

钛合金 EJM 加工中超声辅助作用研究

宋永伟 拓占宇

(中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 西安, 710065)

摘要: 本文致力于研究钛合金在应用超声辅助(UA)进行电解液喷射加工(EJM)时的表现。钛合金进行 EJM 加工时,工件表面易生成钝化层进而导致加工效率降低。本文分别对应用氯化钠(NaCl)电解液和硝酸钠(NaNO₃)电解液的超声辅助钛合金 EJM 加工效果进行研究,通过分析比较常规 EJM 加工以及功率一定,频率分别为 25,68,135 kHz 的三种超声辅助 EJM 加工所得钛合金样槽的表面氧化物百分比、深宽比、表面粗糙度和微观形貌,论证了 UA 在钛合金 EJM 加工中的具体作用,为改进钛合金 EJM 加工的质量与效率提供了新的思路与方法。

关键词: 航空宇航制造工程;钛合金;EJM 加工;超声辅助

中图分类号: V261.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2017)S-0163-05

Ultrasonic Assistance in Electrochemical Jet Machining of Ti6Al4V

SONG Yongwei, TUO Zhanyu

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

Abstract: We focused on the machining performance of Ti6Al4V's electrochemical jet machining (EJM) with the use of ultrasonic assistance (UA). When EJM is applied to process Ti6Al4V, the passivating layer on the surface always reduces the machining efficiency. Sodium nitrate solution (NaNO₃) and sodium chloride solution (NaCl) were tested in Ti6Al4V's EJM with the use of UA, respectively. By analyzing the channel aspect ratio (depth/width), channel surface roughness (Sa), oxide percentage and surface topography of the machined workpiece under the condition of normal EJM and EJM with UA under the frequencies of 25, 68, 135 kHz, the effect of UA for EJM was validated, which offered a new idea for improving the quality and efficiency of Ti6Al4V's EJM performance.

Key words: manufacturing engineering of aerospace vehicle; Ti6Al4V; electrochemical jet machining; ultrasonic assistance

电解液喷射加工(Electrochemical jet machining, EJM)作为近些年来较为热门的新兴技术方法,可解决钛合金等导电材料难以通过传统方法加工的问题。经 EJM 加工的零件,表面质量优异且无残余应力,非常适于零件的最终精密加工^[1]。

钛合金(Ti6Al4V)化学性质活泼,加工过程中工件表面极易发生钝化作用进而导致导电性能的降低,最终影响 EJM 加工的速度与效果^[2,3]。电化学加工(ECM)中常用的去钝化方法有化学去钝

化、流体动力学去钝化以及机械去钝化三大类^[4]。但对于 EJM 来说,这些方法都有一定的局限性:化学去钝化会产生健康与安全风险,且废液处理成本较高;流体动力学去钝化中电解液的流速较低,不足以移除工件表面的氧化物;机械方法预先处理工件表面能够收到一定的成效,但其很难在 EJM 加工过程中实时去除新产生的钝化层^[2]。前人大量的理论和试验研究表明,电化学加工中应用超声辅助技术(UA)可以有效地提高工件的加工质量与精度^[4-7]。

收稿日期: 2017-05-15; **修订日期:** 2017-06-20

通信作者: 宋永伟,男,工程师, E-mail: 25316252@qq.com。

引用格式: 宋永伟,拓占宇. 钛合金 EJM 加工中超声辅助作用研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S): 163-167.
SONG Yongwei, TUO Zhanyu. Ultrasonic assistance in electrochemical jet machining of Ti6Al4V[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S): 163-167.

