

添加过渡层的镁合金/钢激光-TIG 电弧复合 熔化焊接机制

宋 刚, 王 杰, 于景威, 刘黎明

(辽宁省先进连接技术重点实验室 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024)

摘 要: 激光-电弧复合热源技术较单一热源焊接技术相比, 具有热源能量密度梯度及热力耦合模式可优化设计等特点, 成为实现关键零部件精确成形性焊接制造的重要方法. 文中以镁合金/钢为代表的难固溶不反应异质材料为研究对象, 提出多组元液相共存的镁合金/钢激光-TIG 电弧复合焊接新思路, 利用激光-TIG 电弧复合焊接热源所具有的能量密度梯度分布特征, 通过添加 Cu-Zn 过渡层, 实现镁合金/钢异种金属高质量熔化焊接, 并对铝元素的作用进行了探讨.

关键词: 激光-电弧复合; 异质材料; 多组元液相; 熔化焊

中图分类号: TG 456 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)05-0069-04

0 序 言

镁合金/钢复合结构可兼具整体减重与局部承载增强的协同优势, 在航天飞行器、高速列车、汽车等领域均具有广阔的应用前景, 镁合金/钢异质材料焊接与连接迅速成为近年来国内外学者研究的热点. 目前大量研究主要集中在固相连接和熔-钎焊接两个方面, 例如扩散焊^[1]、搅拌摩擦(点)焊^[2,3]、电阻点焊^[4]、超声波钎焊^[5]、激光熔-钎焊^[6]以及冷金属过渡熔钎焊^[7]等, 并取得了系列卓有成效的研究结果. 上述焊接与连接方法具有共同的特征是钢侧材料几乎不熔化, 主要是利用添加过渡层(Ni, Cu, Cu-Zn 等箔层以及 Zn, Ni 镀层等), 与镁合金和钢的扩散或扩散反应的“桥梁作用”达到有效连接的目的, 镁合金/钢焊接接头的强度系数可达到镁合金 80%.

然而作为工业应用最为广泛的熔化焊接方法却很少应用在镁合金/钢焊接上, 主要是由于镁合金与钢的物理和化学性能差距巨大, 在液态下两者几乎不能同时共存(镁的沸点 1 090℃ 显著低于铁的熔点 1 538℃)、难互溶不反应(镁在铁中的最大溶解度仅为 0.000 99%), 镁元素极其活泼容易产生含有结晶的氧化膜, 两者同时熔化时由于镁直接气化导致熔池波动剧烈甚至产生飞溅, 很难获得良好焊缝成形,

同时容易产生未熔合、氧化物夹杂和气孔等缺陷. 未能实现镁合金/钢同时熔化焊接的本质原因: 一方面是以镁合金/钢为代表的难固溶/不反应异种金属的液态熔池共存条件苛刻, 难以获得连续美观焊接接头; 另一方面是液态熔池共存及焊接非平衡凝固条件下多组元成分的扩散、反应远比固相连接更剧烈、更复杂, 界面组织和成分难以精确控制. 因此, 镁合金/钢液态熔池的稳定共存机理以及界面组织、成分的精确控制机制, 是发展镁合金/钢异种金属熔化焊接技术至为关键的理论基础.

激光-电弧复合焊接技术是一种将激光与焊接电弧的能量耦合作用于同一个熔池, 将两种焊接工艺优点集成于一体, 实现优质高效焊接加工的一种新型焊接成形工艺. 目前国内外关于激光-电弧复合焊接技术研究更侧重于获得更高的复合热源能量密度、更高的焊接质量以及更高的焊接效率. 而前期研究发现^[8,9], 激光与电弧两种具有不同能量密度、不同传质和传热模式的热源复合, 对于实现精确焊接成形和成性具有极强的可行性.

文中利用激光热源与电弧热源能量密度和能量梯度可控优势, 探索镁合金/钢激光-电弧复合熔化焊接的可行性, 并对其焊接机制进行了探讨.

