

镁铝合金层状复合材料研究现状与制备技术

黎小辉¹, 孙炜翔², 李晓沛^{2*}, 陈天来^{3*}

(1. 佛山科学技术学院机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528225; 2. 福建师范大学材料与化学学院, 福建 福州 350000; 3. 佛山通宝精密合金股份有限公司, 广东 佛山 528131)

摘要: 阐述了镁铝合金层状复合材料的优缺点和研究现状, 介绍了轧制复合、挤压复合和爆炸复合3种常用的层状复合材料的制备方法。列举了几种具体的镁铝金属层状复合板的组成成分, 分析了界面特征及界面温度对镁铝复合板的微观结构的影响机制和性能变化规律, 为镁铝合金层状复合材料的应用与发展指明了方向。

关键词: 镁铝层状复合板; 拉伸性能; 制备工艺; 界面影响

中图分类号: TG113.12

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2023)04-0636-07

引文格式: 黎小辉, 孙炜翔, 李晓沛, 等. 镁铝合金层状复合材料研究现状与制备技术[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(4): 636-642.

LI Xiaohui, SUN Weixiang, LI Xiaopei, et al. Research Status and Preparation Methods of Mg-Al Alloy Layered Metal Composites[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(4): 636-642.

1 镁铝合金层状金属复合材料研究现状

在科学和技术不断进步的今天, 人们对材料的应用要求变得更加严苛, 期望获得质量更轻、强度更高的新型合金材料。镁合金不仅密度小、质量轻、比刚度高, 而且在航空航天、交通等领域中有着广阔的应用前景^[1-2]。但是, 单一的镁合金往往强度和塑性不够高、耐腐蚀性能较差, 无法满足某些特定的高性能需求。两种或两种以上的层状金属复合材料往往具有良好的综合性能, 越来越受到材料研究者的广泛关注^[3-5]。层状金属复合板不仅具有单一金属板不具备的物理和化学性质, 还能满足高强度、高塑性、抗疲劳等特殊要求, 从而能在更多的领域中进行应用^[6-7]。金属铝是一种轻质环保结构材料, 具有活泼的化学性质, 容易与空气中的 O_2 进行氧化反应, 形成致密坚硬的 Al_2O_3 氧化膜^[8]。铝合金还具有出色的耐腐蚀性和塑性变形能力, 可以用于各种成型方法^[9-10]。铝及其合金被广泛用于交通运输、海洋船只、宇宙飞船和其他领域中。因此, 结合金属Mg和金属Al来制作Mg/Al复合板, 可以充分发挥其两种

基体材料的优势。

Mg/Al复合板不仅密度小、强度高、耐腐蚀性好^[11-12], 而且热稳定性好、比刚度高、比强度大, 广泛用作于建筑领域中的装修材料、电子电器行业中无线耳机的支架材料和交通、航空航天领域中高铁和火箭的制造材料^[12]。然而, 镁铝复合板的制备同样也存在着一些不足, 如工艺成本高、工艺复杂、制备周期较长和生产效率低, 在高温的情况下有时会在金属板分层的现象, 镁铝复合板材还存在多道次、层间强度低、力学性能弱等诸多瓶颈, 造成复合板的强度和塑性提升不高。目前, 常见的复合板制备技术主要包括轧制法、挤压法、爆炸焊接法等, 其中轧制复合法不仅生产效率高、而且产品的质量也很稳定, 是目前最常用的镁铝层状复合材料制备方法。

本文介绍了轧制复合、挤压复合、爆炸焊接复合3种复合板的制备方法, 重点介绍了轧制复合中硬板累积轧制复合、非对称轧制和波纹+平板轧制这3种制备工艺。同时, 比较了3种工艺制得的镁铝复合板的拉伸性能, 相比于传统轧制的镁铝复合板其

收稿日期: 2023-08-07

基金项目: 广东省科技特派员专项项目(GDKTP2021028500); 国家自然科学基金项目(52004068); 福建省自然科学基金项目(2021J155); 佛山市科协创新驱动助力工程项目(2021007)

作者简介: 黎小辉, 博士, 教授, 研究方向为电塑性加工新技术及其工程应用、表面强化加工新技术及其装备、机器学习与数据挖掘、增材制造, E-mail: lixiaohui@fosu.edu.cn。

通信作者: 李晓沛, 博士, 副教授, 研究方向为电致塑性加工技术, E-mail: lixiaopei@fjnu.edu.cn;

陈天来, 本科, 工程师, 研究方向为双金属材料, E-mail: ctl@fepac.com。

性能有显著的提升,并从微观结构阐述了提升原因,分析了镁铝合金层状金属复合板的界面形状和界面温度对其微观结构的影响机制和性能变化规律,为镁铝复合板的应用和发展指明了方向。

