

高强高导铝合金材料应用与研究现状

周丰铝

浏阳市达浒镇人民政府经济发展办公室，湖南 长沙

收稿日期：2025年12月9日；录用日期：2026年1月9日；发布日期：2026年1月20日

摘要

高强高导铝合金在电力电子、轨道交通、航空航天等领域具有广泛且迫切的应用需求。然而，材料的强度与导电性通常呈倒置关系，为破解这一矛盾，当前研究主要围绕“成分设计-微观组织调控-制备工艺创新”三个协同层面展开。本文系统分析了铝合金材料强度与导电性的协同机理，以及通过合金成分优化设计、制备与加工工艺优化提高铝合金强度与导电率的技术途径，在此基础上，讨论了当前主要高强高导铝合金体系，并围绕高强高导铝合金材料与制备工艺开发面临的挑战与重点方向进行了论述。

关键词

高强高导铝合金，成分优化，微观组织，制备工艺

The Application and Research Landscape of High-Strength, High-Conductivity Aluminum Alloys

Fenglyu Zhou

Economic Development Office, People's Government of Dahu Town, Liuyang City, Changsha Hunan

Received: December 9, 2025; accepted: January 9, 2026; published: January 20, 2026

Abstract

High-strength, high-conductivity aluminum alloys are in pressing demand for critical applications in power electronics, rail transit, and aerospace. However, a fundamental trade-off exists between strength and electrical conductivity. To break this performance paradox, state-of-the-art research is strategically centered on a tripartite framework: composition design, microstructure engineering, and advanced processing. This review provides a systematic analysis of the underlying synergy—and conflict—between strength and conductivity in Al alloys. It then elaborates on the technical pathways

for enhancing both properties via optimized alloying and innovative thermo-mechanical processing. Furthermore, the prevailing alloy systems are critically discussed. The review concludes by outlining the persisting challenges and future priorities in material design and manufacturing technology for next-generation high-strength, high-conductivity aluminum alloys.

Keywords

High-Strength, High-Conductivity Aluminum Alloys, Composition Optimization, Microstructure, Processing Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代工业对轻量化、节能化和高效率的持续追求，铝合金凭借其优异的比强度、良好的耐腐蚀性和加工性能，已成为众多高端领域的关键材料。在电力传输(如架空导线)、新能源汽车、高速列车及集成电路等典型应用中，导体部件不仅需要承载电流，因而要求高导电性；同时也必须承受机械载荷，故需具备高强度[1]-[3]。然而，这一双重需求在传统铝合金中存在着本质性矛盾：高导电的纯铝(如 1xxx 系，电导率 $\geq 62\%$ IACS)强度过低(屈服强度 < 100 MPa)；而高强的传统合金(如 2xxx、7xxx 系，强度高)却因大量固溶原子与第二相粒子对电子的强烈散射，导致电导率普遍低于 40% IACS，难以满足应用要求[3]-[5]。

因此，开发兼具高强度和高导电性的新型铝合金，成为材料科学领域一项重要而紧迫的课题。其核心科学挑战在于：如何通过成分设计与工艺创新的协同，在微观尺度上实现对缺陷结构(如溶质原子、析出相、位错、晶界)的精细调控，在引入有效强化机制的同时，最大限度地降低对电子迁移的散射，最终实现强度与导电性这对矛盾属性的“双高”兼顾。这构成了该领域持续的研究热点与技术进步的主攻方向。

2. 高强高导铝合金的应用现状

高强高导铝合金作为现代电力传输、轨道交通及高端装备的核心基础材料，其应用现状正呈现出从传统电力导线向高性能综合应用场景快速拓展的多元化格局。在特高压输电领域，以 6201、6101 等牌号为代表的 Al-Mg-Si 系合金已取代部分钢芯铝绞线，成功应用于大跨越导线、节能增容线路及海缆系统中，其典型抗拉强度达 300~360 MPa、电导率超过 51.7% IACS，在实现线路轻量化的同时显著降低了输电损耗，典型案例包括国家电网 JLHA3-425 型特高压导线及沿海地区耐腐蚀铝合金电缆的大规模部署[4] [6] [7]。在轨道交通方面，高强高导 6063、6N01 铝合金已全面应用于高铁接触网导线、汇流排及车厢导电轨，其中抗拉强度达 350 MPa 以上、电导率超过 58% IACS 的新型合金导线，有效满足了时速 350 公里级高速列车对受流稳定性与能源效率的双重要求。而在新能源汽车与航空航天领域，应用需求正向更高性能指标突破：电池包内部高压连接铜排的轻量化替代方案正推动抗拉强度 400 MPa 级、电导率 55% IACS 以上铝合金的产业化攻关；航空导线则对耐热铝合金提出更严苛要求，需在 150℃ 长期服役环境下保持强度与电导率的稳定性，Al-Er-Zr 等微合金化体系在此展现出独特优势。

