

引文格式: 魏颖, 房晓龙, 曲宁松. TB2 钛合金电化学机械抛光试验研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(10): 77–84.

WEI Ying, FANG Xiaolong, QU Ningsong. Experimental investigation on electrochemical mechanical polishing TB2 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(10): 77–84.

TB2 钛合金电化学机械抛光试验研究

魏 颖, 房晓龙, 曲宁松

(南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 航天器用火箭连接带的材料为 TB2 钛合金, 对表面质量要求严格。提出电化学–电化学机械组合抛光 TB2 钛合金的方法, 通过机械作用控制表面 TiCl_4 黏性层厚度, 设计了固结磨料工具阴极, 搭建了电化学机械抛光试验系统。开展了不同组合形式的电化学–电化学机械组合抛光优选试验, 研究了电压、工具转速、进给速度等工艺参数对组合抛光后表面质量的影响, 最后, 在电压 25 V、工具阴极转速 100 r/min、工具阴极进给速度 30 mm/min, 电化学抛光 1 次 + 电化学机械抛光 1 次组合形式交替加工 15 次的条件下, 获得了表面粗糙度 $R_a 0.031 \mu\text{m}$ 、 $S_a 0.082 \mu\text{m}$ 的表面。实现了 TB2 钛合金薄板零件的连续抛光。

关键词: TB2 钛合金; 电化学机械抛光; 组合抛光; 薄板零件; 表面粗糙度

Experimental Investigation on Electrochemical Mechanical Polishing TB2 Titanium Alloy

WEI Ying, FANG Xiaolong, QU Ningsong

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The material of satellite rocket connecting belt is TB2 titanium alloy, which has strict requirements on surface quality. A novel method of electrochemical–electrochemical mechanical polishing of TB2 titanium alloy was proposed, the thickness of adhesive layer of TiCl_4 near workpiece surface is controlled by mechanical action. A tool with consolidated abrasive was designed and a electrochemical mechanical polishing system was established. Experiments were carried out to investigate the effects of different combination modes of electrochemical polishing and electrochemical mechanical polishing on surface quality, and the influences of typical process parameters such as voltage, tool rotation speed and feed rate on surface quality. Finally, under the conditions of machining voltage 25 V, tool rotation speed 100 r/min and tool feed speed 30 mm/min, a smooth surface with surface roughness $R_a 0.031 \mu\text{m}$ and $S_a 0.082 \mu\text{m}$ was obtained after alternating electropolishing and electrochemical mechanical polishing for 15 times. The continuous polishing of TB2 titanium alloy sheet parts was realized.

Keywords: TB2 titanium alloy; Electrochemical mechanical polishing; Combined polishing; Sheet metal; Surface roughness

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.10.077

TB2 是近 β 型钛合金, 具有蠕变时效断裂韧性高、耐腐蚀性好、焊接性能优良等优点, 常用于航天器火箭连接带的制造^[1–3]。火箭连接带为大长度薄壁板材, 工作时需承受大加速度振动产生的拉力、弯矩、剪力等载荷, 表面质量要求高^[4–5]。因材料的高硬度和低导热性, 机械抛光 TB2 钛合金可能会出现表面烧伤; 化学抛光 TB2 钛合金采用强酸溶液, 不满足环保要求, 且表面容

易出现腐蚀坑貌。目前, 火箭连接带表面大多通过手工打磨, 劳动强度大、生产效率低^[6]。

电化学机械抛光是一种将电化学抛光和机械抛磨相结合的复合抛光方法, 其主要过程是阳极发生电化学溶解, 表面形成钝化膜; 机械作用去除表面凸起处的钝化膜, 使基底暴露在电解液中快速溶解^[7–8]。电化学机械抛光不受材料硬度和形状的限制, 广泛应用于模具和

复杂表面的抛光。在电化学机械抛光过程中,大约 90% 的材料通过电化学溶解去除,机械作用只去除少量的材料^[9-11]。Goswami 等^[12]发现在加工 Al_2O_3-Al 复合材料时,固结磨料的电化学机械抛光磨削力比单纯机械加工磨削力降低了 75%~95%。Xu 等^[13]对 YG8 硬质合金整体叶轮进行电化学机械抛光,表面粗糙度 R_a 从 0.85 μm 降至 0.215 μm 。刘新龙等^[14]采用超声磁粒磨料电化学机械抛光 TC4 钛合金板材,表面粗糙度 R_a 从 1.92 μm 降至 0.09 μm ,表面残余应力由 +186 MPa 转变为 -51 MPa。

氯化钠乙二醇溶液是一种无毒醇盐电解液,常用于钛合金等易氧化金属材料的电化学抛光。Fushimi 等^[15]研究了钛在氯化钠乙二醇溶液中的电化学溶解行为,发现溶解的 Ti^{4+} 与溶液中的 Cl^- 反应生成的 $TiCl_4$ 是控制表面溶解速率的关键,但过厚的 $TiCl_4$ 层会阻碍电化学过程中的传质行为。 $TiCl_4$ 在常温下是一种具有高黏度的液态物质,需要强力的搅拌才能去除。Kim 等^[16]在氯化钠乙二醇溶液中加入体积分数 20% 的乙醇,使 $TiCl_4$ 在电解液中的溶解度提高,更容易被去除,获得了表面粗糙度 R_a 2.341 nm 的最佳表面。Huang 等^[17]提出工件运动电化学抛光方案,通过控制工件速度来控制黏性层厚度,提高表面质量。目前尚无关于 TB2 材料薄壁构件电化学机械抛光的研究报道。

本文采用氯化钠乙二醇溶液,提出工件浸液模式下的电化学-电化学机械组合抛光方法,采用机械抛磨刮去表面的黏性产物,以提高电化学抛光速率,通过电化学-电化学机械过程的交替组合来控制 $TiCl_4$ 层厚度,提高表面质量均匀性;设计固结磨料一体化工具阴极及电化学机械抛光试验装置,试验研究电化学-电化学机械组合抛光交替形式以及典型工艺参数对表面质量的影响规律。

