

不同弧电流对 AlCrBN 涂层结构和性能的影响

王建明^{a,b,c}, 蔡飞^{a,b}, 张林^{a,b}, 张世宏^{a,b,c}

(安徽工业大学 a.先进金属材料绿色制备与表面技术教育部重点实验室
b.现代表界面工程研究中心 c.材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: **目的** 提高涂层刀具在高速工况下的切削寿命。**方法** 利用电弧离子镀技术在高速钢试样块和刀具表面制备不同弧电流 (60、80、100 A) 的 AlCrBN 涂层。采用扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD)、X 射线光电子能谱 (XPS)、轮廓仪、洛氏压痕仪、划痕仪、显微硬度计、球盘摩擦磨损试验仪和切削试验对涂层的微观结构和性能进行研究分析。**结果** AlCrBN 涂层的物相成分为固溶的 fcc-(Cr,Al)N 相以及少量的 CrB₂ 和 fcc-BN 相。随着 AlCrBN 靶弧电流由 60 A 增至 100 A, 表面粗糙度 S_q 值由 197 nm 增至 208 nm, S_a 值由 107 nm 增至 113 nm; 显微硬度由 3574HK_{0.05} 先增至 3890HK_{0.05}, 再降至 3209HK_{0.05}; 结合强度 L_{c2} 由 57 N 增至 63 N, 再降至 55 N, 均呈现先增后减的趋势。不同弧电流制备的 AlCrBN 涂层的磨损率依次为 0.69×10^{-15} 、 0.38×10^{-15} 、 0.84×10^{-15} m³/(N·m), 涂层的磨损机理均为磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损。切削结果显示, AlCrBN 涂层刀具在切削速度 V_c 为 60 m/min 和 191 m/min 条件下的切削寿命均高于 AlCrN 涂层刀具, 且 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具切削寿命均最长, 分别为 9 m 和 6 m。切削速度 60 m/min 条件下的磨损机理: 初期为磨粒磨损, 中期为磨粒磨损和粘着磨损, 后期为粘着磨损。切削速度 191 m/min 条件下的磨损机理: 初期和中期为磨粒磨损和粘着磨损, 后期为粘着磨损。**结论** AlCrBN 涂层刀具与 AlCrN 涂层刀具相比, 切削性能更加优越, 并且 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的综合性能最优。

关键词: 电弧离子镀; AlCrBN 涂层; 弧电流; 刀具; 磨损; 切削

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0215-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.024

Effects of Different Arc Currents on the Structures and Properties of AlCrBN Coatings

WANG Jian-ming^{a,b,c}, CAI Fei^{a,b}, ZHANG Lin^{a,b}, ZHANG Shi-hong^{a,b,c}

(a.Key Laboratory of Green Fabrication and Surface Technology of Advanced Metal Materials of Education,
b.Research Center of Modern Surface and Interface Engineering, c. School of Material Science and Engineering,
Anhui University of Technology, Ma'an Shan 243000, China)

收稿日期: 2019-10-13; 修订日期: 2020-07-26

Received: 2019-10-13; Revised: 2020-07-26

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1808085QE131); 安徽省重点研究和开发计划专项 (1804b06020370); 国家自然科学基金 (51305002, 51522502)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province (1808085QE131), Key Research and Development Plan of Anhui Province (1804b06020370), National Natural Science Foundation of China (51305002, 51522502)

作者简介: 王建明 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为刀具涂层。

Biography: WANG Jian-ming (1996—), Male, Master, Research focus: tool coating.

通讯作者: 蔡飞 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面工程。邮箱: caifei32@126.com

Corresponding author: CAI Fei (1986—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: surface engineering. E-mail: caifei32@126.com

引文格式: 王建明, 蔡飞, 张林, 等. 不同弧电流对 AlCrBN 涂层结构和性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 215-224.

WANG Jian-ming, CAI Fei, ZHANG Lin, et al. Effects of different arc currents on the structures and properties of AlCrBN coatings [J]. Surface technology, 2020, 49(9): 215-224.

ABSTRACT: The work aims to improve the cutting life of coated tools at high speed. AlCrBN coatings with various arc currents (60, 80, 100 A) were prepared on high speed steel samples and tools by arc ion plating technology. Microstructures and properties of the coatings were studied by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffractometer (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), profilometer, scratch tester, microhardness tester, wear tester and cutting test. The phases of AlCrBN coatings were solid-soluble fcc-(Cr,Al)N phase and a small amount of CrB₂ and fcc-BN phase. With the increase of arc current of the AlCrB alloy target from 60 A to 100 A, the surface roughness S_q of AlCrBN coatings increased from 197 nm to 208 nm, and the S_a increased from 107 nm to 113 nm. The microhardness increased from 3574HK_{0.05} to 3890HK_{0.05} and then decreased to 3209HK_{0.05}. The adhesive strength L_{c2} increased from 57 N to 63 N and then decreased to 55 N. The wear rate of AlCrBN coatings prepared under different arc currents was 0.69×10^{-15} , 0.38×10^{-15} and 0.84×10^{-15} m³/(N·m) and the wear mechanism was abrasive wear, adhesive wear and oxidative wear. The cutting results showed that the cutting life of the AlCrBN coated tools under the conditions of $V_c=60$ m/min and $V_c=191$ m/min was higher than that of the AlCrN coated tools, and the cutting life of the AlCrBN coated tools prepared at 80 A was the longest, which is 9 m and 6 m respectively. Under the low cutting speed of $V_c=60$ m/min, the main wear mechanism was abrasive wear in the initial stage, abrasive wear and adhesive wear in the middle stage, and adhesive wear in the final stage. Under the high cutting speed of $V_c=191$ m/min, the main wear mechanism was abrasive wear and adhesive wear in the initial stage, abrasive wear and adhesive wear in the middle stage, and adhesive wear in the final stage. The AlCrBN coated tools show the superior cutting performance compared with the AlCrN coated tools. Moreover, the AlCrBN coating prepared at 80 A has the best comprehensive performance.

KEY WORDS: arc ion plating; AlCrBN coating; arc currents; tool; wear; cutting performance

近几十年来,切削加工刀具的市场需求量不断上升,也促使了刀具涂层的快速发展,从第一代的 TiN 简单二元涂层到第二代的 AlCrN 和 AlTiN 多元涂层,再到现在的 AlCrSiN 和 AlTiSiN 纳米复合涂层。尽管多元以及纳米复合涂层表现出优异的切削性能,但其在高速切削工况下的使用性能仍有待进一步提高。

