

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2018.12.002

# 基于电解-磁力复合研磨法的表面光整加工

许召宽, 韩冰, 陈燕, 刘顺

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** 采用电解-磁力复合研磨对 Ti6Al4V 钛合金板表面进行加工, 研究了电解液温度和磁性研磨粒子粒径对表面加工质量和加工效率的影响。结果表明: 当在电解液温度 30 ℃ 下, 采用粒径为 185  $\mu\text{m}$  的磁性研磨粒子对 Ti6Al4V 表面进行研磨 25 min 时, 表面粗糙度  $R_a$  从原始的 1.13  $\mu\text{m}$  降至研磨后的 0.12  $\mu\text{m}$ , 表面的残余应力从应力 +187 MPa 变为应力 -57 MPa, 试件表面的磨削纹理、凹坑、微裂纹缺陷被有效去除, 且有利于零件表面疲劳寿命的改善。

**关键词:** 钛合金; 电解; 磁力研磨; 电解液温度; 表面粗糙度; 残余应力

中图分类号: TH161+.14

文献标识码: A

## Surface Finishing Based on Electrolysis-Magnetic Force Composite Grinding Method

XU Zhaokuan, HAN Bing, CHEN Yan, LIU Shun

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:** The surface of titanium alloy Ti6Al4V plate was processed by electrolysis-magnetic force composite grinding. The effects of electrolyte temperature and magnetic abrasive particle size on the surface processing quality and machining efficiency were studied. The results showed that the surface roughness of  $R_a$  was decreased from the original 1.13  $\mu\text{m}$  to 0.12  $\mu\text{m}$  after 25 min grinding when the electrolytic temperature was 30 ℃ and the magnetic abrasive particle size was 185  $\mu\text{m}$ . The surface residual stress was changed from +187 MPa to -57 MPa, and the specimen surface grinding texture, pits and micro-cracks were effectively removed which was beneficial to the improvement of the fatigue life of the surface.

**Keywords:** titanium alloy; electrolysis; magnetic abrasive finishing; electrolyte temperature; surface roughness; residual stress

### 引言

钛合金具有较强的耐腐蚀性、良好的耐热性以及高的比强度等优点, 其中 Ti6Al4V 应用领域极广, 主要用在海洋、军工、航空航天、石油化工等领域,

尤其用于制造叶片、深潜器、枪炮管、冷凝器等。然而钛合金主要采用温轧工艺加工生产, 生产的钛合金会有各种缺陷, 包括凹坑、微裂纹等表面缺陷, 这些缺陷严重影响零件的使用寿命<sup>[1-3]</sup>。针对这些缺陷, 任敬心等提出用砂轮磨削钛合金, 其中砂轮是

收稿日期: 2017-12-23

修回日期: 2018-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(51775258)

由碳化硅和刚玉制作而成,由于不好控制磨削用量和砂轮的磨料硬度,易对钛合金表面产生微裂纹、烧伤熔覆物等缺陷<sup>[4-5]</sup>。电化学光整加工是利用电化学微量去除的原理,阳极接工件,阴极接铜棒,电解过程中工件不受硬度的影响,对工件表面进行光整加工,但随着加工的进行,整平效果下降<sup>[6]</sup>。磁力研磨具有温升小、柔性加工、不需要进行工具磨损补偿等优点,因此在复杂模具零件、微型槽和圆的内外表面中应用极广,但由于硬质材料的硬度比较大,磁力研磨对这类材料的加工效果不明显<sup>[7]</sup>。

本文拟采用电解-磁力复合研磨代替传统的加工方法,综合考虑电化学和磁力研磨的有效结合,采用单一变量法,考察电解液的温度和磁性研磨粒子的粒径对钛合金表面加工的影响,得到较优的工艺参数,从而缩短加工时间和得到更好的表面加工质量。此方法综合考虑电化学加工没有机械接触和磁力研磨柔性加工的优点,对不同形状的工件都能达到较好的加工效果,且机械损伤小,延长了磨料使用寿命<sup>[8]</sup>。

