

# Research Progress on Micro-Arc Oxidation Technology of Aluminum Alloy

Lei Wang, Benkui Gong\*, Xu Han, Cuiling Fan

School of Material Science and Technology, Shandong University of Technology, Zibo Shandong  
Email: 2812516073@qq.com, gongben69@163.com

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2018; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 19<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Micro-arc oxidation is a new technology for growing ceramic membranes *in situ* on the valve metal surface. The micro-arc oxidation of aluminum alloy can overcome the shortcomings of low hardness and easy wear of aluminum and its alloys, and has broad application prospects in aerospace, electronic machinery, military and other fields. The development process and mechanism of micro-arc oxidation are briefly introduced. The influence of various factors on the formation and performance of ceramic coating was analyzed. The existing problems of the technology are pointed out, and the development trend of the technology is forecasted.

## Keywords

Aluminum Alloy, Micro-Arc Oxidation, Ceramic Coatings, Performance

---

# 铝合金微弧氧化技术的研究进展

王磊, 宫本奎\*, 韩旭, 范翠玲

山东理工大学材料科学与工程学院, 山东 淄博  
Email: 2812516073@qq.com, gongben69@163.com

收稿日期: 2018年11月19日; 录用日期: 2018年12月12日; 发布日期: 2018年12月19日

---

## 摘要

微弧氧化是一种在阀金属表面原位生长出陶瓷膜的新技术。铝合金微弧氧化可以克服铝及其合金硬度低、易磨损等缺点, 在航空航天, 电子机械, 军工等领域都具有广阔的应用前景。本文简介了微弧氧化技术的发展及其机理, 分析了各种因素对陶瓷层生成和性能的影响, 指出该技术尚存在的问题, 展望了该技术的

\*通讯作者。

发展趋势。

## 关键词

铝合金, 微弧氧化, 陶瓷层, 性能

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 环境保护以及可持续发展得到很大的重视。铝及铝合金具有良好的物理、化学和加工性能, 且含量丰富, 污染小, 可回收。铝已广泛用于航空航天、兵器、建筑、交通、电力、包装、印刷、电子、家电等各个领域。但在使用过程中易发生局部腐蚀与磨损, 需要对其表面进行耐蚀与抗磨强化。

微弧氧化(Micro-Arc Oxidation, MAO)是新型的表面处理技术, 是将阀金属置于电解液中, 在强电压的作用下, 在金属的表面发生氧化反应, 在表面会出现火花放电的现象, 在等离子体化学, 电化学, 热化学等的共同作用下, 在金属表面原位生长出一层具有良好的耐腐蚀、抗磨损、绝缘等优良性能的陶瓷膜。

## 2. 微弧氧化技术的发展

20 世纪 30 年代, Gunterschulze 等人发现将某些金属浸入电解液中, 在强电场的作用下, 在金属的表面会发生火花放电的现象, 初始认为这种火花放电现象会破坏金属表面的氧化膜, 但后来研究发现, 此现象也可以生成氧化膜且性能更加优异。在 70 年代, 美国, 德国及其前苏联都对该技术进行大量研究, 其中, 前苏联在研究水平以及规模上处于前沿。90 年代后, 更多的国家都在开始对微弧氧化技术进行研究。以北京师范大学低核能物理研究所、哈尔滨工业大学、哈尔滨理工大学、西安理工大学等为主, 在引进与吸收俄罗斯的技术基础上进行了大量的研究。随着人们对微弧氧化技术不断地研究, 其应用将会越加的广泛。

目前, 对于微弧氧化技术研究主要集中在铝、镁、钛及其合金, 但对于微弧氧化陶瓷膜的生长机理还没有统一的定论。在微弧氧化过程一般分为 4 个阶段: 阳极氧化阶段、火花放电阶段、微弧氧化阶段和熄弧成膜阶段。吴汉华[1]等在微弧氧化研究中发现: 当电压保持不变时, 随着时间的变化电流会明显的分为五个阶段, 陶瓷层的形貌与结构随着氧化时间的增加发生阶段性的变化: 第 1 阶段, 样品电流会由开始的 4.7 A 迅速下降到 2.6 A, 样品表面会先出现大量气泡, 随即产生大量微小弧点, 陶瓷层的平均厚度约为 1  $\mu\text{m}$ ; 第 2 阶段, 电流在 2.6 A~2.4 A 之间波动, 样品表面有无数均匀游动的白色弧点, 在此阶段, 陶瓷层的厚度随时间增加较快, 电流却变化较小; 第 3 阶段, 电流由 2.4 A 升至 3.5 A, 微小弧点变为更大的弧光斑, 陶瓷层的表面孔径也会增大; 第 4 阶段, 电流由 3.5 A 下降至 1.8 A, 样品表面会发生连续击穿现象, 弧光斑点变得更大; 第 5 阶段, 电流由 1.8 A 下降到 0.1 A, 只能观察到零星微小的火星。

