

铝镁异种材料搅拌摩擦焊研究进展

魏艺涵, 汪晟钰, 高吉成

(扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要 开展铝/镁异种材料焊接对工程轻量化具有重要意义, 但铝/镁异种焊接面临诸多挑战, 改善焊接接头组织, 并提高接头性能成为研究重点之一。针对国内外铝/镁异种材料搅拌摩擦焊发展现状, 从焊接参数、新工艺及数值模拟等方面对铝/镁异种材料搅拌摩擦焊进行了分析与展望, 旨在为相关领域的进一步研究提供借鉴与参考。

关键词 搅拌摩擦焊; 铝/镁; 研究进展; 新工艺; 数值模拟

中图分类号 TG 457.1

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2024)01-0131-08

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20231204.004

Research progress of friction stir welding of Al/Mg joint

WEI Yihan, WANG Shengyu, GAO Jicheng

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract It is of great significance for engineering lightweight to carry out Al/Mg dissimilar materials welding. However, the welding of Al/Mg dissimilar materials faces many challenges. And improving the structure and increase the performance of Al/Mg dissimilar welded joints has become one of the research focuses. According to the development status of Al/Mg dissimilar materials friction stir welding at home and abroad, the welding parameters, new technologies and numerical simulation were analyzed and prospected, aiming at providing reference for further research in related fields.

Keywords friction stir welding; Al/Mg; research progress; new technologies; numerical simulation

铝合金与镁合金作为重要的轻质金属材料, 在航空航天、交通运输、船舶制造等领域有着重要的应用。现代工程中, 为解决轻量化问题, 铝/镁异质结构受到越来越多的关注, 两种材料的焊接成为研究热点之一^[1]。目前针对铝合金与镁合金异种结构的焊接技术有激光焊、电阻焊、超声波焊、电弧焊等, 但是两种材料在物理化学性质方面的差异, 使得焊接过程中容易出现气孔、裂纹等缺陷, 降低了接头的性能^[2]。

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)作为一种固相连接技术, 在铝镁异种材料焊接过程中可有效抑制金属间化合物(intermetallic compounds, IMC)的产生, 同时该技术焊接效率高、焊接变形小、可减少甚至消除铝镁异种材料传统熔焊过程中的缺陷, 从而在铝镁异种金属焊接中受到越来越多的关注^[3]。本文作者主要从铝/镁异种金属搅拌摩擦焊工艺参数、新型技术及数值模拟等方面综述当前的研究进展。

1 铝/镁 FSW 焊接工艺参数

1.1 铝/镁 FSW 接头组织

铝/镁 FSW 常见的接头形式有对接与搭接。对接

接头横截面宏观形貌如图 1 所示^[4]。焊缝主要包括热影响区(heat affected zone, HAZ)、热机械影响区(thermal-mechanical affected zone, TMAZ)与焊核区(weld nugget zone, WNZ)等部分。赵亚东等^[5-6]研究了 1060 铝与 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊对接接头的组织演化行为。研究表明, 焊核区微观织构由镁合金母材的<0001>||ND 织构转变为<0001>||IWD, 从焊核区至镁合金一侧的热机械影响区, 微观织构从<0001>||IWD 逐渐向<0001>||TD 演变。

铝/镁 FSW 搭接接头横截面宏观形貌如图 2 所示^[7]。铝/镁搭接过程中, 在焊核底部会形成明显的洋葱环, 焊接过程中, 上方的铝合金在轴肩压力的作用下由顶部被挤入底部。于欢等^[8]在对 5A06 铝合金与 AZ31 镁合金 FSW 搭接研究中发现, 焊核区材料在搅

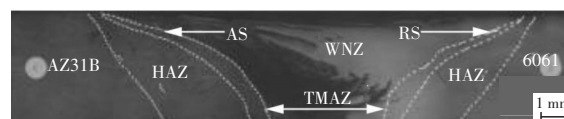


图 1 铝/镁 FSW 对接接头横截面宏观形貌^[4]

Fig.1 Macroscopic morphology of cross-section of Al/Mg FSW butt joint^[4]

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-11-11

基金项目: 江苏省大学生创新创业训练计划(202311117129Y); 扬州大学教学改革研究课题(xkjs2023046)

第一作者: 魏艺涵, 女, E-mail: victorchampion@foxmail.com。

通信作者: 高吉成, 男, 博士, 副教授, E-mail: gaojicheng1984@163.com。

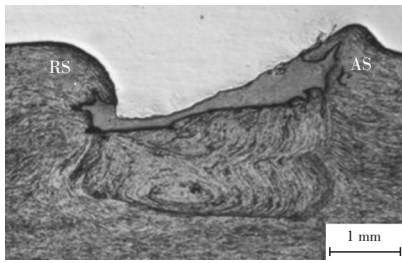


图2 铝/镁FSW搭接接头横截面宏观形貌^[7]

Fig.2 Macroscopic morphology of cross-section of Al/Mg FSW lap joint^[7]