2 镁铝合金层状金属复合板的制备方法

2.1 轧制复合

轧制法是将两种相互接触的金属,通过轧机对其施加一个较强的下压力,从而使两种金属达到复合的效果^[6]。根据轧制所需要的不同温度,可以将轧制分为热轧和冷轧2种方式。热轧开始之前需要进行一定温度的预加热,从而使金属可以顺利地进行塑性变形、使金属轧制过程中的变形抗力减小,以及使复合界面处的小分子更容易进行扩散,让两种金属更紧密地结合在一起。但是,热轧会在界面处产生新的金属间化合物,从而在一定程度上减少界面处的结合强度,大大地降低了复合效果^[13]。冷轧主要分为表面处理、轧制复合和退火处理^[14],其比热轧

更为简单方便,所需要的成本也更低,但冷轧需要的变形量较大,所以对轧机的功率要求也更高^[15]。

纯镁及大部分镁合金具有密排六方结构(HCP),晶格对称性差,晶内不同变形模式下启动所需的临界分切应力差异较大,室温变形过程中最容易开启的基面滑移只能提供2个独立的滑移系,远低于均匀变形所需的5个独立的滑移系(von-Mises准则)^[16]。在室温条件下塑性性能差,所以采用热轧的方式制备镁基合金层状金属复合材料^[17]。热轧开始前,先对镁合金进行表面预处理以去除表面的氧化物和杂质,提高复合效果,然后对金属进行预加热来提高其塑性变形能力,最后用线切割机将金属切割成所需的尺寸大小,选择合适的轧制温度、轧制速度和每道次的压下量,每次轧制后还要对金属复合板进行退火处理并且将弯曲的部分去除^[18]。本节详细介绍3种常见的轧制复合的制备工艺,即硬板累积轧制复合、非对称轧制、波纹+平板轧制,不同轧制复合工艺制备的镁铝复合板的拉伸性能列于表1。

表1 不同轧制复合工艺制备的镁铝复合板的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of Mg-Al composite plates prepared by different rolling composite processes

| 合金成分 | 轧制工艺 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 延伸率/% | 文献 |
|--------------|--------|----------|----------|-------|------|
| AZ31B/AA1060 | 传统轧制 | 210.3 | 293 | 15.6 | [19] |
| AZ31B/AA1060 | 硬板累积叠轧 | 226 | 296 | 21.5 | [19] |
| AZ31B/AA1060 | 硬板轧制 | 220.5 | 232.16 | 14.13 | [20] |
| AZ31B/AI6061 | 非对称轧制 | 273.2 | 304.5 | 9.3 | [21] |
| AZ31B/AI6061 | 非对称轧制 | 225 | 283.3 | 18.6 | [22] |
| AZ31B/AI5052 | 波纹平板轧制 | 68.26 | 278.3 | 16.91 | [23] |
| AZ31B/AI5052 | 波纹平板轧制 | 280 | 316 | 13 | [24] |

2.1.1 累积叠轧复合

累积叠轧复合(ARB)方法被广泛使用,制备镁铝层状复合板的原料一般采用镁合金AZ31B和铝合金AA1060,该方法通过不断累积应变获得大变形破碎晶粒,从而形成大角度晶界,通过不断细化晶粒,从而显著提高材料的强度。采用累积叠轧复合方法制备的镁铝复合板的延伸率和抗拉强度随着轧制道次的增加先增大后减小,两道次的复合板性能最好^[25]。累积叠轧具有操作简单、生产成本低的优点,但是在轧制过程中复合板的变形剧烈,强度的提高往往伴随着塑性的降低。研究发现^[26-28],添加硬质板可以改变轧制过程中复合板的应力状态,显著影响层间的结合能力、机械性能、微观结构及界面形态,硬质板的添加可以将轧制方向的剪切力部分转化为法向的压应力,从而使界面结合更加紧密。硬板累积叠轧对复合的镁铝复合板的力学性能和板材

成形性能等有较大的提高,这为非均质复合材料层复合板的成形与制造提供了一种新思路^[19]。图1为硬板累积叠轧的示意图^[25]。

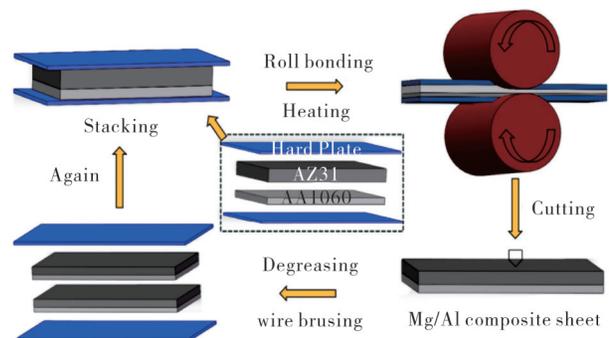


图1 硬板累积叠轧复合板的工艺原理^[25]

