电机铜铝接线端子失效机理

李燕，赖云亭，张忠伟，左敦桂
(苏州热工研究院有限公司，江苏 苏州 215004)

摘要：铜铝接线端子可以降低构件重量和成本、发挥各自材料的性能优点，是现役电力系统中重要的连接部件，在电力系统中应用广泛。针对某电厂运行 6 年后发生开裂的电动泵电机铜铝接线端子，分别通过宏观检查、化学成分分析、金相检验、扫描电镜分析和 X 射线衍射分析等试验进行原因分析。结果表明，接线端子接头存在焊接工艺控制不良，导致接头存在塑性变形不完全、铜夹渣、孔洞等缺欠。在服役过程中，腐蚀介质在上述缺欠处聚集进而发生电化学腐蚀，裂纹萌生并进一步扩展。

关键词：铜铝接线端子；摩擦焊；塑性变形；电化学腐蚀

中图分类号：TG441.7　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.12073/j.hj.20220513001

Failure mechanism for Cu-Al transition lug of electrical machinery

Li Yan, Lai Yunting, Zhang Zhongwei, Zuo Dungui
(Suzhou Nuclear Power Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, Jiangsu, China)

Abstract: Cu-Al transition lug can reduce the weight and cost of the components and give full play to the performance advantages of their materials. It is an important connecting component in the active power system and is widely used in the power system. The reasons leading to fracture for Cu-Al transition lug of electric pump after 6 years operation was analyzed by means of morphology analysis, hardness test, metallographic test, SEM and other detection means. The results show that the welding process control of the Cu-Al transition lug is poor, which is resulting in incomplete plastic deformation, copper slag inclusion, holes and other defects. The cracks were formed and further expansion during the service, which the cause of the electrochemical corrosion at the above defects.

Key words: Cu-Al transition lug, friction welding, plastic deformation, electrochemical corrosion

0　前言

铜、铝及其合金具有良好的导电性能、加工性能以及优良的耐腐蚀性能，常被广泛用于电力行业，尤其在电网系统中起到了至关重要的作用[1－3]。国内铝资源储存丰富，铜资源相对匮乏，铝的密度是铜的 1/3，使用铜铝连接，不仅可以降低部件重量，发挥各自材料的性能优点，还可以降低成本。但是，铜和铝的物理、化学性能差别较大，其中熔点相差 423 ℃，导热系数相差 46% 以上，抗剪强度相差 50% 以上，抗拉强度相差 1/4。这些物理性能的差距，导致常规的扩散焊、钎焊、压力焊、熔焊等方法都难以形成优良的接头[4－8]。焊接接头也容易出现脆性大、裂纹、气孔、夹渣等问题。此外，铜和铝都容易氧化，焊接过程中常发生氧化而生成高熔点的氧化物，从而造成焊缝未能完全熔合。上述焊接问题，导致服役过程中的铜铝接头极易出现断裂、腐蚀、发热等问题[9－11]。文中针对某电厂电动泵电机铜铝过渡接线端子在发生开裂问题进行综合性能分析研究，找出开裂的原因，为机组后续安全稳定运行提供保障。

1　试验方法

1.1　研究背景

失效的电动泵电机接线端子类型为铜铝过渡压

收稿日期：2022−05−13
基金项目：广东省基础与应用基础研究重大项目（2019B030302011）

接型端子，主要使用在电机三相（U 相、V 相、W 相）进线电缆上，用于连接电机和电缆。接线端子部件上部分为铜，和电机相接；下部分为铝，用于和铝芯电缆相接，冷压压紧。

电机接线端子型号为 TL50-16，铜材为 T2，执行标准为 GB/T 5231—2001《加工铜及铜合金牌号和化学成分》，铝材为 L2，执行标准为 GB/T 3190—1996《变形铝及铝合金化学成分》。铜铝接线端子采用摩擦焊方式连接，后通过车削方式对焊接部位进行加工成形。



图 1　铜铝接线端子检查情况

1.2　宏观形貌

结合现场安装情况，对来样样品进行宏观检查，并通过体式显微镜对开裂位置进行拍照记录。宏观检查结果如图 1 所示。开裂位置分布在安装位置外侧的铜铝焊接处，裂纹为环向裂纹，开口较小，裂纹两侧金属均未见明显的宏观塑性变形特征，为脆性开裂。在体式显微镜下，来样样品的焊缝位置离变径处也仅有 1 mm 左右距离。

1.3　化学成分分析

成分分析结果见表 1 和表 2。结果表明，铜材取样样品中的铁、铅、锡元素含量远超标准要求，其余元素均满足 GB/T 5231—2001 对 T2 的要求。铝材取样样品中的元素均满足 GB/T 3190—1996 对 L2 的要求。

