

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

王俊龙 蒋文明 管峰 李广宇 张政 樊自田

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室)

摘要 采用机械振动强化 Al/Mg 双金属复合材料的结合界面,研究了振动频率对消失模固-液复合铸造 Al/Mg 双金属复合材料的界面组织和力学性能的影响。结果表明,振动频率对 Al/Mg 双金属复合材料的界面组织和力学性能有显著影响。随着振动频率增加,Al/Mg 双金属复合材料界面金属间化合物(IMCs)层厚度减小,导致 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 脆性相减少,并且界面 Mg_2Si 相细化,分布由团聚变为分散。当振动频率为 50 Hz 时,Al/Mg 双金属结合界面的平均剪切性能最大,达到 46.83 MPa,相比未振动的 Al/Mg 双金属复合材料性能提升 47.13%。

关键词 振动频率;Al/Mg 双金属复合材料;界面组织;力学性能

中图分类号 TB331;TG249.6

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Vibration Frequency on Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Al/Mg Composites by Lost Foam Casting

Wang Junlong, Jiang Wenming, Guan Feng, Li Guangyu, Zhang Zheng, Fan Zitian

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology,

Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Mechanical vibration was utilized to strengthen bonding interface of the Al/Mg bimetallic composites. The effects of vibration frequency on the interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Mg bimetallic composites by LFC solid-liquid composite casting were investigated. The results indicate that the vibration frequency has a significant effect on the interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Mg bimetallic composites. With the increase of vibration frequency, the thickness of the intermetallic compound(IMCs) layer is decreased, resulting in the decrease of brittle phase of Al_3Mg_2 and $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, and the Mg_2Si phase at the interface is refined with a distribution change from agglomeration to dispersion. When the vibration frequency is 50 Hz, the shear strength of Al/Mg bimetallic composites reaches the maximum of 46.83 MPa, which is 47.13% higher than that of the Al/Mg bimetallic composites without vibration.

Key Words: Vibration Frequency, Al/Mg Bimetallic Composites, Interfacial Microstructure, Mechanical Properties

Al 及 Mg 合金由于符合轻量化的要求和优异的性能被广泛应用于汽车和航空航天等领域。铝合金具有良好的力学性能和优良的铸造性能,镁合金具有较低的密度和良好的阻尼减震性能。Al/Mg 双金属复合材料结合了镁合金和铝合金的优点,具有单一材料不具有的性能,得到了广泛关注^[1]。

Al/Mg 双金属复合材料可以通过焊接^[2]、挤压^[3]、

轧制^[4]或复合铸造^[5]等方法制备。其中,消失模铸造(LFC)技术是一种近净成形铸造技术,将消失模铸造工艺应用于 Al/Mg 双金属复合材料,可以实现制备复杂结构双金属铸件、固态嵌体无需额外固定、泡沫分解产物为还原性气体,可防止金属液和固态嵌体氧化等^[6]。但是,Al/Mg 双金属复合材料的制备存在难题,主要是铝镁结合界面会出现 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 和 Al_3Mg_2 脆而硬的金

收稿日期:2022-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075198);国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008304);国家磁约束核聚变能发展研究专项基金资助项目(2018YFE0313300);新金属材料国家重点实验室开放课题重点基金资助项目(2021-ZD07)

第一作者简介:王俊龙,男,1999 年出生,硕士研究生,武汉(430074),E-mail:m202071008@hust.edu.cn

通信作者:蒋文明,男,1982 年出生,副教授,武汉(430074),E-mail:wmjiang@hust.edu.cn

引用格式:王俊龙,蒋文明,管峰,等. 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, et al. Effects of vibration frequency on interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Mg composites by lost foam casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):672-677.

属间相,明显削弱双金属复合材料的力学性能^[6,7]。

研究发现,减小 Al/Mg 双金属复合材料结合区金属间化合物层的厚度可以有效提高复合材料的结合强度,在铸造过程中施加振动被认为是减少 Al/Mg 双金属复合材料结合区界面层厚度的有效方法^[8]。其中,振动频率是振动产生作用的一个重要参数,然而,关于振动频率对 Al/Mg 双金属复合材料微观结构和力学性能影响的研究报道很少。

本课题将机械振动施加于消失模铸造固-液复合 Al/Mg 双金属复合材料制备过程,研究振动频率对 Al/Mg 双金属复合材料界面组织和力学性能的影响,为其产业化应用提供参考。

