

稀土改性高电导率铝合金研究进展

张 方¹ 于 鑫¹ 邹大鹏¹ 于笑辰¹ 杨长龙² 杨立军³ 孟祥辉³ 丁 一⁴

(1. 国网辽宁省电力有限公司丹东供电公司; 2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司;

3. 江苏亨通电力电缆有限公司; 4. 全球能源互联网研究院有限公司先进输电技术国家重点实验室)

摘 要 近年来国家经济快速发展,多行业对电力的需求量逐渐增大,电网基础设施建设不断推进,其中大容量、高电压、远距离输电线路的建设数量不断增加,普通钢芯铝绞线在线路运行中出现一些问题,迫切需要研发出一种拉重比大、弧垂性能好、电能损耗小及耐腐蚀性优的新型节能输电导线,以满足我国电力行业发展的要求。稀土元素添加对电工用铝合金的电导率有明显改善,系统介绍了高导电稀土改性铝合金材料的成分、工艺和性能之间关系,以对工程应用提供参考。

关键词 铝合金;稀土;高导;中强度

中图分类号 TG142.1;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Rare Earth Modified Aluminum Alloy with High Conductivity

Zhang Fang¹, Yu Xin¹, Zou Dapeng¹, Yu Xiaochen¹, Yang Changlong², Yang Lijun³,
Meng Xianghui³, Ding Yi⁴

[1.Dandong Power Supply Company of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd.;

2.Shenyang Power Supply Company of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd.;

3.Jiangsu Hengtong Power Cable Co., Ltd.; 4.State Key Laboratory of Advanced Power
Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.)]

Abstract: In recent years, due to rapid development of national economy, the demand for electricity from various industries is gradually increased, and the construction of power grid infrastructure is constantly promoted. With the escalation of quantities of high-capacity, high-voltage, remote transmission line, there appear some problems in the running of ordinary steel-cored aluminum stranded wire. In order to meet the national power industry development requirements, it is urgently needed to prepare a new energy-saving conductor with large proportion of draw-weight, desirable sag performance, low energy loss and optimal corrosion resistance. Considering that the electrical conductivity of aluminum alloy can be improved by rare earth elements, the relationship among the material composition, technology and performance of a new rare earth aluminum alloy material was mainly introduced, which can provide reference for engineering application.

Key Words: Aluminium Alloys, Rare Earth, High Conductivity, Medium Strength

经济的高速发展,促进了电网技术的进步,社会诸多行业对电力能源的需求愈发强烈。为满足“两型三新”电网需要,新材料、新技术、新工艺的开发日益受到关注。其中,中强全铝合金导线通常在超高压以及特高压输变电线路领域大量使用^[1,2]。

中强全铝合金导线使用的单根铝合金丝的抗拉强度在 230~265 MPa 之间。图 1 为国家标准列入的铝合金导线的 3 种结构样式:全铝合金绞线、铝合金芯绞线和钢芯铝合金绞线^[3]。在长距离输电线路领域中,我

国目前广泛使用的架空绞线是钢芯铝绞线,这种绞线采用铝合金导线和钢导线复合而成。和铝合金相比,钢的导电性能相对较差,所以钢芯铝绞线输电线路中通常会造造成较为严重的电能浪费。

而中强全铝合金导线有如下特点^[4,5]:①铝合金导线的拉重比更大,弧垂特性较好,能够适当地增大输电线路塔间距,一定程度上降低线路建设成本;②导线伸长率较好,具备良好的抗过载能力以及疲劳特性;③导线高温性能更好,可以在较高温度下使用,强度损失较小;

收稿日期:2021-04-28;修改稿收到日期:2021-06-01

第一作者简介:张方,男,1969 年出生,高级工程师,辽宁丹东(118000),E-mail:ddjyuxin@163.com

通信作者:丁一,男,1986 年出生,高级工程师,北京(102209),E-mail:dyadin@sina.com

引用格式:张方,于鑫,邹大鹏,等. 稀土改性高电导率铝合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):938-943.

ZHANG F, YU X, ZOU D P, et al. Research progress in rare earth modified aluminum alloy with high conductivity[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):938-943.

