

## 等离子体电解氧化技术在气吸式马铃薯排种器中的应用

李紫辉<sup>1</sup>, 杨苗苑<sup>2</sup>, 吕金庆<sup>1,3</sup>, 李光<sup>2</sup>, 夏原<sup>2</sup>, 刘中原<sup>1</sup>, 李季成<sup>1</sup>, 杨颖<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学 工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;  
3. 国家马铃薯产业技术体系机械研究室, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 装备气吸式排种器的马铃薯播种机作业速度高, 株距均匀性好。为了提高气吸排种器配气阀的气密性、耐磨性, 采用等离子体电解氧化(PEO)技术在表面生成陶瓷层, 达到密封、抗磨损、耐腐蚀的目的。在给定的工艺条件下, PEO处理后获得的涂层的厚度为73 μm, 显微硬度为959.4 HV0.025。对比摩擦磨损试验结果表明, PEO涂层可以显著提高6061铝合金的耐磨性能。经气吸式马铃薯排种器试验台累计150 h运转试验后, 装备经PEO处理后的配气阀, 播种机的重漏播率无明显变化, 播种质量稳定。

**关键词:** 气吸式排种器; 配气阀; PEO涂层; 陶瓷膜; 摩擦磨损; 播种质量

**中图分类号:** TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2016)08-0138-05

## Application of plasma electrolytic oxidation in vacuum potato seed meter

Li Zihui<sup>1</sup>, Yang Miaoyuan<sup>2</sup>, Lü Jingqing<sup>1,3</sup>, Li Guang<sup>2</sup>, Xia Yuan<sup>2</sup>, Liu Zhongyuan<sup>1</sup>, Li Jicheng<sup>1</sup>, Yang Ying<sup>1</sup>

(1. Northeast Agricultural University, Harbin Heilongjiang 150030, China;

2. Institute of Mechanics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. China Agricultural Research System-Potato Machine Branch, Harbin Heilongjiang 150030, China)

**Abstract:** Potato planter with the vacuum seed meter has high working speed and good spacing uniformity. To improve the air tightness and wear resistance of the valves on the seed meter, the plasma electrolytic oxidation(PEO) experiment was carried out on the valve surface to obtain ceramic films. Under the given process parameters, the thickness of the ceramic film is 73 μm, and the micro hardness is 959.4 HV0.025. The friction-wear test proves that the wear-resisting property of the PEO coating on 6061 aluminum alloy is improved visibly. After running for 150 hours, the repeated sowing rate and miss sowing rate of the vacuum seed meter have no significant change, and the sowing quality is stable.

**Keywords:** vacuum seed meter; valve; PEO coating; ceramic film; friction-wear; sowing quality

随着马铃薯生产机械化的发展,对马铃薯播种机的作业效率、株距均匀性、重漏播率等指标,提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。气吸式马铃薯排种器,依靠真空,将薯块或者整薯从种箱吸到沿圆周均布的管状吸嘴;管状吸嘴安装在旋转配气阀上面,随同旋转配气阀连续旋转,并在投种区域,依靠与旋转配气阀相配合的固定配气阀的阀芯位置,将吸在管状吸嘴上面的种薯吹出,准确落入开沟器开出的沟内。装备气吸式排种器的马铃薯播种机作业速度最高可达10 km/h,通过控制适当的吸气负压,真正实现了零速投种,其株距的均匀性达到了人工播种的精确程度<sup>[3]</sup>。然而,由于农业机械的特殊作业环境,其核心零部件—旋转配气阀与固定配

