

高强高导铝合金研究现状

李凯^{1,2}, 王红超¹, 杨志彬¹, 张晓敏¹, 吴小超²

(1. 河南平高电气股份有限公司, 河南平顶山 467001;

2. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南郑州 450000)

摘要: 高强高导铝合金因其优异的性能被广泛应用于电力、航天、交通等领域。综述了高强高导铝合金的强化机制、导电导热性能影响因素及不同合金体系的研究现状。研究发现, 铝合金强化需引入晶格缺陷阻碍位错运动, 但缺陷会加剧电子散射, 降低导电导热性, 精细化调控微观缺陷是协调二者矛盾的关键。传统Al-Mg-Si系、Al-Zr(-Sc)系合金通过精准调控成分与析出相, 可实现强度与导电性的平衡; Al-RE系及Al-石墨烯/CNTs复合材料借助界面工程突破性能瓶颈, 显著提升强度且控制电导率损失。此外, 热处理、塑性变形等工艺对合金性能起决定性作用, 多级热机械处理可有效协调强度与导电性, 机器学习为工艺优化和新材料开发提供了新路径。

关键词: 铝合金; 高强高导; 晶格缺陷; 界面工程; 热机械处理; 机器学习

中图分类号: TG146.21; TG113.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0464-12

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0063

Research Status of High-Strength and High-Conductivity Aluminum Alloys

LI Kai^{1,2}, WANG Hong-chao¹, YANG Zhi-bin¹, ZHANG Xiao-min¹, WU Xiao-chao²

(1. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467001, Henan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: High-strength and high-conductivity aluminum alloys are widely used in the fields of power, aerospace, and transportation due to their excellent properties. This review summarizes the strengthening mechanisms of high-strength and high-conductivity aluminum alloys, the influencing factors of their electrical and thermal conductivity, and the current research status of different alloy systems. It is found through investigation that the strengthening of aluminum alloys requires the introduction of lattice defects to hinder the movement of dislocations, but these defects will intensify electron scattering and reduce electrical and thermal conductivities. Fine-tuning the micro-defects is the key to reconciling contradiction between the two. Traditional Al-Mg-Si series and Al-Zr(-Sc) series alloys can achieve a balance between strength and electrical conductivity by precisely controlling the composition and precipitated phases; Al-RE series and Al-graphene/CNTs composites break through the performance bottleneck through interface engineering, significantly enhancing strength while controlling the loss of electrical conductivity. In addition, processes such as heat treatment and plastic deformation play a decisive role in the alloy's performance. Multi-level thermomechanical treatment can effectively coordinate strength and electrical conductivity, and machine learning provides new paths for process optimization and new material development.

Key words: aluminum alloy; high-strength and high-conductivity; lattice defects; interface engineering; thermal mechanical treatment; machine learning

铝合金因其良好的导电导热、轻质高强、耐腐蚀等原因被广泛应用于电力传输、新能源汽车、航空航天和国防军工等领域^[1-2]。如在电力传输领域, 6系合金线材可用来制作全铝合金绞线, 代替传统的钢绞线, 从而减轻导线重量, 减少杆塔和基础负荷^[3-4]。在

交通运输领域, 高强高导铝合金可用来做高速轨道交通的接触网导线和导电弓架、新能源汽车中的汇流排和电机绕组、船舶中的结构件, 起到轻质高强的作用^[5]。在工业设备的散热系统当中, 高导铸造铝合金主要用于电力电子散热器和热交换器等部件, 保证高

基金项目: 河南省科技研发联合基金 (202324202)。

收稿日期: 2025-12-24 收到初稿, 2026-02-12 收到修订稿。

作者简介: 李凯 (1984-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为铝合金铸件的质量控制。E-mail: 007zzulikai@163.com

通信作者: 杨志彬, 男, 博士。电话: 13082433762, E-mail: zbyangimr@163.com

引用格式: 李凯, 王红超, 杨志彬, 等. 高强高导铝合金研究现状 [J]. 铸造, 2026, 75 (5): 464-475.

LI Kai, WANG Hongchao, YANG Zhibin, et al. Research status of high-strength and high-conductivity aluminum alloys [J]. Foundry, 2026, 75 (5): 464-475.

强度的同时起到良好的散热作用。在磁悬浮轨道、高精度仪器框架、核工业零部件及高档厨具等方面也有广泛应用^[6-7]。另外，在配网、高压开关等设备当中，许多传统的铝合金铸件产品起到通流和支撑的作用，对材料的电导率和强度要求也越来越高^[8-9]。然而，金属的强度与导电性之间存在显著的相互制约关系，严重限制了铝合金在更高领域的应用^[10-12]。目前，已有大量学者研究了铝合金强化工艺对其导电性的影响，但鲜有关于铝合金高强高导的综述性报告。本文详细总结了固溶、第二相和缺陷等对不同牌号铝合金材料强度和导电性的影响。

1 铝合金强度和电导率的协同提升机理

自由电子迁移率作为金属导电的基础，减少因晶界、位错、溶质原子和第二相颗粒等对电子的散射是提高合金导电性的基本途径^[13-14]。铝合金的强化机制通常包括固溶强化、析出强化、位错强化和细晶强化^[15]。研究表明^[16-20]，溶质原子（如Mg、Si）扭曲晶格，增加电子散射，每1at.%溶质原子电导率下降10%~20%；第二相颗粒（如Al₂Cu、Mg₂Si）阻碍电子运动，纳米析出相可使电导率降至40%IACS；高密度位错形成电子散射中心，冷变形后电导率下降5%~15%；晶界数量增多会阻碍电子传输，晶粒每细化1 μm，电导率降低1%~3%。

1.1 电导率和强度的定量模型

金属材料中强度与电导率之间的固有矛盾源于其物理机制的根本对立：强度的提升依赖于引入溶质原子、位错、晶界及析出相等晶体缺陷以阻碍位错运动，而这些缺陷同时作为电子散射中心，显著降低电子和声子的平均自由程，从而导致电导率与热导率下降^[21-23]。因此，高强高导铝合金的开发是一个巨大的挑战。

一般来说，晶界对强度和电导率的影响可以用霍尔-佩奇关系（式1）^[24]和估算晶界电阻率的公式（式2）^[25]来描述：

$$\sigma_{gb} = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2} \quad (1)$$

$$\omega_{gb} = \frac{1}{\rho_{gb}} = \frac{1}{3 \cdot \rho_{gb}^0} \quad (2)$$

式中： σ_{gb} 为晶界强化引起的强度增量， σ_0 为晶格摩擦应力， k 为霍尔-佩奇斜率， d 为平均晶粒尺寸， ω_{gb} 为晶界电导率， ρ_{gb} 为晶界电阻率， ρ_{gb}^0 为单位晶界密度的电阻率。根据式（1）和式（2），可以推断减小晶粒尺寸能提高强度，但会导致电导率损失。相反，增加

晶粒尺寸以牺牲强度为代价能提高电导率。因此，从理论上讲，调整晶粒尺寸的方法不能打破金属材料强度和电导率之间的权衡关系。为破解这一矛盾，Fan等人提出了轴向纤维状晶粒和径向<111>取向织构的微观结构设计概念，以打破强度和电导率之间的权衡关系，如图1所示^[14]，在导电过程中，垂直于轴向的晶界主要散射电子，从而降低了电导率。平行于轴向的晶界主要阻碍位错运动以提高强度。因此，纤维状晶粒形状设计有可能同时提高金属材料强度和电导率。

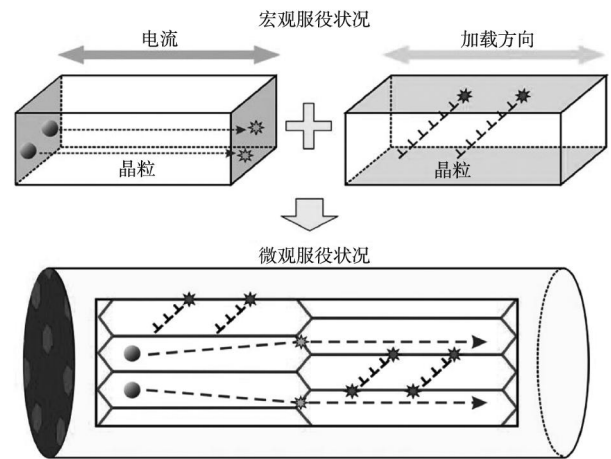


图1 打破强度和电导率之间权衡关系的晶粒设计概念示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the grain design concept for breaking the trade-off relation between strength and electrical conductivity

