DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.06.008

高效精密电解铣磨加工钛合金 Ti-6Al-4V 试验研究

刘刚强,李寒松,牛屾,林毓涛,曲宁松

(南京航空航天大学 直升机传动技术国家级重点实验室,江苏 南京 210016)

摘　要:采用直径6 mm的平头磨轮,对Ti-6Al-4V钛合金进行电解铣磨加工试验研究。研究了Ti-6Al-4V在10%$NaNO_3$溶液中的电化学特性,根据结果选择和优化电解铣磨加工试验参数,进行了沟槽粗、精加工试验,并对加工沟槽进行了检测,对结果进行分析讨论。

关键词:电解铣磨;Ti-6Al-4V;电化学特性;表面粗糙度

中图分类号:TG17　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2020)06-0032-04

Experimental Investigation of High-efficiency Precision Electrochemical Mill-grinding of Titanium Alloy Ti-6Al-4V

LIU Gangqiang, LI Hansong, NIU Shen, LIN Yutao, QU Ningsong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper makes a study of using a flat-head grinding wheel with a diameter of 6 mm to electrochemically mill-grind Ti-6Al-4V titanium alloy and the polarization characteristics of Ti-6Al-4V in 10% $NaNO_3$ solution. The experimental parameters of electrochemical mill-grinding are selected and optimized, the machined grooves are detected and the results are analyzed and discussed.

Keywords: electrochemical mill-grinding; Ti-6Al-4V; electrochemical characteristics; surface roughnes

0　引言

Ti-6Al-4V钛合金由于其密度低,比强度高,耐热性和耐腐蚀性优良而广泛应用于航空工业[1]。由于其弹性模量小,导热系数低,传统的切削加工切削温度高,刀具磨损很快,使Ti-6Al-4V成为典型的难加工材料[2]。电化学加工(ECM)是基于电化学阳极溶解的原理,具有无刀具磨损、加工表面无残余应力的优点,因此特别适合加工难加工材料。

电解铣削[3]加工采用棒状等简单形状的工具阴极,根据电化学阳极溶解的原理对工件进行加工。与传统的拷贝式电解加工比较,电解铣削的加工范围更加广泛并且加工柔性更高。MISHRA K等[4]通过电解铣削加工Ti-6Al-4V钛合金,采用逐层加工的方式加工了"L"形的沟槽,获得了0.6 mm的加工深度(每层加工0.2 mm)和2.4 mm/min的进给速度。

电解磨削[5]是一种复合加工的加工方式,它结合了电化学加工和机械磨削加工的优点,具有高的加工精度和良好的加工表面质量。CURTIS D T等[6]研究了通过电解磨削加工镍基合金,并且加工出表面粗糙度为0.65 μm的叶盘。

为了提高电解磨削的加工柔性,电解铣磨的加工方式被提了出来。电解铣磨加工结合了电解铣削加工和电解磨削加工的特点,通过底部电镀有金刚石磨粒的棒状阴极以电解铣削的加工形式对工件进行加工。李寒松等[7]提出了内喷液式电解铣磨加工方法。与传统的外喷液加工不同,电解液不是通过喷头从外部喷射入加工区域,而是通过采用中空的棒状阴极,电解液流过阴极内部,从阴极底部的喷液孔进入加工区域。这种喷液方式能够形成稳定均匀的流场,提高加工深度和稳定性。曲宁松等[8]采用内喷液电解铣磨的加工方式加工GH4169,获得了3 mm的切削深度和2.1 mm/min的进给速度。目前,关于Ti-6Al-4V电解铣磨粗、精连续加工的研究很少,因此本文以Ti-6Al-4V为研究对象,通过电解铣磨的加工方法,进行Ti-6Al-4V的粗、精连续加工试验研究。

1　实验原理及设备

1.1　实验原理

如图1所示,电解铣磨加工的工具磨轮以中空的金属棒为基体,侧壁开有喷液孔,底端电镀有金刚石磨粒。在加工过程中,磨轮与电源的负极连接,工件与电源的正极连接,电解液从磨轮内部由通液孔喷入加工区域,参与电化学反应并且及时带走加工产物和焦耳热。磨轮在计算

