

固-液复合铸造制备双金属复合材料的研究进展

辜 诚¹ 程 进¹ 闻福林¹ 赵建华^{1,2}

(1.重庆大学材料科学与工程学院; 2.国家镁合金材料工程技术研究中心)

摘 要 固-液复合法可以制造出结构复杂的双金属复合材料,具有生产成本低、加工工艺简单、合金适用范围广、能耗低、产品界面结合强度高的特点。综述了固-液复合铸造技术的发展及应用,分析了工艺参数对固-液双金属铸件界面品质的影响,阐述了固-液复合铸件界面组织与性能及界面的结合机理,探讨了固-液复合铸造双金属材料的研究方向。

关键词 双金属复合材料;固-液复合铸造;微观组织;界面结合

中图分类号 TB331;TG249.9

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Preparation of Bimetallic Composites by Solid-liquid Compound Casting

Gu Cheng¹, Cheng Jin¹, Wen Fulin¹, Zhao Jianhua^{1,2}

(1.College of Materials Science and Engineering, Chongqing University;

2.National Magnesium Alloy Material Engineering and Technology Research Center)

Abstract: The solid-liquid compound method can produce bimetallic composites with complex internal structure, which has the characteristics of low production cost, simple processing technology, wide application range of alloys, low energy consumption, and high bonding strength of interface. The development and application of solid-liquid compound casting technology were reviewed, and the influence of process parameters on the interface quality of solid-liquid bimetallic castings was analyzed. Meanwhile, the interface microstructure, properties, and interface bonding mechanism of solid-liquid compound castings were expounded, and the research direction of solid-liquid compound casting bimetallic materials were prospected.

Key Words: Bimetallic Composites, Solid-liquid Compound Casting, Microstructure, Interface Bonding

近年来,工业的迅速发展对材料的综合性能提出了更高的要求。单一组分的金属材料受性能以及生产条件的限制,难以用传统的生产手段实现兼具高性能和轻量化的特点^[1]。双金属复合材料是一种将两种或多种不同金属通过调控组元和工艺实现冶金结合而成的新型复合材料^[2],其中各金属之间可保持性能的独立,又可以作为整体实现强度、韧性、摩擦性能、耐热性等的同步改善,获得广泛关注。目前,双金属材料以其兼具不同优良互补性能的特点,已被应用于航空航天、汽车船舶、机械化工等领域^[3~5]。

双金属材料的制备方法包括轧制复合法^[6]、粉末冶金法^[7]、扩散连接^[8]、挤压^[9]、爆炸焊^[10]、搅拌摩擦焊^[11]、铸造复合法^[12]等。其中,固-液复合铸造是将某

种液态金属直接与另一种固态金属接触,使液-固金属的原子在界面相互扩散,并生成均匀分散在基体中的金属间化合物以实现牢固结合,进而形成复合材料的方法。相比其他制备方法,固-液复合铸造具有生产成本低、加工工艺简单、合金适用范围广、能耗低、产品界面结合强度高的特点,可以制造出内部结构复杂的双金属复合材料,并且可通过优化工艺参数调控界面反应产物以实现固-液复合铸件的有效连接。

鉴于固-液复合铸造的显著优势,从固-液复合铸造的工艺特点出发,对其制备的双金属材料性能特点及研究进展进行综述,系统性地探讨固-液复合铸造工艺参数的调控优化及应用范围,为其在双金属材料制备方面的进一步发展提供参考。

收稿日期:2021-12-30

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项基金重点资助项目(cstc2019jcsx-mbdX0039);四川省遂宁市重点研发资助项目(20191300000994244)

第一作者简介:辜诚,男,1990年出生,助理研究员,重庆(400030),E-mail:gucheng.90@cqu.edu.cn

通信作者:赵建华,男,1962年出生,教授,重庆(400030),E-mail:zjhzwf@sina.com

引用格式:辜诚,程进,闻福林,等. 固-液复合铸造制备双金属复合材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(6):681-687.

GU C, CHENG J, WEN F L, et al. Research progress in preparation of bimetallic composites by solid-liquid compound casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):681-687.

1 固-液复合铸造技术的发展及其应用

固-液双金属复合铸造技术既适用于同种双金属材料制备,如 Mg/Mg^[13], Al/Al^[14,15] 及钢/钢^[16] 等,也适用于异种双金属材料的复合,如钢/铸铁^[17,18],钢/铝^[19,20],铜/铝^[21,22],镁/钢^[23~26],镁/钛^[27~29] 等,因而被广泛应用在交通运输、航空航天、生物医药、装备制造等领域,如钢芯铝绞线,铝/铝或者铸铁/铝复合的发动机缸体,不锈钢/铝空管管状靶材,高铬铸铁/碳钢复合锤头等。根据固、液态金属的相对位置,固-液双金属复合铸造分为内包覆技术和外包覆技术。