1 镁合金/钢多组元液相熔化焊接思路的提出

针对镁合金与钢熔化焊接问题, 提出以下镁合

金/钢多组元液相共存熔化焊接思路:(1)热源模式设计,即将高能量密度热源激光作用于高熔沸点钢侧,低能量密度热源电弧主要作用于镁侧,获得两者同时熔化的条件,同时电弧热源能够延长镁合金熔池存在的时间;(2)过渡层设计,过渡层能够分别与镁合金和钢相互作用(扩散)或反应,同时发生多组元反应并具有低于镁合金沸点($1\ 090^{\circ}\text{C}$)的反应温度区间。例如铁铝锌和铁铝铜都存在较宽的满足要求的成分配比区间,为实现镁合金、钢以及过渡层的液相共存提供成分条件。

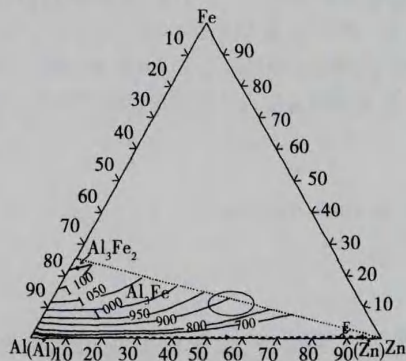


图 1 铁铝锌三元相图的固液转化温度

Fig. 1 Solid-liquid transformation temperature of Fe-Al-Zn ternary phase diagram

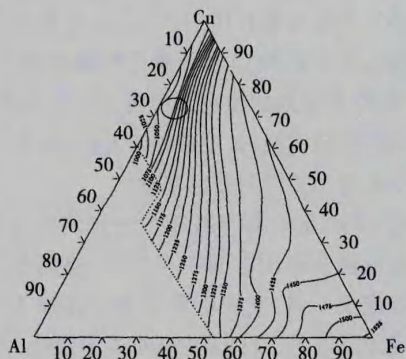


图 2 铁铝铜三元相图的固液转化温度

Fig. 2 Solid-liquid transformation temperature of Fe-Al-Cu ternary phase diagram

2 镁合金/钢激光-TIG 电弧复合熔化焊接组织和性能

试验选择的材料为 AZ31B 轧制镁合金、ZK60 铸造镁合金(对比 Al 元素影响)以及 Q235B 低碳钢,过渡层选择 Cu-Zn 合金(Cu62%,余量 Zn)。镁合金板材厚度 1.6 mm, Q235B 低碳钢板材厚度 1.1 mm。采用激光-TIG 电弧复合焊接方法,焊接偏移量选择为 0.2 mm,焊接试验示意图见图 3 所示。

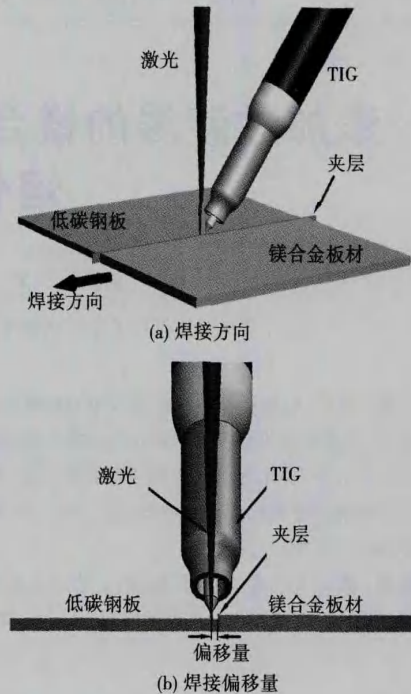
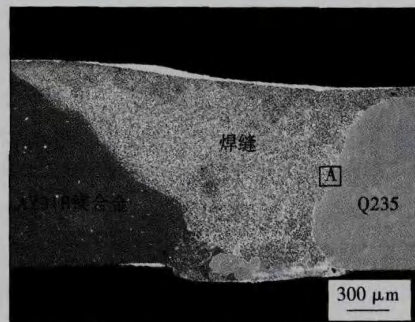


