DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3089

提高铝合金及铝基复合材料导电性方法的研究进展

毕晓勤[1],张　森[1],徐　琴[1],蔡艳慧[1],付　莹[2]
(1. 河南工业大学,河南 郑州 450001;2. 松山湖材料实验室,广东 东莞 523808)

摘　要:铝合金及复合材料因密度低、导电性好,被认为是替代铜导线的首选材料。本文分析了材料内部组织缺陷、固溶元素种类、微观组织结构对铝合金及复合材料导电性能的影响,在此基础上综述了硼化处理、调整 Mg/Si 比、添加稀土元素、热处理、变形处理等提升铝合金导电性能的方法,以及导电铝基复合材料的固态、液态及选区激光熔化等制备工艺的发展现状。分析了各方法的优缺点和适用条件,并对铝合金线材未来的研究方向进行了总结展望。

关键词:铝合金;铝基复合材料;导电性;提升方法;研究现状;发展趋势

中图分类号:TG146　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)06-0537-16

Research Progress on the Method of Improving Conductivity for Aluminum Alloy and Aluminum Matrix Composites

BI Xiaoqin[1], ZHANG Sen[1], XU Qin[1], CAI Yanhui[1], FU Ying[2]
(1. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China)

Abstract: Aluminum alloy and composite materials with low density and good conductivity are considered as the preferred materials to replace copper wires. In this paper, the effects of internal microstructure defects, types of solid solution elements and microstructure on the conductivity of aluminum alloy and composite materials are analysed. On this basis, the methods of boron treatment, Mg/Si ratio adjustment, rare earth element addition, heat treatment and deformation treatment to improve the conductivity of aluminum alloys are summarized, as well as the development of solid state process, liquid state process and selective laser melting process for conductive aluminum matrix composites. The advantages, disadvantages and application conditions of each method are analysed, and the future research direction of aluminum alloy wire is summarized and prospected.

Key words: aluminum alloy; aluminum matrix composites; electrical conductivity; lifting methods; research status; development trends

随着我国社会经济的快速发展,用电量的激增加剧了对铜资源的开发和利用,使我国铜资源日益减少。而铜导线作为传统的金属导电材料,其价格也日益提高,因此需要研发出一款新型导电材料来解决这种现状。经过国内外学者的不断尝试,大家把目光放在了价格低廉、性能优异的铝导体上,制定了“以铝代铜”的政策[1-3]。铝合金被用于很多行业,当今应用最广泛的还是在电线电缆、远距离输电等领域。而近年来,随着我国汽车工业的发展,车辆类型逐渐向新能源车过渡。而强度高,质量轻的铝合金正契合了新能源车轻量化的发展趋势[4-5]。作为减重的一环,新能源车内的线缆也考虑了质轻、导电性能

收稿日期:2023-04-07
基金项目:国家自然科学基金(52001114);河南省教育厅自然科学项目(21A430010);河南省高校科技创新人才(23HASTIT022);河南省高等学校青年骨干教师培育计划(2021GGJS064);华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题(P2023-005)
作者简介:毕晓勤,1967 年生,博士,教授.研究方向:金属基复合材料的制备及表面处理技术研究.电话:18623719970,Email: xiaoqin_bi@haut.edu.cn
通讯作者:徐　琴,1983 年生,博士,副教授.研究方向:先进结构材料与性能、特种凝固理论与技术研究.电话:18623718362,Email: xuqin@haut.edu.cn
引用格式:毕晓勤,张森,徐琴,等.提高铝合金及铝基复合材料导电性方法的研究进展[J].铸造技术,2023,44(6):537-552.
BI X Q, ZHANG S, XU Q, et al. Research progress on the method of improving conductivity for aluminum alloy and aluminum matrix composites[J]. Foundry Technology, 2023, 44(6): 537-552.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

优异的铝合金线缆。

纯铝具有优异的塑性和高达 61%IACS(电导率百分值),并且铝资源是我国地壳中储量最多的金属资源。但是,纯铝强度低,高温下稳定性不足,抗蠕变性能较差。学者们通常将纯铝与其他材料相结合,弥补其力学性能较差的缺点,从而达到工业使用要求[6-7]。2007 年铝合金进入我国市场并被迅速推广;2014 年,全球电线电缆行业第一次铝合金电缆全生命周期研究报告在上海发布,这也证实了铝合金线缆的优异性能。

目前,铝导体增强钢(Al conductor steel reinforced, ACSR)也是常用的输电线路材料。ACSR 由钢、铝线和一层铝导体组成,其中钢芯提供出色的抗拉强度(ultimate tensile strength, UTS),铝提供高导电率(electrical conductivity, EC)。但在长距离输电过程中,由于 ACSR 自身的质量以及结冰、风、雪等外部环境的载荷,容易发生断裂,造成人员伤亡和电力损失。此外,在海洋或工业气氛下,ACSR 可能遭受基于不同金属(铝和钢)的严重电偶腐蚀,导致使用寿命缩短。在这种情况下,解决问题的普遍方法是使用全铝合金导体(all-Al-alloy conductors, AAACs),通过添加合金元素,使其强度更高,EC 损失更小。对于高 UTS 和高 EC 铝合金,普遍的看法是 UTS在 300~320 MPa 以上,EC 在 52%~53%IACS 以上[8-11]。

本文综述了影响铝合金及铝基复合材料导电性的因素,提升铝合金导电性各方法的最新研究进展、优缺点、适用条件及面临的挑战,并对未来的研究问题和方向进行总结展望。

1 影响铝合金及铝基复合材料导电性的因素

通过将铝和其他金属合金化产生固溶强化或沉淀硬化,使材料强度、性能得到提升。然而,铝合金强度的提高也会影响电导率,原因是由于电子在传输过程中遇到障碍物时散射引起的。杂质和晶格缺陷导致电子散射中心的产生,这引起电阻率不必要的增加[11-12]。马西森规则描述了基于微观结构特征的电阻率 ρ:

$$\rho=\rho_0+\rho_{ss}+\rho_p+\rho_v+\rho_{dis}+\rho_{gb} \quad (1)$$

式中,ρ_0 为纯金属电阻率,ρ_{ss}、ρ_p、ρ_v、ρ_{dis}、ρ_{gb} 分别为固溶体中元素、析出相、空位、位错、晶界对电阻率的影响。由式(1)可知,铝合金的电阻是一个对微缺陷相当敏感的参数,晶体缺陷的任何变化都可能导致电阻的变化。马西森规则可以反映各种微观缺陷对铝合金导电性的影响,许多学者在他们的研究中也使用了这个模型。

浇铸的铝合金中存在的夹渣、孔隙等会阻碍电子运动,增加电子反射率,从而使合金的导电率下降[13-14]。除此之外,用于冶炼的商业纯铝中含有部分过渡金属(transition metal, TM)元素如 V、Ti、Cr、Mn 等,这些元素通常以固溶体的形式存在于铝基体中,并且 TM 元素与铝元素在原子半径方面有较大的差异,这导致了严重的晶格畸变,增加了电子被散射的可能性,从而降低了铝合金的导电性能。因此,降低铝合金基体中固溶度较大的过渡族元素的固溶量,将其以析出态的形式去除,可以降低其对导电率的不利影响[15-17]。

而 Zr 元素由于其特有的强化能力也在铝合金中被广泛使用,在高温时效过程中,Zr 元素会从铝基体中析出,转变为热稳定性较强的 Al_3Zr。在高温下,晶界(grain boundaries, GBs)被钉住,以增强材料的抗蠕变性能。Zr 元素从铝基体中析出,可以缓解电子的散射效应,提高合金的电导率,其常与 Sc 元素共同作用在材料上,对铝合金的耐高温性能有显著提升[18-20]。由于原料和工业条件限制,Fe 也是最终的铝导体产品中所必然存在的元素,根据合金的成分差异、冷却速率及微量元素的存在,Fe 原子容易与基体中的铝、硅结合形成一系列的如 Al_6Fe 等金属间化合物,从而对铝合金的导电性产生影响[21-23]。

除了合金元素外,合金的微观组织对铝合金的导电性也有显著影响。微观组织主要分为位错、晶界和析出相 3 部分。位错是晶体中的一种线缺陷,一般由金属的塑性变形引起。晶体中位错的密度对金属的强度有决定性的影响,位错密度越大,材料强度越高。有学者报道位错对导电率的影响小于其他因素。经严重塑性处理 (severe plastic deformation, SPD)方法处理的铝合金位错密度显著提高,但是如此高的位错密度却使电阻率增加很少[24-26]。Murashkin 等[27]证实经高压扭转(high-pressure torsion, HPT)工艺处理的商业纯铝中获得的超细晶粒 (~500 nm)和高位错密度(~2.0×10^{12} m^{-2})并没有导致导电率的显著降低,导电率从 61.7%IACS 下降到 60.7%IACS,下降了 1.0%。

当晶粒尺寸等于电子在晶粒内的平均自由程时,GB 散射对电阻率的贡献不可忽视,GB 散射引起的多晶金属电阻率主要受电子被散射率的影响。控制铝合金的织构类型可以同时提高铝合金的电导率,当导电电子的运动方向与织构的运动方向平行时,可以缓解电子的散射效应,从而提高电导率[28-30]。析出相的半径大小同样对铝合金的导电性有影响,导

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电率随析出相的半径增大而增大。当析出相半径较小时,会引起严重的电子散射,因此,应适当控制析出相的尺寸。经分析可知影响铝合金及铝基复合材料导电性能的因素主要有:材料内部组织缺陷、杂质元素固溶的种类及数量、位错和晶界等微观结构影响。

学者们针对上述影响铝合金导电性能的各个因素,提出了许多提升铝合金导电性能的方法,如:硼化处理、调整 Mg/Si 比、添加稀土元素、热处理、变形处理以及铝复合化等。它们各有优缺点和适用条件,下面将对各方法的研究现状进行综述。

2 提高铝合金导电性能的方法

2.1 合金化

2.1.1 硼化处理

对于导电铝合金而言,微量元素的变化就会引起电导率的大幅度改变,尤其是在铝合金基体中固溶度较大的溶质元素。当微量元素以固溶态存在的时候会严重损害铝合金的导电率,但是当其以析出态存在的时候,对其损害作用就会迅速减小。而由于当今冶金技术的缺陷,铝基体中会存在 V、Ti 等过渡元素。过渡元素中 V 和 Ti 对导电率劣化的影响远大于其他过渡元素[31]。当往合金中掺入硼化物,即硼化处理后,硼与铝中的杂质元素反应生成相应的硼化物(如 AlB_2、TiB_2、VB_2、MnB_2 等),使杂质元素由固溶态变成析出态[32-33]。硼化处理过程中形成的大部分硼化物密度大于铝的密度,在铸造过程中会落到铸锭的底部,在底部更容易清除。由于杂质元素的析出及沉淀,同时铝中晶格畸变减少,提高了合金导电率。