内包覆技术是将固态金属作为型芯,置于模具中,再浇注液态金属。图 1 为内包覆技术全过程^[30]。图 2 为采用内包覆铸造技术制备的双金属锭实物及形貌^[31],得到的 AA4045/AA3003 双金属界面由 Si 和 Mn 扩散形成的宽度为 15 μm 的扩散层组成,其界面粘接强度较高,达 107.3 MPa,可有效地应用于制备包覆汽车发动机冷凝管的钢坯。

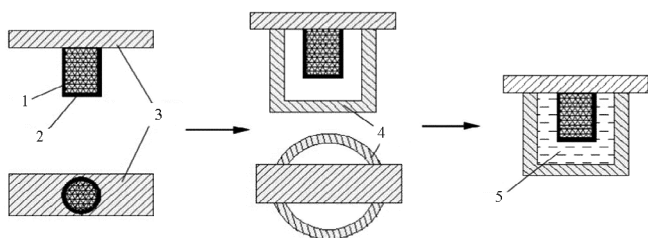


图 1 内包覆技术示意图^[30]

Fig.1 Schematic diagram of the inner cladding technology

1.型芯 2.涂层 3.支撑板 4.模具 5.金属液

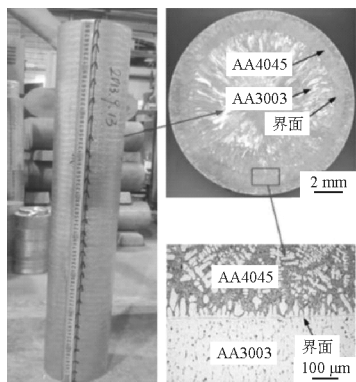


图 2 内包覆 AA4045/AA3003 双金属锭实物图及显微形貌^[31]

Fig.2 Entity and micromorphology of the inner cladding AA4045/AA3003 billet

外包覆技术是将固态金属作为外镶件,安置于模具之中,再浇注液态金属。固/液态金属间将形成外界面,由于金属液热量散失的方向由内及外,作为外镶件的固态金属所处的温度相较于作为型芯的固态金属较低,因此外包覆的双金属界面结合相较于内包覆更困难。图 3 为采用外包覆技术制备 Al/AZ91D 双金属材料的技

术过程^[32],预先将 Al 涂层通过电弧喷涂的方式喷涂在模具内表面,再浇注 AZ91D,制备 Al/AZ91D 双金属复合材料。结果表明,在表面包覆一层 Al 涂层后,AZ91D 的耐腐蚀性得到了提高。

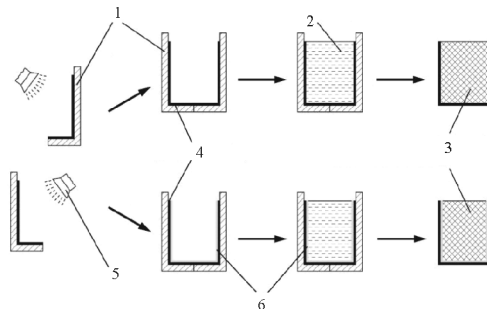


图 3 固-液双金属复合铸造外包覆技术的流程示意图^[32]

Fig.3 Flow chart of outer cladding by solid-liquid compound casting

1.模具 2.金属液 3.电弧喷涂/铸态双金属材料
4.喷涂层 5.电弧喷枪 6.喷涂夹层

制备内外包覆双金属材料的铸造方法并不单一。针对不同的产品需求,往往需要采取不同的铸造工艺与方法,如挤压铸造、重力铸造、压铸、砂型铸造、消失模铸造等。表 1 为近年来在固-液复合铸造技术中使用的主要铸造方法及典型的工业应用。

表 1 固-液双金属复合铸造的典型应用

Tab.1 Typical application of solid-liquid bimetal compound casting process

材料	复合铸造方法	工业应用
ZL101 铝合金-HT250 铸铁 ^[33]	石膏型铸造	汽车发动机缸体
40Cr-Q345B ^[34]	离心铸造	双金属环坯
5038 铝-AZ31B 镁 ^[35]	重力铸造	复合板
铝-金刚石 ^[36]	压铸	集成电路封装材料
高铬铸铁-钢 ^[17]	离心铸造	复合管,钻井泵缸套

随着固-液双金属材料应用范围的不断扩大,可实现高效自动化生产的金属型重力铸造和低压铸造方法得到研究者的青睐。图 4 和图 5 分别为金属型铸造^[27]和低压铸造^[37]的工艺原理图。金属型铸造由于其铸型的可重复利用性,生产的铸件尺寸和品质的稳定性可以得到保证。同时,通过金属型对铸件的快速冷却作用,可获得晶粒细密的铸件,显著提高力学性能。低压铸造

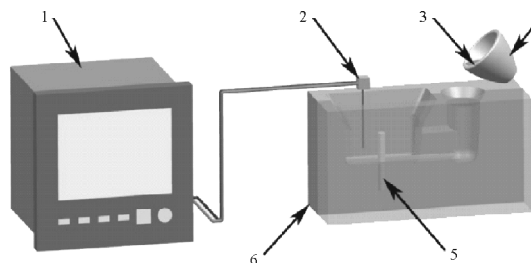


图 4 钛/镁固-液双金属复合铸造示意图^[27]

