

纳米颗粒 SiCp/Al 复合材料车削特性试验研究

盆洪民¹, 杜延杰², 马建斌¹, 刘飞³, 岳彩旭², 张海军¹, 何华东¹

(1. 天津航天机电设备研究所, 天津 300458;

2. 哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150080;

3. 北京特思迪半导体设备有限公司, 北京 101300)

摘要:针对纳米颗粒增强铝基 (SiCp/Al) 复合材料在航空航天领域的应用需求, 采用试验的方法, 研究不同刀具材料和不同刀具几何参数对切削加工纳米 SiCp/Al 复合材料加工表面粗糙度和切屑形貌的影响。试验结果表明, 相同切削参数下, PCD 刀具比硬质合金刀具能获得更低的已加工工件表面粗糙度, 微崩刃的存在是导致硬质合金刀具加工时工件表面粗糙度升高的主要原因之一; 增加刀具的锋利度能够获得较低的工件表面粗糙度, 较大的主偏角表面粗糙度变化较剧烈; 由于纳米颗粒增强相的不均匀分布和材料内部存在微裂纹, 在切削时导致切屑呈不规则的锯齿状, 基体的断裂模式是该现象产生的主要原因。文中的研究成果将为进一步分析纳米 SiCp/Al 复合材料的切削机理提供必要的试验基础。

关键词: SiCp/Al 复合材料; 纳米颗粒; 车削; 表面质量

中图分类号: V461

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2022)05-0105-08

Experimental study on turning SiCp/Al composites with nanometer-level reinforced particle

PEN Hongmin¹, DU Yanjie², MA Jianbin¹, LIU Fei³, YUE Caixu², ZHANG Haijun¹, HE Huadong¹

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

2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

3. Beijing TSD Co., Ltd, Beijing 101300, China)

Abstract: According to the application requirements of particle reinforced aluminum matrix composites in aerospace field, the effects of different tool materials and different tool geometric parameters on the machined surface roughness and chip morphology of aluminum matrix composites reinforced by nano-particles were studied by an experimental method. The experimental results show that machining by PCD tool can obtain better surface quality than carbide tool under the same cutting parameters, and the existence of micro chipping is one of the main reasons for the increase of surface roughness when machining with carbide tools; A lower workpiece surface roughness can be obtained by increasing the sharpness of the tool, and the surface roughness changed violently at a large approach angle; Due to the uneven distribution of nano-particle reinforced phase, an irregular sawtooth chip was formed, which is mainly caused by the fracture mode of the matrix. The research results of this paper will provide a

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 51505331)

引用格式: 盆洪民, 杜延杰, 马建斌, 等. 纳米颗粒 SiCp/Al 复合材料车削特性试验研究[J]. 空间电子技术, 2022, 19(5): 105-112. PEN H M, DU Y J, MA J B, et al. Experimental study on turning SiCp/Al composites with nanometer-level reinforced particle[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(5): 105-112.

necessary experimental basis for further analysis of the cutting mechanism of aluminum matrix composites reinforced by nano-particles.

Key words: SiCp/Al composites; nano-particles; turning; surface quality

0 引言

SiCp/Al 复合材料作为重要结构部件和电子封装材料,因其良好的比刚度、比强度且热膨胀系数低、导热性好,在航空航天领域获得了越来越多的应用^[1-3]。

因增强相的引入, SiCp/Al 复合材料的切削加工成为影响该材料普遍应用的一大难点。过去 20 多年来,对微米 SiCp/Al 复合材料的切削加工已经取得一系列研究成果^[4-6]。近年,在纳米及纳微米混杂 SiCp/Al 基复合材料的加工特性研究方面,引起研究者的广泛关注。Ahamed 等^[7]通过高速钢钻削 SiCp-B₄Cp/Al 基复合材料实验,结果表明磨粒磨损和粘结磨损是高速钢钻刀的主要磨损形式,并得到了影响刀具磨损的主要因素为切削速度。Basavarajappa 等^[8]研究 SiCp—石墨混杂 Al 基复合材料钻削加工,结果表明表面粗糙度随切削速度和进给量的增加而增加。Altunpak 等^[9]利用涂层刀具钻削 SiCp、不同含量的石墨混杂 Al 基复合材料,结果表明石墨的添加能够明显降低切削抗力。Osada 等^[10]对加工后的纳米 SiCp/Al 基复合材料(体积分数 15%)进行热处理,结果表明裂纹自愈合是降低加工成本和提高加工表面完整性的有效方法。Gopalakannan 等^[11]利用电加工方法加工纳米 SiCp/Al 基复合材料,结果表明脉冲电流是影响材料去除率、电极磨损率和表面粗糙度的最重要因素。Rajmohan 等^[12]利用不同材质的钻头加工混杂金属基复合材料,试验结果揭示进给量对轴向力、表面粗糙度、刀具磨损和毛刺高度的影响最大。从提高工件表面精度,降低轴向力、刀具磨损和毛刺高度考虑,PCD 刀具比其他两种刀具性能更好。

