

PCD刀具车削不同颗粒含量 SiC_p/Al复合材料试验研究*

盆洪民¹,刘鑫²,倪娜¹,陈志涛²,刘飞¹,岳彩旭²

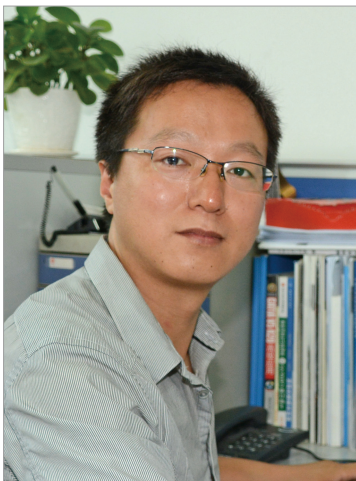
(1.天津航天机电设备研究所,天津 300458;

2.哈尔滨理工大学机械动力工程学院,哈尔滨 150080)

[摘要] 碳化硅铝基复合材料具有优良的导热性、较高的比强度和比刚度,在航空航天领域具有广泛的应用前景。由于此复合材料中含有增强相,导致材料的切削加工性能变差。通过试验分析了不同颗粒体积分数(纳米级 5%、微米级 25%) SiC_p/Al 复合材料和切削参数(切削速度、背吃刀量、进给量)对刀具磨损和工件表面质量的影响,并对刀具磨损机理进行了研究。试验结果表明,车削微米级 25% SiC_p/Al 材料时聚晶金刚石 PCD (Polycrystalline Diamond) 刀具磨损更严重,且工件表面质量更差。随着进给量和背吃刀量的增大,工件表面粗糙度值增大,刀片前刀面磨损严重;随着切削速度的增大,工件表面粗糙度值减小,刀片前刀面磨损量增大。选取本文切削参数进行 SiC_p/Al 复合材料的切削加工时,发现刀具磨粒磨损、微崩刃是 PCD 刀具后刀面磨损的主要成因,且刀具前刀面也会产生积屑瘤。研究结果可为 SiC_p/Al 复合材料 PCD 车削工艺的优化提供理论基础。

关键词: SiC_p/Al 复合材料;PCD 刀具;车削;刀具磨损;表面质量

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.11.014



盆洪民

博士,研究员,研究方向为精密机械设计与制造、超精密加工与微纳制造。

*基金项目:国家自然科学基金项目(51505331)。

SiC_p/Al 复合材料具有独特的力学和物理性能,在航空航天、精密仪器及汽车等领域具有广阔的应用前景。由于材料中存在增强相,加大了材料的硬度和耐磨性,使该类铝基复合材料的切削过程变得非常困难,导致刀具磨损严重、加工效率低及工件表面质量差,并限制了 SiC_p/Al 的进一步应用^[1]。

为了改善此材料的加工性能,诸多学者展开了此种材料切削机理和工艺优化方面的研究。Dabade 等^[2]对 SiC_p/Al 已加工表面特征进行了研究,试验指出带修光刃的 PCD 刀片的切削力比不带修光刃的 PCD 刀片要小,且加工表面特征与表面质量较好。Debade 等^[3]对体积分数为 20% 与 30% 和颗粒度为 15μm、65μm 的

SiC/2024Al-MMCs 进行了研究,结果表明 15μm 颗粒度 SiC/Al MMCs 已加工表面缺陷明显减少,即细颗粒和高体积分数的材料可以得到更低的表面粗糙度。车明帆^[4]利用 K10、PCBN 和 PCD 3 种材料的刀具车削高体积分数 SiC_p/Al,探究了不同刀具材料对切削高体积分数 SiC/Al MMCs 刀具磨损机理和已加工表面粗糙度的影响。王大镇^[5]采用 PCD 刀具对金属基复合材料进行车削试验,分析切削参数对切削力的影响,发现颗粒含量越多切削力越大。葛英飞等^[6]利用 PCD 刀具超精密车削颗粒体积分数为 15% 的铝基复合材料,试验结果表明 PCD 刀具主要发生脆性崩刃、剥落、磨粒磨损和石墨化磨损。Muthukrishnan 等^[7]对颗粒体积分

