

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5008

外场对复合铸造 Al/Mg 双金属影响的研究进展与展望

曾乾通¹, 李广宇^{1,2}, 蒋文明³, 王 军⁴, 康 兴¹, 王晓琼¹, 姚 山^{1,2}, 姚平坤¹

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315000; 3. 华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 4. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: Al/Mg 双金属兼具铝和镁的性能特点, 具有广阔的应用前景。然而, 界面强度低是阻碍其发展与推广的主要因素, 因此, 如何调控界面组织从而提高其性能是本领域的研究热点。施加外场是一种工艺简单、成本低廉、影响效果显著, 且能够同时改善基体和界面调控的复合铸造 Al/Mg 双金属组织和性能的方法, 在强化双金属方面具有较大潜力。本文综述了机械振动场、超声场和电磁场 3 种主要外场对双金属组织和性能的影响, 并展望了外场辅助下双金属界面调控的未来发展方向, 为 Al/Mg 双金属的强化提供借鉴与思考。

关键词: Al/Mg 双金属; 复合铸造; 界面调控; 外场; 研究进展; 展望

中图分类号: TG249.5; TG292; TB331

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)04-0343-11

Research Progress and Prospects on the Effects of External Fields on Al/Mg Bimetal Prepared by Compound Casting

ZENG Qiantong¹, LI Guangyu^{1,2}, JIANG Wenming³, WANG Jun⁴, KANG Xing¹,
WANG Xiaoqiong¹, YAO Shan^{1,2}, YAO Pingkun¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315000, China; 3. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Al/Mg bimetals combine the advantageous properties of both aluminium and magnesium, offering broad application prospects. However, low interfacial strength remains a major obstacle to the development and widespread adoption of Al/Mg bimetals. Consequently, regulating the interfacial microstructure to enhance performance has become a key research focus in this field. The application of external fields is a method to improve the microstructure and properties of Al/Mg bimetallic composites through compound casting. This approach features simple processing, low cost, and significant effects that can simultaneously enhance both the matrix and the interface. This material shows great potential in strengthening bimetallic materials. This paper reviews the effects of three major external fields, namely, mechanical vibration fields, ultrasonic fields, and electromagnetic fields, on the microstructure and properties of bimetals. Additionally, future directions for the interfacial regulation of bimetals under external field assistance are discussed, providing insights and references for the strengthening of Al/Mg bimetals.

Key words: Al/Mg bimetals; compound casting; interface regulation; external fields; research progress; outlook

收稿日期: 2025-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(52205359, 52075198, 52271102); 凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP202409); 中央高校基本科研业务费(DUT23RC(3)039)

作者简介: 曾乾通, 2003 年生, 硕士生. 研究方向为电磁搅拌复合铸造 Al/Mg 双金属界面调控. Email: 3110317287@qq.com

通信作者: 李广宇, 1991 年生, 博士, 副教授. 研究方向为轻金属的强化、双金属的界面调控、增材制造. Email: gyli@dlut.edu.cn

引用格式: 曾乾通, 李广宇, 蒋文明, 王军, 康兴, 王晓琼, 姚山, 姚平坤. 外场对复合铸造 Al/Mg 双金属影响的研究进展与展望[J]. 铸造技术, 2025, 46(4): 343-353.

ZENG Q T, LI G Y, JIANG W M, WANG J, KANG X, WANG X Q, YAO S, YAO P K. Research progress and prospects on the effects of external fields on Al/Mg bimetal prepared by compound casting[J]. Foundry Technology, 2025, 46(4): 343-353.

随着现代工业技术的快速发展,对材料的性能要求越来越高,特别是在轻量化、结构整体化和综合性能方面^[1]。双金属是通过各种连接技术使2种不同的金属或合金在接触界面上实现紧密结合来提高综合性能的一种复合材料^[2]。镁合金具有密度低、减震性、电磁屏蔽性和可加工性好的特点^[3],但耐腐蚀性和耐磨性较差;而铝合金具有耐磨、耐腐蚀、塑性好的特点,但其密度高于镁合金,通过制备Al/Mg双金属,可以结合二者的优点从而提高其综合性能。

复合铸造可制备形状复杂且大尺寸的双金属零件,易于实现冶金结合,具有可热处理强化、成本低等特点,因此,其应用前景广阔^[4]。但是在采用复合铸造工艺制备Al/Mg双金属时也面临一些挑战:①由于镁和铝在物理性质上的差异,导致结合界面处容易产生应力集中^[5];②双金属界面组织存在晶粒粗大、成分分布不均匀、界面层过厚等问题^[6];③固态嵌体表面的氧化膜难以彻底清除,这不仅会降低嵌体与液态金属的润湿性,还会导致界面氧化物夹杂的形成^[4];④结合界面由脆性的Al-Mg金属间化合物(intermetallic compounds, IMCs)组成,在外力作用下容易发生开裂^[7]。因此,如何调控双金属的界面组织,从而提高其性能是本领域研究的重点与难点。

针对上述难题,研究者们开展了广泛研究,主要研究方向包括:添加中间层^[8]、合金化^[9]、去除氧化膜^[10]、优化工艺参数^[11]、二次轧制^[12]、嵌体热改性^[13]和施加外场^[14]等。其中,施加外场主要包括机械振动场、超声场和电磁场,相较于其他调控方法,展现出许多独特的优势。例如,外场可以同时改善基体和界面组织性能。与添加中间层相比,外场无需改变界面成分,又能提高界面强度;与二次轧制相比,外场施加在液态凝固过程中,调控效果更显著。相较于昂贵的稀土合金化方法,施加外场可以降低界面调控成本。此外,外场技术在操作过程中由于不与合金溶液直接接触,可减少污染,且具有改善凝固条件、细化晶粒、减少铸造缺陷的作用^[15]。

综上所述,施加外场是一种具有较大潜力的强化双金属的方法,本文总结了近年来外场作用下复合铸造Al/Mg双金属组织与力学性能的变化规律,阐明了其界面调控的机理,并对其未来发展方向进行展望。

1 机械振动场对Al/Mg双金属的影响

机械振动因其工艺简单、成本低,被广泛应用

于合金凝固控制领域^[16]。施加振动时,金属液会受到剧烈冲击,产生强迫对流,促进形核,还可以改善微观组织的均匀性^[17],是改善Al/Mg双金属性能的一种非常有潜力的方法。目前采用机械振动场调控Al/Mg双金属界面组织和性能的研究已取得一定进展。例如,Wang等^[14]首次将机械振动应用于消失模固-液复合Al/Mg双金属中,设备原理如图1a所示,其利用消失模自带的振动台,无需额外设备,工艺简单、成本低。铸件的微观组织和性能与液态金属的充型和凝固过程密切相关。在双金属固-液复合铸造过程中,固态嵌体及机械振动场的引入使得充型和凝固过程变得复杂。为了探明机械振动场下双金属的充型凝固行为,Li等^[18]通过高速摄影机和温度测量设备实时记录了机械振动场下消失模固-液复合A356/AZ91D双金属的充型和凝固过程,测量原理如图1b和c所示。结果表明,机械振动后AZ91D溶液充型速率增加且更均匀,AZ91D溶液和A356嵌体之间的润湿性得到改善,整个铸件的温度分布更加均匀。Guan等^[19]在此基础上继续研究了机械振动对Al/Mg界面组织和力学性能的影响,发现界面层的相组成在机械振动前后保持不变,但机械振动场的施加细化了Mg₂Si和Al₃Mg₂相,并使界面层中的Mg₂Si强化相分布更加均匀,如图2所示。剪切测试结果表明,与未振动的双金属相比,其剪切强度从31.7 MPa提升至47.5 MPa。研究认为施加振动产生的强制对流,破碎了初始凝固的细小树枝晶,同时降低了温度梯度,提高了双金属的凝固速率,导致成分过冷度增大,共同作用下获得的细小弥散的Mg₂Si相和细化的Al₃Mg₂相使裂纹发生偏转和弯曲,改善了界面性能,具体原理如图2c~h所示。