1 试验材料与方法

消失模铸造固-液复合 Al/Mg 双金属复合材料所用的嵌体为 A356 铝合金,浇注到泡沫模样中的是 AZ91D 镁合金,其成分见表 1。

表 1 A356 和 AZ91D 合金的化学成分

合金	w_B						
	Zn	Mn	Al	Fe	Mg	Si	Ti
AZ91D	0.62	0.23	9.08	—	余量	—	—
A356	—	—	余量	0.205	0.439	6.810	0.017

首先使用线切割切出 $\phi 10\text{ mm}\times 110\text{ mm}$ 的铝棒,使用除油剂清洗嵌体表面,依次使用 80~2 000 目砂纸打磨嵌体表面,去除线切割痕迹。

消失模复合模型的制作包括泡沫模样和固态嵌体两部分。首先将泡沫切割成各种尺寸,泡沫包括与嵌体组合的试样、直浇道和内浇道,用消失模铸造专用胶水粘接浇道部分,然后将嵌体嵌入试样中完成复合模型。将复合模型均匀地涂刷上消失模铸造专用涂料,在 50℃ 下烘干。在浇注过程中,使用 K 型热电偶和计算机数据采集系统测量铝嵌体表面的温度变化,制备装置及浇注系统见图 1。

将模样放入砂箱中,加干砂振动紧实,在砂箱顶端放置塑料薄膜,抽真空,使真空度达到 0.03 MPa。在体积分数为 0.5% 的 SF_6 和 99.5% 的 CO_2 的保护气氛下,采用坩埚电阻炉熔炼镁合金。浇注温度为 720℃,振动时间设置为 300 s,振动频率分别为 20、35、50 Hz。

浇注后,用线切割将双金属试样沿中间位置切割得到金相试样。采用砂纸依次打磨至 2 000 目,使用 Al_2O_3 抛光液抛光。清洗后使用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀 8~10 s,使用乙醇溶液进行超声波清洗,烘干后保存。

采用 MeF-3 金相显微镜和 Quanta200 扫描电镜观察界面处微观组织特征,并采用 Image Pro-plus 软件测

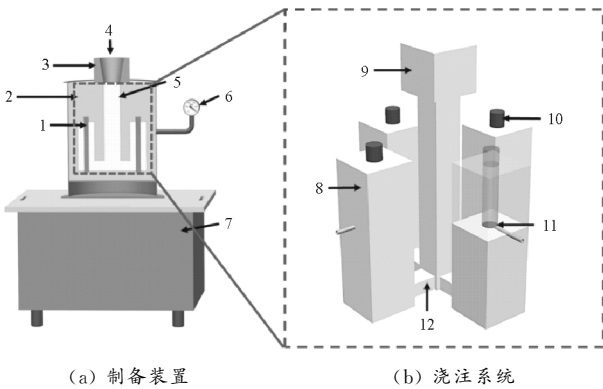


图 1 双金属复合材料制备原理图及浇注系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of bimetallic composite and gating system

1、10.A356 铝合金嵌件 2.砂型 3.浇口杯 4.AZ91D 镁合金 5.泡沫模型 6.真空表 7.振动台 8.泡沫 9.冒口 11.测温点 12.内浇道

量界面层厚度。使用 Zwick Z100 通用测试仪测试双金属试样的剪切强度,其原理见图 2,压缩速率为 0.5 mm/min,在相同位置选择 6 个试样,取平均值。利用 MeF-3 光学显微镜对 A356/AZ91D 双金属复合材料的断裂面形貌进行观察和分析。