此外，Hou等人提出了“细长晶粒”设计原理（图2）^[21]，建立了一种计算细长晶粒电导率（electrical conductivity, EC）的新模型，该模型首先将平行晶界与基体并联，然后将它们与垂直晶界串联，可以通过以下方程式计算细长晶粒的电导率：

$$E = \frac{E_v \cdot L \cdot [t^2 \cdot E_0 + 4 \cdot t \cdot h \cdot (E_p - E_0) + 4 \cdot h^2 \cdot (E_0 - E_p)]}{8 \cdot t \cdot h^2 \cdot (E_p - E_0) + 8 \cdot h^3 \cdot (E_0 - E_p) + t^2 \cdot (2 \cdot E_0 \cdot h + E_v \cdot L - 2 \cdot E_v \cdot h)} \quad (3)$$

式中： $E_0=64.94\%$ IACS是基质的电导率； E_p 和 E_v 分别是平行和垂直晶界（grain boundary, GB）的电导率，其中 h 是GB厚度的一半，假设平行和垂直晶界的晶界厚度相同。 t 和 L 分别是晶粒宽度和长度。显然，平行GB的EC明显高于垂直GB，定量证实了平行GB与垂直GB相比具有更好的导电性，定量揭示了晶粒形状参数对强度和EC的一般影响。

1.2 晶界对强度和电导率的定量影响

基于计算EC和屈服强度（yield strength, YS）的定量模型，图3^[21]显示了晶粒宽度、长度、体积以及长径比对EC和YS的影响。很明显，随着晶粒宽度

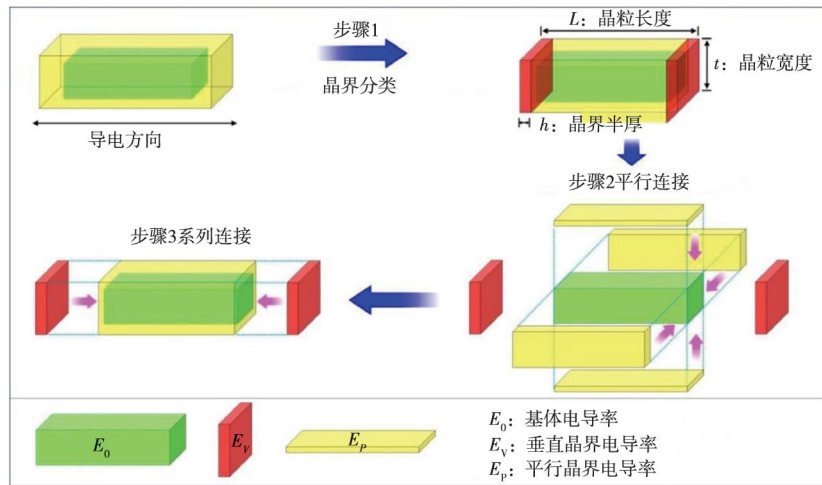


图2 构建计算细长形晶粒电导率的定量模型过程的示意图

Fig. 2 Schematic diagram illustrating the process of constructing the quantitative model for calculating the electrical conductivity of fine-long shaped grains

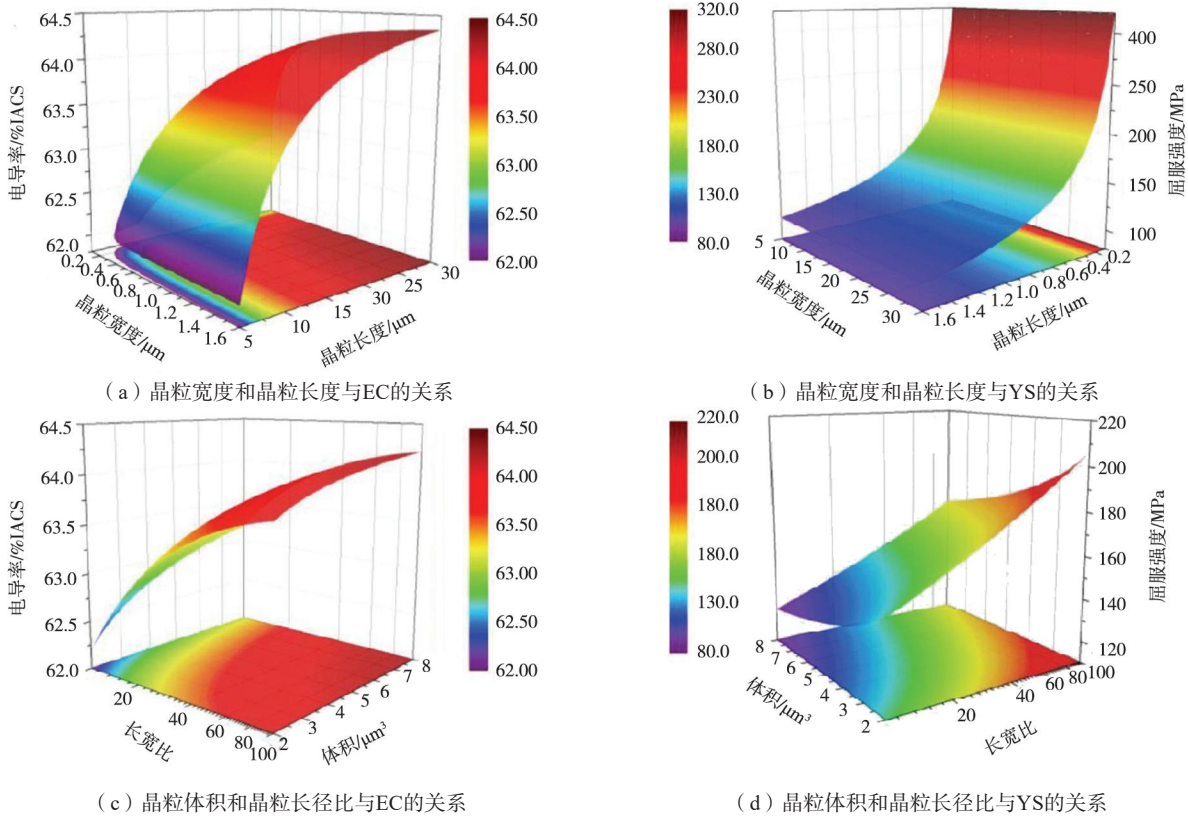


图3 不同晶粒形状特征的YS和EC之间的三维定量关系

Fig. 3 Three-dimensional quantitative relations between YS and EC with different grain shape characteristics

和长度的增加，EC逐渐增加，如图3（a）所示。对于YS，它随着晶粒宽度的减小而显著增加，但不受晶粒长度变化的影响，如图3（b）所示。同时，晶粒体积和晶粒长径比是更准确地描述细长形晶粒的内在参数。因此，基于式（1）和式（3），可以建立不同晶粒体积和晶粒长径比下EC和强度之间的定量关系。图3（c）表明，EC随着晶粒体积和晶粒长径比的增加而

增加。相反，YS随着晶粒体积的减小和长径比的增加而增加，如图3（d）所示。综上所述，图3为高强度、高EC纯铝导体的定量设计提供了理论依据。此外，可以定量评估晶粒体积和晶粒长径比对YS-EC关系的总体影响。当晶粒体积保持不变且晶粒长径比增加时，强度和EC同时增加。然而，当晶粒长径比保持不变而晶粒体积发生变化时，强度和EC表现出传统的

权衡关系。

1.3 不同铝合金系与加工方法的性能进展

基于上述分析,各铝合金体系通过调控析出相、晶粒结构和界面状态,探索了不同的协同提升路径。高强高导铝合金的协同提升机理,已从宏观的性能权衡深入到对位错运动与电子散射这两个基本物理过程

的微观协同调控。表1综合比较了主要高强高导铝合金体系通过代表性工艺所达到的性能水平。

纯铝通过“细长晶粒”设计,增加平行于电流的强化晶界,减少垂直于电流的散射晶界,抗拉强度较传统组织提升约30%,电导率较高^[21]。Al-Mg-Si系是析出强化主导:形成纳米 β'' 相强化;控制Mg/Si比及添加Zr优化析出、净化基体,抗拉强度可以达到

