

镁合金绿色高效焊接技术研究进展*

刘黎明^{1,2}, 王红阳^{1,2}

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024;

2. 辽宁省先进连接技术重点实验室, 大连 116024)

[摘要] 镁合金是航空航天领域应用最为广泛的轻合金之一。随着镁合金应用的不断深入,对具有高精度、低能耗、高效率特征的绿色焊接技术提出了迫切需求,并成为镁合金焊接制造发展的重要方向。针对上述需求,围绕镁合金激光诱导电弧复合焊接技术,镁合金活性高效焊接技术以及镁合金与异种金属的连接技术展开系统研究。采用激光诱导电弧复合焊接技术成功实现了镁合金低能耗高效焊接制造,与传统电弧焊接相比显著提高了焊接制造效率,降低了焊接制造能耗。采用激光胶焊技术及激光-电弧复合焊接技术实现了镁合金与铝合金及镁合金和钢铁的高性能焊接制造。上述绿色焊接制造技术研究成果为实现航空镁合金轻量化结构件的设计和制造提供了有力支撑。

关键词: 镁合金焊接; 绿色焊接; 高效; 低能耗

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.016



刘黎明

教授、博导,长江学者特聘教授,国家杰出青年科学基金获得者,“基于绿色制造的焊接工艺与装备”教育部科研创新团队带头人,现任辽宁省先进连接技术重点实验室主任。主要从事轻合金先进焊接与连接技术、激光-电弧复合焊接技术与装备等研究。

随着低碳环保、节能降耗等绿色制造理念的不断发展,减轻装备的整体重量,实现结构轻量化,已经逐渐成为航空航天及交通运输领域的重要发展方向。镁合金作为目前工业制造领域中最轻的金属材料之一,因其能显著降低结构重量,而在上述领域不断得到深入应用^[1]。

由于镁及镁合金具有高比强度、高比刚度、好的减震效果、优良的导热性和导电性及电磁屏蔽性等特征^[2],使它在航空航天业中具有广阔的应用前景,适用于飞机、航天器的轻质外壳、蒙皮、座椅、减震系统元件及其他构件。近年来,随着先进镁合金制品生产能力和技术水平的提高,其在航空航天制造领域的应用范围也不断扩展,并逐渐发展形成了镁合金制造技术、材料及装备体系。

焊接技术作为装备制造领域的共性技术,已经成为影响镁合金在航

空航天装备制造领域应用的关键技术之一。围绕镁合金焊接制造技术,国内外学者展开了广泛而深入的研究,采用电弧焊接、激光焊接、搅拌摩擦焊接及激光-电弧复合焊接^[3-9]等诸多方法均能够实现镁合金的良好连接。随着航空航天及轨道交通等领域装备零件体积的增大、结构更加复杂、服役需求的不断提升,提高镁合金的焊接制造效率、降低焊接能耗、减少焊接污染,促进镁合金与铝合金、钢铁等异种材料的连接,实现镁合金关键结构的高性能绿色焊接制造已经成为镁合金焊接制造发展的重要方向和迫切需求。

本文围绕镁合金绿色焊接制造技术展开系列研究,采用脉冲激光诱导电弧复合焊接技术实现了镁合金板材及T型结构件的优质高效焊接,使镁合金焊接制造效率较电弧焊提高5~8倍,焊接能耗仅为电弧焊的

* 基金项目: 国家自然科学基金(11375038)。

30%；采用镁合金活性焊技术成功实现了复杂铸造镁合金结构件的良好修复。针对镁合金与异种金属连接问题,通过采用激光胶焊技术及激光-电弧复合焊接实现了镁合金与铝合金、镁合金与钢铁之间异种金属的良好连接。上述研究成果为镁合金在航空航天等轻量化制造领域的深入应用起到了积极的促进作用。

同质镁合金绿色高效焊接技术

1 镁合金激光诱导电弧复合焊接机理

镁合金脉冲激光诱导电弧复合焊接具有焊接速度快、焊接缺陷少、焊接性能高等技术优势。焊接过程中,激光热源在焊接熔池中产生焊接“匙孔”,对电弧起到了显著的诱导增强效果。图1为激光诱导电弧复合焊接结构示意图。