研究表明,在 TiAlN 涂层中加入 Si 和 B 等元素,可形成性能良好的 TiAlSiN、TiAlBN、CrAlSiN、CrAlTiSiN、TiAlBSiN 等纳米复合结构涂层^[1-4]。如在 TiAlN 涂层中添加 Si 元素,可以形成非晶态 Si₃N₄ 相,而 TiAlN 纳米晶被非晶态 Si₃N₄ 相所包裹,这种非晶包裹纳米晶的结构可显著地提高涂层的硬度和抗氧化性能^[3]。同样,在 TiAlN 涂层中添加 B 元素,亦可形成 TiAlBN 纳米复合涂层,涂层微观结构由非晶 BN_x 相包裹纳米晶 TiAlN 晶粒组成,该结构的纳米复合涂层相较于 TiAlN 涂层,高温抗氧化性能有所提高^[3]。最近有研究发现,AlCrBN 涂层中的纳米级 fcc-AlCrN 晶粒周围被一层薄的 BN_x 相包裹^[4],使涂层具有超高硬度和低压应力。另外,在 AlCrBN 涂层中还发现存在 c-BN 和 hcp-BN 相。c-BN 相拥有超高硬度、高耐磨性和高温硬度^[5]。因为这些优点,AlCrBN 涂层已被用于高速钢滚齿刀的高速滚齿加工中^[6]。而

hcp-BN 拥有自润滑作用^[7],其经常被添加至自润滑涂层当中,以提高涂层的摩擦性能。

本文在 AlCrN 涂层基础上,使用 PVD 多弧离子镀技术,通过改变 AlCrB 合金靶材弧电流,制备不同弧电流的 AlCrBN 硬质涂层。通过一系列结构和性能检测,研究 AlCrBN 涂层的组织结构与性能之间的关系,并对其切削性能进行了详细讨论。

1 试验

1.1 样品制备

本文选用的基体材料为 M2 高速钢,尺寸分别为 18 mm×18 mm×5 mm 和 14 mm×14 mm×5 mm。经金相砂纸粗磨、精磨和尼龙布抛光后,在超声波清洗器中用乙醇和丙酮各清洗 30 min,使试样表面尽量光滑、无污染,然后放入真空室内。切削使用刀具为直径 10 mm 的 M42 四刃高速钢铣刀。表 1 所示为 M2 和 M42 的化学成分。

涂层制备系统为离子源-平面弧-柱弧复合 PVD 镀膜系统^[8]。炉内主要为 4 个 $\phi 160$ mm×15 mm 的圆弧靶和一个 $\phi 100$ mm×850 mm 的柱弧靶。两个 AlCr 合金圆靶(原子比 70/30,纯度 99.97%)装配在第 1、

表 1 基体和刀具化学成分
Tab.1 Chemical composition of substrate and tool

Type	W	Mo	Cr	V	Co	C	Mn
M2	5.50~6.75	4.50~5.50	3.80~4.40	1.75~2.20	—	0.80~0.90	0.15~0.40
M42	1.15~1.85	9.00~10.0	3.50~4.50	0.95~1.35	7.50~8.50	1.00~1.15	≤0.40

wt. %

4 号靶位,用于涂层的沉积;两个 AlCrB 合金圆靶(原子比 63/27/10,纯度 99.95%)装配在第 2、3 号靶位,用于涂层的沉积^[8]。沉积过渡层环节,使用两个 AlCr 合金圆靶;工作层镀膜环节,开启四个合金靶。AlCrBN 涂层制备的具体参数如表 2 所示。

表 2 AlCrBN/AlCrN 涂层沉积参数

Tab.2 Deposition parameters of AlCrBN/AlCrN coatings

Bias/V	Adhesive layer			Working layer		
	Pressure /Pa	Current /A	Time /min	Pressure /Pa	Current /A	Time /min
-60	3.5	80	140	4.0	60	70
—	—	—	—	—	80	55
—	—	—	—	—	100	40

1.2 结构表征与力学性能检测

采用 Phenom-XL 扫描电镜对涂层截面形貌进行检测。采用 P-7 型台阶仪对涂层表面粗糙度进行测量,扫描速度为 20 μm/s,分辨率为 200 Hz,扫描范围为 500 mm×500 mm,每个试样测 3 次,取平均值。采用日本理学 X 射线衍射仪对三种涂层进行物相分析,采用 Cu 靶材,电压 40 kV,电流 30 mA,衍射角范围 30°~90°,扫描速度 10 (°)/min。采用 Thermo ESCALAB 250 型 XPS 分析涂层的化学态,Ar⁺刻蚀表面深度≥50 nm。

利用显微维氏硬度计,在 50 g 载荷下进行硬度的测定,每个试样测 15 次,取平均值。使用洛氏压痕试验仪在 1470 N 载荷下对试样进行检测,并结合蔡司正置金属光学显微镜定性分析涂层的结合强度。采用划痕测试仪在加载力为 0~150 N,划痕长度为 8 mm,加载速率为 18.75 N/min,划痕速率为 1 mm/min 实验

参数下进行检测,并结合蔡司正置金属光学显微镜定量研究涂层的结合强度。

涂层摩擦实验在 CSM HT-1000 (Anton Paar) 型球-盘实验仪上进行,摩擦副为 φ5 mm 的 Al₂O₃ 球,测试时间 2400 s,温度 25 ℃,转速 400 r/min,载荷 5 N,磨痕直径 6 mm,并结合台阶仪和扫描电镜对磨痕形貌以及磨损机理进行分析^[9]。

切削实验加工设备为 VMC-85 立式铣床,主轴最大转速为 8000 rad/min。使用 ISM 型便携式工具显微镜测量后刀面的中间磨损带部分的平均磨损量 VB ,以此作为刀具磨损的磨钝标准^[10]。本文的磨损标准确定为 0.2 mm,即 $VB=0.2$ mm。切削实验使用的被切削材料为 40CrMo(C 0.35%~0.45%, Si 0.15%~0.40%, Mn 0.40%~0.70%, Cr 1.00%~1.50%, Mo 0.15%~0.25%, P≤0.035%, S≤0.035%),硬度为 220HB。选取两组切削参数进行实验。切削参数一:切削速度为 60 m/min,径向切深为 2 mm,轴向切深为 2 mm,每转进给量为 0.2 mm。切削参数二:切削速度为 191 m/min,径向切深为 0.2 mm,轴向切深为 2 mm,每转进给量为 0.2 mm。刀具悬伸量均为 40 mm。每切削 1 m,观察刀具后刀面磨损情况,并利用扫描电镜对其进行检测分析。

2 结果分析与讨论

2.1 形貌分析

图 1 为不同弧电流 AlCrBN 涂层的截面形貌,涂层厚度均在 4.0~4.5 μm 之间,粘接层 (AlCrN) 和工作层 (AlCrBN) 的厚度比约为 7 : 3,这可以有效地提高涂层的结合强度^[11]。图 2 所示为三种涂层的三维表面形貌。不同弧电流的 AlCrBN 涂层的表面粗糙度

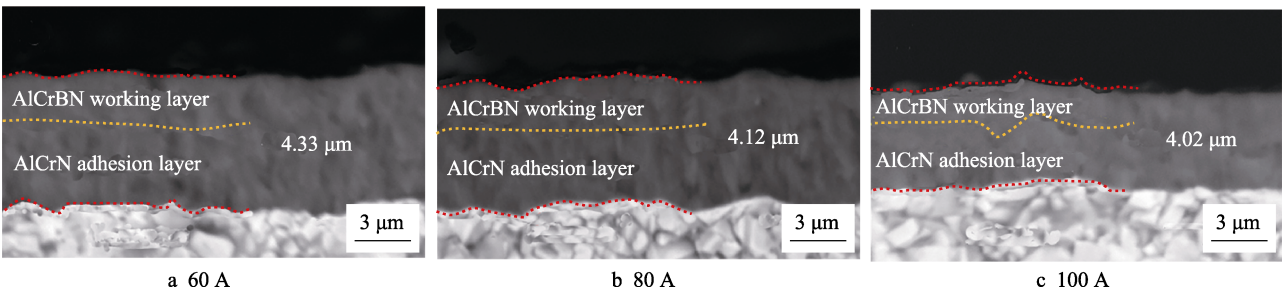


图 1 不同弧电流 AlCrBN 涂层截面形貌
Fig.1 Cross-sectional morphology of AlCrBN coatings with various arc currents