数 10% 和 20% 的 SiC_p/Al356-MMCs 进行车削试验, 研究发现颗粒体积分数 20% 的 SiC_p/Al356-MMCs 发生的刀具磨损更严重。Ibrahim 等^[8] 揭示了颗粒尺寸对 SiC_p/Al 切削过程刀具的寿命影响。Gonzalo 等^[9] 对质量分数 25% 的 SiC_p/2124Al 复合材料切削过程展开了研究, 揭示了不同刀具材料对加工过程、表面粗糙度、切削力、刀具磨损的影响。韩荣第等^[10] 对不同体积分数 SiC/2024Al-MMCs 进行切削试验, 结果表明 3 个方向切削力都随切削速度的增加而增大, 并且增强颗粒体积分数越高、尺寸越大, 切削力则越大。刘汉中^[11] 利用 PCD 刀具精密车削体积分数为 45% 的 SiC_p/2024Al 复合材料, 对车削工艺和刀具磨损展开研究, 得出 PCD 刀具主要磨损形式为刻划磨损、粘结磨损、摩擦磨损、月牙凹磨损, 同时伴随微崩刃和颗粒脱落等破坏形式。吕立生等^[12] 采用 PCD 刀具车削了高体积分数 SiC_p/Al 复合材料, 研究结果表明 PCD 刀具的加工性能要远好于硬质合金刀具, 更适合高体积分数 SiC_p/Al 复合材料的精密加工。

针对 SiC_p/Al 复合材料切削加工过程, 刀具寿命和已加工表面质量与复合材料中颗粒含量关系密切, 为探寻合适的切削条件来实现此材料切削工艺的优化, 本文对不同粒度 SiC_p/Al 的 PCD 刀具切削过程展开研究, 为 SiC_p/Al 复合材料车削工艺的优化提供理论基础。

试验条件与方案

1 试验条件

为了揭示颗粒含量对 SiC_p/7075Al 复合材料切削性能的影响, 并得到相应优化的切削参数, 本研究进行了如下切削试验。试验采用 PCD 金刚石三角形刀片对颗粒体积分数为 25% 微米级 (7 μm) SiC_p/2009Al 复合材料和颗粒体积分数为 5% 纳米级 (200~800 nm)

SiC_p/7075Al 复合材料进行车削试验, 其中微米级 SiC_p/Al 采用粉末冶金法制备, 纳米级 SiC_p/Al 采用搅拌铸造法制备。本试验切削条件为干式切削, SiC_p/Al 的力学性能分别如表 1 和表 2 所示, 试验用刀具材料力学性能如表 3 所示。

2 切削试验方案的设计

试验采用单因素法研究了切削速度、背吃刀量和进给量对 SiC_p/Al 切削过程中刀具磨损及工件表面质量的影响。试验机床为大连机床生产的 CA6150 数控车床, 试验用 PCD 金刚石刀片的型号为 TNMG160408, 试验现场和 PCD 刀具如图 1 和图 2 所示。刀具磨损状态采用基恩士公司生产的超景深显微镜检测, 刀片磨损微观形貌采用型号为 SU-350 日

立扫描电子显微镜检测。工件已加工表面形貌采用 Taylor Map CCI 白光干涉仪进行测量, 表面粗糙度采用手持式粗糙度仪进行测量。

切削试验结果及讨论

1 SiC_p/Al 复合材料颗粒含量对切削过程的影响

为了研究颗粒含量对切削过程的影响, 在切削速度为 70 m/min, 进给量为 0.05 mm/r, 背吃刀量为 0.5 mm 时, 当切削相同距离 ($L=1000$ mm) 后, 利用超景深显微镜测得的刀具磨损情况如图 3 和图 4 所示。切削颗粒体积分数 5% 纳米级 SiC_p/Al 刀具磨损要明显小于颗粒体积分数 25% 微米级 SiC_p/Al。在此切削参数下, 切削 25% SiC_p/Al 时, 前刀面磨损值

表1 颗粒体积分数25%微米级SiC_p/2009Al复合材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of micron-level 25% SiC_p/2009Al composites

密度 / (g·cm ⁻³)	热膨胀系数 / (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	热导率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	弹性模量 / GPa	屈服强度 / MPa
2.89	14.5	175	115	190

表2 颗粒体积分数5%纳米级SiC_p/7075Al复合材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of nanometer-level 5% SiC_p/7075Al composites

