

氮硅涂层陶瓷刀具切削铸铁磨损机理研究*

STUDY ON WEAR MECHANISM OF CUTTING CAST IRON BY NITROGEN SILICON COATING CERAMIC TOOL

阮铭业** 张 建 彭晓君 朱先勇

(肇庆学院 机械与汽车工程学院, 肇庆 526061)

RUAN MingYe ZHANG Jian PENG XiaoJun ZHU XianYong

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhaoqing College, Zhaoqing 526061, China)

摘要 为研究氮硅涂层陶瓷刀具切削性能及磨损机理,采用物理气相沉积(PVD)工艺分别在氮化硅刀具表面沉积 TiAlN 和 CrAlN 涂层,利用切削灰铸铁 HT200 实验对刀具寿命和磨损机理进行了系统研究,探讨不同切削深度、进给率、切削速度下刀具的磨损情况。着重关注陶瓷涂层车削铸铁的最佳切削速度,分析了不同切削速度下刀具的切削性能。结果表明:TiAlN 和 CrAlN 涂层刀具能有效提高刀具硬度,三种刀具切削灰铸铁的磨损机理无明显区别,磨损机制主要是磨粒磨损;随着切削速度的增大($V_c = 250 \text{ m/min} \sim 450 \text{ m/min}$),氮化硅涂层陶瓷刀具的切削寿命均迅速减少,能够为氮化硅涂层陶瓷刀具的研发提供理论指导。

关键词 陶瓷刀具 切削速度 氮硅涂层 磨损机理

中图分类号 TG711

Abstract In order to study the cutting performance and wear mechanism of nitrogen-silicon coated ceramic tools, TiAlN and CrAlN coatings were deposited on the surface of silicon nitride tool by physical vapor deposition (PVD). The tool life and wear mechanism were systematically studied by cutting gray cast iron HT200. Different depths of cut, feed rate and cutting speed were discussed. The wear condition of the lower tool, and pays attention to the optimal cutting speed of ceramic coated cast iron. The cutting performance of the tool under different cutting speeds is analyzed. The results show that the TiAlN and CrAlN coated tools can effectively improve the hardness of the tool. There is no obvious difference in the wear mechanism of gray cast iron. The wear mechanism is mainly abrasive wear. With the increase of cutting speed ($V_c = 250 \text{ m/min} \sim 450 \text{ m/min}$), the cutting life of silicon nitride coated ceramic tools is rapidly reduced. Provide theoretical guidance for the development of nitrogen-silicon coated ceramic tools.

Key words Ceramic cutter; Cutting speed; Nitrogen-silicon coating; Wear mechanism

Corresponding author: RUAN MingYe, Email: ruanmingye@zqu.edu.cn, Fax: +86-758-2716061

The project supported by the Ministry of Education's Cooperative Education Project of China (No.201801086044).

Manuscript received 20190913, in revised form 20190930.

引言

随着高效、高速加工技术的迅速发展,陶瓷材料以其稳定的高温性、优异的耐磨性和较高的化学稳定性成为最有应用前景的刀具材料之一^[1-2]。氮化硅以其优异的化学稳定性、抗热震性,耐热耐磨性成为最广泛的陶瓷刀具材料。但切削高温下氮化硅基陶瓷刀具会与工件内铁元素发生化学反应,严重限制其实际应用^[3]。因此,如何提高氮化硅基陶瓷刀具的综合性能,逐渐受到众多学者的青睐。在刀具表面沉积一层低摩擦因数、高硬度与基体材料性能互补的涂层,能够

