



热循环对电气接续材料长期连接性能的影响

陈冠¹, 杨荣凯¹, 唐建国², 陈华³, 张冰¹, 孔维权¹

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 南京 211100;

2. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

3. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400081)

摘要: 电气线路的压接连接质量会对线路的长期运行安全产生较大的影响。采用热循环及短路试验对铝制接续金具和铝合金接续金具压接下的铝合金电缆导体线路的运行情况进行了分析。结果表明: 在热循环试验条件下, 铝制接续金具与铝合金接续金具的压接性能差异不大, 但短路试验后, 铝合金接续金具的压接性能明显优于铝制金具的; 短路试验所产生的温差导致的接续金具内部应力(110 MPa)明显高于热循环试验所产生的应力(35 MPa); Al-0.6Fe-0.15Cu 铝合金接续金具, 基体中 Al_3Fe 相粒子可极大地阻碍位错的运动, 增加蠕变变形抗力, 提高材料应对热循环特别是短路时所产生的高温大应力下蠕变变形的能力。

关键词: Al-Fe 合金; 热循环; 连接性能; 蠕变; 微观组织

文章编号: 1004-0609(2019)-03-0484-07

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

随着国民经济的快速发展, 社会用电负荷急剧增加, 部分输电线路出现满负荷甚至过负荷运行的状况, 对线路的运行安全造成极大的考验。现有铝芯电缆由于力学性能低、抗蠕变性能差、线路长时间运行时会出现接头处因蠕变变形导致连接不牢, 进而发生过热而影响线路安全。铝合金电缆在纯铝电缆的基础上通过微合金化和特殊的热处理工艺研制而成, 在保持现有电导率的基础上, 同时具备良好的抗蠕变性能。在铜价高企及铜资源匮乏的大背景下, “以铝代铜”成为电线电缆行业发展的必然趋势^[1], 铝合金电缆以其独特的性能优势在国内外建筑领域得到广泛应用^[2-3]。

近些年来, 铝合金电缆作为进入国内市场的新产品, 相关厂家及研究机构对 8000 系 Al-Fe 合金电缆导体的合金化及制备工艺进行了大量的研究^[4-9]。其中, XING 等^[10]对 AA8011 合金进行强烈的塑性累加变形, 晶粒尺寸降至 1 μm 以下, 同时力学性能受连续再结晶、动态回复和静态回复的综合作用而出现下降趋势。杨荣凯等^[11]研究表明, 铸造工艺及挤压条件对 Al-Fe 系合金的微观组织及抗蠕变性能影响较大, 热顶半连续铸造工艺和 Cu 元素的微合金化可细化铸态晶粒并提高抗蠕变性能。郭磊等^[12]研究发现, 较高挤压比时位错密度、固溶原子及 Al_3Fe 相形貌会对 AA8030 铝

合金的电性能产生综合影响。输电线路采用铝合金电缆的优势在于其抗蠕变性能良好的铝合金导体与性能匹配的接续金具通过合适的压接工艺连接而成。但有关铝合金电缆配套接续金具的研究相对欠缺, 以至于出现用铝制金具对铝合金电缆进行接续的问题, 难以发挥出铝合金电缆的优势, 对铝合金电缆的推广造成极大的负面影响。对此, 本文从线路连接稳定性的角度, 对铝合金金具与铝制金具进行热循环连接性能试验, 并对其性能和微观组织的变化进行研究, 为铝合金电缆接续金具的选型提供相关参考及理论指导。

1 实验

电气接续金具连接性能试验采用 DJX-1 电缆金具热循环测试系统, 参照 GBT9327—2008《额定电压 35 kV($U_m=40.5$ kV)及以下电力电缆导体用压接式和机械式连接金具试验方法和要求》进行热循环试验(B 类), 随后补加短路试验(A 类), 对接续金具的连接性能进行考核, 热循环试验回路如图 1(a)所示。图 1(b)所示为图 1(a)中热循环回路中金具接续部分的示意图, 两段 AA8030 铝合金电缆绞合导体通过接续金具

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(524606160239); 国家自然科学基金资助项目(51474240)

