

高速电弧放电加工SiC/Al的放电作用力特性研究

陈吉朋¹,何国健¹,刘 晓²,顾 琳¹,赵万生¹

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室,上海 200240;

2. 上海航天设备制造总厂,上海 200245)

[摘要] 基于压电传感器,测量和研究了高速电弧放电加工 SiC/Al 的作用力。分析了作用力的波形特征,对比了不同放电介质中的作用力。研究了作用力的频率特性、以及作用力受脉冲宽度、峰值电流和放电电压的影响趋势,揭示了作用力与电弧放电加工时材料抛出过程的关系,给出了高速电弧放电加工航空航天 SiC/Al 薄壁零件时,降低作用力的可行措施。

关键词: 电弧; 放电; 碳化硅铝基复合材料 (SiC/Al); 作用力; 薄壁件

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.054



陈吉朋

助理工程师,博士研究生。主要研究方向为电弧放电加工工艺及装备,参与自然科学基金重点项目“高速电弧放电加工技术基础研究”、面上项目“难切削材料的高效电弧放电轮廓切割加工基础研究”等项目。

在铝基复合材料中,颗粒增强碳化硅铝基复合材料(SiC/Al)被公

认为是最有竞争力的金属基复合材料品种之一^[1],其比强度高、比刚度高、耐高温、抗腐蚀、抗疲劳,已在航空航天、国防等领域展示出广阔的应用前景^[2-3]。

然而,作为典型的难切削材料,SiC/Al材料中的SiC颗粒的强化作用增加了基体材料的硬度和强度,同时给切削加工带来不利影响。加工时,切削效率和刀具寿命难以兼顾,高加工效率的获取往往是以牺牲刀具寿命为代价,而采用经济切削参数时则无法实现高效加工。

为降低加工成本、突破传统放电加工的效率瓶颈,上海交通大学赵万生、顾琳等提出了一种利用电弧放电等离子进行材料蚀除的新型高效加工方法,即高速电弧放电加工(Blasting Erosion Arc Machining, BEAM)^[4]。基于高速电弧放电,Gu,Chen等系统研究了加工SiC/Al的工艺特性和加工机理,获得了远高

于传统电火花放电的加工效率^[5-6]。

尽管放电加工没有宏观切削力作用于工件,但是放电加工中由于电子、离子在电场中的运动,电弧等离子体的形成与扩张等,仍表现出一定力的作用,称之为作用力(Reaction Force)或者冲击力(Impact Force、Impulse Force)等。由于高速电弧放电加工研究尚处于起步阶段,其放电作用力的大小和持续的时间等特征是否区别于电火花放电,以及利用电弧放电加工SiC/Al时,作用力对材料去除是否有直接影响等不可知。特别是,航空航天装备中有大量的薄壁件,对薄壁件进行高速电弧放电加工时的作用力影响往往不可被忽视,因此本文对SiC/Al材料电弧放电的作用力大小、频率及影响因素等进行了研究。

放电作用力测量方法及装置

1 测量方法

在电火花放电领域,对加工中的

作用力常见的测量方法主要有两种,即通过力传感器的直接测量和通过霍普金森杆(Hopkinson Bar)等装置的间接测量。比如 Zhang 等^[7]采用 DLC101-10 力传感器(高频响应频率 25 kHz)结合质量-弹簧-阻尼系统研究电火花放电加工的作用力。而日本学者 Kunieda 等^[8]则是利用霍普金森杆方法测量了电火花放电作用力。Kunieda 等在 21 世纪初之所以没采取力传感器进行测量的原因在于受传感器性能所限,未能直接得到作用力的信号,而是包含了 22 kHz 的高频响应信号。

