

五边形中空电极电火花加工颗粒增强金属基复合材料试验研究^{* 1}

陈少国,于兆勤,杨逍潇,彭励强,郭钟宁,刘江文
(广东工业大学机电工程学院,广州 510006)

摘要:针对颗粒增强金属基复合材料的加工难题以及采用中空管电极电火花打孔排屑等问题,提出了采用多边形中空管电极电火花法加工该类材料。分别采用截面为圆形和五边形的两种中空管电极,对比研究不同颗粒增强金属基复合材料加工的效率。利用正交试验法研究颗粒增强金属基复合材料中不同加工参数对加工效率的影响,得到了多边形中空电极电火花加工的最佳工艺参数。试验结果表明,截面为五边形的中空电极较圆形中空电极电火花加工效率高,加工时间最大缩短 51.8%;正交试验的最佳工艺组合为脉冲宽度 32ms,占空比 2:3,峰值电流 7A。

关键词:颗粒增强金属基复合材料;多边形管电极;电火花加工

中图分类号: TG661 文献标志码: A 文章编号: 1671—3133(2017)11—0005—05

DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2017.11.002

Experimental study of particle reinforced metal matrix composite of electrical discharge machining by pentagonal hollow electrode

Chen Shaoguo, Yu Zhaoqin, Yang Xiaoxiao, Peng Liqiang, Guo Zhongning, Liu Jiangwen
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: An polygonal tube electrode Electrical Discharge Machining (EDM) method is developed to improve the performance of conventional EDM process in machining particulate reinforced Metal Matrix Composites (MMCs) and the problem of hollow electrode chip during the EDM. Make a contrastive research on machining efficiency of particulate reinforced MMCs through two hollow electrodes with different cross sections, such as the round and the pentagon. In addition, orthogonal experiment is adapted to study particulate reinforced MMCs with different processing parameters on the efficiency to obtain optimal parameters for polygon electrode EDM. The experimental results show that the efficiency of machining such materials by the cross-section of pentagonal hollow electrode is higher than the circular hollow electrode, the maximum processing time is reduced by 51.8%; the optimum combination of orthogonal experiment is the pulse on time (32ms), the duty cycle(2:3) and the peak current(7A).

Key words: particle reinforced metal matrix composites; polygonal tube electrode; Electrical Discharge Machining(EDM)

0 引言

颗粒增强铝基复合材料因具有优异的性能,在航空、航天和汽车制造等领域得到广泛的应用与关注^[1-5]。颗粒增强铝基复合材料为一种难加工材料,加工该材料的困难程度增加了其工业化应用的成本。国内外研究人员采用了传统切削加工法、特种加工法(激光加工、电火花加工、电解加工、磨料水射流加工)

及电化学火花加工等方法在内的多种加工方法对颗粒增强铝基复合材料进行加工^[6-9],然而研究结果表明,现有的加工手段均在一定程度上难以符合实际应用需求。

传统切削加工法进行该材料加工时,将面临刀具剧烈磨损及加工表面质量低下等问题,由此导致加工刀具快速磨损报废^[10-14];这主要是由于铝基复合材料中的增强相本身就是磨料,具有很高的硬度,如 SiC 颗

* 国家自然科学基金项目(51675105, 51575113, 51205137);广东省高层次人才特殊支持计划科技创新青年拔尖人才项目(2014TQ01X542)

粒的硬度就比绝大多数的刀具材料高很多。

特种加工法中,采用激光加工^[15-16]、磨料水射流加工^[17-18]和电解加工^[19-21]时,虽无刀具磨损问题,但由于复合材料的特殊性导致这些加工手段加工精度低,表面质量差,难加工出复杂形状,故难以满足工业生产需求。

相对而言,电火花加工该类材料时,其加工精度相对较高且可加工出复杂形状,然而在实际应用中存在电极损耗、加工效率相对低等问题^[22-23]。但有关研究表明,电火花加工该类材料时,电极形式会影响加工的排屑情况,新颖的电极结构可以及时引入工作液同时排出加工产物,提高其加工效率^[24-25]。文献[24]使用带有偏心孔铜的新型电极在 6061Al/Al₂O₃ 10% 材料(增强颗粒平均尺寸为 10mm)上加工盲孔。研究表明,这种电极虽在加工过程中损耗严重,但由于其结构有利于碎屑的处理,获得了高的材料去除率,加工效果优于使用不带孔旋转电极及固定电极时的加工效果。文献[25]采用梅花型线电极电化学火花复合加工颗粒增强铝基复合材料,同样得出新颖电极有利于排屑,可提高加工效率的结论。