密度 / (g·cm ⁻³)	热膨胀系数 / (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	热导率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	弹性模量 / GPa	屈服强度 / MPa
2.86	22	135	80	100~120

表3 试验用PCD材料的力学性能

Table 3 Mechanical properties of PCD materials for testing

材料	硬度 HV	压缩强度 / GPa	弹性模量 / GPa	弯曲强度 / MPa
PCD	8000~10000	5.3~6.2	800~850	2.4~3.2

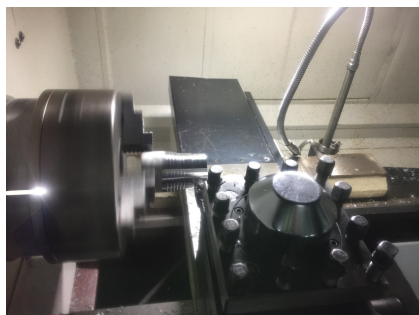


图1 试验现场图

Fig.1 Experimental set-up

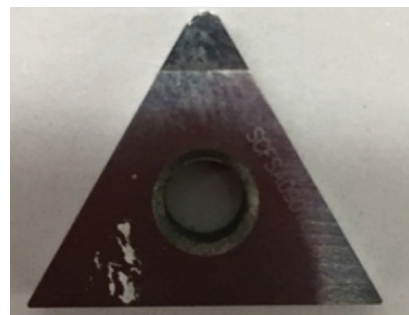
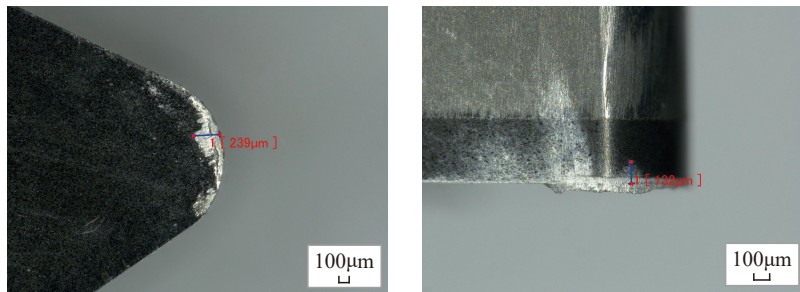


图2 试验用PCD刀具

Fig.2 PCD cutting tool

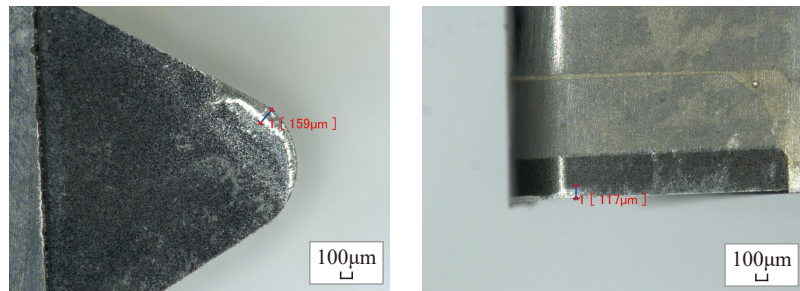
最大为 0.239mm,后刀面磨损值最大为 0.132mm。PCD 刀具切削体积分数 5% SiC_p/Al 时,前刀面磨损值最大为 0.159mm,后刀面磨损值最大 0.117mm。同时,两种切削情况下刀具前刀面上最显著的特征是出现了明显划痕,这是由于切屑划擦作用而导致的,而后刀面在磨粒磨损的作用下出现了明显的磨损现象。分析试验结果可知,当颗粒体积分数增大时,刀具前刀面和后刀面的磨损现象也明显加剧。

不同含量 SiC_p/Al 经 PCD 刀具切削相同距离(L=1000mm)后的已加工表面形貌如图 5 所示。分析试验结果可知,切削 5% SiC_p/Al 时,已加工表面粗糙度 R_a 值为 0.18μm,工件表面形貌较好。当 SiC_p 颗粒体积分数增大到 25% 时,其表面粗糙度 R_a 值为 0.21μm。对比发现,切削颗粒体积分数为 5% SiC_p/Al 时, SiC 颗粒脱落后形成的凹坑少,此时工件表