表1 不同铝合金系与加工方法的性能对比
Tab. 1 Performance comparison of different aluminum alloy systems and processing methods

合金体系	典型成分/工艺	抗拉强度/MPa	电导率/% IACS	文献
纯铝	细长晶粒结构	较传统组织提升约30%	保持>90%	[21]
Al-Mg-Si系	峰时效态 (T6)	约300~350	约52~55	[26]
Al-RE系	Al-8.5RE (La+Ce), HPT+280 °C退火	约495	约52.4	[27]
Al-石墨烯复合材料	镀铜石墨烯/Al, 高压低温烧结	约404	约82.5	[28]
Al-Zr-Sc系	Al-0.2Zr-0.06Sc, 连铸连轧+过时效+冷拔	约195	约61.1	[29]

300~350 MPa,电导率达到52~55%IACS^[26]。Al-RE系是超细晶强化+弥散相强化:高压扭转 (high-pressure torsion, HPT) 获得超细晶;RE金属间化合物弥散分布;晶界与析出相对电子散射弱^[27]。Al-石墨烯复合材料是异质界面优化:石墨烯增强与载荷传递提升强度;完整石墨烯界面优化电子输运路径,抗拉强度可以达到约404 MPa,电导率达到~82%IACS^[28]。Al-Zr-Sc系是工艺协同与析出净化:过时效析出 Al_3 (Zr, Sc)相净化基体提升电导率和热导率;冷拔形变与细长晶粒组织提升强度^[29]。

1.18、1.70、2.19和2.98),对其强度和导电性的影响做了探究^[30]。如图4所示,不同Mg/Si比的合金时效后所形成沉淀相的种类不同。0.68和1.18两种比例主要形成 β'' 相,1.70比例主要形成 β'' 和 β' 相,2.19和2.98两种比例主要形成 β' 相。如图4(b)所示,1.18比例的铝合金所形成 β'' 相的比例最高,能最大程度地起到沉淀强化的作用;同时基体中残余的Mg和Si的含量最少,降低了固溶对电导率的影响。残余Mg或Si原子都会严重散射电子和传导热量的声子。Mg/Si比为1.18的合金,其析出过程最大程度地消耗了基体中的溶质原子,合金拥有最好的综合性能,强度、电导率和热导率分别可达305 MPa、51.57%IACS和199.7 W/(m·K)。

Al-Mg-Si合金经不同的热-机械处理后其强度和电导率会发生相应的改变。Lin等的研究表明,经70%变形量的冷轧和180 °C时效6 h后,该合金的强度和

2 高强高导铝合金的分类及研究现状

2.1 Al-Mg-Si系合金

Dong等对Al-Mg-Si合金中不同Mg/Si比(0.68、

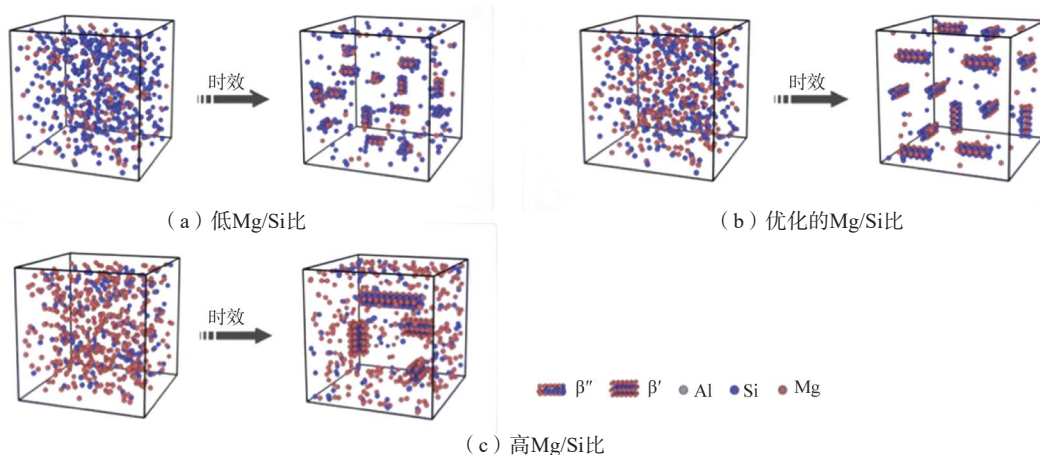


图4 不同Mg/Si比对人工时效过程中组织演变的影响机理可视化示意图

Fig. 4 Visualized schematic diagrams of influence mechanism of varying Mg/Si ratios on the microstructure evolutions during artificial aging processes

电导率可达267 MPa和58.2%IACS, 优于传统峰值时效后的248 MPa和54.8%IACS。另外, 冷轧前先180 °C预时效2 h后, 合金的强度和电导率可进一步提升到301 MPa和58.2%IACS^[31]。由于冷轧量大, 预时效过程中形成的G.P.区在基体中重新溶解。再溶解的G.P.区由于在冷轧过程中扩散速率较低, 更容易变成富集的团聚体, 而不是均匀分布的溶质, 更有利于沉淀相的析出。该过程提高了合金的沉淀强化效果, 显著降低了电子和声子散射, 提高了电导率和热导率。

牛艳萍等研究了热处理工艺对Al-Mg-Si系稀土铝合金导线强度和电导率的影响。结果显示, 影响最明显的因素是时效温度, 其次是固溶温度和固溶时间, 最不明显的因素是时效时间^[32]。经过一系列热处理工艺的对比, 得到最优的参数为: 530 °C固溶1 h, 190 °C时效12 h, 该合金导线的强度和电导率分别可达266.5 MPa和56.1%IACS。

机器学习帮助新型材料的开发越来越受到广泛的关注, 王硕等使用向量机 Support vector machine (SVM)、随机森林 Random Forest (RF) 以及人工神经网络, 包括: 深度神经网络 (Deep neural network, DNN)、反向传播神经网络 (Back propagation neural network, BP) 和极限学习机 (Extreme learning machine, ELM) 五种机器学习方法建立Al-Mg-Si合金在不同条件下强度和电导率的变化机器学习预测模型^[33]。该模型主要包括以下步骤: 数据集的收集、数据清洗、特征工程、模型构建以及模型性能评估。结果表明以热力学数据和加工工艺为特征输入, DNN模型在合金性能预测方面表现出巨大潜力, 精度最高, 拟合效果最好。

植国鹏等将Al-11Si-2Cu-0.6Mg压铸合金分别以不同的固溶时间进行T6热处理, 发现固溶时间从20 min上升到30 min后, 合金的平均孔洞直径从17.703 μm上升到21.144 μm, 气孔数量从20 min的63个上升到30 min的121个, 合金内部气孔开始变大变多; 合金表面从无变化到出现少量起泡现象, 说明压铸合金不适合长时间固溶处理^[34]。最终确定最佳热处理工艺参数为525 °C × 20 min/180 °C × 6 h。与铸态合金相比在短流程T6处理下的合金抗拉强度为387.3 MPa, 与铸态相比抗拉强度为387.3 MPa, 提升了26.7%; 屈服强度为314.9 MPa, 提升了69.4%; 电导率为17.29 MS/m, 提升18.9%, 伸长率为2.45%, 仅降低了3.9%。

热处理工艺和Mg元素的含量同样是影响Al-Mg-Si合金强度和电导率的关键因素。彤伟博等发现铸态条件下, 粗大的长针状共晶Si相和棒条状-Al8Mg3FeSi6相连续阻碍了晶界处电子的迁移, 从而使合金电导率

急剧下降^[35]。对Al-4Si-xMg合金进行短时的T6热处理后, 合金组织中初生α-Al均匀分布, 灰色针条状的共晶Si和一些富Fe相较铸态也有了一定的断裂和粒化, 以球状或短棒状存在, 尺寸细小, 比较均匀地分布在α-Al枝晶间, 对合金的割裂作用大大减弱, 这时的基体晶体点阵更为完好, 自由电子定向运动变得更加容易, 因此合金的电导率升高。但是随着合金中Mg含量的增加, 在晶界处偏聚的细小Mg₂Si相也不断增多, 使基体的晶格畸变剧增, 进而增加了自由电子定向运动的散射度, 导致合金的电阻增大, 电导率下降。最终确定, Al-4Si-0.5Mg合金在经过短时T6热处理后, 合金的抗拉强度和电导率值达到了310 MPa和25 MS/m。与电导率一样, 合金的热导率也遵循相似的物理规律: 决定电子运动阻力的微观缺陷, 同样是热量传递 (主要由自由电子和晶格振动共同完成) 的障碍^[21-23]。通过固溶-时效, 驱使Mg、Si原子从铝基体中脱溶, 形成纳米析出相。这极大降低了固溶原子对电子和声子的散射, 从而显著提升热导率。

