

铝/钢异种金属焊接及增材制造研究进展

蔺春发¹, 李响², 韩雨菁¹, 董龙龙², 戴宇轩¹, 朱铨祺¹

(1. 常熟理工学院 汽车工程学院, 江苏 常熟 215500)
(2. 西北有色金属研究院 先进材料研究所, 陕西 西安 710016)

摘要: 铝/钢复合结构结合了铝合金的低密度和钢的高强度、低成本等优良特性, 在汽车轻量化制造领域具有良好的应用前景。利用焊接方法和增材制造可以实现铝/钢复合构件的快速制造, 但铝和钢的物理性能差异较大且二者之间极易反应形成连续分布的脆硬Fe-Al金属间化合物, 严重降低铝/钢异种金属界面及整个构件的力学性能。本文论述了铝/钢异种金属的焊接性, 介绍了铝/钢异种金属焊接技术的发展现状及一些前沿的金属间化合物调控和消除策略, 重点阐述了电弧增材制造和激光增材制造在铝/钢复合结构制备方面的应用及其与铝/钢电弧焊、激光焊的异同之处, 最后对铝/钢异种金属焊接及增材制造的发展方向进行了展望。

关键词: 轻量化; 铝/钢复合结构; 异种金属焊接性; 双金属增材制造; 金属间化合物

中图分类号: TG425;TG44

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)02-0524-09

随着“碳达峰、碳中和”战略目标纳入国家发展规划中,我国持续推进汽车产业结构和能源结构转型。在大力发展新能源汽车的同时,也希冀通过车身材料和结构轻量化的方法来降低能耗,实现节能减排。钢具有优异的力学性能和机械加工性能,且成本低,是汽车制造最常用的结构材料,但其较大的密度给车身轻量化带来了一定的挑战^[1]。与之相比,铝合金具有更低的密度(约为钢的1/3)和高比强度、良好的耐腐蚀性等优点,逐渐成为汽车零部件生产的关键结构材料之一。但其生产成本较高(约为钢的2倍),且强度无法和先进高强度钢相比,在安全保障和成本控制方面仍有不足^[2]。为了解决以上问题,铝/钢复合结构应运而生,它通过铝和钢的结合,在满足车身零部件基本性能需求的同时,可以实现轻量化和低成本制造目标,已得到广泛应用^[3-5]。

目前,常规的铝/钢复合结构件主要通过铝/钢异种金属的焊接进行连接成形^[6-10]。但传统焊接技术(如电弧焊、电阻点焊、搅拌摩擦焊等)在制造具有复杂结构、特殊形状和尺寸的铝/钢构件方面存在一定的局限性。近年来,随着异种金属增材制造技术的快速发展^[11-13],为铝/钢复杂结构件的可控制备提供了新的方法。金属增材制造技术以计算机数字模型为基础,在分层软件和数控成形系统控制下,将金属熔化并逐层堆积来构造三维物体,不受零件结构和尺寸的约束,在制造多材料复杂结构方面具有灵活高效和设计性强等优势。然而,与铝/钢焊接

接头类似,铝/钢异种金属增材件中总是形成界面冶金缺陷及硬脆的Fe-Al金属间化合物(intermetallic compounds, IMCs),且增材热循环会对铝/钢界面产生比焊接过程更复杂的影响,使铝/钢异种金属的增材制造面临着巨大的挑战^[14-18]。可见,界面缺陷及金属间化合物的控制是铝/钢异种金属焊接及增材制造领域的共性问题,有待进一步解决,并需要在实际研究工作中充分考虑增材制造技术与焊接工艺之间的差异性。

本文总结了铝/钢异种金属的焊接性,介绍了一些前沿的金属间化合物调控和消除策略,阐述了电弧增材制造及激光增材制造铝/钢复合构件的发展现状,对比分析了增材制造技术与焊接方法在制备铝/钢复合结构方面的异同之处,并对铝/钢异种金属焊接及增材制造的发展方向提出了展望,旨在为铝/钢复合结构在汽车轻量化领域的实际应用提供理论和技术参考。

1 铝/钢异种金属焊接性

由于铝合金与钢的物理和化学性质存在明显差异,使得铝/钢异种金属的高质量焊接和增材制造存在一定的困难和挑战,具体表现在以下几个方面。

1.1 物理性能差异大

表1列出了铝和铁的物理性能^[19]。从表中可以看出,铁的密度是铝的近3倍,当采用熔化焊方法连接铝/钢两种金属时,铝液往往会上浮到钢上方,造成接头成分不

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 江苏省基础研究计划自然科学基金(BK20220690);江苏省高等学校基础科学研究面上项目(23KJB430002);陕西省重点研发项目(2024GX-YBXM-356)

作者简介: 蔺春发,男,1989年生,博士,常熟理工学院汽车工程学院,江苏 常熟 215500, E-mail: chunfalin1852@csit.edu.cn

表1 铝和铁的物理性能
Table 1 Physical properties of Al and Fe^[19]

Material	Density/ g·cm ⁻³	Melting point/ °C	Thermal expansion coefficient/×10 ⁻⁶ K ⁻¹	Thermal conductivity/ W·(m·K) ⁻¹	Specific heat capacity/J·(kg·K) ⁻¹
Al	2.7	660	24	237	1080
Fe	7.8	1536	11	80	795

均匀。另外,铝和铁的熔点相差较大,当铝合金与钢在一定温度下进行焊接或增材制造时,会出现铝已经完全熔化而钢仍处于固态的情况,由于液态铝对固态钢的润湿性不佳,会导致铝/钢接头的成形质量和力学性能较差。此外,铝和铁的热膨胀系数相差较大,铝/钢构件在冷却后,接头区会保留较大的焊接残余应力,需要通过后续热处理或振动等手段来消除,否则可能会导致变形及开裂,降低铝/钢接头的可靠性。除此之外,铝在高温下易被氧化生成稳定且熔点极高的 Al_2O_3 膜,不仅会阻碍铝、钢之间的冶金连接,还容易诱发夹杂、气孔等焊接缺陷的生成,使铝/钢接头的强度降低,造成复合构件服役能力下降。