表1　铜材化学成分分析结果（质量分数，%）

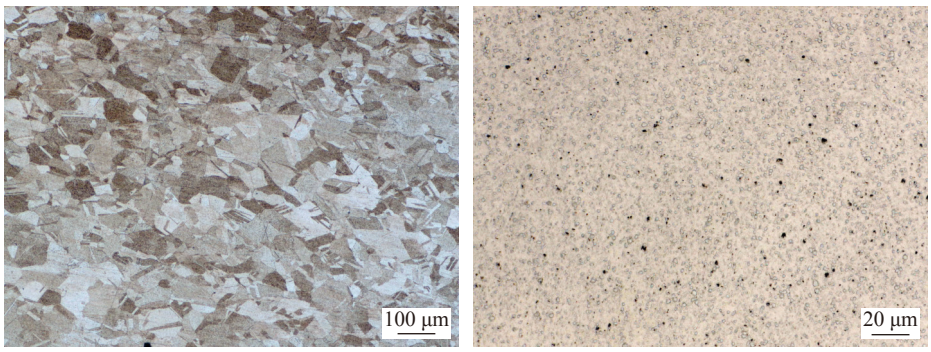
样品	Cu	Ag	P	Bi	Sb	As	Fe	Pb	Sn
铜材	99.82	0.007 5	0.003	<0.000 5	<0.000 5	<0.000 5	0.065	0.009	0.012
标准值	≤99.90	≤99.90	—	≤0.001	≤0.002	≤0.002	≤0.005	≤0.005	≤0.005

表2　铝材化学成分分析结果 (质量分数，%)

样品	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
铝材	0.057	0.13	<0.004	<0.003	<0.004	0.012	<0.002
标准值	≤0.25	≤0.35	≤0.05	≤0.03	≤0.03	≤0.05	≤0.03

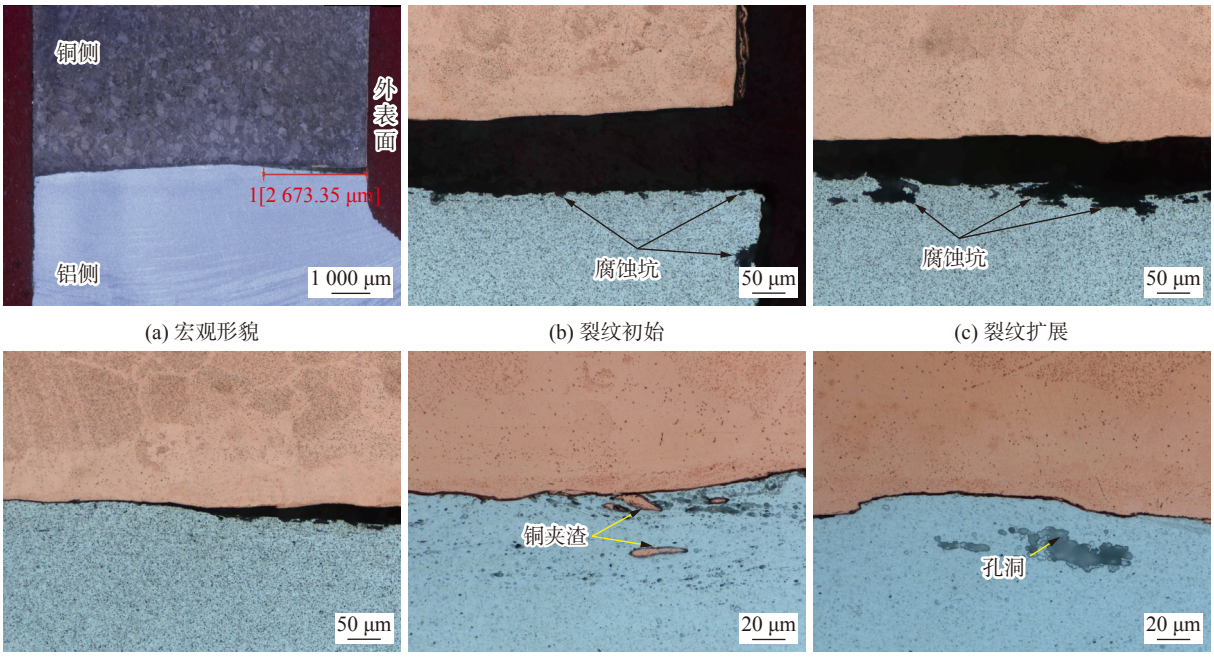
1.4　金相检验

金相检验结果如图 2 和图 3 所示。铜基体组织为单向 α 固溶体，铝基体组织为轧制状细晶粒。裂纹启裂于外表面焊缝处，呈“V”形向内侧扩展，裂纹深度约为 2 673 μm。启裂处铝侧外表面边缘存在较为明显的腐蚀现象，裂纹中间和裂纹尖端铝侧同样存在较为明显的腐蚀现象，裂纹内部存在铜夹渣、孔洞等缺欠。