通常,超声辅助技术在电化学加工中有两种加载方式,分别为直接振动法(刀具振动,工件固定)和间接振动法(通过超声波激励电解液以传播波能量)^[4]。

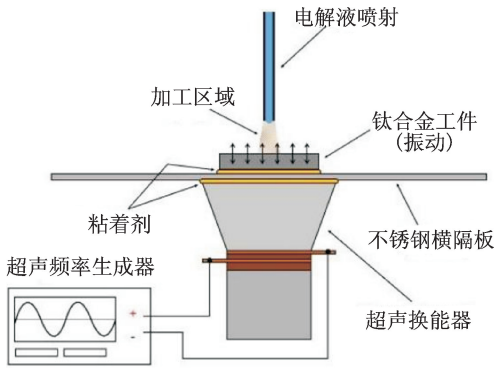


图1 超声辅助 EJM 加工平台示意图
Fig. 1 Schematic of UA-EJM platform

考虑到 EJM 加工的基本原理,本文借鉴直接振动法原理搭建了超声辅助 EJM 加工平台,具体组成结构如图 1 所示^[7]。图 2 为 EJM 加工设备实物图。

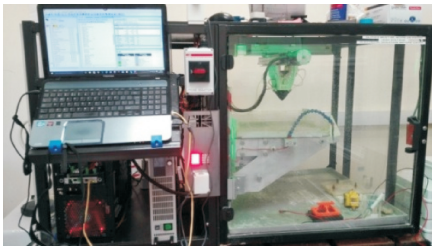


图2 EJM 加工设备
Fig. 2 EJM machine

本文分别对采用氯化钠(NaCl)电解液和硝酸钠(NaNO₃)电解液的钛合金 EJM 加工过程实施超声辅助,通过对比分析加工所得钛合金样槽的表面氧化物百分比、深宽比、表面粗糙度和微观形貌,研究超声辅助对钛合金 EJM 加工结果的影响,为实现钛合金的稳定精密加工提供理论与试验依据。

1 超声辅助 EJM 精密加工试验

1.1 EJM 加工参数

为保证不同试件加工状态的一致性,除超声辅助相关参数外,其他设备参数在试验过程中始终保持稳定。根据 Dan 等人^[7]前期所获得的研究成果,设备优选参数如表 1 所示。

表 1 电解液喷射加工试验参数^[8]

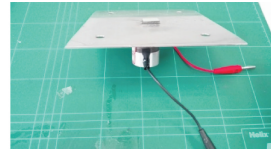
Tab. 1 Machining parameters of EJM

参数	数值
喷嘴直径/ μm	$\text{O}250$
电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	550
喷嘴移动速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.5
电解液流速(由喷嘴处测得)/ $(\text{ml} \cdot \text{min}^{-1})$	70
喷嘴与待加工表面间距离/ mm	0.5

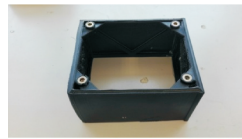
常规材料的 EJM 加工中常用的电解液有 NaCl 溶液和 NaNO₃ 溶液^[9,10],本文选用的 NaCl 电解液与 NaNO₃ 电解液的浓度均为 2.5 mol/L。

1.2 钛合金试件安装

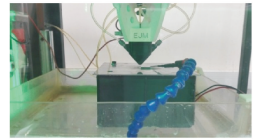
EJM 加工中工件材料通过电化学反应去除,加工区域需与超声换能器完全绝缘,否则会因漏电导致电弧放电或漏加工现象。如图 3(a)所示,拉格朗日换能器与工件分别从上下两面直接粘接在薄不锈钢隔板的中心处,以减少振动传递过程中能量的损失。该隔板具有良好的抗腐蚀性,粘接所用的树脂胶可确保工件与换能器相互绝缘,并通过电流测试仪再次确认是否存在漏电现象。图 3(b)所示的树脂底座用于隔离超声振动,避免机床精度与结构的损伤。因隔板面积较大,EJM 加工中喷射出的电解液难以接触到树脂底座且可远离换能器,进一步确保加工过程中的绝缘。整体组装应用如图 3(c)所示。



(a) Adhesive joint of sample, transducer and clapboard



(b) Resin base



(c) Adhesive joint during EJM processing

图3 试件安装与关键零部件

Fig. 3 Samples mounting and key components

1.3 试验设计思路

为研究不同的超声频率对钛合金 EJM 加工效果的影响,本文在保证超声功率 60 W 恒定不变的情况下分别选用低频、中频和 3 个频段的超声(25, 68, 135 kHz),依次进行超声辅助 EJM 加工试验,具体加工方案如图 4(a)所示。该方案下可同时研究超声辅助对不同电解液下钛合金 EJM 加工的影响。每个试件上加工 8 条相同长度的样槽,其中前 4 条使用 NaNO₃ 电解液,后 4 条使用 NaCl 电解液。同种电解液加工的 4 条样槽中,只有前 2 条使用超声辅助,每个试件上应用 1 种超声频率,共使用 3 个试件进行加工试验。加工实例如图 4(b)所示。

