

架空导线用高强铝合金导体材料研究进展

李梦琳^{1,2} 陈保安^{1,2} 徐金³ 陈瑞^{1,2} 韩钰^{1,2} 潘学东^{1,2} 房正刚³ 迟铨^{1,2} 赵蕊^{1,2}

(1. 先进输电技术全国重点实验室, 北京 102209; 2. 中国电力科学研究院有限公司电工新材料研究所, 北京 102209; 3. 中国电力科学研究院有限公司输变电工程研究所, 北京 102209)

摘要 Al-Mg-Si系铝合金导体材料因其良好的力学性能与电导率被广泛用于高强铝合金导线中, 在大跨越、强覆冰等服役场景输电线路中具有技术优势。Al-Mg-Si合金的力学和电学性能存在相互制约关系, 限制了高强铝合金导线的推广应用。综述了高强铝合金导体材料性能提升技术研究进展, 讨论了主要合金元素含量控制、微合金化元素添加、热处理制度优化等手段对Al-Mg-Si合金特征微观结构、综合性能的影响, 并介绍了高强铝合金导体材料的应用情况。

关键词 Al-Mg-Si合金; 高强铝合金导线; 电导率

中图分类号 TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240384

Research Progress in High-strength Aluminum Alloy Conductor for Overhead Wires

LI Menglin^{1,2}, CHEN Baoan^{1,2}, XU Jin³, CHEN Rui^{1,2}, HAN Yu^{1,2}, PAN Xuedong^{1,2}, FANG Zhenggang³,
CHI Cheng^{1,2}, ZHAO Rui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Beijing 102209; 2. Institute of Electrical Engineering New Materials, China Electric Power Research Institute, Beijing 102209; 3. Institute of Power Transmission and Transformation Engineering, China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209)

Abstract: Al-Mg-Si aluminum alloy conductor is widely used in high-strength aluminum alloy wires due to the excellent mechanical properties and electrical conductivity, which has technical advantages in transmission lines featuring long span and heavy icing. The mechanical and electrical properties of Al-Mg-Si alloy are mutually restrictive, limiting the promotion and application of high-strength aluminum alloy wires. The research progress in performance improvement technology of high-strength aluminum alloy conductors was reviewed. The effects of main alloying element control, micro-alloying element addition and heat treatment process optimization on characteristic microstructure and comprehensive properties of Al-Mg-Si alloys were analyzed. Moreover, the application of high-strength aluminum alloy conductors was introduced.

Key Words: Al-Mg-Si Alloy, High-strength Aluminum Alloy Conductor, Electrical Conductivity

面对大跨越、重覆冰、大电流等严苛服役环境, 架空输电线路的安全可靠运行至关重要。现有架空导线中最常用的铝线材料为1xxx系铝合金, 其电导率较高(≥ 35.38 MS/m), 但抗拉强度(最高180 MPa以上)^[1]无法满足严苛环境下线路的安全可靠运行。高强度铝合金导线的高抗拉强度可提高导线的拉重比, 保证导线在施工安装时的压接可靠性^[2-3], 高电导率可提升输电线路的电能输送效率、降低输电损耗, 在多个领域特别是大跨越线路上广泛应用。Al-Mg-Si系合金(6xxx系铝合金)因其良好的力学性能与导电性能被广泛应用于高强度铝合金导线中, 同时具备良好的耐蚀性能

和焊接性能, 具有电容量大、质量轻、弧垂性能好等一系列特点^[4-6]。电工用Al-Mg-Si合金线多采用6101和6201铝合金, 抗拉强度为255~330 MPa、电导率为30.45~33.35 MS/m(即52.5%~57.5% IACS)^[7]。作为高强铝合金导体材料的两大关键指标, 电导率与强度的平衡优化是Al-Mg-Si系高强铝合金导体材料的研究重点。本研究针对Al-Mg-Si系高强度铝合金导体材料性能提升技术的研究进展进行综述, 并对高强度铝合金导体材料及导线产品的应用前景进行分析, 旨在为高性能高强铝合金导体材料的自主研发与应用推广提供参考。

收稿日期: 2024-09-23; 修订日期: 2025-01-10

基金项目: 国家电网公司技术研究服务资助项目(SGZB0000JJJS2400407)

第一作者简介: 李梦琳, 女, 1997年出生, 工程师, E-mail: limenglin19@163.com

引用格式: 李梦琳, 陈保安, 徐金, 等. 架空导线用高强铝合金导体材料研究进展[J]. 特种铸造及有色金属, 2025, 45(9): 1335-1340.

