

SiC_p/Al 复合材料内螺纹螺旋磨削加工方法研究

王逸轩, 李 勋, 柏 帆

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083)

[摘要] 铝基碳化硅颗粒增强型复合材料(SiC_p/Al 复合材料)切削加工性能较差,其内螺纹的切削加工难度更大。在研究 SiC_p/Al 复合材料磨削加工性能的基础上,提出利用电镀超硬磨料成形砂轮进行 SiC_p/Al 复合材料内螺纹螺旋磨削加工的工艺方法,并研制了电镀 CBN 成形砂轮,进行了具体的内螺纹磨削试验。试验结果验证了 SiC_p/Al 复合材料内螺纹螺旋磨削加工方法的可行性和灵活性。在砂轮线速度 $v_s=5.86\text{m/s}$ 、进给速度 $v_f=80\text{mm/min}$ 的条件下, CBN 成形砂轮对 SiC_p/Al 复合材料展现出较好的磨削能力,单个砂轮可以完成 17 个 M8 螺纹孔的螺旋磨削加工,其内螺纹的加工尺寸精度均满足 6H 塞规的检测要求。同时,电镀 CBN 砂轮的磨损形式以磨粒磨损为主,砂轮表面未出现大面积脱落的现象。这说明,利用超硬磨料成形砂轮可以实现 SiC_p/Al 复合材料内螺纹的高效高质量加工,此工艺方法具有较高的工程应用价值,适于在实际生产中推广应用。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; 螺纹; 螺旋磨削; 超硬磨料; 电镀 CBN 砂轮; 磨损

Research on Helical Grinding of Internal Threads in SiC_p/Al MMCs

WANG Yixuan, LI Xun, BAI Fan

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100083, China)

[ABSTRACT] SiC particle reinforced aluminum metal matrix composite material (SiC_p/Al MMCs) has a poor machinability, especially in the machining process of internal threads. Based on analyzing grinding machinability of SiC_p/Al MMCs, the helical grinding method of internal threads with a super abrasive grinding wheel is developed and the helical grinding experiments are carried out utilizing an electroplated CBN grinding wheel. The experimental results show that the helical grinding method has the feasibility and flexibility. On the condition of grinding speed $v_s=5.86\text{m/s}$ and feed rate $v_f=80\text{mm/min}$, CBN forming wheel presents an excellent grinding performance. A grinding wheel can finish 17 internal threads (M8), of which the quality meets the requirement of 6H thread plug gauge inspection. Meanwhile, the micro morphology of utilized grinding wheel shows that the wheel wear is mainly on the abrasive wear and only a few abrasive grains fall off from the wheel surface. All the experimental results indicate that the helical grinding method using the electroplated CBN wheel is effective in the machining internal threads of SiC_p/Al MMCs with high machining efficiency and surface quality. Thus, this grinding process has a great engineering application value.

Keywords: SiC_p/Al MMCs; Thread; Helical grinding; Super abrasive; Electroplated CBN grinding wheel; Wear

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.088

铝基碳化硅颗粒增强型复合材料(SiC_p/Al 复合材料)具有较高的比强度和比刚度、较小的热膨胀系数、极好的尺寸稳定性^[1-2],因此已被广泛应用于航空航天、汽车、光学仪器等领域^[2-4]。

另一方面, SiC_p/Al 复合材料是在金属铝的内部增加 SiC 颗粒增强相,进而提高材料的机械性能。在进行 SiC_p/Al 复合材料切削加工时,因为 SiC 颗粒的存在,致使材料的切削加工性变差,主要表现为刀具的磨粒磨损

严重^[5-7]、加工精度和表面质量较差^[8-10],尤其是针对空间较为封闭、结构较为复杂的内螺纹来说,其切削加工性更差。为此,低频振动攻丝加工技术^[11-12]被用于提高 SiC_p/Al 复合材料内螺纹的可加工性,但是依然存在刀具寿命短和加工效率低等问题。

高速主轴和超硬磨料砂轮制造水平的不断提高,使得较小直径的砂轮也可以获得较高的线速度,从而为 SiC_p/Al 复合材料的磨削加工提供了必要条件。目前,关

于 SiC_p/Al 复合材料磨削加工机理、加工精度、表面完整性、砂轮磨损、工艺优化等基础研究已经比较完善^[13-16]。Gao 等^[17]建立了内螺纹螺旋磨削加工误差的数学模型,通过此模型优化了砂轮的设计参数,并采用铜基金刚石砂轮进行了验证性的内螺纹螺旋磨削加工试验,并对内螺纹的质量和砂轮的有效使用寿命进行了初步的检测和研究。但是,铜基金刚石砂轮在机微细电火花修整难度大、成本较高。因此,该加工方法具有一定的局限性,不利于实际生产中的应用与推广。

