

# 不同介质水蒸气等离子弧焊接 7A52 铝合金接头组织性能研究

Microstructure and Properties of 7A52 Aluminum Alloy Welded Joints of Different Medium Aqueous Vapor Plasma Arc

马世宁, 罗 林, 刘 谦, 邱 骥

(装甲兵工程学院 装备再制造工程系, 北京 100072)

MA Shi-ning, LUO Lin, LIU Qian, QIU Ji

(Faculty of the Remanufacturing Engineering,

Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

**摘要:** 利用水蒸气等离子弧焊切设备, 选择水及不同比例丙酮水溶液等作为电弧介质对 7A52 铝合金进行焊接, 对不同介质水蒸气等离子弧的轴向电弧吹力进行测试, 对不同介质水蒸气等离子弧焊接 7A52 铝合金接头的组织和性能进行分析研究。结果表明: 丙酮浓度越大, 轴向电弧吹力越大, 焊缝熔深越深; 随着丙酮的添加, 电弧的氧化性降低, 有利于提高焊接质量, 丙酮含量为 40% (体积分数) 时焊接接头性能最好, 焊缝组织比较均匀; 接头热影响区存在不同程度的硬化和软化区域, 这与轴向电弧吹力大小、电弧热量传导速度、热影响区组织中强化相转化以及时效状态密切相关。

**关键词:** 7A52 铝合金; 水蒸气等离子弧; 电弧介质; 电弧吹力; 微观组织

**中图分类号:** TG406; TG456.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2010)04-0036-06

**Abstract:** Pure water and different medium aqueous plasma arc were used to weld 7A52 aluminum alloy plate of 6mm thickness. The arc force of different medium aqueous plasma arc was measured. The microstructure and properties of 7A52 aluminum alloy welded joints of different medium aqueous vapor plasma arc were studied. The results indicate the higher the acetone, the larger the arc force and the deeper the penetration. The oxidizability of the plasma arc is decreased with the increasing of the acetone, which can improve the quality of the welded joint. The aqueous vapor with acetone concentration of 40% (volume fraction) presents the optimum properties and microstructure for the welded joints. There was harden and soften zone in the HAZ(heat affected zone), which is mainly related to the arc force, the conducting speed of arc heat, the conversion of the strengthen phase and the aging state.

**Key words:** 7A52 aluminum alloy; vapor plasma arc; arc medium; arc force; microstructure

水蒸气等离子弧是电弧等离子体技术的新发展<sup>[1]</sup>, 它是利用水或其他介质水溶液通过焊枪内蒸发器的作用产生气体介质, 该气体介质在电场作用下产生电弧。由于焊枪喷嘴的机械压缩效应, 喷嘴内涡流导向槽形成旋转气流套的热收缩效应以及等离子束本身磁力而产生的磁收缩效应, 使弧柱的收缩一直达到和枪体内部的气体膨胀力平衡为止, 从而形成了稳定的水蒸气等离子弧。该技术设备体积小、质量轻、便携性好、机动性高, 非常适合野外或应急条件下的焊接作业。

7A52 铝合金是近年来国内新研制的中强可焊铝合金结构材料, 该合金熔铸方便, 成形性好, 经轧制能

获得比较理想的板材, 通过适当的固溶及回归再时效处理, 可获得优良的综合性能, 已批量应用于军用装备、航空航天器与地面车辆等焊接构件<sup>[2-4]</sup>。目前该类合金的焊接主要采用金属焊条惰性气体保护焊 (Metal Inertia Gas, MIG) 和搅拌摩擦焊, 这两种焊接技术各有特点, 均能实现对 7A52 铝合金的焊接, 但由于 MIG 焊需要专用电源和气瓶, 设备牵连大; 搅拌摩擦焊对工装要求较严, 设备繁重。这两种技术的便携性和机动性较差, 不能满足野外或应急条件下的焊接维修作业。所以, 探索新的焊接方法在 7A52 铝合金应急维修中的应用是非常必要和迫切的。

1 实验

人工时效状态(CS), 抗拉强度  $\sigma_b \geq 410\text{MPa}$ , 伸长率  $\delta \geq 7\%$ 。焊件尺寸为  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 6\text{mm}$ , 焊丝 ER5356, 直径  $\phi 3\text{mm}$ , 基体及焊丝主要化学成分如表 1, 2 所示。

