

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2019.10.004

电解-旋转超声磁粒复合对 Tc4 板抛光的研究

刘新龙, 陈燕, 张国富, 王杰

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁鞍山 114051)

摘要: 为了改善 Tc4 钛合金板材制造零部件的表面质量, 降低其表面粗糙度, 提出了一种高效率的电解-旋转超声磁粒复合研磨抛光方法。设计了电解-旋转超声磁粒复合研磨抛光的实验装置, 对不同加工工艺下所得的合金表面的表面粗糙度、表面残余应力进行分析。结果表明, 经过 20 min 加工后, 复合研磨使表面粗糙度由 $1.92\ \mu\text{m}$ 降至 $0.09\ \mu\text{m}$, 改善了表面质量。表面残余应力由 +186 MPa 转变为 -51 MPa, 即由拉应力变为压应力, 获得更好的表面应力状态。

关键词: Tc4 板材; 电解-旋转超声磁粒复合研磨; 表面粗糙度; 表面残余应力

中图分类号: TH161.14

文献标识码: A

Study on Polishing of Tc4 Plate by Electrolysis-Rotating Ultrasound Magnetic Particle Composite

LIU Xinlong, CHEN Yan, ZHANG Guofu, WANG Jie

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

Abstract: In order to improve the surface quality and reduce the surface roughness of parts made of Tc4 titanium alloy sheet, an electrolysis-rotating ultrasonic magnetic particle composite grinding method was proposed. The experimental device for the method was designed, and the surface roughness and residual stress of the worked alloy with the device under different processing technic were analyzed. The results showed that the surface roughness reduced from $1.92\ \mu\text{m}$ to $0.09\ \mu\text{m}$ by composite grinding after 20 minutes processing time, which improved the surface quality. The residual stress on the surface was changed from +186 MPa to -51 MPa, it meant the form of stress was changed from tensile stress to compressive stress, which could provide a better state of surface stress.

Keywords: Tc4 sheet; electrolysis-rotating ultrasonic magnetic particle composite grinding; surface roughness; surface residual stress

钛合金以其良好的比强度、耐高温、耐腐蚀性等优点, 已成为航空制造业中不可或缺的新型结构材料。随着以波音公司为代表的民用飞机年产量增加, Tc4 钛板材的需求量逐年提高^[1]。但 Tc4 板材

一般通过热轧、冷轧批量生产, 成型后的 Tc4 板材表面质量较差, 不能达到使用要求。近些年, 科研人员们对 Tc4 平面抛光做了大量研究, 邹松华等^[2]利用电镀镍的工艺对 Tc4 表层进行镀膜, 此方法在

收稿日期: 2019-01-31

修回日期: 2019-05-25

通讯作者: 陈燕(1963-), 女, 博士, 教授, 研究方向为精密加工, Email: laochen412@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(51775258、51105178), 辽宁省教育厅基金项目(2016HZPY10)

提高Tc4表面质量的同时,还可以保证较高的加工效率,但是电镀所产生的化学废料存在环境污染的风险。邢绍美^[3]采用技术较为成熟的砂轮磨削方法对Tc4平面进行磨削,但磨削时容易产生大量热量,最高温度可达1500℃,且对磨削刀具工作性能有较高的要求。许召宽^d等^[4]还利用电解-磁粒复合研磨的方法对钛合金板表面进行抛光。

本文在前期工作基础上提出了电解-旋转超声磁粒复合研磨方法,该方法是将电化学腐蚀、旋转超声以及磁粒研磨三者合为一体的研磨方法。首先,工件经过电解腐蚀后,其表层材料会变成硬度低于基体的钝化膜^[5]。然后采用磁粒研磨的方法对钝化膜进行去除,Tc4表层材料在电解-研磨-电解这一循环操作中被逐渐去除。而旋转超声波可以提供“小幅度,高频次”的研磨压力^[6],使磁性研磨粒子在加工过程中得到不断的翻滚与更新^[7],避免研磨粒子的微观研磨被钝化,从而提高磁性研磨粒子的使用寿命,并提高加工效率。本文利用该方法对Tc4钛板进行抛光,研究工艺参数对抛光效果的影响。