Fig.4 Schematic diagram of solid-liquid compound casting for Ti/Mg bimetallic material

1.无纸记录仪 2.热电偶 3.AZ91D 熔体 4.坩埚 5.TC 棒 6.铸型

过程中由于气压保持到铸件完全凝固为止,在压力作用下,金属液的流动性得到提高,并使铸件在结晶凝固过程中得到充分的补缩,因此得到的铸件组织致密、成形精度高。另外,相比一般的压力铸造,低压铸造所需的压力较小,且由于液流和气流方向一致,充型平稳,可有效减少气孔、夹杂等缺陷的产生。

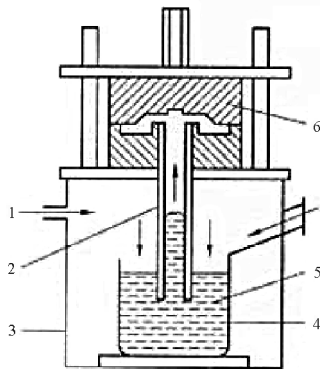


图5 低压铸造示意图^[37]

Fig.5 Schematic diagram of the low-pressure casting

1.压缩气体 2.升液管 3.密封容器 4.坩埚 5.金属液 6.铸型

2 工艺参数对固-液双金属界面的影响

2.1 表面处理

在固-液复合铸造过程中,改善液态金属熔体与固态金属表面之间的反应条件具有重要的意义^[38]。固相金属的表面粗糙度、固-液界面的润湿性、固-液界面的反应活性等都决定着固-液复合铸件最终的界面性能。利用物理或化学方法对固态金属进行表面处理,可以改善固-液界面的反应条件。

近年来固-液复合研究中所采用的表面处理方法见表2。主要分为物理改性和化学改性,其中物理改性包

表2 固-液双金属复合铸造固相的典型表面处理

Tab.2 Typical surface treatment of solid-phase in solid-liquid bimetal compound casting

分类	材料	表面处理方法
物理处理	99.96%纯铜-99.8%纯镁 ^[42]	机械磨抛,表面清洗
	高硅铝合金-ZL104 铝合金 ^[14]	机械加工凹槽
	5083 铝合金-AZ31B 镁合金 ^[35]	机械磨抛,表面清洗
	2024 铝合金-6061 铝合金 ^[15]	表面清洗,除氧化膜
	ZL105 铝合金-AZ91D 镁合金 ^[43]	表面除氧化膜
化学处理	ZL114A 铝合金/20 号钢 ^[19]	表面改性,热浸铝
	Al-20Si 铝合金/Mg-Nd 镁合金 ^[44]	锌酸盐浸锌,高温铝硅钎剂处理
	ZL102 铝合金-2Cr12NiMo1W1V 钢 ^[20]	钢表面电镀镍
	AM60 镁合金-A390 铝合金 ^[45]	铝表面锌酸盐处理,镀锌
	T2 纯铜-6061 铝合金 ^[21]	铜表面化学镀镍-磷
	铝-AZ91D 镁合金 ^[46]	Al 表面电弧喷涂的锌涂层
	AZ91D 镁合金-Q235 钢 ^[23]	Q235 表面热浸铝
	AZ91D 镁合金-0Cr19Ni9 钢 ^[24]	0Cr19Ni9 热浸铝
	TC4 钛合金-AZ91D 镁合金 ^[28]	TC4 表面热浸锌
	TC4 钛合金-AZ91D 镁合金 ^[27]	TC4 表面电沉积镍

括机械处理、激光冲击等,主要目的是去除固相金属表面的水渍、油污和氧化膜或获得具有一定粗糙度或特定形貌的可接受表面,从而增强液态金属熔体与固态金属表面之间的润湿性以及提高双金属间的机械咬合作用^[39,40];而化学改性则是指利用电镀、热浸、电弧喷涂、物理/化学气相沉积等方法在固相金属表面引入中间层金属,达到强化或调控固-液界面反应程度的目的,最终实现固-液双金属材料界面的冶金或化学结合^[41]。

2.2 铸造工艺参数

表3为采用不同的铸造工艺条件下获得的最优铸造工艺参数。结果表明,优化铸造工艺参数,是获得具备良好冶金结合及力学性能的界面的前提条件。如对浇注温度的控制,当浇注温度过低,则固相金属表面不能充分融合扩散,固-液界面无法形成有效的冶金连接;而浇注温度过高,原子过度扩散又会导致金属间化合物大量产生,严重恶化固-液界面力学性能。