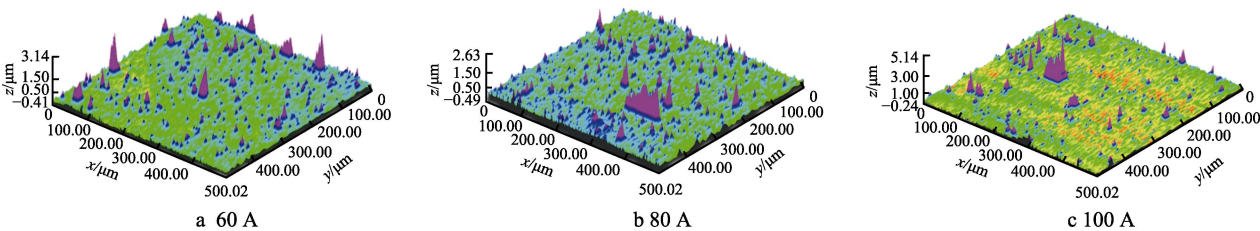


图 2 不同弧电流的 AlCrBN 涂层的三维表面形貌
Fig.2 3D Surface morphologies of AlCrBN coatings with various arc currents

根均方高度 (Sq) 和算术平均高度 (Sa) 见表 3。可以发现, 涂层表面粗糙度随弧电流的增加而增加。

表 3 不同弧电流的 AlCrBN 涂层的表面粗糙度

Tab.3 Surface roughness of AlCrBN coatings with various arc currents

Current/A	Sq/nm	Sa/nm
60	197±2	107±2
80	198±1	111±2
100	208±2	113±1

2.2 XRD 分析

图 3 为不同弧电流 AlCrBN 涂层的 XRD 图谱。发现涂层的主要结构相为 fcc-(Cr,Al)N 相。在标准的 fcc-CrN 和 fcc-AlN 衍射峰之间, 形成了 fcc-(Cr,Al)N 相, 可认为是 Al 原子固溶到 CrN 中, 形成 (Cr,Al)N 固溶体。因为原子尺寸较小的 Al 原子替代了 CrN 中原子尺寸较小的 Cr 原子, 使得涂层晶体面间距 d 减小^[12-13]。根据布拉格方程可知, d 的减小, 使得衍射角 θ 增大, 从而导致 (Cr,Al)N 相的衍射峰向高角度偏移。从图 3 中可以看出, (Cr,Al)N 分别在 (111)、(200)、(220)、(311) 和 (222) 衍射峰上出现, 并在 (111) 晶面上出现了优先取向。另外, XRD 图谱中还发现较弱的

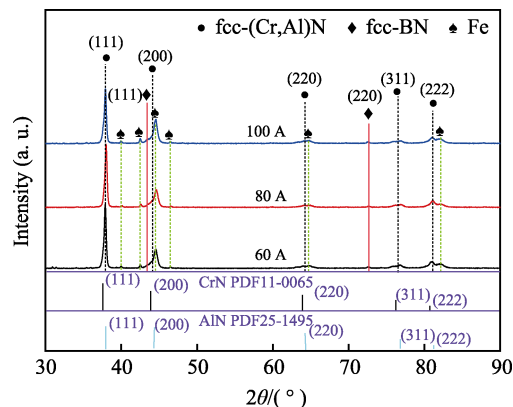


图 3 不同弧电流的 AlCrBN 涂层的 XRD 图谱

Fig.3 XRD spectrum of AlCrBN coatings with various arc currents

fcc-BN 衍射峰。最后, 从图 3 中还可以看出, 不同弧电流 AlCrBN 涂层的 XRD 结果呈现相同的变化趋势。

2.3 XPS 分析

AlCrBN 涂层的 XPS 测试结果显示, 不同弧电流条件下制备的 AlCrBN 涂层的 XPS 能谱图相似, 下面以 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层 (图 4) 为例进行说明。在 Al 2p 的 XPS 能谱图 (图 4a) 中, 结合

