

重大工程装备

时效对高导耐热铝合金导线第二相析出及其性能的影响

方振邦¹, 王若民^{1,2}, 李宸宇³, 缪春辉¹, 滕越¹, 陈国宏¹, 汤文明³

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601; 2. 安徽新力电业科技咨询有限责任公司, 合肥 230026; 3. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: **目的** 开展时效过程中 61.5%IACS 高导耐热铝合金导线析出第二相特性及其电导率与拉伸力学性能变化规律的研究, 评价其热稳定性。**方法** 经过 150~230 °C 长达 630 h 时效, 揭示第二相的组成、形态与分布及其对时效态铝合金导线电导率与拉伸力学性能的影响规律。**结果** 时效态铝合金导线中, 颗粒状及针状 $Al_3Zr(Y, Er)$ 、 $Al_3(Zr(Y)_xEr_{1-x})$ 第二相在 Al 晶内、晶界析出, Al_3Fe 相颗粒弥散分布于 Al 晶界。伴随着时效过程, 铝合金导线的抗拉强度与伸长率先上升、再逐渐下降; 同时, 铝合金导线的电导率先增大、后逐渐趋于稳定。该趋势随时效温度的升高而越加明显。**结论** 第二相的析出、长大是影响时效态铝合金导线力学性能及电导率的主要原因。经 230 °C、1 h 时效, 铝合金导线的强度保持率高达 94%, 满足 GB/T 30551—2014 的要求。所有时效态铝合金导线的电导率均高于其初始值, 该高导耐热铝合金导线的热稳定性良好。

关键词: 耐热铝合金导线; 人工时效; 第二相; 电导率; 拉伸力学性能; 断口形貌

中图分类号: TG166.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)06-0120-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.017

Effects of Aging on Secondary-phase Precipitation and Properties of High-conductivity Heat-resistant Al Alloy Conductor Wire

FANG Zhen-bang¹, WANG Ruo-min^{1,2}, LI Chen-yu³, MIAO Chun-hui¹, TENG Yue¹,
CHEN Guo-hong¹, TANG Wen-ming³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China; 2. Anhui Xinli Power Technology Consulting Co., Ltd., Hefei 230026, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: The precipitation characteristic of the secondary-phases, and the change law of the conductivity and tensile me-

收稿日期: 2021-03-26; 修订日期: 2021-05-10

Received: 2021-03-26; Revised: 2021-05-10

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目 (5500-202028257A-0-0-00)

Fund: Science and Technology Foundation of SGCC (5500-202028257A-0-0-00)

作者简介: 方振邦 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电网材料失效分析及新材料。

Biography: FANG Zhen-bang (1991-), Male, Master, Engineer, Research focus: materials failure analysis and advanced materials in power grid.

通讯作者: 汤文明 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料失效分析及先进电子封装材料。

Corresponding author: TANG Wen-ming (1969-), Male, Doctor, Professor, Research focus: materials failure analysis and advanced electronic packaging materials.

引文格式: 方振邦, 王若民, 李宸宇, 等. 时效对高导耐热铝合金导线第二相析出及其性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 120-126.

FANG Zhen-bang, WANG Ruo-min, LI Chen-yu, et al. Effects of Aging on Secondary-phase Precipitation and Properties of High-conductivity Heat-resistant Al Alloy Conductor Wire[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 120-126.

chanical properties were researched to evaluate the thermal stability of the 61.5% IACS high-conductivity heat-resistant Al alloy conductor wire. After aging at temperature range from 150 °C to 230 °C for 630 h, the composition, morphology and distribution of the secondary phases was detected, and its effect on the conductivity and tensile mechanical properties of the aging Al alloy conductor wire were revealed. As for aging Al alloy conductor wire, granular and needle-like secondary phases of $Al_3Zr(Y, Er)$ and $Al_3(Zr(Y)_xEr_{1-x})$ are distributed in the Al grains and along the Al grain boundaries, and also the Al_3Fe particles are distributed dispersively along the Al grain boundaries. During aging, the tensile strength and elongation of the wire initially increase, and then gradually decrease. Meanwhile, the conductivity of the wire initially increases, and then remains stable. Such trends become more obvious as increasing the aging temperature. The evolution of the mechanical properties and conductivity of the aging wire mainly results from the precipitation and growth of the secondary phases. After aging at 230 °C for 1 h, the strength retention rate of the Al alloy conductor wire is as high as 94%, meeting the requirement of GB/T 30551-2014. The conductivity of the wire in all aging conditions is superior to the initial value of the wire. Therefore, it is indicated that the high-conductivity heat-resistant Al alloy conductor wire has a high thermal stability.