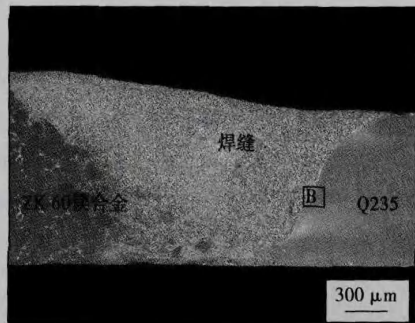
图 3 镁合金/钢激光-TIG 复合热源对接焊示意图

Fig. 3 Schematic of hybrid laser-TIG butt welding magnesium and steel

在优化的工艺参数条件下,获得了成形良好的镁合金/钢异质材料激光-TIG 电弧复合焊接接头,其横断面形貌见图 4 所示。



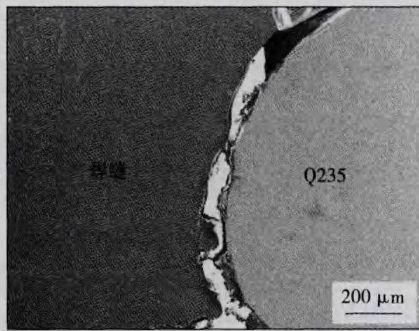
(a) 添加 Cu-Zn 过渡层的 AZ31/Q235 接头



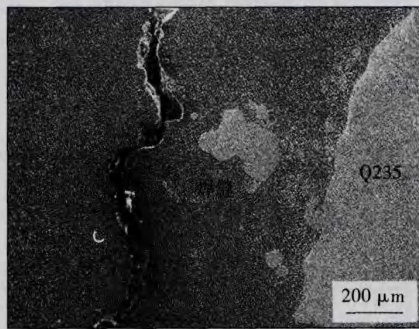
(b) 添加 Cu-Zn 过渡层的 ZK 60/Q235 接头

图 4 典型镁合金/钢焊接接头横断面形貌

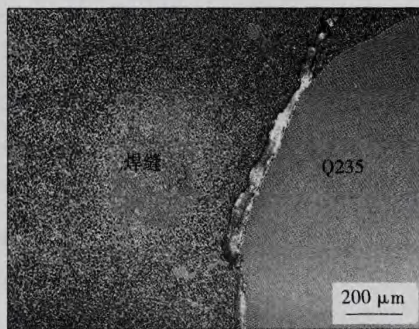
Fig. 4 SEM cross section of joints



(a) AZ31/Q235 无过渡层



(b) AZ31/Q235添加Cu-Zn过渡层



(c) ZK60/Q235添加Cu-Zn过渡层

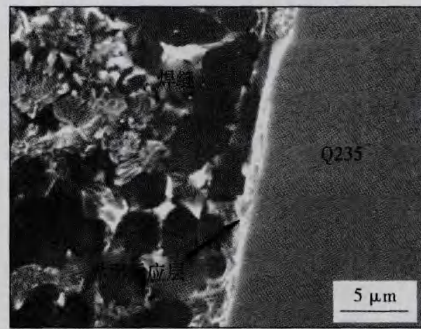
图5 镁合金与钢焊接接头拉伸断裂位置

Fig. 5 Macrograph of fracture path

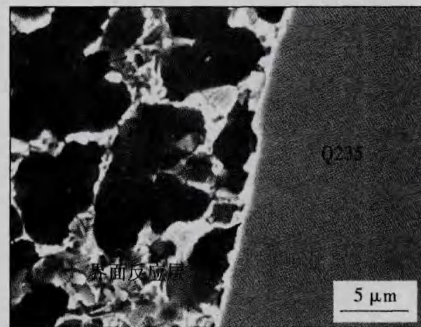
镁合金/钢激光-TIG 电弧复合焊接接头拉伸断裂位置见图5,其中无过渡层AZ31镁合金/Q235钢焊接接头直接从界面开裂,结合强度很低;添加Cu-Zn过渡层的AZ31镁合金/Q235钢对接焊接接头的平均抗拉强度为203 MPa,断裂在焊缝中;而添加Cu-Zn过渡层的ZK60镁合金/Q235钢对接焊接接头的平均抗拉强度仅为93 MPa,仅为AZ31镁合金/Q235钢的一半左右,断裂路径穿过焊缝和界面。

