

# 扫描式阴极电化学光整加工对 车削外圆面边缘毛刺的去除

朱肖飞, 樊双蛟, 闫兆彬, 卜繁岭, 庞桂兵, 王满富

(大连工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 大连 116034)

**摘 要:** **目的** 通过电化学光整加工, 在改善车削零件表面粗糙度的同时, 有效去除工件边缘两侧方向的微小毛刺, 提高零件表面的完整性。**方法** 在扫描式阴极电化学光整加工能实现表面良好光整加工效果的参数范围内, 通过改变阴极局部形状, 改变毛刺部位的电场分布, 进而改变其材料去除速度, 实现毛刺去除。对不同形状阴极条件下, 毛刺表面的电流密度分布及毛刺顶端和底部的电流密度差值进行仿真分析, 得到使毛刺高度值下降较快的阴极形状。对工件进行扫描式阴极电化学光整加工, 获得表面粗糙度  $Ra$  与毛刺高度值的变化规律。**结果** 使用凸圆角阴极时, 毛刺顶端和底部的电流密度差值较大, 去除效率较高。 $Ra$  值在加工时间为 16~18 min 时出现拐点, 加工 20 min 时,  $Ra$  值由  $2.76\ \mu\text{m}$  降低至  $0.32\ \mu\text{m}$ ; 毛刺高度值在加工时间为 10~14 min 时出现拐点, 加工 20 min 时, 从  $17.10\ \mu\text{m}$  降低至  $2.64\ \mu\text{m}$ , 与表面粗糙度  $Rz$  值为同一量级。**结论** 通过改变阴极形状, 在电化学光整加工过程中能有效降低车削工件边缘两侧方向的微小毛刺, 实现零件使用性能的提高, 具有实际应用中的可行性。

**关键词:** 去毛刺; 电化学加工; 光整加工; 微小毛刺

中图分类号: TG662 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)12-0111-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.011

## Scanning Cathode Electrochemical Finishing for Removal of Burrs on Edge of Turning Cylindrical Surfaces

ZHU Xiao-fei, FAN Shuang-jiao, YAN Zhao-bin, BU Fan-ling, PANG Gui-bing, WANG Man-fu

(College of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

**ABSTRACT:** Electrochemical finishing can improve the surface roughness of turning parts and effectively remove micro two side-direction burr on the edge of the workpiece, so as to improve the surface integrity of workpiece. In the parameter range that electrochemical finishing with the moving cathode can achieve good surface finishing effect, the electric field distribution at the

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2021-11-17

Received: 2021-09-26; Revised: 2021-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51975081); 辽宁省教育厅科学研究经费项目 (LJKZ0510, J2020106)

**Fund:** The National Natural Science Foundation of China (51975081) and Scientific Research Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJKZ0510, J2020106)

作者简介: 朱肖飞 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电化学加工。

**Biography:** ZHU Xiao-fei (1995—), Male, Master student, Research focus: electrochemical machining.

通讯作者: 庞桂兵 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为特种精密加工、精密仪器设计与制造。

**Corresponding author:** PANG Gui-bing (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: special precision machining and design and manufacture of precision instruments.

引文格式: 朱肖飞, 樊双蛟, 闫兆彬, 等. 扫描式阴极电化学光整加工对车削外圆面边缘毛刺的去除[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 111-118.  
ZHU Xiao-fei, FAN Shuang-jiao, YAN Zhao-bin, et al. Scanning cathode electrochemical finishing for removal of burrs on edge of turning cylindrical surfaces[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 111-118.

burr part is changed by changing the shape of the cathode, and then the material removal speed is changed to achieve burr removal. The current density distribution on the burr surface and the difference between the current density at the top and bottom of the burr are simulated and analyzed under the conditions of different shapes of cathode, and the cathode shape that makes the burr height decrease rapidly is obtained. The workpiece is processed by electrochemical finishing with the moving cathode, and the variation law of surface roughness  $Ra$  value and burr height value is obtained. When the convex fillet cathode is used, the current density difference between the top and bottom of the burr is large, and the burr removal efficiency is high. The surface roughness  $Ra$  value has an inflection point when the processing time is within the range of 16~18 min, and the  $Ra$  value is reduced from  $2.76\text{ }\mu\text{m}$  to  $0.32\text{ }\mu\text{m}$  after 20 min; The burr height value has an inflection point when the machining time is within the range of 10~14 min, and it is reduced from  $17.10\text{ }\mu\text{m}$  to  $2.64\text{ }\mu\text{m}$  after 20 min. It is the same order of magnitude as the surface roughness  $Rz$  value. By changing the cathode shape, the micro two side-direction burrs on the edge of the turning workpiece can be effectively reduced in the process of electrochemical finishing, and the service performance of the parts can be improved. This method is feasible in practical application.

