

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.07.017

## 铝合金电镀金鼓包原因分析及解决措施

李大洋\*, 熊俊良

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 铝合金零件镀金层出现鼓包故障, 扫描电镜结果显示鼓包位置有晶间腐蚀形貌, 沿晶腐蚀与表面贯通。镍层在局部位置沿晶裂纹渗入到基体内, 且在沿晶裂纹内存在P元素。说明沿晶腐蚀在镀镍前已经存在, 电镀后晶间腐蚀处被镀层覆盖, 因此在结合力检测过程中, 在晶间腐蚀产生应力的作用下, 该处形成鼓包现象。机械加工和电镀过程中采取一系列防锈措施后, 解决了该故障。

**关键词:** 铝合金; 镀金; 鼓包现象; 晶间腐蚀

**中图分类号:** TQ153.1 **文献标识码:** A

## Analysis and solution measures for the cause of gold bulging in aluminum alloy electroplating

Li Dayang\*, Xiong Junliang

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** The gold plating layer of aluminum alloy parts has bulging fault, and the scanning electron microscopy results showed that the location of bulging has intergranular corrosion morphology, along intergranular corrosion and surface penetration. The nickel layer infiltrates into the matrix along crystal cracks at local locations, and there is P element in the intergranular cracks. This indicates that intergranular corrosion has already existed before electroless nickel plating, and after gold electroplating, the intergranular corrosion area is covered by a coating. Therefore, during the binding force testing process, under the action of stress generated by intergranular corrosion, bulging phenomenon is observed at this location. After taking a series of rust prevention measures during mechanical processing and electroplating, the problem is solved.

**Keywords:** aluminum alloy; gold-plating; bulging phenomenon; intergranular corrosion

前言 2A12 铝合金是一种可热处理强化的硬铝合金, 比强度较高, 具有较好的焊接性能、加工性能、力学性能, 在航空、航天、机械等工业领域应用广泛<sup>[1-5]</sup>。通常采用阳极氧化的方法进行表面处理, 可以满足大部分机械结构件应用场景下的耐蚀性要求<sup>[6]</sup>。某零件为满足特殊的功能需要在其 2A12 铝合金基体表面镀覆金层, 在结合力检验时发现零件

表面出现鼓包故障。常见的镀层鼓包原因是镀层结合力不良所致, 而本次铝合金电镀金鼓包故障原因较为特殊, 是铝合金基体在电镀前发生了晶间腐蚀。国内外对铝合金发生晶间腐蚀的机理以及控制方法进行了大量研究<sup>[7-12]</sup>, 但是铝合金晶间腐蚀对电镀金的影响却少有报道, 本文对铝合金基体晶间腐蚀造成的电镀金鼓包故障进行了研究。

收稿日期: 2023-12-25

修回日期: 2024-02-03

作者简介: 李大洋(1992—), 男, 学士, 工程师, 主要从事金属腐蚀与防护方面的工作, email: lidayang1992@foxmail.com

## 1 铝合金零件表面镀金及鼓包故障分析方法

铝合金零件表面电镀金的工艺流程为,装挂→除油→碱蚀→除垢→1次浸锌→脱锌→2次浸锌→预镀碱性镍→酸性化学镀镍→镀金( $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ )。某批次零件完成镀金后,在 $270^\circ\text{C}$ 条件下烘烤 $5 \text{ min}$ 以检测镀层的结合力,结果发现零件表面有鼓包故障。

本文通过观察鼓包故障宏观形貌、显微形貌、金相形貌并对鼓包位置的铝合金基体进行能谱分析,对分析结果进行研究后推断鼓包故障原因为铝合金零件基体在电镀前发生晶间腐蚀。经过晶间腐蚀试验对研究结果进行了验证。

