

表面状态及电解液对 Ti6Al4V EJM加工质量的影响

宋永伟, 拓占宇

(航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

[摘要] 钛合金广泛应用于航空发动机中, 硝酸钠(NaNO_3)电解液与氯化钠(NaCl)电解液广泛应用于常规金属材料电化学加工。研究了钛合金在应用电解液喷射加工技术(EJM)时的表现。首先应用这两种电解液对两种不同表面质量的钛合金试件分别进行EJM加工试验, 通过分析加工后所得样槽的深宽比、表面粗糙度、氧化物占比以及微观形貌, 分析了钛合金原始表面状态以及电解液选用对最终加工精度的影响效果。在此基础上, 以不同的顺序组合应用这两种电解液对优选出的钛合金试件再次进行EJM加工试验研究, 确定最优的电解液组合应用顺序。两个系列的试验研究, 为提高钛合金电化学喷射加工的质量与效率提供了一定的理论和试验依据。

关键词: Ti6Al4V; 表面状态; 电解液; 电解液喷射加工(EJM)

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.15.101



宋永伟

硕士、工程师, 2016年获英国诺丁汉大学制造工程与管理专业一等硕士学位。主要研究方向为液压偶件精密、超精密制造技术与特种加工技术。

钛合金作为一种优良的金属材料, 具有强度高、密度低、耐热、耐腐蚀等优异性能, 在航空发动机中应用十分广泛。同时, 钛合金具有的低导热性与高化学活泼性等特点使其很难运用传统的方法进行机械加工^[1]。

电解液喷射加工技术(Electrochemical Jet Machining, EJM)作为一种新型的加工方法, 具有发热少、无残余应力、加工范围广等优点, 可用于加工导电的各种材料, 加工后的零件表面质量好、无毛刺, 是目前较为热门的研究内容之一^[2]。本研究选用钛合金Ti6Al4V作为研究对象, 通过比较钛合金样件的加工表现, 对不同的原始表面状态、电解液以及电解液的使用顺序对EJM加工质量的影响进行研究分析。

EJM 加工技术

EJM 源于电化学加工技术

(Electro-Chemical Machining, ECM), 具体过程如图1所示, 样件固定于工作台上, 电解液通过泵从存储箱中抽出后以一定的速度喷射至工件表面。系统中, 工件为阳极, 喷嘴为阴极, 金属原子在电极的作用下失去电子被氧化, 进而溶解于电解液, 实现材料的去除与加工^[3-6]。EJM加工中常用的电解液有氯化钠(NaCl)溶液和硝酸钠(NaNO_3)溶液^[7-8], 不同的电解质溶液以及电解质溶液使用的先后顺序和待加工工件的表面质量等因素对最终的加工精度可能具有一定的影响。

EJM 精密加工试验

1 钛合金试件准备

为研究钛合金原始表面质量对最终加工精度的影响, 本文抛光处理了两组 20×20 (mm)试件, 在去除表面氧化层和污染物的同时, 确保其

具有不同的表面状态。抛光后的试件如图 2 所示,表面粗糙度值(S_a)分别为 $0.177\ \mu\text{m}$ 和 $1.066\ \mu\text{m}$ 。

2 加工参数选定

基于 Dan 等^[3]的研究成果,设备优选参数分别为:喷嘴直径 $\phi=250\ \mu\text{m}$;电流密度 $=550\text{A}/\text{cm}^2$;喷嘴移动速度 $0.5\text{mm}/\text{s}$;由喷嘴处测得的电解液流速 $70\ \text{ml}/\text{min}$;喷嘴与待加工表面间距离 $0.5\ \text{mm}$ 。并在系列加工试验中稳定不变,以保证不同试件加工状态的稳定性与一致性。本文选用的 NaCl 电解液与 NaNO_3 电解液的浓度均为 $2.5\text{mol}/\text{L}$ ^[7-8]。

3 试验系列1

3.1 设计思路

两种钛合金试件上分别用 NaCl 电解液和 NaNO_3 电解液各加工两个矩形样槽,通过样槽底面的氧化物百分比、表面粗糙度值(S_a)和样槽的深宽比定量分析试件的加工表现,并对加工后表面的微观形貌进行定性分析。确保第二条样槽数据的重复性,具体思路如表 1 所示。

