

镁/铝双金属复合材料成形工艺的研究进展 及影响结合层的因素

袁婷¹, 曾朝伟¹, 孙振威¹, 彭威¹, 赵健行¹, 胡红军¹, 钟韬²

(1.重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400050; 2.南宁职业技术学院科技处, 南宁 530000)

摘要: 镁合金和铝合金具有密度低、比强度高特点, 在汽车轻量化方面具有显著优势。Mg/Al 双金属复合材料兼具 2 种金属的优点, 在运输、电子 3C 等领域具有广泛的应用前景。制备 Mg/Al 复合材料的方法可分为焊接、铸造、轧制和挤压 4 大类。在制备 Mg/Al 复合材料时, 4 种方法均会不可避免地界面结合处产生硬脆相的金属间化合物 (IMC), 如 Al_3Mg_2 、 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 等。硬脆相的 IMC 往往不利于 Mg/Al 之间的结合。提高 Mg/Al 双金属复合材料结合强度的关键是消除或者减少 IMC。针对以上问题, 综述了目前较为前沿的焊接、铸造、轧制、挤压等用于制备 Mg/Al 双金属复合材料的新工艺, 分析了不同工艺及其参数、夹层合金元素、界面形状对结合层组织和性能的影响。最后, 对目前制备 Mg/Al 复合材料成形工艺的研究现状进行了总结与展望。

关键词: 镁/铝双金属复合材料; 加工工艺; 金属间化合物; 结合强度

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.08.007

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)08-0053-12

Research Progress in Forming Process of Mg/Al Bimetallic Composites and Factors Affecting the Bonding Layer

YUAN Ting¹, ZENG Chao-wei¹, SUN Zhen-wei¹, PENG Wei¹, ZHAO Jian-xing¹, HU Hong-jun¹, ZHONG Tao²

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China;

2. Science and Technology Department, Nanning Vocational and Technical College, Nanning 530000, China)

ABSTRACT: Magnesium alloy and aluminum alloy are featured with low density and high specific strength, and have significant advantages in lightweight of automobiles. Mg/Al bimetallic composites combine the advantages of both metals and have a wide range of applications in transport, electronics 3C and other fields. The methods for preparing Mg/Al composites can be divided into four main categories: welding, casting, rolling and extrusion. When preparing Mg/Al composites, all four methods

收稿日期: 2023-02-11

Received: 2023-02-11

基金项目: 重庆英才项目 (CQYC202003047); 重庆市自然科学基金 (cstc2018jcyjAX0249, cstc2018jcyjAX0653)

Fund: Chongqing Excellence Project(CQYC202003047); Chongqing Natural Science Foundation Project(cstc2018jcyjAX0249, cstc2018jcyjAX0653)

作者简介: 袁婷 (1999—), 女, 硕士生, 主要研究方向为镁合金精密成形。

Biography: YUAN Ting(1999-), Female, Postgraduate, Research focus: plastic forming of Mg alloys.

通讯作者: 钟韬 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为轻合金塑性成形。

Corresponding author: ZHONG Tao(1986-), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: plastic forming of light alloys.

引文格式: 袁婷, 曾朝伟, 孙振威, 等. 镁/铝双金属复合材料成形工艺的研究进展及影响结合层的因素[J]. 精密成形工程, 2023, 15(8): 53-64.

YUAN Ting, ZENG Chao-wei, SUN Zhen-wei, et al. Research Progress in Forming Process of Mg/Al Bimetallic Composites and Factors Affecting the Bonding Layer[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(8): 53-64.

inevitably produce Intermetallic Compounds (IMCs) with hard and brittle phases, such as Al_3Mg_2 , $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, etc. at the interface bond. IMCs in the hard and brittle phase are often detrimental to the bonding between Mg/Al. The key to improving the bonding strength of Mg/Al bimetallic composites is the elimination or reduction of IMCs. In response to these problems, the new processes such as welding, casting, rolling and extrusion at the forefront for the preparation of Mg/Al bimetallic composites were reviewed. The effect of the processes and their different parameters, intercalation alloying elements, and interface shapes on the organization and properties of the bonded layers were analyzed. Finally, the current status of the forming processes for preparation of Mg/Al composites was summarized and presented in perspective.

KEY WORDS: magnesium/aluminum bimetallic composites; processes; intermetallic compounds; bonding strength

当今社会对能源的需求越来越大,为了提高燃油的经济性,使用轻质结构材料已经成为当下的趋势之一。但是随着时代的发展,单一的轻质金属材料已经难以满足人们的使用要求。因此,双金属复合材料受到了人们的广泛关注。将2种金属通过1种或2种工艺结合在一起而形成的材料称为双金属复合材料,该材料同时具备2种单金属的优异性能^[1]。

镁合金具有密度低、比强度高、电磁屏蔽性好、可回收、储氢容量大等优异性质,在运输、电子3C等领域拥有广泛的应用前景^[2-8]。但是镁合金在常见服役环境下的耐腐蚀性较差,尽管添加合金元素可以提高耐腐蚀性,但效果并不理想^[9]。铝合金作为同样较轻的金属结构材料,能够在表面形成致密且稳定的氧化膜,进而提高其耐腐蚀性^[10-11]。将Mg和Al结合起来制备的Mg/Al双金属复合材料兼有2种单金属的优点,具备低密度、较好的成形性和良好的耐腐蚀性等优良特性^[12]。

目前,Mg/Al双金属复合材料常见的成形工艺有焊接、铸造、轧制和挤压4大类。在成形过程中,铝原子和镁原子发生扩散和迁移,当Mg/Al原子浓度达到一定程度时,会产生金属间化合物(Intermetallic Compounds, IMC),从而实现Mg/Al之间的冶金结合。当Mg/Al原子浓度不同时,会产生不同的IMC。由Mg-Al二元相图(见图1)^[1]可知,在结合过程中可能会出现 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 等金属间化合物。IMC的出现说明金属之间发生了冶金结合,但是过厚的IMC层对复合材料的结合性能不利。硬脆的IMC与镁铝基体之间的高晶格失配是产生裂纹以及界面结合强度下降的重要原因^[13]。此外,双金属结合层的形成和演变与工艺参数密切相关。当采用传统的熔焊方法连接Mg/Al双金属时,接头处易产生裂纹和气孔,并且很难控制IMC的形成。为提高焊接的质量,扩散焊、爆炸焊接和磁脉冲焊接等方法被应用于Mg/Al双金属的成形中^[14-15]。铸造法很容易使Mg/Al双金属之间产生冶金结合,但如果控制不当,会降低材料的结合性能。近年来,将铸造和其他成形工艺相结合已经成为研究热点之一^[16]。轧制法的产品质量稳定性好、工艺简单、生产效率高、易于大批量生产^[12]。挤压法能提高材料的变形能力,增大接触面积,提高

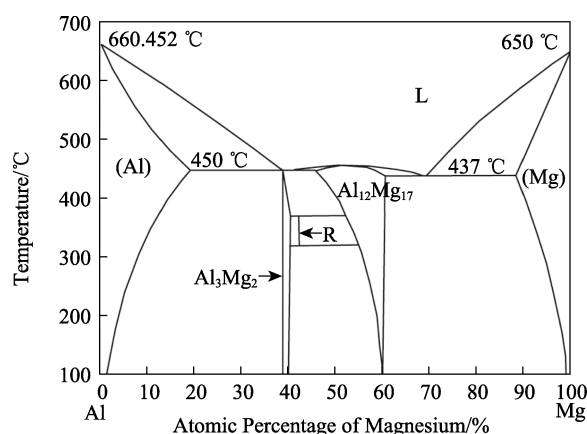


图1 Mg-Al二元相图^[1]

Fig.1 Binary phase diagram of Mg-Al^[1]

Mg/Al双金属的结合效果^[17]。

本文总结了焊接、铸造、轧制和挤压4种工艺在Mg/Al双金属复合材料中的应用以及研究现状,分析了影响结合层结合性能的因素。最后对目前制备镁/铝金属基复合材料的成形工艺进行了展望,以期对制备高性能镁/铝金属基复合材料的研究与应用提供相关理论指导。

1 焊接

1.1 镁/铝复合材料焊接工艺

目前,用于连接镁合金与铝合金的焊接方法有很多,如电弧焊^[1,18]、扩散焊^[1,15]、搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)^[1,19-21]、超声波点焊(Ultrasonic Spot Welding, USW)^[1,22,23]、磁脉冲焊接(Magnetic Pulse Welding, MPW)^[1,14,24]和爆炸焊接^[11,25]等。

