

金刚石涂层刀具钻削高比分 SiC_p/Al 复合材料试验研究^{*}

胡芳¹, 解丽静¹, 王西彬¹, 高飞农¹, 付纳新², 史兴宽²

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京无线电测量研究所, 北京 100854)

[摘要] SiC_p/Al 复合材料与传统的金属材料相比, 具有优异的物理和热学性能。但在孔加工中, 棱边加工缺陷成为影响其在高端产品中使用的主要问题之一。开展金刚石涂层刀具钻削 SiC_p/Al 复合材料的试验研究, 对试验力学信号进行分析, 对出入口棱边缺陷形成机理及形貌特征做出了解释。结果表明: 使用金刚石涂层刀具钻削 SiC_p/Al 复合材料时, 每步钻削深度、进给速度和主轴转速对轴向力的作用依次减弱; 出口处质量明显优于入口处, 入口缺陷形成机理主要是 Al 基体的断裂和 SiC 颗粒脱落; 金刚石涂层钻头适合用于加工 SiC_p/Al 复合材料。对于 SiC_p/Al 复合材料的实际加工应用有一定的参考价值。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; 金刚石涂层钻头; 轴向力; 棱边缺陷; 啄钻

Experimental Study on Drilling of High Volume Friction SiC_p/Al Composites With Diamond Coated Bits

HU Fang¹, XIE Lijing¹, WANG Xibin¹, GAO Feinong¹, FU Naxin², SHI Xingkuan²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

[ABSTRACT] Compared to traditional metal materials, SiC_p/Al composites has excellent physical and thermal properties. However, hole edge quality in the he holed drilling process becomes one of the main problems influencing the usability of the composites. In this paper, experimental study on drilling of SiC_p/Al composites with diamond coated bits is carried out, the measured mechanical signals, the formation mechanisms and characteristics of hole edge defects are analyzed. It is shown that in the drilling process the process parameters have influence on the thrust force, and their effect are ordered as each drill depth, feed speed and spindle speed; the hole quality at the exit is better than that at the entrance; the defect formation mechanisms mainly include the fracture of Al matrix and the detachment of SiC particle. And the diamond coated bits are suitable for the drilling of SiC_p/Al composites. It has reference value for the actual processing and application of SiC_p/Al composites.

Keywords: SiC_p/Al composite; Diamond coated bit; Thrust force; Edge defect; Pecking

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.066

SiC_p/Al 复合材料与传统材料相比, 具有高弹性模量、高强度、低热膨胀系数、抗疲劳和耐腐蚀等一系列优越的性能^[1-3]。但是, 其在机械加工过程中造成的表面缺陷、钻头磨损等问题不容忽视。哈尔滨工业大学的晏义伍^[4]通过试验和数值模拟的方式, 发现 SiC 颗粒的尺寸对 SiC_p/Al 复合材料的力学行为有明显影响。

当前, 对 SiC_p/Al 复合材料的钻削加工开展的研究, 学者们主要采用试验的方法^[5-7]。印度学者

Basavarajappa 等^[8]利用正交试验和方差分析的方法研究了加工参数对钻削力、表面粗糙度和毛刺高度的影响, 得出进给量对于加工质量的影响最为明显的结论。土耳其菲拉特大学的 Tosun^[9]也对 SiC_p/Al 复合材料表面粗糙度的工艺参数进行了统计分析, 确定最重要的因素是进给量和刀具类型, 并得到了最优化的工艺参数。

本文对 SiC_p/Al 复合材料的钻削加工特性开展了试验研究, 使用金刚石涂层刀具和啄钻的加工方式, 分析了 3 种加工参数对钻削加工过程中轴向力的影响, 得到