为此,针对新颖电极利于排屑,可提高电火花加工效率的研究现状,本文提出采用截面为圆形和五边形的中空电极分别对颗粒增强铝基复合材料进行电火花加工,通过单因素试验和正交试验研究不同截面的加工效率,同时得出最佳参数。

1 试验材料以及设备

工件材料为体积分数 10% 的 Al₂O₃ 颗粒增强型 6061 铝基复合材料和体积分数 20% 的 SiC 颗粒增强型 359 铝基复合材料。Al₂O₃ 颗粒的平均直径为 ϕ 21mm, SiC 颗粒平均直径为 ϕ 10mm,工件厚度为 5mm。采用去离子水作为工作液进行加工。管电极一律采用铜电极,并且加工采用的五边形电极已保证五边形的外切圆直径和圆电极的直径尺寸一致,直径为 ϕ 2.5mm。试验在苏州长风机电科技有限公司的 DD703 型电火花小孔加工机上完成。图 1 所示为试验加工示意图。图 1 中: V 表示工具头的上下运动; W 表示工具头的旋转运动。

2 单因素试验

首先分别采用截面为圆形和五边形的中空铜电极对工件进行加工,并对比其加工效果差异,同时初步评估多边形电极对加工效率的影响。由于电火花

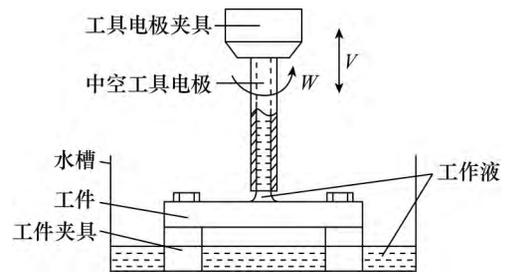


图 1 试验加工示意图

加工过程中电极会发生损耗,故为保证加工的可靠性,每组试验重复 5 次,并且每次试验后都需拆下电极进行打磨,去除已磨损部分但保持截面形状和尺寸后继续装夹加工。

试验采用不同的占空比作为单因素变量,其余试验条件参数如表 1 所示,试验结果如图 2、图 3 所示。

表 1 试验条件参数

| 电压/V | 脉冲宽度/ ms | 峰值电流/ A | 主轴转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 工作液压力/MPa |
|------|-------------|------------|----------------------------------|-----------|
| 95 | 24 | 4 | 60 | 4 |

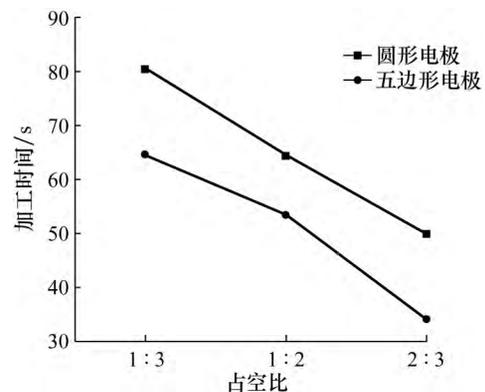


图 2 采用不同截面中空电极对材料加工效率的影响(10% Al₂O₃ 增强相 6061 铝基)

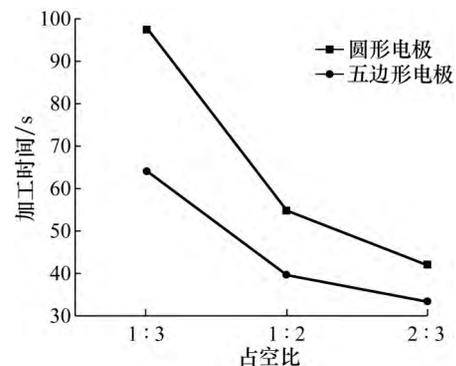


图 3 采用不同截面中空电极对材料加工效率的影响(20% SiC 增强相 359 铝基)