LI M L, CHEN B A, XU J, et al. Research progress in high-strength aluminum alloy conductor for overhead wires[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1335-1340.

1 Al-Mg-Si 系高强铝合金性能提升

Al-Mg-Si 合金是典型的热处理可硬化铝合金,其时效析出序列为:过饱和固溶体→Mg、Si 独立的原子团簇→G.P. 区→ β'' 相(Mg_5Si_6)→ β' 相→ β 平衡相(Mg_2Si)^[8-9],与 Al 基体呈共格、半共格关系的球状 G.P. 区和针状 β'' 相为主要强化相,通过强化相的弥散分布阻碍位错运动,实现强度的提高^[10]。但 Al 基体中产生的缺陷(如空位、位错和晶界)、析出相和杂质原子会破坏晶体结构中的原子周期性,造成电导率下降^[11]。因此,促使 Al-Mg-Si 合金强度提高的因素往往会引起晶格畸变,导致电子散射和电导率的下降,强度和电导率之间的平衡关系是一个长期存在的难题。

HOU J P 等^[12]提出了制备 Al-Mg-Si 系高导高强铝合金线的 3 个关键原则(见图 1),即细长晶粒、强织构和纳米级析出相。其中,导线长度方向的细长晶粒可以在不降低强度的前提下获得更高的电导率,横截面的强 $\langle 111 \rangle$ 织构可以在不影响导电性的情况下有效地强化铝线,在总畸变度高的过饱和固溶体中析出纳米相可以同时提高铝合金线材的强度和电导率。为实现电导率与抗拉强度的协同提升,通常采用成分优化、制备工艺优化两种方式。成分优化方法包括主要合金

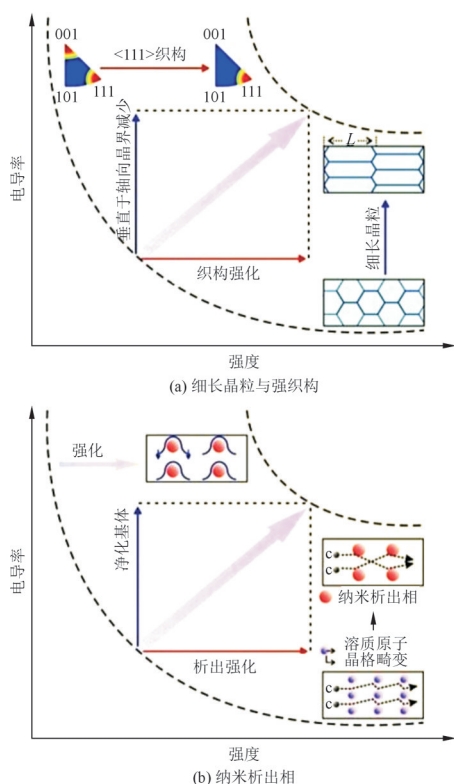


图 1 获得高电导率高强度铝合金材料的设计原则^[12]

Fig.1 Designing principles for aluminum alloy with high strength and high conductivity^[12]

