

输电铁塔用双导线铝设备线夹断裂失效分析

丁文彬¹ 方 文² 张朝磊¹ 葛 艺¹
(1.北京科技大学材料科学与工程学院;2.大唐锅炉压力容器检验中心有限公司)

摘 要 通过化学成分光谱检测分析、显微组织观察、断口分析、力学性能测试等手段,对输电铁塔用设备线夹断裂失效原因进行分析。结果表明,ZL102 铝合金变质处理效果不明显,金相显微组织主要为 α -Al 基体上不均匀分布着粗大针片状共晶 Si 相。合金受力时在针片状共晶 Si 的棱角、尖端等位置会造成应力集中,为裂纹的萌生与扩展提供条件,使其抗拉强度和伸长率仅为要求值的 67.6%、36.0%。同时,材料中存在的较多孔洞、二次裂纹和铸造缩孔也加剧了设备线夹提前断裂失效。

关键词 SSY 型设备线夹;ZL102 铝合金;显微组织;力学性能;失效分析

中图分类号 TG146.21;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Failure Analysis of Double Conductor Aluminum Equipment Wire Clamp for Transmission Tower

Ding Wenbin¹, Fang Wen², Zhang Chaolei¹, Ge Yi¹
(1.School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing;
2.Datang Boiler Pressure Vessel Inspection Center Co., Ltd.)

Abstract: By means of chemical composition spectrum detection and analysis, microstructure observation, fracture analysis, mechanical property testing and other experimental method, the failure of equipment wire clamp for transmission tower was analyzed. The results indicate that the modification effect of ZL102 aluminum alloy for fracture equipment wire clamp is not obvious, and microstructure of the alloy is characterized by coarse needle-like eutectic Si phase, which is unevenly distributed in the α -Al matrix. Stress concentration occurs at the corners and tips of needle-like eutectic Si under stress, providing facility for crack initiation and propagation. The tensile strength and elongation after fracture are reduced to 67.6% and 36.0% of the required values. Meanwhile, there exist major holes, secondary cracks and shrinkages, which also aggravate premature fracture failure of equipment wire clamp.

Key Words: SSY Equipment Wire Clamp, ZL102 Aluminum Alloy, Microstructure, Mechanical Properties, Failure Analysis

收稿日期:2022-06-20;修改稿收到日期:2022-07-27
第一作者简介:丁文彬,男,1997 年出生,硕士研究生,北京(100083),E-mail: tomting1022@163.com
通信作者:张朝磊,男,1984 年出生,教授,北京(100083),E-mail: zhangchaolei@ustb.edu.cn
引用格式:丁文彬,方文,张朝磊,等. 输电铁塔用双导线铝设备线夹断裂失效分析[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(3):359-362.
DING W B, FANG W, ZHANG C L, et al. Failure analysis of double conductor aluminum equipment wire clamp for transmission tower[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3):359-362.

[21] RANI R D, SASIDHAR P. Sorption of cesium on clay colloids: Kinetic and thermodynamic studies[J]. Aquatic Geochemistry, 2012, 18(4): 281-296.

[22] DONG C, WANG Q, QIANG J B, et al. From clusters to phase diagrams: Composition rules of quasicrystals and bulk metallic glasses[J]. Journal of Physics, 2007, D40(15): R273.

[23] TONG X, WANG G, STACHURSKI Z H, et al. Structural evolution and strength change of a metallic glass at different temperatures[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-12.

[24] CHEN J, ZHU L. Heterogeneous UV-Fenton catalytic degradation of dyestuff in water with hydroxyl-Fe pillared bentonite[J]. Catalysis Today, 2007, 126(3-4): 463-470.

[25] LIN H L, ZHANG W X. Nanoscale Pd/Fe bimetallic particles: Catalytic effects of palladium on hydrodechlorination[J]. Applied Catalysis, 2007, B77(1-2): 110-116.