考虑到力传感器的性能比之前有了很大的提高,因此本文采用力传感器对电弧放电的作用力进行直接测量。所用的力传感器型号为 PCB 201B01,该传感器为 PCB 公司生产的 ICP 压电陶瓷传感器。ICP 压电传感器设计有压电集成电路(IEPE, Integral Electronic Piezoelectric)。为满足传感器的工作条件,先将力传感器接入 IEPE 信号适调器获得 2~20mA 恒流源。同时,传感器检测到的信号也由信号适调器输出至示波器,试验所用示波器型号为 Tektronix MDO3024。所用压电传感器的性能参数如表 1 所列。

2 试验装置和试验参数

为确保测量系统的响应性能,设计了专用的测量装置,如图 1 所示。

测量试验中所用的电极为直径 2mm 的紫铜棒。为方便调节放电间隙,将紫铜棒安装于数控机床的主轴上,通过主轴的运动带动电极运动,运动精度为 $1\mu\text{m}/\text{rev}$ 。试验中所用工件的材料为体积分数 20%SiC/Al,工件尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。为便于更换,工件安装于矩形铝槽中并通过螺纹紧固。

传感器安装于基座上,基座整体固定在机床工作台上。由于力传感器需要加载 0.267kN 的预紧力,因此将在传感器中间的空心部分设计有

定制螺纹杆。螺纹杆上端和下端分别连接矩形铝槽和基座,通过螺纹结构调节过程给传感器施加预紧力,以满足测量环境下的标定设置要求。

测量试验中的工作液为水,可通过滴管加入矩形铝槽内,并浸没工件。试验参数如表 2 所列,为全面考察作用力与放电参数的关系,分别设置不同的电流、脉冲宽度和开路电压值。放电开始前,通过机床主轴的运动,调整电极和工件之间的放电间隙为 $50\mu\text{m}$ 。在该放电间隙下,工作液可被击穿并实现电弧放电。

为最大限度地降低环境噪声

对测量的影响,所用的信号线为带 BNC 接口的专用高性能屏蔽信号线。通过屏蔽线将力信号直接接入 IEPE 信号适调器,IEPE 输出的信号直接由示波器采集,得到的数据通过 MATLAB 进行滤波和频域变换处理。

测量结果及分析

1 作用力的出现时刻

设置开路电压为 100V,电流为 500A,脉冲宽度为 4ms,分别采集放电时的电压、电流以及作用力的信号,如图 2 所示。

观察电压、电流和作用力的波形

表1 压电传感器性能参数

参数	值	参数	值
灵敏度 / ($\text{mV} \cdot \text{kN}^{-1}$)	112,405	非线性度	$\leq 1\% \text{ FS}$
测量范围 / N	44.48	输出极性	正
低频响应 / Hz	0.01	时间常数 / s	≥ 50
测量频率 / kHz	≤ 90	刚度 / ($\text{kN} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	2.1
预加载荷 / kN	0.267	激励电流 / mA	2~20

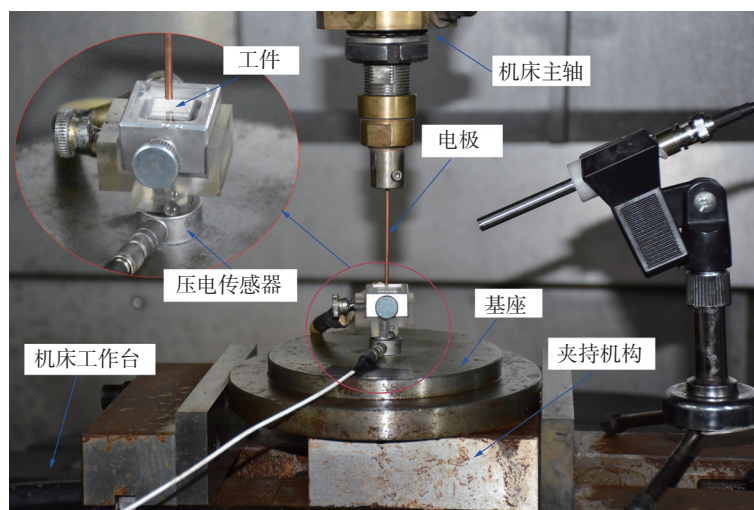


图1 试验装置
Fig.1 Experimental setup

表2 试验参数

参数	值
电流 / A	300, 400, 500
脉冲宽度 / ms	2, 4, 8
开路电压 / V	100, 120, 140, 160, 180
放电间隙 / μm	50
预加载荷 / kN	0.267

