G, GERARDIS S, et al. The effect of micro-blasting procedures on the cutting performance of coated tools [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005(200): 128-132.
- [18] BOUZAKIS K D, SKORDARIS G, BOUZAKIS E, et al. Optimization of wet micro-blasting on PVD films with various grain materials for improving the coated tools' cutting performance [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2011, 60: 587-590.
- [19] 周泽华. 金属切削原理 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993.
- ZHOU Z H. Principles of metal cutting [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1993. (in Chinese)
-
- 作者简介:** 张家敏,男,1993年出生,硕士研究生。主要研究方向刀具涂层。
E-mail: zhangjiamin0522@163.com
- 蔡飞(通信作者),男,1986年出生,博士,讲师。主要研究方向 PVD 硬质涂层和刀具涂层。
E-mail: caifei32@126.com