**KEY WORDS:** deburring; electrochemical machining; finishing; micro burr

毛刺对机械零件的使用性能和寿命具有重要影响,一些容易被忽略的微小毛刺往往隐藏着致命的风险<sup>[1]</sup>。在流体机械、轻工纺织、生物医药等领域有大量不锈钢或有色金属等材料的回转类零件,为避免工作介质的粘附作用,需要进行表面光整加工。这些零件由于采用的材料塑性好,切削加工时受到挤压、剪切等作用,在切入和切出部位会在两侧方向出现毛刺。如车削加工时切入和切出部位会出现高  $16\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 、宽约为  $0.2\text{ mm}$  的两侧方向毛刺<sup>[2]</sup>。与进给方向毛刺不同,两侧方向毛刺尺寸小,肉眼难以直接观察到,常常被忽略,给实际使用过程留下了隐患。通过改变切削加工参数和刀具角度能在一定程度上减小毛刺<sup>[3-5]</sup>,但不能完全去除毛刺。由于毛刺尺寸小,机械法去毛刺加工<sup>[6-9]</sup>在去除这类毛刺时,常常难以达到理想效果。两侧方向毛刺去除成为化工、轻纺、生医等领域零件制造的难题之一。

电化学加工通过毛刺不同部位的溶解速度差去除毛刺,没有机械挤压或剪切作用,加工机理上不会产生新的毛刺<sup>[10]</sup>,适合于去除零件边缘部位的微小毛刺。李豪威等<sup>[11]</sup>采用电化学加工去除纯铝和纯钛经线切割加工产生的金属重熔层和  $10\text{ }\mu\text{m}$  高的毛刺。Wei Z.F.等<sup>[12]</sup>采用电化学加工去除了铝板上微小孔边缘  $0.4\sim 0.8\text{ mm}$  的毛刺。Satisha 等<sup>[13]</sup>将电化学加工用于交叉孔相贯线部位的毛刺去除。这些研究证实,电化学加工具有对不同尺寸的毛刺、不同零件部位毛刺较广泛的适应性。在电化学光整加工过程中同时实现毛刺去除,有利于缩短工艺流程,提高生产效率,降低生产成本。针对实际生产中的迫切需求和电化学加工在解决微小毛刺去除难题方面具有的特点,本文以车削加工回转表面为例,提出在电化学光整加工过程中,通过改变阴极局部形状,控制电场分布,实现零件边缘部位电场集中,达到阳极表面光整和边缘毛刺去除加工的复合,为提高零件表面的完整性提供了一

种新的方法。

## 1 加工原理

### 1.1 扫描式阴极电化学光整加工原理

扫描式阴极电化学加工原理如图 1 所示。工件接电源正极,阴极接电源负极,工件绕自身轴线旋转过程中,阴极扫过工件表面,循环流动的电解液充满并流过极间间隙,工件表面产生电化学阳极溶解反应,实现工件表面的电化学光整加工。

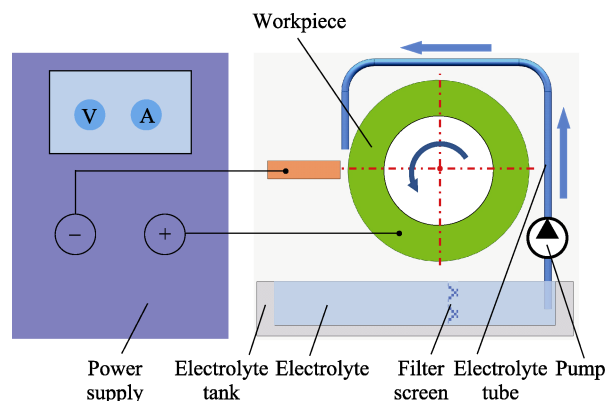


图 1 扫描式阴极电化学加工原理

Fig.1 Schematic of electrochemical machining with the moving cathode

### 1.2 电化学加工去毛刺原理

不同阴极轮廓的加工间隙如图 2 所示。图 2a 为平面阴极加工的方式去除工件表面的毛刺,毛刺最高点标记为  $A_1$ ,  $A_1$  距离阴极平面的间距定义为初始加工间隙  $\delta$ , 加工过程中  $A_1$  点处的溶解速度为  $V_{A1}$ 。图 2b 为借助尖角阴极加工的方式去除工件表面的毛刺,阴极表面尖峰高度为  $h$ , 毛刺最高点标记为  $A_2$ , 加工过程中  $A_2$  点处的溶解速度为  $V_{A2}$ 。

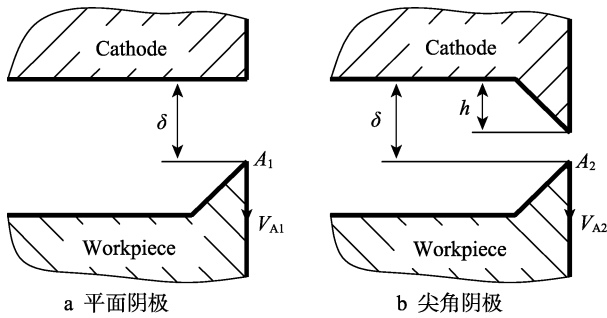


图 2 不同阴极轮廓的加工间隙模型

Fig.2 Machining gap models with different cathode profiles: a) planar cathode; b) sharp cathode

毛刺表面电场的非均匀分布导致材料溶解速度产生差异。根据法拉第定律,  $V_{A1}$ 、 $V_{A2}$  和加工间隙的关系为<sup>[14]</sup>:

$$V_{A1} = \frac{\eta \omega \kappa U}{\delta} \quad (1)$$

$$V_{A2} = \frac{\eta \omega \kappa U}{\delta - h} \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为电流效率, A/cm<sup>2</sup>;  $\omega$  为阳极体积电化学当量, cm<sup>3</sup>/(A·min);  $\kappa$  为电解液电导率, S/cm;  $U$  为加工电压, V。