气阀的气密性、耐磨性,成为制约气吸式马铃薯播种机发展的瓶颈。

陶瓷材料以其特有的耐蚀、耐磨、耐高温等性能,以及丰富的资源优势,成为继钢铁、铝材之后的第三代工程材料<sup>[4-6]</sup>。等离子体电解氧化(plasma electrolytic oxidation, PEO)亦称为阳极火花沉积(anodic spark deposition, ASD)、微弧氧化(micro-arc oxidation, MAO)等,是一种利用等离子体电解氧化进行材料表面处理的新兴技术<sup>[7-8]</sup>。其基本工作过程如下:将待处理的工件浸入到特定的电解液(一般为弱碱性电解液)中作为阳极,另有一个金属电极作为阴极,在两极之间施加电压(直流或交流),当电压增加到某一阈值时,工件表面就会产生放电现象,同时伴随有弧光产生,在该过程中工件表面及其附近区域发生着复杂的物理、化学、电化学、等离子体化学等一系列反应<sup>[9-11]</sup>。单一等离子体电解氧化技术或复合其他处理工艺,可在铝、镁、钛等阀金属及其合金表面形成结合牢固的陶瓷层,从而可改善基体材料的力学特性,显著增强了基体材料的抗磨损、耐腐蚀、耐高温等性能<sup>[12-14]</sup>。

收稿日期: 2016-02-08

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2014BAD06B03-01); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-10-P22); 云南省冬季无公害高产技术体系构建及应用项目(2014YNC001)

作者简介: 李紫辉(1961—),男,高级工程师,硕士,主要从事农业机械制造方面研究工作, E-mail: li501@163.com

doi: 10.13251/j.issn.0254-6051.2016.08.031

将 PEO 技术应用于气吸式马铃薯排种器, 解决了气吸式马铃薯排种器的核心部件—旋转配气阀与固定配气阀的气密性与耐磨性的矛盾。经过该技术处理的旋转配气阀与固定配气阀的配合表面, 即使在恶劣的田间作业环境下, 仍可实现无间隙无润滑连续可靠工作, 既降低了作业功耗, 又提高了排种器的耐磨性与耐腐蚀性, 保证了气吸式马铃薯排种器稳定可靠的工作。

## 1 气吸式马铃薯排种器的结构原理

气吸式马铃薯排种器主要由静止阀体、旋转阀体、静止轴、旋转主轴、管状吸嘴等构成。静止阀体为圆台形(如图 1(a)), 沿圆锥表面设有相互隔开的负压区和正压区; 旋转阀体为圆盘形(如图 1(b)), 一侧端面为锥孔型腔, 与沿外圆周均匀分布的吸气孔连通。静止阀与旋转阀装配组成配气阀, 其中静止阀体与静止轴连接, 保证静止阀体在工作过程中不发生转动。旋转阀体与旋转主轴连接, 由旋转主轴带动旋转阀体转动; 管状吸嘴安装在旋转阀体圆周均布的吸气孔内。管状吸嘴随同旋转阀共同转动; 各管状吸嘴在通过负压区过程中吸取种薯并保持吸附状态。各管状吸嘴吸附种薯旋转到正压区时, 在正压作用下, 以一定的初速度投放种薯。

气吸式马铃薯排种器工作时, 图 1 所示的内、外圆锥密封面在压紧弹簧的作用下相互配合, 实现正压区与负压区之间, 以及正、负压区与大气之间的旋转密封。由于马铃薯排种器的工作环境条件, 决定了该旋转密封不能采用常规的油润滑或脂润滑。另一方面, 在负压吸种过程中, 田间扬起的沙土、小石子, 以及破碎薯块、拌种剂等杂物, 同时被吸入, 在密封面之间形成复杂的摩擦磨损和腐蚀环境。

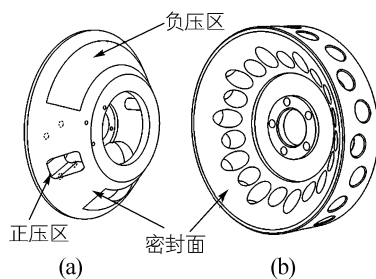


图 1 配气阀结构示意图

(a) 静止阀体; (b) 旋转阀体

Fig. 1 Schematic of the valve set  
(a) stationary body; (b) rotating body

本文以 6061 压延铝合金为基体材料, 加工制造静止阀体和旋转阀体。在内、外圆锥密封面上, 采用

PEO 技术在表面生成陶瓷层, 达到密封、抗磨损、耐腐蚀的目的。

## 2 配气阀的 PEO 工艺过程

等离子电解氧化处理采用中科院力学研究所自主研制的等离子电解氧化系统, 该系统主要包括 PEO 处理交流电源设备、不锈钢电解槽、搅拌器、水冷系统组成。电解液成分为  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  体系。配气阀在 PEO 处理前, 先放在金属清洗液里超声清洗 30 min, 然后再在去离子水中超声清理 10 min, 最后吹干。将清洗后的配气阀放入电解槽中, 配气阀与阳极引线相连, 阴极引线接在不锈钢槽上, 打开水冷系统, 设置好电参数, 开始 PEO 处理。本次 PEO 处理采用恒流模式, 电流密度为  $8 \text{ A/dm}^2$ , 处理时间为 1 h。PEO 处理后的工件用去离子水冲洗, 然后用吹风机吹干。