元素含量优化、其他合金元素添加等,制备工艺优化重点关注热处理制度优化与大塑性变形处理。

1.1 合金元素对 Al-Mg-Si 合金导体材料性能影响

1.1.1 Mg、Si 主合金元素影响

Mg、Si 是高强铝合金导体材料的主合金元素,Mg、Si 的添加量以及 Mg、Si 摩尔比是高强铝合金导体成分设计的基础^[13]。Mg 在铝中的固溶度达 17.4%,是形成高弥散度析出相的关键,应尽可能使其从铝中脱溶析出。研究表明,Mg、Si 含量以及 Mg、Si 摩尔比将影响 β''/β' 析出相类型、分布和尺寸。不同晶体结构 MgSi 相的 Mg、Si 摩尔比各不相同, β'' 相的 Mg、Si 摩尔比在 1 左右, β' 相的 Mg、Si 摩尔比约为 1.8, β 相的 Mg、Si 摩尔比约为 2^[14]。过量的 Si(Mg、Si 摩尔比低于 2)可加快沉淀动力学,促进细小 β'' 相的均匀析出,强化效果增加,同时还能减少晶界处的 Mg_2Si 颗粒,减弱固溶态 Mg 原子对导电性能的影响,在早期时效阶段起关键作用。而当 Mg 过量(Mg、Si 摩尔比高于 2)时,基体中会伴随有粗大的第二相,对 Al-Mg-Si 合金没有强化作用,相对于 Mg、Si 摩尔比,晶粒尺寸对 Al-Mg-Si 合金电导率的影响更大(见图 2)^[15]。HAN Y 等^[16]制备了 Mg、Si 摩尔比分别为 0.75、1.10、1.48 和 1.94 的 Al-Mg-Si 超细晶合金,发现 Mg、Si 摩尔比对析出相密度和析出相间距有较大影响,其中 Mg、Si 摩尔比为 1.48 的合金中析出相密度最大,表现出最佳的硬度和电导率。倪艳荣^[17]设计了不同 Si、Mg 含量的 Al-Mg-Si 合金,人工时效后 Al-Mg-Si 合金中析出 Mg_2Si 强化相和 $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相, $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相使 Mg_2Si 形状得到钝化;经过 $200\text{ }^\circ\text{C} \times 6\text{ h}$ 时效处理后的含 0.6% 的 Mg,添加 0.4% 的 Si(摩尔分数)铝合金单丝电导率达到 34.86 MS/m,抗拉强度为 230 MPa。

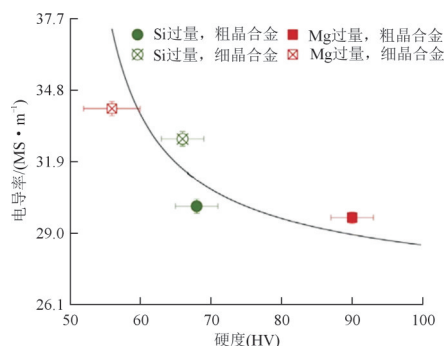


图 2 不同晶粒尺寸和 Mg、Si 摩尔比的 Al-Mg-Si-Sc 合金的硬度-电导率曲线图^[15]

Fig.2 Hardness-conductivity curves of Al-Mg-Si-Sc alloys with different grain sizes and molar ratio of Mg to Si^[15]

1.1.2 其他合金元素及精炼剂影响

其他微合金化元素对铝合金时效析出行为有显著影响^[18-23],一般添加小于1%的微量合金元素能显著改善合金的时效硬化行为,提高合金的力学性能。Al-Mg-Si铝合金中添加稀土元素,可以起到除杂净化、变质以及合金化的作用,从而改善合金的综合性能。陈保安等^[24]发现稀土元素Sc能够抑制纳米级第二相的析出和长大过程,获得尺寸更小、分布更弥散的 β'' 强化相,时效后Al-Mg-Si-0.3Sc单丝的抗拉强度达350 MPa以上,添加Ce元素后合金电导率提高明显(约32.60 MS/m)。FLORES F U等^[25]设计添加合金元素(Sr、In、Sn、Sb、Pb和Bi),以加速富Mg、Si强化相的析出动力学,提高合金的强度,并对其性能进行分析对比,见图3,其中Al-0.7Mg-0.3Si-0.08Bi在200℃×7 h时效后综合性能优异,抗拉强度达426 MPa,电导率达30.57 MS/m,Sn的添加被证明在增加合金的强度方面最有效。雷文魁等^[26]添加0.5%的混合稀土元素La、Ce,使6201铝合金平均晶粒尺寸降低了70%以上,形成AlFeSiLaCe第二相与Mg₂Si相,铝杆的电导率提高到32.31 MS/m、抗拉强度为236 MPa。Zr会促进 β'' -Mg₅Si₆沉淀相的析出,并生成Al₃Zr沉淀相,对基体起到强化作用,同时,固溶原子的析出能有效提高时效Al-Mg-Si-Zr合金的电导率^[27]。

