

飞行式电解铣削加工 TiB_2 /7050Al 复合材料试验研究

徐晨龔¹,李寒松¹,何彬森¹,蔡晶²

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016;

2. 南京宁庆数控机床制造有限公司,江苏 南京 211161)

摘 要: 铝基复合材料作为应用最广泛的一种金属基复合材料,具有高比强度、高比刚度、高导热性、高耐磨性、高耐腐蚀性等多方面优点。在加工该材料的薄壁零件时,飞行式电解铣削的方式不会产生加工应力,可以有效规避加工中的变形与震颤。通过分析研究加工电压及进给速度对加工效率产生的影响,总结得出试验结果:沟槽深度随加工电压及进给速度的增大而增大,且近似呈线性关系;进给速度的增大能够提升材料去除率,但上升的趋势由 18.5% 降至 2.8%。在 40 V 加工电压的参数下,单次进给的最大沟槽深度为 1.22 mm,最大材料去除率为 $608 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。

关键词: 铝基复合材料;电解铣削;沟槽深度;材料去除率

中图分类号: TG54 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)05-0051-04

Experimental Study on Flight-type Electrochemical Milling TiB_2 /7050Al Composites

XU Chenyan¹, LI Hansong¹, HE Binsen¹, CAI Jing²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Nanjing Ningqing CNC Machine Tool Manufacturing Limited Company, Nanjing 211161, China)

Abstract: As one of the most widely used metal matrix composites, aluminum matrix composites have the advantages of high specific strength, high specific stiffness, high thermal conductivity, high wear resistance, high corrosion resistance and so on. When processing thin-walled parts of the material, the flight-type electrochemical milling method does not generate processing stress, which can effectively avoid deformation and tremor in processing. This paper analyzes and studies the influence of processing voltage and feed rate over processing efficiency. The test results indicate that the groove depth increases with the increase of processing voltage and feed rate and is approximately linear. The increase of feed rate can improve the material removal rate, but the upward trend is reduced from 18.5% to 2.8%. Under the parameters of 40 V processing voltage, the maximum groove depth of a single feed is 1.22 mm, and the maximum material removal rate is $608 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Keywords: aluminum matrix composites; electrolytic milling; trench depth; material removal rate

0 引言

铝基复合材料(Aluminum matrix composites, AMCs)是以纯铝或铝合金为基体,由两种或两种以上性质不同的材料通过各种工艺手段复合而成。该材料具有高比强度、高比刚度、高导热性、高耐磨性、高耐腐蚀性等多方面优点^[1-4]。因此,该材料已经成为金属复合材料中最常用的材料之一。铝基复合材料在汽车领域可以用于制造刹车转子、活塞等刹车系统元件;在航空航天领域能够代替铝合金制造机上腹鳍等结构件;在电子和光学仪器中可以制造各类精密仪器的零件^[5-6]。

对于飞机蒙皮、腹鳍、导流叶片等薄壁结构件,如果使用机械切削加工的方式,会存在较为严重的变形和颤振,使得零件的尺寸难以精确地控制,导致加工效率的降低与生产成本的提高。为了有效地规避此类问题,飞行式电解铣削是一个很好的选择。电解加工是一种利用金属在电

解液中发生电化学阳极溶解的原理,从工件(阳极)去除材料。因此在电解加工过程中工件与工具阴极不会发生接触,故不存在机械切削力,不产生残余应力和变形^[7]。电解铣削根据铣削的方式又可分为飞行式和切入式,其中飞行式电解铣削就是工具阴极始终在工件的加工表面上,不与工件产生任何接触,完全利用工具阴极的底面进行电解加工;切入式电解铣削则多数从工件侧面切入加工,同时利用工具阴极的侧面和底面进行电解加工。在加工薄壁零件时,单次进给的深度较小,完全可以利用飞行式电解铣削的方式加工工件,在保证铣削深度的同时提高材料去除率。

在有关电解铣削领域的研究中,牛灿等^[8]在有关航空铝合金的精密电解铣磨加工试验中,采用切入式铣削的方式,主要对比了电解铣削与电解铣磨加工的质量。在 10 V 的加工电压、 $0.8 \text{ mm}/\text{min}$ 进给速度的条件下,材料去除率为 $160.64 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。在谢焱炼等^[9]有关电解复合铣削不锈钢的试验中,选用切入式复合铣削的方式,在进给

基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111)