KEY WORDS: heat-resistant Al alloy conductor wire; artificial aging; secondary phase; conductivity; tensile mechanical property; fractography

随着国民经济的迅速发展,我国电力生产与调配已形成了“西电东送、南北互供、全国联网”的格局,“一带一路”沿线国家也提出了规模庞大的跨国联网计划^[1]。如此广袤区域的地形地貌及复杂的气象条件,使得电力建设需要克服诸如高温高湿环境、大跨度输电等困难,对电工铝合金的导电性、强度、耐热性提出了更高的要求。耐热铝合金导线是一种性能良好的特种扩容导线,目前国内外主要以 60%IACS 耐热铝合金导线为主,61%IACS 及以上高导耐热铝合金导线的应用相对较少,难以满足远距离、大容量输电线路建设工程及电网扩容改造工程的需求^[2]。因此,开展高导耐热铝合金导线的研发及其可靠性评价,成为目前耐热铝合金导线最为迫切的技术需求。

通过在工业纯铝中微量添加 Zr、Cu、Y、Er、Sc、Ce、B 等合金元素,优化铸轧及热处理工艺,已成功开发出导电率不低于 60%IACS、长期耐热温度不低于 150 °C 的高导耐热铝合金导线^[3-6]。热时效条件下,该高导热耐热铝合金导线中的结构变化复杂, Al_3Zr 等第二相的析出与长大以及 Fe、Si 等杂质的再分布等对耐热铝合金导线的电导率、强度、塑性都会产生显著影响,从而影响导线的热稳定性及服役可靠性^[7-9]。

目前,系统开展不同温度长时间人工时效对高导耐热铝合金导线力学、电学性能影响的研究还很缺乏,有待加强。基于此,本文针对国内研发的某 61.5%IACS 高导耐热铝合金导线,进行不同温度下最长达 630 h 的等温时效处理,着重开展时效过程中该合金导线析出第二相的组成、形态、分布及其电导率与拉伸力学性能变化规律的研究,综合评价该高导耐热铝合金导线的热稳定性,为其工程化应用提供技术支持。

1 试验

试验用 61.5%IACS 高导耐热铝合金导线线股在某国产 JNRLH61.5/LB20A-400/50 高导耐热铝合金钢绞线上拆取,线股直径为 3.05 mm。线股取直后,在 GZX-9023MBE 型恒温干燥箱中进行等温时效处理,具体工艺方案见表 1。根据 GB/T 30551—2014《架空绞线用耐热铝合金线》的要求,强度保持率不低于室温测试初始值 90%的 NRLH1 铝合金导线的时效温度及时间分别为 230 °C、1 h 或 180 °C、400 h,因此本文特别对 61.5%IACS 高导耐热铝合金导线进行 230 °C、1 h 的时效处理,以评价其热稳定性。

表 1 铝合金导线的时效处理方案
Tab.1 Aging scheme of the Al alloy conductor wires

时效温度/°C	时效时间/h
150	150, 210, 350, 630
180	8, 36, 72, 120, 240, 480
200	4, 8, 16, 24, 48
230	1

由于该耐热铝合金中的合金元素含量极少,时效析出第二相量也很少,难以检测。因此,将时效后的铝合金导线在 10% (质量分数) NaOH 水溶液中充分溶解,过滤得到第二相颗粒残渣,经蒸馏水清洗,烘干后,在 D/MAX2500V 型 X-射线衍射仪上测试第二相的组成。X-射线衍射 (XRD) 测试条件: Cu 靶 ($K\alpha$, 波长 $\lambda=0.154$ nm), 管电压和管电流分别为 20 kV 和 200 mA, 扫描角度为 10°~90°, 扫描速度为 6 (°)/min。按照 GB/T 4909.3—2009《裸电线拉力试验 第三部分: 拉力试验》的要求,在 MX-0580 型微机控制电子万能试验机上测量铝合金导线的拉伸力学性能,横梁位移速率为 0.3 mm/min。采用 JSM-6490 型扫描电