拌针的作用下向底部迁移并挤压周边金属而在搭接界面形成hook沟,适当降低焊接速度有利于hook沟处原子的扩散。

1.2 铝/镁FSW接头金属间化合物

由于铝合金与镁合金两种材料物理化学性质的差异,FSW过程中通常会出现金属间化合物,因此焊接过程中要控制金属间化合物的种类和数量^[9-10]。孔德兵等^[11]研究了5A06铝合金与AZ31B镁合金FSW过程中金属间化合物的种类,研究发现,焊接过程中金属间化合物主要为 Al_3Mg_2 与 $Al_{12}Mg_{17}$,在镁合金一侧的热机影响区与焊核区界面处存在较多的 $Al_{12}Mg_{17}$,是造成断裂的主要原因。聂浩等^[12]研究发现,焊接界面镁合金一侧上部存在74 μm 厚的 $Mg+Al_{12}Mg_{17}$ 共晶层与12 μm 厚的连续带状 Al_3Mg_2 层,中部金属间化合物层及共晶层的厚度减小,而下部只存在 Al_3Mg_2 与 $Al_{12}Mg_{17}$ 金属间化合物层。XU等^[13]研究表明,旋转速度对铝/镁FSW界面金属间化合物与低熔点共晶的厚度和种类有着重要影响,其原因为应变速率影响着金属间化合物的生长。

1.3 铝/镁FSW接头性能

FSW过程中,旋转速度、焊接速度、下压量等影响着焊接热输入与材料的流动行为,进而影响接头性能。

李佩琪等^[14]研究了旋转速度对AZ91D镁合金与压铸态ADC12铝合金FSW接头抗拉强度的影响,结果表明,接头抗拉强度在旋转速度为900 r/min时达到最高值(83 MPa),降低旋转速度会使焊接热输入过低,导致接头界面存在孔洞缺陷;增加旋转速度会使接头组织粗大与微型孔洞扩张,从而恶化接头的力学性能。叶结和等^[15]研究了焊接速度对5754/AZ31搅拌摩擦焊接头抗拉强度的影响。结果表明,焊接速度影响焊核区金属间化合物的数量,从而影响接头性能,焊接速度为200 mm/min时的抗拉强度最大,为76.6 MPa。孙嵩等^[16]用不同的焊接速度对6061铝合金与AZ31镁合金进行连接,研究发现,后退侧硬度随焊接速度的增

加先增后减,前进侧硬度整体呈增大趋势,而接头的抗拉强度和屈服强度随焊接速度的增加均有所下降,接头断裂为脆性断裂。赵亚东等^[17]在FSW连接1060铝合金与AZ31B镁合金的研究中发现,接头的抗拉强度与伸长率随焊接速度的增加先增后减,在110 mm/min时最大,分别为96.5 MPa与4.2%。张真等^[18]研究了下压力对6061铝合金与AZ31镁合金FSW接头性能的影响。结果发现,接头抗拉强度在下压力为28 kN时最大(168 MPa),随下压力增大,焊接界面处金属间化合物层厚增加,且出现多相共存的混合结构,同时出现孔洞等焊接缺陷。

除力学性能外,铝/镁FSW接头的耐蚀性也被研究。陈成等^[19]研究了6061/AZ31B接头的腐蚀特性。结果表明,焊核区铝合金一侧的耐蚀性优于铝母材(仅出现轻微点蚀与晶间腐蚀),焊核区镁合金由于晶粒细化提高了其耐蚀性,同时镁合金焊核区富镁带状区存在明显的腐蚀产物与裂纹,富铝带状区产生轻微的点蚀。蔡达等^[20]在对5052铝合金与AZ31B镁合金焊接接头腐蚀行为的研究中发现,焊核区与热机影响区金属间化合物及镁合金中的 β 相分布不均匀及各区域晶粒大小的差异,导致不同区域的腐蚀形貌与腐蚀行为存在差异,接头的耐蚀性不及母材。KAMAL等^[21]研究了6061铝合金与AZ31镁合金焊接接头焊核区的电化学腐蚀行为。结果表明,焊核区由于存在铝、镁的混合区域使耐蚀性变差。

2 铝/镁FSW新工艺

铝合金与镁合金晶体结构与晶格类型的差异导致铝/镁异种接头的可靠性较差,同时焊接过程中会产生 Al_3Mg_2 与 $Al_{12}Mg_{17}$ 金属间化合物,从而无法获得满足使用要求的复合结构。近年来,针对铝/镁FSW,新型焊接技术及工艺逐渐受到重视,主要包括中间层、超声辅助与静轴肩等。

2.1 中间层

Zn是铝/镁FSW中常用的中间层。金玉花等^[22]在6061铝合金与AZ31B镁合金搭接界面处添加Zn粉实现了两者的连接,研究发现,Zn可有效阻止铝镁的相互扩散,焊接界面处由Al-Zn固溶体、 $Al_3Mg_{11}Zn_4$ 金属间化合物及Mg-Zn共晶区组成,接头的剪切断裂载荷达到3.92 kN。NIU等^[23]在7075铝合金与AZ31镁合金焊接界面处添加纯Zn箔,通过FSW对其进行焊接,研究发现,添加Zn层使焊接结构具有更大的有限搭接厚度、宽度及更大的搅拌混合区,分散的Mg-Zn金属间化合物取代了原来连续的Mg-Al金属间化合物(图