1 电化学机械抛光原理

机械抛磨、电化学机械抛光方法原理如图 1 所示(其中, ω 为工具阴极转速; V_1 、 V_2 、 V_3 为不同的工具阴极扫描速度),工件浸泡在氯化钠乙二醇溶液中,工具阴极旋转的同时沿着工件表面往复运动。

加工主要分为以下 3 个过程。

(1)机械抛磨。作为电化学机械抛光的前处理工序,阴极磨料切入工件表面,即加工间隙 $d < 0$,电源不通电,磨削去除表面氧化层,如图 1 (a) 所示,该步骤目的是去除表面氧化层,快速降低表面粗糙度。

(2)电解作用下的均匀黏性层生成(低电流密度电化学抛光)。工具阴极远离工件,即 $d > 0$,电源通电,表面形成 $TiCl_4$ 黏性层,如图 1 (b) 所示,工具阴极快速旋转,并以较快的速度沿工件表面往复运动。

(3)电化学机械抛光。阴极磨料接触 $TiCl_4$ 黏性层,即 $d <$ 黏性层厚度 H (数百 μm),电源通电,如图 1 (c) 所示,工具磨料快速刮除部分黏性层,工件本体金属裸露于电场中进行电化学抛光,最终达到表面质量要求。该方法具有以下特点:加工区黏性层被阴极磨料刮除减薄,保证加工区材料的正常电化学溶解;非加工区由于距离阴极较远、电场强度较弱和黏性层较厚的原因,电流密度低,材料基本不发生溶解。

2 电化学机械抛光试验系统

建立了图 2 所示的电化学机械抛光试验系统,主要包括移动平台及运动控制系统、步进电机及控制单元、电解液循环系统、直流电源及电流采集系统。加工运动包括两个部分:一是机床运动控制阴阳两极间隙和工具阴极往复运动;二是步进电机控制工具阴极的旋转。在试验加工区,工件通过导电弹簧、导线与电源正极相连;阴极通过夹头连接到电机转轴,与电源负极相连。电解

