

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.03.002

## 316L 不锈钢金属双极板的电解抛光工艺

柳小祥, 范文俊, 徐招, 王新东\*

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 研究了不同温度、电压、时间对电解抛光处理后 316L 不锈钢金属双极板的表面质量及其耐腐蚀性能的影响, 从而确定最佳的试验条件。通过单因素试验分析方法, 制定了三因素三水平试验方案, 结合不同条件下抛光后样品的表面形貌及其在 0.5 mol/L 硫酸+2 mmol/L F<sup>-</sup> 溶液中动电位极化曲线测试结果, 分析了不同因素条件对抛光质量的影响。试验结果表明, 当电解抛光液温度为 75±5 °C, 电压为 7 V, 抛光时间为 7 min 时, 抛光后所得到的 316L 不锈钢双极板表面质量最佳, 且对应的耐腐蚀性能最好。

**关键词:** 316L 不锈钢; 双极板; 电解抛光; 耐腐蚀性

**中图分类号:** TQ153.5      **文献标识码:** A

## Electro-polishing of 316L Stainless Steel Bipolar Plate

LIU Xiaoxiang, FAN Wenjun, XU Zhao, WANG Xindong\*

(School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The influence of different temperature, voltage and time on the surface quality and corrosion resistance of 316L stainless steel bipolar plate after electro-polishing was studied, so as to determine the best test conditions. A three-factor, three-level test protocol was developed by using a single factor test analysis method. The effects of different factors on the polishing quality were analyzed by combining the surface morphology of the polished samples under different conditions and the results of the dynamic potential polarization curves in solution with 0.5 mol/L sulfuric acid and 2 mmol/L F<sup>-</sup>. The test results show that the best surface quality and corrosion resistance can be obtained by electro-polishing 316L stainless steel bipolar plate under the conditions of electrolyte temperature of 75±5 °C, voltage of 7 V and time of 7 min.

**Keywords:** 316L stainless steel; bipolar plates; electro-polishing; corrosion resistance

近年来, 由于质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 具有清洁、高效、环境友好、低温启动等特点, 受到了各国的高度重

视, 使 PEMFC 成为燃料电池车辆的研究重点<sup>[1-2]</sup>。双极板 (Bipolar Plate) 是组成质子交换膜燃料电池的关键部件之一, 对它的选材与处理有着高要求,

收稿日期: 2019-06-25

修回日期: 2019-09-16

通信作者: 王新东, echem@ustb.edu.cn

双极板需要具备强耐腐蚀性,高机械强度、低接触电阻的特性,来满足对燃料电池的要求。

目前大量研究学者把目光聚焦在金属双极板方向,作为金属,它满足双极板的绝大多数要求,如良好的导电性、强度高、可加工性好等,但其耐腐蚀性达不到要求<sup>[3-6]</sup>。燃料电池专家衣宝廉院士认为今后薄层金属双极板的主要发展方向是利用电化学方法对其进行表面改性<sup>[7]</sup>。本文工作对316L不锈钢的电抛光属于表面改性工作的前处理,对之后的工作如表面电化学氮化,电镀CrC涂层,真空溅射TiN和TiCrN膜层等<sup>[8-11]</sup>起重要作用。

随着表面改性技术的发展,对工件表面质量要求更高。目前工件前处理的主要方法有机械抛光,化学抛光以及电解抛光三种。其中,传统的机械抛光方法由于很难对几何形状复杂的金属双极板进行面抛光,且易产生残余应力等问题,不适用于金属双极板表面抛光处理。相反,电解抛光由于其具有消除工件表面毛刺,改善基体材料的表面状态,且能够对复杂形态零件表面进行精加工,不会产生残余应力等优势<sup>[12-15]</sup>,可应用结构复杂的金属材料表面抛光工序。本文主要通过探究不同试验因素条件对316L不锈钢金属双极板的电解抛光的影响,确定最佳工艺试验条件,为之后金属双极板的表面改性打下基础。

## 1 试验

### 1.1 材料与试剂

本试验所用材料取自市场上商用316L不锈钢,其各元素含量如表1所示。用线切割机从材料上取样(试样大小10 mm×10 mm×1 mm),然后在预磨机上,先后采用400目、800目砂纸打磨去除表面氧化膜,在用酒精进行超声波清洗,去掉表面油脂及附着杂物,用去离子水洗净,吹干后备用。

