

引用格式: 李冠娜, 王俊红, 常朗, 等. 低密度高强可焊铝合金的开发设计思路及展望[J]. 中国材料进展, 2026, 45(5): 397-405.
LI G N, WANG J H, CHANG L, *et al.* Strategies and Future Outlook for Low-Density, High-Strength, Weldable Aluminum Alloys[J]. Materials China, 2026, 45(5): 397-405.

低密度高强可焊铝合金的开发设计思路及展望

李冠娜, 王俊红, 常朗, 商梦瑶, 丁海波, 张济山, 宋西平
(北京科技大学 新金属材料全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 随着航空航天和交通运输等领域对材料轻量化与高性能的迫切需求, 低密度高强可焊铝合金逐渐成为研究热点。传统高强铝合金虽然在强度和耐蚀性方面表现优异, 但普遍存在密度较高、焊接性能差的问题。因此, 探索兼具低密度、高强度和优良焊接性的铝合金体系, 成为当前铝合金研究与应用的关键课题。针对这一需求, 基于合金成分调控、组织及相结构优化以及与先进的焊接工艺相结合的方法路径, 提出了低密度高强可焊铝合金的开发设计思路与发展展望。在合金成分方面, 通过大幅度提高低密度 Mg 元素含量来降低整体合金密度。在组织及相结构方面, 通过加入 Zn 元素形成 T-Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ 相来抑制低密度高强可焊铝合金中有害 β -Al₃Mg₂ 相出现, 同时形成的 T-Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ 相弥散细小, 不仅可以细化组织, 还可以进一步提高基体强度。在焊接工艺方面, 通过采用搅拌摩擦焊这类先进的加工技术, 可以解决低密度高强可焊铝合金的焊接问题。除此之外, 对低密度高强可焊铝合金中应力腐蚀开裂敏感性问题进行了分析并提出了合理的解决方案, 以实现低密度高强可焊铝合金的密度、强度、焊接性和耐蚀性的全面平衡, 进而推动其在高端装备制造领域的工程化应用。

关键词: 低密度; 铝合金; 设计思路; 高强可焊; 发展展望

中图分类号: TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2026)05-0397-09

Strategies and Future Outlook for Low-Density, High-Strength, Weldable Aluminum Alloys

LI Guanna, WANG Junhong, CHANG Lang, SHANG Mengyao,
DING Haibo, ZHANG Jishan, SONG Xiping

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083, China)

Abstract: With the growing demand for lightweight and high-performance materials in aerospace, transportation and related fields, low-density, high-strength and weldable aluminum alloys have emerged as a research hotspot. Although conventional high-strength aluminum alloys exhibit excellent mechanical strength and corrosion resistance, they generally suffer from relatively high density and poor weldability. Therefore, the development of aluminum alloy systems that simultaneously offer low density, high strength and superior weldability has become a critical issue in both fundamental research and engineering applications. To address this challenge, this study proposes a design strategy and development perspective for low-density, high-strength and weldable aluminum alloys, integrating alloy composition regulation, microstructure and phase optimization, as well as the application of advanced welding techniques. From the standpoint of alloying, increasing the Mg content significantly reduces the overall alloy density due to its low atomic mass. In terms of microstructure and phase constitution, the addition of Zn promotes the formation of the T-Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ phase, which effectively suppresses the precipitation of the detrimental β -Al₃Mg₂ phase commonly found in low-density, high-strength and weldable aluminum alloys. The finely dispersed T-Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ phase not only refines the microstructure, but also enhances the matrix strength. From a processing perspective, advanced welding technologies such as friction stir welding are employed to overcome the weldability issues of low-density, high-strength and weldable aluminum alloys. Furthermore, the susceptibility of low-density, high-strength and weldable aluminum alloys to stress corrosion cracking is systematically analyzed, and rational solutions are proposed. These combined strategies aim to achieve a comprehensive balance among density, strength, weldability and corrosion resistance, thereby promoting their engineer-

收稿日期: 2025-09-08 修回日期: 2025-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3710401, 2023YFB3710403)

第一作者: 李冠娜, 女, 2000 年生, 硕士研究生

通讯作者: 宋西平, 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师,

Email: xpsong@skl.ustb.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202509008

perspective, advanced welding technologies such as friction stir welding are employed to overcome the weldability issues of low-density, high-strength and weldable aluminum alloys. Furthermore, the susceptibility of low-density, high-strength and weldable aluminum alloys to stress corrosion cracking is systematically analyzed, and rational solutions are proposed. These combined strategies aim to achieve a comprehensive balance among density, strength, weldability and corrosion resistance, thereby promoting their engineer-

ing application in advanced equipment manufacturing.

Key words: low density; aluminum alloy; design strategy; high-strength and weldable; development prospects

1 前言

一提起铝合金,人们脑海里首先浮现出的是轻质金属材料。金属铝的密度为 2.70 g/cm^3 ,经合金化后其密度一般在 $2.63 \sim 2.85 \text{ g/cm}^3$ 之间。相比于传统金属材料,如高温合金的 $8.00 \sim 9.50 \text{ g/cm}^3$,低碳合金钢的 $7.60 \sim 8.10 \text{ g/cm}^3$,以及航空用钛合金的 4.50 g/cm^3 ,铝合金的密度仅为其密度的 $1/3 \sim 1/2$ ^[1]。尽管铝合金已具备较低的密度,但在航空航天等对结构轻量化要求日益提高的领域,发展低密度、高强度且具有良好的可焊性的铝合金仍具有重要意义。

这一需求既来源于外部竞争压力,也源于材料性能提升的内在驱动力。从外部压力来看,镁合金的“异军突起”无疑成为发展低密度铝合金的首要外部压力。表 1 列出了铝合金与镁合金的性能及成本对比^[2-12]。可以看出,尽管镁合金在强度、耐腐蚀性及可焊性方面还有不足,

成本也高,但仅凭质量轻(密度为铝合金的 $2/3$)这一指标,就可以在铝合金面前展示优势,且国内镁矿资源丰富、产能高、开发势头强劲,已经在航空航天、汽车工业、电子产品以及运动器材等领域获得了应用,展现了潜在的替代铝合金的发展趋势,因此铝合金不仅要继续加强其高强、耐腐蚀、可焊以及低成本等传统优势,还要从降低密度方面下功夫,进一步增强其竞争力。