子显微镜 (SEM) 观察导线拉伸断口形貌及其表面时效析出第二相的形态与分布, 用 Oxford INCA 型能谱仪 (EDS) 测量微区成分。EDS 测试参数: 加速电压为 15 kV, 计数率为 3 500~4 000 cps。采用四电极法, 使用 QJ36 智能型数字电桥测量铝合金导线的电阻, 计算 IACS 相对电导率。以上铝合金导线的拉伸性能及电导率测试时, 每种时效状态下测量 5 根, 结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 力学性能与电导率

由表 2 可见, 在 150、180、200 °C 3 种时效温度条件下, 铝合金导线的抗拉强度 (R_m) 与伸长率 (A) 均随着时效时间的延长呈现先增后降的趋势, 而其断口收缩率 (Z) 有一定的波动, 变化不明显。此外, 由图 1a 可见, 在 150 °C 时效初期 (≤ 150 h), 铝合金导线的 R_m 基本不变, 随后快速上升; 在时效 350 h 后, 其 R_m 又维持长时间的稳定; 在 180、200 °C 时效时, 该铝合金导线的 R_m 随时效时间的变化曲线走势基本相同, 都是呈现先快速增加、后逐渐减小的趋势 (见图 1b、c)。在 200 °C 时效时, 铝合金导线 R_m 的变化幅度更大, 时效 8 h 即达到峰值, 而 180 °C 时效铝合金导线 R_m 峰值则出现在 72 h 左右。由此可见, 铝合金导线的 R_m 对温度具有一定的敏感性, 随着时

表 2 不同时效状态下铝合金导线的拉伸性能及电导率
Tab.2 Tensile mechanical properties and conductivities of the Al alloy conductor wires under different aging conditions

序号	时效状态	R_m /MPa	A /%	Z /%	电导率/%IACS
1	未时效	173	3.1	87.1	61.55
2	150 °C, 150 h	173	2.96	88.9	61.05
3	150 °C, 210 h	178	3.01	88.6	62.2
4	150 °C, 350 h	180	2.8	86.2	62.23
5	150 °C, 630 h	180	2.88	86.7	62.16
6	180 °C, 8 h	173	3.07	88.4	62.1
7	180 °C, 36 h	178	3.18	88.2	62.21
8	180 °C, 72 h	180	2.97	87.9	62.55
9	180 °C, 120 h	178	2.89	88.6	61.9
10	180 °C, 240 h	177	2.99	88.6	62.6
11	180 °C, 480 h	164	3.05	87.5	62.95
12	200 °C, 4 h	182	3.15	87.7	62.66
13	200 °C, 8 h	186	3.2	86.4	61.66
14	200 °C, 16 h	168	2.69	86.5	61.84
15	200 °C, 24 h	161	2.84	88.1	63.04
16	200 °C, 48 h	158	3.11	88.3	63.1
17	230 °C, 1 h	160	3.17	87.3	62.9

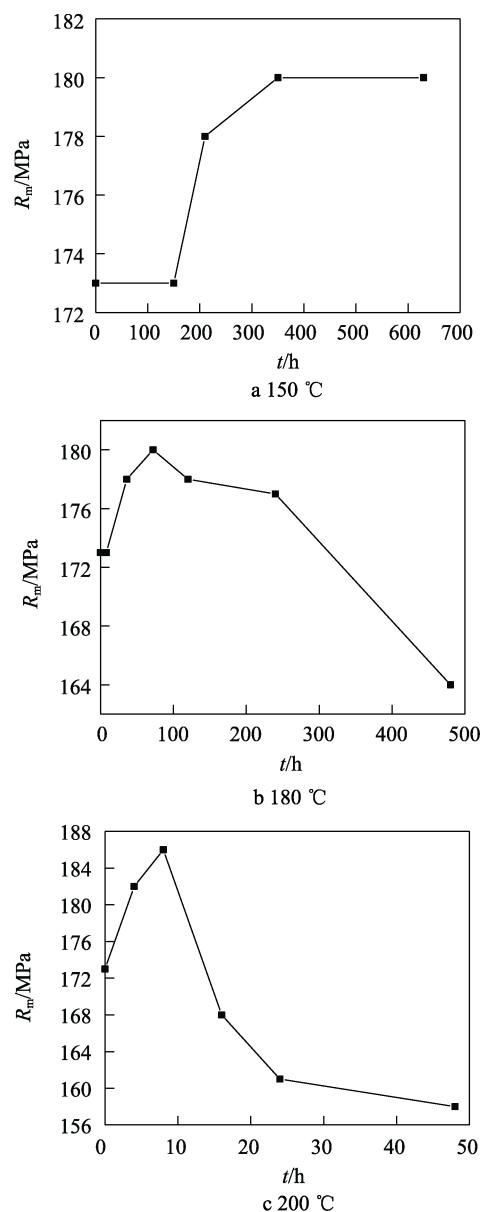


图 1 不同温度下时效铝合金导线的 R_m 与时效时间的关系
Fig.1 R_m of the Al alloy conductor wire varied with the aging times at different temperatures

