

微小孔电化学去毛刺试验研究*

Experimental Study on Electrochemical Deburring of Miniature Hole

大连理工大学 徐文骥 余自远 孙晶 魏泽飞

[摘要] 采用电化学方法对不锈钢管壁上钻削的微小孔与不锈钢管内壁相贯处难到达区域的毛刺进行去除。实验研究了加工时间、电解液成分与浓度、电解液流动方式对微小孔毛刺去除质量的影响以及相应条件下阴阳极极间电压的变化规律。研究表明:在优选的加工工艺参数条件下,可有效地去除微小孔毛刺。

关键词: 电化学去毛刺 微小孔 极间电压

[ABSTRACT] The electrochemical deburring (ECD) is adopted to remove burrs which exist in the intersections of the miniature drilling holes and the inner wall of stainless steel pipe. By processing experiments, the influences of the machining parameters on the deburring quality and the change law of the voltage between the electrode and workpiece are explored, such as process time, electrolytic composition and concentration, flow forms of electrolyte. The ECD results show that the burrs can be removed with good quality and efficiency in the condition of optimal selecting parameters.

Keywords: ECD Miniature hole Voltage between electrode and workpiece

随着科学技术的发展,越来越多的工业产品向微型化和精密化方向发展,直径在 1mm 以下的微小孔的应用越来越广泛,如航空发动机高压涡轮工作叶片、导向叶片、燃烧室的气膜冷却孔、燃料喷油嘴、汽化器、惯性陀螺仪中的仪表元件以及微型传感器等。钻削是微小孔加工中最常用的方法,但钻孔时会在孔的出口处产生细小的毛刺^[1]。对于精密零件来说,加工后的毛刺将会严重影响零件的精度、质量和使用性能,因此必须去除。

目前去除毛刺的方法主要有机械式抛光法、磁力研磨法、化学抛光法和电化学法等^[2-4]。对于直径较大的孔采用上述方法去毛刺技术比较成熟,但机械式抛光或磁力研磨抛光可能会导致磨料、微小颗粒或材料移除物等物质将微小孔覆盖甚至填满堵塞;化学抛光加工时间较长,而且会对零件非加工表面产生腐蚀;电化学加工

方法加工过程无机械力、可到达性好,适用于强度较低及传统方法难以到达的区域,如交叉孔处的毛刺,目前在去除清除直径 2mm 以上的孔毛刺方面已较为成熟。总体看,目前精密零件的微小孔去毛刺,特别是去除难到达区域的毛刺还是一个难题。

本文将针对直径 1mm 以下的微小孔毛刺(尤其是因受零件尺寸、形状等限制难以到达区域的毛刺),研究电化学去除的关键问题,重点研究加工条件对微小孔毛刺去除质量的影响规律。鉴于加工过程中极间电压的变化可以在一定程度上反映微小孔毛刺的去除程度,本文还分析了不同加工条件下极间电压的变化规律。

1 电化学去毛刺基本原理

电化学去毛刺是利用电能、化学能进行阳极溶解去毛刺的方法,其基本原理如图 1 所示,零件与电源的正极相连,构成阳极,成形工具与直流电源的负极相连,构成阴极。两极之间保持一定的间隙,其间充满流动的电解液,接通电源后,电化学反应开始进行。工件阳极表面将发生氧化反应,工具阴极表面将发生还原反应。

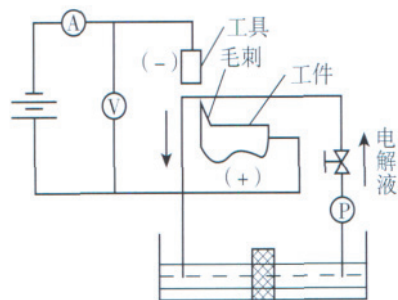


图1 电化学去毛刺原理图

Fig.1 Theoretical diagram of electrochemical deburring

工件阳极的基本电化学反应式为:



工具阴极的基本电化学反应式为:



加工时,在工件阳极表面形成一层很薄的氧化膜,对工件阳极具有一定保护作用,毛刺等凸出部位氧化膜容易扩散且电流密度较为集中,因而溶解速度快,形成光滑

* 辽宁省科技计划项目(2009220022)资助。

圆角。

2 试验方法

2.1 建立微小孔电化学去毛刺试验装置

被加工工件为外径 10mm、内径 7mm 的不锈钢管，在其管壁上加工一组直径为 0.9mm 的微小孔，毛刺即存在于微小孔与不锈钢管内壁相贯处。毛刺的主要形状如图 2 所示，其中均匀型与钻孔帽型毛刺主要出现在低进给速度条件下，皇冠型毛刺主要出现在高进给速度条件下^[5]。试验装置如图 3 所示，其中直流稳流稳压电源为电化学加工提供稳定、精准的电流；数字式万用表的两个探针分别与阴极和工件相连，并通过数据传输线与计算机串口相连来采集加工过程中极间电压变化，采集

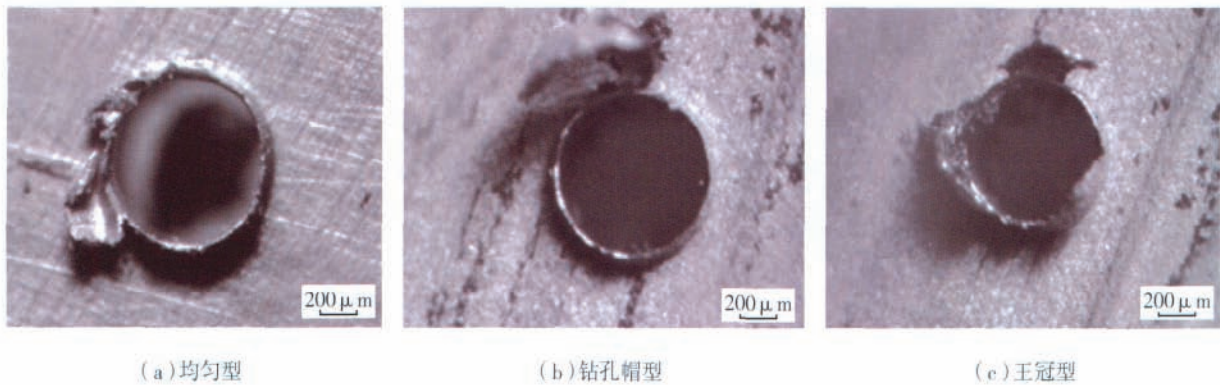


图2 典型毛刺形态

Fig.2 Typical burrs shape

表1 电化学去毛刺试验参数

| 电解液主要成分 | 电解液浓度/% | 电解液流动方式 | 电解液温度/°C | 加工时间/s | 加工电流/mA | 加工间隙/mm |
|-------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| NaNO ₃ | 5 ~ 30 | 静止 | 25 | 20 ~ 60 | 200 | 0.2 |
| NaCl | | 流动 | | | | |
| NaNO ₃ +NaCl | | 超声波振荡 | | | | |

3 试验结果与讨论

3.1 电解液成分对加工质量及极间电压影响

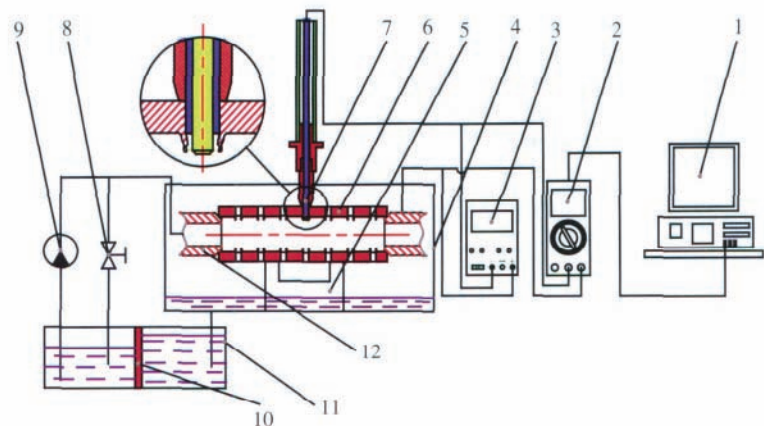
电解液是发生电化学反应的载体，不同的电解液与材料的匹配构成的电极体系显示出不同的电流效率特性，一般分为线性特性和非线性特性两类。线性电解液的典型代表是 NaCl 溶液；非线性电解液的典型代表是 NaNO₃ 溶液。采用表 1 中的加工参数，通过试验研究不同电解液成分对微小孔毛刺去除质量的影响。