1.2 硬脆 Al-Fe 金属间化合物的生成

图1为Al-Fe二元合金相图^[20]。可以看到,虽然铁中可以溶解一定含量的铝原子,但铁在铝中的固溶度极低,尤其是当温度降至Al-Fe的共晶温度(655 °C)以下时,溶于铝中的微量铁会以Fe-Al金属间化合物的形式析出,常温下铝中更是几乎不能溶解铁原子。常见的Fe-Al二元金属间化合物主要包括富铁相 Fe_3Al 、 FeAl 及富铝相 FeAl_2 、 Fe_2Al_3 、 FeAl_3 等。由于这些IMCs中独立的滑移系很少,变形能力很差,因此宏观上大多呈现出硬而脆的物理特性^[21-22]。

铁、铝两种元素的低固溶性是导致铝/钢焊缝冶金相容性差的根本原因。铝/钢焊接过程中会在界面附近生成多种脆硬的Fe-Al金属间化合物,造成铝/钢界面的脆性大幅增加,强度明显降低,使铝/钢异种金属的焊接成为一大难题。铝/钢焊缝凝固过程中,生成的IMCs的种

类主要取决于实际的焊接温度和合金的化学成分,同时也受到扩散时间的影响^[23]。界面组织演变过程可粗略分为4个阶段:(1)界面附近Al、Fe原子的互扩散;(2)Fe原子在Al基体中达到饱和状态,开始析出IMCs晶核;(3)随着元素进一步扩散,IMCs晶粒长大并形成连续层;(4)不同Fe-Al金属间化合物的生长与转变。最终在铝/钢界面区形成了不同种类、形貌和尺寸各异的金属间化合物。较薄的IMCs层可以加强界面结合,有利于抑制界面失效,而过厚的IMCs层则会损伤接头性能^[24-28]。因此,在进行铝/钢异种金属焊接或增材制造时,需要严格控制IMCs层的厚度。目前,研究人员主要采用优化增材制造及焊接工艺参数、添加中间层、施以外加能场等方法来调控Fe-Al金属间化合物层的厚度和形态,从而获得界面结合性能优异的铝/钢复合结构^[29-31]。

2 铝/钢异种金属的焊接与增材制造

异种金属焊接技术已发展较为成熟,常用的有激光焊(laser welding, LW)^[32-35]、电弧焊(arc welding, AW)^[36-38]、电阻点焊(resistance spot welding, RSW)^[39-41]、搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)^[42-46]等方法及其复合技术^[47-50]。然而,异种金属的增材制造尚处于起步阶段,主要以线材电弧增材制造(wire arc additive manufacturing, WAAM)^[51-53]和激光粉末床熔合(laser powder bed fusion, LPBF)^[54-55]、激光定向能量沉积(laser-directed energy deposition, LDED)^[12,56]等方法为主。鉴于此,本文将重点分析异种金属增材制造与焊接之间的异同之处,并对铝/钢构件电弧增材制造、电弧焊和激光增材制造、激光焊的研究进展进行阐述。

2.1 铝/钢电弧焊

电弧焊具有设备成本低、效率高、操作灵活等优点,在车、船用铝/钢构件的焊接领域应用十分广泛。铝/钢电弧焊通常采用熔钎焊模式,即利用电弧对铝/钢界面加热时,高熔点的钢材不熔化,低熔点的铝合金母材及填充金属发生熔化并铺展在钢表面形成钎焊接头,而焊缝与铝之间形成熔化焊连接^[36-37]。电弧焊可分为钨极惰性气体保护焊(tungsten inert-gas arc welding, TIG)、熔化极惰性气体保护焊(metal inert-gas arc welding, MIG)和冷金属过渡(cold metal transfer, CMT)等。其中,CMT技术将焊丝回抽机制与MIG相结合,获得了更高的焊接速度、

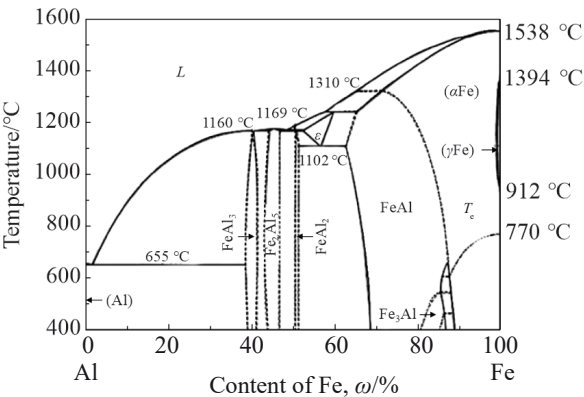


图1 Al-Fe二元合金相图
Fig.1 Phase diagram of Al-Fe binary alloy^[20]

工艺稳定性及更低的热输入条件^[38]。

Sravanthi 等^[57]分别采用 TIG 和 CMT 技术对 AA5052 铝合金与镀锌低碳钢进行了搭接焊。如图 2 所示,两种条件下获得的铝/钢接头中均形成了一定厚度的 Al-Fe-Si 化合物层,由于 CMT 技术具有更低的热输入,因此采用该技术成形的铝/钢接头中 IMCs 层的厚度相对较低,即 IMCs 层的厚度与热输入量成反比^[58]。余腾义等^[59]采用脉冲 CMT 焊接方法获得了宏观形貌良好的 AA5052 铝合金/Q235 低碳钢对接接头,在铝/钢界面处发现了平均厚度约 10 μm 的 IMCs 层,其组织为向钢侧生长的针状 Fe_2Al_3 相和靠近铝侧均匀分布的 FeAl_3 相。随着 IMCs 层厚度的降低,铝/钢接头的拉伸强度增加,当钎料润湿铺展良好且有背部成形时,接头的抗拉强度最高,达到 158.3 MPa,其断裂位置从铝/钢界面转移到铝母材区。由此可见,IMCs 的形态和尺寸是影响铝/钢接头力学性能的重要因素。谭攀等^[60]利用啃削辅助电弧熔钎焊技术制取了 AA5052 铝合金/SUS304 不锈钢接头。如图 3 所示,随着啃削量的增加,铝/钢界面从平直状演变为波浪

状,再变为由厚 IMCs 层和叠层结构组成的混合界面,同时 IMCs 层厚度由原始的 1.99 μm 增加至 7.95 μm 。当啃削量为 0.2 mm 时,包含波浪状界面的铝/钢接头的抗拉强度最高,达到了 152 MPa;当啃削量达到 0.3 mm 时,厚 IMCs 层的存在使得铝/钢接头的脆性增加、强度下降。目前,研究人员尝试在电弧焊过程中引入磁场、超声能场、塑性变形等辅助手段对铝/钢界面进行控形控性,已取得了一些有价值的成果,这些研究工作可为电弧增材制造铝/钢复合构件的形性调控提供理论指导。