3.2 数据采集与处理

本文应用系列检测与分析技术对钛合金试件在 EJM 加工中的表现进行研究及评估,流程如图 3 所示。

(1) 表面氧化物比例分析。

大原子质量的成分可产生更多的背闪电子,故在背闪电子方式下拍摄的 SEM 照片中氧化物的颜色较深,钛合金基体的颜色较亮,如图 4 所示。这些黑白照片经开源软件 ImageJ 的颜色阈值功能处理后(设置合适的亮度值),可将样槽表面覆盖的氧化物从钛合金基体中区分出来,标红高亮显示的同时计算出该区域占总面积的百分比。为保证数值的准确性,分析过程中对样槽两侧参差不齐的边缘进行了修剪,如图 5 所示。

每个样槽上选取 5 处不同的区域,依上述流程分别计算氧化物占表面积的百分比,最终以均值表征样槽

表面氧化物比例。氧化物占比越高,继续进行电化学反应的趋势越小,EJM 加工越困难。

(2) 表面氧化物的去除。

完成氧化物占比分析后,用树脂毛刷在流动活水下手工去除氧化物,超声清洗 25min (全信号, $80\ ^\circ\text{C}$)。虽然氧化物硬度较高,在不损伤试件基体的情况下很难完全去除,但经过该流程可以更准确地评估样槽的深宽比与表面粗糙度值。

(3) 几何特征检测。

将 3D 光学显微镜 Alicona 扫描已加工表面所得数据导入软件 MountainsMap。

· 样槽深宽比(深度 / 宽度)。

每个样槽随机选取 3 个截面,分别测量每个截面上样槽的宽度与深度,计算得出各截面处的深宽比,最终以平均值表征该样槽的深宽比。

· 表面粗糙度(S_a)。

每个样槽随机选取 3 处区域,分别得到各区域的 S_a 后,以平均值表征样槽底面的粗糙度。

(4) 微观形貌分析。

通过二次电子下拍摄的 SEM 照片对样槽底面的微观形貌进行分析。

4 试验系列2

4.1 设计思路

通过样槽的深宽比和底面的粗

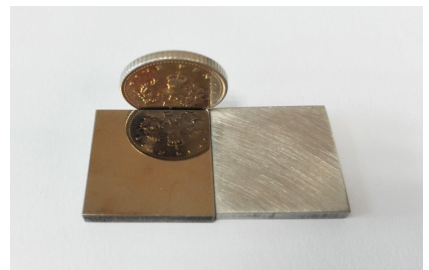


图2 粗抛和精抛后的钛合金试件表面状态
Fig.2 Surface condition of test pieces after cursory polishing and excellent polishing

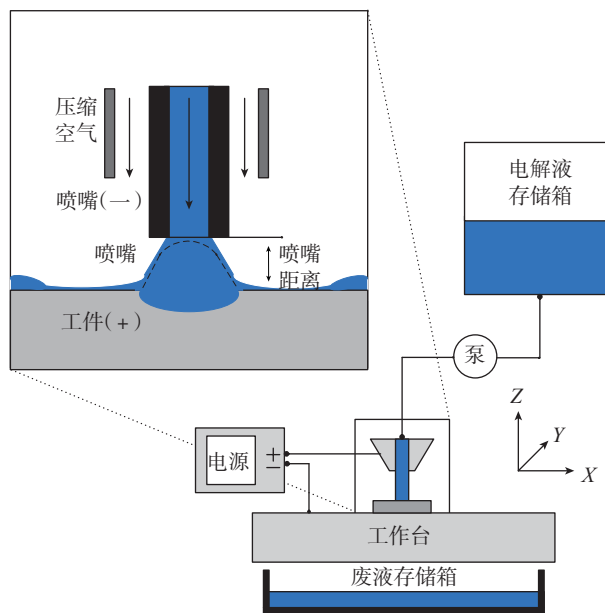


图1 电解液喷射加工示意
Fig.1 Sketch map of EJM

表1 试验系列1

试件	电解液	原理图	检测
粗面	NaNO_3		(1) 氧化物百分比 (SEM——背闪电子); (2) 样槽深宽比与 S_a 值 (3D 光学形貌); (3) 表面形貌分析 (SEM——二次电子)
	NaCl		
镜面	NaNO_3		
	NaCl		

