

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202410011



# 太阳能电池板支架 6005 铝合金 腐蚀失效分析

陈首虹<sup>1</sup>, 苏治钦<sup>2</sup>, 范袁涛<sup>2,3</sup>, 黄身桂<sup>2,3</sup>, 姜峰<sup>1,3</sup>, 黄进益<sup>4</sup>

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;

3. 南安华大石材产业技术研究院, 福建 南安 362261;

4. 固美金属股份有限公司, 福建 南安 362303)

**摘要:** 为研究太阳能电池板支撑部件局部腐蚀失效的原因,对 6005 铝合金支架腐蚀位置的宏微观形貌、基体材料和元素组成及质量分数进行能量色散光谱分析,并结合材料生产工艺的过程及运行环境,分析腐蚀产生原因。结果表明:加工过程中的金属挤压成型加工液未清洗干净,造成成型加工液中氯化物的残留,是导致太阳能电池板支架在使用过程腐蚀失效的重要原因。

**关键词:** 6005 铝合金; 太阳能电池板支架; 金属挤压成型加工液; 腐蚀

中图分类号: TK 51

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)02-0142-05

## Corrosion Failure Analysis of 6005 Aluminium Alloy for Solar Panel Mounting Brackets

CHEN Shouhong<sup>1</sup>, SU Zhiqin<sup>2</sup>, FAN Yuantao<sup>2,3</sup>,  
HUANG Shengui<sup>2,3</sup>, JIANG Feng<sup>1,3</sup>, HUANG Jinyi<sup>4</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

3. Nan'an HQU Institute of Stone Industry Innovations Technology, Nan'an 362261, China;

4. Goomax Metal Limited Company, Nan'an 362303, China)

**Abstract:** To study the causes of localized corrosion failure in solar panel support components, the macro- and micro-morphologies, matrix material properties, elemental compositions and mass fractions at the corrosion sites of a 6005 aluminium alloy brackets were analyzed using energy dispersive spectroscopy. In addition, the corrosion mechanisms were evaluated considering the products' manufacturing processes and operating environment. The results indicate that the inadequate cleaning of metal extrusion moulding processing fluid lead to chloride residue in the moulding process fluid, which was an important cause of corrosion and failure of the solar panel bracket during service.

**Keywords:** 6005 aluminium alloy; solar panel bracket; metal extrusion moulding processing fluid; corrosion

近几年,随着“双碳”战略的不断推进,光伏行业作为绿色能源的重要一部分,在西部地区有着十分

收稿日期: 2024-10-24

通信作者: 姜峰(1981—),男,教授,博士,主要从事精密超精密加工技术的研究。E-mail:jiangfeng@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275428)

广泛的应用<sup>[1]</sup>。但是西北部地区昼夜温差大、西南部地区酸雨现象严重,都对光伏设备的使用寿命造成显著的影响,其中,受到影响最大的是光伏支架的使用寿命。光伏支架作为太阳能电池板的支撑部件,其可靠性也关系着供电系统的稳定性,若铝合金表面出现腐蚀情况却未及时发现,造成腐蚀面积的扩大,则会导致铝合金材料强度降低<sup>[2]</sup>、支架稳定性变弱,进而影响光伏电站的稳定运行,产生严重的安全隐患<sup>[3]</sup>。6005 铝合金由于其密度低、耐腐蚀性强、力学性能优异、可加工性能好等显著优势,在光伏行业中常被用于太阳能电池板边框和支架的制造<sup>[4]</sup>。因此,对 6005 铝合金腐蚀失效案例进行相应的检测及分析并提出对应的解决措施,对于光伏电站的稳定运行,减小安全隐患,有着重要意义。

基于此,本文对 6005 铝合金支架腐蚀位置的宏微观形貌、基体材料和元素组成及质量分数进行能量色散光谱(EDS)分析,并结合材料生产工艺的过程及运行环境,分析腐蚀产生原因。

## 1 检验结果与分析

### 1.1 宏观检测

某厂家在检查安装检修太阳能电池板支架时,发现在太阳能电池板边框及安装支架上,固定部位的接口边缘处有部分腐蚀情况(图 1)。为避免安全隐患,对该固定部分受腐蚀部件进行拆解更换。受腐蚀的太阳能电池板支架部件使用 6005 铝合金挤压成型,其铝合金腐蚀宏观形貌,如图 2 所示。由图 2 可以看出,铝合金支架无明显形变,表面无涂层及喷漆处理,在侧表面位置有较多明显的腐蚀痕迹。通过对部件腐蚀区域产生的位置进行观察,可以看到腐蚀区域主要集中在材料侧面、固定区域上部及边角位置,由多个灰黑色的斑点连接而形成。