根据式(1)和式(2)可计算  $A_1$  点与  $A_2$  点的溶解速度差值  $\Delta V$ :

$$\Delta V = \frac{\eta \omega \kappa U h}{\delta(\delta - h)} \quad (3)$$

根据式(3)可知, 采用表面轮廓存在凸起的阴极时, 工件表面毛刺溶解速度更快。加工条件不变时, 凸起高度  $h$  越大, 溶解速度差值越大。因此, 通过阴极局部形状的改变, 可以实现在光整加工过程中同时去除毛刺。

## 2 工件与阴极

对如图 3 所示的 304 不锈钢试件进行车削加工, 测量其外圆面表面粗糙度  $R_a$  值, 为 2.7~3 μm。采用轮廓仪对回端面边缘部位的两侧方向毛刺进行测量, 过程如图 4 所示。毛刺高度约为 16~20 μm, 宽度平

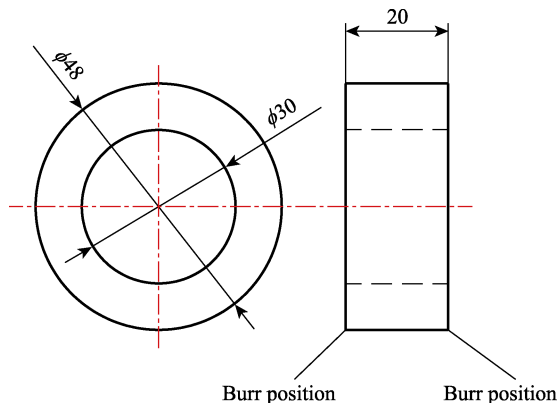


图 3 加工试件

Fig.3 Workpiece

均值为 0.2 mm 左右, 如图 5 所示。对多个试件毛刺轮廓形状进行分析, 由于试件边缘各处的变形程度不完全一致, 产生的毛刺轮廓存在微小差异。根据实际测量结果, 毛刺表面轮廓可大体简化为 I、II、III 3 种类型, I 型毛刺向内凹, II 型毛刺近似为直线, III 型毛刺向外凸, 如图 6 所示。

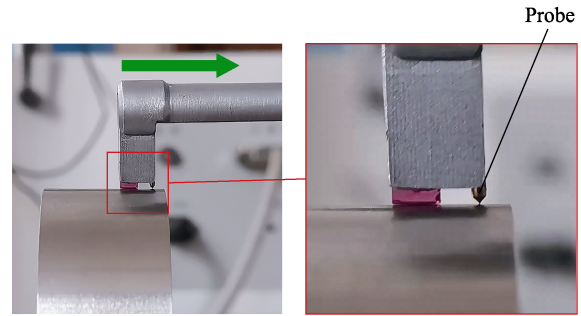


图 4 毛刺测量过程

Fig.4 Measurement process of the burr size

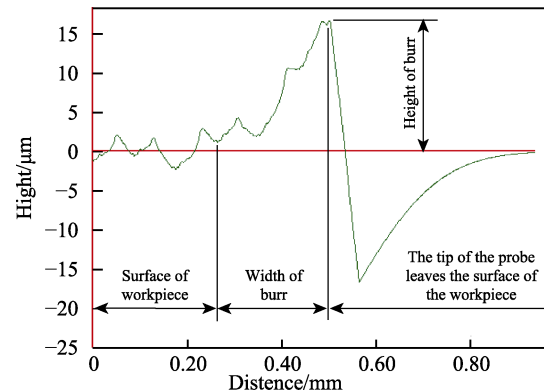


图 5 毛刺测量结果

Fig.5 Measurement result of the burr size

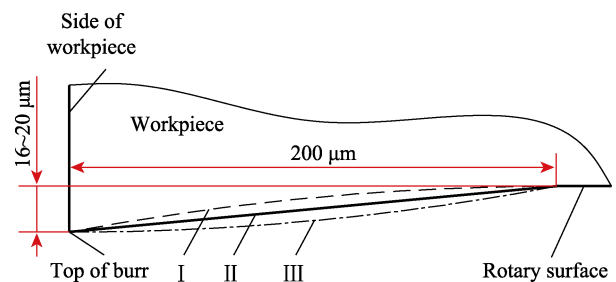


图 6 毛刺轮廓形状

Fig.6 Shape of the burr

根据电化学光整加工的去毛刺原理及毛刺轮廓特征, 设计阴极时应满足以下要求: 阴极形状应使得毛刺顶端电场分布最为集中, 且从毛刺顶端到底部的电场分布逐渐减弱; 阴极形状和尺寸应在电化学加工中能够实现光整加工效果的工艺参数范围选取<sup>[15]</sup>; 阴极形状应考虑加工工艺性。从以上角度考虑, 阴极形状设计为如图 7 所示的凸圆角、斜角和凹圆角形阴极。其中, 凸圆角阴极的凸出轮廓与阴极侧面垂直, 凹圆角阴极轮廓与阴极工作表面相切, 斜角阴极的凸

出轮廓部分为直线,以满足电场从工件边缘部位到毛刺底部逐渐减弱的要求,同时具有良好的加工工艺性。阴极两侧凸起高度取 0.1 mm,凸起部分宽度与毛刺宽度同宽,取 0.2 mm,阴极厚度取 2 mm,以满

足光整加工要求。根据电化学加工中极间间隙越小,阳极对应表面电场分布越强的规律,对于 3 种阴极,毛刺部位总体上的电场强弱分布为:凸圆角形阴极 > 斜角形阴极 > 凹圆角形阴极。