表3 典型的固-液双金属复合铸造工艺参数

Tab.3 Process parameters of typical solid-liquid bimetal

compound casting		
双金属种类	铸造工艺	工艺参数
低碳钢-高铬铸铁 ^[18]	离心铸造	外层浇注温度为 1 572 ℃,内层浇注温度为 1 450 ℃,铸型预热温度为 200 ℃
CuZn37 黄铜-AA7075 铝合金 ^[22]	连续复合铸造	铝合金浇注温度为 800 ℃
AZ91D 镁合金-低碳钢 ^[26]	金属型铸造	浇注温度为 750 ℃
ZL105 铝合金-AZ91D 镁合金 ^[47]	金属型铸造	浇注温度为 680 ℃,铸型预热温度为 300 ℃
Al4.5Cu 合金-CP 纯铝 ^[48]	复合挤压铸造	挤压浇注温度为 750 ℃,模具预热温度为 250 ℃

表4为固-液复合铸造中有关固相的工艺参数。液固体积比是影响界面结合的关键因素,其主要与浇注的液态金属对固相基体输入热量相关。只有当浇注的金属液提供足够高的热量,才能使界面实现完全的冶金结

表4 固-液复合铸造中的固相工艺参数

Tab.4 Solid-phase parameters in solid-liquid compound casting

双金属种类	铸造工艺方式	固相工艺参数
高铬铸铁-碳钢 ^[49]	感应预热双金属复合铸造	固相预热温度为 800 ℃,液固体积比为 10 : 1
AZ91D 镁合金-20 号钢 ^[25]	金属型铸造	液固体积比为 12 : 1
A356 铝合金-纯镁 ^[50]	真空辅助砂模复合铸造	固相初始温度为 100 ℃
AJ62 纯镁-AZ31 镁合金 ^[12]	金属型铸造	固相预热温度为 250~350 ℃
T2 铜-99.7% 纯铝 ^[51]	金属型铸造	固相预热温度为 100 ℃,液固体积比为 49.24 : 1
T2 铜-A356 铝合金 ^[52]	消失模铸造	液固体积比为 7 : 1
C2Cr6Mo2W5V8 高速钢-45 号钢 ^[16]	镶铸法连续铸造	固相预热温度为 400 ℃,液固体积比大于 8
A356 铝合金-AZ91D 镁合金 ^[53]	消失模铸造	预热温度为 300 ℃,浇注温度为 730 ℃,液固体积比为 14.6 : 1

合。当液固体积比过小,输入热量不足以满足界面元素的扩散所需,冶金结合不充分,因此易在界面处产生空隙、裂纹等缺陷。但当液固体积比过大时,液态金属向固相基体输出的热量多,从而影响到界面冶金反应进行的时间和界面反应层的生长过程,可能产生组织形态较差的层间相,同样不利于实现良好的界面冶金结合,还会造成材料的浪费。因此,在设计固-液复合铸造工艺时,必须要考虑液固体积比。

除此之外,固相初始温度即预热温度,也是影响液态金属凝固的重要因素,在改善固-液复合铸件界面的品质时也需要引起重视。对固相金属进行预热,可以防止液相金属冷却过快,对于保证复合材料成形过程的顺利进行,增加包覆力有着重要作用。同时,提高固相初始温度,可以延长固相金属与液态金属的接触时间,为原子的扩散和迁移提供更多动力,使得热扩散过程加强,进而提高界面结合强度。

3 固-液复合界面组织与性能

3.1 界面硬度

固-液复合铸造双金属材料的界面显微硬度是力学性能的重要特征,由于界面金属间化合物的生成,界面反应层具有比低硬度母材一侧更高的显微硬度,从而在界面区域内形成一个高硬度区域。以 Al/AZ91D 双金属复合材料为例,界面反应层区域由于生成了硬度较高的 Mg-Al 金属间化合物,因而具有比 AZ91D 基体更高的显微硬度,其硬度分布见图 6^[54]。同样的,不锈钢/铸铁^[55]、灰铸铁/碳钢^[56]、Al/Ti^[57] 双金属材料界面显微硬度的分布也呈现出中间高,两边低的特点。

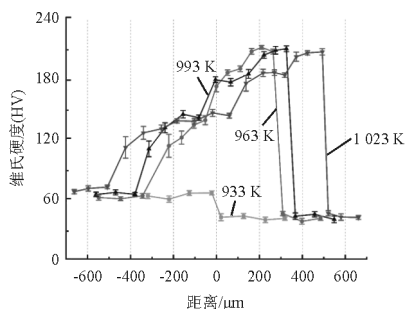


图 6 Al/AZ91D 双金属材料界面处的显微硬度分布图

Fig.6 Microhardness distribution of the interface in Al/AZ91D bimetal

但是在一些熔点差异比较大的异种金属固-液复合铸造过程中,由于两种金属本身硬度值差异较大,在界面区域往往可以获得显微硬度值介于固相和液相金属之间的反应层。例如,在制备高铬铸铁/铸钢双金属铸件时,界面可以得到一个显微硬度呈梯度变化的区域,有利于改善双金属铸件的界面受力状态,进而提高界面