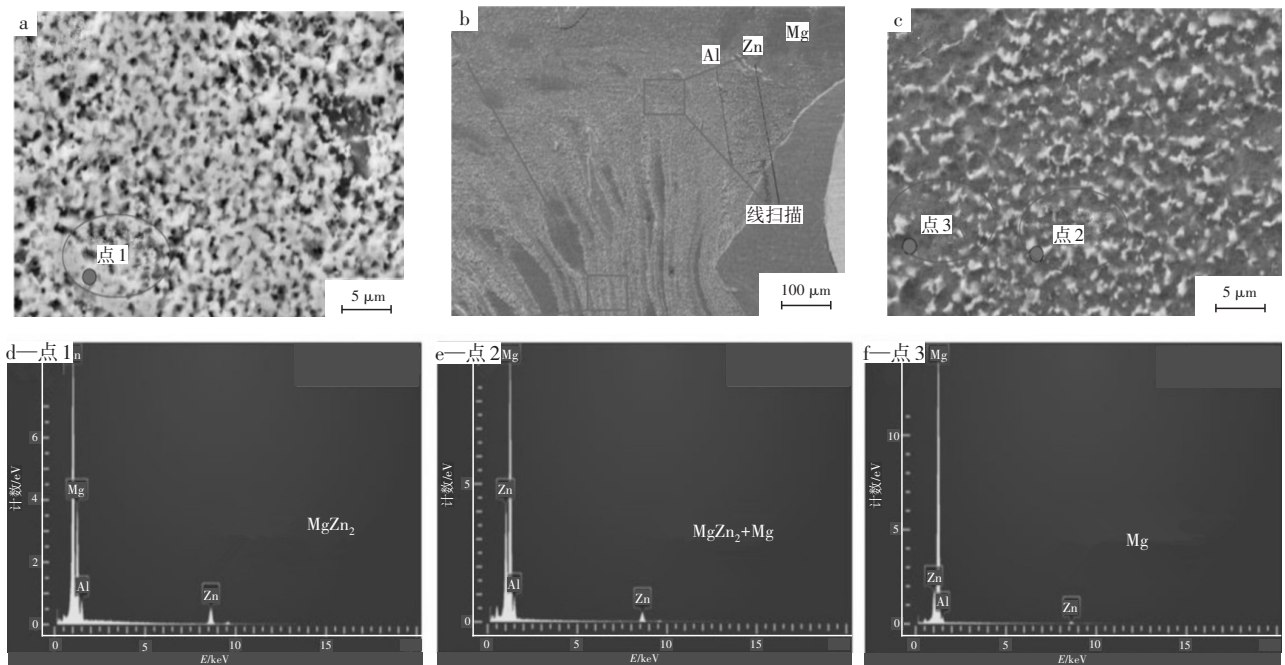


图3 添加Zn层的Al/Mg接头中金属间化合物^[23]

Fig.3 Intermetallic compounds in Zn added Al/Mg joints^[23]

3),提高了接头的拉伸剪切载荷。ABDOLLAHZADEH等^[24]在6061铝合金与AZ31镁合金FSW时在焊接界面添加Zn层。研究发现,搅拌区主要存在Mg-Zn及Mg-Al-Zn金属间化合物、Al固溶体与残余的Zn,Zn的添加消除Al-Mg金属间化合物(Al_3Mg_2 与 $Al_{12}Mg_{17}$),降低接头的硬度,提高了接头的抗拉强度(由141 MPa升到175 MPa)与伸长率(由0.7%升到1.9%)。

除Zn外,Cu、Sn、Ni也被用作铝/镁FSW的中间层。郑博等^[25]在5052铝合金与AZ31镁合金焊接界面处添加Cu箔后进行焊接,研究发现,焊接界面处出现 Al_3Mg_2 、 Al_2Cu 、 $MgCu_2$ 韧性相与 $Mg_{17}Al_{12}$ 、 $AlCu$ 脆性相,接头无明显的焊接缺陷,最大抗拉强度达到87.5 MPa。王彦辉等^[26]在5052铝合金与AZ31镁合金焊接界面处添加Cu箔,通过FSW进行连接。结果表明,添加Cu箔可以改变焊缝区金属间化合物的种类和数量,焊接区域扩散形成了 $AlCu$ 、 Al_2Cu 与 $MgCu_2$ 等金属间化合物,图4为Al/Mg接头的XRD图。KARIMI-DEMANI等^[27]研究了Sn夹层对7075铝合金与AZ31镁合金FSW接头组织与性能的影响。研究表明,Sn促进了焊核区物质的扩散与混合,提高了焊核区宽度和混合区厚度,但是由于混合区外侧 Mg_2Sn 金属间化合物的生成,接头的强度有所下降。KUMAR等^[28]研究了Ni层对6061铝合金与AZ31镁合金FSW接头组织与性能的影响。研究发现,Ni可有效阻止Al与Mg在界面处的扩散,消除 Al_3Mg_2 与 $Al_{12}Mg_{17}$ 金属间化合物,焊核区形成 Al_3Ni 与 Mg_2Ni 化合物,接头具有更高的力学性能。

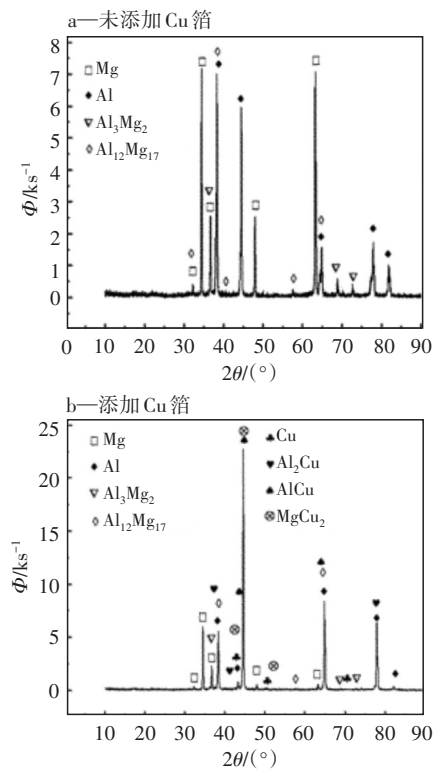


图4 Al/Mg接头的XRD图^[26]