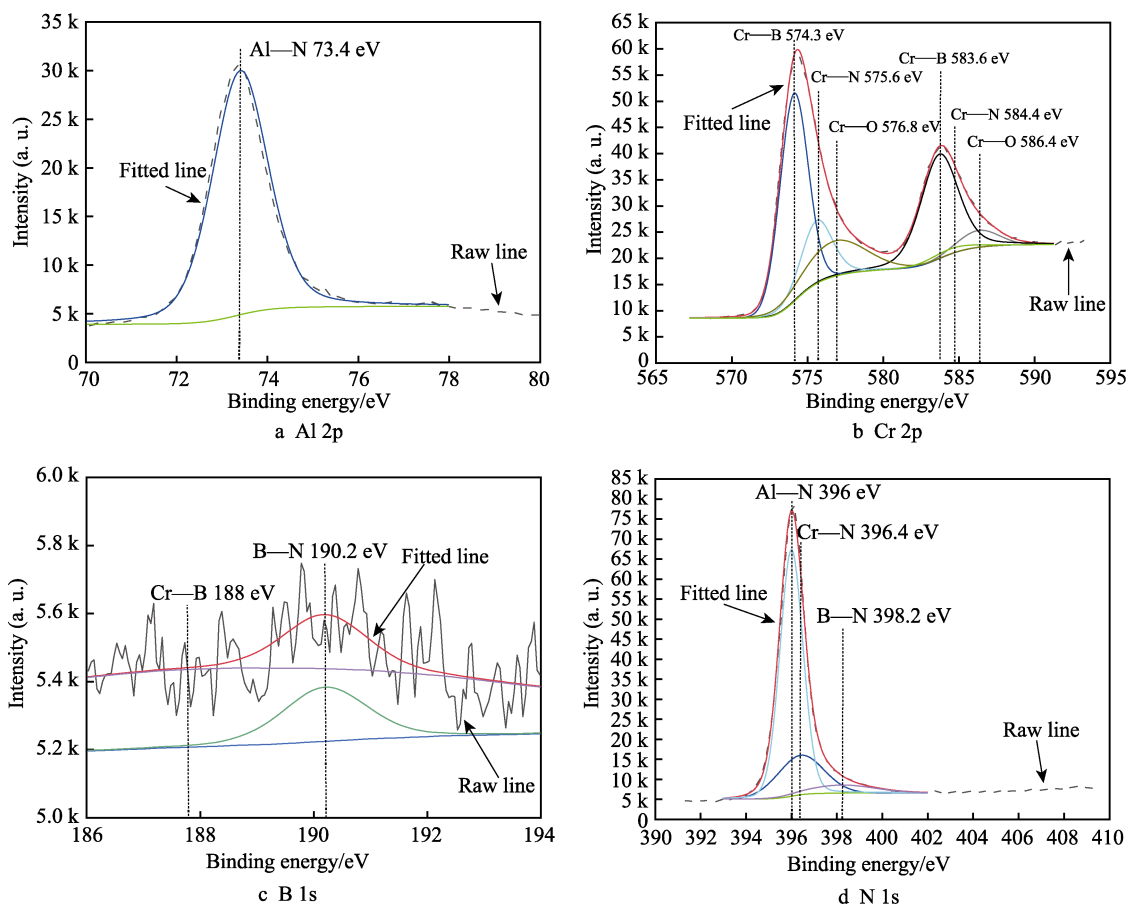


图 4 80 A 条件下 AlCrBN 涂层的 XPS 图谱

Fig.4 XPS spectrum of the AlCrBN coating under 80 A

能 73.4 eV 处出现特征峰, 这与 Al—N 键能对应的峰相吻合^[14]。在 Cr 2p 的 XPS 能谱图 (图 4b) 中, 结合能为 574.3 eV 和 575.8 eV 处的特征峰分别对应着 Cr—N 和 Cr—B^[15]。有研究提出, Cr—B 主要存在于 CrB₂ 相中, 而 CrB₂ 相的出现可以显著提高涂层的硬度^[16]。Cr 2p_{3/2} 和 Cr 2p_{1/2} 在 576.8 eV 和 586.4 eV 处出现特征峰, 这与 Cr—O 键能对应的峰相吻合。出现 Cr—O 键是因为, 在进行 XPS 检测之前, 样品表面暴露在空气中, 吸附空气中氧所导致。在 B 1s 的 XPS 能谱图 (图 4c) 中可以发现, 在结合能 190.6 eV 处出现特征峰, 这与 B—N 键能对应的峰吻合^[17]。在 N 1s 的 XPS 能谱图 (图 4d) 中可以发现, 在结合能 396.4、396.6、398.2 eV 处出现了特征峰, 这与 Al—N、Cr—N 和 B—N 键能吻合, 这也验证了 Al 2p、Cr 2p 和 B 1s 的 XPS 能谱图结果。

通过上述 XRD 和 XPS 结果可以得出, AlCrBN 涂层的物相主要为固溶的 fcc-(Cr,Al)N 相以及少量的 CrB₂ 和 fcc-BN 相。

2.4 涂层的显微硬度与结合强度

表 4 所示为 AlCrBN 涂层在 50 g 载荷下的显微硬度。可以发现, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的显微硬度最高 (3890HK_{0.05}), 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的显微硬度最低 (3209HK_{0.05})。图 5 为

AlCrBN 涂层的洛氏压痕形貌。可以发现, 60 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的压痕周围裂纹较多, 剥落较严重。当弧电流为 80 A 时, 压痕周围裂纹数量和长度均减少。当弧电流为 100 A 时, 洛氏压痕周围裂纹较多, 且出现了径向裂纹和环形剥落。根据文献[18]中的判定标准, 60、80、100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的膜基结合强度等级依次为 HF2、HF2 和 HF3。图 6 所示为 AlCrBN 涂层的划痕结果及表面形貌。经仔细分析, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层与基体的结合强度 L_{c2} 最高 (63 N), 60 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层次之 (57 N), 100A 条件下制备的 AlCrBN 涂层最低 (55 N)。可以发现, 划痕结果与经洛氏压痕判定的结合强度结果一致。

B 含量对 AlCrBN 涂层的结合强度和硬度影响较大。B 含量较低时, 不足以形成 fcc-BN 和 CrB₂ 相, 导致 AlCrBN 硬度较低。B 含量过高, 则倾向于生成

表 4 不同弧电流 AlCrBN 涂层的显微硬度
Tab.4 Microhardness of AlCrBN coating with various arc currents

Current/A	Microhardness(HK _{0.05})
60	3574±20
80	3890±10
100	3209±15

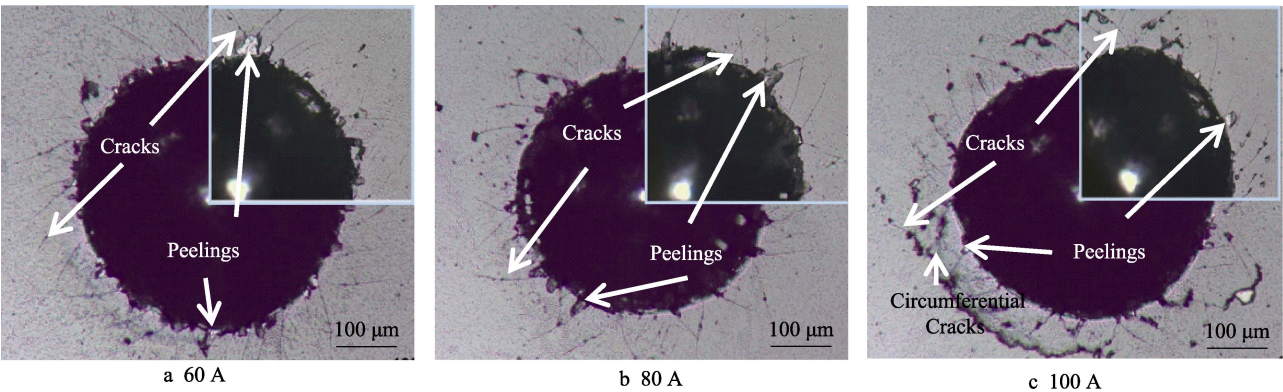


图 5 不同弧电流 AlCrBN 涂层的洛氏压痕形貌
Fig.5 Rockwell indentation morphology of AlCrBN coatings with various arc currents

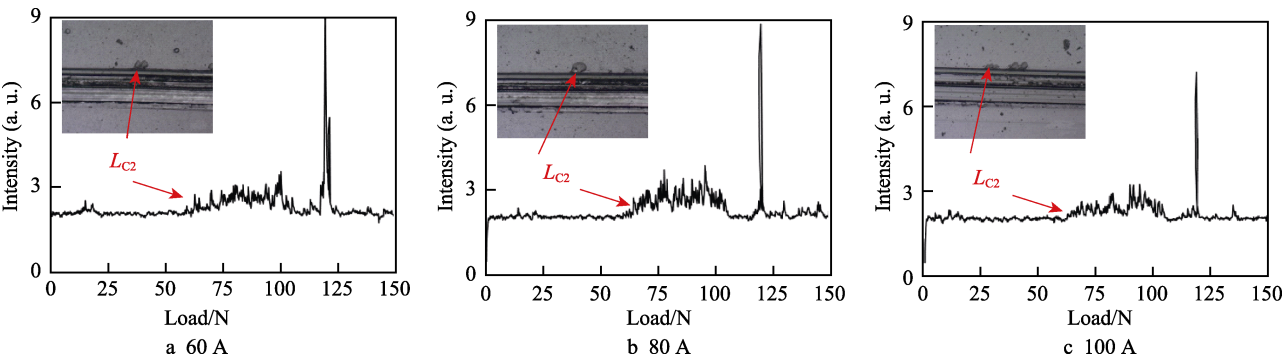


图 6 不同弧电流 AlCrBN 涂层的划痕声发射结果及划痕表面形貌
Fig.6 Scratch results and morphologies of AlCrBN coatings with various arc currents

较软的 hcp-BN 相, 导致 AlCrBN 硬度急剧下降, 并出现明显的环形剥落^[17]。只有当 B 含量适中时, AlCrBN 涂层的硬度才会达到最高。80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的 B 含量 (3.2%~5.0%) 适中, 其硬度高达 3890HK_{0.05}。