2 实验部分

2.1 电解旋转超声磁力复合装置

图1为电解旋转超声磁力复合对Tc4平面抛光加工示意图,图中,1-工作平台;2-Tc4板;3-磁粒研磨刷;4-柱形磁极;5-铜棒;6-滑动变阻器;7-直流电源;8-过滤网;9-电解液槽;10-蠕动泵;11-钝化膜;12-电解液;13-磁性研磨粒子;14-固定支架;15-主电机;16-超声波发生器;17-塑料夹头。

待加工工件与电解装置的阳极相连接,阴极与空心铜棒相连接^[8],超声波发生器通过法兰盘被固定在电机主轴上,并通过电刷与外电路相连,电机

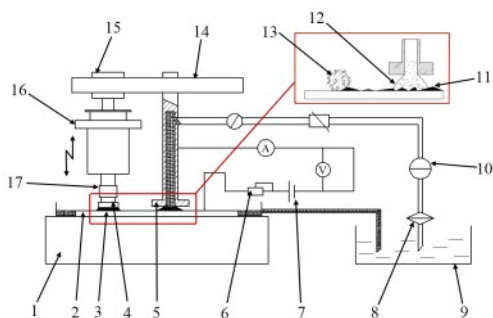


图1 电解-旋转超声磁粒复合研磨加工示意图

转动时带动超声波发生器转动,形成旋转超声波^[6]。磁极通过塑料筒夹被固定在超声波发生器上,电机主轴亦可带动磁极进行转动。工作时,电解液在蠕动泵的驱动下,进入空心铜棒中,不间断的落到工件的待加工表面上,开启直流电源与主轴电机,工件表面在电解的作用下形成硬度低于基体的钝化膜,所形成的钝化膜不导电,于是电解停止^[4]。磁性粒子在磁极磁场力的作用下形成有一定硬度的磁性“研磨刷”,研磨刷对Tc4表层的钝化膜进行去除,电解得以继续进行^[9-10]。如此电解-研磨-电解循环往复,对Tc4平板进行逐层去除。

2.2 实验参数

实验参数如表1所示。

表1 实验参数

参数名称	数值
主轴转速/ $(r \cdot \min^{-1})$	1300
磨粒粒径/ μm	200
待加工工件	Tc4板,规格200 mm \times 150 mm \times 10 mm
磁极	$\Phi 15$ mm \times 40 轴向磁极 (强磁材料汝铁硼)
研磨液	劳力恩SR-9911 水基式研磨液(6 mL)
电解液	11wt% NaCl溶液
电解电压/ V	9
磁极与工件间隙/ mm	3
加工时间/ min	50
旋转超声波振动频率/ kHz	18
旋转超声波振动幅值/ μm	轴向振动4

2.3 测试表征

使用JB-8E触针式表面粗糙度仪对Tc4板5个不同位置的粗糙度进行测量,并取其平均值;使用VHX-500F超景深高倍显微镜观察Tc4板表面形貌;使用高精度天平测量工件加工前后去除材料量的变化;采用帕纳科X射线衍射仪测量Tc4板研磨前后的表面残余应力^[11]。

3 结果与分析

3.1 表面粗糙度及材料去除量

采用表1所述的实验参数,分别利用传统单纯磁力研磨方法及电解-旋转超声磁粒复合研磨方法

对Tc4板表面进行研磨,图2为经50 min研磨,两种研磨方法对Tc4表面粗糙度及材料去除量的影响。从图2可以看出,电解-旋转超声磁粒复合研磨方法对Tc4钛板抛光材料去除较快,粗糙度可由原始的 $1.92\text{ }\mu\text{m}$ 降为 $0.09\text{ }\mu\text{m}$ 。而传统单纯磁力研磨方法材料去除量较少,表面粗糙度下降较慢^[12]。原因在于,磁粒研磨为一种“柔性”加工工艺,其磨削刀具较软,依靠单一磁粒研磨方法,不能在短时间内使Tc4表面达到光整性效果。而电解-旋转超声磁粒复合研磨在加工过程中使Tc4表面受电解阳极溶解形成一层钝化膜,此钝化膜的硬度远低于Tc4基体硬度,在磁力作用下由磁性研磨粒子所形成的“柔性”研磨刷可以快速地将钝化膜去除,以达到抛光效果。

