

铝镁合金复合铸造技术及其界面结合机制研究

李厚田

华誉精密科技（含山）有限公司 安徽马鞍山

【摘要】 铝镁合金因轻质高强特性在航空航天、汽车制造等领域广泛应用。复合铸造技术是提升其性能的关键手段，能赋予合金独特组织与优异综合性能。文章系统阐述铝镁合金复合铸造技术，深入剖析界面结合机制，详细探讨影响因素，并提出优化方法，旨在为该技术发展提升提供坚实理论依据，助力拓展铝镁合金应用边界。

【关键词】 铝镁合金；复合铸造；界面结合；影响因素；性能优化

【收稿日期】 2025 年 2 月 24 日 **【出刊日期】** 2025 年 3 月 28 日 **【DOI】** 10.12208/j.jer.20250134

Study on aluminum magnesium alloy composite casting technology and its interface bonding mechanism

Houtian Li

Huayu Precision Technology (Hanshan) Co., Ltd, Ma'anshan, Anhui

【Abstract】 Aluminum-magnesium alloys are widely used in aerospace and automotive manufacturing due to their lightweight and high-strength characteristics. Composite casting technology is a key method for enhancing their performance, endowing the alloy with unique microstructures and excellent overall properties. This article systematically discusses composite casting techniques for aluminum-magnesium alloys, delves into the mechanisms of interfacial bonding, and thoroughly examines influencing factors, proposing optimization methods. The aim is to provide a solid theoretical foundation for the development of this technology and the improvement of alloy performance, thereby helping to expand the application boundaries of aluminum-magnesium alloys.

【Keywords】 Aluminum magnesium alloy; Composite casting; Interface bonding; Influencing factors; Performance optimization

引言

在现代工业快速发展的背景下，航空航天、汽车等行业对轻量化高性能材料的需求愈发迫切，铝镁合金凭借密度低、比强度高的优势成为关键材料。复合铸造技术可将不同材料优势融合，显著改善铝镁合金性能。界面结合质量是制约其性能提升的关键瓶颈。深入研究铝镁合金复合铸造技术及其界面结合机制，探索有效解决策略，对满足行业发展需求、推动材料科学进步具有重要意义。

1 复合铸造技术

铝镁合金复合铸造技术作为材料制备领域的重要手段，在推动合金性能提升方面发挥着极为关键的作用。在熔铸复合工艺里，当在铝镁合金熔炼过程添加增强相时，对于添加时机与搅拌速度的把控堪称严苛^[1]。若添加过早，增强相犹如不受控制的集群，极易出现团聚现象，如同散沙聚集，难以在后续流程中发挥理想效

能；添加过晚，则增强相仿佛在合金液中迷失方向，难以均匀分散，无法充分融入基体，导致最终材料性能大打折扣。合适的搅拌速度恰似精准的指挥棒，能有条不紊地促使增强相均匀分布在合金液中，为后续浇注成型筑牢坚实基础。经由该工艺精心制备的复合材料，在结构件制造领域大放异彩，展现出卓越的强度与韧性，为构建稳固、可靠的结构体系提供了坚实保障。

压铸复合技术则凭借高压这一强大力量，宛如强力推进器，将金属液与增强相迅猛压入模具型腔，极大地缩短了成型时间，显著提升了生产效率。在压铸进程中，模具温度、压射速度等参数宛如精密仪器的旋钮，对成型质量有着举足轻重的影响^[2]。精确控制模具温度，恰似调控精密仪器的关键参数，可有效避免金属液过早凝固，确保增强相能够充分嵌入基体，实现二者的紧密融合；合理调整压射速度，犹如精准驾驶高速汽车，能有效减少气孔等缺陷产生，提升材料的内部质量。压

铸复合制备的铝镁合金复合材料, 凭借其出色的尺寸精度和力学性能, 成为制造汽车发动机缸体等对性能要求极高零部件的不二之选。

除熔铸复合与压铸复合外, 科技的浪潮不断催生新兴复合铸造技术。如半固态复合铸造, 该技术巧妙利用合金在半固态下呈现出的特殊流变性能, 使增强相如同在特殊通道中顺畅滑行, 更容易与基体均匀混合。制备出的复合材料组织更加细小均匀, 性能也得以进一步提升, 宛如精心雕琢的艺术品, 展现出更高的品质。这些各具特色的复合铸造技术相互补充, 犹如一个庞大的工具箱, 为制备满足不同需求的铝镁合金复合材料提供了丰富多样的选择。

