

镁合金和其他金属及合金的焊接

黄万群¹ 马立军² 王新³

(1 中国石油大学(华东)机电工程学院, 东营 257061)

(2 胜利油田井下作业公司, 东营 257231)

(3 松原市建筑工程质量检测中心(有限公司), 松原 138000)

文 摘 综述了镁合金与异种镁合金、铝合金、钢、铜及其合金、钛及其合金异种材料焊接的国内外研究现状, 并指出最新发展动态及未来发展趋势。

关键词 镁合金, 异种材料, 焊接

Welding of Magnesium Alloy With Other Metal and Alloy

Huang Wanqun¹ Ma Lijun² Wang Xin³

[1 College of Mechanical & Electronic Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying 257061]

(2 Shengli Oil Field Downhole Operation Company, Dongying 257231)

(3 Songyuan Construction Engineering Quality Inspection Center, Songyuan 138000)

Abstract Research status of welding at home and abroad is summarized about magnesium alloy and other metals, such as other magnesium alloy, aluminum alloy, steel, copper and copper alloy and titanium and titanium alloy. The research trends in this area are also proposed.

Key words Magnesium alloy, Dissimilar materials, Welding

1 前言

镁及镁合金具有比强度、比模量高, 减振性、电磁屏蔽和抗辐射能力强, 尺寸稳定性高, 易切削加工、易回收等一系列优点, 在汽车、电子、电器、交通、航天、航空和国防军事工业领域具有极其重要的应用价值和广阔的应用前景, 是继钢铁和铝合金之后发展起来的第三类金属结构材料, 被称之为 21 世纪的绿色工程材料^[1-3]。随着很多常用金属矿产资源的日益枯竭, 镁以其资源丰富而日益受到重视, 特别是结构轻量化及环保问题的需求更加刺激了镁工业的发展^[3]。作为 21 世纪的绿色结构材料, 镁合金的应用前景甚为广阔^[1]。

随着镁合金的广泛应用, 必将遇到镁合金与其他金属及合金异种材料的连接问题^[4]。镁合金的焊接性不好, 与其他金属及合金的连接非常困难。本文就镁合金与异种镁合金、铝合金、钢、铜及其合金、钛及

其合金的国内外研究现状进行归纳总结。

2 镁合金与其他金属及合金的焊接

2.1 异种镁合金的焊接

目前, 对同种镁合金的焊接研究较多, 而对不同成分镁合金的焊接研究较少。各种镁合金之间性能差异较大, 获得异种镁合金之间的可靠连接比同种镁合金焊接困难得多, 并且采用常规的焊接方法很难实现。

王希靖、张永红等人对异种变形镁合金 AZ31B 和 AZ61A 进行了搅拌摩擦焊对接^[5], 结果表明: 当采用凹面圆台形搅拌头, 且将 AZ31B 置于后退侧进行施焊时较易得到成型良好、无焊接缺陷的对接接头。异种 AZ31B 与 AZ61A 搅拌摩擦焊接时, 适当的工艺参数范围较窄, 接头的力学性能对搅拌头的旋转速度和焊接速度非常敏感。当焊接速度为 35 mm/min, 搅拌头转速为 1 000 r/min 时, 接头抗拉强度最高可达

收稿日期: 2009-11-10; 修回日期: 2009-12-17

作者简介: 黄万群, 1975 年出生, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为新材料及特种焊接技术。E-mail: hwanqun@gmail.com

到母材 AZ31B 的 90.5%。接头各区域组织差异很大,前进侧热影响区组织呈层状分布且较宽。当工艺参数不恰当时,该区域层间易产生氧化物和杂质的富集。夹杂层的存在和应力集中是造成接头在前进侧热力影响区力学性能下降的主要原因。