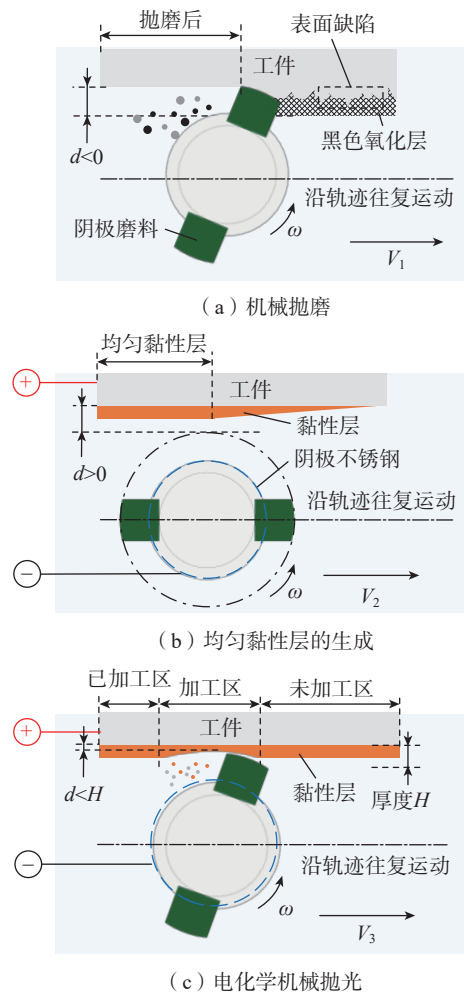


图 1 浸液式电化学机械抛光原理图

Fig.1 Schematic diagram of immersion electrochemical mechanical polishing

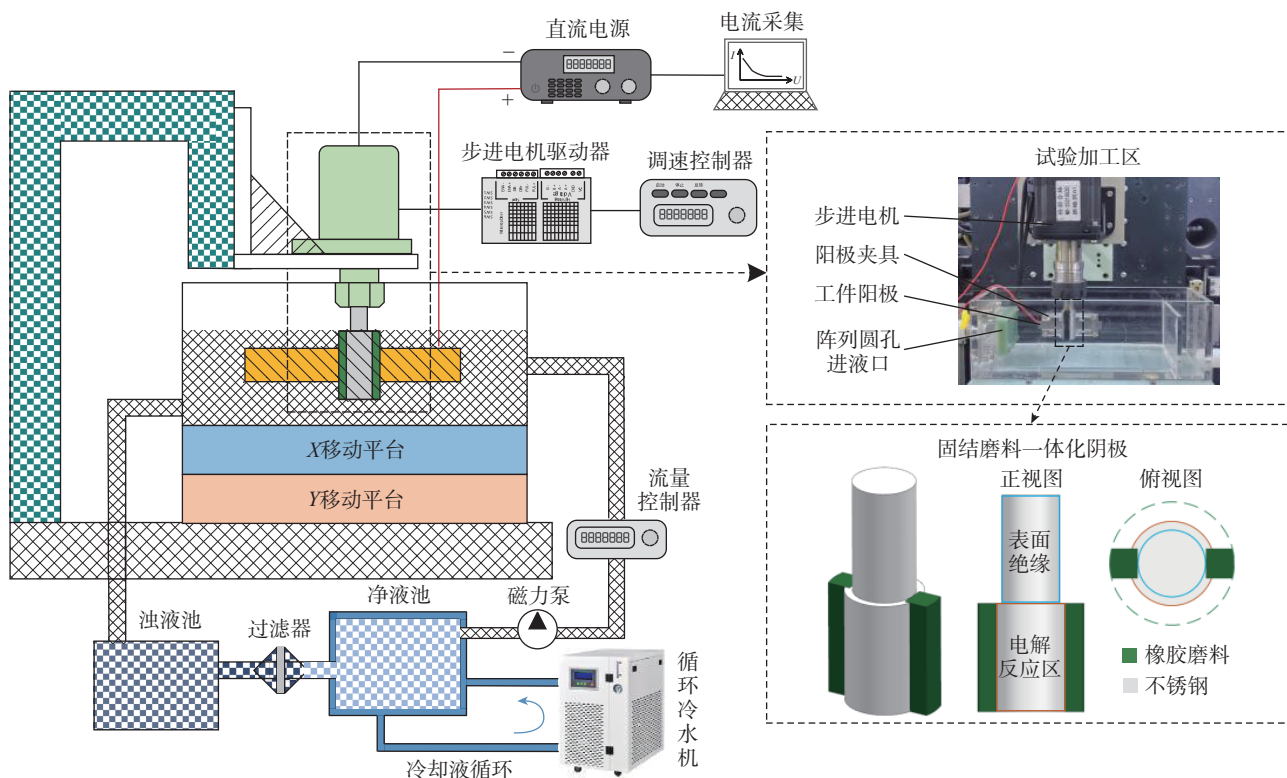


图2 电化学机械抛光试验系统

Fig.2 Electrochemical mechanical polishing test system

液循环系统主要用于：(1)过滤机械磨削和电化学抛光产生的加工产物，维持溶液电导率，防止磨削杂质黏附在工件表面；(2)带走加工区机械磨削和电化学抛光过程中产生的加工热，通过循环冷水机来保证电解液温度恒定。试验用电源为艾德克斯 IT6722 可编程直流电源，加工过程中借助相应的电源控制软件采集电流数据。在固结磨料一体化阴极，其工作面两侧对称安装了橡胶磨料。该阴极结构主要是保证机械磨削和电化学抛光的交替进行，异形结构旋转能够带动周围的电解液流动，带走加工产物。试验采用 1 mol/L 的氯化钠乙二醇电解液，电解液温度控制在 25 ℃，侧向冲液流速设置为 0.8 m/s。工件尺寸为 10 mm × 80 mm，原始表面粗糙度 R_a 约为 0.4 μm。

加工前后，样品采用乙醇和去离子水超声处理 5 min；采用光学显微镜 (VHX 6000, Keyence, 日本) 观察工件表面微观形貌，采用接触式泰勒粗糙度轮廓仪 (Talysurf i-Series 5, Taylor Hobson) 测量工件表面粗糙度。

3 结果与讨论

3.1 电化学机械抛光试验

图 3 为记录的电化学机械抛光过程加工电流变化情况，工具运动流程如图 3 (a) 所示，阴极进给速度设置为 40 mm/min，阴极从 A 点出发，并在 A、B 之间往复

运动，阴极从 A 点运动到 B 点约 100 s。电化学机械抛光典型电流变化过程为：(1) 加工初期，表面黏性产物产生，电流不断下降，阴极进给约 100 s 后运动至 B 点。工具由 B 点向 A 点运动过程中，B 点处的黏性层经历两次连续的机械去除，黏性层更薄，因此电流密度上升，如图 3 (b) 红色箭头处；(2) 随着阴极运动，远离工具阴极的阳极表面生成了少量黏性产物，电流开始缓慢下降。当阴极再次运动到 A 点，电流再次上升，如图 3 (b) 蓝色箭头处。阴极运动在 B 点折返时的电流上升的幅度高于 A 点，这与工具阴极转向和平动方向有关。当从 B 点向 A 点运动时，被刮去的黏性层堆积在运动方向后，使 BC 段的黏性层较厚，如图 3 (a) 所示；当从 A 点向 B 点运动时，堆积的黏性层在运动方向前方，AC 段无黏性层堆积现象。因此，B 点处黏性层比 A 点更厚，机械作用效果更明显，电流变化更快。

电化学机械抛光后的表面形貌如图 4 所示。表面存在直径约 60 μm 的腐蚀坑，以及沿工具阴极运动方向的加工痕迹，这主要是由于电化学机械抛光阶段，黏性层的生成速率远低于工具磨料去除部分黏性产物的速率，导致工件表面黏性层较薄，电流密度较大。抛光后的表面粗糙度为 R_a 0.135 μm。

3.2 电化学-电化学机械组合抛光试验

电解机械抛光过程中工件表面黏性层较薄，表面溶

解不均匀,存在明显的加工痕迹和腐蚀坑。为防止黏性层被机械作用过度去除,提出电化学-电化学机械组合抛光的形式。基于浸液电化学机械抛光原理,电化学-电化学机械组合抛光的工艺路线为:机械抛磨→电化学→电化学机械→电化学→电化学机械,如图5所示。

为了保证机械作用调控黏性层厚度的效果,以抛光1个工件长度为循环单位,按照电化学抛光和电化学机械抛光长度不同设计了4种组合抛光方案。方案1为电化学抛光1次+电化学机械抛光1次(电化学抛光时工具阴极运动1个工件长度,电化学机械抛光时工具阴极运动1个工件长度,交替进行抛光);方案2为电化学抛光1次+电化学机械抛光2次;方案3为电化学抛光2次+电化学机械抛光1次;方案4为电化学抛光2次+电化学机械抛光2次。该过程中通过控制工具阴极的拾刀来实现电化学抛光和电化学机械抛光的交替。