如图 4 所示(工件材料: 不锈

速率设定为 1 次 /s；阴极直径为 0.5mm，材料为紫铜，屏蔽层厚度为 0.2mm，将阴极插入限位夹头并调节阴极伸出限位夹头的长度，使阴极绝缘管伸出夹头的长度等于不锈钢管壁厚。加工前将阴极从不锈钢管外部插入微小孔内，启动电解液循环泵并接通电源。

2.2 试验方案

试验参数如表 1 所示，分别研究电解液成分、电解液浓度、加工时间、电解液流动方式对微小孔毛刺去除质量及极间电压的影响。其中静止电解液方式是指将不锈钢管浸泡在电解液中，电解液本身不流动；流动电解液方式是指利用泵将电解液注入不锈钢管，让其不间断流过毛刺部位；超声波振荡电解液方式是指将不锈钢管浸泡在电解液中，然后再用超声波振荡电解液。



1—计算机;2—数字式万用表;3—直流稳流稳压电源;4—工作箱;5—工件支架;6—工件;7—阴极;8—阀门;9—电解液循环泵;10—过滤板;11—电解液箱;12—导电顶尖

图3 电化学去毛刺试验装置示意图

Fig.3 Diagram of experimental equipment for ECD

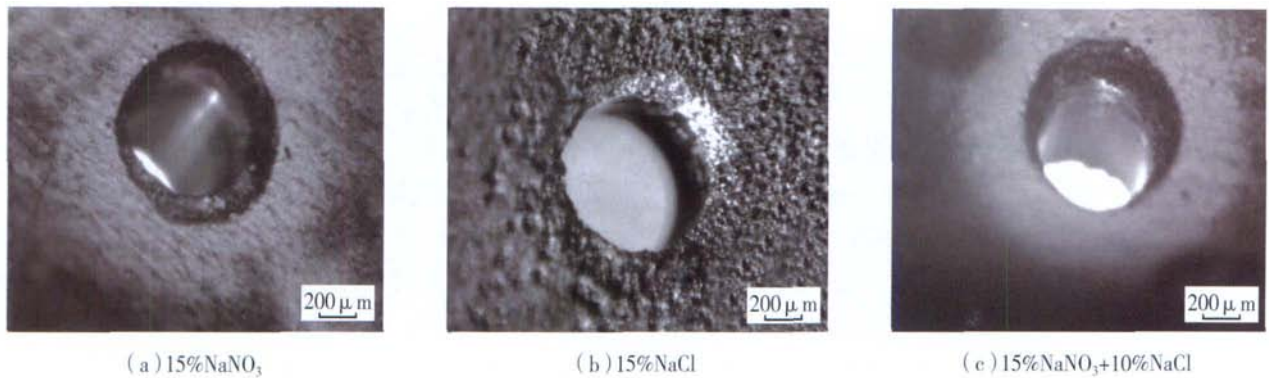


图4 不同电解液成分下微小孔毛刺去除照片

Fig.4 Images of miniature holes after ECD with various of electrolytes

钢;加工时间:40s;加工电流:恒流 200mA;温度:25℃;加工间隙:0.2mm),采用 15%NaNO₃ 电解液和采用 15%NaNO₃ 与 10%NaCl 混合电解液为主要成分的工作液加工后的微小孔毛刺被完全去除,且无杂散腐蚀坑,而采用 15%NaCl 电解液加工后的微小孔毛刺端周围管 内壁产生较为严重的杂散点蚀坑,其原因是 NaCl 电解 液活性和电流效率远高于 NaNO₃ 电解液。

如图 5 所示,采用 15%NaNO₃ 作电解液时的极间电压 高于使用 15%NaCl 作电解液时的极间电压,其原因是 电解液温度为 25℃时,前者的电导率 κ_1 要小于后者 的电导率 κ_2 ,在初始加工间隙相同与恒流的前提下,电 导率越大电解液的欧姆压降越大;采用混合电解液时的 极间电压介于采用 NaNO₃ 与 NaCl 作电解液时的极间电 压之间,表明混合电解液电导率 κ_3 介于 κ_1 、 κ_2 之间。

图 5 中(工件材料:不锈钢;加工时间:40s;加工电 流:恒流 200mA;温度:25℃;加工间隙:0.2mm)采用 NaCl 作电解液时的极间电压在前 10s 内逐渐下降,其