## 3. 微弧氧化工艺的影响因素

微弧氧化技术是受多个影响因素控制, 电解液、温度、电参数以及氧化时间都对最后生成的氧化膜

有很大影响。

### 3.1. 电解液的影响

微弧氧化的电解液可分为酸性电解液和碱性电解液,但为了保护环境,通常会采用弱碱性的电解液。电解液的成分对微弧氧化所形成的陶瓷膜有很大的影响,常用的电解液体系有硅酸盐体系、碳酸盐体系、磷酸盐体系以及铝酸盐体系,不同的体系对氧化膜层的性能与结构会有很大的影响。电解液的成分、浓度、温度和添加剂的种类对陶瓷层的成分及性能有着极大的影响。

辛铁柱[2]等人在氢氧化钾溶液中分别加入硅酸钠和铝酸钠,结果研究发现在硅酸盐体系中所形成的膜层较厚,粗糙度也较大,而铝酸钠体系形成陶瓷膜的硬度和致密层比率较高。同时硅酸钠和铝酸钠的浓度对陶瓷膜的厚度、硬度以及致密层比率也有很大的影响。杨巍[3]等人在碳酸钠、硅酸钠和锡酸钠 3 种电解液中对 LY12 铝合金进行微弧氧化处理的过程中发现,在硅酸钠溶液中铝合金易于起弧,能够在短时间、低电压下获得高阻抗膜;而在锡酸钠溶液中铝合金未发生起弧现象,不能形成高阻抗膜;在碳酸钠和硅酸钠溶液中,微弧氧化陶瓷膜的后期生长曲线有着相似的变化规律,在锡酸钠溶液中样品表面产生电化学溶解,不能形成陶瓷膜;提出铝合金样品表面形成高阻抗膜是微弧氧化得以进行的必要条件。

此外,在电解液中加入一些添加剂对陶瓷层性能也有很大的影响,ChenQuanzhi [4]等在对 6063 铝合金微弧氧化过程中加入石墨烯,研究结果发现:石墨烯粒子可以降低击穿电压,从而促进微弧氧化的进行,陶瓷层的厚度与硬度会随着石墨烯的含量增加而增加。王玉江等人在电解液中加入纳米二氧化钛颗粒,能够有效的改善陶瓷层的表面质量,减少微裂纹以及孔洞的数量,使膜层变得平滑而致密,使陶瓷层具有优异的耐蚀性。王平等人在对铝合金钻杆材料微弧氧化过程中加入 SiC 微粉,发现 SiC 微粉的添加增加了膜层的厚度,改变了膜层的表面形貌,同时提高了微弧氧化膜层的显微硬度、耐蚀性等性能。Shunping Ji [5]等研究发现,微弧氧化陶瓷层中掺杂 Fe 和 P 可以有效的提高 LY12 铝合金微弧氧化后的耐腐蚀性能。

### 3.2. 电参数的影响

电参数是影响陶瓷膜层质量的另一大影响因素,电流密度、电压、占空比、脉冲频率在很大程度上都会影响陶瓷膜层的结构与性能。

辛铁柱[2]等人在对 LY12 铝合金进行微弧氧化的过程中,发现随着电流密度的增加,陶瓷层的厚度也会增加,但当电流密度超过一定值的时候会使陶瓷层表面产生烧蚀现象;而致密层的比率则随着电流密度的增大在不断的减小。王红美等研究了电流密度对 5083 铝合金微弧氧化陶瓷层的电化学腐蚀性能的影响,发现随着电流密度的增大,陶瓷层的厚度随之增大,陶瓷层表面微孔的数量不断减小。WangPing [6]等人在对 7E04 铝钻杆制备微弧氧化层时发现:随着电流密度的增大,击穿电压会增加,陶瓷层的厚度增加,但其表面会变粗糙,导致表面显微硬度降低。田钦文等人研究了工作电压对 7A04 铝合金微弧氧化陶瓷层的性能研究,发现陶瓷层表面的多孔是受到正向和反向电压的影响,正向电压的增加会减少孔洞的数量,但孔洞的深度会增加,水接触角也会增大;反向电压的增加会对陶瓷层产生刻蚀现象,但水接触角减小,提高陶瓷层的亲水性。郑金杰等人在铝酸盐体系中研究了脉冲频率对 7075 铝合金微弧氧化陶瓷膜层的影响,结果发现当脉冲频率为 300 Hz 时,所得到陶瓷层的硬度以及耐腐蚀性都是最优。朱荣柏研究了占空比对陶瓷层的影响,发现占空比对陶瓷层的腐蚀电流密度影响较小,但对陶瓷层的厚度影响较大,是因为占空比较小的时候,单脉冲所释放的能量较小,在陶瓷层形成的孔洞也较小,同时也有利于熔融物的冷却,有利于膜层的生长。周京[7]等人研究了电参数对 7075 铝合金微弧氧化陶瓷层致密性的影响,发现影响陶瓷层厚度与孔隙率程度的大小依次为电压、电流密度、占空比、脉冲频率,当