基金项目:国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111)

第一作者简介:刘刚强(1994—),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为电解加工。

机程序的控制下一边作高速旋转,一边作进给运动,完成对工件的加工。

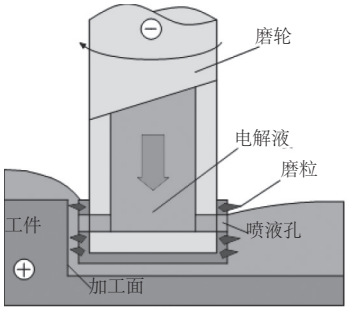


图 1　电解铣磨加工原理示意图

1.2　实验设备

图 2 是试验使用的电解铣磨加工系统的示意图,该加工系统主要由机床主体、运动控制系统、数据采集系统、电解液系统和电源组成。运动控制系统由计算机、伺服电机、伺服驱动器和运动控制卡组成,用于控制 X、Y 十字滑台和主轴的运动。数据采集系统由计算机、数据采集卡和霍尔电流传感器组成,用于监控和记录加工过程中的加工电流。调压阀和压力表用于调节和监测管道中的电解液压力。

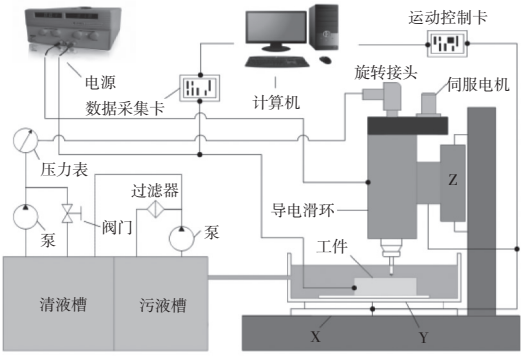


图 2　电解铣磨加工系统示意图

2　实验方法和材料

为了选择合适的电解铣磨加工参数,采用电化学工作站测量 Ti-6Al-4V 的阳极极化曲线。试验前先使用砂纸将棱长 10 mm 的 Ti-6Al-4V 正方体的一个面进行研磨和抛光处理,再使用无水乙醇进行超声清洗,其余表面用树脂覆盖。试验采用三电极装置,铂电极和甘汞电极分别作为对电极和参比电极。试验时,将电解质溶液水浴加热至 30 ℃并且在-2 V~16 V 电压范围内进行动电位测试,扫描速率为 10 mV/s。

试验采用的阴极磨轮的基体材料为 45 号钢,外径为 6 mm,内径为 4 mm,径向距离底面 1.5 mm 的侧壁均匀分布有 6 个直径 1 mm 的通液孔,底端侧壁和底面电镀有金刚石磨粒,金刚石磨粒的粒径为 75~90 μm。

3　实验结果和分析

3.1　Ti-6Al-4V 的电化学特性

图 3 是 Ti-6Al-4V 在 10%$NaNO_3$溶液中的极化曲线。可以看到,当电解质溶液的温度为 30 ℃时,Ti-6Al-4V 的分解电压约为 11 V。电位越大,电流密度也越大,电化学溶解作用越强。

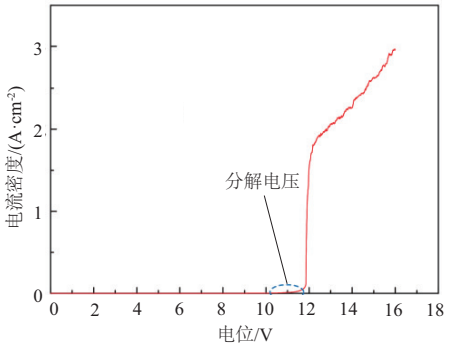


图 3　Ti-6Al-4V 的阳极极化曲线

3.2　电解铣磨沟槽加工试验

根据电化学特性试验的结果,Ti-6Al-4V 在 30 ℃的 10%$NaNO_3$溶液中的分解电压约为 11 V,因此加工电压要高于 11 V,并且电流密度随加工电压的增大而增大。为了提高电解铣磨加工 Ti-6Al-4V 的效率,试验选择 20 V 作为加工电压,电解液压力为 0.6 MPa,主轴转速为 1 000 r/min,具体的加工参数如表 1 所示。