不同电化学-电化学机械组合抛光形式的加工电流变化如图6所示,其中红色方框处为电化学加工区

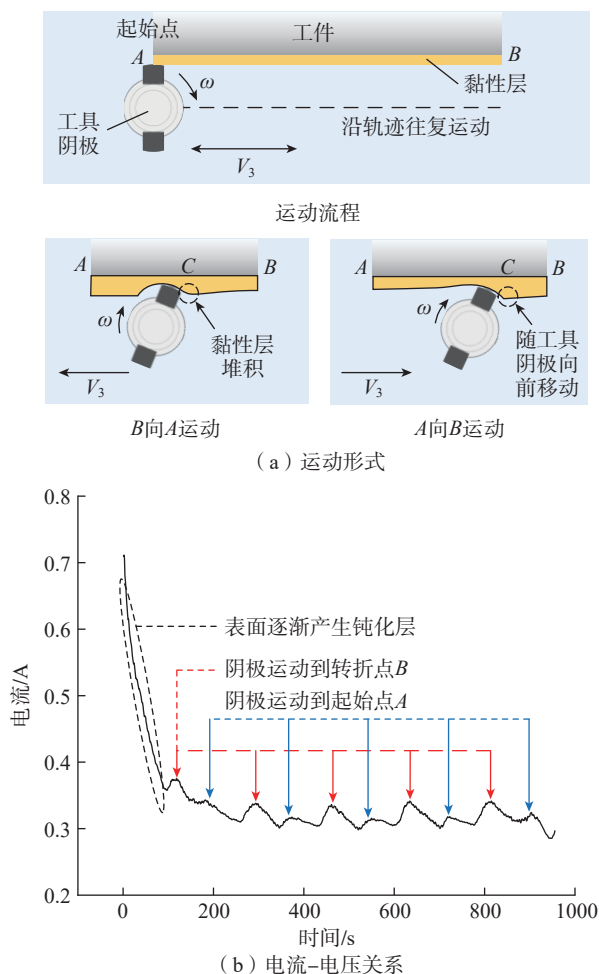


图3 电化学机械抛光的加工电流及分析

Fig.3 Processing current and analysis of electrochemical mechanical polishing

域。方案1电化学抛光1次+电化学机械抛光1次模式的电流如图6(a)所示,电流会出现蓝色箭头所示的迅速上升,电流最大值与最小值相差约0.15 A。这是因为:(1)电化学抛光模式下(d 约为5 mm),阴极运动到第1次转折点时,电流会因重复的机械作用引起黏性层减薄而增加;(2)电化学抛光转为电化学机械抛光,阴阳两极间隙减小(d 约为0.1 mm),电流密度上升。采用其余3种形式加工,红色虚线框内为电化学抛光区,电化学机械加工区的电流变化与图3(b)的电化学机械加工电流基本一致。

加工后工件表面形貌和粗糙度变化如图7和8所示。采用方案1电化学抛光1次+电化学机械抛光1次的形式,从图7(a)可以发现,表面微观形貌存在少许微小的腐蚀点,其表面粗糙度为 $R_a 0.039 \mu\text{m}$ 。采用方案2电化学抛光1次+电化学机械抛光2次和方案3电化学抛光2次+电化学机械抛光1次形式,表面出现了更多的微小腐蚀点,这主要是由于黏性层的厚度过薄或过厚导致,电化学抛光1次+电化学机械抛光2次表面粗糙度为 $R_a 0.088 \mu\text{m}$,方案3电化学抛光2次+电化学机械抛光1次的表面粗糙度为 $R_a 0.071 \mu\text{m}$ 。采用方案4电化学抛光2次+电化学机械抛光2次的形式时,表面黏性层在过厚和过薄的状态频繁交替,表面具有明显的凹凸不平形貌,表面粗糙度 R_a 高达 $0.243 \mu\text{m}$ 。



图4 电化学机械抛光的表面形貌

Fig.4 Surface morphology using electrochemical mechanical polishing

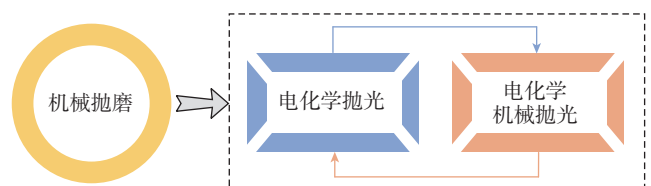
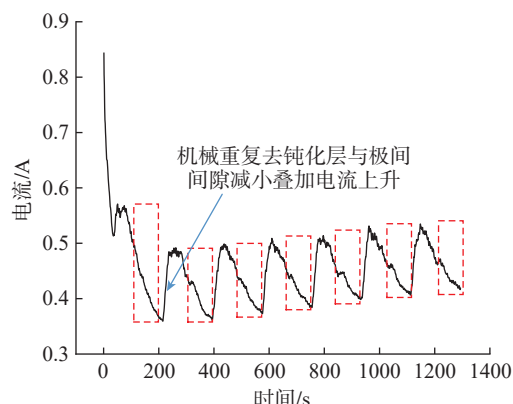
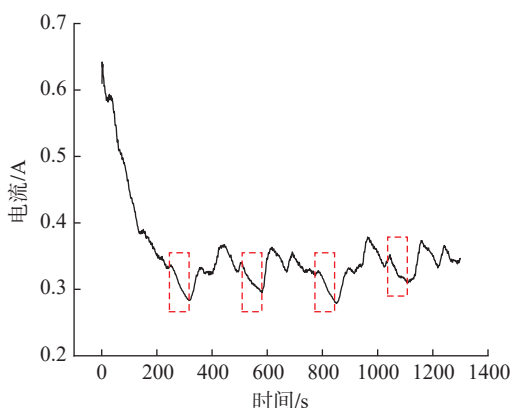


图5 电化学-电化学机械组合抛光的工艺路线

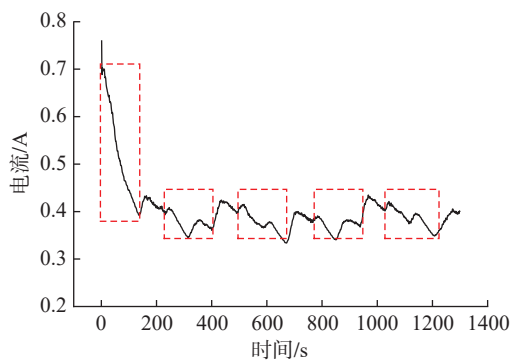
Fig.5 Process route of electrochemical-electrochemical mechanical polishing



