

# 阴极尺寸对环形 ADC12 铝合金 内壁 PEO 涂层性能的影响

杨刚<sup>1,2</sup>, 李光<sup>2,3</sup>, 杨苗苑<sup>2,3</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 夏原<sup>2,3</sup>

(1. 中北大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**采用双极脉冲 PEO 技术研究了圆柱阴极尺寸对环形 ADC12 铝合金内壁涂层性能的影响。分析了涂层的厚度、表面、截面形貌和摩擦系数。结果表明:涂层厚度随着阴极尺寸的增大先升后降。一定范围内,涂层随着阴极尺寸的增大表现出更优的耐磨性。涂层性能受到了圆柱阴极与环形件内壁距离的限制导致反应气体集聚在狭小空间,致使阴极尺寸为  $d=30$  mm 时涂层的质量变差。最终,最优的阴极尺寸为  $d=20$  mm。

**关键词:**阴极尺寸;ADC12 铝合金内壁;PEO 涂层

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.06.036

中图分类号: TG146.2; TG174

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2018)06-0156-03

## Effect of Cathode Size on Properties of PEO Coatings Inside Annular ADC12 Aluminum Alloy

YANG Gang<sup>1,2</sup>, LI Guang<sup>2,3</sup>, YANG Miaoyuan<sup>2,3</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, XIA Yuan<sup>2,3</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The effects of cylindrical cathode size on the properties of annular ADC12 aluminum alloy inner wall coating were studied by bipolar pulse PEO technology. The thickness, surface and section morphology and friction coefficient of the coating were analyzed. The results show that the thickness of the coating increases first and then decreases with the increase of cathode size. In a certain range, the coating shows better wear resistance with the increase of cathode size. The properties of the coating is limited by the distance between the cylindrical cathode and the inner wall of the ring, which can result in the reaction gas gathering in narrow space, then, when the cathode size is  $d=30$  mm, the quality of the coating becomes worse. Finally, the optimal cathode size is  $d=20$  mm.

**Key words:** cathode size; ADC12 aluminum alloy inner wall; PEO coating

压铸铝合金 ADC12 具有较高的强度比、良好的铸造性能和切削性能,被广泛应用于军工、航天、汽车、机械等领域,尤其在汽车发动机缸体方面应用较为广泛<sup>[1-3]</sup>。由于硬度低、耐磨性差、耐蚀性差限制了其在汽车领域的广泛应用。PEO 技术称为微弧氧化(Micro-arc oxidation, MAO)又称等离子体电火花沉积(Plasma Electronic Oxidation, PEO)是一种能在

Al、Mg 和 Ti 等金属表面原位生长陶瓷膜的新技术,该技术的提出为改善铝合金的表面性能提供了新的途径<sup>[4-5]</sup>。本文采用自制实验装置对其内壁进行了 PEO 陶瓷化,并以此为基础研究了圆柱形阴极尺寸对环形 ADC12 内部 PEO 涂层的厚度、形貌以及摩擦磨损性能的影响,并得出了最优的阴极尺寸。

## 1 实验材料与方法

实验采用压铸 ADC12 铝合金为基体材料,其化学成分见表 1,尺寸为内径 40 mm、外径 50 mm、高度 20 mm,实验前采用 400<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、1000<sup>#</sup>、1500<sup>#</sup> 砂纸进行内壁磨抛,粗糙度达到  $Ra=0.5 \mu\text{m}$ ,环状 ADC12 铝合金工件为阳极,采用不同的阴极(不锈钢)尺寸(取直径  $d=10$  mm、 $d=20$  mm、 $d=30$  mm)在碱性硅酸盐电解液中进行恒流 PEO 处理,电流密度为 14

收稿日期:2017-06-28

基金项目:国家国际科技合作专项项目(2014DFG51240);中国科学院  
战略性先导科技专项(B类)(XDB22040503)

作者简介:杨刚(1991-),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向:铝  
合金液态成型及其表面处理;电话:15735658453;

E-mail:619083514@qq.com

通讯作者:夏原(1963-),男,浙江上虞人,研究员/博导,博士,主要研究  
方向:表面科学与工程;电话:010-82543858;

E-mail:xia@imech.ac.cn

表1 ADC12 铝合金的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of ADC12  
aluminum alloy (wt%)

Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Ni	Sn	Al
9.6~12	1.5~3.5	≤0.3	≤1.0	≤1.3	≤0.5	≤0.2	余量

A/dm<sup>2</sup>、时间为 60 min,实验装置示意图如图 1 所示。

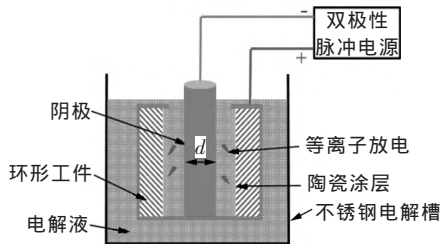


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

使用涡流测厚仪进行涂层厚度的测量,圆筒试样涂层厚度的测量是沿圆筒轴线方向在偏上、中间及偏下位置分别取样测得厚度数据后取其平均值作为圆筒内壁弧面 PEO 涂层的厚度。使用 FEIQuanta 200F 进行表、截面形貌的观察;摩擦试验采用往复球盘式试验机来进行,摩擦球采用直径为 5 mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球,载荷为 15 N。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 不同阴极尺寸对涂层厚度的影响