从以上纳米 SiCp/Al 复合材料的加工分析可以看出,研究主要集中在钻削加工和电加工,对其车削加工特性,特别是加工后表面粗糙度和切屑形态的研究尚少。本文通过 PCD 金刚石刀、硬质合金刀切削 SiCp/Al 复合材料实验,得到了 PCD 刀具切削时,已加工表面的粗糙度明显低于硬质合金刀具切削;同时,当改变刀具参数时,刀具前角和后角的增

大可以获得较低的已加工表面粗糙度。本文的研究成果可为加工特种复合材料时刀具设计与切削性能方面提供指导作用。

1 试验条件与方案

1.1 试验条件

本试验主要采用不同刀具几何参数的 PCD 金刚石刀、硬质合金刀对颗粒含量为 5% 纳米级 SiCp/Al 复合材料进行车削试验。切削条件为干式切削, SiCp/Al 复合材料的力学性能如表 1 所列,刀具力学性能如表 2 和表 3 所列。

表 1 5% 纳米级 SiCp/7075Al 复合材料的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of nanometer-level 5% SiCp/7075Al composites

密度 /(g · cm ⁻³)	硬度 HB	热导率 /W · (m · K) ⁻¹	弹性模量 /GPa	弯曲强度 /MPa
2.92	229	120	138	500 ~ 550

表 2 PCD 刀具的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of PCD materials

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

表 3 硬质合金刀具的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of carbide materials

刀具	硬度 HV	压缩强度 /GPa	弹性模量 /GPa	弯曲强度 /GPa
硬质合金	>1200	4.5 ~ 5.6	600 ~ 640	>1.9

1.2 试验方案

试验用刀具:PCD 金刚石三角形刀片前角为 0° 和 5°(1 和 2 号刀具);PCD 金刚石菱形刀片前角为 0° 和 5°(3 和 4 号刀具);整体式三角形可转位刀片(5 号刀具);整体式菱形可转位刀片(6 号刀具);整体式 PCD 金刚石车刀主偏角 60°、75° 和 90°(7、8 和 9 号刀具),如图 1 所示,具体刀具参数如表 4 所列。纳米颗粒 SiCp 铝基复合材料棒料如图 2 所示。

表 4 刀具几何参数表
Tab.4 Geometric parameters for tools

刀具编号	前角	后角	刀尖半径	主偏角	备注
1	0°	0°	0.8 mm	90°	PCD 刀片,形状 60°
2	5°	0°			
3	0°	7°			
4	5°	7°			PCD 刀片,形状 55°
5	5°	0°			
6	5°	7°			
7	5°	7°		60°	整体车刀
8	5°	7°		75°	整体车刀
9	5°	7°		90°	整体车刀