效温度的升高, 其强度保持率逐渐下降。即便经 230 °C、1 h 或 180 °C、480 h 时效, 铝合金导线的 R_m 仍能分别达到 160、164 MPa, 相较时效前铝合金导线的 R_m (173 MPa), 其强度保持率分别为 94% 和 96%, 依然满足 GB/T 30551—2014 的要求, 表明该高导耐热铝合金导线具有良好的强度保持率。同时, 在时效过程中, 该铝合金导线的电导率基本上呈现先增大、后逐渐趋于稳定的状态, 所有时效态铝合金导线的电导率均高于其初始值。综上所述, 该高导耐热铝合金导线的热稳定性优异。

2.2 第二相特性

如图 2 所示, 230 °C、1 h 时效后的铝合金导线中存在 2 种第二相: 其一为导线中添加的微合金元素

Zr、Y 及 Er 与 Al 形成的 $Al_3Zr(Er,Y)$ 类型的第二相; 另一种是由铝合金熔炼和后续热加工过程中与钢、铸铁工模具相接触或者由重熔废料时带入的杂质 Fe 元素形成的 Al_3Fe 第二相^[10]。

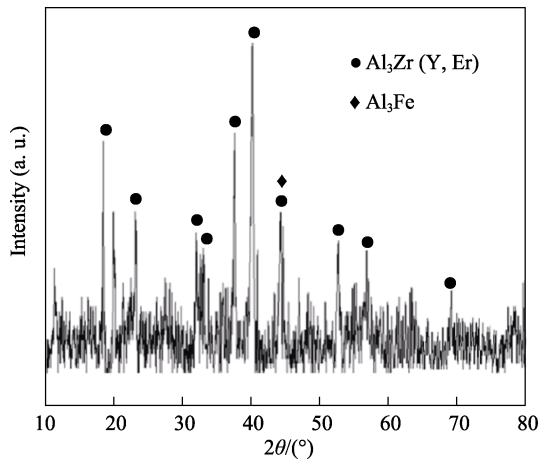


图 2 230 °C、1 h 时效铝合金导线溶解后萃取物的 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of the extracts dissolved from the Al alloy conductor wire aging at 230 °C for 1 h

结合时效铝合金导线拉伸断口上第二相的形貌 (见图 3) 分析及表 3 中的第二相成分测试可以看出,

时效铝合金导线中的 Al_3Zr 、 Al_3Er 和 Al_3Y 可以单独形成二元金属间化合物相 $Al_3Zr(Y,Er)$, 也可以形成 $Al_3[Zr(Y)_xEr_{1-x}]$ 多元合金金属间化合物相^[11]。 $Al_3Zr(Y,Er)$ 相的形态为颗粒状, 图 3a 中点 2 所指的球形颗粒尺寸较大, 接近 2 μm , 应为初生相, 而非时效过程中的弥散析出。图 3b、c 中点 5、6 所指的第二相同同时含有较多的 Zr、Y 和 Er 成分, 应为 $Al_3[Zr(Y)_xEr_{1-x}]$ 多元合金金属间化合物相, 形态呈针状^[12-13]。这些第二相颗粒除少部分分布于韧窝的底部外, 大多分布于韧窝的撕裂棱上, 表明大多数的第二相颗粒仍能随 Al 基体一起发生塑性变形, 协调性较好, 对时效铝合金导线的塑性影响不大, 甚至因为第二相的析出, Al 晶格畸变程度降低, 变形能力提高, 而使得时效铝合金导线的塑性提高。此外, 该铝合金导线中的杂质元素 Fe 在时效过程中, 与 Al 形成颗粒状的 Al_3Fe , 分布于韧窝底部, 反而对时效铝合金导线的塑性有一定的不利影响。这些 Al_3Fe 颗粒都或多或少地含有 Er (点 4、7), 说明 Er 对 Al 中的杂质元素 Fe 有很强的吸附性, 促进其在 Al 晶界处偏聚^[11,14-18]。点 4、7 所指第二相颗粒的 Al、Fe 成分比十分接近 Al_3Fe , 说明其为 Al_3Fe 金属间化合物, 与图 2 的 XRD 结果一致。Al 晶界 Al_3Fe 相的析出, 有效减少了 Al 晶内的固溶杂质, 有助于提高铝合金导线的综合性能^[10]。

