

铝合金微弧氧化技术的研究进展

陈姣丽

(航宇救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441000)

摘要 铝合金的密度较小, 且强度较高, 在航空航天、工业以及民用制造业生产中具有良好的应用效果, 但是铝合金的硬度较低, 且耐磨性较差, 所以在具体应用过程中会受到一定的限制。为了明确微弧氧化技术对于铝合金的影响, 本文详细阐述了微弧氧化的基本原理, 对影响微弧氧化的主要因素进行分析, 最后对不同实验条件下经过微弧氧化处理后铝合金的硬度、耐磨性疲劳性能、热学性能以及耐腐性能进行分析, 根据实验结果表明, 微弧氧化技术能够有效提高铝合金综合性能。

关键词 铝合金 微弧氧化技术 电解液 电解液配方 基体材料

中图分类号: TG178

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)03-0001-03

铝合金的密度较小, 且强度较高, 因此在实际应用过程中, 需要提高铝合金的硬度、耐磨性以及耐腐蚀性, 主要通过对铝合金表面进行处理方式。其中, 微弧氧化技术具有良好的应用效果, 微弧氧化技术以普通阳极氧化技术为基础, 通过弧光放电提高和激活在阳极中发生反应, 能够在铝合金表面形成陶瓷氧化膜, 从而能够提升铝合金综合性能。

1 微弧氧化技术原理分析

1.1 微弧氧化技术发展历程

1930年初, 研究人员将金属放置在强电场中, 发生了火花放电的现象, 研究人员发现火花对于金属氧化膜会产生一定的破坏作用。经过进一步实验发现, 通过火花放电现象能够在金属表面形成一层氧化膜, 所以该技术逐渐在镁合金的防腐处理中应用。1970年后, 美国、德国等国家相继开展该项技术的研究, 对火花放电的具体原因进行分析, 并提出了“电子雪崩”的模型, 通过该模型对放电过程中金属的氧化反应进行研究, 相关研究人员指出该现象主要发生在氧化膜最为薄弱的区域, 或最容易被击穿的区域, 放电过程中所产生的强大热应力是引起“电子雪崩”的主要动力源; 研究人员之后提出放电的高能电子来自进入氧化膜中的电解质, 并提出了“火花沉积”模型, 由此微弧氧化技术被全面应用于有色金属性能强化中。

1.2 微弧氧化技术原理分析

将金属放入到电解质溶液中, 其表面能够生成一层较薄的金属氧化物绝缘膜; 当电压从普通的阳极氧化法拉第区域进入高压放电区域后, 当超过临界值时,

绝缘膜中的一些薄弱环节就会被击穿, 金属表面就会产生密度较高的火花放电; 在微弧氧化继续的过程中, 金属表面的游动弧斑会不断变大, 且弧斑数量不断减少, 跳跃的频率会不断降低, 直到弧光完全消失; 但是因为击穿主要发生在养护膜的薄弱区域, 在被击穿后该区域会生成新的氧化膜, 薄弱区域就会转移到其他区域, 从而形成均匀的氧化膜。由此可见, 微弧氧化的过程为: 击穿→熔化→覆盖→熄弧→凝固→反复击穿。

在微弧氧化技术应用过程中, 通过微弧区域瞬间产生的高温烧结作用, 能够在铝、镁等有色金属表面形成陶瓷膜, 具有电晕、火花以及微弧等多种不同放电形式。微弧氧化的过程一般可以分为阳极氧化、火花放电、等离子体微弧氧化以及熄弧等四个不同阶段^[1]。例如, 将微弧氧化技术应用在6068铝合金时, 在不同的电流密度下, 电位会随着时间的变化而产生变化, 在不同电流密度下微弧氧化的过程存在很大差异; 部分研究人员通过散射光谱学以及快速成像工艺, 对铝、氧等光散射强度和时间的关系进行定量分析, 发现在阳极氧化阶段中没有铝的散射强度, 在经过一段时间后, 样本表面会出现火花放电现象, 铝散射线突然开始提高, 之后呈现出指数降低的现象, 铝综合性能得到充分强化。

微弧氧化工艺近些年来发展速度较快, 受到现代科学技术发展的影响, 微弧氧化工艺在铝合金材料中的应用, 能够有效提高铝合金材料各项性能, 使得铝合金材料能够适应多种高耐磨、高腐蚀性的应用场景。

2 微弧氧化技术的主要影响因素分析

2.1 电解液配方影响因素分析

通常所采用的微弧氧化电解液包括酸性和碱性两种不同类型,酸性电解液会对环境产生一定的危害,所以应用逐渐减少。微弧氧化膜在碱性电解液中会有少部分被其溶解,所以一般采用弱碱性电解液。电解液配方对于微弧氧化技术的应用效果会产生很大影响,电解液中的一些成分会参与微弧氧化形成过程,从而对陶瓷膜的性能产生直接影响。现阶段,铝合金微弧氧化技术中所采用的电解液主要为硅酸钠溶液和偏铝酸钠溶液,在部分实验研究中发现,随着偏铝酸钠溶液逐渐增加,微弧氧化膜的厚度、硬度会有一定提升,但是偏铝酸钠溶液超过一定浓度后就不会形成氧化膜^[2]。由此可见,电解液配方对于微弧氧化技术的应用效果会产生直接影响,所以为了提高铝合金微弧氧化膜综合性能,必须做好电解液配方处理。