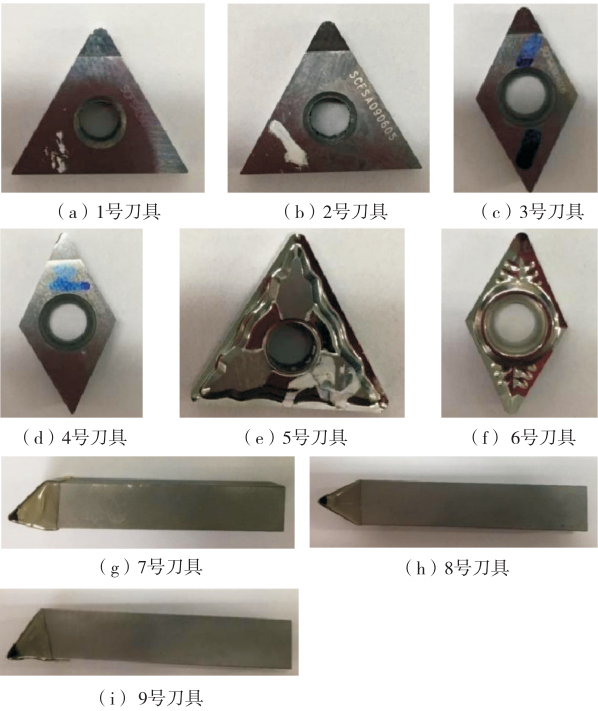


图 1 试验用车削刀具
Fig.1 Cutting tools used by experiments

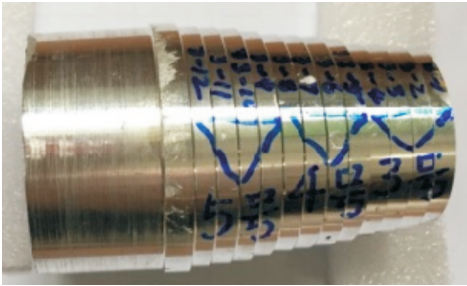


图 2 工件材料图
Fig.2 Workpiece material
本次试验采用正交试验方案,分别研究不同切

削速度、切深、进给量下不同刀具材料、不同刀具几何参数对 SiCp 铝基复合材料切削过程中工件表面粗糙度和切屑形貌的影响,通过试验检测工件表面粗糙度、切屑形态等分析切削过程现象。具体试验参数如表 5 所列。

表 5 正交车削试验参数表
Tab.5 Parameters for orthogonal cutting experiment

刀具号	序号	切深 a_p/mm	切削速度 $V_c/(\text{m}/\text{min})$	进给量 $f/(\text{mm}/\text{r})$
1~9 号刀具	1	0.5	40	0.05
	2	0.5	100	0.1
	3	1	40	0.1
	4	1	100	0.05

其中,试验机床为大连机床公司生产的 CA6150 数控车床,如图 3 所示,试验现场如图 4 所示。加工表面形貌采用如图 5 所示的 Taylor Map CCI 白光干涉仪进行测量,单点的采集范围为 $0.86\text{ mm} \times 0.86\text{ mm}$,采集像素为 1024×1024 。加工后 SiCp/Al 复合材料表面粗糙度采用如图 6 所示的手持式粗糙度仪进行测量。



图 3 CA6150 数控车床 图 4 试验现场图
Fig.3 CA6150 CNC lathe Fig.4 Experimental state



图 5 白光干涉仪



图 6 手持粗糙度仪

Fig. 5 White-light interferometer Fig. 6 Hand roughness meter

2 试验结果及分析

2.1 不同刀具几何角度对工件表面质量的影响

图 7 为加工后工件表面形貌图,从形貌图中能测量出已加工表面的表面粗糙度,图 7 为 2 号刀具加工后(切深 $a_p = 0.5 \text{ mm}$,切削速度 $v = 40 \text{ m/min}$,进给量 $f = 0.05 \text{ mm/r}$,转速 $n = 220 \text{ r/min}$)测量结果。

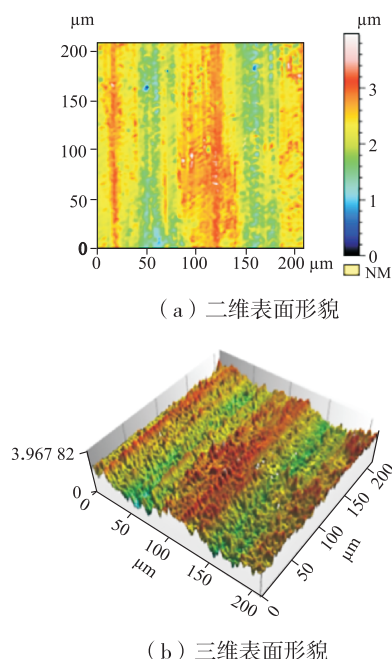


图 7 SiCp 铝基复合材料工件表面形貌图

Fig. 7 Surface topography of SiCp aluminum matrix composites

为分析比较不同刀具参数对已加工表面粗糙度的影响,以下分别从不同的刀具材料、刀具前后角和主偏角分别进行讨论。图 8 为 2 号和 5 号刀具的对比情况,从曲线图可以看出,在 4 种不同切削类型下,采用 PCD 刀具加工获得的表面粗糙度均优于硬质合金。同样,采用 4 号和 6 号刀具也有类似结果,如图 9 所示。分析其主要原因在于 PCD 刀具的抗磨损性比硬质合金刀具高一到两个量级,且与硬质合金刀具相比,工件亚表层损伤要小^[13]。图 10 为不同号刀具加工情况下刀具的磨损情况,可以看出与 PCD 刀具相

比,硬质合金刀具磨损主要发生在后刀面,且存在微崩刃现象,微崩刃的存在是导致工件表面粗糙度升高的主要原因之一。因此要获得较低的表面粗糙度值和工件表面质量,应优选 PCD 刀具,这与文献[14-15]加工微米 SiCp/Al 复合材料所得结论一致。

