

文章编号:1673-9981(2018)01-0032-04

时效工艺对 Al-Mg-Si 合金导线抗拉强度和导电率的影响^{*}

杨莉¹, 陆冠华¹, 康跃华¹, 王顺成¹, 翟元辉², 张志敏²

1. 广东省材料与加工研究所, 广东 广州 510650; 2. 广东新亚光电缆实业有限公司, 广东 清远 511500

摘要:采用连铸连轧和拉拔工艺制备 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线, 利用直流双臂电桥和拉伸试验机, 研究了自然时效和人工时效工艺对 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线抗拉强度和导电率的影响。结果表明:随着自然时效时间延长, 铝合金导线的抗拉强度提高, 导电率下降。当自然时效 192 h 时, 铝合金导线的抗拉强度达到最大值 318 MPa, 导电率为 52.5% IACS。随着人工时效时间延长, 铝合金导线的抗拉强度和导电率提高。在 175 °C 人工时效 8 h 时, 铝合金导线的抗拉强度达到最大值 330 MPa, 导电率为 55.6% IACS。

关键词: Al-Mg-Si 合金; 铝合金导线; 时效处理; 导电率

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

随着我国国民经济的高速发展, 电力工业建设突飞猛进, 输电线路建设正朝着长距离、大跨越、大容量方向发展^[1]。我国现有长距离、大跨越架空输电线路的电缆主要是由纯铝导线加工而成的钢芯铝绞线, 这种钢芯铝绞线的电能损耗较大。为了降低输电线路的电能损耗, 迫切需要开发高强度的铝合金导线来制造全铝合金绞线, 代替传统的钢芯铝绞线^[2]。全铝合金绞线的全部线股均由同质的铝合金线绞成, 具有输送容量大、电能线路损耗少、耐腐蚀、弧垂特性好和施工便利等优点^[3-4]。Al-Mg-Si 系合金是可热处理强化的铝合金, 是全铝合金绞线的主要合金材料^[5-6]。为了优化 Al-Mg-Si 系合金导线的热处理工艺, 本文采用连铸连轧和拉拔工艺制备了 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线, 研究了自然时效和人工时效工艺对 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线抗拉强度和导电率的影响。

1 试验材料与方法

试验材料为 Al-0.8Mg-0.7Si 合金, 采用工业纯

铝(质量分数 99.7%)、速溶硅(质量分数 99.5%)和纯镁(质量分数 99.8%)通过熔炼制成。实验设备为 15 t 双室熔炼炉、圆形倾动式保温炉、LGZ-1600 型轮带式连铸机和 15 机架 Y 型连轧机, 连铸机结晶轮直径为 1600 mm, 连铸坯横断面积为 2400 mm²。

在双室熔炼炉内加热熔化工工业纯铝锭并升温至 760 °C, 然后加入速溶硅和纯镁锭, 搅拌熔化成铝合金液, 经精炼和扒渣后, 将铝合金液转入圆形倾动式保温炉内进行调温和保温, 最后连铸连轧成直径 9.5 mm 的 Al-0.8Mg-0.7Si 合金圆杆。铝合金液浇铸温度为 710 °C, 连铸机结晶轮转动线速度为 0.2 m/s, 冷却水流量为 60 m³/h, 终轧速度为 6.2 m/s。

将 Al-0.8Mg-0.7Si 合金圆杆拉拔成直径 4 mm 的铝合金导线, 在 520 °C 固溶处理 1 h 后进行水淬, 然后分别进行自然时效和人工时效。时效处理后, 用 QJ-31 型双臂电桥仪测量 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率, 用 DNS200 型电子拉伸机检测 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度(拉伸速度 2 mm/min)。

收稿日期: 2017-10-23

^{*} 基金项目: 清远市清城区科技计划项目资助(201601)

作者简介: 杨莉(1979-), 女, 广西柳州人, 工程师, 本科。

2 试验结果与分析

2.1 自然时效对抗拉强度的影响

图 1 为 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度与自然时效时间之间的关系曲线.由图 1 可知,随着自然时效时间的延长,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度逐渐提高.当自然时效时间超过 72 h 后,抗拉强度的提高速度开始下降.当自然时效时间达到 192 h 时,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度达到最大值 318 MPa.随着自然时效时间继续延长,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度出现小幅度下降.固溶处理后的 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线是过饱和固溶体,这种过饱和固溶体不稳定,在室温保存时就会发生自然时效作用.在 G. P. 区或原子团簇形成后,位错切过相质点所需的力随着 Mg_2Si 强化相尺寸的增大而急剧增加^[7],使 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度逐渐升高.但是由于室温下的外界驱动力较小,自由能的变化驱动着 G. P. 区或原子团簇的形成, Mg_2Si 强化相尺寸不会一直增大,驱动力也不足以使其发生相转变,导致后续自然时效引起 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度升高速率逐渐减小.在达到室温下的 Mg_2Si 强化相平衡后,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度不再继续升高,在保持一个相对稳定阶段后,开始出现小幅度下降.