可发现,作用力几乎是在间隙击穿的同时产生,之后迅速上升,在击穿后约 0.15~0.2ms 左右达到峰值。当作用力达到峰值时,此时放电电流尚未达到设定值,约为 200~250A。在作用力达到峰值后迅速降低并在零值附近轻微振荡后基本消失。而此时放电尚未结束(图 2 中脉冲宽度设置为 4 ms),电流维持在设定值。可见,放电作用力出现在放电初期,伴随着等离子体的形成过程,并非一直存在于放电脉冲期间。

日本学者 Kunieda 等^[8]研究电火花放电中的作用力时,从气泡角度解释作用力的产生机理,认为作用力是由于气泡的周期性膨胀和压缩而产生(气泡脉动)。并且, Kunieda 等认为气泡来自于液体介质及电极材料的蒸发、裂解及电离等^[9]。Zhang 等^[7]利用压电传感器测量电火花放电的冲击力时也认为,最初出现的冲击力峰值是由于气泡的膨胀产生,而等离子体压力出现在气泡膨胀之后。

区别于上述观点,从液中放电等离子形成角度考察,电弧放电的作用力包含了两个部分,即冲击压力和气泡压力,分别对应了冲击压力波及气泡压力波。Martin, Graneau, Okun 等多位学者对液中放电研究后认为:等离子体的形成是冲击压力波产生的最根本原因,而气泡压力波则是由于等离子通道的热能加热并气化了通道周围的液体,使之转变为气泡的内能及膨胀势能,而气泡的膨胀-收缩过程则产生气泡压力波^[10-13]。

2 液中放电和气中放电作用力比较

形成冲击压力及气泡压力波的必要条件是液态放电介质,为验证该观点,进行不同介质中的放电对比试验。峰值电流 500A,脉冲宽度 2 ms 时,测量结果如图 3 所示。当放电介质换成空气时,几乎观察不到作用力,该现象与日本学者 Kunieda 等描述的电火花放电时的一致^[8]。对比 Kunieda 等在文献 [8] 中给出的电火

花放电作用力波形可知,无论电火花放电还是电弧放电,其本质均为放电产生等离子体。一般认为电火花放电为电弧放电的过渡阶段,液中放电时,两者均包含了等离子通道的形成过程并出现冲击压力波及气泡压力波,因而可以判断电弧放电和电火花

放电的作用力形成过程并无本质区别。

3 作用力的频率特性

如图 4 所示,对作用力做快速傅里叶变换(FFT, Fast Fourier Transform)。首先,提取噪声信号,截取图 4 中 A1 时域(-4~-0.5ms,非放