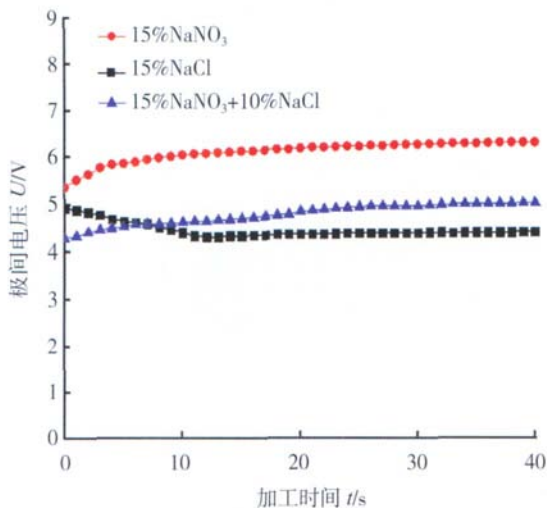


图5 不同电解液下极间电压变化规律

Fig.5 Change law of voltage between electrode and workpiece with various electrolytes

原因是不锈钢工件表面覆盖一层致密的具有较大电阻 率的氧化膜,产生较大的电压降,而 NaCl 电解液活性很 高,开始加工后,工件表面氧化膜被逐渐腐蚀,氧化膜产 生的电压降逐渐减小;10s 之后极间电压开始缓慢上升, 其原因是氧化膜被完全腐蚀穿,微小孔周围管内壁开始 产生杂散点蚀坑,电解液与工件基体材料直接接触,随 着加工的继续进行,阴阳极之间的加工间隙逐渐增大, 电解液产生的欧姆压降逐渐增大,因此加工开始 10s 之 后,极间电压开始缓慢上升;采用 NaNO₃ 电解液与混合 电解液时极间电压一直缓慢上升,其原因是这两种电解 液活性远低于 NaCl 电解液,杂散腐蚀较小,对工件氧化 膜腐蚀能力有限,随着加工的不断进行,阴阳极间加工 间隙逐渐变大,极间电解液的欧姆压降也逐渐增大。

3.2 电解液浓度对加工质量及极间电压影响

电解液浓度的改变会引起电导率很大的变化,而电 导率直接影响加工间隙和电流密度等工艺参数,并最终 影响微小孔去毛刺的质量和加工效率。采用表 1 中的 加工参数,通过试验研究不同浓度的 NaNO₃ 电解液对 微小孔毛刺去除质量的影响。

如图 6 所示(工件材料:不锈钢;加工时间:50s;加 工电流:恒流 200mA;温度:25℃;加工间隙:0.2mm),加 工时间为 50s 时,采用浓度低于 10%的 NaNO₃ 溶液作 为电解液,加工后的微小孔毛刺未能完全去除,并且浓 度越低,残留的毛刺高度越大,这表明微小孔电化学去 毛刺时采用低浓度的电解液加工效率低;当电解液浓度 高于 25%时,毛刺虽然能够被快速去除,但是加工后微 小孔毛刺端周围管内壁却会变黑。

如图 7 所示(工件材料:不锈钢;加工时间:50s;加 工电流:恒流 200mA;温度:25℃;加工间隙:0.2mm), 随着电解液浓度的增加,极间电压逐渐减小,其原因是 电解液电导率随着浓度增加而变大,因此电解液浓度越 低,阴阳极间热损耗越大;图中个别曲线存在突然变化 现象,原因是微小孔毛刺形状不规则,加工过程中有些

