DOI: 10.3901/JME.2020.08.001

镁合金与钢异质材料焊接的研究进展*

宋 刚^{1,2} 赵 爽^{1,2} 李涛涛^{1,2} 刘黎明^{1,2}

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院 大连 116024;
2. 大连理工大学辽宁省先进焊接与连接重点实验室 大连 116024)

摘要: 镁合金是最轻的金属类工程结构材料, 钢仍是目前应用最广泛的金属材料, 镁合金与钢形成结构件能够充分发挥材料“物尽其用”的优势, 在航空航天、汽车等领域具有广阔的应用前景。镁与钢不仅物理和化学性能差异巨大, 而且两者属于典型的不反应难固溶异质材料, 实现镁合金与钢高性能连接是焊接领域研究热点及面临的极大挑战。基于此, 详细总结与分析国内外镁合金/钢焊接结合模式、焊接方法、焊接接头组织及力学性能等方面的研究进展, 并阐述了镁合金/钢异质材料焊接接头界面错配研究现状。最后, 结合现有研究进展和应用需求, 提出镁合金/钢异质材料焊接未来可能的研究方向, 旨在为后续研究提供参考与借鉴。

关键词: 镁合金; 钢; 焊接方法; 力学性能; 界面组织

中图分类号: TG406

Research Progress on Welding of Magnesium Alloy and Steel Dissimilar Materials

SONG Gang^{1,2} ZHAO Shuang^{1,2} LI Taotao^{1,2} LIU Liming^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;
2. Liaoning Advanced Welding and Connection Key Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Magnesium alloy is the lightest metal engineering structural material. Steel is still the most widely used metal material at present. The structural parts formed by magnesium alloy and steel can give full play to the advantages of the material and have broad application prospects in aerospace, automotive and other fields. Magnesium and iron not only have great differences in physical and chemical properties, but also are typical non-reactive hard-dissolving dissimilar materials. The high-performance welding of magnesium alloy and steel is still a hot topic and a great challenge in the field of welding. Based on this, the research progress of the welding method, interface structure and mechanical properties of magnesium alloy/steel joints at home and abroad is summarized and analyzed and their research status of interface mismatch is described. Finally, in order to provide reference for subsequent research, the possible future research directions of magnesium alloy/steel dissimilar materials welding are proposed combined with the existing research progress and application requirements.

Key words: magnesium alloy; steel; welding method; mechanical properties; interface structure

0 前言

镁合金具有质量轻、比强度高优点, 被称为 21 世纪“绿色工程结构材料”。中国是世界镁资源大国, 原镁产量达到全球原镁产量的 90%以上, 高附加值镁合金产品开发及规模化应用已成为国家战略发展方向。钢具有强度高、塑韧性好、耐热性强等优点, 是目前工业制造领域应用最广泛的金属结

构材料。镁合金与钢之间的混合结构设计与制造是现阶段实现零部件轻量化的重要途径之一, 在航空航天、新能源汽车等领域均具有广泛的应用前景^[1]。然而, 镁合金与钢异质材料焊接基础理论匮乏, 焊接接头性能尤其是动载性能仍较低, 严重制约镁合金/钢混合结构零部件设计及产业化应用的进程。

Mg 与 Fe 物理、化学性能存在显著的差异, 如表 1 所示。Mg 与 Fe 熔点相差较大, Fe 的熔点为 1 538 °C, 而 Mg 的熔点为 650 °C, 尤其是 Fe 的熔点甚至远高于 Mg 的沸点(1 090 °C), 因此采用常规熔化焊方法时, 当 Fe 熔化时 Mg 极易产生蒸发烧损, 难以获得良好的焊接接头成形。Mg 与 Fe 的热导率、

* 国家自然科学基金资助项目(U1960111, U1764251)。20200126 收到初稿, 20200220 收到修改稿

线膨胀系数等热物理性能相差较大, Mg 的热导率和线膨胀系数分别是 Fe 的 1.94 倍和 2.10 倍, 热导率和线膨胀系数的显著差异容易导致镁合金/钢焊后出现裂纹。Mg 与 Fe 晶体结构不同, Mg 为密排六方结构(HCP), 而 Fe 室温下为体心立方结构(BCC), 且晶格常数差异大, 纯镁与纯铁的晶体结构错配较大。Fe 在 Mg 中的固溶度仅为 0.000 43%(原子分数)且二者之间无任何化合物(图 1^[2]), 所以很难实现 Mg 和 Fe 的直接冶金连接。

表 1 Mg 元素和 Fe 元素的物理化学性能对比

金属	Mg	Fe
熔点/℃	650	1 538
沸点/℃	1 090	2 862
晶体结构	HCP	BCC
晶格常数/nm	$a=b=0.320\ 9, c=0.521\ 0$	$a=b=c=0.286\ 0$
原子半径/nm	0.160	0.126
热导率/[W/(m·K)]	156	80.4
线膨胀系数/[$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$](25 °C)	2.48	1.18
密度/(g/cm ³)	1.738	7.847

(a) Mg-Fe 二元相图

(b) Mg-Fe 二元局部相图

图 1 Mg-Fe 二元相图

综上所述, 镁合金与钢属于典型的不反应难固溶异质材料, 实现两者有效焊接的关键是焊接接头界面层的优化设计与调控, 其中界面层尺寸、化合物种类及其与两侧晶格匹配程度是当前研究的热

点。本文通过对镁合金/钢国内外研究现状进行梳理, 总结了镁合金/钢焊接接头模式, 并从焊接方法、界面层组织形态及力学性能、界面晶格错配等三个方面进行系统的阐述, 并对镁合金和钢焊接理论及技术的未来发展进行了展望。

1 镁合金/钢焊接结合模式

添加合金元素是进行异质金属材料焊接接头界面层设计与调控的常用手段。目前关于镁合金/钢焊接界面设计主要是基于二元合金相图, 选取与 Mg 和 Fe 分别具有良好固溶度和金属化合物形成能力的合金元素, 并以填充焊丝(富 Al)或者添加过渡层(Zn、Cu、Ni、Al、Sn 等镀层或者箔层)的方式加入, 在焊接热源作用下, 利用添加的合金元素与 Fe 和 Mg 的扩散或反应形成界面层, 实现镁合金与钢的冶金连接。由于 Fe 的熔点大幅高于 Mg 的沸点, 在焊接过程中若钢发生熔化, 镁则爆破蒸发而发生剧烈烧损和飞溅, 难以获得成形良好的焊接接头。因此, 当前镁合金/钢焊接以搭接方式为主, 焊接过程中确保钢侧母材几乎不熔化, 利用镁合金在钢表面的润湿铺展, 并借助所添加合金化元素的桥梁作用, 形成有效焊接接头。采用的常用焊接方法主要包括搅拌摩擦(点)焊^[3-4]和扩散焊^[5-6]、电阻点焊^[7-8]、超声点焊^[9-10]、熔-钎焊(激光、电弧)^[11-13]等。

