

电化学光整加工过程中电流场分布特性^{*}

阿米娜·卡德尔, 阿达依·谢尔亚孜旦, 平宗保, 何连英

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 为改善电化学光整加工整平效果, 根据电化学光整加工前后表面微观轮廓的变化, 在提出的圆锥体和半球体表面微观几何形貌的基础上, 建立了极间电流场的数学模型, 并分析了电化学光整加工过程中电流场分布特性的变化。研究表明, 尖峰状表面微观几何轮廓有利于强化电化学的选择性溶解, 有利于提高整平效果, 验证了电化学光整加工过程中, 机械作用具有使表面微观几何轮廓尖峰化的作用。

关键词: 电流场; 特性; 电化学; 光整加工

中图分类号: TG113.23; O646.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2011)04-0060-06

Properties of Current Distribution in Processing of Electrochemical Finishing

AMINA · Kader, ADAYI · Xieeryazidan, PING Zong-bao, HE Lian-ying

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Ulumuqi 830047)

Abstract: To improve the effect of electrochemical finishing leveling, according to change of surface profile before and after electrochemical finishing, based on micro-meometry contour of the surface of cone and hemisphere, this study established the mathematical model of current field, and analyzed the process of electrochemical finishing characteristics of current changes in field distribution. The result shows that micro-geometry of spike-like contour surface is conducive to strengthening selective electrochemical dissolution, helping improve the leveling effect. In the electrochemical mechanical finishing process, surface micro-geometry has been validated because of mechanical action.

Key words: current field; characteristics; electrochemical; finishing

0 引 言

由于电化学光整加工以独特的整平机理, 在提高加工质量方面显现了巨大的优势, 因而在航空、航天、医疗器械以及模具等行业受到了广泛关注^[1-4]。目前, 国内外很多研究机构已在电化学光整加工工艺方面取得了显著的进展, 极大地推动了电化学光整加工的应用, 使电化学光整加工成为世界制造业关注的一个重要方向^[5]。

虽然电化学光整加工是电化学阳极溶解现象在光整加工领域的应用, 但由于加工目的不同, 其方法在工艺实施和整平机理等方面有其自身的规律和特点。大量研究表明, 影响电化学光整加工整平效果的因素较多, 如电解液的质量分数、电流密度等。在电化学光整加工初期, 整平

效果提高较为显著, 但随着光整加工的进行, 整平效果的提高并不十分明显; 同时, 所获得的表面微观几何轮廓由尖峰形变为圆角形^[6]。显然, 在小间隙条件下, 表面微观几何轮廓的变化影响了极间电流场的分布。

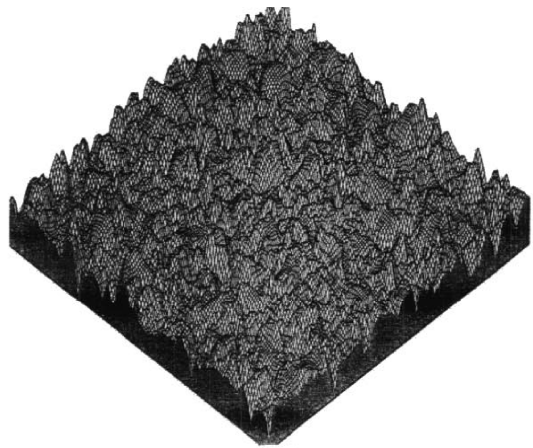
文中基于表面微观几何轮廓的变化, 探讨极间电流场分布特性的变化, 旨在为提高电化学光整加工的整平速度提供理论依据。

1 极间电流场数学模型的建立

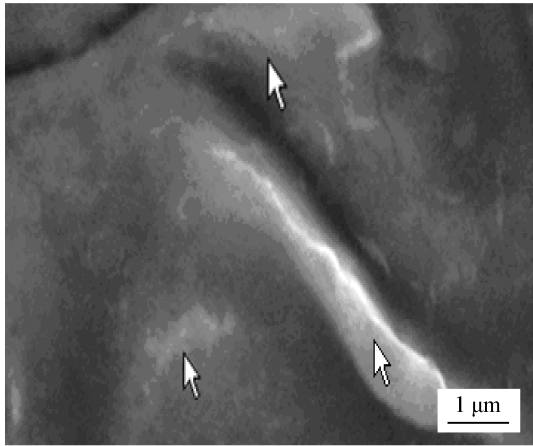
1.1 电化学光整加工前后表面微观几何轮廓的变化

电化学光整加工方法是一种利用电化学阳极溶解现象, 实现去除材料的零件终加工工艺方法^[7]。零件表面微观几何轮廓主要受机械加工过程中, 工具与零件表面摩擦、刀痕、切屑时零件表面金属层的变形以及机械加工工艺系统的高频振动等因素的影响, 所获得的零件表面微观几何轮廓是尖峰型的表面微观几何轮廓^[8] (见图 1