使用 VHX-1000 型电子显微镜对腐蚀部件进行检查,腐蚀区域放大宏观形貌,如图 3 所示。由图 3 可知:在铝合金表面,无明显凹坑及裂纹,腐蚀产物为灰黑色,呈圆形、片状覆盖于铝合金支架基体之上。



图 1 典型的铝合金光伏支架失效情况  
Fig. 1 Typical failure of aluminum alloy brackets

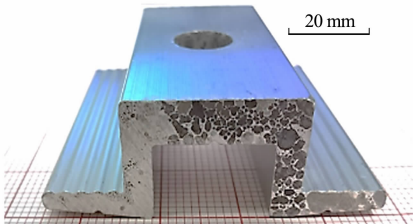


图 2 铝合金腐蚀宏观形貌  
Fig. 2 Macroscopic morphology of corrosion of aluminum alloy

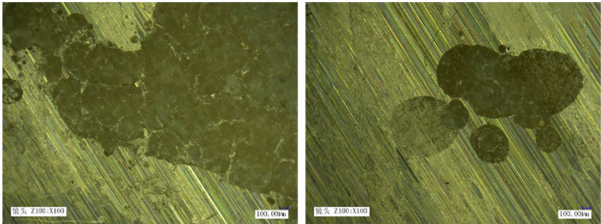


图 3 腐蚀区域放大宏观形貌  
Fig. 3 Enlarged macroscopic morphology of corroded area

### 1.2 基材分析

对未腐蚀的铝合金工件截面进行元素成分检测,检测结果如表 1 所示。表 1 中: $w$  为质量分数。在基材成分中可以看出,该基材中主要含有 Si、Mg、Cr、Fe、Mn 等元素。根据铝合金的 GB/T 3190—2020 标准要求<sup>[5]</sup>,该铝合金太阳能支架紧固件的化学成分,符合牌照为 6005 铝合金的技术要求。

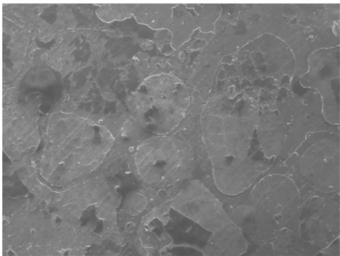
表 1 铝合金工件截面元素成分检测结果

基材	$w/\%$								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
铝合金挤压成型支架	0.85	0.05	0.02	0.03	0.56	0.08	0.03	0.02	余量
6005 技术要求	0.60~0.90	≤0.35	≤0.10	≤0.10	0.40~0.60	≤0.10	≤0.10	≤0.10	余量

### 1.3 腐蚀产物分析

使 JSM-IT500 型用扫描电镜对该样品进行检测,铝合金支撑架腐蚀区域微观形貌,如图 4 所示。由图 4 可知:在腐蚀区域中,腐蚀产物呈现出堆叠的状态,部分腐蚀区域呈现出类似“蜂窝状”的形貌,并在腐蚀面积较大的区域,可以观察到有龟裂的痕迹。

对腐蚀区域进行能量色散光谱检测,元素能谱分析结果如图 5 所示。图 5 中: $I$  为信号强度; $E$  为能量。由图 5 可知:相较于未腐蚀区域,腐蚀区域中 O 元素质量分数达到 41.70%,而 Al 元素质量分数则降低至 42.18%,并且在检测中还发现少量的 Na、S、Cl 等元素。这可能是由于在日常使用中,铝合金支架表面接触了含有 S、Cl 的物质,导致铝合金表面长期处于酸性环境中,表面致密的氧化膜失效,加速了铝合金支架的腐蚀速度。



(a) 扫描电镜图

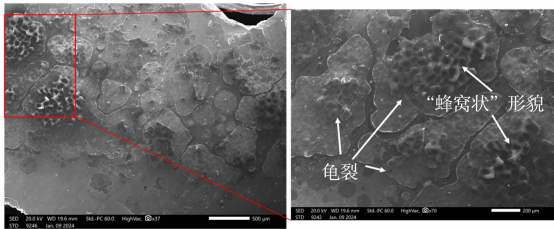
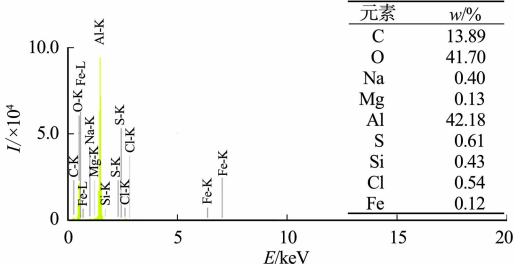


