

# (TiB+TiC)/TC4 钛基复合材料电解加工基础试验研究

李洁,李寒松,徐国梁

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对钛基复合材料及其基体材料展开电解电化学特性研究,测量了 TC4 及 (TiB+TiC)/TC4 复合材料在 NaNO<sub>3</sub> 溶液中的极化曲线和电流效率。研究发现,(TiB+TiC)/TC4 复合材料相较于 TC4 分解电压更高,电流效率更低。选用合适的加工参数进行 (TiB+TiC)/TC4 复合材料的电解铣磨粗、精加工。结果表明:粗加工后平整性较差,有明显的接刀痕,反应面存在大量未脱落的晶须状增强相,表面粗糙度  $R_a$  为 5.262  $\mu\text{m}$ 。精加工后具有较好的平整性,可以观察到金属光泽与磨削的痕迹,表面粗糙度  $R_a$  减小至 0.702  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:**钛基复合材料;电化学特性;电解铣磨;表面粗糙度

**中图分类号:**TB33 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)05-0042-04

## Experimental and Study on Electrochemical Machining of TC4 Titanium Alloy Matrix Composites Enhanced By TiB and TiC

LI Jie, LI Hansong, XU Guoliang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The electrochemical characteristics of titanium matrix composites and their matrix materials were studied. The polarization curves and current efficiency of TC4 and (TiB+TiC)/TC4 composites in NaNO<sub>3</sub> solution were measured. The experimental results show that (TiB+TiC)/TC4 composites have higher decomposition voltage and lower current efficiency than TC4. Upon the implementation of electrochemical mill-grinding of (TiB+TiC)/TC4 composites and refined processing with appropriate machining parameters, the matrix composites has good flatness, observable metal luster and grinding traces with  $R_a$  being reduced to 0.702  $\mu\text{m}$  as compared with 5.262  $\mu\text{m}$ , which had poor flatness, obvious tool marks and enormous whisker like reinforcement due to rough machining.

**Keywords:** titanium matrix composites; electrochemical properties; electrochemical mill-grinding; roughness

## 0 引言

钛基复合材料(TMCs)是在钛合金基体中添加颗粒、晶须、纤维等增强相而组成的金属基复合材料<sup>[1]</sup>,相较于钛合金具有更好的综合性能,是先进航空发动机及飞行器某些重要部件的候选材料<sup>[2]</sup>。然而,钛基复合材料基体材料导热变形系数小,增强相颗粒硬度高,用传统的加工方法(例如切削或铣削)很难获得好的加工效果<sup>[3]</sup>。

电解铣磨加工(electrochemical mill-grinding, ECMG)是近年来在电解加工技术基础上发展起来的一种柔性电解机械复合加工方法,它采用带有磨粒的棒状工具,通过类似铣削加工的方式实现复杂结构的加工,较电解磨削具有更高的柔性及生产率。QU N S 等<sup>[4]</sup>综合电解铣削和电解磨削的优点,首次提出外部供液的电解铣磨加工方法,采用钎焊金刚石磨料球头棒状工具,对 Inconel 718 开展电解铣磨加工试验研究,其切削深度为 0.5 mm。随后,内部供液方式也被应用于电解铣磨加工。LI H S 等<sup>[5]</sup>在切

深为 3 mm 的电镀金刚石磨料管状工具阴极侧壁开设单排喷液孔,在 GH4169 上加工出凸台结构。NIU S 等<sup>[6]</sup>在切深为 10 mm 的电镀金刚石磨料管状工具侧壁开设 4 排出液孔,通过流场数值模拟分析与 Inconel 718 切削试验验证,发现相比于垂直排布,采用螺旋排布的方式能有效提高工件侧面的平整度。

目前关于电解铣磨加工技术的研究主要集中于镍基高温合金 Inconel 718/GH4169,尚无有关钛基复合材料电解铣磨加工的报导。本文针对 TC4 及 (TiB+TiC)/TC4 复合材料展开电化学特性测量,并选择合适的加工参数进行 (TiB+TiC)/TC4 复合材料电解铣磨试验研究。

## 1 电化学特性测量

### 1.1 试样准备

本文所使用的钛基复合材料为 TiC 和 TiB 颗粒增强,基体材料为 TC4 钛合金。(TiB+TiC)/TC4 复合材料中增

**基金项目:**国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111);江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX19\_0012)