(a) 铜基体　　(b) 铝基体

图 2　接线端子开裂处金相检验



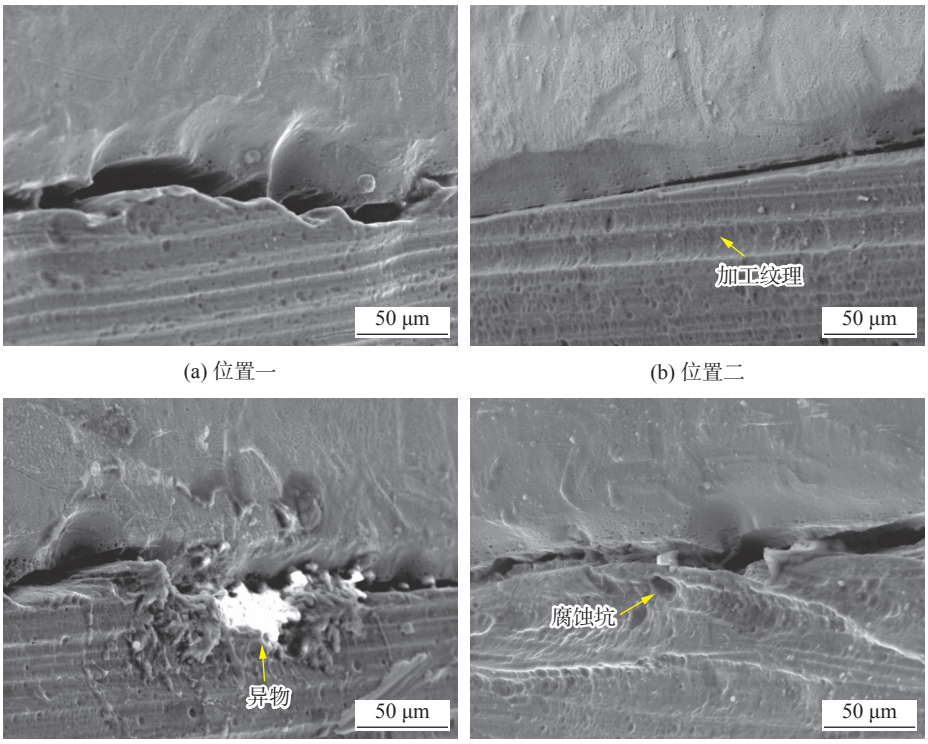
(a) 宏观形貌　(b) 裂纹初始　(c) 裂纹扩展

(d) 最终断裂　(e) 铜夹渣　(f) 孔洞

图 3　接线端子基体金相组织

1.5　SEM 微观观察和能谱分析

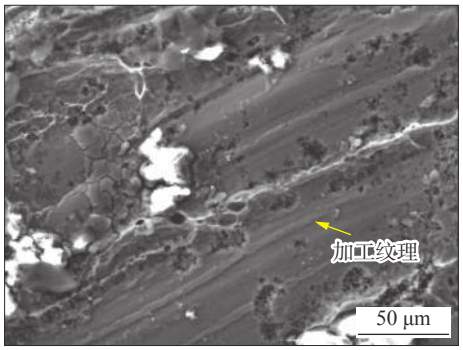
图 4 ~ 图 6 为裂纹外表面和断口的微观结果以及断口表面的能谱检测结果。结果表明，裂纹外表面不同位置处的微观结果显示，裂纹附近铝侧存在明显的机加工纹理和细小的点腐蚀坑，裂纹内部存在异物。断口可见明显的机加工纹理和点腐蚀坑，