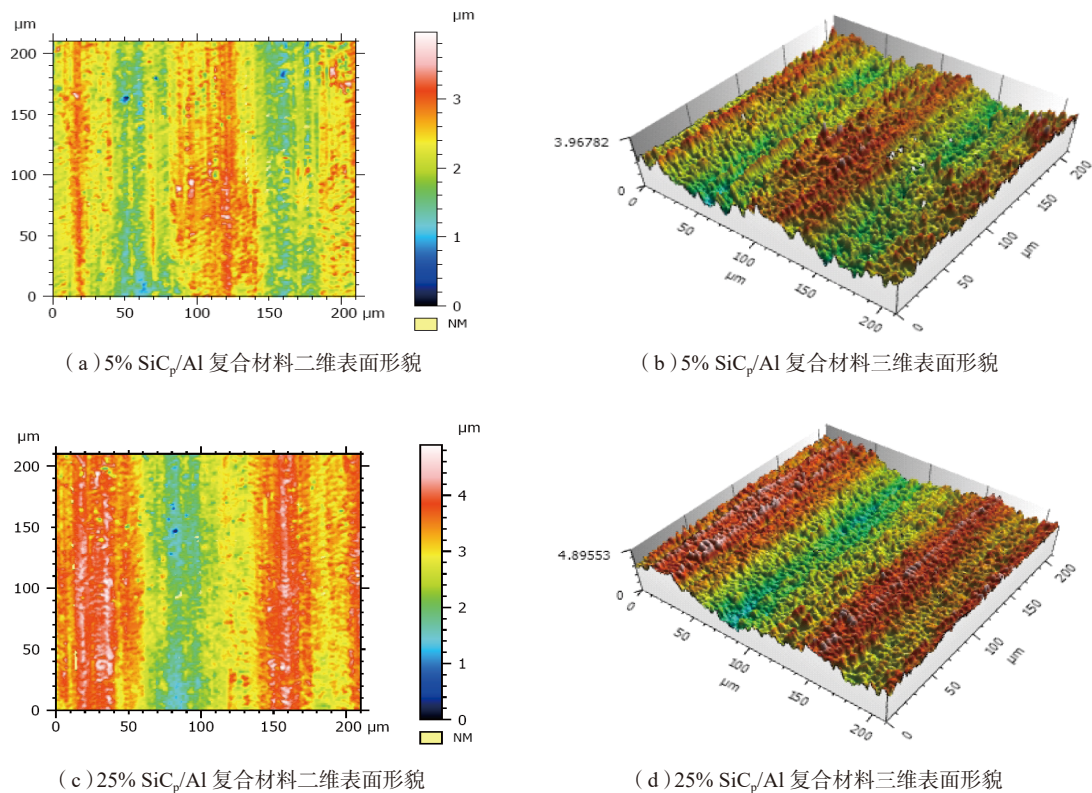
(a)前刀面磨损 (b)后刀面磨损

图3 切削25% SiC_p/Al复合材料时刀具磨损情况
Fig.3 Tool wear when cutting 25% SiC_p/Al composites



(a)前刀面磨损 (b)后刀面磨损

图4 切削5% SiC_p/Al复合材料时刀具磨损情况
Fig.4 Tool wear when cutting 5% SiC_p/Al composites



(a) 5% SiC_p/Al 复合材料二维表面形貌 (b) 5% SiC_p/Al 复合材料三维表面形貌
(c) 25% SiC_p/Al 复合材料二维表面形貌 (d) 25% SiC_p/Al 复合材料三维表面形貌

图5 不同颗粒含量SiC_p/Al复合材料加工表面形貌图

Fig.5 Surface topography of SiC_p/Al composites with different particle contents

面纹理较好,形貌较为均匀。当颗粒体积分数增大到 25% 时候,表面质量变差,其原因可以解释为颗粒体积分数的增加使得工件材料力学性能产生了变化,当增大到一定数值时候,不但 SiC 颗粒发生了断裂和脱落,并且颗粒之间也发生了干涉,进而导致了已加工表面质量的变差。