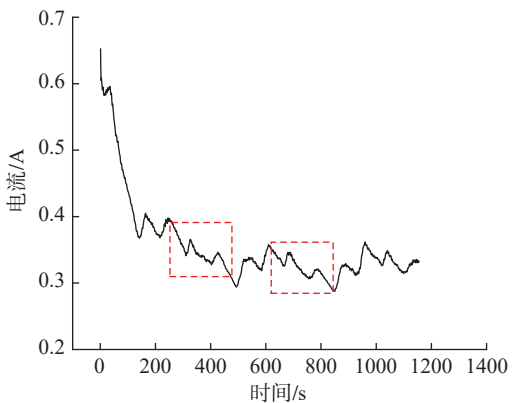
(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3



(d) 方案4

图6 不同组合形式的加工电流图

Fig.6 Current waveforms under different polishing modes

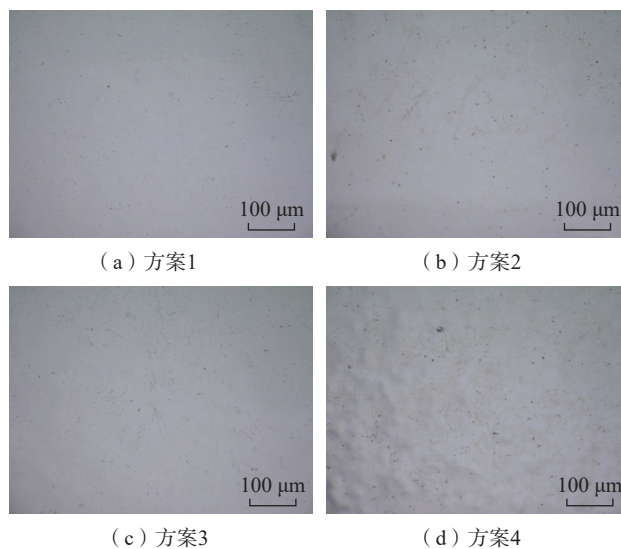
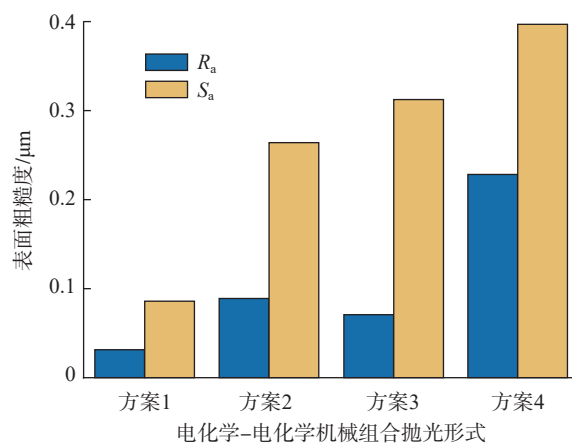


图7 不同组合形式下的抛光表面微观形貌

Fig.7 Morphology of polished surfaces under different polishing modes



电化学-电化学机械组合抛光形式

图8 不同组合形式下抛光表面粗糙度

Fig.8 Surface roughness of polished surfaces under different polishing modes

3.3 典型工艺参数对电化学-电化学机械组合抛光表面形貌的影响

选取方案1的组合抛光方式。对加工电压、工具阴极转速、进给速度对表面质量的影响进行了研究,参数设计如表1所示。

3.3.1 加工电压对表面质量的影响

不同加工电压加工后的表面形貌和粗糙度变化如图9和10所示(转速200 r/min、进给速度30 mm/min)。在电压15 V时,杂散腐蚀严重,这是因为电流密度太低,表面溶解不均匀,表面粗糙度 R_a 高达1.34 μm ;在电压20 V时,电流密度有所提高,表面开始变得光滑,但存在图9(b)所示的微坑,表面粗糙度为 R_a 0.091 μm ;电压25 V时,表面变得光滑平整,表面粗糙度为 R_a 0.057 μm ;电压增加至30 V时,电流密度上升过快,表面出现了许

多微腐蚀点,表面粗糙度为 $R_a 0.123 \mu\text{m}$ 。材料去除率随电压的上升不断增加。

3.3.2 工具阴极转速对表面质量的影响

不同工具阴极转速加工后的表面形貌和粗糙度变化如图 11 和 12 所示。转速为 10 r/min 时,表面出现直径约 $60 \mu\text{m}$ 的腐蚀坑,这是由于黏性层黏性大,转速较低时刮去的部分黏性产物仍黏附在表面;表面粗糙度为 $R_a 0.12 \mu\text{m}$ 。当转速在 100~200 r/min 时,获得的表面质

量较好;当转速在 100 r/min 时,表面粗糙度 $R_a 0.04 \mu\text{m}$ 、 $S_a 0.222 \mu\text{m}$ 相对最佳。当转速增加至 300 r/min 时,电极刮除作用太强,残留的黏性层过薄,材料溶解过快,使得表面起伏不平;表面粗糙度 R_a 增加至 $0.25 \mu\text{m}$, S_a 增加至 $0.326 \mu\text{m}$ 。随着工具阴极转速的增加,材料去除率不断增加,并且当转速在 300 r/min 时,材料去除率趋于稳定,约为 $1 \mu\text{m}/\text{min}$ 。

3.3.3 工具阴极进给速度对表面质量的影响

不同进给速度加工后的表面形貌和表面粗糙度如图 13 和 14 所示。当进给速度为 10 mm/min 时,从图 13 (a) 可以看出,表面密集分布着直径约为 $30 \mu\text{m}$ 的腐蚀坑。这是由于进给速度较低,阳极表面加工区的机械去黏性层作用增强,黏性层厚度过薄;而靠近加工区的表面又堆积了较厚的黏性层,导致表面溶解不均匀。当速度增加至 20~30 mm/min 时,获得较好的表面