Chen等研究了多级轧制+时效处理对Al-Mg-Si合金性能的影响, 结果表明经两步轧制后, 合金的强度达282.17 MPa (增加79.79 MPa), 电导率达57.54%IACS (增加4.3%IACS)^[36]。如图5所示^[36], 变形后拉长的晶粒、<111>织构、β"相的生成是其强度和电导率协同提升的关键因素。传统的时效处理后, 部分晶粒达2 444 μm, 且无明显的位错和择优取向, 沉淀强化 (116.24 MPa) 和基体中固溶的溶质原子 (4.88 nΩ·m) 是合金强度和电阻率的主要因素。两步轧制后, 晶粒尺寸细化到23.5 μm, β"相尺寸降低到1.2 nm, 位错密度增加到2.74 × 1 014 m⁻²。位错强化为强度提升贡献108.22 MPa, 固溶原子的减少使其电阻率 (0.8 nΩ·m) 显著降低。该论文揭示的加工路径, 通过强烈促进析出、净化铝基体这一核心机理, 在显著提升强度的同时, 为同步提升合金的导电和导热性能奠定了微观基础。尽管引入的位错和界面会对导热产生不利影响, 但析出的主导作用使得整体导热性能有望获得实质性改善。

2.2 Al-RE 系合金

在纯铝或常规牌号的铝合金中加入新元素是调控其强度和电导率最常用的方法。对于Al-0.2Ce合金^[37], 向其中加入0.2wt%的Sc和0.1wt%的Y形成的Al-0.2Ce-0.2Sc-0.1Y合金在经过400 °C的应变幅值扫描后, 其硬度和电导率分别从HV57.6、61.01%IACS提升到HV59.3、61.75%IACS。如图6所示, 加入Sc和Y后, 热处理过程中会形成约40 nm的Al₃Sc沉淀相, 且该沉淀相

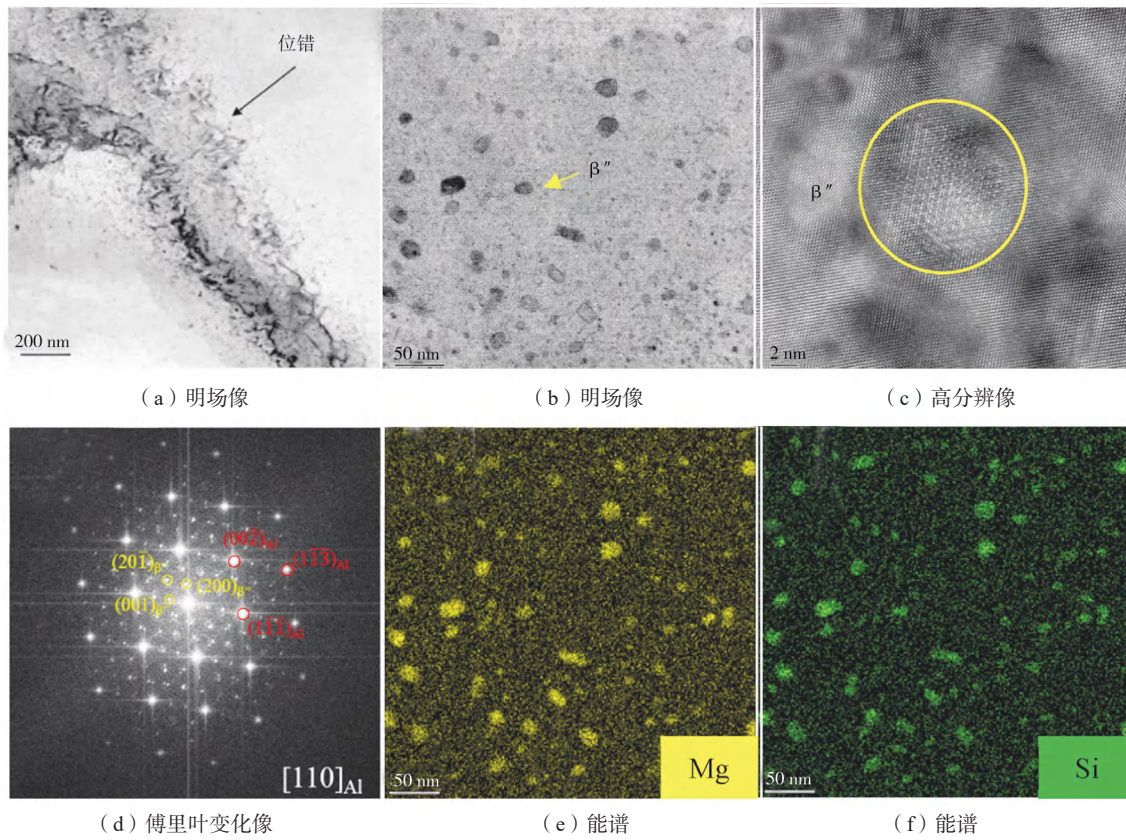
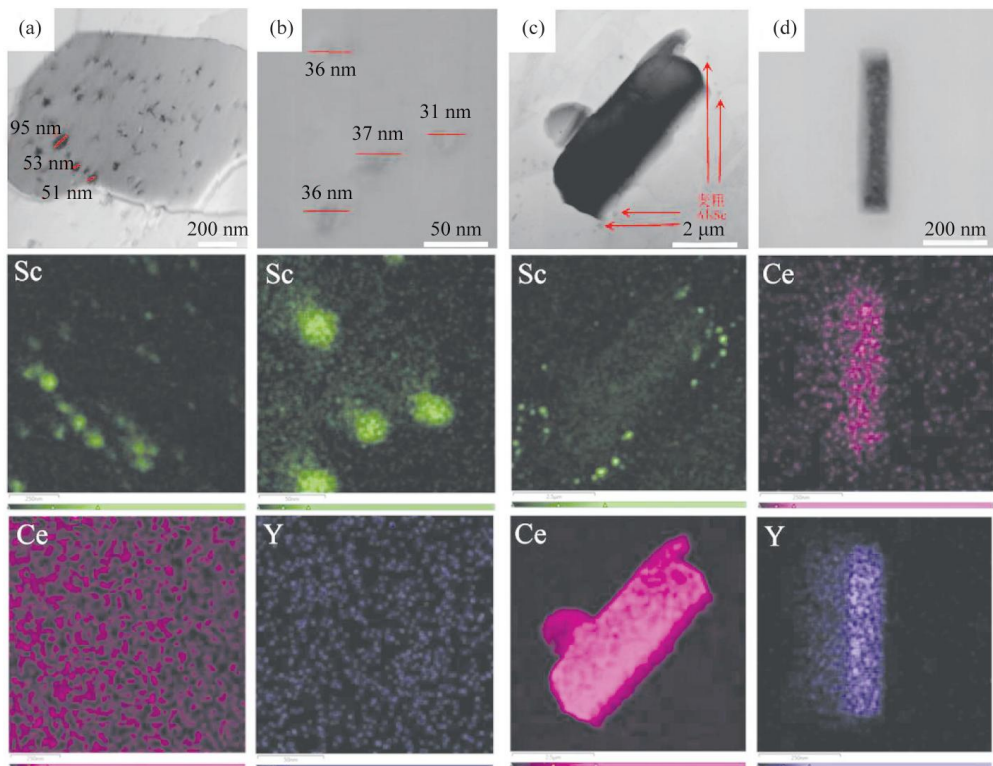


图5 Al-Mg-Si合金两步轧制后的TEM图像
Fig. 5 TEM images of Al-Mg-Si sample after Two-stage rolling



(a) 和 (c) Al-Ce-Sc合金；(b) 和 (d) Al-Ce-Sc-Y合金

图6 50~500 °C DMA温度扫描后不同合金的STEM图像和EDS图谱
Fig. 6 STEM images and EDS mapping of the different alloys after DMA temperature scanning from 50 to 500 °C