收稿日期: 2018-01-24; 修订日期: 2018-05-20

通信作者: 杨荣凯, 教授级高级工程师; 电话: 025-81093593; E-mail: chenguancsu@foxmail.com

压接相连。其中, I 处为液压钳压接的作用位置, II 处为压痕间隙, 未压接部分。本试验中采用铝电缆通用的 AA1060 铝制金具和自制的 Al-0.6Fe-0.15Cu 铝合金金具进行连接性能对比试验。采用 HV-1000A 型显微硬度计进行硬度测试, 加载载荷为 4.9 N, 加载时间 15 s, 每个退火状态测试 5 次并取平均值。经机械减薄和双喷减薄制样后采用 JEM-2100F 型透射电镜对热循环前后的试样微观组织进一步观察。材料的(压)蠕变试验采用 RWS 电子蠕变松弛试验机进行测试。

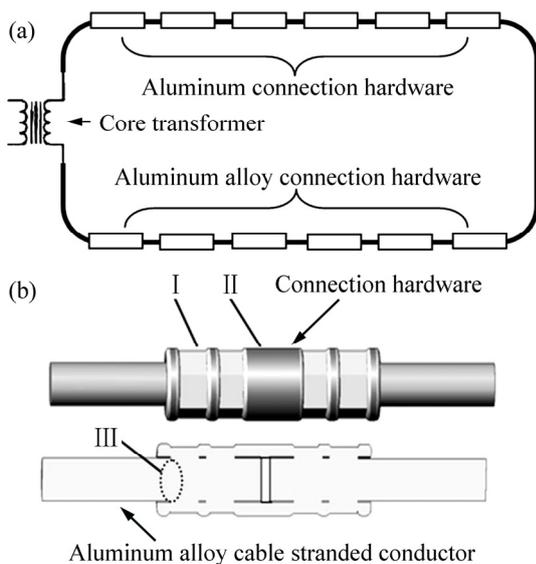


图1 热循环试验回路结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of thermal cycling test loop: (a) Thermal cycling test loop; (b) Connection of aluminum alloy cable conductor by hardware

2 实验结果

输电线路负荷存在短周期性, 即用电的峰谷时段, 同样, 也呈现出明显季节性的差异。用电高峰期, 线路输电负荷大, 线路温度高; 用电低谷期, 线路输电负荷小, 线路运行温度低。为验证接续金具的连接性能, 参照 GBT9327—2008, 采用热循环试验模拟线路实际的运行情况, 结果如图 2 所示。根据标准要求, 通过图 1(a)穿心变压器, 利用互感原理, 对回路施加电流(650 A), 将基准导体(铝合金电缆导体)加热至 θ_R , 波动 0~6 °C, 回路电流调至 500 A 左右, 同时保证中值接续金具的温度大于 100 °C, 上下波动 0~2 °C, 保温 10 min, θ_R 一般在 120~140 °C 之间。随后断电风冷至 35 °C 以下, 作为一个完整的热循环, 一般控制在 60 min 左右。热循环试验分为 A 类和 B 类, B 类仅进

行 1000 次热循环, A 类需额外补加 6 次短路试验。短路试验电流一般不大于 25 kA, 通电持续时间 $1_{-0.1}^{+0.5}$ s, 将基准导体瞬间加热至 250~270 °C。本试验中采用首先完成 B 类 1000 次热循环, 后补加 6 次短路试验的顺序, 以验证 A 类测试条件下, 铝制接续金具和铝合金接续金具在连接性能上的差异性。

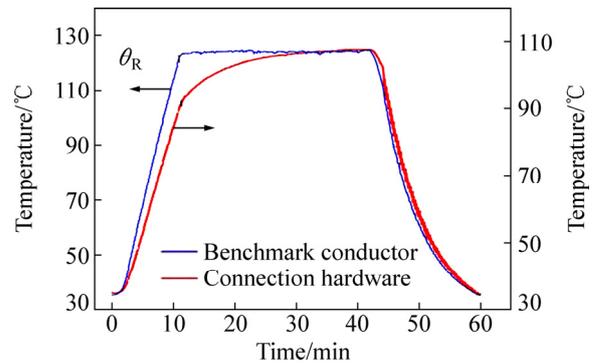


图2 单个热循环示意图

Fig. 2 Single thermal cycle diagram

接续金具连接性能好坏的重要表征就是金具接续处电阻的变化情况, 将热循环回路中接续金具电阻与铝合金电缆导体(作为基准导体)电阻的比值定义为电阻比率 k , 电阻比率 k 的定义可有效消除外界环境因素(特别是温度的波动)对电阻测量的影响。该实验通过测定热循环过程中每个金具接续处的电阻比率 k 的变化情况来衡量其连接性能。表 1 所列热循环试验过程中各接续金具的电阻比率 k 的测量数据。