2.2 铝/钢复合结构的电弧增材制造

对于具有复杂结构、特殊形状和尺寸的铝/钢构件,采用电弧焊方法很难实现其精确成形。突破传统电弧焊在铝/钢复杂结构生产方面的局限性,是推动航空航天、船舶和汽车轻量化行业发展亟需解决的问题之一。WAAM 以焊接电弧为热源,可将同种或不同金属丝材熔化并进行逐层堆积,能够实现复杂结构件的一体化成形及可控制备,为解决上述难题提供了新方法。与电弧焊相比,WAAM 过程不仅包含了相邻金属层之间的焊接,

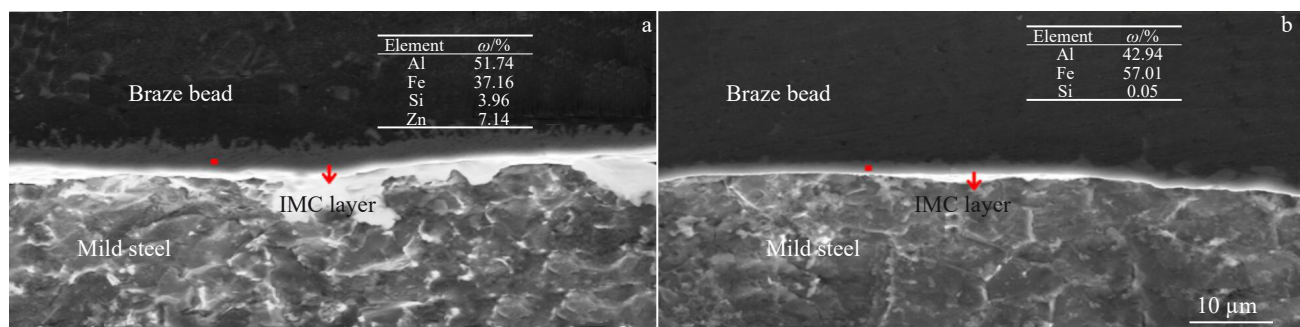


图2 采用不同电弧焊接方法获得的铝/钢接头中焊缝/钢界面的微观形貌

Fig.2 Microstructures of the braze bead-steel interface in Al/steel joints obtained by TIG (a) and CMT (b) technologies^[57]

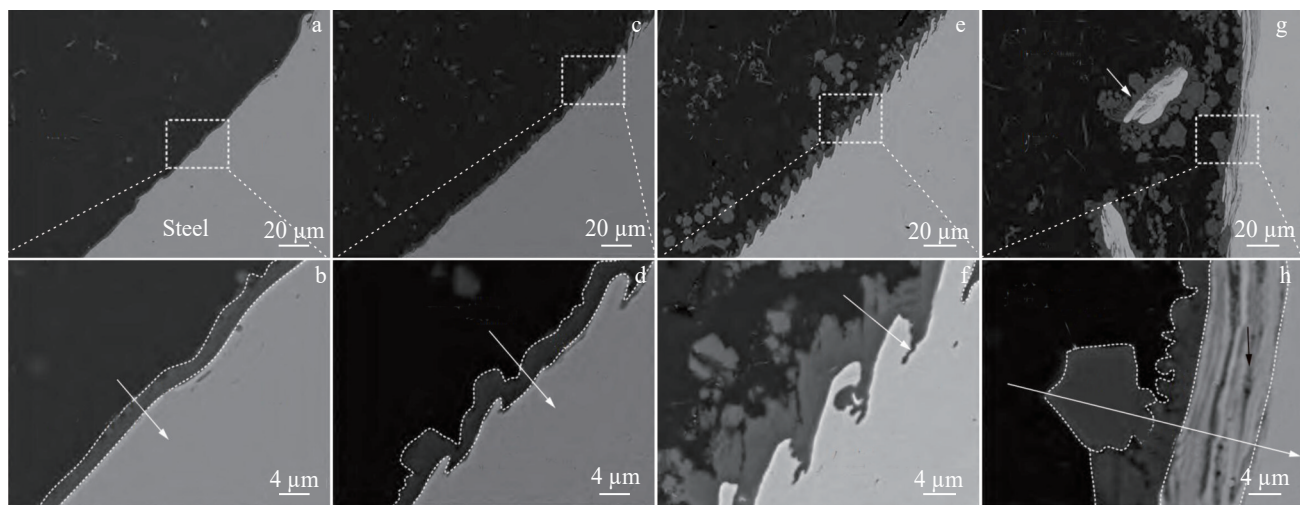


图3 不同啃削量下铝/钢电弧焊接头的界面组织形貌

Fig.3 Interface microstructures of Al/steel joint under different offset values: (a-b) 0 mm; (c-d) 0.1 mm; (e-f) 0.2 mm; (g-h) 0.3 mm^[60]

还涉及了熔融金属沉积过程的结晶行为以及增材热循环对已成形层和层间界面的多重热影响,其组织结构演变过程比电弧焊更为复杂,构件力学性能的调控难度更大。当然,现有的铝/钢电弧焊相关理论和工艺优化策略对WAAM仍具有一定的指导作用。

孔乐乐^[61]选用船用Q235低碳钢基板和ER5356铝合金焊丝进行了铝/钢复合结构的电弧增材制造,并通过调整TIG焊接电流、送丝速度、焊接速度等工艺参数,获得了成形质量良好的铝/钢构件。其结果显示,铝/钢界面层中形成了FeAl、FeAl₂、Fe₂Al₃、FeAl₃等多种化合物。相比于电弧焊Q235/AA5052的接头组织^[57],WAAM过程中生成的IMCs更复杂多样,其原因在于电弧增材制造过程存在多重热循环,给铝/钢界面带来了更多的热输入,从而促进了Fe-Al之间的互扩散,发生了更复杂的冶金反应^[23]。苗玉刚等^[62-63]采用旁路分流MIG工艺(bypass-current MIG welding, BC-MIG)实现了AA4043铝合金/Q235镀锌钢复合结构的增材制造得到的铝/钢电弧增材件外观良好,性能优异,验证了该工艺在异种金属增材制造方面的可行性^[64]。Karim等^[65-66]利用CMT技术制备了AA4043铝合金/316L不锈钢双金属电弧增材件,其宏微观形貌如图4及图5所示。可以发现,铝/钢界面处形成了以FeAl₂Si为主的IMCs层。在低热输入条件下,IMCs层厚度较小,铝/钢构件的拉伸强度较高,最高可达130 MPa;当热输入量升高后,铝/钢界面IMCs层的厚度会显著增加,界面的脆性增大,构件的力学性能降低至100 MPa以下。可见,与电弧焊过程类似,铝/钢电弧增材件的界面处也会形成不同种类和形态的Fe-Al化合物,且随IMCs层厚度的增加,电弧增材铝/钢构件的力学性能下降。