周围富集着Y元素。Al₃Sc沉淀相对位错和晶界起到很强的钉扎作用，起到良好的沉淀强化效果；同时又能抑制再结晶的发生（图7），减少因晶界引起的电子散射，提升该合金电导率。

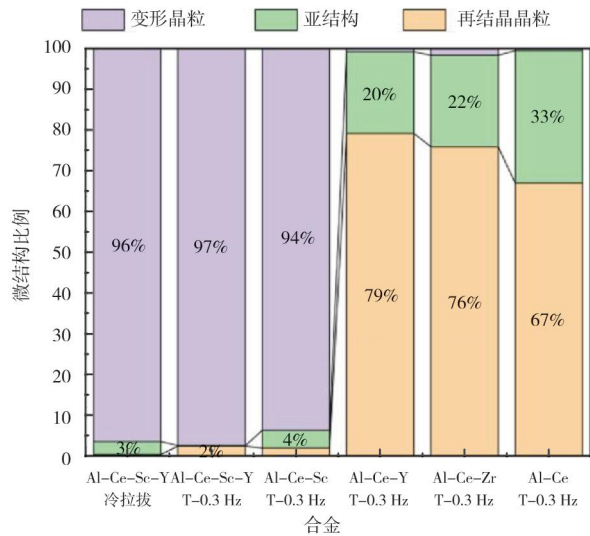


图7 不同铝合金在相同DMA工艺处理后动态再结晶的比例
Fig. 7 Dynamic recrystallization fractions of different aluminum alloys after the same DMA process treatment

Pozdniakov等研究了Sc含量对Al-Y-Sc合金导电性和力学性能的影响。结果表明，Al-0.2Y-0.2Sc和Al-0.2Y-0.05Sc合金在300 °C退火7 h后，其强度和电导率分别可达183 MPa和61.5%IACS以及127 MPa和62.4%IACS。Al-Y-Sc合金中形成的Al₃(Sc_xY_y)相和共熔的Al₃Y相是其主要的强化机制。在退火过程中伴随着Al₃Y相的部分溶解到Al基体当中，Al₃(Sc_xY_y)相成为主要的沉淀相。因此，高Sc含量的Al-0.2Y-0.2Sc合金在退火后形成的沉淀相更多，其强度更高。另外，随着Sc含量的提高，Al-0.2Y-0.2Sc的再结晶温度达450 °C，远高于Al-0.2Y-0.05Sc的350 °C。高的再结晶温度使Al-0.2Y-0.2Sc合金在退火过程中的再结晶程度降低，减少了因晶界引起的电导率下降。

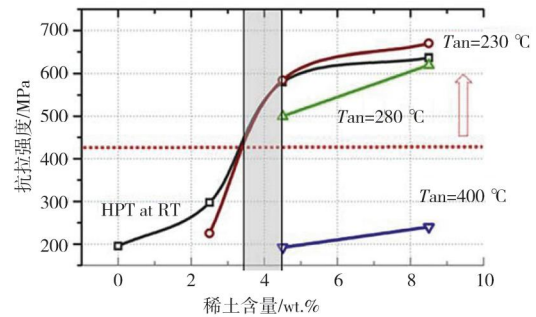
Medvedev等人研究了稀土元素La和Ce对纯铝的改性作用，并根据Matthiessen's公式对铝合金强度和电阻率的变化做出了解释^[27]：

$$\sigma_{\text{theor}} = \sigma_{\text{GB}} + \sigma_{\text{d}} + \sigma_{\text{or}} + \sigma_{\text{ss}} \quad (4)$$

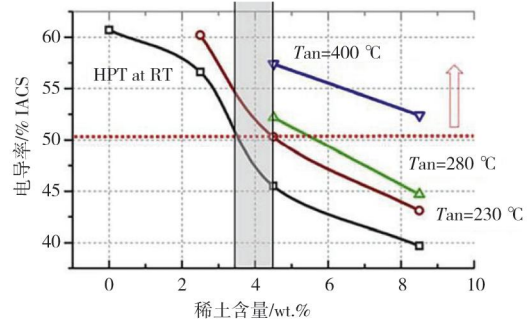
$$\rho_{\text{theor}} = \rho_0 + \rho_{\text{GB}} + \rho_{\text{d}} + \rho_{\text{or}} + \rho_{\text{ss}} \quad (5)$$

式中： σ_{theor} 、 ρ_{theor} 代表理论强度和电阻率； ρ_0 是材料固有电阻率； σ_{GB} 、 ρ_{GB} 、 σ_{d} 、 ρ_{d} 、 σ_{or} 、 ρ_{or} 和 σ_{ss} 、 ρ_{ss} 分别代表晶界、位错、沉淀相和固溶对强度和电阻率的贡献。图8结果表明，稀土元素含量在3.5%~4.5%区间内以及退火温度为230 °C时，Al-RE合金的综合性能最优。稀土元素的引入所形成的Al₁₁(Ce, La)₃金属间化

合物可起到弥散强化（增大 σ_{or} ）的作用，增强合金强度。另外，稀土元素与铝合金不固溶，大幅降低了由引起的电导率的下降。



(a) 抗拉强度



(b) 电导率（灰色框显示最佳强度/电导率组合的区间）

图8 不同退火温度下Al-RE合金的性能与RE浓度的关系（符号表示实验数据，实线为拟合曲线）

Fig. 8 Properties of Al-RE alloys vs. RE concentrations under different annealing temperatures (symbols represent experimental data and solid lines are fitting curves)

Lin等研究了Ce和Y两种稀土元素对铝合金强度和电导率的影响^[39]。结果表明，加入0.2wt.%的Ce后，铸造状态的Al-0.2Ce合金的晶粒尺寸细化到90.68 μm；额外添加0.1wt.%的Y之后，晶粒可进一步细化到87.55 μm。加入进的Ce和Y还会生成与α-Al共格的Al₁₁Ce₃和Al₃Y第二相，错配度只有4.43%和0.85%，可以为α-Al的孕育提供形核点。另外，第二相的存在还能促进合金中固溶的杂质元素Fe、Si等在其周围析出，降低基体的固溶度，减少电子散射并提高力学性能。与商用的纯Al相比，加入Ce和Y后，其拉伸强度、硬度和电导率可分别提升16.5%、8.5%和5.0%。

2.3 Al-石墨烯复合材料

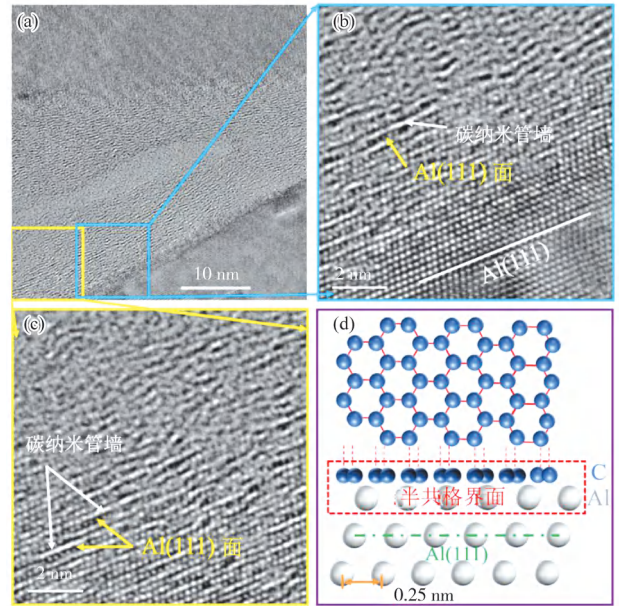
石墨烯是由单层碳原子构成的正六边形蜂窝状二维材料，具有优异的力学性能、热学性能（热导率约5 000 W·m⁻¹·K⁻¹）和电学性能（电子迁移率达200 000 cm²·V⁻¹·s⁻¹，电导率约108 S·m⁻¹），是室温下最好的导体材料。Al-石墨烯复合材料的制备方法主要包括两种：固态法（混粉烧结、热挤压和高