Figure 1 Principle of hard-plate accumulative roll bonding of composite plate

2.1.2 非对称轧制

非对称轧制工艺允许上轧制线速度和下轧制线速度存在差异,这种速度差可能导致板材的顶表面和底表面上的中性点偏移,这使得中性面具有一定的倾角,前后滑动区形成横向剪切变形区,这种强烈的剪切变形不仅可以实现结构细化和织构弱化,而且还增加了界面处金属断裂的机会,形成金属间化合物,改善复合板界面的结构,这不仅增强了复合板的粘结效果,还改善了复合材料的机械性能和界面的完整性,降低了粘结所需的临界压下率及系统能耗^[29-32]。研究发现^[31,33],强剪切变形效应对增加难变形金属的相对变形和实现整个复合板的协调变形具有重要影响。但是,目前大多数现有报导的非对称轧制工艺主要用于研究单一金属的微观结构和成形性能,以及提高材料的成形性。通过减少轧制力和转矩来节省能源,与对称轧制相比,非对称轧制可以将轧制力降低5%—30%^[34-35]。

2.1.3 波纹-平板轧制

近年来,人们开发了一种新的轧制工艺—波纹轧制+平板轧制(CFR)工艺来制备Mg/Al层状复合板。Wang^[23]采用CFR工艺成功把AZ31BMg/5052Al制备成了具有波纹界面和平整表面的Mg/Al复合板,并对其界面组织和力学性能进行了研究,结果表明:CFR工艺诱发的微观结构显著细化、强界面粘结和低残余应力使Mg/Al层状复合板具有优异的性能,其抗拉强度为278.3 MPa、伸长率为16.91%,优于单个组件板材,板材形状良好。Li^[24]分别采用波纹+平面轧制(CFR)和传统轧制(TR)方法将AZ31B Mg和5052 Al板制备成Mg/Al复合板,同时对复合板的微观结构、机械性能和界面状态进行了研究,结果表明:传统轧制的Mg/Al复合板的界面呈现出一个平直的状态,波纹+平板轧制的复合板的波纹界面含有断裂的金属间颗粒,这是波纹辊应变不均匀造成的,在CFR过程中波纹辊可以促进基板工作硬化层的破裂,加速新鲜金属之间的相互挤压以增强界面粘合;与Mg合金的传统基底纹理相比,CFR工艺可以改变纹理形态,从而提高Mg板的塑性变形能力,波纹+平面轧制的Mg/Al复合板的UTS升高到了316 MPa,比传统轧制的镁铝复合板的UTS(293 MPa)高出了约8%;此外,波纹+平面轧制复合板的弯曲曲线是光滑的,在弯曲过程中没有应力突然下降的现象。

2.2 挤压复合

挤压复合工艺是指将待复合材料采取层状堆栈的方式置于挤压筒中,借助挤压杆施加的压力发生变形,并通过挤压模孔成形。采用挤压复合技术可

以显著减少材料中的气孔、疏松等缺陷,且挤压过程中的三向压应力状态可以实现镁合金的较大塑性变形^[36]。通过对AZ31镁合金板和6061铝合金板进行多层的挤压复合,发现复合板镁合金侧存在少量的变形组织,复合板铝合金侧的晶粒呈现典型的带状结构,并且二者周围都存在大量细小的再结晶晶粒生成,此外复合板中Mg/Al界面具有良好的冶金结合^[37]。镁合金AZ91B和铝合金6063连续挤出的复合材料的细晶结构显著提高了极限抗弯强度(达到452 MPa),镁合金的预热使Al壳和Mg芯发生完全的动态再结晶(DRX),改变了镁合金的(0001)织构,从而显著提高了Al/Mg复合材料的可弯曲性^[38]。Wang等^[39]提出了一种孔模共挤(PCE)工艺制备Al/Mg/Al层合板,原料主要采用镁合金AZ91B和铝合金6063,结果表明:在Al/Mg界面处未出现孔洞和裂纹等缺陷,随着挤压温度的升高过渡层厚度逐渐增加,但Al层和Mg层的晶粒尺寸逐渐增大;在低温挤压过程中,基体晶粒尺寸明显减小,显微硬度较高,由于缺乏金属间化合物的生成,Mg/Al界面处的硬度较低。虽然,PCE方法显著提高了复合材料层状板的界面结合强度,但制备工艺复杂,不适合于批量生产^[40]。