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51575051)。

了出入口棱边缺陷的形貌特征并对其做出了机理解释。

1 试验设备与方案

本试验使用的机床为 DMG 高速五轴加工中心, 测量切削力的设备为 Kistler 9123c 压电测力仪。该工件的材料为体积分数 65% 的 SiC_p/Al 复合材料, 其中增强体颗粒大小平均 $10\mu\text{m}$ 左右。试验设备、刀具形貌如图 1 所示。本文所用刀具为 CVD 金刚石涂层钻头, 其直径为 3mm, 顶角为 140° , 前角为 30° , 螺旋角为 30° 。

由于 SiC_p/Al 复合材料的难加工特性, 普通的一次性钻削通孔方式产生的高钻削力容易使得钻头发生断裂, 而采用啄钻的加工方式可以降低钻削力, 有效地避免刀具断裂, 啄钻加工的操作如图 2^[10] 所示。为了防止在加工过程中温度过高使得金刚石涂层脱落, 整个切削过程为湿式切削。为了研究不同加工参数对轴向力的影响效果, 设计了如表 1 所示的 3 因素 3 水平的正交试验。

2 钻削力试验结果与讨论

图 3 为在加工参数为转速 4000r/min、进给速度 100mm/min、步深 0.05mm 条件下, 得到的轴向力的变化曲线图。可见, 整个钻削过程共经历了 59 步, 每一步有效切削时段内, 轴向力都快速升高并达到最高值。采用啄钻的加工方式并伴随切削液的加入, 钻削过程中产生的热量可以及时扩散, 有效地保护了钻头上的涂层不脱落且降低了轴向力。

图 4 为轴向力最大值变化曲线图。其中, 钻入阶段为钻头开始进入至主切削刃完全进入工件, 期间轴向力快速增大; 稳定阶段为钻尖部分在工件内部的阶段, 这时的轴向力峰值稳定在 85N 左右; 钻出阶段为钻头部分的退出阶段, 此时轴向力快速下降。

方差分析结果如表 2 所示。可以看出, 转速 n 、进给速度 f 、每步钻削深度 d 这 3 个因素对试验结果均有显著影响, 其中每步钻削深度的影响最为显著, 同时验证了采用啄钻方式适合加工 SiC_p/Al 复合材料。

图 5 为轴向力随各加工参数的变化曲线图。可以看到, 当转速增加时, 轴向力减小; 进给速度的增加使得轴向力增加, 归结于每齿切削深度随进给速度的增加而增大。方差分析得出结论: 步深对轴向力的影响最为显著, 轴向力随步深的变化增幅相对明显。

3 SiC_p/Al 复合材料钻削的孔棱边缺陷形貌与形成机理

图 6 为使用扫描电镜显微镜拍摄样件所得到的已加工孔表面形貌。可以看出, 已加工形成的孔表面形貌

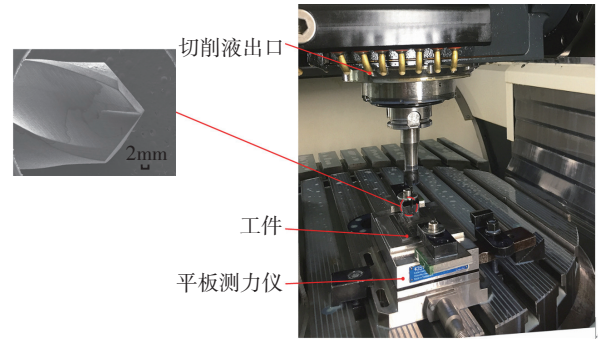


图1 试验设备及刀具形状

Fig.1 Test equipment and tool shape

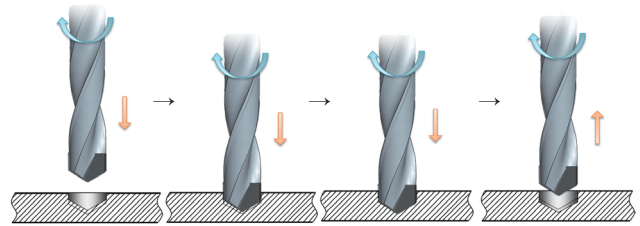


图2 啄钻加工示意图

Fig.2 Peck drilling process diagram

表1 正交试验设计

水平	A	B	C
	每步钻削深度 d/mm	转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
1	0.025	2000	100
2	0.050	3000	150
3	0.075	4000	200

