

Al-Mg-Si 系高导电铝合金研究进展

黄家亮¹ 黄永清¹ 赵振存¹ 李 洋² 李欣洋² 秦志颖² 苗 芳²

1.运城康道合金科技有限公司, 山西 河津 043300

2.中北大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030051

[摘要]随着新能源电力系统和电气装备向轻量化、低成本方向发展, 开发高强度和高导电性的 Al-Mg-Si 系铝合金材料已成为实现“以铝代铜”的重要研究方向。然而, 合金元素固溶、析出强化及形变缺陷对电子运输的不利影响, 使强度与导电性能之间长期存在协同优化难题。近年来, 围绕合金化设计与形变热处理协同调控的研究不断深入, 通过对合金成分、析出相特征及缺陷结构的精细调控, 在一定程度上缓解了强度与电导率之间的制约关系。本文综述了 Al-Mg-Si 系导电铝合金在合金化设计与形变热处理方面的研究进展, 重点总结其对微观组织演化及力学-导电性能协同调控的作用机制。此外, 本文也对该类导电铝合金的未来发展方向进行展望, 为新一代高性能导电铝合金的设计与工程应用提供理论参考。

[关键词]Al-Mg-Si 合金; 导电铝合金; 合金化设计; 形变热处理

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18346

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

Research Progress on High-conductivity Al-Mg-Si Aluminum Alloys

HUANG Jialiang¹, HUANG Yongqing¹, ZHAO Zhencun¹, LI Yang², LI Xinyang², QIN Zhiying², MIAO Fang²

1. Yuncheng Kangdao Alloy Technology Co., Ltd., Hejin, Shanxi, 043300, China

2. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051, China

Abstract: With the development of lightweight and low-cost requirements in new energy power systems and electrical equipment, the development of high-strength and high-conductivity Al-Mg-Si aluminum alloys has become a key research topic for realizing the substitution of aluminum for copper. However, the effects of alloying element solid solution, precipitation strengthening, and deformation-induced defects on electron transport have led to a challenge in achieving the optimization of mechanical strength and electrical conductivity. In recent years, increasing research efforts have focused on the synergistic regulation of alloying design and thermo-mechanical treatment. Through the precise control of alloy composition, precipitate characteristics, and defect structures, the trade-off between strength and electrical conductivity has been partially alleviated. This paper systematically reviews the recent progress in alloying design and thermo-mechanical treatment of Al-Mg-Si conductive aluminum alloys, summarizes their effects on microstructural evolution and the synergistic regulation mechanisms of mechanical and electrical properties, and further discusses future research. Furthermore, future research directions are discussed to provide theoretical guidance for the design and engineering application of next-generation high-performance conductive aluminum alloys.

Keywords: Al-Mg-Si alloys; conductive aluminum alloys; alloying design; thermo-mechanical treatment

引言

随着新能源汽车产业以及电力系统不断发展, 对导电材料的应用需求不断增加。铜合金作为传统导电材料, 虽具有优异的导电性能, 但其在资源储备, 成本控制等方面面临巨大挑战。在此背景下, 发展低成本的导电材料成为重要的发展方向。铝合金导电性仅次于铜合金, 且具有密度低、资源丰富和成本优势显著等特点, 在电力传输、新能源发电及电气装备等领域展现出广阔的应用前景。近年来, 随着合金设计、制备工艺等技术的不断进步, 铝合金

的导电性能得到显著提升, “以铝代铜”逐渐成为行业关注的热点, 具有良好的市场应用潜力^[1,2]。

在众多导电铝合金体系中, Al-Mg-Si 系合金(如 6101、6001 等)因兼具较高导电性、良好的成形加工性能, 被认为是实现“以铝代铜”的重要候选材料。该类合金属于典型的可热处理析出强化型铝合金, 其力学性能和导电性能与合金成分设计及析出相演化行为密切相关。Al-Mg-Si 系合金典型析出相为 Mg_2Si , 其析出强化在提升合金强度的同时, 往往加剧电子散射效应, 使力学性能与导电性能