传统的焊接方法如熔化焊具有很大的灵活性,在实际生活中应用广泛。但是熔化焊容易在接头位置处产生气孔和裂纹。为了提高Mg/Al焊接接头的质量,Liu等^[18]采用了一种新型焊接工艺,即冷金属过渡焊接技术(Cold Metal Transfer, CMT),并加入了磁振系统对Mg和Al进行连接。CMT技术不但没有焊接飞溅的产生,而且有更低能量输入。平台型磁极结构能明显减小IMC层的厚度,分散 Mg_2Si 相,防止裂纹扩展,并且随着电流的增加,焊接产生的气孔被

抑制。此外, 为了提高 Mg/Al 焊缝的质量, 扩散焊、搅拌摩擦焊、磁脉冲焊接和爆炸焊接等固相焊以及超声波点焊已成为研究热点。

扩散焊是在 $0.5T_m \sim 0.8T_m$ (T_m 为绝对熔化温度) 的高温下, 对 2 种材料施加压力, 进而实现结合的一种固态焊接技术。在该焊接过程中, 材料不会熔化, 只会发生有限的宏观变形或相对运动^[26]。刘政军等^[15]对固相焊接中镁铝元素的扩散行为进行了研究, 发现 Mg 和 Al 的连接温度应该低于 480°C 。Azizi 等^[26]通过扩散焊接工艺成功结合了镁铝合金, 发现从 Mg 侧向 Al 侧方向形成的结合层分别为 γ ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$)、 γ 和 β (Al_3Mg_2) 的混合物, 并且在 450°C 保温 120 min 条件下得到的接头硬度达到 170HV。利用扩散焊接连接异种金属有显著优势, 但是扩散焊的时间较长, 生产效率低, 无法连续大批量生产, 这限制了它在工业中的应用。

搅拌摩擦焊 (FSW) 是一种固态焊接工艺, 其原理如下: 将旋转搅拌头插入工件, 通过搅拌头和轴肩与焊件的摩擦热使焊件端部达到热塑性状态, 然后迅速顶锻以完成焊接^[1]。搅拌摩擦焊在连接铝合金和镁合金等轻质材料方面表现出了高效率, 且焊接过程无污染、无烟尘、无辐射, 是一种较为绿色的焊接工艺, 但焊接时的作用力较大, 焊接头磨损相对较高。Paradiso 等^[27]初步证明了采用 FSW 将 2024-T3 铝合金连接至 ZE41A 镁合金上的可行性。赵亚东等^[21]采用 FSW 制备出的 Mg-Al 合金接头的抗拉强度达到 96.1 MPa、伸长率达到 13.2%, 分别为铝合金母材抗拉强度的 95% 和伸长率的 65%。采用 FSW 并不能完全避免 IMC, 近年来, 有学者将一些创新技术应用于 FSW 中以解决 IMC 的问题, 如超声辅助 FSW、浸没式 FSW、激光辅助 FSW 和脉冲电流辅助 FSW, 其中, 水下 FSW 是产生良好焊缝最流行的技术^[28]。Zhao 等^[29]利用 FSW 在水下焊接镁铝合金, 发现与在空气中的焊接相比, 其 IMC 层要薄得多。辅助 FSW 的创新技术在抑制 IMC 方面有着巨大潜力, 是今后研究的重点方向。Gao 等^[19]通过搅拌摩擦搭接焊与等离子电解氧化技术 (Plasma Electrolytic Oxidation, PEO) 成功连接了镁铝合金, PEO 是提高镁合金耐腐蚀性的一种有潜力的涂层技术, 在焊接过程中, PEO 夹层流入铝合金侧, 抑制了 IMC 的生长, 如若没有 PEO 夹层, 那接头会出现多层结构, 如图 2 所示。

磁脉冲焊接 (MPW) 是一种类似于爆炸焊接的固相焊接方法, 对环境友好且高效, 可用于实现各种不同材料的连接。MPW 技术可以有效避免缺陷 (如裂纹、气孔和偏析) 的形成, 获得界面结合优异的高性能异种金属接头。Zhu 等^[14]优化了 MPW 的工艺参数, 研究表明, 在 35 kJ 的放电能量和 1.4 mm 的间隔距离下, Mg/Al 接头的剪切力达到铝合金母材的 97%, 并且由于冷却速度极快, 界面处没有 IMC 的

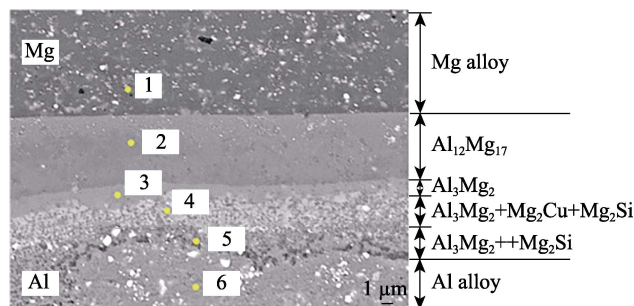


图 2 Mg/Al 接头界面处的多层结构^[19]

Fig.2 Multilayer structure at Mg/Al joint interface^[19]

形成。此外, MPW 能形成波形界面, 这也是其接头具有高性能的原因之一。

爆炸焊接是通过爆炸波加速飞片, 来实现异种材料的连接方法。图 3 为铝镁合金板爆炸焊接示意图^[11]。爆炸焊接过程中产生的射流能去除表面氧化物, 得到良好的波浪形固态结合界面^[11,25]。Kumar 等^[30]利用爆炸焊接的倾斜布置, 在载荷比为 0.8、间距为 5 mm、倾斜角为 3° 的条件下, 得到了拉伸强度和剪切强度分别为 146 MPa 和 93 MPa 的镁铝板材。目前从事镁铝合金爆炸焊接研究的人员较少, 有关接头性能和结合界面之间关系的研究还不够系统。爆炸焊接由于操作时间较短, 元素扩散时间不足, 能有效抑制 IMC 的产生, 但是由于空间、设备和安全等问题, 爆炸焊接的应用仍然不是十分广泛。



图 3 铝镁合金板爆炸焊接示意图^[11]

Fig.3 Schematic diagram of explosion welding of aluminium and magnesium alloy plates^[11]

超声波点焊 (USW) 的焊接能量较低, 焊接时间较短, 是解决 Mg/Al 合金焊接困难的一种新方法, 并且对环境十分友好。超声波点焊能在一定程度上减少 IMC, 但依然不能有效阻止 IMC 的产生。较厚的 IMC 层会显著降低金属之间的结合强度。为解决这个问题, Peng 等^[22]在 USW 焊接的镁铝合金异种接头中添加了 Ag 夹层, 使 Mg/Ag 和 Al/Ag 界面取代了 Mg/Al 界面, 消除了不利的 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 金属间化合物, 改善了焊缝的质量, 提高了材料的结合强度。目前, 有关夹层在 USW 中的应用较少, 未来应进一步研究夹层的阻隔原理, 对比不同夹层的阻隔效果。

1.2 影响焊接结合层的因素

焊接的能量、时间、温度、放电电压以及焊接后的热处理对接头处 IMC 的形成有着重要影响。当焊接能量过高时, IMC 层的厚度增加, 焊接性能降低。文献^[22]表明, 在高焊接能量水平下, 夹层 Ag 会在

熔核边缘断裂或溶解, Mg_3Ag 会变为多孔结构, 夹层 Ag 失去了阻隔 IMC 的效用。随着焊接时间的增加和温度的升高, IMC 逐渐从结合界面处析出, 接头的力学性能降低。刘政军等^[15]研究表明, 当温度较低时, 元素扩散得较慢, 当焊接温度升高后, 结合层逐渐变厚, 当温度过高时, 金属 Mg 发生熔化。采用焊接能量较低和时间较短的超声波点焊可以在一定程度上抑制 IMC。图 4 为不同加热温度下 Mg/Al 界面的显微形貌及宏观特征^[15]。放电电压对 IMC 层的厚度有显著影响。Chen 等^[31]研究发现, 随着放电电压的增加, 界面层的平均厚度增加, 界面波形变得更加规则和平滑。随着退火温度的升高和退火时间的增加, 铝合金和镁合金基体晶粒长大, 硬度下降, IMC 层增厚, 双金属的拉伸强度降低^[25]。