2.3 爆炸焊接复合

爆炸焊接是利用爆炸瞬间产生的巨大的压力,使复合板和基体金属相互作用,在较短的时间内在表面上形成一个薄的塑性变形区,使机械和冶金结合发生在两种金属之间。爆炸焊接的优点是在较低的温度下进行复合,抑制金属间化合物的产生,并且爆炸瞬间产生的巨大压力可以破坏原有金属表面的氧化膜,从而省去了表面处理这一个步骤。爆炸时炸药的厚度选取也很重要,厚度过小会使爆炸产生的压力不足,复合效果较差;厚度过大,会使金属件熔化,产生大量的金属间化合物和杂质,从而导致复合板的性能变差^[41]。爆炸焊接复合一直还存在各种安全问题和环境污染问题,从而限制了该方法大规模应用于金属复合板的生产^[14]。相比轧制复合和挤压复合,爆炸焊接复合在参数的选择上需要更加严谨慎重。图2为爆炸焊接复合的实验示意图^[18]。

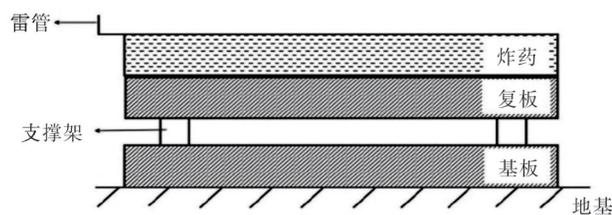


图2 爆炸焊接过程^[18]

Figure 2 Explosive welding process

3 镁铝合金层状金属复合板的影响因素

3.1 界面的形状

传统轧制的镁铝结合处的界面趋于平直,而硬板轧制会在界面处形成波纹状结构^[42]。图3为工艺示意图。从图3可见^[20]:在相同条件下,硬质板轧制(HPR)在Al/Mg界面处形成波纹状结合,而传统轧制(TR)趋于平整;复合板的抗拉强度为232.16 MPa、断裂伸长率为14.3%,分别比传统轧制提高

了7.36%和45.22%。波纹状结构的形成主要是由于轧辊的剪切力转化为压应力,促进了界面的Mg原子和Al原子的流动,两种原子之间的静摩擦力会产生差流^[42]。波纹状界面镁和铝的组织强度远远小于平直界面处的组织强度,并且有较强的非基底滑移开启,有利于随后的塑性变形,而波纹状界面以大量的细晶粒为主,并且还大量的孪晶,会阻止位错运动,提高复合板的强度^[20]。

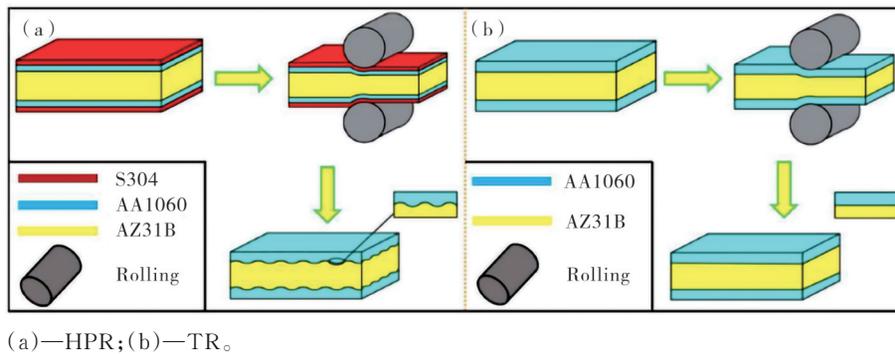


图3 工艺示意图^[20]

Figure 3 Process schematic diagram

Wang^[43]通过EBSD技术研究了仅由波纹辊获得的Mg/Al复合板的界面微观结构,结果表明:界面粘合良好、无缺陷,标定率相对较低为35%;轧制后,Mg晶粒和Al晶粒得到了显著的细化,前者是由于动态再结晶过程,后者的特点是随着应变的增加从小角度晶界过渡到大角晶界,在轧制过程中波纹辊可以诱发随Mg侧的界面峰值和通道位置变化的交替纹理;复合板的抗拉强度为278 MPa,其具有优异的弯曲能力,突出的机械性能主要是由于基材的晶粒细化、镁合金的纹理交替变化和铝合金的低纹理强度。采用上波纹辊和下平辊在400℃轧制温度和压下率35%条件下也成功制备了波纹状Mg/Al复合板,同时对波纹状Mg/Al复合板的界面结合性能进行了研究,采用有限元法对波纹板轧制过程进行了数值模拟,实验结果表明:采用波纹辊轧制的镁铝复合板结合紧密、无裂纹、无金属间化合物生成,横向拉伸剪切强度在谷位处达到31.22 MPa、在峰位处的拉伸剪切强度为17.61 MPa;通过数值模拟结果可以发现,在波谷位置处界面金属的应力和应变最大,这是由于波纹状Mg/Al复合板轧制变形区可形成两个交叉剪切区,加速了金属塑性流动,促进了界面紧密结合^[44]。