Fig.4 XRD results of Al/Mg joint^[26]

2.2 超声辅助

通过在铝/镁FSW过程中施加超声辅助,可以有效改善焊缝成形质量,细化晶粒,提高接头性能。王涛等^[29]研究了超声振动强化对6061/AZ31接头组织和性能的影响,研究发现,超声振动可以促进焊核区材料的

流动和能量传输,减少甚至消除焊缝缺陷,增强焊接界面的机械互锁程度,接头的抗拉强度较常规FSW提升了11.32%。吕学奇等^[30-31]研究了超声振动在6061/AZ31搅拌摩擦焊中的应用,结果表明,超声振动虽然未改变焊缝金属间化合物的种类,但是减小了金属间化合物层的厚度,如图5所示。HE等^[32]研究了超声振动对6061铝合金与AZ31镁合金FSW接头金属间化合物及抗剪强度的影响。研究显示,当铝合金位于上方时,金属间化合物以 Al_3Mg_2 为主,当镁合金位于上方时,金属间化合物以 $Al_{12}Mg_{17}$ 为主,同时发现,镁合金位于上方的接头抗剪强度更高。ZHAO等^[33-34]研究了超声振动搅拌摩擦焊6061铝合金与AZ31镁合金焊缝金

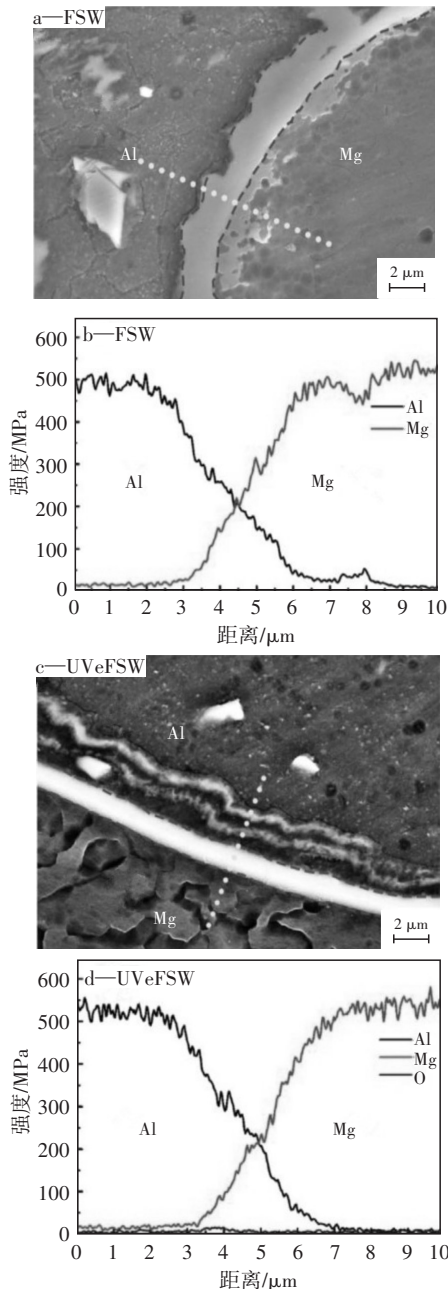


图5 Al/Mg焊接界面SEM与EDS^[31]
Fig.5 SEM and EDS of Al/Mg weld interfaces^[31]

属间化合物的演化规律,结果显示,超声振动使得更多的镁合金向后退侧移动,最终金属间化合物层的厚度更薄。JI等^[35-36]研究了超声振动与Zn中间层复合技术对搅拌摩擦焊7075/AZ31结构与性能的影响,研究表明,添加Zn箔与超声辅助可以获得更大的混合区域与有效搭接宽度,与常规FSW相比,焊接区域形成了分布均匀的细小金属间化合物,接头的拉伸剪切载荷较常规FSW提升了52.6%。

2.3 静轴肩

静轴肩近年来也被用于铝/镁FSW研究中。李丰等^[37]研究了静轴肩对6061/AZ31接头成形与力学性能的影响。研究发现,采用静轴肩获得的焊接表面更平整,接头强度较常规工艺提升了28%,焊核区为铝镁混合的叠层结构,焊缝区金属间化合物层明显减少,如图6所示。许志武等^[38]研究了静轴肩对6061铝合金与AZ31镁合金FSW接头组织与性能的影响,结果表明,静轴肩可以增强材料的混合与流动,提高接头的力学性能。LIU等^[39]采用超声振动与静轴肩复合FSW实现了6061铝合金与AZ31镁合金的连接。研究发现,超声振动可以将前进侧热机影响区附近的金属间化合物层破碎成碎片或颗粒,接头的抗拉强度与伸长率较常规FSW分别提高17 MPa与0.8%。