**第一作者简介:**李洁(1996—)女,浙江嘉兴人,硕士研究生,研究方向为电化学电解加工技术。

强相与基体材料的体积分数如表 1 所示。通过电火花线切割将两种材料制成边长为 10 mm 的立方体试样,并对表面进行抛光处理后用于电化学特性测量。

表 1 (TiB+TiC)/TC4 复合材料增强相与基体材料的体积分数 单位: vol. %

成分	Ti-6Al-4V	TiB	TiC
含量	92	6.4	1.6

## 1.2 阳极极化曲线

阳极极化曲线表示电极电位与电流密度之间的关系,用于研究阳极极化的规律及金属溶解过程。本试验使用电化学工作站(Zennium E, Zahner, 德国)测量 TC4 及 (TiB+TiC)/TC4 复合材料的极化特性曲线。测量前将试样待测面抛光,放入封装模具中进行密封处理,待密封胶凝固后将待测面多余胶体磨除,保持切面整齐,并用丙酮清洗表面油污。极化测量采用三电极体系,其中铂电极为对电极,甘汞电极为参比电极。试验在(30±1)℃的 10% 浓度的 NaNO<sub>3</sub> 溶液中进行,采用恒电位法测量极化曲线,扫描速率为 10 mV/s,扫描范围为 0~13 V。

## 1.3 电流效率测量

法拉第定律又称为电解定律,可用于描述电极上通过的电量和电极反应物质量之间的关系,即:电极界面上发生化学变化物质的量与通入的电量成正比。然而,实际电解加工中阳极金属的溶解量并不同于理论计算值。为了明确金属溶解对总电量的利用率,引入电流效率概念,表征实际用于金属溶解的电量占总电量的比值。电流效率随电流密度的变化规律( $\eta-j$  曲线)是衡量材料电解加工能力的重要指标,计算公式为

$$\eta = \frac{M}{\omega \rho I t}$$

式中: $M$  为阳极实际溶解质量, g;  $\omega$  为材料体积电化学当量, cm<sup>3</sup>/(A·min);  $\rho$  为材料密度, g/cm<sup>3</sup>;  $I$  为加工电流值, A;  $t$  为加工时间, min。

试验在(30±1)℃的 10% 浓度的 NaNO<sub>3</sub> 溶液中进行,加工间隙为 0.1 mm,电解液压力为 0.4 MPa,控制并记录反应时间  $t$ 。试验前后用丙酮清洗,吹干并称量,计算材料溶解质量  $M$ 。每组试验重复 3 次取平均值,计算不同电流密度下的电流效率,得到电流效率曲线。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 极化曲线

TC4 及 (TiB+TiC)/TC4 复合材料的极化曲线测量结果如图 1 所示。在低电压下的钝化区内,电流密度值为 0,材料几乎不会发生溶解。达到溶解电压后,电流密度迅速增长,材料开始大量溶解。TC4 的分解电压约为 10.5 V, (TiB+TiC)/TC4 复合材料较高一些,约为 12 V。这表明 (TiB+TiC)/TC4 复合材料更难溶解。究其原因,可能是

由于 (TiB+TiC)/TC4 复合材料中增强相的存在阻碍了基体材料的溶解。

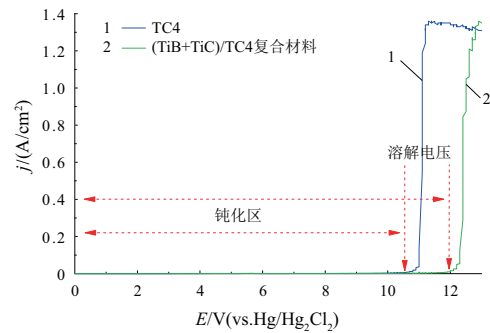


图 1 TC4 及 (TiB+TiC)/TC4 复合材料的极化曲线

### 2.2 电流效率及表面形貌

图 2 为 TC4 和 (TiB+TiC)/TC4 复合材料在 NaNO<sub>3</sub> 溶液中的电流效率曲线。随着电流密度的增加,TC4 和 (TiB+TiC)/TC4 复合材料在 NaNO<sub>3</sub> 溶液中的电流效率都呈现非线性变化趋势:在低电流密度下,电流效率随着电流密度的增加迅速增长,而在高电流密度下电流效率变化较小。电流密度为 0.78 A/cm<sup>2</sup> 时,TC4 和 (TiB+TiC)/TC4 复合材料电流效率相近,两种材料皆为微量蚀除。电流密度由 0.78 A/cm<sup>2</sup> 上升至 8.59 A/cm<sup>2</sup> 阶段,TC4 电流效率比 (TiB+TiC)/TC4 复合材料电流效率增长更快。电流密度达到 8.59 A/cm<sup>2</sup> 后,两种材料电流效率趋于稳定值,并且 TC4 电流效率略高于 (TiB+TiC)/TC4 复合材料。电流效率出现差值的原因可能是由于 TiB 增强相为纤维状晶须<sup>[7]</sup>,随着电解反应的进行,基体材料被不断去除,TiB 的一部分暴露出来,但仍然固着于材料表面,并未脱落,或者少量脱落。