通过爆炸焊接技术研究了界面结构对Mg/Al双层复合板力学性能的影响,原料主要采用镁合金AZ31B和铝合金AA6061。研究发现^[13]:在Mg/Al复合板的结合界面处存在典型的正弦波结合界面,

这种正弦波结合界面不仅可以大大提高材料的抗拉强度和剪切强度,还可以达到冶金结合的目的;当爆炸焊接时通入惰性气体(氦气)对复合板进行保护,可以使复合板在界面处形成稳定的正弦波纹界面,可显著提高Mg/Al复合板的拉伸和剪切性能;不连续的金属间化合物可以限制裂纹扩展,消耗裂纹扩展所需的能量,提高复合板的结合强度。通过爆炸焊接后的5道次热轧获得Mg/Al复合板,并在不同温度和保温时间下对轧制的Mg/Al复合板进行退火,发现界面扩散层厚度随退火温度升高和时间的延长而增加,力学性能先增加后降低^[45]。通过在400℃下累积轧制制备Mg/Al复合板,发现复合板在轧制方向和横向的抗拉强度在第三次循环期间下降,这是由于铝合金板的颈缩和开裂所造成^[46]。

3.2 界面的温度

工业生产中通常采用室温轧制工艺来生产Mg/Al金属复合板,然而在室温下生产的复合板存在严重的边缘开裂、高残余应力、板翘曲和低粘结强度这些问题,其原因是镁合金在室温下的独特晶体结构(HCP)使其仅启动两个基滑移系统^[47-48]。这与铝合金的塑性变形能力大不相同,在大变形的情况下,导致难以变形的镁和易于变形的铝之间产生严重的变形失配^[33,49],出现在复合期间产生高残余应力的趋势,使得轧板形状发生严重翘曲,大的变形使

Mg层容易开裂,从而降低了复合板的变形程度和结合强度,不利于随后的连续大规模生产和二次成型^[50-51]。Xiao等^[52]采用温差对称轧制法制备Ti/Al复合板,发现温差能大大提高Ti/Al复合板的变形均匀性和结合强度,通过控制轧制过程中工作辊两侧的温差,使轧辊接触Al层的温度低于接触Mg层的温度,进一步促进Mg/Al复合过程中异种金属的协调变形,制备出品质较好的AZ31B/6061Al复合板。然而,对于Mg/Al层状复合板的差温非对称轧制的研究较少。此外,制备Mg/Al复合板需要较高的镁侧变形温度,以启动镁的柱面滑移和锥面滑移,提高镁的塑性变形能力^[53-54]。该温度梯度的存在不仅减小了金属层之间的塑性变形间隙,而且还诱导了强剪切变形的贡献^[55-56]。通过引入温度梯度和剪切力效应,这大大促进Mg/Al界面氧化膜的破坏,增加了固态键合,提高复合材料板的结合强度,改善变形均匀性^[22]。

为研究不同温度对Mg/Al复合板材组织、界面形貌和力学性能的影响,采用非对称轧制方法制备了Mg/Al复合板材。结果表明:等温轧制与差温轧制相比,界面处剪切变形诱导的滑移系较少,位错聚集程度较高,这导致每层中更高层次的亚晶和更高的复合板的拉伸和屈服强度,然而该板易于在界面处产生应力集中,这严重降低了伸长率,损害了结合强度^[22];差温轧制通过引入温度梯度,促进了非对称轧制引入的剪切力的贡献,从而允许引发更多的锥面滑移,从而减少了孪晶的产生、促进了晶粒的再结晶、扩大了等轴晶粒的均匀分布^[57-58];同时,在复合材料中形成了更多位错堆积在较弱的剪切带区域,优化了界面组织,有效地提高了复合材料的塑性和强度^[59];复合板具有最佳的综合力学性能,最大结合强度为89.6 MPa、最大延伸率为19.2%,与等温非对称轧制相比,分别增加了59%和106%^[21-22]。

4 结语

轧制复合、挤压复合和爆炸焊接复合是制备金属复合板最为常用的3种方式,他们还可细分为硬板累积轧制复合、非对称轧制、波纹+平板轧制、分模共挤(PCE)等新型工艺,采用上述方法可以制造出综合强度和塑性均较好的新型镁铝金属层状复合板。进一步开发和优化镁铝金属复合板的生产工艺,对于高性能镁铝金属复合板的发展具有重要意义。

(1)硬板累积轧制复合可通过提高轧制方向的剪切力转化为法向的压应力、分模共挤(PCE)减少了界面的孔洞和裂纹、非对称轧制使前后滑动区形成横向剪切变形区、波纹+平板轧制在界面处形成断裂的金属间颗粒,从而来提高镁铝金属层状复合板的综合性能。