崔晓丽[34]采用硼化处理加上晶粒细化的方式将 AA1070 铝合金的电导率提升到 63.2%IACS,极限抗拉强度为 87 MPa。在此基础上,崔晓丽继续探究硼化处理与晶粒细化和热处理相结合的方式,将 Al-0.5Mg-0.35Si(质量分数,%)的电导率提升到 56.5%IACS,极限抗拉强度为 178 MPa,将Al-0.5Fe-0.2Si 的电导率提升到 60.4%IACS,极限抗拉强度为 96 MPa;将 Al-0.8Fe-0.2Cu 合金其电导率提升至 61.8%IACS,极限抗拉强度为 103 MPa[35]。如图 1 所示,可以看出添加了硼元素的各系合金的极限拉伸强度以及电导率都比基体合金有显著提升。

赵毅飞等[36]研究了硼和稀土元素(rare earth element, RE)含量对 Al-Fe 合金导电率的影响,发现当硼含量较低时,铝合金组织中可见柱状晶形态,当硼含量增加至 0.04%(质量分数,下同)时,开始出现等轴晶,并随硼含量增加而逐渐增多。当硼含量为 0.06%时,导电率达最大值,比加入了 RE 的铝合金导电性能更优异。这主要是由于硼不仅可以净化铝合金中的杂质元素,同时还可以细化合金晶粒的缘故。在硼化处理时,晶粒细化剂一般以 Al-5Ti-1B 中间合金的形式加入,但在与硼复合处理时,Ti 对合金导电率的损伤会有所减轻。Ye 等[37]研究了钛辅助复合硼处理(Ti assistant composite B treatment, TBT)对 AA1070 铝电导率的影响,发现在添加 0.05%Ti、保温 20 min 搅拌的协同作用下,熔体中 TM 元素和过量硼的含量进一步降低,AA1070 铝的导电率从 62.4%IACS 提高到 66.9%IACS。

在此基础上,Li 等[38]研究了微量 TM(Zr、V、Ti)元素辅助硼处理对 AA6101 电导率的影响,发现 TM 硼化物为核壳结构(图 2),核主要为未反应的 AlB_2 化合物,导致硼处理效率较低。但当在铝熔体中加入不同数量的 TMs(Zr、V、Ti),发现它们能破坏核壳结构,促进硼反应的进行。当 Zr、V 和 Ti 的添加量分别为 0.05%、0.06%和 0.03%时,AA6101 的导电率可分别达到 54.2%IACS、53.9%IACS 和 53.7%IACS。结果表明,Zr 辅助硼处理效果最好,AA6101 的导电率比未处理的 AA6101提高了 8.2%(导电率为 50.1%IACS)。这是因为 Zr 可以取代硼化物粒子

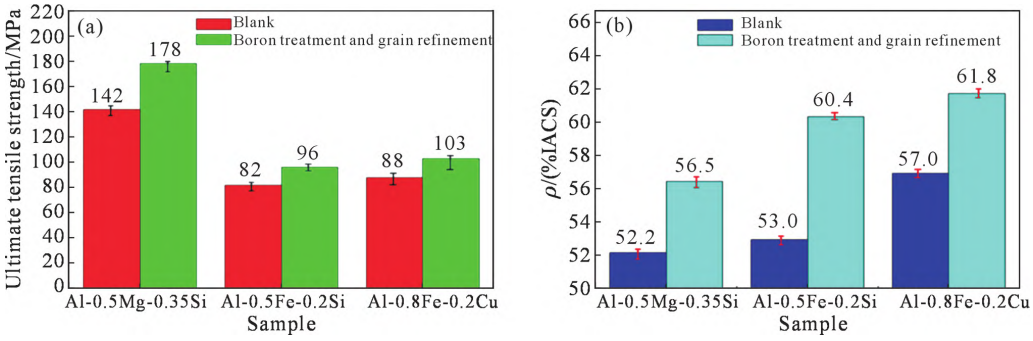


图 1 硼处理和晶粒细化对各系合金性能影响对比:(a) 各系合金的极限拉伸强度的提升对比,(b) 各系合金的导电率的提升对比[35]

Fig.1 Effect of boron treatment and grain refinement on the properties of different alloys: (a) comparison of the increase in ultimate tensile strength, (b) comparison of the increase in conductivity of each alloy[35]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

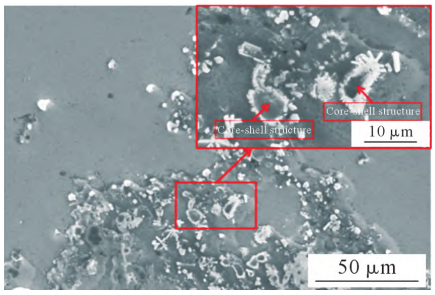


图 2 常规硼处理后 AA6101 形成的硼化物核壳结构的 SEM 图像[38]

Fig.2 SEM image of the boride core-shell structure formed by AA6101 after conventional boron treatment[38]

上的 TMs，取代后的 TMs 继续与硼化物中心未反应的 AlB_2 发生反应。因此，更多的 TMs 杂质参与了反应，从而减少了其对 AA6101 导电率的损伤。

硼化处理是一种非常好的方法，硼化处理时其与过渡族元素反应生成的硼化物会沉淀到底部，以炉渣的形式去除，极大地提升了合金的导电性能。硼化处理的优点在于实验简单，对实验条件要求较低，不会改变铝合金的化学成分和物理性质，并且会提高材料表面光洁度，制备的铝合金材料具有较高的导电率，其常常配合晶粒细化剂一同使用。注意点在于掺杂硼元素的含量问题，需要经过大量实验来得出最合适的硼元素掺杂含量，且硼处理可能会影响材料的韧性[16]。

2.1.2 调整 Mg/Si 比

研究表明，当 Al-Mg-Si 合金中的 Mg/Si 比(质量比)不同时，对铝合金的力学性能和导电性能有不同的影响。Al-Mg-Si 合金中，Si 能与 Mg 形成弥散分布的 Mg_2Si 纳米强化相，阻碍位错运动，提高合金的强度。Al-Mg-Si 合金的过饱和固溶体(supersaturated solid solution, SSS) 的典型分解顺序为：SSS→早期沉淀阶段(Guinier-Preston, GP 区)→β″相→β′相→β 相(Mg_2Si)[39]。根据 Mg/Si 质量比的不同，Al-Mg-Si 合金可分为 3 种：当 Mg/Si 质量比为 1.73 时，即 Mg 与 Si 全部反应生成 Mg_2Si 相，合金与二元 Al-Si 合金相似，通常将其当做 Al-Mg-Si 伪二元合金；当 Mg/Si 质量比大于 1.73时，合金中存在多余的 Mg，为过剩 Mg 合金；当 Mg/Si 质量比小于 1.73 时，合金中存在多余的 Si，为过剩 Si 合金。据报道，在粗晶粒 Al-Mg-Si 导体合金中，具有过量 Si 的合金显示出更高的强度。此外，在细粒 Al-Mg-Si 导体合金中，由于 Si 过量的合金中存在晶界沉淀，因此有更高的导电性能[40-42]。设计合适比例的合金元素也是提升铝合金力学性能和导电能力的很好方式。

Khangholi 等[43]制备了 4 种 Mg/Si 比(原子比)为 2、1.5、1 和 0.86 且恒定 Mg 添加量为 0.65%的实验合金，根据图 3 的结果分析发现，Mg/Si 比约为 1.5 的合金能兼顾导电性能和力学性能。

Xu 等[44]研究了不同 Mg/Si 比(质量比)例合金成分以及在 180 ℃条件下不同人工时效时间对铝合金性能的影响，发现 Mg/Si 比在 1.18 的铝合金能兼顾导电性能和力学性能。孙亮等[45] 设计研究了 6 系 Al-Mg-Si 合金中不同的 Mg/Si 比(质量比)：0.73、1.19、1.30，经过各种测试分析后得出，当比例为 1.30 时，导电性能最佳，但是铝合金抗拉强度和硬度随比例的升高而出现小幅度降低。Han 等[46]采用挤压和冷拔及时效工艺制备了 Mg/Si 比 (原子比) 分别为0.75、1.10、1.48 和 1.94 的超细晶粒 Al-Mg-Si 合金。经过分析发现 4 种时效合金中 β″析出相均分散在晶粒内部。虽然析出相的大小对 Mg/Si 比不敏感，但析出相的数量密度以及析出相间距对 Mg/Si 比有很大的依赖性，时效处理后位错密度降低 40%，但与 Mg/Si 比无关，Mg/ Si 比对沉淀的影响较大。优化后的 Mg/Si 比为 1.48，析出密度最大，硬度、电导率也最高。综上，现今学者们研究的 Mg/Si 比课题中比例分为两种：一种是质量比，一种是原子比。当研究为原子比时，Mg/Si 原子比约为 1.5 时铝合金能兼顾力学性能和导电性能；当研究质量比时，Mg/Si 质量比在 1.2~1.3 范围内铝合金能兼顾力学性能和导电性能。

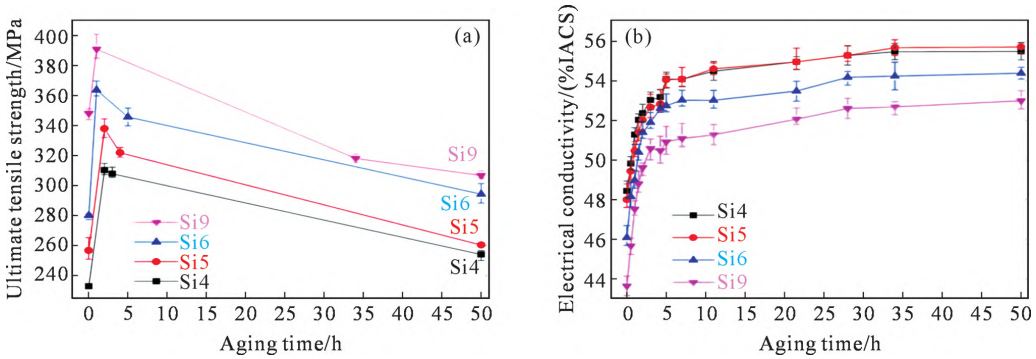


图 3 各合金性能随时效时间变化的关系：(a) UTS 随时效时间变化的关系，(b) 导电率随时效时间变化的关系[43]

Fig.3 Relationship between aging time and properties of alloys: (a) the relationship of UTS with aging time, (b) the relationship of conductivity with aging time[43]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6 系 Al-Mg-Si 合金是可热处理合金，其强化相是 Mg_2Si，这种合金化的方法操作较为简单，对实验条件环境要求不高，把握好 Mg、Si 元素比例即可设计出较为理想的铝合金。若要继续提高铝合金的导电性能，需要其他方法与调控 Mg/Si 比结合起来，在与其他方法协同作用下或许能获得导电性能更为理想的铝合金线缆材料。