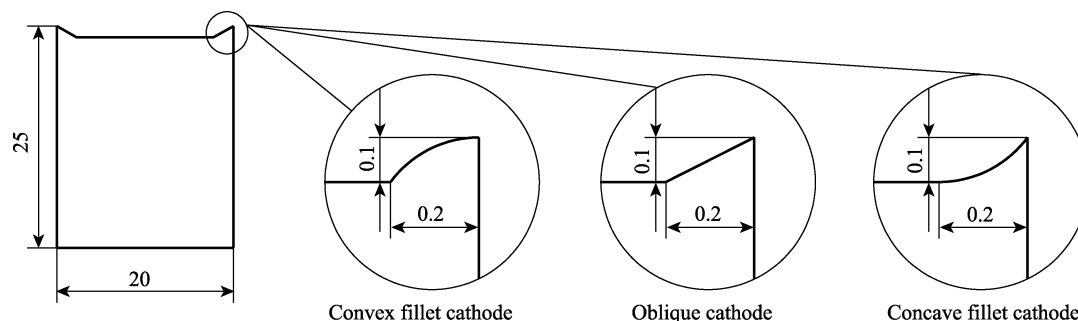


图 7 不同阴极形状

Fig.7 Different cathode shapes

用 COMSOL 软件对不同阴极条件下毛刺表面的电流密度进行模拟,仿真模型如图 8 所示。主要模拟参数:电解液温度为 25 ℃;加工电压为 30 V;体积电化当量为 0.002 09 cm<sup>3</sup>/(A·min)<sup>[16]</sup>;电解液为 15% (质量分数) NaNO<sub>3</sub>,其初始电导率为 0.116 S/cm<sup>[17]</sup>;

考虑气泡对电导率的影响,影响指数取 1.5<sup>[18]</sup>。电流效率  $\eta$  与电流密度  $J$  满足式(4)<sup>[19]</sup>。

$$\eta = \frac{0.85}{1 + e^{(10-J)/6}} - 0.1 \quad (4)$$

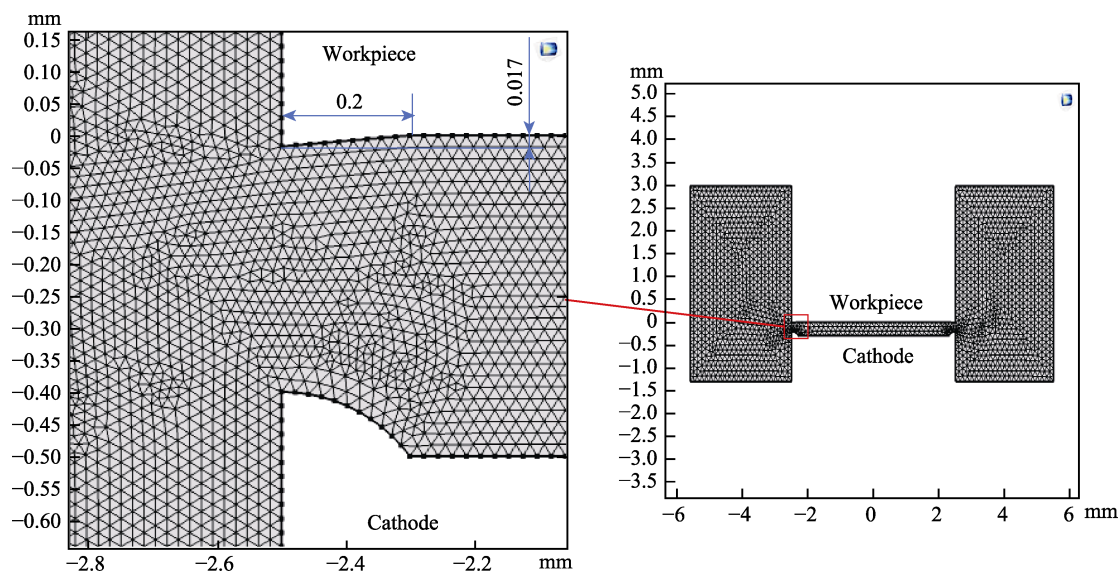


图 8 电流密度仿真模型

Fig.8 Simulation model of current density

图 9a 为毛刺表面电流密度的模拟位置。在 3 种不同形状阴极的条件下,毛刺表面电流密度分布的模拟结果如图 9b—d 所示。不同形状的阴极通过改变电化学加工中电场分布效果<sup>[20]</sup>来改变毛刺表面的电流密度分布,使毛刺表面溶解速度不同,实现毛刺高度值减小。因此,毛刺最高点处的电流密度值最大,溶解速度最快,电流密度值由毛刺最高点向毛刺最低点逐渐减小,毛刺最低点处的溶解速度最慢,随着加工的进行,毛刺高度值逐渐减小。对于 3 种不同形状的

毛刺,采用凸圆角阴极时,毛刺表面各处的电流密度值较大,毛刺最高点与最低点处的电流密度差值  $\Delta J$  最大,毛刺溶解速度较快,毛刺高度值的降低速度也较快,去毛刺效率较高,因此本文实验中采用凸圆角阴极。

阴极采用凸圆角形状,材料为 304 不锈钢,利用慢走丝线切割机床切割成形。为减小周围电场对加工过程的影响,对电化学作用表面附近进行绝缘处理<sup>[21]</sup>。阴极外观尺寸如图 10 所示。