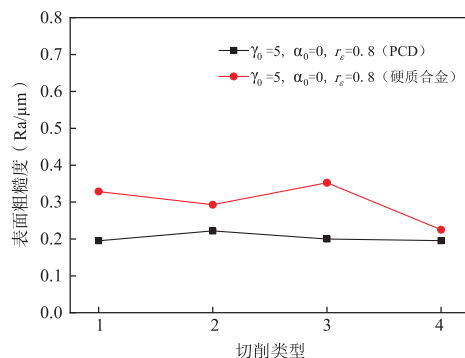


图 8 2 号和 5 号刀具不同切削参数下表面粗糙度值

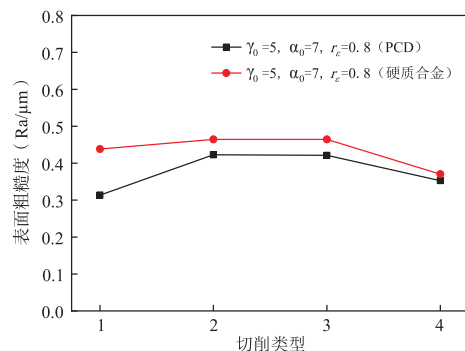
Fig. 8 Surface roughness under different parameters with tool 2[#] and tool 5[#]

图 9 4 号和 6 号刀具不同切削参数下表面粗糙度值

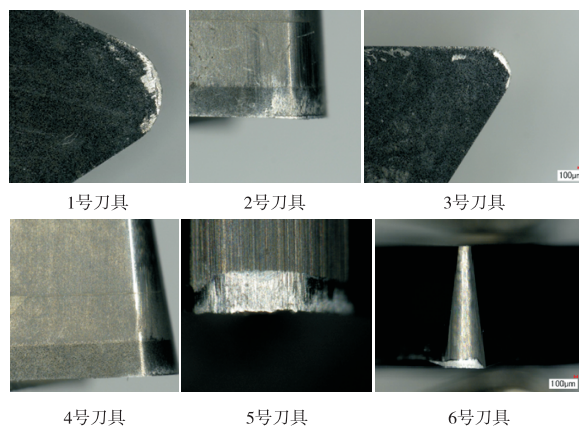
Fig. 9 Surface roughness under different parameters with tool 4[#] and tool 6[#]

图 10 不同切削刀具条件下刀具磨损情况

Fig. 10 Tool wear under six different cutting tools

图 11 和图 12 分别为刀具后角相同,前角变化对表面粗糙度的影响。从两幅曲线图对比可以看出,两种刀具后角下,刀具前角为 5° 时表面粗糙度

明显低于前角为 0° 时。原因在于增大刀具的前角能够减小切削变形,刀具和切屑间的摩擦变小。这表明加工纳米颗粒铝基复合材料,增加刀具的锋利度有助于提高工件的加工表面质量。

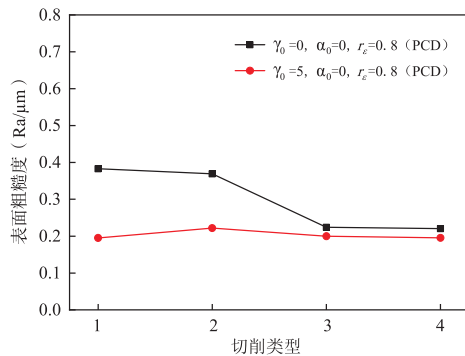


图 11 1 号和 2 号刀具不同切削参数下表面粗糙度值

Fig. 11 Surface roughness under different parameters with tool 1# and tool 2#

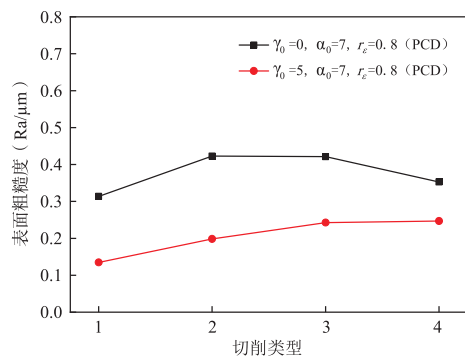


图 12 3 号和 4 号刀具不同切削参数下表面粗糙度值

Fig. 12 Surface roughness under different parameters with tool 3# and tool 4#

图 13 为三种不同刀具主偏角情况下,工件已加工表面粗糙度的变化。从图中可以看出,表面粗糙度随主偏角变化并没有明显的变化规律。与主偏角为 60° 和 75° 相比,在主偏角为 90° 时,表面粗糙度变化较为剧烈。