## 2 鼓包特征

如图1所示,零件表面的鼓包分布位置无明显

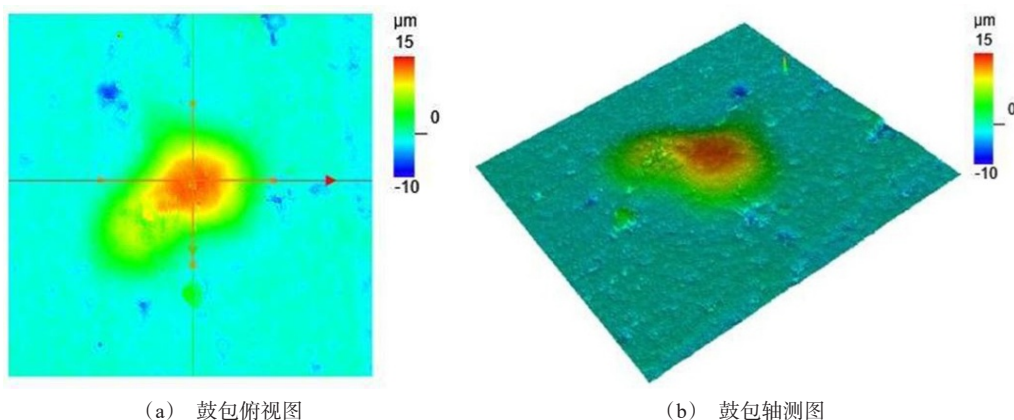
规律。



图1 有鼓包问题的零件

Fig.1 Parts with bulge issue

用激光共聚焦显微镜观察鼓泡形貌(见图2(a)、(b)),鼓包的高度约为 $15 \mu\text{m}$ ,鼓包长度约为 $300 \mu\text{m}$ 。



(a) 鼓包俯视图

(b) 鼓包轴测图

图2 鼓包区域形貌

Fig.2 Macro morphology of the bulge area

## 3 原因分析

将零件表面的镀层去除后观察基体的外观,发现零件基体上在相对应位置也存在一样的鼓包(见图3),因此确定鼓包故障不是镀层结合力不良导致的镀层起泡,而是因为零件铝合金基体上有鼓包。