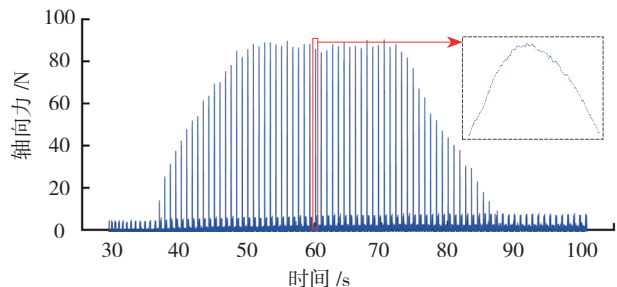


图3 金刚石涂层钻头钻削 SiC_p/Al 复合材料的力学信号变化曲线图

Fig.3 Mechanical signal curve of SiC_p/Al composite with diamond coated drill bit

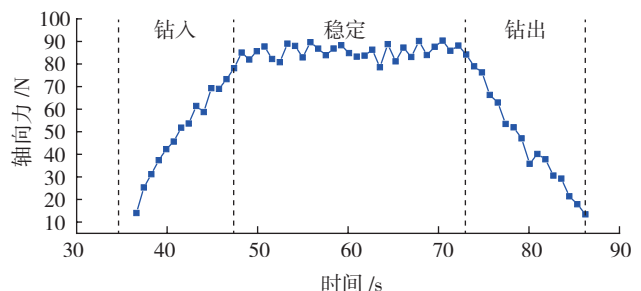
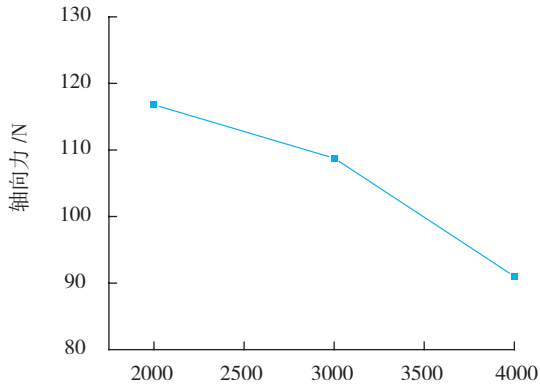


图4 轴向力最大值变化曲线图

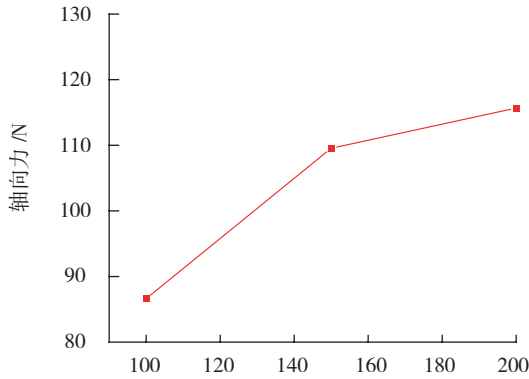
Fig.4 Maximum thrust force curve

表2 方差分析结果

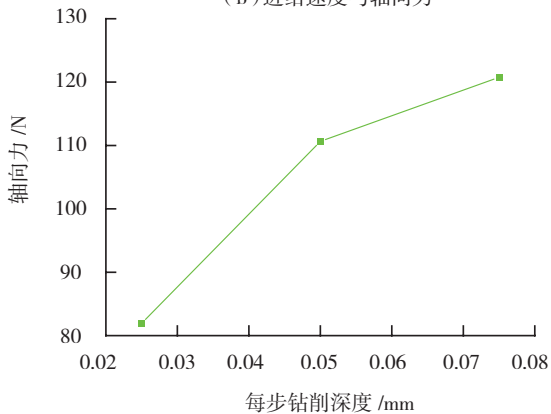
因素	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	F 值	临界值	显著性
A	1025.3166	2	602.6583	31.7667	$F_{0.05}(2,2)=19$ $F_{0.01}(2,2)=99$	**
B	729.4923	2	364.7462	19.2261		*
C	798.8869	2	399.4435	21.0550		*
误差 e	37.9427	2	18.9714	—		—