2.1.3　添加稀土元素

在 20 世纪 90 年代时，上海电缆研究所就已经发现了在铝合金熔体中加入微量稀土能改善合金的导电性[47]。稀土是元素周期表中所有镧系元素，以及与铜系元素密切相关的同族元素钪(Sc)和钇(Y)共 17 种元素的总和。添加稀土元素能够改善共晶硅的形貌，还对铝合金的时效析出过程有一定影响[48]。在纯铝中引入其他元素会降低其对溶质原子、位错、晶界和沉淀物引起的电子散射的电导率，溶质原子对电导率降低的影响最为显著。因此，铝基不混溶体系，如 Al-RE 或 Al-Fe，是很有前途的高电导率导体材料，因为这些合金元素在铝中溶解度为 0，对电导率的影响不显著，目前研究较多的稀土元素有 La、Ce、Y、Sc、Er 等。此外，金属间相以小颗粒的形式均匀分布在合金中，可以显著提高合金的机械强度和热稳定性[49-51]。但是，不混溶元素化合物的浓度应加以控制，过量可能会导致电导率的损失。

Koprowski 等[11]研究了添加 0.2%的 Ce 对铝合金的影响，发现添加 Ce 元素后经过拉拔后其极限抗拉强度为 184 MPa，电导率为 60.9%IACS。Medvedev 等[52]研究不同稀土浓度的 Al-RE 合金组合，发现掺杂 2.5%RE(La+Ce)元素，再通过 HPT 以及退火处理获得了电导率为 60.2%IACS，极限拉伸强度为 227 MPa 的铝合金。其晶粒尺寸如图 4 所示，含稀土合金的主要趋势是 HPT 导致位错密度增加，这对于严重的塑性变形是非常自然的。位错密度越高，机械强度越高。

Zheng 等[53]研究了 La 元素对 Al-Mg-Si 铝合金性能的影响。如图 5 所示，发现添加 0.08% La 的铝合金在 215 ℃时效后，合金导电率提升到 57.9%I-ACS，极限拉伸强度增加到 268 MPa。添加了 La 元素的合金无论是导电性能还是强度都比基体合金有显著提升，实现了理想的 α-Al 晶粒细化。

Davydov 等[54]研究了 Sc 添加量对铝合金导电率的影响，发现随着 Sc 添加量的增大，合金的导电率呈先增加后降低的趋势，当 Sc 的添加量为 0.75%时，合金的导电率达到最大值。在热处理铝合金中，微量 Sc 主要通过促进非均相形核和降低生长/粗化驱动力，促进晶粒细化的强化颗粒的分散析出[55]。Li 等[56]研究结果表明添加 0.05%~0.16%的 Ce 能降低铝基体中 Fe、Si 等杂质元素的固溶度，提高工业纯铝的导电性能。Yuan 等[57]发现在 Al-Mg-Si-Zr 合金中，当 La 的添加量超过 0.2%以后才能改善合金的导电性。

杜壮等[58]研究了碲(Te)元素对 1R50 导电铝合

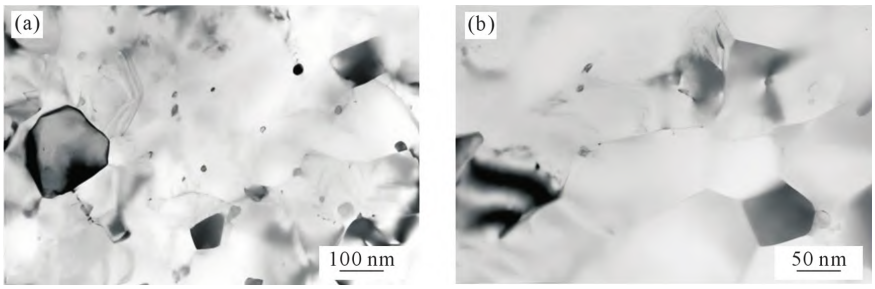


图 4　变形处理后 230 ℃退火时 Al-2.5RE 合金的 TEM 图像：(a) 低倍下晶粒尺寸，(b) 高倍下晶粒尺寸[52]

Fig.4　TEM images of Al-2.5RE alloy annealed at 230 ℃ after deformation treatment: (a) grain size at low magnification, (b) grain size at high magnification[52]

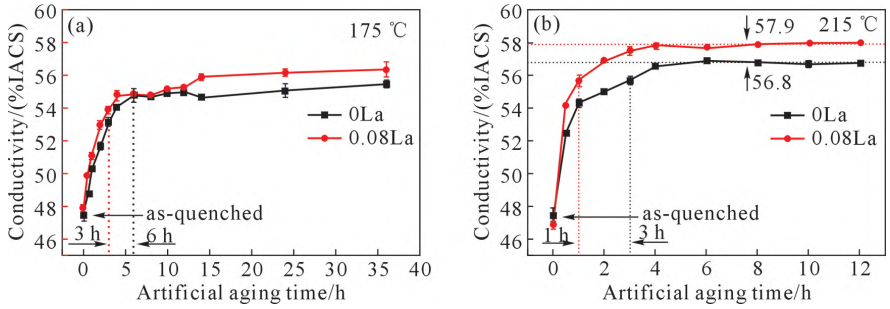


图 5　Al-0.6Mg-0.6Si 和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金在不同温度时效过程中导电率的变化：(a) 175 ℃, (b) 215 ℃[53]

Fig.5　Variations in electrical conductivity for the Al-0.6Mg-0.6Si and Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La alloys during artificial aging at different temperatures: (a) 175 ℃, (b) 215 ℃[53]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

金的影响，发现 Te 添加后形成的 Al_2Te_3 相作为形核核心有效细化晶粒尺寸，使合金的第二相形貌改变，提升了力学性能。Te 与 Fe、Si、Ce 原子形成金属间化合物，在晶界析出，改善了合金的导电性能。当 Te 添加量为 0.1%时，合金的综合性能最佳，抗拉强度及伸长率为 78 MPa、41.4%，与 1R50 合金相比分别提高了 16.4%、7.0%，且导电率不降低。Zhang 等[59]研究了添加 La 和 Ce 元素时电导率的差异，铸态 Al-Ce 合金的电导率高于相同添加量的铸态 Al-La 合金，铸态 Al-Ce 合金的最高电导率为 63.62%IACS，铸态 Al-La 合金的最高电导率为 62.59%IACS。而 Al-La 合金的电导率较 Al-Ce 合金低是因为 Ce 对铝基体中的 Fe 和 Si 杂质有很强的净化作用，这使铝基体中形成 Al-Fe-Si-Ce 化合物而不是固溶体，La 元素的杂质净化能力略弱于 Ce 元素，导致 Al-La 合金中固溶体原子较多，进而影响了 Al-La 合金的导电率。但在 300 ℃热处理 24 h 后，两者的电导率相同，原因是 Al-La 和 Al-Ce 合金的大部分固溶体原子可以完全从铝基体中析出，其微观结构相似。

我国稀土资源丰富，种类齐全，因此研究稀土合金及其材料的前景发展意义深远。掺杂稀土可以提升铝合金的耐热性、耐腐蚀性、可加工性能，但是添加稀土元素一定要适量，适量的稀土配比对铝合金的电学性能有积极影响，过量的话就会对其产生消极影响。还有学者研究了多种稀土混合使用的方法，这更要注意元素含量及配比问题[60-61]。掺杂稀土元素的配比、作用机理等需要研究者们进行大量实验，直至找出选定元素的合适配比。

2.2 热处理

当合金成分确定了以后，合金材料的微观组织决定了其导电性能的好坏，而材料微观组织受热处理影响。合适的热处理方式可以最大程度地减少合金元素的固溶量，减少元素固溶对导电率损害的同时也发挥出析出相的强化效果。对于适合热处理的 Al-Mg-Si 合金，最终状态一般为固溶时效强化态；而对于非热处理强化类的 Al-Mg、Al-Si、Al-Fe 以及 Al-Mg-Fe 等导电铝合金，合金最终状态多为冷加工硬化态、退火态、第二相硬化态等[55,62-64]。晶粒尺寸、形貌、枝晶间距和二次相分布是影响铸件力学性能的关键因素[65-67]。铝合金组织质量主要取决于化学成分、熔炼工艺和冷却速率。根据这些情况，了解如何通过铸造或热处理控制铝合金的组织形成非常重要。

Zhang 等[68]探究了预时效工艺对 7055 铝合金性能的影响，他的热处理方式为 530 ℃固溶+水淬+预时效+人工时效。如图 6 所示，在低温预时效阶段，7055 铝合金电导率与时效温度呈负相关；在高温预时效阶段，7055 铝合金的电导率与时效温度呈正相关。

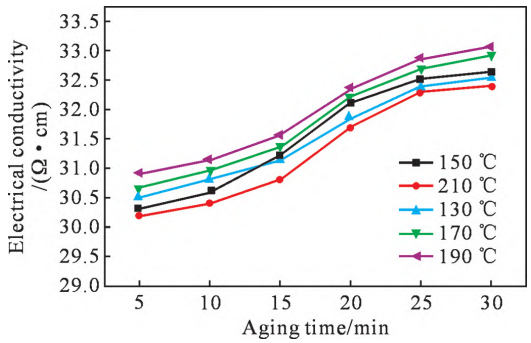


图 6 不同时效温度下电导率与时效时间的关系图[68]
Fig.6 Relationship between conductivity and aging time at different aging temperatures[68]

谭勇等[69]研究了固溶和时效工艺对Al-Mg-Si-Cu合金的影响，结果表明，最优的固溶工艺是 530 ℃/30 min，较优的时效工艺是 175 ℃/10 h。研究发现合金在 530 ℃温度下固溶 30 min 可完成再结晶，获得晶粒均匀的等轴晶，如图 7 所示。在上述固溶时效条件下，合金获得了最优的力学性能，且兼备优异的导电性能，其综合性能能满足工业使用要求。

黎诚等[70]探究了时效处理对 7022 铝合金的影响，分析得出在 110 ℃ 时效 18 h 时，合金的力学性能最优，抗拉强度与伸长率分别为 591. 60 MPa、11. 02%。合金的导电率随着时效时间的增加呈现先上升后下降的趋势，且在 150 ℃ 时效 14 h 时达到峰值 31.2%IACS。焦承东等[71]研究了热挤压与固溶温度对 6063 铝合金导电性能的影响，发现随着固溶温度增加，试样的电导率呈先增加后下降趋势。获得最佳导电性能的工艺为 530 ℃挤压 1 h，然后固溶 1 h，最后在 175 ℃下进行 8 h 时效处理，其导电率为 53.1%IACS，相比原始状态的导电率提升了 12%左右。电导率改变的原因是在原始状态晶界上析出颗粒比较多，它们会对电子定向移动产生一定阻碍作用，因此电导率比较低。在经过挤压之后，材料表面的晶粒会产生一定变形，且挤压加工是在一定温度下完成的，晶粒边界的合金化元素或者杂质会有部分溶入晶粒内部，电导率略有上升。在经过热处理后由于晶界上杂质持续溶入晶粒内部，故电导率上升且达到最大值。

