

引文格式: 杨怡天, 刘刚强, 李寒松. (TiB+TiC)/TC4 复合材料电解钻孔试验研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(3): 118-121.

YANG Yitian, LIU Gangqiang, LI Hansong. Experimental investigation of electrochemical drilling of (TiB+TiC)/TC4 Composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(3): 118-121.

(TiB+TiC)/TC4复合材料电解钻孔试验研究*

杨怡天^{1,2}, 刘刚强¹, 李寒松¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 江苏省消防救援总队镇江市支队金山焦山北固山国家风景名胜区大队, 镇江 212004)

[摘要] 钛基复合材料是一种典型的难加工材料, 采用传统机械加工方法存在加工效率低和加工质量差等问题。利用电解加工技术, 采用直径为 10mm 的管状阴极, 对 (TiB+TiC)/TC4 复合材料进行电解钻孔加工试验研究。进行了 (TiB+TiC)/TC4 复合材料的电化学特性研究, 测量了 (TiB+TiC)/TC4 复合材料在 10% NaNO₃ 溶液中的极化曲线和电流效率。探究了加工电压、电解液压力对加工精度的影响。结果表明, 当加工电压为 30V, 电解液压力为 0.6MPa 时, 电解钻孔可以在 1mm/min 的进给速度下稳定加工。当加工的盲孔深径比为 3.06 时, 孔的圆度误差为 41.1μm, 锥度为 0.4°, 具有较高的加工精度。

关键词: 管状阴极; 电解钻孔; (TiB+TiC)/TC4 复合材料; 电化学特性; 锥度

Experimental Investigation of Electrochemical Drilling of (TiB+TiC)/TC4 Composites

YANG Yitian^{1,2}, LIU Gangqiang¹, LI Hansong¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jinshan Jiaoshan Beigushan National Scenic Area Brigade of Zhenjiang City Detachment, Jiangsu Fire and Rescue Corps, Zhenjiang 212004, China)

[ABSTRACT] Titanium matrix composites is a kind of typical hard-to-cut materials, and traditional machining methods have problems such as low machining efficiency and poor machining quality. To this end, experimental investigation on electrochemical drilling of (TiB+TiC)/TC4 composites using a tubular cathode with a diameter of 10mm was conducted. The electrochemical characteristics of (TiB+TiC)/TC4 composites were studied. The polarization curves and current efficiency of (TiB+TiC)/TC4 composites in 10% NaNO₃ solution were measured. The influence of processing voltage and electrolyte pressure on processing accuracy was explored. The results show that when the machining voltage is 30V and the electrolyte pressure is 0.6MPa, the electrochemical drilling process is stably at a feed speed of 1mm/min. When the depth-to-diameter ratio of the machined blind hole is 3.06, the roundness error of the hole is 41.1μm and the taper is 0.4°, which shows the high machining accuracy of the electrochemical drilling method.

Keywords: Tubular cathode; Electrochemical drilling; (TiB+TiC)/TC4 composites; Electrochemical characteristics; Taper

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.03.118

钛基复合材料具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀和耐疲劳等优良的物理力学性能, 在航空航天等领域具有广阔的应用前景^[1-2]。然而, 钛基复合材料属于

典型的难加工材料, 采用传统的机械加工方法存在加工效率低、加工精度和加工表面质量难以保证、刀具磨损严重等问题^[3-4]。

电解加工是采用具有一定形状的阴极, 通过电化学溶解作用去除工件材料, 从而将工件材料加工成具有一

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0015-D111)。

定尺寸与形状的结构的加工方法。与机械加工方法比较,电解加工具有不受工件材料强度、硬度限制的优点,适用于加工钛合金、硬质合金等难加工材料^[5-6]。

房晓龙^[7]采用直径1mm的管电极在TC4钛合金上加工出深度为20mm的通孔结构。但是,采用管电极加工盲孔结构时会在孔底形成中心柱结构^[8]。刘鼎铭等^[9]采用底部开孔的管式阴极在304不锈钢上加工盲孔结构,消除了盲孔底部的凸台。