④导线表面耐损伤,线路铺建过程中导线表面擦伤现象会大幅减少,可以有效改善线路的铺建质量;⑤耐腐蚀,在大气环境中,导线具备良好的抗腐蚀能力,同时导线整体为铝合金材料,不会出现钢芯铝绞线中铝线和钢线两者存在的电化学腐蚀现象,服役寿命更长。

铝合金用作输电导线的关键技术是保证其较高的强度,与此同时具有良好的电导率,但现有中强全铝合金导线的电导率偏低(一般在 33.93 MS/m),是制约其在我国大规模推广应用的技术瓶颈。因此,为有效减少输电线路自身损耗的电能,迫切需要设计开发具备更高电导率的中强铝合金导线^[6,7],进而替代传统的钢芯铝绞线,实现新型输电线路的升级改造,满足我国高效节能、环保低碳的电网建设要求。

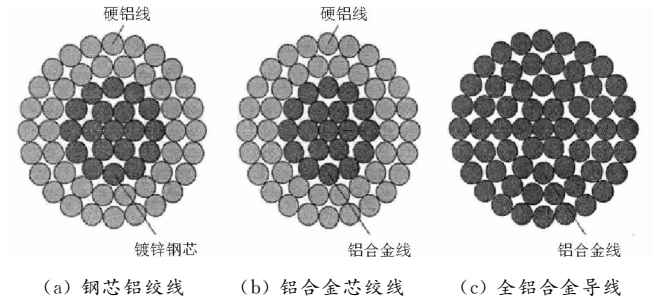


图 1 我国使用较为广泛导线结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of conductor structure widely used in China

1 合金配方体系与连铸连轧工艺设计

铝合金的电导率与抗拉强度彼此制约,为解决该技术难题,在确保高电导率中强度铝合金线抗拉强度(最小抗拉强度 ≥ 240 MPa)的前提下进一步提升电导率(电导率 ≥ 34.336 MS/m),需要对铝合金成分体系重新设计,同时对铝合金导线的制备工艺加以调整和优化。

在 20 世纪 50 年代,为了改进输电线路,美国最早设计开发了中强铝合金线-铝镁系 5005 合金。随后,许多国家也开始发展研制中强铝合金导线,见表 1^[8],通常有热处理型和非热处理型两种。由表 1 可见,除美国研制的铝镁系合金外,其他国家开发的中强铝合金线的电导率均有所改善,其中日本开发的 SI-26 型合金综合

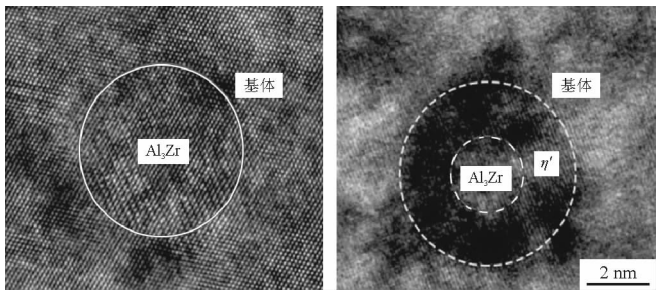
表 1 几种主要牌号的中强铝合金线的性能

Tab.1 Properties of several main grades of medium strength aluminum alloy wires				
国家	牌号	最小抗拉强度/MPa	最小伸长率/%	最小电导率/(MS·m ⁻¹)
美国	5005	225	1.3	31.03
	MS-AL	245	—	33.93
日本	KAL	250	4.7	33.64
	SI-26	250	5.5	33.93
瑞士	Ductalex	235	—	34.22

性能最好,在保证抗拉强度不低于 250 MPa 情况下,其伸长率为 5.5%。近年来,我国在中强铝合金的研制方面也做了许多工作,主要是在 SI-26 型合金的基础上进行成分调整与制备工艺改进,通过优化合金成分实现提高合金性能的目标,成功开发出中强铝合金线 LHA3。