陶瓷膜的厚度测试采用电涡流测厚仪 (HCC-25A 230), 其测量精度可达  $1 \mu\text{m}$ , 分别在五个不同的位置测量后取平均值。粗糙度测试采用 MFT-4000 多功能材料表面性能试验仪来测量, 在试样上选取 5 个不同位置测量粗糙度取其平均值作为粗糙度的衡量值。摩擦磨损性能测试采用球盘往复摩擦试验机来测定, 摩擦试验参数为对磨球: 钢球(直径  $\phi 5 \text{ mm}$ ) 加载力:  $15 \text{ N}$  (恒载), 磨痕长度:  $5 \text{ mm}$ , 往复速度:  $200 \text{ mm/min}$ 。陶瓷膜的硬度采用 MH-6 显微硬度仪来测量, 选取十个不同位置打硬度后取其平均值, 硬度测试参数为: 加载砝码  $25 \text{ g}$ , 保持时间  $15 \text{ s}$ 。

## 3 性能试验

### 3.1 静态性能测定

PEO 涂层的厚度通过测量 5 个不同位置的厚度后取平均值得到, PEO 处理后获得的涂层的厚度为  $73 \mu\text{m}$ , 经 1000 号砂纸打磨掉疏松层后涂层的剩余厚度为  $43 \mu\text{m}$ , 此时涂层的表面粗糙度为  $0.8 \mu\text{m}$ 。涂层的截面形貌如图 2 所示, 由图 2 可知, 涂层的厚度均匀性很好, 涂层比较致密, 没有明显的缺陷, 涂层与基体的界面结合情况很好, 这主要是由于涂层是从基体表面原位生长得到的。

PEO 涂层的显微硬度通过 MH-6 硬度计来测量, 通过选取 10 个不同的位置打硬度取其平均值作为涂层的显微硬度, 经测量涂层的显微硬度为  $959.4 \text{ HV0.025}$ , 而 6061 铝合金基体的显微硬度为  $92.3 \text{ HV0.025}$ 。经过对比发现, 经 PEO 处理后, 铝合金表面硬度得到了显著提高。

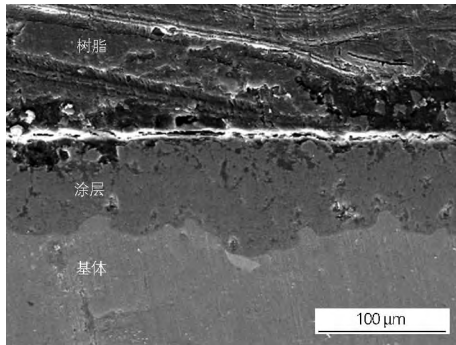


图2 涂层的截面形貌

Fig. 2 SEM image in cross-section of the coating

### 3.2 实验室环境下的摩擦磨损试验

摩擦磨损试验采用 MFT-4000 多功能材料表面性能试验仪来测量,测量方式为往复球盘式,摩擦球为 GCr15 钢球(直径  $\phi 5$  mm),磨痕长度 5 mm,试样移动速度 200 mm/min,摩擦时间为 60 min。对 PEO 处理后的试样及 6061 铝合金基体试样在相同的实验条件下进行摩擦磨损试验,通过对比来评价 PEO 陶瓷层的磨损性能。图 3 给出了相同放大倍数下铝合金试样及 PEO 处理后试样的磨损形貌。由图 3 可知,在相同摩擦参数下,6061 铝合金基体的磨痕更宽,磨痕更深更粗糙,而 PEO 涂层的磨痕很细很浅,陶瓷涂层基本上没有产生磨损损耗。由图 3(c) 可知,6061 铝合金与