总体而言，不同体系的高强高导铝合金在应用领域中表现出显著的性能差异，其强度与电导率之间存在典型的权衡关系。为直观反映各类高强高导铝合金的性能分布及发展潜力，图 1 给出了各类高强高

导铝合金的强度 - 电导率关系图，可用于标定当前材料的性能边界与未来优化方向。

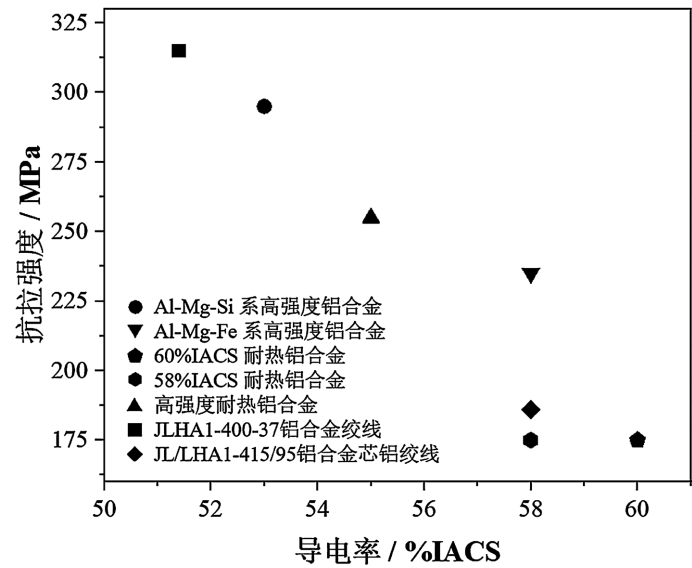


Figure 1. Strength-electrical conductivity relationship diagram for high-strength & high-conductivity aluminum alloys
图 1. 高强高导铝合金的强度 - 电导率关系图

为了系统比较不同高强高导铝合金在性能与工艺上的差异，本文对近年来典型代表合金的化学成分、典型加工工艺、力学性能和导电性能进行了汇总，如表 1 所示。该表不仅反映了主流高强高导铝合金的性能水平与应用特征，也揭示了不同合金在强度 - 导电性平衡和工艺可行性方面的取舍关系，为后续性能优化与材料设计提供了基础参考。

Table 1. Comparison of mainstream high-strength, high-conductivity aluminum alloys
表 1. 主流高强高导铝合金对比

合金	典型工艺	抗拉强度(MPa)	导电率(% IACS)
FLG/Al 复合材料	883 K 温度下 SPS + 热挤压	177	59.80
Gr/Al 复合材料	铸造 + 冷轧 + 200℃时效 1 h	180	63.45
铝合金绞线(JLHA1-400-37)	拉丝 + 退火	315	51.4
Al-0.2Sc-0.04Zr 合金	380℃下时效 189 min	140	60.0
6063 铝合金	540℃固溶 50 min + 185℃时效 8 h	290	52.42
Al-2Ni-0.5Zr 铝合金	激光 3D 打印	168	53.5
Al-Zr-Sc 铝合金	连铸连轧 + 过时效	195	61.1
6201 铝合金	旋转锻造 + 时效	352	51.7

值得关注的是，当前产业化应用仍面临两大核心挑战：一方面，现有合金在强度突破 400 MPa 时普遍出现导电率陡降至 50% IACS 以下的“性能瓶颈”，制约了其在超高压电力设备及航天器线缆等尖端场景的应用[1]；另一方面，复杂截面型材(如异形导电轨、水冷母线)的挤压成形工艺与组织性能协同控制技术尚不成熟，导致产品成品率与性能一致性亟待提升。未来随着深度脱氧提纯、多级形变热处理等新工艺的产线集成，以及机器学习辅助的成分 - 工艺优化系统投入应用，高强高导铝合金有望在新能源电