2 试验结果与分析

为研究超声频率对不同电解液下钛合金 EJM 加工状态的影响,分别对各试件加工后所得样槽的表面氧化物百分比、深宽比、粗糙度以及微观形貌

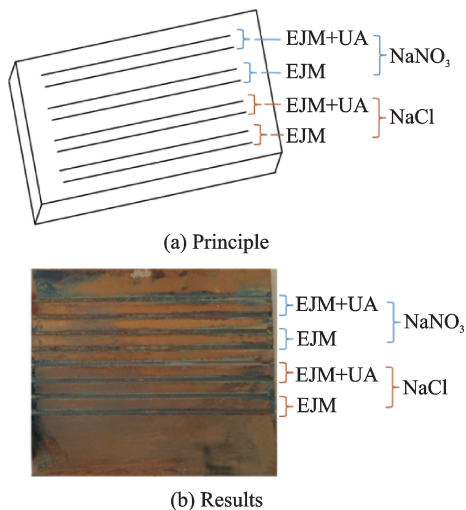
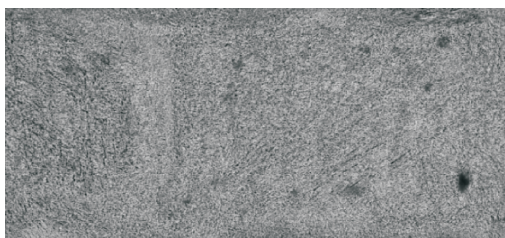
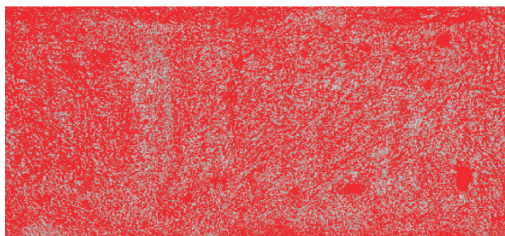


图 4 试验原理与钛合金试件加工实例
Fig. 4 Methods and machined sample



(a) Groove in Fig.5 (ignoring the anomalous edges)



(b) Results after processed by ImageJ

图 6 钛合金基体上氧化物的提取
Fig. 6 Extracting of oxide on the titanium alloy

进行比较分析。

2.1 表面氧化物百分比

表面氧化物百分比的数值大小通过背闪电子 (BSE) 图像获得。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 5 所示。利用图像处理软件(ImageJ)的颜色阈值功能提取图像中的颜色百分比,可得到不同电解液作用下不同超声频率下加工后的表面氧化物占样槽总面积的百分比,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 6 所示。

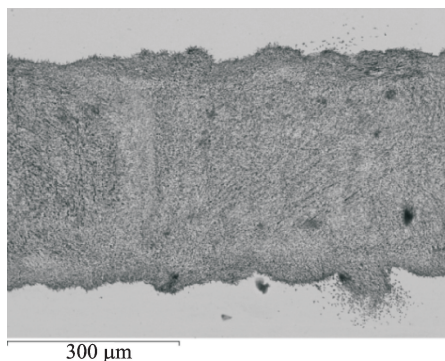
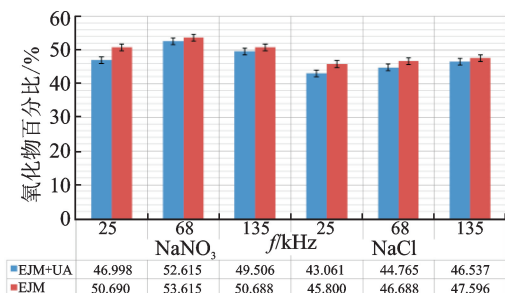