显著提高陶瓷刀具的使用寿命与切削性能^{[4]15495-15502}^[5]。孙庆志^[6]发现涂层与刀具基体之间生成一种混合相,能够大幅改善基体表面韧性,刀具的切削性能也得到明显提升。JAT G L 等^[7]对 TiCN 和 TiN 涂层的刀具摩擦因数进行了实验研究,发现 TiCN 涂层能够有效地降低刀具磨损,工件表面质量较好。REN Zhongwei 等^[8]通过 PVD 技术将 TiN 涂层沉积到陶瓷基体上,涂层陶瓷刀具的加工费用低,对工件材料中碳钢(45 HRC)进行切削加工时,刀具进给量是影响工件表面粗糙度的主要因素,切削速度次之,加工后的表面质量较好。本文采用物理气相沉积工艺分别在氮

* 20190913 收到初稿, 20190930 收到修改稿。教育部产学合作协同育人项目(201801086044)资助。

** 阮铭业, 1979 年生, 男, 广东江门人, 硕士, 肇庆学院机械与汽车工程学院讲师, 实验室中心主任, 研究方向为机械制造及数控加工。

化硅刀具表面沉积 TiAlN 涂层和 CrAlN 涂层,对涂层陶瓷刀具的磨损机理进行了系统研究,并着重关注陶瓷涂层车削铸铁的最佳切削速度,探讨不同切削参数下刀具的磨损情况,以期对陶瓷涂层刀具的设计、研发提供理论指导及可靠的试验数据。

1 实验过程

选用双龙公司生产的 Si_3N_4 陶瓷刀具基体, SNGN 120700 型。利用 PVD 技术在刀具表面分别涂覆一层 CrAlN, TiAlN 薄膜。车削工件规格为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.15\text{ m}$, 工件材料选用灰铸铁 HT200, 拉伸强度为 200 MPa, 硬度为 163 HB~255 HB, 其主要化学成分如表 1 所示^{[9]68-71}。

表 1 灰铸铁化学成分

Tab.1 Chemical composition of gray iron

化学成分 Chemical composition	P	S	Mn	Si	C
wt%	0.01~0.15	0.05~0.12	0.7~0.9	1.8~2.1	3.1~3.5

切削实验在 ETC3 650 h 的 CNC 机床上进行,最高转速 3 000 r/min, 机床主轴功率 20 kW。刀具失效标准为后刀面磨损量 $V_B = 0.3\text{ mm}$; 安装角度为: 主偏角 $K_r = 4.5^\circ$, 前角 $\gamma_0 = -6^\circ$, 后角 $\alpha_0 = 6^\circ$; 切削参数为 $a_p = 0.6\text{ mm} \sim 1.8\text{ mm}$, $f = 0.05\text{ mm/r} \sim 0.25\text{ mm/r}$, $V_c = 250\text{ m/min} \sim 450\text{ m/min}$ 。切削过程中, 采用美国 FEI 公司生产的 Quanta 400 型扫描电镜 (SEM) 对涂层厚度与微观结构以及刀具后刀面磨损形貌进行观察; 使用 WS-2006 型涂层自动划痕仪进行刀具抗划痕测试, 划痕长度 6 mm, 痕速度 3 mm/min, 最大加载载荷 120 N, 加载速度 50 N/min; 菱形压头加载 50 g 的测量力并保压 25 s 后用 HXD-TM/LCD 型显微硬度计表征涂层硬度; 使用体式显微镜测量后刀面的磨损量 V_B ; 切削力使用测力仪进行采集, 型号为 9129AA; 切削温度使用 FLIR 红外测温仪进行采集; 采用 SEM 自带的电子能谱对磨损表面和涂层成分进行测定, 确定刀具磨损表面的元素成分组成, 其工作电压为 15 kV。

2 实验结果与分析

2.1 涂层刀具结构分析

氮化硅陶瓷刀具表面 CrAlN 和 TiAlN 涂层截面形貌均无明显缝隙, 表面生长致密。其中, TiAlN 涂层晶粒较大, 存在众多柱状晶粒, 并由基体逐渐延伸至涂层表面; CrAlN 涂层截面晶粒细小, 无明显晶粒形状。两种涂层刀具的划痕测试结果, 如图 1 所示, 可以看出, 测试过程中, 信号出现局部波动时涂层开始出现裂纹。随着载荷的不断增大, 局部涂层出现微小剥离, 随后剥