3 分析与讨论

3.1 热循环前后接续金具电阻比率的变化

铝合金的初始电阻比率 k 的平均值 \bar{k} 为 0.640, 铝的 \bar{k} 为 0.648, 两者电阻比率相当; 经过 1000 次热循环后, 铝合金的 \bar{k} 为 0.638, 铝的 \bar{k} 为 0.655, 与初始电阻比率相比几乎没有变化(1%之内)。为反映每个接续金具在热循环过程中的电阻变化, 在此定义电阻比率比值 λ , $\lambda = k_i/k_0$, i 为热循环次数, k_0 为初始电阻比率。将各接续金具的电阻比率比值 λ 绘制如图 3 所示。根据图 3 可知, 在 1000 次热循环过程中, 铝制接续金具的变化幅度相比铝合金接续金具而言更稳定, 变化幅度更小, 表明铝制接续金具的个体性能相对一致, 并无明显差别。

在 1000 次热循环(B 类试验)结束后, 对试验回路通以 25 kA、持续时间 $1_{-0.1}^{+0.5}$ s 的大电流, 将试验回路

表1 接续金具的电阻比率 k

Table 1 Resistance ratio k of connection hardware

Cycle number	k of aluminum alloy connection hardware						k of aluminum connection hardware					
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
0	0.63	0.67	0.62	0.65	0.64	0.63	0.63	0.67	0.66	0.66	0.64	0.63
250	0.59	0.58	0.64	0.66	0.65	0.62	0.62	0.66	0.67	0.66	0.66	0.61
325	0.60	0.57	0.65	0.65	0.63	0.61	0.62	0.65	0.66	0.66	0.67	0.60
400	0.59	0.57	0.65	0.64	0.62	0.60	0.62	0.65	0.66	0.65	0.66	0.60
475	0.57	0.55	0.63	0.61	0.60	0.58	0.61	0.62	0.64	0.63	0.64	0.58
550	0.54	0.54	0.61	0.61	0.59	0.57	0.59	0.62	0.63	0.63	0.63	0.57
625	0.58	0.58	0.66	0.65	0.64	0.61	0.62	0.65	0.67	0.66	0.66	0.61
700	0.58	0.59	0.66	0.66	0.64	0.62	0.63	0.66	0.67	0.67	0.67	0.61
775	0.58	0.58	0.65	0.65	0.63	0.61	0.62	0.65	0.67	0.67	0.66	0.61
850	0.56	0.56	0.63	0.63	0.61	0.59	0.61	0.64	0.66	0.65	0.65	0.60
925	0.56	0.58	0.65	0.65	0.64	0.61	0.62	0.65	0.67	0.67	0.67	0.62
1000	0.61	0.61	0.68	0.66	0.64	0.63	0.64	0.66	0.67	0.67	0.67	0.62
Short	0.67	0.67	0.64	0.76	0.73	0.69	0.86	1.04	1.01	0.95	1.13	1.16

Exp1, Exp2, Exp3, Exp4, Exp5, Exp6 present experiment No. 1, 2, 3, 4, 5, 6.

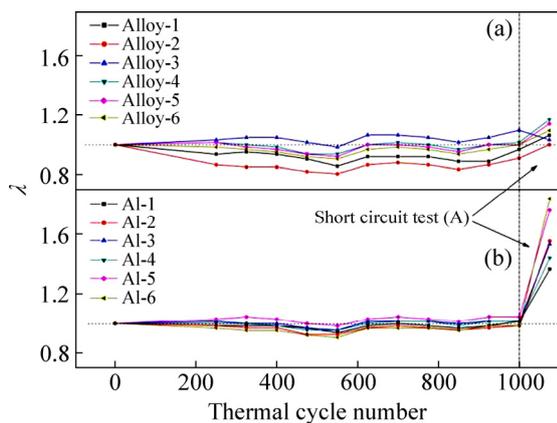


图3 热循环过程中 λ 的变化曲线

Fig. 3 Change curves of λ during thermal cycling test: (a) Aluminum alloy connection hardware; (b) Aluminum connection hardware