在铝/钢之间添加中间层或通过给母材施加镀层能够有效改善铝/钢之间的冶金性能,抑制金属间化合物的产生,是目前改善铝/钢界面力学性能的重要途径^[67-68]。

刘一搏^[69]在铝/钢CMT电弧增材制造过程中加入了纯镍和紫铜作为中间过渡层,结果发现铝/镍界面处形成了由Ni₃Al、Ni_{0.9}Al_{1.1}、Ni₂Al₃、NiAl₃组成的IMCs层,铝/铜界面IMCs层由Cu₃Al₂、Cu₉Al₄、CuAl₂组成。由于这些脆性化合物的存在,铝合金与镍、铜的界面连接处是增材件性能的薄弱环节。通过进一步地引入外加纵向磁场,增加了电弧与基板表面接触面积,改变了熔滴过渡行为,改善了熔融铝合金在钢、镍、铜表面的润湿效果,同时抑制了硬脆IMCs层的生长,显著提高了界面结合强度,使铝-夹层-钢电弧增材件的抗拉强度比铝/钢直接增材制造时提高了近70%。王亚欣^[70]研究发现磁场的存在还可以改善初始界面结构(见图6),降低后续增材热过程的峰值温度 and 高温停留时间,调节增材温度以引起适当的热冲击作用,形成化合物以镶嵌状形态分布的界面结构,从而提高界面及整个增材件的力学性能。由此可知,与铝/钢电弧焊过程类似,添加辅助能场同样能够改善电弧增材制造铝/钢构件的成形质量和界面特性,进而获得优异的综合力学性能。然而,需要指出的是在电弧增材制造铝/钢构件中,受后续增材热循环的影响,先成形区及界面组织会发生转变,IMCs层厚度会进一步增大,这比铝/钢电弧焊过程更加复杂。尽管如此,相比于传统先制造、再焊接生产铝/钢复合构件的方法,电弧增材制造可以实现铝/钢构件的一体化快速成形,对于提高汽车、船舶用多材料混合零部件的生产效率具有重要的现实意义。

2.3 铝/钢激光焊

铝/钢异种金属的激光焊是采用激光作为热源来实现铝合金与钢之间形成有效连接的方法,具有焊接速度快、能量密度高、热输入控制精确、焊接变形小等优点,被广泛用于汽车、船舶等工业领域铝/钢复合构件的连接成形^[32-35]。Du等^[6]采用激光偏置焊接方法进行了铝/钢对接焊,并通过研究发现调整激光束点的偏置距离能够控制铝合金的熔化量,从而达到调控IMCs层厚度和组织缺

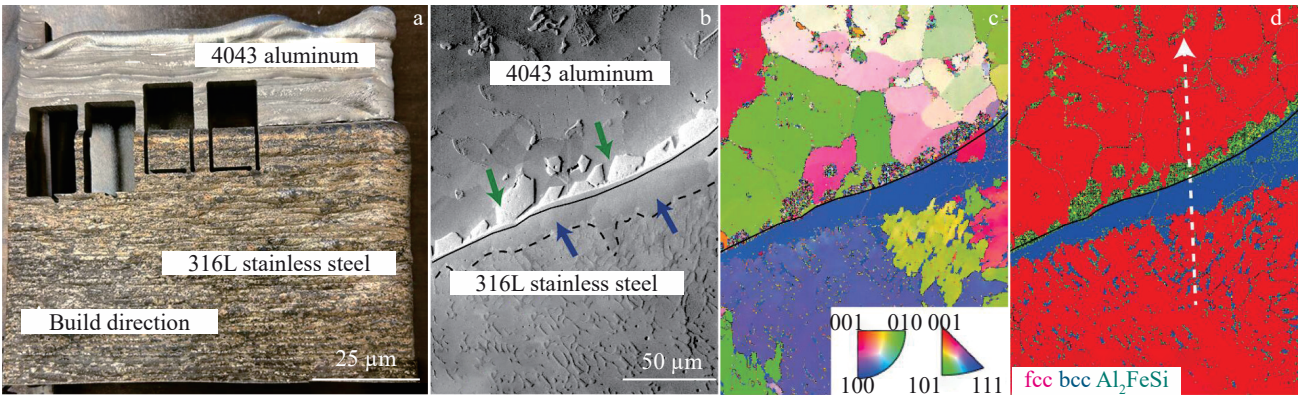


图4 电弧增材制造SS316L/ER4043双金属结构表征

Fig.4 Characterization of the fabricated Al/steel bimetallic structure: (a) as-deposited component; (b) interfacial morphology; (c) inverse pole figure map and (d) phase map along the build direction^[65]