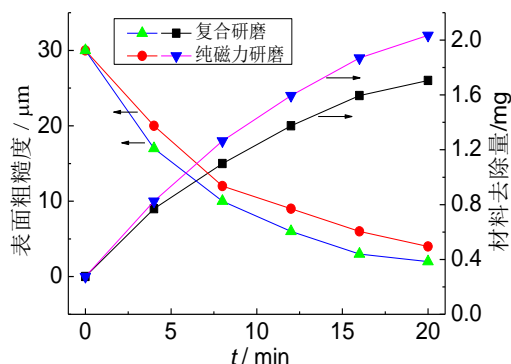


图2 两种研磨方法的Tc4板表面粗糙度及材料去除量

3.2 表面微观形貌分析

图3为Tc4板研磨前后的微观形貌图。图3(a)为原始微观形貌图,可看出最大波峰波谷高度差可达 $101.3\text{ }\mu\text{m}$,有较深的“沟壑”状纹理,表面质量极差。图3(b)为经磁粒研磨50 min后工件表面形貌图,可看出工件表面质量虽有较大程度的提高,最大波峰波谷高度差已降为 $39.1\text{ }\mu\text{m}$,但仍有多处缺陷,表面纹理不均匀。图3(c)为经电解-旋转超声磁粒复合抛光后的Tc4平面微观形貌图,与磁粒研磨样品的形貌相比有明显的改善,最大波峰波谷高度差最终降为 $8.6\text{ }\mu\text{m}$,表面缺陷几乎已经完全去除。由此也可看出,电解-旋转超声磁粒复合抛光方法对Tc4钛板具有较好的抛光效果,且抛光速率也快于传统方法。

3.3 表面残余应力分析

Tc4板材表面残余应力是衡量其工作性能的重

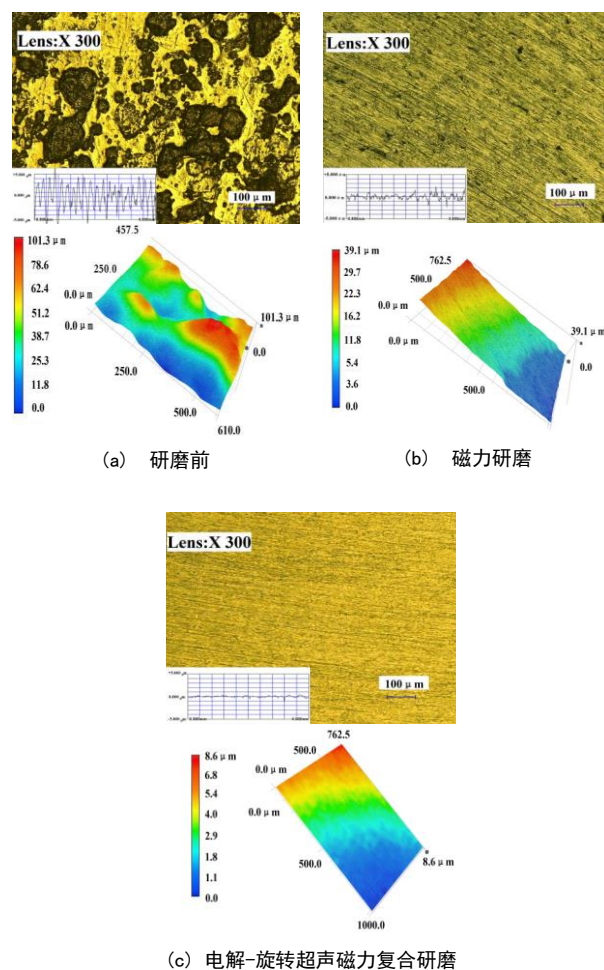


图3 Tc4板研磨前后的表面形貌及波峰波谷云图

要指标,因此需对其表面残余应力进行考察。利用X射线衍射法,并使用帕纳科X射线衍射仪测量孔边残余应力,根据X射线衍射 $\sin^2\Psi$ 应力分析法,得到应力数学计算方程^[13]:

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

式中: d_n 为初始倾斜角为 0° 的晶面材料表面在初加工时的塑性变形间距, μm ; d_{ψ} 为倾斜角的晶面间距, μm ; Ψ 为倾斜角度,度; ν 为材料的泊松比; E 为材料的杨氏模量, GPa; σ 为反向上的应力, MPa。通过帕纳科X射线衍射仪对Tc4板表面6个随机不同位置的点进行测量,并将测量的点拟合成直线,结果如图4所示。通过公式(1)计算得出Tc4钛板的表面残余应力,由原始的+186 MPa降为研磨后的-51 MPa。Tc4板由研磨前的拉应力转变为研磨后

的压应力,可以有效增强工件的使用性能与服役寿命。

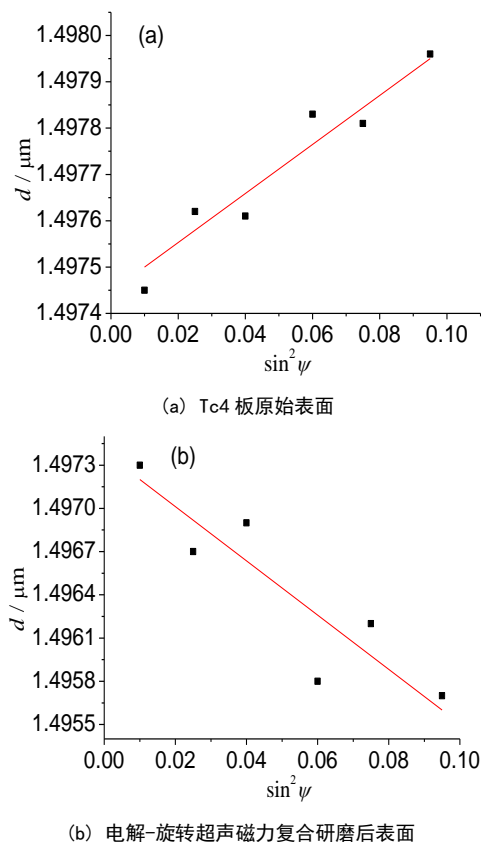


图4 TC4板表面应力残余应力曲线

4 结论

(1)采用电解-旋转超声磁粒复合对TC4板抛光,相比于传统磁粒研磨可提高了加工效率,该方法经过50 min研磨加工可使TC4表面粗糙度由原始的1.92 μm降为0.09 μm。

(2)经方法研磨,TC4表面残余应力由加工前的+191 MP降低为抛光后的-51 MPa,工件的使用性能及工作寿命得到改善。

参考文献

- [1] 吕冬兰. 钛合金在民用飞机上的应用及发展趋势[J]. 世界有色金属, 2018, 5: 230-231.
- [2] 邹松华, 王帅东, 李曼, 等. TC4钛合金电镀镍工艺及镀层性能[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(12): 626-628.
- [3] 邢绍美. TC4钛合金的平面磨削[J]. 航天工艺, 2001, 3: 51-54.
- [4] 许召宽, 韩冰, 陈燕, 等. 基于电解-磁力复合研磨法的表面光整加工[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(12): 7-10.
- [5] 廖明, 韩冰, 陈燕, 等. 钛合金管内表面的电化学磁力研磨复合光整试验[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 123-131.
- [6] 李琳琳, 顾翔, 朱永伟. 微细旋转超声加工材料去除机理及试验[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(3): 78-81.
- [7] 曾加恒, 陈燕, 张科丙, 等. 旋转超声辅助磁力研磨镍基合金参数优化设计及分析[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 274-280.
- [8] 谭悦, 陈燕, 曾加恒, 等. 电解-磁力复合研磨TA18钛合金管内表面研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(2): 140-142+147.
- [9] Du Z W, Chen K, Zhou C L. Research on the electrolytic-magnetic abrasive finishing of nickel-based superalloy GH4169[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5-8): 897-903.
- [10] Xu S, Zou Y H. Development of magnetic abrasive finishing combined with electrolytic process for finishing SUS304 stainless steel plane[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9-12): 3373-3384.
- [11] 张龙龙, 焦安源, 刘新龙, 等. 电解-磁粒复合研磨对TCTC4孔棱边毛刺的光整加工[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(10): 1-5.
- [12] 田腾腾, 陈燕, 谭悦, 等. 电解-磁力研磨钛合金的工艺参数优化[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(1): 27-30.
- [13] 谭悦, 于克强, 陈燕, 等. 电解-磁力复合研磨镍基高温合金实验研究[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(12): 1-4.