加热至 250~270 °C，后冷却至 35 °C 以下，作为一次短路试验，累计 6 次。图 3 所示为循环过程中金具 λ 的变化曲线。由图 3 可知，在 6 次短路试验后，铝制接续金具的电阻比率比值明显增加， λ 最大值为 1.84；而铝合金接续金具在短路试验后变化较小， λ 的平均值在 1.10 以下。试验表明，A 类短路试验对铝制接续金具破坏较为明显，导致接续处电阻急剧增大，而铝合金接续金具电阻较为稳定。通过 A 类试验的金具适用于能承受相对较长时间和较大强度的短路电流作用的配电或工业网络，而通过 B 类试验的金具仅适用于装有保护装置且能将过负荷或短路电流迅速排出的用

电网络。根据上述试验，铝合金接续金具相比铝制金具更适用于 A 类用电网络，对于 B 类用电网络，两者均适用且差异不大。

3.2 接续金具的相关性能

在 B 类热循环及后续 A 类短路试验中，对图 1(b) 中 I (受压处)、II (未受压) 位置进行显微硬度测试，结果如图 4 所示。铝制接续金具和铝合金接续金具 I 位置处的显微硬度均高于 II 位置处的，这与 I 位置因压接变形产生加工硬化有关，I 位置处的性能对接续金具的压接性能好坏起到决定性作用。随着热循环的进行，接续金具 I 位置处的硬度略微下降后均趋于平缓，但在经过短路试验后，接续金具 I 位置处的硬度出现

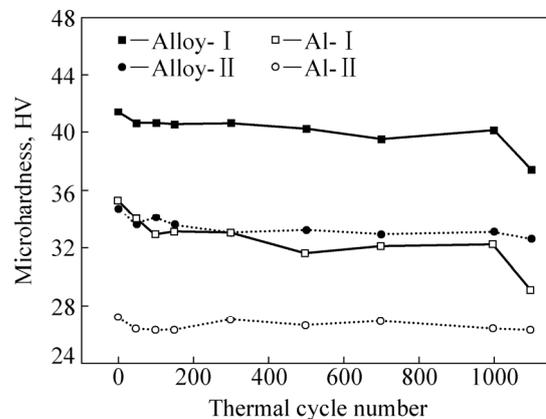


图4 热循环过程中接续金具的硬度变化

Fig. 4 Microhardness change of connection hardware during thermal cycling test

大幅下降, 对应图 3 接续金具电阻比率比值 λ 突然升高。在短路试验时, 接续处温度较高, 特别是在 I 位置处, 由于受到压接变形, 材料内部位错等畸变缺陷较高, 发生回复的驱动力要高于 II 位置处的, 因此接续金具 I 位置处的硬度降幅大于 II 位置处的。铝合金接续金具的显微维氏硬度要比铝制接续金具高 6~8 个单位, 力学性能要好于铝制金具的。

铝合金接续金具(Al-0.6Fe-0.15Cu) 是在 AA1060 基础上进行微合金化制备而成, 其线膨胀系数与 AA1060 的差异不大。图 1(b)所示为铝合金电缆导体(基准导体)通过接续金具压接相连, 如两者温差过大, 内外膨胀不一致, 接续金具内部会产生较大的应力, 发生蠕变变形, 进而影响其连接性能。材料的线膨胀变形量 ΔL 的计算式如下:

$$\Delta L = \alpha(T) \cdot \Delta T \cdot L \quad (1)$$

式中: $\alpha(T)$ 为线膨胀系数; ΔT 为温差; L 为原始长度。将式(1)进行变换可得

$$\varepsilon = \Delta L / L = \alpha(T) \cdot \Delta T \quad (2)$$

材料的弹性模量设定为 $E(T)$, 由式(2)可得, 因热膨胀变形而产生的应力 σ 为

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E(T) \cdot \alpha(T) \cdot \Delta T \quad (3)$$

线路接续处金具内外温度不一, 金具内部贴近基准导体处温度 T_1 , 金具外表面温度 T_2 , 从内到外呈现递减趋势。本实验中取接续金具内部一薄层(图 5 虚线所示), 厚度极小, 两侧温差为 dT , 由式(3)可得, 该薄层所受到的热膨胀应力为 $d\sigma = E(T) \cdot \alpha(T) \cdot dT$ 。为了简化计算, 假定材料弹性模量 E 和线膨胀系数 α 在所研究温度范围内变化不大, 或者以其平均值参与计算, 则接续金具最外层所受应力值可简化为