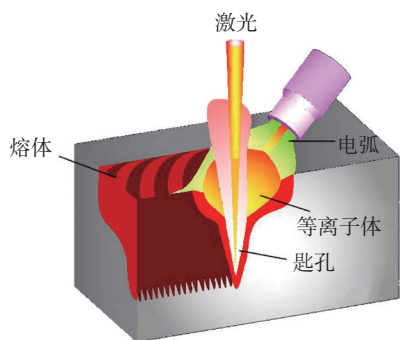


图1 激光诱导电弧复合焊接结构示意图
Fig.1 Schematic of laser-induced arc hybrid welding Mg alloy joints

脉冲激光与电弧之间的耦合作用直接影响了镁合金的焊接质量和效率。采用高速摄像机对电弧状态进行分析,发现在激光作用前后,热源等离子体状态发生了明显变化。在脉冲激光作用前:电弧形态与一般焊接过程类似,电弧等离子体比较松散,沿着钨极尖端方向延伸(图2(a));在脉冲激光作用区间,激光在电弧熔池中形成焊接“匙孔”,熔池波动剧烈,电弧等离子体主要与复合焊接“匙孔”直接连通,等离子体明显被压缩至“匙孔”附近,形成电弧钨极与焊接“匙孔”间的耦合放电(图

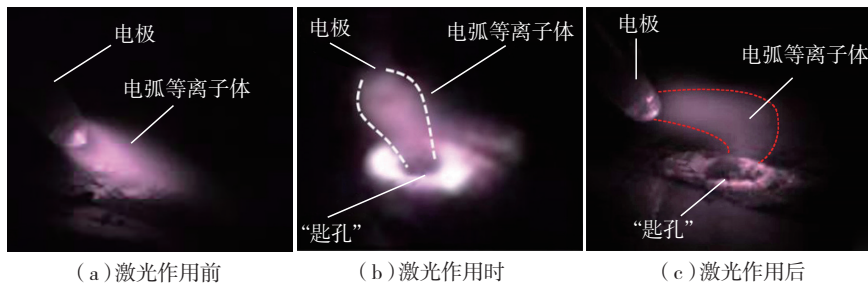


图2 激光与电弧间耦合放电等离子体状态
Fig.2 Plasma shape in laser and arc discharge coupling process

2(b)),电弧亮度及能量密度均显著提高;当脉冲激光作用消失后可以发现,“匙孔”出口在激光脉冲作用结束后并未立刻闭合(图2(c)),而是持续存在大约7.0~10.0ms,即发生了“匙孔”的延迟闭合现象,这主要是由于电弧与“匙孔”产生耦合放电,为“匙孔”提供了足够的高温气体,对“匙孔”侧壁及底部产生压力,维持“匙孔”打开状态,“匙孔”延迟闭合诱导焊接电弧持续压缩,增强了热源整体作用效果。

从上述结果可以发现,伴随着耦合放电发生,通过激光的脉冲作用改变电弧等离子体的放电状态,提高电弧等离子体的能量密度,以及激光诱导电弧复合热源的穿透能力和制造效率。激光脉冲作用消失后,耦合放电的延迟效应使激光对电弧等离子体的增强效果仍可持续一定时间。采用脉冲激光诱导电弧复合焊及电弧焊方法进行6mm镁合金板材焊接,焊接接头横截面如图3所示。焊接参数为:焊接速度 $v=1\text{m}/\text{min}$,激光能量 $P=500\text{W}$,电弧电流 $I=120\text{A}$ (交流),激光作用点与电弧钨极间距 $D_{la}=2.0\text{mm}$,用于对比试验的单电弧焊接速度为 $0.6\text{m}/\text{min}$ 。从图中可以发现,激光诱导电弧复合焊接镁合金熔深约是电弧焊的3倍。

2 镁合金激光诱导电弧复合焊接技术及装备

采用低功率激光诱导电弧复合焊接方法,实现3mm厚AZ61镁合金板材的高效、高性能焊接制造,激光诱导电弧复合焊接速度达到 $6\text{m}/\text{min}$ 。