从内部驱动力来看,铝合金减重仍然是一项非常迫切的需求。就拿高铁车厢来说,一节高铁车厢自重约 40 吨,其中铝合金质量约 10 吨,占车厢质量的 $1/4$,主要分布于车厢壳体、枕梁、牵引梁等关键型材部件。因此要想进一步提高高速列车的时速,从目前的 $300 \sim 350$ 提高到 $400 \sim 450 \text{ km/h}$,减轻铝合金的质量就是一个绕不开的命题。据估算^[13, 14],高速列车减重 10%,整车运行阻力可降低 22%,可以实现时速提升 $50 \sim 100 \text{ km/h}$ 的目的,因此铝合金减重成为高铁提速的关键选项。

表 1 铝合金与镁合金性能及成本对比

Table 1 Comparison of properties and cost between aluminum alloys and magnesium alloys

| Properties | Aluminum alloy | Magnesium alloy | |
|---------------------------|---|---|---|
| Physical properties | Density/(g/cm^3) | 2.60~2.90 | 1.74~1.85 |
| | Damping capacity | Good | Excellent |
| | Heat dissipation capability | Good | Moderate |
| | Electromagnetic shielding | Good | Moderate |
| Mechanical properties | Tensile strength/MPa | 150~600 | 200~400 |
| | Specific strength/($\text{MPa} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$) | 100~200 | 80~150 |
| | Stiffness/GPa | 70~79 | 40~45 |
| | Ductility | Good | Poor(room temperature) |
| | Corrosion resistance | Excellent | Poor |
| | Fatigue strength | Excellent | Poor |
| Processing properties | Hot formability | Excellent | Moderate |
| | Weldability | Good, with susceptibility to cracking and porosity | Poor, with high susceptibility to cracking and porosity |
| Mineral resources (China) | Limited reserves, mainly dependent on imports | Large reserves, accounting for about 70% of the global total | |
| Cost | Low material and processing costs, highly competitive | High material and processing costs, primarily for high-end applications | |

通过提高铝合金的强度来减少铝合金用料是实现减重的路径之一,但对于如高铁车厢壳体、枕梁、牵引梁等大型型材部件,通过强化减薄固然可以减重,但带来的车厢重新设计及匹配问题、车厢的刚度及稳定性问题、

以及加工成型问题等,使得这一路径所面临的挑战非常困难。另一种减重的路径就是在保持现有形状和尺寸的前提下,通过降低铝合金的密度来实现减重,既保留了原有的设计及加工基础,又可以实现减重的目的,而且

通过低密度减重带来的成本增加几乎可以忽略，为高铁车厢减重提供了一条多快好省、事半功倍的捷径。基于上述背景，发展低密度高强可焊铝合金成为发展铝合金的新的机遇和挑战。

2 发展低密度高强可焊铝合金的对策

要找到降低铝合金密度的途径，首先需要回顾铝合金的发展历程。1886年，美国霍尔和法国埃鲁先后发明了电解法制铝的新工艺，即通过电解熔融于冰晶石中的氧化铝成功制备出了可以大规模应用的金属纯铝，开启了铝合金发展应用的时期。19世纪90年代~20世纪10年代，德国威尔姆在研究铝-铜合金时意外发现了铝合金的时效硬化现象，使铝合金的强度大幅提升，从而迎来了铝合金作为结构材料的时代，由此诞生了第一代铝合金杜拉铝(~95%Al、~4%Cu、~0.5%Mg、~0.5%Mn，质量分数，下同)，在飞艇框架上获得了应用^[15]。20世纪20年代~20世纪40年代，随着第一次世界大战和第二次世界大战中飞机的大量应用，铝合金迎来了第二个高速发展阶段，许多高强铝合金相继开发，如Al-Cu-Mg系(2系)和Al-Zn-Mg-Cu系(7系)铝合金，其强度水平进一步提升^[16, 17]。第二次世界大战之后，铝合金应用从军用迅速扩展到国民经济的各个方面，迎来了第三次大规模发展阶段。20世纪50年代~20世纪60年代，随着航天以及汽车工业的兴起，Al-Mn、Al-Mg防锈耐蚀铝合金(3系和5系)以及Al-Si系铸造铝合金(4系)相继体系化^[16]。20世纪70年代~20世纪90年代，受航空航天等高端需求的驱动，轻量化Al-Li合金受到了追捧。美国开发了Al-Cu-Li(8系)用于航天飞机外贮箱，欧洲推出Al-Li-Cu-Mg(8系)用于空客A330/A340结构件等。21世纪以来，

轻量化、高强、高韧、耐蚀及耐损伤成为了铝合金发展的主旋律，相继发展出了车用轻量化可锻的Al-Mg-Si铝合金(6系)，如美国的AA6016用于特斯拉车身实现减重40%，以及第三代铝锂合金，如美国的2099用于空客A350机身实现减重15%~20%，以及由我国北京有色金属研究总院熊柏青团队发展的第四代高强韧7000系铝合金，打破了国外封锁，成功应用于C919、运20以及C909机身等，展现出强劲的发展势头^[18-21]。

从上述铝合金的发展历程可以看出，追求强度以及强韧配合始终贯穿于其设计理念，并且轻量化已经成为发展铝合金的重要方向。然而，目前的轻量化方法是通过添加金属Li，以Al-Li合金的形式来实现的，但这种方法成本昂贵，大规模工业化应用几乎不可能。金属Li不仅熔炼成本高，即不论是采用熔盐电解法还是采用真空热还原法熔炼，所涉及的工艺流程技术密集、能耗高、生产条件苛刻，成本短期内难以降低，而且随着锂电池的迅猛发展，金属锂的需求旺盛，其供需市场日趋紧张，因此采用金属Li来实现铝合金的轻量化，除了高端需求外，基本没有市场。寻求新的轻量化路径已经迫在眉睫。

除金属Li能够显著降低铝合金密度外，其它合金元素对铝合金轻量化的作用同样值得关注。表2列出了目前各类铝合金中合金元素种类、含量、合金密度以及强化相密度等^[3, 22-38]。可以看出，5系铝合金由于大量使用镁合金化，其密度为2.65~2.68 g/cm³，显著低于其它铝合金，因此金属Mg是一种可以用来轻量化的合金元素。然而，5系铝合金中的Mg含量一般都要小于6%，否则就会出现粗大的沿晶网状 β 相(Al₃Mg₂)，使合金性能急剧下降。因此，突破镁含量限制并开发更高镁含量的铝合金具有重要的研究意义。