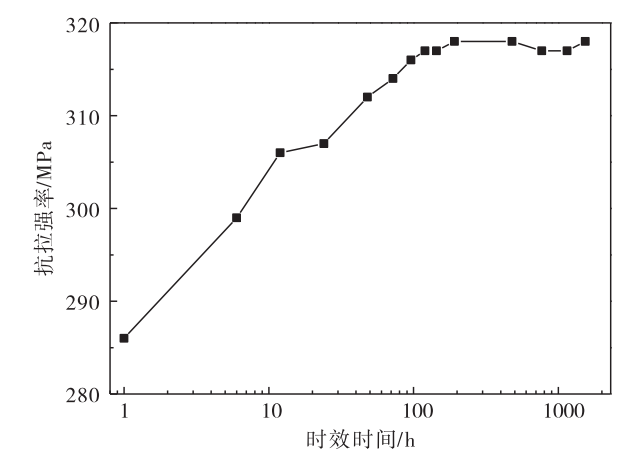


图 1 自然时效对铝合金导线抗拉强度的影响
Fig.1 Effect of natural aging on tensile strength of Al-Mg-Si alloy wires

2.2 自然时效对导电率的影响

图 2 为 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率与自然时效时间之间的关系曲线.由图 2 可知,随自然时效时间延长,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率逐渐下降.当自然时效时间为 1 h 时,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率降至最低,导电率为 52.5% IACS.当自然时效时间超过 1 h 后,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率略有波动,但总体较稳定.上述结果表明,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的自然时效作用比较明显,自然时效时导电率趋于稳定的时间约为 1 h.铝合金导电率的变化与其内部微观结构的变化密切相关,根据量子力学中的经典电子理论^[8],自然时效过程中,铝合金强化相的数量增多,原子团簇质点与铝基体存在共格关系,共格界面具有较小的界面能.应变能在不同的界面关系中会变大,原子团簇析出导致应变能增大而强化铝合金,弹性应变的增大增加了自由电子的散射程度,使自由电子的平均自由程减小,最终导致 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率下降.

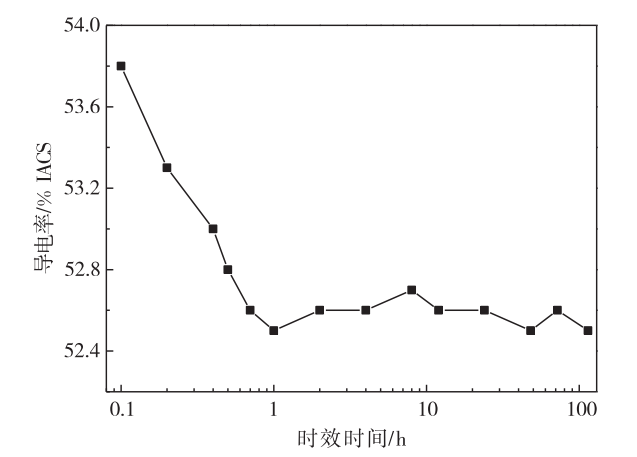


图 2 自然时效对铝合金导线导电率的影响
Fig.2 Effect of natural aging on conductivity of aluminum alloy wires

2.3 人工时效对抗拉强度的影响

在不同温度下进行人工时效,时效时间对 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线抗拉强度的影响如图 3 所示.由图 3 可知,在不同温度下进行人工时效,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度均随时效时间延长而不断提高.人工时效的温度越高,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线抗拉强度的提高速率越快,越早到达抗拉强度的峰值平台.在 175 ℃ 温度下人工时效

8 h 时,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度达到最大值 330 MPa,合金导线具有最佳的时效强化效果. 在 185 ℃ 人工时效 6 h 时,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度达到峰值平台;在 195 ℃ 人工时效 4 h 后,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度达到峰值平台,但其抗拉强度都低于 330 MPa.