由图 2 和图 3 中可以看出:随着占空比的增大,五边形和圆形中空电极的加工时间明显缩短,即效率提

高;这主要是由于在脉宽不变的情况下,随着占空比的增加,脉冲周期时间减小,单个加工周期内有效加工时间增大,电火花蚀除材料的量也随之增加。在相同占空比加工情况下,五边形电极的加工时间明显少于圆形电极,主要是由于具有菱形结构的电极可以在加工过程中大幅度旋转搅拌工作液,使材料内表面加工产物排出以及工作液及时更新;因此,五边形电极的棱角有利于碎屑的排出,避免增强颗粒对加工的影响。同时,由于其五边形的面积较圆形电极小,液体冲在工件表面反射回四周时,五边形电极更有利于排废液。图2中在3种占空比下五边形电极的加工时间较圆形电极的加工时间分别减少了24.6%、20.6%、46.6%,且加工时间最大相差15.9s。图3中五边形电极的加工时间较圆形电极的加工时间分别减少了51.8%、38.4%、25.8%,且加工时间最大相差33.3s。由此可见,颗粒不同,其加工的时间也大不相同。SiC增强相材料中圆形电极和五边形电极的加工时间区别很大,但总体加工时间比Al₂O₃增强相材料长一些;这是由于Al₂O₃与SiC都属于较难导电的物质,而SiC颗粒的体积分数比Al₂O₃颗粒大,加工较难。

3 正交试验

由于在实际加工中,需要考虑多种因素对加工过程的影响,优化并得出相对较优参数的搭配,同时为了在尽可能少的试验次数下获得科学的试验结果,本文将结合试验参数采用正交设计的方法进行试验。正交试验参数表如表2所示。

表2 正交试验参数表

| 因素 | 水平 | | |
|-------------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| 脉冲宽度 A/ms | 16 | 24 | 32 |
| 占空比 B | 1:3 | 1:3 | 2:3 |
| 峰值电流 C/A | 4.0 | 5.5 | 7.0 |

根据上述因素和水平,本试验选取 $L^9(3^4)$ 正交表,五边形中空电极电火花加工试验结果如表3、表4所示。为了保证试验的可靠性,每组试验都重复5次,最后结果的时间取值为5个试验值的均值。

其中 I_j 、 II_j 、 III_j 分别表示每次试验各因素的1、2、3水平的试验结果之和 $j=1, 2, \dots, 9$, $I_j/3$ 、 $II_j/3$ 、 $III_j/3$ 分别表示每次试验各因素的1、2、3水平的试验结果均值 R 表示每次试验各因素的3个水平与均值之间的最大差值,因素 D 为空因素。

表3 五边形中空电极电火花加工试验结果
(10% Al₂O₃增强相 6061 铝基)

| 试验编号 | 因素 | | | | 加工时间 /s |
|-----------|--------|--------|--------|---|---------|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 95.5 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 39.2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 10.3 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 63.1 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 16.2 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 53.2 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 33.7 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 65.1 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 15.0 |
| I_j | 145.0 | 192.3 | 213.8 | | |
| II_j | 132.5 | 120.5 | 117.3 | | |
| III_j | 113.8 | 78.5 | 60.2 | | |
| $I_j/3$ | 48.333 | 64.100 | 71.267 | | |
| $II_j/3$ | 44.167 | 40.167 | 39.100 | | |
| $III_j/3$ | 37.933 | 26.167 | 20.067 | | |
| R | 10.400 | 37.933 | 51.200 | | |

表4 五边形中空电极电火花加工试验结果
(20% SiC增强相 359 铝基)

| 试验编号 | 因素 | | | | 加工时间 /s |
|-----------|--------|--------|--------|---|---------|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 75.5 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 29.3 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 10.5 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 39.1 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 14.5 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 44.0 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 25.1 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 39.5 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 14.2 |
| I_j | 115.3 | 139.7 | 159.0 | | |
| II_j | 97.6 | 83.3 | 82.6 | | |
| III_j | 78.8 | 68.7 | 50.1 | | |
| $I_j/3$ | 38.433 | 46.567 | 53.000 | | |
| $II_j/3$ | 32.533 | 27.767 | 27.533 | | |
| $III_j/3$ | 26.267 | 22.900 | 16.700 | | |
| R | 12.166 | 23.667 | 36.300 | | |

由表3的极差分析可以知道, $R_3=51.200$ 最大, $R_1=10.400$ 最小, $R_2=37.933$ 居中;因此,在本试验范围内,各因素中对试验指标影响最大的是峰值电流 C ,其次是占空比 B ,影响最小的是脉冲宽度 A 。由于该试验优化参数的衡量标准是加工时间尽可能少,故根据表3可以得出最佳的参数配合是 $A_3B_3C_3$,即对10%的Al₂O₃颗粒增强型6061铝基复合材料进行加工的最佳工艺参数为脉冲宽度32ms,占空比2:3,峰值电流7A。