镁合金板材焊接接头如图4所示,可见板材未发生明显横向和纵向变形,焊缝正面、背面成形连续均匀,说明在此高速焊接条件下热源也具有足够的穿透能力。

图5^[10]为AZ61镁合金激光诱导电弧复合热源焊接接头的微观组织。由图中可以看出,焊缝内部未出现气孔、夹杂以及宏观裂纹,镁合金母材的晶粒尺度为 $40\sim 50\mu\text{m}$;热影响区宽度约为 $250\mu\text{m}$,热影响区晶粒相比于母材未见明显长大;焊缝区的扫描电镜照片显示焊缝的晶粒尺度为 $5\sim 16\mu\text{m}$,晶界处发现了析出的金属间化合物(主要为 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)。对焊接接头进行了拉伸强度测试,测试结果显示试件在母材和焊缝区域

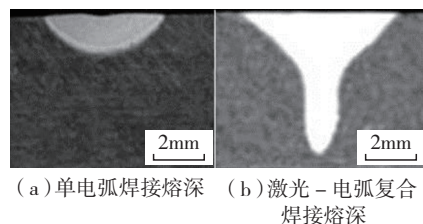


图3 镁合金电弧焊接及激光-电弧复合焊接熔深对比

Fig.3 Penetration comparison of arc welding and laser-arc hybrid welding Mg alloy joints

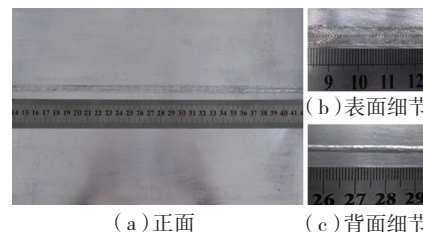


图4 镁合金高速焊接的接头表面形貌
Fig.4 Welding appearance of high speed welding Mg alloy

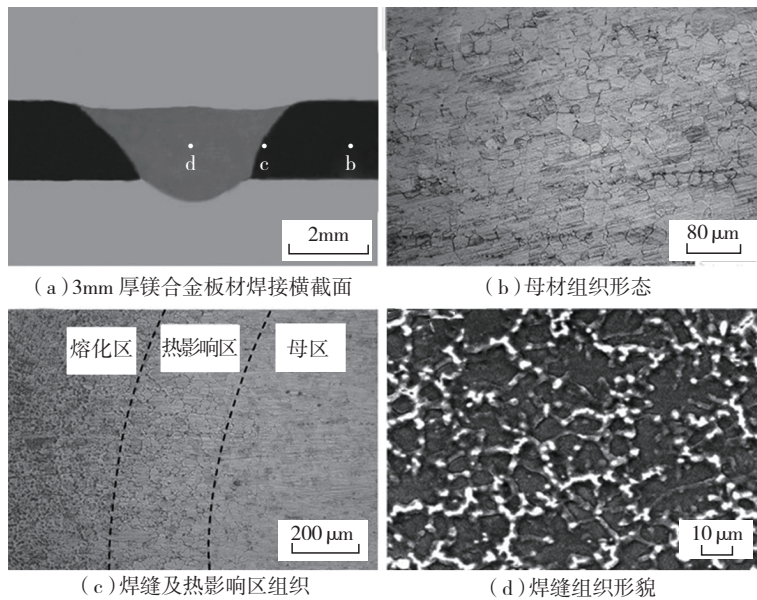


图5 高速焊接镁合金接头微观组织

Fig.5 Microstructure of high speed welding Mg alloy joint

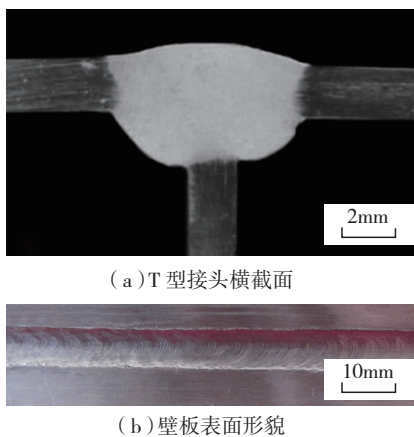


图6 激光-电弧复合冷填丝焊接镁合金T型接头形貌

Fig.6 Appearance of T shape joint of laser-arc hybrid welding Mg alloy

均可发生断裂,表明焊缝的拉伸强度与母材相当。

T型结构件的穿透焊接技术已在飞机制造领域得到广泛应用。采用低功率激光诱导电弧复合焊接方法,实现了2mm 镁合金板材的穿透

焊接,接头形貌如图6所示(参数:激光功率300W,电弧电流100A,焊接速度1m/min,送丝速度1875mm/min)。T型结构件壁板和筋板之间熔合良好,未见明显缺陷。

