

# 镀锌钢板脉冲电弧钎焊接头界面组织及性能研究

Interfacial Structure and Properties of Galvanized Steel Sheet Joined by Pulsed Arc Brazing Process

于治水, 李瑞峰  
(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)  
YU Zhi-shui, LI Rui-feng  
(College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**摘要:** 采用脉冲钨极氩弧钎焊使用 CuSi3 钎料对镀锌钢板进行连接。主要研究脉冲频率变化对接头界面组织和力学性能的影响。实验结果表明, 当电弧脉冲频率由 100Hz 增加到 2000Hz 时, 电弧钎焊熔池的搅拌和冲刷作用效果逐渐增强, 促进了界面须状金属间化合物的破碎行为和熔池成分过冷区域的增加, 使得钎料区域内部 Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>(Cu) 强化相数量不断增多, 弥散宽度变宽, 由 40μm 增加到 120μm, 接头显微硬度最大值也相应增加, 由 175MPa 增加到 204 MPa。  
**关键词:** 镀锌钢板; 电弧钎焊; 脉冲频率; 界面组织  
**中图分类号:** TG454   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-4381(2008) 09-0025-03

**Abstract:** The galvanized steel sheet is joined by pulsed arc brazing process, the joint interfacial structures and properties of the joints at different pulse frequencies are studied. It can be seen that the agitation and brushing action of the molten pool is increasing with the increasing of pulse frequencies ranging from 100 Hz to 2000 Hz, then the whisker-like intermetallic compound fragmentation behavior is strengthened and the constitutional super cooling zone is broadened from 40μm to 120 μm. At last, the dispersal quantity and width of fine Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>(Cu) particles are increased in brazing joint which lead to the improvement of the joint mechanical properties, and the maximum micro-hardness of the interfacial zone is elevated from 175 MPa to 204 MPa.

**Key words:** galvanized steel sheet; arc brazing; pulsed frequency; interfacial structure

电弧钎焊是一种利用电弧加热焊件和填充钎料的钎焊方法<sup>[1]</sup>, 兼有钎焊和电弧焊的特点<sup>[1, 2]</sup>。与普通电弧熔化焊相比, 电弧钎焊具有以下明显的优势: 接头的力学强度高, 焊接热影响区小, 成形美观, 对表面光洁度要求不高, 焊后不用清洗, 节能高效易于实现自动化等。在对薄板、热敏感性高的金属材料、防磁隔磁部件或是存在金属表面涂层材料进行连接时能显示其独特的优点。日本、欧洲的一些厂家在汽车部件及电器制造上, 已经大量采用了这种钎焊方法<sup>[3, 4]</sup>。

目前很多相关研究已经发现采用铜基钎料电弧钎焊连接镀锌钢板时, 接头的强度高于母材的强度<sup>[3, 4]</sup>。但是这些研究只是针对其电弧钎焊设备及工艺进行研究, 很少有研究涉及到电弧钎焊接头得到强化的原因。同时也未见针对脉冲频率变化对镀锌钢板连接时的微观组织和力学性能影响的相关报道。因此本工作采用

CuSi3 作为填充金属连接镀锌钢板, 其中着重研究脉冲频率变化时界面的显微组织以及接头的强化机理。

## 1 实验材料及方案

实验中母材均为镀锌钢板, 尺寸为 40mm × 40mm × 2mm, 钎料选用 CuSi3( Cu: 97, Si: 3, 质量分数/ % ), 称取 200mg, 并弯成环状。实验前所有材料用酒精和丙酮清洗干净。

在本研究中, 为获得电弧钎焊时 CuSi3 钎料和母材之间的界面反应情况, 采用钨极氩弧( TIG )电弧在镀锌钢板表面加热钎料使之熔化并在母材上润湿铺展和母材进行反应, 即 TIG 钎焊方法。在 TIG 钎焊工艺中, 焊接基值电流  $I_0$  为 20A, 峰值电流  $I_p$  为 80 A, 占空比为 50%, 即  $t_0 = t_p$ , 燃弧时间  $t$  为 4s, 电压  $U$  为