力系统、超高速轨道交通及航空航天供电网络中实现更广泛的替代升级，其全球市场规模预计将在 2030 年突破百亿美元，成为引领轻量化导电材料技术变革的关键力量[3] [8] [9]。

3. 铝合金材料强度与导电性的协同机理

3.1. 导电性机制与影响因素

金属的导电性源于自由电子的定向迁移，电导率(σ)的下降主要源于电子在迁移过程中受到的散射，其倒数电阻率(ρ)可表示为[10]：

$$\rho = \rho_l + \rho_i + \rho_d \tag{1}$$

其中， ρ_l 为晶格热振动引起的电阻(与温度相关)， ρ_i 为杂质和合金元素引起的电阻， ρ_d 为晶体缺陷(如位错、晶界)引起的电阻。

对于铝合金而言，溶质原子是导致 ρ_i 增加的最主要因素，固溶于铝基体中的异类原子严重破坏晶格的周期性，对电子产生强烈的散射作用，显著降低电导率。

3.2. 强化机制

铝合金的强化主要依赖于以下几种机制[11] [12]：

- (1) 细晶强化：通过细化晶粒，增加晶界数量，阻碍位错运动。
- (2) 析出强化：通过时效处理形成纳米级析出相，有效地钉扎位错。
- (3) 固溶强化：溶质原子引入晶格畸变，阻碍位错运动。
- (4) 形变强化：通过冷变形引入高密度位错，提升强度。

在铝合金的多种强化机制中，形变强化与析出强化是最主要且可控性最强的两类机制。前者通过位错累积形成应变强化效应，后者依赖弥散析出相对位错运动的阻碍作用实现强化。为更直观地说明这两种机制的微观作用机理，图 2 展示了铝合金的形变强化与析出强化过程示意图。

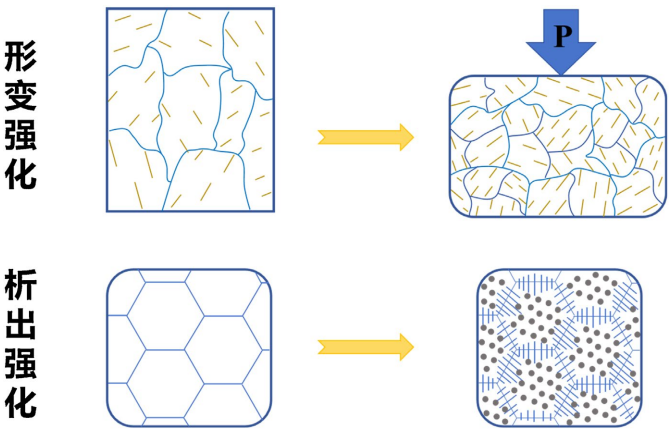


Figure 2. Deformation strengthening and precipitation strengthening mechanisms of aluminum alloys
图 2. 铝合金的形变强化与析出强化机制

3.3. 强度与导电性的协同策略

强度与导电性矛盾的核心在于固溶强化与导电性不可兼得，因此，高强高导铝合金的设计核心是“降低固溶，促进析出”，最大限度地降低基体中的固溶原子浓度，以保证高导电性。

通过引入大量细小、弥散且与基体共格/半共格的纳米析出相，来获得强烈的析出强化效果，同时这

些析出相对电子的散射作用远小于固溶原子。同时，利用细晶强化和形变强化作为补充强化手段。

4. 高强高导的关键技术途径

4.1. 合金成分优化设计

在合金成分是协同铝合金材料强度与导线性能的重要途径，当前主要的关注点在主合金元素优化与微量元素添加方面。

(1) 主合金元素对强度与力学性能的影响

Al-Mg-Si (6xxx)系合金是当前研究和应用最广泛的体系，文献聚焦于通过精确调控 Mg/Si 比例、添加微量 Cu、Ag 等元素，优化 β'' (Mg₂Si)等强化相的析出行为，寻求强度与导电率的最佳平衡点[4] [13]-[15]。文献成功研制了高强导电 6063 铝合金管[16]。该体系的优势在于成分简单、加工性能优异、热处理制度成熟，适合电力导线和轨道交通等大规模应用。然而，其峰值强度受 β'' 相热稳定性限制，该相在 200℃ 以上易发生粗化；此外，若 Mg/Si 比偏离化学计量比，残余固溶原子将增强电子散射，导致导电率降低。未来研究可重点围绕强化相热稳定性提升、导电损失抑制与电子散射优化三方面展开。