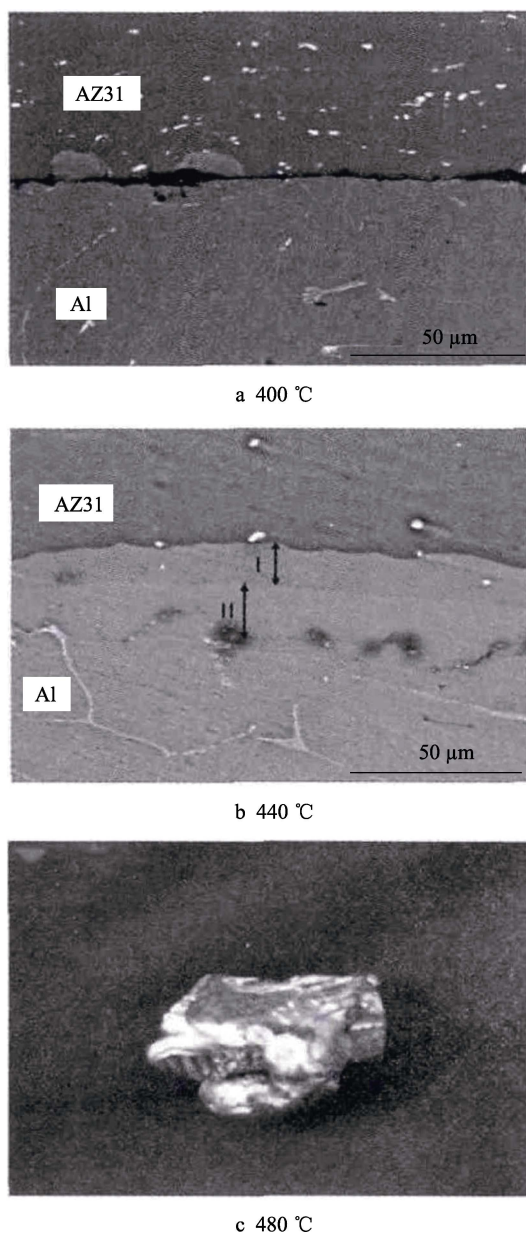


图 4 不同加热温度下 Mg/Al 界面的显微形貌及宏观特征^[15]
Fig.4 Microstructure and macroscopic characteristics of Mg/Al interface at different heating temperature^[15]

除了上述几个影响因素外, 夹层的应用对提高镁/铝双金属复合材料的性能也有着重要意义。由文献[22-23,32]可知, 添加夹层可以减少焊接时间, 改变结合界面合金相的类型, 有效阻隔镁铝金属间化合物的形成, 提高材料接头的结合强度。Peng 等^[33]在 Mg-Al 接头处添加了 Cu 和 Ni, 阻挡了 Mg 和 Al 合金的直接接触, 改善了接头的结合性能。表 1 为添加 Ag 夹层前后 Mg/Al 双金属的结合强度。此外, 超声波振动能改变材料的流速和应变, 减小 IMC 层的厚度, 提高接头的强度^[34-35]。Zhao 等^[36]在 Mg/Al 复合材料的制备中加入了超声波振动, 使焊缝横截面上 IMC 厚度的最大平均值从 4 μm 减小到约 1.5 μm 。

表 1 添加 Ag 夹层前后 Mg/Al 双金属的结合强度^[22]
Tab.1 Bonding strength of Mg/Al bimetal before and after adding Ag interlayers^[22]

Materials	With or without sandwich	Shear strength/MPa
ZEK100-O/ Al6022-T43	None	About 47
	Ag	62

综上所述, 提高 Mg-Al 焊接接头强度的关键是消除或者减少 IMC, 方法如下: (1) 采用相对较短的反应时间和较低能量的制备工艺, 如爆炸焊接和超声波焊接; (2) 使用较低焊接温度的工艺, 这种方法的典型技术是固态焊接工艺, 如搅拌摩擦焊 (FSW) 和扩散焊; (3) 添加夹层可防止或减少接头处的 IMC, 夹层的选择可以是 Ag 或 Zn; (4) 通过超声波辅助振动, 可减小 IMC 层的厚度。

2 铸造

2.1 镁/铝复合材料铸造工艺

铸造法是唯一通过液态凝固而成形的制备工艺, 利用这一特点可以有效控制金属的扩散, 调控复合材料的结合界面^[16]。利用铸造法制备双金属复合材料的历史很悠久, 随着技术的发展, 该技术现在已广泛应用于生产中。Mg/Al 复合材料常见的铸造工艺有复合铸造^[16,37-40]、与锻造相结合的铸造+锻造工艺^[16,41]以及与轧制相结合的固液铸轧工艺^[16]。

复合铸造工艺可以很容易地不同种类的金属之间形成冶金结合, 并且不受产品形状和尺寸的约束。此前人们已经利用复合铸造成功制备了具有良好冶金结合的 Mg/Cu 双金属复合材料^[42]。复合铸造在制备 Mg/Al 双金属方面具有很大的优势, 因为 Al 原子在液态下可以更好地反应和扩散。然而, 随着 Mg、Al 原子的扩散, IMC 逐渐生成, 结合强度下降。为提高结合强度, Zhang 等^[37]在 Mg/Al 双金属复合铸造工艺中引入了稀土元素 Ce, 深入研究了 Mg/Al 双金属界面的微观组织演变机制和力学性能强化机制。稀

土相的沉淀使 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 发生细化, 提高了 Mg/Al 双金属的结合强度。Guan 等^[40]将振动加入到复合铸造过程中, 使 Mg/Al 双金属复合材料的剪切强度增加到 47.5 MPa, 提高了约 50%。图 5 为复合铸造工艺的示意图^[40]。

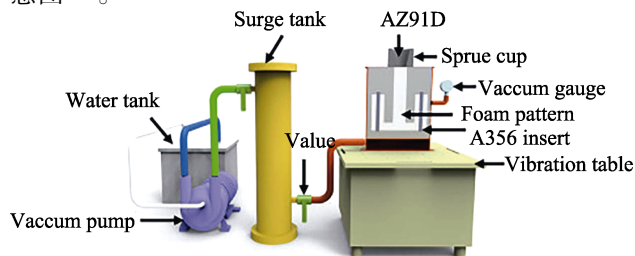


图 5 复合铸造工艺示意图^[40]

Fig.5 Schematic diagram of composite casting process^[40]

在铸造过程中可能会发生因控制不当而导致复合材料性能下降的情况, 而铸造+锻造工艺以及固液铸轧工艺可以解决该问题。陈刚等^[41]将铝合金熔体浇注在镁合金坯料上, 然后施加了一定的压力, 成功制备了 Mg/Al 双金属复合材料, 结果发现, 当成形压力为 350 MPa、铝合金熔体浇注温度为 710 °C 时, 成形质量最好。固液铸轧结合是近年来开发的一种新的短流程、节能和高效的技术^[43]。快速凝固和轧制相结合, 可以使金属材料的接触界面在高温扩散和轧制压力的共同作用下形成冶金结合, 提高复合材料的性能。图 6 为固液铸轧工艺的示意图。

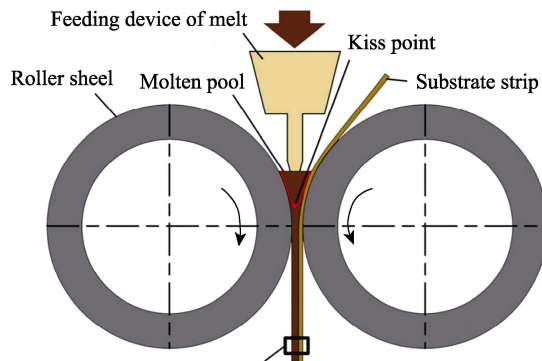


图 6 固液铸轧工艺示意图^[44]

Fig.6 Schematic diagram of the solid-liquid casting and rolling process^[44]

2.2 影响铸造结合层的因素

浇注温度是影响 Mg/Al 双金属复合材料结合层的重要因素之一。杨昊坤等^[39]以不同温度的 Al 合金为浇注金属、以镁合金为固态基板, 制备了 Mg/Al 复合材料。图 7 为在不同浇注温度下制备的 Mg/Al 复合材料的结合界面。较高的浇注温度可以提高金属熔体的流动性, 加快界面处元素的扩散, 生成较厚的 IMC 层。但是当温度高于一定程度时, 镁合金的变形抗力降低, 产生较大的塑性变形, 使材料的平整度降低。所以, 在铸造过程中, 应该严格控制温度, 并加入保护气氛以防止氧化。