中强全铝合金导线牌号较多,主要有 Al-Cu 系、Al-Mg 系、Al-Fe 系和 Al-Mg-Si 系。由相关研究可以发现,Al-Mg-Si 中强全铝合金导线的综合性能已经能够实现较为良好的调控,在保证塑性、耐蚀性等前提下合金的强度和电导率可以达到协调平衡的状态^[4,5]。调整工艺处理方法,不断优化工艺参数,达到强度与导电性综合性能的匹配。针对目前较为成熟的铝合金体系,结合铝合金导线研究来看,添加合适的元素是一种能够有效提高其综合性能的方法。

在 Al-Mg-Si 系合金中添加 Zr 元素之后,采用合适的热处理工艺,可以形成弥散的 Al₃Zr 相,这种中间相热稳定性好,在热处理过程中可以有效地阻碍晶界移动,抑制再结晶的发生,同时 Al₃Zr 相热稳定性良好,可以作为强化相提高合金在较高温度下的强度,同时还可以细化晶粒进而提高力学性能^[9~11]。图 2 为 Al₃Zr 粒子的 HRTEM 图像^[11]。YUAN W 等^[10]在 Al-Mg-Si 合金中添加微量的 Zr 后,合金的抗拉强度提高 50 MPa 左右,而电导率仅下降 0.87 MS/m,这表明 Zr 元素添加对合金的力学性能具备较好的改善效果。KARABAY S^[12]通过在合金熔体中引入少量的 AlB₂ 相,降低了体系中一些合金元素对于电导率的影响,保证了合金具备较高的电导率,对热处理工艺制定有一定的指导作用。经过调整后的热处理工艺有助于把合金的强度损失降到最低,这种方法可以实现较高强度和良好的电导率。通过优化工艺参数,成功制备出抗拉强度为 318 MPa,电导率为 32.77 MS/m 的铝合金导线。



(a) 独立结构 (b) 核壳结构
图 2 Al₃Zr 粒子的 HRTEM 图像

Fig.2 HRTEM image of Al₃Zr particles

稀土元素的化学性质较为活泼,可以和绝大部分的非金属元素结合形成比较稳定的稀土化合物,因此常常作为添加元素在合金中使用。稀土元素可以降低合金

中的杂质元素 H 和 O 含量,减少合金中气孔的数量,同时会与 P、S 等元素反应形成高熔点的化合物,减少合金中杂质元素含量。此外,在凝固过程中稀土会在固液界面前沿富集,增加合金的成分过冷,因此可以减小枝晶间距,在一定程度上起到细化晶粒的效果^[13~15]。由于稀土元素在铝合金中的除气除杂、细化晶粒等作用,因此研究者在稀土元素改性铝合金方面做了大量工作。杨莉等^[16]采用连铸连轧和拉拔工艺制备了稀土铝合金导线,发现添加微量的混合稀土元素(Ce、La)对铝合金导线可以起到净化基体和细化晶粒的作用,基体中形成了富 RE 相,富 RE 相是一种强化相,其在合金基体中弥散分布,因此使铝合金线的强度和电导率均得以改善。和没有添加混合 RE 的铝合金相比,添加 0.15%

的 RE 的铝合金线的电导率提高约 1.74 MS/m,这是因为 RE 可以与铝合金中 Fe、Si 等杂质元素形成富 RE 相,从而减少基体中溶解的 Fe、Si 元素,减轻基体的晶格畸变,从而提高了铝合金的电导率。在铝中添加适量的稀土 Er,能够改善合金的耐热性能同时 Er 还可以和合金中的 Si、Fe 等元素反应,净化合金^[17];在铝中同时添加 0.1% 的 Er 和 0.04% 的 Zr,结果发现合金的导电和耐热性能表现理想^[18]。图 3 为 Al-Cu-Mn 合金在不同固溶温度下的微观组织。可以发现温度过高时晶界附近会出现过烧现象,而温度较低时凝固过程中析出的共晶相不能溶解完全,所以根据材料特点选择合适的热处理工艺后,可以使得材料具有更为良好的综合性能^[19]。