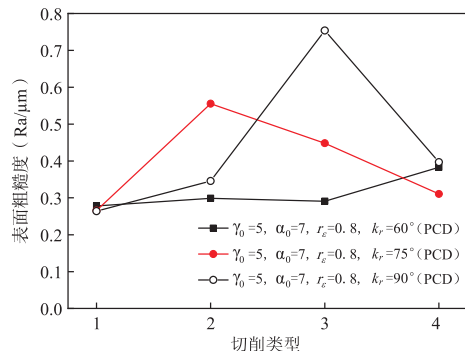


图 13 7 号、8 号和 9 号刀具不同切削参数下表面粗糙度值

Fig. 13 Surface roughness under different parameters with tool 7#, tool 8# and tool 9#

2.2 刀具几何角度对切屑形态的影响

不同几何角度的刀具进行切削试验,形成的切屑形貌如附录 1 所示。由此可以看出,1、2、3、4、5 号刀具在切削时,由于 SiCp 分布不均匀性和微观缺陷,铝基的高变形以及较小的前角,形成具有一定长度的断屑。研究结果表明切削 SiCp/Al 复合材料时,切屑呈厚度准周期变化的锯齿状,微裂纹的动态形成与扩展行为和切削时的剪切角周期变化是形成这种切屑的两种主要机制。但由于纳米颗粒铝基复合材料本身的不均匀性和各种微观缺陷(在材料制备过程中,由于纳米颗粒易于团聚,在基体会形成孔洞等缺陷),材料各部分的力学性能相差较大。经显微观察,本文所用材料内部也存在不同程度的微观缺陷。研究表明,当体积分数达到 5% 时,复合材料断裂机制为基体的韧性断裂和 SiCp 颗粒团聚体的脆性断裂。所以微裂纹和微空洞在切屑材料不同区域产生的数量不一,其形核地点和扩展路径也具有很大的随机性,从而造成在切屑自由表面突发剪切的时间间隔不一致。6 号刀具在切削时,刀具具有较大的前角及相对锋利的切削刃,故切削过程中产生的切屑为螺旋带状屑。7、8 号刀具在切削时,切屑形状为长度较小的断屑。9 号刀具在切削时,由于主偏角较大,切屑形状为螺旋状带屑。

3 结论

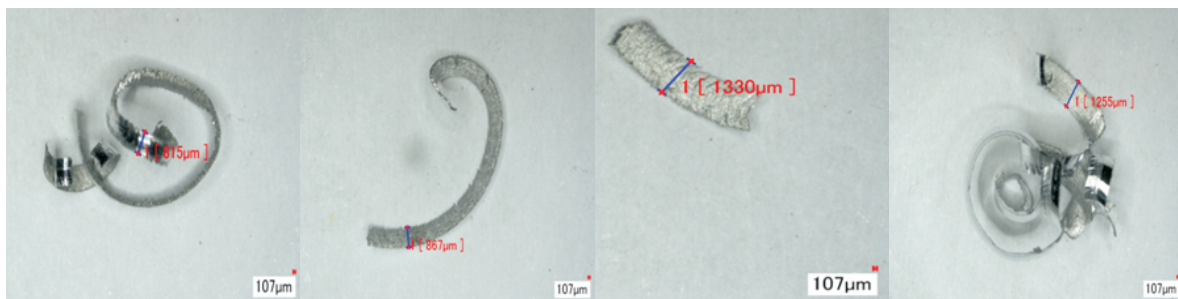
本文主要针对含量为 5% 纳米 SiCp 颗粒铝基复合材料进行车削试验。对 9 种不同型号刀具车削纳米 SiCp 铝基复合材料进行试验分析。对不同参数下的切屑形态、表面粗糙度等进行试验分析。

试验结果表明 PCD 刀具能够比硬质合金刀具获得较低的表面粗糙度,更适合用于材料的精加工。工件表面粗糙度是刀具几何角度、切削参数等综合作用的结果,增大刀具前角和后角有利于获得较好的表面质量。由于纳米 SiCp 颗粒复合材料的固有缺陷,造成切削过程微孔洞和微裂纹的产生,在切削时容易形成不规则或准周期性的锯齿状切屑。为研究纳米 SiCp/Al 复合材料的切削加工特性,需要进一步开展超精密切削或微纳切削试验,结合切削仿真技术对切削的微观变形机理开展研究,探寻宏-微切削加工之间变形的本质规律。