## 1 电解-磁力研磨加工机理

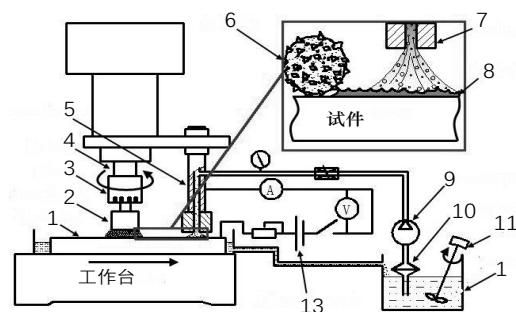
### 1.1 电解-磁力复合研磨装置

图1为电解-磁力复合研磨加工示意图。磁极夹具固定在主轴上,并随主轴旋转,调节磁极与试件的加工间隙为2 mm,填充磁性磨料。阳极为试件,阴极为铜棒,连杆与电极之间开有空孔,利用蠕动泵通过空孔将电解液滴落到阴极和试件之间<sup>[9]</sup>。打开电解电源,同时将蠕动泵启动,随后启动主轴电机,主轴带动磁极旋转,试件随着水平工作台沿水平方向移动。加工过程中试件表面产生电解反应生成相对基体软的钝化膜,磁场中磁性磨粒形成的“磁粒刷”随工作台的移动,移动到钝化膜处并将其去除。加工过程简述为:电解反应→生成钝化膜→“磁粒刷”去除钝化膜,循环往复加工,完成试件表面的光整加工<sup>[10]</sup>。

### 1.2 电解-磁力复合加工工艺

本实验采用长为200 mm,宽为50 mm,厚度为5 mm的Ti6Al4V钛合金。工艺条件为:电解电压为9 V,使用的电解液为16%的NaNO<sub>3</sub>溶液,电解液流速2.5 L/min。主轴转速1000 r/min,进给速率2 mm/s,磁力研磨加工间隙2 mm,磁极材料为Nd-Fe-B,

轴向充磁,直径10 mm,长10 mm。加工中用的研磨液为劳力恩SR-9912水溶性研磨液,加工时间均为25 min。磨料是经过烧结而成的,成分是由质量比为2:1的铁粉和氧化铝混合组成,铁粉的平均粒径为200~250 μm,氧化铝的平均粒径为40~50 μm。通过把烧结的磨料破碎、筛分得到平均粒径为150 μm、185 μm和250 μm等粒径的磨料粒子,并且磨料粒子成分为铁基相和研磨相,铁基相是铁粉组成的,研磨相是氧化铝组成的。



1-试件;2-磁极;3-夹具;4-机床主轴;5-连杆;6-磁性研磨粒子;  
7-阴极铜棒;8-钝化层;9-蠕动泵;10-过滤装置;11-搅拌装置;  
12-NaNO<sub>3</sub>电解液;13-电解电源

图1 电解-磁力复合研磨装置图

### 1.3 电解-磁力复合加工检测设备

对加工试件采用表面粗糙度仪每5 min测量1次表面粗糙度 $R_a$ ,每次取5个点求平均值。用分度值为1 mg的天平每5 min测量1次试件的质量,材料去除率 $\omega$ 按公式(1)计算<sup>[11]</sup>。为了观察表面形貌,选用超景深3D显微镜。

$$\omega = (\text{原始质量} - \text{加工后质量}) / (\text{原始质量} \times \text{加工时间}) \quad (1)$$

加工试件的残余应力用X射线残余应力分析仪检测。根据X射线衍射 $\sin^2\psi$ 应力分析法<sup>[12]</sup>,通过X射线残余应力分析仪在衍射角范围内选取的6个点来测定晶面间距 $d(\mu\text{m})$ ,并进行线性拟合,应力按式(2)计算。

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1 + \nu) \sin^2\psi} \left[ \frac{d_\psi - d_n}{d_n} \right] \quad (2)$$

式中, $\sigma_\varphi$ 为 $\varphi$ 反向上的应力,MPa; $\nu$ 为泊松比, $\nu=0.33$ ;E为杨氏模量, $E=110 \text{ GPa}$ ; $\psi$ 为倾斜角度, $(^\circ)$ ; $\varphi$ 为衍射角度, $(^\circ)$ ; $d_n$ 为初始倾斜角 $(0^\circ)$ 的晶面材料初始表面受到初加工时的塑性变形间距, $\mu\text{m}$ ; $d_\psi$ 为倾斜角的晶面间距, $\mu\text{m}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 电解液温度对表面粗糙度和材料去除率的影响