图 4 铝合金支架腐蚀区域微观形貌

Fig. 4 Microscopic morphology of corrosion area in aluminum alloy bracket

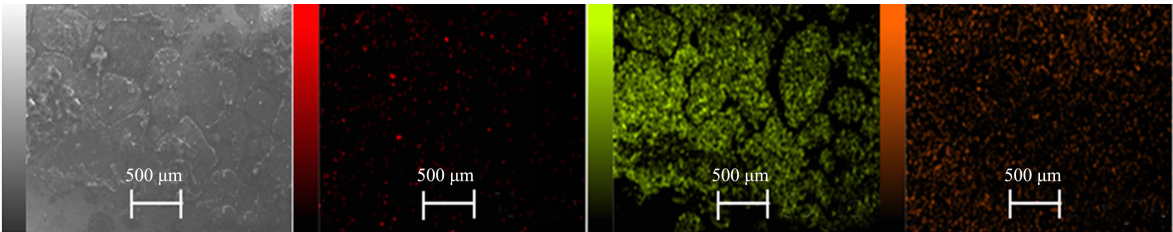


(b) 元素能谱分析结果

图 5 腐蚀区域元素能谱分析

Fig. 5 Energy spectrum analysis of elements in corroded areas

为了更好地判断腐蚀区域中不同元素的分布情况,对腐蚀区域的元素分布进行分析,结果如图 6 所示。对比图 6(c)、(f)可知:O、Al 两种元素呈现出“互补式”的分布,在氧化物与铝合金基体之间,有着较为明显的“分界线”,在腐蚀区域“外围”Al 元素分布较多,而在腐蚀的“中心”区域,则检测出大量的 O 元素。这可能是由于在腐蚀过程中,铝合金工件表面是由“点”到“面”逐步氧化扩散,最终氧化物物质会将

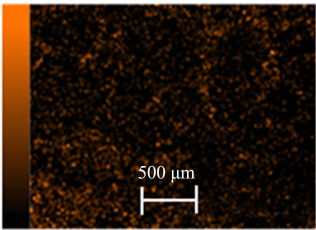


(a) 腐蚀工件表面形貌

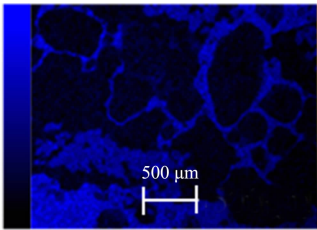
(b) C 元素

(c) O 元素

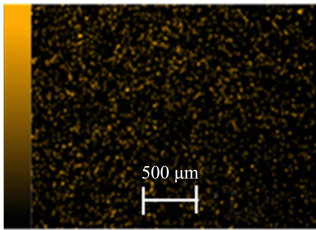
(d) Na 元素



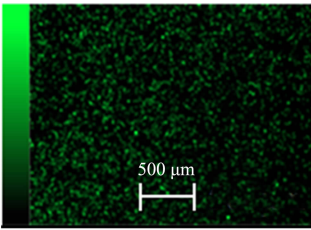
(e) Mg 元素



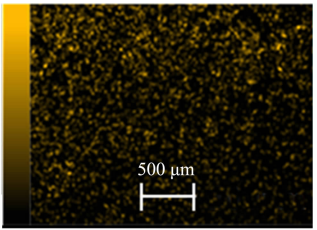
(f) Al 元素



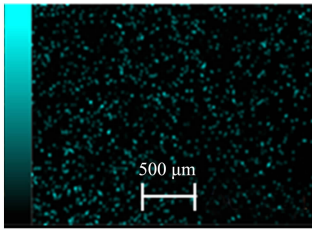
(g) S 元素



(h) Si 元素



(i) Cl 元素



(j) Fe 元素

图 6 腐蚀表面元素分析

Fig. 6 Elemental analysis of corrosion surface



铝合金基体完全覆盖。由图 6(d)、(g)、(i) 可知：Na、S、Cl 三种元素在铝合金表面有着较广泛的分布。从分布情况可以看出，在铝合金表面，Na 元素大多存在于未氧化的区域，已发生氧化区域分布较少；而 S、Cl 两种元素则几乎布满检测区域。这也进一步说明，在腐蚀发生过程中，含有 S、Cl 的物质广泛粘附于铝合金表面，使得铝合金表面长期处于酸性环境中，这也是铝合金支架产生腐蚀最主要的原因。