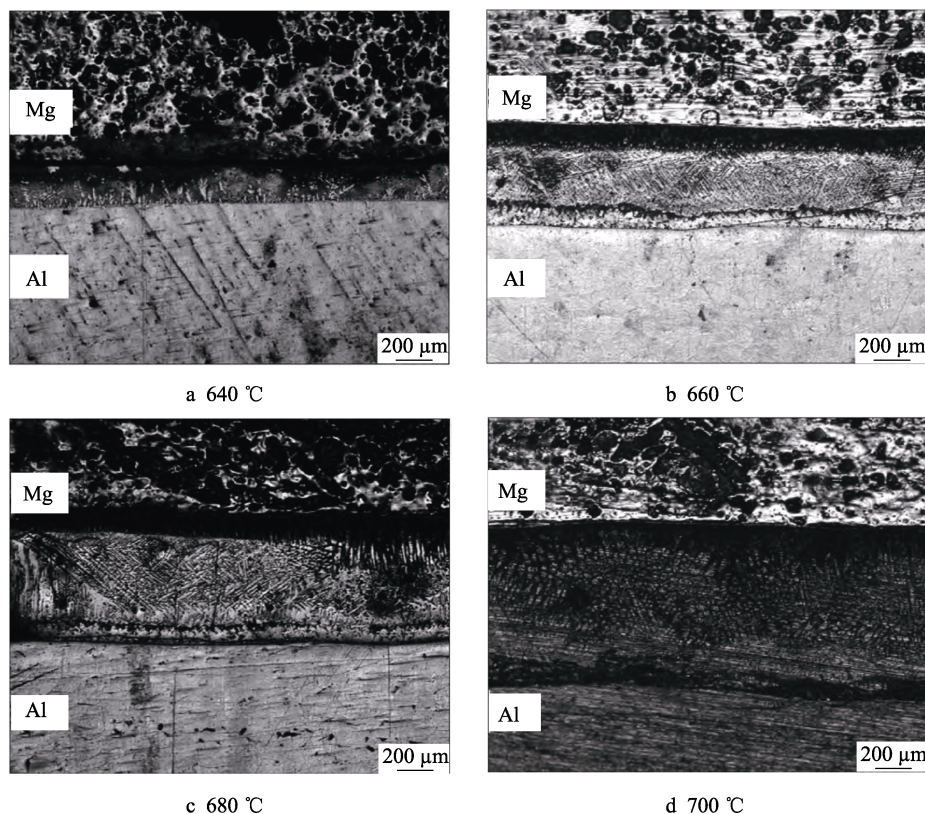


图 7 不同浇注温度下制备的 Al/Mg 复合材料的结合界面^[39]

Fig.7 Bonding interface of Al/Mg composites prepared at different casting temperature^[39]

在金属凝固过程中加入振动可以减小结合层的厚度,改善复合材料的结合性能。随着振动时间的增加,凝固过程中的冷却速率增加,Mg/Al双金属材料界面处金属间化合物(IMC)层的厚度减小。Wang等^[38]研究表明,当振动时间为300 s时,断裂裂纹可以穿过IMC层并延伸到镁合金基体中,从而获得最佳的剪切强度,比无振动复合材料的剪切强度高51%。Guan等^[45]在Mg/Al双金属复合铸造中加入了超声辅助振动,使双金属的断口在界面层产生了局部塑性变形,而没有使用超声振动的断口呈现出明显的脆性断口形貌。分析认为,超声振动可以改善结合界面的塑性,提高材料整体的性能,但是产生塑性变形的机制还有待进一步研究。

中间层的引入可以改变Mg/Al双金属复合板结合界面的相组成,显著改善复合板的力学性能。Yang等^[46]将Zn引入到Mg/Al复合板中,在结合界面处形成了一些新的相,如MgZn、MgZn₂和AlMg₄Zn₁₁,它们具有较强的抗变形性和较好的韧性,能改善材料整体的性能。尽管中间层的引入对控制Mg-Al金属间化合物很有效,但是中间层的制备很难控制,金属表面的覆盖率也不能保证,因此,向合金中添加元素(如Ce),即合金化,是一个更简单、更容易控制的过程^[37]。Li等^[47]对Al-xSi/AZ91D复合材料的剪切强度进行了研究,研究发现,随着Si含量的增加,复合材料的剪切强度逐渐提高,过共晶Al-xSi/AZ91D材料的剪切强度高于亚共晶Al-xSi/AZ91D双金属材料,这是由于没有氧化物夹杂、Mg₂Si颗粒较多以及冶金结合层的取向不一致。合金化是提高材料结合性能的方法之一,但是关于第三元素的添加量对结合层影响的研究还较少。

综上所述,消除或者减少铸造镁/铝复合材料IMC的方法如下:(1)优化工艺参数,在满足金属流动性的情况下,采用较低的浇注温度;(2)在铸造过程中加入振动,加快金属的冷却速度,振动可以使Mg/Al界面在产生冶金结合的同时产生机械结合从而提高Mg/Al之间的结合强度;(3)加入中间层或向合金中添加其他元素即合金化,抑制Mg/Al硬脆相IMC的形成。表2为不同改进措施下Mg/Al双金属的结合强度。

表2 不同改进措施下Mg/Al双金属的结合强度
Tab.2 Bonding strength of Mg/Al bimetals with different improvements

Materials	Improvements	Binding strength/MPa	References
AZ91D/A356	None	31.7	[40]
AZ91D/A356	With vibration	47.5	[40]
AZ31B/6061Al	Alloying	39	[39]

3 轧制

3.1 镁/铝复合材料轧制工艺

前文提到,轧制法因具有产品质量稳定性好、生产效率高、易于大批量生产等优点,成为目前工业应用中最广泛的工艺。Mg/Al双金属复合材料常见的轧制工艺有热轧^[48-49]、累积叠轧^[49-50]、异步轧制^[49]、波纹辊-平辊轧制^[49]和爆炸焊接+轧制^[49,51]等。

由于Mg/Al双金属在室温下的塑性较差,所以一般采用热轧的方式来制备。在再结晶温度以上进行热轧可以降低塑性变形抗力,提高塑性成形性并促进不同原子之间的扩散。图8为热轧结合过程示意图。轧制过程可以分为以下2个阶段:(1)在一定的压力下,金属表面的氧化膜破裂,新鲜的金属显现出来;(2)新鲜金属被挤入另一个金属基体中,实现异种材料的冶金结合。Mi等^[48]利用热轧技术制备了Ti/Al/Mg/Al/Ti层压板,Mg/Al界面呈波浪状,Al/Ti界面呈直线状,且复合材料沿轧制方向的综合力学性能最好。值得注意的是,不同于Mg/Al双金属复合材料,对于Ti/Al/Mg/Al/Ti层压板,需要考虑不同层之间的协调变形机制。Ren等^[52]采用了一种创新且灵活的方法来制造Mg/Al复合板,即通过冷喷涂将Al粉末直接沉积在Mg板上,得到结合良好的Mg/Al复合板,然后对复合板进行热轧,进一步提高了力学性能。Zhang等^[53]采用脉冲电流辅助轧制技术制备了Mg/Al合金复合板,结果表明,界面过渡层为锯齿状,复合材料压剪强度达到70.37 MPa。也有一些研究使用冷轧法制备Mg/Al双金属复合材料,但是由于其效率较低,在工业中的应用并不广泛^[49]。

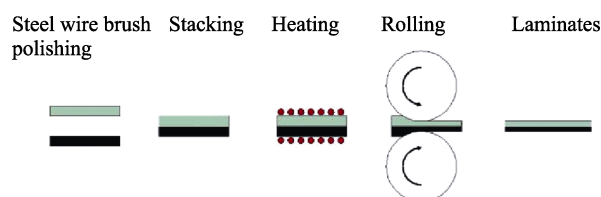


图8 热轧过程示意图^[49]

Fig.8 Schematic diagram of hot rolling process^[49]