首先用粒径为  $185\ \mu\text{m}$  磨料,其他参数同 1.2。在温度为  $10$ 、 $20$ 、 $30$ 、 $40\ ^\circ\text{C}$  下对  $\text{Ti6Al4V}$  表面分别进行加工试验,结果见图 2。从图 2(a)可知,升高电解液温度,表面粗糙度会下降,表面磨削纹理基本去除,表面趋于平整。当电解液温度为  $10\ ^\circ\text{C}$  时,表面粗糙度由原始  $1.13\ \mu\text{m}$  降至  $0.20\ \mu\text{m}$ ,这是因为温度低,电解液的导电性能差,试件表面钝化比较严重,容易引起阳极表面不均匀溶解或形成磁力研磨难去除的致密“黑膜”<sup>[13]</sup>。当电解液温度为  $30\ ^\circ\text{C}$  时,表面粗糙度  $R_a$  在加工  $25\ \text{min}$  后由原始的  $1.13\ \mu\text{m}$  降至  $0.12\ \mu\text{m}$ 。当再继续增大电解液温度到  $40\ ^\circ\text{C}$ ,与电解液温度为  $30\ ^\circ\text{C}$  相比,表面粗糙度没有更好,反而有增大的趋势,这是因为温度过高会引起杂散腐蚀,从而对已经加工过的表面产生了腐蚀破坏;还会因不能生成钝化膜,磁力研磨磨削剧烈,从而导致表面烧伤<sup>[13]</sup>。由图 2 看出,在前  $5\ \text{min}$  的研磨效率较高,这是因为试件原始表面存在许多波峰,波峰处优先发生电解反应生成钝化膜,磁性研磨粒子研磨后,波峰处的钝化膜被去除,而波谷处的钝化膜还没有被去除,加工后表面更加平整。在加工  $5\ \text{min}$  后,试件表面越来越平整,因此表面粗糙度的下降速率放缓。由图 2(b)可知,升高电解液温度,材料去除率增大;在加工  $5\ \text{min}$  后,材料去除率放缓。考虑电解液温度和材料去除率对表面粗糙度的综合作用,选择电解液温度为  $30\ ^\circ\text{C}$  时,试件的加工效率和表面质量得到了有效提高。

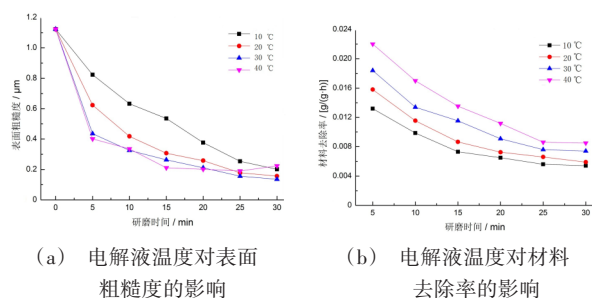


图2 电解液温度对表面粗糙度及材料去除率的影响

### 2.2 磁性研磨粒子粒径对表面粗糙度和材料去除率的影响

设定电解液温度为  $30\ ^\circ\text{C}$ ,其他参数同 1.2,用粒径为  $150$ 、 $185$ 、 $250\ \mu\text{m}$  的磁性研磨粒子对  $\text{Ti6Al4V}$  表面进行加工,其结果如图 3 所示,由图 3(b)得知,磁性研磨粒子粒径越大,材料的去除率也越大。在加工  $25\ \text{min}$  后,在粒径为  $250\ \mu\text{m}$  时材料去除率最大,由图 3(a)可知,粒径为  $250\ \mu\text{m}$  时,表面粗糙度与  $185\ \mu\text{m}$  相比,表面粗糙度反而增大。这是因为磁性研磨粒子在翻滚研磨的过程中,只有一部分对表面加工有研磨作用,一部分粒子在加工表面进行滑擦,一部分粒子对试件表面进行刻划,由于粒径的增大,对表面的划痕就越深,从而造成表面粗糙度值有上升的趋势。当使用粒径为  $150\ \mu\text{m}$  的磁性研磨粒子时,研磨  $25\ \text{min}$  后,  $R_a$  为  $0.19\ \mu\text{m}$ ,材料的去除总量为  $210\ \text{mg}$ ,这是因为粒径为  $150\ \mu\text{m}$  时,相对于粒径为  $185\ \mu\text{m}$  和  $250\ \mu\text{m}$  的粒子,粒径相对较小,粒径减小,粒子上面烧结黏附的用于研磨的氧化铝切削刃也减少,所以每个粒子的切削量也会减小。综合考虑表面粗糙度和材料去除率的影响,温度为  $30\ ^\circ\text{C}$  时,粒径为  $185\ \mu\text{m}$ ,研磨  $25\ \text{min}$  后,表面粗糙度为  $0.12\ \mu\text{m}$ ,达到光整效果,材料去除总量为  $283\ \text{mg}$ ,去除量不会影响试件的质量。

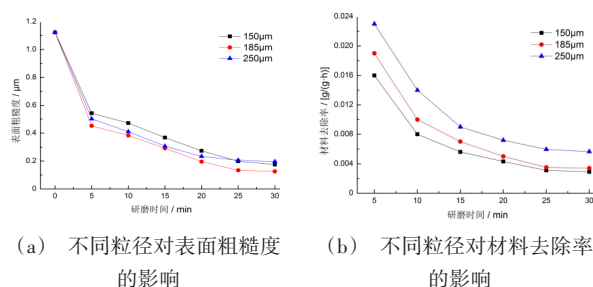


图3 不同粒径对表面粗糙度及材料去除率的影响

### 2.3 电解-磁力复合研磨前后的表面形貌

在电解液温度为  $30\ ^\circ\text{C}$ ,粒径为  $185\ \mu\text{m}$ ,其他参数同 1.2。图 4 为加工前后表面形貌图。图 4(a)表示原始砂轮加工工件的表面形貌,加工后的表面呈条状纹理,纹理方向与加工方向相同且分布不均匀;波峰与波谷之间高度差较大,且表面有划痕、凹坑和微裂纹缺陷。从图 4(b)可以看出,电解磁力复