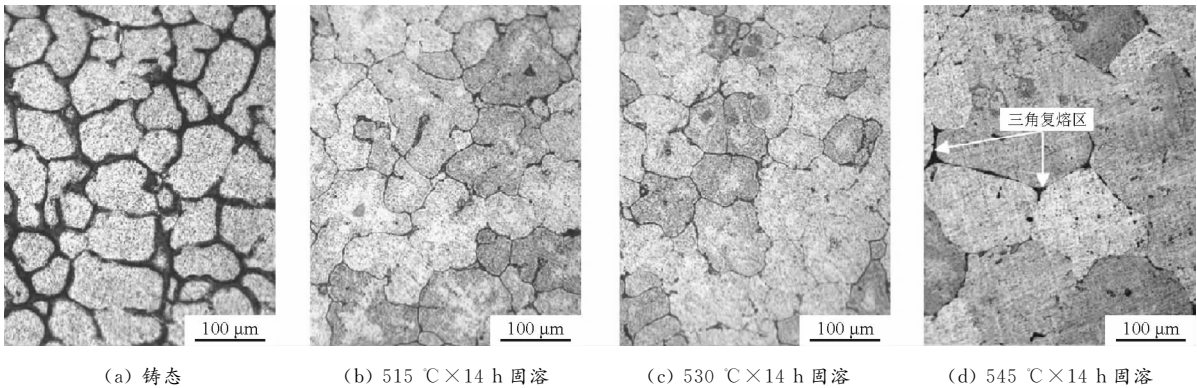


图 3 Al-Cu-Mn 合金在不同的固溶温度下的微观组织

Fig.3 Microstructure of Al-Cu-Mn alloy at different solution temperatures

合金元素加入一般以两种形式存在:作为溶质原子存在于基体以及作为析出相。这两种存在形式都会造成基体晶格发生一定程度畸变,从而影响合金的导电性能。表 2 为工业纯铝中几种常见的元素在固溶质量分数每增加 1%时对导电性的影响^[20]。

表 2 化学元素对工业纯铝电导率的影响

Tab.2 Effect of chemical elements on conductivity of industrial pure aluminum

元素	最大固溶度/%	电阻率增加/%	电导率降低/%
Si	1.650	0.947	17.1
Fe	0.052	2.750	33.1
Cu	5.650	0.342	7.4
Ti	1.000	3.000	34.5
V	0.600	3.800	38.3
Mn	1.850	3.320	35.7

合金成分对其综合性能起着重要作用,此外,合金的制备工艺也会对材料最终性能产生很大影响。杨勇等^[21]采用连铸连轧工艺制备铝合金圆杆,研究了连铸连轧工艺对于铝合金显微组织、力学性能和电导率的影响。连铸连轧会使坯料发生相当大的塑性变形,同时晶粒组织也会变形并逐渐破碎,微观组织出现大量的亚晶界和位错。亚晶界的出现会增加组织中的界面,界面对

于位错的移动产生阻碍作用,加上大量的位错之间也会发生相互作用,以及可能出现的位错缠结现象,所以这种工艺可以有效提高铝合金的强度,不过其塑性和电导率略有下降。

通过将新型高电导率中强铝合金导体配方和制备工艺参数进行协调配合,经过理论计算与试验验证,最终确定选用一套较为有效的高电导率中强铝合金配方体系以及相配套的合金制备工艺,确保单线性能满足设计要求。

(1) 原材料选择 选择用普通的工业纯铝锭(99.85%),同时添加一定比例的 Fe、Mg 和 RE 等元素,添加微量的稀土元素旨在纯净合金基体,降低杂质元素含量,保证铸锭的熔炼质量,同时多种稀土元素的复合添加可以起到较好的变质作用^[22],提高凝固过程的形核率,减小铝合金铸态组织中的晶粒尺寸。熔炼过程需要注意,炉内铝液温度不超过 755 °C。

(2) 成分检测 将已熔炼铝液倒入保温炉,经充分的均匀化以及搅拌,搅拌处理不得低于 10 min,取样用直读光谱仪实现及时检测,确认熔液中 Al、Fe、B、Si、Mg、La、Ce、Cu 等的含量^[23]。

(3)合金化 根据光谱测试数据,计算铝硼、铝铈、铝硅、铝铁、铝稀土、铝铜等合金锭的使用量。保温炉中的铝液温度需控制在 $(750 \pm 5)^\circ\text{C}$,投入相应的合金锭,选用人工加电磁搅拌 45 min,使铝液成分均匀化,保证铸造后材料成分较为均匀^[24]。该铝液主要成分见表 3。