图 5 超声辅助下应用 NaNO₃ 电解液所加工出样槽的 SEM 照片(背闪电子)
Fig. 5 SEM image of the groove machined with UA using NaNO₃ (BSM)

每个样槽上选取 5 处不同的区域,分别计算氧化物占表面积的百分比,以 5 个数值的平均值表征样槽表面氧化物的比例,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。试验结果如图 7 所示,无论应用何种频率的超声辅助,两种电解液下钛合金表面氧化物的占比均有所下降,且同种电解液下,超声频率为 25 kHz 时,钛

合金样槽表面的氧化物含量最小,其中电解液为 NaCl 溶液和 NaNO₃ 溶液时分别为 43.06% 和 47.0%。当电解液为 NaCl 溶液时,同样条件下所得氧化物少于 NaNO₃ 电解液,而 NaNO₃ 电解液下,超声频率为 25 kHz 时氧化物占比下降最多,降低了 7.28%。



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 7 氧化物占槽底总面积的百分比
Fig. 7 Oxide percentage of machined grooves

2.2 样槽深宽比

为准确分析钛合金样槽的深宽比与底面粗糙度,数据测量前需将加工表面生成的氧化物去除。具体分两步进行:首先在水流冲刷下用聚合物毛刷手工去除,然后将样件置于超声波清洗机中震荡清洗 25 min(全信号,80℃)。清洗完毕后,在每条槽上利用 3D 光学显微镜选取 3 处不同的位置测量样槽宽度与深度,计算出各截面的深宽比(槽深/槽宽)后,以平均值表征样槽的深宽比。

不同条件下所得样槽的深宽比如图 8 所示,超声辅助技术一定程度上提高了钛合金 EJM 加工所得样槽的深宽比。同样的超声频率下,NaCl 电解

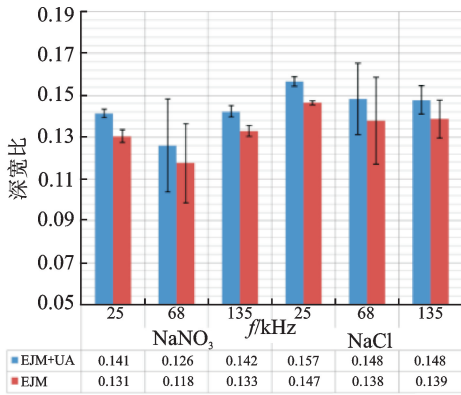


图 8 样槽深宽比

Fig. 8 Aspect ratio of machined grooves

液相比于 NaNO₃ 电解液, 样槽的深宽比要较大。NaCl 电解液下, 超声频率为 25 kHz 时样槽的深宽比达到最大值 0.157; 而 NaNO₃ 电解液下, 超声频率为 135 kHz 时所得样槽的深宽比达到最大值 0.142, 但超声频率为 25 kHz 时, 深宽比提高最为明显, 约为 8.34%。

2.3 样槽底面粗糙度

将 3D 光学显微镜扫描所得的轮廓数据导入至 MountainsMap 软件中, 可以得到加工所得的样槽底面的粗糙度。本文从每个样槽上随机选取 3 处区域, 分别得到各区域的 Sa 后, 以平均值表征槽底面的粗糙度。

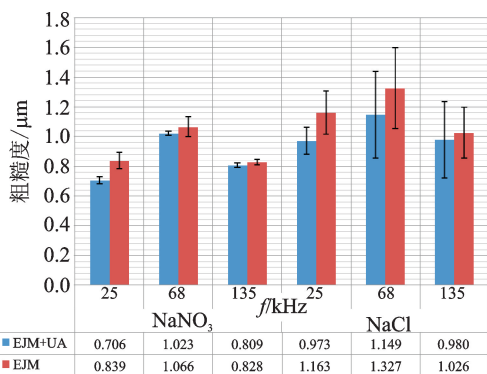


图 9 样槽底面粗糙度

Fig. 9 Sa of machined grooves

最终结果如图 9 所示, 超声辅助技术能降低被加工表面的粗糙度。同样的超声频率下, NaNO₃ 电解液所得槽的粗糙度要小于 NaCl 电解液。NaNO₃ 电解液下, 超声频率为 25 及 135 kHz 时加工所得样槽的粗糙度分别为 0.706 和 0.809, 明显小于超声频率为 68 kHz 时的 1.023; 当电解液为 NaCl 时且超声频率为 25 及 135 kHz 时, 样槽的粗糙度 (0.973 和 0.980) 也明显小于超声频率为 68 kHz 时 (1.149)。