使用金相显微镜观察鼓包位置截面形貌(见图4),发现鼓包位置下面的铝合金基体有晶间腐蚀形貌,且多数沿晶腐蚀与表面贯通。

进一步对鼓包位置进行扫描电镜观察(见图5),可以看出镍层已在局部位置沿晶渗入到基体内。



图3 零件基体上的鼓包形貌

Fig.3 The bulge morphology on the part substrate

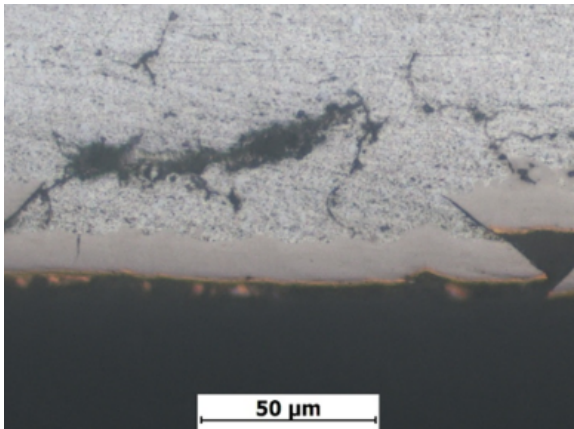


图 4 鼓包处截面金相形貌

Fig.4 Metallographic morphology of the cross-section at the bulge

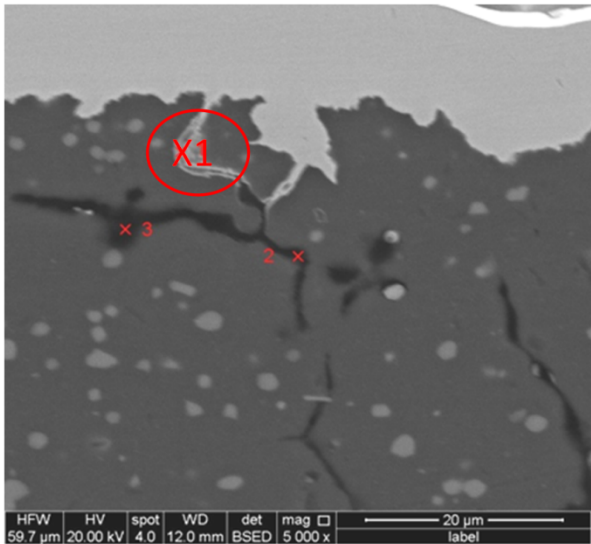


图 5 鼓包处截面扫描电镜图

Fig.5 SEM photo of the cross-section of the bulge

对 X1 裂纹位置进行能谱分析,发现在沿晶裂纹

内存在 P 元素(见表 1),说明沿晶腐蚀形成的裂纹在电镀前已经存在,在化学镀镍时化学镀镍溶液渗入到裂纹内发生了化学镀镍反应。

表 1 X1 处成分分析

Tab.1 Component analysis at X1

元素	含量/wt. %	含量/at. %
C	3.01	8.23
Al	54.14	65.83
P	3.97	4.21
Ni	38.88	21.73

扫描电镜分析还发现镀层与基体结合完好,鼓包位置下面的铝合金基体有裂纹(见图 6)。对铝合金基体鼓包位置下面的裂纹的不同部位进行能谱分析,结果见表 2。从能谱分析结果可以看出裂纹内有异常成分 Na 和 Ca 元素,异常成分是导致铝合金基体发生晶间腐蚀的诱因。

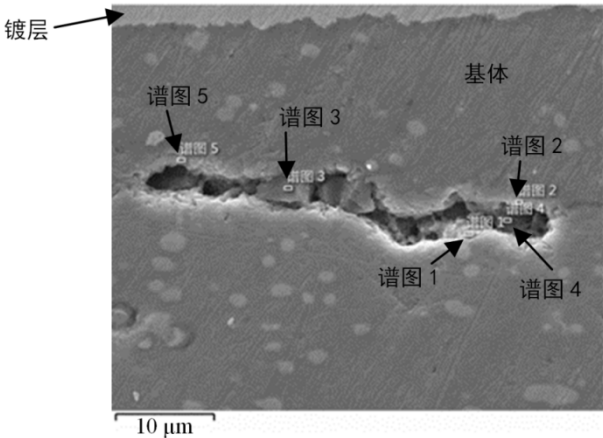


图 6 鼓包位置扫描电镜形貌

Fig.6 Scanning electron microscopy morphology of bulge position

表 2 故障件能谱结果

Tab.2 Energy spectrum results of fault part

谱图	C	O	Na	Mg	Al	Ca	Mn	Ni	Cu	总量
谱图 1	26.75	9.36	—	0.29	61.12	—	0.37	0.61	1.50	100.00
谱图 2	25.30	8.83	0.25	0.21	64.15	0.16	0.45	—	0.66	100.00
谱图 3	93.14	3.48	0.09	—	3.00	—	—	0.28	—	100.00
谱图 4	28.23	6.15	0.34	-	62.58	—	—	2.07	0.64	100.00
谱图 5	16.46	5.98	—	0.26	76.08	—	0.44	—	0.79	100.00

综上所述,扫描电镜金相照片中有晶间腐蚀形貌,且多数沿晶腐蚀与表面贯通。镍层在局部位置沿晶裂纹渗入到基体内,且在沿晶裂纹内存在 P 元素,说明沿晶腐蚀在化学镀镍前已经存在。因此,在

形成化学镀镍层之前存在晶间腐蚀,完成电镀后晶间腐蚀处上覆盖上镀层,在结合力检测过程中,在晶间腐蚀产生应力的作用下该处形成鼓包现象。



## 4 晶间腐蚀试验

参照 GB/T7998—2005 对样品进行晶间腐蚀试验, 试验介质为将 57 g 氯化钠+1000 mL 去离子水+10 mL 过氧化氢, 试验温度为  $35\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 试验时间为 6 h。