热处理工艺操作较为繁琐，但是其对实验条件要求较低，只需调控好温度区间及铝合金晶粒组织就能提升铝合金导电性能，并且热处理工艺是研究金属材料必不可少的工艺。但是热处理需要深入了

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

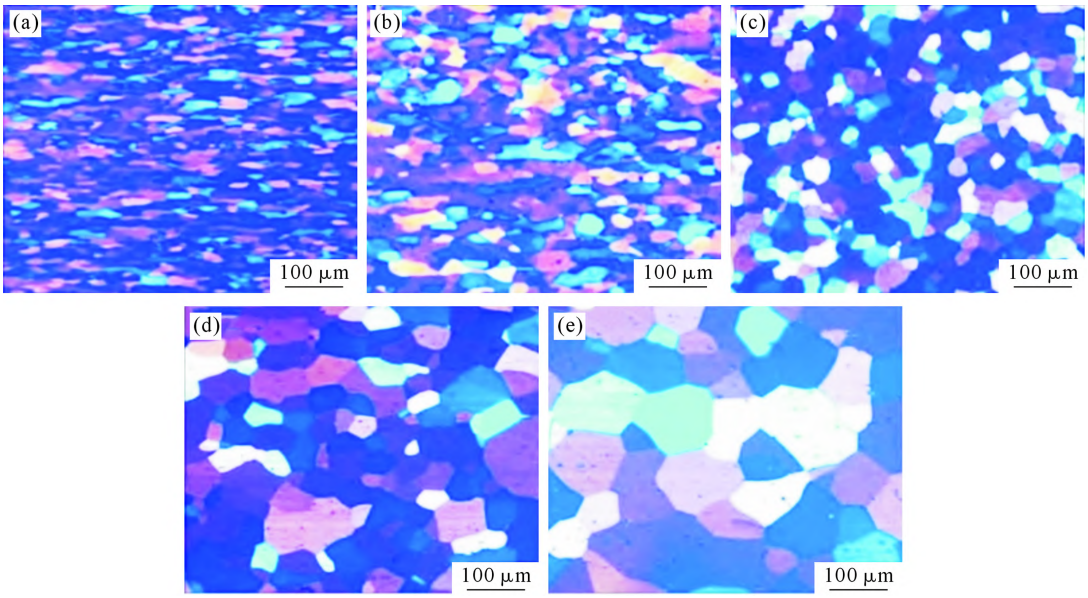


图 7　不同温度下固溶 30 min 的 Al-Mg-Si-Cu 合金显微组织:(a) 510 ℃,(b) 520 ℃,(c) 530 ℃,(d) 540 ℃,(e) 550 ℃[69]

Fig.7　Microstructure of Al-Mg-Si-Cu alloy with solid solution of 30 min at different temperatures: (a) 510 ℃, (b) 520 ℃, (c) 530 ℃, (d) 540 ℃, (e) 550 ℃[69]

解温度对合金组织的影响，精准设计温度区间与合金成分,当温度过高或过低都很难达到理想的效果,经热处理的材料能消除气孔,缺陷、杂质等[72-73]。

2.3　变形处理

近年来,严重变形处理也是研究的热门。该策略利用晶粒细化到亚微米尺度的强化机制和电阻率机制,在室温下使用严重塑性变形,然后在高温下通过动态时效,在 SPD 处理过程中分解固溶体并形成纳米级第二相沉淀物。这些具有第二相纳米沉淀物的超细晶粒 (ultra-fine grained, UFG)微结构由于晶界强化和沉淀硬化而显示出优异的机械强度。同时,溶质原子的含量非常低,并且铝基质中没有 GP 区,导致电导率显著提高[74-76]。变形技术发展迅速,从而可以开发新颖的加工路线来进一步提高其性能。

现在有几种技术可以产生必要的高应变：等通道角压(equal-channel angular pressing, ECAP)、高压扭转、累积滚压(accumulative roll-bonding, ARB)、循环挤压–压缩(cyclic extrusion-compression, CEC)和搅拌摩擦焊接(friction stir welding, FSW)[77]。其工艺流程如图 8 所示。几种方法优势对比见表 1。

最近,经 SPD 处理的 Al-Mg-Si 合金在室温(room temperature, RT)和高温下表现出高强度和导电性的良好结合。在温度 <0.4 T_m (T_m 为熔融温度)下,通过各种 SPD 技术将晶粒细化到超细尺寸,可以实现高强度。在较高(升高)温度下的 SPD 处理通过动态时效提高了 UFG 合金的导电性,从而通过形成纳米级次级相沉淀物来清除铝基体中溶解的杂质原子。

Mavlyutov 等[78]研究了经 HPT 处理得到的超细晶粒商业纯铝在不同退火温度下的组织与性能。发现 UFG 铝的退火将显微硬度提高 13%，这很可能是由于材料中移动位错的湮灭导致屈服应力的增加，从而激活了新的位错源。研究结果为进一步提高经严重塑性变形处理的 UFG 铝和铝合金的强度和导电性提供了新的途径。Qi 等[79]研究了 SPD 变形处理与时效工艺对 6061 铝合金导电率的影响,经过挤压与人工时效后,发现在 400 ℃经过变形处理合金

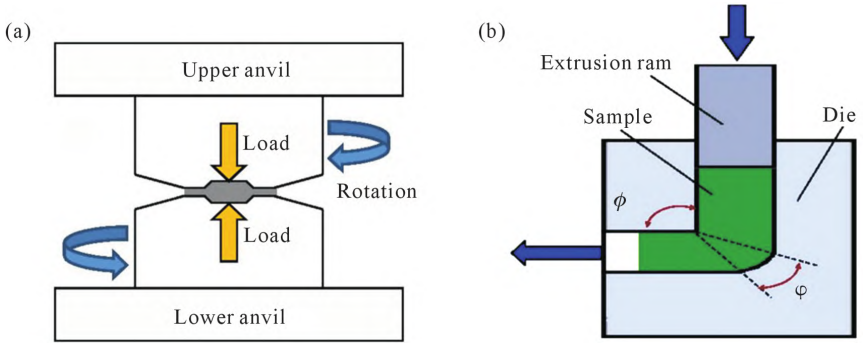


图 8　严重塑性变形工艺示意图:(a) 高压扭转(HPT)工艺示意图,(b) 等通道角压(ECAP)工艺原理图[77]

Fig.8　Schematic diagram of the severe plastic deformation process: (a) high pressure torsion (HPT) process diagram, (b) schematic diagram of the equal channel angular pressure (ECAP) process[77]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 不同的SPD方法[77]
Tab.1 Different SPD methods[77]

类别	优势	劣势	适用范围
ECAP	对材料延展性要求低，工艺简单	不适合连续生产，快速消耗模具	材料塑性差
HPT	变形均匀，变形阻力小，孔隙率低，不引入污染	产品形状尺寸有限，不适合连续生产，工艺参数复杂	小尺寸样品
ARB	成本低，不需要特殊设备	边缘开裂，设备损坏高	适用于大规模工业生产和新型复合材料
CEC	适用于大体积试样，可消除初始组织缺陷，加工温度范围宽	挤出比有限，试样尺寸有限，不适合连续生产	适用于硬质变形金属及工业生产
FSW	工件变形小，尺寸稳定性好，重复性好，不损失合金元素，接头区域性能优良，组织精细，节能	接头部位残留针孔，焊接速度低，接头形状受限	适用于所有系列铝合金及焊接裂纹易感性高的金属

的导电率提升了 10%，但硬度才下降了 40 HV。结果表明，在热变形过程中，动态再结晶形成较大的晶粒，强剪切作用导致宏观析出物的断裂和重分布，位错程度较低，有利于导电。Sunde 等[80]研究了冷轧和时效处理对铝合金导电性能的影响，发现轧制后时效处理导致电导率迅速增加。经过 2 h 的再时效后，电导率的变化率已经减缓到与相同总时效时间后未变形材料相当的水平，随着进一步时效，变形材料的导电性保持 2%~3%IACS 增益。导电性能的提高主要可以用两种沉淀形成机制来解释。

Sauvage 等[81]将 6101 和 6201 铝合金进行 SPD 加工，材料经过 550 ℃固溶和水淬，再进行人工时效处理。研究了 Al-Mg-Si 体系中超细晶粒和纳米级沉淀物的贡献，以优化强度和导电性的组合。通过不同的严重塑性变形和后处理沉淀处理，获得了均匀的 UFG 组织，其平均晶粒尺寸为 180 nm。如图 9 所示，在最高 HPT 加工温度(170 ℃)下，电导率达到最高，为(34.12±0.18) MS/m，通过下式计算得到：

$$IACS=\omega_{Al}/\omega_{Cu}\times100\% \quad (2)$$

式中，ω_{Al} 为铝合金的电导率，单位为 MS/m；ω_{Cu} 为铜的电导率(58.0 MS/m)，约为 58.6%IACS。但是此时材料的强度比其温度低的 HPT 处理要低一点。

变形处理是当下的热门研究方向，其优点在于能够使铝合金的强度大幅度提升的同时也能够极大程度的保留导电率，经变形处理的铝合金晶粒能被细化到亚微米级，这些细晶组织由于晶界强化和沉淀硬化而极大程度的提升铝合金导电性能。这种方法也可以被认为是实现 6 系 Al-Mg-Si 合金电缆和电线大规模工业生产的一种策略。但是缺点是变形处理对实验环境与实验条件有一定的要求，变形处理的方法面临着处理时间长、成本高、效率低等挑战，后续还要经过退火处理来消除缺陷等。

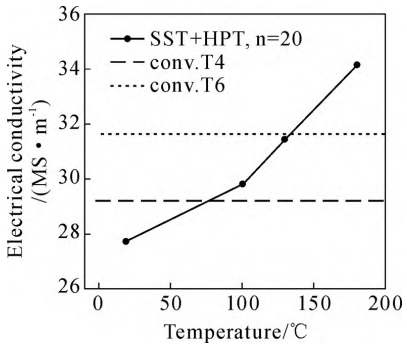


图 9 HPT 加工 6101 铝合金的电导率与加工温度和转数的关系。设置水平线，与同一合金的常规 T4(自然时效)和 T6(峰值时效)处理进行比较[81]

Fig.9 Electrical conductivity of the 6101 Al alloy processed by HPT as a function of the processing temperature and the number of revolutions. Horizontal lines are set for comparison with the conventional T4 (natural aging) and T6 (peak aging) treatments of the same alloy[81]