表2 根据合金元素不同以及是否可热处理的铝合金分类

Table 2 Classification of aluminum alloys based on different alloying elements and whether they can be heat treated

| Alloy system | Alloying elements | Density/(g/cm ³) | Tensile strength/MPa | Strengthening phase | | Performance characteristics, typical grades and application fields |
|--------------|--|------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|--|
| | | | | Type | Density/(g/cm ³) | |
| 1XXX | Al | 2.70 | 45~80 | None | — | Alloys such as 1050 and 1060 are commonly used in fields like electrical wires and cables, packaging materials, and architectural decoration |
| 2XXX | Al-Cu-Mg, Cu 3%~6%, Mg 0.5%~1.8% | 2.75~2.80 | 400~500 | Al ₂ Cu | 4.35 | Duralumin alloys (heat-treatable), such as 2024, commonly used for aircraft structural component |
| | | | | Al ₂ CuMg | 4.34 | |
| 3XXX | Al-Mn, Mn 1.0%~1.5% | 2.73 | 100~180 | Al ₆ Mn | 3.65 | Corrosion-resistant aluminum alloys (non-heat-treatable), such as 3003, commonly used for cookware and architectural decoration |
| 4XXX | Al-Si, Si 4%~22% | 2.72~2.80 | 150~230 | Si | 2.33 | Cast aluminum alloys (non-heat-treatable), such as ZL105, used for cylinder heads and hydraulic pump housings |

续表

| Alloy system | Alloying elements | Density/ (g/cm^3) | Tensile strength/ MPa | Strengthening phase | | Performance characteristics, typical grades and application fields |
|--------------|---|--|--------------------------|-------------------------------------|--|---|
| | | | | Type | Density/ (g/cm^3) | |
| 5XXX | Al-Mg-Mn, Mg 2.0%~5.5%, Mn 0.1%~1.0% | 2.65~2.68 | 190~440 | Al_3Mg_2 , | 2.17 | Corrosion-resistant aluminum alloys (non-heat-treatable), such as 5052, commonly used in ships and vehicles |
| | | | | $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ | 3.76 | |
| 6XXX | Al-Mg-Si, Mg 0.4%~1.2%, Si 0.4%~1.5% | 2.68~2.70 | 90~310 | Mg_2Si | 1.99 | Wrought aluminum alloys with high corrosion resistance (heat-treatable), such as 6061, used for automotive components and rail vehicles |
| 7XXX | Al-Zn-Mg-Cu, Zn 5%~8%, Mg 1%~3%, Cu 0~2.5% | 2.78~2.81 | 500~660 | MgZn_2 | 5.82 | Ultra-high-strength aluminum alloys (heat-treatable), such as 7075 and 7475, used for Airbus A350XWB and fighter aircraft fuselage structures |
| 8XXX | Al-Li, Li 1.5%~2.7% | 2.47~2.60 | 450~580 | Al_3Li | 2.30 | Low-density/high-modulus aluminum alloys, such as 2199, used in aerospace and related fields |

众所周知, Mg 在 Al 中有较大的固溶度, 450 °C 时 Mg 在 Al 中的溶解度为 17.4%, 且随温度的降低 Mg 的溶解度减小, 因此原理上高镁铝合金是可以通过析出第二相(β 相)来进行强化的, 但由于该第二相通常以粗大的沿晶网状形态析出, 使性能显著下降, 因此通常不采用第二相析出强化, 而是采用固溶强化, 通过快冷来抑制 β 相的析出以达到固溶强化的目的。当 Mg 含量过高时, 这种抑制作用有限, 因此 Mg 含量一般都要控制在 6% 以下。

经过大量的相图计算以及已有的试验验证^[39-43], 目前已经研发出了一种含 Zn 的低密度高强可焊铝合金, 通过 Zn 元素与 Mg 元素的相互作用形成 T 相 ($\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$) 的转变机制来抑制 β 相的析出。这种抑制, 不仅可以消除 β 相的析出, 还可以使 Mg 含量提升到 7%~10% 的水平, 密度更低, 同时抑制 β 相析出所带来的高的固溶强化, 以及形成细小 T 相所产生的弥散强化, 使合金的强度可以与现有的 7 系铝合金媲美。从 Al-Mg-Zn 三元相图(图 1a)可以看出, 当 Zn 含量为 3% 时, 随着 Mg 含量的增加, 合金中先析出 T 相, 后析出 β 相。由于

T 相单相比较大, 转变过程较为缓慢, 因此在一定 Zn 含量的前提条件下, 通过控制 T 相转变就可以达到抑制 β 相析出的目的。此外, 通过理想混合定则计算 Al-Mg-Zn 合金理论密度(图 1b)可以发现, 当 Zn 含量为 3% 时, 随着 Mg 含量的增加, 合金密度显著下降。密度泛函理论计算进一步显示^[44], Zn 原子与 Al 原子具有更高的结合能, 远大于 Mg 原子与 Al 原子间的结合能, 因此含 Zn 的 T 相将会优先团聚并析出, 而含镁 β 相的析出则会受制于 T 相的析出。因此通过调控 Zn 原子含量就可以做到在提高 Mg 含量的同时, 通过诱发细小的 T 相析出并抑制粗大的 β 相析出来提高低密度高强可焊铝合金的性能。此外, T 相的电极电位与 $\alpha(\text{Al})$ 基体的电极电位基本相同, 有助于抑制铝合金的电极腐蚀, 从而有利于提高低密度高强可焊铝合金的耐腐蚀性。

除了低密度高强以外, 焊接性能也是一个重要的方面。已有的研究表明^[45-48], 当 Mg 含量低于 6% 时, 焊接裂纹敏感性随 Mg 含量的升高而降低; 当 Mg 含量高于 6%, 其作用相反, 焊接裂纹敏感性随 Mg 含量的升高