(2)波纹状结构的镁铝金属层状复合板界面Mg和Al的织构比较弱,晶粒也较小,同时伴随着孪晶的分布,减少了位错运动,从而提高了复合板的结合强度。轧制变形区还可形成两个交叉的剪切区,加速金属的塑性流动,促进界面紧密结合。

(3)通过引入温度梯度进行差温轧制,促进了非对称轧制引入的剪切力贡献,从而引发更多的锥面滑移,这不仅减少了孪晶的产生,还促进了晶粒的再结晶,扩大了等轴晶粒的均匀分布,形成了更多位错堆积在较弱的剪切带区域,有效地提高了复合材料的塑性和强度。

参考文献:

- [1] 刘俊伟,陈振华,陈鼎. 镁合金轧制板材低温变形行为与微观机制[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(9): 1577-1583.
- [2] ZHANG X P, CASTAGNES, YANG T H, et al. Entrance analysis of 7075Al/Mg-Gd-Y-Zr/7075Al laminated composite prepared by hot rolling and its mechanical properties[J]. Mater Des, 2011, 32(3): 1152-1158.
- [3] MOVCHAN B A, LEMKEY F D. Mechanical properties of fine crystalline two-phase materials [J]. Mater Sci Eng A, 1997, 224: 136-145.
- [4] WADSWORTH J, LESUER D R. Ancient and modern laminated composites-from the great pyramid of gizeh to Y2K[J]. Mater Charact, 2000, 45: 289-313.
- [5] LIU H S, ZHANG B, ZHANG G P. Enhanced toughness and fatigue strength of cold roll bonded Cu/Cu laminated composites with mechanical contrast [J]. Scr Mater, 2011, 65: 891-894.
- [6] 鲁云,朱世杰,马敏图,等. 先进复合材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 邵丙璜,张凯. 爆炸焊接原理及其工程应用[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1987.
- [8] 杨浩坤,黎伟华. 三种汽车用轻量化材料的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2022(3): 471-484.
- [9] MISHRA R R, SHARMA A K. On mechanism of in-situ microwave casting of aluminium alloy 7039 and cast microstructure[J]. Mater Des, 2016, 112, 97-106.
- [10] SIMAR A, BRÉCHET Y, MEESTER B, et al. Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloys: Process, microstructure and properties [J]. Prog Mater Sci, 2012, 57: 95-183.
- [11] NIEHH, LIANG W, CHENHS, et al. Effect of annealing on the microstructures and mechanical properties of Al/Mg/Al laminates[J]. Mater Sci Eng A, 2018, 732: 6-13.
- [12] ZHANG N, WANG W X, CAO X Q, et al. The effect of annealing on the interface microstructure and mechanical characteristics of AZ31B/AA6061 composite plates fabricated by explosive welding [J]. Mater Des, 2015, 65: 1100-1109.
- [13] ZENG X Y, WANG Y X, LI X Q, et al. Effect of