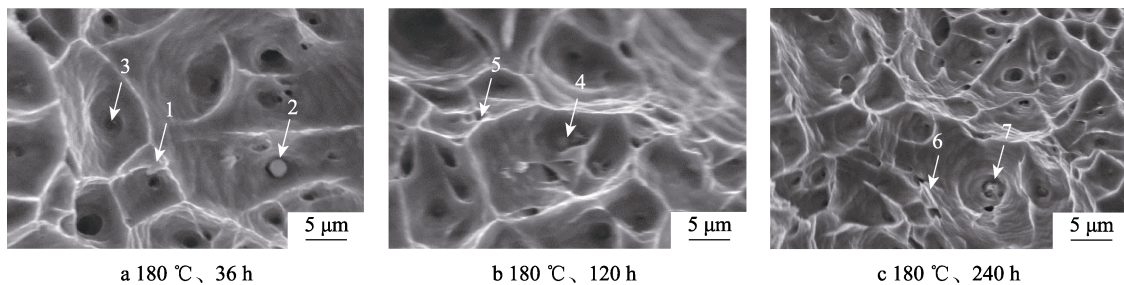


图 3 时效铝合金导线中第二相的形态

Fig.3 Morphologies of the secondary phases in the aging Al alloy conductor wire at different temperatures and time

表 3 图 3 上各点的成分

Tab.3 Chemical compositions of the points in fig.3

位置	Zr	Y	Er	Fe	Al
1	—	—	5.48	—	94.52
2	3.16	1.61	—	—	95.23
3	1.14	2.28	—	—	96.58
4	—	—	0.65	37.65	61.7
5	2.41	1.61	5.15	—	90.84
6	3.59	2.23	1	—	93.18
7	—	—	2.12	31.7	66.18

由图 4a 可见, 未时效铝合金导线拉伸断口上的韧窝深度大, 尺寸较小, 且大小均匀, 表明铝合金导线的塑性变形性能良好。在 180 °C 时效初期, 伴随着

细小第二相的逐渐析出, 铝合金导线拉伸断口上的韧窝变得更加细密, 尺寸减小, 韧窝深度有所降低 (见图 4b、c)。由于第二相颗粒大多在 Al 的晶界析出, 导致晶界的变形能力降低, 但因第二相小而弥散, 铝合金导线整体变形协调性仍保持较高水平。同时, 伴随第二相的析出, Al 晶内合金元素含量减少, 晶格畸变降低, 塑性变形能力增强。因此, 相对于未时效铝合金导线, 其塑性指标并未发生明显变化, 甚至有所提高。随着时效时间的延长, 铝合金导线断口上出现较大尺寸韧窝, 尺寸均匀性降低, 且韧窝较浅 (图 4d—g)。这是因为, 经过较长时间的高温时效处理, 铝合金导线中第二相析出的速率降低, 已析出的第二相聚集长大, 逐渐粗化 (Ostwald 熟化)^[19], 与 Al 基体的变形协调性降低, 铝合金导线的塑性随之减小。