试验采用的试剂均为分析纯试剂。电解抛光

表1 316L不锈钢化学成分

元素	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Fe
含量 wt%	0.08	17.0	12.0	2.0	1.0	2.0	0.045	0.030	其余

液采用磷酸:硫酸:去离子水体积分数比为23:11:6的混合液,再在每一升混合液中配以2.5 mL甘油作为添加剂组合而成。抛光后处理为酸浸8~10 s,所使用的溶液为体积分数20%的硝酸溶液。

### 1.2 电解抛光试验

本文主要讨论电压、温度及时间对电解抛光效果的影响。试验采用直流稳压电源供电,电极间距固定为40 mm。阳极材料为316L不锈钢,阴极材料为铅板,阴极与阳极面积比例为1.2:1。本装置采用恒温水浴加热搅拌的方式来进行电解抛光试验。电解抛光装置如图1所示。

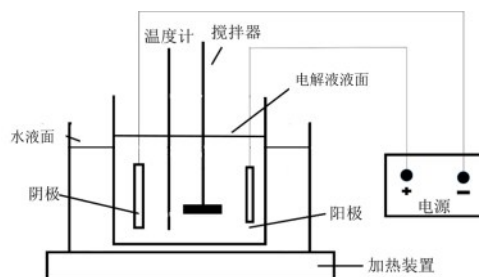


图1 电解抛光装置

### 1.3 试验研究方法

为了研究电压、温度、时间对316L不锈钢双极板电解抛光的影响,采用单因素分析方法,对单因素条件下不同试验水平进行研究,其试验因素水平如表2所示。

表2 试验因素水平

水平	因素		
	电压/V	时间/min	温度/°C
1	6	5	65±5
2	7	7	75±5
3	8	10	85±5

#### 1.3.1 金相显微测试与表面粗糙度测试

通过采用舜宇MX6R金相显微镜与Dektak 150表面轮廓仪,对不同条件下抛光后的样品表面结果进行观察对比。根据抛光后样品表面的光洁度,以及缺陷数量和表面粗糙度 $R_a$ 选择最佳实验条件。最后,将得到的最佳条件应用到156 mm×50 mm×0.7 mm带有流道的316L不锈钢金属板上,观察不锈钢金属双极板表面抛光前后的金相对比图,从而判断抛光效果是否达到后续表面改性工作的

要求。

### 1.3.2 电化学测试

电化学测量在法国 Bio-logic 型号 VMP-2 电化学工作站上完成,采用三电极体系,以 316L 不锈钢作为工作电极,石墨作为辅助电极,硫酸亚汞电极作为参比电极,0.5 mol/L 硫酸+2 mmol/L F 溶液为电解液。待开路电位(OCV)稳定后,进行动电位极化扫描,扫描速率为 0.333 mV/s,初始扫描电位相对于开路电位为-0.2 V,终止扫描电位相对于参比电极为 0.65 V。本文接下来的电位都将是相对于标准氢电极(SHE)而言的。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 不同抛光温度对表面质量的影响

试验过程中,设置直流电源电压为 7 V,电解抛光时间为 7 min,电解抛光液温度分别为:65±5 °C、75±5 °C、85±5 °C,其它试验条件保持一致。

图 2 为不同温度条件下抛光后 316L 不锈钢表面金相显微图像,实验结果发现,当抛光液温度为 65±5 °C 时,试验后不锈钢表面出现大量球形凹坑状的细微麻点,经进一步观察后发现,其与点蚀所产生的缺陷及其相似。随着电解液温度的逐渐提高到 75±5 °C 时,不锈钢表面麻点数量急剧减少,其表面光泽度显著增加,此时不锈钢表面质量达到最佳水平。当温度超过 80 °C 时,不锈钢表面麻点数量又明显增加,并伴随着部分条纹出现,不锈钢表面平整度大大降低。这是因为当抛光液温度较低时,其黏度较大,电解抛光过程中,电解产物由电极表面向溶液本体中的扩散速度较小,造成不锈钢表面区域溶解速率不均匀,使得发生点蚀的局域增加,产生大量麻点,不锈钢表面质量降低。但随着抛光液温度的逐渐提高,其黏度显著下降,电解产物扩散速度加快,减少了由于局部溶解速度不一导致的点蚀现象的产生,使得不锈钢表面麻点数量大大降低,表面质量得到明显改善。然而,当抛光液温度达到一定程度时,电极表面反应速度过快,导致了大量气泡生成,并且在上浮过程中不断聚集长大,形成了一连串的“气柱”,覆盖在局部电极表面,使得该区域溶解速度降低,不锈钢表面出现流痕