[26] LI X, ELLIOTT D W, ZHANG W. Zero-valent iron nanoparticles for abatement of environmental pollutants: materials and engineering aspects[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2006, 31(4): 111-122.

(编辑:刘晨辉)

随着铁路、发电站、配电站等电网系统快速发展,设备线夹的使用、服役要求越来越高^[1]。设备线夹主要用于连接母线引下线与电气设备的出线端子连接以及电气设备之间连接,由电气设备连接部分和紧固导线部分组成,前者为端子板(接线板)结构,后者为管形结构^[2-4]。目前使用较为广泛的铝设备线夹一般采用焊接端子板或整体铸造。在实际生产中设备线夹无论采用何种制造工艺,端子板与管形结构之间的连接位置始终是最薄弱的环节,大部分铝设备线夹在服役过程中提前失效都是在连接位置附近发生断裂^[5-6]。设备线夹断裂会严重影响电网系统平稳运行,甚至导致大面积停电事故^[7]。本研究采用光谱检测、显微组织观察、力学性能检测等手段分析双导线铝设备线夹(SSY 型)断裂原因,对改善设备线夹生产工艺、延长其服役寿命、增强电网系统安全稳定性提供参考。

1 失效试样

某电力公司输电铁塔双导线铝设备线夹提前发生断裂失效,其端子板与管形结构采用焊接方式连接,断裂位置在第一排贯穿孔根部,见图 1。设备线夹型号为 SSY-1400/400,双导线间距为 400 mm,端子板尺寸为 200 mm×200 mm,材质为 ZL102 铝合金,属于 Al-Si 二元合金,含有 10%~13% 的 Si,位于共晶点附近,其显微组织由 α-Al 固溶体、初生 Si 相、共晶 Si 相与富 Fe 相组成^[8]。ZL102 合金具有良好的铸造工艺性能,在熔融状态下吸气倾向大,铸件容易形成针孔,浇注前需要变质处理以改善合金的力学性能^[9]。

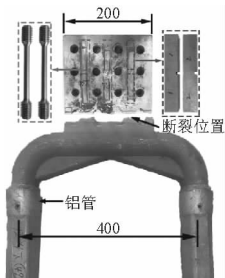


图 1 失效双导线铝设备线夹

Fig.1 Products of failed double wire aluminum equipment clamp

2 试验方法

采用 OES 8000S 直读光谱仪对断裂设备线夹端子板的化学成分进行检测。在端子板断口位置取 10 mm×10 mm×10 mm 的金相试样、硬度试样,经过研磨、抛光后使用凯勒试剂侵蚀后,在蔡司 Axio Scope. A1 光学显微镜下观察显微组织,利用 XHB-62.5T 型自动转塔布氏硬度计对试样进行硬度测试。采用 Mini

Flex600 X 射线衍射仪(铜靶材,扫描速度 3°/min)对 ZL102 合金中物相进行分析。使用超声波设备清洗断口表面灰尘、油污等,并将其置于 ZEISS Gemini 500 扫描电镜下观察并对不同位置进行 EDS 分析。从端子板贯穿孔之间切割两个拉伸试样(标距尺寸为 φ10 mm×50 mm)于 WDW200D 万能试验机上进行拉伸试验,测定试样的应力-应变曲线;在 SANS-ZBC2452-B 型仪表冲击机上进行冲击试验,采用尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm 的 U2 试样;拉伸、冲击试样尺寸要求参照 GB/T 228.1-2010 和 GB/T 229-2007,拉伸、冲击试样取样位置见图 1。

3 试验结果与分析

3.1 端子板化学成分

ZL102 合金成分执行标准依据 GB/T 3190-2008。端子板的实测化学成分与 ZL102 的技术要求见表 1。对比可见,除了 Fe 含量超过标准值外,其他元素均符合标准。

表 1 ZL102 铝合金端子板材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of ZL102 terminal plate

元素	w _B							%
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	
实测值	11.9	0.156	0.038	0.006	0.008	0.025	0.014	余量
技术要求	10.0~13.0	0~0.1	≤0.30	≤0.50	≤0.10	≤0.10	≤0.20	余量