难以同步提升,因此,突破强度与导电性能之间的制约关系,实现二者的协同优化,已成为当前 Al-Mg-Si 系导电铝合金研究中的关键科学问题和技术难点。相关研究表明,通过合理的合金化设计、形变热处理工艺优化,可调控析出相的类型、尺寸及分布,在一定程度上缓解强度与电导率之间的倒置关系,为提升 Al-Mg-Si 系导电铝合金的综合性能提供了有效途径^[3,4]。基于此,本文将综述 Al-Mg-Si 系导电铝合金在合金化设计与形变热处理工艺方面的研究进展,归纳其对力学性能与导电性能的影响规律及作用机制,并对该类导电铝合金的未来发展方向进行展望。

1 铝合金强化方式对强度和导电性能的影响

铝合金的强化机制主要包括固溶强化、析出强化、晶界强化(细晶强化)和位错强化(加工强化)等。不同强化方式通过改变合金中溶质原子分布、第二相形态及晶体缺陷来提高力学性能,但同时也会以不同程度影响电子传输过程,对导电性能产生影响。Hou 等^[5]总结了制备高强度高导电铝合金的三大原则,为平衡铝合金强度和电导率之间的关系提供了有效指导,具体如图 1 所示。

相关研究表明,晶体中由溶质原子、析出相、位错及晶界等微观结构因素引起的原子周期性破坏,是影响金属导电性能的根本原因,铝合金的总电阻率可表示为各类散射贡献之和,如公式(1)所示。

$$\rho_{\text{total}} = \rho + \rho_{\text{ss}} + \rho_{\text{p}} + \rho_{\text{d}} + \rho_{\text{gd}} \quad (1)$$

式中, ρ_{total} 为材料的总电阻率; ρ 为铝基体本征晶格电阻率; ρ_{ss} 为溶质原子散射所引起的电阻率增量; ρ_{p} 为第二相对电子散射所贡献的电阻率; ρ_{d} 为位错缺陷引起的电阻率; ρ_{gd} 为晶界散射导致的电阻率。

根据公式(1)可知,不同强化机制实质上对应于电阻率中不同散射项的变化:固溶强化主要增加 ρ_{ss} , 位错强化和加工变形主要影响 ρ_{d} , 晶粒细化主要影响 ρ_{gd} , 而析出强化则通过降低 ρ_{ss} 并适度引入 ρ_{p} , 在一定程度上实

现强度与导电性能的协调优化。因此,针对高强高导铝合金的设计,应以降低溶质原子和位错散射、合理调控析出相,实现多种强化机制的协同调控。

2 合金化设计对 Al-Mg-Si 系合金强度和导电性能的影响

合金化及微合金化技术是改善铝合金综合性能、开发新型高强高导铝合金的重要手段之一。然而,铝合金导体材料的电导率对化学成分极为敏感,不同合金元素在铝基体中的存在形式、固溶行为及第二相特征差异显著,其对电子散射和力学性能的影响程度存在明显不同。因此,在实现强度提升的同时尽量降低对导电性能的不利影响,合理选择合金元素并优化其含量,是 Al-Mg-Si 系高强高导铝合金设计的核心问题。

2.1 Mg 和 Si 元素

Mg/Si 比是影响 Al-Mg-Si 系合金导电性与强度的一个重要参数。研究表明,合理的 Mg/Si 比有利于形成弥散、均匀分布的 β'' 强化相,实现强度与导电性的优化匹配。Dong^[6]等研究发现,当 Mg/Si 比为 1.02 时,合金在硬度与导电性之间达到最佳平衡,过量 Si 虽可促进时效析出、提高强度,但会因晶格畸变而降低导电性。Han^[7]等指出,当 Mg/Si 比为 1.48 时,合金中 β'' 相分布最为致密且均匀,合金综合性能最优。因此,优化 Mg/Si 比率可促进强化相的充分沉淀,最大限度地减少基体中的残留合金元素,这对于实现强度和电导率之间的平衡至关重要。