现有研究表明, 镁合金/钢焊接接头可分为三类结合模式(5 种), 详见图 2。第一类焊接结合模式是钢/共晶组织(层状或网状)/镁, 如图 2a 和图 2b 所示。其中图 2a 显示的是层状共晶(Eutectic structure, ES)组织作为界面过渡层的镁合金/钢焊接接头结构, 这种结构常出现镁合金/钢异种金属扩散焊中, 通过加入第三组元元素, 促进界面共晶反应, 以达到连接的目的^[14-16]。图 2b 中镁合金/钢焊缝区(Fusion zone, FZ)是由网状共晶和 α -Mg 组成, 这种结构常出现在镁合金/钢搅拌摩擦焊中, 在搅拌针的作用下使钢表面的镀层(Zn 或 Ni)与 Mg 直接反应形成共晶组织^[17]。图 2a 和 2b 焊接结构具有同一特征, 该接头形式主要存在于界面反应温度(约 500 °C 至镁合金熔点 650 °C)比较低的固相焊接方法中, 都是利用共晶反应温度低的特点, 来实现镁合金/钢异种金属的连接。

第二类焊接结合模式如图 2c 和图 2d 所示。图 2c 和 2d 中焊接接头除形成共晶组织外, 还在共晶组织与钢母材一侧之间形成了具有微纳尺度的界面化合物层, 并且该界面层主要出现在熔钎焊和熔化焊中^[18-19]。镁合金/钢焊接过程中, 当采用界面连接

温度(约 1 100 °C)较高的连接方法时,例如熔钎焊和熔化焊的界面温度均高于固相焊,有利于促进所添加合金化元素与 Fe 形成扩散反应,在镁合金/钢界面处形成熔点更高,且更稳定的化合物界面层,

而添加过量的合金化元素将与 Mg 以低熔点的层状共晶的方式沿着界面层凝固或在热源剧烈搅拌下与 Mg 形成网状共晶存留在焊缝中,即出现了图 2c 和 2d 所示的焊接接头结构。

图 2 不同焊接条件下界面连接模式

第三类焊接模式如图 2e 所示。不同于图 2c 和 2d 中在界面层附近或者焊缝中会有共晶组织,在图 2e 中仅存在一层较薄的化合物界面层。这种界面结构主要存在熔化焊^[18-19]中,一般需要满足以下要求:① 焊接界面温度高于 2 000 °C;② 含 Al 的 AZ 系列镁合金与钢直接焊接或者焊接过程中添加高铝含量镁合金焊丝,Al 会富集在界面处与 Fe 反应形成微纳尺度金属间化合物层;③ 选择与钢具有极高固溶度的元素(例如 Ni),并严格控制含量,使其固溶到 Fe 中或者形成微纳尺度反应物在界面析出。

通过上述总结分析,可知镁合金/钢异质金属焊接界面结构主要与焊接方法(界面反应温度)、合金元素选择密切相关,下面将从镁合金/钢焊接方法、界面连接模式以及力学性能等方面进行详细阐述。

2 镁合金/钢焊接方法

2.1 固相焊

2.1.1 搅拌摩擦焊

镁合金/钢搅拌摩擦焊主要是利用搅拌头搅拌镁合金,而钢基体几乎不熔化,利用塑性流动的镁合金与钢基体上的镀层发生润湿反应,进而获得良好成形和性能的焊接接头^[20]。在镁合金/钢搅拌摩擦焊接研究中,焊接方式包括搭接焊、点焊^[21-23],近年来也开始探索对接焊的可行性^[3]。焊接中所采用的钢板多为镀锌钢板,镀锌层具有两个作用:① 通过镀锌层的介入,在镁合金/钢界面附近形成 Mg-Zn 低熔点共晶组织;② 共晶液相在搅拌头作用下,沿着界面移动,远离焊缝中心,最后堆积在镁合金区

焊缝的两侧,被挤出镁合金/钢界面,达到清理钢表面的目的。

2.1.2 扩散焊

扩散焊作为另一种典型的固态连接技术,其能在保证钢侧母材不熔化的情况下,通过加热加压使得添加的合金元素(镀层或者箔层)与 Fe 和 Mg 发生扩散反应,在镁合金和钢界面形成低熔点共晶层,从而能实现二者的连接^[14]。由于 Ni、Cu、Al 均与 Mg、Fe 具有良好的冶金相容性,在镁合金/钢扩散焊过程中常被作为添加元素,促进镁合金/钢异种金属的冶金结合。

2.2 熔钎焊

镁合金/钢异种金属焊接研究最多的是熔钎焊方法,该方法是焊接过程中钢侧基体基本不熔化,主要借助热源使低熔点镁合金熔化后润湿铺展在高熔点钢表面,凝固过程中利用镁合金中的 Al 元素与 Fe 的反应或者 Mg 与钢表面镀层(Zn、Ni)反应,进而在镁合金/钢界面形成扩散反应界面层。镁合金/钢熔钎焊方法常用的焊接热源有激光热源、电弧热源等。

2.2.1 激光熔钎焊

镁合金/钢激光熔钎焊方法中可分为直接熔钎焊,也可通过添加焊丝或合金元素来实现焊接。镁合金/钢采用激光直接熔钎焊时,一般采用对接焊模式,可分为两种方法:第一种是激光直接作用在镁合金侧,镁合金熔化后润湿铺展于钢表面,利用镁合金中的 Al、Mn 等元素与 Fe 反应形成界面层,获得熔钎焊接头^[24-27]。第二,激光直接作用在钢表面,通过热传导使另一侧的镁合金发生熔化,同样是利用镁合金中的 Al、Mn 等元素与 Fe 反应形成界面层,从而形成熔钎焊接头^[28]。

镁合金/钢激光熔钎焊时,也可采用焊丝或镀层、箔层的方式添加合金元素来实现镁合金/钢界面的冶金结合,主要采用搭接焊方式。常用的夹层或镀层元素主要有 Zn^[29-34]、Ni^[35-37]、Al^[38]、Sn^[39]以及其他元素^[31, 40-41]等,而焊丝主要采用 AZ 系列镁合金焊丝,例如 AZ31 镁合金焊丝^[30, 32-33, 42-44]、AZ61 镁合金焊丝^[45]以及 AZ92 镁合金焊丝^[29, 36-37, 40]等。

2.2.2 电弧熔钎焊

镁合金与钢电弧熔钎焊采用的焊接方法主要有熔化极惰性气体保护焊(Metal inertia gas, MIG)^[46-48],冷金属过渡技术(Cold metal transfer, CMT)^[12]以及 TIG-MIG 复合焊^[49]。主要是采用搭接焊方式,当采用对接焊时则需要钢侧开坡口。通常采用弧焊对镁合金与钢进行焊接时,需要采用添丝的方法,或者添加夹层,又或者钢表面本身就有一层镀层。以上