3 导电铝基复合材料

铝金属基复合材料(aluminum metal matrix composites, AMMCs)由于其优异的力学和电学性能，在航空航天、汽车和电子等领域有着广泛的应用。铝基复合材料是用铝金属作为基体与增强体材料 (主要是 SiC，Al_2O_3，B_4C，TiB_2 等陶瓷) 复合而成的材料[82-83]。石墨烯和碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)被发现是金属基复合材料中优良的支撑增强材料。石墨烯纳米片和纳米板的二维几何结构使其比表面积达到最大值，从而使石墨烯成为掺入铝基体以实现高强度和高导电性的理想候选材料。石墨烯具有优异的力学性能，具有 1 TPa 杨氏模量和 130 GPa 的拉伸强度，还具备优异的导电性能[84-86]。铝基复合材料传统的制备方法可分为液态(液态金属浸渗和铸造技术)和固态(粉末冶金和搅拌摩擦加工等)两大类[87]。而除此之外，选区激光熔化技术(selective laser melting, SLM) 也是一种新颖且前景远大的铝材生产技术[88]。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.1 液态工艺

液态金属浸渗和铸造是将分散的颗粒掺入熔融的基体金属中，然后使其凝固。在液态工艺中，增强体的分散是在熔融金属中进行的。许多液态工艺用于制造 AMMCs，例如搅拌铸造、复合铸造、喷射沉积和原位加工等[89-90]。并且搅拌铸造工艺应用最为广泛，此工艺具有柔性强、成本效益好、最适合批量生产等优点，是一种适合于制备铝基复合材料的方法[91-92]。液态工艺制备轻质金属基体的优势在于铝基体材料的熔融温度较低[93]。缺点是当采用液态处理方法制备铝基复合材料时，由于石墨烯与金属基体之间的密度差异较大，这导致石墨烯很难在基体内均匀分散，石墨烯粉会在韧性基体中团聚，团聚会产生颗粒，导致材料产生脆性[94-95]。

Zhao 等[96]将卤化物盐反应与铸造冶金相结合将双尺寸 TiB_2 颗粒引入 6201 铝合金中，并加入Al-3B中间合金来调控 B/Ti 比(质量比)，制备了 TiB_2/6201 铝导电复合材料，电导率结果如图 10 所示。结果表明加入 4%TiB_2/6201(质量分数)铝复合材料的极限抗拉强度、断裂伸长率和 EC 分别为 360.9 MPa、8.27%和 53.5%IACS，而对照组的 6201 铝合金的这些性能分别为 325.0 MPa、7.8%和 56.06%IACS。可以发现在不牺牲 EC 的情况下获得了较优的力学性能，TiB_2/ 6201 铝复合材料中形成的半相干颗粒/基体界面，对增强基体起着至关重要的作用。Jaber 等[97]采用搅拌铸造工艺制备了 AA6063-T4/TiO_2 复合材料，研究了 3%、5%和 7%TiO_2(质量分数)添加量对复合材料性能的影响。结果表明复合材料的电导率随 TiO_2 用量的增加而增加，并且电导率均高于母材基体。研究认为，纳米颗粒的增强、TiO_2 的分布和晶粒尺寸是限制纳米复合材料力学和电学性能的主要原因。

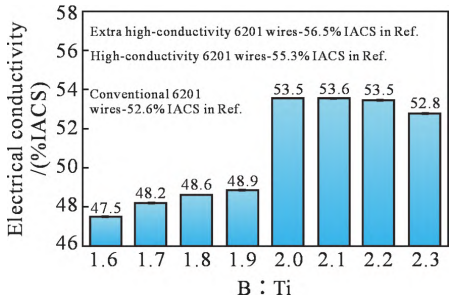


图 10 不同化学计量比(B:Ti)下 TiB_2/6201 铝复合材料的电导率及 6201 铝合金电导率的参考值[96]

Fig.10 Electrical conductivity of TiB_2/6201Al composites with different stoichiometric ratios (B:Ti), and reference values of the 6201 alloys[96]

3.2 固态工艺

与液态加工方法相反，固态加工是对固态或半固态的金属进行的。粉末冶金(powder metallurgy, PM)是目前广泛使用的 AMMCs 合成方法之一，即对粉末进行冷压，然后烧结或热压。但是粉末冶金处理有两个缺点：①金属基体的氧化和颗粒与基体之间不干净的界面的产生，从而导致弱的结合[98]；②高温烧结会在基体中产生意想不到的晶粒生长[99]。但是，通常还是使用 PM 处理，因为其更容易使分散体分布更均匀。PM 加工技术的替代方法通常包括烧结、冷等静压、热等静压或火花等离子烧结，在某些情况下，还包括二次变形，如热挤压、热锻造、热轧和搅拌摩擦加工[100-103]，图 11 为粉末冶金的操作流程[104]。

Huang 等[105]将 5%(质量分数)石墨烯纳米板作为增强材料包裹在铝基体中，粉末在室温下混合并压实，然后在不同温度下进行 HPT 处理。发现在 298 K 时，电导率为(66.7±4.0)%IACS，经过 HPT 加工后，商业纯铝的电导率为 57.5%IACS[106]。与工业纯铝相比，石墨烯增强材料的硬度和抗拉强度均有所提高，石墨烯作为增强体有效地提高了材料的强

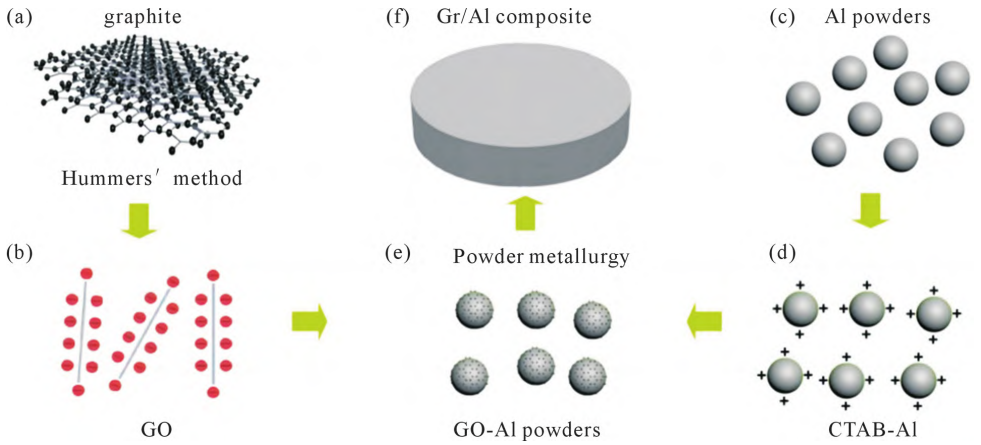


图 11 Al- 石墨烯复合材料的合成工艺：(a) 原始石墨，(b) 化学剥离法制备带负电荷的氧化石墨烯(GO)，(c) Al 粉，(d) 带正电荷的十六烷基三甲基溴化铵(CTAB-Al)包覆 Al 粉，(e) Al-GO 粉，(f)粉末冶金固结 Al- 石墨烯复合材料[104]

Fig.11 The synthesis process of the Al-graphene composite: (a) pristine graphite, (b) graphene oxide (GO) with negative charges prepared by the chemical exfoliation method, (c) Al powders, (d) Al powder coated by hexadecyl trimethyl ammonium bromide with positive charges (CTAB-Al), (e) Al-GO powders, (f) Al-graphene composite consolidated by powder metallurgy[104]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度。在 298 K 时，这些纳米复合材料的导电性与 HPT 处理的商业纯铝相比略有提高，表明石墨烯倾向于提高材料的导电性。Luo 等[107]对镀镍石墨烯增强铝基复合材料的导电性进行了研究，石墨烯薄片镀镍后可以保持良好的分离，并且镀镍后在石墨烯和铝之间可以形成良好的界面键合，也防止形成降解的 Al_4C_3 相。当石墨烯添加量为 0.1%(质量分数)时，复合材料的电导率达到 33.6 MS/m，比纯铝提高约 4.3%。电导率的提高是由于镍和铝之间更好的润湿能力使界面键合更强，并防止了 Al_4C_3 的形成。Zhang 等[108]通过在碳硅反应合成的碳纳米管表面引入连续的 SiC 纳米层，作为与铝粉混合前的相容性过渡层来解决界面结合问题，然后经过球磨及火花等离子烧结(spark plasma sintering, SPS)制备材料。研究发现 SiC 熔覆层具有良好的润湿性，其过渡层减小了碳纳米管与基体之间的比表面能和质量密度差，CNTs 与铝基体之间的界面反应可以得到有效调控，在不影响导电性能的同时也提高了力学性能。

石墨烯片在铝基体中的分散问题是影响其性能的主要原因，机械球磨法因其简单、可控性好，已成为制备纳米复合材料最广泛使用的方法。Yu 等[109]研究了球磨时间对石墨烯纳米片增强铝 6063 复合材料的影响，通过球磨阶段的原位界面反应，制备出优质复合材料。揭示了随着球磨能量的增加，石墨烯的分散均匀性、缺陷和界面反应程度的演变。如图 12 所示，其反映了材料的结构演化，当球磨时间为 3 h 时，电导率较参比铝显著提高(从 45%IACS 提高到 52.9%IACS)。在加入了 0.3%石墨烯纳米片(graphene nanosheets, GNSs)时就获得了最大抗拉强度(~276 MPa)。

搅拌摩擦加工(friction stir processing, FSP)是一种由搅拌摩擦焊原理衍生而来的加工技术。它最初应用于铝合金的改性，现在已被视为制造铝基复合材料的一种有前途的技术[110-111]。此方法的原理是材料在焊接工具的搅拌和锻造作用下发生强烈的塑性变形，导致增强体与铝基体混合，由于其固态加工特性，与其他工艺相比，FSP 工艺具有节能、环保、高效、低成本等诸多优势[112]。并且由于工具的搅拌作用，金属间相分布更为均匀。Zhang 等[113]以石墨烯作为增强体，采用 FSP 工艺结合热挤压法制备了石墨烯/铝纳米复合材料。结果表明，石墨烯/铝纳米复合材料的电导率、抗拉强度和伸长率分别比纯铝提高 2.1%、17.3%和 35.4%。原因是石墨烯在纳米复合材料中均匀分散，形成了直接键合的石墨烯/铝界面，为同时提高材料的力学性能和导电性能提供了结构基础。而 Liu 等[114]用 FSP 工艺原位剥离石墨制备了块状石墨烯/铝复合材料，对其结构研究发现在铝基体的晶界和晶粒内部均嵌入了大量的石墨烯–铝双相纳米团簇，石墨烯与铝以半相干方式结合。与母材相比，复合材料的硬度和导电性分别提高了15%