综上所述,机械振动是一种调控Al/Mg双金属界面的有效手段,但机械振动的效果受到多种参数的影响,如振动频率、振动时间、加速度等。Wang等^[14,20]和Guan等^[21]分别研究了振动持续时间、频率、加速度对Al/Mg双金属界面微观组织及力学性能的影响。研究表明,随着振动时间、频率、振动加速度的提高,凝固过程中的冷却速率增加,金属间化合物层厚度减小,界面处Mg₂Si相发生细化和均匀化,界面剪切强度显著提高。但当振动时间超过一定值后,界面处IMCs层厚度反而会增加,导致性能降低。

前文探讨了单一振动及其参数对双金属界面组织和性能的影响,随着研究的深入,一些学者开始探索多种强化方式共同调控策略,以期获得更优异的性能。其中包括稀土元素合金化,以及添加中间层技术与机械振动的复合调控,二者单独使用都能提高

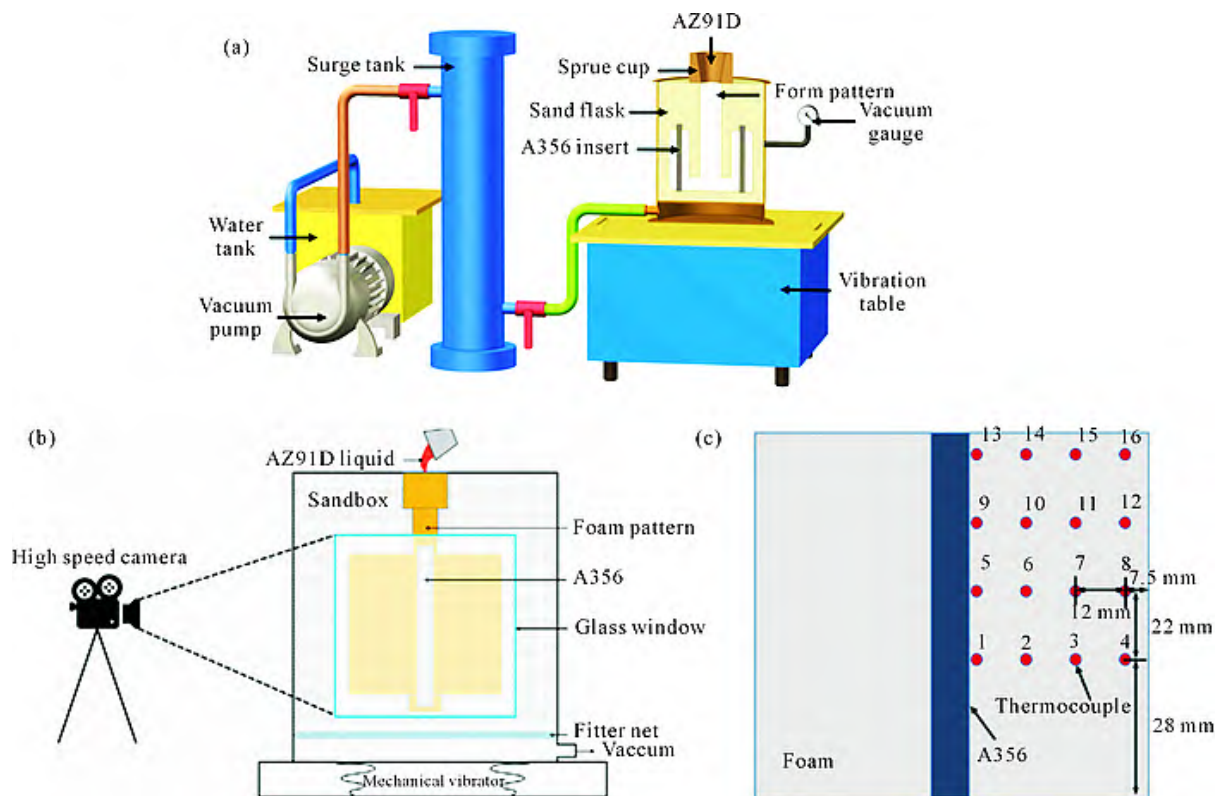


图1 实验装置:(a) 振动辅助消失模铸造实验装置;(b) 高速摄影机装置;(c) 测温采集点^[14,18]

Fig.1 Experimental setup: (a) vibration-assisted system experimental setup; (b) schematic diagram of the high-speed camera setup; (c) collection points for temperature measurement^[14,18]

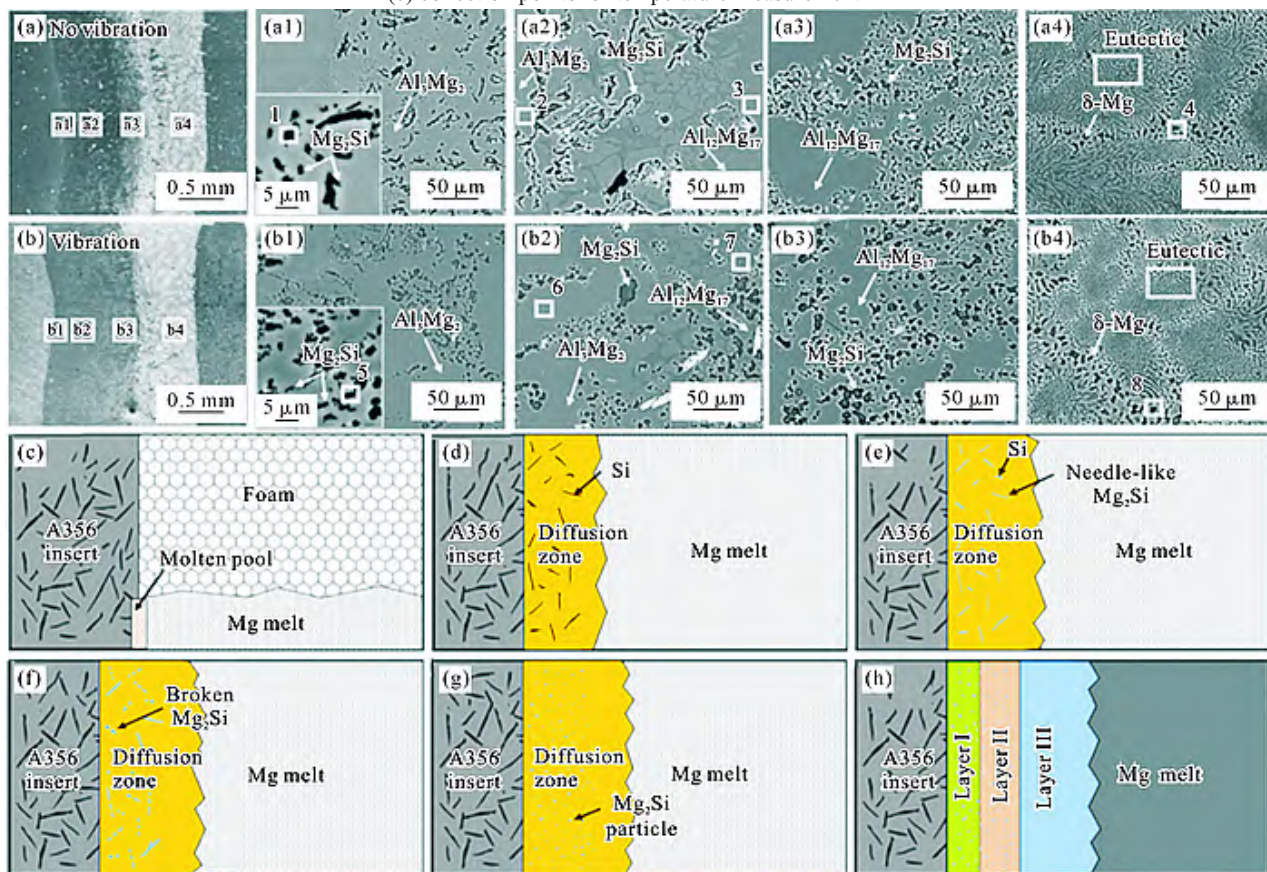


图2 振动对界面的影响:(a) 无振动下的界面;(b) 有振动下的界面;(a1~a4) 无振动下界面组织的 SEM 像;(b1~b4) 有振动下 SEM 像;(c~h) 振动改善界面组织机理^[19]