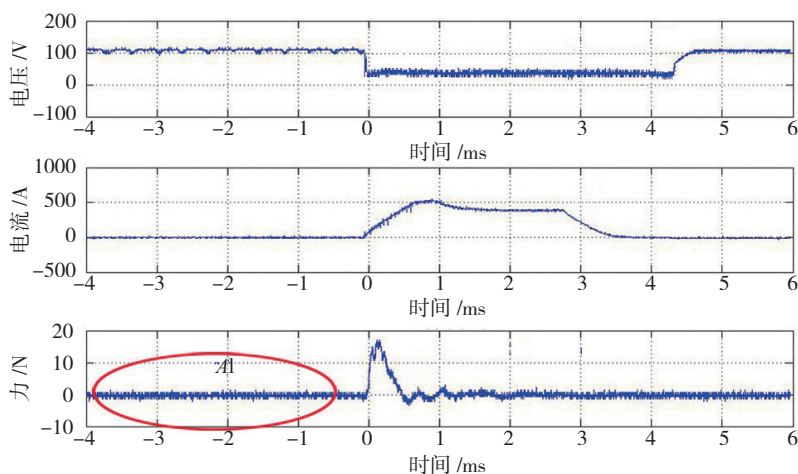


图2 电压、电流以及作用力波形

Fig.2 Waveform of discharge voltage, current and force

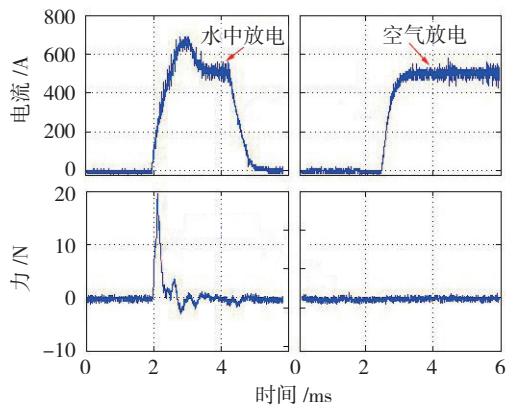


图3 不同放电介质中的作用力对比

Fig.3 Comparison of reaction force in different dielectric

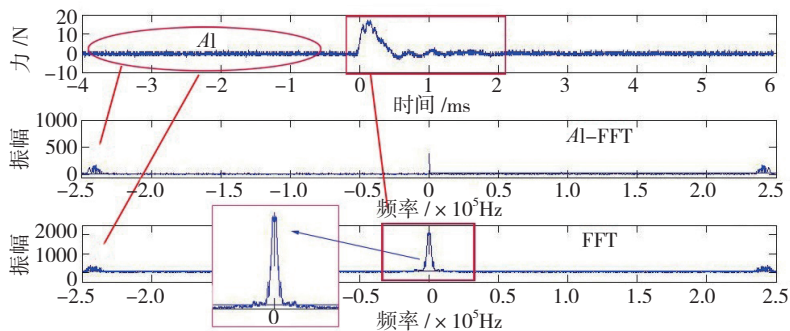


图4 放电作用力的频率特性

Fig.4 Frequency characteristic of reaction force

电时域)进行分析,发现噪声信号频率约为 $2.5 \times 10^5 \text{ Hz}$ 。其次,对作用力信号进行频域变换,得电弧放电作用力的频率,发现其值约在 10kHz 范围内。中国科学院电工所刘强等研究水中脉冲放电时,得出的结论是电弧放电对应的频率主要集中在 50kHz 之内^[14],本文得出的 10 kHz 在 50kHz 范围之内。

4 不同放电参数下的作用力

设置开路电压为 100V,分别采集峰值电流 300A、400A 及 500A 时对应的作用力信号,所得波形如图 5 所示。对作用力的峰值进行统计,各组参数下选取 15 组数据。得出的结论为:电弧放电加工 SiC/Al 的峰值作用力集中在 15~25N 范围内,平均峰值作用力为 20N 左右,且作用力与峰值电流之间无明显对应关系。因而,在对航空航天装备中薄壁 SiC/Al 工件加工时,通过降低峰值电流的方法难以达到降低作用力的目的。

设置开路电压从 100V 增加至 180V,间隔为 20V,分别采集放电波形并统计峰值作用力。如图 6 所示,随着开路电压的增加,作用力峰值随之增加。如开路电压 100~160V 时,作用力平均峰值依次为 20.56N、20.88N、21.84N 和 23.16N,其增幅相对平缓。而开路电压为 180V 时,作用力峰值增加至 29.67N,比 100V 时增加近 45%。可见,开路电压对作用力幅值具有较大影响,影响趋势呈现出非线性的特征。因而,在对航空航天装备中的薄壁 SiC/Al 工件加工时,为尽可能降低作用力,开路电压应该在电源可调参数范围内选择下限值。