累积叠轧是一种进一步扩大变形量、细化晶粒的轧制工艺。Mokhles等^[50]用累积叠轧法制备了Ni/Ti多层复合材料,随着ARB循环次数的增加,Ni和Ti层厚度分布的不均匀性得到了改善,硬度和强度也得到了提高。将累积叠轧法应用于Mg/Al合金多层板,并研究各个界面的协调变形机制是未来的研究重点。Bi等^[20]利用搅拌摩擦焊+累积叠轧相结合的新方法制备了铝/镁/铝层状复合材料,根据不同的轧制压下率结合层厚度的测量值,获得了1060/AZ31/1060 LCMs在不同轧制应变场下界面层的生长动力学模型公式以及最佳的工艺参数。Al/Mg/Al LMCs的累积叠

轧工艺过程如图 9 所示^[12]。虽然累积叠轧能够细化晶粒, 提高材料的强度, 但是轧辊的使用寿命不高, 生产成本昂贵, 还会降低塑性, 萌生边缘裂纹^[49,54]。对此, Zhang 等^[54]提出了一种利用硬板累积叠轧制备 Mg/Al 复合板材的方法, 该方法在显著提高复合材料层压板拉伸强度的同时也提高了塑性。

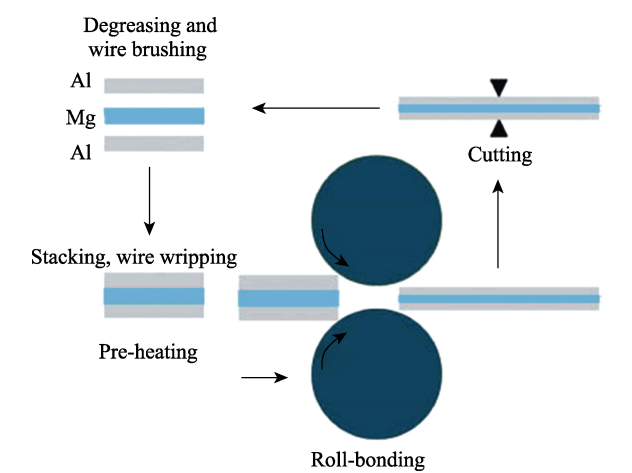


图 9 Al/Mg/Al 层状金属复合材料的累积叠轧工艺过程^[12]
Fig.9 ARB process for Al/Mg/Al LMCs^[12]

近年来, 一些特殊的轧制技术也被开发出来以用于制备 Mg/Al 双金属复合材料, 例如异步轧制、波纹辊-平辊轧制以及将爆炸焊接和轧制结合起来的工艺方法。由于上辊和下辊具有不同线速度, 异步轧制 (Different Speed Rolling, DSR) 是一种可在整个板材厚度上产生严重剪切变形的轧制工艺。一方面, DSR 所产生的剪切变形有助于金属之间的结合; 另一方面, DSR 可以产生大量的热量, 为界面区域中金属原子的扩散提供能量。因此, 与传统的轧制技术相比, DSR 可以降低能耗, 增强结合效果并改善平整度^[12]。但是, DSR 工艺也存在缺点, 如扭矩分布不均匀、自动咬合困难、轧机容易颤振等^[12,49]。传统轧制方法制备的复合材料存在一些缺点, 如残余应力大和变形严重。为解决这些问题, Wang 等^[55]采用新型的波纹辊+平辊轧制工艺在高温下制备了具有优异力学性能和良好板形的 Mg/Al 复合板。近年来, 也有一些研究将轧制与焊接相结合。Mroz 等^[51]用爆炸焊接+热轧法制备了 Mg/Al 复合材料, 研究表明, 在爆炸焊接后, 结合界面呈波浪形。在热轧过程中, 界面处形成了由 Mg-Al 金属间相组成的连续夹层。

3.2 影响轧制结合层的因素

Mg/Al 复合材料的性能在很大程度上取决于工艺参数, 例如轧制温度、轧制速度、压下率以及轧制后的退火处理等。结合层厚度随轧制温度的升高而增加。轧制温度过高会使金属发生氧化, 表面氧化层的存在对结合极为不利, 也会导致金属粘在辊上。当轧制温度过低时, Mg 会因不易发生塑性变形而断裂。

过快的轧制速度会缩短板材的接触时间, 导致板坯无法在短时间内与新鲜金属实现大面积接触, 然而, 轧制速度太慢又会导致板材的温度下降^[12]。当压下率过低时, 金属表面的氧化层不容易破裂, 新金属的暴露被限制, 复合板无法实现冶金结合。陈琦等^[56]研究表明, 当轧制温度为 300~400 °C、道次压下率为 30%~40%时, 镁铝板材可以实现良好的结合。随着轧制后退火处理温度的升高, 元素扩散速度变快, IMC 层厚度增大, 材料结合性能下降^[56]。图 10 为不同退火温度下镁/铝复合板界面化合物生长情况^[49]。

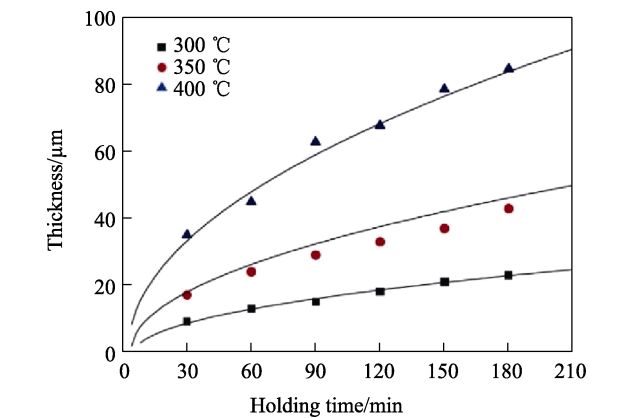


图 10 不同退火温度下镁/铝复合板界面化合物生长情况^[49]
Fig.10 Growth of compounds at the interface of magnesium/aluminium composite plates at different annealing temperatures^[49]

界面的形状、层厚比和夹层的应用对结合层也有显著影响。与二维界面相比, 三维界面不仅增大了各个层之间的接触面积, 而且可以有效地抑制裂纹扩展, 提高界面结合性能和整体力学性能^[12]。Wang 等^[55,57]通过波纹辊+平辊工艺获得了波浪形三维界面, 细化了基体组织, Mg/Al 板材抗拉强度为 278.3 MPa, 伸长率为 16.91%, 优于单个构件板材, 且板材形状良好。Gao 等^[58]研究了不同层厚比的 Al/Mg/Al 复合板材, 随着层厚比的增加, 结合界面的形态特征和平均晶粒尺寸会发生变化, 当层厚比为 1 : 10 时, 极限抗拉强度为 240.8 MPa, 伸长率为 25.3%, 性能最好。在以往对 Mg/Al 复合材料的研究中, 大部分工作集中于复合材料的界面形状和力学性能, 有关轧制后层厚比控制的研究较少。夹层的应用在前面的工艺中已有介绍, 不再赘述。表 3 为添加不同夹层的 Mg/Al 双金属的结合性能。

表 3 添加不同夹层的 Mg/Al 双金属的结合强度 Tab.3 Binding strength of Mg/Al bimetals with different interlayers			
Materials	With or without sandwich	Binding strength/MPa	References
AZ31B/6061Al	None	65	[46]
AZ31B/6061Al	Zn	74	[46]
AZ31B/6061Al	Ti	74.6	[59]

综上所述,减少 IMC、提高 Mg/Al 复合材料力学性能的方法如下:(1)优化工艺,找到轧制温度、轧制速度和压下率的最优搭配,在条件允许的情况下,尽可能降低轧制后的退火温度,找到最优层厚比;(2)用三维界面代替二维界面,比如波纹辊-平辊轧制工艺;(3)加入夹层。

4 挤压

4.1 镁/铝复合材料挤压工艺

复合材料的挤压工艺是将异种材料的复合坯料在一定压力下挤出的一种方法。挤压能够大大提高材料的塑性,并且由于材料间接触面积大,元素扩散充分,有利于提高结合效果^[17]。但是该方法的材料损失较大,成品率较低,且由于压力的存在,挤压工具的使用寿命较短。