2.5 摩擦磨损

不同弧电流 AlCrBN 涂层的摩擦曲线如图 7 所示。60 A 和 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦曲线比较平缓, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦磨损曲线波动较大, 且 60 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦因数略高于 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦因数。在前 20 min, 80 A 条件下制备的

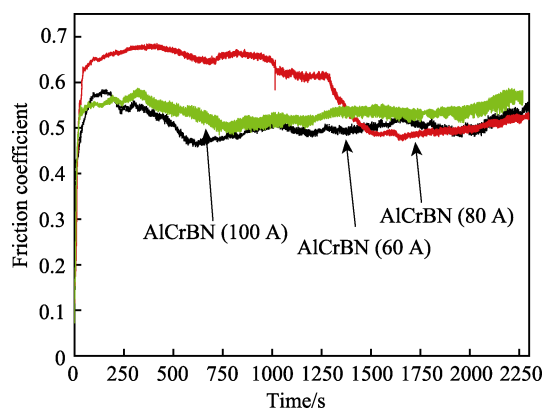


图 7 不同弧电流 AlCrBN 涂层的摩擦磨损曲线
Fig.7 Friction coefficient curves of AlCrBN coatings with various arc currents

AlCrBN 涂层的摩擦因数高达 0.65, 高于 60 A 和 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦因数。当摩擦时间超过 20 min 后, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦因数开始下降。当摩擦时间超过 25 min 后, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦因数低于 60 A 和 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦因数。当时间超过 28 min 后, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的摩擦因数最低, 仅为 0.46。

AlCrBN 涂层的磨损率 (见表 5) 大小依次为: $0.38 \times 10^{-15} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ (80 A) $< 0.69 \times 10^{-15} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ (60 A) $< 0.84 \times 10^{-15} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ (100 A)。可见 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的磨损率最小。

表 5 不同弧电流 AlCrBN 涂层的磨损率

Tab.5 Wear rate of AlCrBN coatings with various arc currents

Current/A	Depth/ μm	Volume/ mm^3	Rate/ $(\text{m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
60	0.22	0.001 04	0.69×10^{-15}
80	0.12	0.000 57	0.38×10^{-15}
100	0.27	0.001 27	0.84×10^{-15}

图 8 所示为 AlCrBN 涂层的磨痕形貌图。从图中可看到明显的沟槽状磨痕和粘附颗粒, 分别对应着磨粒磨损和粘着磨损的特征。3 种涂层磨痕的白色区域中, Al、Cr、B、N、O、C 元素的原子百分比相似。其中, O 含量较高, 表明摩擦磨损过程中存在氧化磨损。

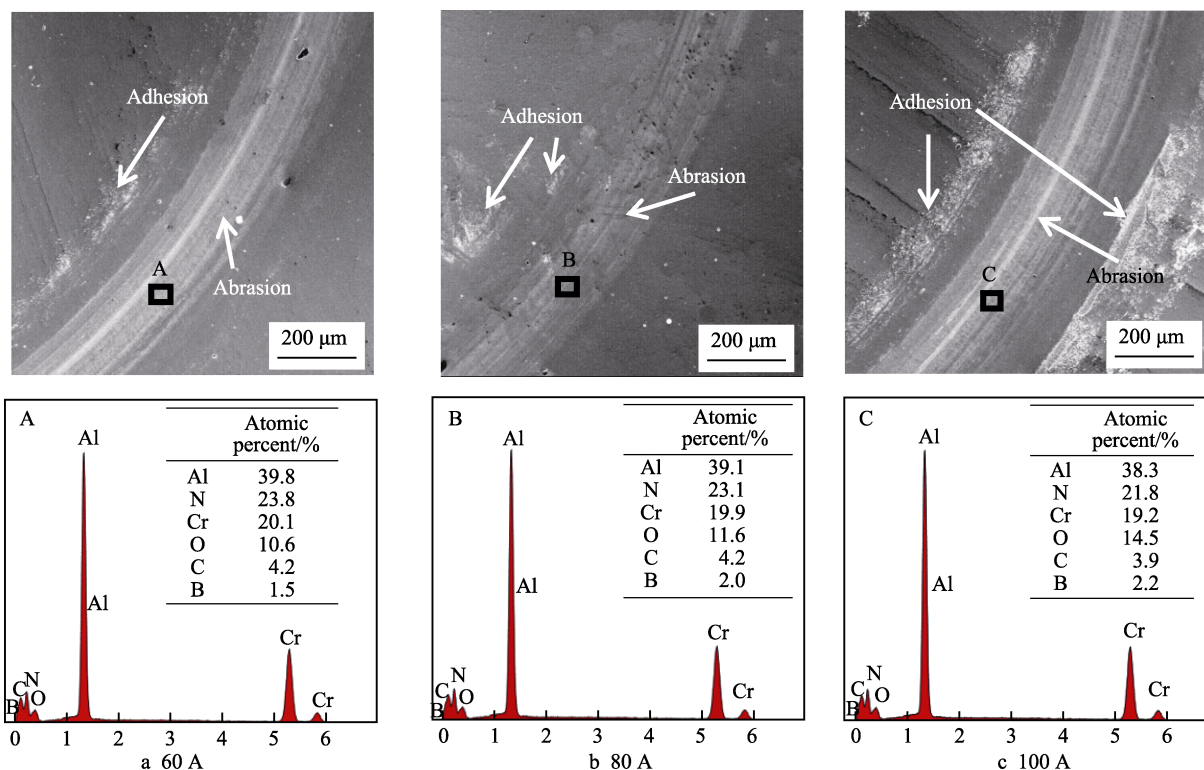


图 8 不同弧电流 AlCrBN 涂层的磨痕 SEM 形貌以及化学成分

Fig.8 SEM morphologies and chemical composition of worn tracks of AlCrBN coatings with various arc currents

2.6 涂层刀具的切削性能

图 9 所示为不同弧电流 AlCrBN 涂层刀具在 $V_c=60$ m/min 条件下的切削寿命曲线图。可以得出, 60 A 和 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具的切削长度均达 9 m。而 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具的切削长度只有 6 m。这是因为, 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层表面颗粒较多, 在切削磨损过程中, 磨粒磨损加剧。此外, 涂层的 B 含量较高, 易形成较软的 hcp-BN^[19], 使涂层的结合强度和硬度均下降。但相较于 AlCrN 涂层刀具在相同条件下 4 m 的切削寿命, AlCrBN 涂层刀具的切削寿命有了较大的提高。