(a) 转速与轴向力



(b) 进给速度与轴向力



(c) 每步钻削深度与轴向力

图5 轴向力随各参数的变化规律

Fig.5 Thrust force variation with the parameters

可以大致分为3个区域:入口区、平稳钻削区和出口区。将加工后的工件切成如图7所示的形状,从不同方向观察出入口的形貌特征。

3.1 钻孔入口棱边缺陷形貌与形成机理

孔入口处的形貌特征如图8所示。入口处缺陷主

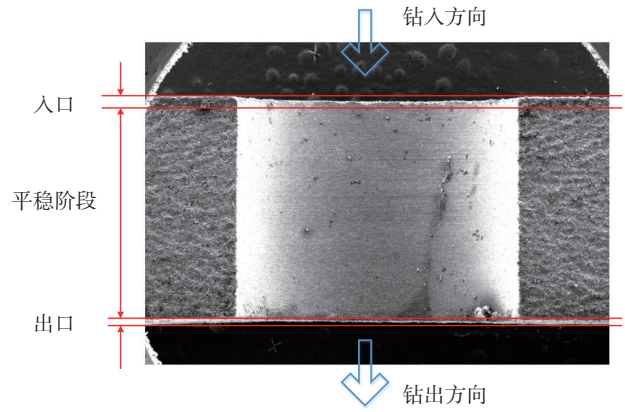
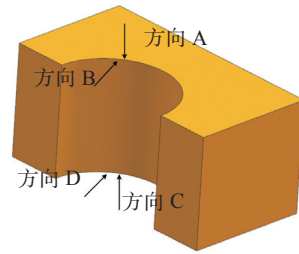


图6 已加工孔表面扫描电镜图

Fig.6 Processed hole surface with SEM



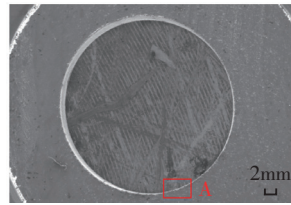
(a) 出入口缺陷观察方向示意图



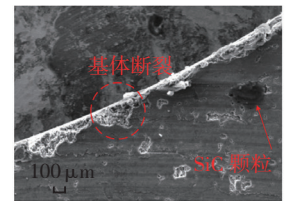
(b) 线切割后的工件

图7 切分后的工件形状

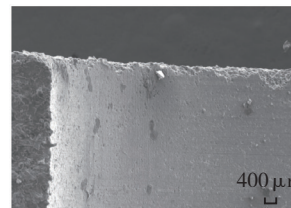
Fig.7 Workpiece shape after segmentation



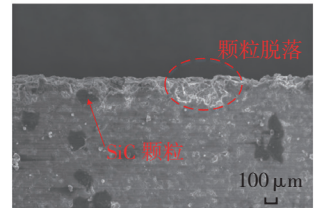
(a) A 方向入口整体图



(b) A 方向入口局部图



(c) B 方向入口整体图



(d) B 方向入口局部图

图8 孔入口边缘形貌特征

Fig.8 Entrance edge topography features

要存在于钻入的上表面,主要表现为 Al 基体的断裂脱落,这种断裂的尺寸较小,且是断续的,如图 8 (b)所示。图 8 (d)显示的是钻削棱边缺陷中的颗粒脱落形式,造成了入口边缘处大的凹坑。