第一作者简介: 徐晨龔(1999—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为电解加工,chenyanxu@qq.com。

速度达到 140 mm/min 下的实际切深为 0.03 mm。除此之外,在有关飞行式电解铣削加工中,LIU Y 等^[10]有关电解铣削铝基复合材料的研究,使用了 20% NaNO₃ 电解液对 TB6 铝合金电解铣削加工所得的浅槽深度分别为 143 μm 和 210 μm。王系众等^[11]使用了 10% NaNO₃ 电解液,在 40 V 加工电压、30 mm/min 进给速度的条件下,所得的材料去除率为 279.85 mm³/min。为提高加工效率,本文提出选用 20% NaCl 溶液为电解液,并利用大直径的工具阴极加工铝基复合材料,以获得更高的材料去除率与加工深度。

本文针对 TiB₂ 颗粒增强铝基复合材料进行飞行式电解铣削的基础研究。试验材料为 10% vol. TiB₂/7050Al 复合材料,其中基体材料为 7050 铝合金, TiB₂ 颗粒的体积分数为 10%,其质量分数如表 1 所示。

表 1 TiB₂/7050Al 复合材料质量分数 单位:%

Zn	Ti	Mg	Cu	B	Zr	Al
6.7	3.78	2.27	2.24	1.55	0.13	其余

1 研究方法

1.1 飞行式电解铣削加工原理

飞行式电解铣削加工利用具有简单形状的工具电极,基于电化学阳极溶解原理,在数控系统的控制下沿规划运动路径,在工具阴极不接触工件阳极表面的前提下,以类似铣削的加工方式进行材料的电解加工。飞行式电解铣削加工示意图如图 1 所示,加工过程中,工件连接电源正极形成阳极,工具连接电源负极形成阴极,工具阴极与工件阳极保持极小的加工间隙,并以一定的加工速度相对于工件作进给运动。电解液通过中空棒状阴极,沿端部的出液口喷射至工件表面,同时工具阴极具有一定的转速以改善加工间隙内流场的均匀性,电解液在一定的流速下,带走加工过程中产生的加工产物、气泡以及热量,以保证加工持续稳定地进行。

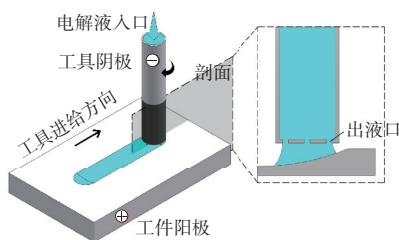


图 1 飞行式电解铣削加工示意图

1.2 工具阴极结构设计

在电解加工过程中,选用正流式加工,即电解液从工具阴极内部通过底部出液孔喷射至工件表面。工具阴极的内部与加工间隙中的电解液分布如图 2 所示,这样设计的电解液既可以在阴阳两极之间组成导电回路,也可以带走加工过程中产生的加工产物、气泡以及热量,保证加工持续稳定^[12]。加工间隙流场的稳定直接决定了工件的加

工精度及表面质量,工具阴极底部的出液孔形式又决定了加工间隙的流场分布,因此工具阴极底部出液孔的形式十分重要。

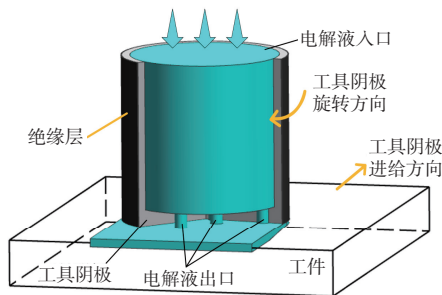


图 2 电解液分布示意图

本文设计并选用的工具阴极如图 3 所示,其外径为 20 mm,内径为 18 mm,壁厚 1 mm,长度为 60 mm。刀具底面在直径为 2.4 mm 的圆周上开设 1 个出液孔,在直径为 7 mm 的圆周上分布 2 个出液孔,在直径为 12 mm 的圆周上分布 2 个出液孔,在直径为 15 mm 的圆周上均布 4 个出液孔。为了提高单次加工沟槽底面的平整性,减少后续精加工的加工余量,提高整体加工的效率,将平底的工具阴极改成一定弧度的圆弧凹坑工具阴极,从而改变工具阴极与工件的加工间隙,使位于加工时间最长、电解深度最深的工具阴极圆心处的加工间隙最大,圆心向圆周加工间隙逐渐减小。