表1给出了对接板材及T型结构件电弧焊及激光诱导电弧复合焊的制造效率及焊接能耗(计算时考虑了激光加工设备及冷却系统的整体能耗)。可以发现,采用激光诱导电弧复合焊方法可以在显著提高焊接制造效率的同时降低单位长度的焊接能耗,对于发展镁合金的绿色焊接制造技术起到了积极的促进作用。

以上述激光诱导电弧复合焊接技术为基础开发出成套低能耗激光-电弧复合焊接装备,采用该成套装备实现了国内首个镁合金整理箱高效高性能焊接制造,如图7所示。

3 镁合金活性焊接/补焊技术

活性焊接是采用活性剂材料增

强电弧的一种焊接方法。通过深入研究电弧热源与焊接材料作用的物理机制,在传统活性焊接的基础上,将活性材料与焊丝有机结合,形成了一种基于活性焊丝的新型活性焊接方法,其原理如图8所示。

研究发现,活性剂涂覆在焊丝表面时,活性剂中金属元素与非金属元素将对电弧形成“电离增强效应”^[11]。以镁合金为研究对象,通过揭示活性剂中低电离能金属元素的电离以及非金属元素对电子的吸附作用,使镁合金活性焊接电弧能量密度提高8~10倍,从 $10^2\sim 10^4\text{W}/\text{cm}^2$ 增加至 $10^3\sim 10^5\text{W}/\text{cm}^2$,实现了活性焊接从“板材涂覆活性焊”向“焊丝涂覆活性焊”的转变,与单电弧焊接相比,该技术焊接熔深可增加1~3倍(图9),焊接效率提高3~5倍,焊接能耗为相同条件下电弧焊接的40%~50%。

铸造镁合金结构件因在减轻结构重量方面具有良好的减震效果而在航空航天领域得到广泛的应用。但铸造镁合金在成形、加工过程中极易产生气孔、夹渣及裂纹等多种缺

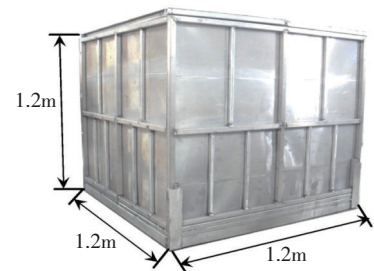


图7 激光-电弧复合焊接镁合金空运整理箱
Fig.7 Laser-arc hybrid welding Mg alloy air storage box

表1 激光诱导电弧复合焊接与电弧焊接效率及能耗比较

| 焊接试件 | 复合焊接速度 / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) | 电弧焊接速度 / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) | 复合焊接能耗 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$) | 电弧焊接能耗 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$) |
|------|---|---|---|---|
| 对接 | 6.0 | 0.5 | 120 | 500 |
| T型 | 1.0 | 0.2 | 470 | 1250 |

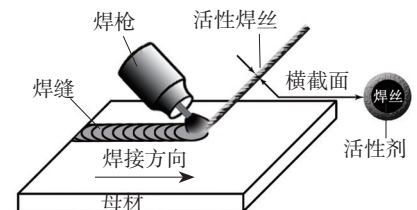


图8 镁合金活性焊丝焊接结构示意图
Fig.8 Structure diagram of Mg alloy active welding process

陷,所以对缺陷铸件的补焊具有较高的经济价值。分别采用钨极氩弧焊(TIG)及活性电弧焊接(A-TIG)对铸造镁合金进行补焊对比试验,焊接效果如图10所示。

通过TIG与A-TIG对不同孔深缺口愈合试验发现,在相同的焊接参数下,A-TIG愈合缺口的深度明显高于TIG,且焊缝气孔缺陷较少。通过对补焊后焊缝的微观组织和硬度观察发现,利用A-TIG进行补焊不但可以实现较深缺口的愈合,而且可以减少焊缝气孔缺陷,同时避免热影响区组织的粗化。