(a))。经电化学光整整平后,由于电流场的尖峰效应,工件阳极表面微观几何轮廓发生了明显的变化,呈圆角形或圆弧形(图 1(b))。



(a) 机械加工后^[8]



(b) 电化学光整后

图 1 电化学光整加工前后表面微观几何轮廓变化
Fig. 1 Changes of the surface profile before and after electrochemical finishing

1.2 电化学光整加工前后表面微观轮廓的几何模型

为便于分析沿表面微观几何轮廓的电流场分布特性,首先应根据工件阳极的表面微观几何形貌特征确定适宜的几何模型。

由于受电化学光整加工前加工因素的影响,零件的表面微观几何轮廓呈尖峰状,如图 2 所示,表面微观几何轮廓基本上呈三角状,只是高度和角度各异。由于平面内的三角形可以被认为空间内的圆锥体在该平面内的投影,因此,为研究问题方便,完全可用圆锥体来代替工件阳极表面的微观几何形貌,或者说,工件阳极表面

微观几何形貌是由锥高不等、锥角不同的无数个圆锥体随机排列构成的。

试验表明:经电化学光整加工后,表面微观几何形貌(轮廓)发生了变化。分析图 1(b)的扫描电镜图可得,在中性电解液条件下,电化学光整加工后,试件表面的微观几何形貌发生了变化:表面微观几何形貌的尖角部位已被圆角或圆弧所替代。这表明,经电化学光整加工后,尖峰状的表面微观几何轮廓被圆角化。由于圆弧或圆角可以被认为球体在平面内的投影。因此,认为经电化学光整加工后,所获得的工件阳极表面微观几何形貌是由半径各异的球体在工件阳极表面上随机排列分布的结果(见图 3)。

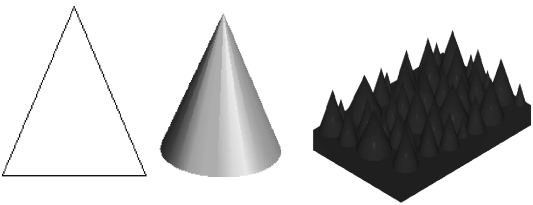


图 2 电化学光整加工前尖峰形表面微观几何轮廓
Fig. 2 The micro-geometry contour of spike-like surface before electrochemical finishing



图 3 电化学光整加工后圆弧形表面微观几何轮廓
Fig. 3 The micro-geometric profile of arc shape surface after electrochemical finishing

1.3 极间电流场电动力学模型的建立

依据欧姆定律的微分形式,借助于电导率可将电场转化为电流场,为研究问题方便,首先研究极间电场问题。

1.3.1 尖峰形表面微观几何轮廓的电场模型及其边界条件的确立

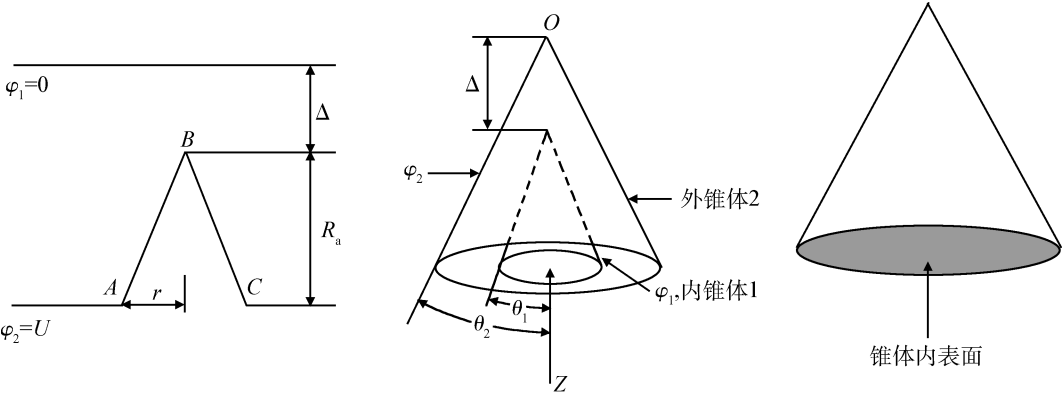
电化学光整加工前,假设工具阳极与工件阴极之间没有电介质,工具阴极是平板,工件阳极是随机排列的圆锥体,并取其中的一个圆锥体分析。当在工件阳极与工具阴极之间施加电压 U 后,工具阳极与工件阴极之间形成一电场,如图 4(a)所示。根据电动力学知识确定两极间间隙内的边界条件是:电势 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = U$ 。由几