压扭转等)和液态法(压力浸渗法和熔融铸造法)。Chyada等在Al中加入0.5wt.%的石墨烯并经过铸造+冷轧+200 °C时效1 h后,复合材料的抗拉强度和电导率分别可达180 MPa和63.45%IACS,远高于铸造+冷轧态纯铝的67 MPa和58.27%IACS^[40]。这是因为石墨烯的导电性好且能与Al基体之间形成有利的位向,带来导电增强效应。

Zhang等运用搅拌摩擦加工制备了研究了碳纳米管/铝(CNTs/Al)复合材料,并研究了二者界面对其强度和电导率的影响^[41]。结果表明,碳纳米管逐一的分布在Al基体中,具有很强的CNTs/Al界面结合且无化学反应和杂质元素的存在。如图10所示,碳纳米管的轴与Al(111)面平行,为CNTs/Al界面的半共格关系提供了几何基础。这种半共格的界面能够降低电子的散射,具有很低的电阻。同时,强界面结合能很好地阻碍位错的运动,使复合材料的抗拉强度和屈服强度分别提升84%和50%。

Chen等通过放电等离子烧结和热挤压的方式制备了不同碳纳米管含量的Al/CNTs复合材料^[42]。结果表明,加入0.75vol.%的碳纳米管时,它能够很好的分散和排列在Al基体中;当含量增加到1vol.%时,会发生碳纳米管的团聚并降低复合材料的强度。随着CNTs的加入,它会在晶界处产生钉扎效应,从而细化Al晶粒。

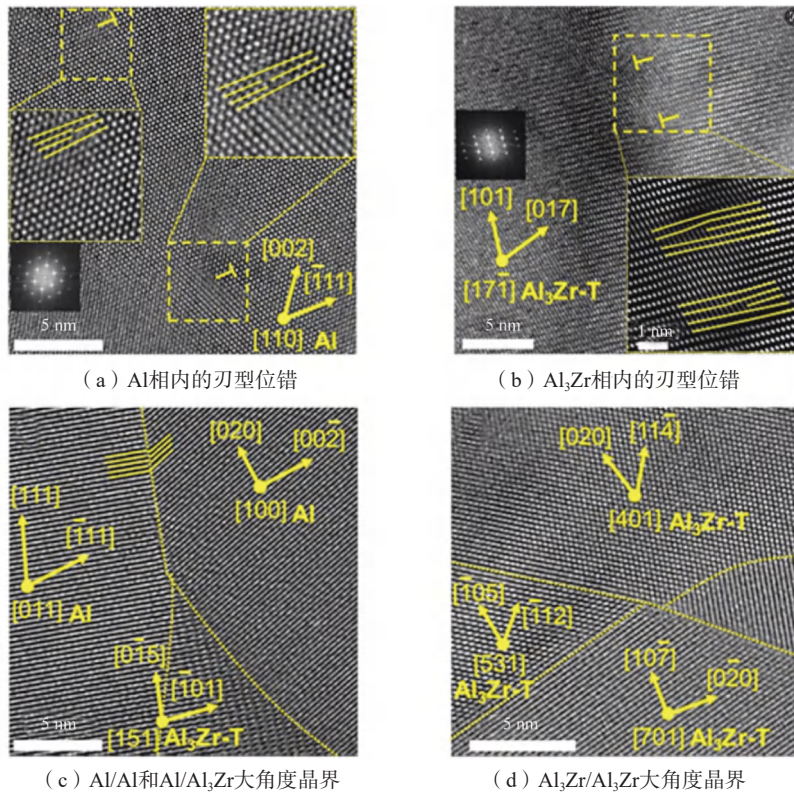
另外,在Al/CNTs界面处产生了富氧层,该层可以增加两相的界面结合。Al晶粒的细化和富氧层的产生增强了复合材料的强度但降低了其电导率。



(a) CNT/Al界面结构的整体形貌;(b)和(c)为图(a)中标记区域的放大图像;(d)为(b)和(c)中观察到的CNTs/Al界面半共格结构的示意图

图9 CNTs/Al界面的TEM原子排布分析

Fig. 9 TEM analysis on atom arrangements at the CNTs/Al interface



(a) Al相内的刃型位错

(b) Al₃Zr相内的刃型位错

(c) Al/Al和Al/Al₃Zr大角度晶界

(d) Al₃Zr/Al₃Zr大角度晶界

图10 经高压扭转处理1 000圈的Al-5%Zr样品的透射电子显微镜高分辨率图像

Fig. 10 TEM high-resolution images of Al-5%Zr sample processed by HPT for N=1 000 turns

2.4 Al-Zr 系合金

Al-Zr合金因其优异的热稳定性和良好的电导率从而得到广泛的应用,但其存在硬度不足($<HV75$)的问题。Mohammadi等通过高压扭转的方法产生剧烈的塑性变形(ultra-serve plastic deformation)制备了过饱和的Al-Zr(1at%)合金,导致Al的晶格参数增加了 $4.9 \times 10^{-4} \text{ nm}$ ^[43]。如图10所示^[43],经时效处理后,剩余的Zr被重新分配形成非均匀的晶界偏析和稳定的D023四方 Al_3Zr 相的纳米级颗粒。过量的Zr增加了缺陷产生速度,使其晶粒细化到了73 nm,硬度达HV148,热稳定性达523 K,电导率为35%IACS。硬度增加的主要贡

献因素当中,沉淀强化占35%,其余则为纳米晶的形成、晶界分离和位错塞积。

Wu等研究了不同Si含量(0、0.05、0.10和0.15,质量分数%)对Al-0.2wt.%Zr-0.05wt.%Sc合金力学与电学性能的影响^[44]。结果表明,Si的加入可增强析出动力学,加速非均相纳米 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 沉淀相的析出。图11给出了Al-Zr-Sc-Si合金的硬度和电导率随Si含量和时效温度的变化,在等时效之前,可在500 °C下时效生成数十纳米大小的 Al_3Zr 分散体,等时效生成数纳米大小的 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{Zr}_{1-x})$ 纳米沉淀物。分散体和纳米沉淀物的耦合作用可以提高材料的硬度同时不影响其电导率。

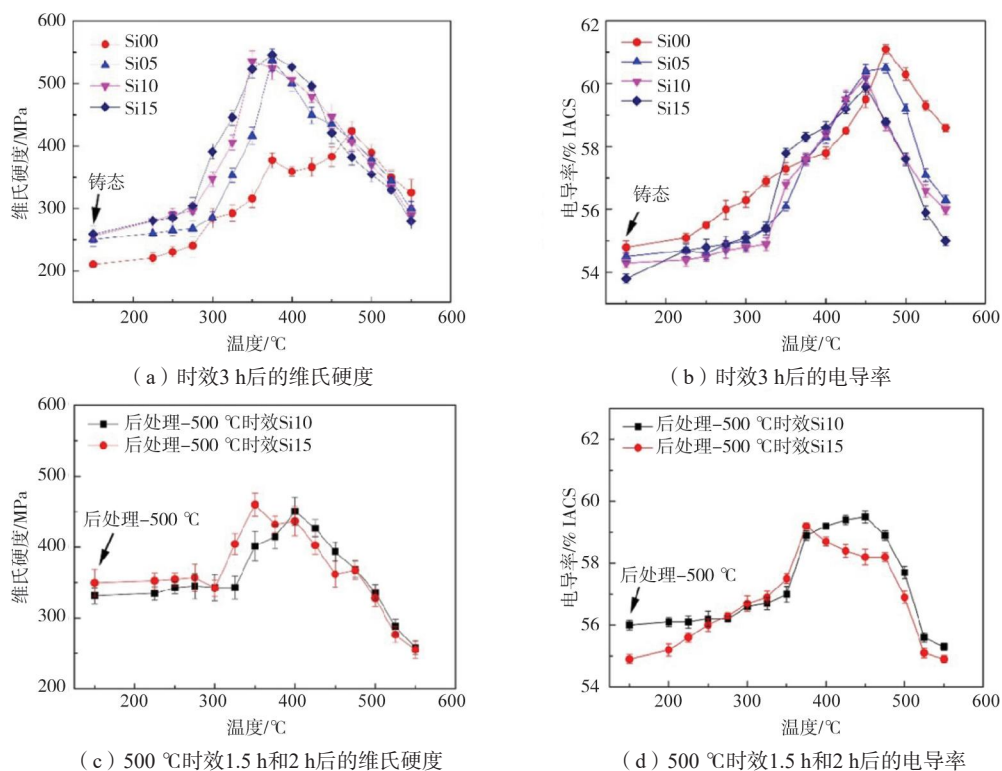


图11 铸态Si00、Si05、Si10、Si15以步长25 °C等时效3 h过程中硬度和电导率的变化以及500 °C时效1.5 h和2 h后Si10、Si15合金等时效后的硬度和电导率的变化