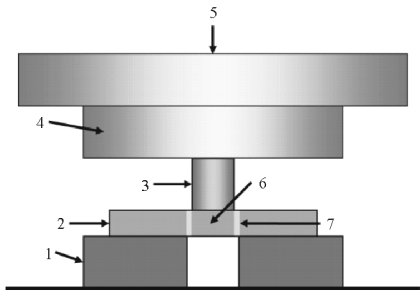


图 2 剪切测试原理图

Fig.2 Schematic diagram of shearing test

1.下模 2.AZ91D 镁合金 3.上模 4.测试机 5.载荷 6.A356 铝合金 7.界面

2 试验结果与分析

2.1 振动频率对 Al/Mg 界面层宏观组织的影响

图 3 为 720℃ 时不同频率下获得的 Al/Mg 双金属复合材料界面过渡区域的 SEM 形貌。界面层分为 3 个区域,其中区域 I 为 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \delta\text{-Mg}$ 共晶层,区域 II 为 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \text{Mg}_2\text{Si}$ 层,区域 III 为 $\text{Al}_3\text{Mg}_2 + \text{Mg}_2\text{Si}$ 层,靠近铝基体的 II 层和 III 层为金属间化合物(IMCs)层。可以看到,施加振动之后,不同参数的平均界面层厚度发生明显变化,界面层的 3 个区域的平均厚度也有明显改变。同时,施加振动之后界面层受到的扰动增加,界面层不同区域的分界线变为不规则的曲线。

图 4 为不同振动频率下各个界面层厚度。可以看出,未施加振动的 Al/Mg 双金属复合材料 IMCs 层平均厚度为 1 041.7 μm ,界面层总厚度为 1 830.8 μm ,而

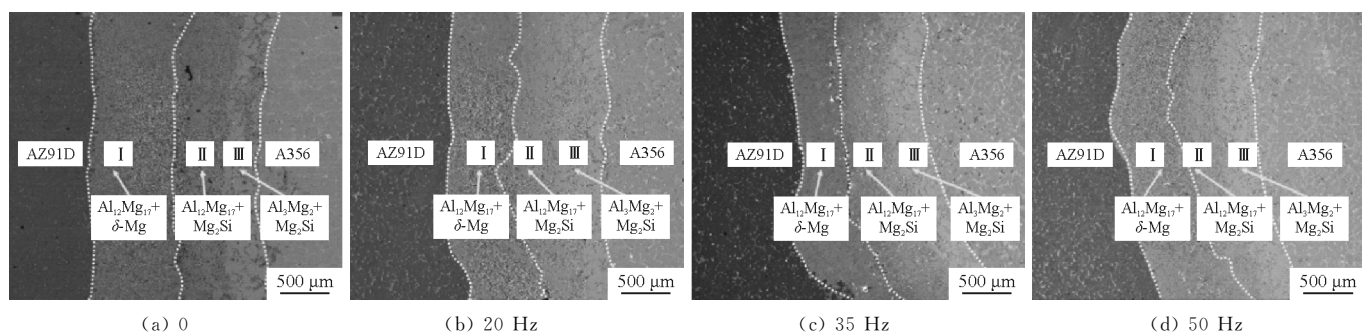


图 3 不同振动频率下 Al/Mg 双金属复合材料界面层不同区域宏观 SEM 形貌

Fig.3 Macro SEM morphologies of different regions in interface layer of Al/Mg bimetallic composites at different vibration frequencies

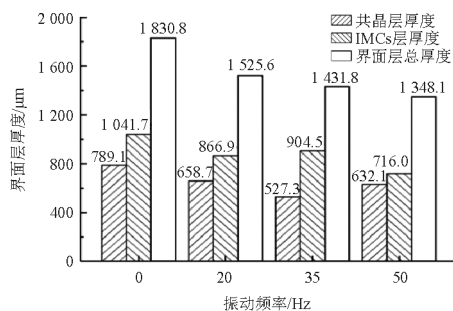


图 4 不同振动频率下 Al/Mg 双金属复合材料界面层厚度

Fig.4 Interfacial layer thickness of Al/Mg bimetallic composite at different vibration frequencies

施加振动之后,随着振动频率增加,IMCs 层厚度和界面层总厚度均趋于减小。在振动 50 Hz 时 IMCs 层厚度达到最小值 716.0 μm,相对于未施加振动减小了 31.2%。

2.2 振动频率对 Al/Mg 界面层微观组织的影响

图 5 为在 720 °C 施加不同振动频率下的 Al/Mg 双金属复合材料界面层不同区域的微观结构。从图 5a~图 5c 看出,Mg₂Si 颗粒在 IMCs 层中呈现团聚倾向,形貌多为粗大的块状或聚集的长条状。从图 5e、图 5f、图 5h、图 5i、图 5k、图 5l 中可以看出,在施加振动之后,