本研究采用管状阴极在(TiB+TiC)/TC4复合材料上进行盲孔结构电解加工试验研究,通过对工具阴极侧壁进行绝缘抑制了孔壁的腐蚀,提高了加工精度,探究了加工电压、电解液压力对加工精度的影响。

1 试验材料及方法

试验采用的钛基复合材料材料基体为TC4钛合金,其主要成分见表1。增强相为TiB与TiC,增强相的体积分数为8%,其中,TiB与TiC的比例为3:1。

图1为电解钻孔加工的原理示意图,电解钻孔加工采用内部中空的管状阴极,以类似钻削加工的方式,通过电化学溶解作用实现工件材料的去除。在电解钻孔加工过程中,金属工件与工具阴极分别与电源的正极与负极连接,电解液从工具阴极的开口端流入阴极内部,并由阴极底部的喷液孔高速流出进入加工间隙,参与电化学反应,同时不断带走加工产物和焦耳热。工具阴极一边作旋转运动,一边作竖直向下的进给运动,工件材料逐渐溶解,直至达到所需的加工距离。

图2所示为工具阴极的喷液孔分布形式,工具阴极直径为10mm;其内部盲孔直径为8mm;喷液孔直径为

表1 基体TC4钛合金的主要成分

Table 1 Main components of TC4 titanium alloy

Ti	Al	V	Fe	O	余量
89.36	6	4	0.3	0.2	0.14

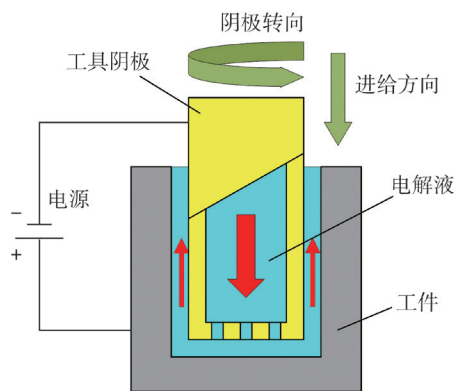


图1 电解钻孔加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrochemical drilling

1mm;底部厚度为1mm。

试验采用的电解加工系统与先前进行TC4钛合金电解加工试验使用的系统一致^[10]。工具阴极的基体材料为45号钢,为了探究工具阴极侧壁绝缘对加工效果的影响,采用电泳的方法对工具阴极进行侧壁绝缘,电泳层的厚度为60 μm ,将未进行侧壁绝缘的工具阴极命名为工具A,进行侧壁绝缘的工具阴极命名为工具B。

2 电化学特性研究

采用电化学工作站测量(TiB+TiC)/TC4复合材料在温度为30 $^{\circ}\text{C}$,质量分数为10%的 NaNO_3 溶液中的极化曲线,结果如图3所示。可以看到,基体材料TC4钛合金的分解电压约为11V,(TiB+TiC)/TC4复合材料的分解电压约为12.5V,这可能是因为(TiB+TiC)/TC4复合材料中的增强相颗粒阻碍了基体材料的溶解。进行(TiB+TiC)/TC4电解钻孔加工试验时,加工电压不应小于12.5V。

采用恒电流法测量(TiB+TiC)/TC4复合材料在温度为30 $^{\circ}\text{C}$,质量分数为10%的 NaNO_3 溶液中的电流效率,将(TiB+TiC)/TC4复合材料的体积电化当量 ω 与电流效率 η 的乘积来表示实际体积电化当量,绘制出