离面积明显扩大, 此时即为基体与涂层结合力。对比图 1 可以看出, TiAlN 涂层与刀具基体的结合强度远大于 CrAlN 涂层, 其中 TiAlN 涂层与基体的结合力为 33.9 N, 而 CrAlN 涂层的结合力大小为 22.6 N。

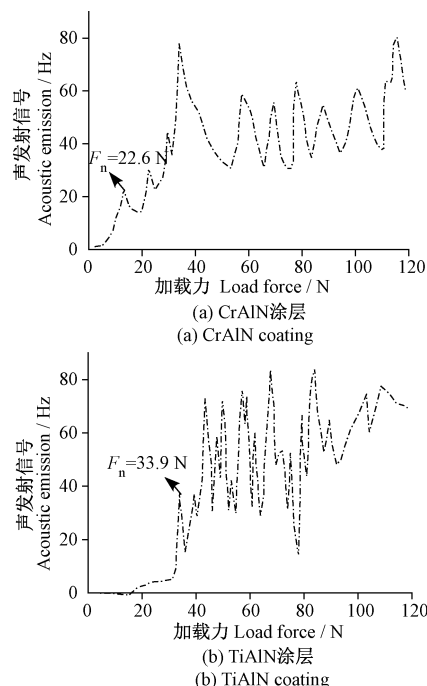


图 1 两种涂层划痕测试结果

Fig.1 Scratch test results of two coatings

三种刀具显微硬度的表征结果, 如图 2 所示, 可见 CrAlN 和 TiAlN 涂层均能有效提高刀具硬度, 刀具表面硬度分别提高 87% 和 50%, 这主要与两种涂层的微观结构有关, 即 CrAlN 涂层的致密细晶结构比 TiAlN 涂层柱状晶结构具有更高的表面硬度。

2.2 切削参数对刀具寿命的影响研究

2.2.1 切削深度 a_p 对刀具寿命的影响

刀具失效标准为: 后刀面磨损量 $V_B = 0.3\text{ mm}$ 。 $f = 0.15\text{ mm}$, $V_c = 250\text{ m/min}$ 时, 不同切削深度对三种刀具寿命的影响曲线, 如图 3 所示。切削深度从 0.3 mm 增大到 1.2 mm 时, 刀具寿命有一定程度的缩短, 主要是因为切削温度不高, 此时抗冲击疲劳能力是决定刀具寿命的主要因素。由于基体材料与涂层结合牢固, 能有效包覆刀具基体。切削深度增大到 1.8 mm 时, 抗冲击能力提高, 参与切削的刀刃强度增强, 刀具寿命得到大幅提高。

2.2.2 进给率对刀具寿命的影响

$a_p = 1.2\text{ mm}$, $V_c = 250\text{ m/min}$ 时, 进给率对刀具寿命的影响, 如图 4 所示。可以看出, 三种刀具寿命的变化趋势基本相同, 即随着进给率的不断增大, 刀具寿命均总体减小, 主要是由于进给率增大, 使得单位刀刃所承受的切削温度和切削力增加, 相应的刀刃的微崩、