三种方法可以概括为通过添加合金元素,提高镁液的润湿性,促进镁合金与钢的冶金结合。

2.3 熔化焊

镁合金与钢直接采用熔化焊方法时,钢侧母材发生熔化的同时,镁合金会大量烧损,焊后在镁合金/钢界面处极易出现裂纹或孔洞等缺陷,单一的激光或者电弧焊方法难以获得成形良好的焊接接头。为克服镁合金/钢熔化焊过程中易产生的成形缺陷,一方面焊接过程中需要精确控制焊接热输入,确保钢发生瞬时熔化、尽量降低镁合金烧损量;另一方面,可在焊接过程中补充添加镁合金焊丝或增加板材厚度以弥补焊接过程中镁合金的烧损。激光诱导电弧复合热源具备能量密度梯度可以精确调控的特点,是目前镁合金/钢熔化焊接主要的焊接热源。焊接过程中,通过调控激光的偏移量,可以将高能量密度的激光作用在钢侧,促进钢的瞬时熔化;低能量密度的电弧热源用于熔化镁合金并延长液态镁合金的停留时间,确保镁合金的回填铺展,可以获得良好的焊接接头成形^[19, 50]。

2.4 其他焊接方法

2.4.1 电阻点焊

目前关于镁合金/钢异种金属电阻点焊(Resistance spot welding, RSW)的研究包括采用镀锌钢板夹层的 RSW^[51]以及带有盖板的 RSW^[52],并发展出电阻元件点焊(Resistance element welding, REW)^[53]。镁合金与钢电阻点焊时,镁合金瞬间熔化,界面反应决定了接头的力学性能。当镁合金与钢直接焊时,镁合金中的 Al 元素在界面的富集发挥了重要作用;而加入夹层后,夹层合金元素与钢和镁通过扩散反应,形成过界面过渡层,实现冶金连接。

2.4.2 超声波点焊

镁合金/钢异种金属通过超声波点焊(Ultrasonic spot welding, USW)也可实现连接。例如,镁/镀锌钢接头^[54-58]、镁/裸钢接头中加入锡层^[54, 59]、镁/镀锌钢接头中加胶^[60-61]。镁合金/钢 USW 主要是利用超声波高频振动的能量转化成摩擦能量,促进镀层与镁合金和钢的反应,实现接头良好连接。

3 镁合金/钢接头组织和力学性能

基于镁合金/钢现有的三类共 5 种典型焊接接头结合模式,结合不同焊接方法及添加的合金化元素,系统阐述了不同镁合金/钢焊接接头结合模式下的焊接接头组织及其力学性能。

3.1 钢/层状(网状)组织/镁合金结合模式

钢/层状(网状)组织/镁合金结合模式主要发生

在界面反应温度比较低的扩散焊方法中。根据 Mg-Ni 和 Mg-Cu 二元相图可知, 两种体系的共晶反应温度较低, 均低于镁合金熔点; Ni 和 Cu 与 Fe 均具有良好的冶金相容性, 在镁合金/钢扩散焊过程中, Ni 和 Cu 元素常被作为添加元素, 促进镁合金/钢异种金属的冶金结合。ELTHALABAWY 等^[5, 14]采用 Ni 夹层作为添加合金元素, 研究 10 mm 厚 316 L 不锈钢与 5 mm 厚 AZ31 镁合金搭接扩散焊接头组织的演变规律。在 510 °C 温度下, 扩散时间对接头组织的演变规律如图 3 所示^[14]。随着扩散时间的延长, Ni 夹层不断消耗, 在钢基体侧形成层状共晶组织, 如图 3c 所示, 该界面结构与图 2a 相似。当扩散时间进一步增加为 20 min 时, 接头剪切强度最高, 可达 46 MPa, 这是因为共晶组织包裹住了 B2 颗粒相, 类似于组织呈网状结构, 如图 3e 所示, 其界面结构与图 2b 相似。为了进一步提高 AZ31 镁合金/316L 不锈钢接头的剪切强度, 在钢表面预置了一层 Fe-Ni 反应层^[14], 如图 3f 所示。扩散焊后, Fe-Ni 反应层替代原先 316L 钢的位置, 与扩散反应产物直接接触, 其接头剪切强度最大可达 54 MPa。

图 3 510 °C 下不同保温时间对 AZ31/Ni/316L 接头组织影响(L 表示液相, E 表示共晶体, B、B2 分别表示 B 和 B2 型颗粒化合物)

3.2 钢/界面层/层状(网状)组织/镁合金界面结构

镁合金/钢界面连接方式除了钢/层状(网状)组织/镁合金界面结构外, 在钢与层状或网状组织之间形成了一层新的界面层, 并且该界面层沿着钢侧生长, 如图 2c 和 2d 所示。一般情况下, 熔点相对较高的界面层优先形成, 然后熔点相对较低的层状或网状组织沿着界面层生长。钢/界面层/层状(网状)组织/镁合金是镁合金/钢连接过程中最常见的界面结构, 主要出现在固相焊、熔钎焊以及熔化焊接头中。镁合金与钢的连接过程中, 为了促进界面冶金反应, 常加入一些合金元素 X, 如 Cu, Zn, Ni, Cu-Zn 以及 Sn 等。这些元素与镁作用后, 聚集在镁合金/钢界面附近, 形成 Mg-X 层状或网状组织; 而当界面温度较高或者搅拌剧烈的情况下, 基体中的 Al、Mn 等元素以及添加的 Ni 等元素会与 Fe 发生扩散反应形成微纳尺度的金属化合物界面层。上述金属化合物界面层+层状或网状组织, 实现镁合金/钢的冶金连接。

镁合金/钢采用搅拌摩擦焊时, 常选用镀锌钢板, 主要是考虑通过镀锌层的介入, 在镁合金/钢界面附近形成 Mg-Zn 低熔点共晶组织, 实现镁合金/钢的冶金连接^[17]。在搅拌针的作用下, 镀锌层与镁反应, 形成共晶组织。在镀锌层与钢基体间还存在一层较薄的 Fe-Al 化合物, 在共晶组织形成的同时, 该化合物层保留在钢基体表面。对 2 mm 厚的镁合金与镀锌钢板的搅拌摩擦焊接头进行剪切拉伸实验, 试件的搭接宽度为 65 mm。镁合金与镀锌钢搅拌摩擦焊过程中形成钢/Fe-Al 化合物/Mg-Zn 共晶组织/镁合金的界面连接结构, 剪切拉伸强度达到 158 MPa。