结合强度。同样的,在 Al/FeCrAl^[58]、不锈钢/高铬铸铁^[59]、高铬铸铁/铸钢^[60] 等双金属材料中获得类似的硬度分布,见图 7。

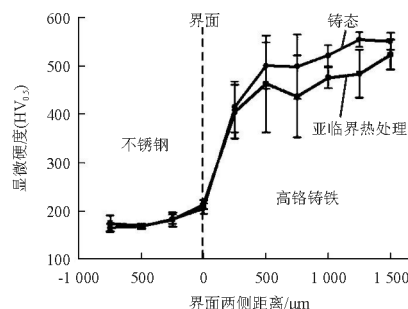


图 7 高铬铸铁/铸钢双金属材料界面显微硬度分布^[60]

Fig.7 Microhardness profiles of the interfaces in high-chromium cast iron/cast steel bimetal

3.2 剪切强度

固-液复合铸造的研究中,界面处常常会出现裂纹缺陷,界面的剪切强度是评估双金属材料性能的重要参数。固-液复合铸件界面的剪切强度主要通过衡量裂纹沿界面传播扩展的难易程度来决定,根据复合铸件的形状及厚度的不同可选择采用压剪或拉剪切的方式进行测试。在压剪试验过程中,两种金属材料分别受到压头和剪刀的阻碍,在平行于界面的压力作用下在界面处产生相互错动的剪切力。图 8 和图 9 分别为压剪和拉剪试验的原理图。拉剪试验主要适用于压力下易发生弯曲变形的较薄铸件,试验过程中,固定一种金属,对另一种金属进行拉伸,两种形式下铸件发生断裂时的压力或

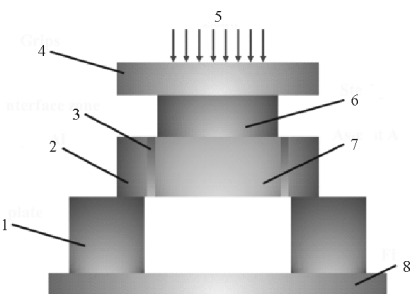


图 8 固-液复合铸造双金属材料压剪试验装置原理图^[54]

Fig.8 Schematic diagram of compression and shearing test apparatus for solid-liquid compound casting bimetal material

- 1.支撑板 2.电弧喷 Al 3.界面区 4.夹点 5.加载 6.钢孔
- 7.铸态 AZ91D 8.固定台

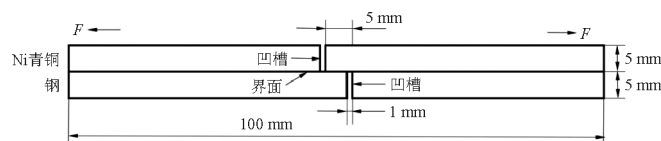


图 9 固-液复合铸造双金属材料拉剪试验装置二维图^[61]

Fig.9 2D diagram of tension and shearing test apparatus for solid-liquid compound casting bimetal material

拉力除以界面的面积即为其剪切强度。

影响界面剪切强度的因素较多,其中剪切强度随着过渡层厚度增加而逐渐增大,到达峰值后减弱^[29]。金属间化合物的种类及其性质是影响剪切强度的另一重要因素,生成脆硬相和不均匀相的界面由于塑、韧性的降低往往成为剪切试验中的裂纹萌生源^[28]。此外,相邻金属间化合物性能的差异越大越容易产生层间的分离,界面剪切性能也就越差。因此,在固-液复合铸造过程中,需要通过控制多种因素达到合适的界面组成从而获得最大的剪切强度。

3.3 其他性能

固-液复合双金属由于其制备的灵活性,通过不同种类的双金属复合,获得了具有耐腐蚀性、耐磨性、导热性、导电性的材料。如对超高强度的 7075 铝合金的外层包覆一定厚度的 6061 铝合金,可提高其耐蚀性能与合金塑性加工性能^[62]。对耐磨性较差的轻质金属 Al、Ti 等,可与硬质合金钢等复合,获得耐磨性较强的双金属复合材料^[25,37,49]。对具有导电性的 Cu、Al 合金等,可通过固-液双金属铸造的复合型材料,在保证其导电性不受外力影响的情况下,隔绝外部因素的干扰而具有较好的稳定性^[51,52]。另外,将固-液铸造工艺用于金属

复合材料的制备,能够提升铸件热导率,使其具备热量快速聚集、快速消散的功能,为集成电路设计工作提供支持。

4 界面结合机理

固-液复合过程中,界面的冶金结合主要通过原子间的相互扩散和金属间化合物的生成来实现,而两者分别与原子的扩散率和化合物的生成焓有关。据此,主要从动力学和热力学两方面对固-液复合铸件的界面结合机理进行分析。

动力学方面,主要通过分析原子扩散的动态过程研究界面的结合。图 10 为热浸铝的 Q235 钢与 AZ91D 镁合金双金属界面结合机理图^[23]。金属液与固态金属接触后,界面两侧原子在浓度梯度的作用下发生相互扩散并形成扩散层,Q235 基体中的 Fe 和 AZ91D 中的 Mg 扩散到热浸铝涂层中,由于原子扩散能力的差异,将最终分布在界面层的不同位置,并在后续形成不同的反应结合层。此外,由于介质溶解度的限制,当原子扩散后在其中的浓度超过一定值时,将形成与清晰扩散层不同的各种形貌的结构,如在 AZ91D/0Cr19Ni9 双金属界面针状共晶结构的生成^[24],而这将进一步对界面