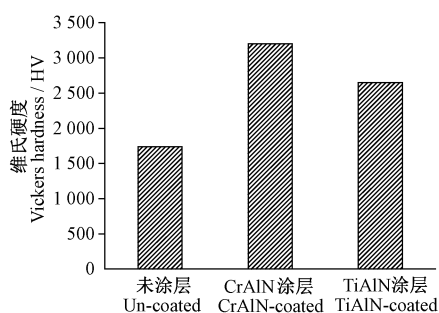


图 2 刀具硬度对比分析

Fig.2 Contrastive analysis of tool hardness

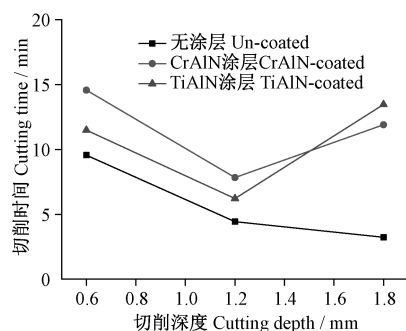


图 3 切削深度对刀具寿命影响曲线

Fig.3 Effect of cutting depth on cutting life

硬质相剥落和粘结磨损加剧,导致刀具寿命明显下降。从切削条件来看, $f=0.05 \text{ mm/r}$ 时切削参数较低,摩擦磨损和切削过程产生的热并不严重,涂层刀具的高耐磨性能得到了充分发挥,同时又加之涂层的隔热作用使得温度不易于传入刀具,进而保证了刀具寿命缩短趋势明显减缓。对比可以看出, $f=0.05 \text{ mm/r}$ 和 $f=0.15 \text{ mm/r}$ 时,刀具磨损均匀上升; $f=0.25 \text{ mm/r}$ 时,在 2 min 出现了明显稳定磨损阶段。

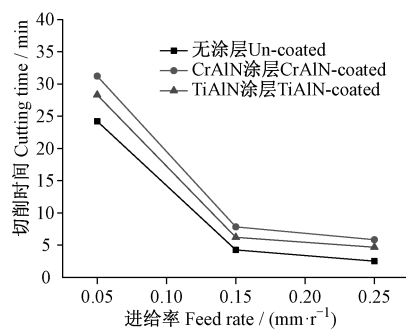


图 4 切削进给率对刀具寿命影响曲线

Fig.4 Effect of feed rate on cutting life

2.2.3 切削速度影响

在切削三要素中,切削深度 a_p 对刀具寿命的影响最小,进给量 f 的影响次之,切削速度 V_c 对刀具使用寿命影响最大。因此,着重分析切削速度对未涂层陶瓷刀具、TiAlN 涂层和 CrAlN 涂层陶瓷刀具切削铸铁失效的影响。保持切削进给量 $f=0.15 \text{ mm/r}$,背吃刀

量 $a_p=1.2 \text{ mm}$,改变切削速度 $V_c=250 \text{ m/min} \sim 450 \text{ m/min}$,以后刀面磨损 $V_B=0.3 \text{ mm}$ 作为磨损标准,切削速度对刀具磨损寿命的影响,如图 5 所示。

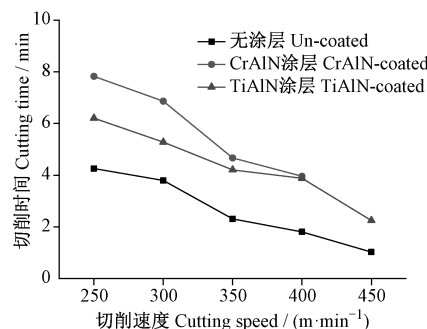


图 5 切削速度对刀具寿命的影响

Fig.5 Effect of cutting speed on cutting life

可以看出,随着切削速度上升,刀具使用寿命呈现明显下降趋势, $V_c=250 \text{ m/min}$ 时具有最长的切削寿命。对无涂层氮化硅刀具而言,切削速度 $V_c=250 \text{ m/min}$ 时,刀具使用寿命为 4.2 min, $V_c=350 \text{ m/min}$ 时仅有 2.3 min,当 V_c 上升到 450 m/min,无涂层陶瓷刀具的切削寿命仅为 1.0 min,与切削速度为 250 m/min 的加工条件相比,刀具的使用寿命缩减了 76.1%。 $V_c=250 \text{ m/min}$ 的切削参数下,TiAlN 涂层刀具的切削寿命为 6.2 min,切削速度上升至 450 m/min 时,切削寿命仅为 2.3 min 缩减了 62.9%。CrAlN 涂层陶瓷刀具在切削速度 $V_c=250 \text{ m/min}$ 时刀具寿命最长为 7.8 min;当切削速度上升到 $V_c=400 \text{ m/min}$ 时,刀具寿命缩减了 49.3%,仅有 3.9 min。在 $V_c=450 \text{ m/min}$ 加工条件下出现大面积涂层剥落,导致涂层失效,主要是由于 CrAlN 涂层氮化硅刀具的膜基结合强度较弱。