Fig.2 Influence of vibration on interfaces: (a) interface without vibration; (b) interface with vibration; (a1~a4) SEM images showing the microstructures of the interface layers without vibration; (b1~b4) SEM images showing the microstructures of the interface layers with vibration; (c~h) mechanism of interface improvement by vibration^[19]

双金属结合强度,但结合振动技术,可以进一步影响稀土元素和中间层在双金属界面处的作用,从而实现多重强化效果。例如,Guan 等^[22]采用稀土 Gd 合金化和施加机械振动相结合的方法来强化 Al/Mg 双金属。研究发现,单独添加 Gd 元素能改善共晶层的微观结构,但 Gd 元素容易在界面上聚集(图 3b),而机械振动场的加入可以解决 Gd 易偏析的问题,且能够使 Gd 元素的扩散距离更远(图 3c)。剪切测试结果表明,双金属的抗剪强度达到了 54.25 MPa,比单纯添加 Gd 的双金属的抗剪强度提高了 19%。Qie 等^[23]将机械振动与添加 Ni 中间层强化方法结合,相较于单独添加 Ni 中间层,机械振动处理对 Ni 夹层表面氧化膜的剪切破碎效应和对流搅拌效应促进了 Mg 侧附近良好冶金结合的形成,其原理如图 4 所示。基于振动辅助处理带来的强化效

果,加上新析出的 $\text{Mg}_3\text{Ni}_2\text{Al}$ 的第二相强化效应,Al/Mg 双金属复合界面的剪切性能显著提高,由未经任何处理的 35.47 MPa 提高到 56.12 MPa,增长了 58.22%。

2 超声振动场对 Al/Mg 双金属的影响

超声振动场(ultrasonic vibration, UV)也常被用于合金凝固中以改善其组织和性能。与低频机械振动不同,将超声振动引入液态介质中可以提供高频振荡,并在液态熔体中诱发空化和声流效应^[24-26],对液态介质的流场和温度场的影响更显著^[25-26]。因此,研究者推测将超声场应用于双金属中也可能会改善 Al/Mg 双金属的界面结合效果。这种技术最初在 Al/Mg 异种金属焊接领域展现出卓越的应用潜力^[27],随着研究深入,人们发现超声振动技术在复合铸造

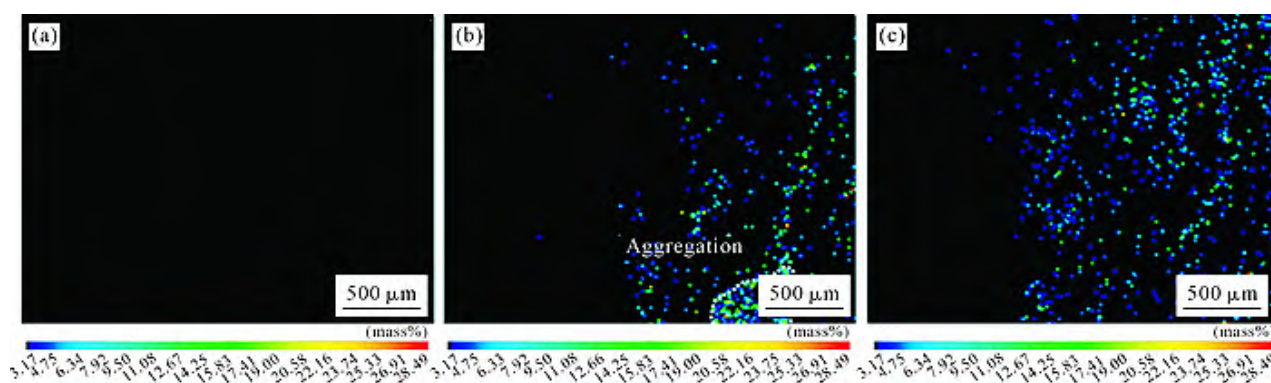


图3 不同实验条件下制备的 Al/Mg 双金属中 Gd 元素的分布:(a) 未经处理;(b) 添加 0.6%Gd;(c) 添加 0.6%Gd 和施加振动^[22]
Fig.3 Distributions of Gd in the Mg/Al bimetal prepared with different experimental conditions: (a) without treatment; (b) with 0.6 wt.% Gd added; (c) with 0.6 wt.% Gd added and applying vibration^[22]

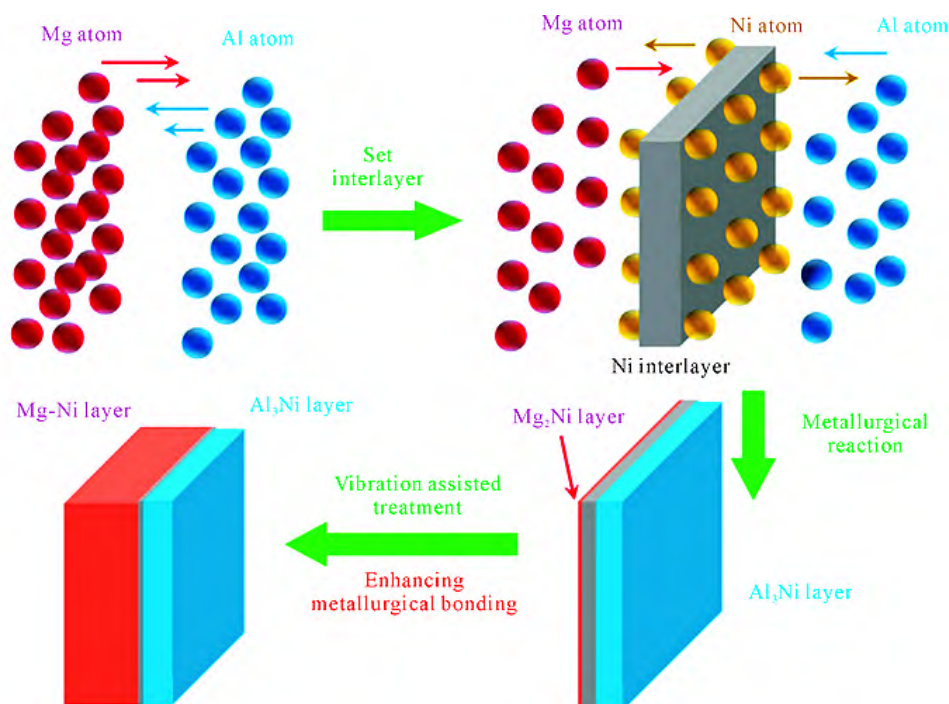


图4 Al/Mg 双金属复合界面形成过程示意图^[23]

Fig.4 Schematic diagram showing the formation process of the Al/Mg bimetallic composite interface^[23]

领域同样能够显著改善材料的微观结构和性能。

Guan 等^[28]首次将超声振动场应用到消失模铸造制备的 Al/Mg 双金属界面调控中,通过将超声换能器固定在 A356 嵌件上,实现了将超声振动施加到 Al/Mg 双金属制备过程中,其原理如图 5 所示。结果表明,在超声振动场作用下,界面处的 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}+\delta\text{-Mg}$ 共晶组织显著细化, Mg_2Si 相也发生细化且更加均匀地分散在整个界面中,连续的氧化夹杂被消除(图 6),与没有施加超声振动场相比,双金属的剪切强度提高了 86.5%,达到 69 MPa。研究认为超声波在 Al/Mg 界面产生空化和声流效应,空化过程中气泡吸热导致局部过冷而促进成核,气泡破裂时释放高温和冲击力,使晶核破碎增多,声流则可输运这些晶核,共同细化了 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 和 Mg_2Si 晶粒,并打散了氧化膜,从而实现了双金属的强化,如图 6c 所示。