讨论

1 放电参数对作用力的影响

由波形可知,作用力与峰值电流之间无明显对应关系,而受开路电压的影响较大。提高开路电压可增加放电间隙的电场强度,提高带电粒子的运动速度及动能,进而增加辐射能

量及通道膨胀做功能量,提高作用力。

华中科技大学卢新培等从通道电阻角度解释开路电压对作用力的影响,认为开路电压增高,等离子体通道的等效电阻变小,引起电流增大,增加等离子温度及压力。该过程

促使等离子体通道加速膨胀,增大了导电截面,最终导致通道电阻减小并提升等离子体温度和压力,进而提高作用力^[15]。除此以外,西北核技术研究所沈炎龙等从放电能量的角度来解释,认为随着充电电压增加,放电过程释放能量增多,放电通道中等

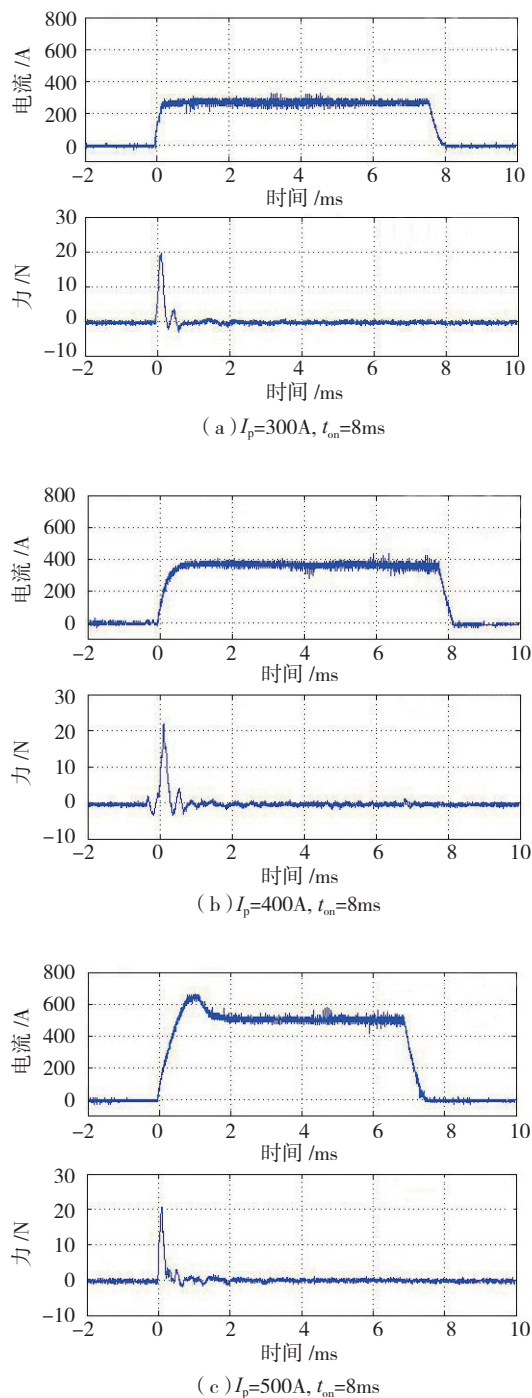


图5 不同峰值电流下的作用力

Fig.5 Reaction forces under different discharge current

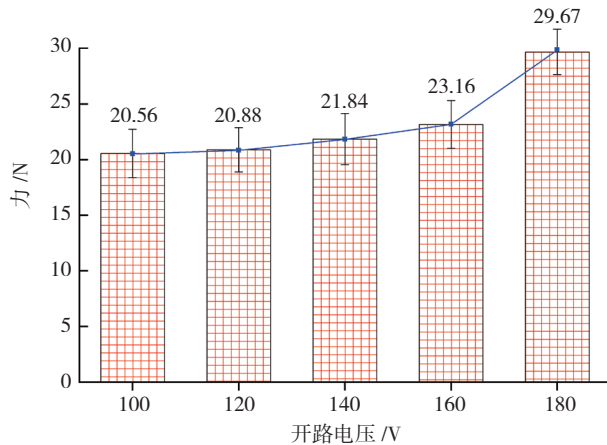


图6 不同开路电压下的作用力峰值

Fig.6 Reaction forces under different open voltages

离子体的电荷密度相应增加,作用力峰值压强也变大,且其最大压强可达1MPa^[16]。

2 作用力与材料抛出的关系

在电加工领域,传统观点认为放电加工中熔融的材料是在放电爆炸力(即作用力)的作用下被抛出放电蚀坑^[17]。通过作用力的测量可知,作用力出现在放电起始阶段,当放电尚未结束时,作用力往往已经完成从出现到消失的过程。多位研究人员通过观测研究放电加工材料去除机制时,发现在整个放电过程中都观测到了连续的材料抛出^[18-19]。基于上述观测结果和本文的测量结果,可推断出:作用力对放电加工(包括BEAM在内)的材料抛出不起主要作用。

前期研究可知,对航空航天装备中的SiC/Al工件进行电弧放电加工时,提高脉冲宽度可以有效提高材料去除效率^[5-6]。由于作用力出现在击穿瞬间,因而在效率优先的加工要求下,可适当增加脉冲宽度,此时作用力并不会会有明显改变。

结论

(1) 放电作用力出现在放电初期,伴随着等离子体的形成过程,并非一直存在于放电脉冲期间。

(2) 形成冲击压力及气泡压力波的必要条件是液态放电介质。电

弧放电作用力的频率范围主要集中在10kHz左右的范围内,峰值集中在15~25N范围内,平均峰值为20N左右。并且,随着开路电压的增加,作用力峰值随之增加,呈现出非线性趋势。

(3) 电弧放电作用力对电弧放电加工SiC/Al的材料抛出不起主要作用。

(4) 在对航空航天装备中的薄壁SiC/Al工件进行电弧放电加工时,为尽可能降低作用力,开路电压应该在电源可调参数范围内选择下限值。

参考文献

[1] 崔岩. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用[J]. 材料工程, 2002(6): 3-6.
CUI Yan. Aerospace applications of silicon carbide particulate reinforced aluminium matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(6): 3-6.
[2] TANG F, ANDERSON I E, GNAUPEL-HEROLD T, et al. Pure Al matrix composites produced by vacuum hot pressing: tensile properties and strengthening mechanisms [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 383(2): 362-373.