3.2 断口形貌分析

3.2.1 宏观形貌

双导线铝设备线夹断口宏观形貌见图 2。可以看出,整个断口较为平坦呈明显直线型,无起伏平台,呈亮灰色结晶状,断裂面上有较多孔洞,部分位置出现黑斑,无明显塑性变形,表现为直接脆断。基体断裂时,孔洞、缩孔等铸造缺陷的存在为二次裂纹源萌生及其快速扩展提供通道,大幅增加了材料提前断裂失效的风险性^[5,10]。

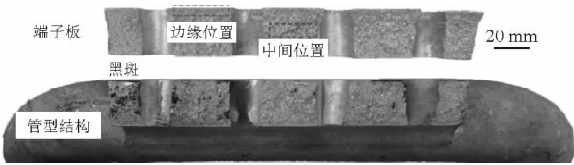


图 2 设备线夹断口宏观形貌

Fig.2 Macro morphologies of equipment wire fracture

3.2.2 微观形貌

端子板断口边部和中间位置的微观形貌见图 3 和图 4。由图 3 可以看到,断口边缘处存在较多的孔洞(尺寸约 500 μm),少量深度较浅的韧窝,同时还可以观

观察到较多的二次裂纹和缩孔。由图 4 可以看出,断口中间位置存在大量平坦的“类解理”小台阶,河流状花样短小且弯曲、支流少,周围分布较多的撕裂棱。裂纹由裂源向四周延伸,并不连续,在局部位置铺开。可以推断其为准解理断裂模式^[10]。