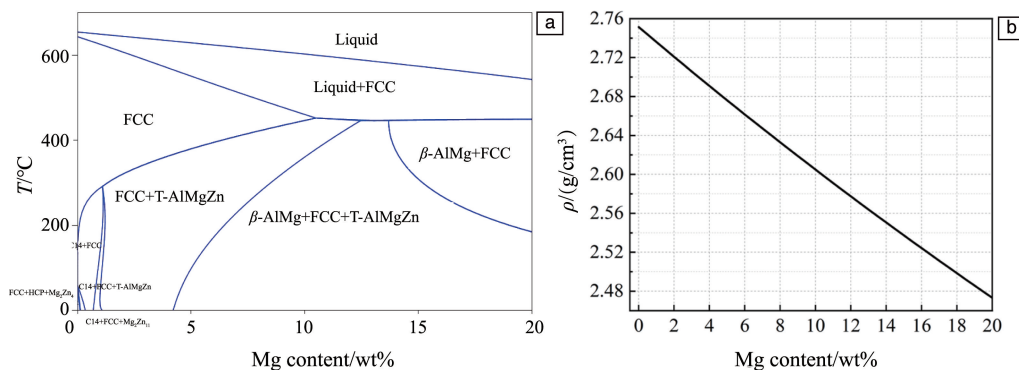


图 1 Al-xMg-3Zn 三元相图(a), Al-xMg-3Zn 合金理论密度(b)

Fig. 1 Al-xMg-3Zn ternary phase diagrams (a), theoretical densities of Al-xMg-3Zn alloys (b)

而升高。尽管通过形成 T 相抑制了 β 相的析出，但合金中仍然含有大量的 Mg 原子(以过饱和固溶、T 相以及含 Mg 金属间化合物相存在)，这些 Mg 原子在焊接时容易挥发，导致焊缝的热裂纹倾向、气孔敏感性以及焊接接头软化等问题加重。为此，采用新式的搅拌摩擦焊工艺^[49]替代传统的钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)及熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)，将会使这一问题迎刃而解，不但使焊接接头质量更高，热裂纹倾向及气孔敏感性显著降低，焊缝强度显著回升，可以达到母材强度的 70% 以上；而且搅拌摩擦焊工艺简单，成本也低，适合大规模生产应用。

3 现有的相关工作

3.1 微观组织

在没有添加 Zn 元素的情况下，随着 Mg 含量的增

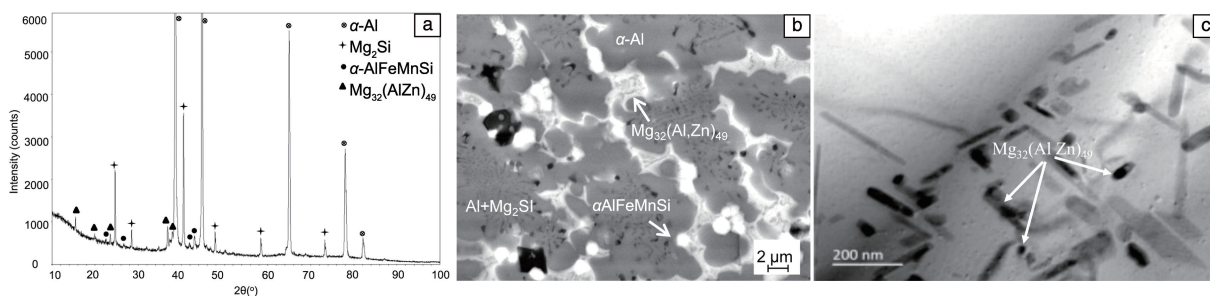


图 2 Al-10Mg-3.5Zn-2.7Si 合金微观组织^[52]：(a) XRD 图谱，(b) 背散扫描电镜照片，(c) $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 的 TEM 照片

Fig. 2 Microstructure of Al-10Mg-3.5Zn-2.7Si alloy^[52]：(a) XRD pattern, (b) backscattered scanning electron microscopy image, (c) $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ TEM image

除此以外，张天有等^[55]通过研究 Al-5Mg-3Zn 合金，发现存在纳米级 T- $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相，T 相的平均粒子尺寸为 5.69~5.86 nm，可以起到很好的弥散强化作用。根据以上研究成果，证明在低密度高强可焊铝合金中加入 Zn 元素，不仅可以阻止粗大 $\beta-(Al_3Mg_2)$ 析出，而且在实现轻量化方面有实质性的新的突破。

3.2 抗拉强度

已有的研究工作表明，在铝合金中添加高 Mg 含量

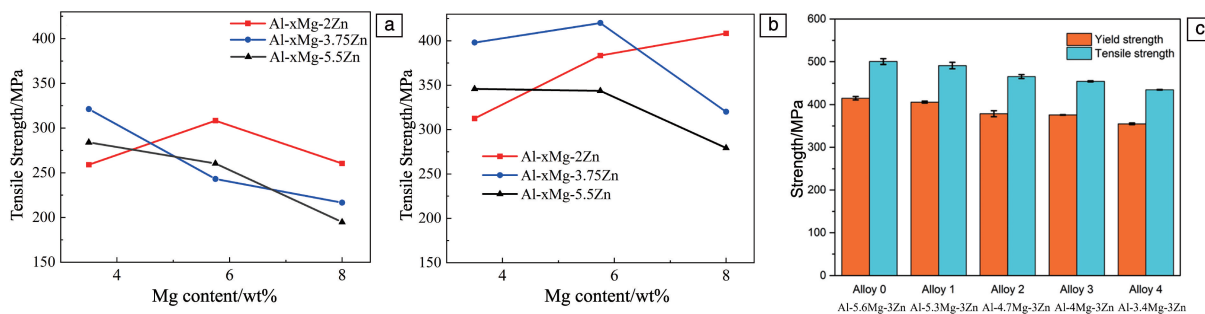


图 3 强度变化规律图：(a) 铸态 Al-xMg-yZn，(b) T4 态 Al-xMg-yZn^[54]；(c) T6 态 Al-xMg-3Zn^[58]

Fig. 3 Strength variation diagram: (a) cast state Al-xMg-yZn，(b) T4 state Al-xMg-yZn^[54]；(c) T6 state Al-xMg-3Zn^[58]