何形状的构形可知,当一个锥体的锥角为 $\frac{\pi}{2}$ 时,圆锥体就成为一平面。因此,可用图 4(b)所示的同轴非共顶的双锥体分析尖峰形表面轮廓的电场分布的问题。

选择图 4(c)中所示的内锥体 1 的表面作为

边界,则对边界内部的区域(见图 4(c)中所示的阴影部分)自由电荷的分布密度为零。因此拉普拉斯方程 $\nabla^2 \varphi = 0$ 成立。

由图 4(a)中所示的三角形 ABC 可知, $r = r(\theta, R_a)$;同时,考虑到电化学光整加工前,工件阳极的表面粗糙度 R_a 给定,因此,有电势的分布



R_a -表面粗糙度 Δ -极间间隙 φ_1 、 φ_2 -电势 θ_1 、 θ_2 -内外两个圆锥体的锥角
(a) 两极之间的电动力学模型 (b) 圆锥体的电动力学模型 (c) 内锥体

图 4 尖峰形表面的电动力学模型

Fig. 4 Peak form surface of the electricity dynamic model

$\varphi = \varphi(\theta)$ 成立,即电势的分布与锥体的锥角 θ_1 有关,而与 r 无关。

为求解拉普拉斯方程方便,建立图 5 所示的球坐标系;同时,考虑到 $\varphi = \varphi(\theta)$,因此,在球面坐标系中,拉普拉斯方程可写为:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r}\right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}\right) = 0 \tag{1}$$

对方程(1)求解,则所求的电势 φ 为:

$$\varphi(\theta) = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \ln\left(\tan \frac{\theta}{2}\right) - \varphi_1 \ln\left(\tan \frac{\theta_2}{2}\right) + \varphi_2 \ln\left(\tan \frac{\theta_1}{2}\right)}{\ln\left(\tan \frac{\theta_1}{2}\right) - \ln\left(\tan \frac{\theta_2}{2}\right)} \tag{2}$$

令 $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$, 则上式可写为:

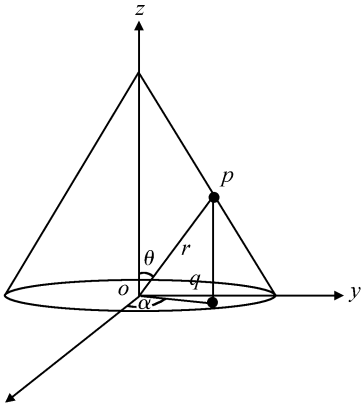
$$\varphi(\theta) = (\varphi_1 - \varphi_2) \frac{\ln\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)}{\ln\left(\tan \frac{\theta_1}{2}\right)} + \varphi_2 \tag{3}$$

由电场强度与电势分布的关系,可获得如下的极间电场的强度表达式:

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{d\theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{r \ln\left(\tan \frac{\theta_1}{2}\right)} \tag{4}$$

圆锥面上电荷量的面密度为:

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{r} \frac{d\varphi}{d\theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{\epsilon_0 (\varphi_1 - \varphi_2)}{r \ln\left(\tan \frac{\theta_1}{2}\right)} \tag{5}$$



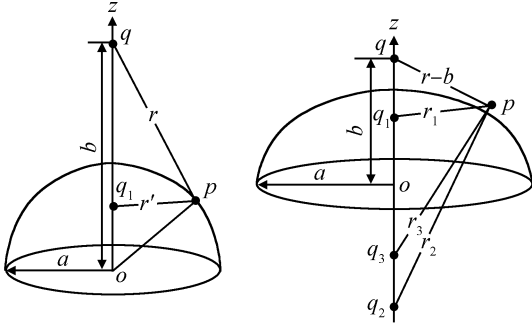
θ -夹角, α -方位角, r -原点到表面上的点 p 的距离

图 5 球坐标系示意图

Fig. 5 The ball coordinate system schemes

1. 3. 2 圆弧形表面微观几何轮廓的电动力学模型及其边界条件的确立

为便于研究相关问题,假设:①半球体的半径为 a ,球心在导体平面上;②由于两极间间隙 b 远远大于球体半径 a ($b \gg a$),因此,工具阴极平面可看成为一个点电荷 q ,它位于系统对称轴上。建立如图 6 所示的坐标系,并用镜像法求解^[10]。