表 3 高电导率中强铝合金化学成分

Tab.3 Chemical composition of aluminum alloy with high conductivity medium strength %						
w_B						
Si	Fe	Cu	Mg	B	La+Ce	Al
0.25~0.45	0.15~0.35	0.06~0.08	0.32~0.46	0.01~0.04	0.08~0.11	余量

(4) I 次精炼 当保温炉中的铝液温度控制在 $(750 \pm 5)^\circ\text{C}$ 时用高纯氮气作载体,在保温炉中喷入高效精炼剂从而完成精炼、除气、除杂等操作^[25]。精炼时需要仔细管控精炼剂的吹入速度与保温炉内充入氮气的压力,将铝液精炼的时间控制在 30 min 左右,氮气压力控制在 12~18 kPa 范围内^[26]。

(5)扒渣 将铝液静置 10 min 左右,除去铝液表面上漂浮的铝渣。

(6)成分调整 保温炉内铝液静置 40 min 左右,重新取样分析,按表 3 的要求进行确认,如存在偏离含量要求的元素,需要进行成分微调。

(7) II 次精炼 铝液经流槽进入过滤、在线除气设备,在流槽中经过喂丝机掺加 Al-Ti-B 丝^[27]。该过程目的是实现合金材料晶粒细化与导电性能提升。

(8)铸造 II 次精炼后的铝液需控制浇注温度在 $685 \sim 695^\circ\text{C}$,依据高电导率中强铝合金线直径对应的性能要求匹配性,设计杆材关键性能的参数控制范围,控制浇注速度、冷却水分布,使铸坯温度控制在 $485 \sim 505^\circ\text{C}$,利于浇注的坯料晶粒细小,避免坯料中心裂纹、缩松、气孔等缺陷。

(9)连续轧制 利用中频感应加热器处理,使铸坯温度保持在 $475 \sim 490^\circ\text{C}$ 进轧。

(10)淬火 选用稀乳化液对轧制的铝合金杆进行淬火处理^[28],将铝合金杆外表温度控制在 80°C 以下,可增加铝合金杆的抗拉强度。

经纯化处理和变质处理得到细小的晶粒及少量球化杂质相的铸造组织,见图 4。发现经过上述工艺处理后,微观组织整体较为均匀,没有出现较为明显的结构差异,均匀的组织结构有助于实现高电导率和强度的协同提高。采用上述工艺生产制备高电导率中强铝合金杆,其性能检测结果见表 4。铝合金杆的抗拉强度约为 170 MPa,其伸长率约为 9%,具备比较好的塑性,电导率为 31.9 MS/m,经过后续的热处理,有望满足中强高

导铝合金对电导率的要求。

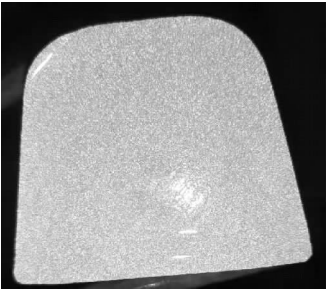


图 4 高电导率中强铝合金铸坯金相分析
Fig.4 Metallographic analysis of aluminum alloy slab with high conductivity and medium strength

表 4 高电导率中强铝合金杆性能

Tab.4 Performance of aluminum alloy rod with high conductivity and medium strength			
铝杆状态	抗拉强度/MPa	伸长率/%	电导率/(MS·m ⁻¹)
T4	172	9.8	31.929
	175	9.4	32.074
	174	9.0	32.028
均值	174	9.4	32.010

2 高导中强铝合金线拉线工艺优化

通过行业大数据统计分析,发现铝合金材料拉线的配模延伸系数、拉线油温、模具材质均对铝合金线电导率和力学性能有直接影响。经验证后采取将铝合金材料拉丝配模延伸系数控制在 1.18~1.22 之间、拉线油温控制在 $40 \sim 60^\circ\text{C}$ 以及使用纳米拉拔模等措施,使拉线塑性变形对导体材料电导率的抑制影响降到更低水平,这些措施在一定程度上能够提高铝合金线的抗拉强度,按此工艺批量制备了铝合金线,单线检测性能见表 5。