现象。

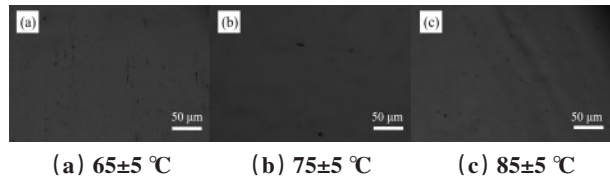


图 2 不同温度条件下抛光后 316L 不锈钢表面形貌

图 3 为不同抛光温度下 316L 不锈钢的表面粗糙度曲线,当电解抛光液温度分别为 65±5 °C、75±5 °C、85±5 °C 时,表面粗糙度  $R_a$  为 60.14 nm、40.70 nm、154.70 nm。可以知道,抛光液温度在 75±5 °C 范围时,表面粗糙度最低;但当温度超过 80 °C,表面粗糙度急剧变大,可以表明,温度对 316L 不锈钢电解抛光效果影响巨大。

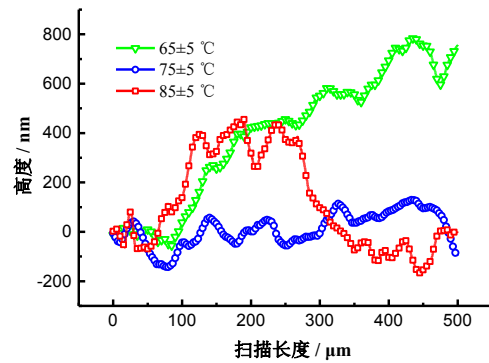


图 3 不同抛光温度下 316L 不锈钢的表面粗糙度曲线

图 4 为不同抛光温度条件下 316L 不锈钢在 0.5 mol/L 硫酸+2 mmol/L F 溶液中的动电位极化曲线图。动电位极化曲线 Tafel 拟合结果如表 4 所示。从图中可以看出,随着抛光温度的提高,316L 不锈钢表面的耐腐蚀性能较未处理样品有了显著提高。并且当抛光温度控制在 75±5 °C 时,抛光后的 316L 不锈钢腐蚀电位达到最大 0.387 V,腐蚀电流降低至 0.043 μA/cm<sup>2</sup>。之后随着抛光温度的进一步提高,不锈钢表面耐腐蚀性能反而下降,甚至低于未处理样品。结合图 2 中不同抛光温度条件下 316L 不锈钢表面形貌图可以看出,这主要是由于不锈钢表面缺陷数量对其耐腐蚀性能产生了不利影响。因此,控制抛光液温度为 75±5 °C,有利于提高 316L 不锈钢表面的整体质量。

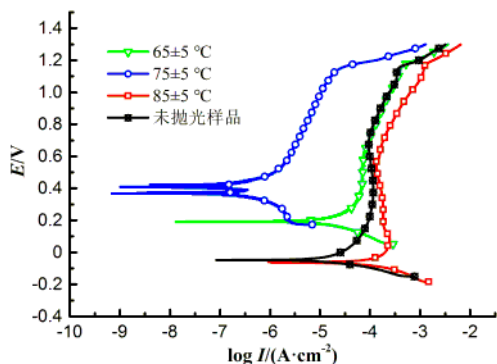


图4 不同抛光温度下316L不锈钢在0.5 mol/L硫酸+2 mmol/L F溶液中的动电位极化曲线

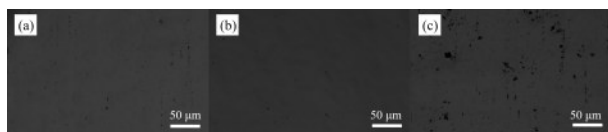
表4 动电位极化曲线Tafel拟合结果

抛光温度/°C	$E_{corr}/V$	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$
65±5	0.198	8.731
75±5	0.387	0.043
85±5	-0.065	68.427
未抛光	-0.049	11.498