另一方面，提高 Al-Zn-Mg (7xxx)系高强铝合金的导电性能也吸引了众多学者的兴趣，文献表明，通过调整 Zn/Mg 比与时效工艺，7000 系铝合金可获得极高的强度，但导电率提升是其难点。研究普遍认为，降低溶质残留量、优化析出相尺寸与分布是改善导电性能的关键途径[17]。该体系的强化机制主要依赖于 η' (MgZn₂)析出相，赋予材料极高的强度，但由于 Zn、Mg 在铝基体中具有较高的固溶度，残余溶质原子形成大量电子散射中心，导致电阻率上升。7xxx 系合金的优势在于具备极高的强度潜力和成熟的热处理制度(如 T6、RRA 等)，但同时存在导电性能受限、时效窗口狭窄以及晶界连续析出与应力腐蚀开裂(SCC)风险高等问题。未来研究方向可聚焦于降低 Zn/Mg 比(低 Zn 高 Mg 设计)减少溶质残留、采用多级时效工艺(T6 → T77)控制析出相序列、引入弥散分布的 Al₃(Zr,Er)相以兼顾强度与导电性等。

在铝铜合金中，Cu (铜)可通过时效形成 θ'' 和 θ' (Al₂Cu)析出相，提供极强的析出强化。关键在于精确控制时效工艺，使 Cu 原子尽可能从基体中析出，从而在获得高强度的同时恢复基体导电性[18]-[20]。

(2) 微量元素对强度与力学性能的影响

微合金化是当前平衡铝合金材料强度与导电率的核心手段，通常添加微量(<1.0 wt%)的特定元素。Zr (锆)是最重要的微合金化元素之一，Zr 能在铝基体中形成稳定的 L1₂ 结构 Al₃Zr 析出相，该相与基体完全共格，界面能低，热稳定性极高，能有效钉扎晶界和位错，提供持久的高温强化，同时其对电子的散射较弱[21]。Er (铒)、Sc (钪)与 Zr 类似，形成 Al₃Er、Al₃Sc 析出相，具有极强的析出强化和抑制再结晶的作用，Sc 效果极佳但成本高昂，常与 Zr 联合使用以降低成本并产生“协同效应”。在快速凝固/粉末冶金工艺中，Fe (铁)、Ni (镍)可形成稳定的金属间化合物(如 Al₃FeNi)，提供高温强度和抗蠕变能力，且对电导率影响较小[4] [13] [21]-[23]。

4.2. 制备与加工工艺优化

调控铝合金强度与导电性能的核心在于控制点缺陷(溶质原子)、线缺陷(位错)、面缺陷(晶界、相界面)与电子传输的相互作用。析出相类型、形态、分布等特征对力学、电学性能的影响较大，通过形成大量细小、弥散、与基体共格/半共格且界面清晰的纳米析出相是核心，如 Al₃(Er, Zr)、 β'' 相等，既能有效钉扎位错，又对电子迁移阻碍较小[24]。

同时，通过形变与再结晶控制晶粒尺寸与取向也是改变材料力学、电学性能的重要途径；细晶强化能提升强度，但过多晶界会散射电子，发展“亚晶界”或“回复组织”是当前研究的重点方向，其原理是在保留部分位错墙强化作用的同时，减少对电子的散射。另一方面，通过溶质原子存在形式的精确控

制,使强化元素尽可能析出成为有效强化相,最大限度降低基体中的固溶原子浓度,这是提升导电率的关键[25]。

在加工制造方面,通过快速凝固/粉末冶金(RS/PM)能够获得过饱和固溶体、细化微观组织、形成非平衡相,为后续热处理创造有利条件。通过剧烈塑性变形(SPD),如等通道转角挤压(ECAP)、高压扭转(HPT)等,可制备出超细晶甚至纳米晶结构,实现极高的细晶强化,同时晶界对电子的散射作用相对温和。剧烈塑性变形技术:如采用的旋锻,以及可能涉及的等通道角挤压等,能制备超细晶乃至纳米晶结构,大幅提高强度,但需后续热处理以恢复导电性[26]。