热挤压可以使镁铝原子发生扩散,当两原子扩散到一定浓度时,在界面处会产生 IMC,使 Mg/Al 产生冶金结合。Feng 等^[60]系统研究了多层结构对 Mg/Al 板材组织和性能的影响,发现多层结构界面处存在更多的 IMC,不利于 Mg/Al 复合板材的力学性能。截至目前,通过挤压工艺制备 Mg/Al 双金属复合材料的研究主要集中于棒材和板材。Meng 等^[61]通过共挤压的方式在不改变织构类型的情况下增加了外层 AZ31 和内层 GW103K 的织构强度,制成的复合棒材的抗拉强度和屈服强度均得到了提高,工艺流程如图 11 所示。Chen 等^[62]通过孔模共挤出(Porthole Die Co-Extrusion, PCE)工艺,制备出了结合层没有空隙和裂纹的 Al/Mg/Al 三层板,并研究了结合层的硬度和 2 种金属的织构。与普通挤压成形相比,连续挤压剪切在挤压过程中能产生更严重的塑性变形(Severe Plastic Deformation, SPD),细化晶粒,使动态再结晶的比例更高^[63-64],从而达到提高复合材料力学性能的目的。Tian 等^[65]采用挤压剪切工艺制备了铝/镁复合棒,相比于直接挤压工艺,挤压剪切工艺形成了没有孔隙和裂纹的冶金结合层,显著细化了晶粒尺寸,结合层的剪切强度达到 36 MPa,在提高双

金属材料综合力学性能方面具有很大潜力。Sheng 等^[66]研究了一种能产生 SPD 的全新的金属合金挤压方法,即直接挤压和弯曲-剪切(Direct Extrusion and Bending-Shear, DEBS)方法,并通过这种方法制备了 Mg/Al 复合板材。双金属复合板材制备工艺如图 12 所示。Guo 等^[67]将轧制、剪切、挤压等工艺结合,研发出了一种新的加工工艺,可以在不预热的情况下将铝合金管和镁合金内芯直接加工为冶金效果良好的双金属复合板材。Wang 等^[68]采用了一种新的固态加工工艺——旋转摩擦挤压(Rotational Friction Extrusion, RFE),实现了纯铝改性和铝基复合材料的制备。改性 Al 和铝基复合材料的应变硬化能力显著提高,表现出优异的伸长率。RFE 技术适用于轻金属改性和复合材料制造,可以推广到镁铝双金属复合材料的研究中。综上所述, Mg/Al 双金属复合材料的研究主要集中于棒材和板材,而对方形管的研究很少,然而方形管比圆形管具有更好的能量吸收能力,在工程建筑、机械设备和车辆支撑架中有广泛的应用^[69]。对此, Zhao 等^[69]采用包括直接挤压和连续剪切膨胀在内的渐进膨胀成形(Progressive Expanding Forming, PEF)工艺制备了镁铝复合方管,并用 DEFORM-3D 软件对复合材料方管角部缺陷产生的原因进行了分析。结果表明,复合方管角部出现缺陷是由 Mg/Al 原子扩散系数的差异导致的。PEF 工艺可以通过施加剪切力来改善 Mg/Al 复合方管的冶金结合,在提高 Mg/Al 复合方管综合力学性能方面具有很大潜力。

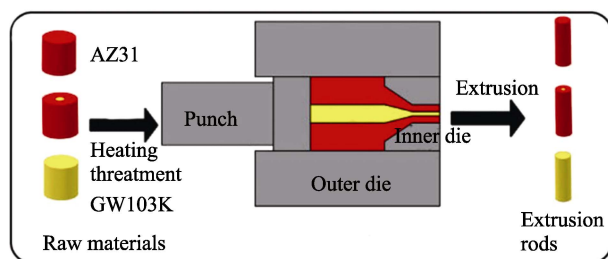


图 11 双金属复合棒材制备工艺流程^[61]

Fig.11 Preparation process for bimetallic composite rods^[61]

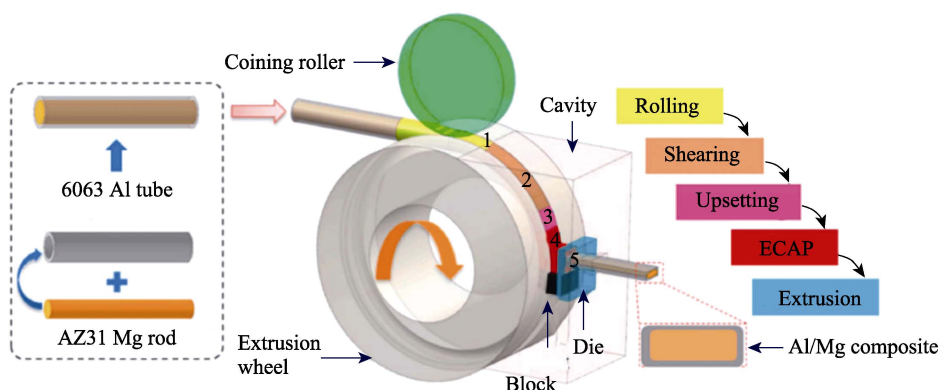


图 12 双金属复合板材制备工艺^[67]

Fig.12 Preparation process of bimetallic composite sheets^[67]

4.2 影响挤压结合层的因素

在挤压成形过程中,影响 Mg/Al 复合材料结合层组织和结合性能的因素有挤出速度、挤出温度和挤压后的热处理等。同前面几种工艺一样,随着温度的升高, Mg/Al 复合材料结合层的厚度增加,结合性能下降^[61,63]。当退火温度过高时,部件之间可能会出现局部或完全脱粘现象,这与退火处理后形成大量的金属间化合物有关。随着挤出速度的增加, Mg 和 Al 之间的塑性变形差异变得更加明显,界面之间没有足够的原子扩散时间,因此无法形成稳定的复合界面^[66]。快速挤压引起的局部应变的不均匀性和塑性变形能力的差异是影响复合挤压片材开裂的重要原因。此外,材料堆叠结构也对结合层有重要的影响, Sun 等^[70]对 7075/Zr44Ti11Cu10Ni10Be25 (Vit1b)/AZ31B 复合材料界面进行了研究,发现该复合材料几乎没有挤压飞边或弯曲等缺陷,拉伸强度提高了 12.5%。Chen 等^[71]用超声波辅助挤压铸造方法加工了变形铝合金,验证了超声波辅助挤压铸造技术的可行性。研究表明,随着超声功率的增加,挤压铸件的显微组织明显细化,强度和塑性等力学性能也得到显著改善。与添加夹层相比,超声波辅助是一种更加创新的改进方法,未来可将其应用到 Mg/Al 双金属的挤压过程中。

综上所述,提高复合材料结合性能的方法如下:

(1) 优化工艺,采用合适的挤出速度和挤出温度,在一定范围内,采用较低的退火温度;(2) 采用合适的材料堆叠结构;(3) 加入超声波振动辅助;(4) 采用挤压剪切等新工艺。

5 总结与展望

Mg/Al 复合材料同时具备镁合金和铝合金的优质特点,有着广泛的应用前景。由于制备工艺比较复杂,成本较高, Mg/Al 复合材料的制备工艺还有待进一步研究。当采用焊接、铸造、轧制和挤压这 4 种 Mg/Al 复合材料成形方法时,结合界面都容易产生硬脆的 IMC,会降低材料的结合性能。要想提高 Mg/Al 复合材料的性能,可以从减少或者消除 IMC 入手。

1) 采用超声波点焊、磁脉冲焊接和水下搅拌摩擦焊等新工艺,选择合适的工艺参数,添加第三元素或者夹层,可以有效抑制 IMC,改善结合性能。今后应重点研究新工艺的作用机制,优化工艺参数,进一步研究第三元素添加量对组织和性能的影响。

2) 铸造法在层状金属材料制备中的应用已经非常广泛,未来可以将铸造与轧制或锻造等方式结合,融合 2 种工艺的优势,制备性能更优良的材料。由于铸造中液相的温度较高,容易发生氧化,不利于界面结合,应加入保护气氛,进一步优化工艺参数。此外,

用超声波振动辅助制备、添加夹层以及合金化,都可以抑制 IMC,优化结合效果。

3) 轧制产品的质量稳定性好、生产效率高、易于大批量,轧制是目前生产 Mg/Al 复合材料最广泛的方法。波纹辊-平辊轧制是近年来出现的新技术,它不但弥补了平辊传统轧制的缺陷,而且能产生三维结合界面,提升板材的质量。优化工艺参数、添加夹层、精确控制层厚比是未来的研究方向。

4) Mg/Al 复合材料挤压工艺的研究目前都集中于板材和棒材,对方形管的研究很少。未来可以在实验基础上运用数值模拟对复合材料的成形过程进行模拟和工艺优化。将超声振动引入挤压过程是一种创新性的改进措施。界面堆叠结构、工艺的可控性和包覆效果都是研究的重点。