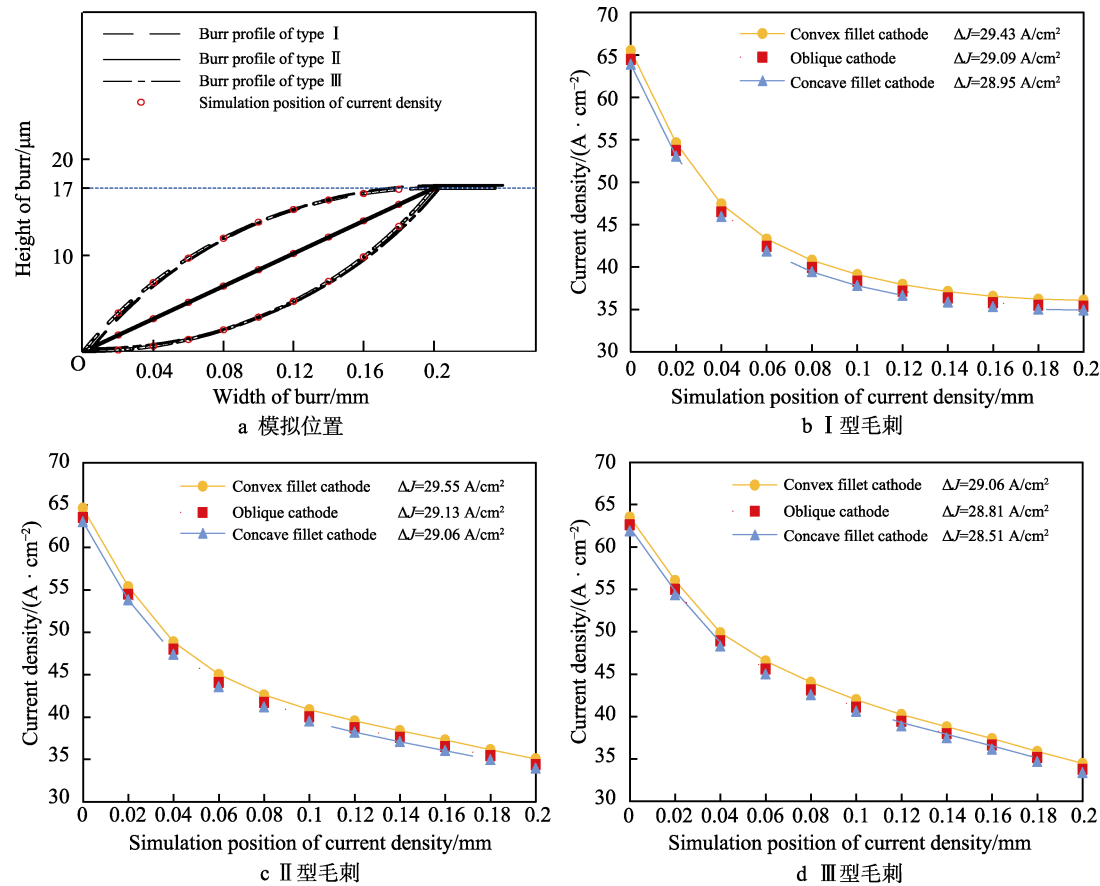


图 9 不同毛刺轮廓的电流密度分布模拟

Fig.9 Simulation of current density distribution on different burr profile:a)simulation position of current density on burr; b)type I burr; c) type II burr; d) type III burr

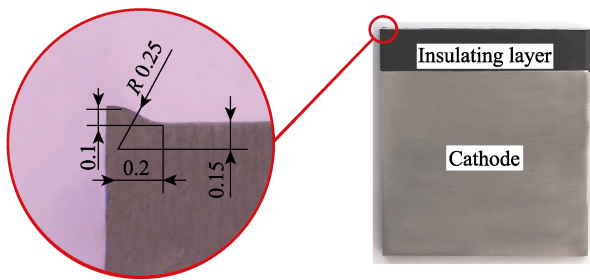


图 10 阴极形状  
Fig.10 Cathode shape

### 3 实验

#### 3.1 实验参数

实验参数取在前期实验中证明能够获得良好表面粗糙度的参数值，见表 1。电解液采用质量分数为 15%的  $\text{NaNO}_3$  水溶液。实验装置如图 11 所示。

采用 2205B 型表面轮廓测量仪测量毛刺高度值。实验中，以 3 个工件为一组进行光整加工，取毛刺高度平均值记录。测量毛刺时，轮廓仪的探针扫过工件边缘部位，轮廓最高点的高度即为毛刺高度值。对 3 个实验工件进行 12 次测量，毛刺高度平均值为  $17\text{ }\mu\text{m}$ ，宽度平均值为  $0.2\text{ mm}$ 。

表 1 实验参数  
Tab.1 Experimental parameters

Parameter	Value
Processing voltage/V	30
Processing time/min	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20
Rotate speed/(r·min <sup>-1</sup> )	30
Initial machining clearance/mm	0.5