糙度值(S_a)定量分析试件的加工表现,并定性分析加工后表面的微观形貌,定量与定性相结合,确定出最佳的电解液组合应用顺序。第二条样槽数据的重复性,具体思路如表2所示。

4.2 数据采集与处理

本系列试验中应用的检测与分

析技术与试验系列1中相同,但不分析试件表面氧化物的比例,故直接手工去除附着在样槽表面的氧化物后,应用3D光学显微镜获取样槽的三维形貌,分析获得样槽的深宽比与底面粗糙度值,最后通过二次电子下拍摄的SEM照片对加工表面的微观形貌进行分析。

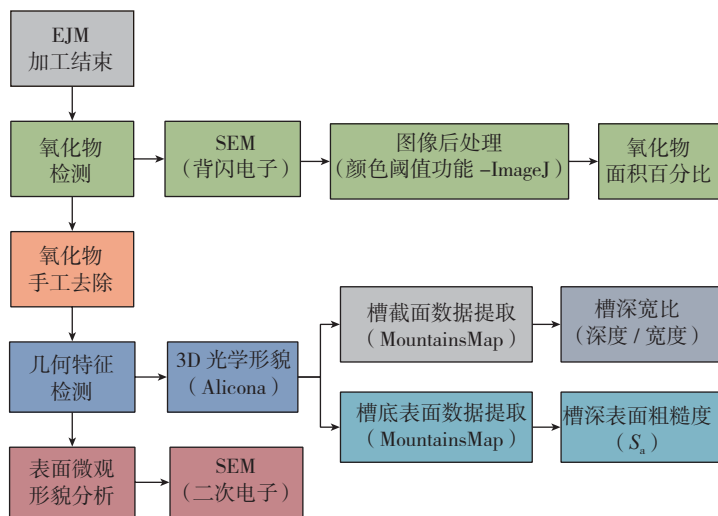


图3 数据采集与处理流程
Fig.3 Flow of data collection and disposal

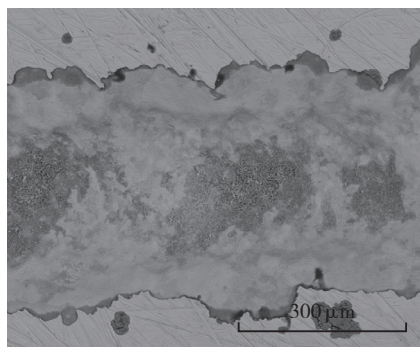
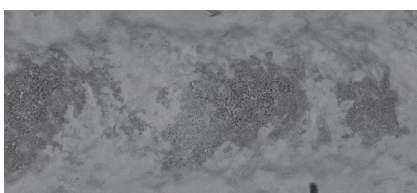
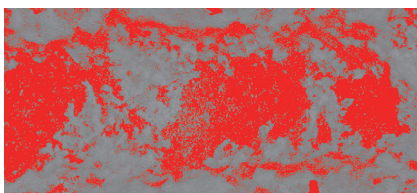


图4 粗面试件上使用NaNO₃电解液加工出的样槽的SEM照片(背闪电子)
Fig.4 SEM image of the groove machined on rough sample with UA using NaNO₃ (BSM)



(a) 图4 样槽忽略了两侧不规则边缘



(b) 经 ImageJ 颜色阈值功能处理后的效果

图5 钛合金基体上氧化物的提取
Fig.5 Extracting of oxide on Ti-alloy

表2 试验系列2

试件	电解液	原理图	检测
1	NaNO ₃ → NaCl		(1) 样槽深宽比与表面粗糙度(3D光学形貌) (2) 表面形貌分析(SEM——二次电子)
2	NaNO ₃ → NaCl		

试验结果与讨论

1 试验系列1

1.1 表面氧化物百分比

图6为两种钛合金试件EJM加工后表面氧化物所占面积的百分比。电解液一定时,镜面试件的氧化物占比较高,其中NaNO₃电解液下为53.62%,NaCl电解液为46.69%,相比于粗面试件分别高出2.38%和4.99%。而同一试件上,电解液为NaNO₃溶液时氧化物占比更高,其中粗面高出9.54%,镜面高出6.94%。