文献[6]采用 3 kW 的 CO₂ 激光束对 AZ31、AM60、ZK60 异种镁合金进行焊接。结果表明,焊接速率为 2 m/min 时,所有接头的焊缝都较宽;焊接速率为 3.5 m/min 时,熔合区内出现严重的分层现象,其中一种母材为 ZK60 时,分层现象尤为显著。ZK60 与另外两种镁合金连接时,接头的抗拉强度略低于 ZK60 母材;其中一种母材为 AZ31 时,接头的抗拉强度高于母材。AZ31 基体金属中未见明显的部分熔化区,AM60 及 ZK60 侧熔合线延伸至基体金属中,形成较宽的部分熔化区。除 AM60/ZK60 接头外,其余异种镁合金接头熔合区内 Al、Zn 的浓度分布比较均匀,AM60/ZK60 熔合区内出现 Al、Zn 的浓度梯度。

研究表明,采用搅拌摩擦焊及激光焊可以实现异种镁合金间的连接。其他焊接方法焊接异种镁合金目前还未见报道。对于同种镁合金焊接比较成功的方法如活性 TIG 焊进行异种镁合金的焊接还有待研究。

2.2 镁合金/铝合金的焊接

随着镁合金的广泛应用,不可避免地会遇到镁合金和铝合金的连接问题^[7]。Mg 和 Al 的表面容易形成氧化膜(MgO、Al₂O₃),焊缝中极易形成大量的 Mg-Al 系脆性金属间化合物,采用一般的焊接工艺难以得到良好的焊接接头^[8]。

文献[9]针对 AZ31B 镁合金与 LY12 铝合金进行了搅拌摩擦焊技术研究,结果表明,适宜的焊接工艺参数下,AZ31B/LY12 搅拌摩擦焊接是可行的。同时镁铝合金的片层结构由于材料的彼此挤压而相互挤入,发生明显的变形,从而导致焊接接头的力学性能较母材有所降低。镁/铝异种合金的搅拌摩擦焊接规范带比较窄,只有在严格控制规范参数的情况下,才能获得优质的焊接接头。

柳绪静、刘黎明等人对 AZ31B 镁合金及 6061 铝合金板材分别进行了激光-TIG 复合热源和 TIG 焊接^[7]。结果表明,TIG 焊接镁和铝形成连续的金属间化合物层,导致镁和铝接触的界面开裂,不能实现有效连接。激光-TIG 复合热源由于其焊接速度率和对熔池的快速搅拌作用,使镁和铝形成的金属间化合物由连续的层状变成弥散的状态,改善了异种金属镁和铝的焊接性。镁和铝激光-TIG 复合热源焊接的焊缝成形均匀美观。

文献[10]研究了 MB3 镁合金与 1060 铝合金的

搅拌摩擦焊接。结果表明,可以实现这两种合金的连接,并可得到外观形貌良好的接头;镁合金在搅拌过程中呈层状嵌入到铝合金基体中,这种层状结构中出现的微小空洞靠近镁合金的一侧,同时在连接界面还发现了狭长的中间层;接头附近存在的脆性金属间层状物导致接头力学性能显著下降。

Kwon 等人对厚度为 2 mm 的 AZ31B-O 镁合金与 A5052P-O 铝合金板进行了搅拌摩擦焊接^[11]。当旋转速率为 1 000、1 200、1 400 r/min 时均可获得无缺陷的焊缝,随旋转速率的增大,焊缝更光滑。连接界面附近出现镁合金与铝合金的混合组织,说明在机械搅拌作用下,连接界面附近的镁铝合金母材发生了物质转移。接头最大抗拉强度为 132 MPa,为 A5052P-O 铝合金母材的 66%,旋转速率的变化对抗拉强度的影响不大。

镁合金与铝合金通过真空扩散焊^[12]、爆炸焊^[12]、搅拌摩擦焊^[13-14]可以实现一定强度的连接,但是接头强度仍有待于提高。而镁合金和铝合金的熔化焊接,如熔化极气体保护焊、电子束焊,遇到很大的困难^[15]。镁合金与铝合金很难采用普通的熔焊方法实现有效的连接。镁和铝的熔点分别为 651 和 660℃,在熔焊时不可避免地要发生两种液态金属的接触,液态金属之间的反应速度远远大于固态金属,镁和铝之间易于生成大量金属间化合物。激光-TIG 复合热源作为一种熔焊方法,之所以能形成异种金属镁和铝的焊接接头,与其高的焊接速率是分不开的。高的焊接速率大大减少了形成金属间化合物的时间,也就减少了金属间化合物的量。并且由于电弧和激光快速的复合搅拌作用使金属间化合物分布比较弥散,改变了 TIG 焊中金属间化合物连续层状分布的存在状态,使异种金属镁和铝的焊接成为可能^[7]。