(a) 半球体的电动力学模型 (b) 圆弧形表面的电动力学模型

图 6 电化学光整加工后的电动力学模型

Fig. 6 Electricity dynamics model after electrochemical finishing

为了保证导体面电势为零,只考虑两个电荷假想点电荷 q_1 来代替球面上感应电荷对空间电场的作用。根据对称性 q_1 在 oq 线上, q_1 的大小满足半球面上 $\varphi = 0$ 。

由镜像法的基本原理可知,边界条件应满足(见图 6(a)):

$$\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r'} = 0 \quad (6)$$

$$\text{由上式可得} \quad \frac{r'}{r} = -\frac{q_1}{q} \quad (7)$$

其中: r 为 q 到 p 的距离, r' 为 p 到 q_1 的距离。由于 $\triangle Opq$ 与 $\triangle Opq_1$ 相似,式(7)可写为:

$$q_1 = -\frac{a}{b}q$$

由镜像法可知, q 对于导体平面的感应电荷 q_1 位于点 $(0, 0, \frac{a^2}{b})$; 对于导体平面的像电荷 q_2 位于点 $(0, 0, -b)$ 处,应考虑 q_1 对于导体平面的像电荷 q_3 , 位于点 $(0, 0, -\frac{a^2}{b})$, $q_3 = -q_1 = \frac{a}{b}q$, 见图 6(b)所示。

基于上述分析,可知球体表面电势分布为:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon} [A_1 + A_2 + A_3 + A_4] \quad (8)$$

其中:

$$A_1 = \frac{q}{|r-b|} = \frac{q}{\sqrt{r^2 + b^2 - 2br\cos\theta}}$$

$$A_2 = \frac{q_1}{\left|r - \left(\frac{a^2}{b^2}\right)b\right|} = \frac{q_1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{a^2}{b}\right)^2 - 2\left(\frac{a^2}{b}\right)r\cos\theta}}$$

$$A_3 = \frac{q_2}{|r+b|} = \frac{q_2}{\sqrt{r^2 + b^2 + 2br\cos\theta}}$$

$$A_4 = \frac{q_3}{\left|r + \left(\frac{a^2}{b^2}\right)b\right|} = \frac{q_3}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{a^2}{b}\right)^2 + 2\left(\frac{a^2}{b}\right)r\cos\theta}}$$

根据电势分布与电场强度的关系式,可得半球体表面的电场强度为:

$$E = -\frac{\partial\varphi}{\partial r} = -\frac{q}{4\pi\epsilon} [B_1 + B_2 + B_3 - B_4] \quad (9)$$

其中:

$$B_1 = \frac{-(r - b\cos\theta)}{(r^2 + b^2 - 2br\cos\theta)^{\frac{3}{2}}}$$

$$B_2 = \frac{\frac{a}{b}\left(r - \frac{a^2}{b}\cos\theta\right)}{\left(r^2 + \frac{a^4}{b^2} - \frac{2a^2}{b}r\cos\theta\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$B_3 = \frac{r + b\cos\theta}{(r^2 + b^2 + 2br\cos\theta)^{\frac{3}{2}}}$$

$$B_4 = \frac{\frac{a}{b}\left(r + \frac{a^2}{b}\cos\theta\right)}{\left(r^2 + \frac{a^4}{b^2} + \frac{2a^2}{b}r\cos\theta\right)^{\frac{3}{2}}}$$

根据电荷密度与电场强度的关系式:

$$\sigma = -\epsilon_0 E \quad (10)$$

半球面上电荷分布为:

$$\sigma|_{r=a} = -\epsilon_0 \left(\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)|_{r=a} = -\frac{q}{4\pi} [C_1 + C_2 + C_3 - C_4]|_{r=a}$$

其中:

$$C_1 = \frac{-(r - b\cos\theta)}{(r^2 + b^2 - 2br\cos\theta)^{\frac{3}{2}}}$$

$$C_2 = \frac{\frac{a}{b}\left(r - \frac{a^2}{b}\cos\theta\right)}{\left(r^2 + \frac{a^4}{b^2} - \frac{2a^2}{b}r\cos\theta\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$C_3 = \frac{r + b\cos\theta}{(r^2 + b^2 + 2br\cos\theta)^{\frac{3}{2}}}$$
$$C_4 = \frac{\frac{a}{b}\left(r + \frac{a^2}{b}\cos\theta\right)}{\left(r^2 + \frac{a^4}{b^2} + \frac{2a^2}{b}r\cos\theta\right)^{\frac{3}{2}}}$$