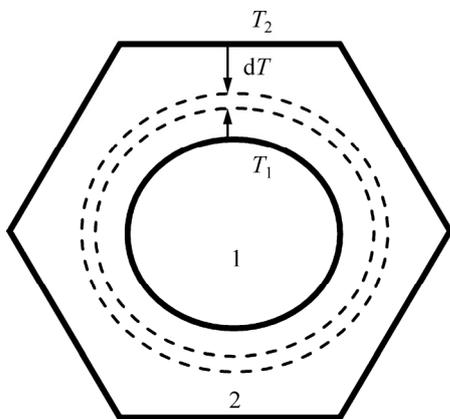


图 5 接续金具截面图

Fig. 5 Section diagram of connection hardware

$$\sigma = \int d\sigma = \int E(T) \cdot \alpha(T) \cdot dT = E \cdot \alpha \int dT = E \cdot \alpha (T_1 - T_2) \quad (4)$$

图 6 所示为短路试验中各温度的变化曲线。由图 6 可知, 与 B 类热循环试验相比, A 类短路试验通过短时大电流后, 基准导体瞬间达到 250~270 °C, 随后开始缓慢降温, 接续金具由于质量较基准导体的大, 加之体积大散热快, 升温较慢, 约 1 min 后达到 150 °C 后开始降温, 此时接续金具和基准导体的温度变化较为稳定, 相差 60~80 °C。参考相关数据^[13], 该温度下线膨胀系数 α 的平均值为 24.5×10^{-6} , 弹性模量为 60~68 GPa。由式(4)可得, 接续金具最外层所受应力值为 110 MPa 左右, 金具内层由于温差偏小, 所受应力也相应较小。而 B 类热循环试验中, 基准导体最高温度仅为 120 °C, 接续金具在 100 °C 左右, 两者温差一般为 20~25 °C(见图 2)。参考相关数据^[13], 该温度下线膨胀系数 α 平均值为 24.5×10^{-6} , 弹性模量为 65~70 GPa, 由式(4)可得, 接续金具最外层所受应力值为 35 MPa, 内层因温差小而应力更小。

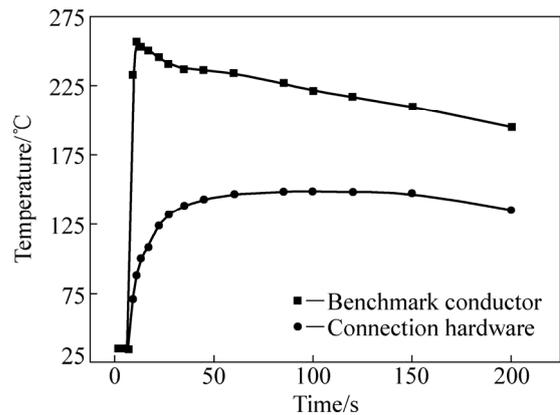


图 6 短路试验中各温度的变化曲线

Fig. 6 Changing curves of temperature in short circuit test

根据以上估算结果可知, B 类热循环试验时接续金具因温差所造成的应力值远小于短路试验时接续金具所受的应力值, 但在长期运行下, 这种应力的存在也会加速材料的蠕变变形。为此, 对铝制接续金具和铝合金接续金具制取圆柱状蠕变试样, 分别在表 3 温度和压应力条件下对其进行压蠕变测试以检测材料的蠕变变形情况。

在参照 B 类热循环条件下(100 °C, 35 MPa), 分别对铝制接续金具与铝合金接续金具进行同等条件下的压蠕变试验。由表 3 可知, 两者蠕变变形率均较小, 并无明显差异。而在参照 A 类短路试验条件下(150 °C, 112 MPa)进行蠕变测试时, 表 3 显示铝制接续金具和铝合金接续金具均出现较大的蠕变变形, 而

铝合金接续金具的蠕变变形量仅为铝制金具的11%。接续金具的蠕变变形会导致压接处连接性能降低，B类热循环试验条件下各接续金具蠕变变形较小，其连接性能较为稳定，而短路试验条件下的接续金具蠕变变形较大，是导致接续处电阻明显增大的原因。同时，铝合金接续金具表现出较好的抗蠕变性能，受短路试验的影响要比铝制金具的小。