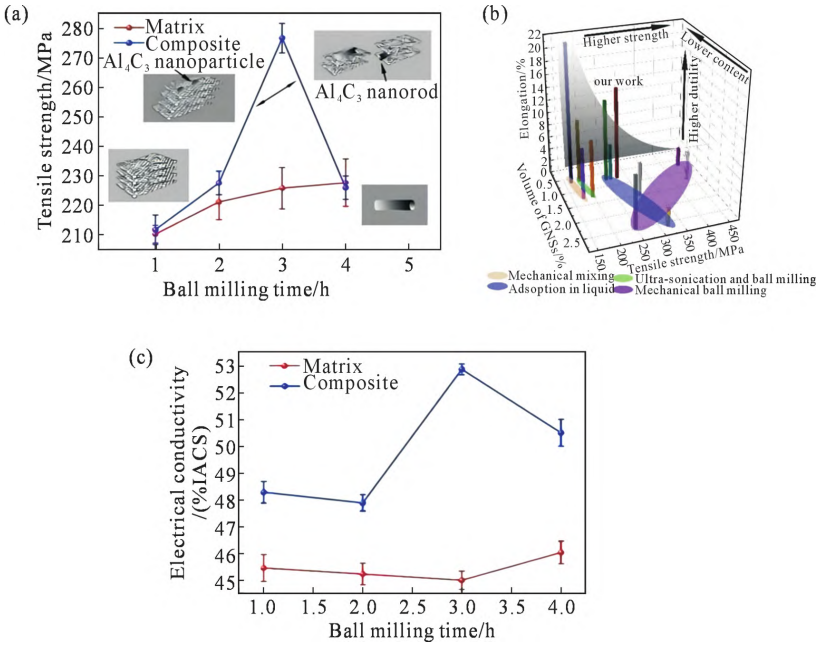


图 12 基体与复合材料各性能对比：(a) 基体与复合材料抗拉强度对比，(b) 文献中 GNSs/Al 复合材料综合性能的比较，包括增强体积、抗拉强度和伸长率之间的关系，(c) 不同球磨时间下基体和复合材料的电导率(IACS:国际退火铜标准)[109]

Fig.12 Comparison of properties between matrix and composite materials: (a) comparison of tensile strength between matrix and composite, (b) comparison of the comprehensive properties of GNSs/Al composite in reported articles, including the relationship between volume of reinforcement, tensile strength and elongation, (c) electrical conductivity of matrixes and composites with various ball milling time (IACS: international annealed copper standard) [109]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和13%。

3.3 选区激光熔化

增材制造(additive manufacturing, AM)是一种逐层生产的方法，作为一种生产复杂零件的制造技术而受到关注[115]。利用其自由设计的特点,在包括航空航天、汽车和机械工业在内的各个领域开发出具有新颖和优异功能的创新零件[116-117]。选区激光熔化是一种利用超高能量密度激光对金属粉末进行快速熔化和凝固的过程。该过程是基于激光与金属粉末的相互作用,包括一系列复杂的过程,如能量传递和相变[118-119]。并非所有铝合金材料都适合 SLM 工艺,因为裂纹、缺陷、低密度、机械性能差和其他缺陷限制了它们的适用性[120]。与常规的增材制造加工铝合金相比,铝基复合材料由于其独特的层状结构、更高的强度、硬度、耐腐蚀性和耐磨性,在各个领域得到了更广泛的应用[121]。此外,常规材料的性能一般不能满足高应用要求。然而,增强相的添加使得将材料从不可模塑转化为可模塑或通过增加材料的可模塑性来调整材料的性能成为可能，从而满足特定应用场景的需求[122]。

Zhang 等[123]用 SLM 技术制备了纳米 ZrO_2 增强 AlSi10Mg 基复合材料,研究了 ZrO_2 对复合材料显微组织和力学性能的影响。结果表明,ZrO_2 颗粒分布均匀,与 AlSi10Mg 基体界面结合良好;ZrO_2 的加入减少了大晶粒的形成,对晶粒细化有重要作用。与 AlSi10Mg 合金相比,ZrO_2/AlSi10Mg 复合材料具有优异的力学性能,最高硬度达到 139 HV(平均提高 10.3%)，抗拉强度达到 478.6 MPa，伸长率达到 10.6%,两者分别提高 13.5%和 41%。Tiwari 等[124]使用 SLM 技术制备了石墨烯纳米片(graphene nanoplates, GNPs)/AlSi10Mg 复合材料，研究了 GNPs 增强体和激光功率对GNP/AlSi10Mg 复合材料力学性能、显微组织和孔隙率的影响。发现随着 GNPs 含量的增加,晶粒尺寸迅速减小，硬度几乎不受激光功率变化的影响，但随着石墨烯含量的增加而逐渐增加。当 GNPs 为 0.1%(质量分数)时,屈服强度提高 22%,当 GNPs 为 0.2%(质量分数)时,硬度提高了 30%。

Xi 等[125]制备了 0.5%(质量分数)多壁碳纳米管(multiwalled carbon nanotubes, MWCNTs) 增强 Al-Mg-Sc-Zr 合金的铝基纳米复合材料。研究了添加 MWCNTs 对 Al-Mg-Sc-Zr 合金的制备质量、相形成及力学性能的影响。研究发现,初生 Al_3(Sc,Zr)颗粒析出并均匀分布在等轴区和柱状区。新的 Al_4C_3 相在 MWCNTs 的缺陷和非晶碳层中生成，覆盖其整个表面。复合材料的抗拉强度为 544.2 MPa,屈服强度为 505.1 MPa,分别比未增强的Al-Mg-Sc-Zr 合金提高了 4.5%、5.0%。

由于受合金原料粉末成分的限制，目前关于 SLM 工艺对铝材电导率影响的研究相对较少。因此,需要学者们对其进行更为深入的研究。虽然通过 SLM 制备大体积材料仍然非常困难,但这种方法可以帮助我们了解一些特殊组织对 EC 的影响[9]。同时与传统的铝材制造方法相比这种方法也是较为新颖的。这对发展高强、高导电率的铝线具有深远的指导意义。

综上所述，复合材料的设计方法具有广阔的发展前景。然而，在最近的研究中报道了两个主要挑战:①铝基体与增强材料的润湿性差;②碳材料增强的 AMC 中的不良反应。例如，铝与碳质反应生成 Al_4C_3,这对复合材料的力学性能非常不利[126]。但也有研究指出 Al_4C_3 对提高强度有积极作用，因此 Al_4C_3 的作用还不是很清楚[127]。总的来说,良好的润湿性有利于增强机械性能和导电性能。而润湿性差会导致基体形成高应力区，高应力区易成为裂纹的形核点(材料有很大的断裂倾向),从而大大降低铝合金的强度。未来的研究将集中在增强体与基体之间的界面,因为高质量增强体/铝界面的形成对材料的力学性能和电导率有重大影响。

4 总结与展望

铝合金在导电性方面的发展为我国电力行业的发展提供材料保障。现代社会高速发展,目前的输电铝合金线材已经不大能满足高负荷、高功率的输电需求,电力行业对远距离、大容量、强度高线材的需求越来越大。随着,我国新能源车行业发展,各大城市的车辆由燃油车逐渐向新能源车过渡，汽车轻量化是应对国际新能源车行业竞争的一个强有力方法,而学者们深入研究铝合金线材,制定“以铝代铜”的研究策略也正是应对了这一点。我国在铝电材料方面的研究取得了很多的成就，但在许多方面还需要发展和完善。未来导电铝合金材料的研究方向应从以下几点考虑:

(1)继续提升铝合金材料的纯度,继续深入研究去除材料中的有害微量元素，目前来看即使是高纯度铝材中也含有一定的微量元素。因此,提高熔体净化工艺以生产更高纯度的导电铝材也是需要研究的问题。

(2)合金的性能由合金成分所决定,合理的设计合金中各个元素的种类及含量，再经实验探究得到合金元素间的最佳配比,在前人的基础上更进一步，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

达到更优的导电性能和强度，这也是需要继续深入研究的。

(3)随着我国各行各业的蓬勃发展，对于用电而言，铝线的应用范围愈发的广阔，应用环境愈发的恶劣，如高温条件、酸碱条件、高强度条件等，开发高导热高强度等综合性能优异的铝线材料也是刻不容缓的。

(4)近年来，铝基复合材料发展也越来越迅速，其性能也较为优异，在深入开发研究传统铝合金铸造技术的同时，也不妨把眼光放在铝基复合材料上面，它目前的研究聚焦在力学性能方面，在导电性能方面的研究还需要学者们继续挖掘。

参考文献：

[1] RHEE H, WHITTINGTON W R, OPPEDAL A L, et al.Mechanical properties of novel aluminum metal matrix metallic composites: Application to overhead conductors[J]. Materials & Design, 2015, 88: 16-21.

[2] 樊祥泽. 电线电缆用 8030 铝合金导电材料组织与性能的研究[D]. 重庆：重庆大学，2019.
FAN X Z. Study on microstructure and properties of 8030 aluminum alloy conductive material used for wire and cable [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[3] 苗欢. 铝合金导体的性能研究[D]. 北京：华北电力大学，2017.
MIAO H. Study on properties of aluminum alloy conductors [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[4] REN J Z. New energy vehicle in China for sustainable development: Analysis of success factors and strategic implications [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 59: 268-288.

[5] SHIN J, KIM T, KIM D, et al. Castability and mechanical properties of new 7xxx aluminum alloys for automotive chassis/body applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 698: 577-590.

[6] ROSITTER P L. The electrical resistivity of metals and alloys[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

[7] MURASHKIN M Y, SABIROV I, SAUVAGE X, et al. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(1): 33-49.

[8] 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.

[9] WANG Y, ZHU L J, NIU G D, et al. Conductive Al alloys: The contradiction between strength and electrical conductivity[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(5): 2001249.

[10] CUI X L, CUI H W, WU Y Y, et al. The improvement of electrical conductivity of hypoeutectic Al-Si alloys achieved by composite melt treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 1322-1328.

[11] KOPROWSKI P, LECH-GREGA M, WODZIŃSKI Ł, et al. The effect of low content additives on strength, resistivity and microstructural changes in wire drawing of 1xxx series aluminium alloys for electrical purposes [J]. Materials Today Communications, 2020, 24: 101039.

[12] GUAN R, SHEN Y, ZHAO Z, et al. A high-strength, ductile Al-0.35Sc-0.2Zr alloy with good electrical conductivity strengthened by coherent nanosized-precipitates [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(3): 215-223.

[13] 孙睿，庆毅，庄景巍，等. 铝合金及铝基复合材料导电性能的研究进展[J]. 轻合金加工技术，2019, 47(2): 9-15,37.
SUN R, QING Y, ZHUANG J W et al. Research progress on electrical conductivity of aluminum alloy and aluminum matrix composites[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019, 47(2): 9-15, 37.

[14] 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.

[15] KHALIQ A, AKBAR RHAMDHANI M, BROOKS G A, et al. Removal of vanadium from molten aluminum—Part III. Analysis of industrial boron treatment practice[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45: 784-794.

[16] RAMBABU P, ESWARA PRASAD N, KUTUMBARAO V V, et al. Aluminium alloys for aerospace applications [M]// ESWARA PRASAD N, WANHILL R J H. Aerospace Materials and Material Technologies. Indian Institute of Metals Series. Singpore: Springer, 2017: 29-52.

[17] YE H, CUI X L, LI X H, et al. Fabrication of hypoeutectic Al-4Si alloy with high electrical conductivity, high plasticity and medium strength by the dual treatment of Al matrix and eutectic Si microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 885: 161117.