本文在前期对 SiC_p/Al 复合材料磨削机理、砂轮选择、小孔螺旋磨削加工等研究的基础上^[18-19],采用优化后的电镀 CBN 成形砂轮对 SiC_p/Al 复合材料进行内螺纹的螺旋磨削加工试验。试验结果表明,利用 $\Phi 4\text{mm}$ 的 300# 电镀 CBN 成形砂轮能够实现 17 个 M8 螺纹孔的高效磨削加工,其加工尺寸精度均满足标准 6H 塞规的检测要求,从而验证了利用超硬磨料电镀成形砂轮可以实现 SiC_p/Al 复合材料内螺纹的高效高质量加工,为内螺纹螺旋磨削加工技术的工程化应用提供了参考。

1 内螺纹螺旋磨削原理

内螺纹的螺旋磨削是一种利用成形砂轮以螺旋进给的运动方式来实现内螺纹加工的工艺方法,砂轮的运动过程如图 1 所示。其中, d 为砂轮磨削部分的最大直径, n 为砂轮的转速, R_h 为砂轮轴线绕内螺纹轴线的运动半径, D_1 为内螺纹小径, D_2 为内螺纹中径, D 为内螺纹大径, P 为内螺纹螺距。

根据内螺纹大径 D 和砂轮磨削部分的最大直径 d ,

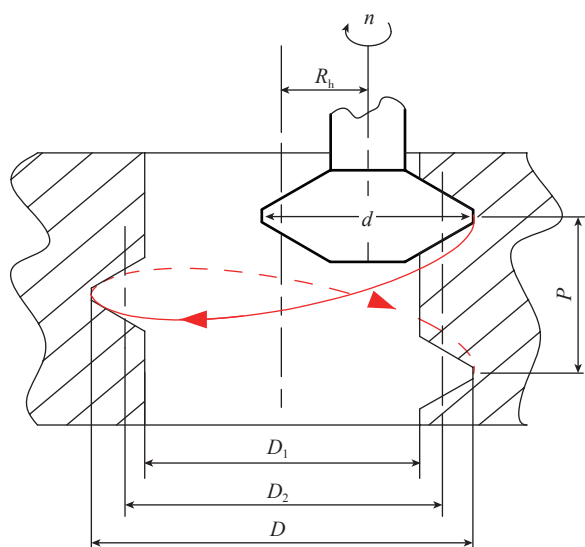


图1 内螺纹螺旋磨削加工原理图

Fig.1 Schematic diagram of machining internal thread with helical grinding method

可确定砂轮螺旋运动时 R_h 的最大值。在加工过程中,控制砂轮的轴线绕内螺纹的轴线运动一周时,砂轮沿内螺纹的轴向匀速运动一个螺距 P 。逐渐增大 R_h ,可逐步实现对内螺纹的粗、精磨削加工。

2 成形砂轮设计

针对不同公称直径和螺距的螺纹,需要设计特定的成形砂轮,磨削砂轮的结构如图 2 所示。其中,砂轮杆直径为 d_0 ,砂轮磨削部分最大直径为 d ,磨削部分厚度为 h ,砂轮尖端角度为 θ ,圆弧半径为 R 。结合内螺纹大径和螺距,需要保证:

$$d-d_0 > D-D_1$$

$$d < D_1$$

$$d + 2R_h \leq D$$

另外,要使设计的砂轮能够满足多种公称直径内螺纹的磨削加工,扩大砂轮的应用范围,就要选择较大的 d 和较小的 d_0 ,而 d_0 的大小对砂轮的整体刚度影响较大,进而影响砂轮的磨削加工性能,因此砂轮结构尺寸的选择需要综合考虑各个因素。

针对 $\text{M}8 \times 1.25$ 公制内螺纹,根据螺纹牙型尺寸(如图 3 所示),设计成形砂轮。

成形砂轮如图 4 所示。成形砂轮为电镀 CBN 砂轮,粒度为 300#,砂轮杆直径 d_0 为 $\Phi 2\text{mm}$,磨削最大直径 d 为 $\Phi 4\text{mm}$,砂轮厚度 h 为 1.25mm ,尖端角度 θ 为 60° ,圆角半径 R 为 0.15mm 。