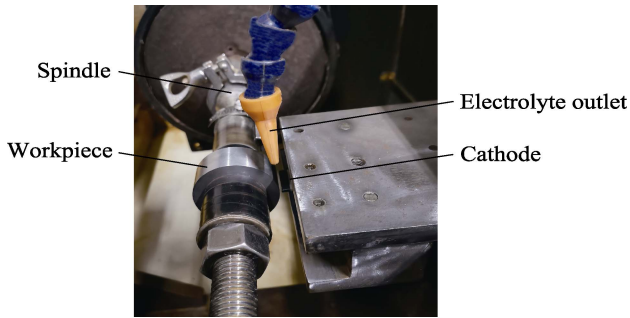


图 11 实验装置  
Fig.11 Experimental setup

#### 3.2 结果与分析

工件表面粗糙度  $R_a$  值及毛刺高度值随加工时间

的变化规律如图12所示。 $Ra$ 值和毛刺高度值的降低速度都随着加工时间的增加而逐渐减慢。加工前后的 $Ra$ 值和毛刺轮廓如图13所示, $Ra$ 值从 $2.7624\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $0.3269\text{ }\mu\text{m}$ ;毛刺高度值从 $17.10\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $2.64\text{ }\mu\text{m}$ ,与表面粗糙度 $Rz$ 值(一般为 $Ra$ 值的8倍<sup>[22]</sup>)为同一量级。对比 $Ra$ 值和毛刺高度值二者的变化规律,既具有相似性,又具有差异性。

$Ra$ 值与毛刺高度值随加工时间的变化规律相似。刚开始加工时, $Ra$ 值与毛刺高度值的下降速度较快,随着加工的进行,下降速度减慢。 $Ra$ 值由 $2.76\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $0.32\text{ }\mu\text{m}$ 后,随加工时间的增长,基本不再降低。毛刺高度值由 $17.10\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $2.64\text{ }\mu\text{m}$ 后,也基本保持不变。毛刺是工件表面轮廓的一部分,因此毛刺高度值在加工过程中的变化规律大体上也符合电化学光整加工的整平机理。加工过程中,阳极表面微观

轮廓由“尖峰状”变为“波浪状”,尖端的集中溶解作用减弱,电化学光整加工的整平能力降低<sup>[23]</sup>。

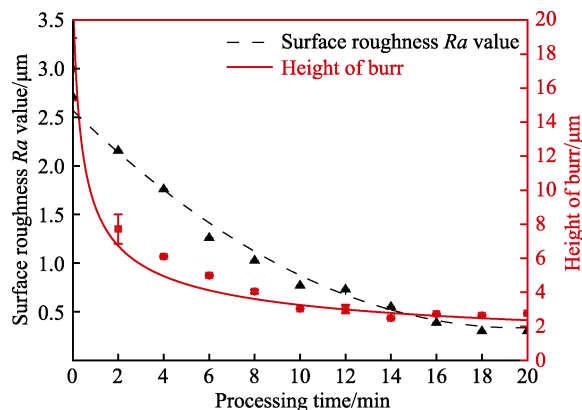


图12 去毛刺效果和光整加工实验结果  
Fig.12 Experimental results of deburring and finishing

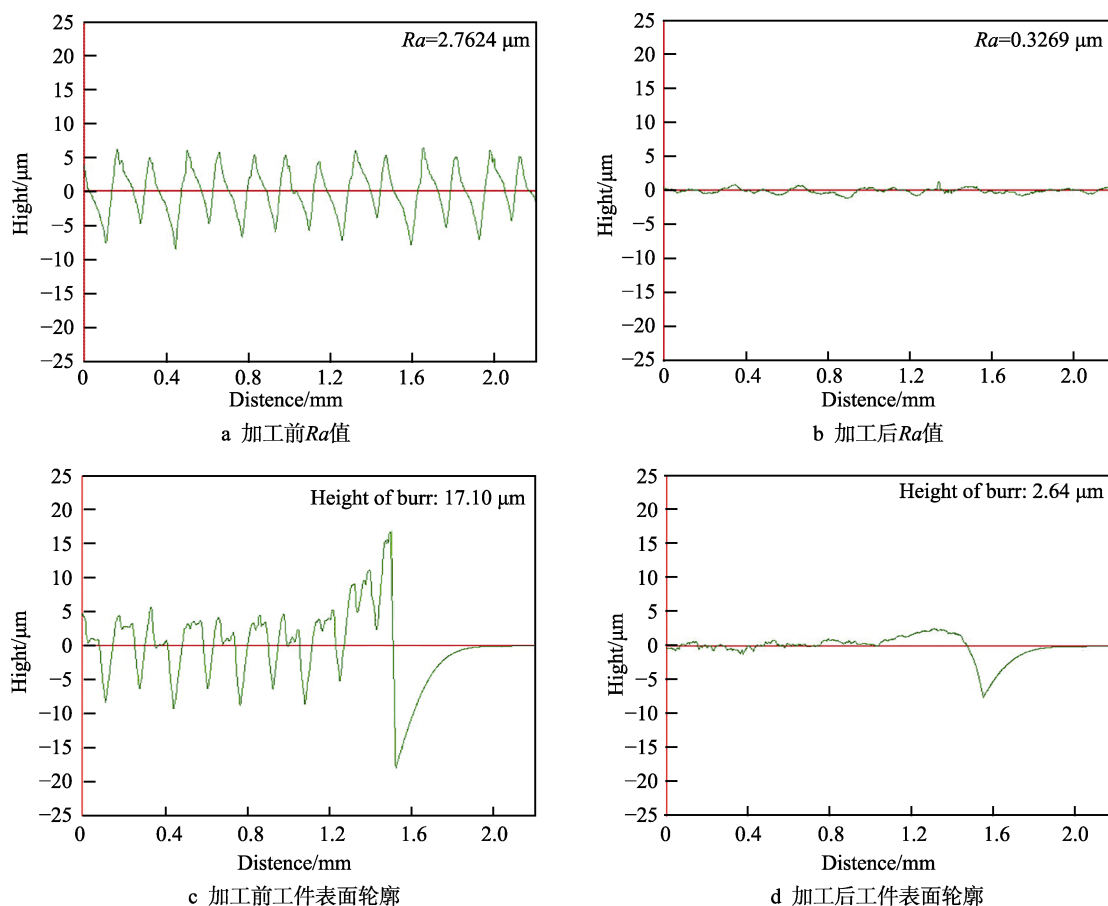


图13 加工前后的 $Ra$ 值和工件表面轮廓

Fig.13 Profile of workpiece surface before and after machining: a) surface roughness  $Ra$  value before machining; b) surface roughness  $Ra$  value after machining; c) profile of burr before machining; d) profile of burr after machining