11.1~11.2V, 脉冲频率  $f$  分别为 100, 500, 1000Hz 和 2000Hz, 各参数示意图如图 1 所示。电弧钎焊实验采用 Fronius 焊机(FK-2600)完成, 电源采用直流正接方式, 保护气体为纯氩, 其流量为 12L/min。

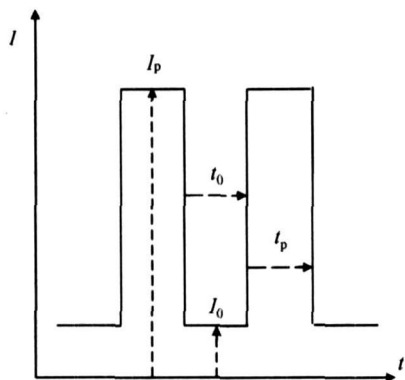


图 1 脉冲电流的基本参数

Fig. 1 Basic parameters of pulsed arc current

TIG 钎焊试样被割断后, 打磨抛光, 对界面分别进行扫描电镜(JXA840A)和能谱分析(OXFORD-7573)确定界面元素成分和显微组织。并且通过 M400H1 显微硬度机(LECO)确定截面显微硬度。显微硬度测试时每个试样测量从钎缝到母材的区域, 在每个测量点分别读取 5 次硬度值, 然后取其平均值。

实验中载荷皆为 10g(0.098N), 载荷持续时间为 1s。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 微观组织分析

图 2 为镀锌钢板/CuSi3 钎料脉冲频率不同时的电弧钎焊接头显微组织照片, 其中左侧为镀锌钢板, 右侧为 CuSi3 钎料。由图 2 可以看出在右侧的钎料区内部有呈球状或花状的深灰色颗粒相存在, 前期研究已经证明此强化相为  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  相, 并且发现由于此强化相的存在接头的强度得到了一定程度的强化<sup>[5]</sup>。

图 2a 是脉冲频率为 100 Hz 时的钎焊接头显微组织。从图 2a 可以看出, CuSi3 钎料与母材镀锌钢板之间有一道界面清晰的区域即为钎缝微观界面, 在钎缝界面的右边大约 40  $\mu\text{m}$  的范围内, 零星的存在着几个球状或花状  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  金属间化合物颗粒, 其数量较小, 尺寸也不大。

图 2b 是脉冲频率为 500 Hz 时的钎焊接头显微组织。相对图 2a 来说, 图 2b 实验中所用频率略有增大, 但钎缝微观界面组织中  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相的分布仍然较少, 且尺寸不大, 呈小球状个别呈花状, 同样分布在靠近界面层的地方, 主要集中在离界面层约 40  $\mu\text{m}$  的范围以内。