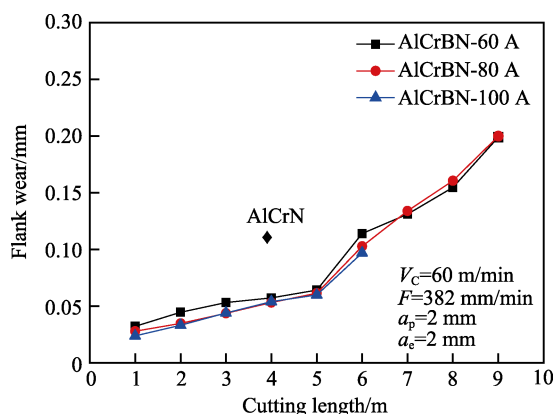


图 9 不同弧电流 AlCrBN 涂层刀具切削寿命

Fig.9 Cutting life of AlCrBN coated tools with different arc current coatings

在整个切削加工过程中, 不同弧电流 AlCrBN 涂层刀具的后刀面磨损情况有较大的差异, 如图 10 所

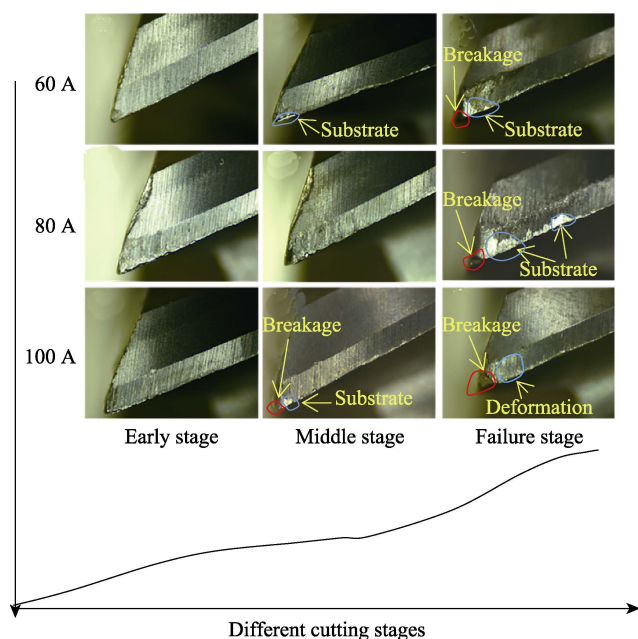


图 10 不同弧电流 AlCrBN 涂层刀具在不同阶段的后刀面磨损形貌

Fig.10 Surface morphology of the AlCrBN coated tools after flank wear with various arc currents

示。60 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具在磨损前期和中期阶段, 磨损状况良好, 但在磨损失效阶段出现大量崩刃, 导致涂层刀具无法继续切削。80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具, 在不同磨损阶段的磨损情况较稳定, 且没有出现大量崩刃现象, 所以可以继续切削。100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具, 后刀面磨损情况恶劣, 且出现大量崩刃现象, 切削寿命较短。

利用 SEM 对 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具的后刀面磨损形貌进行检测, 如图 11a 所示, 发现后刀面刃口处有大量的沟槽状磨痕^[20]存在。另外, 刃口处附着大量的白色颗粒, 经 EDS 分析发现, 白色颗粒中 Mo 含量较高, 这些 Mo 元素主要来自于被切削材料 (40CrMo), 所以推测初期磨损存在轻微的粘着磨损。此外, 刃口处发现有少量的黑色斑点, 对其进行 EDS 分析发现 O 含量较高, 表明切削过程存在轻微的氧化磨损。在切削中期阶段, 涂层刀具存在明显的因粘着磨损而导致的涂层撕裂剥落现象以及出现了较多“积瘤”(图 11b)。另外, 大量的沟槽状磨痕仍然存在。通过 SEM 对高速钢刀具后刀面刃口处进行检测, 发现 AlCrBN 涂层的后刀面刃口处白色颗粒数量增加, 且白色颗粒中 Mo 含量增加, 中期磨损阶段中的粘着磨损加剧。同时, 黑色斑点数量也增加, 其 O 含量均增加, 氧化磨损也加剧。当高速钢刀具切削进行到失效阶段时, 如图 11c 所示, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的后刀面刃口处白色颗粒数量进一步增加, 而白色颗粒中 Mo 含量减少。同时, 刃口处的黑色斑点数量减少, EDS 结果显示其 O 含量降低, 氧化磨损减弱。另外, 涂层刀具后刀面切削区域的涂层基本剥落, 沟槽状磨痕消失, 其失效阶段磨损机制主要为粘着磨损。

图 12 所示为 AlCrBN 涂层刀具在 $V_c=191$ m/min 时的切削寿命曲线图。可以得出, 80 A 和 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具的切削长度均达 6 m, 而 60 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具的切削长度为 5 m。相较于 AlCrN 涂层刀具只有 2.5 m 的切削长度, AlCrBN 涂层刀具在高速切削条件下的切削寿命有了显著提高。在整个切削加工过程中, 不同弧电流 AlCrBN 涂层刀具的后刀面磨损区磨损情况的变化差距较大, 如图 13 所示。60 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具在整个切削过程中磨损情况恶劣; 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具在整个阶段磨损情况比较稳定, 在达到磨钝标准前, 没有出现大面积崩刃现象; 100 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具的磨损情况稳定, 但是在失效阶段出现严重的崩刃现象, 无法继续切削。

图 14 为 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具在 $V_c=191$ m/min 时不同切削阶段的后刀面磨损形貌图。切削前期阶段 (图 14a), 可以观察到刀具后刀面上