2.3 镁合金/钢的焊接

随着镁合金的应用增多,镁和钢的连接问题受到了国内外广大学者的关注^[16]。但二者熔点差异较大,镁合金的熔点为 447-649℃^[17],高、中、低碳钢及不锈钢的熔点分别为 1 289-1 487、1 380-1 514、1 382-1 529 和 1 375-1 475℃^[17],熔点的显著差异使它们很难同时达到熔融态。它们的晶格类型也不同,镁是密排六方结构,钢在熔融态是体心立方结构,从而造成它们在液态极难互溶。并且 Mg 与 Fe 不反应^[18]。基于以上原因,采用传统的熔化焊接方法很难实现两者的有效连接^[16]。

单闯、宋刚等人对 AZ31B 变形镁合金和 Q235 钢采用激光-TIG 复合热源的焊接方法进行焊接^[16]。结果表明,焊接过程中,TIG 电弧熔化了位于上层的镁合金,没有熔化位于下层的钢板。在激光熔化下层钢板的瞬间,使液态镁合金和液态钢相互混合,从而

实现了两者的连接。在焊接过程中,随着激光功率的增大、焊接速率的减小,焊缝抗拉强度随之增大;随着激光离焦量的增加,焊缝抗拉强度呈现先增大后减小的特点;而 TIG 电流的变化对焊缝抗拉强度影响不大。在合适的工艺参数下,能够得到成形良好、力学性能优良的镁/钢焊接接头。

文献[19]采用纯 Ni 作为中间层对 AZ31B 镁合金与 Q235 钢进行了激光-TIG 复合焊,与不加中间层时比较,加入 Ni 中间层后,AZ31B/Q235 激光-TIG 复合焊接头剪切强度明显提高,其连接界面出现金属间化合物 Mg_2Ni 及 Ni 在 Fe 中的固溶体,Ni 中间层的加入改变了接头的连接模式,研究认为,AZ31B/Q235 直接连接时为机械连接,而加入 Ni 中间层后,为半冶金连接。

文献[18]采用激光-GTA 复合焊对 AZ31B 镁合金和 304 钢进行了连接。结果表明,可以获得镁合金与钢的搭接接头。在镁合金与钢连接过程中,Mg 扩散进入钢基体中形成界面过渡区,在界面过渡区内有氧化物存在。剪切测试中,接头断在镁合金与钢的界面上,研究认为,镁/钢界面上的金属氧化物是接头力学性能较低的主要原因。

目前,钢和铝合金、铜合金、钛合金等有色金属之间的连接技术已经日趋成熟,但钢和镁合金的连接还处在研究的初期阶段。镁合金/钢异种材料焊接的研究主要集中在激光-电弧复合热源焊接,通过电弧与激光的相互作用,可提高能量利用率,实现高速焊接,而且激光脉冲瞬间具有高能量密度,对熔化金属存在剧烈的搅拌作用。将激光-电弧复合热源的焊接方法运用到镁和钢的连接中,利用其能量利用率高、瞬间能量密度高的特点,可以使镁和钢在极短的时间内同时熔化而形成有效的连接^[16]。

2.4 镁/铜及其合金的焊接

Mg-Cu 双金属件正广泛应用于电子、电力、电器、机械及汽车工业中,其研究与应用已从航海及军事领域向高附加值的民用产品延伸,如汽车、计算机及通讯设备。为达到减重及产品多重性能的目的,在不久的将来,在某些场合 Mg-Cu 双金属件将替代钢^[20]。

文献[21]对 AZ31B 镁合金与 T2 纯铜进行了搅拌摩擦焊接。结果表明,在适当的焊接工艺参数下,搅拌摩擦焊可以实现纯铜与镁之间的连接。距焊缝中心越远的特征点到达温度峰值的时间越晚,温度峰值越低,搅拌头轴肩边缘附近温度梯度最大。纯铜与镁的搅拌摩擦焊接头中,焊合区涡流状交迭形貌反映了搅拌摩擦焊过程中金属塑性流动行为。若焊接工艺参数不当,焊接过程中热输入不够,焊接接头中