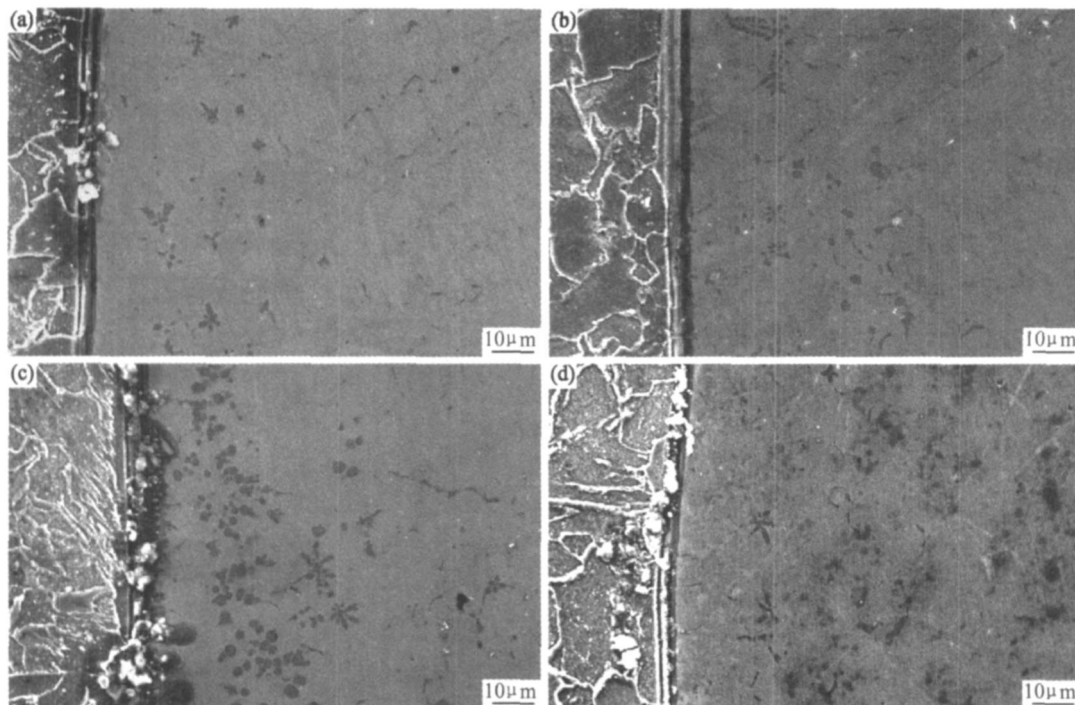


图 2 脉冲频率变化对接头显微组织的影响

(a)  $f = 100\text{Hz}$ ; (b)  $f = 500\text{Hz}$ ; (c)  $f = 1000\text{Hz}$ ; (d)  $f = 2000\text{Hz}$

Fig. 2 Effect of pulse frequency on microstructure of brazing joint

(a)  $f = 100\text{Hz}$ ; (b)  $f = 500\text{Hz}$ ; (c)  $f = 1000\text{Hz}$ ; (d)  $f = 2000\text{Hz}$

图 2c 是脉冲频率为 1000 Hz 时的钎焊接头微观组织。从图 2c 中发现, 在  $\text{CuSi}_3$  钎料微观组织中分布着大量  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相, 相对图 2a, b 中的  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相颗粒来说尺寸较大, 数量多, 呈小球状和星状, 并且分布的宽度也有所增加, 达到 60~80  $\mu\text{m}$ 。

图 2d 是脉冲频率为 2000 Hz 时的钎缝接头微观组织情况。从图 2d 中可以明显发现, 在右边  $\text{CuSi}_3$  钎料区弥散分布着大量的  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相, 分布范围较广, 不仅存在于靠近钎缝界面层, 在远离界面层处也同样分布着大量  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相, 且个别  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相颗粒的尺寸相比图 2a, b, c 明显的增大, 呈花瓣状。

由图 2 可以看出  $\text{CuSi}_3$  钎缝区内  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相随脉冲频率增加时的分布和生长过程。在频率相对较低时(频率为 100, 500Hz), 钎料区域内部逐渐产生一定的  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相, 但  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相的分布较少, 且大多靠近界面层; 当脉冲频率较大时(频率为 1000, 2000Hz),  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相大量产生, 数量增加很快, 由刚开始的球状逐渐长大呈星状和花瓣状, 且分布区域更广。

## 2.2 显微硬度分析

前期铜基钎料电弧钎焊连接镀锌钢板的接头拉伸实验结果已经表明, 连接后的拉伸断口一般产生在母材一侧<sup>[5]</sup>。为表明电弧钎焊频率对接头钎缝区域力学性能的影响, 本研究采用了对钎缝区域进行显微硬度测量的方法, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 对于采用 4 种脉冲电弧频率的电弧钎焊试样, 都在界面附近显微硬度值达到最大值, 也就是说界面的硬度高于熔化钎料区域和镀锌钢板母材区域。另外由图 3 也可看出, 其他脉冲参数相同的条件下, 当脉冲频率增加时其钎缝显微硬度的最大值不断增加, 由 175 MPa 增加到 204 MPa, 同时钎缝被增强的区域宽度也不断增加, 由宽度为 40  $\mu\text{m}$  增加到 120  $\mu\text{m}$ , 也就是说随脉冲电弧频