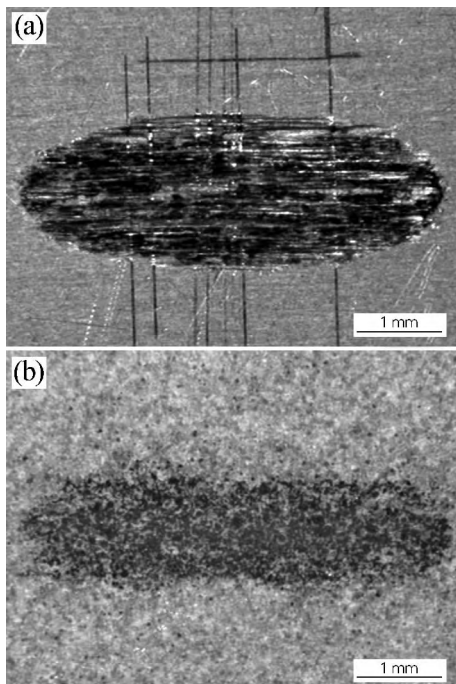


图3 磨痕形貌

(a) 6061 铝合金; (b) PEO 涂层

Fig. 3 Morphologies of the wear tracks

(a) 6061 aluminum alloy; (b) PEO coating

钢对磨时,基体材料被犁削除去,磨痕条纹很清晰,磨损很严重。图 4 给出了放大 100 倍时 PEO 涂层的磨痕形貌。由图 4 可知,PEO 涂层与钢球对磨过程中,钢屑镶嵌到 PEO 涂层中,使涂层表面更加光滑,同时提高了涂层的润滑性,使涂层的磨损破坏进一步减轻。由于涂层的显微硬度比 GCr15 钢球的要高,在摩擦磨损过程中,钢球的磨损破坏很严重,经过 1 h 的摩擦磨损,钢球球头被磨平,而涂层的磨损量却很小。

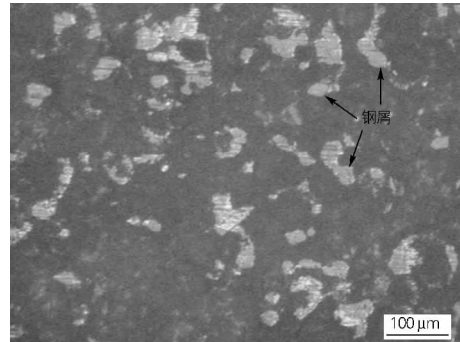


图4 PEO 涂层的磨痕形貌

Fig. 4 Wear morphology of the PEO coating

为了定量的分析涂层及 6061 铝合金的磨损情况,通过测量体积磨损率来评定。体积磨损率计算公式(1)为:

$$\omega = \frac{\Delta V}{F \cdot n \cdot l} \quad (1)$$

式中: $\omega$  代表体积磨损率( $\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ),  $\Delta V$  为磨损体积( $\text{mm}^3$ ),  $F$  为加载力(N),  $n$  为往复摩擦次数,  $l$  为磨痕长度(mm)。磨损体积可由公式(2)计算得到

$$\Delta V = A \cdot l \quad (2)$$

式中: $\Delta V$  为磨损体积( $\text{mm}^3$ ),  $l$  为磨痕长度(mm),  $A$  为磨痕的横截面积( $\text{mm}^2$ )。磨痕的横截面积通过测量磨痕的轮廓再积分后得到。经过测量及计算,6061 铝合金的磨损率  $\omega$  为  $2.75 \times 10^{-6} \text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ , 而涂层的磨损体积很小,在相同的测试条件下无法测量出来。说明与钢对磨的情况下,PEO 涂层的耐磨性能要明显优于 6061 铝合金的耐磨性,PEO 涂层可以显著提高 6061 铝合金的耐磨性能。图 5 为 PEO 处理前、后的配气阀体。

### 3.3 气吸式马铃薯排种器试验台试验

分别将 PEO 处理后的配气阀体和未处理的配气阀体安装在气吸式马铃薯排种器试验台上,进行吸种、携种性能试验。将 HQLUGB-DN100 型空气流量计和 PSAN-C01CA-RC1/8 型压力传感器接入吸气系统,对配气阀进行流量、负压在线监测。以播种机每个作业季 15 天,每天作业 10 h 计,试验台累计运行 150 h,每 0.5 h 记录一次流量、负压数据,共采集 300 组数据。流量数据处理方法为:将连续记录的 20 个数据分为一组,共 15