参考文献:

- [1] 龙琼,路坊海,张玉兰,等. Mg/Al 异种金属焊接技术的研究现状及最新进展[J]. 轻金属, 2018(2): 47-53.
LONG Qiong, LU Fang-hai, ZHANG Yu-lan, et al. Present Research Status and New Development of the Welding Technologies of Mg/Al Dissimilar Metals[J]. Light Metals, 2018(2): 47-53.
- [2] SONG Jiang-feng, SHE Jia, CHEN Dao-lun, et al. Latest Research Advances on Magnesium and Magnesium Alloys Worldwide[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 1-41.
- [3] TAYLOR S, WEST G D, MOGIRE E, et al. Superplastic Forming Characteristics of AZ41 Magnesium Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(3): 648-654.
- [4] 胡中潮,高忠玉,陈湖演,等. Mg-Al 合金晶粒细化综述及未来展望[J]. 有色金属加工, 2022, 51(1): 15-20.
HU Zhong-chao, GAO Zhong-yu, CHEN Hu-yan, et al. Review and Prospect of Mg-Al Alloy Grain Refinement[J]. Nonferrous Metals Processing, 2022, 51(1): 15-20.
- [5] 徐仕豪,温璐,彭翔,等. 镁锂合金熔体保护和净化的研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1774-1785.
XU Shi-hao, WEN Lu, PENG Xiang, et al. Research Status and Prospect of Mg-Li Alloys Melt Protection and Purification[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1774-1785.
- [6] 宋广胜,牛嘉维,张士宏,等. 镁合金棒材扭转变形的孪晶机制[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1574-1583.
SONG Guang-sheng, NIU Jia-wei, ZHANG Shi-hong, et al. Twinning Mechanism of Magnesium Alloy Rod Torsion[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(7): 1574-1583.
- [7] PAN Fu-sheng, WANG Qing-hang, JIANG Bin, et al. An Effective Approach Called the Composite Extrusion to

- Improve the Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheets[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 655: 339-345.
- [8] CHEN Liang, ZHANG Ji-xiao, ZHAO Guo-qun, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Al-Zn Alloy Extruded by Porthole Die with Different Initial Billets[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 718: 390-397.
- [9] XU Tian-cai, YANG Yan, PENG Xiao-dong, et al. Overview of Advancement and Development Trend on Magnesium Alloy[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7(3): 536-544.
- [10] HIRSCH J, AL-SAMMAN T. Superior Light Metals by Texture Engineering: Optimized Aluminum and Magnesium Alloys for Automotive Applications[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(3): 818-843.
- [11] CHEN Peng-wan, FENG Jian-rui, ZHOU Qiang, et al. Investigation on the Explosive Welding of 1100 Aluminum Alloy and AZ31 Magnesium Alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(7): 2635-2641.
- [12] LIU Ting-ting, SONG Bo, HUANG Guang-sheng, et al. Preparation, Structure and Properties of Mg/Al Laminated Metal Composites Fabricated by Roll-Bonding, a Review[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(8): 2062-2093.
- [13] PENG Pai, WANG Kuai-she, WANG Wen, et al. Intermetallic Compounds: Formation Mechanism and Effects on the Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Dissimilar Joints of Magnesium and Aluminum Alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 802: 140554.
- [14] ZHU Cong-cong, XU Shi-wei, GAO Wen-li, et al. Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of Al/Mg Joints Manufactured by Magnetic Pulse Welding[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021.
- [15] 刘政军, 宫颖, 苏允海, 等. Mg/Al 固相连接镁铝元素扩散行为的分析[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(13): 38-40. LIU Zheng-jun, GONG Ying, SU Yun-hai, et al. Analysis of Diffusion Behavior of Mg-Al Element in Mg/Al Solid Phase Bonding[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(13): 38-40.
- [16] 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. CUI Peng-jie, ZHONG Li-sheng, BAI Hai-qiang, et al. Application of Casting in Layered Bimetallic Composites[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(19): 1-6.
- [17] 林凌峰. 6063Al/AZ31Mg 层状复合材料的制备及性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022: 5-6. LIN Ling-feng. Preparation and Properties of 6063Al/AZ31Mg Laminate Composites[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022: 5-6.
- [18] LIU Y B, LI J Z, SUN Q J, et al. Optimization of Magnetic Oscillation System and Microstructural Characteristics in Arc Welding of Al/Mg Alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 39: 69-78.
- [19] 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 and Engineering: A*, 2018, 711: 109-118.
- [20] BI Xiao-lin, HU Yu-jun, LI Rui-feng, et al. A Novel Method for Preparing Al/Mg/Al Laminated Composite Material, Processing Maps and Interface Diffusion Analysis[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 900: 163417.
- [21] 赵亚东, 路尧文, 何洋洋, 等. 1060 铝/AZ31B 镁异种金属 FSW 接头的组织演化与力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(10): 3071-3084. ZHAO Ya-dong, LU Yao-wen, HE Yang-yang, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Metal Joints of 1060 Aluminum and AZ31B Magnesium Alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(10): 3071-3084.
- [22] PENG H, CHEN D L, BAI X F, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Mg-to-Al Dissimilar Welded Joints with an Ag Interlayer Using Ultrasonic Spot Welding[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(2): 552-563.
- [23] 李铭锋, 王官明, 朱政强, 等. 金属箔片阻隔 Mg/Al 超声波焊接界面 反应的有效性[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(8): 1606-1615. LI Ming-feng, WANG Guan-ming, ZHU Zheng-qiang, et al. Effectiveness of Metal Foil Barrier Interfacial Reaction during Ultrasonic Welding of Mg/Al[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(8): 1606-1615.
- [24] 李成祥, 杜建, 周言, 等. 电磁脉冲板件焊接设备研制及镁/铝合金板焊接实验研究[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(10): 2018-2027. LI Cheng-xiang, DU Jian, ZHOU Yan, et al. Development of Electromagnetic Pulse Welding Equipment for Plates and Experimental Research on Magnesium/Aluminum Alloy Welding[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(10): 2018-2027.
- [25] SAHUL M, SAHUL M, LOKAJ J, et al. The Effect of Annealing on the Properties of AW5754 Aluminum Alloy-AZ31B Magnesium Alloy Explosively Welded Bimetals[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(10): 6192-6208.
- [26] AZIZI A, ALIMARDAN H. Effect of Welding Temperature and Duration on Properties of 7075 Al to AZ31B Mg Diffusion Bonded Joint[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(1): 85-92.
- [27] PARADISO V, RUBINO F, CARLONE P, et al. Magnesium and Aluminium Alloys Dissimilar Joining by Friction Stir Welding[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 183: 239-244.
- [28] SEN M, PURI A B. Formation of Intermetallic Com-