[18] LENG J F, REN B H, ZHOU Q B, et al. Effect of Sc and Zr on recrystallization behavior of 7075 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(9): 2545-2557.

[19] ORLOVA T S, LATYNINA T A, MAVLYUTOV A M, et al. Effect of annealing on microstructure, strength and electrical conductivity of the pre-aged and HPT-processed Al-0.4Zr alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 41-48.

[20] TIAN S K, LI J Y, ZHANG J L, et al. Effect of Zr and Sc on microstructure and properties of 7136 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5): 4130-4140.

[21] 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.

[22] YOO H S, KIM Y H, SON H T. Effect of Fe content on the mechanical properties and thermal conductivity of the Al-RE alloys [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2020, 65(3):1029-1033

[23] GAN J Q, DU J, WEN C, et al. The effect of Fe content on the solidification pathway, microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 16(1): 178-190.

[24] 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 precipita-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

tion on hardening and electrical conductivity[J]. Acta Materialia, 2021, 203: 116503.

[25] LI Y X, HU A, FU Y T, et al. Al alloys and casting processes for induction motor applications in battery-powered electric vehicles: A review[J]. Metals, 2022, 12(2): 216.

[26] ZHANG Y D, JIN S B, Trimby P W, et al. Dynamic precipitation, segregation and strengthening of an Al-Zn-Mg-Cu alloy (AA7075) processed by high-pressure torsion[J]. Acta Materialia, 2019, 162: 19-32.

[27] MURASHKIN M Y, SABIROV I, MEDVEDEV A E, et al. Mechanical and electrical properties of an ultrafine grained Al-8.5 wt.% RE (RE=5.4 wt.% Ce, 3.1wt.% La) alloy processed by severe plastic deformation[J]. Materials & Design, 2016, 90: 433-442.

[28] TIAN L, ANDERSON I, RIEDEMANN T, et al. Modeling the electrical resistivity of deformation processed metal-metal composites[J]. Acta Materialia, 2014, 77: 151-161.

[29] MA P P, LIU C H, CHEN Q Y, et al. Natural-ageing-enhanced precipitation near grain boundaries in high-strength aluminum alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 46: 107-113.

[30] LERVIK A, WENNER S, LUNDER O, et al. Grain boundary structures and their correlation with intergranular corrosion in an extruded Al-Mg-Si-Cu alloy [J]. Materials Characterization, 2020, 170: 110695.

[31] **陈迪. 硼对高铁铝合金微观组织和性能的影响**[D]. **青岛：青岛科技大学**，2014.
CHEN D. Effect of Boron on microstructure and properties of iron-rich aluminum[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2014.

[32] **崔晓丽. 溶体复合硼化处理及第二相形貌演变对铝合金导电率影响机制的研究**[D]. **济南：山东大学**，2016.
CUI X L. Research on the Influencing mechanisms of melt complex boron treatment and second phase morphological evolution on electrical conductivity of aluminum alloy[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[33] GAO J W, SHU D, WANG J, et al. Effect of boron on removal of iron from aluminium melts[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(12): 1462-1466.

[34] CUI X L, WU Y Y, LIU X F, et al. Effects of grain refinement and boron treatment on electrical conductivity and mechanical properties of AA1070 aluminum[J]. Materials & Design, 2015, 86: 397-403.

[35] CUI X L, WU Y Y, ZHANG G J, et al. Study on the improvement of electrical conductivity and mechanical properties of low alloying electrical aluminum alloys[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 110: 381-387.

[36] **赵毅飞，黄金磊，辛涛. 含硼铝合金电缆组织与导电性能研究**[J]. **铸造技术**，2018, 39(3): 677-679.
ZHAO Y F, HUANG J L, XIN T. Study on microstructure and electrical conductivity of B modified aluminum alloy cable [J]. Foundry Technology, 2018, 39(3): 677-679.

[37] YE H, CUI X L, CUI H W, et al. Study about improving mechanism of electrical conductivity of AA1070Al treated by a novel composite boron treatment with trace Ti[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 870: 159416.

[38] LI X H, CUI X L, LIU H Y, et al. Study on the improvement and mechanism of AA6101 electrical conductivity by trace TM (Zr, V, Ti) elements-assisted boron treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023,939: 168728.

[39] SERIZAWA A，SATO T，MILLER M K. Effect of cold rolling on the formation and distribution of nanoclusters during pre-aging in an Al-Mg-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 561: 492-497.

[40] YANG M J, CHEN H N, Orekhov A, et al. Quantified contribution of β″and β′ precipitates to the strengthening of an aged Al-Mg-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 774: 138776.

[41] 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(7): 1354-1363.

[42] KAIRY S K, ROMETSCH P A, DIAO K, et al. Exploring the electrochemistry of 6xxx series aluminium alloys as a function of Si to Mg ratio, Cu content, ageing conditions and microstructure [J]. Electrochimica Acta, 2016, 190: 92-103.

[43] NIKZAD KHANGHOLI S N, JAVIDANI M, MALTAIS A, et al. Optimization of mechanical properties and electrical conductivity in Al-Mg-Si 6201 alloys with different Mg/Si ratios [J]. Journal of Materials Research, 2020, 35(20): 2765-2776.

[44] XU X X, YANG Z, YE Y L, et al. Effects of various Mg/Si ratios on microstructure and performance property of Al-Mg-Si alloy cables[J]. Materials Characterization, 2016, 119: 114-119.

[45] **孙亮，刘兆伟，张宇，等**. Mg **和** Si **质量比对** 6 **系铝合金性能的影响**[J]. **有色金属材料与工程**，2020, 41(2): 35-40.
SUN L, LIU Z W, ZHANG Y, et al. Effect of massratio of Mg to Si on the properties of 6 series aluminum alloys[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2020, 41(2): 35-40.

[46] 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.

[47] **黄崇祺，储成著，丁关森，等. 稀土优化处理在电工铝导体生产中的应用**[J]. **电线电缆**，1986(6): 31-35.
HUANG C Q, CHU C Z, DING G S, et al. Rare earth optimization application in the production of electrical aluminium conductor [J]. Electric Wire Electric Cable, 1986(6): 31-35.

[48] **赵娟. 稀土元素** Er **及热处理工艺对** Al-Si **系导电铝合金组织和性能影响的研究**[D]. **淄博：山东理工大学**，2020.
ZHAO J. Effect of rare earth element Er and heat treatment on microstructure and properties of Al-Si conductive aluminum alloy [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.

[49] ZOU Y, YAN H, YU B, et al. Effect of rare earth Yb on microstructure and corrosion resistance of ADC12 aluminum alloy[J]. Intermetallics, 2019, 110: 106487.

[50] BOBRUK E V, MURASHKIN M Y, KAZYKHANOV V U, et al. Aging behavior and properties of ultrafine-grained aluminum alloys of Al-Mg-Si system[J]. Reviews on Advanced. Materials Science, 2012, 31(2): 109-115.

[51] GUO W C, CHEN X H, LIU P L, et al. Effects of Er additions on

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

the microstructure, mechanical properties, and electrical conductivity of the Al-0.4Fe-0.05Si alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(3): 2000955.

[52] 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.

[53] ZHENG Q J, JIANG H X, HE J, et al. Effect of micro-alloying La on precipitation behavior, mechanical properties and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys [J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(9): 2012-2022.

[54] DAVYDOV V G, ELAGIN V I, ZAKHAROV V V, et al. Alloying aluminum alloys with scandium and zirconium additives[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1996, 38(8): 347-352.

[55] ZHANG J Y, GAO Y H, YANG C, et al. Microalloying Al alloys with Sc: A review[J]. Rare Metals, 2020, 39: 636-650.

[56] LI P F, WU Z G, WANG Y L, et al. Effect of cerium on mechanical performance and electrical conductivity of aluminum rod for electrical purpose[J]. Journal of Rare Earths, 2006, 24(1): 355-357.

[57] YUAN W H, LIANG Z Y ,ZHANG C Y, et al. Effects of La addition on the mechanical properties and thermal-resistant properties of Al-Mg-Si-Zr alloys based on AA 6201[J]. Materials & Design, 2012, 34: 788-792.

[58] **杜壮**,**叶金文**,**杨璐霏**. Te **微合金化对** 1R50 **导电铝合金的组织及性能的影响**[J]. **热加工工艺**,2023(16): 16-20.
DU Z, YE J W, YANG L F. Effect of Te microalloying on microstructure and properties of 1R50 conductive aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2023(16): 16-20.

[59] ZHANG Y L, WEI F, MAO J, et al. The difference of La and Ce as additives of electrical conductivity aluminum alloys[J]. Materials Characterization, 2019, 158: 109963.

[60] WANG W Y, PAN Q L, JIANG F Q, et al. Microstructure evolution and performances of Al-0.7Mg-0.6Si-0.2Ce-X (X=Sc, Y and Zr) alloys with high strength and high electrical conductivity[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 895: 162654.

[61] CHEN Y, LIU K J, HU K X, et al. Influence of mixed rare earth elements (Y and Ce) on the microstructure and corrosion behaviour of Mg-4Al-3Ca alloy[J]. Materials Research Express, 2018, 6(1): 016555.

[62] SHUAI G L, LI Z, ZHANG D T, et al. The mechanical property and electrical conductivity evolution of Al-Fe alloy between room temperature and elevated temperature ECAP[J]. Vacuum, 2021, 183: 109813.

[63] ZHOU P F, WANG D T, LIU S C, et al. New strategy to improve the mechanical properties in cast Al-Mg-Fe alloys by the formation of Al-AlFe eutectic[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23 (5): 2001460.

[64] ZHU X Z, LIU F C, WANG S H, et al. The development of low-temperature heat-treatable high-pressure die-cast Al-Mg-Fe-Mn alloys with Zn[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56: 11083-11097.

[65] **邹镕**. **金属材料热处理变形的控制措施** [J]. **冶金与材料**,2022, 42(6): 116-118.
ZOU R. Control measures for deformation of metal materials during heat treatment [J]. Metallurgy and Materials, 2022, 42(6): 116-118.

[66] KRUPIŃSKI M, LABISZ K, TAŃSKI T, et al. Influence of Mg addition on crystallisation kinetics and structure of the Zn-Al-Cu alloy[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(2A): 785-790.

[67] SMYRAK B, JURKIEWICZ B, ZASADZIŃSKA M, et al. The effect of Al-Mg-Si wire rod heat treatment on its electrical conductivity and strength[J]. Metals, 2020, 10(8): 1027.

[68] ZHANG P, LI Y Y, LIU Y, et al. Analysis of the microhardness, mechanical properties and electrical conductivity of 7055 aluminum alloy[J]. Vacuum, 2020, 171: 109005.

[69] **谭勇**,**王乙舒**,**周炜**,**等**. **热处理对** Al-Mg-Si-Cu **铝合金组织和性能的影响**[J]. **热加工工艺**,2022, 51(22): 130-133.
TAN Y, WANG Y S, ZHOU W, et al. Effects of heat treatment on microstructure and properties of Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2022 51(22): 130-133.