2 切削参数对表面粗糙度及刀具前刀面磨损的影响

车削不同颗粒含量 SiC_p/Al 时,切削参数的选取对工件的表面质量和刀具的磨损程度有着重要影响。本研究从切削速度、进给量、背

吃刀量 3 个方面对刀具前刀面磨损和工件表面粗糙度进行了单因素分析。当进给量 0.05mm/r、背吃刀量 0.5mm,切削速度从 60m/min 增大到 100m/min 时,表面粗糙度和刀具磨损量随切削速度的变化如图 6 所示。相比于颗粒体积分数为 25% 微米级 SiC_p/Al 复合材料,颗粒体积分数为 5% 纳米级 SiC_p/Al 复合材料得到的表面粗糙度值更小,刀具磨损更小。当切削速度增大,表面粗糙度值减小,且刀具磨损速度也加快,当切削速度大于 80m/min 时,刀具磨损剧烈,刀具的使用寿命也急剧下降。

当切削速度和背吃刀量保持不变,表面粗糙度和刀具前刀面磨损量随着进给量的变化如图 7 所示。当切削速度 40m/min、背吃刀量 0.5mm,进给量从 0.06mm/r 增大到 0.1mm/r 时,表面粗糙度值呈明显增大趋势。另外,进给量增大,刀具磨损速度也加快,当进给量大于 0.08mm/r 时,刀具磨损剧烈,导致刀具使用寿命急剧下降。相比于颗粒体积分数为 25% 微米级 SiC_p/Al,颗粒体积分数为 5% 纳米级 SiC_p/Al 在切削加工时的表面质量更好,刀具磨损也更小。