加，铝合金中会出现粗大的网状 β 相，如毛轶哲等^[50]和 Zhou 等^[51]分别在 Al-10Mg 及 Al-11Mg 合金中观察到晶界粗大 $\beta-(Al_3Mg_2)$ 析出相。然而，通过添加合金元素 Zn，可以有效地抑制 β 相的析出，如 Yan 等^[52]在 Al-10Mg 合金中加入 3.5% Zn 和 2.7% Si，发现无 $\beta-(Al_3Mg_2)$ 存在，取而代之的是 T- $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 、 Mg_2Si 及 $\alpha-AlFeMnSi$ 金属间化合物相，如图 2 所示。李波等^[53]针对 Al-6Mg-2.5Zn-0.3Sc-0.1Zr 合金研究发现，除基体 Al 相外仅存在强化 T- $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相与 $Al_3(Sc, Zr)$ 金属间化合物相，没有发现 β 相的存在。朱兆军^[54]研究了 Mg 含量对 Al-5.5Mg-3.75Zn 和 Al-8.0Mg-3.75Zn 合金显微组织的影响，发现在 Zn 含量一定的情况下，随着 Mg 含量的增加，T 相析出量不断增加，晶界上 T 相由分散到连续分布，无 Al_3Mg_2 相存在。

的合金元素后，其抗拉性能可以大幅上升。Yu 等^[56]在制备出的 Al-6.2Mg-1.95Zn 合金粉末中加入适量微合金化元素 Si, Sc, Zr，以及优化激光熔融参数获得了最高达 600 MPa 的抗拉强度。Xiong 等^[57]制备的 Al-8.7Mg-3Zn 合金的抗拉强度可达 625 MPa。朱兆军^[54]和 Ding 等^[58]分别研究了 Mg 含量对铸态 Al-xMg-yZn(图 3a)、T4 态(欠时效) Al-xMg-yZn(图 3b)和 T6 态(峰时效) Al-xMg-3Zn(图 3c)合金的力学性能的影响，如图 3 所示。在铸态

情况下,随着 Mg 含量的升高,合金强度有下降趋势;经热处理后,T4 态情况下,当 Zn 含量为 2%时,合金强度随 Mg 含量的升高而升高;T6 态情况下,当 Zn 含量为 3%时,合金强度随 Mg 含量升高而升高。图 4 汇总了部分的 Al-xMg-yZn 合金的密度及抗拉强度性能^[45, 48, 59-64],可以看到通过 Zn 等元素合金化,铝合金在保持低密度优点的同时,强度随 Mg 含量的升高而升高,有望未来实现轻量化与高强度的双重需求。

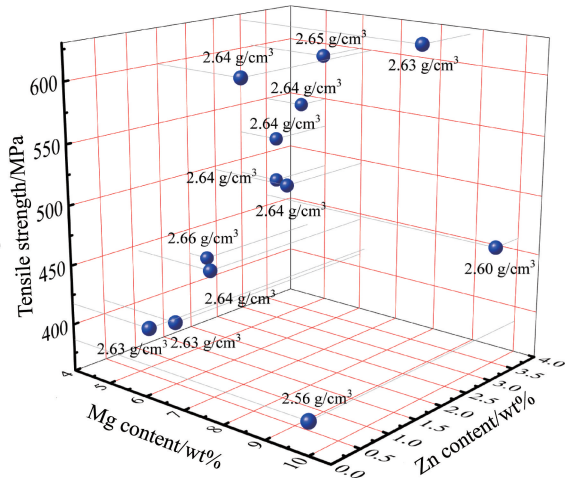


图 4 不同 Mg, Zn 含量下铝合金密度及抗拉强度变化^[45, 48, 59-64]
Fig. 4 Changes in density and tensile strength of aluminum alloys with different Mg and Zn contents^[45, 48, 59-64]

3.3 腐蚀性能

传统 Al-Mg 合金随着 Mg 含量的升高 (>3.5%) 会在晶界析出 β 相,而晶界形成的 β 相电极电位 (-1.05 V) 比 Al 基体 (-0.812 V) 低^[65],通常容易成为阳极被腐蚀,所以传统 Al-Mg 合金随着 Mg 含量的升高其腐蚀敏感性会增加。为了解决 β 相对高镁 Al-Mg 合金造成的易腐蚀问题,Carroll 等^[66]向 Al-5.4Mg 合金中添加 0.7% Zn,发现加入 Zn 后其耐腐蚀性高于未加 Zn 合金,并证明了形成的 T 相展现出更好的耐腐蚀性。Wang 等^[63]通过激光熔覆法制备出的 Al-20Mg-9Zn-Cu 合金层腐蚀电位很高,达到 -0.73 V,展现了很好的耐腐蚀性。Xiong 等^[67]开发了 Al-8.7Mg-3Zn 合金,其剥落腐蚀评级为 EA,展现了较好的抗剥落腐蚀性能。作者课题组针对 Al-10Mg-3Zn 合金进行晶间腐蚀和剥落腐蚀试验,发现抗晶间腐蚀性显著提高,剥落腐蚀评级为 EA,证明了在加入 Zn 元素后,低密度高强可焊铝合金的抗晶间腐蚀和抗剥落腐蚀性能并无显著下降(图 5)。

3.4 焊接性能

铝合金传统的焊接技术有 TIG 焊和 MIG 焊,但针对新型的低密度高强可焊铝合金均有一定的缺点,如 TIG 焊

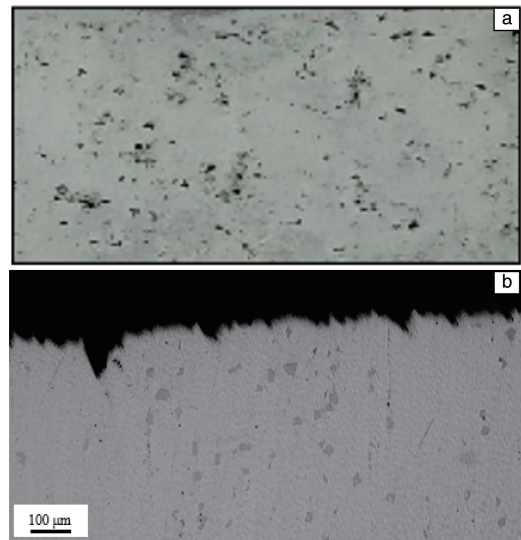


图 5 Al-10Mg-3Zn 腐蚀后形貌:(a)剥落腐蚀,(b)晶间腐蚀
Fig. 5 Morphology of Al-10Mg-3Zn after corrosion: (a) exfoliation corrosion, (b) intergranular corrosion