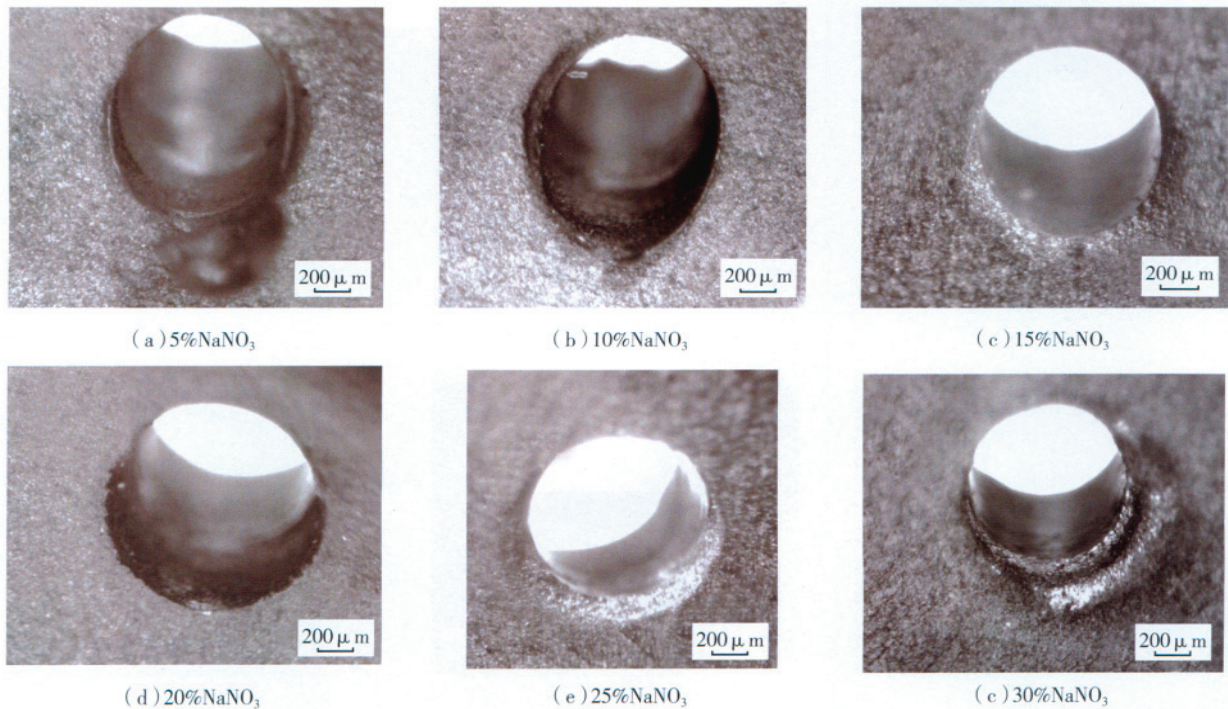


图6 使用不同浓度电解液去毛刺结果照片

Fig.6 Images of miniature holes after ECD with different concentration of electrolytes

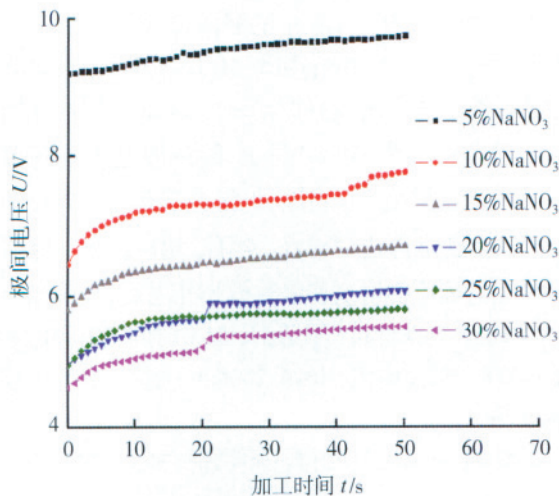


图7 不同电解液浓度下极间电压变化规律

Fig.7 Change law of voltage between electrode and workpiece with different concentrations of electrolytes

毛刺会突然脱落。

3.3 加工时间对加工质量的影响

加工时间对电化学去毛刺来说是非常重要的一个参数,加工时间长短直接影响毛刺的去除质量。采用表1中的加工参数,通过试验研究加工时间对微小孔毛刺去除质量的影响。

如图8(a)所示,钻削后的微小孔出口处存在不连续的向上翻卷的毛刺;图8(b)~(f)表明,加工时间在

30s以下时,微小孔毛刺未能被完全去除;加工时间在40s以上时微小孔的毛刺不仅完全被去除,而且还在毛刺端形成了一个倒角,但是加工时间过长会使微小孔边缘质量降低(工件材料:不锈钢;电解液:15% NaNO₃;温度:25℃;加工间隙:0.2mm;加工电流:恒流200mA)。

如图9所示(工件材料:不锈钢;电解液:15%NaNO₃;温度:25℃;加工间隙:0.2mm;加工电流:恒流200mA),由于采用绝缘管包住铜电极使得微小孔侧壁非加工表面被很好屏蔽,加工前、后微小孔屏蔽处孔直径 D_0 几乎没有变化;微小孔出口被电化学加工形成倒角后出口直径 D_b 随着加工时间变长而增大,其中 D_b 在0s~40s内变化较大,而在40s~50s内变化减小,50s以后几乎不变,这表明微小孔出口处毛刺在50s时已被去除完毕,且出口也被倒圆角,之后尽管增加加工时间,但由于阴极与阳极之间的间隙变大,而NaNO₃电解液属于非线性电解液,存在截断间隙,所以电化学加工金属蚀除速率减小,从而使得 D_b 在50s之后变化不明显。