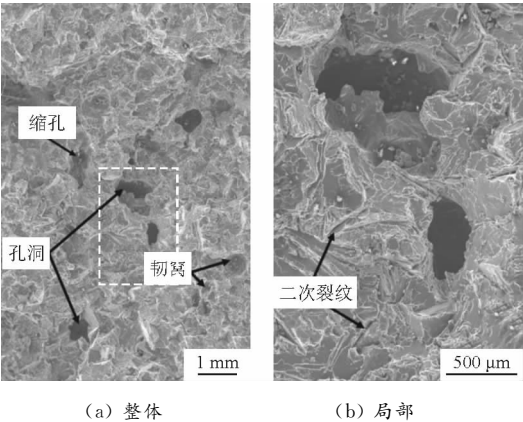


图 3 断口边缘处微观形貌

Fig.3 Micro morphologies of ZL102 alloy at fracture edge

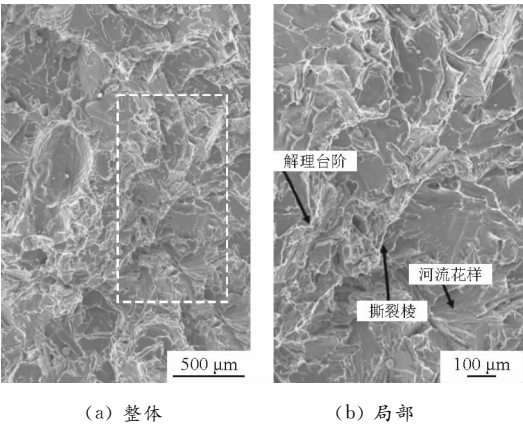


图 4 断口中间位置处微观形貌

Fig.4 Micro morphologies of ZL102 alloy at the center of fracture

在扫描电镜下观察黑斑以探究其成分及形成原因见图 5。扫描电镜下该位置呈白亮色,附着在基体上,附近组织呈熔融状态。对基体 1 号位置与白亮色附着

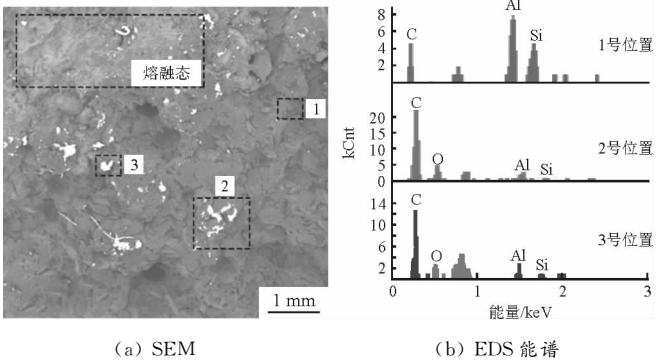


图 5 黑斑位置处 SEM 图和 EDS 分析

Fig.5 SEM images and EDS spectrum of black spot location

物 2、3 号位置处进行能谱分析,见图 5b,可见基体成分主要为 C、Al、Si 元素,白色附着物主要为 C、Al、Si、O。因此,断口上黑斑为设备线夹断裂瞬时电流过大产生电弧,释放热量将铝金融化而烧伤产生的氧化物。

3.3 金相组织分析

铝合金经变质处理后,共晶 Si 由粗大针片状变为细小均匀分布的球粒状或圆棒状,有利于获得良好的力学性能。失效设备线夹中不良金相显微组织是由于 ZL102 铝合金在熔炼过程中未进行变质处理或变质处理效果不明显所导致。

X 射线衍射物相分析结果见图 6,可见失效设备线夹断口处存在 Si 相、 α -Al 固溶体和富 Fe 相 $Al_{17}(Fe_{3.2}Mn_{0.8})Si_2$ 。断口处金相组织形貌见图 7,白色组织为 α -Al 固溶体,黑色针片状组织为共晶 Si 相^[7];少量块状组织为初生 Si 相^[5]以及亮灰色细针状富 Fe 相 $Al_{17}(Fe_{3.2}Mn_{0.8})Si_2$ ^[11]。合金中的共晶 Si 相、初生 Si 相、富 Fe 相都是强化相,具有“硬而脆”的性质,与基体铝差异较大。未变质的共晶 Si 组织以粗大的针片状不均匀地分布在铝基体上,在受力时其棱角、尖端等位置会严重割裂基体,引起应力集中,破坏基体连续性,为裂纹的产生与扩展提供条件。“硬质”强化相会使得材料脆性增加,塑性与抗拉强度大幅下降,综合力学性能恶化。

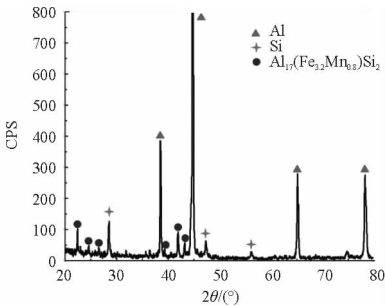


图 6 ZL102 铝合金的 XRD 图谱
Fig.6 X-ray patterns of ZL102 alloy

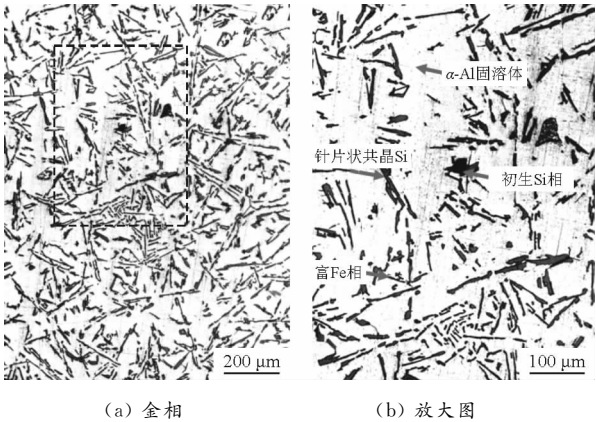


图 7 端子板断口处金相组织

Fig.7 Metallographic structure at the fracture of terminal board

3.4 室温力学性能

端子板冲击试样经试验后实物和宏观形貌见图 8a。可以看出,断口整齐平坦无明显起伏,塑性变形小,呈现脆断形貌。拉伸应力-应变曲线及断裂实物见图 8b,拉伸试样未产生缩颈现象,塑性较差。力学性能试验结果见表 2,抗拉强度仅为 98.1 MPa,相较于要求值低 46.9 MPa;伸长率仅为 1.44%,硬度(HBS)为 48.6,接近要求值 50;断裂失效的铝设备线夹抗拉强度、伸长率以及硬度值均低于技术要求值,其中抗拉强度和伸长率与技术要求值差距较大,约为要求值的 67.6%、36.0%。