2 界面结合机制

原子扩散堪称铝镁合金复合铸造界面结合的基础且关键的过程。在高温铸造这一仿若熔炉的环境下, 基体与增强相表面的原子宛如获得了神奇的能量加持, 开始进行不规则运动, 如同灵动的舞者在舞台上自由穿梭, 逐渐向对方区域扩散^[3]。这种扩散现象并非一成不变, 而是会随着时间的推移和温度的起伏而不断改变, 最终形成具有一定厚度的过渡层。过渡层的存在意义重大, 它如同一个缓冲地带, 有效降低了界面处的应力集中, 增强了基体与增强相之间的结合力, 使得复合材料在受力时能够像一个协调统一的整体, 更均匀地传递载荷, 抵御外界的各种挑战。

机械咬合作用在界面结合中同样扮演着不可或缺的重要角色。增强相表面通常在微观层面存在着凹凸不平的状况, 恰似崎岖的山路。在复合铸造过程中, 基体金属液如同奔腾的水流, 填充这些凹凸结构, 冷却凝固后便形成了稳固的机械锁合^[4]。这种机械咬合结构仿佛无数微小却坚韧的“钩子”, 紧紧地阻碍着增强相与基体之间的相对滑动, 从而显著提高了复合材料的整体性能。增强相的形状和表面粗糙度对机械咬合效果影响深远, 合理设计增强相的形态, 就如同精心设计一把钥匙, 能够精准地契合锁孔, 极大地增强机械咬合作用。

化学反应在强化界面结合方面发挥着举足轻重的作用。在高温且复杂的铸造环境这一特殊的化学反应“舞台”上, 基体与增强相之间具备发生化学反应的条件, 它们相互作用, 生成新的化合物相。这些新生的化合物相, 微观层面上, 犹如一个个紧密锚定在基体与增强相之间的坚固桥梁, 从结构上为二者提供了稳固的连接, 进而显著提升了界面结合强度。但化学反应如同握在手中的双刃剑, 利弊兼具, 必须予以谨慎把控。

在实际操作中, 需通过对多种因素的调节, 将其严格控制在合理范围内。一旦反应过度, 就如同熊熊燃烧的火势失去控制, 极有可能产生脆性相。

3 影响因素剖析

增强相的特性犹如一把双刃剑, 对铝镁合金复合铸造界面结合有着极为深远的影响。不同种类的增强相, 如陶瓷颗粒、碳纤维等, 与铝镁合金基体的物理化学性质差异较大, 恰似不同性格的人相处, 会导致界面结合情况各不相同。增强相的尺寸也至关重要, 尺寸过小如同微小的尘埃, 容易团聚在一起, 难以发挥其应有的作用; 过大则会像巨石在柔软的土地中, 增加界面处的应力集中, 影响材料整体性能^[5]。其形状和分布同样影响显著, 球形增强相在基体中分布更均匀, 如同均匀散布在土壤中的养分, 有利于提高界面结合质量; 而分布不均的增强相则像杂乱无章的石块, 易造成局部性能薄弱。在实际应用中, 需综合考量增强相各方面特性, 如同挑选合适的拼图碎片, 选择最适配的增强相。

铸造工艺参数堪称影响界面结合的另一关键因素。铸造温度直接影响原子扩散速率和金属液流动性, 宛如温度影响化学反应速率一般^[6]。温度过高, 可能导致基体合金元素烧损, 如同高温下金属被过度熔炼而失去部分关键成分; 温度过低, 则原子扩散不充分, 界面结合强度不足, 材料性能难以达到理想状态。压力大小影响金属液与增强相的接触紧密程度, 合适的压力有助于增强机械咬合作用和促进化学反应, 如同适当的外力能使两个物体结合得更紧密。冷却速度决定了合金的凝固组织, 快速冷却可细化晶粒, 如同急速冷却的水流能形成更细小的冰晶, 但可能导致界面处产生较大热应力, 因此需合理调控冷却速度, 以平衡各方面影响, 达到最佳的材料性能。

基体合金成分及纯净度在铝镁合金复合铸造技术中同样占据关键地位, 不可忽视。不同成分的铝镁合金, 其与增强相的相容性存在显著差异, 这就如同在烹饪中, 不同的食材搭配会产生截然不同的味道与口感。具体来说, 某些合金元素, 如钛(Ti)、锆(Zr)等, 能够显著促进界面反应, 恰似高效的催化剂加速化学反应进程, 有助于增强相在基体中更好地分散并形成稳固的结合; 而像铅(Pb)、铋(Bi)等合金元素, 则可能对界面反应起到抑制作用, 如同给化学反应踩下刹车。此外, 合金中的杂质, 如铁(Fe)、硅(Si)等, 在铸造过程中会在界面处偏聚, 就如同在一幅完美的画布上留下难以去除的污渍, 进而形成诸如孔洞、裂纹等缺陷, 严重降低界面结合质量。通过科学合理地优化