铝合金的强化与导电性能优化一定程度上依赖于从原子尺度溶质行为到微观组织结构的多层次调控。不同热处理过程对铝合金中析出相的形成、长大及分布具有决定性影响。以典型 6xxx 系铝合金为例,其组织演化过程主要经历从固溶态过饱和固溶体到时效态 β'' 强化相的逐步析出与转变。为更直观地展示该过程,图 3 给出了典型 6xxx 系铝合金在固溶与时效过程中的组织演化示意图。

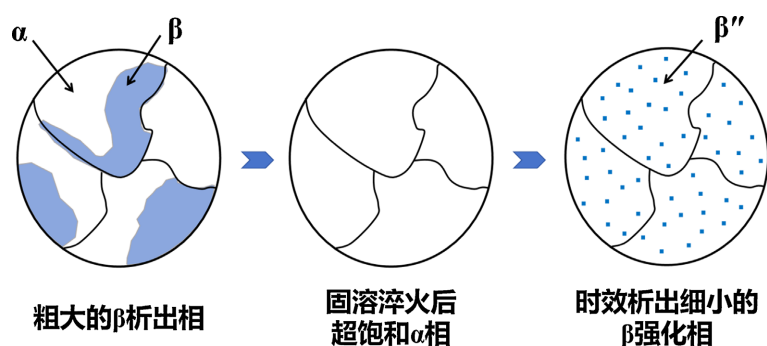


Figure 3. Schematic diagram of the microstructure evolution during heat treatment of typical 6xxx aluminum alloys
图 3. 典型 6xxx 铝合金的热处理组织演化示意图

进一步,结合多级热处理工艺,包括多级固溶、多级时效(T6、T78、T79 等),可实现析出序列的有效调控,促使析出相细小、弥散分布,并避免形成粗大或晶界连续析出相,从而优化强韧性和导电性的匹配。

形变热处理是当前最主流且工业可行的技术路径来实现强度与导电性能的协同,文献系统研究了轧制/挤压 + 时效工艺中,预变形量、时效温度与时间对 6201 铝合金性能的影响,揭示了变形引入的位错为析出提供形核点,从而优化析出动力学。

5. 主要高强高导铝合金体系

5.1. Al-Cu-Mg-Ag 系合金

Al-Cu-Mg-Ag 系合金属于典型的高强耐热型铝合金体系,通过添加 Ag 和 Mg,促进形成细密、与基体共格的 Ω (Al_2Cu) 相,该相的热稳定性优于 θ' 相,使该系列合金在 200℃ 以上仍能保持高强度,具有更高的热稳定性和较低的界面能,同时电导率可通过时效处理得到提升。主要优势在于高温性能稳定、强化相形貌可控及良好的加工适应性;局限性则在于 Ag 成本较高、时效过程窄且工艺窗口要求严格。

5.2. Al-Zr-(Er-Sc)系合金

该类合金是导线应用的明星材料,通过控制 Al_3Zr 及其复合析出相的形核与长大,实现了优异的耐热性和良好的强导配合。例如,Al-0.1Zr-0.1Er 合金在经过适当加工和退火后,可实现电导率 60% IACS 以上和抗拉强度超过 150 MPa 的综合性能,其强化机制基于 L_{12} 结构的 Al_3 (Zr, Er) 共格析出相。该相热

稳定性高、界面能低，能有效钉扎晶界与位错，对电子散射作用弱。

5.3. Al-Fe-Ni-Si 系合金

Al-Fe-Ni-Si 系合金属于典型的耐热高导型铝合金体系，利用快速凝固技术形成高体积分数的耐热弥散相，如 Al_9FeNi 。这些相在高温下不易粗化，保证了材料的高温强度和抗蠕变性，同时由于 Fe、Ni 在 Al 中固溶度极低，基体纯净，使该体系在强化的同时保持了较高的电导率，表现出优良的强度 - 电导率协同特性。