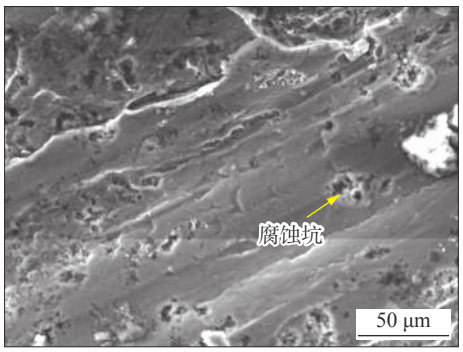
(a) 位置一　(b) 位置二

(c) 位置三　(d) 位置四

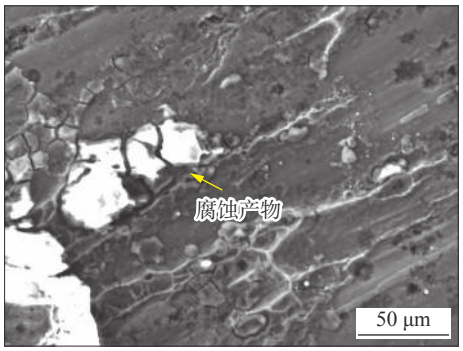
图 4　裂纹侧面微观观察结果



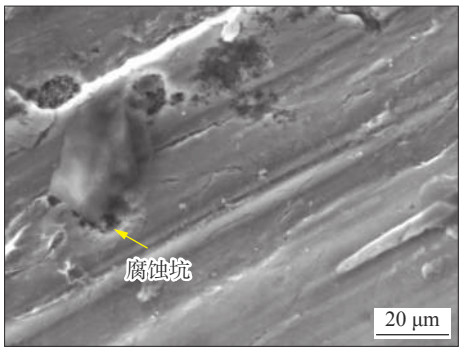
(a) 裂纹启裂



(b) 腐蚀坑



(c) 裂纹扩散



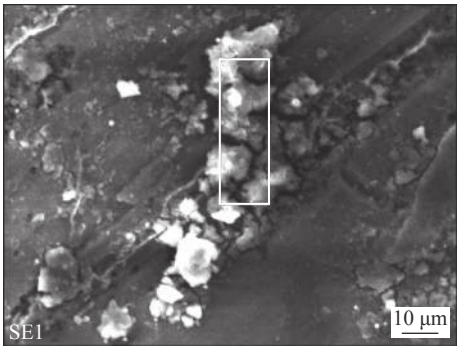
(d) 裂纹未满

图 5　裂纹打开后铝侧断口微观观察结果

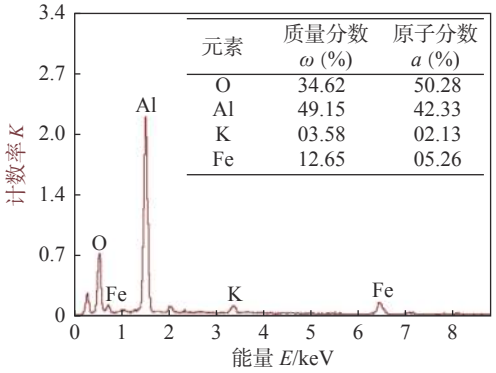
腐蚀产物主要元素为 Al, O, Cu, Fe, Si, K, Na, P 等。

1.6　X 射线衍射分析

X 射线衍射扫描分析结果如图 7 所示。断口表面只存在 Cu, Al, 未见金属间化合物生成。



(a) 观察位置



(b) 能谱结果

图 6　铝侧断口能谱结果

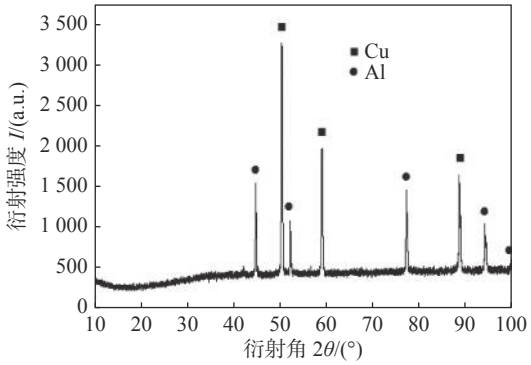


图 7　端子接头 X 射线衍射图

2　失效原因分析

样品的开裂位置分布在安装位置外侧的铜铝焊缝处，裂纹为环向裂纹，开口较小，裂纹两侧金属均未见明显的宏观塑性变形特征，为脆性开裂。微观上，裂纹启裂于外表面焊缝处，呈“V”形向内侧扩展。铝侧断口及其临近表面存在明显的点腐蚀坑，为铜铝电化学腐蚀结果。因此，电机端子裂纹应为接头焊缝发生电化学腐蚀，导致接头承载能力降低，在运行过程中，裂纹进一步扩展直至被发现。