2 数学模型的分析及试验验证

2.1 尖峰状表面电荷密度分布的分析

图 7 是利用 matlab 模拟仿真软件,并依据公式(3)得出的电势分布与角度以及电荷分布与角度的关系曲线。由于电荷密度与电流密度成正比,根据法拉第电解定律,顶部的电势分布和电荷密度分布都比较大,随着夹角的增大电势或电荷密度分布在逐渐降低。由于表面微观轮廓呈尖峰型,夹角小的时候电荷密度减少有突变,因此在试验初期整平速度比较快。

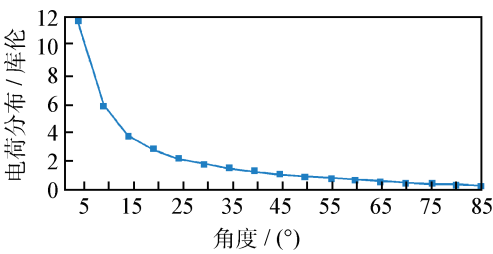


图 7 尖峰状表面电荷密度分布的模拟曲线
Fig. 7 The simulation curve of the peak shape surface charge density distribution

2.2 圆弧状表面电荷密度分布的分析

图 8 是利用 matlab 模拟仿真软件,并依据公式(6)得出的圆弧状表面微观轮廓的电荷密度分布与角度的关系曲线。由于电荷密度与电流密度成正比,根据法拉第电解定律圆弧形表面的电势分布和电荷密度分布都比较均匀,随着夹角的增大电势或电荷密度分布缓慢的减少。因此在光整加工过程中整平速度比较慢。

对比图 7 和图 8,显而易见,尖峰状的表面微观轮廓有利于提高整平速度,相比尖峰状表面微观轮廓与圆弧状表面微观轮廓,尖峰形表面强化选择性溶解。这在试验中得到了验证。

分别把 30°、60°、90°的 Q235 尖峰状试件和圆弧状 Q235 试件放入 NaCl 电解液中,其质量分数为 15% ~ 20%,阴极为铜棒,电流密度 110 A,极间间隙 0.2 mm,3 种不同尖角和圆弧

形表面微观几何轮廓对比试件电化学光整后的质量变化如表 1 所示。

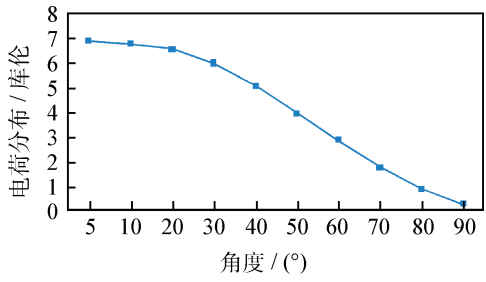


图 8 圆弧状表面电荷密度分布的模拟曲线
Fig. 8 The simulation curve of the circular arc shape surface charge density distribution

表 1 电化学光整加工前后的质量变化
Table 1 Quality changes of specimens before and after electrochemical finishing

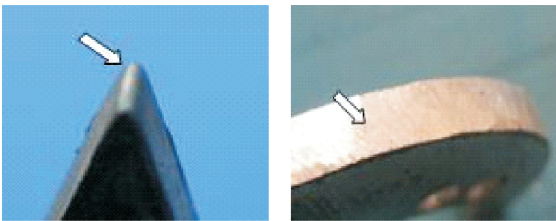
试 件	30°	45°	60°	圆弧状
减少量 / mg	80	50	25	5

由表 1 可知,电化学光整加工的起初,工件阳极表面微观几何轮廓尖峰形部位的尖角小,电化学溶解速度高,去除量也比较大,从而实现工件阳极表面微观几何轮廓的整平。随着光整表面微观轮廓呈圆角形,溶解速度慢,去除量较少。

图 9 是 30°和圆弧状试件在光整加工前后的对比图片。试验结果和数值模拟曲线结果相吻合,则可用圆锥体替代尖峰状,半球体代替圆弧状表面微观几何轮廓的电场分布的特性。