从晶间腐蚀试验后截面的抛光态金相照片(见图 7)可以看出, 样品发生明显的局部不均匀的晶间腐蚀, 与故障件晶间腐蚀形貌一致。

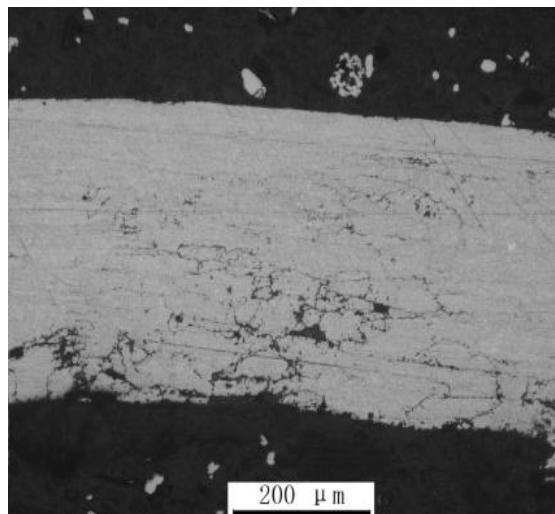


图 7 晶间腐蚀试验金相照片

Fig.7 Metallographic photo of intergranular corrosion test

铝合金样品在氯化钠存在的情况下会发生晶间腐蚀, 晶间腐蚀形貌与故障件腐蚀形貌一致。

## 5 故障原因

零件镀金表面鼓包的原因是铝合金基体在电镀之前发生了晶间腐蚀, 完成电镀后晶间腐蚀处覆盖上镀层, 在结合力检测过程中, 在晶间腐蚀产生张应力的作用下该处形成鼓包现象。

2A12 铝合金有晶间腐蚀倾向<sup>[13-18]</sup>, 2A12 铝板经轧制, 其显微组织发生变化, 平行于铝板表面的晶粒尺寸远大于其垂直方向。在腐蚀介质作用下, 腐蚀沿与铝板表面平行的晶界方向发展, 生成的腐蚀产物  $\text{AlCl}_3$  或者  $\text{Al}(\text{OH})_3$  等体积比铝的体积大。由于体积膨胀必然会沿着晶界产生张应力, 而且该应力的方向总是与铝板表面法向一致<sup>[19]</sup>, 因此随着该应力的逐渐增大, 就会使已经失去与基体之间结合的晶粒向外鼓起, 使合金表面鼓包。

## 6 解决措施

当空气相对湿度超过 60% 时就可以引起水蒸气的凝聚, 附着在铝合金表面的灰尘和铝合金零件的狭缝都能形成毛细管而凝聚成液膜, 成为电化学腐蚀所需的电解液膜<sup>[20]</sup>。在此情况下, 如果铝合金表面存在盐或者卤素离子等腐蚀性介质时, 金属表面将发生电化学反应形成晶间腐蚀。为防止铝合金零件发生晶间腐蚀, 应该保持零件表面洁净, 不与腐蚀性介质接触并且使零件处于干燥环境中。此外, 及时在零件表面镀上镀层可对零件起防锈作用。

### 6.1 机械加工控制措施

(1) 机械加工工序完成工序从机床取下零件后 5 min 内用去离子水清洗, 分别在 2 个容器内清洗至少 2 遍, 清洗所用的水变色时要立即更换, 要求每天最少更换 1 次。清洗干净后用压缩空气吹干零件。