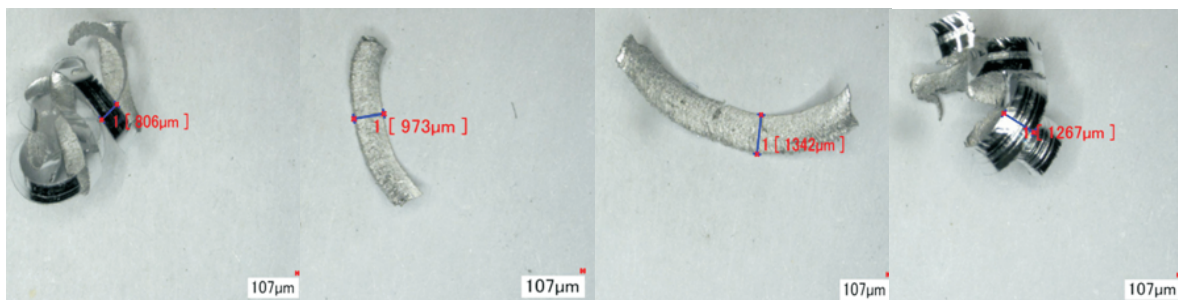
参考文献:

- [1] 武高辉,张强,姜龙涛,等. SiCp/Al 复合材料在电子封装应用中的基础研究[J]. 电子元件与材料,2003,22(6):27-29.
- [2] 汪新刚,何向辉. 低膨胀铝基复合材料在星载大功率多工器中的应用[C]//2009 年空间环境与材料科学论坛. 北京: 航天器环境工程编辑部, 2009:202-204.
- [3] 张从发,李林,李潇,等. 国外在轨制造和装配技术发展现状及启示[J]. 空间电子技术,2021,18(3):97-104.
- [4] DWIVEDI S P, KUMAR S, KUMAR A. Effect of turning parameters on surface roughness of A356/5% SiC composite produced by electromagnetic stir casting[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26 (12): 3973-3979.
- [5] 黄劲楠,周明. PCD 刀具切削颗粒增强铝基复合材料时刀具磨损研究[J]. 工具技术,2008,42(6):6-9.
- [6] YUAN Z J, GENG L. Ultraprecision machining of SiC/Al composites [J]. Annals of the CIRP, 1993, 42 (1): 107-109.
- [7] AHAMED A R, ASOKAN P, ARAVINDAN S, et al. Drilling of hybrid Al - 5% SiCp - 5% B₄Cp metal matrix composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9-12):871-877.
- [8] BASAVARAJAPPA S, CHANDRAMOHAN G, PRABU M, et al. Drilling of hybrid metal matrix composites—workpiece surface integrity [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(1):92-96.
- [9] ALTUNPAK Y, AY M, ASLAN S. Drilling of a hybrid Al/SiC/Gr metal matrix composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60 (5-8):513-517.
- [10] OSADA T, NAKAO W, TAKAHASHI K, et al. Strength recovery behavior of machined Al₂O₃/SiC nano-composite ceramics by crack-healing [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(10):3261-3267.
- [11] GOPALAKANNAN S, SENTHILVELAN T. Application of response surface method on machining of Al-SiC nano-composites[J]. Measurement, 2013, 46(8):2705-2715.
- [12] RAJMOHAN T, PALANIKUMAR K. Modeling and analysis of performances in drilling hybrid metal matrix composites using D-optimal design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(9-12):1249-1261.
- [13] HUNG N P, ZHONG C H. Cumulative tool wear in machining metal matrix composites Part I: Modelling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 58 (1): 109-113.
- [14] DAVIM J P, BAPTISTA A M. Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 103(3):417-423.
- [15] LI X P, SEAH W K H. Tool wear acceleration in relation to workpiece reinforcement percentage in cutting of metal matrix composites[J]. Wear, 2001, 247(2):161-171.