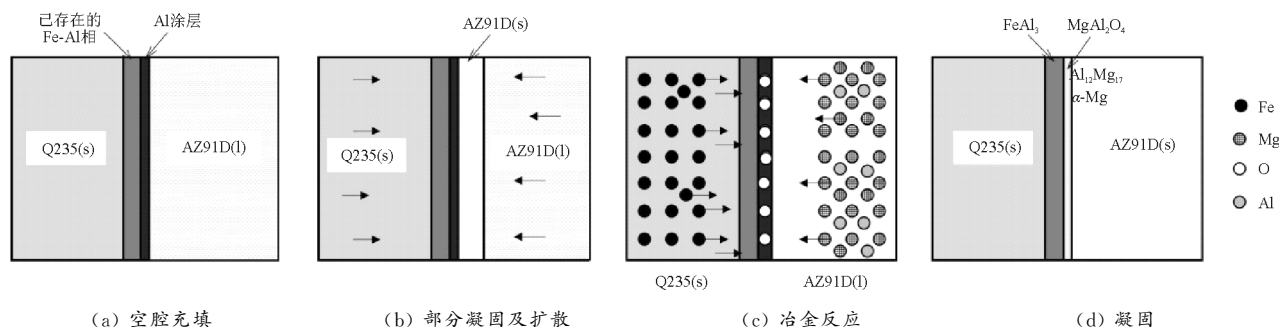


图 10 热浸铝 Q235 钢-AZ91D 镁合金双金属界面结合机理图^[23]

Fig.10 Mechanism diagram of Q235 steel-AZ91D magnesium alloy bimetal interface coated with aluminum

结合产生影响。

热力学方面,主要结合生成焓和吉布斯自由能等数据分析界面金属间化合物的生成可能性以及形成的次序。LI G Y 等^[63]通过热力学分析,讨论了镍铜夹层的 A356 铝-AZ91D 镁双金属复合层界面的形成过程。根据吉布斯自由能数值,确定了 Al_3Ni 、 Mg_2Cu 、 $\text{Al}_7\text{Mg}_6\text{Cu}_3$ 等 3 种金属间化合物的生成,且低自由能的 $\text{Al}_7\text{Mg}_6\text{Cu}_3$ 相优于 Mg_2Cu 相形成,与试验结果相吻合,见图 11。另外,WEN F L 等^[27]和 SHANGGUAN J J 等^[28]的热力学分析也验证界面化合物试验观察的结果。因此,热力学分析可作为研究界面结合机理的有效手段。

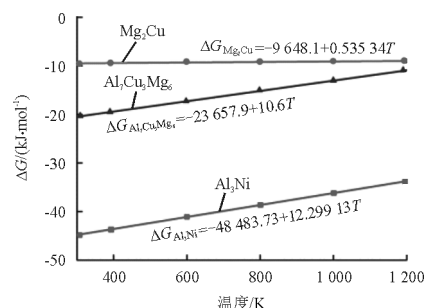


图 11 不同金属间化合物的吉布斯自由能

Fig.11 The Gibbs free energies of the different intermetallic compounds

5 结 语

固-液复合铸造双金属材料以其突出的综合力学性

能获得了广泛应用,国内外的研究者针对固-液复合铸造界面的连接、强化机理展开了深入细致的研究,也取得了一定的进展。未来固-液复合铸造双金属材料的研究方向还应该包括:①针对现有固相金属材料的表面处理方法的局限性,需要充分借助新兴的材料表面处理的方法,如磁控溅射、物理(化学)气相沉积技术等,对固相材料的表面性能进行调控;②充分发挥特种铸造技术的优势,将其利用在固-液复合铸造双金属材料的制备过程中,是保证双金属材料良好界面性能的重要基础;③借助3D打印、粉末冶金等技术手段,将固相金属加工制备成具有内部结构的形状,得到与液态金属形成三维互嵌的结构,有利于进一步提高界面结合力;④双金属材料界面的强化机理以及断裂失效机理还有待研究。