由于高体积分数 SiC 颗粒的存在,使复合材料具有明显的脆性材料的特性。边缘缺陷的形成可以用最大拉应力的理论来解释:当材料内部某一点的最大主应力超过复合材料的抗拉强度时, I 型裂纹会沿着最大主应力方向开裂,裂纹在扩散的过程中交汇,就会出现基体材料的断裂脱落。当 SiC 颗粒和基体界面结合处应力集中超过其结合强度时, SiC 颗粒就会发生脱落,由于颗粒的随机分布,孔边周围的实际缺陷是不均匀的。不同于钻出阶段的是,在钻头接触工件的初期,钻头对工件的轴向力增大,会造成薄板的弯曲变形,进而引起已加工孔的收缩。入口处的孔边材料已经由于材料的弯曲变形而收缩,钻头上的螺旋槽部分又给孔边的收缩提供了空间,这样在之后钻削时,螺旋刃会不断切到已加工过的孔边,使铝基体发生大量的剥落,造成表面完整性较差。图 9 为入口边缘缺陷的形成机理。

3.2 钻孔出口棱边缺陷形貌与形成机理

孔出口处的形貌特征如图 10 所示。相比于入口缺陷,出口质量较好,无明显的 Al 基体脱落。因此,采用啄钻的加工方式及金刚石涂层刀具适合于 SiC_p/Al 复合材料的钻削加工。

4 结论

(1) 采取啄钻方式加工 SiC_p/Al 复合材料,由正交试验的分析结果可得,转速 n 、进给速度 f 、每步钻削深度 d 对试验结果轴向力 F_z 均有显著影响,因素的影响顺序均为 $A(d) > C(f) > B(n)$ 。