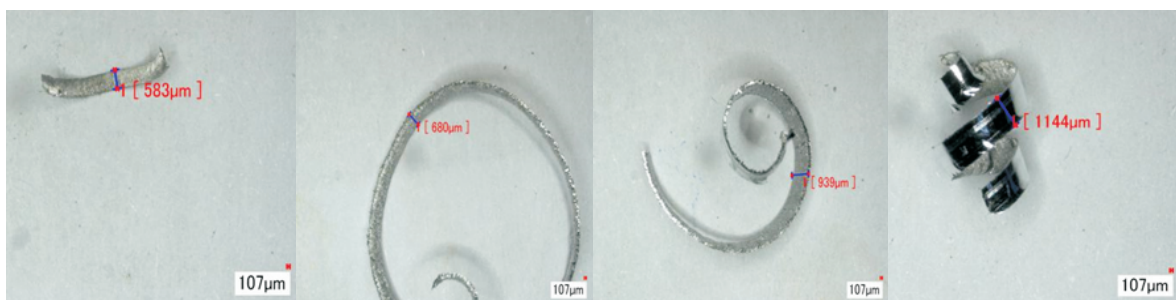
附录 1:4 组切削参数下的切屑形态照片



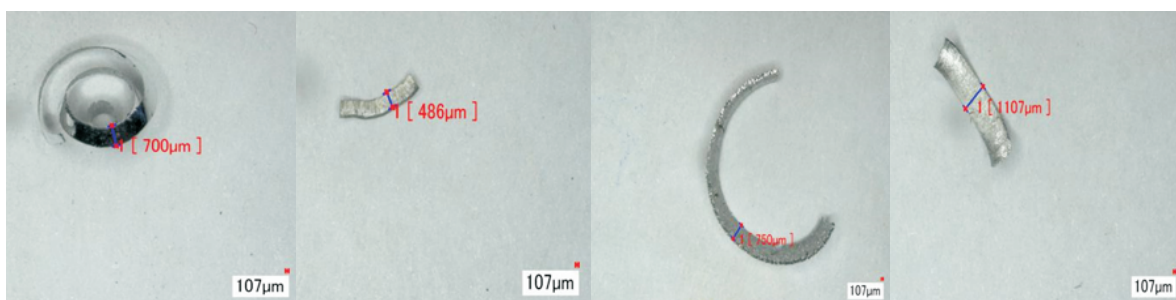
1号刀具



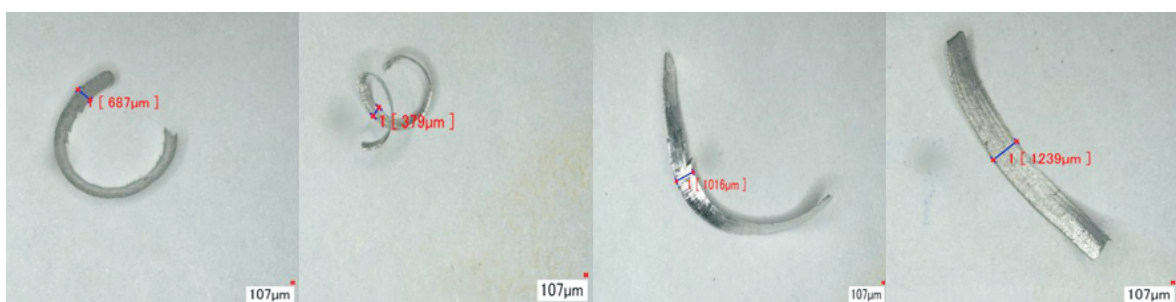
2号刀具



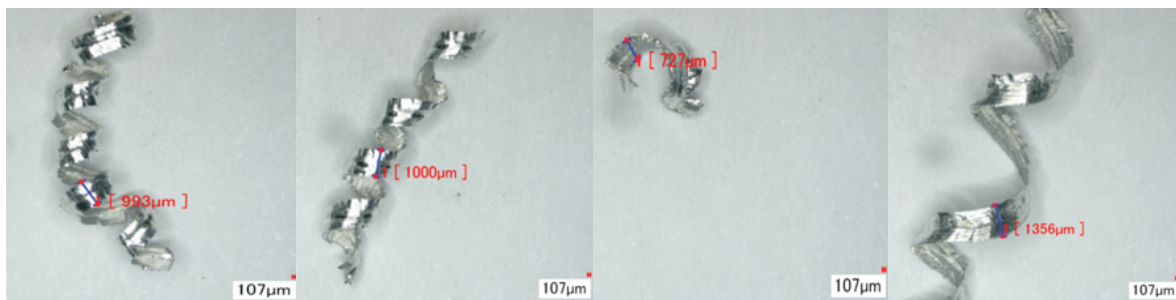
3号刀具



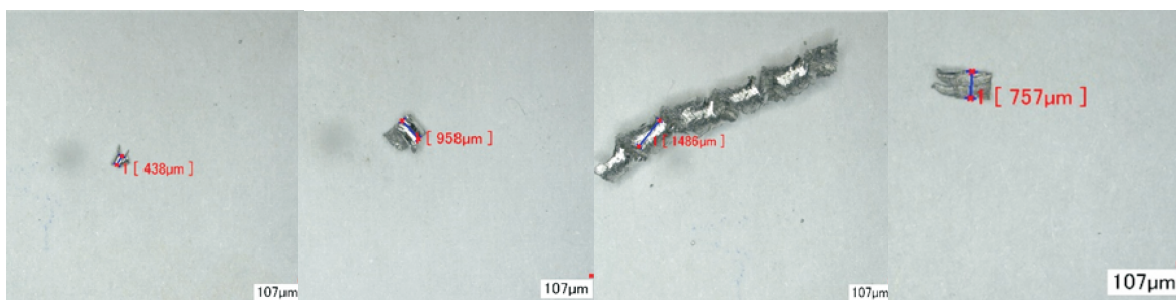
4号刀具



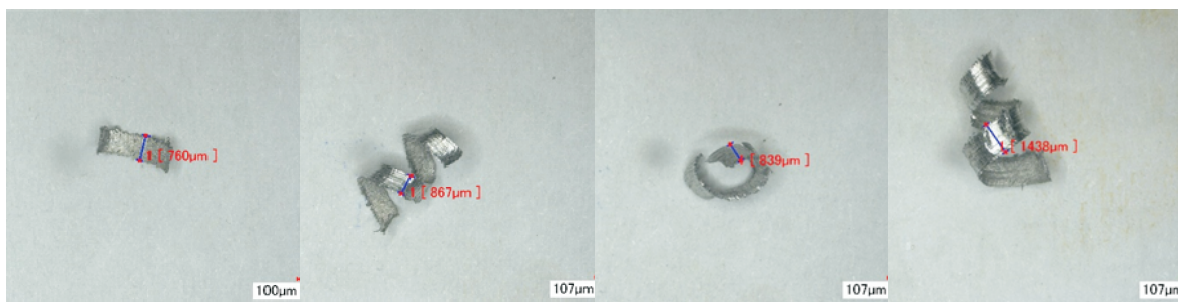
5号刀具



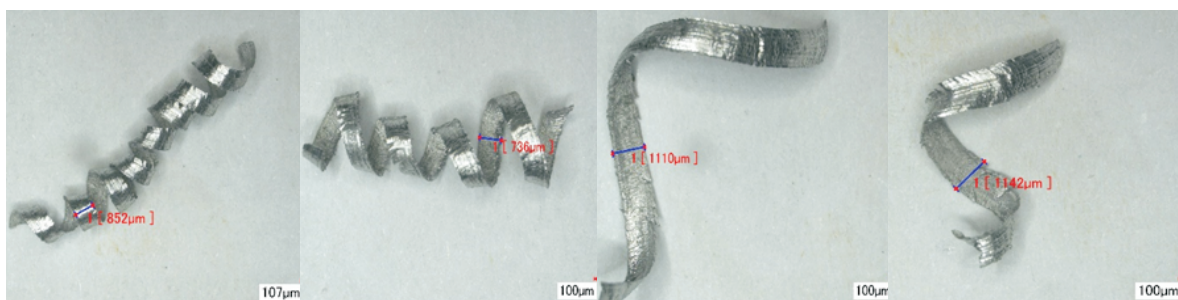
6号刀具



7号刀具



8号刀具



9号刀具

作者简介: 盆洪民(1980—), 天津人, 博士, 研究员。主要研究方向为精密机械设计与制造、超精密加工与微纳制造。

E-mail: hmpen23@126.com

(上接第 87 页)

参考文献:

- [1] 张荣生. SRAM 型 FPGA 故障注入及刷新技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [2] 王子龙, 郑美松, 涂吉, 等. SRAM 型 FPGA 的基于可观性度量的选择性三模冗余方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(11): 2184-2191.
- [3] 余永涛, 陈煜海, 余俊杰, 等. SRAM 型 FPGA 单粒子效应测试方法及试验验证[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(5): 534-540.
- [4] HOQUE K A, AIT MOHAMED O, SAVARIA Y. Formal analysis of SEU mitigation for early dependability and performance analysis of FPGA-based space applications[J]. Journal of Applied Logic, 2017, 25: 47-68.
- [5] 丁宗杰, 门永平, 白正尧, 等. FPGA 状态机综合可靠性探究[J]. 空间电子技术, 2021, 18(1): 23-27.
- [6] 许海滨. FPGA 软错误防护方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [7] XILINX. Xilinx TMRTTool user guide UG156(V2.2) [S]. 2007.
- [8] CARMICHAEL C. Triple module redundancy design techniques for virtex FPGAs, application note 197[S]. 2001.
- [9] 邢克飞, 杨俊, 王跃科, 等. Xilinx SRAM 型 FPGA 抗辐射设计技术研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(1): 123-129 + 151.
- [10] XILINX. Virtex-II Platform FPGA user guide UG002(V2.2) [S]. 2007.
- [11] XILINX. Virtex-II Platform FPGAs: Complete Data Sheet DS031(V4.0) [S]. 2014.

作者简介: 马小霞(1990—), 甘肃甘谷人, 硕士, 工程师。主要研究方向为空间电子技术。E-mail: maxxlu@126.com