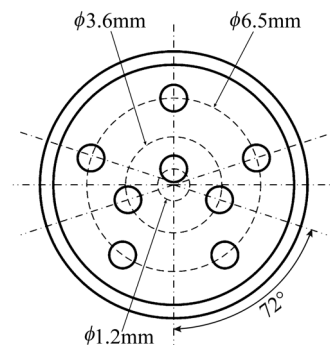


图2 工具阴极喷液孔分布图

Fig.2 Distribution diagram of tool cathode spray holes

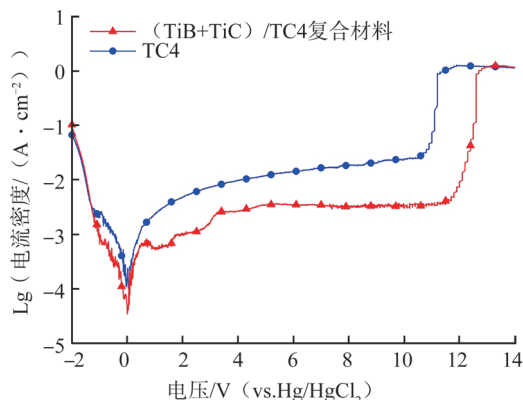


图3 TC4钛合金与(TiB+TiC)/TC4复合材料在 NaNO_3 溶液中的极化曲线

Fig.3 Polarization curves of TC4 titanium alloy and (TiB+TiC)/TC4 composites in NaNO_3 solution

$\eta\omega-i$ 曲线,结果如图 4 所示。可以看到,当电流密度 $< 10\text{A}/\text{cm}^2$ 时, $(\text{TiB}+\text{TiC})/\text{TC4}$ 复合材料的实际体积电化当量随电流密度的增加而迅速增大。当电流密度超过 $10\text{A}/\text{cm}^2$ 时,随着电流密度的增加, $(\text{TiB}+\text{TiC})/\text{TC4}$ 复合材料的实际体积电化当量增长缓慢,逐渐趋向于一定值,约为 $2.97 \times 10^{-5}\text{cm}^3/(\text{A} \cdot \text{s})$ 。

3 电解钻孔试验研究

3.1 侧壁绝缘对锥度的影响

由于加工初始阶段加工间隙内的流场不稳定,采用较大的加工速度可能会导致火花放电现象。为了保证加工的稳定,工具阴极先以一个较小的速度切入一段距离,待加工间隙内的流场稳定后,再以较大的进给速度进行加工。加工电压为 30V ,电解液压力为 0.6MPa ,初始加工间隙为 $200\mu\text{m}$,其他主要试验参数如表 2 所示。

图 5 为加工出的孔的入口形貌。可以看出,当工具阴极侧壁未绝缘时,由于阴极侧壁对内孔壁面的腐蚀,导致加工出的孔孔径较大,明显大于工具阴极的直径。此外,在孔的入口处,存在明显的杂散腐蚀现象,孔形质量较差。而工具阴极侧壁绝缘时,在加工过程中不会造成已加工表面二次腐蚀,因此加工出的孔孔径较小,接

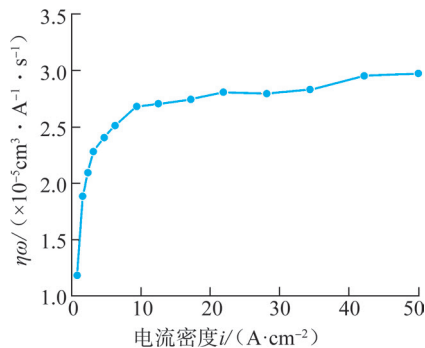


图4 (TiB+TiC)/TC4复合材料在 NaNO_3 溶液中电流效率曲线
Fig.4 Current efficiency curve of (TiB+TiC)/TC4 composites in NaNO_3 solution

表2 主要试验参数

Table 2 Main experimental parameters

参数	数值
电解液	10% NaNO_3
电解液温度/ $^{\circ}\text{C}$	30
工具转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1000
切入速度 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.6
切入深度 /mm	1.0
进给速度 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.0
总加工深度 /mm	20