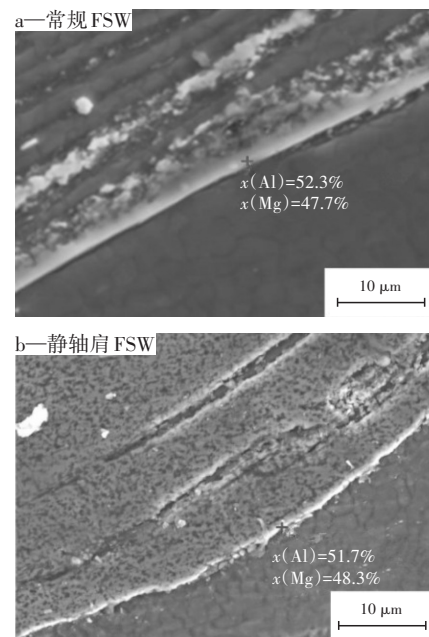


图6 两种工艺下铝/镁界面层形貌^[37]
Fig.6 Morphologies of Al/Mg joining interface layers under two processes^[37]

2.4 其他

王璐等^[40]研究了水下FSW对6061/AZ31接头显微组织与力学性能的影响。研究发现,界面过渡层主要由Al、Mg、 $Al_{12}Mg_{17}$ 及少量的 Mg_2Al_3 组成,水下FSW

可以有效抑制焊接界面金属间化合物的产生,提升接头的剪切强度。JADAV等^[41]研究了压缩空气与CO₂冷却介质对6061/AZ31搅拌摩擦焊接头组织与力学性能的影响。结果显示,随冷却强度的增加,前进侧峰值温度降低,抗拉强度提升,显微硬度降低。JIANG等^[42]研究了脉冲电流辅助对6061/AZ31接头组织与性能的影响。研究发现,脉冲电流消除了常规工艺易产生的裂纹、隧道等缺陷,扩大了焊接工艺窗口,改变了焊接界面金属间化合物的厚度和数量,提高了接头效率。ZHENG等^[43]首先对Al、Ni混合粉末进行球磨后,将其均匀涂抹在5052/AZ31焊接界面,研究了自反应对接头组织与性能的影响。结果显示,通过自反应辅助FSW可以获得良好的焊缝表面,接头抗拉强度较常规工艺提升了57%,焊接界面处存在Mg₁₇Al₁₂、Mg₂Al₃与AlNi等金属间化合物。

3 铝/镁FSW数值模拟

近年来,计算机数值模拟在铝/镁FSW研究中受到越来越多的关注。郑博等^[44]采用基于密度泛函理论的Castep和Dmol程序软件包,计算了含Sn夹层的6061/AZ31接头的金属间化合物的演化。结果显示,AlSn的结构最稳定,Mg₂Sn的合金化形成能力最强。罗亚龙等^[45]基于响应面法建立1060/AZ31搅拌摩擦焊数学模型,用Design-Expert12.0软件对FSW接头拉剪力作模型分析。研究发现,刀具偏移量对接头的拉剪力影响最大。曹丽杰等^[46-48]用Abaqus软件建立了铝/镁FSW数值模型,计算结果显示,焊缝末端的搭接面处的残余应力最大,垂直于焊缝表面的残余应力呈M型分布,随转速的增加,纵向残余应力明显大于横向。SONG等^[49]基于计算流体力学和多相流理论建立了2024/AZ31搅拌摩擦焊三维数学模型,分析了材料的流动模式,计算结果显示,焊接接头上部的材料流动强烈,在高转速下材料的迁移距离与混合模式发生改变。JI等^[50-51]建立了超声辅助铝/镁FSW数学模型,通过灰狼算法与鸽群算法优化焊接工艺参数,研究发现,接头的质量受3个因素的影响:一是无表面缺陷和内部缺陷的成形质量是获得高强度接头的基础;二是焊接界面复杂的互锁结构增加了连接宽度;三是搅拌区金属间化合物层较薄且分布均匀。ZHAI等^[52-53]通过计算流体力学方法建立了铝/镁FSW数学模型,研究了搅拌针长度对3 mm厚铝/镁搭接接头的影响,结果显示,当针长度为3.8 mm时,焊接界面会产生较高的温度和更强烈的材料流动,从而易产生金属间化合物,降低接头的力学性能。同时,作者研究了超声辅助铝/镁FSW数学模型,结果显示,超声振动使剪切层的界面

生热和黏滞耗散生热下降,从而导致焊接工具与工件界面的温度降低,材料流动加剧,材料混合区域增大。

4 结论与展望

作为一种新型的固相连接技术,搅拌摩擦焊因其高效、环保等优势而在铝/镁异种材料连接领域有着越来越广泛的应用。现阶段,国内外学者对铝/镁异种搅拌摩擦焊接头的焊缝成形、组织结构、性能与工艺参数之间的关系进行了较成熟的研究。同时,围绕铝/镁异种材料搅拌摩擦焊接过程中产生金属间化合物的问题,开展了添加Zn、Cu、Sn、Ni等中间层,超声辅助与静轴肩等形式的工艺设计与优化,从而改善了接头的组织结构,提高了接头力学性能。此外,计算机数值模拟在铝/镁异种搅拌摩擦焊领域也得到了一定的关注与研究。