利用红外光谱法对切削液进行检测，发现其主要成分为矿油、丙烯二甘醇醚、硼酸一乙醇胺、三乙醇胺、油酸、水、聚氧乙烯醚、石油磺酸钠、氯化聚烯烃，所含金属及卤族元素为 Na、S、Cl。根据腐蚀区域的元素成分的分布，并结合铝合金挤压成型工艺进行分析。该腐蚀物可能是在生产过程中，金属挤压成型加工液未清洗干净残留所导致。由于有机氯化物的存在，当太阳能电池板在日常使用中处于降水或空气潮湿的环境时，将导致残留在铝合金表面的氯离子与铝合金基材表面发生腐蚀，如图 7 所示。

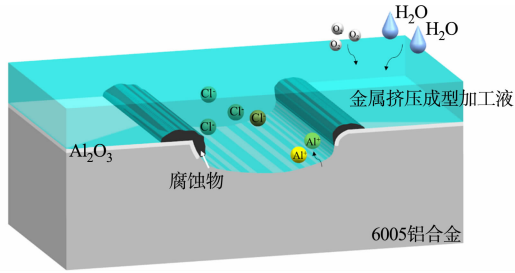


图 7 金属挤压成型加工液残留导致的腐蚀  
Fig. 7 Corrosion induced by residual metal extrusion moulding processing fluid

在铝合金支架使用过程中，如有加工液残留在工件表面，其与空气中的  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$  在铝合金支架表面形成了一层电解质水膜，其中充满了  $\text{Cl}^-$  等自由离子，从而造成电化学腐蚀。如果有酸雨的加入，电解质水膜内还会加入  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{F}^-$  等自由离子。电解质水膜是阴极，而铝合金材料是阳极，在电化学作用下，阳极发生溶解，而作为阴极的电解质水膜层会不断补充，造成铝合金阳极的不断溶解。其反应式为



## 2 腐蚀及失效成因分析

综合对铝合金支架及紧固件腐蚀区域成分分析，该材料发生腐蚀失效是由于在铝合金挤压成型过程中，使用含  $\text{Cl}^-$  的挤压成型加工液，并且在加工后的清洗中未将挤压成型液清洗干净，导致氯化物的残留，加剧了材料表面发生氧化腐蚀，产生含铝氧化物，导致材料力学性能下降，进而造成材料在使用中发生腐蚀失效。

1) 环境方面，太阳能电池板安装位置多位于户外，安装环境变化大，条件较为恶劣。发生腐蚀的部位为铝合金支架的外表面，当外界降水时，外表面与环境接触面积大，加上含氯化物挤压成型液的残留，使其表面处于极端 pH 值环境中，导致氯离子与铝合金表面的基材发生腐蚀<sup>[6-7]</sup>。同时，铝合金内部及表面含有 S、Na、Mg 等元素，容易在铝合金支架上形成电偶腐蚀，加速铝合金支架的腐蚀，严重时可能导致支架断裂失效<sup>[8-9]</sup>。

2) 工艺方面，金属挤压成型加工液的选用也是铝合金腐蚀的重要因素<sup>[10-11]</sup>。在金属挤压成型加工液中，含有大量的氯离子，会对铝合金零件的加工产生较高的腐蚀作用。若金属挤压成型加工液长时间不更换，则容易发生加工液的劣化，造成微生物剧增，进而导致电化学腐蚀速率升高<sup>[12]</sup>，最终使得铝合金支架在加工过程后，更容易发生腐蚀失效。

3) 受力方面，太阳能电池板支架常安装于屋面或地处宽阔的区域，尤其在屋面太阳能电池板应用时，风载荷对于其受力有着较大的影响<sup>[13-14]</sup>。太阳能电池板支架作为关键的支撑部件，在受到风吹动时，会受到吸力作用产生振动，加剧铝合金支架的晃动，造成腐蚀区域断裂裂纹的加剧，进而造成支架的断裂失效。