[3] HONG S J, KIM H M, HUH D. Effect of clustering on the mechanical properties of SiC particulate-reinforced aluminum alloy 2024 metal matrix composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 347(1-2): 198-204.
[4] ZHAO W S, GU L, XU H, et al. A novel high efficiency electrical erosion process -

blasting erosion arc machining[J]. Procedia Cirp, 2013, 6: 621-625.

[5] GU L, CHEN J, XU H, et al. Blasting erosion arc machining of 20 vol.% SiC/Al metal matrix composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9-12): 1-10.

[6] CHEN J P, GU L, ZHU Y M, et al. High efficiency blasting erosion arc machining of 50 vol.% SiC/Al matrix composites[J/OL]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture[2017-06-30]. <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0954405417690553>

[7] ZHANG M, ZHANG Q, DOU L. Research on the impulse force in electrical discharge machining using a new measuring method [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1-4): 463-471.

[8] KUNIEDA M, TOHI M, OHSAKO Y. Reaction forces observed in pulse discharges of EDM [J]. Ijcm, 2003, 8: 51-56.

[9] KUNIEDA M, LAUWERS B, RAJURKAR K P, et al. Advancing EDM through fundamental insight into the process [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 64-87.

[10] MARTIN E A. Experimental investigation of a high - energy density, high - pressure arc plasma[J]. Journal of Applied Physics, 1960, 31(2): 255-267.

[11] GRANEAU P, GRANEAU P N. Electrodynamic explosions in liquids[J]. Applied Physics Letters, 1985, 46(5): 468-470.

[12] OKUN I. Electrical characteristics of a pulsed discharge in a liquid[J]. Soviet Physics Technical Physics, 1969, 14: 627.