表 5 热处理前高电导率中强铝合金线检测性能

Tab.5 Test performance statistics of aluminum alloy wire with high conductivity and medium strength before heat treatment				
序号	单线直径/mm	抗拉强度/MPa	伸长率/%	电导率/(MS·m ⁻¹)
1	3.75	254	3.6	31.772
2	3.75	248	4.0	31.587
3	3.74	256	4.0	31.906
4	3.75	258	4.2	31.668
5	3.76	250	4.8	31.801
均值	3.75	253	4.1	31.743

3 热处理工艺优化处理

一般条件下铝合金的强度越高,电导率越低。为了改善合金的强度往往需要采用多种强化手段,但是都会对电导率产生影响,导线的强度与电导率之间表现出典型的负相关。热处理是协调铝合金力学性能与电导率的重要工艺措施,热处理工艺的优化包含热处理温度的

选择以及相应条件下热处理工艺的确定,合理的热处理工艺能够使得铝合金线的性能得以改善。

铝合金导线通常会经过时效处理,一般认为时效过程中,温度起主导作用,时效温度越高,电导率提高越快。李春和等^[29]针对拉拔变形的 6201 铝合金导线,考察了时效温度对铝合金导线微观组织、力学性能和电导率的影响,见图 5。发现当时效温度从 150 ℃ 提高到 190 ℃ 时,铝合金中析出的第二相颗粒尺寸变化不大,合金的电导率升高,但屈服强度和抗拉强度有所下降。可能是经过冷变形的导线内部形成了许多位错和空位,位错彼此交割缠结相互作用阻碍移动,空位的存在也会在在一定程度上钉扎位错,所以会明显提高导线的强度,在时效处理过程中,微观组织中的部分空位、位错等缺陷发生湮灭,所以导线的力学性能呈下降趋势。与此同时,微观组织由于缺陷数量减少,有利于降低其对电子的散射效应,从而改善导线的电导率。

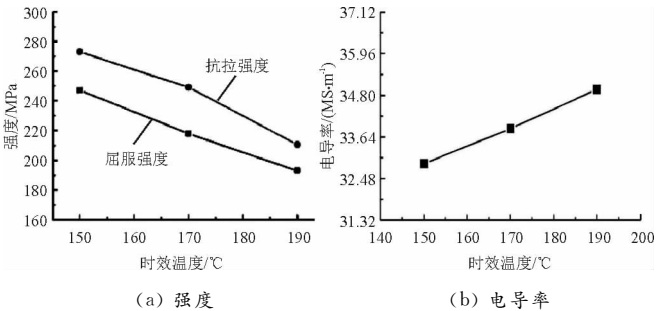


图 5 6201 导线屈服强度、抗拉强度和电导率
随时效温度的变化

Fig.5 Effects of aging temperature on yield strength, tensile strength and conductivity of 6201 wire

王宏颖^[30]以冷轧态 Al-Cu 系合金作为研究对象,分别采用不同的退火工艺处理 Al-Cu 系合金,总结了退火工艺对其组织和性能的影响。发现轧制态 Al-Cu 系合金中存在高密度的位错以及一定数目的空位,位错对电子的运动有阻碍作用,空位容易导致电子运动中发生散射,这时合金的导电性较低。经过退火处理后微观组织中发生回复和再结晶,位错数量减少,合金的导电性能提高。随着退火温度升高,试样的抗拉强度有所降低,电导率逐渐升高随后保持稳定。

将热处理温度设定为 178 ℃,测试经不同热处理时间处理后,各试验组的高电导率中强铝合金线的抗拉强度和电导率平均测试值见图 6。

由图 6 可见,在 3.5~10.0 h 范围内,随热处理时间增加,合金线的抗拉强度表现为先增加后降低的趋势,其峰值出现在 6.5 h 时,为确保抗拉强度不低于 240 MPa,故时效时间不宜超过 9.5 h。