镁合金具有较低的熔沸点和较高的蒸汽压,在焊接制造过程极易形成大量的金属蒸汽和粉尘颗粒。减少镁合金焊接材料在制造过程中的挥发和燃烧,已经成为镁合金绿色焊接制造的重要问题。其关键在于提高镁合金焊接材料的沸点,减少镁合金焊接过程的质量损失。由于镁合金具有较少的核外电子及较大的原子半径,镁合金的金属键能相对较弱,因此具有较低的熔沸点。针对上述问题提出了基于分子团簇的高沸

点镁合金焊材设计思想,通过在镁合金中添加稀土、Zn、Al等多种元素,并精确控制元素比例,使镁合金与这些元素分别形成具有团簇特征的密排拓扑结构及高熔沸点的金属间化合物,有效地提高了镁合金焊接材料的沸点(由1100℃提高到1422℃)。采用DSC热差分析方法对镁合金焊接材料进行失重率测量发现,在1200℃时,普通的镁合金焊接材料失重率达到80%以上,而本文开发的高沸点镁合金焊接材料失重率小于35%。

镁合金与异种金属高性能焊接技术

1 镁合金与铝合金的激光胶接焊技术

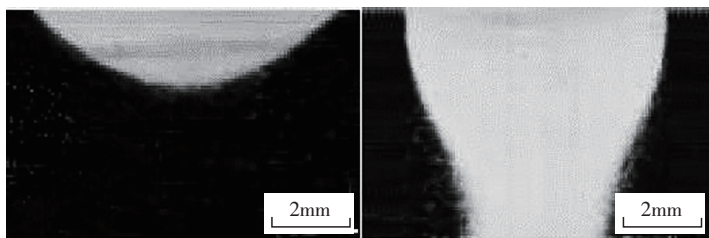
镁合金与铝合金是目前在飞机制造领域应用最为广泛的两种轻合金材料,因而实现两种材料的优质高效焊接,对于充分发挥镁合金的应用性能具有十分重要的意义。然而镁合金和铝合金在焊接中容易形成金属间化合物,对焊接性能产生了显著不良影响。激光胶接焊技术是一种将激光焊接与胶接有机结合得到的新型连接技术,采用该技术成功实现了

AZ31B镁合金与6061铝合金异种金属之间的良好连接,焊接接头横截面及焊缝表面成形如图11所示。研究发现,胶粘剂的加入能够影响金属间化合物的分布和形态,减少了焊接接头内部的金属化合物,在一定程度上提高了焊接接头的连接性能。但是胶粘剂的主体是有机化合物,并不能完全抑制Mg元素和Al元素之间的反应,无法消除镁铝金属间化合物。

为了实现对Mg-Al金属间化合物的有效抑制,将胶粘剂与合金元素有机结合,形成了基于复合中间层设计的激光胶焊方法。图12为采用铁箔和胶粘剂作为中间层的镁/铝异种金属激光胶焊结构示意图。充分利用Mg和Fe之间不反应也不互溶的特性,实现了对Mg-Al金属间化合物的有效抑制,焊接接头性能显著提升。当胶粘剂固化后,镁/铝异种金属激光胶焊性能达到2.9kN/cm,与单独激光焊接相比提高了6倍以上,达到镁合金母材拉伸载荷的90%。

2 镁合金与钢激光-电弧复合焊接技术

镁合金和钢铁既不反应也不互



(a) 电弧焊接熔深 (b) 活性焊接熔深

图9 镁合金活性电弧焊接与单一电弧焊接熔深对比

Fig.9 Penetration comparison between active welding and simple TIG welding Mg alloy joints