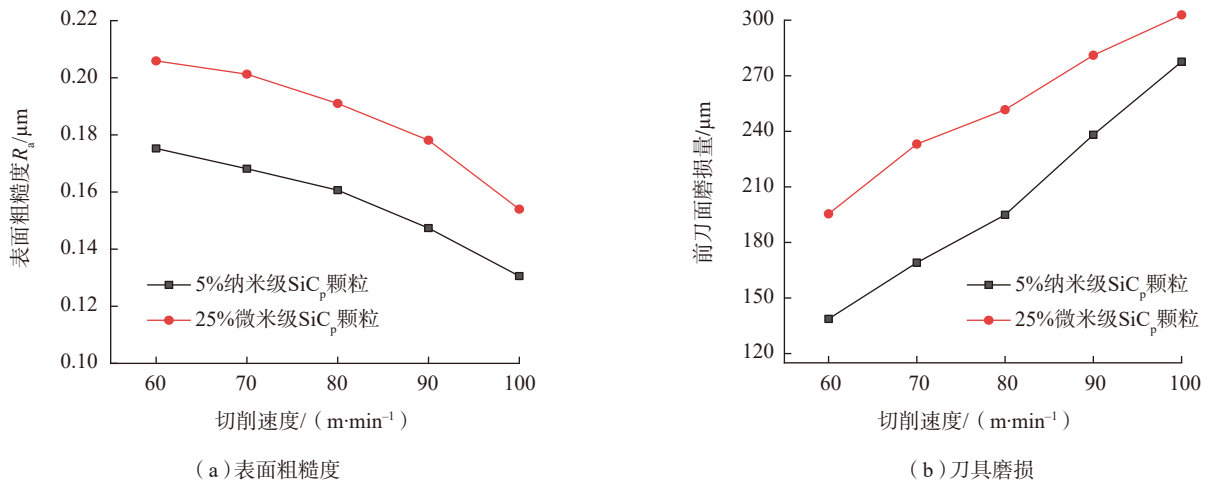


图6 切削速度对表面粗糙度和刀具磨损的影响

Fig.6 Effect of cutting speeds on surface roughness and tool rake wear

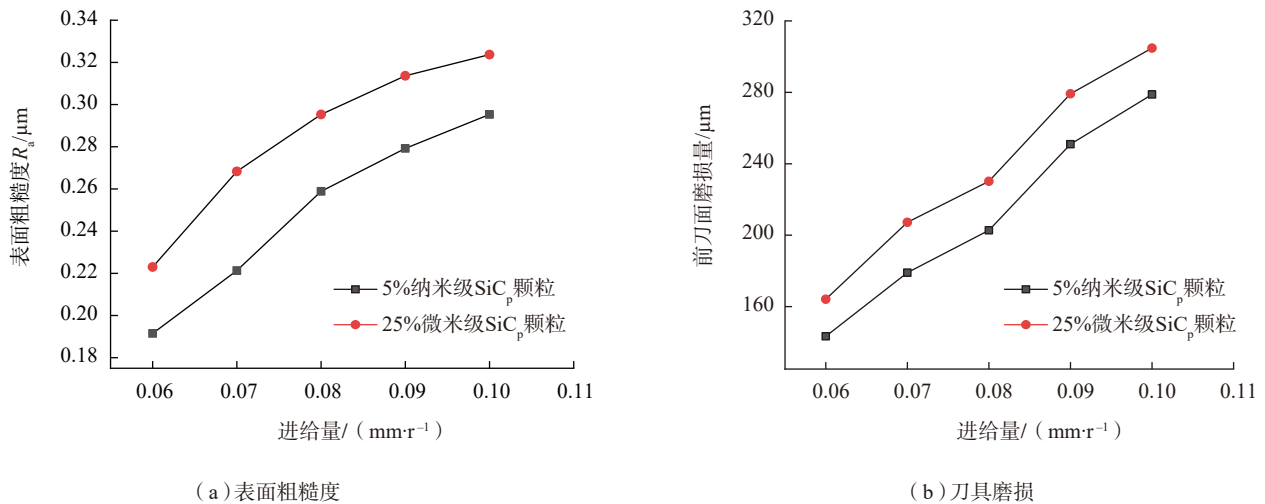


图7 进给量对表面粗糙度和刀具磨损的影响

Fig.7 Effect of cutting feed rate on surface roughness and tool rake wear

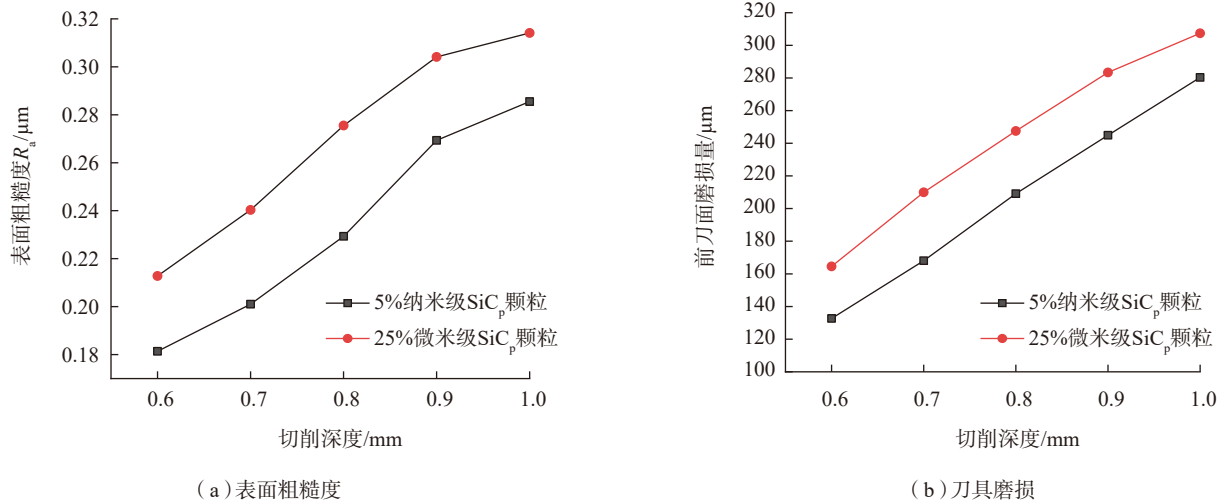


图8 背吃刀量对表面粗糙度和刀具磨损的影响

Fig.8 Effect of cutting depth on surface roughness and tool rake wear

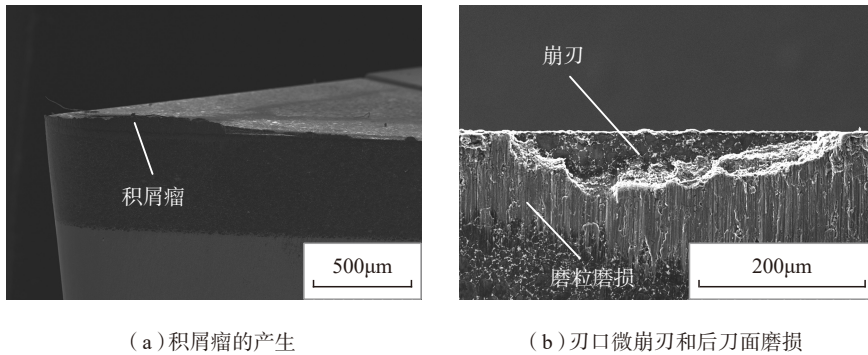


图9 积屑瘤的产生和刀具后刀面磨损情况

Fig.9 Built-up edge and tool flank wear in cutting process

当切削速度为 40m/min, 进给量为 0.05mm/r, 被吃刀量从 0.6mm 增大到 1mm 时, 表面粗糙度和刀具磨损量随着背吃刀量的变化关系如图 8 所示。此时, 表面粗糙度 R_a 值呈增大趋势, 背吃刀量增大, 刀具磨损速度加快, 刀具磨损剧烈, 刀具的使用寿命急剧下降。相比于颗粒体积分数为 25% 微米级 SiC_p/Al 复合材料, 颗粒体积分数为 5% 纳米级 SiC_p/Al 复合材料在切削加工时, 刀具磨损量较小。

3 PCD 刀具磨损特性研究

刀具磨损是影响已加工表面质量的重要因素。为了揭示切削过程 PCD 刀具的磨损特性, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对 SiC_p/Al 复合材

料车削产生的刀具磨损区域的形貌进行了研究。由于复合材料的热导率远小于 PCD 刀具, 铝基体在切削过程中易被加热软化而发生塑性流动, 而铝基体对切削温度敏感, 在切削过程中软化使得“冷焊”现象更容易发生, 切屑在流出过程中滞留在前刀面上, 并黏附在前刀面刃口部位的沟槽中形成积屑瘤, 如图 9 (a) 所示。积屑瘤对刀具前刀面具有一定的保护作用, 可以避免前刀面发生进一步的磨粒磨损。