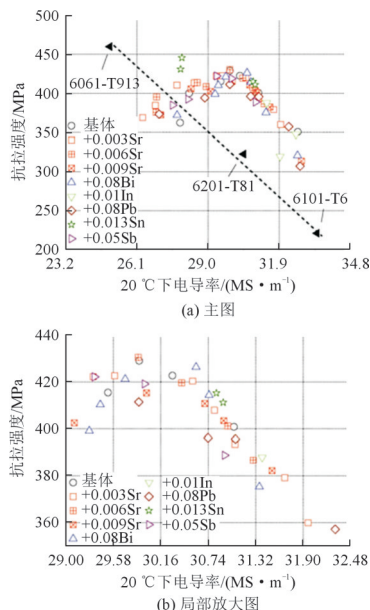


图3 添加不同合金元素制备的系列Al-Mg-Si合金抗拉强度和电导率图^[25]

Fig.3 Tensile strength and electrical conductivity of serial Al-Mg-Si alloys with different alloying elements^[25]

此外,精炼剂和改性剂的添加也能实现合金综合性能的改善。KARABAY S^[28]在铸造阶段添加3%的

Al₂B对6101合金进行改性,结合炉内短时人工时效,消除了沉淀硬化过程中Mg₂Si颗粒与金属基体的非共格效应,然后进行适当的时效处理,获得了电导率为31.90 MS/m和抗拉强度为290 MPa的单丝。

1.2 制备工艺对Al-Mg-Si合金导体材料性能影响

1.2.1 热处理工艺影响

目前,高强铝合金线的加工工艺主要包括T6和T8两种,其中T6工艺为拉拔→固溶→人工时效,T8工艺为固溶→拉拔→人工时效。相对于T6工艺,通过T8在固溶后先进行拉拔处理,在此过程中形成了大量位错,在时效后可以获得更高的强度;同时,位错辅助扩散将更多的溶质析出形成析出相,实现电导率的提高。对于可热处理强化的Al-Mg-Si系铝合金,固溶与时效处理是关键工艺步骤。通过固溶处理获得过饱和固溶体,后续采取时效工艺,分解过饱和固溶体,实现基体中二次相的弥散析出,阻碍位错运动从而实现强化,同时第二相的细小弥散析出也可提高合金的电导率^[28]。

李东阳等^[29]对铸态Al-Mg-Si-B-Sr合金的均匀化退火工艺进行对比研究,通过550℃×9 h的均匀化退火,消除合金的铸态组织偏析、细化粗大的初生相,将电导率提高至31.90 MS/m以上。ROMETSCH P A等^[30]对比了自然时效处理与人工时效处理对Al-Mg-Si合金力学和电学性能的影响,发现随着自然时效时间的增加,Al-Mg-Si合金中形成大量小溶质团簇,造成的电子散射使电导率明显下降、强度明显增加;随人工时效时间延长,溶质和小团簇数量减少、 β'' 强化相析出,使得强度和电导率都有明显的上升趋势,这一趋势预计将持续到峰时效状态(见图4)。HOU J P等^[12]对 ϕ 9.50 mm的Al-Mg-Si杆进行175℃×4 h人工时效,经

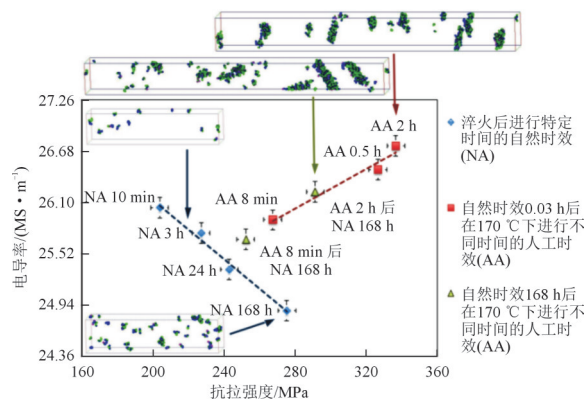


图4 自然时效和人工时效对550℃固溶后Al-Mg-Si合金电导率和抗拉强度的影响^[30]