2.2 Fe 元素

Fe 元素是 Al-Mg-Si 合金中常见的杂质元素,具有极低的固溶度,容易与 Al、Si 形成多元金属间化合物,如 $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ 相^[8],当 Fe 含量超过 0.5 wt.%,会产生过量的 Al_5FeSi ,降低合金的拉伸强度和伸长率。然而,在合理控制 Fe 含量的条件下,Fe 的存在也会消耗过量的 Si,形成的 Al_5FeSi 可以减少电子散射,增加电导率^[9]。

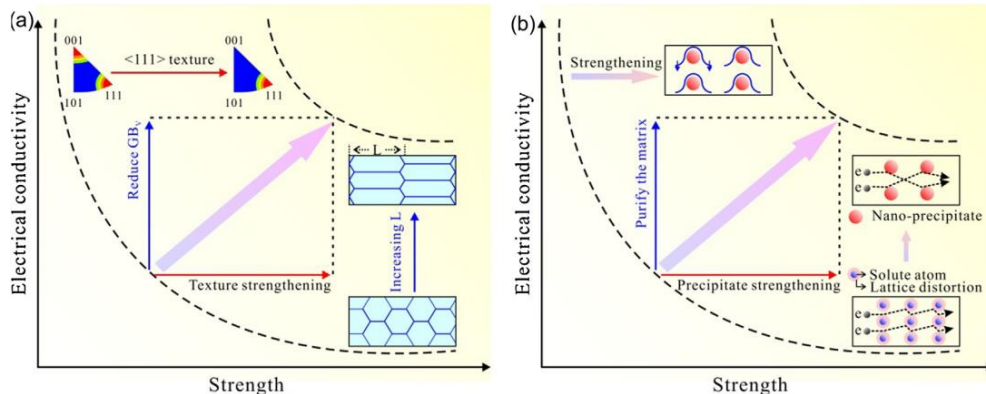


图 1 高强度高导电金属材料设计原理^[5]: (a) 拉长晶粒和织构导致强度和导电性同时提高; (b) 溶质原子析出纳米级析出相起到析出强化和导电性提升

2.3 Mn 元素

Mn 元素的添加可有效调控含 Fe 相的形貌特征,比如 Mn 可以抑制有害 β -Al₅FeSi 相的形成,促进 α -Al(Fe,Mn)Si 等球形相的形成,从而改善合金力学性能。但是 Mn 的引入会使合金的导电性与力学性能演化更为复杂,若添加量不合理,反而可能导致综合性能的下降。如 Zheng^[10]等报道,在 Al-Mg-Si 合金中单独引入 Mn 会使延伸率降低约 40%,电导率降低约 22%。He^[11]等研究了 Mn 对 Al-Mg-Si 合金拉伸性能和电导率的影响机制,发现 Mn 含量为 0.18 wt.%时,经热挤压处理的合金仍表现出较优的综合性能,其抗拉强度、伸长率和电导率分别为 176 MPa、24%和 48.07%IACS。因此,在合理 Mn 含量范围内,并与其他合金成分设计及加工工艺相协同,才能实现力学性能与导电性能的综合优化。

2.4 Cu 元素

Cu 是 Al-Mg-Si 系合金中常用的强化元素之一,Cu 的添加能够增加析出相 Mg₂Si 的结合能,时效过程中形成的含 Cu 的 β'' 相,该类析出相具有更高的热稳定性和抗溶解能力,从而更有利于提高合金时效强化效果。王峰^[12]等研究了 Cu 含量对导电性的影响,结果表明添加 0.03wt.%Cu 可细化 Mg₂Si 析出相并缩短峰时效时间,使电导率提升至 60.18%IACS,而 Cu 含量超过 0.06wt.%时因 Cu 固溶于铝基体中,导致晶格畸变,加剧电子在传导过程中的散射效应,进而导致材料电导率下降。Elgallad^[13]