尽管铝/镁搅拌摩擦焊技术已经取得了一定的研究成果,但面向工程应用,铝/镁搅拌摩擦焊仍存在一些亟需解决的问题,未来研究重点应集中:1)进一步探寻铝/镁焊接界面金属间化合物的种类、形态、数量,通过优化工艺参数、改变中间层材料、热处理等工艺实现对铝/镁焊接界面金属间化合物的有效调控。2)进一步完善铝/镁异种搅拌摩擦焊的温度场、流动场与应力场的数值模拟,通过对焊接过程中热-力耦合与材料流动的调控来指导焊接试验,优化接头成形,提高接头性能。3)面向工程应用,开展适合于铝/镁异种材料搅拌摩擦焊的智能化、自动化焊接设备的研究与开发,以实现更高的生产效率,获得更优的焊接质量,扩大搅拌摩擦焊技术在铝、镁等有色金属焊接中的应用。

5 参考文献

- [1] 郁炎,张建欣,李士凯. 国内外异种材料搅拌摩擦焊的研究现状及发展趋势[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(6): 108-113.
YU Yan, ZHANG Jianxin, LI Shikai. Recent development of friction stir welding for dissimilar materials at home and abroad [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(6): 108-113. (in Chinese)
- [2] 王创,张骁勇,鲁一荻,等. 镁/铝异种金属焊接技术研究现状及进展[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(3): 107-112.
WANG Chuang, ZHANG Xiaoyong, LU Yidi, et al. Research status and progress of magnesium/aluminum dissimilar metal welding technology [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(3): 107-112. (in Chinese)
- [3] 郑洋,宿振宇,张璇. 铝/镁异质金属搅拌摩擦焊技术研究进

- 展[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 346-352.
- ZHENG Yang, SU Zhenyu, ZHANG Xuan. Research progress of aluminum/magnesium dissimilar joints by friction stir welding[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 346-352. (in Chinese)
- [4] 朱浩, 张二龙, 莫淑娟, 等. 带状组织对铝/镁异种金属搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(1): 34-38.
- ZHU Hao, ZHANG Erlong, MO Shuxian, et al. Effect of banded structure on mechanical properties of aluminum/magnesium dissimilar metal friction stir welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(1): 34-38. (in Chinese)
- [5] 路尧文, 赵亚东, 崔红保, 等. 铝/镁异种材料搅拌摩擦焊接头的组织演化与断裂行为研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(17): 27-31.
- LU Yaowen, ZHAO Yadong, CUI Hongbao, et al. Microstructure evolution and fracture behavior of aluminum/magnesium-dissimilar materials friction stir welded joint[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(17): 27-31+35. (in Chinese)
- [6] ZHAO Y D, LU Y W, LUO Y L, et al. Microstructure evolution and fracture behavior of dissimilar friction stir welding of 1060Al alloy to AZ31B Mg alloy[J]. Materials Characterization, 2021, 180: 111440.
- [7] 赵亚东, 罗亚龙, 郭学锋, 等. 1060铝/AZ31镁合金异种金属搅拌摩擦搭接焊组织与力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(9): 49-53.
- ZHAO Yadong, LUO Yalong, GUO Xuefeng, et al. Microstructure and mechanical properties of 1060 Al/AZ31 Mg alloy dissimilar metal friction stir lap welding[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(9): 49-53. (in Chinese)
- [8] 于欢, 毛育青, 杨平, 等. 铝/镁异种合金搅拌摩擦搭接焊接头界面结构及拉剪性能[J]. 热加工工艺, 2022, 51(5): 32-36.
- YU Huan, MAO Yuqing, YANG Ping, et al. Interface structure and tensile-shearing property of dissimilar aluminum/magnesium alloy friction stir lap welded joints[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(5): 32-36. (in Chinese)
- [9] SEN M, PURI A B. Formation of intermetallic compounds (IMCs) in FSW of aluminum and magnesium alloys (Al/Mg alloys)-A review[J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 105017.
- [10] XU Y, KE LM, OUYANG S, et al. Precipitation behavior of intermetallic compounds and their effect on mechanical properties of thick plate friction stir welded Al/Mg joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1059-1069.
- [11] 孔德兵, 陈树君, 蒋晓青. 铝镁异种合金FSW接头形貌及金属间化合物研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(11): 12-16.
- KONG Debing, CHEN Shujun, JIANG Xiaoqing. Study on morphology and intermetallic compounds of aluminum-magnesium dissimilar alloy FSW joint[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(11): 12-16. (in Chinese)
- [12] 聂浩, 徐洋, 柯黎明, 等. 转速对厚板铝/镁异种材料搅拌摩擦焊摩擦产热及界面组织的影响[J]. 材料导报, 2023(8): 1-11.
- NIE Hao, XU Yang, KE Liming, et al. Effect of rotational speed on frictional heat production and interface structure of thick plate Al/Mg dissimilar materials by friction stir welding[J]. Materials Reports, 2023(8): 1-11. (in Chinese)
- [13] XU Y, KE L M, MAO Y Q, et al. Effect of rotational speed on intermetallic compounds and low melting point eutectic of Al/Mg friction stir welded joints[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(12): 4209-4217.
- [14] 李佩琪, 游国强, 徐轩曦, 等. 压铸态镁/铝异种合金搅拌摩擦焊接接头组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(5): 1551-1558.
- LI Peiqi, YOU Guoqiang, XU Xuanxi, et al. Microstructure and properties for friction stir welded joints of high-pressure die casting dissimilar Mg/Al alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(5): 1551-1558. (in Chinese)
- [15] 叶结和, 杨千里, 朱燕, 等. 5754/AZ31异种合金搅拌摩擦焊接头的组织与性能[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2016, 30(3): 232-236.
- YE Jiehe, YANG Qianli, ZHU Yan, et al. Microstructure and mechanical properties of 5754/AZ31 dissimilar joint by friction stir welding[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 30(3): 232-236. (in Chinese)
- [16] 孙嵩, 王快社, 王文, 等. 焊接速度对镁/铝异种合金搅拌摩擦焊接头显微组织与力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2019, 43(2): 63-68.
- SUN Song, WANG Kuaishe, WANG Wen, et al. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of dissimilar magnesium/aluminum alloys[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(2): 63-68. (in Chinese)
- [17] 赵亚东, 路尧文, 崔红保, 等. 焊接速度对铝/镁异种合金搅拌摩擦焊竖向压力、组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023(13): 42-46.
- ZHAO Yadong, LU Yaowen, CUI Hongbao, et al. Effect of welding speed on vertical pressure, microstructure and properties of Al/Mg dissimilar metals friction stir welding[J]. Hot Working Technology, 2023(13): 42-46. (in Chinese)
- [18] 张真, 付雪松, 陈吉, 等. 下压力对铝/镁搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12): 22-27.
- ZHANG Zhen, FU Xuesong, CHEN Ji, et al. Effect of Z-axial force on microstructure and mechanical property of Al/Mg dissimilar friction stir welded joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(12): 22-27. (in Chinese)
- [19] 陈成, 袁鸽成, 杨濂, 等. 6061/AZ31B异质板材搅拌摩擦焊