[70] **黎诚**,**殷剑**,**金康**. **时效处理对** 7022 **铝合金力学性能和导电率的影响**[J]. **材料热处理学报**,2021, 42(12): 61-68.
LI C, YIN J, JIN K. Effect of aging treatment on mechanical properties and electrical conductivity of 7022 aluminum alloy[J].Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(12) : 61-68.

[71] **焦承东**,**李宾**. **固溶温度对** 6063 **铝合金导电性能的影响**[J]. **铸造技术**,2018, 39(12): 2857-2860.
JIAO C D, LI B. Effect of solid solution temperature on electrical conductivity for 6063 aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2018, 39(12): 2857-2860.

[72] WANG X D, PAN Q L, LIU L L, et al. Characterization of hot extrusion and heat treatment on mechanical properties in a spray formed ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 131-140.

[73] SONG L Y, LIU H X, NIE S N, et al. Microstructure and fracture behavior of Al-Si-Mg alloy prepared with recycled alloy[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2019, 50(4): 462-470.

[74] MURASHKIN M Y, SABIROV I, KAZYKHANOV V U, et al. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(13): 4501-4509.

[75] VALIEV R Z, MURASHKIN M Y, SABIROV I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity[J]. Scripta Materialia, 2014, 76, 13-16.

[76] 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(10): 2513-2528.

[77] GUAN R G, TIE D. A review on grain refinement of aluminum alloys: Progresses, challenges and prospects[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30: 409-432.

[78] MAVLYUTOV A M, BONDARENKO A S, MURASHKIN M Y, et al. Effect of annealing on microhardness and electrical resistivity of nanostructured SPD aluminium[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 698: 539-546.

[79] QI Y S, KOSINOVA A, LAKIN E, et al. Effect of SPD processing on the strength and conductivity of AA6061 alloy[J]. Advanced

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Engineering Materials, 2019, 21(8): 1801370.

[80] SUNDE J K, MARIOARA C D, WENNER S, et al. On the microstructural origins of improvements in conductivity by heavy deformation and ageing of Al-Mg-Si alloy 6101[J]. Materials Characterization, 2021, 176: 111073.

[81] SAUVAGE X, BOBRUK E V, MURASHKIN M Y, et al. Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2015, 98: 355-366.

[82] ZHANG J L, SONG B, WEI Q S, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(2): 270-284.

[83] YASHPAL, SUMANKANT, JAWALKAR C S, et al. Fabrication of aluminium metal matrix composites with particulate reinforcement: a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 2927-2936.

[84] RANDVIIR E P, BROWNSON D A C, BANKS C E. A decade of graphene research: Production, applications and outlook[J]. Materials Today, 2014, 17(9): 426-432.

[85] WANG J, LI Z Q, FAN G, et al. Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(8): 594-597.

[86] CAO M, LUO Y Z, XIE Y Q, et al. The influence of interface structure on the electrical conductivity of graphene embedded in aluminum matrix[J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(13): 1900468.

[87] KANDPAL B C, KUMAR J, SINGH H. Production technologies of metal matrix composite: A review[J]. IJRMET, 2014, 4(2): 27-32.

[88] FEREIDUNI E, GHASEMI A, ELBESTAWI M. Selective laser melting of aluminum and titanium matrix composites: recent progress and potential applications in the aerospace industry[J]. Aerospace, 2020, 7(6): 77.

[89] MOHAMMED S M A K, CHEN D L. Carbon nanotube-reinforced aluminum matrix composites[J]. Advanced Engineering Materials, 2020, 22(4): 1901176.

[90] GARG P, JAMWAL A, KUMAR D, et al. Advance research progresses in aluminium matrix composites: Manufacturing & applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5): 4924-4939.

[91] NAYIM S M T I, HASAN M Z, SETH P P, et al. Effect of CNT and TiC hybrid reinforcement on the micro-mechano-tribo behaviour of aluminium matrix composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 21: 1421-1424.

[92] KANDPAL B C , KUMAR J , SINGH H . Manufacturing and technological challenges in stir casting of metal matrix composites-a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(1): 5-10.

[93] TAJZAD I, GHASALI E. Production methods of CNT-reinforced Al matrix composites: A review[J]. Journal of Composites and Compounds, 2020, 1(2): 1-9.

[94] NADENDLA H, TZAMTZIS S, BAREKAR N, et al. Fabrication of metal matrix composites under intensive shearing: Solid State Phenomena[C]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2008. 373-378.

[95] SU J L, TENG J. Recent progress in graphene-reinforced aluminum matrix composites[J]. Frontiers of Materials Science, 2021, 15: 79-97.

[96] ZHAO K, LIU X T, FANG Y, et al. Multiscale microstructures, mechanical properties and electrical conductivity of in-situ dual-size TiB_2 particles reinforced 6201 aluminum matrix composites [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 5459-5473.

[97] JABER M H, AZIZ G A, MOHAMMED A J, et al. Electrical conductivity, magnetic and fatigue properties of aluminum matrix composites reinforced with nano-titanium dioxide (TiO_2)[J]. Nanocomposites, 2020, 6(2): 47-55.

[98] IBRAHIM I A, MOHAMED F A, LAVERNIA E J. Particulate reinforced metal matrix composites—a review[J]. Journal of materials science, 1991, 26: 1137-1156.

[99] VISWANATHAN V, LAHA T, BALANI K, et al. Challenges and advances in nanocomposite processing techniques[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2006, 54(5-6): 121-285.

[100] RANA R S, PUROHIT R, DAS S. Review of recent studies in Al matrix composites[J]. International Journal Scientific Engineering Research, 2012, 3(6): 1-16.

[101] XIE Y, MENG X, LI Y, et al. Insight into ultra-refined grains of aluminum matrix composites via deformation-driven metallurgy[J]. Composites Communications, 2021, 26: 100776.

[102] ALIPOUR M, ESLAMI-FARSANI R. Synthesis and characterization of graphene nanoplatelets reinforced AA7068 matrix nanocomposites produced by liquid metallurgy route[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 706: 71-82.

[103] RASHAD M, PAN F S, YU Z W, et al. Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2015, 25(5): 460-470.

[104] GAO X, YUE H Y, GUO E J, et al. Preparation and tensile properties of homogeneously dispersed graphene reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials & Design, 2016, 94: 54-60.

[105] HUANG Y, BAZARNIK P, WAN D Q, et al. The fabrication of graphene-reinforced Al-based nanocomposites using high-pressure torsion[J]. Acta Materialia, 2019, 164: 499-511.

[106] BAKHSHI R, FARSHIDI M H, SAJJADI S A. Strengthening of aluminium alloy 7005 through imposition of severe plastic deformation supplemented by different ageing treatments[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(10): 2909-2921.

[107] LUO Y M, HUANG Y L, HASSAN A, et al. Nickel-encapsulated graphene reinforced aluminum matrix composites with increased mechanical strength and electrical conductivity[J]. Journal of Materials Research, 2022, 37(21): 3803-3815.

[108] ZHANG X, LI S F, PAN B, et al. Regulation of interface between carbon nanotubes-aluminum and its strengthening effect in CNTs reinforced aluminum matrix nanocomposites [J]. Carbon, 2019, 155: 686-696.

[109] YU Z H, YANG W S, ZHOU C, et al. Effect of ball milling time on graphene nanosheets reinforced Al6063 composite fabricated

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

by pressure infiltration method[J]. Carbon, 2019, 141: 25-39.

[110] SHARMA V, PRAKASH U, KUMAR B V M. Surface composites by friction stir processing: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224: 117-134.

[111] DAS H, MONDAL M, HONG S T, et al. Joining and fabrication of metal matrix composites by friction stir welding/processing[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018, 5: 151-172.

[112] ZHANG H J, ZHANG B X, GAO Q Z, et al. A review on microstructures and properties of graphene-reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 126-135.

[113] ZHANG S, CHEN G Q, QU T M, et al. Simultaneously enhancing mechanical properties and electrical conductivity of aluminum by using graphene as the reinforcement [J]. Materials Letters, 2020, 265: 127440.

[114] LIU Y J, CHEN G Q, ZHANG H, et al. In situ exfoliation of graphite for fabrication of graphene/aluminum composites by friction stir processing[J]. Materials Letters, 2021, 301: 130280.

[115] WANG P, ECKERT J, PRASHANTH K G, et al. A review of particulate-reinforced aluminum matrix composites fabricated by selective laser melting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2001-2034.

[116] ROMETSCH P, JIA Q B, YANG K V, et al. Aluminum alloys for selective laser melting – towards improved performance[M]//Froes F, Boyer R. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry. Alpharetta: Elsevier, 2019: 301-325.

[117] KIMURA T, NAKAMOTO T, SUYAMA T, et al. In-process fabrication of carbon-dispersed aluminum matrix composite using selective laser melting[J]. Metals, 2020, 10(5): 619.

[118] LUO S X, LI R F, HE P Y, et al. Investigation on the microstructure and mechanical properties of CNTs-AlSi10Mg composites fabricated by selective laser melting [J]. Materials, 2021, 14 (4): 838.

[119] LIAO H L, ZHANG W Q, CHEN C P, et al. Hybrid reinforced aluminum matrix composites fabricated by selective laser melting[J]. Intermetallics, 2021, 131: 107080.

[120] WANG Z, UMMETHALA R, SINGH N, et al. Selective laser melting of aluminum and its alloys [J]. Materials, 2020, 13 (20): 4564.

[121] ABOULKHAIR N T, SIMONELLI M, PARRY L, et al. 3D printing of aluminium alloys: Additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting[J]. Progress in Materials Science, 2019, 106: 100578.

[122] LEI Z L, BI J, CHEN Y B, et al. Effect of energy density on formability, microstructure and micro-hardness of selective laser melted Sc-and Zr-modified 7075 aluminum alloy[J]. Powder Technology, 2019, 356: 594-606.

[123] ZHANG S Z, CHEN Z, WEI P, et al. Microstructure and properties of a nano-ZrO_2-reinforced AlSi10Mg matrix composite prepared by selective laser melting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 838: 142792.

[124] TIWARI J K, MANDAL A, SATHISH N, et al. Investigation of porosity, microstructure and mechanical properties of additively manufactured graphene reinforced AlSi10Mg composite [J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101095.

[125] XI L X, DING K, ZHANG H, et al. In-situ synthesis of aluminum matrix nanocomposites by selective laser melting of carbon nanotubes modified Al-Mg-Sc-Zr alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 891: 162047.

[126] LI M X, ZHAO Y H, CHEN L W, et al. Research progress on preparation technology of graphene-reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials Research Express, 2019, 6(3): 032002.

[127] ZHOU W, ZHOU Z, KUBOTA K, et al. Design of high-performance Al_4C_3/Al matrix composites for electric conductor [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 798: 140331.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net