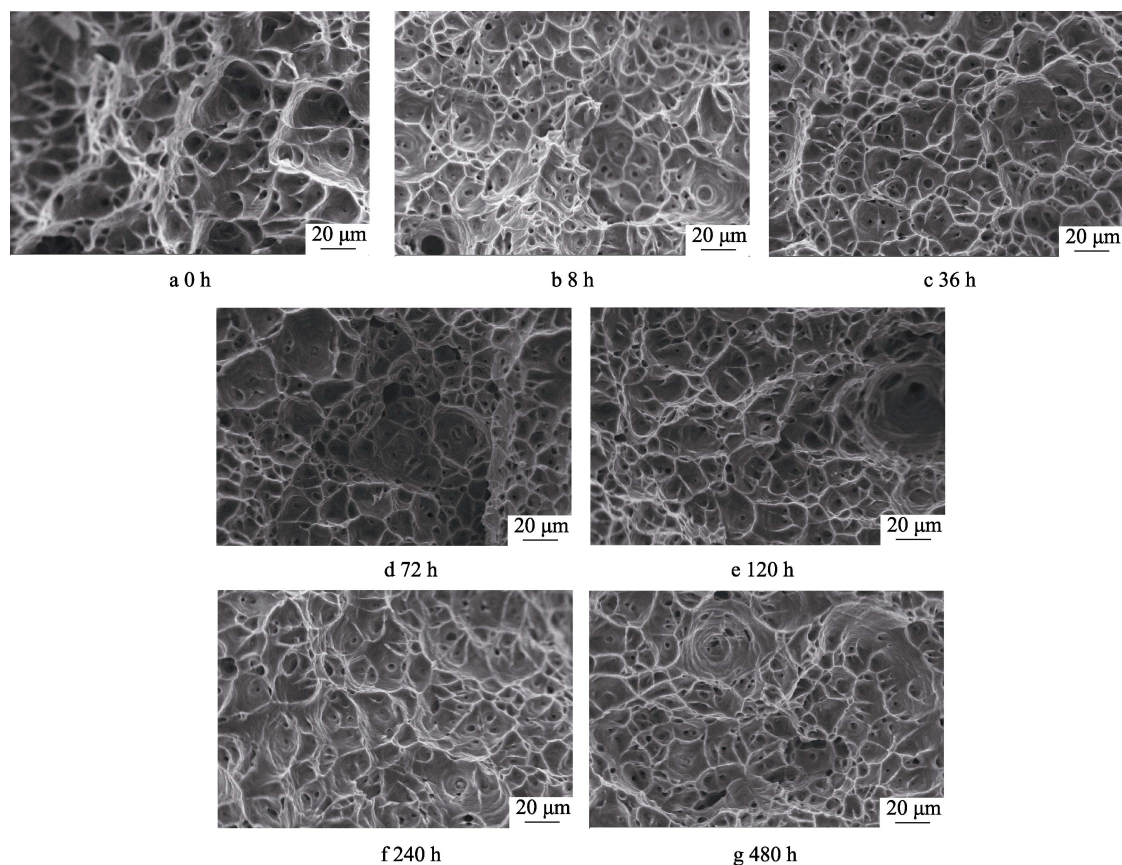


图4 180 °C时效不同时间铝合金导线的拉伸断口形貌
Fig.4 SEM fractographies of the Al alloy conductor wire aging at 180 °C under different times

综上所述,该 61.5%IACS 铝合金导线中的合金元素 Zr、Y、Er 及杂质元素 Fe 有 2 种存在形式。当其含量很少时 (Zr、Y 和 Er 总的质量分数 $\leq 0.1\%$ ^[20-21], Fe 在 Al 中的最大固溶度为 0.052%^[22]),它们溶于 Al 基体中,形成置换固溶体。此时,随着合金元素及杂质元素含量的增加,合金电阻升高,电导率下降^[23]。同时,因为固溶强化效应,铝合金导线的强度增加,但塑性降低。随着合金元素含量的提高,Zr、Y 和 Er 等合金元素以 $Al_3Zr(Y,Er)$ 和 $Al_3[Zr(Y)_xEr_{1-x}]$ 等金属间化合物的形式弥散分布于 Al 的晶界、晶内。同时,Zr、Y 和 Er 等合金元素促进 Fe 向 Al 的晶界偏聚,并以 Al_3Fe 颗粒的形式析出^[24-25]。合金元素以金属间化合物第二相颗粒的形式析出,Al 基体的晶格点阵畸变程度降低,电子散射降低,其电导率相应提高^[26]。此外,在时效初期,析出第二相尺寸细小,数量逐渐增多,且在 Al 基体中分布均匀,对 Al 晶界及位错的钉扎作用增强,铝合金导线的 R_m 持续增大。在 180 °C 以上较长时间时效条件下,伴随着第二相颗粒的聚集长大粗化,其对位错及 Al 晶界的钉扎作用减弱,铝合金导线的 R_m 及塑性下降。同时,时效过程中的 Al 晶粒长大及位错密度降低也会导致铝合金导线的 R_m 降低,但电导率提高。此外,时效温度越高,上述显微组织结构的变化越快,铝合金导线 R_m 由升高到降低的转折点就会越早发生,导线的强度保