电导率随热处理时间延长呈现增加趋势。为确保

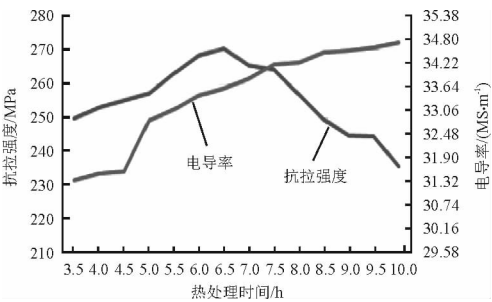


图 6 178 ℃ 温度下热处理时间对铝合金性能影响
Fig.6 Effects of heat treatment time on mechanical and electrical properties of aluminum alloy at 178 ℃

高电导率中强铝合金线电导率不低于 34.336 MS/m^[31],热处理时间不宜短于 8.5 h。因此,确定热处理温度为 178 ℃,时效时间选择 9 h 较好。

按照上述原则,进行了不同热处理温度下高电导率中强铝合金线的抗拉强度和电导率最佳组合的热处理时间研究,见表 6。可见,随着热处理温度升高,铝合金线实现最佳抗拉强度与电导率组合的时间逐渐缩短,从 176 ℃ 的 10.25 h 降低到 184 ℃ 的 7.50 h,其原因是 Mg₂Si 中间相随着热处理温度提高其析出速率增加,形成的 Mg₂Si 相可以有效强化基体,同时基体中溶解的合金元素减少,所以合金的电导率改善;同时,发现铝合金线的抗拉强度随热处理温度的升高在峰值前后的变化速率都在逐渐增加,电导率提高速率同样呈增加趋势。

表 6 中强铝合金最佳工艺组合与数据验证

Tab.6 Optimal process combination and data verification			
时效温度/℃	时效时间/h	抗拉强度/MPa	电导率/(MS·m ⁻¹)
176	10.25 ± 0.25	246	34.568
178	9.00 ± 0.25	250	34.574
180	8.75 ± 0.25	245	34.580
182	8.00 ± 0.25	254	34.551
184	7.50 ± 0.25	250	34.545

4 结束语

经过提高原材料使用的铝纯度以及稀土微合金化改性,并优化热处理工艺设计,可以有效提升高电导率中强铝合金线的抗拉强度和电导率,其抗拉强度可达 240 MPa 以上,电导率达到 34.336 MS/m 以上。稀土元素对铝合金电导率的影响不大,部分元素能够改善电导率,并且可以使铝合金晶粒细化,从而提高合金的综合性能。稀土改性高电导率中强铝合金线具有拉重比大、弧垂性能好、电能损耗小及耐腐蚀优的优点,适用与大容量、高电压、远距离输电线路的建设。

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] 叶鸿声. 中强度全铝合金导线在输电线路中的应用[J]. 电力建设, 2010, 31(12): 14-19.

[3] 张家胜. 节能导线用中强铝合金力学及导电性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.

[4] 张强, 陈保安, 祝志祥, 等. 一种高电导率中强铝合金导线的研制及节能分析[J]. 热加工工艺, 2016, 45(3): 142-144.

[5] 贾艳军, 杨亚, 袁红梅. 铝合金导线在我国的应用及发展[J]. 有色金属加工, 2017, 46(3): 9-10.

[6] 张军, 孟博, 贾伟, 等. 一种高电导率中强度铝合金材料及其制备方法: 中国, CN109136686A[P]. 2019-01-04.

[7] 范辉, 冯砚厅, 耿江海, 等. 节能导线电能损耗特性分析及节能效果对比研究[J]. 电工材料, 2016(3): 20-24.

[8] 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(17): 111-116.

[9] 刘真云, 马立群, 丁毅. 新型耐热铝合金架空导线的发展和应用[J]. 电线电缆, 2008(3): 25-27.

[10] YUAN W, LIANG Z. Effect of Zr addition on properties of Al-Mg-Si aluminum alloy used for all aluminum alloy conductor[J]. Materials & Design, 2011, 32(8-9): 4 195-4 200.

[11] FEI L, BAI P, HOU X, et al. Transmission electron microscopic observation of a novel $Al_3Zr-\eta$ core-shell particle in Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(11): 3 272-3 276.