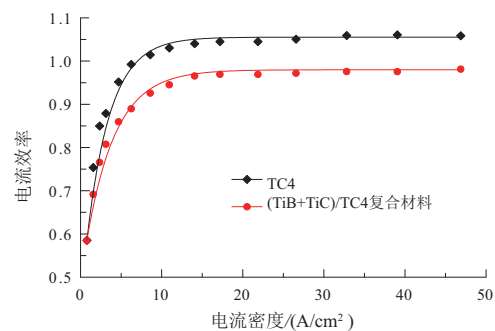


图 2 TC4 及 (TiB+TiC)/TC4 复合材料的电流效率曲线

为了进一步研究 TC4 和 (TiB+TiC)/TC4 复合材料在 NaNO<sub>3</sub> 溶液中的电化学特性,采用扫描电子显微镜观测不同电流密度下的表面形貌,结果如图 3、图 4 所示。在低电流密度 0.78 A/cm<sup>2</sup> 时,电解反应不充分,TC4 和 (TiB+TiC)/TC4 复合材料反应面都存在未溶解区域。电流密度达到 8.59 A/cm<sup>2</sup> 时,材料表面被充分腐蚀,其中 (TiB+TiC)/TC4 复合材料表面可以观察到一些纤维状物质。电

流密度达到  $46.88 \text{ A/cm}^2$  时, TC4 表面较为平整, (TiB+TiC)/TC4 复合材料表面呈现大量明显的纤维状晶须。

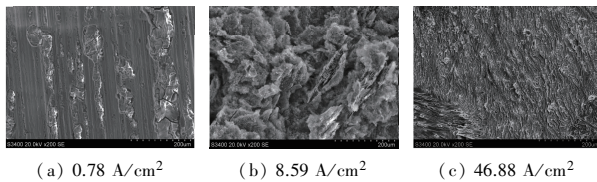


图3 TC4 钛合金在不同电流密度下的扫描电子显微镜图

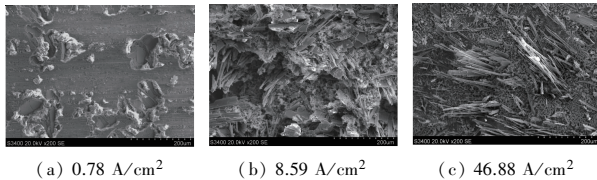


图4 (TiB+TiC)/TC4 复合材料在不同电流密度下的扫描电子显微镜图

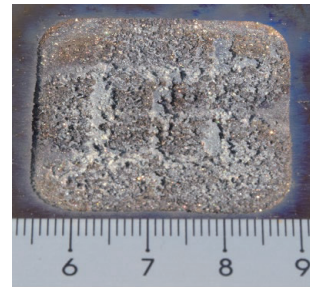
### 3 (TiB+TiC)/TC4 复合材料电解铣磨加工试验研究

电解铣磨加工可以通过同一工具阴极实现同一工件的粗、精加工。粗加工阶段用于去除工件的大部分余量,精加工阶段用于整平工件表面并降低表面粗糙度值,缩短加工周期的同时避免更换工具阴极带来的装夹定位误差。由于(TiB+TiC)/TC4 复合材料存在具有很高强度和硬度的TiB、TiC 增强相,在机械切削加工过程中容易与刀具碰撞,造成刀具磨损严重。因此,本文针对(TiB+TiC)/TC4 复合材料开展电解铣磨试验研究。试验所采用的工具阴极为末端闭合的管电极,外径和内径分别为 10 mm 和 8 mm,侧壁绝缘处理,端面电镀 170/200#金刚石磨粒并开有 5 个直径为 1 mm 的喷液孔。