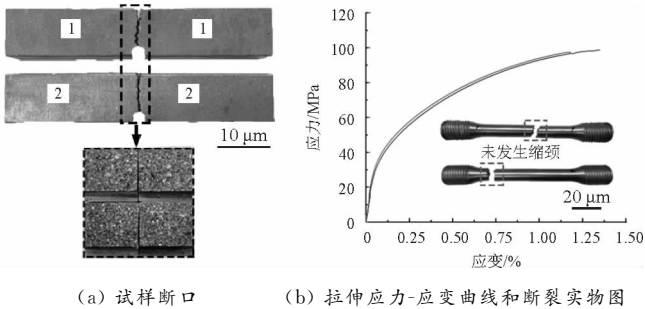


图 8 冲击断裂试样及拉伸应力-应变曲线
Fig.8 Impact fracture specimen and tensile stress-strain curves

表 2 力学性能试验结果

试样	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	冲击功/ J	硬度 (HBS)
试样 1	98.8	60.5	1.48	1.71	48.7
试样 2	97.5	60.2	1.40	1.71	48.4
实测平均值	98.1	60.3	1.44	1.71	48.6
技术要求值	≥145	—	≥4	—	≥50

注:技术要求值参考 GB/T 1173-1995

4 结 论

(1)设备线夹端子板用 ZL102 合金冶炼时变质处理不明显,金相组织主要由粗大针片状共晶 Si 相、块状初生 Si 相、基体 α -Al 相,以及少量针状富 Fe 相组成。综合力学性能较差,其抗拉强度为 98.1 MPa,伸长率为 1.44%,分别为技术要求值的 67.6%和 36.0%;硬度值(HBS)稍低于技术要求值。

(2)未变质处理的硬质强化相棱角、尖端在受力时造成应力集中,破坏基体铝的连续性,成为裂纹萌生与扩展的通道。同时 ZL102 铝合金在铸造时存在缩松、缩孔等缺陷,增加材料脆性,加剧了设备线夹提前断裂。

参 考 文 献

[1] 董瑾,钟相源,安江英.变电站铜铝过渡设备线夹断裂原因[J].
[2] DL/T 346-2010 设备线夹[S].
[3] 许宏伟,虞鸿江,杨迎春,等.电网设备线夹开裂原因[J].理化检验(物理分册),2021,57(1):66-69,73.
[4] 罗宏建,龚卓,王炯耿,等.铝合金设备线夹失效分析[J].云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(5):44-48.
[5] 卢振宇,李文胜,何凤生.500 kV 变电站 SSY 型设备线夹断裂分析[J].广东电力,2015,28(3):77-81.
[6] 王军,黄蓉,姜涌,等.SSY 型设备线夹断裂故障分析[J].矿冶工程,2020,40(3):138-141.
[7] 徐贤,吴国忠,包艳蓉,等.变电站铝设备线夹断裂事故分析[J].热加工工艺,2012,41(7):191-192,195.
[8] GB/T 9438-2013.铝合金铸件[S].
[9] 王祝堂,田荣璋.铝合金及其加工手册[M].长沙:中南大学出版社,2007.
[10] 钟群鹏,赵子华.断口学[M].北京:高等教育出版社,2006.
[11] 罗昌森,罗宏,曾宪光.ZL102 铝合金抛光机扣环断裂分析[J].特种铸造及有色合金,2013,33(3):285-288.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