电压 550 V、电流密度 8 A/dm<sup>2</sup>、占空比 20%、频率 400 Hz 时，能得到最优的陶瓷层。

### 3.3. 氧化时间的影响

氧化时间对铝合金微弧氧化陶瓷层的厚度、硬度以及表面形貌有很大的影响。

崔叶等研究了氧化时间对陶瓷层电接触微动磨损的影响，结果表明氧化时间的增加会减小陶瓷层的摩擦系数，提高陶瓷层的耐磨性能，在氧化时间为 50 min 时，陶瓷层的厚度最大，耐磨性也最优。肖峰等人研究了氧化时间对超硬铝 7A04 陶瓷层硬度的影响，发现随着氧化时间的增加，陶瓷层厚度增加，但陶瓷层的显微硬度是先增加后减小的，在氧化时间为 50 min 时，陶瓷层十分致密，显微硬度也最大。辛铁柱[2]研究了氧化时间对陶瓷层的硬度，致密层的比率的影响，结果表明随着氧化时间的增加陶瓷层的硬度在增加，但超过一定的时间硬度增加就较为平缓，而致密层的比率则随着氧化时间增加在不断的减小，粗糙层在不断的增加。

## 4. 铝合金微弧氧化陶瓷膜的性能

对铝合金进行微弧氧化的目的就是为了在金属表面得到性能优异的陶瓷层，耐磨损、耐腐蚀以及抗疲劳性能是主要的研究重点。

### 4.1. 耐磨损性能

铝合金微弧氧化所形成的陶瓷膜主要是  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，陶瓷层与基体结合较为紧密，因而具有良好的耐磨性能。陶瓷膜分为致密层和疏松层，其组成成分、结构以及所占的比率都会影响到陶瓷层的硬度和耐磨性能。

王艳秋等对 7075 铝合金进行微弧氧化，结果发现经过微弧氧化过后其耐磨性能相对于 7075 铝合金提高了 400 倍，相对于硬质阳极氧化膜提高了 50 倍。孙源等在对 2024 铝合金陶瓷层进行研究时发现：摩擦系数随着载荷的增加而减小，磨损量在增加，磨损发生为磨粒磨损。唐艳茹[8]等在提高陶瓷层耐磨性的研究中发现：加入适量的石墨可以提高陶瓷层的厚度，促进致密层的生长，且石墨具有很高的导电性，会使陶瓷层表面较为光滑平整，从而降低陶瓷层的摩擦系数。

### 4.2. 耐腐蚀性能

提高材料的耐腐蚀性能一直是人们所研究的重点之一，随着铝合金的应用更加广泛，对其耐腐蚀性能要求也越加严格。

王晓波等在对 LF6 铝合金进行研究过程中发现，没有经过微弧氧化处理的铝合金在盐雾腐蚀实验中易生成絮状物质，而经过微弧氧化后，在同等的条件下并没有腐蚀裂纹的产生，也没有明显的腐蚀现象发生，说明微弧氧化所形成的陶瓷层对金属基体具有很好的保护作用。庄俊杰[9]等研究发现：对 7050 铝合金经过微弧氧化处理，其表面疏松层主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，致密层是由 Al 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 烧结而成，陶瓷层的存在可以有效的降低铝合金的腐蚀敏感性，抑制腐蚀点的产生。Wang Ping 等人研究了 Ce(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 对 ZL108 微弧氧化陶瓷层的影响，结果发现随着 Ce(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 浓度的增加，微弧氧化电压先增大后减小，Ce(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 可以提高陶瓷层的均匀性和耐腐蚀性，但表面硬度会随着 Ce(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 的增加是先增大后减小。宋仁国等对 6063 铝合金分别在硼酸盐体系和硅酸盐体系中进行微弧氧化，发现在硅酸盐中所生成的陶瓷层更加的致密，在陶瓷层中含有较多的 Al<sub>3</sub>Si，两种体系所形成的陶瓷层都具有一定的耐腐蚀性，但硅酸盐体系所形成的陶瓷层耐腐蚀性更加的优异。王思然等在研究铝合金微弧氧化陶瓷层耐海水冲蚀实验中发现：陶瓷层在海洋大气环境中腐蚀方式主要为局部腐蚀，当环境温度升高时，在动力学和热力学的作用下，腐蚀速度将会迅速增加；而且随着海水的冲蚀速度的加快，陶瓷层的腐蚀速度也会加快。