图6a和图6b分别为AZ31/Q235和ZK60/Q235异种金属焊缝界面中部的放大图。从图中可以看出,在两种连接接头的界面处均存在一个白色的过渡层,对于AZ31/Q235接头该过渡组织是Fe, Al, Cu, Zn形成的化合物,而对于ZK60/Q235则是Fe, Cu, Zn化合物。对比两个界面反应层发现,

AZ31/Q235界面形成的界面反应层的宽度比ZK60/Q235界面存在的界面反应层大,这说明镁合金母材中是否存在铝元素对镁合金/钢异种金属对接接头的界面反应层的厚度有显著的影响,而连续稳定的界面反应层是实现焊接性能提升的关键。



(a) AZ31/Q235



(b) ZK60/Q235

图6 镁合金/钢添加过渡层对接接头界面

Fig. 6 Interface of butt joints with interlayer

3 镁合金/钢异种金属焊接接头的界面结合机制分析

为揭示过渡层元素在镁合金/钢焊接中的作用,首先考虑镁合金/钢无过渡层直接焊接过程。由于热源作用设计,界面处的镁合金/钢均发生熔化。焊接过程涉及元素包括Mg, Al(来自AZ31母材), Fe三种主要元素。由Fe-Mg二元相图可知,Fe, Mg之间不发生反应或者固溶。由Fe-Al二元相图可知,Fe, Al之间反应温度几乎都是在1 160℃以上,高于Mg的沸点(1 090℃)。因此,镁合金与熔化的钢接触,会发生剧烈“爆炸”,这种“爆炸”现象阻碍Fe-Al金属间化合物的形成。当温度降低至1 090℃以下时,已经错过了Fe-Al金属间化合物最佳形成区间,难以在镁合金/钢界面处形成连续界面反应层,实现有效焊接。同时,由于镁合金、钢之间的热膨胀系数差异,室温下镁合金与钢不仅不能结合,而且还在界面处直接开裂,如图5a所示。

当镁合金/钢焊接中添加 Cu-Zn 过渡层时,焊接过程涉及元素包括 Mg, Al, Fe, Cu, Zn 五种主要元素,根据上述五种金属元素之间的二元相图,Fe-Al 金属间化合物的反应温度最高,在焊接熔池的凝固过程中,熔池中首先会析出 Fe-Al 金属间化合物。由于 Mg, Fe 之间难固溶不反应,因此界面处可能存在的反应中不考虑镁元素。为此,重点分析 Fe-Al-Zn 系与 Fe-Al-Cu 系三元相图,关注点在于熔池凝固过程中液固相转化温度,而非反应生成物。