与机械振动场相似,超声振动场的调控效果也受时间、频率等影响。Li 等分别研究了超声频率^[29]、施加超声时界面温度^[30]、功率^[31]及持续时间^[32]对 Al/Mg 双金属界面组织和性能的影响,发现与未施加超声振动场相比,施加不同参数的 UV 处理均会细化和均匀化 Mg_2Si 颗粒,细化共晶层晶粒和减小界面处金属间化合物层厚度,从而使剪切性能得到不同程度的提高。其中超声功率对界面的结合影响最大,当超声功率为 75 W 时,与未经 UV 处理的 Al/Mg 双金属相比提高了 89.5%。较为特殊的情况是,当超声处理温度在镁合金液相线温度以上时,Al 嵌件会受到超声空化的侵蚀,导致双金属界面与 Mg 基体之间出现裂纹,剪切强度反而降低了 13.9 MPa。

与机械振动相似,还可以将超声振动场与其他调控方法结合,实现复合强化。Xu 等^[33]研究了超声

场与 FeCoNiCrCu 高熵合金涂层复合强化对 Al/Mg 双金属界面组织和力学性能的影响。结果表明,单独高熵合金涂层处理时,Mg 侧冶金结合差,限制 Al/Mg 双金属性能。而复合强化后的 Al/Mg 双金属界面层厚度仅为未处理的双金属界面层厚度的 26.99%,且超声振动产生的声空化和声流效应促进了铝元素在高熵合金涂层中的扩散,Mg 侧的冶金结合质量得到显著改善,其原理如图 7 所示。Al/Mg 双金属的剪切强度由未经处理的 32.16 MPa 提高到 63.44 MPa,提高了 97.26%。

3 电磁场对 Al/Mg 双金属的影响

电磁搅拌(electromagnetic stirring, EMS)技术常被应用于合金凝固过程中,其原理是通过在熔体外部施加交变电磁场,从而激发熔体内部感应电动势和感生电流,在二者的交互作用下,产生洛伦兹力,驱动金属熔体发生流动,该技术无接触、无污染、低成本和易于操作^[34]。目前,诸如低频电磁场、脉冲磁场、交流和直流复合磁场等电磁场已被广泛应用于各类单一合金的制备过程中^[35-37],但应用于 Al/Mg 双金属界面调控中的研究还较少。

Yu 等^[38]研究了电磁场对 Al/Mg 双金属界面微观结构和力学性能的影响,其制备原理如图 8a 所示。磁场发生器的主体是 9 个铁芯感应线圈,以 120° 的相位差安装,由三相交流电供电,利用相间 120° 相位差原理产生旋转磁场,如图 8b 所示。研究发现,EMS 促进了 Si 元素在界面中的扩散,使得 Mg_2Si 颗粒在 IMC 区域内细化和分散。此外,氧化膜仍然存在,但变得不连续且周围的 Mg_2Si 含量增加,界面裂纹不再像未施加 EMS 时沿着氧化膜传播(图 8c),而是从 IMCs 区域延伸到共晶区域(图 8d)。与没有施

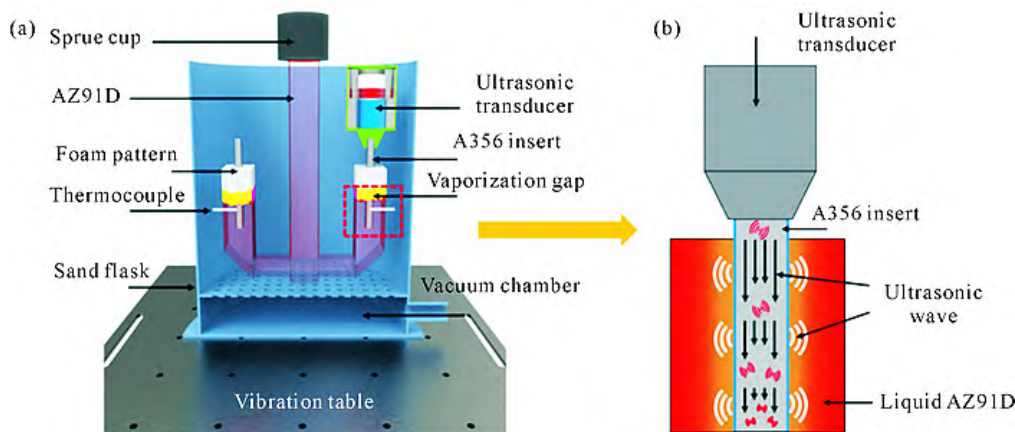


图 5 实验装置及超声振动应用过程示意图:(a) 超声场作用下固-液复合设备原理;(b) 超声头和铝嵌体的固定方式及影响原理^[28]

Fig.5 Schematic diagram of the experimental setup and ultrasonic vibration application process: (a) principle diagram of solid-liquid composite equipment under the action of ultrasonic field; (b) fixing method and influence principle of ultrasonic head and aluminium inlay^[28]

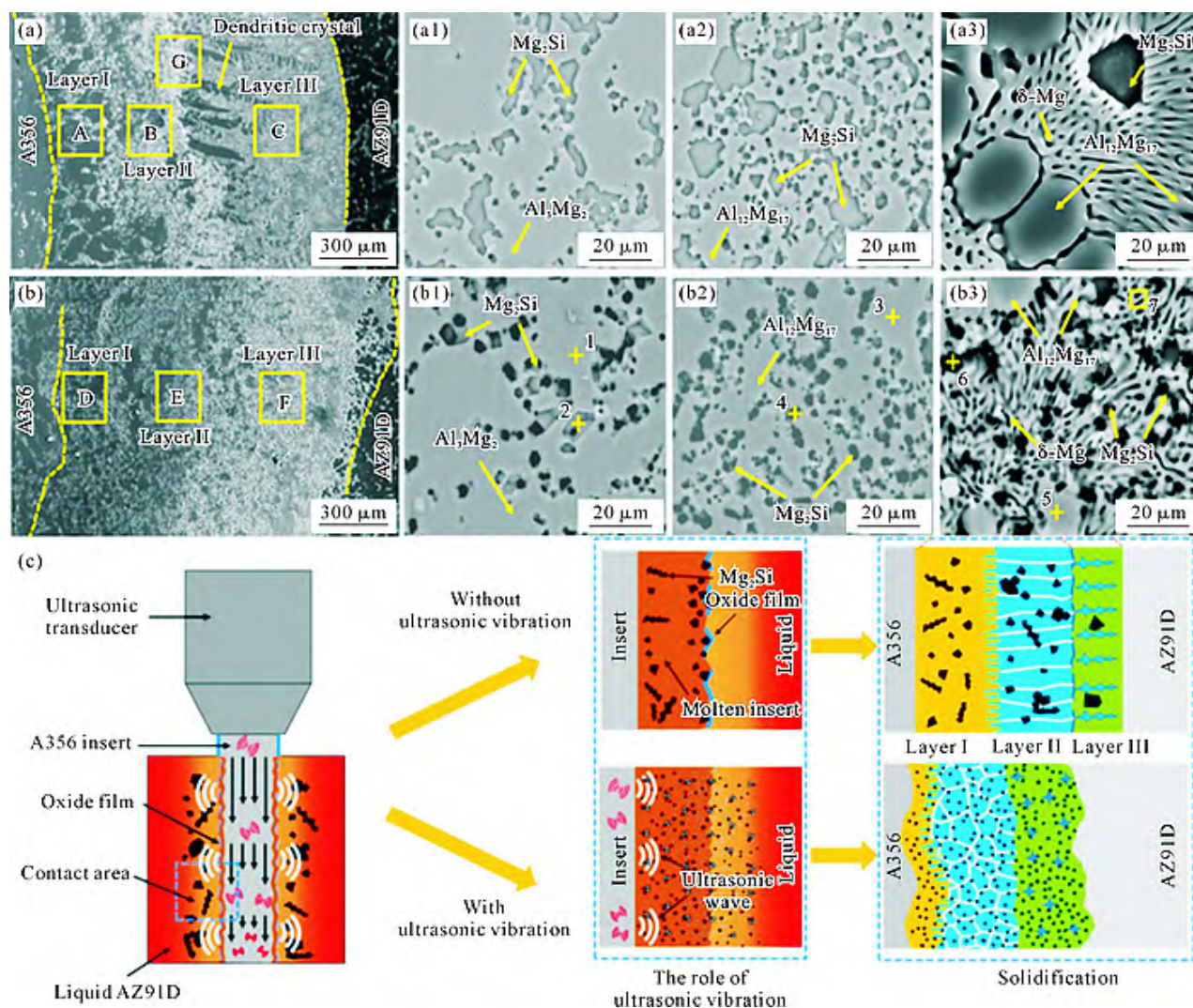


图6 界面在无超声和有超声条件下的显微组织对比:(a)界面在无超声下的SEM像;(a1~a3)图(a)中区域A、B、C的显微组织;(b)界面在有超声下的SEM像;(b1~b3)图(b)中区域D、E、F的显微组织;(c)超声改善界面组织机理^[28]