Fig.4 Effects of natural ageing and subsequent artificial ageing on electrical conductivity and tensile strength of Al-Mg-Si alloy after solution treatment at 550℃^[30]

冷拉拔后的铝线中形成了大量纳米级析出相,见图 5,单丝强度达到 352.3 MPa、电导率为 32.46 MS/m,性能大幅提高。

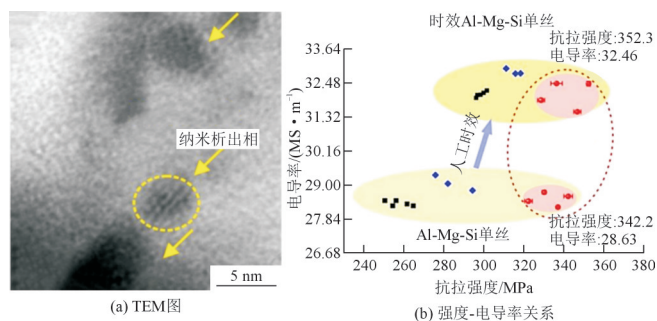


图 5 时效 Al-Mg-Si 线材的径向 TEM 图像和 Al-Mg-Si 线材的强度-电导率关系^[12]

Fig.5 Radial TEM images of as-aged Al-Mg-Si wires and strength-electrical conductivity relation of Al-Mg-Si wires^[12]

1.2.2 变形处理工艺影响

改良传统热机械工艺也是提高铝合金导体材料电导率与抗拉强度的方法之一,常采用的工艺流程是固溶

处理→预时效处理→冷拉拔→人工时效处理。LING Y 等^[31]发现,与传统的热处理相比,采用 180 ℃×2 h 预时效→冷轧→180 ℃×6 h 再时效后,在应变硬化和析出强化的相互作用下 Al-Mg-Si 合金的抗拉强度和电导率分别达到 301 MPa 和 34.16 MS/m。此外,研究者发现在高温大塑性变形过程中,结合动态时效可以加速纳米析出相的形成^[32],实现强度和导电性的提升。VALIEV R Z 等^[11]采用双梯度严重塑性变形 (SPD) 处理设计了一种高强铝合金导体的纳米结构设计方法,首先将 6201 铝合金在室温下通过大塑性变形处理将晶粒细化到亚微米尺度,然后在高温 (130~180 ℃) 下进行大塑性变形处理结合动态时效,实现了溶质原子溶解,并形成纳米级的球状析出物 (见图 6),这些超细晶组织通过晶界强化和沉淀硬化显著提高强度 (365~412 MPa)。同时,由于 Al 基体中溶质原子含量极低, G.P. 区不存在,使合金电导率同步提高 (32.25~33.87 MS/m),但大塑性变形是一个复杂的过程,难以实现规模化应用。

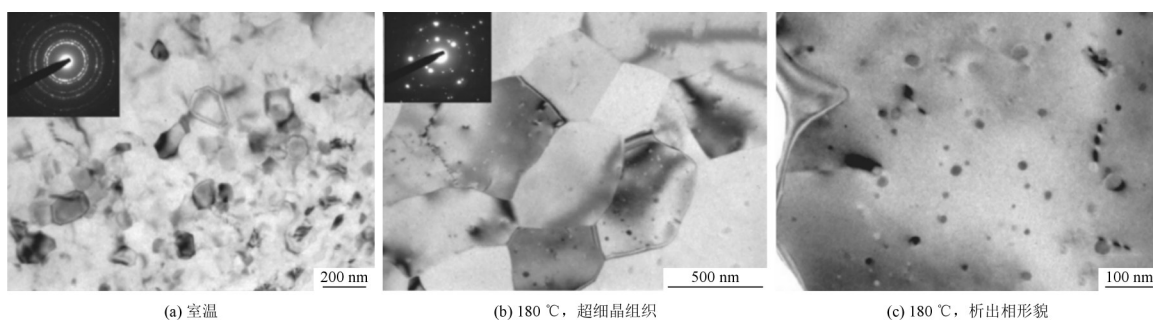


图 6 室温、180 ℃下严重塑性变形处理后 6201 铝合金的 TEM 图像^[11]