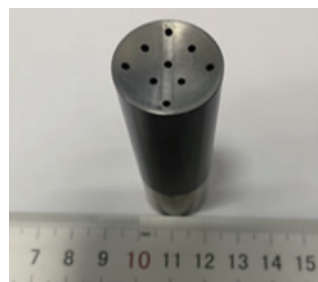
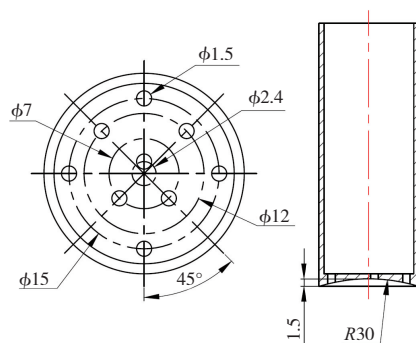


图 3 工具阴极结构设计图及实物图

1.3 试验设置

通过控制变量的方式分析电解加工中的加工电压和进给速度对加工效率的影响。在其余条件不变的情况下(详见表 2),分别选用不同的加工电压或不同的进给速度对沟槽深度和材料去除率进行研究。

表2 主要加工参数

加工参数	数值
电解液	20% NaCl
电解液温度/℃	30
电解液电导率/(S/m)	23.9
主轴转速/(r/min)	500
电解液压力/MPa	0.2
初始加工间隙/mm	0.2

在电解铣削加工结束后分析加工沟槽的表面形貌以及加工效率,通过桥式坐标测量机(HEXAGON,瑞典)检测沟槽剖面 A-A 所在位置的轮廓上各点的坐标,用基恩士(VR-5000,KEYENCE,日本)来观测加工表面的微观三维形貌。加工效率通过材料去除率(material removal rate, MRR)来表征,即单位时间内材料去除的体积来表示,计算公式为

$$M_{RR} = \frac{\Delta m}{\rho t} \quad (1)$$

式中: Δm 为去除的材料质量,g; ρ 为材料的密度,g/cm³; t 为加工时长,min。材料去除的质量 Δm 通过高精度的电子天平(ME4002E)称得,为防止加工表面有残留的加工产物,保证测量的准确性,对加工后的工件进行超声清洗后再称质量。

2 结果分析

电解铣削加工中,采用包络法加工复杂型面,沟槽加工的最低点应与理论加工表面相切,因此,沟槽的加工深度与型面的加工精度直接相关,不同的加工参数对沟槽加工深度的影响规律不同。本文使用上述工具阴极来探究加工电压以及进给速度对沟槽加工深度和材料去除率的影响。

2.1 加工电压对电解铣削加工沟槽的影响

由 10% vol. TiB₂/7050Al 复合材料在 20% NaCl 溶液中极化曲线可知,该材料的分解电压很低^[13]。因此本小节可以采用较低的加工电压进行研究。在进给速度为 60 mm/min 的前提下,选取加工电压为 10 V、20 V、30 V 以及 40 V 进行研究。

图 4 为不同加工电压加工沟槽的表面形貌,图 5 为沟槽的扫描轮廓。随着加工电压的增大,沟槽加工深度显著增加,当加工电压从 10 V 增大到 40 V 时,加工深度从 0.15 mm 增加到了 0.53 mm。此结果可由法拉第定律解释,即当加工电压增大时,通过工件阳极的电流增大,阳极材料电解蚀除速率与通过其电流大小成正比,因此工作电压增加可以显著增大沟槽的加工深度。

图 6 为不同加工电压下加工沟槽的材料去除率,可以看出随着加工电压增大,工件材料去除率显著增加,加工电压从 10 V 增大到 40 V 时,加工材料去除率分别为 179.77 mm³/min、337.93 mm³/min、462.62 mm³/min、