近工具阴极的直径。在加工出的孔的入口处,无明显的杂散腐蚀现象,孔形质量较好。

采用桥式三坐标测量机对孔的轮廓进行扫描,当工具阴极侧壁未绝缘时,孔的入口直径为 15.52mm ,深度为 20.58mm ,锥度为 6.37° 。而工具阴极侧壁绝缘时,孔的入口直径为 10.81mm ,深度不变,锥度只有 0.5° 。这说明通过对工具阴极侧壁进行绝缘处理,可以有效地减小孔的锥度,提高孔形精度。

3.2 加工电压对加工精度的影响

孔径是决定孔的尺寸精度的重要指标,孔径的大小主要由刀具直径和加工间隙决定。为了探究加工电压对加工精度的影响,采用工具 B,保持电解液入口压力为 0.6MPa ,主轴转速为 $1000\text{r}/\text{min}$,进给速度为 $1.0\text{mm}/\text{min}$,进行电解钻孔加工式验。采用三坐标测量机对孔径进行测量,结果如图 6 所示。可以看出,随着加工电压的增大,孔径也随之增大。这是因为当加工电压升高时,工具阴极底部对工件材料的蚀除作用增强,从而导致孔的直径变大。

3.3 电解液压力对加工精度的影响

为了探究电解液压力对加工精度的影响,采用工具 B,保持加工电压为 30V ,主轴转速为 $1000\text{r}/\text{min}$,进给速度为 $1.0\text{mm}/\text{min}$,进行电解钻孔加工式验。采用三坐标测量机对孔径进行测量,结果如图 7 所示,可以看出,当电解液压力较低或较高时,孔径都较大,这是因为当电



(a) 侧壁未绝缘 (b) 侧壁绝缘

图5 孔的入口形貌图

Fig.5 Entrance morphology of holes

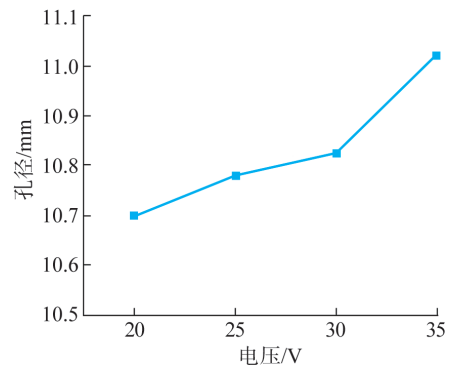


图6 加工电压对孔径的影响

Fig.6 Effect of processing voltage on aperture

解液压力较低时,加工间隙内电解液流量小,不利于加工产物的排出,加工稳定性差,容易产生细小的火花放电,造成孔径变大。当电解液压力较大时,加工间隙内的电解液流速显著提高,保证了加工间隙内电解液的充足和电导率的稳定,使孔径又有所增大。

根据上述试验结果,采用加工电压 30V、电解液压力 0.6MPa、进给速度 1mm/min、加工深度 32mm,在 (TiB+TiC)/TC4 复合材料上加工盲孔结构,结果如图 8 所示。可以看到,孔的入口形貌良好,锥度很小。根据测量结果,加工出的盲孔圆度误差为 41.1 μ m;深度为 32.5mm;深径比为 3.06;锥度仅有 0.4 $^{\circ}$,这表明电解钻孔加工方法对于 (TiB+TiC)/TC4 复合材料等难加工材料的盲孔结构加工具有一定的优势。

4 结论

采用直径 10mm 的管状阴极进行 (TiB+TiC)/TC4 复合材料电解钻孔试验研究,根据试验结果,可以得到以下结论。

(1) 温度为 30 $^{\circ}$ C 时,TC4 钛合金在质量分数为 10% 的 NaNO₃ 溶液中的分解电压为 11V; (TiB+TiC)/TC4 复合材料的分解电压约为 12.5V。

(2) 当电流密度 < 10A/cm² 时, (TiB+TiC)/TC4 复合材料的实际体积电化当量随电流密度的增加而迅速增大。当电流密度超过 10A/cm²,随着电流密度的增加, (TiB+TiC)/TC4 复合材料的实际体积电化当量增长缓