不同切削速度下三种刀具的切削磨损曲线如图 6 所示,可以看出,三种刀具的磨损曲线无明显突变,均呈线性变化,磨损规律也基本相同。表明实验过程中刀具不存在磨损瞬间增大的磨损初期,磨损机制没有发生改变。这主要与刀具表面耐磨致密、硬度高的优良特性有关。同时可以发现,涂层能有效提高刀具的使用寿命。而 TiAlN 涂层在切削速度为 250 m/min、300 m/min、350 m/min、400 m/min、450 m/min 时较无涂层刀具分别提高了 45.72%、39.07%、82.15%、114.89%和 119.10%的切削寿命;而 CrAlN 涂层能在切削速度为 250 m/min、300 m/min、350 m/min、400 m/min 时较无涂层刀具分别提高 78.99%、80.77%、102.19%和 119.15%的切削寿命;表明随着切削速度的提高,CrAlN 涂层对刀具切削性能的提升也越明显,高切削速度会使切削摩擦加剧,超过涂层承受范围,刀具寿命无明显提升。值得注意的是,CrAlN 涂层正常切削时,能大幅度增加刀具使用寿命,切削性能明显好

于 TiAlN 涂层刀具,主要是是涂层具有更高的刀具表面硬度和更致密的细晶结构;而切削速度大于 400 m/min 时,CrAlN 涂层无法承受此切削参数下的剧烈

冲击而剥落,对刀具基体无任何提升作用,究其原因因为 CrAlN 涂层与基体的结合强度相对较弱。

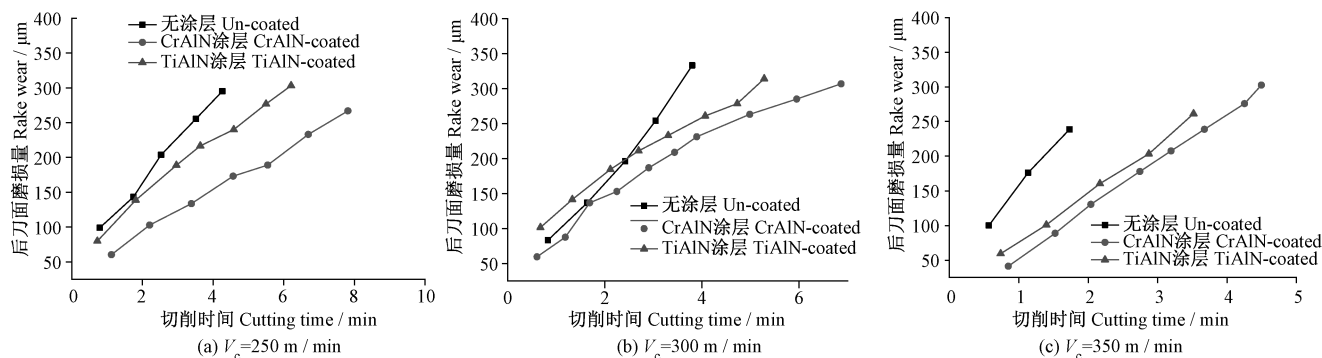


图6 实验刀具不同切削速度下的磨损曲线

Fig.6 Wear curve of the experimental tool at different cutting speeds

不同切削速度下车削灰铸铁的工件表面加工质量曲线,如图7所示,随切削速度的上升,三种氮化硅陶瓷刀具的加工质量均得到明显改善。主要是由于刀具磨损表面无太大区别,增加切削速度使得切屑变形程度变小。对比三种刀具可以看出,TiAlN 涂层陶瓷刀具的加工质量稍差,可能与涂层结构形貌有关,TiAlN 涂层晶粒较大,形成的涂层表面凹凸不平,切削时还会与工件产生剧烈摩擦,导致切削振动变大。而无涂层刀具的加工质量与 CrAlN 涂层刀具相差无几。主要是由于 CrAlN 涂层结构致密晶粒细小,形成的涂层较为平整,切削磨损能较好保持磨损表面的光滑。