持率及热稳定性明显降低。

3 结论

1) 伴随着时效过程,61.5%IACS 高导耐热铝合金导线的抗拉强度及伸长率先上升、再逐渐下降。同时,电导率先增大、后逐渐趋于稳定,这种趋势随时效温度的升高而加快。经 230 °C、1 h 时效处理,铝合金导线的强度保持率高达 94%,满足 GB/T 30551—2014 的要求,所有时效态铝合金导线的电导率均高于其初始值,该高导耐热铝合金导线的热稳定性良好。

2) 在时效过程中,铝合金导线中的微量合金元素以 $Al_3Zr(Y,Er)$ 和 $Al_3[Zr(Y)_xEr_{1-x}]$ 第二相的形式析出,在 Al 晶内、晶界弥散分布。同时,其中的 Fe 杂质元素以 Al_3Fe 的形式在 Al 晶界析出。

3) 第二相的析出、长大是引起时效态铝合金导线力学性能及电导率变化的主要原因,同时 Al 晶粒长大及位错等缺陷的消除也对时效铝合金导线的性能产生一定的影响。

参考文献:

- [1] 北极星电力网. “一带一路”能源研究报告[EB/OL]. 2018.03.26. <http://news.bjx.com.cn/html/20170513/8253->

- 09-8.shtml.
Polaris Power Network. "One Belt One Road" Energy Research Report[EB/OL]. 2018.03.26. <http://news.bjx.com.cn/html/20170513/825309-8.shtml>.
- [2] 张强, 杨长龙, 韩钰, 等. 耐热铝合金导线综述[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22): 35-37.
ZHANG Qiang, YANG Chang-long, HAN Yu, et al. Summary of Heat-Resistant Aluminum Alloy Conductors[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(22): 35-37.
- [3] 赖存明. Zr、B、Er 对耐热导电铝合金微观组织及性能影响的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
LAI Cun-ming. Study on the Effect of Zirconium Erbium and Boron on the Microstructure and Properties of Thermal-Resistant Conductive Aluminium Alloy[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [4] 高红选, 张晓燕, 黄鑫, 等. 钼、铜及稀土铈元素对铝电工圆杆组织和性能的影响[J]. 功能材料, 2015, 46(3): 3073-3076.
GAO Hong-xuan, ZHANG Xiao-yan, HUANG Xin, et al. The Effect of Zr, Cu Elements and Rare Earth Ce on Microstructure and Property of the Electrical round Rod[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(3): 3073-3076.
- [5] 侯雅尘, 杨昇, 蔡彬, 等. Er、Zr、B 对耐热导电铝合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(5): 550-553.
HOU Ya-chen, YANG Sheng, CAI Bin, et al. Effects of Er, Zr and B on Microstructure and Properties of Heat-Resistance Conductive Aluminum Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(5): 550-553.
- [6] 韩钰, 夏延秋, 刘东雨, 等. 微量 Zr、Er 对导线用耐热铝合金性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(7): 71-73.
HAN Yu, XIA Yan-qiu, LIU Dong-yu, et al. Effects of Trace Elements Zr and Er on Heat-Resistance of Aluminum Alloy Wires[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(7): 71-73.
- [7] 邱跃武. Al-Er 高强耐热导电铝合金的性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
QIU Yue-wu. Properties Research of Al-Er High-Strength Thermal-Resistant Conductive Aluminium Alloy[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [8] 周立宪, 郑树会, 李冬青, 等. 输电线路导线单线长时高温运行条件下的强度损失[J]. 理化检验(物理分册), 2019, 55(9): 621-625.
ZHOU Li-xian, ZHENG Shu-hui, LI Dong-qing, et al. Strength Loss of Single Line of Transmission Line Conductors under Condition of Long Time and High Temperature Operation[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2019, 55(9): 621-625.
- [9] 王宏颖. 退火处理对高导耐热铝合金导线组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(24): 141-143.
WANG Hong-ying. Effects of Annealing Treatment on Microstructure and Properties of High Conductivity and Heat Resistant Aluminum Alloy Wire[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(24): 141-143.
- [10] 章德胜, 刘平, 刘新宽, 等. 高导电率、高强度耐热铝合金导体材料的研究进展[J]. 热加工工艺, 2012, 41(24): 24-27.
ZHANG De-sheng, LIU Ping, LIU Xin-kuan, et al. Research on Progress of High-Conductivity and High-Strength of Aluminum Conductor Material[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(24): 24-27.
- [11] WEN S P, XING Z B, HUANG H, et al. The Effect of Erbium on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Mn-Zr Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 516(1-2): 42-49.
- [12] 王秀芳. Zr 元素对铝合金导线组织及性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
WANG Xiu-fang. Effect of Zr on the Microstructure and Properties of Aluminum Alloy Conductor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [13] 李飞, 朱庆丰, 王文静, 等. Al-5Zr 中间合金初生 Al₃Zr 相三维形貌及其对浇注温度的依赖性[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2397-2402.
LI Fei, ZHU Qing-feng, WANG Wen-jing, et al. Three-Dimensional Morphology of Primary Al₃Zr Phase in Al-5Zr Master Alloy and Its Dependence on Pouring Temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2397-2402.
- [14] 张强, 许超, 李海龙, 等. 耐热铝合金导体材料的研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(19): 7-10.
ZHANG Qiang, XU Chao, LI Hai-long, et al. Research Progress on Heat-Resistant Aluminum Alloy Conductor Materials[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(19): 7-10.
- [15] 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.
ZHANG Guo-ling. The Effects of Alloying Elements Content and Processing Technology on Properties of 8030 Aluminum Alloy[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [16] NIE J F, MUDDLE B C. Strengthening of an Al-Cu-Sn Alloy by Deformation-Resistant Precipitate Plates[J]. Acta Materialia, 2008, 56(14): 3490-3501.
- [17] MAHMUDI R, SEPEHRBAND P, GHASEMI H M. Improved Properties of A319 Aluminum Casting Alloy Modified with Zr[J]. Materials Letters, 2006, 60(21-22): 2606-2610.
- [18] 王剑钊, 王少华, 房灿峰, 等. Zr 对 2E12 铝合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(2): 247-251.
WANG Jian-zhao, WANG Shao-hua, FANG Can-feng, et al. Effects of Zr on Microstructures and Mechanical Properties of 2E12 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(2): 247-251.
- [19] 段谟刚. HR3C 钢管服役状态及其运行可靠性评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
DUAN Mo-gang. Evaluations on Service States and Running Reliabilities of HR3C Heat Resistant Steel Tubes[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.