Fig. 11 The variations of the microhardness and electrical conductivity during isochronal aging processes with steps of 25 °C for 3 h for as-cast Si00, Si05, Si10 and Si15 alloys, and the variations of the microhardness and electrical conductivity during isochronal aging processes for 3 h for Si10 and Si15 alloys after aging at 500 °C for 2 h and 1.5 h, respectively

Fan等研究了均匀化处理(H)后时效(A)、热挤压(E)和冷拉拔(C)三种工艺不同组合类型下Al-0.2Zr-0.06Sc合金强度、电导率及微观结构的演变,具体结果如图12所示^[45]。经HAEC路线处理后,在沉淀强化($\text{Al}_3(\text{Zr}, \text{Sc})$ 相)、晶界强化和位错强化共同作用下,该合金线的强度最高。经HEAC路线处理后,合金线具有较高的电导率和强度,主要与热挤压过程中纳米 Al_3Sc 沉淀相的析出以及时效过程中溶质原子的析出有关。HECA路线处理后,合金线取得了最高的电导率,但位错强化效应的减弱导致其强度显著下

降。另外, $\text{Al}_3(\text{Zr}, \text{Sc})$ 和 Al_3Sc 相产生的钉扎效应使合金具有很高的热稳定性。

3 结论

系统总结并分析了高强高导铝合金的强化机制、电导率和热导率影响因素及不同合金体系的研究现状,主要结论如下。

(1) 强度与导电性的内在矛盾与解决思路:铝合金的强化依赖于引入晶格缺陷(如溶质原子、析出相、位错与晶界)以阻碍位错运动,但这些缺陷同时

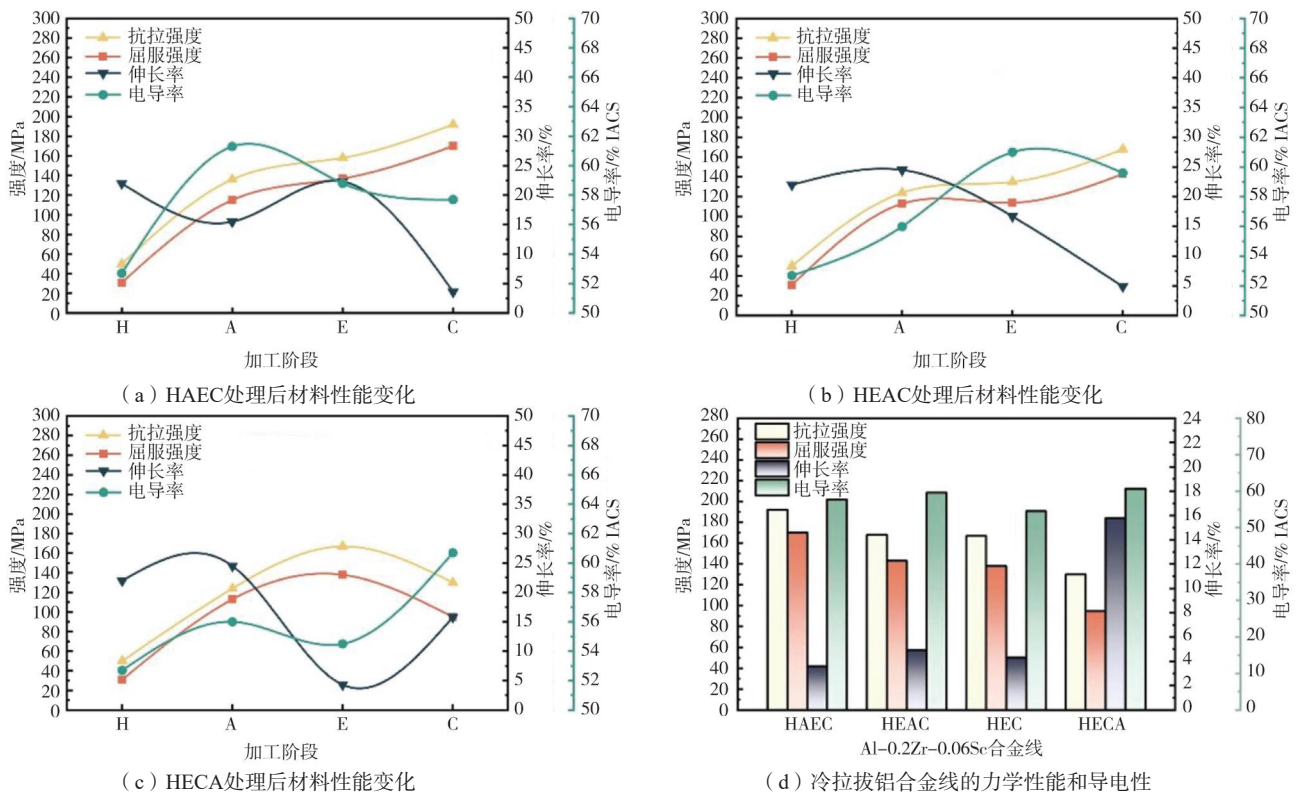


图12 不同加工路径处理后的Al合金线性能变化; 冷拉拔Al-0.2Zr-0.06Sc合金线的力学性能和导电性

Fig. 12 Performance changes of Al wires prepared by different processing paths; Mechanical properties and EC of cold-drawn Al-0.2Zr-0.06Sc alloy wires

会成为电子散射中心, 显著降低电导率和热导率。实现高强高导的关键在于精细化调控微观缺陷, 即在获得强化的同时, 最大限度地减少电子散射。具体策略包括: 采用低固溶强化效应的元素合金化、形成与基体共格/半共格的纳米析出相以及优化工艺减少晶格畸变。

(2) 传统合金体系的性能提升依赖于成分与析出的精准调控。Al-Mg-Si系: 其强度与导电性的平衡高度依赖Mg/Si原子比和时效工艺。当Mg/Si比接近 Mg_2Si 的化学计量比(约1.73)时, 可在峰时效态形成高密度的纳米级 β'' 强化相, 并使基体溶质原子残留最少, 从而在获得超过300 MPa强度的同时, 保持约55~58%IACS的电导率。Al-Zr(-Sc)系: Zr、Sc等元素在铝中固溶度极低, 其形成的纳米级L12-Al₂(Zr, Sc)共格析出相是理想的高效强化体。通过连铸连轧结合深度过时效等协同工艺, 可最大化析出相密度并净化基体, 使合金在保持60%IACS以上高电导率的同时, 实现显著的强度提升。

(3) 新型合金体系与复合材料通过界面工程实现突破。Al-RE系: 稀土元素(如Ce、Y)在铝中几乎不固溶, 主要通过形成热稳定的金属间化合物(如Al₁₁RE₃)实现弥散强化和细晶强化。结合剧烈塑性变形(如高压扭转)可制备超细晶结构, 在电导率损失

可控的前提下, 将抗拉强度提升至近500 MPa水平。Al-石墨烯/CNTs复合材料: 其性能突破的关键在于构建强结合、低电阻的界面。通过纳米包裹、低温烧结等创新工艺抑制有害界面反应(如Al₄C₃), 使石墨烯在承载的同时成为电子快速通道, 为实现兼具超高强度(>400 MPa)与接近纯铜电导率(>80%IACS)的颠覆性材料提供了可能。

(4) 工艺优化的关键作用: 热处理(固溶、时效制度)、塑性变形(轧制、拉拔、高压扭转)等制备加工工艺对最终微观组织和性能起着决定性作用。多级热力学处理(如预时效+冷轧+终时效)被证明是协调强度与导电性的有效手段。机器学习方法在优化工艺参数、预测性能方面展现出巨大潜力, 有助于加速新材料开发。

开发新一代高强高导铝合金仍需深入研究纳米析出相的演化规律及其与位错、晶界的交互作用机制, 进一步探索多元微合金化的协同效应, 开发新型复合工艺以实现增强体的理想分布与界面控制, 并利用人工智能与多尺度计算辅助材料设计与工艺优化, 最终实现铝合金强度与导电性的协同提升, 满足先进电工、电子及航空航天等领域对材料综合性能的苛刻要求。