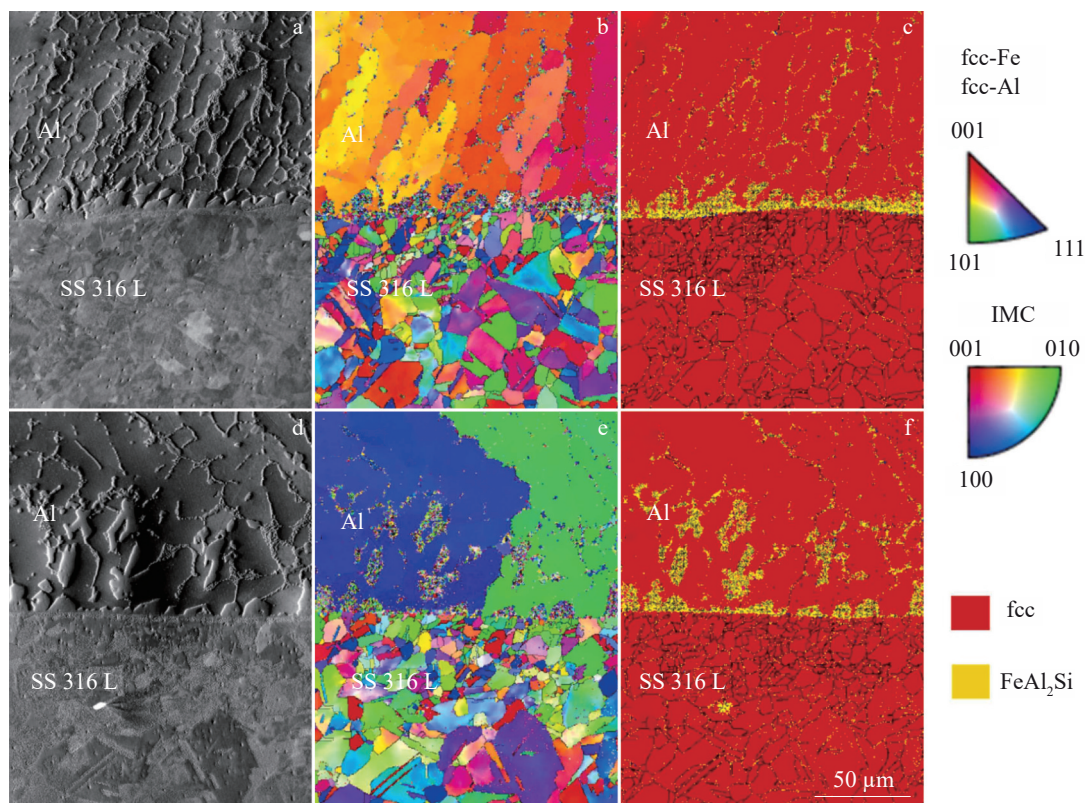


图5 电弧增材制造SS316L/ER4043 双金属结构的形貌、反极图和相分布图

Fig.5 SEM images (a, d), inverse pole figure maps (b, e), and phase maps (c, f) of the SS316L/ER4043 bimetallic structure fabricated under low heat input and (a–c) high heat input (d–f)^[66]

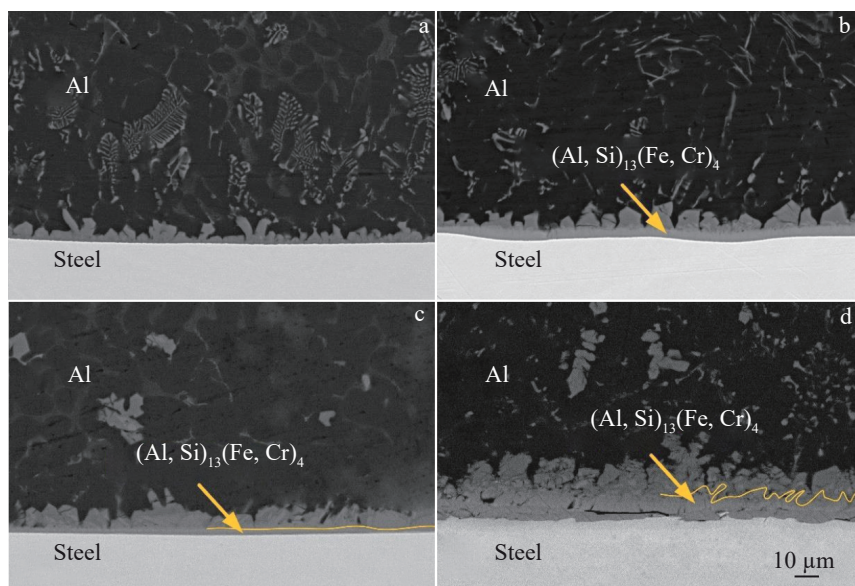


图6 电弧增材制造铝/钢构件的界面结构

Fig.6 Interfacial microstructures of the initial (a, c) and subsequent (b, d) Al/steel interface in additive manufactured Al/steel components under magnetic field (a–b) and without magnetic field (c–d)^[70]

陷的目的。Ding 等^[71]通过控制激光束落在 CRRA1000 镀锌高强度钢和 AA5754 铝合金上的比例 (2/3 钢+1/3 铝、1/2 钢+1/2 铝) 获得了具有不同界面特性的铝/钢搭接

接头(图7)。结果发现,当钢上激光束占比及热输入较高时,界面处形成了粗大的 Fe-Al-Si 化合物,铝/钢构件的断裂失效主要发生在焊缝区;当降低激光束在钢上的占

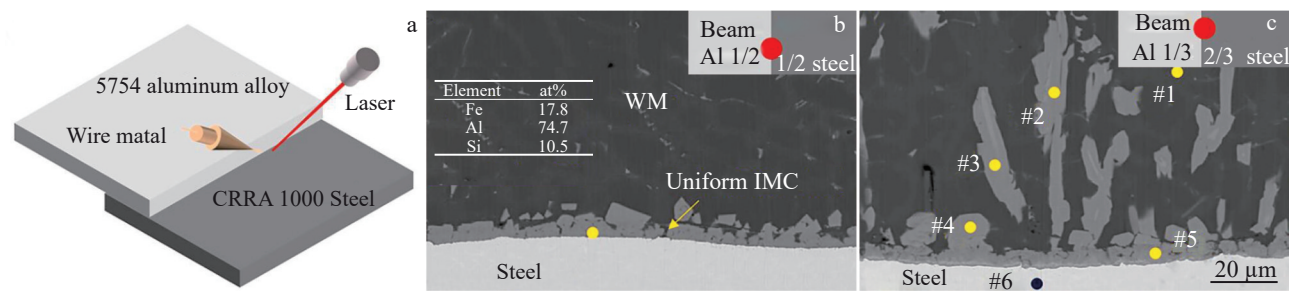


图7 铝/钢异种金属激光熔钎焊

Fig.7 Laser welding-brazing of 5754 aluminium and CRRA 1000 steel: (a) schematic of Al/steel laps, (b–c) microstructures of the interface between weld metal (WM) and steel for the specimens fabricated with welding parameter #1 (the spot location containing 1/2 aluminum and 1/2 steel) and parameter #2 (the spot location containing 1/3 aluminum and 2/3 steel)^[71]

比和热输入后,焊缝与钢之间形成了均匀的IMCs层,裂纹扩展受到阻碍,断裂位置在铝母材上;两种情况下构件的抗拉强度和断裂延伸率分别为344 MPa、10%和345 MPa、15%。可见,调整激光斑点辐照在钢和铝上的比例可以改变热输入量,从而调控铝/钢界面的组织结构和失效行为。