- 缝的腐蚀特征[J]. 热加工工艺, 2022, 51(11): 32-36.
- CHEN Cheng, YUAN Gecheng, YANG Lian, et al. Corrosion characteristics of friction stir welding seams of 6061/AZ31B heterogeneous plates [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(11): 32-36. (in Chinese)
- [20] 蔡达, 王立世, 胡心彬. AA5052铝合金/AZ31B镁合金搅拌摩擦焊接头的腐蚀行为研究[J]. 材料导报, 2023(4): 1-14.
- CAI Da, WANG Lishi, HU Xinbin. Study on corrosion behavior of friction stir welded joints of AA5052 aluminum/AZ31B magnesium alloys [J]. Materials Reports, 2023(4): 1-14. (in Chinese)
- [21] KAMAL J R, MALARVIZHI S, BALASUBRAMANIAN V. Electrochemical corrosion behaviour of stir zone of friction stir welded dissimilar joints of AA6061 aluminum - AZ31B magnesium alloys [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2017, 27: 2181-2192.
- [22] 金玉花, 吴永武, 毕胜, 等. Zn粉辅助Al/Mg异种合金搅拌摩擦搭接连接[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(4): 26-31.
- JIN Yuhua, WU Yongwu, BI Sheng, et al. Zn powder-assisted friction stir lap welding of Al/Mg heterogeneous alloying plates [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(4): 26-31. (in Chinese)
- [23] NIU S Y, JI S D, YAN D J, et al. AZ31B/7075-T6 alloys friction stir lap welding with a zinc interlayer [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2019, 263: 82-90.
- [24] ABDOLLAHZADEH A, SHOKUH FAR A, CABRERA J M, et al. The effect of changing chemical composition on dissimilar Mg/Al friction stir welded butt joints using zinc interlayer [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 18-30.
- [25] 郑博, 邓威, 王彦辉, 等. 进给速度对铜界面合金化镁/铝FSW组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(11): 1193-1197.
- ZHENG Bo, DENG Wei, WANG Yanhui, et al. Influence of feed speed on the microstructure and mechanical properties of the magnesium-aluminum interface alloying joint with Cu foil by friction stir welding [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(11): 1193-1197. (in Chinese)
- [26] 王彦辉, 赵丽, 邓威, 等. 添加Cu箔后搅拌摩擦焊镁/铝异种合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(11): 1187-1190.
- WANG Yanhui, ZHAO Li, DENG Wei, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stirring welding magnesium and aluminum dissimilar alloys with Cu foil [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(11): 1187-1190. (in Chinese)
- [27] KARIMI-DERMANI O, ABBASI A, ROEEN GA, et al. Dissimilar friction stir lap welding of AA7075 to AZ31B in the presence of Sn interlayer [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 616-631.
- [28] KUMAR S, WU C S. Eliminating intermetallic compounds via Ni interlayer during friction stir welding of dissimilar Mg/Al alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4353-4369.
- [29] 王涛, 武传松. 超声对铝/镁异质合金搅拌摩擦焊接成形的影响[J]. 材料工程, 2022, 50(5): 20-34.
- WANG Tao, WU Chuansong. Effect of ultrasonic on friction stir welding formation of magnesium/aluminum dissimilar alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(5): 20-34. (in Chinese)
- [30] 吕学奇, 杨春靓, 武传松. 铝-镁合金的超声振动强化搅拌摩擦焊试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 58-64.
- LÜ Xueqi, YANG Chunliang, WU Chuansong. Experimental investigation on ultrasonic vibration enhanced FSW of Al-Mg dissimilar materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 58-64. (in Chinese)
- [31] LÜ X Q, WU C S, YANG C L, et al. Weld microstructure and mechanical properties in ultrasonic enhanced friction stir welding of Al alloy to Mg alloy [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2018, 254: 145-157.
- [32] HE C S, WANG T, ZHANG Z Q, et al. Coupling effect of axial ultrasonic vibration and tool thread on the microstructure and properties of the friction stir lap welding joint of Al/Mg dissimilar alloys [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 80: 95-107.
- [33] ZHAO J J, WU C S, SHI L, 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.
- [34] ZHAO J J, WU C S, SU H. Acoustic effect on the tensile properties and metallurgical structures of dissimilar friction stir welding joints of Al/Mg alloys [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65: 328-341.
- [35] JI S D, NIU S Y, LIU J G. Dissimilar Al/Mg alloys friction stir lap welding with Zn foil assisted by ultrasonic [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35: 1712-1718.
- [36] JI S D, NIU S Y, LIU J G, et al. Friction stir lap welding of Al to Mg assisted by ultrasound and a Zn interlayer [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2019, 267: 141-151.
- [37] 李丰, 党鹏飞, 刘雪松. 基于不旋转轴肩的铝镁异种材料搅拌摩擦焊[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 55-58.
- LI Feng, DANG Pengfei, LIU Xuesong. Dissimilar friction stir welding of Al/Mg alloys based on non-rotational shoulder [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 55-58. (in Chinese)
- [38] 许志武, 李政玮, 冯艳, 等. 静轴肩辅助铝镁搅拌摩擦搭接接头的组织与性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 1-6.
- XU Zhiwu, LI Zhengwei, FENG Yan, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg/Al friction stir lap welding joint