参考文献:

- [1] MAO Q, WANG L, NIE J, et al. Optimizing strength and electrical conductivity of 6201 aluminum alloy wire through rotary swaging and aging processes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 331: 118497.
- [2] BAI S, YI X, LIU Z, et al. The influence of preaging on the strength and precipitation behavior of a deformed Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 62–72.
- [3] LI Z, ZHAO P, JIA Z, et al. Effects of Mg and Si contents on the microstructure and mechanical properties of AA6014 alloys in T4P and T6P temper [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 740–741: 187–200.
- [4] JIANG S, WANG R. 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 (7): 1354–1363.
- [5] GEORGANTZIA E, GKANTOU M, KAMARIS G S. Aluminium alloys as structural material: a review of research [J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111372.
- [6] HOU J P, WANG Q, ZHANG Z J, et al. Nano-scale precipitates: the key to high strength and high conductivity in Al alloy wire [J]. *Materials & Design*, 2017, 132: 148–157.
- [7] SHANG Q, TAN J, LV H, et al. Breaking the trade-off between thermal conductivity and strength of magnesium alloys: mechanisms and strategies [J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2025, 37: 101230.
- [8] GREJTAK T, SHYAM A, BLAU P J, et al. Additively manufactured and cast high-temperature aluminum alloys for electric vehicle brake rotor application [J]. *Wear*, 2025, 570: 205961.
- [9] DARAZ U, LIM H, KIM B-H, et al. Silicon addition in novel AlMg5 alloy: balancing castability, strength, and electrical conductivity [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1036: 181933.
- [10] PENG R, LIU H, YI P, et al. Improving strength-conductivity synergy of Al-Cu- (Sn/Er) alloy with nanoscale substructure [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010 (1): 177159.
- [11] LIU H, LIU J, WANG Y, et al. Study about heat treatment on microstructure, electrical conductivity and mechanical properties of Al-1Si-0.6Mg-0.2Fe alloy [J]. *Materials Characterization*, 2024, 209: 113700.
- [12] CUI X, YE H, LIU H, et al. The improvement mechanism of good matching between electrical conductivity and mechanical properties for Al-4Si-0.8Mg-0.6Fe alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 938: 168275.
- [13] HAN S Z, CHOI E A, LIM S H, et al. Alloy design strategies to increase strength and its trade-offs together [J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 117: 100720.
- [14] FAN X, HOU J, WANG S, et al. Achieving extraordinary strength and conductivity in copper wire by constructing highly consistent hard texture and ultra-high aspect ratio [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 220: 14–22.
- [15] BOURGEOIS L, DWYER C, WEYLAND M, et al. The magic thicknesses of θ' precipitates in Sn-microalloyed Al-Cu [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60 (2): 633–644.
- [16] LI D, CAI S, 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.
- [17] 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.
- [18] SU C, LI D, LUO A A, et al. Effect of solute atoms and second phases on the thermal conductivity of Mg-RE alloys: a quantitative study [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 747: 431–437.
- [19] HOMMA T, KUNITO N, KAMADO S. Fabrication of extraordinary high-strength magnesium alloy by hot extrusion [J]. *Scripta Materialia*, 2009, 61 (6): 644–647.
- [20] ZHANG J, MA M, SHEN F, et al. Influence of deformation and annealing on electrical conductivity, mechanical properties and texture of Al-Mg-Si alloy cables [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 710: 27–37.
- [21] HOU J, LI X, WANG S, et al. Quantitative model for grain boundary effects on strength-electrical conductivity relation [J]. *Acta Materialia*, 2024, 281: 120390.
- [22] YANG K, WANG Y, GUO M, et al. Recent development of advanced precipitation-strengthened Cu alloys with high strength and conductivity: a review [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 138: 101141.
- [23] AKBARPOUR M R, GAZANI F, MOUSA MIRABAD H, et al. Recent advances in processing, and mechanical, thermal and electrical properties of Cu-SiC metal matrix composites prepared by powder metallurgy [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 140: 101191.
- [24] CARLTON C E, FERREIRA P J. What is behind the inverse Hall-Petch effect in nanocrystalline materials [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55 (11): 3749–3756.
- [25] MIYAJIMA Y, KOMATSU S-Y, MITSUHARA M, et al. Change in electrical resistivity of commercial purity aluminium severely plastic deformed [J]. *Philosophical Magazine*, 2010, 90 (34): 4475–4488.
- [26] 杨昭, 付嘉妮, 徐雪璇, 等. Mg-Si摩尔比及Zr的添加对Al-Mg-Si合金性能的影响及其机理 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32 (6): 1617–1629.
- [27] MEDVEDEV A E, MURASHKIN M Y, ENIKEEV N A, et al. Enhancement of mechanical and electrical properties of Al-RE alloys by optimizing rare-earth concentration and thermo-mechanical treatment [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 745: 696–704.
- [28] LUO Y, HUANG Y, WANG W, et al. The influence of

- interface products on the mechanical and electrical properties of graphene aluminum composites [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 46: 104164.
- [29] FAN S, FENG J, LI Z, et al. Achieving superior strength and conductivity for Al-Zr-Sc wires by coupling design of deformation and ageing [J]. *Materials Research Letters*, 2024, 12 (8) : 590-598.
- [30] DONG Q, ZHANG Y, WANG J, et al. Enhanced strength-conductivity trade-off in Al-Mg-Si alloys with optimized Mg/Si ratio [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 970: 172682.
- [31] LIN G, ZHANG Z, WANG H, 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.
- [32] 牛艳萍, 杨勇, 唐维学, 等. 高强高导稀土铝合金导线的热处理工艺正交试验优化 [J]. *中国金属通报*, 2018 (6) : 120-122.
- [33] 王硕, 王俊升, 梁婷婷, 等. 高强、高导铝合金研发的机器学习策略 [J]. *材料热处理学报*, 2023, 44 (11) : 27-34.
- [34] 植国鹏. 短流程热处理对高强高导压铸Al-Si-Cu-Mg合金组织与性能的影响 [D]. 深圳: 深圳大学, 2023.
- [35] 彤伟博. 高强高导Al-Si-Mg铸造合金成分及其组织性能研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [36] CHEN L, OU M, 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.
- [37] WANG W, PAN Q, LIN G, et al. Internal friction and heat resistance of Al, Al-Ce, Al-Ce-Zr and Al-Ce- (Sc) - (Y) aluminum alloys with high strength and high electrical conductivity [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 1255-1274.
- [38] POZDNIAKOV A V, BARKOV R Y. Microstructure and mechanical properties of novel Al-Y-Sc alloys with high thermal stability and electrical conductivity [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 36: 1-6.
- [39] LIN G, LI L, GUO Z, et al. Influence of cerium and yttrium addition on strength and electrical conductivity of pure aluminum alloys [J]. *Journal of Rare Earths*, 2024, 42 (3) : 600-611.
- [40] CHYADA F A, JABUR A R, ALWAN H A. Effect addition of graphene on electrical conductivity and tensile strength for recycled electric power transmission wires [J]. *Energy Procedia*, 2017, 119: 121-130.
- [41] ZHANG S, WANG T, JIANG Z. Carbon nanotubes/aluminum interface structure and its effects on the strength and electrical conductivity of aluminum [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 7037-7046.
- [42] CHEN B, LI S, IMAI H, et al. Carbon nanotube induced microstructural characteristics in powder metallurgy Al matrix composites and their effects on mechanical and conductive properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 651: 608-615.
- [43] MOHAMMADI A, ENIKEEV N A, MURASHKIN M Y, et al. Developing age-hardenable Al-Zr alloy by ultra-severe plastic deformation: significance of supersaturation, segregation and precipitation on hardening and electrical conductivity [J]. *Acta Materialia*, 2021, 203: 116503.
- [44] WU S H, XUE H, YANG C, et al. Effect of Si addition on the precipitation and mechanical/electrical properties of dilute Al-Zr-Sc alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 812: 141150.
- [45] FAN S, LI Z, XIAO W, et al. Effects of processing paths on the microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of dilute Al-Zr-Sc alloy conductive wires [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 188: 202-215.