由表4的极差分析可知, $R_3=36.300$ 最大, $R_1=$

12.166 最小, $R_2 = 23.667$ 居中; 因此, 在本试验范围内, 各因素中对试验指标影响最大的也是峰值电流 C , 其次是占空比 B , 影响最小的是脉冲宽度 A 。由于该试验优化参数的衡量标准是加工时间少, 加工效率高, 故根据表 4 可以得出最佳的参数配合是 $A_3B_3C_3$, 即对 20% SiC 颗粒增强型 359 铝基复合材料进行加工的最佳工艺参数为脉冲宽度 32ms, 占空比 2:3, 峰值电流 7A。

4 结语

本文通过对比不同截面中空电极, 利用电火花加工的方法加工颗粒增强铝基复合材料, 得到如下初步结论: 1) 截面为五边形的中空电极较圆形电极电火花加工 10% Al_2O_3 增强相 6061 铝基复合材料和 20% SiC 颗粒增强相 359 铝基复合材料的效率高, 最大分别可以缩短 46.6%、51.8% 的加工时间。这主要是由于具有菱形结构的电极不仅可以在电极高速旋转加工过程中大幅度旋转搅拌工作液, 使材料内表面加工产物排出加工区域, 而且能把工作介质带入加工区域, 避免了不正常电弧放电。2) 对于本文中的两种颗粒增强铝基复合材料, 峰值电流对加工效率的影响最为明显。在试验选取的试验参数范围内, 对这两种不同颗粒增强金属基复合材料进行加工的最佳工艺组合为脉冲宽度 32ms, 占空比 2:3, 峰值电流 7A。

未来试验研究还有许多工作可以开展下去, 主要是如下几方面: 1) 对该多边形电火花加工过程及其机理进行有限元仿真分析; 2) 制备其他多边形电极进行加工研究, 对比加工效果; 3) 对其他颗粒增强铝基复合材料进行加工研究等。

参考文献:

- [1] 金鹏, 刘越, 李曙, 等. 颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域的应用[J]. 材料导报, 2009, 23(11): 24-27.
- [2] PARK B G, CROSKY A G, HELLIER A K. Fracture toughness of microsphere Al_2O_3 -Al particulate metal matrix composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(7): 1270-1279.
- [3] 樊建中, 石力开. 颗粒增强铝基复合材料研究与应用发展[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 1-7.
- [4] 李涛, 郭西振, 张新馨. 颗粒增强铝基复合材料的研究与进展[J]. 黑龙江科技信息, 2014(1): 41-42.
- [5] 张俊清, 周素霞, 杨月, 等. 高速列车制动盘 SiCp/A356 颗粒增强铝基复合材料的热疲劳性能研究[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 252-256.
- [6] 李德溥, 姚英学, 袁哲俊. 颗粒增强金属基复合材料的特

种加工研究现状[J]. 机械制造, 2006, 44(10): 65-68.

- [7] 大卫姆. 金属基复合材料加工[M]. 贾继红, 孙晓雷, 牛群, 译. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [8] 包晓慧, 明平美, 毕向阳. 电化学蚀刻法制备铝基复合材料超疏水表面[C]. 厦门: [出版者不详], 2015.
- [9] 谭焘年. SiCp/Al 复合材料的水导激光加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] KISHAWY H A. 1-Turning processes for metal matrix composites[J]. Machining Technology for Composite Materials, 2012, 32(3): 3-16.
- [11] ZHANG J Y, YU Q X, PANG S Q, et al. Study on the Machining Technology of Composite Materials[J]. Materials Science Forum, 2004, 471-472(3): 159-163.
- [12] 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]. 焦作工学院学报, 2003, 22(2): 121-124.
- [13] HUANG S T, ZHOU L, YU X L, et al. Experimental study of high-speed milling of SiCp/Al composites with PCD tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(5/6/7/8): 487-493.
- [14] ZHOU L, HUANG S T, WANG D, et al. Finite element and experimental studies of the cutting process of SiCp/Al composites with PCD tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5): 619-626.
- [15] BISWAS R, KUAR A S, BISWAS S K, et al. Effects of Process Parameters on Hole Circularity and Taper in Pulsed Nd: YAG Laser Microdrilling of Tin- Al_2O_3 Composites[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2010, 25(6): 503-514.
- [16] YUE T M, LAU W S. Pulsed Nd: YAG Laser Cutting of Al/Li/SiC Metal Matrix Composites[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2007, 11(1): 17-29.
- [17] 徐亮, 陈旭辉, 方胜, 等. 磨料水射流技术及其加工复合材料研究现状[C]. 厦门: [出版者不详], 2014.
- [18] PRAMANIK A. Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 86(11): 44-61.
- [19] 王建业. 电解加工原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [20] SENTHILKUMAR C, GANESAN G, KARTHIKEYAN R, et al. Modelling and analysis of electrochemical machining of cast Al/20% SiCp composites[J]. Materials Science & Technology, 2010, 26(3): 289-296.
- [21] SENTHILKUMAR C, GANESAN G, KARTHIKEYAN R, et al. Study of electrochemical machining characteristics of Al/SiCp composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(3): 256-263.