3.4 电解液流动方式对加工质量及极间电压的影响

电解液除了具有电化学反应发生的载体作用外还具有排除电解产物、带走电化学加工过程所产生的热量、以确保正常加工的作用。因此电解液的流动方式对微小孔的毛刺去除质量有很大影响。采用表1中的加工参数,实验研究电解液流动方式对微小孔毛刺去除质量的影响。

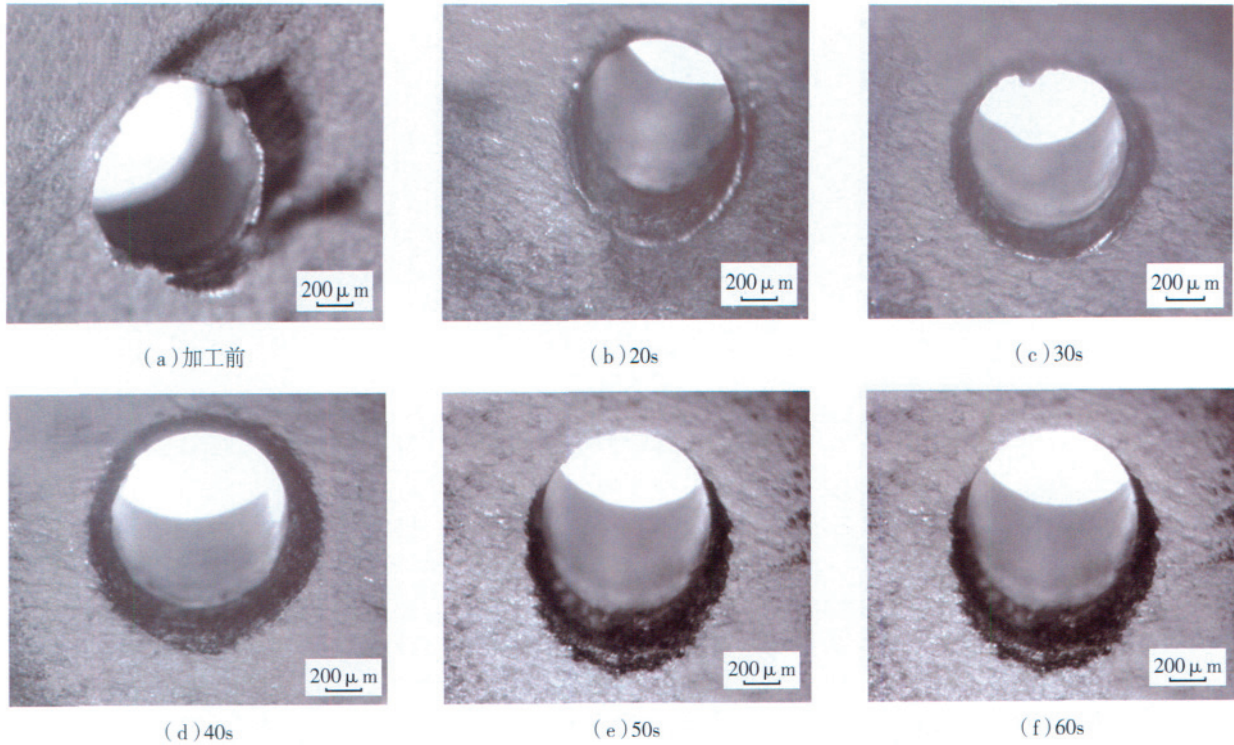


图8 不同加工时间微小孔去毛刺结果照片

Fig.8 Images of miniature holes after ECD with different time

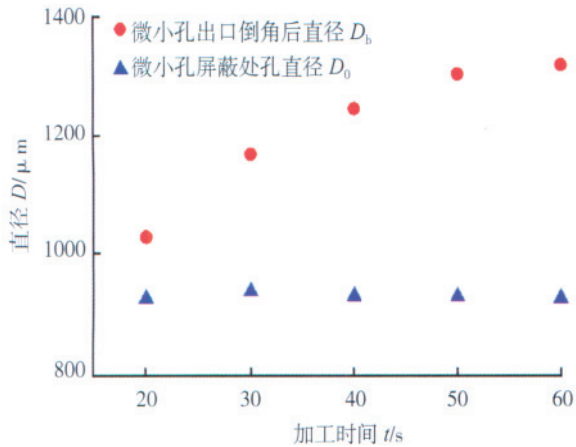


图9 微小孔毛刺去除随时间变化规律

Fig.9 Change low of deburring of miniature hole with different time

如图 10 (a) 所示, 静止电解液方式下微小孔出口处毛刺没有被完全去除; 如图 10 (b) 所示, 流动电解液方式下微小孔毛刺不但被完全去除, 而且还在孔端部加工出倒角; 如图 10 (c) 所示, 超声波振荡电解液方式下微小孔毛刺被完全去除, 但是孔端部边沿较流动电解液方式下孔端部边沿稍差。