研究发现添加 0.4 wt.%Cu 的 Al-Mg-Si 系合金经过形变—热处理后合金的抗拉强度提高约 37%,而电导率仅降低约 4.5%,最终实现了 500MPa 的超高抗拉强度和 49%IACS 的较高电导率。

2.5 稀土元素

稀土元素(如 Sc、Y、Ce、La 等)添加到 Al-Mg-Si 系合金,可有效提升其综合性能。研究表明,稀土元素作用主要体现在三个方面:(1)稀土具有变质效果,稀土可以细化枝晶组织并抑制含 Fe 有害相形成;(2)稀土具有合金化效应,稀土可以与 Al、Si 等元素形成稀土化合物,起到析出强化效果;(3)稀土可以净化熔体,稀土与熔体中的 O、S 等杂质反应生成稳定化合物,降低夹杂物含量,提高熔体纯净度。正是由于稀土的协同作用使 Al-Mg-Si 系合金在提升力学性能的同时,也使其具备了良好的导电性。目前,研究者对稀土作用开展了一系列研究,如 Li^[14]等研究了 La/Ce 和 La/Er 复合添加对 Al-Mg-Si 系合金强度和电导率的影响,结果表明掺杂 La/Ce 可以形成共沉淀析出相,使 Al-Mg-Si 合金的抗拉强度达到 223MPa,添加 La/Er 可捕获 Si 溶质原子,形成 ErFeSi 相沿合金晶界析出,其电导率可达到 52.35%IACS。陈保安^[15]等在 Al-Mg-Si 系合金中分别引入稀土 Ce 和 Sc,发现稀土元素的添加显著改善了微米级 AlFeSi 粗大相的形貌与尺寸分布特征。其中,添加 Ce 后合金电导率最高,可达约 56.2%IACS;而添加 Sc 后合金抗拉强度最高,达到约 350 MPa。

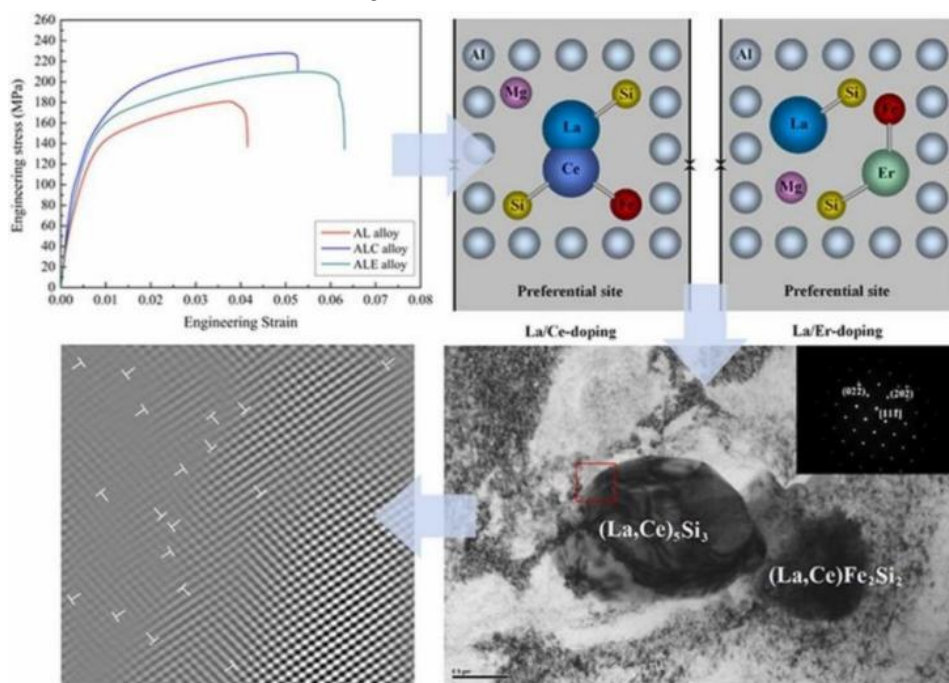


图2 La/Ce 和 La/Er 共掺杂诱导沉淀强化高强度 Al-Mg-Si 导电合金^[14]