表 1　电解铣磨沟槽粗加工试验参数

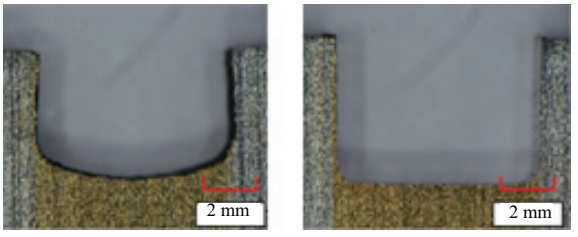
参数	数值
加工电压/V	20
电解液温度/℃	30
电解液压力/MPa	0.6
进给速度/(mm·min^{-1})	1.8
切深/mm	3.00

尽管粗加工阶段具有很高的加工效率,但是加工后的沟槽表面不平整,表面残留有一些难溶产物,表面粗糙度值很高,难以满足精加工的要求。因此,在粗加工后还需要进行精加工,以提高加工表面的平整度,降低表面粗糙度。电解铣磨加工方法具有粗、精加工连续进行的优点,只需要选择合适的精加工参数而无需更换工具阴极。但与粗加工不同,精加工阶段只需要去除较少的材料,主要目的是提高加工表面的质量,因此应选择低的加工电压、小的切削深度、低的电解液压力和大的进给速度,目的是提高加工过程中的机械磨削作用,减少电化学溶解造成的杂散腐蚀。具体的加工参数如表 2 所示。

表 2　电解铣磨沟槽精加工试验参数

参数	数值
加工电压/V	1
电解液温度/℃	30
电解液压力/MPa	0.2
进给速度/(mm·min^{-1})	30.0
切深/mm	0.05

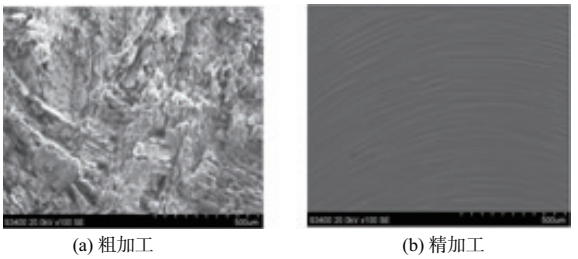
通过电解铣磨粗加工和精加工得到的沟槽其截面照片如图 4 所示。可以观察到,只经过粗加工的沟槽侧壁不平整,并且由于杂散腐蚀[9]的原因,实际的加工深度要大于切削深度。同时由于沟槽底面中间部分受到的杂散蚀除时间较长,而靠近两侧壁处受到的杂散蚀除时间较短,因此底面形成了中间深、两边浅的凹弧。在精加工后,这一现象得到改善,沟槽侧壁和底面变得平整。



(a) 粗加工　　(b) 精加工

图 4　电解铣磨粗、精加工沟槽的截面图片

采用扫描电子显微镜观察加工沟槽底面的微观形貌,结果如图 5 所示。可以观察到,粗加工后的底面质量很差,存在着明显的点蚀凹坑,而精加工后表面平整,无点蚀特征。实验结果表明通过精加工可以有效地消除由杂散腐蚀对粗加工的影响,改善加工表面的质量。