TAN 等^[31]采用激光熔钎焊的方法对 1.5 mm 厚的 AZ31 镁合金和 DP980 钢进行搭接焊, 拉伸试件的搭接宽度为 10 mm。分别研究了在钢表面添加 Zn+Fe-Al 化合物层, Zn 层, Fe-Al 化合物层以及无任何镀层下, 对接头成形及性能的影响。研究发现 Zn 涂层的存在显著提高了液态镁合金对钢的润湿性。当采用 Zn+Fe-Al 化合物层和 Zn 层时, 其界面结构由钢/Fe-Al 化合物/Mg-Zn 共晶组织/镁合金组成(图 4)^[31], 对接头进行常温下拉伸速度为 1 mm/min 的剪切拉伸试验, 接头单位长度载荷分别为 180 N/mm 和 165 N/mm。但是, Mg-Zn 共晶组织容易在焊缝中聚集, 使接头产生开裂倾向; 并且 Mg-Zn 共晶与 Fe-Al 化合物层的结合较弱, 接头易在界面位置断裂。

WANG 等^[11, 46]采用 MIG 焊对 3 mm 厚的 AZ31 镁合金和 Q235 钢进行 Mg 侧开 30° 坡口, 钢侧开

45°坡口的对接接头焊接。铜夹层的加入使镁合金/钢接头的强度获得了提升,焊缝中形成了(α -Mg+Mg₂Cu)共晶组织和Mg-Al-Cu三元相,界面处形成Fe-Al化合物。当加入0.15 mm厚度的铜夹层,其接头最大抗拉强度可达190 MPa(79%镁合金母材),接头在焊缝和镁合金/钢界面处断裂。添Cu夹层时,其界面结构钢/Fe-Al化合物/Mg-Cu共晶组织/镁合金组成。与此同时,WANG还研究了镁合金焊丝中铝含量对接头组织和力学性能的影响。加入AZ31镁合金焊丝后,镁合金/钢接头的拉伸强度可达到184.2 MPa,其界面反应层由Fe-Al化合物组成;加入AZ61镁合金焊丝后可使接头强度达到192 MPa(80%的AZ31镁合金)^[48]。基于上述研究结果,他们的共同点是在添加Cu夹层或不同Al含量的焊丝时,在镁合金/钢界面均获得Fe-Al界面层,并且接头表现出较好的力学性能。

图4 镁合金/钢激光熔钎焊界面结构

LIU等^[62]率先采用激光诱导电弧耦合热源焊接技术对镁合金与钢进行搭接熔化焊研究。在激光辐射区,钢和镁合金均发生熔化。相比于单激光,电弧作用区域更大,镁合金熔化更多,可有效弥补镁合金的烧损。当镁合金与钢直接焊时,依靠镁合金中的Al与钢发生反应,实现冶金连接,但是相比于添夹层焊,镁合金/钢直接焊接头性能更低,这是因为镁合金/钢界面处产生了金属氧化物。为了减少镁合金/钢界面的金属氧化物,相继开展了镁合金/钢激光诱导电弧添夹层焊接研究,添加的夹层主要有

Ni^[63-71]、Cu^[64-66, 68-69, 72]、Sn^[66, 73]和Cu-Zn^[64, 66]等,提出了半冶金连接模型,搭接焊的拉伸强度最高可达170 MPa。在搭接焊基础上,又提出了镁合金/钢异种金属激光诱导电弧对接熔化焊方法,并通过添加Cu-Zn夹层,获得了良好的焊接接头成形,如图5所示^[74]。当激光向钢侧偏移0.2 mm时,镁合金/钢对接焊接头的抗拉强度最大可达203 MPa。研究中发现,Al和少量的Cu元素富集在Mg/Fe界面形成微纳尺度化合物层,但大部分的Cu仍滞留在镁合金熔池中,与Mg反应形成粗大的Mg-Cu网状共晶组织。正是由于焊缝中存在粗大的Mg-Cu网状共晶组织导致焊接接头拉伸断裂在焊缝中部,而不是镁合金/钢界面。

图5 镁合金/钢添Cu-Zn夹层对接熔化焊接头

3.3 钢/界面层/镁合金界面结构

无论是钢/层状(网状)组织/镁合金界面结构,还是钢/界面层/层状(网状)组织/镁合金界面结构,层状或网状组织产生的原因是添加的合金元素无法向钢基体或镁合金焊缝中扩散,大量聚集在镁合金/钢界面附近,使得界面附近形成层状或网状组织,成为焊缝的薄弱区域。因此,如何控制界面层附近层状或网状组织的数量、种类、尺寸及分布状态是进一步提高接头性能的关键。

镁合金/钢焊接过程中,一般在添加镁合金焊丝,铝夹层或不添加任何合金元素的情况下,才会出现钢/界面层/镁合金界面结构。因为能参与界面反应的主要是镁合金中微量元素Al和Mn,以及钢基体中的Fe或Mn,界面层主要为微纳尺度的Fe-Al化合物或Al-Mn化合物。

镁合金/钢异种金属焊接过程中,界面层的形成可分两种形式,一种是钢表面原有界面层,比如在

镀锌钢板上, 镀锌层与钢基体之间存在一层 Fe_2Al_5 界面层, 焊接过程中, Fe_2Al_5 界面层仍保留在接头中; 另一种是焊接过程中形成的新的界面层。刘磊等^[75-76]采用 AZ31 镁合金与镀锌钢板焊接, 镀锌钢板表面存在一层纳米级 Fe_2Al_5 界面层和镀锌层。焊接过程中采用硝酸将钢表面的镀锌层去掉, 仅留下新鲜的 Fe_2Al_5 界面层。然后采用电阻点焊的方法将 1.5 mm 厚的 AZ31 镁合金板与露出新鲜表面 Fe_2Al_5 的 0.77 mm 厚的钢板进行连接, 得到面积为 25 mm×25 mm 的搭接焊接头拉伸载荷达 4.8 kN^[75]。

大多数情况下, 界面层的形成主要依靠合金元素之间的反应。在镁合金与镀锌钢板搅拌摩擦焊过程中, 液相反应产物在搅拌头作用下, 沿着界面移动, 远离焊缝中心, 最后堆积在镁合金区焊缝的两侧^[77]。低熔点共晶被挤出镁合金/钢界面, 达到清理钢表面的目的。镁合金/钢界面的线扫描结果, 发现 Al 元素在镁合金/钢界面富集, 而 Zn 元素并未有富集的现象^[78]。在镁合金/钢异种金属搅拌摩擦搭接焊过程中, 其界面常见的化合物及抗拉载荷分别为 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ (2.3 kN)和 Fe_3Al ^[20, 78-81](8.7 kN, 3.0 kN, 无, 3.4 kN, 2.3 kN)、 Fe_2Al_5 ^[3](4.3 kN)和 FeAl_2 ^[21](4.7 kN)。