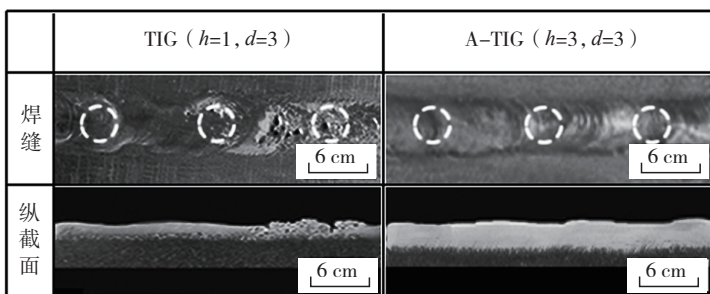
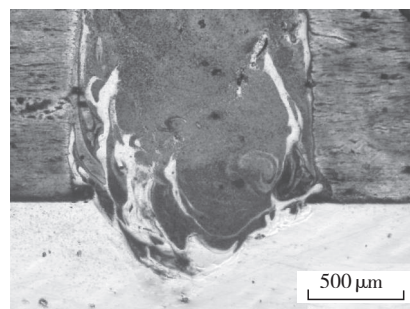
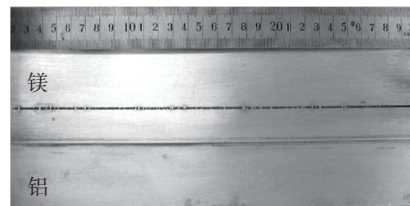


图10 TIG与A-TIG补焊缺口完全愈合图

Fig.10 Repair welding joints of TIG and A-TIG Mg alloy



(a) 焊接接头横截面



(b) 焊接试件

图11 镁/铝异种金属激光胶接焊横截面及焊接试件

Fig.11 Cross section and specimen of laser weld boning Mg alloy to Al alloy joint

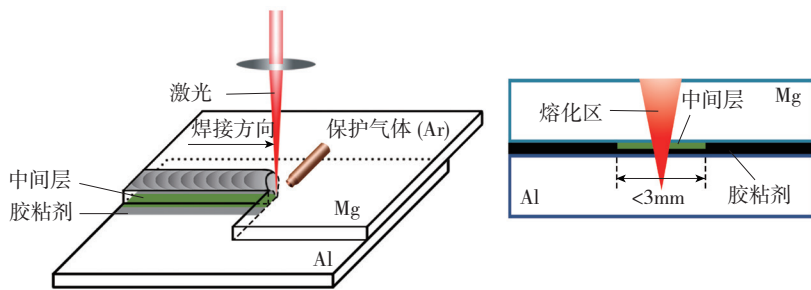
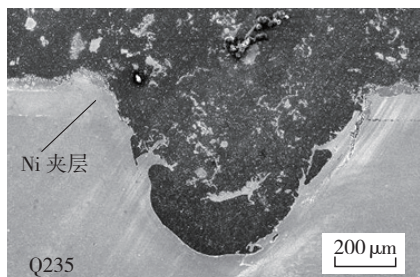


图12 采用复合中间层的镁/铝异种金属激光胶焊结构示意图
Fig.12 Laser weld bonding Mg alloy to Al alloy joint with hybrid interlayer

溶,镁合金的沸点低于钢铁的熔点,钢熔化时镁合金已经气化,对镁/钢异种金属的熔化焊接带来显著困难。

针对上述问题,采用激光-TIG电弧复合焊接技术实现了镁/钢异质金属搭接结构的良好焊接,焊接接头横截面结构及表面形貌如图13所示。从图中可以发现,镁合金和钢铁熔合良好,未在异种金属连接界面处发现明显焊接缺陷。

这主要是由于在激光-电弧复合焊接热源中,电弧热源的能量密度相对较低,一般为 $10^3\sim 10^4\text{W}/\text{cm}^2$,而激光的能量密度相对较高,一般为 $10^5\sim 10^7\text{W}/\text{cm}^2$,因此将两者形成的复合热源能量密度整体呈现逐渐增高



(a) 搭接接头横截面



(b) 搭接接头表面形貌

图13 镁/钢异种金属搭接结构激光-电弧复合焊接横截面及表面形貌

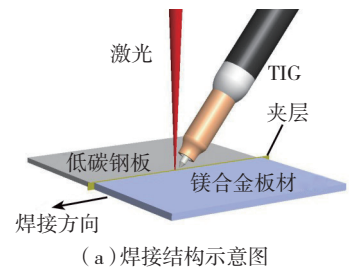
Fig.13 Cross section and appearance of laser-arc hybrid welding Mg alloy to steel lap joint