1.2 槽深宽比

如图7所示,电解液一定时,镜面试件样槽的深宽比较小,其中NaNO₃电解液下为0.118,NaCl电解液为0.138,相对于粗面试件分别减少了18.3%和21.9%。而同一试件时,NaNO₃电解液加工所得样槽的深宽较小,相比于NaCl电解液分别减少了14.8%和18.5%。

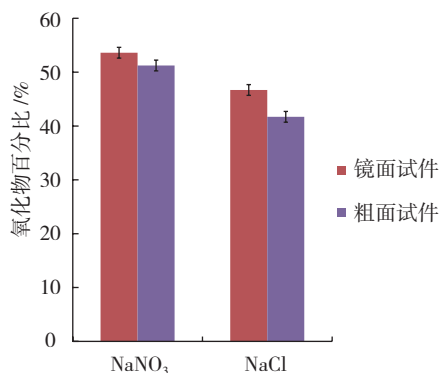
1.3 表面粗糙度 S_a

如图8所示,电解液一定时,镜面试件样槽的 S_a 值较小,其中NaNO₃电解液下为0.837,NaCl电解液为1.163,相比于粗面试件分别改善了73.6%和73.9%。而同一试件时,NaNO₃电解液下 S_a 值较小,相比于NaCl电解液粗面和镜面试件分别改善了28%和28.8%。

1.4 表面微观形貌

用扫描电子显微镜通过二次电子的方式对样槽的微观形貌进行观察分析,普通倍率下所得的图像如表3所示。

同种电解液下,镜面试件样槽边缘的整齐度显著好于粗面试件(因数控程序的问题,镜面试件仅得到一条样槽)。相同加工参数下,粗面试件与镜面试件上各条样槽的微观结构非常相似,本文选取镜面试件上的样槽进行放大。如图9所示,电解液为NaNO₃溶液时,样槽表面覆盖有更多的多孔且均匀的氧化物薄层,样槽的



注: 未特殊说明的情况下, 本文数据图中的误差线均为所分析数据组的标准偏差。

图6 氧化物占槽底总面积的百分比
Fig.6 Oxide percentage of machined grooves

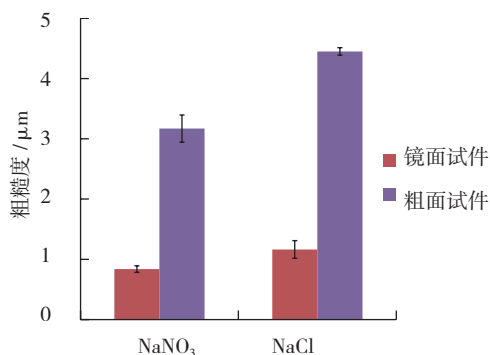


图8 槽底部的表面粗糙度
Fig.8 S_a of machined grooves

边缘更为光滑整齐。而当电解液为 NaCl 溶液时, 样槽的宽度显然更窄, 这就意味着加工主要发生在样槽底部, 这也是其能获得更大的样槽深宽比的原因。

粗面试件的加工过程稳定性较差, 无论选用哪种电解液都可在样槽上观察到因电弧放电导致的斑块。图 10 与图 11 为粗面试件样槽中放电区域的 SEM 照片。相比于 NaCl 电解液, NaNO₃ 电解液会导致更为频繁的放电, 如图 11 所示, 在加工粗面试件上的第二条样槽时, 甚至出现了持续放电现象。

若需进一步降低 EJM 加工过程中放电发生的可能性, 并提高加工过程的稳定性, 需对包括喷嘴到试件的距离、电解液流速和喷嘴的移动速度等加工参数进行试验、优化。

2 试验系列2

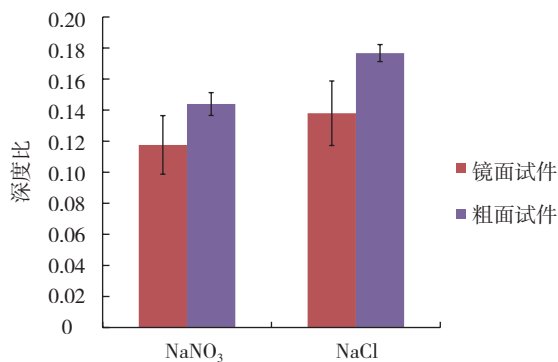
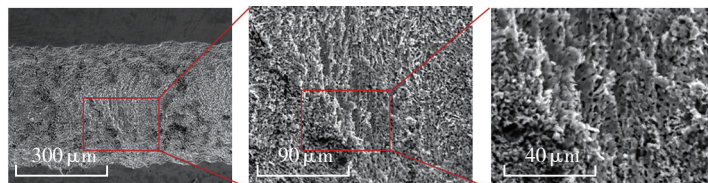