MIAO 等^[24-26]采用激光深熔钎焊方法对 2.4 mm 厚 AZ31 镁合金和 1.7 mm 厚 Q235 钢进行对接焊研究。焊接过程中, 激光向镁合金侧偏移促使镁合金发生熔化, 熔化的镁合金作为填充金属, 向钢侧铺展, 获得成形较好的镁合金/钢接头, 如图 6 所示^[25]。在镁合金/钢界面处出现 1~2 μm 的化合物界面层, 实现冶金结合。进一步分析发现, 该化合物为富铝相, 如 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 、 Mg_2Al_3 、 FeAl 和 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ ^[26]等。元素分析表明, 镁合金/钢界面上发现了明显的元素过渡区, Al 元素在界面具有明显的富集现象, 表明界面层存在 Fe-Al 化合物, 这可能与界面具有很高的温度密切相关, 因为发现界面处钢侧存在少量熔化现象。在焊缝的下部, 镁合金/钢界面上元素含量因温度较低而发生突变^[50]。通过优化焊接工艺, 激光向镁侧偏移 0.6 mm 时, 接头在界面处失效, 平均拉伸强度可达到 185 MPa^[25]。JIANG 等^[27]采用激光焊对 3 mm 的 AZ31B 镁合金和 2 mm 厚的 AISI304 不锈钢进行连接, 当激光向镁侧偏移 0.2 mm 时, 接头最大抗拉强度可达 211 MPa(89.8% 镁母材强度)。

SONG 等^[50]提出基于高温促进界面扩散反应及多元素固溶强化的镁合金/钢全固溶体界面层设计思想, 基于 Ni 与 Fe 的无限互溶特性, 开展了添加 Ni 箔层的 1.6 mm 厚的 AZ31B 镁合金/1.0 mm 厚的 Q235 钢激光诱导电弧对接焊研究, 得到了纳米尺度

(Al, Mg)(Ni, Mn, Fe)金属化合物固溶体+纳米尺度 α -(Fe, Ni, Al) 固溶体组成的“双固溶体”界面结构, 如图 7 所示, 对接接头拉伸强度达到了 232 MPa; 为了简化焊接工艺, 进一步开展了不等厚 AZ31B 镁合金/Q235 钢激光诱导电弧复合填丝对接焊研究, 通过填充高铝含量的 AZ61 镁合金焊丝获得了由纳米尺度的高温 $\text{Al}_{11}(\text{Mn}, \text{Fe})_4$ 金属化合物固溶体+ α -Fe(Al)固溶体组成的“双固溶体”界面结构^[19], 最大拉伸强度为 238 MPa, 达到镁合金母材的 94.5%, 焊接接头拉伸断裂在钢侧。

图 6 激光深熔钎焊

图 7 镁合金/钢对接熔化焊

4 镁合金/钢界面错配研究

Mg 和 Fe 属于典型的难固溶不反应异种金属, 并且 Mg 和 Fe 晶体结构和晶格常数差异较大, 它们之间的晶格匹配较差, Mg 和 Fe 直接连接时界面结

合强度较弱^[82-83]。在镁合金与钢焊接过程中形成的界面层,大多与镁合金和钢呈半共格关系。当预置了一层 Fe_2Al_5 化合物的钢板与镁合金采用电阻点焊进行连接时,接头最大拉剪力可达 5.0 kN,接近镁合金点焊接头强度的 95%, $\text{Mg}/\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{Fe}$ 实现半共格匹配^[84];而纯镁和 IF 钢连接时,相当于纯镁与纯铁的连接,接头强度仅为 2.08 kN^[82]。因此,通过观察界面层与两侧的匹配度,可在一定程度上揭示镁合金/钢接头强化机制。

NASIRI 等^[39]发现在 AZ31B 镁合金/镀锡钢激光熔钎焊时,镀锡层能保护钢不受氧化,促进液态镁与钢的新鲜表面直接反应。激光熔钎焊过程中形成了一层纳米级的 $\text{Fe}(\text{Al})$ 固溶体和 $\text{Al}_8(\text{Mn}, \text{Fe})_5$ 化合物界面层。在 $\text{Fe}(\text{Al})/\text{Al}_8\text{Mn}_5$ 界面上具有如下位向关系,沿 $[10\bar{1}1]_{\text{Al}_8\text{Mn}_5} // [\bar{1}11]_{\text{Fe}(\text{Al})}$ 方向, $\{110\}_{\text{Fe}(\text{Al})}$ 与 $\{30\bar{3}3\}_{\text{Al}_8\text{Mn}_5}$ 晶面之间呈 4.2° 夹角,两晶面间错配 5.2%,如图 7 所示。而在 $\text{Al}_8\text{Mn}_5/\text{Mg}$ 界面,具有如下位向关系,沿 $[10\bar{1}1]_{\text{Al}_8\text{Mn}_5} // [10\bar{1}0]_{\text{Mg}}$, $\{30\bar{3}3\}_{\text{Al}_8\text{Mn}_5}$ 与 $\{0002\}_{\text{Mg}}$ 晶面之间存在 47.4° 夹角,两晶面间错配 16.8%。

LIU 等^[82, 84]提出,界面物相的形成是实现镁合金/钢冶金连接的关键。AZ31 镁合金和 DP600 钢电阻点焊过程中,界面产生了一层连续的 Fe_3Al 相^[84]。界面析出相首先沿着钢侧生长,然后在焊缝的冷却过程中实现镁合金/钢的冶金连接。分析发现, $[133]_{\text{Fe}_3\text{Al}} // [0001]_{\text{Mg}}$ 晶向, $(0002)_{\text{Mg}} // (133)_{\text{Fe}_3\text{Al}}$ 晶面,表明界面相与焊缝具有较好的取向关系。当 DP600 钢表面与镀锌层之间存在 Fe_2Al_5 化合物层时,镁合金与钢成形较好,电阻点焊接头拉伸强度可达 4.8 kN^[84]。进一步研究表明, Fe_2Al_5 化合物与钢的位向关系,沿 $(002)_{\text{Fe}_2\text{Al}_5} // (110)_{\text{Fe}}$ 方向, $[110]_{\text{Fe}_2\text{Al}_5} // [\bar{1}13]_{\text{Fe}}$ 晶向,界面错配 4.8%; Fe_2Al_5 化合物与镁的位向关系,沿 $(002)_{\text{Fe}_2\text{Al}_5} // (01\bar{1}2)_{\text{Mg}}$ 方向, $[0\bar{1}0]_{\text{Fe}_2\text{Al}_5} // [100]_{\text{Fe}}$ 晶向,界面错配 0%。

SONG 等^[85]采用激光诱导电弧添 Ni 夹层进行 AZ31 镁合金和 Q235 钢对接熔化焊时,接头成形及性能较好。发现镁合金/钢界面结构由钢/ α -(Fe, Ni) 固溶体/ α -(Fe, Ni, Al, Mn) 固溶体/ $(\text{Al}, \text{Mg})(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Fe})_{\text{B}_2}$ 金属间化合物基固溶体/ α -Mg_HCP 组成。 α -(Fe, Ni, Al, Mn) 固溶体的宽度在 70 nm 左右,而 $(\text{Al}, \text{Mg})(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Fe})$ 金属间化合物基固溶体的宽度在 110 nm 左右。通过分析 $(\text{Al}, \text{Mg})(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Fe})$ 金属间化合物基固溶体/ α -Mg 界面高分辨像, $(\text{Al}, \text{Mg})(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Fe})/\alpha$ -Mg 的晶面, $(101)_{\text{B}_2} // (10\bar{1}2)_{\text{Mg}}$ 。 $(101)_{\text{B}_2}$ 和 $(10\bar{1}2)_{\text{Mg}}$ 晶面间距的实际测量值分别为 0.213 nm 和 0.217 nm。而 $(101)_{\text{B}_2}$ 和 $(10\bar{1}2)_{\text{Mg}}$ 晶面