的梯度分布,可以实现镁合金和钢铁的同时熔化。为了实现Mg和Fe的冶金反应,通过添加Ni中间层改善镁钢界面的结合状态,在镁合金熔池一侧形成了Mg-Mg₂Ni亚共晶组织,在钢熔池一侧形成了Fe-Ni固溶体,实现了镁合金和钢铁的良好连接。AZ31B镁合金与Q235搭接结构激光-电弧复合焊接接头的剪切强度达到160MPa,与镁合金自身的剪切强度相当。

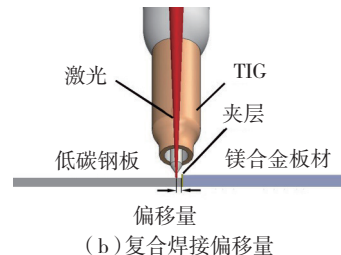
在实现镁合金和钢搭接结构良好焊接的基础上,针对镁/钢对接结构焊接技术展开研究。采用激光在前、TIG电弧在后的复合热源作用方式,进行镁/钢异种金属的双面焊接。结合激光-TIG复合热源焊接技术的梯度热源焊接特性,焊接过程中设定复合焊接热源一定的偏移量,即激光和电弧略向钢一侧偏移,充分利用复合热源的高能量区域熔化钢铁,低能量区域熔化镁合金(图14),镁合金和钢在焊接过程中同时熔化,实现了AZ31/Q235镁/钢异种金属薄板对接结构的冶金焊接连接^[12]。

图15给出了镁/钢异种金属激光-电弧复合焊接对接接头宏观形貌。根据焊接接头结构将它分为4个区域。其中I区是镁合金母材,II区是镁合金熔化区,III区是钢的熔化区,IV区是钢铁的熔化区。

其中III区是影响焊接接头性能的主要部分。采用EDS能谱对图中III区成分进行分析,结果显示:过渡区中主要由Fe和Ni两种元素组成,



(a) 焊接结构示意图



(b) 复合焊接偏移量

图14 镁/钢异种金属激光-TIG电弧对接焊示意图

Fig.14 Schematic of laser-arc hybrid welding Mg alloy to steel butt joint

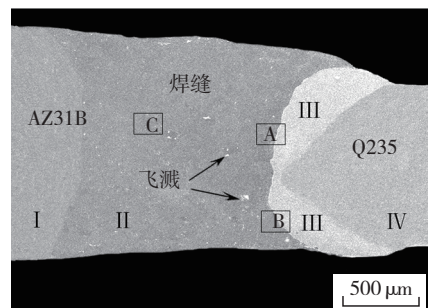


图15 镁/钢对接结构激光-电弧复合焊接接头横截面

Fig.15 Cross section of laser-arc hybrid welding Mg alloy to steel butt joint

并含有少量的Al元素,这说明在复合热源的作用下钢与镍熔化后形成了该过渡区。从图中可以进一步看出,焊缝与钢侧界面结合较好,未见微裂纹、微气孔、未焊合等缺陷。采用万能拉伸试验机测量焊接接头的平均拉伸强度可达232MPa,约为镁合金母材的90%,接头断裂位置位于钢侧界面附近。

结论

(1) 通过脉冲激光对电弧的诱导增强,使电弧能量密度显著提升。采用激光-电弧复合焊接技术实现了镁合金板材及T型结构件的优质高效焊接。与传统电弧焊接相比,激

光诱导电弧复合焊接制造效率提高5~8倍,焊接制造能耗降低50%以上,镁合金结构件的焊接接头性能达到母材的95%以上。

(2) 研制出镁合金活性焊丝焊接技术,开发出低污染镁合金焊接材料,使镁合金活性焊接与填丝焊接有机结合;研制出铸造镁合金的高性能活性补焊技术,该技术显著提高了铸造镁合金的活性补焊效率和质量。