效率低、在低密度高强可焊铝合金中易产生裂纹^[46, 68];MIG 焊虽效率高,但易产生气孔、变形等,损害焊接接头强度^[69, 70]。目前新兴的搅拌摩擦焊,作为一种新型固相连接工艺,拥有效率高、缺陷少以及可调控界面金属间化合物等优点^[71-73],在低熔点材料连接方面展现出巨大的应用前景。作者课题组对 Al-10Mg-3Zn 合金进行钨极氩弧焊、激光电弧焊和搅拌摩擦焊对比,焊后形貌如图 6 所示,发现搅拌摩擦焊的焊后表面质量更好,且焊接强度未明显降低,强度系数在 80%以上。

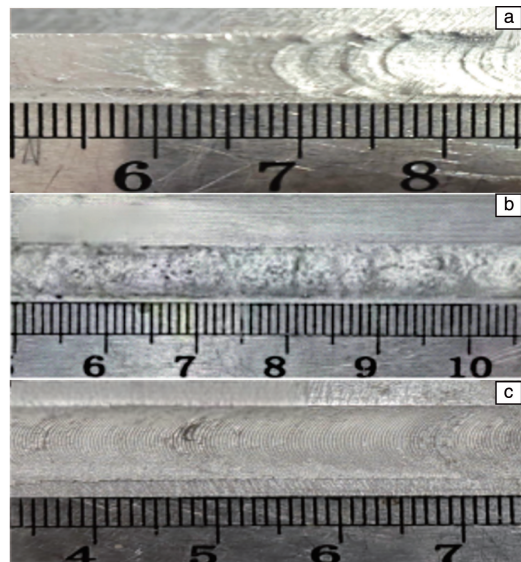


图 6 Al-10Mg-3Zn 焊后形貌:(a)钨极氩弧焊,(b)激光电弧焊,(c)搅拌摩擦焊
Fig. 6 Weld joint appearance of Al-10Mg-3Zn: (a) tungsten inert gas arc welding, (b) laser arc welding, (c) friction stir welding

4 结 语

通过添加轻质的 Mg 合金化元素, 可使铝合金的密度达到 2.56 g/cm^3 的水平, 比普通铝合金及高强铝合金密度降低 5%~10%, 同时, 利用 Mg 的固溶强化以及形成的 T 相的沉淀硬化等机制, 使低密度高强可焊铝合金的强度接近 7 系铝合金的水平, 完美地实现了轻量化和高强度两大优势兼具的目标, 加之搅拌摩擦焊可以很好地解决低密度高强可焊铝合金的焊接问题, 使其有望在如高铁等交通运输工具上获得应用。

然而, 添加较多 Mg 元素的低密度高强可焊铝合金还存在一些不足, 其应力腐蚀开裂敏感性较高, 还有待进一步改善。一般来讲, 当 Mg 含量大于 5% 时, 由于晶界连续分布着粗大的网状 β 相, 合金将会出现应力腐蚀开裂现象^[74]。应力腐蚀开裂更容易在这些有第二相析出的铝合金表面发生, 通过第二相的阳极溶解或第二相诱导的氢致开裂增加了合金的应力腐蚀敏感性。尽管低密度高强可焊铝合金通过固溶强化、析出 T 相以及形成细小弥散分布的含镁第二相, 消除了晶界连续分布的粗大的网状 β 相, 但由于析出的第二相密度较高, 因此仍然存在一定的应力腐蚀开裂倾向。为了解决这一问题, 可以采用稳定化退火处理, 使晶界上连续分布的 β 相重新溶解或球化, 阻止其在晶界非连续化析出, 或采用过时效处理 (T7X 处理) 替代通常的峰值时效处理 (T6 处理), 牺牲少量强度来换取抗应力腐蚀开裂性能的提升, 以及采用包铝的方法, 在不影响性能的情况下, 通过外包一层薄铝, 阻止铝合金第二相与腐蚀介质的接触从而降低其应力腐蚀开裂倾向。

近年来, 通过异构组织调控来缓解合金的强度-塑性倒置关系已取得显著进展, 该理念同样为降低低密度高强可焊铝合金的应力腐蚀开裂敏感性提供了新的思路。比如, 采用等离子体电解氧化或微弧氧化, 在铝合金表面形成一层不含第二相的界面层, 由于不含第二相, 其应力腐蚀开裂敏感性将会大幅降低。同时, 由于用这种方法形成的界面层与基体母材有较好的界面结合强度, 不易脱落, 从而使其具有较长的使用寿命。相比于表面包覆纯铝的方法, 这种方法不仅可以大大简化成型工艺, 而且材料的整体性不会受到影响, 更利于工程应用。除此以外, 通过表面摩擦变形实现表面显微组织的纳米化, 有效阻止应力腐蚀的裂纹扩展路径, 也有望抑制裂纹的萌生和扩展, 从而达到降低应力腐蚀开裂敏感性的目的。

总之, 通过多尺度组织协同调控 (析出相调控、晶界组织调控及表面处理调控), 可有效降低由第二相引起的阳极溶解及氢致开裂倾向, 从而降低应力腐蚀开裂敏感性, 并促进低密度高强可焊铝合金的发展。