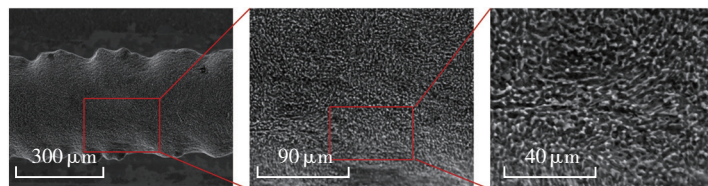
图7 槽深宽比
Fig.7 Aspect ratio of machined grooves

表3 加工表面SEM照片

电解液	镜面试件	粗面试件
NaNO ₃		
NaCl		



(a) 电解液为 NaNO₃ 溶液



(b) 电解液为 NaCl 溶液

图9 样槽表面微观形貌

图9 Surface topography of the machined groove

2.1 槽深宽比

如图 12 所示, 当先用 NaNO₃ 电解液后用 NaCl 电解液时所得样槽的深宽比为 0.24, 相比于另一组合下的 0.26, 减少 7.7%, 即此种组合下加工效率降低了 7.7%。

2.2 表面粗糙度

如图 13 所示, 当先用 NaNO₃ 电解液后用 NaCl 电解液时所得样槽的 S_a 值为 21.1 μm, 相比于另一组合下的 14.6 μm, 增加了 44.5%, 表面质量严重下降。

2.3 表面微观形貌

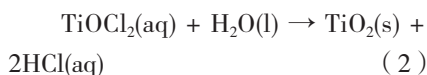
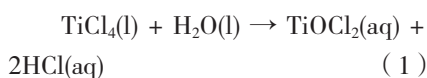
用扫描电子显微镜通过二次电子的方式对样槽的微观形貌进行观察分析,如图 14 所示,先 NaCl 电解液后 NaNO₃ 电解液的顺序下,样槽表面质量与边缘的整齐度有非常明显的改观。

3 结果分析与讨论

3.1 NaNO₃ 电解液与 NaCl 电解液的效果

试验系列 1 所得结果证明,钛合金 EJM 加工中应用 NaNO₃ 电解液可获得更好的表面质量,但 NaCl 电解液可以产生更少的氧化物与更高的深宽比。而 NaCl 电解液之所以能够产生更少的氧化物,主要是加工界面上形成了能够发生水解的 TiCl₄, TiCl₄ 在发生反应式(1)所示的水解的同时被电解液冲走。随后新生成的 TiOCl₂ 继续发生反应式(2)所示的水解,在排出的废液中生成不溶的

TiO₂^[9]。



因此,应用 NaCl 电解液时加工主要发生在样槽的底部,如图 15 所示。而在应用 NaNO₃ 电解液时,迅速反应生成的 TiO₂ 会粘附在样槽底部,阻碍底部材料的继续去除,所以加工会向侧面偏移,最终获得较小的深宽比。

综上所述,钛合金进行 EJM 加工时,NaCl 电解液相比于 NaNO₃ 电解液,在试件加工表面生成钝化层的趋势更低,所以能够以更高的速度加工出更窄、定位性更好的矩形样槽。

3.2 工件表面原始状态的影响

试验系列 1 所得结果证明,镜面试件与粗面试件的加工表现显著不同。同样参数下,镜面试件可获得更

低的表面粗糙度与更规整的槽边,但粗面试件上检测到的氧化物比例更低,深宽比更大。究其原因,粗面试件由于粗糙度较高,从而使钛合金基体和电解液的接触面积更大,这也就意味着同时进行电化学反应的界面更大,于是较高的材料去除率导致加工出更大的深宽比。氧化物的百分比指水平基面上样槽表面被氧化物覆盖的面积所占的比重,因此名义上的氧化物百分比要比实际值略小,表面粗糙度也会由于加工表面的不平整而更差。此外,因表面不平整,一些电解液会停留在加工区域附近,从而导致样槽的边缘轮廓整齐性变差。