因此, 超声波振荡电解液可以防止电解产物堵塞和覆盖微小孔毛刺, 改善加工条件。图 10 中工件材料: 不锈钢; 加工时间: 50s; 电解液: 15%NaNO₃; 加工电流: 恒流 200mA; 温度: 25℃; 加工间隙: 0.2mm。

如图 11 所示(工件材料: 不锈钢; 加工时间: 50s; 电

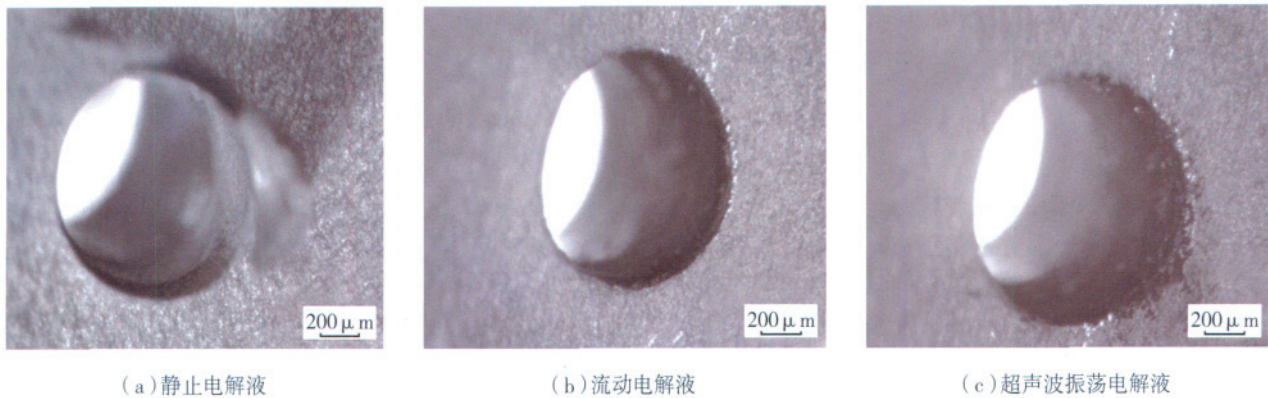


图10 不同电解液流动方式下去毛刺结果照片

Fig.10 Image of miniature holes after ECD with different flow forms of electrolyte

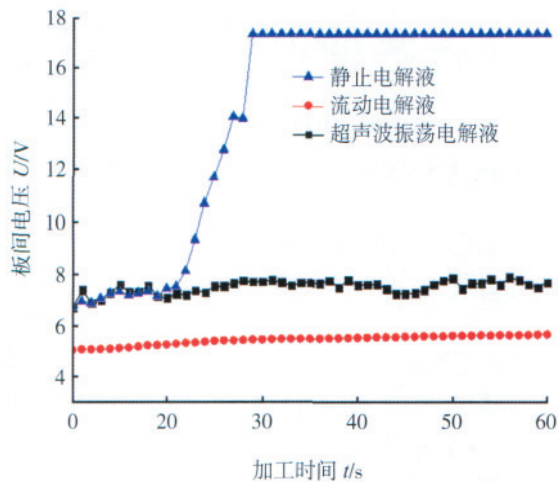


图11 不同电解液浓度下极间电压变化规律
Fig.11 Change law of voltage
between electrode and workpiece with different
concentrations of electrolytes