容易产生孔洞缺陷。

Liu Liming 等人对 AZ31B 镁合金与 Cu 采用搭接形式进行 TIG 焊^[22]。AZ31B 镁合金与 Cu 进行直接搭接 TIG 焊时,在界面区出现金属间化合物,认为金属间化合物是导致接头脆化的主要原因。AZ31B/Cu 接头抗拉强度约为 25 MPa。采用 Fe 板作为中间层进行 AZ31B 镁合金与 Cu 的 TIG 焊,接头脆化现象明显减弱,接头抗拉强度达 70 MPa。

Mahendran 等人采用扩散连接工艺对 5 mm 厚的 AZ31B 镁合金与 3 mm 厚的 Cu 合金进行连接^[20]。在 500℃、12 MPa,保持 15 min 时,由于在镁/铜合金接头界面形成合适厚度的扩散层,接头剪切强度最高。

Mg、Cu 表面易生成高熔点氧化膜,熔焊时易在焊缝中产生夹杂。而且采用传统的熔焊技术焊接 Mg/Cu 时,接头易生成脆性金属间化合物,并且容易引起热裂纹。因此,采用熔化焊很难实现 Mg/Cu 的连接^[20]。固相焊接技术可以避免熔焊时的焊接性缺陷,如搅拌摩擦焊、扩散焊可以实现 Mg/Cu 及合金的焊接。

2.5 镁合金/钛的焊接

Ti 和 Mg 都具有密排六方结构,相互不能形成固溶体,并且 Ti 及其合金的熔点(1 477-1 682℃)高于 Mg 的沸点(1 363℃)。因此,通过熔化焊接方法很难实现二者的连接。

文献[23]对板厚为 2.5 mm 工业纯钛轧制材及 AZ31B 镁合金挤压材进行了搅拌摩擦焊接。结果表明,当搅拌头前进方向在 AZ31B 侧,后退方向在 Ti 侧时,形成的焊缝较好,而且不易着火。当焊具旋转速率达 1 500 r/min,搅拌头位置偏 Ti 板侧 0.8 mm 及 1.2 mm 时,接头未发现缺陷。结果表明,焊接界面中的 Ti 侧由于热影响和搅拌力的作用,晶粒发生变形,而 AZ31B 侧由于搅拌发生了晶粒的动态再结晶,晶粒变得比母材晶粒直径(20-30 μm)小,晶粒直径大多在 10 μm 以下。当焊具转速为 1 500 r/min,搅拌头位置偏 Ti 侧 1.2 mm 条件下,接头抗拉强度最大,达 156 MPa,为 AZ31B 母材强度的 65%。断裂均发生在 AZ31B 在 Ti 上的凝附处,断裂面为延性断裂组织。研究认为,焊接工具搅拌头位置偏向 Ti 侧,以 AZ31B 为前进方向进行搅拌,可实现钛和镁异种金属的焊接。

Masayuki 等^[24]对 AZ 系列镁合金 AZ31B、AZ61A、AZ91D 与 Ti 进行了搅拌摩擦焊接。结果表明,这几种镁合金与 Ti 接头界面上都形成了 Ti-Al 金属间化合物层,金属间化合物层的厚度随镁合金中 Al 含量的增加而增大,接头的抗拉强度随 Al 量的增

加而减小。接头断裂于金属间化合物层内。研究认为,金属间化合物层在镁合金/Ti 接头形成过程中起重要作用,但增大金属间化合物层厚度,接头抗拉强度降低。

由于 Mg 与 Ti 热物理性能的显著差异,采用普通的熔化焊接技术很难实现 Mg 与 Ti 的连接。从少量文献可以看出,采用固相焊接技术,如搅拌摩擦焊可以实现 Mg/Ti 及其合金的连接。对于其他固相焊接技术,如加中间层的扩散连接技术,采用合适的中间层,其熔点低于 Mg、Ti 的熔点,利用中间层熔化而母材(Mg、Ti)不熔化,熔化中间层材料与两侧母材发生扩散反应实现 Mg/Ti 及其合金的连接。