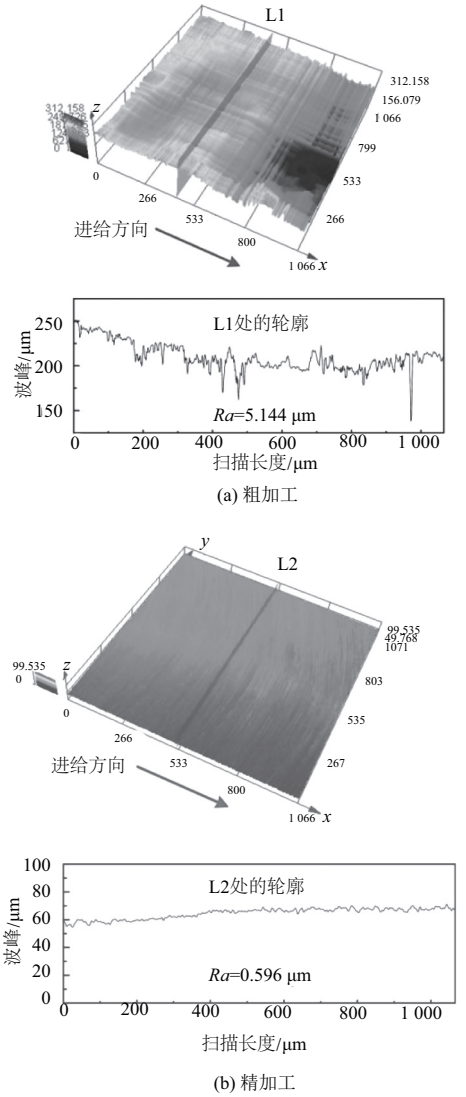


(a) 粗加工　　(b) 精加工

图 5　加工沟槽底面的表面形貌 SEM 图

采用激光共焦显微镜测量加工沟槽底面的表面粗糙度,结果如图 6 所示。相较于粗加工,精加工后的沟槽底面更加光滑。测量结果显示,粗加工后底面的表面粗糙度 Ra = 5.144 μm,而精加工后底面的表面粗糙度 Ra = 0.596 μm,底面表面粗糙度值减小了 88.4%。试验结果表明,通过精加工可以有效地降低加工底面的表面粗糙度。

通过对比粗、精加工的试验结果,精加工后加工底面的表面质量得到了明显的改善,说明电解铣磨适用于连续的粗、精加工。这也为电解铣磨加工技术在航空领域的进一步发展提供了支持。



(a) 粗加工

(b) 精加工

图 6　电解铣磨粗、精加工的表面

4　结语

采用平头阴极电解铣磨粗、精加工 Ti-6Al-4V,根据电化学特性测量试验和沟槽粗、精加工试验的结果,可以得到以下结论:

1) 温度为 30℃时,Ti-6Al-4V 钛合金在 10% $NaNO_3$ 溶液中的分解电压为 11 V。

2) 粗加工后沟槽底面和侧壁不平整,通过选择合适的加工参数进行精加工,可以改善粗加工后沟槽截面轮廓不平整的问题。

3) 粗加工后沟槽底面具有明显的点蚀凹坑,表面粗糙度为 Ra = 5.144 μm,精加工后沟槽底面表面粗糙度降低至 Ra = 0.596 μm。

参考文献:

[1] 刘勇,朱景川,尹钟大. Ti-6Al-4V 合金应力松弛行为及微观组织观察[J]. 稀有金属,2002,26(6):509-512.

[2] 吴月颖. 基于 MQL 的钛合金高速切削硬质合金刀具磨损机理的研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2014.

[3] 刘勇. 微细电解铣削加工技术的基础研究[D]. 南京：南京航空航天大学,2010.
[4] MISHRA K,DEY D,SARKAR B R,et al. Experimental investigation into electrochemical milling of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Manufacturing Processes,2017,29：113-123.
[5] 干为民,张艳红,王祥志,等. 电解磨削加工方法研究现状[J]. 电加工与模具,2015 (5)：58-61,65.
[6] CURTIS D T,SOO S L,ASPINWALL D K,et al. Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aeroengine alloy using mounted grinding points[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2009,58(1)：173-176.
[7] LI Hansong,NIU Shen,ZHANG Qingliang,et al. Investigation of material removal in inner-jet electrochemical grinding of GH4169 alloy[J]. Scientific Reports, 2017(7)：1-11.
[8] NIU Shen,QU Ningsong,LI Hansong. Investigation of electrochemical mill-grinding using abrasive toolswith bottom insulation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,97(1/2/3/4)：1371-1382.
[9] WANG Xindi,QU Ningsong,FANG Xiaolong. Reducing stray corrosion in jet electrochemical milling by adjusting the jet shape [J]. Journal of Materials Processing Technology,2019,264：240-248.