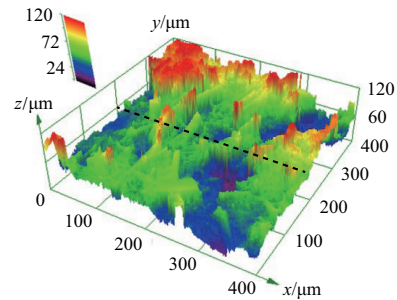
根据极化曲线测量结果可知,(TiB+TiC)/TC4 复合材料在  $\text{NaNO}_3$  溶液中的分解电压约为 12 V,粗加工阶段施加电压应  $\geq 12 \text{ V}$ 。根据法拉第定律,电流密度越大,材料溶解作用越强。当电压  $> 12 \text{ V}$  后,电流密度随着电压的增大而增大,为了提高(TiB+TiC)/TC4 复合材料的加工效率,选择 30 V 作为加工电压。试验加工间隙为 0.2 mm,进给速度为 20 mm/min,电解液压力为 0.6 MPa。

图 5(a) 为工具阴极在预设的运动轨迹下所加工的平面结构。可以看到,加工平面的平整性较差,能观察到明显的接刀痕。利用激光共聚焦显微镜 (OLS4100, Olympus, Japan) 对粗加工表面进行三维形貌扫描,并测量其表面粗糙度,结果如图 5(b) 所示,表面波峰、波谷起伏明显,黑色虚线处所测量的线粗糙度  $R_a$  为  $5.262 \mu\text{m}$ 。如图 5(c) 所示,粗加工阶段的表面形貌通过扫描电子显微镜 (S-3400, Hitachi, Japan) 进行检测,可以看到粗加工表面存在大量纤维状增强相,部分区域基体材料溶解不均匀,形成了密集分布的片状结构。

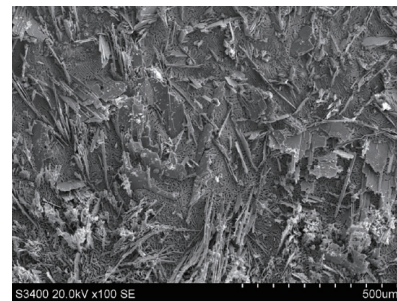
在电解铣磨的粗加工阶段,为了追求高的材料去除率,需要使用较高的电压,但这也引起严重的杂散腐蚀,导致已加工表面的质量较差,无法达到精加工阶段的产品



(a) 平面结构



(b) 加工表面三维形貌



(c) 加工表面微观形貌

图5 (TiB+TiC)/TC4 复合材料电解铣磨粗加工

要求。因此需要对粗加工后的工件表面进行电解铣磨精加工,从而改善工件表面质量,提高表面平整度。由(TiB+TiC)/TC4 复合材料的极化曲线可知,当电位超过 12 V 后材料开始发生电化学溶解。因此,为了减少电化学溶解造成的杂散腐蚀,同时提高加工过程中的机械磨削作用,在精加工阶段应该选择较低的加工电压和较小的切削深度,以逐层加工的方式完成小余量材料去除过程。试验加工电压为 1 V,进给速度为 60 mm/min,电解液压力为 0.2 MPa。

图 6(a) 为电解铣磨精加工所获平面结构,具有较好的平整性与均匀性,并且可以观察到明显的金属光泽。三维形貌扫描结果如图 6(b) 所示,精加工表面波峰波谷之间的高度差明显小于粗加工之后的高度差,所测量的表面粗糙度  $R_a$  为  $0.702 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度值减少了 86.7%。从图 6(c) 可以看出,精加工后表面磨削痕迹明显,可以看到隆起条纹,这是磨削加工中典型的耕犁及成屑特征<sup>[8]</sup>。由此可知,精加工过程中磨削起着主导的作用,并且在精加工过程中工件表面的成型不再受杂散腐蚀的影响。