采用扫描电镜的能谱仪分析镁合金/钢界面反应层的成分组成。由于界面反应层呈不连续线性分布。为确定最佳界面反应生成物位置,首先将界面图像放大至三万倍,并沿界面方向进行线扫描,如图 7 所示的线扫位置。由图中可知,Fe, Al 两种元素在界面处分布趋势一致,说明两者之间存在反应,并选取 A 点进行成分确定,其化学成分(质量分数)分别为 3.66% Fe, 11.09% Al, 28.38% Mg, 37.10% Cu 和 19.77% Zn。根据元素成分比例,参考 Fe-Al-Zn 系三元相图(图 1)。当 Fe: Al: Zn = 10.6%: 32.14%: 57.26%,液固相转化温度大概为 800 °C 至 900 °C,明显低于 1 090 °C。也就是说 Zn 元素的存在使 Fe-Al 之间的反应温度大大降低,低于 Mg 的沸点 1 090 °C,实现了 Fe, Al, Mg, Zn 元素的液态共存。同样思路,参考 Fe-Al-Cu 系三元相图(图 2) Fe: Al: Cu = 7%: 21.4%: 71.6%,该成分下的液固相转化温度亦低于 1 090 °C,实现了 Fe, Al, Mg, Cu 元素的液态共存。

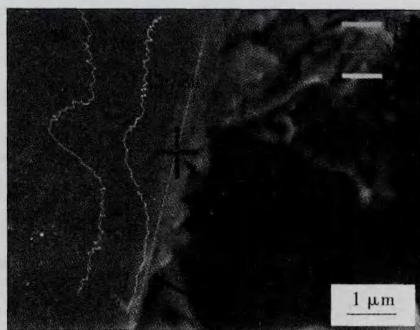


图 7 微观界面 EDS 线分析

Fig. 7 EDS line analysis of Mg/Fe interface

综上所述,适当 Zn, Cu 元素加入可以使 Fe-Al 反应温度低于 1 090 °C 以下,增大 Fe-Al 反应温度区间,获得了稳定的液态熔池共存条件,有利于界面反应层的形成和提高焊接过程稳定性。上述研究结果,从理论上和工艺上证明了镁合金/钢多组元液相熔化焊接的可行性。

4 结 论

(1) 采用添加 Cu-Zn 过渡层的激光-TIG 电弧复合焊接技术能够实现 AZ31B 镁合金与 Q235 钢的良好连接,焊接接头平均抗拉强度可到 203 MPa。

(2) 在激光-TIG 电弧复合焊接热源作用下,添加 Cu-Zn 过渡层,使 Fe-Al-Cu/Fe-Al-Zn 反应温度低于镁合金沸点,获得良好的多组元液相共存,是实现镁合金与钢连续稳定熔化焊接的关键。

参考文献:

- [1] Elthabawy W M, Khan T I. Liquid phase bonding of 316L stainless steel to AZ31 magnesium alloy [J]. Mater. Sci. Technol. 2011, 27(1): 22–28.
- [2] Watanabe T, Kazuhiko K, Atsushi Y, et al. Solid state welding of steel and magnesium alloy using a rotating pin-solid state welding of dissimilar metals using a rotating pin (report 3) [J]. Journal of the Japan Welding Society, 2006, 24(1): 108–115.
- [3] 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 and Design, 2009, 30(9): 3913–3919.
- [4] Xu W, Chen DL, Liu L, et al. Microstructure and mechanical properties of weld-bonded and resistance spot welded magnesium-to-steel dissimilar joints [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 537: 11–24.
- [5] M Santella, E Brown, M Pozuelo, et al. Details of Mg–Zn reactions in AZ31 to galvanized mild steel ultrasonic spot welds [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(3): 219–224.
- [6] 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 and Design. 2010, 31(6): 3121–3126.
- [7] 曹 睿, 余建永, 陈剑虹, 等. 镁/镀锌钢板 CMT 熔钎焊连接机制分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 21–24.
Cao Rui, Yu Jianyong, Chen Jianhong, et al. Bonding mechanism of CMT fusion-brazed joints between magnesium and galvanized steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(9): 21–24.
- [8] 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 and Design, 2010, 31: 605–609.
- [9] 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 and Design, 2012, 35: 323–329.

作者简介: 宋 刚,男,1978 年生,工学博士,副教授,博士研究生导师。主要从事绿色焊接技术与装备开发研究。发表论文 50 余篇。