接线端子采用的焊接方法为摩擦焊，考虑到防止

焊缝中产生铜铝金属间化合物，从而降低接头机械性能，摩擦焊均采用低温摩擦焊方法，其焊接温度均控制在铝–铜共晶点（548 ℃）以下[10]。该次来样端子的焊接接头处 X 射线衍射扫描分析结果显示，接头处仅有 Cu，Al，未见脆性金属间化合物，可见焊接温度并未超过 548 ℃。但是，裂纹打开后的断口均可见明显的机加工纹理，表明摩擦焊过程中塑性变形不完全，应为摩擦焊过程中焊接温度过低且顶断压力过小所致。另外，接头处存在铜夹渣、孔洞等缺欠。综上，来样接线端子在焊接前的原材料加工过程、焊接前的清理环节以及焊接工艺参数设定均存在问题。

正常情况下，如果铜、铝焊接界面表面平整光滑，焊接质量良好，焊缝表面无微裂纹或未熔合等焊接缺欠，不存在容纳电解液存在的环境，2 种金属发生电化学反应的可能性很小。该次开裂端子铝侧表面均存在较为明显的机加工纹理，且机加工结束处为焊缝处，部分焊缝处存在铜夹渣、孔洞等缺欠。上述，均会导致空气中的水和氧化碳及其他有害杂质在上述焊缝缺欠处聚集，造成电化学腐蚀。铜铝间的电极电位差为 2 V 左右，所以铝首先发生氧化还原反应出现腐蚀，铝不断丢失电子而成为铝离子，再氧化成 Al_2O_3。随着腐蚀的继续，表面金属的逐步缺失，在接头处会形成“V”形缺口，导致此处应力集中。同时，焊缝处于结构的变径处和焊接接头质量不佳，更加会加快焊缝开裂速度，焊缝的开裂进一步为电化学腐蚀的发生创造环境，铝材进一步腐蚀缺失，铜铝接触截面减少，承载能力降低，导致裂纹的进一步扩展。

3 结论

（1）接线端子的焊接接头存在质量问题，具体表现在：焊接温度过低且顶断压力过小，导致塑性变形不完全，焊缝中残留较为明显的机加工痕迹。接头存在铜夹渣、孔洞等缺欠以及铜材金属缺失现象。

（2）接头焊接质量问题是导致接线端子开裂的主要原因。另外，铝侧断口及其临近表面存在明显的点腐蚀坑，为铜铝电化学腐蚀结果，这种电偶腐蚀对裂纹萌生和发展起到促进作用。

参考文献

[1] 窦飞, 乔黎伟. 铝芯电缆在电网建设中的应用 [J]. 电力建设, 2011, 32(7): 101 − 104.

[2] 黄伯云. 我国有色金属材料现状及发展战略 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14S1(5): 122 − 127.

[3] 于汶加, 陈其慎, 张艳飞, 等. 世界新格局与中国新矿产资源战略略观 [J]. 资源科学, 2015, 37(5): 69 − 73.

[4] 殷祚炷, 孙凤莲. 铜铝钎焊接头腐蚀机理分析 [J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 121 − 125.

[5] 薛志清, 胡绳荪, 左迪, 等. 铜铝异种金属激光焊接头组织特征及力学性能 [J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 51 − 56.

[6] Gulenc B. Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method[J]. Materials & Design, 2008, 29(1): 275 − 278.

[7] 张满, 薛松柏, 姬峰, 等. $CuAl_2$ 相对铜铝钎焊接头组织与性能的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 93 − 98.

[8] Schmalen P, Plapper P. Evaluation of laser braze-welded dissimilar Al-Cu joints [J]. Physics Procedia, 2016, 83: 506 − 514.

[9] Aminazad A M, Hadian A M, Ghasimakbari F. Investigation on corrosion behavior of copper brazed joint [J]. Procedia Materials Science, 2015, 11: 672 − 678.

[10] 徐雪霞, 欧阳杰, 冯砚厅, 等. 设备线夹开裂失效分析 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(13): 160 − 163.

[11] 邢丽, 万於辉, 杨成刚, 等. 厚板铜/铝搅拌摩擦焊接头的组织分析 [J]. 电焊机, 2014, 44(4): 27 − 30.

第一作者： 李燕，硕士，工程师；主要从事核电厂关键设备和金属部件材质评价与失效分析的工作；maqueziji@163.com。

通信作者： 左敦桂，硕士，正高级工程师；主要从事电站关键设备和金属部件失效分析及寿命评估的工作；zuodungui@cgnpc.com.cn。

（编辑：曲畅）

本文引用格式：

李燕, 赖云亭, 张忠伟, 等. 电机铜铝接线端子失效机理[J]. 焊接, 2023(8): 55 − 59.

Li Yan, Lai Yunting, Zhang Zhongwei, et al. Failure mechanism for Cu-Al transition lug of electrical machinery[J]. Welding & Joining, 2023(8): 55 − 59.