(3) 采用激光胶焊技术成功实现了镁/铝异种金属的优质高效焊接,通过胶粘剂及中间合金的复合作用有效抑制了镁铝金属间化合物,焊接接头性能达到镁合金母材的90%;通过设计激光-电弧复合热源能量的分布状态,实现了镁合金与钢铁的搭接及对接结构的优质焊接,焊接接头性能达到镁合金母材的90%以上。

参考文献

- [1] 贾中振,刘金合,杨艳,等. 镁合金高能束焊接技术的研究现状及进展[J]. 焊接, 2013, 30(1): 97-103.
- JIA Zhongzhen, LIU Jinhe, YANG Yan, et al. Research and development of high energy beam welding technology of Mg alloys[J]. Welding, 2013,30(1): 97-103.
- [2] 冯吉才,王亚荣,张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(2):175-178.
- FENG Jicai, WANG Yarong, ZHANG Zhongdian. Status and expectation of research on welding of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(2):175-178.
- [3] LIAO J S, YAMAMOTO N, NAKATA K. Gas tungsten arc welding of fine-grained AZ31B magnesium alloys made by powder metallurgy[J]. Materials and Design, 2014, 56 : 460-467.
- [4] 单际国,张婧,郑世卿,等. 镁合金激光焊接气孔问题的实验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 234-239.
- SHAN Jiguo, ZHANG Jing, ZHENG Shiqing, et al. Experimental study on pores in laser welding of magnesium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3): 234-239.
- [5] 杨素媛,刘冬冬. 镁合金搅拌摩擦焊的研究现状与展望[J]. 稀有金属, 2014, 38(5): 896-904.
- YANG Suyuan, LIU Dongdong. Status and prospect of friction stir welding of magnesium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(5): 896-904.
- [6] MIRONOV S, ONUMA T, SATO Y S, et al. Microstructure evolution during friction-stir welding of AZ31 magnesium alloy[J]. Acta Materialia, 2015,100: 301-312.
- [7] LI W Y, FU T, HÜTSCHE L, et al. Effects of tool rotational and welding speed on microstructure and mechanical properties of bobbin-tool friction-stir welded Mg AZ31[J]. Materials & Design, 2014, 64: 714-720.
- [8] ZHU T P, CHEN Z W, GAO W. Incipient melting in partially melted zone during arc welding of AZ91D magnesium alloy[J]. Materials Science Engineering A, 2006, 416(1-2): 246-252.
- [9] ZHANG Z D, LIU L M, SONG G. Welding characteristics of AZ31B magnesium alloy using DCPMIG welding[J]. Trans. Nonferrous Metals Soc. China, 2013, 23(2): 315-322.
- [10] LI C B, CHEN M H, YUAN S T, et al. Effect of welding speed in high speed laser-TIG welding of magnesium alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27(12): 1424-1428.
- [11] ZHANG Z D, CAO Q J. Study on metal transfer behaviour in metal inert gas arc welding with activating flux for magnesium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(7): 550-555.
- [12] SONG G, AN G, LIU L M. 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 and Design, 2011, 35: 323-329.

Research on Green and Efficient Welding Technology of Mg Alloy

LIU Liming^{1,2}, WANG Hongyang^{1,2}

(1. School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory of Liaoning Advanced Welding and Joining Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] Mg alloy is one of the most widely used light alloys in aerospace manufacture. With the further application of Mg alloy, the Green welding technology of Mg alloy is required urgently, which is provided with the high precision, low energy consumption, high efficiency characteristics. It has become an important direction for development of Mg alloy welding manufacture. This research focuses on Mg alloy laser-induced arc hybrid welding technology, efficient activated welding technology and dissimilar metals joining technology. The laser-induced arc hybrid welding technology is used successfully to join Mg alloy with low energy and high efficient, which improves the welding efficiency and reduces the energy consumption significantly, compared with the ordinary arc welding technology. Laser weld bonding technology and laser-arc hybrid welding technology are used successfully to join Mg alloy to Al alloy and steel. The above research provides a strong support on the design and manufacture of Mg lightweight aircraft components.

Keywords: Mg alloy welding technology; Green welding technology; Efficient; Low energy consumption

(责编 谷雨)