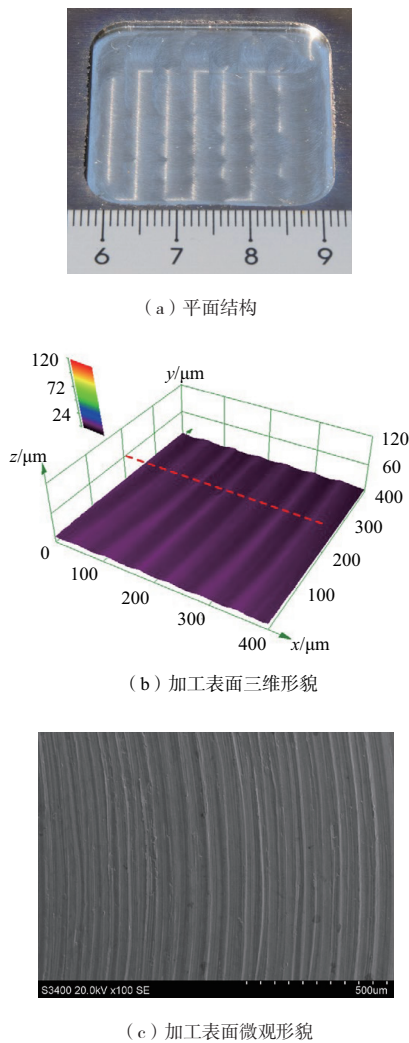


图6 (TiB+TiC)/TC4 复合材料电解  
铣磨精加工

## 4 结语

1) 温度为 30℃ 时, TC4 及 (TiB+TiC)/TC4 复合材料

在 10%NaNO<sub>3</sub> 溶液中的溶解电压分别为 10.5 V 和 12 V; 两种材料的电流效率都呈现非线性变化趋势; 相同电流密度下, (TiB+TiC)/TC4 复合材料的电流效率略小于 TC4。

2) 使用扫描电子显微镜观察腐蚀试样的表面形貌, 两种材料在不同电流密度下分别具有不同的形貌特征。(TiB+TiC)/TC4 复合材料随着电流密度增加, 越来越多的晶须状增强相出现在加工表面。

3) 选择合理的加工参数对 (TiB+TiC)/TC4 复合材料进行电解铣磨试验, 粗加工阶段由于高电压、缓进给所造成材料去除不均匀、加工表面平整度差、表面粗糙度大的现象, 通过精加工修整后得到显著改善, 表面粗糙度由 5.262 μm 降至 0.702 μm。

### 参考文献:

- [1] 张可召. 高温钛合金表面 YSZ 热障涂层性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [2] 刘超杰. 钛基复合材料高速磨削加工磨削力仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(2): 89-93.
- [3] EZUGWU E O, WANG Z M. Titanium alloys and their machinability—a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262-274.
- [4] QU N S, ZHANG Q L, FANG X L, et al. Experimental investigation on electrochemical grinding of inconel 718 [J]. Procedia CIRP, 2015, 35: 16-19.
- [5] LI H S, NIU S, ZHANG Q L, et al. Investigation of material removal in inner-jet electrochemical grinding of GH4169 alloy [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3482.
- [6] NIU S, QU N S, YUE X K, et al. Effect of tool-sidewall outlet hole design on machining performance in electrochemical mill-grinding of Inconel 718 [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 41: 10-22.
- [7] 张茂胜. TiC+TiB 增强高温钛合金基复合材料的组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] QIAN N, DING W F, ZHU Y J. Comparative investigation on grindability of K4125 and Inconel 718 nickel-based superalloys [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5/6/7/8): 1649-1661.

收稿日期: 2020-09-22

(上接第 31 页)

- [2] 孙智超, 高长水. 基于 Plant Simulation 的汽车生产线仿真技术研究[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(6): 161-165.
- [3] 缪晨, 谢晶. 冷库空气幕流场的非稳态数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 246-253, 299-300.
- [4] 陈静, 袁建平, 方正. 地铁车站防烟空气幕阻烟效果模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(11): 1431-1435.
- [5] 黄冬梅, 梅秀娟, 兰彬, 等. 出口风速对防烟空气幕防烟效果影响的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(2): 31-34.
- [6] SHU C, WANG L Z, ZHANG C, et al. Air curtain effectiveness rating based on aerodynamics [J]. Building and Environment, 2020, 169: 106582.
- [7] YANG S W, ALRAWASHDEH H, ZHANG C, et al. Wind

effects on air curtain performance at building entrances [J]. Building and Environment, 2019, 151: 75-87.

- [8] 王俊. 冷库空气幕的实验研究及数值模拟[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [9] 南晓红, 何媛, 刘立军. 冷库门空气幕性能的影响因素[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 334-338.
- [10] 缪晨, 谢晶. 空气幕的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 237-240, 262.
- [11] 迪特马尔·威兰, 奥利弗·伊格劳尔, 克里斯托夫·克尼赛尔, 等. 带有用于吹入气态流体的装置的加工腔: 中国, 103189702A [P]. 2013-07-03.

收稿日期: 2020-10-30