Fig.6 TEM images of 6201 alloy subjected to HPT processing at room temperature and 180 ℃^[11]

2 Al-Mg-Si 系高强铝合金的应用

Al-Mg-Si 铝合金导体材料可以作为导体部分、芯线部分应用于全铝合金绞线 (AAAC),也可作为芯线与硬铝线同心绞合成铝合金芯铝绞线 (ACAR)。与普通钢芯铝绞线相比,铝芯铝绞线具有强度高、弧垂性能好的技术优势,以高强度铝合金芯替代镀锌钢芯,符合轻量化建设需求,同时以“铝-铝”接触替换传统“钢-铝”接触,能有效减少异质金属接触带来的电偶腐蚀,具有优异的耐腐蚀性能。采用高导高强铝合金导线可替代现有的大截面钢芯铝绞线,可节约大量的金属材料和基建投资,实现线路减重、增大新建线路铁塔距离、节约杆塔建设投资。

目前,高强铝合金导线国外输电线路已大规模应用,占比达 60% 以上。随着高强铝合金导线的应用与推广,国内外也相继制定了相关标准对高强铝合金导线用 Al-Mg-Si 合金的性能指标做了规范^[7,33-34],见表 1。

GB/T 23308-2009 规定了 LHA1、LHA2 两类型号,电导率为 30.45~30.74 MS/m、抗拉强度为 295 MPa 以上。ASTM B398-2015 所规定的高强铝合金线抗拉强度较高,均达到 315 MPa 以上。BS EN 50183-2000 将架空导线用 Al-Mg-Si 合金导线的性能进一步提升,在

表 1 国内外对高强铝合金线的相关标准^[7,33-34]

Tab.1 Domestic and overseas relevant standards of high-strength aluminum alloy wire^[7,33-34]

型号	标准号	电导率/ (MS·m ⁻¹)	抗拉强度/ MPa	伸长 率/%
LHA1	GB/T 23308-2009	30.45	315~325	3.0
LHA2		30.74	295	3.5
AL2	BS EN 50183-2000	30.45	315~325	3.0
AL3		30.74	295	3.5
AL4		30.68	315~325	3.0
AL5		32.05	295	3.5
AL6		32.25	300~314	3.5
AL7		33.35	255~300	3.0
6201-T81	ASTM B398-2015	30.45	330	3.0
		30.45	315	3.0

AL2~AL7等6类高强铝合金线中,其中3类导线的电导率要达到32.05 MS/m以上,以AL6型高强铝合金线综合性能最佳。

高强全铝合金导线、高强铝合金芯铝导线适用于多种服役场景下的输电线路工程,尤其在跨越通航大河流、湖泊或海峡等档距较大(1 000 m以上)或杆塔较高(100 m以上)的线路工程中具有广阔的应用前景^[35-36]。同时,也适用于重污染及沿海地区、中重冰区等特殊地理条件下的输电线路,原有铁塔和线路走廊条件受限情况下的增容改造线路等,可显著地提高电能输送效率,保障线路安全可靠。

3 结论与展望

对于Al-Mg-Si系高强铝合金导体材料,强度和电导率是两个重要的性能参数,分别表示其抗损伤能力和电子传输的能力。由于铝合金强度与电导率之间的互斥关系,使得Al-Mg-Si系高强铝合金导体材料力学和电学性能协同提升技术成为目前的研究热点。

晶粒特征、晶体取向和合金元素存在状态的多尺度微观结构,是决定Al-Mg-Si系高强铝合金导体材料强度-电导率关系的关键。主要从材料成分设计与制备工艺优化两个角度开展,在成分设计方面包括通过优化Mg、Si含量与Mg、Si摩尔比、添加微合金元素、改性剂;制备工艺方面,时效处理是关键的优化工艺环节,此外,大塑性变形结合时效可以提高晶界强化和析出强化,并具有理想的电导率。