粗面试件进行 EJM 加工时,可观察到频繁的电弧放电现象。结合前面的分析,粗面试件相比于镜面试件能够获得更高的加工效率,故单位时间内加工区域会产生更多的氧化物,而加工所用的电流密度较高(550A/cm²),一旦不导电的氧化物覆盖了较多的加工区域,就可能发生电弧放电。NaNO₃ 电解液相比于 NaCl 电解液更易生成氧化物,故放电的机率更高。通过增大喷嘴与待加工表面间的距离,可以减少放电现象,试验系列 2 可以有效地证明这一点:第一种电解液加工完成后,样槽表面已非常粗糙,但在应用第二种电解液继续进行加工时因喷嘴与工件的距离实际上已得到了增大,故基本没有观测到电弧放电现象。

3.3 电解液使用顺序的分析

试验系列 2 所得结果表明,先 NaCl 后 NaNO₃ 电解液顺序下钛合金的加工效果较相反的使用顺序更好,其深宽比和表面质量分别提高了 7.7% 和 44.5%。当先使用 NaCl 电解液时,加工表面附着的氧化物更少,后面的 NaNO₃ 电解液能够进一步提升表面质量并继续向下加工;相反地,先使用 NaNO₃ 电解液得到宽且浅的槽后再使用 NaCl 电解液,槽底