6. 挑战与展望

当前，高强高导铝合金研究虽已取得显著进展，但在通往大规模、低成本、高性能应用的道路上仍面临多重挑战，主要包括以下四个方面：

- 1) 理论模型有待深化：现有模型对复杂析出序列与性能关联的预测精度不足，亟需发展融合第一性原理、相场法及机器学习的多尺度计算模拟，以精准指导新合金设计与工艺优化。
- 2) 成本控制压力突出：高效但昂贵的 Sc 元素限制了其大规模应用。开发以 Zr、Er、Ce 等元素为主的低 Sc 或无 Sc 复合微合金化方案，是推动产业化降本的关键。
- 3) 高效稳定生产工艺瓶颈：传统工艺流程长、能耗高。开发如连铸连轧与在线热处理相结合的短流程、一体化制备技术，是实现高性能材料大规模、稳定生产的核心工艺挑战。
- 4) 性能天花板亟待突破：现有合金体系的强导配合已接近传统理论极限。亟需探索基于共格纳米团簇、梯度结构或异构结构等新型强化机制与微观构型，以开辟新的性能空间。

与此同时，未来在高强高导铝合金材料设计、制造及应用方面，亟需关注的重点方向如下：

- 1) 人工智能驱动的高通量设计：深度融合机器学习与计算材料学，构建成分 - 工艺 - 组织 - 性能的智能映射关系，极大加速新型合金与热处理工艺的研发周期。
- 2) 多尺度结构跨工艺协同设计：实现从原子尺度溶质团簇、纳米级析出相到微米级晶粒/亚晶结构的一体化设计与全流程工艺精准调控，打破各尺度组织优化相互割裂的现状。
- 3) 极端/复合工艺开发：积极探索将剧烈塑性变形(如旋锻、ECAP)与先进热处理(如脉冲电流时效、磁场处理)相结合的新颖工艺，创造常规手段无法获得的独特强化结构。
- 4) 面向场景的定制化与综合评价：针对特高压输电、新能源汽车、航空航天等具体应用场景，开发定制化合金与型材加工技术，并系统性加强其在疲劳、蠕变、腐蚀等复杂工况下的综合服役性能评价体系。

综上所述，未来的突破将依赖于计算设计、工艺创新与表征评价三方面的深度融合，通过跨学科、多尺度的系统研究，推动该领域从“经验试错”向“理论预测与精准制造”的范式转变，最终实现材料性能的持续突破与产业化应用的广泛拓展。

7. 总结

当前，高强高导铝合金的研究已从单一的成分尝试，进入到基于微观组织机理理解的、成分 - 工艺 - 性能一体化设计的新阶段。其核心科学范式在于通过微合金化与先进加工热处理工艺的协同，在最大限度地净化铝基体以保障导电性的同时，引入高密度、热稳定的纳米析出相作为核心强化源，从而实现强度与导电性的最优平衡。Al-Er、6xxx、7xxx 系是三大主力研究方向，形变热处理是实现上述组织调控的核心工艺手段。未来的突破将有赖于计算材料学、先进表征技术与创新制备工艺的深度融合，推动研发范式从“经验试错”向“理论预测、精准制备”的根本性转变。随着理论设计、工艺优化与微观解析能力的持续进步，性能更优异、成本更可控、应用场景更广泛的新一代高强高导铝合金必将不断涌现，