Fig.6 Comparison of microstructures of the interface under conditions without and with UV: (a) SEM image of the interface layers without UV; (a1~a3) microstructures of regions A, B, and C in (a); (b) SEM image of the interface layers with UV; (b1~b3) microstructures of regions D, E, and F in (b); (c) mechanism of interface improvement by ultrasonic vibration^[28]

加EMS的样品相比,剪切强度提高了29.1%。这是因为电磁力使 Mg_2Si 颗粒发生细化、均匀化,且与基体的应力集中小,又由于其高硬度对裂纹扩展具有阻碍作用,加上电磁力使得氧化膜附近 Mg_2Si 颗粒增多,不仅增强了氧化膜附近阻碍裂纹扩展的能力,又使氧化膜破碎,解理作用削弱,裂纹延伸路径变长,从而提高了Al/Mg界面抗剪强度,如图8d和图9所示。

赵佳蕾等^[39]研究了电磁场对半连续铸造方法制备的5056/AZ91双金属组织和性能的影响,其设备原理如图10所示。研究发现,未经电磁搅拌时,金属间化合物聚集在过渡层,5056铝合金侧为 Mg_2Al_3 ,AZ91镁合金侧为 $Mg_{17}Al_{12}$ 。而在施加电磁搅拌后,界面至铸锭中心处的相变为单一的 Mg_2Al_3 ,这是因为电磁场引起AZ91熔体的强迫流动,冲刷5056铝合金凝壳导致重熔,铝元素混入镁合金熔体,使界

面至铸锭中心处的相变为单一的 Mg_2Al_3 。

鉴于目前电磁场辅助下Al/Mg双金属界面调控的研究较为有限,本文结合其他类型双金属界面中的相关研究进行归纳总结,以为后续Al/Mg双金属在电磁场调控下的研究提供参考。

Yu等^[40]探究了行波和旋转耦合磁场对Al-7Si-Cu-Mg-Mn/钢双金属界面的影响。研究发现,施加磁场后,虽然相组成不变,但界面层厚度由 $(5.1 \pm 0.9) \mu m$ 减至 $(2.7 \pm 0.2) \mu m$ 。认为是磁场引起的熔体流动增加了液-固界面处Fe的浓度梯度,促进了Fe从金属间相向液体的扩散,加速了 Al_3Fe_2Si 的溶解,并减缓其生长,从而减小了界面层厚度,如图11所示。界面层厚度的减小使得剪切强度从 $(41 \pm 7) MPa$ 提升至 $(56 \pm 2) MPa$ 。

Xiong等^[41]也开展了类似的研究,在电磁搅拌作用下制备了高铬铸铁/中碳钢双金属。研究发现,

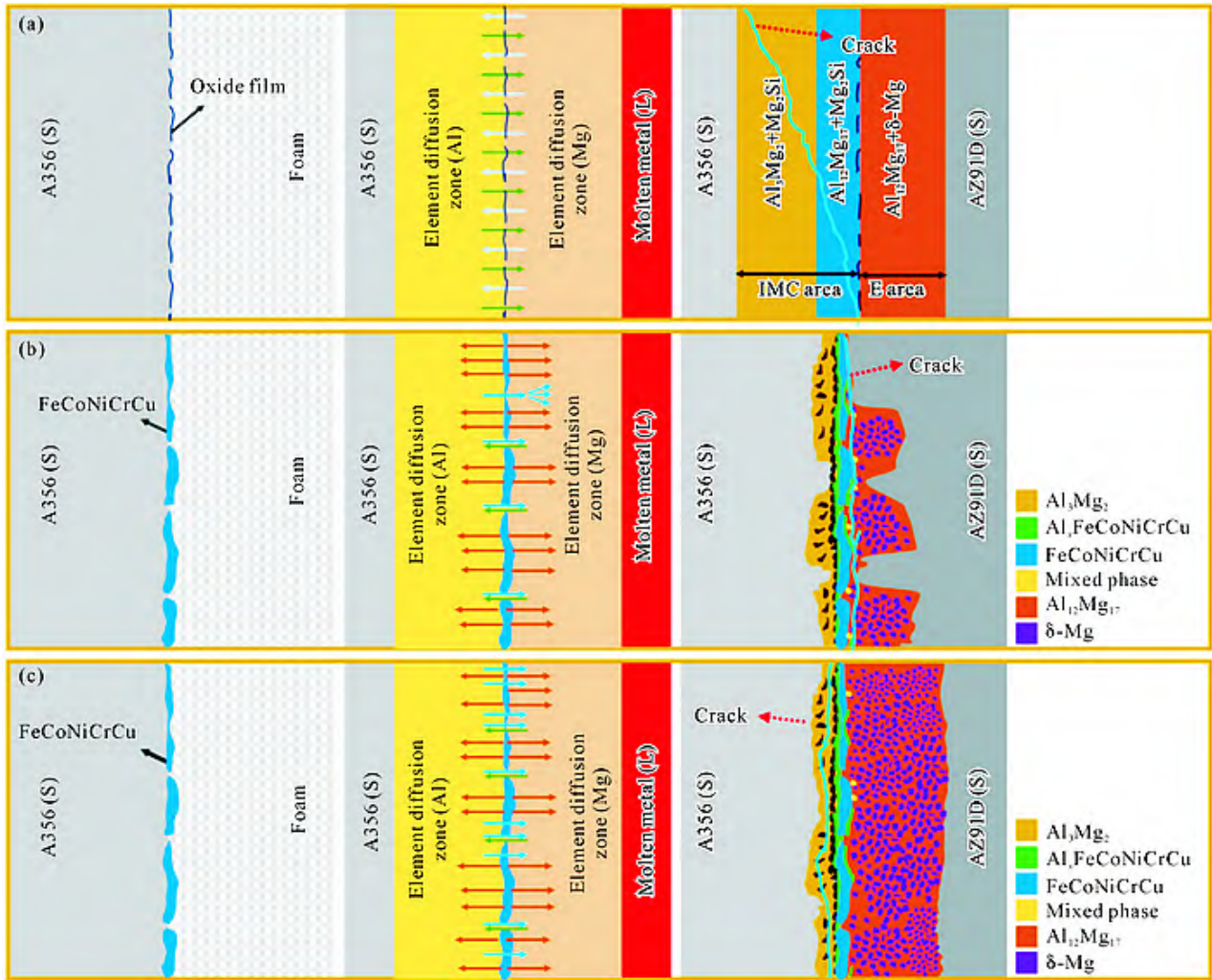


图 7 Al/Mg 双金属界面形成过程和裂纹扩展路径示意图:(a) 未处理;(b) 高熵合金涂层处理;(c) 高熵合金涂层+超声场^[33]
Fig.7 Schematic diagram of the interface formation process and crack propagation path of an Al/Mg bimetal: (a) untreated;
(b) high-entropy alloy coating; (c) high-entropy coating plus an ultrasonic field^[33]