王晓虹等^[72]以05CuPCrNi高耐候低碳钢和AA6082为母材,研究了Fe-B-Si中间层对铝/钢接头组织形貌和力学性能的影响。结果显示,未添加中间层条件下,铝/钢接头中生成了呈层状分布的 Fe_2Al_3 、 FeAl_2 、 FeAl 和 Fe_3Al 化合物以及少量的针状 FeAl_3 ,由于 FeAl_2 和 FeAl_3 韧性较低,因此在拉剪试验中,铝/钢接头主要在这两个区域发生脆性断裂;添加Fe-B-Si中间层后,富铝IMCs层厚度降低,针状 FeAl_3 数量明显减少,铝/钢接头的拉剪性能提升了1.37倍。Li等^[73]在激光焊接AA6022铝合金和DP590双相钢时加入了Ti中间层(图8),成功使IMCs层的厚度降低,并在靠近钢侧形成了以韧性 Fe_2Ti 为主的界面产物区,铝/钢接头的断裂模式从脆性断裂转变为由脆性断裂和韧性断裂组成的混合模式,接头的性能提高了27%。可见,与电弧增材制造铝/钢复合结构及其电弧焊过程类似,控制热输入量、添加中间层对于提升铝/钢异种金属激光焊接头的性能同样具有积极作用。

2.4 铝/钢复合结构的激光增材制造

激光增材制造技术是以激光束为热源,通过将加热熔化的金属材料逐层堆积成形来制取三维构件的方法,根据原材料形态(丝材或粉末)和成形方式的不同,可分为激光定向能量沉积和激光粉末床熔合技术。相比于电弧增材制造方法,激光增材制造的成形精度更高、工艺更稳定,是制备复杂结构金属构件的重要手段之一。但目前针对铝/钢复合结构激光增材制造的研究报道较少,仍处于初步探索阶段。

Kannan等^[12]利用激光增材制造技术进行了铝/钢复合结构的成形,具体包括两个步骤:(1)采用激光粉末床

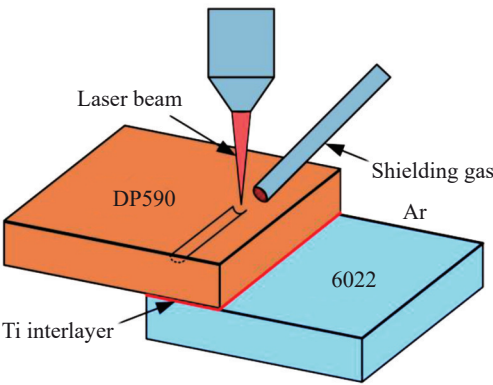


图8 添加钛中间层的铝/钢激光焊接过程示意图

Fig.8 Schematic illustration of the laser welding of 6022 aluminum alloy to DP590 dual-phase steel by adding Ti foil^[73]

熔合方法制备Al-Cu-Ce-Zr合金;(2)利用激光定向能量沉积方法在制取的Al-Cu-Ce-Zr合金上沉积316L不锈钢。如图9所示,由于两种材料热膨胀系数失配引起的残余应力发展和界面处存在延展性低的IMCs的共同作用,铝/钢界面处形成了大量的裂纹,构件的力学性能较差。针对这一问题,研究人员提出了两种改善激光增材制造铝/钢双金属结构性能的策略:(i)提高冷却速率,抑制无序到有序的转变,降低铝/钢界面脆性,这一方法已被Liu等^[14-15]证明是切实可行的;(ii)设计成分过渡界面和添加中间层材料来改善界面结构,从而提高界面延展性。谢勇^[74]研究了添加CoCrNiCu_x系中熔合金过渡层对激光增材制造铝/钢复合结构件组织、性能的影响。结果显示,AlSi₁₀Mg/CoCrNiCu和CoCrNiCu/316L界面处均无裂纹产生,在前一界面位置形成了铆钉状的Al-Cu固溶体区,在后一界面处形成了Fe元素浓度呈梯度变化的固溶体区,两者的界面剪切强度分别达到了70和380 MPa。为了提高前者的界面结合强度,研究人员尝试了调控激光增材工艺参数和控制熔池稀释率的方法,成功改善了

异质界面由于存在 IMCs 层而强度不足的问题,最终使铝/钢异质界面的结合强度进一步提高,达到了 235 MPa。值得一提的是与前文谈及的添加 Ti、Cu、Ni 等扩散阻碍层的策略不同,这一工作通过添加高熵合金过渡层,借助高熵效应和固溶原理,使铝/钢界面形成固溶体而非脆性的金属间化合物,在降低界面脆性、提高界面结合强度方面取得了更加突出的效果。

此外,将激光增材制造与其他成形方法相结合,可以进一步发挥增材制造技术在多材料复杂结构件制备方面的独特优势。例如,Ghasri-Khouzani 等^[13]为了获得如图 10 所示的复杂结构铝/钢构件,创新性地提出了利用激光粉末床熔合方法制取 316L 不锈钢框架结构,随后利用真空辅助熔渗铸造工艺将铝合金填充到不锈钢框架的空腔中进行成形的方法。这种基于激光增材制造技术的复合成形方法克服了传统激光焊接对构件形状和尺寸的限制,在制造多材料复杂结构方面表现出极大的应用潜力。

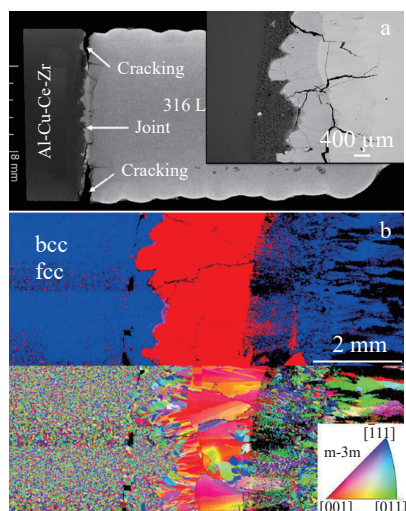


图9 激光增材制造铝/钢构件的界面组织结构

Fig.9 Al-Cu-Ce-Zr alloy/316L stainless steel component fabricated by LPBF and powder LDED: (a) X-ray CT image of the interface, (b) phase map and inverse pole figure map of the interface corresponding to the region shown in the inset in Fig.9a^[12]