3 形变热处理工艺对 Al-Mg-Si 系合金强度和导电性能的影响

形变热处理通过将冷（或温）塑性变形与随后的时效热处理过程有机结合，实现对 Al-Mg-Si 系合金微观组织的有效调控。塑性变形过程中引入的大量位错、亚晶界及细化晶粒，为 Mg-Si 原子团簇及亚稳析出相（如 β'' 相等）的形核提供了优先位点。在随后的时效过程中，通过合理调控时效温度与时间，可促使细小且弥散分布的 β'' 相析出，使得 Al-Mg-Si 合金具有良好的力学强度和导电性。

目前，研究者已开发出多种形变热处理工艺路径。不同形变方式在变形温度、应变量水平及缺陷引入机制方面存在显著差异，其对合金再结晶行为、析出动力学过程以及溶质原子分布状态的影响不同，进而导致力学性能与导电性能的差异。例如，热挤压、轧制等常规塑性变形方式通常引入中等密度的位错，并伴随动态回复与动态再结晶过程，可获得一定程度的晶粒细化和织构强化，从而在改善强度的同时保持较高的电导率。比如 Lin^[17]等采用预时效（180°C×2h）+冷轧变形（70%变形量）+二次时效（180°C×6h）的形变热处理工艺，在 Al-Mg-Si 合金中引入高密度位错并促进细小析出相的均匀弥散分布，使极限抗拉强度和电导率分别达到 301MPa 和 58.9%IACS。Chen^[18]等通过多道次轧制+时效处理，使 Al-Mg-Si 合金形成明显的<111>择优取向，晶粒细化至约 23.5 μm ， β'' 析出相尺寸减小至约 1.2nm，在晶粒细化与析出强化协同作用下，合金的屈服强度提升至 282.17MPa，同时电导率提高至 57.54%IACS。Majchrowicz^[19]等对 Al-Mg-Si(6101)

合金进行了挤压—时效形变热处理，通过高累积应变和热处理调控，获得 300~400nm 的超细晶以及弥散分布的针状 β'' 相的微观组织，使合金抗拉强度达到 330MPa，电导率最高达 58%IACS。除传统变形方式外，大塑性变形结合时效处理的工艺路线也受到广泛关注。研究表明，等通道转角挤压（ECAP）、累积叠轧等大塑性变形技术可引入极高密度的位错并显著细化晶粒尺寸，加速析出相的形核与演化过程，从而使合金强度获得大幅提升。Zhao^[20]等研究了等通道转角挤压（ECAP）和多级时效工艺对 Al-Mg-Si 系 6063 合金抗拉强度和电导率的影响，结果表明，ECAP 变形可以诱导形成含纳米级析出相的超细晶组织，四道次 ECAP 后再经过两次时效处理，合金抗拉强度达到 376MPa，电导率为 49.5%IACS。尽管大塑性变形在晶粒细化和强度提升方面具有显著优势，但当累计变形量过大时，过高的缺陷密度和显著增加的晶界面积会增强电子散射效应，从而在一定程度上制约合金导电性能的进一步提升。Chrominski^[21]等通过累积轧制和时效工艺相结合的方法，使得析出相更加弥散分布，提高了 Al-Mg-Si 系合金硬度，如图 3 所示。因此，合理控制大塑性变形的累计变形量并与适宜的时效制度相匹配，是实现性能平衡的关键。总体而言，形变热处理已成为调控 Al-Mg-Si 系导电铝合金微观组织和综合性能的有效手段，相关研究在工艺路径设计、析出行为调控及性能优化方面取得了显著进展。未来研究应进一步围绕形变缺陷与析出相演化的耦合机制，精细调控变形程度与多级时效制度，同时结合先进表征技术和组织性能关联模型，进而开发出高强度、高导电性的 Al-Mg-Si 系合金。