Al-Mg-Si高强铝合金导线的高强度、高耐蚀性、高电导率的优势既可降低输电损耗,提高电能利用率,减少碳排放,保障线路运行的安全性、稳定性,还可减少维护成本,延长输电线路寿命,具有显著的经济和社会效益。目前,国外线缆企业在高导高强铝合金导线的研制与应用方面仍处于领先水平,国内在高导高强铝合金导体材料领域尚处于核心技术突破与产品更新换代阶段,Al-Mg-Si系高强铝合金导体材料的性能调控与工业化稳定生产是关键技术难点,需进一步聚焦成分-工艺-结构-性能的相互影响机理,突破纳米尺度析出物对Al-Mg-Si线的强度和导电性改善的同时提高关键调控技术,完善、规范高导高强铝合金导线的批量化制备工艺流程,推进在大跨越、远距离等新建线路工程中推广应用,保障电力的安全可靠与节能高效输送。

参 考 文 献

- [1] GB/T 17048-2017. 架空绞线用硬铝线[S].
- [2] 张强,韩钰,卢卫疆,等. 架空导线用中强铝合金导体材料综述[J]. 热加工工艺,2016,45(18):7-9.
- [3] 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.
- [4] 陈庆吟,盛叶弘,李瑞,等. Al-Mg-Si合金线电导率演变规律与机制[J]. 金属热处理,2021,46(3):175-179.
- [5] LIN S, DENG Y L, LIN H Q, et al. Microstructure, mechanical properties and stress corrosion behavior of friction stir welded joint of Al-Mg-Si alloy extrusion[J]. Rare Metals, 2023, 42(6): 2 057-2 067.
- [6] KHANGHOLI S N, JAVIDANI M, MALTAIS A, et al. Review on recent progress in Al-Mg-Si 6xxx conductor alloys[J]. Journal of Materials Research, 2022, 37: 670-691.
- [7] EN 50183-2002. Overhead power line conductors-bare conductors of aluminium alloy with magnesium and silicon content[S].
- [8] HUIS M A, CHEN J H, SLUITER M H F, et al. Phase stability and structural features of matrix-embedded hardening precipitates in Al-Mg-Si alloys in the early stages of evolution[J]. Acta Materialia, 2007, 55(6): 2 183-2 199.
- [9] HUIS M A, CHEN J H, ZANDBERGEN H W, et al. Phase stability and structural relations of nanometer-sized, matrix-embedded precipitate phases in Al-Mg-Si alloys in the late stages of evolution[J]. Acta Materialia, 2006, 54(11): 2 945-2 955.
- [10] NINIVE P H, STRANDLIE A, GULBRANDSEN D S, et al. Detailed atomistic insight into the β'' phase in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2014, 69(52): 126-132.
- [11] VALIEV R Z, MURASHKIN M, SABIROV I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity[J]. Scripta Materialia, 2013, 76: 13-16.
- [12] HOU J P, LI R, WANG Q, et al. Three principles for preparing Al wire with high strength and high electrical conductivity[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(5): 742-751.
- [13] KIM S N, KIM J H, KOBAYASHI E, et al. Influence of Mg/Si ratio on nanocluster formation in Al-Mg-Si alloys with constant Mg+Si concentration[J]. Materials Transactions, 2014, 55(11): 1 647-1 655.
- [14] VISSERS R, HUIS M A, JANSEN J, et al. The crystal structure of the β' phase in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55(11): 3 815-3 823.
- [15] JIANG S Y, WANG R H. Grain size-dependent Mg/Si ratio effect on the microstructure and mechanical/electrical properties of Al-Mg-Si-Sc alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35: 1 354-1 363.
- [16] HAN Y, SHAO D, CHEN B A, et al. Effect of Mg/Si ratio on the microstructure and hardness-conductivity relationship of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(8): 4 445-4 459.
- [17] 倪艳荣. 人工时效对Al-Mg-Si铝合金导线导电性能和力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2018,47(4):185-187.
- [18] 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.
- [19] 杨建军,聂祚仁,付静波,等. 稀土在铝合金中的作用及研究进展[J]. 北京工业大学学报,2002,28(4):500-505.
- [20] 陈保安,张静媛,祝志祥,等. 化学成分对高强Al-Mg-Si合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2022,47(4):30-38.
- [21] 余海东,茹中赞,李勇,等. Ce对Al-Mg-Si合金铸态及均匀化组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(2):229-235.