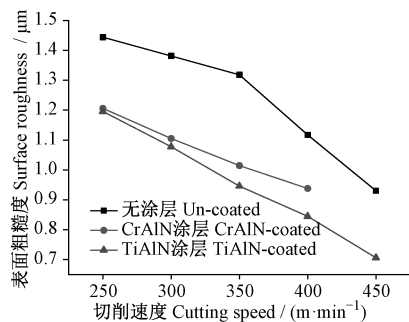


图7 切削速度对刀具加工质量的影响

Fig.7 Effect of cutting speed on tool processing quality

2.3 刀具磨损机理研究

对切削过程中径向力 F_y 和主切削力 F_z 进行测量。通过下式对前刀面摩擦因数 μ 进行计算

$$\mu = \tan [\arcsin (F_y / F_z) + \gamma_0] \quad (1)$$

式中, γ_0 为刀具前角, (°)。

不同切削速度下三种陶瓷涂层刀具前刀面摩擦因数的变化,如图8所示。可以看出,随着切削速度的增加,陶瓷刀具的前刀面摩擦因数有所降低,切削速度为 250 m/min 时,与未涂层刀具相比,CrAlN 和 TiAlN

涂层刀具的前刀面摩擦因数分别降低了 15.2% 和 17.4%,切削速度为 350 m/min 时,摩擦因数分别降低了 19.7% 和 20.2%。

切削速度对三种陶瓷涂层刀具切削温度的影响,如图9所示,可以发现,CrAlN, TiAlN 陶瓷涂层刀具在切削速度升高 40% 的条件下,切削温度分别降低了 10.6% 和 8.3%,较无涂层陶瓷刀具的切削温度变化明显。通过比较无涂层陶瓷刀具与 CrAlN, TiAlN 陶瓷涂层刀具,切削速度为 250 m/min 时,CrAlN 涂层刀具的切削温度比涂层陶瓷刀具降低了 8.5%,TiAlN 陶瓷涂层刀具降低了 12.2%;切削速度为 350 m/min 时,CrAlN 涂层刀具的切削温度比涂层陶瓷刀具降低了 16.4%,TiAlN 陶瓷涂层刀具降低了 17.4%;说明切削速度升高 40%,有利于刀具在切削时切削温度的降低。

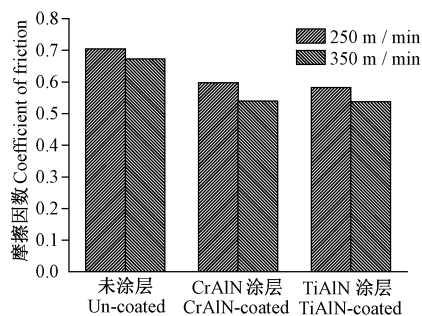


图8 切削速度对前刀面摩擦因数的影响

Fig.8 Effect of cutting speed on the friction coefficient of rake face

陶瓷刀具具有良好的化学性、较高的硬度,磨损机制与其他刀具材料有很大的不同。氮硅基陶瓷刀具磨损性能主要与刀具的表面硬度和刀具材料的断裂韧性有关。相关研究发现^{[4]15495-15502},硬质涂层能够大幅度的提高陶瓷刀具的表面硬度;涂层能够阻止热量传递,降低刀具与切屑的摩擦温度。两种陶瓷涂层刀具前刀