[13] 周越. 液中放电的研究与应用 [J]. 电工电能新技术, 1988(3): 22-29.

ZHOU Yue. Research and application of discharge in liquid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1988(3): 22-29.

[14] 刘强, 孙鹤鸿, 严萍, 等. 水中脉冲电晕放电的声学特性研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(2): 59 - 61.

LIU Qiang, SUN Yaohong, YAN Ping. Investigation of acoustic characteristics of pulsed corona discharge in water[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(2): 59-61.

[15] 卢新培, 张寒虹, 潘垣, 等. 水中脉冲放电的压力特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4): 282-286.

LU Xinpei, ZHANG Hanhong, PAN Yuan,

et al. Study on the pressure characteristics of pulsed discharge in water[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(4): 282-286.

[16] 沈炎龙, 于力, 栾昆鹏, 等. 表面放电等离子体产生冲击波特性[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(6): 44-48.

SHEN Yanlong, YU Li, LUAN Kunpeng. Investigation on properties of surface discharge plasma induced shockwave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 44-48.

[17] 刘媛, 曹凤国, 桂小波, 等. 电火

花加工放电爆炸力对材料蚀除机理的研究[J]. *电加工与模具*, 2008(5): 19-25.

LIU Yuan, CAO Fengguo, GUI Xiaobo, et al. Research on the mechanism of material erosion based on explosion force in EDM[J]. *Electromachining & Mould*, 2008(5): 19-25.

[18] 张彦振, 刘永红, 张锐, 等. 高速电弧加工材料去除机理研究[C]// 全国特种加工学术会议. 南京, 2013.

ZHANG Yanzhen, LIU Yonghong, ZHANG Rui, et al. Research on the mechanism of material

removal from high speed arc machining [C]// National Special Processing Conference. Nanjing, 2013.

[19] HAYAKAWA S, SASAKI Y, ITOIGAWA F. Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining [J]. *Procedia Cirp*, 2013, 6(7): 174-179.

通讯作者: 顾琳, 博士、副教授、博士生导师, 主要研究方向为特种加工, E-mail: lgu@sjtu.edu.cn。

Characteristics of Reaction Force in Blasting Erosion Arc Machining of SiC/Al Composites

CHEN Jipeng¹, HE Guojian¹, LIU Xiao², GU Lin¹, ZHAO Wansheng¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing, Shanghai 200245, China)

[ABSTRACT] This paper measured and studied the reaction force of blasting erosion arc machining (BEAM) of SiC/Al based on a piezoelectric sensor. The characteristics of the reaction force waveform was discussed, and the forces in different dielectric are compared. Then, the frequency characteristics and the relationship between reaction force and discharge parameters (pulse on time, current and open voltage) were researched. Furthermore, the influence of relationship between reaction force and the material removal mechanism of discharge processing was discussed. And finally, a method to reduce the reaction force during BEAM of thin-wall SiC/Al workpiece which is commonly used in aerospace industry was given.

Keywords: Arc; Discharge; SiC/Al; Reaction force; Thin-wall workpiece

(责编 大漠)

(上接第45页)

Electrochemical Machining of Complex Surface of Integral Thin-Walled Components in Aero-Engine

LI Hongying, ZHANG Mingqi, ZHANG Zhijin, CHENG Xiaoyuan, CHU Yucheng, FENG Jian, HUANG Mingtao, ZHAI Shimin

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Aiming at the requirements in manufacturing cost and reliability of new generations of aero-engine, electrochemical machining technology has the advantage of efficiency and integrity in the manufacture of aero-engine integral thin walled structure. This paper focuses on the current domestic machining technology for the complex surface of the thin-walled structure and electrochemical machining technology for the aero-engine integral thin-walled structure of home and abroad, and points out the future problems and development prospects of the technology.

Keywords: Electrochemical machining; Thin wall; Complex surface; Aero-engine; High efficiency

(责编 海山)