表3 不同压应力条件下接续金具蠕变测试数据

Table 3 Creep test data of connection hardware under different conditions

Test condition	Creep deformation/%	
	100 °C, 35 MPa, 24 h	150 °C, 112 MPa, 24 h
Aluminum connection hardware	0.083	19.1
Aluminum alloy connection hardware	0.065	2.10

3.3 接续金具的微观组织

对铝制接续金具和铝合金接续金具压接处进行取样，在150 °C恒温下，施加112 MPa的压应力，进行

(压)蠕变测试，随后分别将测试前后的试样制样后进行TEM形貌观察，如图7所示。图7(a)和(c)所示分别为铝制和铝合金接续金具未发生蠕变时的微观形貌，而图7(b)和(d)所示则分别为24 h蠕变测试后的微观组织。图7(a)显示，在铝制接续金具基体中位错数量较少，晶粒尺寸较大；而当蠕变发生24 h后，较大的压应力使得基体中产生大量的位错，位错通过滑移或攀移及位错间的相互作用等形式，沿垂直滑移面的方向排列起来形成位错墙，从而降低体系的总应变能。每组位错墙均以小角度晶界将较大的晶粒割裂为更小的亚晶粒(见图7(b))。同时，较高的蠕变温度使得位错滑移更加明显，部分细小亚晶加速合并，从而加速蠕变变形。

由图7(b)和(d)可知，铝合金接续金具(Al-0.6Fe-0.15Cu)在蠕变变形前后，基体中(亚)晶粒尺寸大小并没发生明显的变化，蠕变初期大量的第二相粒子位于晶界或者亚晶界处，在蠕变变形过程中，位错滑移到晶界处被第二相粒子钉扎，进而导致晶界难以迁移，(亚)晶粒难以与周围亚晶合并，从而使得蠕变抗力增大，蠕变变形相对困难。该铝合金接续金具属于Al-Fe系合金，Fe在铝基体中的溶解度极低，几

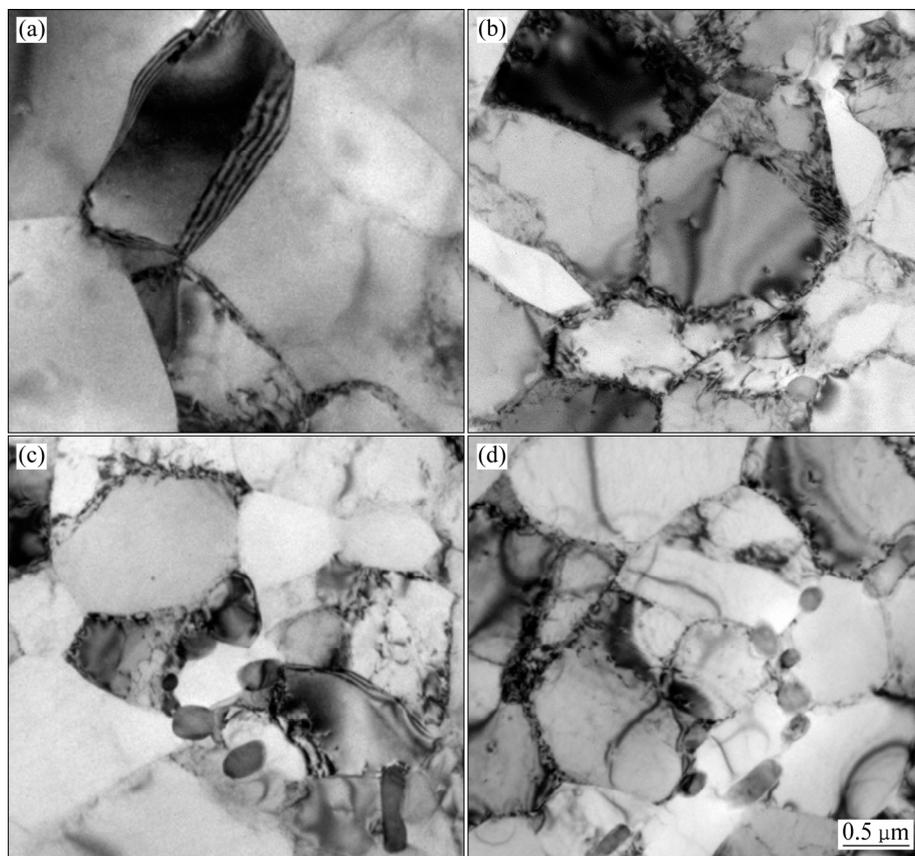


图7 在蠕变变形过程中接续金具的TEM像

Fig. 7 TEM images of connection hardware during creep deformation process: (a) Al, 0 h; (b) Al, 24 h; (c) Alloy, 0 h; (d) Alloy, 24 h