591.74 mm³/min。加工的材料去除率直接反映了工件的加工效率,根据试验结果,选用材料去除率最高时的 40 V 作为后续试验的加工电压参数。

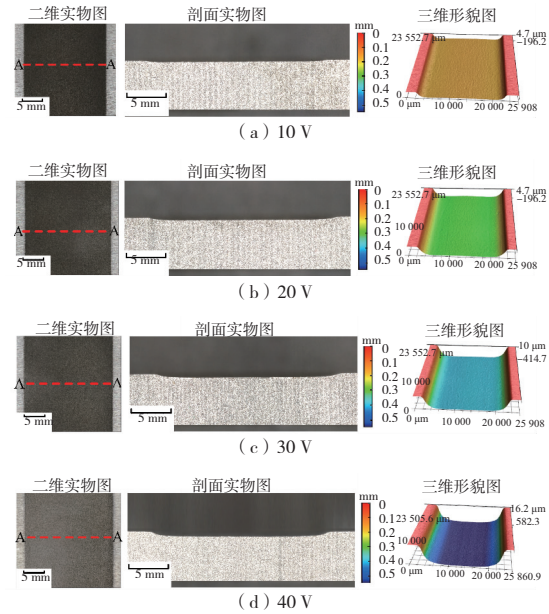


图4 不同加工电压加工沟槽的实物图及形貌图

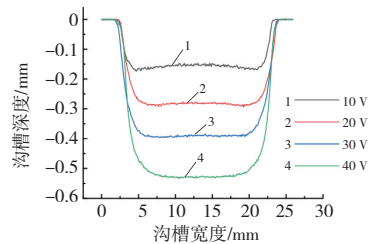


图5 不同加工电压加工沟槽的扫描轮廓

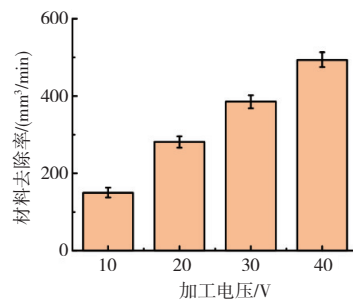


图6 不同加工电压加工沟槽的材料去除率

2.2 进给速度对电解铣削加工沟槽的影响

电解铣削加工的进给速度就是工具阴极与加工工件的相对运动速度,对沟槽的加工深度有重要影响,本节选用进给速度 20 mm/min ~ 80 mm/min 进行试验研究。

图 7 为不同进给速度加工沟槽的表面形貌,图 8 为沟槽的扫描轮廓。从图 7 和图 8 中可以看出,沟槽加工深度随着进给速度的提高而减小,当进给速度从 20 mm/min 增大到 80 mm/min 时,加工深度从 1.22 mm 减小到了 0.41 mm,其原

因是当进给速度增加时,工具阴极与工件阳极电解作用时间就随之减少了,从而导致工件材料去除量与沟槽加工深度的减小。

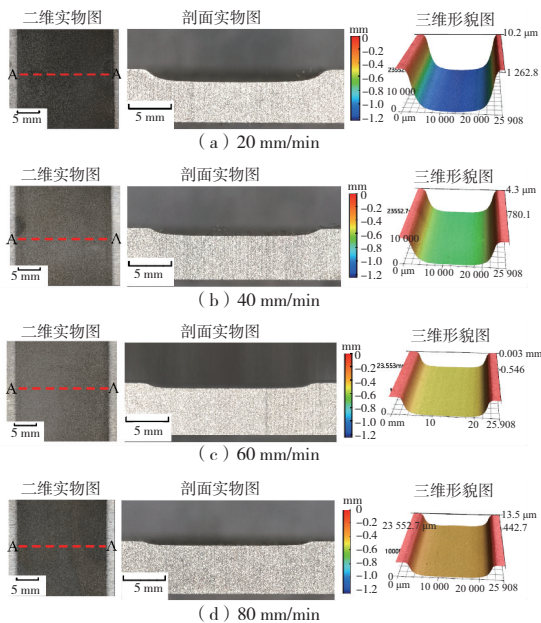


图7 不同进给速度加工沟槽的实物图及形貌图

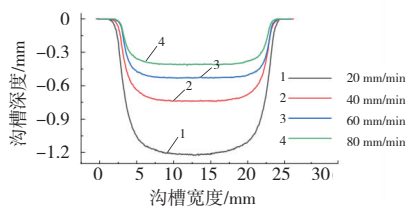


图8 不同进给速度加工沟槽的扫描轮廓

图9为不同进给速度下加工沟槽的材料去除率,可以看出随着进给速度增大,工件的材料去除率增加。进给速度从 20 mm/min 增大到 80 mm/min 时,加工材料去除率分别为 $472.18\text{ mm}^3/\text{min}$ 、 $559.38\text{ mm}^3/\text{min}$ 、 $591.74\text{ mm}^3/\text{min}$ 、 $608.64\text{ mm}^3/\text{min}$ 。分析其原因,可能是当进给速度较大时,工具阴极与加工工件在加工过程中平均加工间隙较小,相同时间下,较小的加工间隙可以得到更高的材料去除率。值得注意的是,随着进给速度的增加,加工的材料去除率增加的速率在降低,因此当进给速度增大到一定值后,进给速度对加工深度的影响极小,基本可以忽略不计。