图 2 为不同阴极尺寸条件下制得的涂层厚度变化规律。可知,随着阴极尺寸的不断增大,圆筒内壁涂层的厚度出现先增加后减小趋势,且在  $d=20$  mm 时,厚度达到最大值。当阴极尺寸较大或者较小的时候都会对膜层的厚度造成影响,只有合适的阴极尺寸,才可得到厚度最优的样品。实验中环状 ADC12 的内径是固定不变的,当阴极尺寸不同时,其阴阳极之间的距离也不相同。在恒流模式下进行 PEO 时,当工作电流密度较大时,阴极尺寸较小的阴极材料浸入电解液中的部分,单位面积的电流会很大,进而加快了阴极材料氧化和腐蚀速率,阴极材料的不断氧化及电解,会导致电解液的污染,造成 PEO 处理过程中电子流向的紊乱,致使涂层的生长缓慢,导致最终厚度较小。当  $d=30$  mm 时,而工件内径保持不变,这样就导致了阴极与阳极工件之间的间距变狭小。PEO 的生长动力主要来源于不断的击穿放电,当阴阳极之间的距离较小时,实验过程中的气泡难以及时散去和击穿,对生长行为产生了影响,间接导

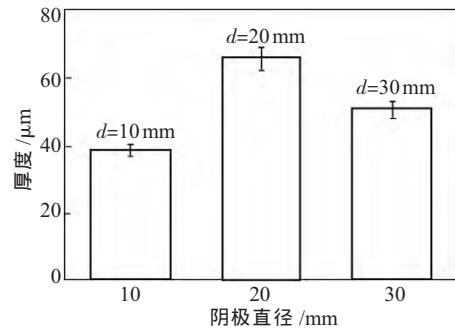


图2 不同阴极尺寸涂层的厚度

Fig.2 The thickness with different cathode sizes

致了涂层的缓慢生长。与此同时,大量的反应热难以散去,对涂层内部的沉积造成了阻碍,致使最终得到的涂层厚度不理想。当  $d=20$  mm 时,阴极的电流密度适合涂层的生长,同时适当的阴极与阳极工件之间的间距可为反应提供足够的空间和合适的环境。

### 2.2 不同阴极尺寸对涂层组织形貌的影响

不同阴极尺寸时制得的涂层的表面和截面形貌如图 3 所示。其中图 3(a)、(b)为  $d=10$  mm 时的涂层表面和截面形貌;图 3(c)、(d)为  $d=20$  mm 时的涂层表面和截面形貌;图 3(e)、(f)为  $d=30$  mm 时的涂层表面和截面形貌。由图 3 可知,当  $d=10$  mm 时,涂层的厚度最小,从表面形貌可看出,由于化学反应,该过程中放电通道内熔融物喷出形成的微孔大小和形状都不均匀,局部区域的微孔直径较大且形状呈现条状。当  $d=20$  mm 时,涂层的厚度达到最大值,但其厚度较不均匀,局部位置向内向外生长较多;涂层的表面缺陷(图 3(c))尺寸较其他两个阴极尺寸下制得的涂层要大,放电形成的孔洞的数量减少,但尺寸变大,孔洞周围火山状的凸起的高度更高。这主要是因为厚度增加,PEO 击穿放电的难度加大,表面薄弱区域减少,每次同时发生击穿放电的数目减少,导致单个放电通道的电流密度急剧升高,产生的放电击穿能量更大,使更多的物质被熔化并在瞬时高压作用下喷出;同时在溶液中冷淬作用下,迅速凝固成型,使形成的孔洞缺陷尺寸变大。当  $d=30$  mm 时,涂层的表面形貌与其他两种条件下的涂层相似,其涂层表面微孔的尺寸较  $d=10$  mm 时的大,比  $d=20$  mm 时的小。不过从涂层的截面形貌(图 3(f))可看出,其涂层内部孔洞较多较疏松。这主要是由于  $d=30$  mm 时,阴极与试样之间的间距仅为 5 mm,在反应过程中会产出大量气体且由于距离狭窄的原因不易快速排出,随着处理时间的持续增加,涂层内聚集了