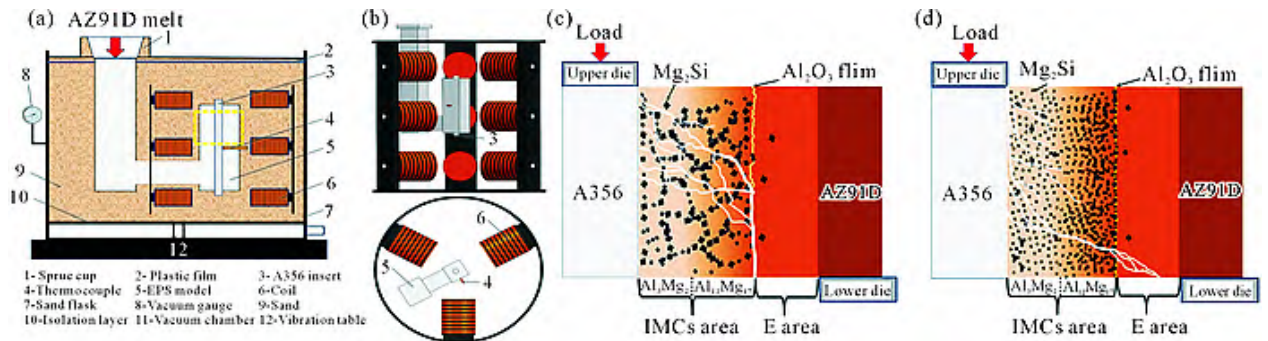


图 8 磁场辅助 LFCC 实验装置及断裂机制分析:(a) 磁场辅助 LFCC 实验装置;(b) 嵌体位置;(c) 未处理时断裂机制;(d) 处理后断裂机制^[38]

Fig.8 Magnetic field-assisted LFCC experimental setup and fracture mechanism analysis: (a) magnetic field-assisted LFCC experimental setup; (b) inlay position; (c) fracture mechanism without treatment; (d) fracture mechanism with treatment^[38]

电磁搅拌细化了界面组织,促进了元素扩散,增强了界面冶金结合,同时电磁搅拌使金属液不断冲刷中碳钢表面,去除了氧化物和杂质,进一步改善了双金属界面的质量。

钟德水等^[42]同样采用如图 10 所示的连续铸造工艺制备了 3003/8090 双铝合金复层铸锭。结果表明,电磁搅拌使 8090 合金组织细化,溶质在晶界处

的富集减少,并使结合界面前沿柱状晶的生长向逆流方向偏转,但对结合处界面的成分分布和扩散层厚度几乎没有影响。这些研究对电磁场调控下复合铸造 Al/Mg 双金属的研究具有借鉴意义。

表 1 总结了 3 种外场作用下 Al/Mg 双金属剪切强度及相比于不施加外场时的提升效果。可以看到,目前超声场的调控效果普遍较好,剪切强度最高

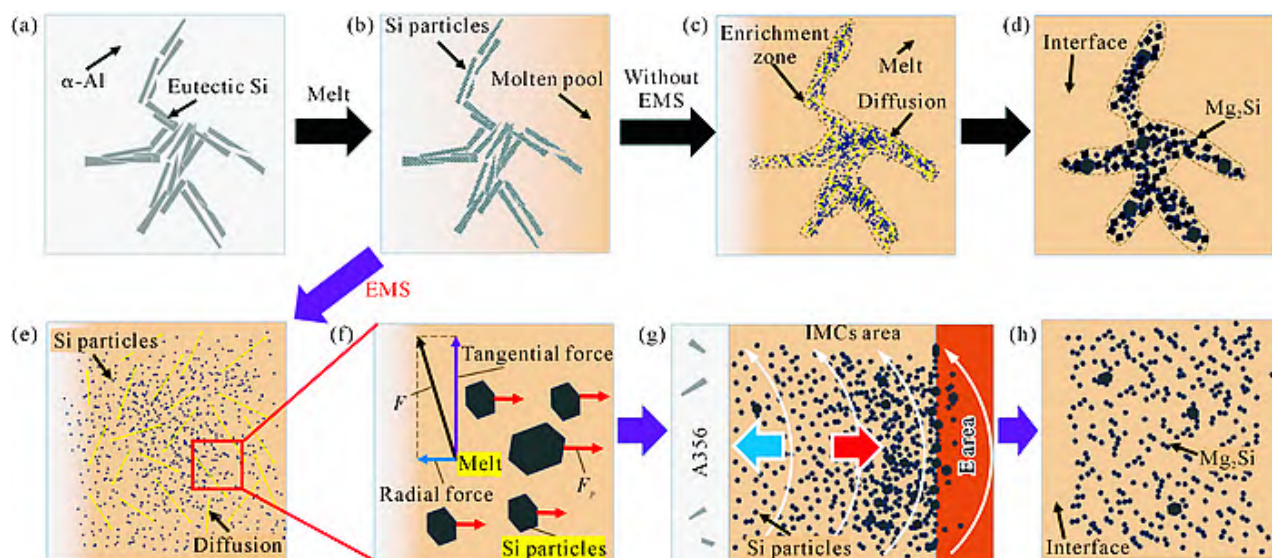


图9 电磁场改善界面组织机理:(a) 硅的初始状态;(b) A356 嵌体表面熔化;(c) 无 EMS 时熔池中局部硅颗粒的扩散;(d) 无 EMS 时 Al/Mg 界面的凝固结构;(e) 有 EMS 时熔池中局部硅颗粒的扩散;(f) 电磁力与阿基米德电磁力;(g) 有 EMS 时界面中的流动;(h) 有 EMS 时 Al/Mg 界面的凝固结构^[38]

Fig.9 Mechanisms of interface improvement by electromagnetic stirring: (a) initial state of Si; (b) melting of the A356 insert surface; (c) diffusion of local Si particles in the melt pool without EMS; (d) solidified structure of the Al/Mg interface without EMS; (e) diffusion of local Si particles in the melt pool with EMS; (f) electromagnetic force and Archimedean electromagnetic force; (g) flow at the interface with EMS; (h) solidified structure of the Al/Mg interface with EMS^[38]

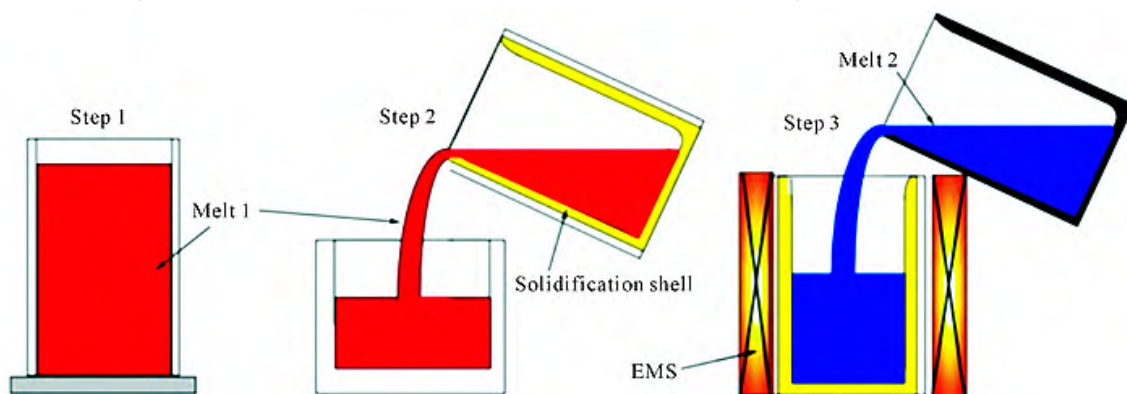


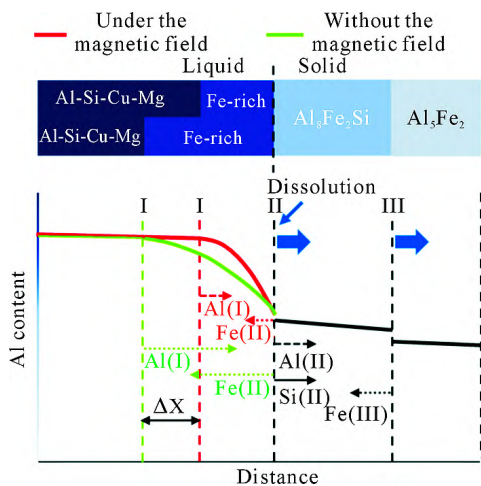
图 10 实验过程示意图^[39]