2.2 电源影响因素分析

首先,微弧氧化技术最早采用直流电源的形式,但是因为直流电源对于铝合金表面的放电特征控制效果较差,难以对其应用过程进行精准控制,所以微弧氧化膜会因为电流密度过大而出现局部破损的问题,因此该电源逐渐被取代,只应用在较为简单或对质量要求不高的铝合金工件制备中。

其次,在单脉冲电源应用中,因为脉冲电压和电流具有“针尖”作用,能够使微弧氧化膜表面的微孔出现相互重叠的现象,从而能够降低微弧氧化膜粗糙度,使其厚度更加均匀,所以单脉冲电源逐渐取得应用,在占空比逐渐增加的情况下,微弧氧化膜的结合力会明显提高,微弧氧化膜与铝合金的分离面从致密层不断向疏松层转移^[3]。

最后,在双脉冲电源的应用中,叠加负脉冲的交流电源应用成本较低,能够降低疏松层在整体膜层中的厚度,为此铝合金交流微弧氧化技术是当前该项技术的主要发展方向。在具体的实验研究中,通过 $0.3\text{A}/\text{dm}^2$ 电流密度的交流电源,在7050铝合金中得到厚度为 $100\mu\text{m}$ 的微弧氧化膜,疏松层仅仅占据膜层整体5%左右,致密层的占比能够达到80%左右,从而能够全面提升微弧氧化膜硬度。

2.3 基体材料的影响分析

铝合金基体的合金成分对于微弧氧化工艺生产的陶瓷膜性能具有直接影响,在相关实验中,将硬铝、锻铝、纯铝以及铸造铝合金进行微弧氧化处理,发现

不同基体材料所形成的陶瓷氧化膜具有一定差异,其中硬铝的陶瓷氧化膜综合性能最好;在铸造铝合金微弧氧化过程中,基体材料中含有的Mg能够促进微弧氧化,Si则会对微弧氧化产生阻碍,尤其是在高硅铸造铝合金中,随着Si含量增加,合金中的Si相数量会随之而提升,会对微弧氧化工艺效果造成很大影响;如果增加铸造铝合金中的铜含量,则维护氧化膜的厚度、硬度等性能能够得到明显提升。由此可见,基体材料对于微弧氧化工艺具有直接影响,所以在采用微弧氧化对铝合金进行处理时,需要准确分析铝合金基体材料的属性。

3 铝合金微弧氧化膜性能分析

微弧氧化陶瓷膜通常由致密内层和疏松外层构成,致密层是其性能提高的主要工作层,通常由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相构成,从外层到内层 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相逐渐增加, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相逐渐减少, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 是氧化铝的高温稳定相,所以铝合金陶瓷氧化膜的综合性能大幅度提升。

3.1 微弧氧化膜的硬度与耐磨性能分析

铝合金微弧氧化会生成氧化铝陶瓷膜,且膜主要成分为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为刚玉和金刚石成分,所以能够提高铝合金硬度。因为铝合金微弧氧化膜的外层主要为疏松层,内层主要为致密层,不同层的成分和微观结构存在差异,所以会对微弧氧化膜的耐磨性和硬度性能产生直接的影响。在一些研究中发现,导致微弧氧化膜硬度降低的主要原因是因为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相的含量降低;在相关对比试验中,微弧氧化所形成的膜层硬度在距离膜基层面 $10\mu\text{m}$ 处为1800HV,相比于其他铝合金处理工艺而言,硬度和耐磨性能更好。主要是因为微弧氧化膜表层较为疏松,所以初始模量最大,耐磨性能逐渐提高。同时,在相关试验中,采用以磷酸为主的电解液,并向其中加入不同浓度的钨酸钠,当钨酸钠溶液浓度为 7g/L 时,铝合金陶瓷膜质地光滑紧密,耐磨性能得到很大提升。此外,在部分实验研究中发现,2024铝合金的微弧氧化膜在干摩擦和油脂润滑不同条件下,油脂润滑条件下的磨损性能会降低90%以上,磨损量能够降低99.9%,说明微弧氧化在具有油脂的条件下其耐磨性能会得到显著提升。