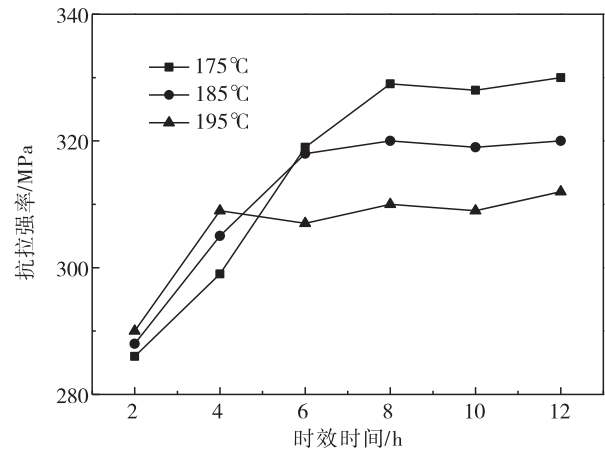


图 3 人工时效对铝合金导线抗拉强度的影响
Fig.3 Effect of artificial aging on tensile strength of aluminum alloy wires

从 Al-0.8Mg-0.7Si 合金的脱溶序列可知,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线在 175 ℃ 人工时效过程中,析出相主要为 β' 过渡相. 随着时效时间的延长, β' 过渡相的密度增大,但是析出相平均尺寸在迅速长大后基本维持不变^[9]. 当达到抗拉强度峰值后,由于析出相的种类没有发生变化,其抗拉强度值变化较小. 在 185 ℃ 和 195 ℃ 进行人工时效,析出相的类型为 β' 和 β' 过渡相的混合,而非单一的 β' 相. 由于 β' 过渡相比较易生长,在 185 ℃ 和 195 ℃ 时效时,铝合金导线的相平均尺寸在时效初期就大于 175 ℃ 时效,故人工时效初期,时效温度高的抗拉强度也高. 在 185 ℃ 人工时效过程中, β' 和 β' 过渡相的数量随时效时间增加而变化较小,这也反映在铝合金抗拉强度的变化上^[10]. 但是在 195 ℃ 人工时效过程中,析出的 β' 过渡相随着时效时间的增加而增多,时效时间为 4 h 时析出相主要为 β' 相,这也导致 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度在时效 4 h 后没有继续提高.

在 175 ℃ 人工时效过程中,强化相为单一的 β' 过渡相,随着析出相体积分数增大,析出相的密度增大,位错切过析出相的切应力大幅增加,从而提高 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度. 但是随着析

出相的粗化,位错绕过析出相所需的切应力小于其切过的应力,此时位错的奥罗万机制启动,使得析出相的强化作用降低^[11]. 在 185 ℃ 和 195 ℃ 下,析出相的粗化一方面降低了析出相的密度,另一方面 β' 过渡相的出现降低了析出相与基体的连续性,而且 β' 相也极易长大,这都降低了对 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的强化作用.

2.4 人工时效对导电率的影响

在不同温度下进行人工时效,时效时间对 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线导电率的影响如图 4 所示. 由图 4 可知,随着人工时效时间的延长,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率呈上升趋势. 在时效前期,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率变化速率随着时效温度升高而增大. 在 195 ℃ 人工时效 4 h 后,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率曲线开始进入稳定平台. 在 185 ℃ 人工时效 6 h 后,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率曲线开始进入稳定平台. 在 175 ℃ 进行人工时效时,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率曲线进入稳定平台最晚,当时效时间为 8 h 时,导电率为 55.6 %IACS.

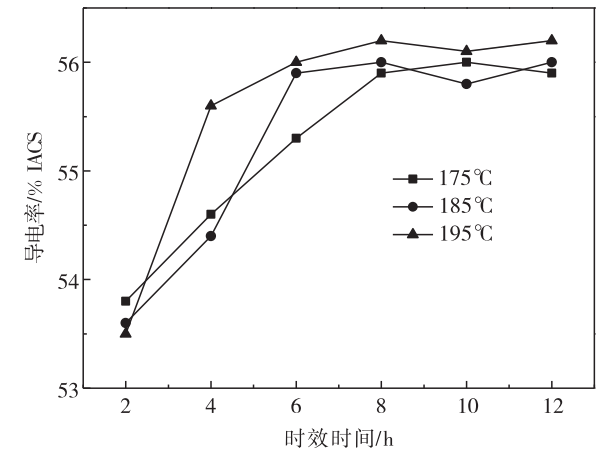


图 4 人工时效对铝合金导线导电率的影响
Fig. 4 Effect of artificial aging on conductivity of aluminum alloy wires