刚开始加工时,毛刺高度值的下降速度远大于 $Ra$ 值的下降速度。电化学光整加工过程中,工件表面不同位置溶解速度的差异由加工间隙的不平衡性及工件表面轮廓的差异产生。加工初始时,毛刺高度值的量级( $17.10\text{ }\mu\text{m}$ )远大于 $Ra$ 值的量级( $2.76\text{ }\mu\text{m}$ ),由毛刺产生的极间间隙的差异性更为显著。另外,毛

刺位于工件尖角部位,对应的阴极凸出部分,加工间隙小,毛刺溶解速度快。再者,毛刺位于工件边缘部位,最高点为工件边缘尖端,电场更为集中,材料去除速度较粗糙度 $Ra$ 值也更快。随着加工的进行,毛刺高度值快速降低,上述作用也越来越弱,毛刺降低速度也很快变缓。

## 4 结论

1) 采用电化学加工, 通过改变阴极形状, 能够在满足光整加工获得良好表面粗糙度  $Ra$  值的工艺条件下, 同时实现边缘两侧方向毛刺的有效去除。采用凸圆角形状阴极时, 毛刺最高处与最低处的电流密度差值较大, 毛刺溶解速度快, 具有较高的毛刺去除效率, 对于不同形状的毛刺具有较好的加工适应性。

2) 加工过程中, 毛刺形状变化总体上为逐渐圆角化的过程, 毛刺去除速度由快变慢。本文实验条件下, 在加工时间达到 18 min 后, 表面粗糙度  $Ra$  值基本不再降低; 毛刺高度值在加工时间达到 14 min 后基本不再降低, 且加工后的毛刺高度值与  $Rz$  值为同一量级。证明在获得良好表面粗糙度  $Ra$  值之前, 能够去除毛刺, 具有实际应用中的可行性。

### 参考文献:

- [1] 曹伟忠. 提高液压件产品质量的核心技术——去毛刺光整工艺[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(7): 77-78.  
CAO Wei-zhong. Improving the key technology of hydraulic product quality burr & finishing process[J]. Hydraulics pneumatics & seals, 2012, 32(7): 77-78.
- [2] 王贵成. 金属切削毛刺分类体系的研究及其应用[J]. 中国机械工程, 1995(6): 40-42.  
WANG Gui-cheng. Study and application on the classification system of the metal cutting burrs[J]. China mechanical engineering, 1995(6): 40-42.
- [3] 王贵成, 朱云明, 张春晔. 两侧方向毛刺形成的数学模型[J]. 兵工学报, 2003, 24(4): 513-515.  
WANG Gui-cheng, ZHU Yun-ming, ZHANG Chun-ye. Mathematical model of two side-direction burr formation[J]. Acta armamentarii, 2003, 24(4): 513-515.
- [4] GAO Shun-xing, LIU Ju-dong, JIN Jia-wei, et al. Orthogonal experimental study on two side-direction burrs of grind-hardening workpiece based on transverse feed[J]. IOP conference series: Materials science and engineering, 2019, 542(1): 012030.
- [5] QU Hai-jun, WANG Gui-cheng, ZHU Yun-ming, et al. Formation and simulation of two-side burr in orthogonal cutting[J]. Advanced materials research, 2008, 53-54: 77-82.
- [6] 曹阳, 刘颖志, 张兴洪. 金属实体保持架去毛刺加工方法[J]. 轴承, 2020(9): 10-12.  
CAO Yang, LIU Ying-zhi, ZHANG Xing-hong. Deburring method for metal solid cage[J]. Bearing, 2020(9): 10-12.
- [7] KIM Y G, KIM K J, KIM K H. Efficient removal of milling burrs by abrasive flow[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2021, 22(3): 441-451.
- [8] 杨胜强, 王秀枝, 李文辉. 振动式滚磨光整加工技术的研究现状及再发展[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(3): 385-392.  
YANG Sheng-qiang, WANG Xiu-zhi, LI Wen-hui. Research status and further development of vibratory finishing technology[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(3): 385-392.
- [9] KUMAR A S, DEB S, PAUL S. Ultrasonic-assisted abrasive micro-deburring of micromachined metallic alloys[J]. Journal of manufacturing processes, 2021, 66: 595-607.
- [10] 吴天祥. 曲轴油孔电化学去毛刺工艺[J]. 表面技术, 1995, 24(5): 46-47.  
WU Tian-xiang. Electrochemical deburring technology of crankshaft oil hole[J]. Surface technology, 1995, 24(5): 46-47.
- [11] 李豪威, 李祥祥, 常伟杰. 纯钨与纯钛电化学去毛刺实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(4): 139-141.  
LI Hao-wei, LI Xiang-xiang, CHANG Wei-jie. Experimental study on electrochemical deburring of pure molybdenum and titanium[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2020(4): 139-141.
- [12] WEI Ze-fei, ZHENG Xing-hua, YU Zi-yuan. Mathematical modeling and experimental study on electrochemical deburring of miniature holes[J]. Advanced materials research, 2013, 721: 382-386.
- [13] PRABHU S, KUMAR A. Investigation of nickel coated tool for electrochemical deburring of Al6082[J]. International journal of surface engineering and interdisciplinary materials science, 2018, 6(1): 17-31.
- [14] 玛斯库达·阿布力哈孜, 阿达依·谢尔亚孜旦. 移动式电化学光整加工整平机理的研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(17): 182-186.  
MASIKUDA Abulihazi, ADAYI Xieeryazidan. Research on removal mechanism of moving electrochemical finishing[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(17): 182-186.
- [15] BHATTACHARYYA B, MUNDA J, MALAPATI M. Advancement in electrochemical micro-machining[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2004, 44(15): 1577-1589.
- [16] 潘永强. 高压静液掩模电解加工表面织构技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
PAN Yong-qiang. Through-mask electrochemical micro-machining micro-dimples with high-pressure hydrostatic electrolyte[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [17] 何长运, 黄志刚, 郭钟宁, 等. 三维模型下电解加工过程的模拟[J]. 电加工与模具, 2015(4): 38-41.  
HE Chang-yun, HUANG Zhi-gang, GUO Zhong-ning, et