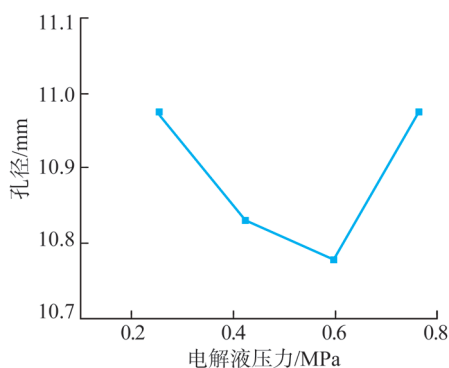
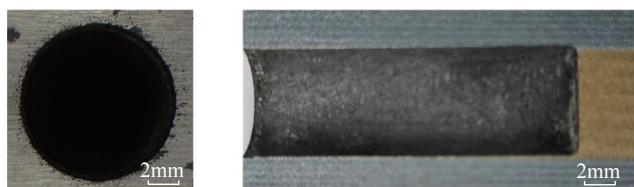


图7 电解液压力对孔径的影响

Fig.7 Effect of electrolyte pressure on aperture



(a) 入口形貌

(b) 剖面图

图8 孔的入口形貌及剖面图

Fig.8 Entrance morphology and cross-sectional view of hole

慢,逐渐趋向于一定值,约为 $2.97 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 / (\text{A} \cdot \text{s})$ 。

(3) 采用侧壁未绝缘的工具阴极时,加工出的孔的入口直径为 15.52mm,锥度为 6.37 $^{\circ}$;采用侧壁绝缘的工具阴极时,加工出的孔的入口直径为 10.81mm,锥度为 0.5 $^{\circ}$,加工精度得到明显提高,在一定范围内孔径随着加工电压的增大而增大。

参考文献

- [1] 田玉晶,孙世臣,胡辰,等. TiBw增强近 α 钛基复合材料相变点测定方法分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(8): 69-72.
- [2] TIAN Yujing, SUN Shichen, HU Chen, et al. Analysis of phase transition point determination method of TiBw reinforced near α titanium matrix composites[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(8): 69-72.
- [3] 王沛培. 原位自生7715D钛基复合材料等轴与层片组织力学性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [4] WANG Peipei. Research on mechanical properties of in situ synthesized 7715D titanium matrix composites with equiaxed and lamellar microstructures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [5] EZUGWU E O, WANG Z M. Titanium alloys and their machinability: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262-274.
- [6] RAHMAN M, WONG Y S, ZAREENA A R. Machinability of titanium alloys[J]. JSME International Journal Series C, 2003, 46(1): 107-115.
- [7] LI H S, FU S X, NIU S, et al. Simulation and experimental investigation of electrochemical mill-grinding of GH4169 alloy[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(7): 6608-6625.
- [8] NIU S, QU N S, FU S X, et al. Investigation of inner-jet electrochemical milling of nickel-based alloy GH4169/Inconel 718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5-8): 2123-2132.
- [9] 房晓龙. 管电极电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [10] FANG Xiaolong. Research on key techniques of shaped tube electrochemical machining[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [11] 张彦. 微小孔电火花—电解复合加工基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [12] ZHANG Yan. Fundamental research on electrochemical and discharge machining for micro hole[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [13] 刘鼎铭, 赵建社, 范延涛, 等. 旋转管电极电解钻孔试验研究[J]. 电加工与模具, 2019(2): 42-46.
- [14] LIU Dingming, ZHAO Jianshe, FAN Yantao, et al. Investigation on electrochemical drilling by rotating tubular cathode[J]. Electromachining & Mould, 2019(2): 42-46.
- [15] LIU G Q, LI H, NIU S, et al. Combined machining of Ti-6Al-4V alloy using electrochemical milling and electrochemical grinding[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019(14): 9876-9887.

通讯作者: 李寒松, 教授, 博士, 研究方向为电解加工。

(责编 杏东)