(2) 零件吹干后应放入干燥柜内存储, 干燥柜内湿度应  $\leq 20\%$ 。

(3) 机加厂小批量、快节奏完成机械加工后, 将零件转入电镀厂, 防止零件长时间放置产生晶间腐蚀。

### 6.2 电镀控制措施

(1) 电镀厂应将收到的产品立即置于干燥柜内, 干燥柜内湿度应  $\leq 20\%$ 。

(2) 电镀工序在来件验收时, 要远离电镀加工现场和有腐蚀性气氛的场所, 应在洁净无腐蚀性气氛的场所内进行。

(3) 完成验收的产品应立即放会干燥柜内, 干燥柜内湿度应  $\leq 20\%$ 。

(4) 零件装挂到电镀挂具后, 应在 4 h 之内进行电镀。

## 7 结语

本次鼓包故障的原因是零件在电镀之前铝合金基体已经发生了晶间腐蚀, 完成电镀后晶间腐蚀处覆盖上镀层。在结合力检测过程中, 在晶间腐蚀产生的张应力释放的作用下该处形成鼓包现象。落实措施后解决了铝合金镀金表面鼓包的问题。

## 参考文献

- [1] 曹玮, 纪凯志, 胡志, 等. 2A12 航空铝合金在海洋环境中腐蚀行为仿真研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2020,

- 40(11): 1218-1223.
- [2] 秦富军. Al-Mg-Si-Cu 系铝合金晶间腐蚀研究进展[J]. 铝加工, 2019, 5(250): 12-16.
- [3] 吴学昆, 罗兵辉, 柏振海, 等. Cu/Mg 含量对 2024 铝合金耐蚀性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2022, 43(6): 1-7.
- [4] 王冠, 吴妍, 寇琳媛, 等. 腐蚀对 2024 铝合金板材力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(9): 2580-2594.
- [5] 吕晓丹, 刘斌, 刘岩, 等. 铝合金在海洋环境中的腐蚀行为研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(6): 477-486.
- [6] 王业东. 2A12 铝合金板材抗腐蚀行为的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021.
- [7] Feng L, Pab Q L, Wei L L, et al. Through-thickness inhomogeneity of localized corrosion in 7050-T7451 Al alloy thick plate[J]. Journal of Central South University of Technology, 2015, 22: 2423-2434.
- [8] QQin J, Li Z, Ma M Y, et al. Diversity of intergranular corrosion and stress corrosion cracking for 5083 Al alloy with different grain sizes [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32: 765-777.
- [9] 贺春林, 吕帅, 白莹莹, 等. 淬火方式对 2024 Al 合金腐蚀行为的影响[J]. 沈阳大学学报, 2016, 28(2): 87-91.
- [10] 李广钦, 王继成, 翟德斌. 淬火工艺参数对 2024 合金晶间腐蚀的影响[J]. 有色金属加工, 2023, 52(3): 29-32.
- [11] 史伟宁. 电力运输用 Al-Cu-Mg 合金耐蚀性能调控及机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [12] 尹作升, 裴和中, 张国亮, 等. 热处理制度对 2024 铝合金晶间腐蚀和抗拉强度的影响[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(2): 107.
- [13] 苑笑博. 2A12 铝合金海水腐蚀的尺寸与形状效应研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- [14] 吴妍. 2024 铝合金耐蚀性能与力学性能研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [15] 牟春. Al-Cu-Mg 系高强铝合金的晶间腐蚀[J]. 铝加工, 2017, 6(239): 22-24.
- [16] 张童, 吕由, 张欣欣. 基于晶格储存能的航空铝合金腐蚀行为研究[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(5): 312-318.
- [17] 孙丽, 牛凤姣, 伍翠兰, 等. 时效析出行为的改变对 AA2024 铝合金应力腐蚀行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(9): 2944-2950.
- [18] 欧阳祚琼, 罗兵辉, 邓攀, 等. 终轧温度对 2024 铝合金晶间腐蚀和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(11): 1-7.
- [19] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008, 141.
- [20] 纪凯志. 海洋大气环境下 2A12 铝合金电化学腐蚀建模与仿真[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.