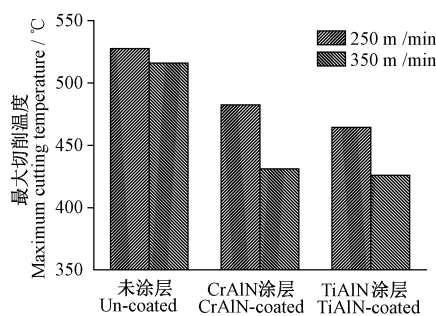


图 9 刀具最大切削温度随切削速度的变化

Fig.9 Maximum cutting temperature of cutting tool with cutting speed

面的磨损形貌图,如图 10 所示,可以看出,两种刀具前刀面均存在明显的月牙洼现象,主要是切屑流过刀具前刀面会发生氧化磨损、扩散磨损、粘结磨损和磨料磨损等,逐步形成凹坑,并不断向着切削刃方向扩展至切削刃形成月牙洼。对月牙洼区域进行深度合成,发现刀具前刀面月牙洼磨损相对明显,月牙洼深度分别为 $20.44\ \mu\text{m}$ 和 $9.13\ \mu\text{m}$,同时月牙洼部位存在明显的磨痕,表明存在磨粒磨损。切削过程中两种刀具均发生崩刃,其中 CrAlN 刀具只是微小的崩刃,而 TiAlN 刀具的崩刃现象明显,一方面切削过程中系统会发生明显震动,刀具会出现明显的疲劳裂纹,月牙洼区域基体裸露,使得涂层磨损具有一定的连续性。另一方面,刀具的基体表面光滑度低,切削力过于集中,切削进行时峰点接触较为明显。

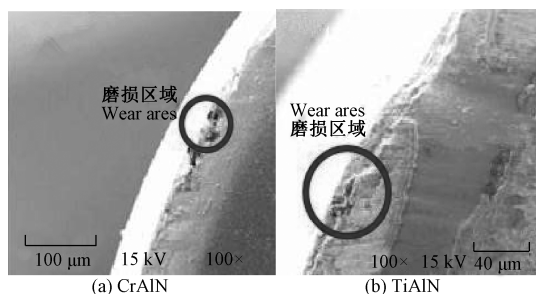


图 10 陶瓷涂层刀具 KY4400 前刀面磨损形貌图

Fig.10 Wear profile of the front face of ceramic coated tool KY4400

无涂层、CrAlN 涂层和 TiAlN 涂层刀具的磨损形貌上均存在大量而密集的划痕,而且 CrAlN 涂层和 TiAlN 涂层磨损表面上较无涂层刀具存在较多粘结区域。为进一步确认该区域形貌,对其进行 EDS 能谱分析,如图 11 所示。该区域存在刀具基体 Si 元素,以及工件的 Fe, Mn, S 等元素。表明该区域属于粘结磨损形貌。同时,在 CrAlN 和 TiAlN 涂层刀具的粘结区域未发现 Al, Ti, Cr 等涂层元素,说明此切削参数下继续有效保护刀具基体,未出现高温氧化失效,但在该切削高温下工件材料易发生氧化。综上,三种刀具表面的磨损机理主要以磨粒磨损为主,同时伴随少量的粘结

磨损。与无涂层刀具相比,两种涂层刀具出现较严重的粘结磨损,这与涂层刀具切削灰铸铁时间长导致更高切削温度和工件材料与粗糙的涂层表面剧烈摩擦两个原因有关^{[9]68-71}。综上,三种刀具表面的磨损机理主要以磨粒磨损为主,同时伴随少量的粘结磨损。