- pounds (IMCs) in FSW of Aluminum and Magnesium Alloys (Al/Mg Alloys) - a Review[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 105017.
- [29] ZHAO Yong, LU Zheng-ping, YAN Keng, et al. Microstructural Characterizations and Mechanical Properties in Underwater Friction Stir Welding of Aluminum and Magnesium Dissimilar Alloys[J]. *Materials & Design* (1980-2015), 2015, 65: 675-681.
- [30] KUMAR P, KUMAR GHOSH S, DEB BARMA J, et al. The Joining of Magnesium and Aluminium Alloys by Inclined Arrangement of Explosive Welding[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 76: 536-541.
- [31] CHEN Shu-jun, JIANG Xiao-qing. Microstructure Evolution during Magnetic Pulse Welding of Dissimilar Aluminium and Magnesium Alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 19: 14-21.
- [32] YANG Tuo-yu, WANG Ke-hong, ZHANG De-ku, et al. Contact-Reaction Brazing of an AZ31 Magnesium/3003 Aluminum Alloy Using a Silver-Copper-Zinc Interlayer[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 531-537.
- [33] PENG Pai, WANG Wen, ZHANG Ting-an, et al. Effects of Interlayer Metal on Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Dissimilar Joints of Magnesium and Aluminum Alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 299: 117362.
- [34] ZHAO Jun-jie, WU Chuan-song, SHI Lei, et al. Evolution of Microstructures and Intermetallic Compounds at Bonding Interface in Friction Stir Welding of Dissimilar Al/Mg Alloys with/without Ultrasonic Assistance[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 139: 31-46.
- [35] WU Chuan-song, WANG Tao, SU Hao. Material Flow Velocity, Strain and Strain Rate in Ultrasonic Vibration Enhanced Friction Stir Welding of Dissimilar Al/Mg Alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 75: 13-22.
- [36] ZHAO Jun-jie, WU Chuan song, SU Hao. Ultrasonic Effect on Thickness Variations of Intermetallic Compound Layers in Friction Stir Welding of Aluminium/Magnesium Alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 388-402.
- [37] ZHANG Zheng, JIANG Wen-ming, GUAN Feng, et al. Interface Formation and Strengthening Mechanisms of Al/Mg Bimetallic Composite via Compound Casting with Rare Earth Ce Introduction[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 854: 143830.
- [38] WANG Jun-long, GUAN Feng, JIANG Wen-ming, et al. 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.
- [39] 杨昊坤, 邱谨, 周宏伟, 等. 铝/镁双金属铸造复合材料的组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(6): 1591-1604.
- YANG Hao-kun, QIU Jin, ZHOU Hong-wei, et al. Microstructure and Properties of Aluminum/Magnesium Bimetallic Casting Composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(6): 1591-1604.
- [40] GUAN Feng, JIANG Wen-ming, LI Guang-yu, et al. 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.
- [41] 陈刚, 贾澎, 陈强. 固液复合成形铝镁双金属件平直界面的精确控制[J]. *锻压技术*, 2021, 46(9): 245-253.
- CHEN Gang, JIA Peng, CHEN Qiang. Precise Control on Flat and Straight Interface for Aluminum-Magnesium Bimetal Component in Solid-Liquid Composite Forming[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46(9): 245-253.
- [42] XU De-xing, YANG Chang-lin, ZHAO Kang-ning, et al. Interfacial Microstructure and Mechanical Behavior of Mg/Cu Bimetal Composites Fabricated by Compound Casting Process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(6): 1233-1241.
- [43] JI Ce, HUANG Hua-gui. A Review of the Twin-Roll Casting Process for Complex Section Products[J]. *ISIJ International*, 2020, 60(10): 2165-2175.
- [44] ZHANG Jun-peng, HUANG Hua-gui, ZHAO Ri-dong, et al. Cast-Rolling Force Model in Solid-Liquid Cast-Rolling Bonding (SLCRB) Process for Fabricating Bimetal Clad Strips[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(3): 626-635.
- [45] GUAN Feng, JIANG Wen-ming, WANG Jun-long, 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: 117441.
- [46] YANG H K, QIU J, CAO C, et al. 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.
- [47] LI Guang-yu, JIANG Wen-ming, GUAN Feng, et al. Microstructure Evolution, Mechanical Properties and Fracture Behavior of Al-xSi/AZ91D Bimetallic Composites Prepared by a Compound Casting[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022.
- [48] MI Yu-jie, NIE Hui-hui, WANG Taolue, et al. Effect of Anisotropy on Microstructures and Mechanical Properties of Rolled Ti/Al/Mg/Al/Ti Laminates[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(7): 4143-4151.
- [49] 李莎, 贾臻, 刘欣阳, 等. 层状镁/铝复合板轧制工艺研究进展[J]. *精密成形工程*, 2021, 13(6): 1-11.
- LI Sha, JIA Yi, LIU Xin-yang, et al. Research Progress on Rolling Process of Laminated Mg/Al Clad Plate[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, 13(6): 1-11.

- 1-11.
- [50] MOKHLES M, HOSSEINI M, DANESH-MANESH H, et al. Structure and Mechanical Properties of Ni/Ti Multilayered Composites Produced by Accumulative Roll-Bonding Process[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(8): 1119-1126.
- [51] MROZ S, MOLA R, SZOTA P, et al. Microstructure and Properties of 1050A/AZ31 Bimetallic Bars Produced by Explosive Cladding and Subsequent Groove Rolling Process[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20(3): 77.
- [52] REN Y P, TARIQ N U H, LIU H H, et al. An Innovative and Flexible Approach to Fabricate Mg/Al Composite Plates: Cold Spraying and Hot Rolling Post-Treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 849: 143515.
- [53] ZHANG Ting-ting, WANG Yan, XU Zhen-bo, et al. A New Method for Fabricating Mg/Al Alloy Composites by Pulse Current-Assisted Rolled Welding[J]. *Materials Letters*, 2023, 330: 133247.
- [54] ZHANG An-xin, LI Feng, HUO Peng-da, et al. Response Mechanism of Matrix Microstructure Evolution and Mechanical Behavior to Mg/Al Composite Plate by Hard-Plate Accumulative Roll Bonding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 3312-3321.
- [55] WANG Tao, WANG Yue-lin, BIAN Li-ping, et al. Microstructural Evolution and Mechanical Behavior of Mg/Al Laminated Composite Sheet by Novel Corrugated Rolling and Flat Rolling[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 765: 138318.
- [56] 陈琦, 迟之东. 镁/铝复合板材制备工艺及性能研究 [J]. *有色金属加工*, 2015, 44(1): 26-28.
CHEN Qi, CHI Zhi-dong. Study of Preparation and Properties of Mg/Al Composite Sheet[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2015, 44(1): 26-28.
- [57] WANG Tao, LI Sha, NIU Hui, et al. EBSD Research on the Interfacial Microstructure of the Corrugated Mg/Al Laminated Material[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 5840-5847.
- [58] GAO Rong-he, LI Feng, HUO Peng-da, et al. Evolution Mechanism of Interfacial Morphological Characteristics for Al/Mg/Al Composite Plate Rolled by the Hard Plate[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 104257.
- [59] GAO Ming, MEI Shu-wen, LI Xiang-you, et al. Characterization and Formation Mechanism of Laser-Welded Mg and Al Alloys Using Ti Interlayer[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 67(2): 193-196.
- [60] FENG Bo, SUN Zheng, WU Yang, et al. Microstructure and Mechanical Behavior of Mg ZK60/Al 1100 Composite Plates Fabricated by Co-Extrusion[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 842: 155676.
- [61] MENG Yun-peng, ZHANG Hua, LIN Bo-yu, et al. Microstructure and Mechanical Properties of the AZ31/GW₁₀₃K Bimetal Composite Rods Fabricated by Co-Extrusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 833: 142578.
- [62] CHEN Liang, TANG Jian-wei, ZHAO Guo-qun, et al. Fabrication of Al/Mg/Al Laminate by a Porthole Die Co-Extrusion Process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 165-173.
- [63] LIU X B, CHEN R S, HAN E H. Preliminary Investigations on the Mg-Al-Zn/Al Laminated Composite Fabricated by Equal Channel Angular Extrusion[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(10): 4675-4681.
- [64] ASGARI M, FERESHTEH-SANIEE F. Production of AZ80/Al Composite Rods Employing Non-Equal Channel Lateral Extrusion[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(5): 1276-1283.
- [65] TIAN Ye, HU Hong-jun, LI Yang, et al. A Continuous Extrusion-Shear (ES) Composite Process for Significantly Improving the Metallurgical Bonding and Textures Regulations and Grain Refinements of Al/Mg Bimetallic Composite Rods[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(6): 2200061.
- [66] SHENG Kun, LU Li-wei, XIANG Yao, et al. Crack Behavior in Mg/Al Alloy Thin Sheet during Hot Compound Extrusion[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7(4): 717-724.
- [67] GUO Li-li, WANG Jian-qiang, YUN Xin-bing, et al. Fabrication of Aluminum-Magnesium Clad Composites by Continuous Extrusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 802: 140670.
- [68] WANG Yan, CHEN Yu-hua, XIE Ji-lin, et al. Light Metal Modification and Composite Preparation by a New Solid-State Processing Process: Rotational Friction Extrusion[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 4886-4892.
- [69] ZHAO Jian-xing, SUN Zhen-wei, YUAN Ting, et al. A Novel Forming Process of Mg/Al Composite Square Tube Based on Numerical Simulations and Experiments[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 105526.
- [70] SUN Y, HE L F, LI H P, et al. A Study of Interfaces in 7075/Zr₄₄Ti₁₁Cu₁₀Ni₁₀Be₂₅(Vit1b)/AZ31B Composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 866: 144682.
- [71] CHEN Gang, YANG Ming, JIN Yu, et al. Ultrasonic Assisted Squeeze Casting of a Wrought Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 19-25.

责任编辑：蒋红晨