### 4.3. 抗疲劳性能

微弧氧化陶瓷层的抗疲劳性能是描述材料性能指标之一，因此对陶瓷层的抗疲劳性能的研究也是热点之一。

张亚娟[10]在对 LD10 铝合金微弧氧化陶瓷层进行研究时认为：陶瓷层产生疲劳断裂是经过疲劳裂纹的产生，疲劳裂纹的扩展以及产生瞬间的断裂三个阶段，其分析认为是残余应力导致陶瓷层发生疲劳断裂，残余应力的产生是由陶瓷层在生长过程中产生的生长应力，以及由于金属基体和陶瓷层热膨胀系数不同，在温度的变化下产生的热应力。王亚明等人在对 LY12 铝合金研究时发现：微弧氧化陶瓷层会降低铝基体的疲劳寿命，而且随着陶瓷层的厚度增加，疲劳寿命会显著下降，其分析认为陶瓷层的生长会导致金属基体产生局部缺陷，在外加载荷的情况下易形成疲劳源，从而导致断裂。Dai. Wei Bing 等对铝合金陶瓷层的研究过程中发现：陶瓷层与铝合金基体之间界面的粗糙度会影响陶瓷层的疲劳寿命，在高交变应力的作用下会严重影响陶瓷层的疲劳性能。

## 5. 微弧氧化技术展望

铝合金微弧氧化形成的陶瓷膜具有优良的性能，使其能够在各个领域中得到广泛的应用，在经过各国的学者不断的研究探索，该技术已经得到很大的发展。例如，在电解液中加入一些添加剂，可以降低膜层的孔隙率，来提高膜层的耐腐蚀性能。但为了能够更好地应用于工程领域，还有一些问题有待解决。

1) 目前，对微弧氧化机理还没有统一的结论，在微弧氧化过程中影响因素较多，这需要对微弧氧化技术做进一步的研究与探索。

2) 对于不同的铝合金，微弧氧化所产生的陶瓷层性能也不一样，需要不断的改进工艺参数，不断的优化实验方案，以至于得到性能更加优异的膜层。

3) 微弧氧化技术效率较低，能耗较大，从而成本较高，不利于微弧氧化技术在生产领域中的应用，研制新的设备与开发新的技术也是微弧氧化技术发展的一个重要方向。

## 参考文献

- [1] 吴汉华. 铝合金微弧氧化陶瓷膜形成过程中的特性研究[J]. 无机材料学报, 2004, 19(3): 617-622.
- [2] 辛铁柱. 铝合金表面微弧氧化陶瓷膜生成及机理的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [3] 杨巍, 蒋百灵. 溶质离子在铝合金微弧氧化陶瓷膜形成过程中的作用机理[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(3): 464-468.
- [4] Chen, Q.Z. (2017) Influence of Graphene Particles on the Micro-Arc Oxidation Behaviors of 6063 Aluminum Alloy and the Coating Properties. *Applied Surface Science*, **423**, 939-950. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.202>
- [5] Ji, S.P. (2017) Excellent Corrosion Resistance of P and Fe Modified Micro-Arc Oxidation Coating on Al Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **710**, 452-459. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.303>
- [6] Wang, P. (2017) Characterization of Micro-Arc Oxidation Coatings on Aluminum Drillpipes at Different Current Density. *Vacuum*, **142**, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.04.038>
- [7] 周京. 7075 铝合金微弧氧化膜层致密性的电参数优化研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(6): 165-172.
- [8] 唐艳茹, 潘利华. 微弧氧化提高铝合金耐磨性能的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 48-54.
- [9] 庄俊杰. 微弧氧化对 7050 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(10): 1532-1539.
- [10] 张亚娟. 微弧氧化对铝合金耐蚀和疲劳性能的影响[D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2011.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)