实验材料为 6mm 厚 7A52 铝合金板材, 状态为淬火

表 1 7A52 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 7A52 aluminum alloy

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Zr
Mass fraction/ %	0.25	0.30	0.05-0.2	0.2-0.5	0.15
Element	Cr	Ti	Zn	Mg	Al
Mass fraction/ %	0.15	0.15	4.0-4.8	2.0-2.8	Bal

表 2 ER5356 焊丝化学成分

Table 2 Chemical composition of ER5356 filler

Element	Si	Fe	Cr	Mn	Zn
Mass fraction/ %	0.25	0.40	0.15-0.25	0.2-0.5	0.10
Element	Cu	Ti	Mg	Other	Al
Mass fraction/ %	0.10	0.05-0.15	4.5-5.5	0.05-0.15	Bal

焊接设备采用水蒸气等离子弧焊电源及专用焊枪, 坡口  $60^\circ$ , 对接单面一次焊完。焊完后沿焊缝横向进行取样, 制取金相试样和拉伸试样, 在 CSS-2210 1 电子万能试验机上进行拉伸实验; 在 BX41 型光学金相显微镜上观察微观组织。腐蚀液为  $5\text{mLHNO}_3 + 3\text{mLHF} + 92\text{mLH}_2\text{O}$  溶液。

水蒸气等离子弧轴向电弧吹力采用 U 型玻管气压计进行检测。其示意图如图 1 所示。将焊枪垂直置于工件正上方, 将喷嘴垂直正对测量孔, 孔径为  $0.8\text{mm}$ , 钨极尖锥角为  $60^\circ$ , 工件为厚度  $20\text{mm}$  的紫铜板, 利用乳胶软管将紫铜板上的导出管与 U 型玻管气压计相连, 轴向电弧吹力通过玻璃管内水柱的液面差  $\Delta H$  换算获得。测量时水蒸气等离子电弧固定不变, 紫铜板可以纵向和横向移动。

和 60% (体积分数, 下同) 丙酮水溶液, 其轴向电弧吹力测试结果如图 2 所示。可以看出, 两种喷嘴孔径下, 纯水介质水蒸气等离子弧轴向电弧吹力最小, 随着丙酮浓度的增加, 轴向电弧吹力随之增加; 相同条件下, 喷嘴孔径越小, 轴向电弧吹力越大。

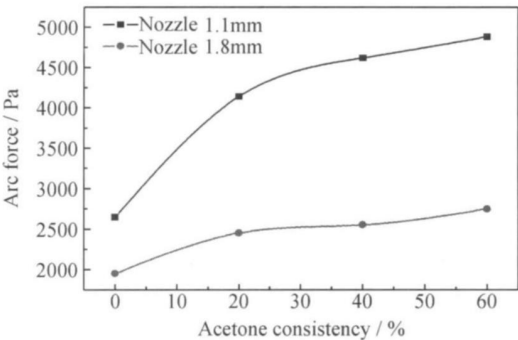


图 2 电弧吹力随电弧介质的变化规律

Fig. 2 Axial arc force vs arc consistency

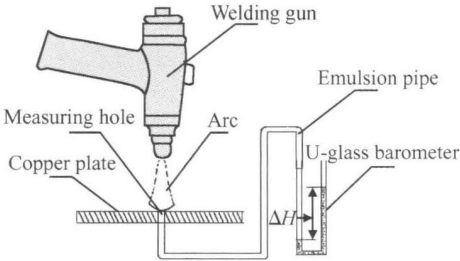


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of test set

2 实验结果

2.1 轴向电弧吹力

水蒸气等离子弧电弧介质分别为纯水, 20%, 40%

2.2 焊缝宏观形貌

不同介质水蒸气等离子弧 7A52 铝合金焊缝横截面宏观形貌如图 3 所示。可以看出, 电弧介质为纯水时, 7A52 铝合金焊缝的熔深最浅(见图 3(a)), 随着丙酮浓度的增加, 7A52 铝合金焊缝的熔深也逐渐加深, 丙酮浓度为 60% 时, 焊缝出现熔透现象(见图 3(d))。对比几种焊缝的横断面可知, 当丙酮浓度为 40% 时, 焊接接头熔合最好(见图 3(c))。从焊缝宏观形貌看不出焊缝存在明显的焊接缺陷。