### 2.2 不同电压对表面质量的影响

试验过程中,控制抛光液温度区间75±5 °C,电解抛光时间为7 min,电压分别为:6 V、7 V、8 V,其它试验条件保持一致。

图5为不同电压条件下抛光后316L不锈钢表面金相显微图像。在本试验中,当电压为6 V时,样品表面存在大小不一的麻点;电压为7 V时,麻点数量急剧减少,此时样品的平整度最好,且光泽度也好;当电压为8 V时,样品表面出现大量更大尺寸的麻点。出现此现象的原因是当电压较低时,电流也较低,阳极一直处于溶解状态,难以形成稳定的黏液膜,出现细微麻点;但电压较高时,电流也高,导致电极局部过热,表面电化学反应剧烈,黏液膜被击破,产生麻坑。



(a) 6 V (b) 7 V (c) 8 V

图5 不同电压条件下抛光后316L不锈钢表面形貌

图6为不同电压下316L不锈钢的表面粗糙度曲线,当电压为6 V、7 V、8 V时,表面粗糙度 $R_a$ 分别为48.52 nm、34.48 nm、84.18 nm。可以知道,控制电压为7 V时,表面粗糙度最低,能得到较好的抛光效果。

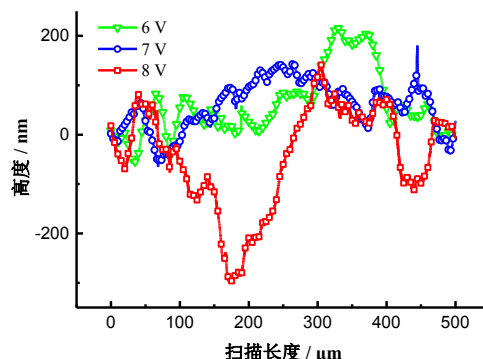


图6 不同电压下316L不锈钢的表面粗糙度曲线

图7为不同电压下316L不锈钢在0.5 mol/L硫酸+2 mmol/L F溶液中的动电位极化曲线图。动电位极化曲线Tafel拟合结果如表5所示。从图中可以看出,随着电压的提高,316L不锈钢表面的耐腐蚀性能较未处理样品有了显著提高。并且当电压控制为7 V时,抛光后的样品腐蚀电位达到最大,腐蚀电流最低。之后随着电压提高至8 V,不锈钢表面耐腐蚀性能反而下降,甚至低于6 V时样品。结合图5中可以看出,电化学测试的方法可以区分出不同的表面质量,表面质量越好,耐腐蚀性越好。因此,控制电压为7 V,有利于提高316L不锈钢表面的平整度与光洁度。

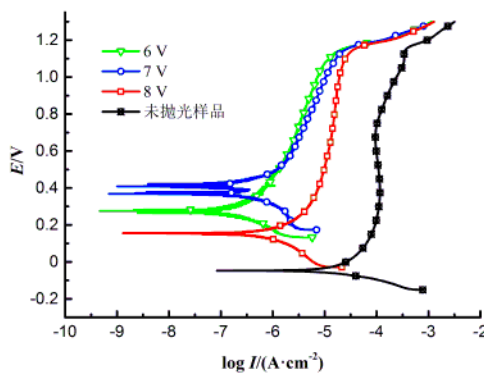


图7 不同电压下316L不锈钢在0.5mol/L硫酸+2 mmol/L F溶液中的动电位极化曲线

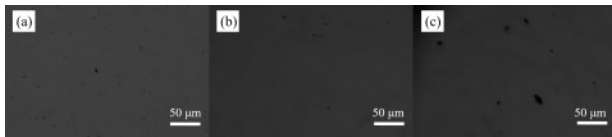
表5 动电位极化曲线 Tafel 拟合结果

抛光电压/V	$E_{corr}/V$	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$
6	0.276	0.101
7	0.387	0.043
8	0.159	0.642
未抛光	-0.049	11.498