合研磨后,磨削纹理基本消失、表面均匀平滑,表面质量明显提高。

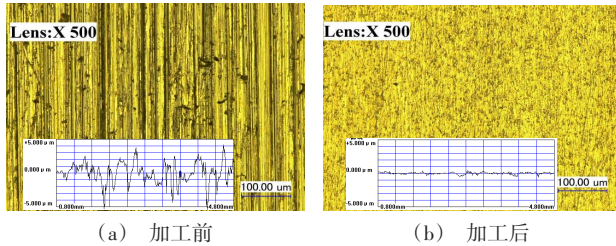


图4 加工前后表面形貌的变化

## 2.4 电解-磁力复合研磨对表面残余应力的影响

在电解液温度为 30 ℃,粒径为 185 μm,其他参数同 1.2。通过 X 射线残余应力分析仪测得的 6 个点,并进行线性拟合,如图 5 所示,试件原始应力为 +187 MPa,通过电解-磁力研磨加工,加工后的试件应力为 -57 MPa,残余应力由拉应力状态变为压应力状态,有利于零件表面疲劳寿命的改善。

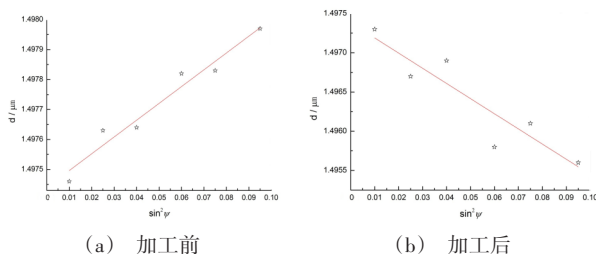


图5 加工前后残余应力的变化

## 3 结论

通过试验得出: Ti6Al4V 在电解液温度为 30 ℃,磁性研磨粒子粒径为 185 μm 的加工工艺下,加工效果最好。通过电解-磁力研磨复合加工 25 min 后,使试件的表面粗糙度从原始的 1.13 μm 降至 0.12 μm,表面的磨削纹理、微裂纹和凹坑缺陷被去除,从而获得良好的表面状态。而且表面的应力由原始的 +187 MPa,在电解-磁力研磨复合加工后表面应力变为 -57 MPa,由拉应力状态变为压应力状态,有利于零件表面疲劳寿命的改善。

## 参考文献

- [1] 庞继明,肖雅静,曲恒磊,等. 不同方法制备的钛及钛合金管坯组织与性能研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(4): 34-36.
- [2] Leyens P M. Titanium and titanium alloys [M]. Weinheim: Wiley-VCH, Co.KGaA, 2003: 17-28.
- [3] 张春江. 钛合金切削加工技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1986: 130-145.
- [4] 张红霞,陈五一,陈志同. SG 砂轮磨削钛合金烧伤机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(1): 22-26.
- [5] 焦佳能,费群星,白凤民,等. 钛合金表面磨粒流加工工艺研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(1): 42-45.
- [6] 阿米娜卡德尔,阿达依谢尔亚孜旦,平宗保,等. 电化学光整加工过程中电流场分布特性[J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 60-65.
- [7] 王显康,陈燕,周坤. 磁力研磨法在微小凹槽表面光针加工中的应用[J]. 机械设计与制造, 2014, (2): 243-249.
- [8] 谭悦,陈燕,曾加恒,等. 电解-磁力复合研磨对 TA18 管内表面光整加工[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(5): 248-252.
- [9] 陈春增,张桂香,赵玉刚,等. 磁力研磨镍基高温合金实验研究[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(4): 6-9.
- [10] 杜兆伟. 镍基高温合金 GH4169 电解-磁力复合研磨加工试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2015.
- [11] 原一高,畅晓振,朱世根. 散料研磨工艺对试件表面质量及材料去除率的影响[J]. 制造技术与机床, 2011, (8): 166-169.
- [12] Ferreira N G, Aramof E, Corat E J, et al. Residual stresses and crystalline quality of heavily boron-doped diamond films analyzed by micro-Raman spectroscopy and X-ray diffraction [J]. Carbon, 2003, 41(6): 1301-1308.
- [13] 张志金,张明岐,曹新鹏,等. 电化学机械复合光整加工技术的研究现状[J]. 材料导报, 2012, 26(13): 12-15.