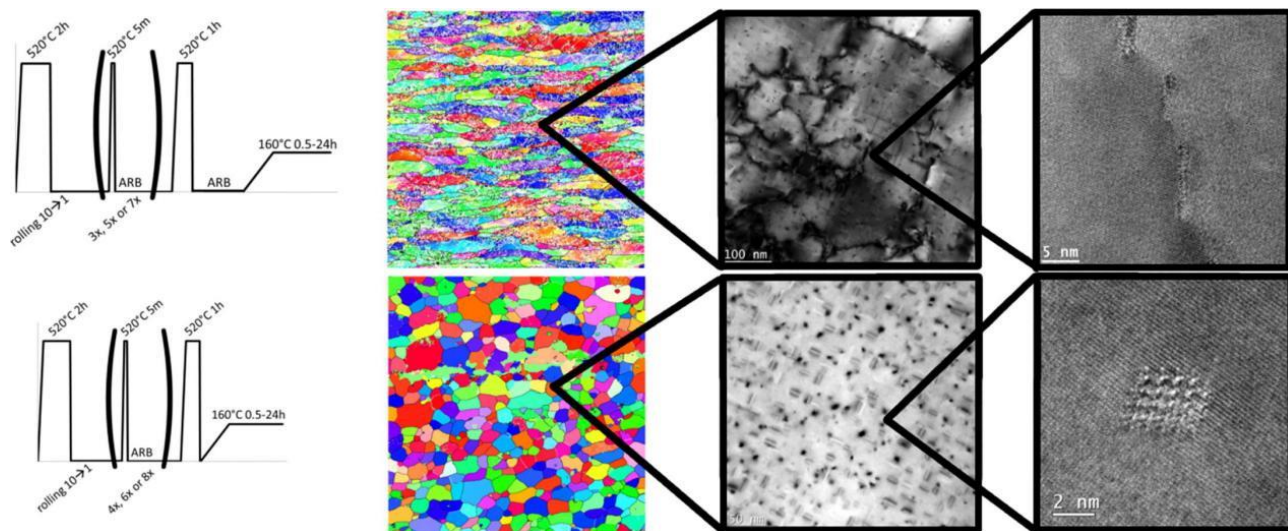


图3 多次累积轧制结合时效热处理 Al-Mg-Si 合金的沉淀强化^[21]

4 结语

Al-Mg-Si 系导电铝合金兼具较高导电性、良好力学性能及成形加工性能,是实现“以铝代铜”的重要候选材料,具有广阔的工程应用前景。本文系统总结了当前导电铝合金的应用现状及研究进展,主要结论与展望如下:

(1) 通过合金化调控,尤其是引入稀土及微量合金化设计,一方面要抑制有害杂质相;另一方面应使得添加的合金化元素,在室温下以弥散相形式析出,降低基体固溶元素含量,在提高合金强度的同时,降低对电子的散射,使其兼备导电性。

(2) 导电铝合金制备过程中需高度重视熔体纯净度。通过熔体净化、区域提纯等工艺手段,有效降低杂质元素和非金属夹杂物含量,提升基体纯净度,从而显著改善合金的导电性能与综合力学性能。

(3) 合理的形变热处理工艺可通过引入高密度位错和晶粒细化,并结合多级时效调控析出相的类型、尺寸与分布特征,在一定程度上缓解强度与导电性能之间的制约关系。尤其是大塑性变形与多级时效工艺的协同应用,有望获得纳米晶结构与高度弥散的析出相,从而进一步提升导电铝合金的综合性能。

(4) 将机器学习与数据驱动方法引入导电铝合金研究,有望加速复杂合金化设计和多工艺参数的优化过程,实现成分-组织-性能之间关系的高效预测与精准调控,为新一代高强高导铝合金的设计与工程应用提供有力支撑。