间距的理论计算值分别为 0.204 nm 和 0.190 nm。合金元素在向界面层扩散后, $(101)_{\text{B}_2} // (10\bar{1}2)_{\text{Mg}}$ 晶面的错配度由理论值 6.86% 变为实测值 1.87%。高分辨像结果证实了在 B_2/HCP 界面附近存在晶格畸变。该试验结果表明,由 B_2 相组成的界面层去部分晶面与 HCP 能够很好地匹配。 α -(Fe, Ni, Al, Mn) 固溶体与 $(\text{Al}, \text{Mg})(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Fe})_{\text{B}_2}$ 金属间化合物基固溶体由于晶体结构相同,且晶格参数接近,因此, α -(Fe, Ni, Al, Mn) 固溶体/ $(\text{Al}, \text{Mg})(\text{Ni}, \text{Mn}, \text{Fe})_{\text{B}_2}$ 晶格匹配较高。

5 结论与展望

基于以上分析和讨论,以镁合金与钢异质材料为代表的混合结构在航空航天、新能源汽车等领域具有广阔应用前景,镁合金/钢异质材料焊接研究已得到了国内外学者的广泛关注,而目前镁合金/钢焊接基础理论研究仍匮乏,有待于进一步的探索和研究。

(1) 镁合金/钢焊接接头连接模式总结归纳可分为三类。焊接接头连接模式与所选择的焊接方法(界面反应温度)和添加的合金元素(种类、数量)密切相关。新型焊接热源设计以及热源能量密度和梯度的精确调控方法是进一步提升镁合金/钢工艺稳定性的关键。

(2) 镁合金/钢焊接接头界面仍以脆硬的金属间化合物为主,界面层设计方法及其强韧化机理亟待突破。寻找相对于 Fe-Al 化合物具有更好塑韧性的界面化合物层,以及进行界面化合物层尺寸和分布状态的精确调控是关键。

(3) 关于镁合金/钢焊接接头界面晶体学特征研究取得了初步进展,相关研究应给予重点关注。Mg 和 Fe 晶体结构和晶格常数差异较大,目前界面层与 Mg 和 Fe 仍以“半共格匹配”为主,如何进一步实现“共格匹配”有待于进一步探索和研究。

(4) 镁合金/钢焊接接头性能的研究集中在拉伸强度等静载荷性能方面,动载荷性能、腐蚀性能研究极少。镁合金/钢焊接构件主要面向飞机、车辆等高动载服役环境,因此需要进一步开展镁合金/钢焊接结构的综合性能研究。

参 考 文 献

- [1] LIYANAGE T, KILBOURNE J, GERLICH A P, et al. Joint formation in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14: 500-508.

- [2] AIZAWA T, HASEHIRA K I, NISHIMURA C. Solid state synthesis of non-equilibrium phase in Mg-Co and Mg-Fe systems via bulk mechanical alloying[J]. *Materials Transactions*, 2003, 44(4): 601-610.
- [3] XU R Z, NI D R, YANG Q, et al. Influencing mechanism of Al-containing Zn coating on interfacial microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded Mg-steel joint[J]. *Materials Characterization*, 2018, 140: 197-206.
- [4] KASAI H, MORISADA Y, FUJII H. Dissimilar FSW of immiscible materials : Steel/magnesium[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 624: 250-255.
- [5] ELTHALABAWY W, KHANT T. Liquid phase bonding of 316L stainless steel to AZ31 magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Sciences & Technology*, 2011, 27(1): 22-28.
- [6] YUAN Xinjian, SHENG Guangmin, LUO Jun, et al. Microstructural characteristics of joint region during diffusion-brazing of magnesium alloy and stainless steel using pure copper interlayer[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(3): 599-604.
- [7] MANLADAN S M, YUSOF F, RAMESH S, et al. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded in welding-brazing mode and resistance element welded magnesium alloy/austenitic stainless steel joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 45-54.
- [8] FENG Yueqiao, LI Yang, LUO Zhen, et al. Resistance spot welding of Mg to electro-galvanized steel with hot-dip galvanized steel interlayer[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 114-122.
- [9] PATEL V K, BHOLE S D, CHEN D L. Characterization of ultrasonic spot welded joints of Mg-to-galvanized and ungalvanized steel with a tin interlayer[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4): 811-817.
- [10] SANTELLA M, BROWN E, POZUELO M, et al. Details of Mg-Zn reactions in AZ31 to galvanised mild steel ultrasonic spot welds[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(3): 219-224.
- [11] WANG Xiaoyong, SUN Daqiang, SUN Y, et al. Effects of Cu addition on microstructure characteristics and tensile behaviors of metal inert-gas arc welded Mg-steel dissimilar joints[J]. *Materials Transactions*, 2015, 56(11): 1868-1874.
- [12] REN Daxin, LIU Liming. Interface microstructure and mechanical properties of arc spot welding Mg-steel dissimilar joint with Cu interlayer[J]. *Materials & Design*, 2014, 59: 369-376.
- [13] CAO R, YU J Y, CHEN J H, et al. Feasibility of cold-metal-transfer welding magnesium AZ31 to galvanized mild steel[J]. *Welding Journal*, 2013, 92(9): 274S-282S.
- [14] ELTHALABAWY W M, KHAN T I. Microstructural development of diffusion-brazed austenitic stainless steel to magnesium alloy using a nickel interlayer[J]. *Materials Characterization*, 2010, 61(7): 703-712.
- [15] ELTHALABAWY W M, KHAN T I. Eutectic bonding of austenitic stainless steel 316L to magnesium alloy AZ31 using copper interlayer[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55(1-4): 235-241.
- [16] LI Taotao, SONG Gang, YU Peini, et al. Interfacial microstructure evolution in fusion welding of immiscible Mg/Fe system[J]. *Materials & Design*, 2019, 181: 107903.
- [17] SCHNEIDER C, WEINBERGER T, INOUE J, et al. Characterisation of interface of steel/magnesium FSW[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(1): 100-106.
- [18] ZHAO Xiaoye, TAN Caiwang, XIAO Liyuan, et al. Effect of the Ni coating thickness on laser welding-brazing of Mg/steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 769: 1042-1058.
- [19] SONG Gang, LI Taotao, CHEN Liang. The mechanical properties and interface bonding mechanism of immiscible Mg/steel by laser-tungsten inert gas welding with filler wire[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 736: 306-315.
- [20] JANA S, HOVANSKI Y, GRANT G J. Friction stir lap welding of magnesium alloy to steel: A preliminary investigation[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2010, 41A(12): 3173-3182.
- [21] ZHANG Zhongke, WANG Xijing, WANG Peichung, et al. Friction stir keyholeless spot welding of AZ31 Mg alloy-mild steel[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(6): 1709-1716.
- [22] CHEN Y, CHEN J, AMIRKHIZ B S, et al. Microstructures and properties of Mg alloy/DP600 steel dissimilar refill friction stir spot welds[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(6): 494-501.