收稿日期：2019－09－02

(上接第 20 页)

图 11 是间隙 2.0 mm 时,填隙补偿下 3D-DIC 在 e_{yy} 方向全场测量应变云图。垫片的补偿降低了板边缘的应变,但对复合材料而言,在孔边区域可剥垫片的补偿效果反而比强迫装配效果更差,这可能与可剥垫片的表面不平整有关。

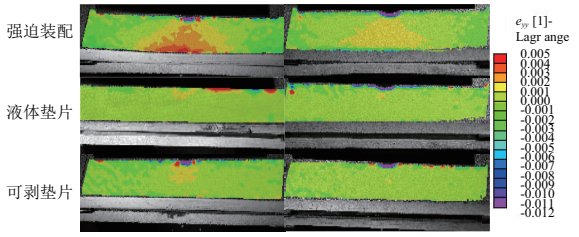


图 11　间隙 2.0 mm 下垫片补偿 e_{yy} 方向应变云图

通过上述分析可得,在补偿垫片之后,大幅度地降低了由于弯曲变形引起的应变,但同时会增大孔边挤压变形,加入可剥垫片之后因为表面不平整带来的应变甚至大于强迫装配时的应变。相比之下,液体垫片效果好于可剥垫片。

4　结语

1) 强迫装配时,构件在 e_{xx} 方向上的应变主要受弯曲变形影响,在 e_{yy} 方向上的应变与 e_{xx} 方向应变趋势相对应。随着装配间隙的不断增大,应变集中程度都增大,且复合材料的应变值大于铝合金材料,即复合材料变形更严重。

2) 垫片补偿后,极大地改善了由于构件弯曲变形引起的应变,即补偿垫片后,构件弯曲变形大幅度降低,且液体垫片补偿效果好于可剥垫片。

参考文献：

[1] MARSH G. Airbus A350 XWB update[J]. Reinforced Plastics, 2010,54(6)：20-24.
[2] COLEMAN R M. The effects of design,manufacturing processes and operations management on the assembly of aircraft composite structure[J]. Massachusetts Institute of Technology,1991(3)：120-135.
[3] 赵稼祥. 碳纤维复合材料在民用航空上的应用[J]. 高科技纤维与应用. 2003(3)：1-4.
[4] Military handbook 17－1F. vol. 1 Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials[S]. 2002.
[5] CEPHAS Yaw Attahu,LULING An. Influence of assembly gap and shims on the strain and stress of bolted composite-aluminum structures[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,2017,12(5)：1593-1617.
[6] CHANG J H, YANG Y X,LIU X S,et al. A mixed shimming method in eliminating the gaps during the assembly process of the complex structures[J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering,2019,493：12140.
[7] 张桂书. 飞机复合材料构件装配间隙补偿研究 [D]. 南京：南京航空航天大学,2015.
[8] 云一珅. 填隙补偿参数对复材螺栓连接结构的力学性能的影响研究[D]. 南京：南京航空航天大学,2017.
[9] 刘怡冰,安鲁陵,蒋麒麟,等. 复合材料翼盒装配工装研究与设计[J]. 机械制造与自动化,2016,45(3)：14-18.
[10] ASTM D5961/D5961M. Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates[S]. 2008.
[11] 肖睿恒,云一珅,胡坚皓,等. 一种用于复合材料结构装配填隙补偿分析的方法和装置：中国, CN108507764A [P]. 2018-09-07.

收稿日期：2019－10－11