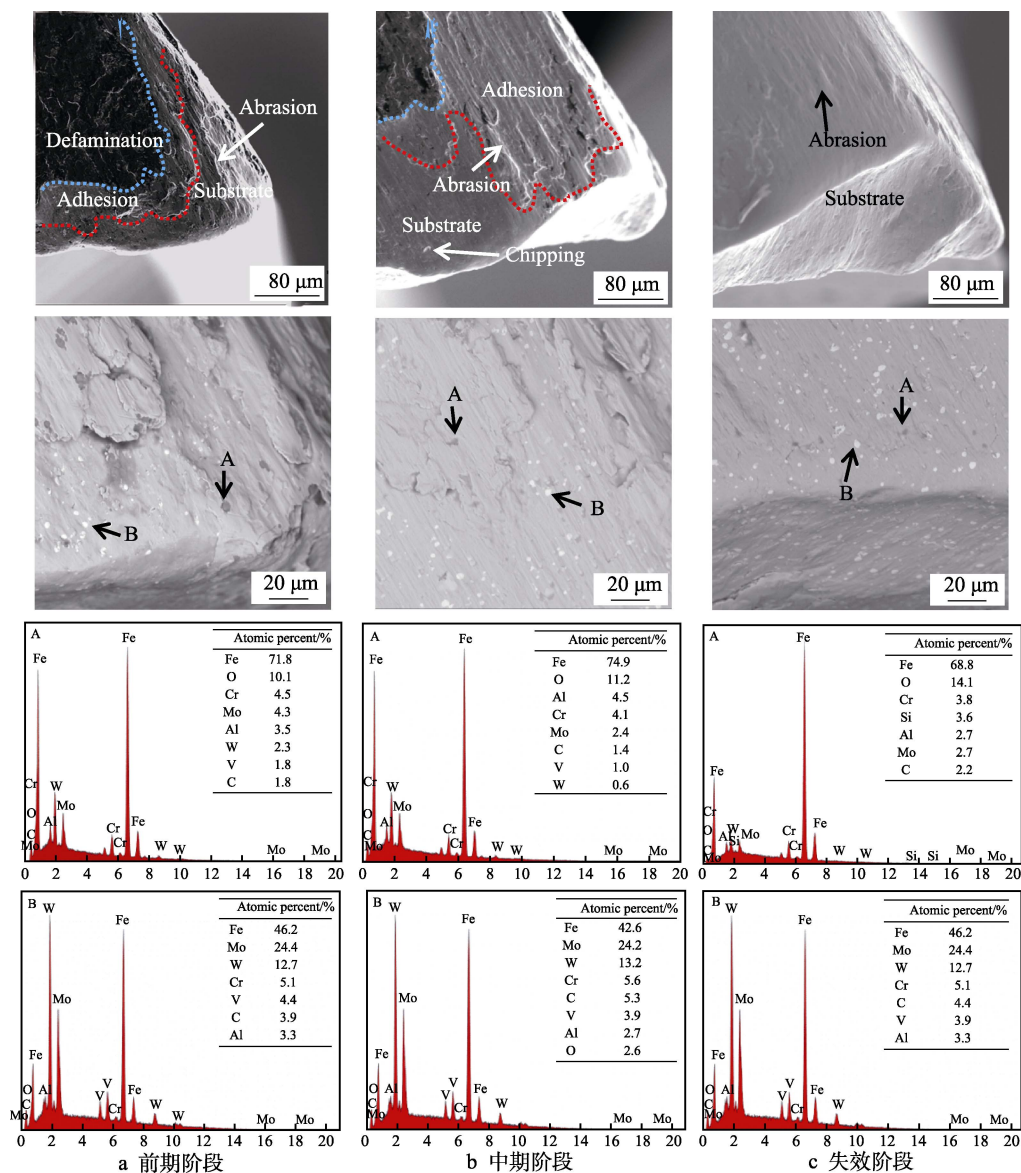


图 11 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具在不同切削阶段的后刀面磨损形貌

Fig.11 SEM analysis of the worn flank of the AlCrBN coated tools under 80 A at various cutting stages: a) initial stage; b) middle stage; c) failure stage

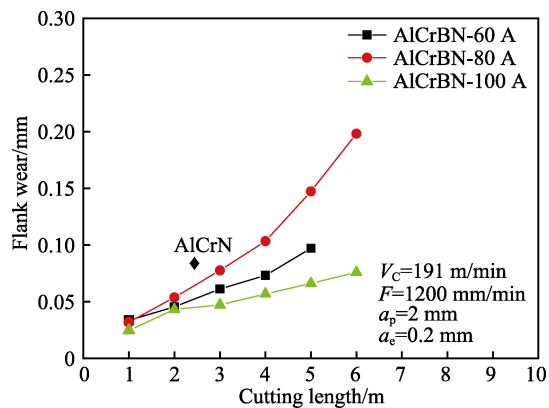


图 12 不同弧电流 AlCrBN 涂层刀具的切削寿命
Fig.12 Cutting life of AlCrBN coated tools with different arc currents

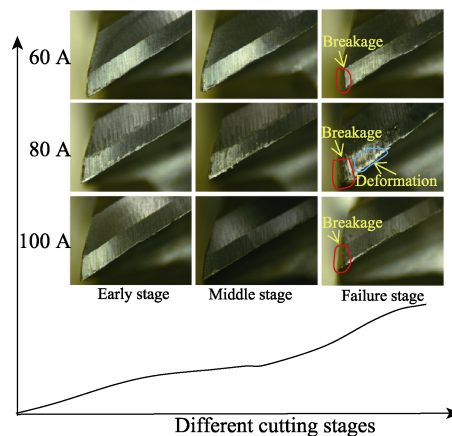


图 13 不同弧电流 AlCrBN 涂层刀具在不同阶段的后刀面磨损形貌
Fig.13 Surface morphology of the AlCrBN coated tools after flank wear with various arc currents

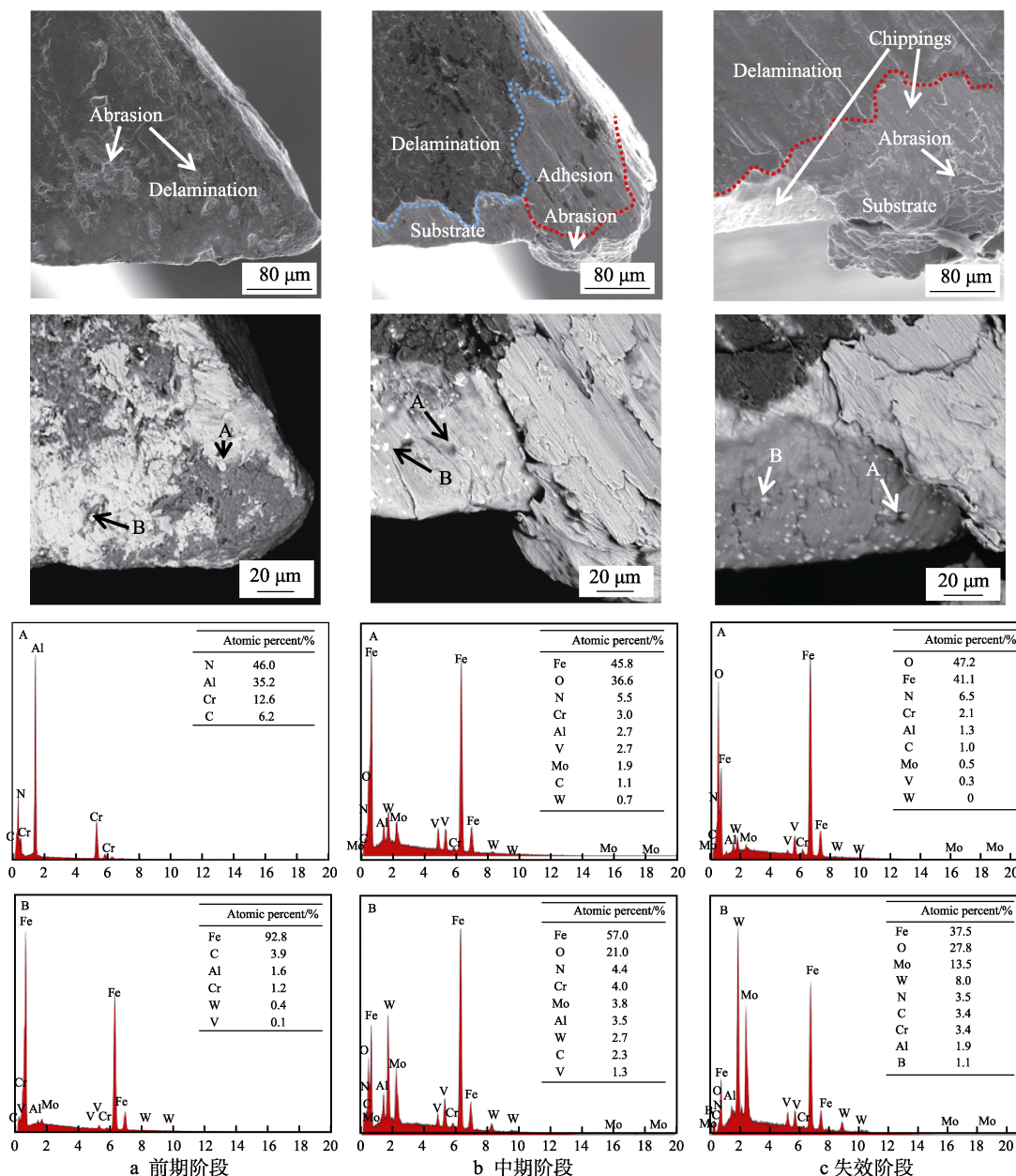


图 14 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具在不同切削阶段的后刀面磨损形貌

Fig.14 SEM analysis of the worn flank of the AlCrBN coated tools under 80 A at various cutting stages: a) initial stage; b) middle stage; c) failure stage