- [23] LIU Xiao, WANG Xijing, WANG Boshi, et al. The role of mechanical connection during friction stir keyholeless spot welding joints of dissimilar materials[J]. *Metals*, 2017, 7(6): 217.
- [24] MIAO Yugang, HAN Duanfeng, YAO Jingzheng, et al. Microstructure and interface characteristics of laser penetration brazed magnesium alloy and steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(2): 97-103.
- [25] MIAO Yugang, HAN Duanfeng, YAO Jingzheng, et al. Effect of laser offsets on joint performance of laser penetration brazing for magnesium alloy and steel[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(6): 3121-3126.
- [26] MIAO Yugang, HAN Duanfeng, XU Xiangfang, et al. Phase constitution in the interfacial region of laser penetration brazed magnesium-steel joints[J]. *Materials Characterization*, 2014, 93: 87-93.
- [27] JIANG Ming, GAO Ming, LI Geng, et al. Research on laser welding-brazing of dissimilar Mg alloy and stainless steel[J]. *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 2014, 52(1): 11-17.
- [28] CASALINO G, GUGLIELMI P, LORUSSO V D, et al. Laser offset welding of AZ31B magnesium alloy to 316 stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 242: 49-59.
- [29] NASIRI A M, ZHOU Y. Effect of Zn interlayer on brazeability of AZ31B-Mg alloy to steel sheet[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(2): 155-163.
- [30] LI Liqun, TAN Caiwang, CHEN Yanbin, et al. CO₂ laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals AZ31B Mg alloy to Zn coated dual phase steel with Mg based filler[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(3): 361-375.
- [31] TAN Caiwang, CHEN Yanbin, LI Liqun, et al. Comparative study of microstructure and mechanical properties of laser welded-brazed Mg/steel joints with four different coating surfaces[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 18(6): 466-472.
- [32] TAN Caiwang, LI Liqun, CHEN Yanbin, et al. Interfacial microstructure and fracture behavior of laser welded-brazed Mg alloys to Zn-coated steel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5-8): 1179-1188.
- [33] LI Liqun, TAN Caiwang, CHEN Yanbin, et al. Influence of Zn coating on interfacial reactions and mechanical properties during laser welding-brazing of Mg to steel[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2012, 43A(12): 4740-4754.
- [34] WAHBA M, KATAYAMA S. Laser welding of AZ31B magnesium alloy to Zn-coated steel[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 701-706.
- [35] TAN Caiwang, XIAO Liyuan, LIU Fuyun, et al. Influence of laser power on the microstructure and mechanical properties of a laser welded-brazed Mg alloy/Ni-coated steel dissimilar joint[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(6): 2983-2997.
- [36] NASIRI A M, WECKMAN D C, ZHOU Y. Interfacial microstructure of diode laser brazed AZ31B magnesium to steel sheet using a nickel interlayer[J]. *Welding Journal*, 2013, 92(1): 1S-10S.
- [37] NASIRI A M, CHARTRAND P, WECKMAN D C, et al. Thermochemical analysis of phases formed at the interface of a Mg alloy-Ni-plated steel joint during laser brazing[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2013, 44A(4): 1937-1946.
- [38] TAN Caiwang, CHEN Bo, SONG Xiaoguo, et al. Influence of Al interlayer thickness on laser welding of Mg/steel[J]. *Welding Journal*, 2016, 95(10): 384s-394s.
- [39] NASIRI A M, WECKMAN D C, ZHOU Y. Interfacial microstructure of laser brazed AZ31B magnesium to Sn-plated steel sheet[J]. *Welding Journal*, 2015, 94(3): 61S-72S.
- [40] NASIRI A M, LI L, KIM S H, et al. Microstructure and properties of laser brazed magnesium to coated steel[J]. *Welding Journal*, 2011, 90(11): 211S-219S.
- [41] WINDMANN M, RÖTTGER A, KÜGLER H, et al. Laser beam welding of magnesium to coated high-strength steel 22MnB5[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9): 3149-3156.
- [42] TAN Caiwang, SONG Xiaoguo, MENG Shenghao, et al. Laser welding-brazing of Mg to stainless steel: Joining characteristics, interfacial microstructure, and mechanical properties[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1-4): 203-213.
- [43] TAN Caiwang, LI Liqun, CHEN Yanbin, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of fiber laser welded-brazed Mg alloy-stainless steel