乎都以 Al_3Fe 相的形式存在于铝基体中^[14-15]。 Al_3Fe 相晶体的空间群为 C_{12}/M_1 , 复杂底心单斜结构, Al—Fe 键的结合力约是 $\alpha(\text{Al})$ 的 5 倍, 位错等缺陷难以切割该硬质相^[16]。因此, 合金中的 Al_3Fe 相可极大地阻碍位错的运动, 增加蠕变变形抗力, 提高合金的抗压蠕变性能。

铝合金接续金具较好的抗蠕变性能可抵抗 B 类热循环试验因温差产生的应力对接续金具造成的蠕变影响, 特别是在短路试验产生的高温大应力环境下, 具有比铝制金具更好的抗蠕变性能, 从而使得线路接续处的电阻保持良好的稳定, 进而保证线路运行的安全。

4 结论

1) 制备了一种抗蠕变性能良好的铝合金金具 ($\text{Al}-0.6\text{Fe}-0.15\text{Cu}$), 其基体中 Al_3Fe 相可极大地阻碍位错的运动, 增加蠕变变形抗力, 进而提高其抗蠕变性能。

2) 线路运行中接续金具与铝合金电缆导体存在一定的温差, 该温差会导致接续金具内部因热膨胀变形不一而产生内应力, 进而促使接续金具发生蠕变变形。短路试验所导致的温差产生的应力(110 MPa)约为 B 类热循环试验所产生应力(35 MPa)的 3 倍, 更容易导致材料发生蠕变变形, 对接续金具性能的要求更加苛刻。

3) 经过 1000 次热循环试验, 铝制接续金具较铝合金接续金具的电阻比率变化更加稳定, 但短路试验后, 铝制接续金具的电阻比率变化明显大于铝合金接续金具的。相比而言, 铝合金接续金具的使用将更加有利于线路的运行安全。

REFERENCES

- [1] 黄崇祺. 电工用铝和铝合金在电缆工业中的应用与前景[J]. 电线电缆, 2013(2): 4-9.
HUANG Chong-qi. The application and development of aluminum and aluminum alloy for electrical purposes in cable field[J]. Electric Wire & Cable, 2013(2): 4-9.
- [2] 汪国明. 低压铝合金电缆替代铜缆在建筑中的应用[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(1): 564.
WANG Guo-ming. The application of low voltage aluminum cable to copper cable in construction[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2015(1): 564.
- [3] 杜毅威. 铝合金电缆在建筑工程中的应用[J]. 建筑电气, 2010, 29(5): 42-45.
DU Yi-wei. Application of aluminum alloy cables in construction engineering[J]. Building Electricity, 2010, 29(5): 42-45.
- [4] 陈雪姣, 魏瑞启, 王裕, 蔡彬. Yb、Er 对 8030 导电铝合金力学和导电性能的影响[J]. 特种铸造有色合金, 2017, 37(9): 1030-1033.
CHEN Xue-jiao, WEI Rui-qi, WANG Yu, CAI Bin. Effects of Yb and Er on the mechanical and electrical properties of 8030 conductive alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(9): 1030-1033.
- [5] 谭敦强, 黎文献, 唐宜平. Al-Fe 系合金中的相及相转变[J]. 材料导报, 2003, 17(5): 18-20.
TAN Dun-qiang, LI Wen-xian, TANG Yi-ping. Phase and phase transformation in Al-Fe system alloy[J]. Materials Review, 2003, 17(5): 18-20.
- [6] 於国良, 吴振江. 电工用 8030 铝合金杆的制造工艺与性能控制[J]. 电线电缆, 2017(2): 12-16.
YU Guo-liang, WU Zhen-jiang. Manufacturing technologies and quality controls of 8030 aluminum alloy rod[J]. Wire & Cable, 2017(2): 12-16.
- [7] 张国玲. 合金元素含量与加工工艺对 8030 铝合金导线性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2012: 19-55.
ZHANG Guo-ling. The Effects of alloying elements content and processing technology on properties of 8030 aluminum alloy[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012: 19-55.
- [8] ZHANG Xiao-yuan, ZHANG Hui, KONG Xiang-xin. Microstructure and properties of Al-0.70Fe-0.24Cu alloy conductor prepared by horizontal continuous casting and subsequent continuous extrusion forming[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6): 1763-1769.
- [9] KIM M G, LEE G C, PARK J P. Continuous casting and rolling for aluminum alloy wire and rod[J]. Materials Science Forum, 2010, 638/642: 255-260.
- [10] XING Z P, KANG S B, KIM H W. Microstructural evolution and mechanical properties of the AA8011 alloy during the accumulative roll-bonding process[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(5): 1521-1530.
- [11] 杨荣凯, 陈冠, 张冰, 孔维权, 刘志鹏. 电缆用 Al-Fe 合金抗压蠕变及力学性能的研究[J]. 铸造, 2017, 66(10): 1062-1066.
YANG Rong-kai, CHEN Guan, ZHANG Bing, KONG Wei-quan, LIU Zhi-peng. Process research on compressive creep and mechanical properties of Al-Fe alloy for cable industry[J]. Foundry, 2017, 66(10): 1062-1066.
- [12] 郭磊, 易丹青, 臧冰, 王斌, 刘会群, 柳公器. 挤压比对 AA8030 铝合金棒材组织及电性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2083-2090.
GUO Lei, YI Dan-qing, ZANG Bing, WANG Bin, LIU Hui-qun, LIU Gong-qi. Effect of extrusion ratio on