3 内螺纹磨削试验

3.1 试验条件

内螺纹螺旋磨削试验在 5 轴数控机床上进行,切削液选取水基切削液。试件选取体积分数为 20% 的 $\text{SiC}_p/$

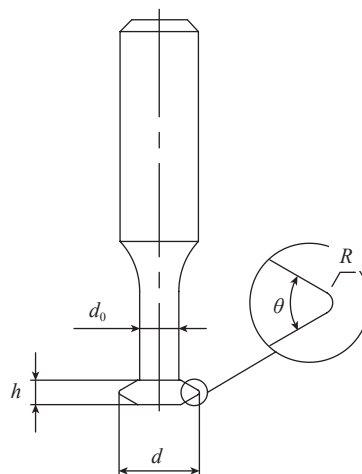


图2 砂轮结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of designed grinding wheel

Al 复合材料, SiC 颗粒的尺寸约为 $15\ \mu\text{m}$, 试件的尺寸规格为 $102\text{mm} \times 19\text{mm} \times 6\text{mm}$, 每块试件含有 9 个 $\Phi 6.8\text{mm}$ 的精加工底孔。螺纹底孔采用螺旋磨削的加工方式^[19]。试件和底孔磨削砂轮如图 5、图 6 所示。

3.2 试验方案

为避免内螺纹加工过程中, 单次磨削深度过大而导致砂轮的“让刀”变形过大, 采用逐步增大 R_i 的进给方式, 加工过程如图 7 所示, 具体加工参数如表 1 所示。

每加工完成一个 M8 内螺纹, 对其进行塞规检测, 塞规如图 8 所示。经过检测, 单个成形砂轮加工的 17 个

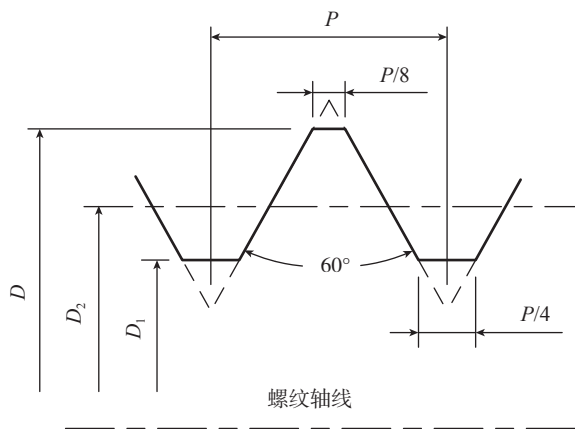


图3 标准公制螺纹的基本牙线
Fig.3 Standard tooth profile of metric thread



图4 300# 电镀CBN砂轮
Fig.4 300# electroplated CBN wheel



图5 试验试件
Fig.5 Experimental specimen



图6 底孔磨削砂轮
Fig.6 Grinding wheel for machining holes

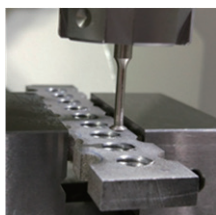


图7 内螺纹的磨削加工过程
Fig.7 Grinding process of internal threads

M8 内螺纹均合格, 单个内螺纹的加工时间约为 6min。

4 试验结果与讨论

4.1 内螺纹牙型观测

塞规检测是一种在工程应用上较为常用的内螺纹检测方法, 但是无法充分反映螺纹牙型与公差带的相对位置关系, 因此需要对螺纹牙型作进一步分析。

针对 $M8 \times 1.25$ 公制内螺纹, 选取基本偏差代号为 H, 公差等级为 6。M8 内螺纹 6H 公差带位置如图 9 所示。其中, D 为内螺纹大径; D_1 为内螺纹小径; D_2 为内螺纹中径; T_{D1} 为内螺纹小径公差; T_{D2} 为内螺纹中径公差。

在显微镜下观察螺纹孔牙型轮廓线和 6H 公差带的相对位置, 如图 10 所示。第 1 个螺纹孔与第 17 个螺纹孔牙型线均位于 6H 公差带内, 说明加工的 17 个螺纹孔均满足 6H 精度要求。第 1 个螺纹孔的牙型线稍大于理论牙型线, 第 17 个螺纹孔的牙型线与理论牙型线几乎重合, 这是因为成形砂轮在加工过程中产生了磨损, 导致内螺纹的尺寸整体减小, 尤其是在螺纹牙底处, 说明砂轮尖端磨损较为严重, 这是因为砂轮尖端处磨粒与基体的黏附面积小, 同时处于砂轮与加工表面接触线的中心, 单个磨粒切除的材料体积大, 而此处磨削液的冷却