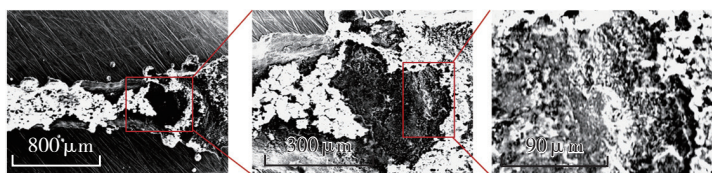


图10 应用NaCl电解液进行EJM加工过程中的放电现象
Fig.10 Arcing during EJM using NaCl

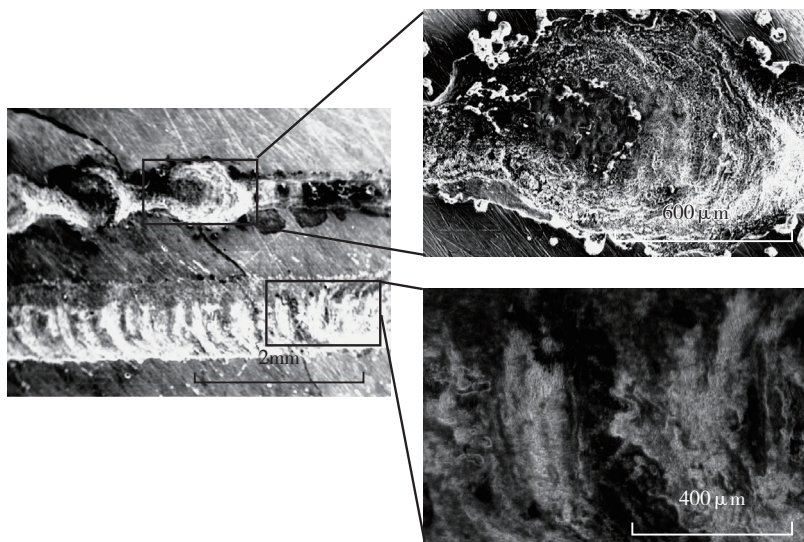


图11 应用NaNO₃电解液EJM加工中的放电现象
Fig.11 Arcing during EJM using NaNO₃

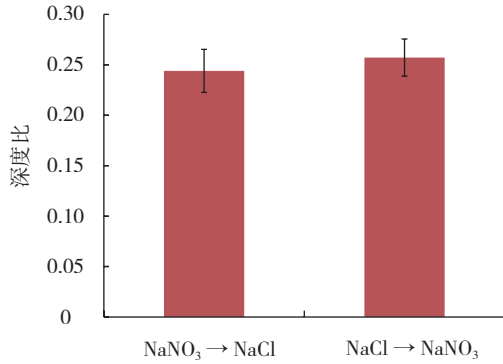


图12 不同电解液顺序下样槽的深宽比

Fig.12 Aspect ratio of grooves machined in different processes

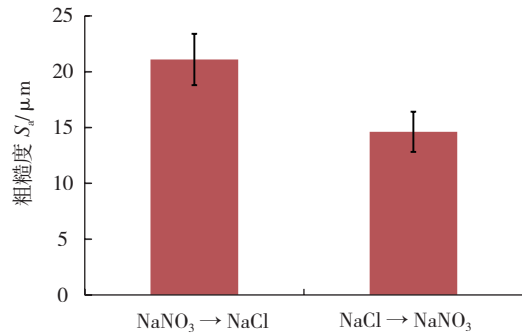
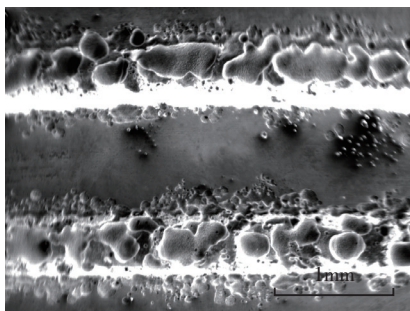
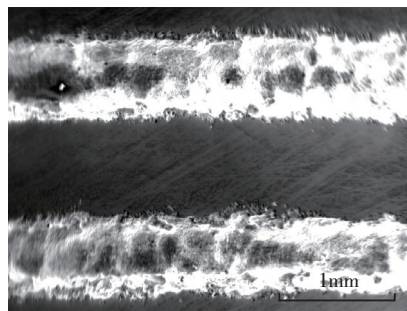


图13 不同电解液顺序下样槽底面的Sa值

Fig.13 Surface roughness of grooves machined in different processes



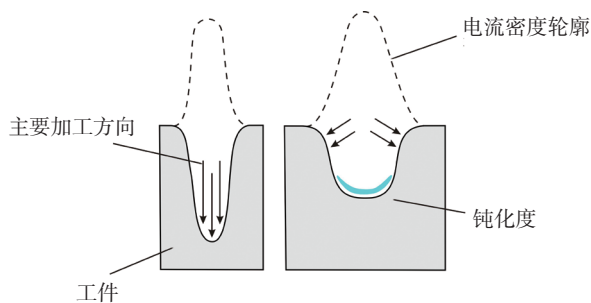
(a) NaNO₃ → NaCl



(b) NaCl → NaNO₃

图14 不同电解液顺序下样槽的微观形貌

Fig.14 Surface topography of the machined groove in different processes



(a)加工主要发生在底部表面 (b)加工发生在侧面

图15 加工过程原理图

Fig.15 Schematics of machining process

氧化物较多,阻碍继续向下加工,且样槽的边缘会被腐蚀,导致边缘轮廓质量下降。

结论

(1) 当电解液一定时,钛合金表面的原始状态越好, EJM 加工效率越低(表面氧化物占比高,样槽深宽比小),但获得的表面质量越高。

(2) 当钛合金表面的原始状态

一定时,电解液为 NaNO₃ 溶液时所得的表面质量和边缘光整度更好。而当电解液为 NaCl 溶液时, EJM 加工效率更高(氧化物占比低,深宽比大)。

(3) 当其他状态参数一定时,先 NaCl 电解液后 NaNO₃ 电解液顺序下,加工表面可得到更低的粗糙度值与更整齐的边缘,且加工效率更高。

参考文献

[1] VEIGA C, DAVIM J P, LOUREIRO A J R. Review on machinability of titanium alloys: the process perspective[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2013, 34(2): 148-164.
 [2] MITCHELL-SMITH J, MURRAY J W, KUNIEDA M, et al. Electrochemical

jet machining for surface texturing of inconel 718[C]//BAHRE D, REBSCHLAGER A, Saarbrucken 2014: Proceedings of INSECT 2014 111-118.

[3] DAN M. Ultrasonic assistance in electrolyte jet machining: enhancing the machinability of titanium through investigation of the effects of ultrasonic parameters on depassivation[R]. Nottingham: University of Nottingham, 2016.

[4] HACKERT-OSCHÄTZCHEN M, MARTIN A, MEICHSNER G, et al. Microstructuring of carbide metals applying Jet electrochemical machining[J]. Precision Engineering, 2013, 37(3): 621-634.