切削过程剧烈的机械应力和热冲击的作用, 使得切削刃局部产生细小缺口和微裂纹, 这些缺口周围的裂纹不断扩展, 最终导致刀具的微崩刃, 如图 9 (b) 所示。同时, 切

削过程中虽然 PCD 刀具的硬度远高于 SiC_p/Al 复合材料的铝合金基体, 但是工件材料中存在大量 SiC_p 硬质颗粒, 而且加工过程中也有部分松动脱落的金刚石颗粒混入前、后刀面, 这些硬质点不断地与 PCD 刀具发生高频刻划和剧烈摩擦作用, 进而使得刀具发生磨粒磨损, 进而导致了在 PCD 刀具后刀面承受剧烈热耦合作用的部位出现了微细沟。

结论

本文对不同粒度 SiC_p/Al 复合材料的 PCD 刀具切削过程展开了研究, 得到了颗粒含量和切削参数对已加工表面质量和刀具磨损的影响规律, 研究结果为选择合适的切削参数提供了理论依据。选取本文切削参数进行研究时, 可以得出如下结论:

(1) 与颗粒体积分数 5% 纳米级 SiC_p/Al 复合材料相比, 体积分数为 25% 微米级 SiC_p/Al 复合材料在相同的切削参数时 PCD 刀具磨损更为严重, 且工件已加工表面质量相对较差。

(2) 切削试验结果表明随着切削速度的增大, 已加工表面粗糙度值减小, 刀具磨损加剧。随着进给量和背吃刀量的增加, 工件表面粗糙度值增大, 刀片前刀面磨损量加剧。

(3) 积屑瘤能够一定程度上抑制磨粒磨损对PCD刀具前刀面的摩擦作用, 剧烈的热、力载荷和SiC_p硬质颗粒划擦作用是PCD刀具磨粒磨损和刃口微崩刃的主要成因。

参考文献

[1] 王阳俊. SiC_p/Al复合材料高速铣削表面质量及刀具磨损研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

WANG Yangjun. Research on surface quality and tool wear in high-speed milling of SiC_p/Al composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[2] DABADE U A, JOSHI S S, BALASUBRAMANIAM R, et al. Surface finish and integrity of machined surfaces on Al/SiC_p composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192: 166–174.