表1 螺旋磨削的加工参数

主轴转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	砂轮线速度 $v_f / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	进给速度 $v_f /$ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	单次磨削深度 $\Delta R_i / \text{mm}$	
			粗加工 (3次)	精加工 (1次)
28000	5.86	80	0.2	0.06



图8 M8-6H塞规
Fig.8 M8-6H thread plug gauge

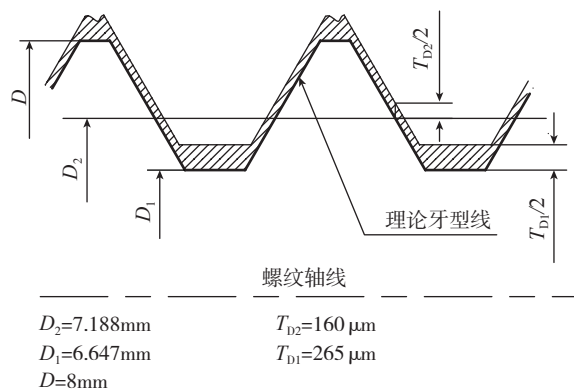


图9 内螺纹公差带
Fig.9 Tolerance zone of internal thread

$D_2=7.188\text{mm}$ $T_{D2}=160\ \mu\text{m}$
 $D_1=6.647\text{mm}$ $T_{D1}=265\ \mu\text{m}$
 $D=8\text{mm}$

润滑效果也最差,从而导致砂轮尖端处磨损严重。

4.2 内螺纹表面形貌观察

在扫描电镜下观察内螺纹的表面形貌,如图 11 所示。可以看出,第 1 个螺纹孔牙型轮廓线边缘较光滑,螺纹牙底面材料去除彻底,同时加工表面上磨粒形成的

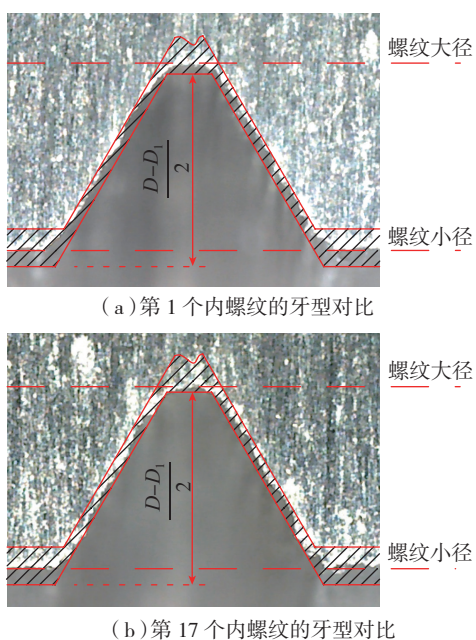


图 10 内螺纹牙型与公差带对比

Fig.10 Comparison between tooth profile of internal threads and tolerance zone

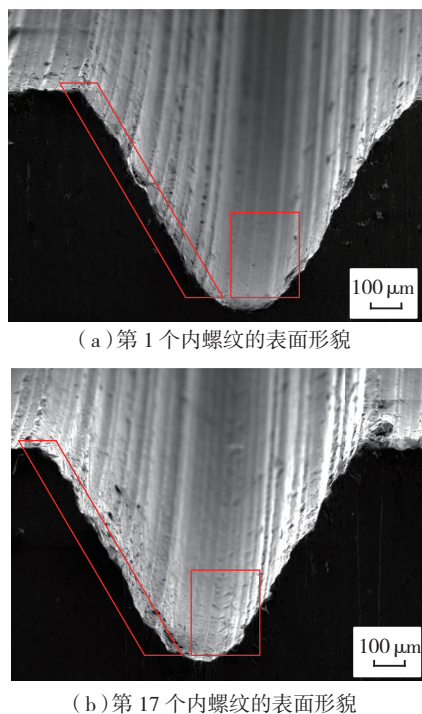


图 11 螺纹孔表面形貌对比

Fig.11 Comparison of surface topography between 1st and 17th internal threads

纹理细密、清晰;第 17 个螺纹孔牙型轮廓线边缘较粗糙,齿形截面上磨粒形成的纹理粗糙且稀疏,同时螺纹牙底面上有明显的鳞刺。这说明在磨削过程中磨粒被磨钝、磨平,失去了锋利性,进而导致内螺纹的尺寸精度和表面质量下降。