(2) 棱边入口处缺陷主要存在于钻入的上表面,主要表现为 Al 基体的断裂脱落,部分区域有 SiC 颗粒的脱落。

(3) 出口处无明显缺陷,金刚石涂层钻头及啄钻加工适合 SiC_p/Al 复合材料的钻削加工。

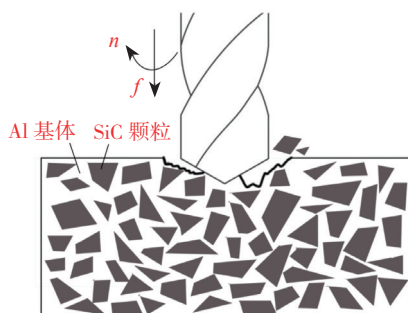


图9 入口边缘缺陷的形成机理

Fig.9 Entrance edge defect formation mechanism

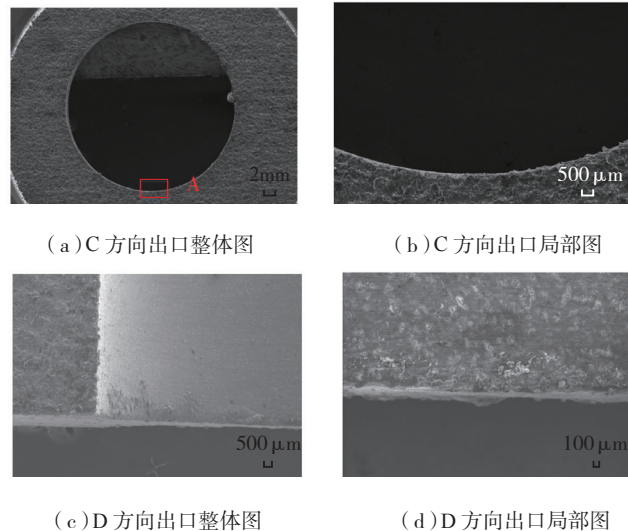


图10 孔出口边缘形貌特征

Fig.10 Hole exit edge topography

参考文献

- [1] 郑晶,贾志华,马光. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的研究进展[J]. 钛工业进展, 2006, 23(6): 13-16.
ZHENG Jing, JIA Zhihua, MA Guang. Progress in research on silicon carbide particulate reinforced aluminum matrix composites[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(6): 13-16.
- [2] 吴震宇,王学根,孙方宏,等. SiC颗粒增强铝基复合材料高速铣削工艺研究[J]. 工具技术, 2004, 38(3): 15-18.
WU Zhenyu, WANG Xuegen, SUN Fanghong, et al. Study on high speed milling technology of SiC particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Tool Technology, 2004, 38(3): 15-18.
- [3] 樊建中,肖伯律,徐骏,等. SiC_p/Al复合材料在航空航天领域的应用与发展[J]. 材料导报, 2007, 21(10): 98-101.
FAN Jianzhong, XIAO Bolü, XU Jun, et al. Application and development of SiC_p/Al composites in the aerospace field[J]. Chinese Journal of Materials, 2007, 21(10): 98-101.
- [4] 晏义伍. 颗粒尺寸对 SiC_p/Al 复合材料性能的影响规律及其数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
YAN Yiwu. Influence of particle size on properties of SiC_p/Al composites and numerical simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [5] TOSUN G, MURATOGLU M. The drilling of an Al/SiC metal-matrix composites. Part I: microstructure[J]. Composites Science & Technology, 2004, 64(2): 299-308.
- [6] 郑建新,刘传绍,赵波,等. 颗粒增强金属基复合材料的加工现状[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2003, 22(2): 121-124.
ZHENG Jianxin, LIU Chuanshao, ZHAO Bo, et al. Processing status of particulate reinforced metal matrix composites[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2003, 22(2): 121-124.
- [7] 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. SiC_p/Al composites high-speed milling surface

(下转第83页)

[33] 胡道秋. 超声滚压表面粗糙度的研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 1993, 15(3): 114-119.

HU Daoqiu. Investigation on the surface roughness produced by ultrasonic burnishing[J]. National Science Journal of Xiangtan University, 1993, 15(3): 114-119.

[34] 胡道秋, 范丰仙. 超声滚压强化的工艺试验[J]. 电加工与模具, 1991(5): 21-26.

HU Daoqiu, FAN Fengxian. Experiment of ultrasonic rolling strengthening[J]. Electromachining & Mould, 1991(5): 21-26.

[35] 欧阳红兵, 文荫国, 胡道秋. 利用超声滚挤压技术改造普通机床[J]. 机械制造, 1995(4): 38-39.

OUYANG Hongbing, WEN Yinguo, HU Daoqiu. Rebuild of ordinary machine with ultrasonic rolling and extrusion technique[J]. Machinery Manufacturing, 1995(4): 38-39.

[36] LANGENECKER B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1966, 13(1): 1-8.

[37] 吕光义, 朱有利, 李礼, 等. 超声深滚对 TC4 钛合金表面形貌和表面粗糙度的影响[J]. 中国表面工程, 2007, 20(4): 38-41.

LÜ Guangyi, ZHU Youli, LI Li, et al. The effect of ultrasonic deep rolling (UDR) on surface topography and surface roughness of TC4 titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2007, 20(4): 38-41.

[38] JUIJERM P, ALTENBERGER I. Fatigue performance of high temperature deep rolled metallic materials [J]. Journal of Metals, Materials and Minerals, 2007, 17(2): 37-41.

[39] PREVÉY P S, HORNBACH D J, JACOBS T L. Improved damage tolerance in titanium alloy fan blades with low plasticity burnishing [C]//Proceedings of 2002 International Surface Engineering Conference. Columbus, 2002.

[40] 李礼. 超声深滚材料表面强化技术及其抗疲劳机理研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2009.

LI Li. Research on ultrasonic deep rolling technique for material's surface enhancement and its anti-fatigue mechanisms[D]. Beijing: Academy of Armored Force Engineering, 2009.

[41] PREVÉY P S, JAYARAMAN N. Use of residual compression in design to improve damage tolerance in Ti6Al4V aero engine blade dovetails [C]//Proceedings of the 10th National Turbine Engine HCF Conference. New Orleans, 2005.