[3] DABADE U A, JADHAV M R. Experimental study of surface integrity of Al/SiC particulate metal-matrix composites in hot machining[J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 914–919.

[4] 车明帆. 高体积分数SiC_p/Al复合材料车削实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

CHE Mingfan. Experimental study

on turning high volume fraction SiC_p/Al composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[5] 王集镇. 颗粒增强铝复合材料切削力特性研究[J]. 机械工程师, 2005(3): 17–19.

WANG Dazhen. Research on the cutting force performance of super-fine particle reinforced aluminum[J]. Mechanical Engineer, 2005(3): 17–19.

[6] 葛英飞, 徐九华, 杨辉, 等. SiC_p/2024Al复合材料超精密车削刀具磨损机理研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1293–1296.

GE Yingfei, XU Jiuhua, YANG Hui, et al. Single crystal diamond tool wear mechanism during ultra-precision turning of SiC_p/2024Al metal matrix composites[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(11): 1293–1296.

[7] MUTHUKRISHNAN N, DAVIM J P. An investigation of the effect of work piece reinforcing percentage on the machinability of Al–SiC metal matrix composites[J]. Journal of Mechanical Engineering Research, 2011, 3(1): 15–24.

[8] IBRAHIM SADIK M, JALILIAN E. Characterization and performance evaluation of mono-grain and Bi-modal PCD grade in machining of MMC[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 200–204.

[9] GONZALO O, BERISTAIN J,

SANDÁ A. Machinability of Al–SiC metal matrix composites using WC, PCD and MCD inserts[J]. Revista De Metalurgia, 2014, 50(1): e006. DOI:10.3989/revmetalm.006.

[10] 韩荣第, 王集镇, 刘华明, 等. 颗粒增强SiC_p/2024铝复合材料切削力特性研究[J]. 高技术通讯, 2001, 11(7): 94–96.

HAN Rongdi, WANG Dazhen, LIU Huaming, et al. Research on the cutting force properties of machining SiC_p/2024 composites[J]. High Technology Letters, 2001, 11(7): 94–96.

[11] 刘汉中. SiC_p/2024Al复合材料的精密车削工艺与刀具磨损研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

LIU Hanzhong. Research on precision turning technology and tool wear of SiC_p/2024Al composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[12] 吕立生, 王咏莉, 李光, 等. 高体积分数SiC_p/Al复合材料精密车削加工工艺技术[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(4): 73–76.

LÜ Lisheng, WANG Yongli, LI Guang, et al. Precision turning technology of high volume SiC_p/Al composite material[J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(4): 73–76.

通讯作者: 岳彩旭, 博士、教授, 研究方向为切削加工过程数字化技术和刀具设计, E-mail: yuecaixu@163.com。

Experimental Research on PCD Tool Turning SiC_p/Al Composites

PEN Hongmin¹, LIU Xin², NI Na¹, CHEN Zhitao², LIU Fei¹, YUE Caixu²

(1. Tianjin Institute of Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300458, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

[ABSTRACT] Silicon carbide aluminum matrix composite, which has excellent thermal conductivity, high specific strength and specific stiffness, will be widely applied in the field of aerospace. However, the reinforced phase in this composite results in poor machined surface quality and severe tool wear. Therefore, the influence of SiC_p/Al materials with different particle contents (nanometer-level 5% and micron-level 25%) and cutting parameters (cutting speed, cutting depth and feed rate) on tool wear and machined surface quality were analyzed through experiments. The tool wear mechanism was also analyzed. The experimental results showed that PCD tool wear was more serious and the machined surface quality was worse when turning 25% SiC_p/Al composite with micron-level particles. With the increases of feed rate and cutting depth, the machined surface roughness increased, and the rake face was seriously worn. With the increase of cutting speed, the surface roughness of the workpiece decreased, and the wear of rake face increased. Under the cutting parameters used in this research, the tool abrasive wear and blade breakage were the main wear mechanisms for PCD inserts, and built-up edge (BUE) will be generated on rake face of the cutting tool. The experimental results provide a theoretical basis for optimizing the turning process of SiC_p/Al composite with PCD tools.

Keywords: SiC_p/Al composites; PCD cutting tool; Turning process; Tool wear; Surface quality

(责编 逸飞)