- inert gas shielding on the interface and mechanical properties of Mg/Al explosive welding composite plate [J]. *J Manuf Process*, 2019, 45: 166-75.
- [14] 杨要杰. 金属复合板的加工技术和设备研制现状 [J]. *有色金属加工*, 2013, 42(2): 4-6.
- [15] 杜大明, 李坊平, 马明亮. 铝镁复合材料的研究现状 [J]. *材料热处理技术*, 2012, 41(22): 147-150.
- [16] YOO M H. Slip, twinning, and fracture in hexagonal close-packed metals [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1981, 12(3): 409-418.
- [17] 罗锡才, 刘灏霖, 康利梅, 等. 搅拌摩擦加工方向对 AZ61 镁合金组织和力学性能的影响 [J]. *材料研究与应用*, 2021(3): 203-209.
- [18] 陶世洁, 宁江利, 苑潇逸. 镁合金层状金属复合板的制备与力学性能研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2023, 52(6): 15-19.
- [19] XIN A Z, FENG L, DA P H, et al. Response mechanism of matrix microstructure evolution and mechanical behavior to Mg/Al composite plate by hard-plate accumulative roll bonding [J]. *J Mater Res Technol*, 2023, 23: 3312-3321.
- [20] GAO R H, LI F, NIU W T, et al. Formation mechanism of the corrugated interface during Al/Mg/Al composite plate by hard-plate rolling [J]. *J Mater Res Technol*, 2023, 25: 3522-3536.
- [21] LEI J Y, MA L F, JIA W T, et al. Effect of differential temperature on the interfacial microstructure evolution and mechanical properties of asymmetrically rolled Mg/Al composite plates [J]. *J Mater Res Technol*, 2023, 24: 1281-1292.
- [22] LEI J Y, MA L F, CAI Z H, et al. Interfacial microstructure evolution for coordinated deformation of Mg/Al composite plates by asymmetrical rolling with differential temperature rolls [J/OL]. *J Magnesium Alloys*, <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.04.012>.
- [23] CHANG H, ZHENG M Y, XU C, et al. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al multilayer fabricated by accumulative roll bonding (ARB) at ambient temperature [J]. *Mater Sci Eng A*, 2012, 543: 249-56.
- [24] QIAN B Y, WU R Z, SUN J F, et al. Evolutions of microstructure and mechanical properties in Mg-5Li-1Zn-0.5Ag-0.5Zr-xGd alloy [J]. *Acta Metall Sin*, 2023, 36(2): 1-14.
- [25] EL-WAZERY M. Electrical and mechanical performance of zirconia-nickel functionally graded materials [J]. *Int J Eng*, 2013, 26(4): 375-82.
- [26] WANG T, WANG Y, BIAN L, et al. Microstructural evolution and mechanical behavior of Mg/Al laminated composite sheet by novel corrugated rolling and flat rolling [J]. *Mater Sci Eng A*, 2019, 765: 138318.
- [27] LI S, LUO C, BASHIR M U, et al. Interface structures and mechanical properties of corrugated+flat rolled and traditional rolled Mg/Al clad plates [J]. *Rare Met*, 2021, 40: 2947-2955.
- [28] YANG X, JIN Y, WU R, et al. Simultaneous improvement of strength, ductility and damping capacity of single β -phase Mg-Li-Al-Zn alloys [J]. *Metals*, 2023, 13(1): 159.
- [29] PAN S C, HUANG M N, TZOU G Y, et al. Analysis of asymmetrical cold and hot bond rolling of unbounded clad sheet under constant shear friction [J]. *J Mater Process Technol*, 2006, 177: 114-20.
- [30] LI X B, ZU G Y, WANG P. Effect of strain rate on tensile performance of Al/Cu/Al laminated composites produced by asymmetrical roll bonding [J]. *Mater Sci Eng A*, 2013, 575: 61-4.
- [31] CHANG D X, WANG P, ZHAO Y Y. Effects of asymmetry and annealing on interfacial microstructure and mechanical properties of Cu/Al laminated composite fabricated by asymmetrical roll bonding [J]. *J Alloys Compd*, 2020, 815: 152453.
- [32] MAGALHAES D C C, SORDI V L, KLIAUGA A M. Microstructure evolution of multilayered composite sheets of AA1050/AA7050Al alloys produced by asymmetric accumulative roll-bonding [J]. *Mater Charact*, 2020, 162: 110226.
- [33] WANG T, WANG Y L, BIAN L P, et al. Microstructural evolution and mechanical behavior of Mg/Al laminated composite sheet by novel corrugated rolling and flat rolling [J]. *Mater Sci Eng A*, 2019, 765: 138318.
- [34] LIN Y C, LIU Z H, CHEN X M, et al. Uniaxial ratcheting and fatigue failure behaviors of hot-rolled AZ31B magnesium alloy under asymmetrical cyclic stress-controlled loadings [J]. *Mater Sci Eng A*, 2013, 573: 234-44.
- [35] AMIR K N, ROOHOLLAH J, AVAL H J. Asymmetric cold rolling of AA7075 alloy: the evolution of microstructure, crystallographic texture, and mechanical properties [J]. *Mater Sci Eng A*, 2021, 824: 141801.
- [36] JIN X, XU W, YANG Z, et al. Analysis of abnormal texture formation and strengthening mechanism in an extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy [J]. *J Mater Sci Technol*, 2020, 45: 133-145.
- [37] 李雷, 吴小俊. 镁铝轻质复合板多层挤压复合工艺 [J]. *锻压技术*, 2017, 42(4): 6.
- [38] GUO L, WANG J, YUN X, et al. Fabrication of aluminum-magnesium clad composites by continuous extrusion [J]. *Mater Sci Eng A*, 2021, 802: 140670.
- [39] WANG Q, ZHAI H, LIU L, et al. Novel Mg-Bi-Mn wrought alloys: The effects of extrusion temperature and Mn addition on their microstructures and mechanical properties [J]. *J Magnesium Alloys*, 2022, 10: 2588-2606.
- [40] YANG X, JIN Y, WU R, et al. Simultaneous improvement of strength, ductility and damping capacity of single β -phase Mg-Li-Al-Zn alloys [J]. *Metals*, 2023, 13(1): 159.
- [41] 王凤辉. 东大 RAL 在南钢成功研发试制出 825 镍基耐蚀