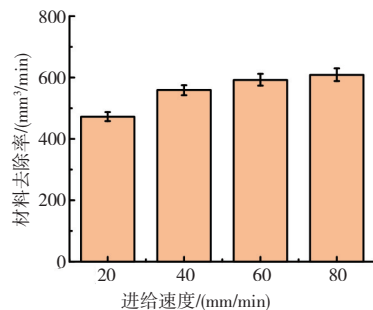


图9 不同进给速度加工沟槽的材料去除率

3 结语

本文主要研究了电解加工参数对加工沟槽底面轮廓及加工深度的影响。通过对铝基复合材料单次的飞行式电解铣削加工,探究了采用改进后的工具阴极加工电压和进给速度对沟槽的加工深度以及材料去除率的影响。通过控制变量并加以对比,得出以下结论。

1) 加工电压对沟槽的加工深度和材料去除率影响较大,沟槽深度随加工电压的增大而增大,且近似呈线性关系。在 40 V 加工电压和 20 mm/min 的进给速度下,沟槽深度为 1.22 mm 。

2) 进给速度对沟槽的加工深度和材料去除率影响较大,材料去除率随着进给速度的增大而增大,但上升的趋势由 18.5% 降至 2.8% 。在 40 V 加工电压和 80 mm/min 的进给速度下,材料去除率为 $608\text{ mm}^3/\text{min}$ 。

3) 降低进给速度能够获得更深的加工深度,但会导致材料去除率降低。当进给速度从 80 mm/min 降低至 20 mm/min 时,材料去除率从 $608.64\text{ mm}^3/\text{min}$ 减小至 $472.18\text{ mm}^3/\text{min}$,降低了 22.42% 。

参考文献:

- [1] GANGADHAR T G, GIRISH D P, SATHEESH J, et al. Study on mechanical properties of Al7050 alloy hybrid composites by stir casting method[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 5980-5985.
- [2] LIU G, GENG J W, LI Y G, et al. Effects of pre-strain on the microstructural evolution and mechanical strength of in situ $\text{TiB}_2/\text{7050Al}$ composite[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(7): 1900042.
- [3] 曾星华, 徐润, 谭占秋, 等. 先进铝基复合材料研究的新进展[J]. 中国材料进展, 2015, 34(6): 417-424, 460.
- [4] 李书志, 王铁军, 王玲. SiC 颗粒增强铝基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(1): 64-70.
- [5] LIN K Y, WANG W H, JIANG R S, et al. Effect of tool nose radius and tool wear on residual stresses distribution while turning in situ $\text{TiB}_2/\text{7050Al}$ metal matrix composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(1/2/3/4): 143-151.
- [6] 薛菁, 王俊, 孙宝德. TiB_2 颗粒增强铝基复合材料的研究进展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(24): 43-47.
- [7] 曲宁松, 刘洋, 张峻中, 等. 电解铣削加工技术研究进展及展望[J]. 电加工与模具, 2021(2): 1-14.
- [8] 牛岫, 曲宁松, 王系众, 等. 航空铝合金高效精密电解铣磨加工试验[J]. 电加工与模具, 2019(6): 37-41.
- [9] 谢焱焱, 徐波, 叶平, 等. 数控电解复合铣削不锈钢的试验研究[J]. 制造技术与机床, 2010(11): 85-88.
- [10] LIU Y, QU N S. Electrochemical milling of TB6 titanium alloy in NaNO_3 solution[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(2): E35-E49.
- [11] 王系众, 李寒松, 李洁, 等. 铝基复合材料高效电解铣削加工试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 6-9, 13.
- [12] 徐国梁, 李寒松, 岳小康, 等. TC4 复合材料电解钻孔加工技术研究[J]. 电加工与模具, 2021(2): 46-55, 60.
- [13] HUANG J, CHEN D, WU Y, et al. Corrosion behavior of in-situ $\text{TiB}_2/\text{7050Al}$ composite in NaCl solution at different pH values[J]. Materials Research Express, 2019, 6(5): 056541.

收稿日期: 2022-03-10