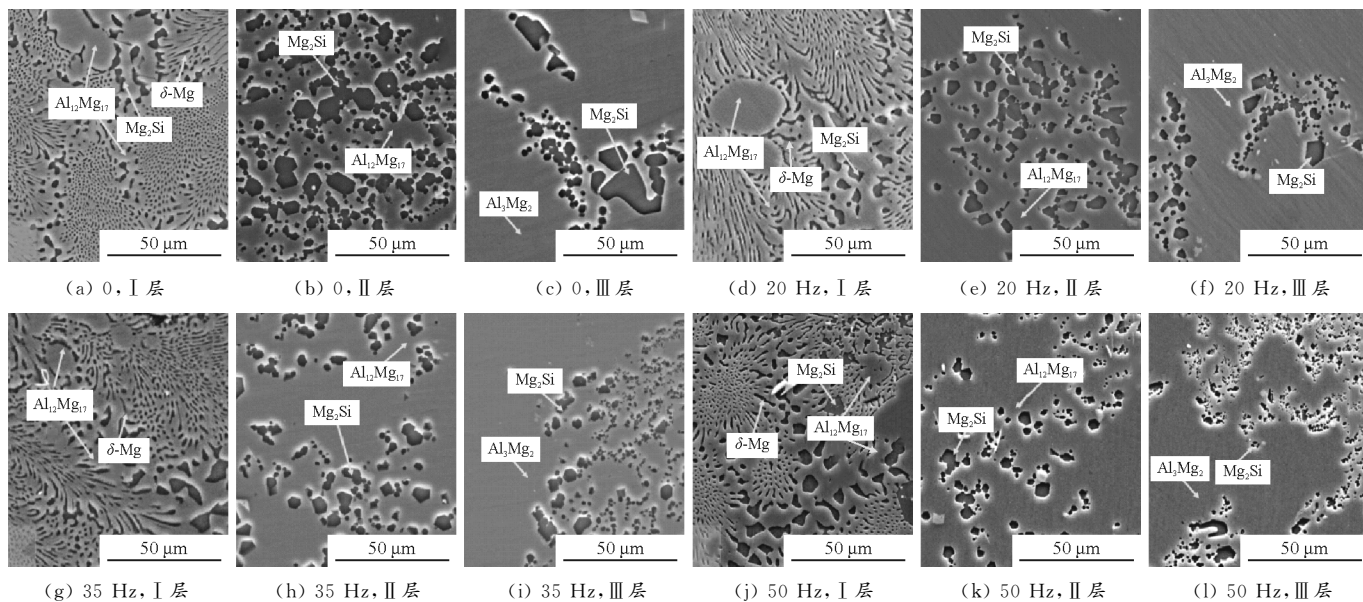


图 5 Al/Mg 双金属复合材料界面层不同区域微观 SEM 形貌

Fig.5 SEM morphologies of different regions in interfacial layer of Al/Mg bimetallic composites

IMCs 层 Mg₂Si 的颗粒明显被细化,尺寸减小,并且趋于团聚的 Mg₂Si 颗粒得到分散,更多以细小颗粒状均匀分散在整个区域中。

利用 Image-Pro-Plus 软件测量并计算得到界面层不同区域 Mg₂Si 颗粒的数目和平均直径,结果见图 6。可以看出,随着振动频率增加,II 层的 Mg₂Si 颗粒被细化,同时数量上趋于增加,这一规律在 Al₃Mg₂ 层更为显著,当振动频率为 50 Hz 时,II 层和 III 层的 Mg₂Si 颗粒细化效果最明显。

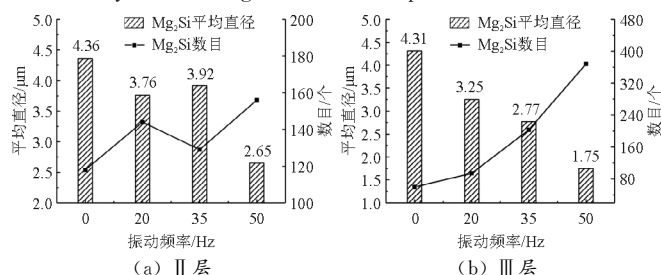

 图 6 Al/Mg 双金属界面不同区域的 Mg₂Si 颗粒尺寸与数量

 Fig.6 Size and quantity of Mg₂Si particles in Al/Mg bimetallic composites at different regions of the interface