出现明显的粘着磨损。中期阶段（图 14b），在切削刃口形貌中发现磨粒磨损和粘着磨损加剧。与切削速度为 60 m/min 类似，后刀面出现大量 Mo 含量较高的白色颗粒以及少量 O 含量较高的黑色斑点，表明该区域存在氧化磨损。当涂层到达失效阶段时，如图 14c 所示，刃口区域的涂层已基本剥落，后刀面刃口处白色颗粒数量和白色颗粒中的 Mo 含量进一步增加。同时，后刀面刃口处的黑色斑点数量和 O 含量也进一步增加，氧化磨损加剧。另外，涂层刀具出现大量的积屑瘤，粘着磨损严重。由上述切削结果可知，与 AlCrN 涂层刀具相比较，AlCrBN 涂层刀具在不同切削条件下的切削寿命均有显著提高，且在高速切削条件下，AlCrBN 涂层刀具的切削寿命提高幅度更大。

这主要归功于 AlCrBN 涂层中 fcc-BN 相和 CrB₂ 相的存在，使得涂层刀具可以承受更高的切削热。

3 结论

1) 不同弧电流制备的 AlCrBN 涂层厚度在 4.0~4.5 μm 之间，并且表面粗糙度随着弧电流的增加而增加。AlCrBN 涂层的物相成分为固溶的 fcc-(Cr,Al)N 相以及少量的 CrB₂ 和 fcc-BN 相。

2) 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层的显微硬度最高，结合强度最好，表现出较好的磨损性能。其磨损机理为磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损。

3) 不同弧电流的 AlCrBN 涂层切削性能均高于

AlCrN 涂层。当切削速度 V_c 为 60 m/min 时, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具的切削性能较好。切削过程中, 不同阶段磨损机理不同: 前期阶段的磨损机制为磨粒磨损; 中期阶段的磨损机制为磨粒磨损和粘着磨损; 失效阶段的磨损机制为粘着磨损。当 V_c 增加到 191 m/min 时, 80 A 条件下制备的 AlCrBN 涂层刀具的切削性能仍然较好, 不同阶段磨损机理分别为: 前期阶段和中期阶段的磨损机制均为磨粒磨损和粘着磨损; 失效阶段的磨损机制为粘着磨损, 并伴随着氧化磨损。

参考文献:

- [1] SHTANSKY D V, KANEKO K, IKUHARA Y, et al. Characterization of nanostructured multiphase Ti-Al-B-N thin films with extremely small grain size[J]. Surface and coatings technology, 2001, 148(9): 206-215.
- [2] ZHANG S, WANG L, WANG Q, et al. A superhard CrAlSiN superlattice coating deposited by a multi-arc ion plating: II. Thermal stability and oxidation resistance[J]. Surface and coatings technology, 2013, 214(6): 153-159.
- [3] PFEILER M, ZECHNER J, PENOY M, et al. Improved oxidation resistance of TiAlN coatings by doping with Si or B[J]. Surface and coatings technology, 2009, 203(6): 3104-3110.
- [4] TRITREMME C, DANIEL R, RUDIGIER H, et al. Mechanical and tribological properties of AlTiN/AlCrBN multilayer films synthesized by cathodic arc evaporation [J]. Surface and coatings technology, 2014, 246(6): 57-63.
- [5] 程德刚, 吕仅修, 黄志文, 等. 气相沉积立方氮化硼薄膜的研究与发展状况[J]. 表面技术, 1997, 26(3): 1-4.
CHENG De-gang, LV Jin-xiu, HUANG Zhi-wen, et al. Research and development of CVD c-BN thin films[J]. Surface technology, 1997, 26(3): 1-4.
- [6] ARND M, LECHTHALER M, STEIN S, et al. High performance tools exhibiting reduced crater wear in particular by dry machining operations: USA, 9464347[P]. 2016-11-10.
- [7] 马锡英, 岳金顺, 贺德衍, 等. 立方氮化硼的生长特性与粘附性研究[J]. 物理学报, 1998, 47(5): 871-875.
MA Xi-ying, YUE Jin-shun, HE De-yan, et al. The growth character and adhesion of cubic boron nitride thin films [J]. Acta physica sinica, 1998, 47(5): 871-875.
- [8] 汪鹏, 许昌庆, 蔡飞, 等. 多弧离子镀 TiAlSiN 梯度涂层制备及切削性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 1-10.
WANG Peng, XU Chang-qing, CAI Fei, et al. Preparation and cutting performance of TiAlSiN gradient coating by multi-arc ion plating[J]. China surface engineering, 2019, 32(2): 1-10.
- [9] 董标, 毛陶杰, 陈汪林, 等. Al/Cr 原子比对 AlCrTiSiN 多元复合刀具涂层微观结构及切削性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 49-55.
DONG Biao, MAO Tao-jie, CHEN Wang-lin, et al. Effect of Al/Cr atomic ratio on microstructure and cutting performance of AlCrTiSiN multiple composite tool coating [J]. China surface engineering, 2016, 29(5): 49-55.
- [10] TRITREMME C, DANIEL R, LECHTHALER M, et al. Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al-Cr-B-N thin films[J]. Surface and coatings technology, 2012, 213(6): 1-7.
- [11] MAYRHOFER P H, MITTERER C, HULTMAN L, et al. Microstructural design of hard coatings[J]. Progress in materials science, 2006, 51(82): 1032-1114.
- [12] ZHANG S H, CAI F, LI M X. The nanostructured phase transition and thermal stability of superhard f-TiN/h-AlSiN films[J]. Surface and coatings technology, 2012, 206(17): 3572-3579.
- [13] ZHANG S H, WU W W, WANG L C, et al. Structural optimisation and synthesis of multilayers and nanocomposite AlCrTiSiN coatings for excellent machinability[J]. Surface and coatings technology, 2015, 277(6): 23-29.
- [14] GAO Ying, CAI Fei, FANG Wei, et al. Effect of oxygen content on wear and cutting performance of AlCrON coatings[J]. Journal of materials engineering and performance, 2019, 28(9): 828-837.
- [15] TRITREMME C, DANIEL R, LECHTHALER M, et al. Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al-Cr-B-N thin films[J]. Surface coating technology, 2012, 213(9): 1-7.
- [16] MA Q, ZHOU F, GAO S, et al. Influence of boron content on the microstructure and tribological properties of Cr-B-N coatings in water lubrication[J]. Applied surface science, 2016, 377(11): 394-405.
- [17] KOVALCÍKOVÁ A, BALKO J, BALAZSI C, et al. Influence of h-BN content on mechanical and tribological properties of Si₃N₄/BN ceramic composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(9): 3319-3328.
- [18] WU Wei-wei, YANG Shu-bao, CHEN Wang-lin, et al. Design of AlCrSiN multilayers & nanocomposite coating for HSS cutting tools[J]. Applied surface science, 2015, 351(8): 803-810.
- [19] LI Jin-long, ZHANG Shi-hong, LI Ming-xi. Influence of the C₂H₂ flow rate on gradient TiCN films deposited by multi-arc ion plating[J]. Applied surface science, 2013, 283(1): 134-144.
- [20] 仇启源, 庞思勤. 现代金属切削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
QIU Qi-yuan, PANG Si-qin. Modern metal cutting technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.