在 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线人工时效的初始阶段,析出相的尺寸较小,同时存在大量的原子团簇,与自然时效时一样,原子团簇加剧了对电子的散射作用,而脱溶析出又会消耗溶质原子,使电子运动阻力减小,这两个作用叠加之后使得 Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线在时效初期的导电率相对较低. 随着时效时间的增加,原子团簇转变为 β' 和 β' 过渡相,使原子团簇对电子的散射作用迅速减弱,导电率迅

速提高。 β' 相的尺寸比 β'' 相大,故 β' 相对溶质原子的消耗也比 β'' 相多,这使得 β' 相的析出大大加快了导电率的增加。时效温度升高会加剧析出相的形核长大,并且随着时效温度的升高, β' 相开始形核, β' 相比 β'' 相更容易长大, β' 相的长大与其周围的位错环密切相关,其相尺寸一般都比 β'' 相大,会消耗更多的溶质原子,使导电率上升更快^[12]。这使得在 195 ℃ 和 185 ℃ 进行时效时,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的导电率上升速率大于在 175 ℃ 时效的。

3 结 论

随着自然时效时间延长,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度逐渐提高,导电率逐渐下降。当自然时效时间为 192 h 时,铝合金导线的抗拉强度达到最大值 318 MPa,导电率为 52.5 %IACS。随着人工时效时间延长,Al-0.8Mg-0.7Si 合金导线的抗拉强度和导电率均逐渐提高。在 175 ℃ 人工时效 8 h 时,铝合金导线的抗拉强度达到最大值 330 MPa,导电率为 55.6 %IACS。

参考文献:

[1] 刘斌,郑秋,党朋,等. 铝合金在架空导线领域的应用及发展[J]. 电线电缆,2012(4): 10-15.
[2] 万建成,冯学斌,莫娟. 特高压大跨越导线选型研究[J].

电力设备,2007,8(4):1-5.
[3] 何健,陈光. 新型铝合金芯铝绞线在输电线路中的应用[J]. 吉林电力,2011,15(2):48-51.
[4] 杨恩娜,吴细毛,李春和,等. 架空导线用铝合金的机电性能及现状与发展[J]. 材料导报,2014,28(9):111-116.
[5] 何桂明,汤涛,李如振. 高强度全铝合金导线在输电线路中的应用[J]. 山东电力技术,2004(3):56-58.
[6] 李文浩,刘斌. GB/T23308—2009 架空绞线用铝镁硅系合金圆线[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
[7] 宋竹满,吴细毛,李春如,等. 变形量和热处理对 6060 铝合金力学性能和导电率的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(1):42-46.
[8] 高鹏. 影响连铸连轧电工铝杆性能的分析[J]. 热加工工艺,2012,41(17):37-39.
[9] 纪艳丽,潘琰峰,郭富安. 退火温度对 6xxx 系铝合金 β'' 相析出动力学的影响[J]. 中国有色金属学报,2007,17(11): 1855-1859.
[10] 徐掌印,柴挨俊,姜银举,等. 提高电工圆铝杆抗拉强度和导电性能的措施[J]. 铸造技术,2008,29(9): 1262-1263.
[11] 李慎兰,黄志其,蒋福利,等. 固溶温度对 6061 铝合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013,34(5): 131-136.
[12] 钟警,郑子樵,余玲娟,等. 时效制度对 AA6156 铝合金拉伸性能和断裂韧性的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2013,42(10):2163-2168.

Effect of aging process on tensile strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloy wires

YANG Li¹, LU Guanhua¹, KANG Yuehua¹, WANG Shuncheng¹, ZHAI Yuanhui², ZHANG Zhimin²

1. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China; 2. Guangdong Xinya Cable Industrial Co., Ltd., Qingyuan 511500, China

Abstract: The Al-0.8Mg-0.7Si alloy wires were prepared by continuous casting-rolling and drawing process. The effects of natural aging and artificial aging process on tensile strength and conductivity of Al-0.8Mg-0.7Si alloy wires were investigated by electrical conductivity measurement and tensile testing machine. The results show that with the extension of natural aging time, the tensile strength of alloy wire is increased gradually, while the conductivity is decreased gradually. The maximum tensile strength of alloy wire with natural aging is 318MPa, while the conductivity is 52.5%IACS. With the prolongation of artificial aging time, the tensile strength and conductivity of alloy wires are increased gradually. At the artificial aging process of 175 ℃ with 8h, the maximum tensile strength of alloy wire is 330MPa and the conductivity is 55.6%IACS.

Key words: Al-Mg-Si alloy; aluminum alloy wire; aging process; conductivity