表 1 电化学-电化学机械组合抛光单因素试验参数

Table 1 Single factor experimental parameters for electrochemical-electrochemical mechanical polishing

参数	值
工具阴极转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	10, 100, 200, 300
电压/V	15, 20, 25, 30
进给速度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	10, 20, 30, 40

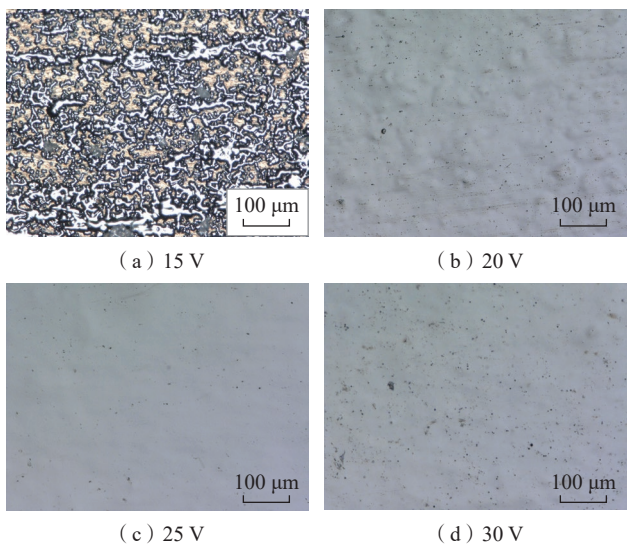


图 9 不同加工电压下组合抛光表面微观形貌

Fig.9 Morphology of polished surfaces at different voltages

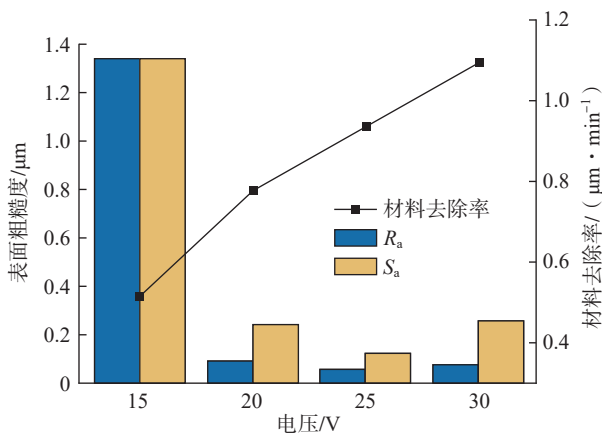


图 10 不同加工电压下表面粗糙度

Fig.10 Surface roughness of polished surfaces at different voltages

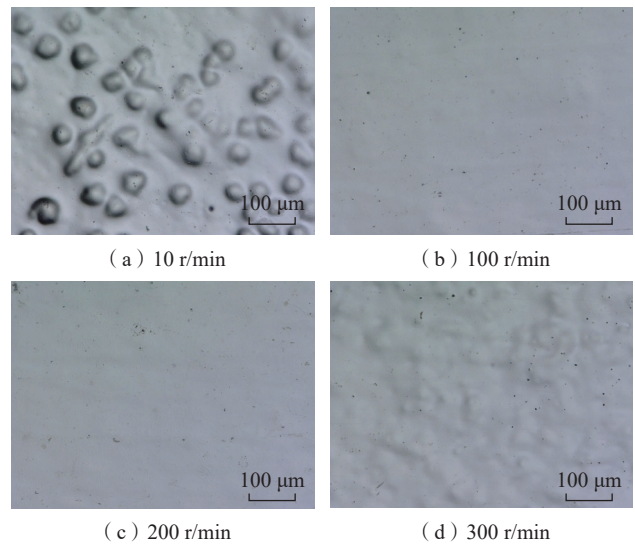


图 11 不同工具阴极转速下组合抛光表面微观形貌

Fig.11 Morphology of polished surfaces at different cathode speeds

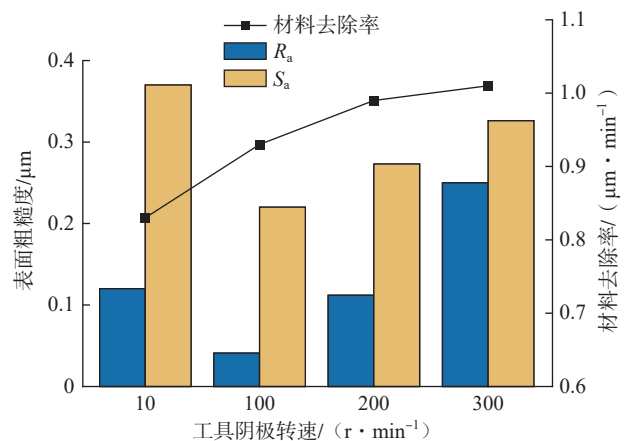


图 12 不同工具阴极转速下表面粗糙度

Fig.12 Surface roughness of polished surfaces at different cathode speeds

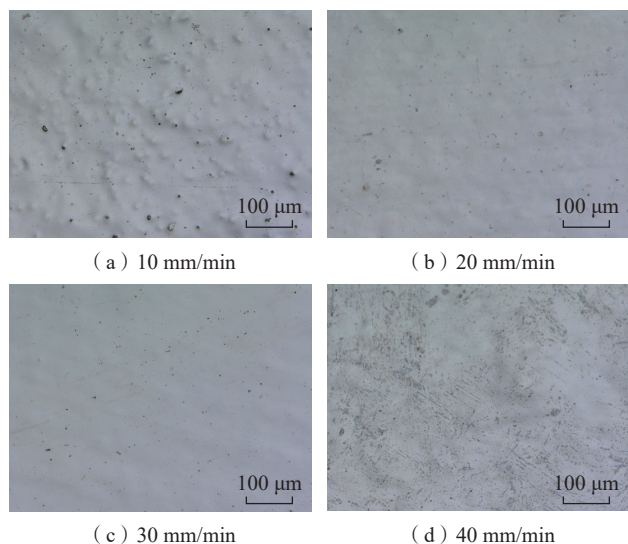


图 13 不同工具阴极进给速度下组合抛光表面微观形貌

Fig.13 Morphology of polished surfaces at different feed rates

质量,当进给速度为 20 mm/min 时,表面粗糙度 R_a 为 $0.058 \mu\text{m}$;当进给速度为 30 mm/min 时,表面粗糙度为 $R_a 0.056 \mu\text{m}$ 。当速度达到 40 mm/min 时,移动速度过快,电化学溶解不够充分,使得表面粗糙度改善不明显,表面粗糙度为 $R_a 0.101 \mu\text{m}$ 、 $S_a 0.274 \mu\text{m}$ 。材料去除率随阴极进给速度的变化差别不大,在 $0.95 \mu\text{m}/\text{min}$ 浮动。