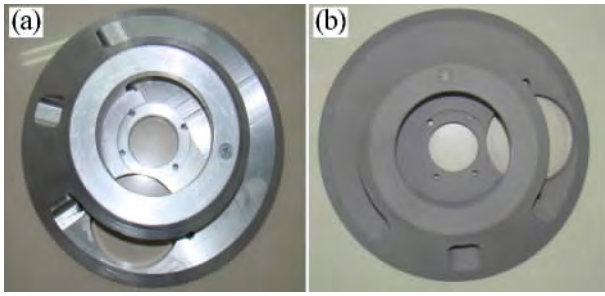


图 5 PEO 处理前 (a) 后 (b) 的配气阀  
Fig. 5 The valve before (a) and after PEO (b) treatment

组, 每组数据取平均值记录, 用于后续分析。流量随排种器运行时间的变化如图 6 (a) 所示。负压数据处理方法与流量数据相同, 负压随运行时间的变化如图 6 (b) 所示。由图 6 可知, 安装 PEO 处理配气阀的排种器, 其流量和负压几乎不随运行时间变化; 而安装未处理过的配气阀的排种器, 在运行 50 h 后, 其流量开始增加, 负压也开始下降。主要原因是未处理过的配气阀在运行中磨损严重, 随磨损量的增加, 两阀体间的间隙变大, 配气阀密封性变差, 导致气体流量增加, 负压下降。

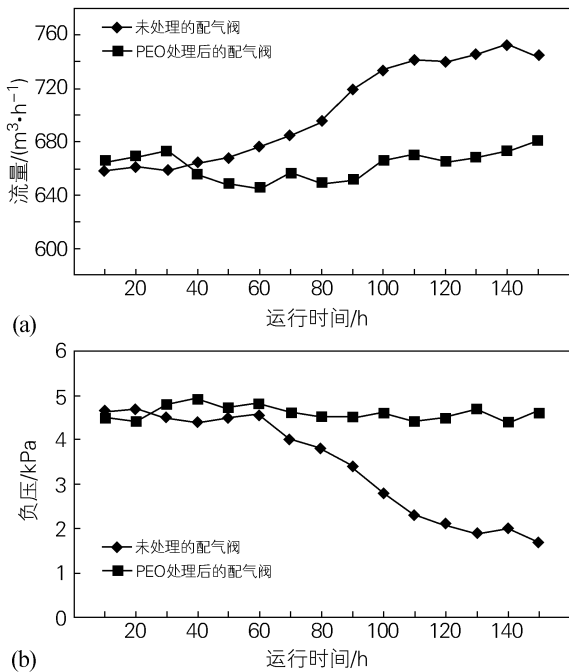


图 6 流量 (a) 及负压 (b) 变化图  
Fig. 6 Variation diagram of the gas flow (a) and negative pressure (b)

按照 GB/T 6242—2006《种植机械 马铃薯种植机 试验方法》中规定的方法对排种器的排种质量进行测定和分析。选取重播率和漏播率为排种质量评价指标, 每隔 1.5 h 计算一次重、漏播率, 共得到 100 组数据。将每个指标连续记录的 10 个数据取平均值记录, 用于后续

分析。试验结果如图 7 所示, 由图 7 可知, 安装 PEO 处理配气阀的排种器的重、漏播率几乎不随试验台运行时间变化; 安装未处理过的配气阀的排种器, 在运行 60 h 后, 其重播率降低, 漏播率增加。主要原因是随着运行时间的增加, 未处理过的配气阀的密封性变差, 导致其内部的气体流量和负压发生改变, 不能满足排种器高质量作业需求, 最终导致排种器的排种质量大幅下降。