2.3 振动频率对 Al/Mg 复合材料力学性能的影响

图 7 为施加不同振动频率下的 Al/Mg 双金属复合材料的剪切强度。随着振动频率增加, Al/Mg 双金属

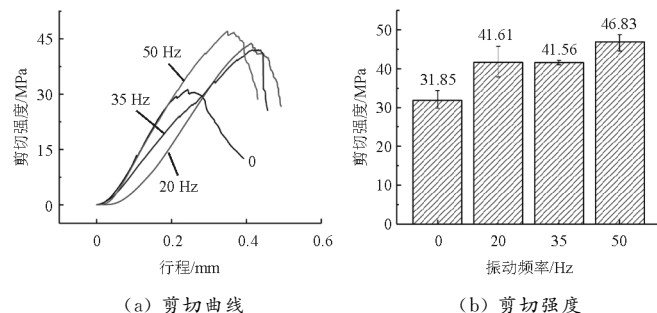


图 7 不同振动频率下 Al/Mg 双金属复合材料的剪切强度及剪切曲线

Fig.7 Shear strength and shear curves of Al/Mg bimetallic composites at different vibration frequencies

复合材料的剪切强度有增加的趋势。在振动频率为 50 Hz 时剪切性能达到最大, 为 46.83 MPa。振动频率为 20、35、50 Hz 时双金属复合材料剪切强度分别达到 41.61、41.56、46.83 MPa, 相比于未施加振动分别提高了 30.64%、30.49%、47.13%。

图 8 为在 720 °C 不同振动频率下的双金属试样断口形貌。剪切强度越高, 一定程度上产生的裂纹延伸的距离越长, 延伸范围更大。未施加振动的一组, 断裂的初始裂纹从靠近 Al 基体的 Al_3Mg_2 层开始延伸, 一直延展到 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \text{Mg}_2\text{Si}$ 层和共晶层交界的过渡位置, 并未延展到共晶层和基体上, 因为在过渡区域容易产生夹杂等缺陷, 裂纹可能优先沿过渡区域扩展而导致 Al/Mg 双金属复合材料力学性能变差。而施加振动之后, 断口裂纹均穿过过渡区域延伸到 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \delta\text{-Mg}$ 共晶层, 这与测得的剪切强度规律一致。

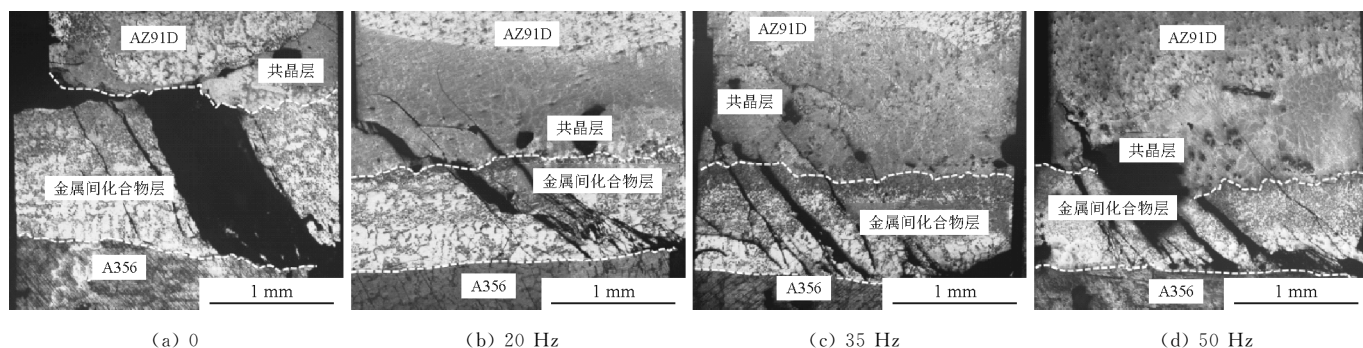


图 8 不同振动频率下 Al/Mg 双金属复合材料界面层断口形貌

Fig.8 Fracture morphologies of interfacial layer of Al/Mg bimetallic composites at different vibration frequencies

3 讨论

Al_3Mg_2 相和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相是 Al/Mg 双金属复合材料 IMCs 层的主要相组成。与 Al 和 Mg 基体相比, 这些相具有更高的硬度和更低的塑性变形能力。因此, 在制备 Al/Mg 双金属复合材料时, 减少脆性相是提高材料结合性能的关键。IMCs 层厚度对 Al/Mg 双金属复合材料的脆性相数量和结合性能有重要影响^[9]。