基金项目:河津市科技计划项目(202401);浙江省博士后基金(ZJ2024127)。

【参考文献】

- [1] 王学印,郭广勋.制冷空调行业铝代铜现状及其发展前景[J].轻合金加工技术,2025,53(5):1-5.
- [2] 范文秀,刘欢,吴玉娜,等.Al-Mg-Si 导电铝合金的研究现状及发展趋势[J].现代交通与冶金材料,2025,5(3):86-126.
- [3] 王茹,邱铨强,吴蔚,等.Ag 微合金化对 Al-Mg-Si 合金析出相结构的影响[J].特种铸造及有色合金,2024,44(8):1127-1132.
- [4] 尹斌,曹富荣,王顺成,等.稀土元素对连续铸挤 Al-Mg-Si 合金组织性能的影响[J].精密成形工程,2017,9(6):130-136.
- [5] 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 and

Technology,2019,35(5):742-751.

- [6] Dong Q P, Wang R Z, Wang J H, et al. Influence of Mg/Si ratio on the mechanical strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Today Communications,2025(42):111439.
- [7] 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):4445-4459.
- [8] Zhao Q R, Qian Z, Cui X L, et al. Optimizing microstructures of dilute Al-Fe-Si alloys designed with enhanced electrical conductivity and tensile strength[J]. Journal of Alloys and Compounds,2015(650):768-776.
- [9] Cui X L, Li X H, Ye H, et al. Study on microstructure characterization, electrical conductivity and mechanical property improvement mechanisms of a novel Al-Si-Mg-Fe-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds,2021(885):160959.
- [10] Zheng Y, Bian L P, Ji H L, et al. Influence of Ca and Mn on microstructure, mechanical properties, and electrical conductivity of as-cast and heat-treated Al-Mg-Si alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2022,51(11):4010-4020.
- [11] He J X, Wang J B, Ding J, et al. Influence of Mn in balancing the tensile and electrical conductivity properties of Al-Mg-Si alloy[J]. Metals,2025,15(8):923.
- [12] 王峰,王松伟,王帆,等.Cu 对热挤压 Al-Mg-Si 合金力学性能及导电率的影响[J].沈阳工业大学学报,2015,37(5):515-519.
- [13] Elgallad E M, Khangholi S N, Javidani M, et al. Development of ultra-high-strength Al-Mg-Si conductor alloys with copper addition via scalable thermomechanical processes[J]. Scripta Materialia,2025(257):116462.
- [14] Li D Q, Cai S L, Gu J, et al. Co-doping of La/Ce and La/Er induced precipitation strengthening for designing high-strength Al-Mg-Si electrical conductive alloys[J]. Materials Today Communications,2023(36):106666.
- [15] 陈保安,李梦琳,陈瑞,等.添加稀土对 Al-Mg-Si 合金微观组织和性能的影响[J].金属热处理,2024,49(7):100-105.

- [16] Mahmoud M G,Zedan Y,Samuel A M, et al. Effect of rare earth metals (Ce and La) addition on the performance of Al-Si-Cu-Mg cast alloys[J]. International Journal of Metalcasting,2022,16(3):1164-1190.
- [17] Lin G Y, Zhang Z P, Wang H Y, et al. Enhanced strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloy by thermo-mechanical treatment[J].Materials Science and Engineering: A,2016(650):210-217.
- [18] Chen L, Ou M G, Liang Y, et al. Effects of processing paths on microstructure evolution and properties of high-strength and high-conductivity Al-Mg-Si alloys[J].Materials Science and Engineering: A,2025(941):148606.
- [19] Majchrowicz K, Pakiela Z, Chrominski W, et al. Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion[J].Materials Characterization,2018(135):104-114.
- [20] Zhao N N, Ban C Y. Developing a high-strength Al-Mg-Si alloy with improved electrical conductivity by a novel ECAP route[J]. Metals and Materials International,2022(28):2513-2528.
- [21] Chrominski W, Lewandowska M. Precipitation strengthening of Al-Mg-Si alloy subjected to multiple accumulative roll bonding combined with a heat treatment[J].Materials & Design,2022(219):110813.

作者简介：黄家亮（1986.1—），男，本科学历，毕业学校：西安石油大学，所学专业：化学专业，现就职单位：运城康道合金科技有限公司。