参考文献 References

- [1] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 有色金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
HUANG B Y, LI C G, SHI L K, *et al.* The Manual Book of Nonferrous Metal Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [2] 邓运来, 张新明. 中国有色金属学报[J], 2019, 29(9): 2115-2141.
DENG Y L, ZHANG X M. The Chinese Journal of Nonferrous Metals [J], 2019, 29(9): 2115-2141.
- [3] PARVIZI P, JALILIAN M, MIRAZIZI P S, *et al.* Next Materials[J], 2025, 9: 1-41.
- [4] YAVUZYEGIT B, KARALI K, AVCU E, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2025, 507: 2-9.
- [5] CHRISTY J V, ARUNACHALAM R, MOURAD A H I, *et al.* Journal of Manufacturing Processes[J], 2020, 59: 287-301.
- [6] LUNN K F, APELIAN D. Materials Science and Engineering: A[J], 2025, 924: 1-15.
- [7] PENG X, LIU W, WU G. Rare Metals[J], 2022, 41(4): 1176-1188.
- [8] LEI B, DONG Z, YANG Y, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2022, 843: 2-8.
- [9] LI S, YANG X, HOU J, *et al.* Journal of Magnesium and Alloys[J], 2020, 8(1): 78-90.
- [10] 郭旭, 卢贤文, 张钰雯茜, 等. 材料热处理学报[J], 2023, 44(1): 77-86.
GUO X, LU X W, ZHANG Y W X, *et al.* Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2023, 44(1): 77-86.
- [11] 付辉, 孙勇, 邹国栋, 等. 金属学报[J], 2025, 61(3): 475-487.
FU H, SUN Y, ZOU G D, *et al.* Acta Metallurgica Sinica[J], 2025, 61(3): 475-487.
- [12] 卢振生. 热加工工艺[J], 2021, 50(1): 104-106+111.
LU Z S. Hot Working Technology[J], 2021, 50(1): 104-106+111.
- [13] 中国国家铁路集团有限公司. 全球最快高铁列车亮相[EB/OL]. (2025-07-01)[2026-03-13]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/rdzt/gtdh/202507/t20250701_146500.html.
China Railway. The World's Fastest High-Speed Train Unveiled[EB/OL]. (2025-07-01)[2026-03-13]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/rdzt/gtdh/202507/t20250701_146500.html.
- [14] International Union of Railways. Aluminium Car Body [EB/OL]. (2002-10-09)[2025-07-02]. https://www.railway-energy.org/static/Aluminium_car_body_6.php.
- [15] ASHKENAZI D. Technological Forecasting and Social Change [J], 2019, 143: 101-113.
- [16] STARKE JR E A, STALEY J T. Progress in Aerospace Sciences [J], 1996, 32(1-3): 131-172.
- [17] YOSHIDA H. Materials Transactions [J], 2023, 64(2): 341-351.
- [18] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 中国工程科学 [J], 2020, 22(5):

- 68-75.
GUAN R G, LOU H F, HUANG H, *et al.* Strategic Study of CAE [J], 2020, 22(5): 68-75.
- [19] 中国金属废料. 国际铝协: 世界铝工业发展历史上最重要的 50 个里程碑时刻[EB/OL]. (2023-01-12)[2025-07-10]. https://www.chinascrap.com/topic/topic_view? key=173746
SCRAP. International Aluminium Institute: The 50 Most Important Milestone Moments in the History of the Global Aluminium Industry [EB/OL]. (2023-01-12)[2025-07-10]. https://www.chinascrap.com/topic/topic_view? key=173746.
- [20] 熊柏青, 闫宏伟, 张永安, 等. 中国工程科学[J], 2023, 25(1): 88-95.
XIONG B Q, YAN H W, ZHANG Y A, *et al.* Strategic Study of CAE [J], 2023, 25(1): 88-95.
- [21] 王怀国, 熊柏青, 周科朝, 等. 新材料产业[J], 2019(7): 36-39.
WANG H G, XIONG B Q, ZHOU K C, *et al.* Advanced Materials Industry[J], 2019(7): 36-39.
- [22] STEMPER L, TUNES M A, TOSONE R, *et al.* Progress in Materials Science[J], 2022, 124(100873): 1-12.
- [23] 李骁. 铸轧 3003 铝合金热加工性能及组织演变研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
LI X. Study on Hot Workability and Microstructure Evolution of Cast-Rolling 3003 Aluminum Alloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [24] 魏自豪. 稀土元素 La 和 Y 对 3003 铝合金微观组织及性能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
WEI Z H. Effect of Rare Earth Elements La and Y on Microstructure and Properties of 3003 Aluminum Alloy [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [25] 闫春宝, 刘云祺, 张云龙, 等. 轻合金加工技术[J], 2025, 53(3): 42-46.
YAN C B, LIU Y Q, ZHANG Y L, *et al.* Light Alloy Fabrication Technology[J], 2025, 53(3): 42-46.
- [26] 郭成, 李宝绵, 张海涛, 等. 稀有金属[J], 2018, 42(8): 878-884.
GUO C, LI B M, ZHANG H T, *et al.* Chinese Journal of Rare Metals [J], 2018, 42(8): 878-884.
- [27] 王祝堂, 余东梅. 轻合金加工技术[J], 2020, 48(9): 1-5.
WANG Z T, YU D M. Light Alloy Fabrication Technology[J], 2020, 48(9): 1-5.
- [28] 沈顾伟, 陈小林, 闫捷, 等. 中国有色金属学报[J], 2023, 33(12): 4002-4012.
SHEN G W, CHEN X L, YAN J, *et al.* The Chinese Journal of Non-ferrous Metals[J], 2023, 33(12): 4002-4012.
- [29] 张王军, 李云, 吴玉娜, 等. 现代交通与冶金材料[J], 2023, 3(3): 52-60+84.
ZHANG W J, LI Y, WU Y N, *et al.* Modern Transportation and Metallurgical Materials[J], 2023, 3(3): 52-60+84.
- [30] EL-ATY A A, XU Y, GUO X, *et al.* Journal of Advanced Research [J], 2018, 10: 49-67.
- [31] 熊慧, 王祝堂. 轻合金加工技术[J], 2021, 49(6): 1-17.
XIONG H, WANG Z T. Light Alloy Fabrication Technology [J], 2021, 49(6): 1-17.
- [32] 杨富强, 熊慧, 任柏峰, 等. 世界有色金属[J], 2018(22): 1-5.
YANG F Q, XIONG H, REN B F, *et al.* World Nonferrous Metals [J], 2018(22): 1-5.
- [33] ZHANG J, WEI W, GAO J, *et al.* Advanced Engineering Materials [J], 2025, 27(7): e2402365.
- [34] 张旭, 闫丽珍, 李志辉, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2025, 54(10): 2583-2590.
ZHANG X, YAN L Z, LI Z H, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2025, 54(10): 2583-2590.
- [35] 王亚丽, 曹玲飞, 温庆红, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2026, 55(2): 501-509.
WANG Y L, CAO L F, WEN Q H, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2026, 55(2): 501-509.
- [36] 罗际韬, 孙志超, 赵志龙. 中国材料进展[J], 2025, 44(12): 1153-1161.
LUO J T, SUN Z C, ZHAO Z L. Materials China[J], 2025, 44(12): 1153-1161.
- [37] 张兵, 叶俊峰, 胡玉军, 等. 中国材料进展[J], 2025, 44(9): 802-813.
ZHANG B, YE J F, HU Y J, *et al.* Materials China[J], 2025, 44(9): 802-813.
- [38] 赵佳航, 王建国, 刘东, 等. 中国材料进展[J], 2026, 45(1): 30-36.
ZHAO J H, WANG J G, LIU D, *et al.* Materials China[J], 2026, 45(1): 30-36.
- [39] HOU S, LIU P, ZHANG D, *et al.* Journal of Materials Science[J], 2017, 53(5): 3846-3861.
- [40] STEMPER L, TUNES M A, DUMITRASCHKEWITZ P, *et al.* Acta Materialia[J], 2021, 206: 2-9.
- [41] 张兆锐. 基于 ICME 的 Al-Mg-Zn-Cu 合金设计、析出行为及强度/塑性匹配机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
ZHANG Z R. Study on Compositional Design, Precipitation Behavior and Strength-Ductility Mechanism in Al-Mg-Zn-Cu Alloy via ICME Model [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [42] ZHANG Z, LI Y, LI H, *et al.* Calphad[J], 2021, 74: 2-13.
- [43] ZHANG Z, LI Y, LIU Y, *et al.* Materials Letters [J], 2023, 347: 2-3.
- [44] XUE B, XIAO W, LI X, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2024, 173: 237-246.
- [45] 黎伟龙. 塑性加工及热处理对 Al-Mg-Zn 合金组织和力学性能的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2024.
LI W L. Influence of Plastic Forming Method and Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Zn Alloys [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.