结合剪切强度结果(见图 7)和界面厚度(见图 4)可知, 施加振动之后, 界面层的厚度明显减小, 同时剪切性

能提高。采用热电偶测量了 AZ91D 熔体和 A356 嵌体结合区的温度, 并得到相应的一阶导数曲线, 见图 9。0~10 s 为升温阶段, 50~200 s 为凝固阶段, 此时共晶反应和相析出过程尚未开始, 200 s 之后在结合区 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 和 Al_3Mg_2 相开始生成, 之后发生共晶反应, $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \delta\text{-Mg}$ 共晶组织形成, 300 s 时振动结束, 温度达到固相线温度, 界面反应已经基本结束。

图 9 为 Al/Mg 双金属复合材料凝固阶段的温度-微分曲线。从图 9a 中可以明显看到降温阶段施加振动的温度曲线更低, 意味着降温速率更大。对 50~200 s

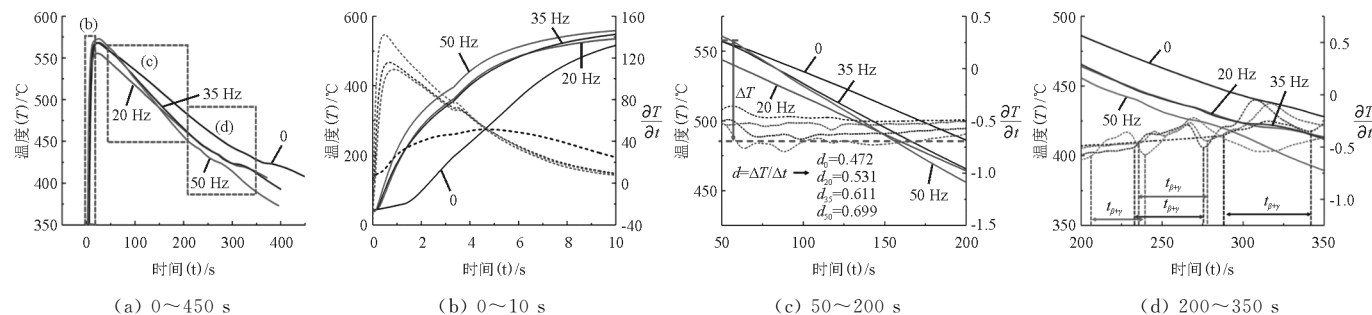
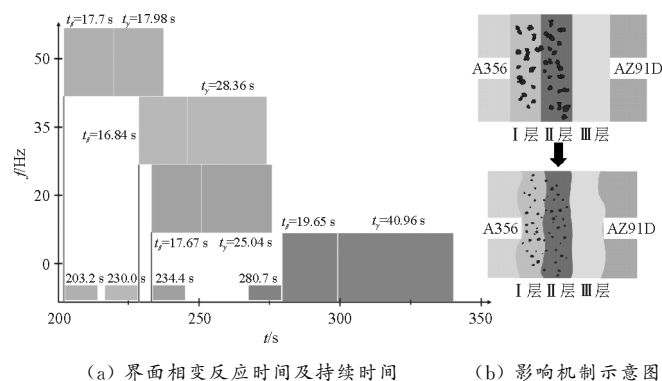


图 9 Al/Mg 双金属复合材料凝固阶段的温度-时间微分曲线

Fig.9 Temperature-differential curves of Al/Mg bimetallic composites during solidification period

的冷却曲线进行计算,结果见图9c,其中 ΔT 为温度差值, Δt 为时间差值,冷却速率为 $d = \Delta T / \Delta t$ 。结果表明,随着振动频率的增加,界面层凝固过程的冷却速率从 $0.472\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 逐渐增加到 $0.699\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,熔体从液相线温度降到固相线温度所需的时间缩短,发生相变的初始时间也因此提前。图10为振动频率对Al/Mg双金属界面形成的影响。将 Al_3Mg_2 、 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相形成的时间分别记为 t_{β} 、 t_{γ} ,经过定量分析,得到不同振动频率下Al/Mg双金属复合材料界面相变反应时间及持续时间,见图10a。由于施加振动之后降温更快,发生相变的起始时间和相变的持续时间都有所改变,0~50 Hz对应的金属间化合物层形成总时间分别为60.61、42.71、45.2、35.68 s。



(a) 界面相变反应时间及持续时间 (b) 影响机制示意图

图10 振动频率对Al/Mg双金属界面形成的影响

Fig.10 Influence of vibration frequency on formation of Al/Mg bimetallic interface