[5] SHOYA K, HARUO S, MASANORI K, et al. Study on electrolyte jet cutting[J]. Procedia CIRP, 2012, 1(1): 627-632.

[6] WATARU N, TOMONE I, MASANORI K. Generating complicated surface with electrochemical jet machining[J]. Precision Engineering, 2007, 31(1): 33-39.

[7] JOÃO C D S N, Accuracy in electrochemical machining: a study of case[C]//20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado: Radio Sonde, 2009.

[8] THOMAS W, High rate electrochemical dissolution of iron-based alloys in NaCl and NaNO₃ electrolytes[D]. Stuttgart: The University of Stuttgart, 2002.

[9] SPEIDEL A, MITCHELL-SMITH J, WALSH D A, et al. Electrochemical jet machining of titanium alloys using novel electrolyte solutions[J]. Procedia Cirp, 2016, 42 :367-372.

通讯作者: 宋永伟, E-mail: 25316252@qq.com。

Effect of Surface Condition and Electrolyte on Electrochemical Jet Machining (EJM) of Ti6Al4V

SONG Yongwei, TUO Zhanyu

(AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

[ABSTRACT] Ti-alloy is widely used in aeroengine, sodium nitrate solution (NaNO_3) and sodium chloride solution (NaCl) are widely used in electrochemical jet machining (EJM). This paper Focused on the machining performance of Ti-alloy with the use of EJM. At first, the two kinds of electrolytes were tested on Ti-alloy with different surfaces. Then the processing quality was explored by analyzing the channel aspect ratio (depth/width), channel surface roughness (S_a), oxide percentage and surface topography. At last the two kinds of electrolytes were used in EJM in different orders again, and the excellent order was confirmed. Those two tests provided academic and experimental basis for the improvement of EJM on Ti6Al4V.

Keywords: Ti6Al4V; Surface condition; Electrolyte; Electrochemical jet machining (EJM)

(责编 铃兰)

(上接第100页)

problem of parts with thin wall after carburizing and quenching[J]. Hot Working Technology, 2003(3):60-62.

[2] 吴秋平,王春旭,刘宪民,等. 回火温度对9310钢力学性能及组织的影响[J], 热加工工艺, 2012, 41(6): 179-180.

WU Qiuping, WANG Chunxu, LIU Xianmin, et al. Influence of tempering temperature on mechanical properties and microstructure of 9310 steel[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(6): 179-180.

[3] 李志. 航空超高强度钢的发展[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

LI Zhi. Development of aeronautical ultra-high strength steels[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012.

[4] 王广生. 航空热处理标准应用手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.

WANG Guangsheng. Air heat treatment standard application manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.

[5] 李克. 航空发动机用轴类零件渗碳工艺研究[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(1): 45-47.

LI Ke. Research on gas carburizing process of shaft parts in aircraft engine[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(1):45-55.

[6] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册·热处理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.

Aviation Manufacturing Engineering

Handbook Editorial Committee. Aviation manufacturing engineering handbook (heat treatment)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[7] 佟小军, 孙枫, 赵立斌, 等. HB/Z20024—2014 航空用钢制件真空渗碳、碳氮共渗工艺[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2015.

TONG Xiaojun, SUN Feng, ZHAO Libin, et al. HB/Z20024—2014 Vacuum carburizing & carbonitriding process of steel parts for aviation[S]. Beijing: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence. PRC, 2015.

通讯作者: 李克, E-mail: like2007331@163.com.

Research on Engineering Application for Carburizing-Quenching Process of the Thin-Wall Hollow Shaft for 9310-Steel

LI Ke, ZHANG Li, LUO Qiang

(AECC South Industry Co.,Ltd., Zhuzhou 412002, China)

[ABSTRACT] Carburization-quenching process of aerongine has been researched. Vacuum-carburizing process parameters has been adjusted. The results showed that the depth of the surface coating was 0.5 mm. Step quenching, loading mode, and stress-relief method has been improved. The part has high hardness and small deformation after carburizing and quenching, through the assessment of the aeroengine 150h lasting. The prospect of engineering application for carburization-quenching process of thin-wall hollow shaft was very good.

Keywords: 9310-steel; Thin-wall hollow shaft; Carburization-quenching; Deformation

(责编 铃兰)