- [46] PAN Y, ZHANG D, LIU H, *et al.* Science and Technology of Welding and Joining[J], 2020, 25(6): 483-489.
- [47] 金聪聪. 新型 Al-Mg 铝合金 MIG 焊接头微观组织及性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
JIN C C. Microstructure and Properties of New Al-Mg Alloy MIG Welded Joint[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [48] 潘艳林. 新型高强韧可焊耐蚀 Al-Mg-Zn-Cu 合金成分设计及组织性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
PAN Y L. Study on Compositional Design, Microstructure and Properties of High Strength-Toughness Al-Mg-Zn-Cu Aluminum Alloy with Good Weldability and Corrosion Resistance[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [49] 林志成, 赵运强, 闫德俊, 等. 焊接学报[J], 2022, 43(10): 24-30.
LIN Z C, ZHAO Y Q, YAN D J, *et al.* Transactions of the China Welding Institution[J], 2022, 43(10): 24-30.
- [50] 毛轶哲, 李建国, 封蕾. 金属学报[J], 2018, 54(10): 1451-1460.
MAO Y Z, LI J G, FENG L. Acta Metallurgica Sinica[J], 2018, 54(10): 1451-1460.
- [51] ZHOU D, ZHANG X, TEHRANCHI A, *et al.* Composites Part B: Engineering[J], 2022, 245: 110211.
- [52] YAN F, YANG W, JI S, *et al.* Materials Chemistry and Physics[J], 2015, 167: 88-96.
- [53] 李波, 许龙, 杨涵, 等. 材料导报[J], 2025, 39(16): 223-228.
LI B, XU L, YANG H, *et al.* Materials Reports[J], 2025, 39(16): 223-228.
- [54] 朱兆军. 合金元素对 Al-Mg-Zn 合金组织和性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
ZHU Z J. The Effect of Alloying Elements on the Microstructure and Properties of Al-Mg-Zn Alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999.
- [55] 张天有, 闫丽珍, 李锡武, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2024, 53(11): 3185-3193.
ZHANG T Y, YAN L Z, LI X W, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2024, 53(11): 3185-3193.
- [56] YU C, WANG Y, YUAN X, *et al.* Progress in Natural Science: Materials International[J], 2025, 35(2): 420-432.
- [57] XIONG B Q, WEN K, LI X, *et al.* Materials & Design[J], 2024, 246: 113349.
- [58] DING Q W, ZHANG D, PAN Y, *et al.* Materials Science and Technology[J], 2019, 35(9): 1071-1080.
- [59] 陈易飞. 非等温时效工艺对 Al-Mg-Zn-Ag 合金组织与性能的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
CHEN Y F. Effect of Non-Isothermal Aging Process on Microstructure and Properties of Al-Mg-Zn-Ag Alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [60] 丁清伟. 时效强化型 Al-Mg-Zn 合金组织性能研究及工艺优化[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
DING Q W. Microstructure and Properties of Age-Hardenable Al-Mg-Zn Aluminum Alloy and the Process Optimization[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [61] MA Q, ZHANG D, ZHUANG L, *et al.* Materials Characterization[J], 2018, 144: 264-273.
- [62] STEMPER L, TUNES M A, OBERHAUSER P, *et al.* Acta Materialia[J], 2020, 195: 541-554.
- [63] WANG Y, CHEN S, ZHANG Y, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2024, 896: 146256.
- [64] LIU Z, SUN J, YAN Z, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2021, 806: 3-6.
- [65] 刘成. 5A01 高镁铝合金腐蚀性能、屈服行为与热变形行为的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
LIU C. Study on the Corrosion Performance, Yield Behavior, and Hot Deformation Behavior of 5A01 High Magnesium Aluminum Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [66] CARROLL M C, GOUMA P I, MILLS M J, *et al.* Scripta Materialia[J], 2000, 42(4): 335-340.
- [67] XIONG B Q, WEN K, LI X, *et al.* Materials & Design[J], 2024, 246: 3-15.
- [68] VERMA V, SINGH A, PANDEY A K, *et al.* Indian Journal of Engineering and Materials Sciences[J], 2022, 29(2): 262-270.
- [69] CEVIK B, KOC M. Metallic Materials[J], 2021, 57(5): 307-316.
- [70] 田春雨, 邓鑫, 金鑫, 等. 轨道交通材料[J], 2025, 4(3): 46-51.
TIAN C Y, DENG X, JIN X, *et al.* Materials for Rail Transportation System[J], 2025, 4(3): 46-51.
- [71] 刘金浩, 李家辰, 张亮亮, 等. 机械制造文摘(焊接分册)[J], 2025(2): 13-22+36.
LIU J H, LI J C, ZHANG L L, *et al.* Welding Digest of Machinery Manufacturing[J], 2025(2): 13-22+36.
- [72] 郭克星, 高杰. 有色金属加工[J], 2024, 53(4): 1-8.
GUO K X, GAO J. Nonferrous Metals Processing[J], 2024, 53(4): 1-8.
- [73] 王雨晴, 杨新岐, 许乃强, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2026, 55(1): 153-163.
WANG Y Q, YANG X Q, XU N Q, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2026, 55(1): 153-163.
- [74] YANG Y, WU Y, JIN S, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2025, 1037: 182430.