4.3 砂轮磨损状况分析

利用 SEM 对砂轮使用前后的表面微观形貌进行观测,得到如图 12 所示的结果。可以看出,加工前砂轮表面上的磨粒分布均匀、棱尖明显。进行磨削加工后,砂轮尖端处的磨粒被磨平,存在个别磨粒脱落现象。砂轮两侧平面上存在明显的磨损,磨损沟槽贯穿砂轮基体和磨粒表面,如图 12 (b) 所示,但是侧面上的磨粒基本上没有脱落。砂轮的磨损情况说明,在磨削过程中电镀砂轮的结合力能够保证磨粒在磨削力作用下依然黏附在砂轮基体表面,不会出现大范围的磨粒脱落现象,尤其是在砂轮的尖角处,从而保证了砂轮具有持续的磨削性能,进而能够完成多个内螺纹的磨削加工。

5 结论

针对 SiC_p/Al 复合材料,研究了内螺纹螺旋磨削的加工方法,设计了电镀 CBN 成形砂轮,并进行了 M8 内螺纹的磨削加工试验。对加工后的内螺纹进行了观测,对比了牙型轮廓线和 6H 公差带的相对位置,并分析了砂轮表面的磨损状况,最终验证了利用电镀 CBN 成形

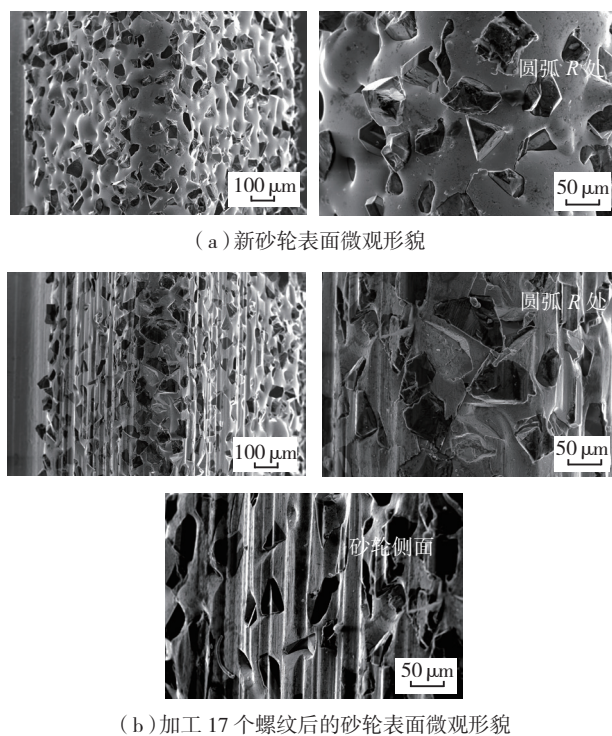


图 12 砂轮表面微观形貌

Fig.12 Surface micro morphology of the grinding wheel

砂轮对 SiC_p/Al 复合材料内螺纹进行螺旋磨削加工具有可行性和工程应用价值。具体的研究结论如下:

(1) 采用电镀 CBN 成形砂轮螺旋磨削加工方式,在磨削参数:主轴转速 $n=28000\text{r}/\text{min}$ 、砂轮线速度 $v_s=5.86\text{m}/\text{s}$ 、进给速度 $v_f=80\text{mm}/\text{min}$ 的条件下,单个砂轮能够完成 17 个 M8 × 1.25 (螺纹深度 6mm) 内螺纹的磨削加工,单个螺纹孔的加工时间约为 6min。

(2) 对比内螺纹牙型轮廓和公差带,验证了第 1 个和第 17 个螺纹均满足 6H 加工精度的要求。砂轮的磨损主要集中在圆角处,并且随着砂轮磨损的增加,内螺纹牙型的轮廓精度和表面质量逐渐降低。