2.3 焊缝微观组织

7A52 铝合金的微观组织是典型的轧制组织, 经淬

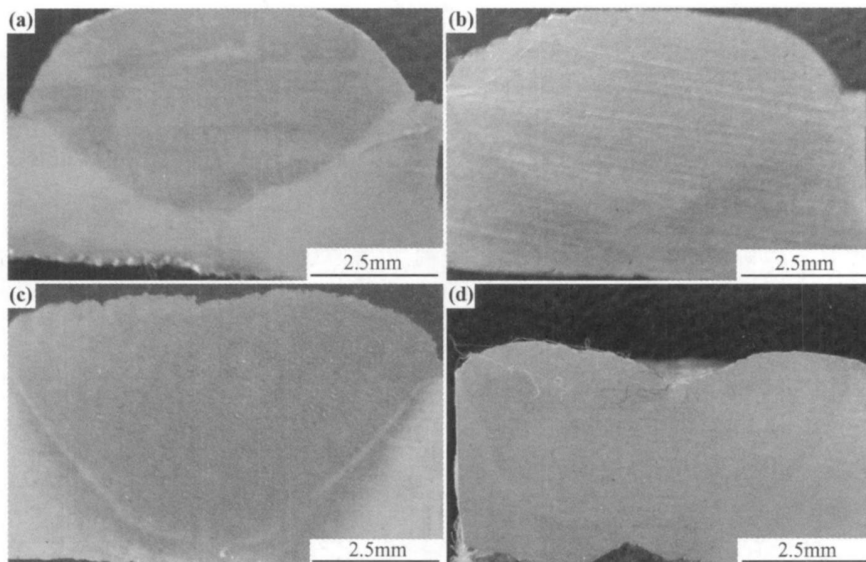


图3 不同介质电弧焊缝横截面宏观形貌

(a) 纯水介质电弧焊缝; (b) 20% 丙酮介质电弧焊缝

(c) 40% 丙酮介质电弧焊缝; (d) 60% 丙酮介质电弧焊缝

Fig. 3 Section macrographs of different medium vapor plasma arc welding joints

(a) joint of pure water; (b) joint of 20% acetone arc

(c) joint of 40% acetone arc; (d) joint of 60% acetone arc

火与人工时效处理后, 轧制组织由再结晶组织与变形的带状板条 $\alpha + \tau$ 相组织组成, 如图4所示。7A52铝合金的主要强化机制是析出强化, 其主要强化相是亚稳相 $\eta$ 相, 合金强度主要由 $\eta$ 相的大小、数量和弥散度决定<sup>[5, 6]</sup>。

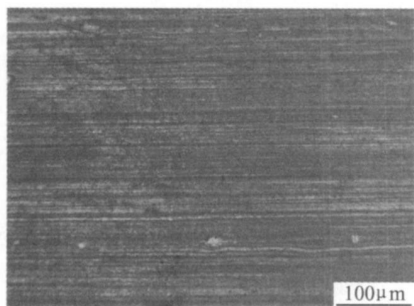


图4 7A52 铝合金微观组织

Fig. 4 Microstructure of 7A52 aluminum alloy

不同介质水蒸气等离子弧 7A52 铝合金焊接接头内均包括焊缝区 WZ(Weld Zone)、熔合区 FZ(Fusion Zone) 及热影响区 HAZ(Heat Affected Zone)。其微观组织如图5所示。

在水蒸气等离子弧高温作用下, 焊丝及 7A52 铝合金基材边缘迅速熔化, 形成液态焊缝金属熔池, 并随后冷却和凝固, 形成焊缝区(如图5中右侧图所示)。可以看出, 焊缝中晶粒为等轴的块状晶, 且大小不一,

为 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体, 在块状晶粒上存在大量的黑色点状析出物质, 为 $\tau(\text{Al}_2\text{Zn}_3\text{Mg}_3)^{[7]}$ 相和 $\eta(\text{MgZn}_2)$ 相。40% 丙酮介质电弧焊缝组织最为均匀, 晶界呈串珠状分布, 为析出的 $\beta(\text{Mg}_5\text{Al}_8)$ 相(见图5(f)中箭头所指)。而其他介质电弧焊缝组织较不均匀, 焊缝晶粒较大, 晶界呈细线状分布<sup>[8]</sup>(见图5(b), (d), (h)中箭头所指)。其中纯水介质焊缝中存在明显的气孔, 组织最不均匀(见图5(b))。