- 合金/X65管线钢复合板[J]. 轧钢, 2015, 32(6): 51.
- [42] HUO P D, LI F, WANG Y, et al. Formability and interface structure of Al/Mg/Al composite sheet rolled by hard-plate rolling (HPR) [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2022, 118:55-65.
- [43] WANG T, LI S, NIU H, et al. EBSD research on the interfacial microstructure of the corrugated Mg/Al laminated material[J]. *J Mater Res Technol* 2021, 9:5840-5847.
- [44] LI S, LIU X, JIA Y, et al. Interface characteristics and bonding performance of the corrugated Mg/Al clad plate[J]. *Materials*, 2021, 14:4412.
- [45] CHEN Z Q, WANG D Y, CAO X Q, et al. Influence of multi-pass rolling and subsequent annealing on the interface microstructure and mechanical properties of the explosive welding Mg/Al composite plates [J]. *Mater Sci Eng A*, 2018, 723:97-108.
- [46] WU K, CHANG H, MAAWAD E, et al. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB)[J]. *Mater Sci Eng A*, 2010, 527:3073-3078.
- [47] LEI J Y, MA L F, JIA W T, et al. Zonal differences in deformation characteristics of AZ31Mg alloy constrained by heterogeneous metals [J]. *J Mater Res Technol*, 2021, 13:2161-79.
- [48] JIA W T, MA L F, JIAO M Y, et al. Fracture criterion for predicting edge-cracking in hot rolling of twin-roll casted AZ31Mg alloy [J]. *J Mater Res Technol*, 2020, 9:4773-4787.
- [49] BOF, XINY C, GUO F L, et al. Compressive mechanical behavior of Al/Mg composite rods with different types of Al sleeve[J]. *Acta Mater*, 2016, 120:379-390.
- [50] NIE H H, CHI C Z, CHEN H S, et al. Microstructure evolution of Al/Mg/Al laminates in deep drawing process[J]. *J Mater Res Technol*, 2019, 8:5325-5335.
- [51] LIU T T, SONG B, HUANG G S, et al. Preparation, structure and properties of Mg/Al laminated metal composites fabricated by roll-bonding, a review[J]. *J Magnesium Alloys*, 2022, 10:2062-2093.
- [52] XIAO H, QI Z C, YU C, et al. Preparation and properties for Ti/Al clad plates generated by differential temperature rolling [J]. *J Mater Process Technol*, 2017, 249:285-290.
- [53] XU T C, YANG Y, PENG X D, et al. Overview of advancement and development trend on magnesium alloy[J]. *J Magnesium Alloys*, 2019, 7: 536-544,
- [54] ULACIA I, DUDAMELL N V, GÁLVEZ F, et al. Mechanical behavior and microstructural evolution of a Mg AZ31 sheet at dynamic strain rates [J]. *Acta Mater*, 2010, 58: 2988-2998.
- [55] FAN X Y, YU L, CHUN X, et al. Improved mechanical anisotropy and texture optimization of a 3xx aluminum alloy by differential temperature rolling [J]. *Mater Sci Eng A*, 2021, 799:140278.
- [56] CHEN S F, SONG H W, ZHANG S H, et al. An effective schmid factor in consideration of combined normal and shear stresses for slip/twin variant selection of Mg-3Al-1Zn alloy[J]. *Scripta Mater*, 2019, 167:51-55.
- [57] CHEN Q H, CHEN R N, SU J, et al. The mechanisms of grain growth of Mg alloys: A review [J]. *J Magnesium Alloys*, 2022, 10:2384-2397.
- [58] HU H J, LIU Y, ZHANG D F, et al. The influences of extrusion-shear process on microstructures evolution and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy [J]. *J Alloys Compd*, 2017, 695: 1088-1095.
- [59] 侯成浩, 周楠, 刘贞阳, 等. 含镁轻质高熵合金的研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2022(6):959-970.

Research Status and Preparation Methods of Mg-Al Alloy Layered Metal Composites

LI Xiaohui¹, SUN Weixiang², LI Xiaopei^{2*}, CHEN Tianlai^{3*}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528225, China; 2. College of Materials and Chemistry, Fujian Normal University, Fuzhou 350000, China; 3. Foshan Tongbao Electrical Precision Alloy Co., Ltd, Foshan 528131, China)

Abstract: In this paper, the advantages and research status of Mg-Al alloy laminated metal composites were firstly elaborated, and three common preparation methods of laminated composite materials such as rolling composite, extrusion composite and explosion composite were introduced. Besides, the compositions of several specific Mg-Al laminated composite plates were described, and the effects of interface characteristics, interface temperature on microstructure and properties of Mg-Al laminated composite plates were analyzed. The direction for application and development of Mg-Al laminated composite materials was pointed out.

Keywords: Mg-Al composite plate; tensile properties; preparation methods; interface effect

(学术编辑: 褚欣)