基体合金成分设计,例如精确调配各合金元素的比例,同时采用先进的精炼工艺严格控制杂质含量,能够有效改善基体与增强相的界面结合状态,最终提升复合材料整体性能,打造出性能更为卓越、质量更优的材料产品。

4 优化与应用

针对增强相相关影响因素,优化措施可从多个维度全面展开。筛选增强相时,除考虑其与基体的物理化学相容性外,还可对增强相进行表面改性处理。通过表面涂层技术,在增强相表面涂覆一层与基体亲和性更好的材料,这层材料如同友好的纽带,降低了界面能,提高了分散性^[7]。优化增强相的预处理工艺,如对碳纤维进行氧化处理,可增加表面活性基团,如同在表面增加了许多“小抓手”,增强与基体的结合力。

在铸造工艺参数优化方面,可借助计算机模拟技术,建立不同工艺参数下的铸造过程模型,这一模型如同虚拟的铸造工厂,能够预测界面结合效果。通过模拟分析,快速确定最佳工艺参数组合,如同在复杂的迷宫中找到最快捷的路径,减少试验次数,提高研发效率^[8]。实际生产中,采用智能监测设备实时监控铸造过程中的温度、压力等参数,并根据反馈信息及时调整,确保工艺参数稳定在最佳区间,从而获得高质量的界面结合,生产出性能卓越的产品。

新型复合铸造工艺与设备的研发为铝镁合金复合材料性能提升开辟了全新的途径。电磁搅拌复合铸造技术利用电磁场对金属液的搅拌作用,使增强相更均匀分散,有效改善了界面结合质量,如同利用无形的手对材料进行更精细的搅拌。随着技术的不断进步,未来将有更多先进工艺和设备如同璀璨的星辰,应用于铝镁合金复合铸造领域。优化后的铝镁合金复合材料已在航空航天领域用于制造飞机蒙皮,凭借其优异的性能保障飞机的安全与高效飞行;在汽车制造中用于生产轻量化底盘部件,助力汽车实现更节能环保的目标,展现出广阔的应用前景。

5 结语

铝镁合金复合铸造技术及界面结合机制研究取得

了诸多成果,为高性能铝镁合金材料制备提供了有力支持。面对不断升级的工业需求,仍有提升空间。未来,应持续深入研究增强相的优化设计与表面处理技术,探索更先进的复合铸造工艺与设备。加强对复杂工况下界面行为的研究,精准调控界面结合过程,以制备出性能更优异、应用更广泛的铝镁合金复合材料,满足各行业对材料高性能、轻量化的迫切需求。

参考文献

- [1] 刘奇峰,蓝丽招.铝、镁合金压铸件在汽车工业中的应用及发展[J].汽车文摘,2024,(02):50-55.
- [2] 孙庆磊,方非凡,王文清,等.含类金刚石薄膜的铝镁合金振膜的制备及其声学特性研究[J].稀有金属材料与工程,2023,52(10):3470-3478.
- [3] 陈昶,朱佳佩,韩子川,等.铝/镁合金轴叉磁脉冲压接/胶接复合连接工艺与接头性能[J].塑性工程学报,2023,30(08):130-137.
- [4] 蒋文明,樊自田.铝/镁合金特种精密铸造技术的研究进展及发展趋势[J].金属加工(热加工),2023,(02):1-9.
- [5] 刘万青.一种复合氧化技术在铝镁合金表面处理应用中获重大突破[J].表面工程与再制造,2022,22(05):65-66.
- [6] 张毅,任勇强,李瑞祺,等.油气井富含 CO₂ 酸性环境下 Ca²⁺对可降解铝镁合金的影响[J].天然气勘探与开发,2022,45(03):75-81.
- [7] 赵菲,王康,马立峰.三层复合板铝/镁合金/铝 FSW 接头的微观组织与抗拉强度[J].稀有金属材料与工程,2022,51(03):1047-1054.
- [8] 金启豪,陈娟,彭立明,等.碳纤维增强树脂基复合材料与铝/镁合金连接研究进展[J].材料工程,2022,50(01):15-24.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