Fig.10 Schematic diagram of the experimental process^[39]

表 1 不同外场作用下 Al/Mg 双金属的剪切强度

Tab.1 Improvement in the shear strength at the Al/Mg bimetal interface under different external fields

External field	Material	Improvement of shear strength/MPa	Reference
Mechanical vibration	A356/AZ91D	31.26→43.69(39.76%)	[18]
		31.7→47.5(49.84%)	[19]
		31.46→47.49(50.95%)	[14]
		32.2→45.1(40.06%)	[21]
		45.25→54.25(19.89%)	[22]
		35.47→56.12(58.22%)	[23]
		37→69(86.5%)	[28]
		38.21→62.2(62.8%)	[29]
		35.5→53.9(51.8%)	[30]
		32.4→61.4(89.5%)	[31]
Ultrasonic vibration	A356/AZ91D	33.3→56.7(70.3%)	[32]
		32.16→63.44(97.26%)	[33]
		35.7→46.1(29.1%)	[38]
		41→56(36.59%)	[40]
Magnetic field	Al-7Si-Cu-Mg-Mn/42CrMo	41→56(36.59%)	[40]
	high chromium cast iron/medium carbon steel	236.2→281.2 (19.09%)	[41]

图 11 铝/钢固-液界面反应示意图^[40]Fig.11 Schematic diagram of the Al/steel solid-liquid interface reaction^[40]

提升 97.26%,最大值为 69 MPa,机械振动场的剪切强度提升效果在 40%~50%左右,而电磁场剪切强度的提升效果最低,在 30%左右。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)外场调控对 Al/Mg 双金属界面组织与力学性能的改善具有显著作用。机械振动通过强制对流和晶粒细化改善界面组织,剪切强度从 31.7 MPa 提升至 47.5 MPa,提升了 49.84%。然而,过度振动时,IMCs 层厚度增加,导致性能下降。超声振动通过空化和声流效应细化晶粒,消除氧化夹杂,极大地提升了界面力学性能,剪切强度从 37 MPa 提升至 69 MPa,提升了 86.5%。在超声功率为 75 W 时,剪切强度从 32.4 MPa 提升至 61.4 MPa,提升了 89.5%。电磁场通过洛伦兹力驱动熔体流动,促进 Si 元素扩散,细化 Mg_2Si 颗粒并破碎氧化膜,使剪切强度从 35.7 MPa 提升至 46.1 MPa,提升了 29.1%。综合来看,超声振动场的调控效果最为显著,其次是机械振动和电磁场。

(2)复合调控策略通过结合外场与其他调控方法进一步提升了 Al/Mg 双金属界面的力学性能。机械振动与稀土元素 Gd 合金化相结合,解决了 Gd 元素在界面上的偏析问题,促进了 Gd 的扩散。与 Ni 中间层结合时,机械振动的剪切破碎效应和对流搅拌效应促进了稳定冶金结合的形成,同时新析出的 Mg_3Ni_2Al 第二相强化效应使界面剪切强度提升了 58.22%。超声振动与 FeCoNiCrCu 高熵合金涂层结合,产生的声空化和声流效应显著改善了冶金结合质量,使剪切强度提升了 97.26%。

4.2 展望

使用外场来调控复合铸造 Al/Mg 双金属的研

究较少,需要进一步探索。目前主要的研究结果及未来可能的研究方向如下。

(1)电磁场作用下复合铸造 Al/Mg 双金属界面调控的深入研究。目前此方面的研究相对较少,关于电磁场参数,如磁场频率、强度等,对 Al/Mg 双金属组织和性能的影响,以及电磁场作用下 Al/Mg 双金属界面组织和性能的强化的机理,尚未有系统和深入的研究。此外,电磁场的形式多样,包括旋转磁场、行波磁场、螺旋磁场、脉冲磁场等,但哪种形式的磁场对 Al/Mg 双金属的强化最为有效,这一问题也尚未得到明确解答。

(2)多物理场耦合或多强化方法复合作用下双金属界面调控的进一步探索。目前的研究主要集中在振动场、超声场及电磁场等单一物理场的界面调控,单一外场引起的对流和振荡等效应的作用范围有限,未来可以加强对多物理场耦合作用的研究,例如电磁场、超声场和振动场等多种物理场的联合作用或者多物理场和其他强化方法相结合,探索其在 Al/Mg 双金属界面调控中的潜力。

(3)新型外场技术的探索与应用。当前的外场各有其不足之处,并不能支持双金属的进一步应用,急需开发一种绿色低成本、高效的新型外场,未来可以在 Al/Mg 双金属中对嵌体施加变形或通过挤压铸造的方式对镁合金溶液施加形变场,或在 Al/Mg 结合界面施加辐照场,研究其在界面组织调控中的作用。

(4)机器学习辅助优化工艺参数和外场参数。以往通过实验试错来确定最佳调控参数的方法,费时费力且成本较高,而通过对历史数据的深度学习,机器学习模型能够预测最佳参数组合,减少实验次数,降低成本,获得最佳界面性能的提升。未来可用于优化 Al/Mg 双金属复合铸造工艺及外场中的各项参数,如浇注温度、施加外场强度与时间等。

(5)外场作用下界面结合的可视化研究。虽然目前外场作用下双金属的界面结合及强化机理仍然是通过实验结果逆推获得,缺少直观的原位观察界面行为的可视化手段。未来可以结合多种先进测试手段,以深入揭示界面凝固过程中的微观演变规律,如采用同步辐射技术实时观测 Al/Mg 界面结合过程,为外场影响下的界面结合机理提供直接证据,或通过多尺度模拟结合实验数据,在宏观-介观-微观尺度上深入解析外场作用下界面行为。

参考文献:

[1] ZHANG J Y, LI F, KANG F W, WANG Z Y, SUN L. Double ef-

- fects of recrystallization behavior on grain morphology evolution and mechanical properties of Al/Mg/Al composite plate by hard plate rolling[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2024, 34(5): 1029-1038.
- [2] 张岩. 热轧制 Ti/Al/Mg 复合板与组织性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- ZHANG Y. Study on the preparation of Ti/Al/Mg composite plates by hot rolling and their microstructure and properties [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [3] ZHANG L, LI Y L. Dynamic recrystallization mechanism, texture evolution development and mechanical characteristics of a Mg-8.7Gd-4.18Y-0.42Zr magnesium alloy by ECAP[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2024, 34(2): 376-388.
- [4] LI G Y, JIANG W M, GUAN F, ZHANG Z, WANG J L, YU Y, FAN Z T. Preparation, interfacial regulation and strengthening of Mg/Al bimetal fabricated by compound casting: A review[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(9): 3059-3098.
- [5] LI S, ZHENG Z T, CHANG L, GUO D H, YU J L, CUI M F. A Two-step bonding process for preparing 6061/AZ31 bimetal assisted with liquid molten zinc interlayer: The Process and microstructure [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2021, 36(19): 2093-2115.
- [6] SARVARI M, GHAEMI K S, DIVANDARI M, SAGHAFIAN H. Dissimilar joining of Al/Mg light metals by centrifugal compound casting process [J]. *International Journal of Metal Casting*, 2023, 17: 998-1007.
- [7] WEN F L, ZHAO J H, YUAN M W, WANG J F, ZHENG D Z, ZHANG J Y, HE K, SHANGGUAN J J, YU G. Influence of Ni interlayer on interfacial microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V/AZ91D bimetals fabricated by a solid-liquid compound casting process [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9(4): 1382-1395.
- [8] YANG H K, QIU J, CAO C, LI Y D, SONG Z X, LIU W J. Theoretical design and experimental study of the interlayer of Al/Mg bimetallic composite plate by solid-liquid cast rolling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 835: 142677.
- [9] ZHANG Z, JIANG W M, LI G Y, WANG J L, GUAN F, JIE G L, FAN Z T. Effect of La on microstructure, mechanical properties and fracture behavior of Al/Mg bimetallic interface manufactured by compound casting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 105: 214-225.
- [10] XU G, LUO A A, CHEN Y, SACHDEV A K. Interfacial phenomena in magnesium/aluminum bi-metallic castings[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 595: 154-158.
- [11] 李广宇. 消失模铸造铝/镁固-液复合界面的调控及强化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- LI G Y. Study on the regulation and strengthening of solid-liquid composite interface of Al/Mg in lost foam casting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [12] CHEN L, BAI S L. The anti-corrosion behavior under multi-factor impingement of Hastelloy C22 coating prepared by multilayer laser cladding[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 437: 1-12.
- [13] MOLA R, BUCKI T. Characterization of the bonding zone in AZ91/AlSi12 bimetals fabricated by liquid-solid compound casting using unmodified and thermally modified AlSi12 alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 66(7-8): 439-448.
- [14] WANG J L, GUAN F, JIANG W M, LI G Y, ZHANG Z, FAN Z T. The role of vibration time in interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Mg bimetallic composites produced by a novel compound casting[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 3867-3879.
- [15] XIAO B T, FAN Z T, JIANG W M, XIANG J H, YAN X F. Effect of vibration frequency on primary phase and properties of grey cast iron fabricated by lost foam casting[J]. *China Foundry*, 2020, 17(1): 1-7.
- [16] 吴士平, 王汝佳, 陈伟, 戴贵鑫. 振动过程的数值模拟在金属凝固中应用的研究进展[J]. *金属学报*, 2017, 54(2): 247-264.
- WU S P, WANG R J, CHEN W, DAI G X. Research progress on numerical simulation of vibration process in metal solidification [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 54(2): 247-264.
- [17] 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(5): 409-432.
- [18] LI G Y, GUAN F, JIANG W M, XU Y C, ZHANG Z, FAN Z T. Effects of mechanical vibration on filling and solidification behavior, microstructure and performance of Al/Mg bimetal by lost foam compound casting[J]. *China Foundry*, 2023, 20(6): 469-479.
- [19] GUAN F, JIANG W M, LI G Y, ZHU J W, WANG J L, JIE G L, FAN Z T. Effect of vibration on interfacial microstructure and mechanical properties of Mg/Al bimetal prepared by a novel compound casting[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(8): 2296-2309.
- [20] 王俊龙, 蒋文明, 管峰, 李广宇, 张政, 樊自田. 振动频率对消失模铸造 Al/Mg 复合材料界面组织和力学性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42(6): 672-677.
- WANG J L, JIANG W M, GUAN F, LI G Y, ZHANG Z, FAN Z T. Influence of vibration frequency on the interface microstructure and mechanical properties of Al/Mg composite materials in lost foam casting [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2022, 42(6): 672-677.
- [21] GUAN F, FAN S, WANG J L, LI G Y, ZHANG Z, JIANG W M. Effect of vibration acceleration on interface microstructure and bonding strength of Mg-Al bimetal produced by compound casting [J]. *Metals*, 2022, 12(5): 2296-2309.
- [22] GUAN F, JIANG W M, ZHANG Z, LI G Y, WANG J L, FAN Z T. Significantly enhanced Mg/Al bimetallic interface by compound casting via combination of Gd addition and vibration[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2023, 54(9): 3389-3399.
- [23] QIE X W, ZHANG Z, LI Q Q, GUAN F, FAN Z T, JIANG W M. Strengthening of compound casting Al/Mg bimetallic interface with Ni interlayer by vibration assisted treatment[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 1736-1742.
- [24] GUO R, ZENG D X, LI F G. Promoting of metallurgical bonding by ultrasonic insert process in steel-aluminum bimetallic castings [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2022, 41(1): 289-295.
- [25] RAO Y S, YAN H, WAN J. Rheological model of semisolid Mg/Si/AM60 composites prepared by ultrasonic vibration treat-

- ment[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(8): 2783-2788.
- [26] CHEN X R, NING F K, HOU J, LE Q C, TANG Y. Dual-frequency ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 433-441.
- [27] KUMAR S, WU C S. Strengthening effects of tool-mounted ultrasonic vibrations during friction stir lap welding of Al and Mg alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2021, 52(7): 2909-2925.
- [28] GUAN F, JIANG W M, WANG J L, LI G Y, ZHANG Z. Development of high strength Mg/Al bimetal by a novel ultrasonic vibration aided compound casting process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 300: 117441.
- [29] LI Q Q, JIANG W M, XU Y C, YU L H, YU X P, FAN Z T. New insights into the influencing mechanism of ultrasonic vibration on interface of Al/Mg bimetal composites by compound casting using simulation calculation and experimental verification[J]. *Composites Part B*, 2024, 284: 111726.
- [30] LI Q Q, XU Y C, NIU Y Q, FAN Z T, YU L H, JIANG W M. Development of Al/Mg bimetal prepared by ultrasonic vibration-assisted compound casting: Effects of interface treatment temperatures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 890: 145911.
- [31] LI Q Q, JIANG W M, XU Y C, YU L H, NIU Y Q, FAN Z T. Development of prominent bonding strength in Al/Mg bimetal composites prepared by ultrasonic vibration-assisted compound casting: Effects of ultrasonic powers[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 197: 78-93.
- [32] LI Q Q, GUAN F, XU Y C, ZHANG Z, FAN Z T, JIANG W M. Development of Al/Mg bimetal processed by ultrasonic vibration-assisted compound casting: Effects of ultrasonic vibration treatment duration time[J]. *Materials*, 2023, 16(14): 5009.
- [33] XU Y C, JIANG W M, LI Q Q, NIU Y Q, YU L H, YU X P, FAN Z T. Combined effects of ultrasonic vibration and FeCoNiCrCu coating on interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Mg bimetal by compound casting[J]. *China Foundry*, 2024, 5: 588-598.
- [34] LI J L, NIAN Y, LIU X, ZONG Y C, TANG X Y, ZHANG C J, ZHANG L Q. Application of electromagnetic metallurgy in continuous casting: A review[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2024, 34(1): 1-11.
- [35] ZUO Y B, CUI J Z, ZHAO Z H, ZHANG H T, QIN K. Effect of low frequency electromagnetic field on casting crack during DC casting superhigh strength aluminum alloy ingots[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 406(1): 286-292.
- [36] BAN C Y, JIANG D D, LIU L, CUI J Z. Effect of DC and AC magnetic fields on the solidification structure of commercially pure aluminium[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 583: 387-390.
- [37] XUAN W D, LIU H, LI C J, REN Z M, ZHONG Y B, LI X, CAO G H. Effect of a high magnetic field on microstructures of Ni-based single crystal superalloy during seed melt-back[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 47(2): 828-833.
- [38] YU L H, MA Y X, LI Q Q, XU Y C, YU X P, PENG Z W, JIANG W M. Effect of electromagnetic stirring on interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Mg bimetal produced by lost foam compound casting [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 2101-2111.
- [39] 赵佳蕾,付莹,曹志强,钟德水,李廷举. 电磁搅拌对复层材料凝固组织的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(6): 1598-1604.
- ZHAO J L, FU Y, CAO Z Q, ZHONG D S, LI T J. Effect of electromagnetic stirring on the solidification microstructure of composite materials[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(6): 1598-1604.
- [40] YU H, ZHANG G W, LV W Z, XU H, XU C J. Improved microstructure and shear strength of the Al/steel bimetal prepared by compound casting under magnetic field[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 932: 167343.
- [41] XIONG B W, CAI C C, WAN H, LU B P. Fabrication of high chromium cast iron and medium carbon steel bimetal by liquid-solid casting in electromagnetic induction field[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(5): 2978-2982.
- [42] 钟德水,付莹,刘宁,宋肖阳,卢一平,李廷举. 电磁搅拌对 3003/8090 铝合金复层铸锭凝固组织的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(S2): 757-760.
- ZHONG D S, FU Y, LIU N, SONG X Y, LU Y P, LI T J. Effect of electromagnetic stirring on the solidification microstructure of 3003/8090 aluminum alloy composite ingot[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(S2): 757-760.

(责任编辑:李亚敏)