## 3 结论

对 6005 铝合金支架腐蚀位置的宏微观形貌、基体材料和元素组成及质量分数进行 EDS 分析，并结

合材料生产工艺的过程及运行环境,得出导致太阳能电池板支架在使用过程中腐蚀失效的重要原因有以下 3 点。

1) 金属挤压成型加工液的残留。由于加工液在表面的残留,使氯化物附着于铝合金支架表面,在使用环境中产生极端 pH 值环境,导致氧化膜遭到破坏,进而造成铝合金支架材料力学性能下降。

2) 金属挤压成型加工液的长时间反复使用。由于加工液的反复使用,使加工液中微生物增加,从而导致电化学腐蚀,进而加快材料腐蚀的速率。

3) 自然条件较为恶劣。在光伏太阳能支架使用过程中,由于太阳能电池板安装大多位于偏远地区,自然环境较为恶劣,加剧了材料破坏的速度。

综合以上分析结论,提出以下保护建议:在生产加工过程中,使用含氯化物较少的挤压成型加工液;监测清洗液中有有机氯成分的残留含量,当超过阈值时更换清洗液。在安装使用时,增加对铝合金支架材料表面的防腐蚀措施,如增加金属镀层、使用涂漆隔绝水汽、利用阳极氧化等材料保护技术,以延长铝合金支架的使用年限。

参考文献:

[1] 朱吉庆,宋雨昂. 太阳能光伏发电技术发展现状与前景[J]. 对外经贸,2024(1):31-34. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-9560. 2007. 10. 003.

[2] 黄浩东,李志鹏,蔡熙楠,等. 腐蚀条件对 7050 航空铝合金断口形貌及失效机理的影响[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2024,38(2):30-38. DOI:10. 3969/j. issn. 2096-8566. 2024. 02. 004.

[3] HARSIMRAN S,KUMAR S,RAKESH K. Overview of corrosion and its control: A critical review[J] Proceedings on Engineering Sciences,2021,3(1):13-24. DOI:10. 24874/PES03. 01. 002.

[4] 丁发俊. 铝合金在光伏支架上的应用[J]. 轻合金加工技术,2019,47(10):7-9. DOI:10. 13979/j. 1007-7235. 2019. 10. 002.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 变形铝及铝合金化学成分: GB/T 3190—2020[S]. 北京: 中国标准出版社,2021.

[6] GRILLI R,BAKER M A,CASTLE J E,*et al.* Localized corrosion of a 2219 aluminium alloy exposed to a 3. 5% NaCl solution[J] Corrosion Science,2010,52(9):2855-2866. DOI:10. 1016/j. corsci. 2010. 04. 035.

[7] WANG Liwei,LIANG Jianming,LI Han,*et al.* Quantitative study of the corrosion evolution and stress corrosion cracking of high strength aluminum alloys in solution and thin electrolyte layer containing Cl<sup>-</sup> [J] Corrosion Science,2021,178:109076. DOI:10. 1016/j. corsci. 2020. 109076.

[8] 陈鑫,田文明,李松梅,等. 氯离子和温度对铝合金在冷却液中腐蚀的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(10):2243-2249. DOI:10. 13700/j. bh. 1001-5965. 2015. 0627.

[9] 张宇鹏,王海斗,董丽虹,等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳失效与寿命预测研究进展[J]. 中国有色金属学报,2024,34(6):1893-1913. DOI:10. 11817/j. ysb. 1004. 0609. 2023-44548.

[10] 王建录,陈曦,曹荣根,等. 切削液腐蚀金属工件表面的机理探讨[J]. 现代制造工程,2012(6):6-8. DOI:10. 16731/j. cnki. 1671-3133. 2012. 06. 009.

[11] 袁世华,王宇,徐强,等. 机加工过程中切削液对航空铝合金零件的腐蚀机理研究[J]. 制造技术与机床,2024(4):100-106. DOI:10. 19287/j. mtmt. 1005-2402. 2024. 04. 016.

[12] 彭陈元,周瑞红,程浩,等. 劣化切削液对铝合金表面腐蚀的行为研究[J]. 工具技术,2024,58(7):24-30. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-7008. 2024. 07. 003.

[13] KOPP G A,FARQUHAR S,MORRISON M J. Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays[J] Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2012,111:40-52. DOI:10. 1016/j. jweia. 2012. 08. 004.

[14] 徐悦. 单层金属屋面-铝合金太阳能支架系统受力性能研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2019.

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 吴跃勤)