- [20] 孙顺平, 易丹青, 陈振湘, 等. Er 在 Al-Mg-Si 合金中的存在形式及其热力学分析[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(1): 138-143.
SUN Shun-ping, YI Dan-qing, CHEN Zhen-xiang, et al. Form and Thermodynamic Analysis of Element Er in Al-Mg-Si Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(1): 138-143.
- [21] 徐国富, 聂祚仁, 金头男, 等. 微量铈对 LF₃ 铝合金铸态组织的影响[J]. 中国稀土学报, 2002, 20(2): 143-145.
XU Guo-fu, NIE Zuo-ren, JIN Tou-nan, et al. Effects of Trace Erbium on Casting Microstructure of LF₃ Al-Alloy[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2002, 20(2): 143-145.
- [22] 韩钰. 稀土微合金化高导电率耐热铝合金材料研究、表征及其微动磨损性能研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
HAN Yu. Research on Rare Earth Microalloyed High Conductivity, Heat-Resistant Aluminum Alloy Materials and Wear Properties[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [23] ROY R K, KAR S, DAS K, et al. Microstructures and Tensile Properties of Commercial Purity Aluminium Alloy AA1235 under Different Annealing Conditions[J]. Materials Letters, 2005, 59(19-20): 2418-2422.
- [24] KARABAY S, UZMAN I. Inoculation of Transition Elements by Addition of AlB₂ and AlB₁₂ to Decrease Detrimental Effect on the Conductivity of 99.6% Aluminium in CCL for Manufacturing of Conductor[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(2): 174-182.
- [25] 李静, 杨昇, 蔡斌, 等. Al-Er-xZr 系列耐热铝合金导线的组织与性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(11): 25-28.
LI Jing, YANG Sheng, CAI Bin, et al. Microstructure and Properties of Al-Er-x Zr Heat-Resistant Aluminum Alloy Conductor[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(11): 25-28.
- [26] 蒋炜华, 李昊, 张乃保. Zr 元素对耐热铝合金导线组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(8): 71-73.
JIANG Wei-hua, LI Hao, ZHANG Nai-bao. Effects of Zr Element on Microstructure and Properties of Heat-Resistant Aluminum Alloy Wire[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(8): 71-73.

责任编辑: 刘世忠