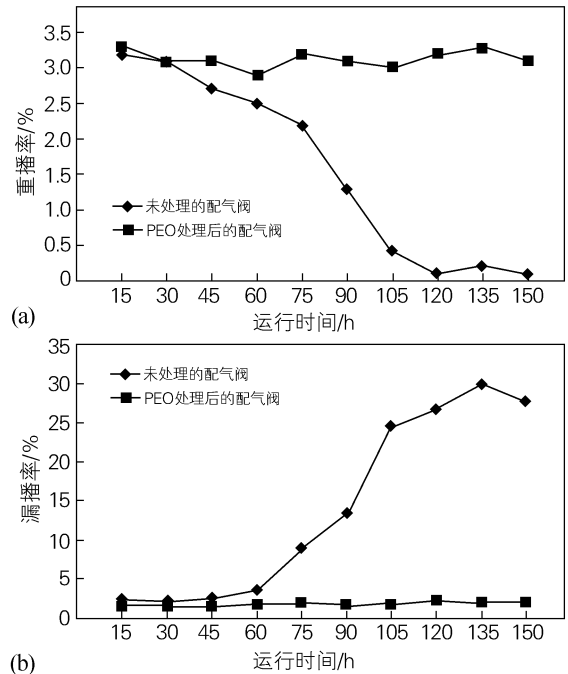


图 7 排种器的排种质量试验结果  
(a) 重播率; (b) 漏播率  
Fig. 7 Experimental results of seed quality of the sowing device  
(a) repeated sowing rate; (b) miss sowing rate

### 4 结论

1) 应用 PEO 技术, 解决了气吸式马铃薯排种器在特殊作业环境下的密封与摩擦磨损问题, 为我国农业机械向精准、高效、低耗迈进, 提供了具有实际应用价值的新工艺。

2) 在电解液成分为 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 体系, 电流密度为 8 A/dm<sup>2</sup>, 处理时间为 1 h 的工艺条件下, 所得涂层的厚度为 73 μm, 显微硬度为 959.4 HV0.025, 铝合金表面硬度得到了显著提高。

3) 对比摩擦磨损试验结果表明, PEO 涂层的耐磨性能要明显优于 6061 铝合金的耐磨性, PEO 涂层可以显著提高 6061 铝合金的耐磨性能。

4) 装备 PEO 处理后的配气阀累计运行 150 h 后, 重漏播率无明显变化。

#### 参考文献:

[1] GB/T 6242—2006, 种植机械 马铃薯种植机试验方法[S].

- GB/T 6242—2006, Equipment for planting-Potato planters-Method of testing[S].
- [2] 刘全威, 吴建民, 王 蒂, 等. 马铃薯播种机的研究现状及进展[J]. 农机化研究, 2013(6): 238-241.  
Liu Quanwei, Wu Jianmin, Wang Di, et al. Current status and progress of the potato seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(6): 238-241.
- [3] Karayel D, Ozmerzi A. Effect of forward speed on hill dropping uniformity of a precision vacuum seeder[J]. Hot Technology, 2004, 14(3): 364-367.
- [4] 袭建军, 辛铁柱, 罗 晶, 等. 铝及铝合金微弧氧化技术的特点及应用[J]. 航天制造技术, 2002(4): 44-47.
- [5] 张勤河, 张建华, 高 军. 工程陶瓷材料的应用[J]. 现代技术陶瓷, 1998(4): 22-24.  
Zhang Qinhe, Zhang Jianhua, Gao Jun. Application of engineering ceramic materials[J]. Advanced Ceramics, 1998(4): 22-24.
- [6] 张世欣, 刘 仁, 王小成, 等. 铝基体上等离子体电解氧化陶瓷涂层的冲蚀性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(9): 84-87.  
Zhang Shixin, Liu Ren, Wang Xiaocheng, et al. Erosion performance of plasma electrolytic oxidation ceramic coating on aluminum substrate[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(9): 84-87.
- [7] Arrabal R, Mohedano M, Matykina E, et al. Characterization and wear behaviour of PEO coatings on 6082-T6 aluminium alloy with incorporated  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 269: 64-73.
- [8] Lukiyanchuk I V, Rudnev VS, Tyrina L M, et al. Plasma electrolytic oxide coatings on valve metals and their activity in CO oxidation[J]. Applied Surface Science, 2014, 315: 481-489.
- [9] 彭家志, 陈 砾, 严宗诚, 等. 等离子体电解氧化电解液配方研究进展[J]. 中国陶瓷, 2009, 45(10): 12-15.  
Peng Jiazhi, Chen Li, Yan Zongcheng, et al. Progress in research on plasma electrolytic oxidation electrolyte[J]. China Ceramics, 2009, 45(10): 12-15.
- [10] 王 丽, 付 文, 陈 砾. 等离子体电解氧化技术及机理研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2012, 31(4): 48-52.  
Wang Li, Fu Wen, Chen Li. Research progress of plasma electrolytic oxidation technology and mechanism[J]. Electroplating & Finishing, 2012, 31(4): 48-52.
- [11] 段关文, 高晓菊, 满 红, 等. 微弧氧化研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(5): 102-106.  
Duan Guanwen, Gao Xiaojie, Man Hong, et al. Research progress in micro-arc oxidation[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(5): 102-106.
- [12] 关永军, 夏 原. 等离子体电解沉积的研究现状[J]. 力学进展, 2004, 34(2): 237-250.  
Guan Yongjun, Xia Yuan. Review on plasma electrolytic deposition[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(2): 237-250.
- [13] 赵玉峰, 杨世彦, 韩明武. 等离子体微弧氧化技术及其发展[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 102-104.  
Zhao Yufeng, Yang Shiyan, Han Mingwu. Technique of plasma microarc oxidation and its development[J]. Materials Review, 2006, 20(6): 102-104.
- [14] 郑 艺, 吴国瑞, 张胜超, 等. 微弧氧化 6061 铝合金复合板轧制工艺及结合机理[J]. 金属热处理, 2014, 39(3): 36-40.  
Zheng Yi, Wu Guorui, Zhang Shengchao, et al. Rolling process and bonding mechanism of micro-arc oxidation 6061 aluminium alloy clad plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(3): 36-40.