- joint[J]. *Welding Journal*, 2014, 93(10): 399S-409S.
- [44] LI Liquan, TAN Caiwang, CHEN Yanbin, et al. Comparative study on microstructure and mechanical properties of laser welded-brazed Mg/mild steel and Mg/stainless steel joints[J]. *Materials & Design*, 2013, 43: 59-65.
- [45] SONG Gang, YU Jingwei, LI Taotao, et al. Effect of laser-GTAW hybrid welding heat input on the performance of Mg/steel butt joint[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 131-138.
- [46] WANG Xiaoyong, SUN Daqian, SUN Y. Influence of Cu-interlayer thickness on microstructures and mechanical properties of MIG-welded Mg-steel joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(3): 910-920.
- [47] WANG Xiaoyong, SUN Daqian, YIN Shiqiang, et al. Microstructures and mechanical properties of metal inert-gas arc welded Mg-steel dissimilar joints[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(8): 2533-2542.
- [48] WANG Xiaoyong, GU Xiaoyan, SUN Daqian, et al. Interface characteristics and mechanical behavior of metal inert-gas arc welded Mg-steel joints[J]. *Journal of Materials Research*, 2016, 31(5): 589-598.
- [49] DING M, LIU S S, ZHENG Y, et al. TIG-MIG hybrid welding of ferritic stainless steels and magnesium alloys with Cu interlayer of different thickness[J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 375-383.
- [50] SONG Gang, LI Taotao, CHI Jiayu, et al. Bonding of immiscible Mg/steel by butt fusion welding[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 157: 10-14.
- [51] FENG Yueqiao, LI Yang, LUO Zhen, et al. Resistance spot welding of Mg to electro-galvanized steel with hot-dip galvanized steel interlayer[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 114-122.
- [52] DING Min, ZHEN Yong, LIAN Jie. Dissimilar spot welding joints of AZ31-443 ferritic stainless steel with cover plate[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(5-8): 1539-1545.
- [53] MANLADAN S M, YUSOF F, RAMESH S, et al. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded in welding-brazing mode and resistance element welded magnesium alloy/austenitic stainless steel joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 45-54.
- [54] PATEL V K, Bhole S D, CHEN D L. Characterization of ultrasonic spot welded joints of Mg-to-galvanized and ungalvanized steel with a tin interlayer[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4): 811-817.
- [55] PATEL V K, Bhole S D, CHEN D L. Formation of zinc interlayer texture during dissimilar ultrasonic spot welding of magnesium and high strength low alloy steel[J]. *Materials & Design*, 2013, 45: 236-240.
- [56] SANTELLA M, BROWN E, POZUELO M, et al. Details of Mg-Zn reactions in AZ31 to galvanised mild steel ultrasonic spot welds[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(3): 219-224.
- [57] FRANKLIN T J, PAN J, SANTELLA M, et al. Fatigue behavior of dissimilar ultrasonic spot welds in lap-shear specimens of magnesium and steel sheets[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2011, 4(1): 581-588.
- [58] SANTELLA M, FRANKLIN T, PAN J, et al. Ultrasonic spot welding of AZ31B to galvanized mild steel[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2010, 3(1): 652-657.
- [59] PATEL V K, CHEN D L, Bhole S D. Dissimilar ultrasonic spot welding of Mg-Al and Mg-high strength low alloy steel[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2014, 4(4): 41005.
- [60] LAI Wenjen, PAN Jwo, FENG Zhili, et al. Failure mode and fatigue behavior of ultrasonic spot welds with adhesive in lap-shear specimens of magnesium and steel sheets[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2013, 6(2): 279-285.
- [61] PAN T Y, FENG Zhili, SANTELLA M, et al. Corrosion behavior of mixed-metal joint of magnesium to mild steel by ultrasonic spot welding with and without adhesives[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2013, 6(2): 271-278.
- [62] LIU Liming, ZHAO Xu. Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser-GTA hybrid welding[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(9): 1279-1284.
- [63] WANG Hongyang, SONG Gang. Influence of adhesive and Ni on the interface between Mg and Fe in the laser-TIG-adhesive hybrid welding joint[J]. *International Journal of Precision Engineering And Manufacturing*, 2016, 17(6): 823-827.
- [64] LIU Liming, QI Xiaodong, ZHANG Zhaodong. The effect of alloying elements on the shear strength of the lap joint of AZ31B magnesium alloy to Q235 steel by hybrid laser-TIG welding technique[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*,

- 2012, 43A(6): 1976-1988.
- [65] LIU Liming, XU Rongzheng. Investigation of corrosion behavior of Mg-steel laser-TIG hybrid lap joints[J]. Corrosion Science, 2012, 54: 212-218.
- [66] QI Xiaodong, LIU Liming. Investigation on welding mechanism and interlayer selection of magnesium/steel lap joints[J]. Welding Journal, 2011, 90(1): 1S-7S.
- [67] SONG Gang, SHAN Chuang. Microstructures of laser-tungsten inert gas hybrid welding of dissimilar AZ31 Mg alloy and Q235 steel with Ni as interlayer[J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(2): 145-149.
- [68] LIU Liming, QI Xiaodong. Strengthening effect of nickel and copper interlayers on hybrid laser-TIG welded joints between magnesium alloy and mild steel[J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3960-3963.
- [69] QI Xiaodong, LIU Liming. Comparative study on characteristics of hybrid laser-TIG welded AZ61/Q235 lap joints with and without interlayers[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(14): 3912-3920.
- [70] LIU Liming, SHAN Chuang. Study on laser-tungsten inert gas hybrid welding of dissimilar Mg alloy and steel with Ni as interlayer[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2009, 40(10): 780-783.
- [71] QI Xiaodong, SONG Gang. Interfacial structure of the joints between magnesium alloy and mild steel with nickel as interlayer by hybrid laser-TIG welding[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 605-609.
- [72] LIU Liming, QI Xiaodong. Effects of copper addition on microstructure and strength of the hybrid laser-TIG welded joints between magnesium alloy and mild steel[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(21): 5725-5731.
- [73] LIU Liming, QI Xiaodong, WU Zhonghui. Microstructural characteristics of lap joint between magnesium alloy and mild steel with and without the addition of Sn element[J]. Materials Letters, 2010, 64(1): 89-92.
- [74] SONG Gang, AN Guangye, LIU Liming. Effect of gradient thermal distribution on butt joining of magnesium alloy to steel with Cu-Zn alloy interlayer by hybrid laser-tungsten inert gas welding[J]. Materials & Design, 2012, 35: 323-329.
- [75] 刘磊. 镁/镁和镁合金/钢电阻点焊接头的形成机理及力学性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- LIU Lei. Formation mechanism and mechanical properties of Mg/Mg and Mg alloy/steel resistance spot welded joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [76] LIU Lei, XIAO Liyuan, CHEN D L, et al. Microstructure and fatigue properties of Mg-to-steel dissimilar resistance spot welds[J]. Materials & Design, 2013, 45: 336-342.
- [77] SHEN Z, DING Y, CHEN J, et al. Comparison of fatigue behavior in Mg/Mg similar and Mg/steel dissimilar refill friction stir spot welds[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 92: 78-86.
- [78] CHEN Y C, NAKATA K. Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded magnesium alloy and steel[J]. Materials & Design, 2009, 30(9): 3913-3919.
- [79] LEE C Y, CHOI D H, YEON Y M, et al. Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and Al-Mg alloy by formation of IMCs[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(3): 216-220.
- [80] CHEN Y C, NAKATA K. Friction stir lap welding of magnesium alloy and zinc-coated steel[J]. Materials Transactions, 2009, 50(11): 2598-2603.
- [81] CHEN Y C, NAKATA K. Effect of surface states of steel on microstructure and mechanical properties of lap joints of magnesium alloy and steel by friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(4): 293-298.
- [82] LIU Lei, ZOU Guisheng, MORI H, et al. Nanostructure of immiscible Mg-Fe dissimilar weld without interfacial intermetallic transition layer[J]. Materials & Design, 2016, 92: 445-449.
- [83] MISHIN Y, ASTA M, LI Ju. Atomistic modeling of interfaces and their impact on microstructure and properties[J]. Acta Materialia, 2010, 58(4): 1117-1151.
- [84] LIU Lei, XIAO Liyuan, FENG Jiecai, et al. Bonding of immiscible Mg and Fe via a nanoscale Fe₂Al₅ transition layer[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(11): 982-985.
- [85] SONG Gang, LI Taotao, ZHANG Zhaodong, et al. Investigation of unequal thickness Mg/steel butt-welded plate by hybrid laser-tungsten inert gas welding with a Ni interlayer[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 30(Supplement C): 299-302.

作者简介: 宋刚, 男, 1978 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为轻量化材料先进焊接理论及方法。

E-mail: songgang@dlut.edu.cn

刘黎明(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色高效焊接技术及装备。

E-mail: liulm@dlut.edu.cn