熔合区是焊缝区与未熔化基材之间存在的一个过渡区域, 该区由于焊接时温度高, 冷却时速度快, 易发生局部过热、偏析物集聚、产生熔合区气孔(见图5(a))及晶界液化裂纹等现象。添加丙酮的水蒸气等离子弧焊接接头熔合区熔合良好, 未发现异常的气孔、夹渣、裂纹等焊接缺陷。

## 2.4 焊缝强度

水蒸气等离子弧焊接时, 不同电弧轴向吹力对熔池的形成及搅拌作用各不相同, 本工作在其他参数相同条件下, 考察不同电弧介质对焊缝抗拉强度的影响, 实验结果如图6所示。由图6可以看出, 纯水介质焊缝抗拉强度最小, 丙酮浓度为40%时, 焊缝的抗拉强度最高, 平均为250.3MPa。丙酮浓度为20%和60%时, 焊缝的抗拉强度均低于丙酮浓度为40%时焊缝的抗拉强度。

## 2.5 接头显微硬度

不同介质水蒸气等离子弧 7A52 铝合金焊接接头

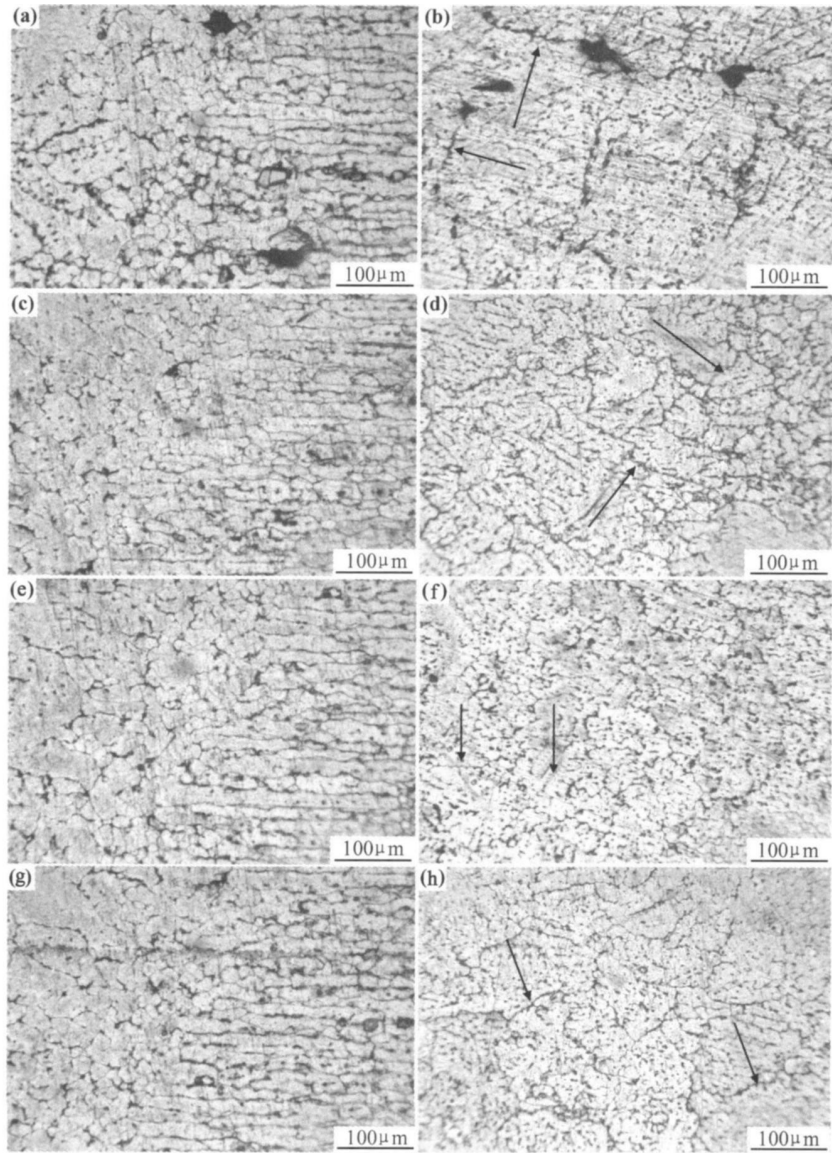


图5 不同介质电弧 7A52 铝合金焊缝微观组织

- (a) 纯水介质电弧接头熔合区; (b) 纯水介质电弧接头焊缝区;  
(c) 20% 丙酮介质电弧接头熔合区; (d) 20% 丙酮介质电弧接头焊缝区;  
(e) 40% 丙酮介质电弧接头熔合区; (f) 40% 丙酮介质电弧接头焊缝区;  
(g) 60% 丙酮介质电弧接头熔合区; (h) 60% 丙酮介质电弧接头焊缝区;