解液:15%NaNO₃;加工电流:恒流200mA;温度:25℃;加工间隙:0.2mm),静止电解液方式下极间电压快速上升到电源所限制的最大电压,之后一直维持最大电压不变化,其原因是电化学加工产生的难溶解Fe(OH)₃逐渐累积在微小孔毛刺部位,阻碍了电解液与毛刺的接触,Fe(OH)₃电阻率很大,阴阳极之间相当于断路,从而使得极间电压达到最大;流动电解液方式下极间电压呈缓慢上升趋势,且变化平稳,表明电解产物Fe(OH)₃在不断流动电解液冲刷下被带走,毛刺始终与新鲜电解液接触,电化学加工得以不断进行;超声波振荡电解液方式下极间电压呈总体缓慢上升,局部上下振荡,这表明利用超声波在液体中的空化作用、加速度作用及直进流作用可以使累积在微小孔毛刺处的电解产物Fe(OH)₃被分散、乳化、剥离,同时由于超声波振荡电解液会在电解液中产生微小气泡,气泡会进入极间间隙,使得极间电压也不停地上下变化,形成振荡曲线。

4 结论

(1)借助电化学方法,成功地去除了不锈钢管上钻削的微小孔($D=0.9\text{mm}$)与管内壁相贯处的毛刺,其优点是装置简单、操作方便、毛刺去除质量好、可以方便地对零件难到达区域毛刺进行去除、可以多工位加工,效率高。

(2)选用NaNO₃溶液或NaNO₃/NaCl混合溶液作为电解液的主要成分,不宜单独选用NaCl溶液做电解液,因为后者对微小孔非加工面的杂散腐蚀较为严重。

(3)NaNO₃电解液的浓度可控制在15%~20%。浓度过低会降低加工效率、增加极间热损耗;浓度过高会使微小孔边沿变黑。

(4)合理控制加工时间,加工时间过短会造成毛刺去除不尽;加工时间过长不仅会影响加工效率,而且会降低微小孔边沿的质量。

(5)尽量避免采用静止电解液方式对微小孔进行电化去毛刺加工。在由于受尺寸与形状等条件限制无法使用流动电解液方式加工的场所,可以考虑使用超声波振荡电解液方式代替静止电解液方式来完成电化去毛刺。

(6)恒电流加工时,通过检测极间电压,可在一定程度上判断微小孔毛刺的去除情况。

参考文献

- [1] Okasha M M, Mativenga P T, Driver N, et al. Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59 (1):199-202.
- [2] Ko S L, Baron Y M, Park J I. Micro deburring for precision parts using magnetic abrasive finishing method. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 19-25.
- [3] 丁建刚,洪若瑜,王廖沙. 钢基体材料化学去毛刺工艺的研究进展. 材料保护, 2007, 40 (7):56-58.
- [4] 李富长. 电化学去毛刺技术在航空产品中的应用. 航空精密制造技术, 2004, 40 (1):16-17.
- [5] Min S, Lee D E, Grave D A, et al. Surface and edge quality variation in precision machining of single crystal and polycrystalline materials. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220 (4): 479-487.

(责编 三丰)

(上接第69页)

of metallic pyramidal truss core materials- Experiments and modeling. International Journal of Plasticity, 2006, 22: 2118-2145.

[9] Deshpande V S, Fleck N A, Ashby M F. Effective properties of the octet-truss lattice material. Journal of The Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49: 1747-1769.

[10] Lim J H, Kang K J. Mechanical behavior of sandwich panels with tetrahedral and Kagome truss cores fabricated from wires. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43: 5228-5246.

[11] Queheillalt D T, Murty Y, Wadley H N G. Mechanical properties of an extruded pyramidal lattice truss sandwich structure. Scripta Materialia, 2008, 58: 76-79.

[12] Chiras S, Mumm D R, Evans A G, et al. The structural performance of near-optimized truss core panels. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39: 4093-4115.

[13] Fan Hualin, Yang Wei, Wang Bin, et al. Design and manufacturing of a composite lattice structure reinforced by continuous carbon fibers. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11 (5): 515-522.

[14] 范华林,杨卫,方岱宁,等. 新型碳纤维点阵复合材料技术研究. 航空材料学报, 2007, 27 (1):46-50.

[15] 卢天健,何德坪,陈常青,等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用. 力学进展, 2006, 36 (4):517-535.

(责编 三丰)