(3) 电镀 CBN 成形砂轮的磨损主要以磨粒磨损为主,在砂轮圆角处有极个别的磨粒脱落现象。这说明,电镀砂轮的结合力能够保证 CBN 磨粒在磨削力作用下依然黏附在砂轮基体表面,不会出现大范围的脱落现象,从而保证了砂轮具有持续的磨削性能,使其能够完成多个内螺纹的加工,进而证明了该加工方法具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 白芸,韩恩厚,谭若兵,等. 铝基复合材料性能的研究现状[J]. 材料保护, 2003, 36(9): 5-7.
- BAI Yun, HAN Enhou, TAN Ruobing, et al. Research on properties of aluminum matrix composites[J]. Materials Protection, 2003, 36(9): 5-7.
- [2] 王文明,潘复生,LU Yun,等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料开发与应用的研究现状[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(3): 61-67.
- WANG Wenming, PAN Fusheng, LU Yun, et al. Current status of development and application in SiC_p/Al composites[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(3): 61-67.
- [3] SURAPPA M K. Aluminium matrix composites: challenges and opportunities[J]. Sādhanā, 2003, 28(1/2): 319-334.
- [4] VARUŽAN K. Development of Al MMC composites for automotive industry[J]. Metallurgy, 2002, 8(4): 275-286.
- [5] XU J H, ZUO D W, YANG M D, et al. Machining of metal matrix composites[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1995, 46(14): 1795-1803.
- [6] 韩荣第,姚洪权,严春华,等. SiC_p/2024 复合材料切削力与刀具磨损的试验研究[J]. 复合材料学报, 1997, 14(2): 71-75.
- HAN Rongdi, YAO Hongquan, YAN Chunhua, et al. Experimental study on the cutting force and wear of lathe tool for SiC_p/2024 Al composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1997, 14(2): 71-75.
- [7] SORNAKUMAR T, KATHIRESAN M. Machining studies of die cast aluminum alloy-silicon carbide composites[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2010, 17(5): 648-653.
- [8] 李丹,闫国成. 颗粒增强铝基复合材料铣削加工实验研究[J]. 现代制造工程, 2007(3): 15-17.
- LI Dan, YAN Guocheng. Experimental study on milling machining of particle-reinforced aluminum matrix composites[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007(3): 15-17.
- [9] EL-GALLABA M, SKLADB M. Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites: Part II: workpiece surface integrity[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83(1-3): 277-285.
- [10] REDDY N S K, KWANG-SUP S, YANG M Y. Experimental study of surface integrity during end milling of Al/SiC particulate metal-matrix composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3): 574-579.
- [11] 张洪立,许奔荣. 铝基复合材料低频振动攻丝技术试验研究[J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(1): 54-58.
- ZHANG Hongli, XU Benrong. Experiment research of low-frequency vibratory tapping on aluminum-matrix composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002, 32(1): 54-58.
- [12] 韩荣第,刘建,韩滨. SiC_w/Al 铝复合材料振动攻丝扭矩的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(2): 252-254.
- HAN Rongdi, LIU Jian, HAN Bin. Experiment study of vibration tapping torque of SiC_w/Al aluminum composites[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(2): 252-254.
- [13] KWAK J S, KIM Y S. Mechanical properties and grinding performance on aluminum-based metal matrix composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3): 596-600.
- [14] 周志勇. SiC_p 增强铝基复合材料的铣磨加工实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- ZHOU Zhiyong. Experimental research on mill-grinding process of SiC particle reinforced aluminum matrix composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [15] 都金光. SiC_p 增强铝基复合材料高效铣磨工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- DU Jinguang. Research on high efficiency mill-grinding process of SiC particle reinforced aluminum matrix composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [16] 于晓琳. 高体积分数 SiC_p/Al 复合材料精密磨削机理及表面评价研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- YU Xiaolin. Research on precision grinding mechanism and surface evaluation of SiC_p/Al composite with high volume fraction[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [17] GAO H, LU S X, YANG A Q, et al. A methodology for helical mill-grinding of tiny internal threads made of hard brittle materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1-4): 25-37.
- [18] 李勋,柏帆,付余,等. 高体积比铝基 SiC 复合材料的铣磨试验研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(1/2): 24-28.
- LI Xun, BAI Fan, FU Yu, et al. Experimental study on mill-grinding of high volume fraction SiC_p/Al metal matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(1/2): 24-28.
- [19] LI X, BAI F, FU Y. The small hole helical mill-grinding process and application in high volume fraction SiC_p/Al MMCs[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9-12): 3007-3014.

通讯作者: 李勋, 博士、副教授, 研究方向为高性能材料切削磨削技术及表面完整性, E-mail: lixun@buaa.edu.cn.

(责编 逸飞)