2.4 微观形貌

钛合金样槽的微观形貌通过扫描电子显微镜, 在二次电子下成像 (SEM)。以超声频率为 25 kHz 为例, 观察不同电解液下钛合金常规 EJM 和使用超声辅助后 EJM 的加工结果, 如表 2 所示。可以看出, 电解液为 NaNO₃ 时样槽的边缘相比 NaCl 电解液时更为齐整。在较低的放大倍率 ($\times 37$) 下, 很难区分超声辅助技术对加工结果的影响。

表 2 不同电解液下, 使用和未用超声辅助 EJM 加工后样槽形貌

Tab. 2 Examples of grooves machined with and without UA using NaNO₃ and NaCl

电解液	UA+EJM	EJM
NaNO ₃		
NaCl		

为进一步观察样槽表面的微观形态, 分别将表 2 中的 4 种不同情形依次放大观察, 所得结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 不论在何种电解液的作用下, 使用超声辅助技术后, 加工表面具有相对均匀且多孔的微观形态; 未使用超声辅助技术加工的样槽表面均一性较差, 具有很多片状或块状的微观结构。超声辅助有效地降低了表面氧化物的形成, 从而提高了样槽的深宽比与底面的质量, 这也恰好印证了前文中相应样槽的表面氧化物百分比、深宽比以及底面粗糙度的实测结果。

2.5 结果与讨论

上述试验结果表明, 在 EJM 加工过程中使用超声辅助对表面氧化物的降低、样槽深宽比的提高以及底面质量的改善具有非常重要的作用。超声频率为 25~135 kHz 对钛合金 EJM 加工结果均有积极的作用与效果, 当超声频率为 25 kHz 时加工结果最为理想。

容易发生氧化反应是钛合金的固有属性, 超声辅助技术并不能阻止这一反应过程并减少氧化物的生成, 但是超声振动可以促使氧化物从样槽表面剥离, 并被电解液冲走, 从而促使电化学反应进行的更为顺畅。如图 11(a) 所示, 工件向远离喷嘴的方向振动时, 产生的负压会使工件和电解液接触面

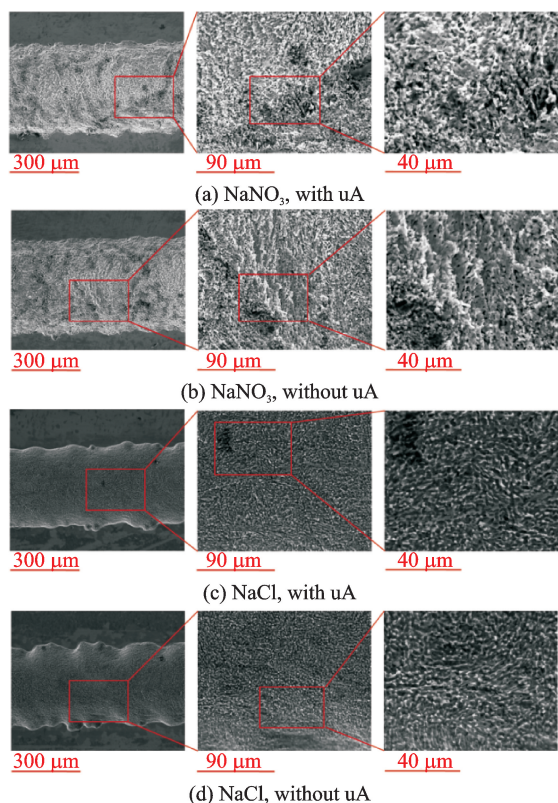


图 10 不同电解液下使用和未用超声辅助 EJM 加工后的样槽微观形貌放大图

Fig. 10 Surface topography of the grooves machined with and without UA using different electrolytes THE