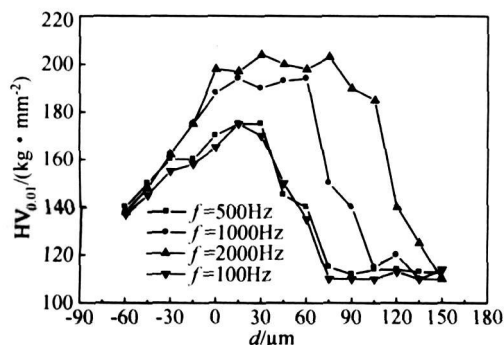


图 3 电弧钎焊接头显微硬度实验结果

Fig. 3 Micro-hardness test results of the brazed joints

率的增加, 钎焊接头的强化作用得到增强。这和上述界面微观组织的分析结果也是一致的。

## 3 讨论

前期研究表明在镀锌钢板进行电弧钎焊连接时, 当在接头的内部弥散分布  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相时, 镀锌钢板的电弧钎焊接头得到了一定的强化, 使得接头的力学性能高于母材的力学性能。并且发现  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  的来源主要分为两个方面, 分别为钎料/镀锌钢板界面须状金属间化合物破碎作用, 以及钎料内部的 Fe 原子的溶解-析出作用。本工作认为在高频脉冲的作用下促进了以上两个作用<sup>[5,6]</sup>。

在焊接高频脉冲电流作用下, 由于脉冲电流在峰值电流和基值电流之间形成周期性变化, 引起电弧压力也周期性变化, 当峰值电流高时, 电弧压力大, 熔池表面的液体呈凹状; 当处于基值电流时, 电弧压力小, 熔池表面呈凸状, 从而导致熔池液体的上、下振动, 使熔池液体发生强烈搅拌作用, 其作用远远大于未施加脉冲电流时的效果。并且随脉冲频率的增加搅拌作用的效果也不断增加<sup>[7,8]</sup>。

而在脉冲电流作用下的熔池液体的搅拌作用一方面增强了熔池内原有的对流, 增大了液体流动, 降低了温度梯度, 扩大了固液界面前沿的成分过冷区域, 并使得 Fe 原子和 Si 原子有机会充分接触, 因此增加了钎料区域内部形成  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  的机会, 增加了形核核心, 使得钎料区域内部的  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  增强相的数量不断增加。

另一方面根据材料力学的基本理论可以看出, 在交变应力作用下, 材料的疲劳极限与其静强度极限  $\sigma_b$  之间存在如公式 (1) 所示的关系<sup>[9]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{-1}^{\text{静}} &\approx (0.4 \sim 0.5) \sigma_b \\ \sigma_{-1}^{\text{拉-压}} &\approx (0.33 \sim 0.59) \sigma_b \\ \tau_{-1}^{\text{静}} &\approx (0.23 \sim 0.29) \sigma_b \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由上述关系可以看出, 在交变应力作用下, 材料抵抗破坏的能力显著下降。因此由脉冲电流产生的强交变对流作用可促进镀锌钢板/钎料界面上生长出的须状  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  金属间化合物发生低应力断裂。并且随着脉冲电流频率的增加也就是加载次数的增加, 须状金属间化合物破碎的几率增加。这些破碎的金属间化合物在熔池搅拌的作用下将其带到固液界面前沿的成分过冷区中, 促进了  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  相的非均质形核, 因此增加了钎料内部  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  金属间化合物的形核核心, 使得  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  增强相的数量分布增多。

(下转第 31 页)