(a) 电化学光整加工前

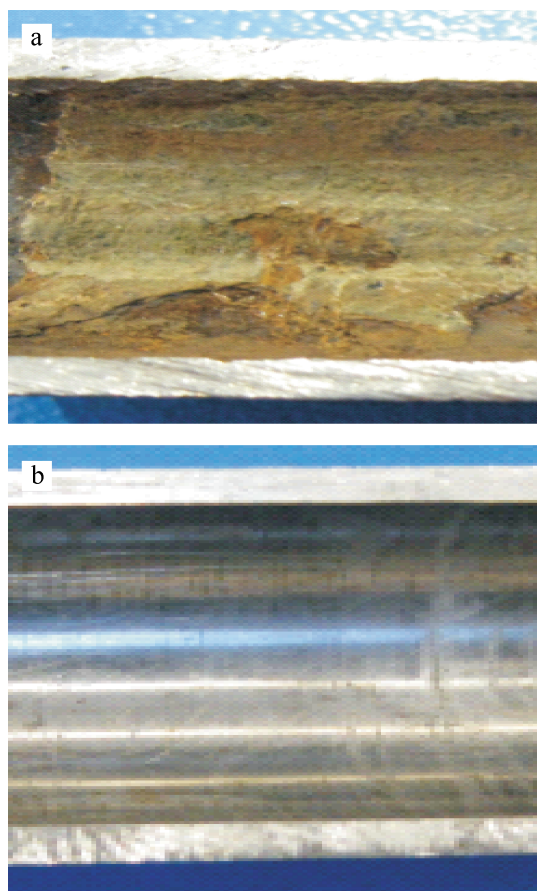


(b) 电化学光整加工后

图 9 电化学光整加工前后试件的对比图片
Fig. 9 The contrast images of specimens before and after electrochemical finishing processing

3 电化学光整加工工艺的应用

研究电化学光整加工过程中电流场分布特性可提高整平速度,改善表面质量,以提高生产效率。如电化学光整加工使管束式换热器各管孔的内表面质量达到较好的水平,提高了热交换效率,延长换热器的在线使用寿命。电化学光整加工后的管件内壁,如图10所示。



(a) 光整前 (b) 光整后

图10 电化学光整前后的管件内壁

Fig.10 The images of the inner wall of pipe before and after electrochemical finishing

4 结 论

(1) 电化学光整加工的整平过程中,工件阳极表面微观几何轮廓是由尖峰状表面微观几何轮廓变成圆弧状表面微观几何轮廓的过程。

(2) 基于电化学光整加工前后表面微观几何轮廓变化的分析,提出了圆锥形和半球体两种几何模型。

(3) 尖峰状表面微观几何轮廓使电荷密度分布极不均匀,可强化选择性溶解,提高整平速度。圆弧状表面微观几何轮廓弱化选择性溶解,不利于提高整平速度。

(4) 实际应用当中,电化学作用与机械作用复合,借助机械作用使工件阳极表面微观几何轮廓尖峰化,提高了整平效果。

参考文献

- [1] Clifton D, Mount A R, Alder G. M, et al. Ultra-sonic measurement of the inter-electrode gap in electrochemical machining [J]. Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 1259-1267.
- [2] Rosset E, Datta M, Landolt D. Pulse polishing of die steels in neutral solutions [J]. Plating and Surface Finishing, 1985: 60-64.
- [3] Masuzawa T, Kou C L M, Fujino. A combined electrical machining process for micronozzle fabrication [J]. Annals of the CIRP, 1994, 43 (1): 189-192.
- [4] Masuzawa T, Sakai S. Quick finishing of wedm products by ECM using a mate-electrode [J]. Annals of the CIRP, 1987, 26(1): 123-126.
- [5] Rajurkar K P, Zhu D, McGeough J A, et al. New development in ECM [J]. CIRP-99, Keynote paper, 1999, 48(2).
- [6] Chetty K O V, Murthy R V J K, Radhakrishnan V. On some aspects of surface formation in ECM [J]. Journal of Engineering for industry, 1981, 103(8)341-348
- [7] 朱树敏,陈远龙,等. 电化学加工技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, 7.
- [8] Hu Z M, Dean T A. A study of surface topography, friction and lubricants in metal forming [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1637-1649.
- [9] 杰克逊. 静电学和电动力学(上册) [M]. 北京: 科学出版社, 1981, 1.
- [10] 郭硕鸿. 电动力学(第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.

作者地址: 乌鲁木齐延安路 62 号

830047

新疆大学南校区 机械工程学院

Tel: 151 6088 0223

E-mail: amina7780@126.com