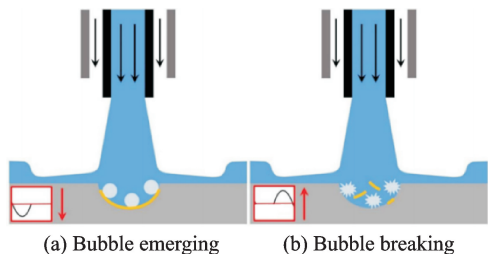


图 11 超声辅助加工过程分解^[7]

Fig. 11 Substep of UA manufacturing procedure

之间产生非均一的气泡,当工件朝向喷嘴振动时,增大的压强会使气泡快速破裂,从而导致氧化物变得疏松,更易脱离加工表面(图 11(b)所示),于是从喷嘴喷出的高速电解液将散布的氧化物冲离加工表面^[6]。超声频率和振幅之间存在一定的关系,当频率越低时振幅越大^[7]。更大的振幅将导致更大气泡的生成以及更高密度的气泡破裂,从而加速了表面氧化物的去除速率,这也正是 3 种频率中最低频的 25 kHz 得到的加工效果最为理想的原因。

3 结 论

通过分析比较不同电解液下 3 种超声频率对钛合金 EJM 加工所得样槽的具体参数与微观形貌,可以得出如下结论:

(1) 使用超声辅助技术能很好地降低 EJM 加工钛合金时的表面氧化物百分比,提高样槽的平均深宽比并改善表面质量,同时可使样槽的边缘更为齐整(即加工的定位性更好),表面微观组织结构更为均匀;

(2) 综合考虑样槽表面的氧化物百分比、深宽比、表面粗糙度以及微观形貌的具体参数,当超声频率为 25 kHz 时钛合金 EJM 加工效果要优于 68 和 135 kHz;

(3) 常规钛合金 EJM 加工时,NaCl 电解液可获得更高的加工效率(较大的样槽深宽比,较低的表面氧化物比例),NaNO₃ 电解液可获得更佳表面质量(齐整的样槽边缘与较低的表面粗糙度),超声辅助下,这一规律仍然成立。

参考文献:

- [1] MITCHELL-SMITH J, MURRAY J W, CLARE A T, et al. Electrolyte jet machining for surface texturing of inconel 718[C]// 10th International Symposium on ElectroChemical Machining Technology (INSECT). Saarland University, Saarbrucken, Germany: 2014: 111-118.
- [2] WALTHER B. Electrochemical dissolution of hard metal alloys. [J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(27): 7732-7737.
- [3] BANNARD J. On the electrochemical machining of some titanium alloys in bromide electrolytes [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1976, 6(6): 477-483.
- [4] NICOAR D, HEDES A, SORA I. Ultrasonic enhancement of an electrochemical machining process[C]// Wseas International Conference on Applications of Electrical Engineering. [S. l.]: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2006:213-218.
- [5] RAJURKAR K P, ZHU D, MCGEOUGH J A, et al. New developments in electro-chemical machining [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1999, 48(2):567-579.
- [6] SKOCZYPIEC S. Research on ultrasonically assisted electrochemical machining process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5):565-574.
- [7] Mercer D. Ultrasonic assistance in electrolyte jet machining: enhancing the machinability of titanium through investigation of the effects of ultrasonic parameters on depassivation[R]. Design Report, University of Nottingham, 2016.
- [8] MITCHELL-SMITH J, CLARE A T. Electrochemical jet machining of titanium: Overcoming passivation layers with ultrasonic assistance [J]. Procedia Cirp, 2016, 42:379-383.
- [9] da SILVA NETO J C. Accuracy in electrochemical machining: A study of case[C]// 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brazil: [s. n.], 2009.
- [10] Wagner T. High rate electrochemical dissolution of iron-based alloys in NaCl and NaNO₃ electrolytes[D]. Germany: University of Stuttgart, 2002.