参 考 文 献

- [1] 杨金鹏,吴孟武,陆文兴,等. 固液双金属复合铸造工艺及机理研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(9): 964-970.
- [2] 崔鹏杰,钟黎声,白海强,等. 铸造在层状双金属复合材料中的应用[J]. 热加工工艺, 2020, 49(19): 1-6.
- [3] 闫可安,许天早,韩礼红,等. 双金属复合管的研究现状与发展趋势[J]. 化工技术与开发, 2020, 49(10): 45-50.
- [4] 田晓冬,李肖,杨桃. 双金属氧化物和复合材料的合成及其在超级电容器中的应用进展[J]. 无机材料学报, 2017, 32(5): 459-468.
- [5] 李宇煥,秦芳诚,刘崇宇,等. 双金属热压缩复合行为及界面组织演变[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1 430-1 435.
- [6] 李慧蓉,程玉杰,马涛,等. 铜/钢双金属固-固相复合法的现状与展望[J]. 热加工工艺, 2021, 50(18): 19-24.
- [7] 温亚辉,李长亮,张清,等. 粉末粒度对钨钼双金属性能影响[J]. 稀有金属, 2016, 40(11): 1 188-1 192.
- [8] 邹军涛,高磊,谢庭芳,等. 扩散连接制备 Cu/Al 双金属及其界面组织与剪切强度[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(12): 4 121-4 128.
- [9] 乔及森,夏宗辉,刘立博,等. 铝镁双金属反向等温包覆挤压棒材耐腐蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(2): 255-262.
- [10] 姜超,龙伟民,冯健,等. 铜/不锈钢爆炸焊界面组织及性能[J]. 焊接, 2021(9): 22-27, 62.
- [11] 张玲,李英龙. 镁合金及镁基复合材料搅拌摩擦焊研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(7): 6-11.
- [12] 陈玉娥,仲红刚,张申,等. 双金属复合材料铸造成形工艺综述[J]. 铸造, 2021, 70(6): 646-650.
- [13] PAPIS K J M, LOFFLER J F, UGGOWITZER P J. Interface formation between liquid and solid Mg alloys-An approach to continuously metallurgic joining of magnesium parts[J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527(9): 2 274-2 279.
- [14] 令狐仅全. 喷射成形高硅铝合金缸套镶铸行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [15] 蔡雨捷,杨超,任双星,等. 2024/6061 铝合金双金属铸坯热轧行为研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(2): 87-91.
- [16] 刘耀辉,刘海峰,于思荣,等. 高速钢/结构钢双金属复合材料界面研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2001(2): 17-19.
- [17] 朱林林,刘金池,董金龙,等. 高铬铸铁/钢离心铸造复合工艺设计及研究[J]. 特钢技术, 2020, 26(2): 1-5.
- [18] 吴轩,胡建华,高歌. 离心铸造双金属管复合界面的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(23): 95-97.
- [19] 李迟,樊自田,蒋文明,等. 表面处理对钢-铝双金属铸件组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(5): 516-519.
- [20] BAO Z, WANG S, HAN R H, et al. Microstructure and mechanical properties of aluminum/steel bimetal using compound casting with electroless nickel plating[J]. Materials Research Express, 2021, 8(1): 016 517.
- [21] HU Y, CHEN Y Q, LI L, et al. Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid-solid compound casting process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(6): 1 555-1 563.
- [22] THOMAS G, VANESSA G N, SIMON S, et al. Vertical continuous compound casting of copper aluminum bilayer rods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116 854.
- [23] CHENG J, ZHAO J H, TANG Y, et al. An investigation on the microstructure and mechanical properties of the hot-dip-aluminized-Q235/AZ91D bimetallic material produced by solid-liquid compound casting[J]. Magnesium Technology, 2020, 361-368.
- [24] ZHAO J H, ZHAO W Q, QU S, et al. Microstructures and mechanical properties of AZ91D/0Cr19Ni9 bimetal composite prepared by liquid-solid compound casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 51-58.
- [25] 蒋海啸. 镁/钢液-固复合铸造工艺及界面组织性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [26] FAN S, WU H B. Improved interface bonding of Mg/aluminized steel bimetallic castings prepared by solid-liquid compound casting process[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2021, 34(1): 32-42.
- [27] WEN F L, ZHAO J H, YUAN M W, et al. 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): 1 382-1 395.
- [28] SHANGGUAN J J, ZHAO J H, SHI Y, et al. Effects of Zn interlayer on microstructures and mechanical properties of TC4/AZ91D bimetal via solid-liquid compound casting process[J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16: 419-434.
- [29] TAN C W, ZANG C W, ZHAO X Y, et al. Influence of Ni-coating thickness on laser lap welding-brazing of Mg/Ti[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 108: 378-391.
- [30] 何科. 固-液复合铸造法制备电弧喷涂 Al/AZ91D 双金属材料的组织及性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [31] GUO J, HAN X, TENG Y X, et al. Preparation of cladding billet via direct chill casting process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(11): 3 321-3 328.
- [32] HE K, ZHAO J H, LI P, et al. Investigation on microstructures and properties of arc-sprayed-Al/AZ91D bimetallic material by solid-liquid compound casting[J]. Materials and Design, 2016, 112(15): 553-564.
- [33] 张国伟,王明杰,董莹,等. 铝铁双金属石膏型铸造界面复合工艺研究[J]. 热加工工艺, 2021, 42(5): 68-71.