- assisted by stationary shoulder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4): 1-6. (in Chinese)
- [39] LIU Z L, MENG X C, JI S D, et al. Improving tensile properties of Al/Mg joint by smashing intermetallic compounds via ultrasonic - assisted stationary shoulder friction stir welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 552-559.
- [40] 王璐, 席小鹏. 镁/铝水下搅拌摩擦搭接焊接头组织与性能研究[J]. 焊管, 2020, 43(8): 13-18.
WANG Lu, XI Xiaopeng. Structure and mechanical properties of magnesium/aluminum joint by submerged friction stir lap welding[J]. Welded Pipe and Tube, 2020, 43(8): 13-18. (in Chinese)
- [41] JADAV H H, BADHEKA V, SHARMA D K, et al. Effect of pin diameter and different cooling media on friction stir welding of dissimilar Al-Mg alloys[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 42: 362-369.
- [42] JIANG X Q, LIU Y Y, YUAN T, et al. Enhanced mechanical properties of dissimilar Al and Mg alloys fabricated by pulse current assisted friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 123-137.
- [43] ZHENG B, HU X B, LÜ Q Q, et al. Study of self-reaction assisted friction stir welding of AZ31B Mg/5052 Al alloys [J]. Materials Letters, 2020, 261: 127138.
- [44] 郑博, 赵丽, 董仕节, 等. AZ31B/6061异种合金搅拌摩擦焊接头界面组成相与第一性原理计算[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 238-241.
ZHENG Bo, ZHAO Li, DONG Shijie, et al. Interface phase composition and first-principle computation of AZ31B/6061 dissimilar alloys friction stirring welded joint[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9): 238-241. (in Chinese)
- [45] 罗亚龙, 赵亚东, 崔红保, 等. 基于响应面法的Al/Mg异种金属搅拌摩擦焊工艺优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(11): 30-33.
LUO Yalong, ZHAO Yadong, CUI Hongbao, et al. Optimization of friction stir welding technology of Al/Mg dissimilar metals based on response surface method[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(11): 30-33. (in Chinese)
- [46] 吴晓虎, 曹丽杰, 苗臣怀, 等. 铝-镁异种合金搅拌摩擦搭接焊残余应力数值模拟[J]. 机械工程材料, 2022, 46(7): 95-102.
WU Xiaohu, CAO Lijie, MIAO Chenhuai, et al. Numerical simulation of residual stress in friction stir lap welding of Al-Mg dissimilar alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(7): 95-102. (in Chinese)
- [47] 吴晓虎, 曹丽杰, 苗臣怀, 等. 铝-镁异种合金搅拌摩擦搭接焊数值模拟[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(2): 76-83.
WU Xiaohu, CAO Lijie, MIAO Chenhuai, et al. Numerical simulation of friction stir lap welding of Al-Mg dissimilar alloy [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(2): 76-83. (in Chinese)
- [48] 苗臣怀, 曹丽杰, 吴晓虎. 铝-镁异种合金搅拌摩擦焊的数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(4): 11-17.
MIAO Chenhuai, CAO Lijie, WU Xiaohu. Numerical simulation of friction stir welding of Al-Mg dissimilar alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(4): 11-17. (in Chinese)
- [49] SONG B, ZHAI Y Y, ZUO D W, et al. Visualization and numerical simulation of material flow in Al/Mg dissimilar friction stir welding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(5): 1483-1490.
- [50] SONG Q, WANG H R, JI S D, et al. Improving joint quality of hybrid friction stir welded Al/Mg dissimilar alloys by RBFNN-GWO system [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 750-759.
- [51] HU W, MA Z W, JI S D, et al. Improving the mechanical property of dissimilar Al/Mg hybrid friction stir welding joint by PIO-ANN [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 53: 41-52.
- [52] ZHAI M, WU C S, SHI L. Numerical simulation of friction stir lap welding of Al-to-Mg alloys under different lap configurations and pin lengths [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 2889-2904.
- [53] ZHAI M, WU C S, SHI L, et al. Dislocation strain energy based modeling for ultrasonic effect on friction stir lap welding process of dissimilar Mg/Al alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 252-268.