(下转第 99 页)

- 117.
- [4] 赵宏林,丁庆新,曾鸣,等. 机床结合面特性的理论解析及应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 208-214.
- [5] 苗青. 数控机床导轨结合面的接触刚度分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
- [6] 温淑华,张学良,武美先,等. 结合面法向接触刚度分型模型建立与仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 197-202.
- [7] 刘称意. 考虑导轨结合面影响的数控机床动态特性分析及结构优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [8] BURDEKIN M, BACK N, COWLEY A. Analysis of the local deformations in machine joints [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1979, 21(1): 25-32.
- [9] CHLEBUS E, DYBALA B. Modelling and calculation of properties of sliding guideways [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(12): 1823-1839.
- [10] GUO L, ZHANG H, YE P et al. On obtaining machine tool joints stiffness by integrated modal analysis. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering [C]. [S. l.]: IEEE, 2010: 2661-2664.
- [11] KALKER J J. The computation of three-dimensional rolling contact with dry friction [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1979, 14(9): 1293-1307.
- [12] KALKER J J. Variational principles of contact elastostatics [J]. International Journal of Applied Mathematics, 1977, 20(2): 199-219.
- [13] CHANDRUPATLA T R, BELEGUNDU A D. Introduction to finite elements in engineering [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [14] 刘瑞堂. 工程材料力学性能 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- [15] 杜平安. 有限元网格划分的基本原则 [J]. 机械设计与制造, 2000(1): 34-36.
- [16] 刘阳, 李景奎, 朱春霞, 等. 直线滚动导轨结合面参数对数控机床动态特性的影响 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(12): 1369-1372.
- [17] 李磊, 张胜文, 于洋, 等. 滚动导轨结合面参数识别及仿真分析 [J]. 江苏科技大学学报, 2009, 23(2): 142-145.
- [18] 王延忠, 周元予, 刘强, 等. 直线电机驱动的加工中心导轨副动力学特性分析 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(13): 1574-1576.
- [19] 钱德拉佩特拉, 贝莱冈度. 工程中的有限元方法: Introduction to finite elements in engineering [M]. 曾攀, 雷丽萍, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [20] TILEYLIOGLU S, STEWART J P, NIGBOR R L. Dynamic Stiffness and Damping of a Shallow Foundation from Forced Vibration of a Field Test Structure [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, 137(4): 344-353.
- [21] BEARDS C F. Damping in structural joints [J]. Shock & Vibration Digest, 1979, 11(9): 35-41.

作者简介: 张亮, 硕士研究生, 研究方向为高效精密加工。

E-mail: 798534509@qq.com

收稿日期: 2016-11-28

(上接第 8 页)

- [22] GARG R K, SINGH K K, SACHDEVA A, et al. Review of research work in sinking EDM and WEDM on metal matrix composite materials [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(5/6/7/8): 611-624.
- [23] SATISHKUMAR D, KANTHABABU M, VAJJIRAVELU V, et al. Investigation of wire electrical discharge machining characteristics of Al6063/SiC composites [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(9/10/11/12): 975-986.
- [24] WANG C C, YAN B H. Blind-hole drilling of Al₂O₃/6061Al composite using rotary electro-discharge machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102(1/2/3): 90-102.
- [25] 刘江文, 陈广学, 余大民, 等. 梅花型线电极电化学火花加工金属基复合材料的稳定性研究 [C]. 苏州: [出版者不详], 2011.

作者简介: 陈少国, 硕士研究生, 主要研究方向为特种加工技术。

于兆勤, 学士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为特种加工技术、超精密加工技术以及先进制造技术。

刘江文, 博士, 副教授, 主要研究方向为非传统制造技术。

E-mail: 1512127045@qq.com; zqyu@gdut.edu.cn; feiwliu@scut.edu.cn

收稿日期: 2016-11-10