3 结语

镁合金与其他金属及合金异种金属焊接问题的研究才刚刚起步,从现有的文献能够看出,镁合金异种金属的连接采用普通的焊接方法很难实现。搅拌摩擦焊作为一种新的固相焊接技术,在异种金属连接方面具有独特的优势,必将在镁合金异种金属焊接方面发挥作用。激光-电弧复合热源焊接技术是一种节能、高效的先进连接技术,近年来,在镁合金焊接研究方面受到极大关注。

参考文献

[1] 潘际璠. 镁合金结构及焊接[J]. 电焊机, 2005, 35(9):1-7

[2] 徐杰, 刘子利, 沈以赴, 等. 镁合金焊接的研究与发展[J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(1):21-26

[3] 陈振华, 严红革, 陈吉化, 等. 镁合金[D]. 北京: 化学工业出版社, 2004

[4] 黄伯云. 我国有色金属材料现状及发展战略[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5):122-127

[5] 王希靖, 张永红, 张忠科. 异种镁合金 AZ31B 与 AZ61A 的搅拌摩擦焊工艺[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(7):1199-1204

[6] Quan Yajie, Chen Zhenhua, Gong Xiaosan, et al. CO₂ laser beam welding of dissimilar magnesium-based alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 496A:45-51

[7] 柳绪静, 刘黎明, 王恒, 等. 镁铝异种金属激光-TIG 复合热源焊接性分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(8):31-34

[8] 刘鹏, 李亚江, 耿浩然, 等. Mg/Al 异种金属的焊接研究现状[J]. 焊接技术, 2006, 35(2):1-3

[9] 谷建军, 刘小文. AZ31B/LY12 的搅拌摩擦焊研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(1):52-53

[10] 王快社, 王训宏, 沈洋, 等. MB3 镁合金与 1060 铝合

金搅拌摩擦焊接研究[J]. 热加工工艺, 2005, 9:29-31

[11] Kwon Y J, Shigematsu I, Saito N. Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys[J]. Materials Letters, 2008, 62:3827-3829

[12] 里亚博夫 B P. 铝及铝合金与其它金属的焊接[D]. 王义衡, 赵瑞湘译. 北京: 宇航出版社, 1990

[13] Sato Yutaka S, Park Seung Hwan C, Michiuchi Masato, et al. Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(9):1233-1236

[14] Somasekharan A C, Murr L E. Microstructures in friction stir welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2004, 52(1):49-64

[15] 中国机械工程学会焊接学会. 焊选手册(第2卷, 第2版)[D]. 北京: 机械工业出版社, 2001

[16] 单闯, 宋刚, 刘黎明. 激光-TIG 复合热源焊接参数对镁/钢异种材料焊接接头的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(6):57-60

[17] Materials Data Book. Cambridge: Cambridge University Engineering Department. 2003:9

[18] Liu L M, Zhao X. Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser-GTA hybrid welding[J]. Materials Characterization, 2008, 59:1279-1284

[19] 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

[20] Mahendran G, Balasubramanian V, Senthilvelan T. Developing diffusion bonding windows for joining AZ31B magnesium and copper alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42:689-695

[21] 陈剑辉, 刘小文. T2 纯铜与 AZ31B 镁合金搅拌摩擦焊技术[J]. 焊接技术, 2008, 37(2):29-31

[22] Liu Liming, Wang Shengxi, Zhao Limin. Study on the dissimilar magnesium alloy and copper lap joint by TIG welding[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 476A:206-209

[23] 高兴国. 用摩擦搅拌焊接法对纯钛与 AZ31 镁合金焊接性能的研究[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(12):44-45

[24] Masayuki Aonuma, Kazuhiro Nakata. Effect of alloying elements on interface microstructure of Mg-Al-Zn magnesium alloys and titanium joint by friction stir welding[J]. Materials Science and Engineering, 2009, 161B:46-49

(编辑 吴坚)