Fig. 5 Microstructure of 7A52 aluminum alloy welded joints of different aqueous medium

- (a) FZ of pure aqueous medium arc joint; (b) WZ of pure aqueous medium arc joint;  
(c) FZ of 20% acetone aqueous medium arc joint; (d) WZ of 20% acetone aqueous medium arc joint;  
(e) FZ of 40% acetone aqueous medium arc joint; (f) WZ of 40% acetone aqueous medium arc joint;  
(g) FZ of 60% acetone aqueous medium arc joint; (h) WZ of 60% acetone aqueous medium arc joint

显微硬度如图 7 所示。

由图 7 可以看出: (1) 焊缝显微硬度均低于 7A52 铝合金基材; (2) 在热影响区靠近焊缝的微区, 显微硬度均明显升高, 高于 7A52 铝合金基材, 且随着丙酮浓度的增加, 该微区宽度逐渐变宽; (3) 在热影响区内均存在软化区域, 电弧介质不同其软化程度也不相同。

2.6 焊缝断口

以丙酮浓度为 40% 为例, 其 7A52 铝合金焊接接头拉伸断口形貌如图 8 所示。可知断口断裂于焊缝区, 断口上可见明显的韧窝形貌, 大韧窝的平均直径在 30μm 左右, 小韧窝的平均直径在 10μm 左右, 断口存在明显的延性棱, 符合延性断裂的微观特征, 显示焊缝断口具有较好的塑性。焊缝的总体断裂形式为韧性断裂。

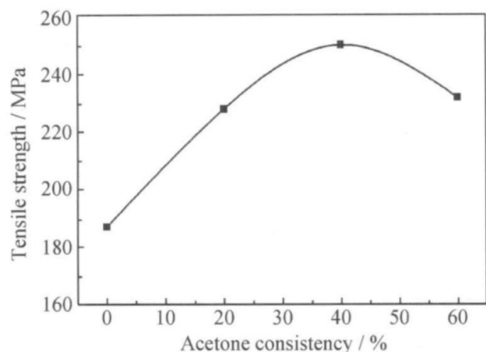


图6 焊缝抗拉强度与电弧介质的关系

Fig. 6 Tensile strength vs acetone consistency

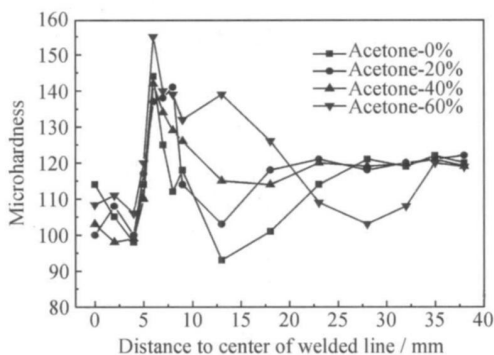


图7 不同介质电弧焊接接头显微硬度

Fig. 7 Microhardness of welded joints of different aqueous medium

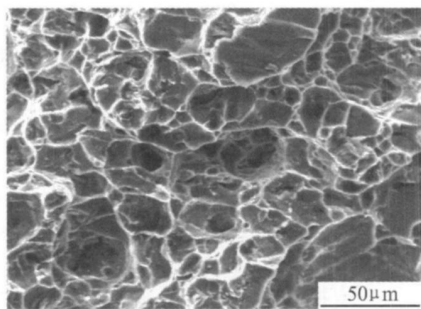


图8 40%丙酮介质7A52铝合金焊缝断口形貌

Fig. 8 Fractograph of 7A52 aluminum alloy welded joint of 40% acetone aqueous medium

### 3 分析与讨论

轴向电弧吹力是电弧等离子流对熔池表面产生的垂直冲击作用力,它是电弧气体密度及等离子流轴向速度的函数,可表示为<sup>[9]</sup>:

$$P_z = \frac{1}{2} \rho u_z^2 \quad (1)$$

式中:  $P_z$  为轴向电弧吹力, Pa;  $\rho$  为电弧气体密度,  $L/m^3$ ;