- microstructure and electrical properties of AA8030 aluminum alloy rod[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2083–2090.
- [13] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 3版. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 217–520.
- WANG Zhu-tang, TIAN Rong-zhang. Aluminum alloy and its processing manual[M]. 3rd ed. Changsha: Central South University Press, 2007: 217–520.
- [14] LI Y J, ARNBERG L. Solidification structure of DC-cast AA3003 alloy and its influence on homogenization[J]. Aluminium, 2002, 78(10): 834–839.
- [15] LI Y J, ARNBERG L. Precipitation of dispersoids in DC-cast 3003 alloy[J]. Materials Science Forum, 2002, 396/402(2): 875–880.
- [16] NISHIMOTO A, AKAMATSU K. Preparation of homogeneous Fe-Al intermetallic compound sheet by multi-layered roiling and subsequent heat treatment[J]. Materials Science Forum, 2007, 561/565(2): 857–860.

Effect of thermal cycling on long-term connection performance of electrical connection material

CHEN Guan¹, YANG Rong-kai¹, TANG Jian-guo², CHEN Hua³, ZHANG Bing¹, KONG Wei-quan¹

- (1. State Grid Electric Power Research Institute, Nari Group Corporation, Nanjing 211000, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400081, China)

Abstract: The quality of compressive connection of electrical circuit has a great influence on the long running safety of the line. The connection of aluminum alloy cable conductor with aluminum and aluminum alloy connection hardware was analyzed by thermal cycling and short circuit test. The results show that there is little difference in the compression performance between aluminum and aluminum alloy connection hardware under the condition of thermal cycling test. However, after the short circuit test, the compression performance of aluminum alloy is better than that of aluminum. The internal stress (110 MPa) caused by temperature difference in short circuit test is significantly higher than the stress generated by the thermal cycling test (35 MPa), the short circuit test is more stringent in the examination of material performance. The Al₃Fe phase particles in the matrix of Al-0.6Fe-0.15Cu alloy can greatly hinder the dislocation movement, and increase creep deformation resistance. The ability to deal with creep deformation of Al-0.6Fe-0.15Cu alloy under high temperature and big stress caused by thermal cycling and especially short circuit is improved.

Key words: Al-Fe alloy; thermal cycling; connection performance; creep; microstructure

Foundation item: Project (524606160239) supported by State Grid Corporation Headquarters Science and Technology Project, China; Project (51474240) supported by the National Nature Science Foundation of China

Received date: 2018-01-24; **Accepted date:** 2018-05-20

Corresponding author: YANG Rong-kai; Tel: +86-25-81093593; E-mail: chenguancsu@foxmail.com

(编辑 龙怀中)