3.2 微弧氧化膜的弯曲、拉伸以及疲劳性能分析

因为微弧氧化膜的硬度和弹性模量相比于铝合金基体更高,在和铝合金基体冶金结合后,对于铝合金

的拉伸性能影响不够显著。在一些实验研究中,2024铝合金在经过微弧氧化技术处理后,相比于没有经过处理的铝合金基体,其屈服强度、抗拉强度会随着膜厚的增加而降低,但是降低量始终在5%之内;部分实验研究中发现,微弧氧化膜能够有效提升铝合金抗弯曲能力,在跨距设定为50mm的条件下,120 μm 厚度的微弧氧化膜能够使得铝合金的弯曲应力提高50%以上,上层微弧氧化膜在挠度设定为6mm时会发生破裂现象,但是下层微弧氧化膜在挠度超过20mm后虽然会出现裂纹,但是不会直接脱落。

微弧氧化膜对于铝合金疲劳性能的影响是主要研究内容,会受到微弧氧化膜的内应力、厚度以及微观结构等因素影响,通过微弧氧化膜改善铝合金的疲劳性能具有重要意义,但是当前技术发展受到很大阻碍。在部分研究中发现,Al-Mg-Si合金在经过微弧氧化技术处理后,其基础材料和抛光后的平面弯曲疲劳微弧氧化膜厚度为40 μm ,微动疲劳微弧氧化膜厚度为100 μm ,在160Mpa平面弯曲疲劳的循环次数为 2×10^4 、 2×10^5 以及 1.1×10^6 。微动疲劳实验结果表明:微弧氧化膜厚度为40 μm 的铝合金和没有经过处理的铝合金材料具有相似的疲劳极限,微弧氧化膜厚度为100 μm 的铝合金与40 μm 的铝合金相比,疲劳极限有所降低。

3.3 铝合金微弧氧化陶瓷膜的热学性能分析

铝合金在经过微弧氧化工艺处理后,所形成的陶瓷膜具有特定组织结构,从而能够提高铝合金材料耐热性以及耐热冲击性能。根据相关实验数据表明,300 μm 厚度的陶瓷膜在101.325kPa压力下能够承受超过3000 $^{\circ}\text{C}$ 的高温,在10132.5kPa压力的气体介质中能够承受6000 $^{\circ}\text{C}$ 的高温环境下2秒内不产生裂纹,从而能够提升铝合金部件的工作温度,在航空航天等对瞬时温度要求较高的行业中,经过微弧氧化工艺处理后的铝合金能够作为受热零部件使用。

由此可见,将微弧氧化工艺应用于铝合金材料处理中,生成的陶瓷膜能够提高铝合金材料耐热性能,使其在更高的温度环境下保持稳定状态,从而全面提高铝合金材料应用范围,对于铝合金材料是一种良好的性能强化工艺。

3.4 耐腐蚀性分析

耐腐蚀性是铝合金性能参数中的重要指标,铝合金在大部分场景中的应用,都对其耐腐蚀性具有较高要求,所以提高铝合金材料耐腐蚀性是一项重要工作。

有相关研究证明,通过采用微弧氧化工艺,所形成的陶瓷膜能够全面提高铝合金材料表面耐腐蚀性,主要是因为陶瓷膜能够降低铝合金腐蚀速率,对铝合金表面起到良好的保护作用。

在相关实验研究中表明,随着铝合金微弧氧化膜厚度的增加,其自腐蚀电位也会逐渐提高,自腐蚀电流明显降低。在部分对ZL205型铝合金微弧氧化陶瓷膜的耐腐蚀性研究中,试验人员采用中性盐雾进行复试试验,发现如果膜厚度超过30 μm ,陶瓷膜主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 以及 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 以及莫来石组成,此时铝合金膜具有良好的耐腐蚀性,其随着厚度变化的特征不明显;当膜厚度低于30 μm 时,陶瓷膜主要由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 以及普通氧化物组成,耐腐蚀性会随着膜厚度增加而提升;在其他一些试验中,采用3.5%氯化钠溶液,对6061型铝合金微弧氧化陶瓷膜进行的中性盐雾腐蚀试验,经过600小时的试验证明,经过微弧氧化处理后的铝合金腐蚀速率明显降低,耐腐蚀性全面提高,说明微弧氧化工艺能够有效提升铝合金耐腐蚀性。

4 结语

综上所述,本文全面阐述了微弧氧化技术的发展历程以及技术原理,并对影响微弧氧化技术应用的主要因素进行分析,最后对经过微弧氧化技术处理后铝合金的性能变化进行探究,希望能够对相关领域的研究起到一定借鉴和帮助作用,不断提高微弧氧化技术水平。

参考文献:

- [1] 雷欣,林乃明,邹娟娟,等.铝合金微弧氧化的研究进展[J].表面技术,2019,48(12):22-34.
- [2] 沈雁,刘桂香,谢荣.电参数对2A12铝合金微弧氧化膜组织结构的影响[J].现代制造工程,2019,46(12):71-75.
- [3] 李涛,张鹏,卢松涛,等.铝合金表面ZnO/Y₂O₃/Al₂O₃微弧氧化涂层的制备及其热控性能研究[J].表面技术,2020,49(12):18-23,47.