[12] KARABAY S. Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminium alloy conductors[J]. Materials & Design, 2006, 27(10): 821-832.

[13] 曹大力, 石忠宁, 杨少华, 等. 稀土在铝及铝合金中的作用[J]. 稀土, 2006(5): 88-93.

[14] 王孟云. 稀土元素在铝合金中作用的研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(3): 290-292.

[15] 杜青春, 臧立根, 董艳宾. 稀土元素变质 A356 铝合金的研究进展[J]. 特种铸造及有色金, 2020, 40(2): 152-155.

[16] 杨莉, 周楠, 王顺成, 等. 铜铈混合稀土对耐热铝合金导线组织与性能的影响[J]. 中国金属通报, 2018(4): 208-210.

[17] 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, 2009, A516(1): 42-49.

[18] WEN S P, GAO K Y, LI Y, et al. Synergetic effect of Er and Zr on the precipitation hardening of Al-Er-Zr alloy[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(7): 592-595.

[19] 李浩, 肖阳, 关绍康, 等. 热处理对 Al-Cu-Mn 铸造铝合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(7): 764-766.

[20] 吴克义. 铝线材中的杂质及其影响[J]. 轻合金加工技术, 1989(6): 13-16.

[21] 杨勇, 牛艳萍, 周楠, 等. 连铸连轧对稀土耐热铝合金组织、电导率与力学性能的影响[J]. 世界有色金属, 2018(13): 190-193.

[22] 陈凡芸. 混合稀土(Pr+Ce)对 ZL105 合金组织及性能的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.

[23] 张顺生. 架空输电线路导线选型分析[J]. 硅谷, 2013, 20(6): 119-121.

[24] 蒯亚强, 黎汉林, 马军, 等. 一种半软化高铜低锰铝合金材料及其制作工艺: 中国, CN108950329A[P]. 2018-12-07.

[25] 蒯亚强, 李名珍. 高强度耐热型铝合金杆的制造方法: 中国, CN106148740A[P]. 2016-11-23.

[26] 刘东雨, 刘静静, 侯世香, 等. 耐热铝合金导线的发展[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(3): 1-6.

[27] 刘萌萌, 陈进成. 制备方法对电线电缆耐热铝合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(2): 215-217.

[28] 王惠, 岳玉梅. 铝合金地铁车辆车顶制造工艺改进[J]. 轨道交通装备与技术, 2013(2): 26-27.

[29] 李春和, 吴细毛, 王建东, 等. 时效温度对 6201 铝合金力学性能和电导率的影响[J]. 轻合金加工技术, 2014, 42(9): 39-43.

[30] 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.

[31] 陆伟, 尤伟任, 缪小林. 电导率为 57% 的中强度铝合金线的制造方法: 中国, CN102453819A[P]. 2012-05-16.

(编辑: 栗万仲)

伊之密成立压铸技术服务中心

“让中国装备技术与世界同步”这是伊之密的宗旨与理念。为了实现这一远大理想, 打响中国制造, 伊之密不仅在规模上, 一次次增资扩产以加强硬件建设, 还在技术上苦下工夫, 注重提升软实力。

2021 年, 伊之密压铸技术服务中心应运而生, 形成一支涵括售前技术支持、压铸岛整体解决方案、模具、压铸工艺、产品调试等各个环节的技术团队。

未来, 压铸技术服务中心将成为伊之密面向客户的窗口, 成为连接客户需求和产品研发的桥梁。不断努力完善, 只为更好地服务客户。

压铸技术服务中心是伊之密根据战略的需要于 2021 年成立的新的组织架构, 它是伊之密以体现客户价值为导向的改革措施之一。近年来, 伊之密逐步从主机设备供应商向整体解决方案提供商转型, 致力成为所在领域技术领先的最佳性价比方案提供商。

技术服务中心也是在这个目标下布局组建, 包含应用技术部、工程部、压铸产品与工艺应用中心(简称 PPAC)、项目管理部。目前已形成一支涵盖售前技术支持、压铸岛、整体解决方案、模具、压铸工艺、产品调试等各个环节的技术团队。

(伊之密供稿)