Al/Mg双金属复合材料结合区对流传热的强化可能是振动对冷却速率和界面层厚度影响的主要原因^[10],振动促进了重熔区内部的溶质交换和对流传热,使固、液两相进行更频繁的热交换,从而导致界面接合区的冷却速率增加。因此,相变的持续时间缩短,这导致了IMCs层的厚度减小,同时也意味着 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 相的数量减少,这两种脆性相的减少有利于提高Al/Mg双金属复合材料的界面结合性能^[11]。

界面层的厚度可能还受到元素扩散的影响。振动频率的增加,促进了更多的Al和Si元素扩散到界面层与来自AZ91D的Mg元素进行反应,冷却速率增加与元素扩散增加一定程度上对界面层厚度的作用是竞争关系^[12]。因此,施加35 Hz相比20 Hz的振动在界面厚度的变化上差别不大,但随着振动频率增加,冷却速率进一步增大,其对界面厚度减小的影响作用增大,IMCs层的厚度进一步减小,施加50 Hz的振动使得Al/Mg双金属复合材料的界面结合性能更佳。

在界面层的凝固过程中, Mg_2Si 相由从A356扩散的Si元素和从AZ91D扩散的Mg元素组合而成,并在IMCs层中聚集为大块或条状(见图10b)。施加振动

后, Mg_2Si 颗粒受到垂直振动的冲击而被细化,分布从团聚变为分散。根据现有的颗粒增强复合材料研究,局部颗粒富集区是裂纹最有利的形核位置。当 Mg_2Si 颗粒体积较大且呈团簇状时,团簇状颗粒和大颗粒在应力过程中更容易断裂,这些断裂颗粒也可被视为裂纹扩展的通道。复合材料中的裂纹颗粒无法传递任何载荷,因为应力沿着裂纹表面释放^[13],导致复合材料的强度降低。因此, Mg_2Si 颗粒的细化和均匀分布对增强Al/Mg双金属复合材料的力学性能有更好的效果,这是Al/Mg双金属复合材料力学性能提高的另一个原因。

4 结 论

(1)随着振动频率增加,Al/Mg双金属复合材料中金属间化合物层厚度趋于减小,脆性相减少。振动频率对冷却速率产生影响的主要原因是增加了熔体中的强制对流传热,导致冷却速率增大,熔体从液相线降温到固相线所需的时间缩短,处于熔融态的界面重熔区温度下降变快,缩短了元素扩散时间和相变时间,界面层的厚度随之减小。

(2)振动可以细化和分散Al/Mg双金属复合材料中的 Mg_2Si 相。在施加振动之后, Mg_2Si 不易发生团聚,以小而分散的颗粒均匀分布在金属间化合物层。随着振动频率增加,各个区域的 Mg_2Si 颗粒尺寸减小,数量增加,50 Hz时的细化分散效果最佳。

(3)Al/Mg双金属复合材料的剪切强度随着振动频率的增加而提高。随着振动频率增加,界面层厚度(主要是金属间化合物层厚度)逐渐降低,脆性相减少。当振动频率为50 Hz时,获得的双金属试样剪切强度最大,达到46.83 MPa,相比无振动时提升47.13%。

参 考 文 献

- [1] XU T C, YANG Y, PENG X D, et al. Overview of advancement and development trend on magnesium alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019,7(3): 536-544.
- [2] GAO Y, MORISADA Y, FUJII H, et al. Dissimilar friction stir lap welding of magnesium to aluminum using plasma electrolytic oxidation interlayer[J]. Materials Science & Engineering, 2018, A711: 109-118.
- [3] FENG B, XIN Y C, GUO F L, et al. Compressive mechanical behavior of Al/Mg composite rods with different types of Al sleeve[J]. Acta Materialia, 2016,120: 379-390.
- [4] TAYYEBI M, ADHAMI M, KARIMI A, et al. Effects of strain accumulation and annealing on interfacial microstructure and grain structure(Mg and Al_3Mg_2 layers) of Al/Cu/Mg multilayered composite fabricated by ARB process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021,14: 392-406.
- [5] 冯世鹏,陈翌庆,刘一,等. Nd对Mg/Al-20Si液固复合铸造界面组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 755-759.
- [6] 李广宇,樊自田,蒋文明,等. 浇注温度对消失模铸造固-液复合Al-Mg双合金界面层的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(5): 527-531.