$u_z$  为等离子流轴向速度,  $m/s$ 。

当水中加入丙酮后溶液的沸点降低,在相同加热功率条件下,添加丙酮的溶液较纯水沸腾较快,导致产气量快速增加,气流增大,故而轴向电弧吹力增大<sup>[1]</sup>。当丙酮浓度达到一定浓度后,产气量增加速度变缓,气流增大趋势减弱,等离子流速增速逐渐减缓。此外,在相同产气量、相同枪体内部压力条件下,随着喷嘴孔径的缩小,其对水蒸气等离子弧的机械压缩作用增强,弧柱截面面积减小,导致电弧弧柱电流密度增大,等离子流流速增加。由式(1)可知,轴向电弧吹力随着等离子流流速和弧柱电流密度的增大而增大。故而出现如图2中所示曲线变化趋势。

随着丙酮浓度的增加,水蒸气等离子弧轴向电弧吹力越大,其对熔池的冲击力也越大。在其他参数相同条件下,电弧吹力越大,熔池越深。但电弧吹力过大时,对焊缝成形不利,可能出现熔透现象(见图3(d))。

由于水蒸气等离子弧电弧空间存在大量的氢、氧粒子,电弧氧化性较强,纯水介质电弧的氧化性最强,当其中加入不同比例的丙酮时,水蒸气等离子弧电弧空间中碳离子所占比例增加,氢、氧离子所占比例减小,导致电弧性质发生了变化,电弧具有一定程度的碳弧特性<sup>[10]</sup>,氧化性降低。此外,随着丙酮的加入,水蒸气等离子弧轴向电弧吹力逐渐增加,其对熔池的冲击和搅拌作用增强,有利于增加熔深,提高熔合比,有利于焊缝中气体的排出,减少气孔的生成。所以,图5中纯水介质焊缝中存在明显的气孔,而添加丙酮后焊缝中气孔减少,接头质量明显提高,丙酮浓度为40%时焊缝的抗拉强度较纯水电弧焊缝提高了近三分之一。此外,ER5356焊丝是高Mg合金焊丝,具有一定的脱氧效果,也有利于7A52铝合金的焊接。

在热影响区靠近熔合区的微区,由于水蒸气等离子弧的高温特性,该微区在焊接时由于峰值温度高及随后的快速冷却,导致该处强化相 $\eta'(MgZn_2)$ 来不及转化为平衡相 $\eta(MgZn_2)$ ,固溶体过饱和,导致该区发生固溶时效硬化,硬度升高。而在距熔合区较远的微区,由于铝合金的高导热性,焊缝向外部的传导热对该处持续作用时间较长,强化相逐渐脱离固溶体而转化为平衡相 $\eta(MgZn_2)$ ,且脱溶析出后继续长大,故导致该处出现软化现象<sup>[11]</sup>。比较几种介质电弧7A52铝合金焊接接头显微硬度分布规律,可以发现,丙酮浓度越高其固溶微区越宽,软化微区距熔合区也越远。主要原因就在于随着电弧轴向电弧吹力的增大,焊接时对熔池的搅拌作用较强,致使电弧热快速沿基材向远处传递,导致该处高温持续时间较长,该处的强化相有足够的温度和时间向平衡相转化。所以,水蒸气等离子

弧电弧介质不同,其焊接接头热影响区中硬化、软化区域的程度和宽度各不相同。

综上所述,由于不同介质水蒸气等离子弧的氧化性不同、轴向电弧吹力不同以及铝合金独特的焊接特点,目前还只能定性地分析不同介质水蒸气等离子电弧与 7A52 铝合金焊接接头组织和性能之间的关系。对于接头热影响区显微硬度的复杂变化,焊接热循环作用导致该处强化相  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) 的脱溶及晶粒长大是其内因,而轴向电弧吹力导致熔池的搅拌及焊接热的传递则是其外因。

## 4 结论

(1) 纯水介质水蒸气等离子弧轴向电弧吹力最小,随着丙酮浓度的增加,轴向电弧吹力逐渐增大,其对熔池的冲击和搅拌作用逐渐增强,焊缝熔池的熔深逐渐加深。

(2) 在其他工艺参数相同条件下,丙酮的添加有利于降低水蒸气等离子弧的氧化性,能有效提高 7A52 铝合金焊接质量和接头性能;纯水介质水蒸气等离子弧焊缝存在气孔、夹渣等焊接缺陷,而添加丙酮后,7A52 铝合金焊接接头质量明显提高,焊缝中焊接缺陷明显减少。