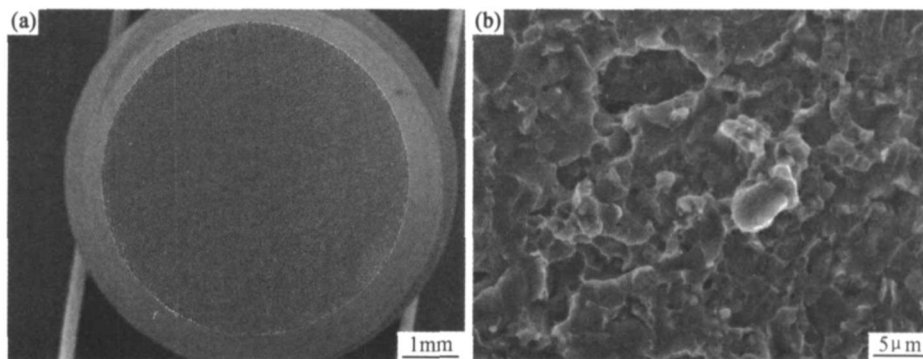


图 4 常规 Ti600 拉伸试样断口 (a) 宏观形貌; (b) 微观形貌

Fig. 4 Fractograph of the normal Ti600 sample after tensile test

(a) macroscopic morphology; (b) microscopic morphology

为 5M Pa 时, 能够实现置氢质量分数 0.4% Ti600 合金的良好扩散连接, 界面孔洞完全弥合, 拉伸强度高达 1013.32M Pa, 为等条件下母材强度 96%。

#### 参考文献

- [1] 林莺莺, 潘洪泗, 李森泉. 钛合金的氢处理技术及其对超塑性的影响[J]. 材料工程, 2005, (5): 60-64.
- [2] 侯红亮, 李志强, 王亚军, 等. 钛合金热氢处理技术及其应用前景[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 533-549.
- [3] 张振祺, 洪权, 杨冠军, 等. Ti600 高温钛合金蠕变前后的组织变

化[J]. 材料工程, 2000, (10): 18-21.

- [4] 张振祺, 罗国珍, 洪权, 等. Ti600 合金的性能与显微组织的研究[J]. 航空材料学报, 1999, 19(4): 6-10.
- [5] 洪权, 戚运莲, 赵永庆, 等. 加工工艺对 Ti600 合金板材组织性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(8): 1334-1337.

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-18

作者简介: 张蕾(1978—), 女, 工程师, 现从事新型材料钎焊扩散焊方面研究工作, 联系地址: 北京 340 信箱 102 室(100024)。E-mail: amber7078@163.com

(上接第 27 页)

## 4 结论

(1) 界面微观组织和显微硬度分析结果表明随脉冲频率的增加, 接头的强化作用增强:  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相数量不断增多, 弥散宽度变宽, 其显微硬度值也相应增加。

(2) 由于脉冲电弧的交变冲击作用下, 电弧钎焊熔池的搅拌和冲刷作用效果增强, 促进了界面须状金属间化合物的破碎作用和熔池成分过冷区域的增加, 从而提高了钎料区域内部  $\text{Fe}_5\text{Si}_3(\text{Cu})$  强化相的数量和分布宽度。

#### 参考文献

- [1] 林三宝, 宋建岭. 电弧钎焊技术的应用及发展[J]. 焊接, 2007, 4: 19-21.
- [2] 于治水, 钱乙余, 王凤江, 等. Cu 基钎料电弧钎焊接头强度及断口分析[J]. 机械工程学报, 2001, 37(10): 88-92.
- [3] BOUAIFI B. Low-heat process enhance jointing of coated sheet

metals[J]. Welding Journal, 2003, (1): 26-31.

- [4] QUINTINO L, PIMENTA G, IORDACHESCU D, et al. MIG brazing of galvanized thin sheet joints for automotive industry[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21(1): 63-73.
- [5] YU Z S, LI R F, ZHOU F M, et al. Joint evolution and strengthening mechanisms in arc brazed galvanized steels with Cu97Si3 filler[J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(11): 1479-1483.
- [6] LI R F, YU Z S, QI K, et al. Growth mechanisms of interfacial compounds in arc brazed galvanized steel joints with Cu97Si3 filler[J]. Materials Science and Technology, 2005, 21(4): 483-487.
- [7] LACASTER J F. The physics of welding[M]. Oxford: Pergamon Press, 1986.
- [8] 徐强, 国旭明, 王宗杰, 等. 双脉冲 MIG 焊对 2219A+Cu 合金焊缝组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2004, 10: 3-5.
- [9] 单辉祖. 材料力学(II)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-14

作者简介: 于治水(1960—), 男, 教授, 博士, 现从事新材料连接技术, 联系地址: 上海市龙腾路 333 号上海工程技术大学材料工程学院(201620)。E-mail: yu\_zhishui@163.com