- [34] 裴蒙蒙. 离心铸造 40Cr/Q345B 双金属的热变形及组织演变行为研究[D]. 太原:太原科技大学, 2021.
- [35] 刘力,朱永长,张圳炫,等.基于液/半固态铸造复合的 5083/AZ31B 层状复合材料界面研究[J]. 铸造设备与工艺, 2019(4): 56-58.
- [36] 龚慧宇,傅黎安,钱静,等. 新型熔融高压铸造法制备铝/金刚石复合材料的研究[J]. 热加工工艺: 1-4[2022-06-06].
- [37] 王蓬勃. 低压铸造 SiC/Al 复合材料铸件的组织与性能[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [38] KIM H J, KIM T H, TAE H, et al. Effect of surface treatments on cast-bonding characteristics of steel-aluminum hybrid composite materials[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2019, 64 (3): 889-892.
- [39] 唐超兰,翁浩,陈鑫,等. 不同表面处理磨具对冷轧 4A60 铝/08Al 钢复合板结合性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(3): 309-312.
- [40] GADUDASU B R, PRAVEEN K B, ANIL K B. Effect on corrosion behaviour of the surface of Al-4.5Cu with bamboo leaf ash composites by laser treatment[J]. Materials Research Express, 2020, 7(1): 016 594.
- [41] LIU T, WANG Q D, LIU P, et al. Microstructure and mechanical properties of overcast aluminum joints[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2015, 25(4): 1 064-1 072.
- [42] XU D X, YANG C L, ZHAO K N, et al. Interfacial microstructure and mechanical behaviour of Mg/Cu bimetal composites fabricated by compound casting process[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2019, 29(6): 1 233-1 241.
- [43] JIANG W M, FAN Z, LI C. Improved steel/aluminum bonding in bimetallic castings by a compound casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226: 25-31.
- [44] 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.
- [45] XU G C, LUO A, CHEN Y Q, et al. Interfacial phenomena in magnesium/aluminum bi-metallic castings[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A595: 154-158.
- [46] HE K, ZHAO J H, CHENG J, et al. Influence of a Zn interlayer on the interfacial microstructures and mechanical properties of arc-sprayed Al/AZ91D bimetallics manufactured by the solid-liquid compound casting process[J]. Materials, 2019, 12: 3 273-3 280.
- [47] 赵成志,张贺新,王强,等. ZL105/AZ91D 复合铸造界面研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(2): 143-146.
- [48] BABAEI M H, MALEKI A, NIROUMAND B. A novel method to improve interfacial bonding of compound squeeze cast Al/Al-Cu macrocomposite bimetallics[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(6): 1 184-1 199.
- [49] 张驰,杨杰明. 双金属复合锤头铸造工艺性能研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(6): 301-302.
- [50] RAJENDE K T. Experimental investigation and optimization of process parameters for shear strength of compound cast bimetallic joints[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71 (9): 2 173-2 183.
- [51] LIU G P, WANG Q D, ZHANG L, et al. Effects of melt-to-solid volume ratio and pouring temperature on microstructures and mechanical properties of Cu/Al bimetallics in compound casting process [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, A50(1): 401-414.
- [52] 管峰,蒋文明,樊自田,等. 液-固体积比对消失模铸造 Al/Cu 双金属界面组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(2): 316-325.
- [53] JIANG W M, LI G Y, FAN Z, et al. Investigation on the interface characteristics of Al/Mg bimetallic castings processed by lost foam casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, A47(5): 2 462-2 470.
- [54] HE K, ZHAO J H, CHENG J, et al. Effect of pouring temperature during a novel solid-liquid compound casting process on microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy parts with arc-sprayed aluminum coatings[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(15): 6 678-6 695.
- [55] 于杨,马幼平,杨蕾,等. 不锈钢/高铬铸铁固-液复合铸造的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(2): 65-68.
- [56] 方健,于赞,王洪金. 灰铸铁/碳钢的复合铸造界面的研究[J]. 铸造, 2015, 64(2): 122-124.
- [57] GECU R, KARAASLAN A. A comparative study on titanium-reinforced aluminium matrix composites produced by melt infiltration casting and squeeze infiltration[J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13(2): 311-319.
- [58] 曾利奎,杨平,王亚军,等. Al/FeCrAl 双金属复合材料的制备及试验研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(8): 87-89.
- [59] 张伟,汪选国,黄晓凯. 铸造 304 不锈钢对高铬铸铁组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(10): 116-121.
- [60] 王迪,荣守范,张圳炫,等.双金属液-固复合工艺对界面层影响的研究[J]. 铸造设备与工艺, 2019(1): 29-32.
- [61] JIE J C, LIU C B, WANG S H, et al. Characterisation of steel/nickel bronze clad strips prepared by continuous solid/liquid bonding method[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(15): 1 840-1 847.
- [62] 郑小平,姜龙,李春晓,等. 固/液复合“半固态显微组织/枝晶组织”界面的组织与性能[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(4): 585-589.
- [63] LI G Y, JIANG W M, GUAN F, et al. Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of A356 aluminum/AZ91D magnesium bimetal prepared by a compound casting combined with a novel Ni-Cu composite interlayer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116 874.

(编辑:彭瑾)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com