## 2016 年全国热处理青年工作者大会邀请函

(2016 年 10 月 28—31 日, 广州)

主办单位: 中国热处理学会青年工作委员会 协办单位: 华南理工大学; 广东世创金属科技股份有限公司; …(征集中)

支持单位: 全国热处理学会《材料热处理学报》编辑部《金属热处理》编辑部

为促进我国材料热处理事业的发展, 全国热处理学会青年工作委员会将于 2016 年 10 月 28—31 日在广州市华南理工大学举办“2016 年全国热处理青年工作者大会”。大会将邀请相关专家做大会报告, 把握行业发展动态及方向, 总结和交流我国材料热处理相关领域的最新研究进展和技术开发成果。欢迎广大从事材料热处理青年科技工作者积极参与, 踊跃投稿!

本次大会将重点研讨“中国制造 2025”大背景下热处理领域的发展思路, 在热处理基础工艺、智能制造、管产学研结合等方面, 以大会报告、校企交流、图片产品展示等多种形式展开广泛交流, 会议设优秀论文奖若干。青年工作委员会是青年热处理工作者的大舞台, 在这个平台上, 可以交朋友、通信息、练能力、创影响。衷心欢迎更多的青年朋友加入青工委行列!

### 一、会议征文范围

材料热处理及表面工程相关新材料、新工艺、新装备及基础研究新进展。本次会议将出版论文摘要集, 对参加本次研讨会交流并提交全文的论文, 如作者同意并评审合格, 将推荐在《材料热处理学报》、《金属热处理》等刊物正式发表。请于 2016 年 8 月 31 日前将大会回执和论文摘要及全文以电子邮件形式提交至大会秘书处。

### 二、日程安排

报到时间: 10 月 28 日全天。报到地点: 广州华工大学城中心酒店(广州市番禺区大学城东二路); 注册费: 1000 元/人, 学生 800 元/人(凭学生证); 住宿费: 华工大学城中心酒店 400 元/间/天。会议食宿统一安排, 费用自理。

28 日晚 19:00-21:00: 青工委换届会议。29—30 日: 大会报告、分组学术交流及企业互动和参观。31 日: 疏散。

### 三、大会秘书处联系方式

联系人: 吕东显 欧阳柳章 地址: 北京市海淀区学清路 18 号热处理学会 邮编: 100083

电话: 010-62914115, 13693356546。E-mail: lvdongx@126.com