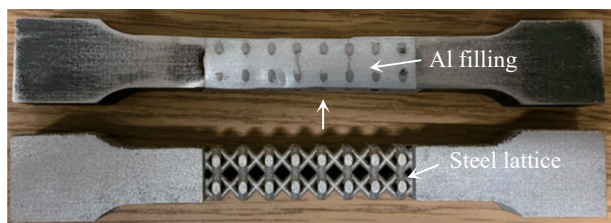


图10 采用激光增材+真空辅助熔渗铸造技术制造的铝/钢构件

Fig.10 Al/steel components fabricated by laser additive manufacturing and vacuum-assisted melt infiltration casting^[13]

综上所述,相比于电弧焊或激光焊方法,电弧增材制造和激光增材制造技术在制备复杂结构铝/钢构件方面具有效率更快、精度更高等优势,有望为汽车轻量化等产业发展提供新的助力。

3 结语

铝/钢复合结构的高质量、可控制造是实现汽车轻量化的重要途径。本文回顾了铝/钢异种金属焊接及增材制造的研究现状,针对其发展趋势提出如下展望:

(1) 异种金属增材制造技术能够克服传统焊接方法在复杂结构、特殊形状和尺寸多材料复合构件成形方面的局限性,具有广阔的应用前景。但目前对增材制造工艺和材料体系的开发十分有限,且缺乏对异种金属增材制造界面组织演变规律的认识,这些难题需要研究人员在未来去逐步攻克。

(2) 采用电弧或激光作为热源进行铝/钢复合构件增材制造时,二者之间总是不可避免地形成大量以 Fe-Al 金属间化合物为主的脆性相,使界面成为裂纹萌生和扩展的主要路径,造成构件性能无法充分发挥。搅拌摩擦增材制造具有固相成形、工艺简单、节能环保等优势,将成为铝/钢复合结构制造的重要方法之一。另外,基于增材制造技术的复合成形方法、以及增减材混合制造、外场辅助增材制造技术也有独到优势,是重要发展方向。

(3) 开发合适的中间层材料,使增材制造或焊接过程中铝/钢界面中形成韧性化合物或固溶体,而非脆硬的金属间化合物,降低界面脆性,提升界面结合强度。

(4) 借助人工智能和数值模拟方法进行铝/钢复合结构增材制造的仿真、预测,优化制造工艺参数,减少试错成本,提升制造的成功率,节省工艺研发周期。

参考文献

References

- [1] Suski C A, Filho J F S, Cortez A *et al.* *Journal of Cleaner Production*[J], 2024, 449: 141833
- [2] Ni Yang(倪 炆), Dong Xuefeng(董学锋). *Automobile Technology & Material*(汽车工艺与材料)[J], 2023, 7: 11
- [3] Yang Y, Luo Z, Zhang Y X *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2024, 110: 376
- [4] Silvayeh Z, Domitner J, Sommitsch C *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 59: 456
- [5] Peng Chen(彭 晨), Tan Guanhua(谭观华), Wang Shanlin(王善林) *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2023, 43(2): 211
- [6] Du M, Wang W Q, Zhang X G *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2022, 853: 143746
- [7] Liu Aiguo(刘爱国), Guo Xiaomeng(郭效盟). *Welding & Joining* (焊接)[J], 2023(11): 53
- [8] Chen J, Feng Z L, Wang H P *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2018, 735: 145

- [9] Shu X, Liang X Y, Liu J L *et al. Materials Letters*[J], 2024, 354: 135328
- [10] Gotawala N, Shrivastava A. *Materials Science & Engineering A* [J], 2021, 825: 141900
- [11] Zhang W C, Wang J, Zhu X L *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 28: 3566
- [12] Kannan R, Lee Y, Pierce D *et al. Materials & Design*[J], 2023, 231: 112003
- [13] Ghasri-Khouzani M, Li X, Bogno A A *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 69: 320
- [14] Liu F C, Zhang Y M, Dong P S. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 73: 725
- [15] Liu F C, Dong P, Khan A S *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2022, 308: 117721
- [16] Matsuda T, Hatano R, Ogura T *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2020, 786: 139437
- [17] Huang J K, He J, Yu X Q *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2017, 25: 126
- [18] Dang Z Y, Qin G L, Ma H. *Materials Science & Engineering A* [J], 2021, 822: 141689
- [19] Yang J, Oliveira J P, Li Y L *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2022, 301: 117443
- [20] Zhang Liping(张丽萍), Xie Jilin(谢吉林), Yu Xi(余曦) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology(航空制造技术)* [J], 2022, 65(21): 78
- [21] Mahto R P, Bhoje R, Pal S K *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 652: 136
- [22] Ghari H, Taherizadeh A, Sadeghian B *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 30: 2520
- [23] Dang Z Y, Qin G L, Guo X Y. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 27: 35
- [24] Pourali M, Abdollah-zadeh A, Saeid T *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 715: 1
- [25] Li H, Zhang C X, Deng Y H *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 26: 328
- [26] Matsuda T, Hayashi K, Iwamoto C *et al. Materials & Design*[J], 2023, 235: 112420
- [27] Dang Z Y, Qin G L, Zhao Y H *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2022, 21: 2215
- [28] Hatano R, Ogura T, Matsuda T *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2018, 735: 361
- [29] Jabar S, Barenji A B, Franciosa P *et al. Materials & Design*[J], 2023, 227: 111774
- [30] Liu Tao, Gao Song, Ye Weicheng *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 25: 5096
- [31] Wang Yuanyi(王元一), Qiao Ke(乔柯), Zhang Ting(张婷) *et al. Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2024, 31(3): 214
- [32] Corrado J, Ganguly S, Williams S *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2022, 119: 367
- [33] Shu F Y, Niu S C, Zhu B H *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2021, 143: 107355
- [34] Liu Y Q, Li Y X, Chen H *et al. International Journal of Fatigue* [J], 2024, 183: 108261
- [35] Liu Y Q, Liu R L, Liu B *et al. Materials Characterization*[J], 2022, 186: 111811
- [36] Hasanniah A, Movahedi M. *Marine Structures*[J], 2019, 64: 295
- [37] Ma Y T, Dong H G, Li P *et al. Materials & Design*[J], 2023, 230: 111971
- [38] Huda N, Chen J, Gerlich A P. *Forces in Mechanics*[J], 2023, 11: 100192
- [39] Chen Yajun(陈亚军), Li Siwei(李思伟), Meng Xianming(孟宪明) *et al. Materials Reports(材料导报)* [J], 2023, 37(13): 21080153
- [40] Cai W Y, Chen Q, Wang Y J *et al. Composites and Advanced Materials*[J], 2022, 31: 1
- [41] Li Shaowei(李绍伟), Wang Fuxin(王付鑫), Wu Kaiwei(吴恺威) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*[J], 2020, 40(7): 723
- [42] Liu J, Wu B T, Wang Z R *et al. Materials & Design*[J], 2023, 225: 111520
- [43] Beygi R, Carbas R J C, Barbosa A Q *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2021, 824: 141812
- [44] Ma L H, Xu Z Y, Zhang T *et al. Journal of Advanced Joining Processes*[J], 2024, 9: 100220
- [45] Wang J, Ling X, Zhang W T *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2022, 21: 3086
- [46] Joshani E, Beidokhti B, Davodi A *et al. Journal of Alloys and Metallurgical Systems*[J], 2023, 3: 100017
- [47] Liu Y Q, Li F, Li Y X *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 29: 933
- [48] Wang D S, Dong Y C, Liu L M *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2022, 17: 1043
- [49] Yang T, Dai W, Chen L *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2022, 299: 117372
- [50] Li M F, Tao W, Zhang J Z *et al. Materials & Design*[J], 2022, 221: 111022
- [51] Argumedo J L G, Mahmoudiniya M, Reinton T E *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2024, 325: 118305
- [52] Squires L, Roberts E, Bandyopadhyay A. *Nature Communications*[J], 2023, 14: 3544
- [53] Amiri V, Naffakh-Moosavy H. *Journal of Advanced Joining Processes*[J], 2024, 9: 100194
- [54] Wen Y J, Zhang B C, Narayan R L *et al. Additive Manufacturing* [J], 2021, 40: 101926
- [55] Wen Y J, Wu X K, Huang A K *et al. Acta Materialia*[J], 2024, 264: 119572
- [56] Ning J S, Zhu L D, Wang S H *et al. International Journal of Extreme Manufacturing*[J], 2024, 6: 025001
- [57] Sravanthi S S, Acharyya S G, Chapala P. *Materials Today: Proceedings*[J], 2019, 18: 2708