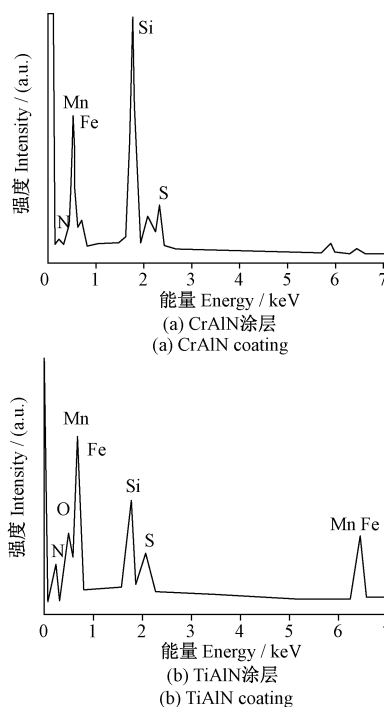


图 11 CrAlN 和 TiAlN 陶瓷涂层刀具 EDS 能谱图

Fig.11 EDS spectrum of CrAlN and TiAlN ceramic coating tools

3 结论

针对陶瓷刀具实际应用问题,采用物理气相沉积工艺在氮化硅刀具表面分别沉积 TiAlN 涂层和 CrAlN 涂层,发现两种涂层均能有效提高刀具硬度;提高切削参数会加剧刀具的磨损情况,磨损曲线基本服从磨损规律;通过 SEM 和 EDS 分析可知,刀具表面的磨损机理主要以磨粒磨损为主,同时伴有少量的粘结磨损、边界磨损以及牙洼磨损。研究结果能够为涂层陶瓷刀具在切削加工中的应用提供数据支持,但如何建立切削性能与刀具界面特性的函数关系,仍需进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 倪敬,施黎峰,郑棱楠,等. 制动盘热机开裂机理的模拟研究[J]. 机械强度, 2017(5): 1175-1180.
NI Jing, SHI LiFeng, ZHENG LingNan, et al. Simulation study on opening mechanism of thermalmechanical crack of brake disc[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017(5): 1175-1180 (In Chinese).
- [2] WANG X W, WANG Z h, ZHANG M H. Development of CNC five-axis turning tool cutter grinder[J]. Advanced Materials Research, 2015: 1120-1121; 2015: 1330-1335.
- [3] 江小辉,张振亚,李郝林,等. 机床精度检测航空薄壁标准件的设计方法研究[J]. 机械强度, 2017(3): 621-628.

- JIANG XiaoHui, ZHANG ZhenYa, LI HaoLin, et al. Research on the design method of the aerospace standard thin-walled specimen to measure the precision of machine tool [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017(3):621-628 (In Chinese).
- [4] TAN DaWang, GUO WeiMing, WANG HongJian, et al. Cutting performance and wear mechanism of TiB₂-B₄C ceramic cutting tools in high speed turning of Ti6Al4V alloy[J]. Ceramics International, 2018,44(13):15495-15502.
- [5] LIU YunFeng, LIU XianLi, WEI ShiLiang, et al. Investigation on critical cutting depth in milling of wave-transmitting Si₃N₄ ceramics [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 94(2):1-7.
- [6] 孙庆志.超硬材料刀具在机械加工中的应用[J].科技创新导报, 2018,15(8):109-110.
- SUN QingZhi. Application of superhard material tool in machining [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(8): 109-110 (In Chinese).
- [7] JAT G L, SINGH K, MAHAJAN A, et al. Real time speed control of induction motor using new generation DSP controller [J]. Computational Intelligence on Power, Energy & Controls with Their Impact on Humanity, 2017(4): 54-56.
- [8] REN ZhongWei, SONG Ming, YANG Lin. Development and application of open cnc system based on dmc motion controller[J]. Advanced Materials Research, 2012(542/543): 1163-1166.
- [9] 王邦伦,朱协彬,王邦硕,等.HT200 加力器异常断裂失效分析 [J].重庆科技学院学报(自然科学版),2017,19(4):68-71.
- WANG BangLun, ZHU XieBin, WANG BangShuo, et al. Fracture failure analysis of an HT200 assistor [J]. Journal of Chongqing University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2017,19(4): 68-71 (In Chinese).