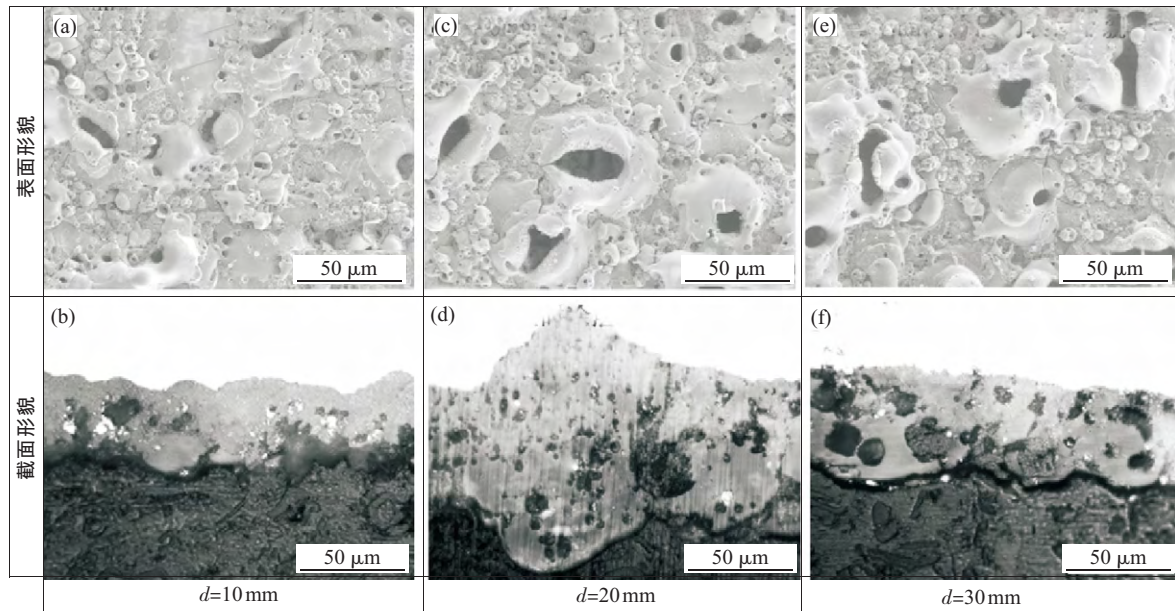


图3 不同阴极尺寸涂层的表、截面形貌

Fig.3 Surface and cross section morphologies of the coatings with different cathode sizes

大量的气体,导致涂层内部疏松,从而影响了涂层的整体性能。

### 2.3 不同阴极尺寸的PEO涂层的摩擦行为

图4给出了不同阴极尺寸下涂层的摩擦系数随往复次数的变化曲线。三种阴极尺寸下制得的涂层在干摩擦情况下的摩擦系数均在0.8左右,这说明阴极尺寸的变化对涂层的摩擦系数并未有显著影响,但在往复次数2000转内 $d=20\text{mm}$ 时的涂层摩擦系数较其他两者的摩擦系数低。随着阴极尺寸的增大,涂层的耐磨性有了显著提高。当 $d=10\text{mm}$ 时,涂层的磨损寿命较低仅为30转,涂层很快被磨掉裸露出基体,说明该阴极尺寸下制得的涂层质量较差。当阴极直径为20、30mm时涂层时,往复次数达到3000转涂层仍没有磨坏的迹象,两种涂层的耐磨性均较好。涂层耐磨性能的好坏取决于涂层内部结构的完整性,由图2可知, $d=20\text{mm}$ 时的涂层厚度较 $d=10$


mm、30mm时的厚, $d=20\text{mm}$ 时的涂层整体较为完整且致密(见图3(c)、(d)),在相同时间内火花放电的集中程度越高,对PEO涂层相变的影响就越大,其涂层的质量就会变得比 $d=10\text{mm}$ 、30mm的更好。由此可见,当 $d=20\text{mm}$ 时涂层的耐磨性能最好。

## 3 结论

(1) 环形ADC12的PEO涂层的厚度会随着阴极尺寸的增长呈先升后降的趋势;适当增加阴极尺寸,可使环形ADC12内壁PEO涂层厚度有极大的提升。

(2) 环形ADC12的PEO涂层耐磨性随着阴极尺寸的增加有明显增加,摩擦系数并未随阴极尺寸的变化有明显改变。综合涂层的厚度、表、截面形貌、摩擦系数可知,最优的阴极尺寸值为 $d=20\text{mm}$ 。

### 参考文献:

- [1] 王蒙蒙,张德恩,卢锦德,等. Al-Cu-Mn系新型铝合金热处理工艺研究[J]. 热加工工艺,2013,42(6):159-163.
- [2] 任丽萍,郭秀琴,刘云. 702A铝合金的合金化工艺研究[J]. 热加工工艺,2010,39(5):40-41.
- [3] 刘伟,景丽丽,刘云,等. 汽车发动机缸体用ADC12铝合金铸造成分优化[J]. 热加工工艺,2016,45(5):67-72.
- [4] 石杰. PEO工艺在复杂铝合金工件上的应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2004.
- [5] 吕志胜. 大型回转体铝合金构件PEO工艺与装置[D]. 西安:长安大学,2012. 

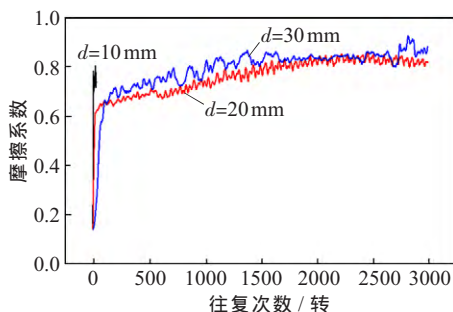


图4 不同阴极尺寸涂层的摩擦曲线

Fig.4 Friction curves of the coating with different cathodic sizes