2.3 不同时间对表面质量的影响

试验过程中,控制抛光液温度区间  $75 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 电压为 7 V, 抛光时间分别为: 5 min、7 min、10 min, 其它试验条件保持一致。

图 8 为不同时间下抛光后 316L 不锈钢表面金相显微图像。当抛光时间为 5 min 时, 抛光样品表面出现较多细小麻点; 但当抛光时间增加至 7 min 时, 麻点数量稀少, 表面光泽度好, 表面光亮; 随着时间的增加, 到达 10 min 时, 表面又出现少量麻点与直径较大的蚀坑, 表面质量反而下降。说明时间为 7 min 就足以取得良好抛光效果, 抛光时间过长, 还会出现过抛, 抛光效率降低等负面影响, 还可能对产品尺寸产生影响。



(a) 5 min (b) 7 min (c) 10 min  
图8 不同时间条件下抛光后 316L 不锈钢表面形貌

图 9 为不同抛光时间下 316L 不锈钢的表面粗糙度曲线, 当时间为 5 min、7 min、10 min 时, 表面粗糙度  $R_a$  分别为 60.35 nm、39.80 nm、72.05 nm。可以知道, 控制抛光时间为 7 min 时, 表面粗糙度最低, 能得到较好的抛光效果。

图 10 为不同抛光时间条件下 316L 不锈钢在 0.5 mol/L 硫酸+2 mmol/L F 溶液中的动电位极化曲线图。动电位极化曲线 Tafel 拟合结果如表 6 所示。从图中可以看出, 随着抛光时间的增加, 316L 不锈钢表面的耐腐蚀性能较未处理样品有了显著提高。并且当时间控制为 7 min 时, 抛光后的样品腐蚀电位达到最大, 腐蚀电流最低。之后随着时间提高至 10 min, 不锈钢表面耐腐蚀性能反而下降, 低于 5 min 时的样品。结合图 8 可以看出, 两种表征方法

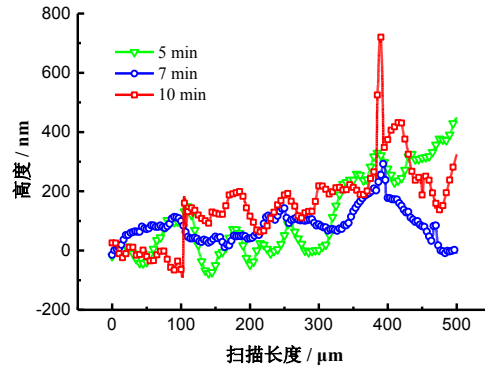


图9 不同抛光时间下 316L 不锈钢的表面粗糙度曲线

的结果具有一致性, 时间不宜过短或过长。因此, 控制抛光时间为 7 min, 对 316L 金属双极板的抛光效果是最佳的。

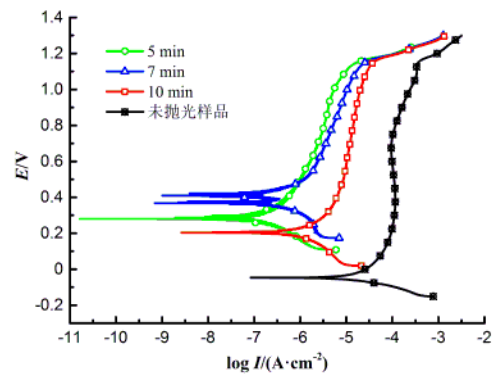


图10 不同抛光时间下 316L 不锈钢在 0.5mol/L 硫酸+ 2 mmol/L F 溶液中的动电位极化曲线

表6 动电位极化曲线 Tafel 拟合结果

抛光时间/min	$E_{corr}/V$	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$
5	0.290	0.079
7	0.387	0.043
10	0.214	0.778
未抛光	-0.049	11.498

2.4 在最佳条件下对 316L 不锈钢金属双极板的抛光

在本文研究得到的最优条件下, 对 316L 不锈钢金属双极板进行抛光, 能得到表面平整、光亮的合格金属双极板。图 11 为实物不锈钢电抛光前后图像。由图可知道抛光后的金属双极板具有镜面光泽, 均一性好, 说明抛光效果良好, 达到此次试验