最终采用优化的参数组合:电化学抛光阴阳两极加工间隙为 5 mm,电化学机械抛光加工间隙为 $100 \mu\text{m}$,加工电压为 25 V,工具阴极进给速度为 30 mm/min,工具阴极转速为 100 r/min,电化学与电化学机械抛光交替 15 次(加工时间约 30 min)。获得了表面粗糙度 $R_a 0.031 \mu\text{m}$ 、 $S_a 0.082 \mu\text{m}$ 的表面,抛光前后的零件实物如图 15 所示。传统的机械抛光在加工 1 min 内将表面粗糙度 R_a 从 $2.4 \mu\text{m}$ 降至 $0.2 \mu\text{m}$,但在后续的加工过程中表面粗糙度降低缓慢^[18]。本研究在加工初期采用机械抛磨前处理迅速降低粗糙度,然后利用电化学-电化学机械组合抛光实现表面粗糙度的进一步降低,提高了加工效率和加工后的表面质量。

4 结论

(1) 针对 TB2 材料薄板零件制造需求提出了电化学-电化学机械组合抛光工艺路线,设计了固结磨料异型阴极结构,建立了浸液模式下的电化学机械抛光试验系统。

(2) 试验研究了不同形式组合抛光对工件的表面粗糙度、表面形貌的影响,结果表明,在电化学抛光 1 次+电化学机械抛光 1 次的交替形式下, TiCl_4 黏性层厚度控制最为合适,得到的表面质量相对最好。

(3) 研究了电压、工具转速、进给速度等工艺参数对电化学机械组合抛光后表面质量的影响,在电压 25

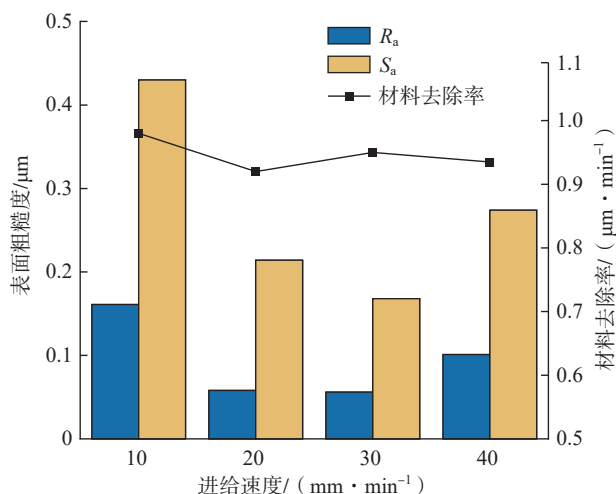


图 14 不同工具阴极进给速度下表面粗糙度

Fig.14 Surface roughness of polished surfaces at different feed rates

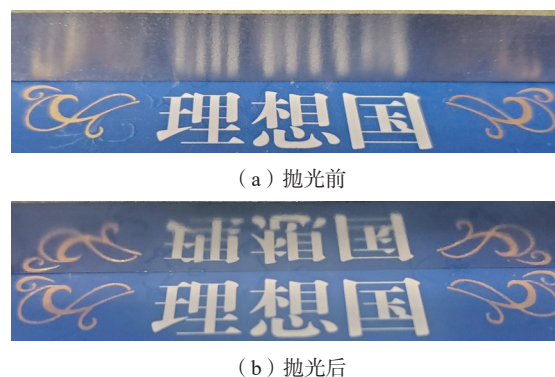


图 15 优化参数下电化学-电化学机械组合抛光实物

Fig.15 Surface generated by electrochemical-electrochemical mechanical polishing with optimized parameters

V、工具阴极转速 100 r/min、工具阴极进给速度 30 mm/min,电化学与电化学机械抛光交替 15 次的条件下获得了表面粗糙度 $R_a 0.031 \mu\text{m}$ 、 $S_a 0.082 \mu\text{m}$ 的表面。

参考文献

- [1] 吴为,张凯锋,龚泰宾. TB2 钛合金扩散接头强度的影响因素[J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(2): 55-59.
- WU Wei, ZHANG Kaifeng, GONG Taibin. Influencing factors of strength of diffusion bonding TB2 alloy joint[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002, 32(2): 55-59.
- [2] 李重河,朱明,王宁,等. 钛合金在飞机上的应用[J]. 稀有金属, 2009, 33(1): 84-91.
- LI Chonghe, ZHU Ming, WANG Ning, et al. Application of titanium alloy in airplane[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(1): 84-91.
- [3] 李思兰,侯智敏,尹雁飞,等. 热处理对热加工态 TB2 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 31-35.
- LI Silan, HOU Zhimin, YIN Yanfei, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TB2 titanium alloy in hot working state[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(6): 31-35.
- [4] 马越. TB2 钛合金蠕变行为研究及其在卫星条带应用[D].

上海:上海交通大学,2016.

MA Yue. Creep behavior of TB2 titanium alloy and applications in satellite band[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

[5] 杨冬雨,付艳艳,惠松骁,等. 高强度高韧钛合金研究与应用进展[J]. 稀有金属,2011,35(4): 575-580.