(3) 7A52 铝合金不同介质水蒸气等离子弧焊接接头热影响区中均存在硬化和软化区域,其硬化区域宽度随着丙酮浓度的增加而逐渐变宽。这与轴向电弧吹力大小、电弧热量传导速度、热影响区组织中强化相转化以及时效状态密切相关。

## 参考文献

- [1] 胡春红, 胡绳荪, 鲍加铭. 不同介质微束水蒸气等离子弧的切割性能[J]. 焊接, 2003, (1): 15–17.
- [2] THOMAS W M, NICHOLAS E D. Friction stir welding for the transportation industries[J]. Materials and Design, 1997, 18(6): 269–273.
- [3] DAWES C J, THOMAS W M. Friction stir process welds aluminum alloys[J]. Welding Journal, 1996, 75(3): 41–45.
- [4] JOEL J D. The friction stir welding advantage[J]. Welding Journal, 2001, 80(5): 30–34.
- [5] 黄兰萍, 陈康华, 李松, 等. 高温预析出对 Al-Zr-Mg 铝合金组织、力学性能和应力腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 727–733.
- [6] CHEN Kang-hua, HUANG Lan-ping. Strengthening toughening of 7××× series high strength aluminum alloys by heat treatment[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(3): 484–494.
- [7] 余进, 王克鸿, 徐越兰, 等. 7A52 铝合金双丝焊接头的组织及性能[J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 87–89.
- [8] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] RICHARDSON I M. The influence of ambient pressure on arc welding processes a review[A]. Physical Aspects of Arc Welding [C]. Glasgow: IIW SG 212: Physics of welding, 1993. 43–68.
- [10] 胡绳荪, 鲍家铭, 孟英谦, 等. 不同介质微束水蒸气等离子弧的气流形态与电弧力[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 1–3.

基金项目: 装备再制造技术国防科技重点实验室基金资助项目 (9140C8504020808)

收稿日期: 2009-07-20; 修订日期: 2010-01-05

作者简介: 马世宁(1941–), 男, 教授, 博士生导师, 从事装备表面工程及装备维修等方面的研究, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号装甲兵工程学院表面工程研究所 (100072), E-mail: mashining@263.net

通讯作者: 罗林, 电话: 010-66718873, E-mail: llblm@sohu.com

(上接第 35 页)

- [2] YASUHIRO H, TATSUO T. コンクリートブロック体接合部のシーリング方法[P]. 日本专利: 09-96019, 1997-04-08.
- [3] TAKESHI K, KENICHI M. 水膨脹ゴム組成物および水膨脹ゴム止水材[P]. 日本专利: 07-138413, 1995-05-30.
- [4] 胡海华, 李锦山, 王振华, 等. 高吸水膨胀橡胶的研制[J]. 世界橡胶工业, 2008, 35(10): 24–27.
- [5] 韩燕蓝, 王群, 何培新. 吸水膨胀橡胶的改性研究进展[J]. 橡胶工业, 2005, 52(4): 251–255.
- [6] 张书香. 吸水膨胀材料的研究进展和应用进展[J]. 工程塑料应用, 2000, 2(5): 36–39.
- [7] 许临, 李芳, 付红旗. 遇水膨胀橡胶的研制及应用进展[J]. 中国建筑防水, 2000, (2): 27–29.
- [8] 刘岚, 向洁, 罗远芳, 等. WSR 的研究进展[J]. 高分子通报, 2006, (9): 23–29.

- [9] 周文英, 齐暑华, 安群力, 等. 吸水膨胀橡胶研究进展[J]. 合成橡胶工业, 2007, 30(1): 68–72.

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2008CDB285); 湖北省教育厅科学研究计划重点资助项目(D20081501)

收稿日期: 2009-05-14; 修订日期: 2010-01-22

作者简介: 李秀辉(1984–), 男, 硕士研究生, 从事高吸水功能高分子材料研究, 联系地址: 武汉工程大学材料科学与工程学院(430073), E-mail: lxhxx2003022313@163.com

通讯作者: 吴江渝(1977–), 男, 博士, 教授, 从事生物医用高分子材料和高吸水功能高分子材料研究, 联系地址: 武汉工程大学材料科学与工程学院(430073), E-mail: wujy@mail.wit.edu.cn