WC 预制体柱增强铁基复合材料的显微组织和性能

张 飞^{1,3} 王兴宇^{2,3} 李祖来^{2,3} 山 泉^{2,3} 廖泽鑫^{2,3} 苟浩杰^{2,3} 向信华^{2,3}

(1.昆明理工大学机电工程学院; 2.昆明理工大学材料科学与工程学院;

3.昆明理工大学金属先进凝固成形及装备技术国家地方联合工程实验室)

摘 要 采用砂型铸造工艺制备具有预制体结构的 WC 颗粒增强铁基复合材料,研究不同预制体直径对 WC 增强铁基复合材料的显微组织和三体磨料磨损性能的影响。结果表明,预制体直径为 5 mm 和 10 mm 时,预制体与基体间均产生了明显的过渡层。复合材料的显微组织主要有含 WC、Fe₃W₃C 和 M₇C₃ 型碳化物,且过渡层和预制体区域比高铬铸铁基体具有更高的硬度,预制体直径为 10 mm 的复合材料具有最小的磨损失重,耐磨性最佳,磨损形貌主要表现为犁沟和剥落等特征。

关键词 WC 颗粒;铁基复合材料;预制体直径;耐磨性

中图分类号 TB331;TG113

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of WC Preform Column Reinforced Iron-based Composites

Zhang Fei^{1,3}, Wang Xingyu^{2,3}, Li Zulai^{2,3}, Shan Quan^{2,3}, Liao Zexin^{2,3}, Gou Haojie^{2,3}, Xiang Xinhua^{2,3}

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology;

2.School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology;

3.National and Local Joint Engineering Laboratory for Advanced Metal Solidification and Equipment Technology, Kunming University of Science and Technology)

Abstract: The WC particle reinforced iron-based composites with prefabricated structure were prepared by sand casting process. The influence of different prefabricated column diameters on the microstructure and three-body abrasive wear properties of WC reinforced iron-based composites was investigated. The results indicate that when the preform diameter is 5 mm and 10 mm, an obvious transition layer is formed between the preform and the iron-based matrix. The microstructure of the composite is mainly composed of WC, Fe₃W₃C and M₇C₃ carbides, and the hardness of the transition layer and preform zone is higher than that of the high chromium cast iron matrix. The composites with prefabricated column diameter of 10 mm exhibit the lowest wear rate and the optimal wear resistance, where the wear morphologies are characterized by furrows and spalling.

Key Words: WC Particles, Iron-based Composite, Preform Column Diameter, Wear Resistance

收稿日期:2022-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52071166,51871116);云南省高唯院士工作站资助项目(202005AF150006)

第一作者简介:张飞,男,1992 年出生,博士,昆明(650093),E-mail:15096694110@163.com

通信作者:李祖来,男,1977 年出生,教授,昆明(650093),E-mail:lizulai@126.com

引用格式:张飞,王兴宇,李祖来,等. WC 预制体柱增强铁基复合材料的显微组织和性能[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(6):677-680.

ZHANG F, WANG X Y, LI Z L, et al. Microstructure and properties of WC preform column reinforced iron-based composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):677-680.

- [7] 蒋文明,李广宇,管峰,等. 热处理对消失模铸造固-液复合 Al/Mg 双金属界面组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(10): 1 050-1 056.
- [8] MUHAMMAD N A, WU C S, TIAN W. Effect of ultrasonic vibration on the intermetallic compound layer formation in Al/Cu friction stir weld joints[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 785: 512-522.
- [9] 张政,蒋文明,李广宇,等. 浇注温度和 Ni 涂层对消失模铸造 Al/Mg 双金属界面组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(5): 539-543.
- [10] KUMAR S, WU C. Suppression of intermetallic reaction layer by ultrasonic assistance during friction stir welding of Al and Mg based alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827: 154 343.

- [11] GUAN F, JIANG W M, WANG J L, et al. Development of high strength Mg/Al bimetal by a novel ultrasonic vibration aided compound casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 300: 117 441.
- [12] PATEL V K, BHOLE S D, CHEN D L. Microstructure and mechanical properties of dissimilar welded Mg-Al joints by ultrasonic spotwelding technique[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(3): 202-206.
- [13] WANG Z, SONG M, SUN C, et al. Effects of particle size and distribution on the mechanical properties of SiC reinforced Al-Cu alloy composites[J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528(3): 1 131-1 137.

(编辑:彭瑾)