[42] PREVÉY P S, JAYARAMAN N, RAVINDRANATH R, et al. Mitigation of fretting fatigue damage in blade and disk pressure faces with low plasticity burnishing [J]. Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea & Air, 2007, 132(8): 61-69.

[43] CHAKRAVARTY S. Research summary: the effect of surface modification on fretting fatigue in Ti alloy turbine components [J]. Journal of Metals, 1995, 47(4): 31-35.

[44] 杨昭明, 罗小安. 先进工艺在飞机起落架制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2005, 48(6): 100-103.

YANG Zhaoming, LUO Xiaohan. Application of advanced manufacturing technology in aircraft undercarriage production[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(6): 100-103.

[45] JAYARAMAN N, PREVÉY P, ONTKO N. Comparison of mechanical suppression by shot peening and low plasticity burnishing to mitigate SCC and corrosion fatigue failures in 300M landing gear steel [C]//Proceedings of ICSP 9. Pairs, 2005.

[46] PREVÉY P S, JAYARAMAN N. Mitigation of SCC and corrosion fatigue failures in 300M landing gear steel using mechanical suppression [C]//Proceedings of the 6th Aircraft Corrosion. Solomons, 2004.

[47] 谢俊峰. 典型飞机材料超声深滚强化与超声焊接修复机理研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2013.

XIE Junfeng. Research on mechanisms of ultrasonic deep rolling enhancement and ultrasonic welding restoration of typical aircraft materials [D]. Beijing: Academy of Armored Force Engineering, 2013.

[48] HORNBACH D, MAHONEY M, PREVÉY P, et al. Low plasticity burnishing of friction stir welds in 2219 aluminum to increase corrosion fatigue life[C]//Proceedings of 6th International Conference on Trends in Welding Research. Pine Mountain, 2002.

[49] DONNE C D, LIMA E, WEGENER J, et al. Investigations of residual stresses in friction stir welds[C]//Proceedings of 3th International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, 2001.

[50] PREVÉY P, HORNBACH D, MASON P et al. Improving corrosion fatigue performance of AA2219 friction stir welds with low plasticity burnishing[C]//Proceedings of 2002 International Surface Engineering Conference. Columbus, 2002.

[51] 中国特种飞行器研究所. 海军飞机结构腐蚀控制设计指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.

China Special Purpose Vehicle Research Institute. Guidelines for naval aircraft structural corrosion control design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.

[52] PREVÉY P, CAMMETT J F. Restoring fatigue performance of corrosion damaged 7075-T6 and fretting in 4340 steel with low plasticity burnishing [C]// Proceedings of 6th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference. Lambda Technologies Group, 2002.

[53] CAMMETT J T, PREVEY P S. Fatigue strength restoration in corrosion pitted 4340 alloy steel via low plasticity burnishing[R]. Lambda Research Cincinnati, 2006.

通讯作者: 王燕礼, 博士后、工程师, 研究方向为断裂失效分析、疲劳断裂与疲劳寿命预测、机械表面抗疲劳制造技术, E-mail: 154552879@qq.com。

(责编 逸飞)

(上接第69页)

quality and tool wear[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[8] BASAVARAJAPPA S, CHANDRAMOHAN G, DAVIM J P. Some studies on drilling of hybrid metal matrix composites based on Taguchi techniques[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 196(1): 332-338.

[9] TOSUN G. Statistical analysis of process parameters in drilling of SiC_p/Al metal matrix composite[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55(5-8): 477-485.

[10] CHEN X L, XIE L J, NAN X H, et al. Experimental study on small-hole drilling characteristics of SiC_p/Al composites[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 319-322.

通讯作者: 解丽静, 工学博士、副教授, 研究方向为先进加工技术, E-mail: rita_xie2004@163.com。

(责编 逸飞)