- [58] Yagati K P, Bathe R N, Rajulapati K V *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214: 2949
- [59] Yu Tengyi(余腾义), Li Wei(李伟), Yu Gaoyang(喻高扬) *et al.* *Iron Steel Vanadium Titanium*(钢铁钒钛)[J], 2023, 44(5): 188
- [60] Tan Pan(谭攀), Sheng Chen(盛陈), Qiu Chengguo(邱成果) *et al.* *Transaction of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2023, 44(4): 98
- [61] Kong Lele(孔乐乐). *Research on Arc Additive Manufacturing Technology of 5083 Aluminum Alloy-Low Carbon Steel Heterogeneous Material Structure*(5083 铝合金-低碳钢异种材料结构电弧增材制造工艺研究)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020
- [62] Miao Yugang(苗玉刚), Zeng Yang(曾阳), Wang Teng(王腾) *et al.* *Transaction of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2015, 36(7): 5
- [63] Miao Yugang(苗玉刚), Li Chunwang(李春旺), Yin Chenhao(尹晨豪) *et al.* *Transaction of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(12): 129
- [64] Li Mingkun(李明琨), Chen Minchang(陈民昌), He Zizhi(何资帜). *China Plant Engineering*(中国设备工程)[J], 2019, 5: 151
- [65] Kannan R, Pierce D, Nayir S *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 29: 4537
- [66] Karim M A, Jadhav S, Kannan R *et al.* *Additive Manufacturing* [J], 2024, 81: 104015
- [67] Jiang Shuying(蒋淑英), Cai Chang(蔡畅), Zhao Ming(赵明) *et al.* *Transaction of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2023, 44(7): 72
- [68] Arghavani M R, Movahedi M, Kokabi A H. *Materials and Design*[J], 2016, 102: 106
- [69] Liu Yibo(刘一搏). *Research on Interface Jointing Behavior of Al/Steel Additive Manufacturing Structure and the Effect Mechanism of Magnetic Field*(铝/钢结构增材连接界面行为及磁场作用机制研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [70] Wang Yaxin(王亚欣). *Research on the Interface Structure Evolution and Control Mechanism of Al/Steel in Arc Additive Manufacturing under Magnetic Field*(磁场作用下铝/钢电弧增材界面结构演化与调控机制研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019
- [71] Ding K, Hu T H, Wu T H *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2023, 880: 145314
- [72] Wang Xiaohong(王晓虹), Gu Xiaoyan(谷晓燕), Sun Daqian(孙大千). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2017, 53(4): 26
- [73] Li T, Zhou D W, Yan Y L *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2020, 796: 139929
- [74] Xie Yong(谢勇). *Design and Microstructure Control of Transition Layer of Steel/Aluminum Heterointerface Prepared by Laser Additive Manufacturing*(激光增材制造钢/铝异质界面过渡层设计及组织调控)[D]. Suzhou: Soochow University, 2022

Research Progress on Welding and Additive Manufacturing of Aluminum/Steel Dissimilar Metals

Lin Chunfa¹, Li Xiang², Han Yuqiang¹, Dong Longlong², Dai Yuxuan¹, Zhu Chengqi¹

(1. School of Automotive Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

(2. Advanced Materials Research Central, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Aluminum/steel bimetallic structures show a good application prospect in lightweight vehicle manufacturing due to the low density of aluminum alloy and the high strength and low cost of steel. Nowadays, aluminum/steel components can be prepared easily and rapidly by welding and additive manufacturing techniques. However, there are some urgent problems such as the differences in physical properties between Al and steel, the formation of continuous Fe-Al intermetallic compounds, which decrease the mechanical properties of aluminum/steel interface of the components. The weldability of aluminum/steel dissimilar metals was discussed, as well as the development status of aluminum/steel dissimilar metal welding and the regulating and eliminating methods of Fe-Al intermetallic compounds. Moreover, the latest investigations on the arc additive manufacturing and laser additive manufacturing of aluminum/steel bimetallic components were also expounded. The similarities and differences between additive manufacturing and welding of aluminum/steel components were investigated. Finally, several suggestions for further research directions of aluminum/steel dissimilar metal welding and additive manufacturing were proposed.

Key words: lightweight; aluminum/steel components; weldability of dissimilar metals; bimetallic additive manufacturing; intermetallic compound

Corresponding author: Han Yuqiang, Ph. D., School of Automotive Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, P. R. China, E-mail: hanyuqiang@csitg.edu.cn