- al. Three-dimensional simulation of electrochemical machining process[J]. Electromachining & mould, 2015(4): 38-41.
- [18] 路文文. 高温镍基合金冷却孔电解加工流场动力学 CFD 分析研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.  
LU Wen-wen. CFD analysis of fluid field for electrochemical machining cooling holes of nickel-based superalloy[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017.
- [19] 房晓龙. 管电极电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
FANG Xiao-long. Research on key techniques of shaped tube electrochemical machining[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [20] 何俊峰, 郭钟宁, 连海山, 等. 电解加工中微细电极尖端效应的实验研究与仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(7): 136-138.  
HE Jun-feng, GUO Zhong-ning, LIAN Hai-shan, et al. Experimental and numerical investigation on the point effect of electrochemical machining[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2014(7): 136-138.
- [21] 张辉, 刘为东, 敖三三, 等. 基于微孔电解加工的新型阴极结构[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(8): 1000-1005.  
ZHANG Hui, LIU Wei-dong, AO San-san, et al. A novel cathode structure in electrochemical micro-machining of micro holes[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(8): 1000-1005.
- [22] 修树东, 戴勇, 文东辉. 研磨抛光工艺组合优化技术研究[J]. 工具技术, 2008, 42(11): 59-61.  
XIU Shu-dong, DAI Yong, WEN Dong-hui. Research on process integration optimization technology for lapping and polishing[J]. Tool engineering, 2008, 42(11): 59-61.
- [23] 周锦进, 阿达依·谢尔亚孜旦, 庞桂兵, 等. 电化学光整加工对表面微观几何形貌的影响[J]. 中国机械工程, 2006, 17(13): 1346-1349.  
ZHOU Jin-jin, ADAYI·Xieeryazida, PANG Gui-bing, et al. Influences of electrochemical finishing process on micro-topography of surfaces[J]. China mechanical engineering, 2006, 17(13): 1346-1349.
- 
- (上接第 100 页)
- [19] 王嵘冰, 徐红艳, 李波, 等. BP 神经网络隐含层节点数确定方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(4): 31-35.  
WANG Rong-bing, XU Hong-yan, LI Bo, et al. Research on method of determining hidden layer nodes in BP neural network[J]. Computer technology and development, 2018, 28(4): 31-35.
- [20] 谢蕴文, 鲁宇明, 刘毅. 求解约束优化问题的改进元胞遗传算法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(8): 323-327.  
XIE Yun-wen, LU Yu-ming, LIU Yi. Improved cellular genetic algorithm for solving constrained optimization problems[J]. Computer simulation, 2021, 38(8): 323-327.
- [21] 李芳, 赵天洋. 遗传算法理论及其应用进展探析[J]. 技术与市场, 2016, 23(1): 87.  
LI Fang, ZHAO Tian-yang. Research on theory and application of genetic algorithm[J]. Technology and market, 2016, 23(1): 87.
- [22] 石向成, 赵志坚, 巩金龙. 遗传算法在催化体系的全局结构优化中的应用[J]. 化工学报, 2021, 72(1): 27-41.  
SHI Xiang-cheng, ZHAO Zhi-jian, GONG Jin-long. Application of genetic algorithm in the global structure optimization of catalytic system[J]. CIESC journal, 2021, 72(1): 27-41.
- [23] RAJORA M, SHIH A H, ZOU Pan, et al. A hybrid neural network for prediction of surface roughness in machining[J]. Applied mechanics and materials, 2014, 633-634: 579-582.
- [24] 潘伟, 丁立超, 黄枫, 等. 基于混沌“微变异”自适应遗传算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(8): 2042-2048.  
PAN Wei, DING Li-chao, HUANG Feng, et al. Adaptive genetic algorithm based on chaos “micro variation”[J]. Control and decision, 2021, 36(8): 2042-2048.
- [25] 墨蒙, 赵龙章, 龚媛雯, 等. 基于遗传算法优化的 BP 神经网络研究应用[J]. 现代电子技术, 2018, 41(9): 41-44.  
MO Meng, ZHAO Long-zhang, GONG Ai-wen, et al. Research and application of BP neural network based on genetic algorithm optimization[J]. Modern electronics technique, 2018, 41(9): 41-44.