以满足新时代对轻量化、高效能导电金属材料的迫切需求，为国民经济与国防建设提供更坚实的材料支撑。

参考文献

- [1] 章德胜, 刘平, 刘新宽, 李伟, 马凤仓, 陈小红. 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.
- [2] 华明凯. 铝对高强高导铝合金导线材料组织性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [3] 王志琪, 薛昊, 李佳铭, 白俊源, 赵志浩, 秦高梧. 交通运输用导电铝合金的应用现状及研究进展[J]. 现代交通与冶金材料, 2024, 4(1): 11-29.
- [4] Mao, Q., Wang, L., Nie, J. and Zhao, Y. (2024) Optimizing Strength and Electrical Conductivity of 6201 Aluminum Alloy Wire through Rotary Swaging and Aging Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, **331**, Article 118497. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118497>
- [5] Liu, W.J., Li, Y.D., Qiu, J., Luo, X.M., *et al.* (2025) Strength-Thermal Conductivity Synergy of Aluminum Alloys Revealed by Al-Re (RE=Ce, La, Gd, Y, Sm, Yb, Er) Intermetallic Compounds. *Materials & Design*, **255**, Article 114221. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114221>
- [6] 朱万利. 高强铝合金导体材料研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [7] 黎汉林. JLHA55.25 高强度高导电率铝合金导线研制及应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2023(3): 17-20.
- [8] 欧阳轶, 邢少敏. 7B50 铝合金三种时效状态的导电率和力学性能[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(4): 44-47+53.
- [9] 王亮. 新能源汽车充电电缆用高强度抗蠕变铝合金导体[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2024(4): 25-28.
- [10] 侯嘉鹏. 铝及铝合金线高强度高导电率机制研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [11] Wang, X., Zhao, Y., Li, M., Tang, S., Huang, Y., Liu, Y., *et al.* (2024) Achieving Enhanced Mechanical Properties of Extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy by Regulating the Initial LPSO Phases. *Materials Science and Engineering: A*, **917**, Article 147411. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147411>
- [12] 王艳玲, 马云龙, 黄元春, 章强, 谭维杨. Zr 元素对 Al-Zn-Mg 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(12): 40-45+49.
- [13] Chen, W., Huang, C., Duan, S., Guo, J. and Du, J. (2025) Synergistic Improvement of Strength and Conductivity of 6101 Alloy with High Fe Content Modified by Trace Sr and Er. *Journal of Materials Research and Technology*, **39**, 4344-4354. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.10.116>
- [14] 范文秀, 刘欢, 吴玉娜, 江静华, 马爱斌. 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): 86-100+126.
- [15] 赵兴华. 变形方式及低温时效对高 Mg、Si 含量 6201 铝合金强度及导电性的影响[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [16] 李红英, 赵菲, 阳慎兰. 富 Ce 混合稀土加入量对铝合金组织与导电性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(4): 719-727.
- [17] 李海, 王芝秀, 郑子樵. 时效状态对 7000 系超高强铝合金微观组织和慢应变速率拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(9): 1634-1638.
- [18] Wang, H., Yi, Y. and Huang, S. (2017) Investigation of Quench Sensitivity of High Strength 2219 Aluminum Alloy by TTP and TTT Diagrams. *Journal of Alloys and Compounds*, **690**, 446-452. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.160>
- [19] Vyletel, G.M., Allison, J.E. and Van Aken, D.C. (1995) The Effect of Matrix Microstructure on Cyclic Response and Fatigue Behavior of Particle-Reinforced 2219 Aluminum: Part I. Room Temperature Behavior. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **26**, 3143-3154. <https://doi.org/10.1007/bf02669443>
- [20] Krajewski, P.E., Allison, J.E. and Jones, J.W. (1993) The Influence of Matrix Microstructure and Particle Reinforcement on the Creep Behavior of 2219 Aluminum. *Metallurgical Transactions A*, **24**, 2731-2741. <https://doi.org/10.1007/bf02659497>
- [21] Wang, T., Li, R., Wang, Y., Xia, X., Zou, L., Yuan, T., *et al.* (2025) Comprehensive Study on Al-Mg-Sr-Zr Aluminum Alloy for Additive Manufacturing in Dual Equiaxed Grains Regions with High Sr and Zr Content. *Materials Science and Engineering: A*, **942**, Article 148743. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148743>
- [22] Mingotti, E., Girelli, L., Tocci, M., Arcaleni, R., Dongellini, M., Ceschini, L., *et al.* (2025) Effect of Different Heat Treatments on the High Temperature Tensile Behavior and Electrical/Thermal Conductivity of HPDC Castings in High

-
- Recycled Content AlSi10MnMg Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **1049**, Article 185446. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.185446>
- [23] Parvizi, P., Jalilian, M., Mirazizi, P.S., Zangeneh, M.R. and Amidi, A.M. (2025) Mechanical and Physical Properties of Aluminum and Its Alloys for Electrical Conductors: A Review. *Next Materials*, **9**, Article 101090. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101090>
- [24] 邱跃武. Al-Er 高强耐热导电铝合金的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [25] Wang, X., Zhao, G., Sun, L., Wang, Y., Lv, Z., Xu, S., *et al.* (2023) Effect of Strain and Dispersoids on Abnormal Grain Growth, Precipitation Behavior and Mechanical Properties at Longitudinal Weld in Al-Li Alloy Profile. *Journal of Materials Processing Technology*, **322**, Article 118216. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118216>
- [26] Lv, Y., Fan, Y., Zhao, S., Han, Y., Liu, T., Cheng, H., *et al.* (2022) The Microstructure Evolution, Damage Behavior and Failure Analysis of Fine-Grained W-Y₂O₃ Composites under High Transient Thermal Shock. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **107**, Article 105905. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105905>