YANG Dongyu, FU Yanyan, HUI Songxiao, et al. Research and application of high strength and high toughness titanium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(4): 575-580.

[6] 崔伟,李勋,苏贵鸿,等. TB6 钛合金抛光表面完整性试验[J]. 航空制造技术,2017,60(4): 73-78.

CUI Wei, LI Xun, SU Guihong, et al. Experiment on surface integrity of polishing for titanium TB6[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 73-78.

[7] 李和仙,刘伟,李梅,等. 谈电化学机械抛光[J]. 机电技术,2010,33(5): 63-64,68.

LI Hexian, LIU Wei, LI Mei, et al. On electrochemical mechanical polishing[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2010, 33(5): 63-64, 68.

[8] EL KHALICK MOHAMMAD A, WANG D W. Electrochemical mechanical polishing technology: Recent developments and future research and industrial needs[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5): 1909-1924.

[9] DUBEY A K, SHAN H S, JAIN N K. Precision microfinishing by electro chemical honing[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2009, 17(4): 364.

[10] DUBEY A K, SHAN H S, JAIN N K. Analysis of surface roughness and out-of-roundness in the electro chemical honing of internal cylinders[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(5): 491-500.

[11] PA P S. Synchronous finishing processes using a combination of grinding and electrochemical smoothing on end-turning surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(3): 277-285.

[12] GOSWAMI R N, MITRA S, SARKAR S. Experimental investigation on electrochemical grinding (ECG) of alumina-aluminum interpenetrating phase composite[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(7): 729-741.

[13] XU B. Five-axis numerical control of electrochemical mechanical polishing of an integral impeller[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15: 12504-12523.

[14] 刘新龙,陈燕,张国富,等. 电解-旋转超声磁粒复合对 TC4 板抛光的研究[J]. 电镀与精饰,2019,41(10): 13-16.

LIU Xinlong, CHEN Yan, ZHANG Guofu, et al. Study on polishing of TC4 plate by electrolysis-rotating ultrasound magnetic particle composite[J]. Plating & Finishing, 2019, 41(10): 13-16.

[15] FUSHIMI K, HABAZAKI H. Anodic dissolution of titanium in NaCl-containing ethylene glycol[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(8): 3371-3376.

[16] KIM D, SON K, SUNG D, et al. Effect of added ethanol in ethylene glycol-NaCl electrolyte on titanium electropolishing[J]. Corrosion Science, 2015, 98: 494-499.

[17] HUANG P, LAI J H, HAN L H, et al. Electropolishing of titanium alloy under hydrodynamic mode[J]. Science China Chemistry, 2016, 59(11): 1525-1528.

[18] 胡垒,孔令叶,阎秋生,等. 基于砂带千页轮的模具抛光加工过程研究[J]. 机电工程技术,2010,39(11): 109-112,146.

HU Lei, KONG Lingye, YAN Qiusheng, et al. Research on polishing process of mould with abrasive belt wheel[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2010, 39(11): 109-112, 146.

通讯作者: 房晓龙,教授,博士,研究方向为电解加工、微细加工和特种加工。

(责编 阳光)

(上接第 76 页)

[11] SALIKOVA A P, BAN' KOVSKAYA I B, KOLOVERTNOV D V, et al. Oxidation of the zirconium boride-silicon nitride composite in the temperature range 1100-1300 °C in air[J]. Glass Physics and Chemistry, 2010, 36(2): 225-231.

[12] GUO Q, HE W T, LI C, et al. High-temperature interface stability of tri-layer thermal environmental barrier coatings[J]. Ceramics International, 2022, 48(7): 9313-9323.

[13] WANG H Y, ZHANG J, SUN L C, et al. Microstructure and phase composition evolution of dual-phase ytterbium silicate coatings plasma sprayed from stoichiometric Yb₂Si₂O₇ feedstock powder[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 437: 128373.

[14] XU Y, HU X X, XU F F, et al. Rare earth silicate environmental barrier coatings: Present status and prospective[J]. Ceramics International, 2017, 43(8): 5847-5855.

[15] 马壮,刘玲,郑伟. 航空发动机环境障涂层: 材料及性能[J]. 现代技术陶瓷,2019,40(5): 331-344.

MA Zhuang, LIU Ling, ZHENG Wei. Environmental barrier coating for aeroengine: Materials and properties[J]. Advanced Ceramics, 2019, 40(5): 331-344.

[16] ZHU D M, LEE K N, MILLER R A. Sintering and cyclic failure mechanisms of thermal and environmental barrier coating systems under thermal gradient test conditions[M]//Ceramic Engineering and Science Proceedings. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008: 505-516.

[17] RAMASAMY S, TEWARI S N, KANG N, et al. Environmental durability of slurry based mullite-gadolinium silicate EBCs on silicon carbide[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(6): 1123-1130.

[18] GARCIA E, MESQUITA-GUIMARÃES J, MIRANZO P, et al. Porous mullite and mullite-ZrO₂ granules for thermal spraying applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(17-18): 4304-4311.

[19] FOURNIER V, QUET A, MEILLOT E, et al. Plasma spraying of mullite and pore formers for thermal insulating applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 406: 126744.

[20] 邓路炜,张晓东,王东升,等. 环境障涂层用纳米结构 Yb₂SiO₅ 粉体喂料的制备与表征[J]. 中国表面工程,2020,33(6): 108-117.

DENG Luwei, ZHANG Xiaodong, WANG Dongsheng, et al. Preparation and characterization of nanostructured Yb₂SiO₅ feedstock for environmental barrier coatings[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(6): 108-117.

[21] YANG M, LI Z G, WANG X Y, et al. Effect of spraying ceramic powder pore structure on thermophysical properties of plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2022, 48(1): 1125-1131.

通讯作者: 王铀,教授,博士生导师,研究方向为纳米表面工程。

(责编 阳光)