工作的要求。图12为316L不锈钢抛光前后表面的金相图像。由图可看出抛光后的金属双极板表面成分均匀,平整度好,满足后续表面改性的要求,再一次证明了在最优条件下可取得良好的抛光效果。

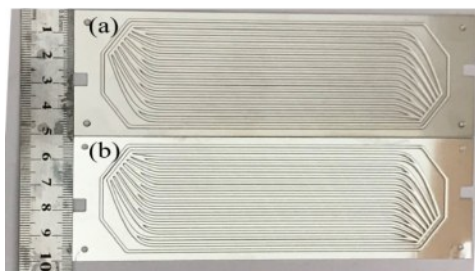
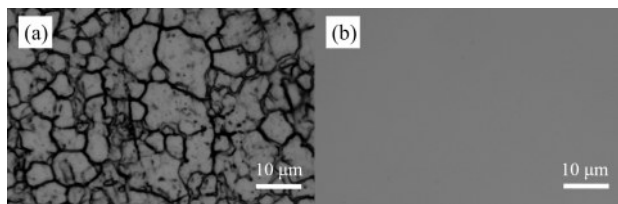


图11 316L不锈钢金属双极板实物图。  
(a)抛光前,(b)抛光后。



(a)抛光前 (b)抛光后  
图12 316L不锈钢表面金相显微形貌

### 3 结论

综上所述,本文可以得出以下几个结论:

(1)本试验所使用的抛光液抛光效果好,低成本,成分简单,是一种环保型抛光液。

(2)抛光后的316L不锈钢金属双极板凹槽与脊表面光亮,为后续表面改性提供了良好基础。

(3)316L不锈钢金属双极板最佳电解抛光条件:抛光液温度 $75\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、电压7V、抛光时间7min。

#### 参考文献

- [1] Brain C H, Steele, Angelika H. Review article materials for fuel-cell technologies [J]. *Nature*, 2001, 6861: 345-352.
- [2] Mehta V, Cooper J S. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing [J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 114(1):32-53.
- [3] 刘丰峰, 卢玫. 质子交换膜燃料电池研究进展[J]. *通信电源技术*, 2009, 2:25-28.
- [4] Middelma E, Kout W, Vogelaar B, et al. Bipolar plates for PEM fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 118(1-2):44-46.
- [5] Hermann A, Chaudhuri T, Spagnol P. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30(12):1297-1302.
- [6] 李谋成. 质子交换膜燃料电池金属双极板材料的腐蚀行为研究[D]. 沈阳:中国科学院金属研究所, 2002.
- [7] 张海峰, 衣宝廉, 侯明, 等. 质子交换膜燃料电池双极板的材料与制备[J]. *电源技术*, 2003, 02:129-133.
- [8] Mani S P, Rajendran N. Corrosion and interfacial contact resistance behavior of electrochemically nitrided 316L SS bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells [J]. *Energy*, 2017, 133:1050-1062.
- [9] Danilov F I, Protsenko V S, Gordiienko V O, et al. Nanocrystalline hard chromium electrodeposition from trivalent chromium bath containing carbamide and formic acid: structure, composition, electrochemical corrosion behavior, hardness and wear characteristics of deposits [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(18): 8048-8053.
- [10] Wang H C, Hou K H, Lu C E, et al. The study of electroplating trivalent CrC alloy coatings with different current densities on stainless steel 304 as bipolar plate of proton exchange membrane fuel cells [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 570:209-214.
- [11] 初敏, 朱亚冠, 刘倩, 等. TiN和TiCrN膜层对氢燃料电池双极板材料316L不锈钢性能的影响[J]. *理化检验(物理分册)*, 2019, 55(4):236-239.
- [12] Wilberforce T, El Hassan Z, Ogungbemi E, et al. A comprehensive study of the effect of bipolar plate (BP) geometry design on the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111:236-260.
- [13] 刘坤坤, 孙伶俐, 何声馨, 等. 316不锈钢电解抛光最佳参数试验研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(8): 288-294.
- [14] 王昊, 林雪. 不锈钢表面酸洗钝化与电抛光[J]. *电镀与环保*, 2018, 38(1):46-48.
- [15] 张素银, 杜凯, 谌加军, 等. 电解抛光技术研究进展[J]. *电镀与涂饰*, 2007, 2:48-50.