

# 钢铁材料溶解扩散焊界面组织及性能

翟秋亚<sup>1</sup>, 徐锦锋<sup>1,2</sup>, 钱翰城<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 材料学院, 西安 710048; 2. 西北工业大学 空间材料科学重点实验室, 西安 710072)

(3. 重庆大学 机械二系, 重庆 630044)

**摘要:** 钢铁材料在熔焊及快冷条件下容易产生硬质相及裂纹, 基材非熔化连接方法有利于解决这一难题。将液膜溶解扩散焊用于钢铁材料的连接, 研究了喷熔温度对钢铁材料溶解扩散焊界面组织和性能的影响。结果表明, 由液膜状态所表征的喷熔温度对接头组织和力学性能具有显著的影响。随喷熔温度的提高, 一方面, 界面 Ni、Fe 原子互扩散加剧, 界面扩散结合层厚度增大, 界面母材产生淬硬组织的倾向增大; 另一方面, 接头抗拉强度有所增加, 硬度值提高。在硬度分布曲线上, 硬度峰值位于界面处偏向热影响区的一侧。以静镜面状液膜状态对应的喷熔温度(700~800 °C)工艺性能和焊区性能最优。保持静镜面液膜状态可获得无白口和淬硬组织的焊接区。

**关键词:** 溶解扩散焊; 喷熔温度; 钢铁材料; 组织与性能

中图分类号: TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)05-84-03



翟秋亚

## 0 序 言

由于 Fe-C 合金所固有的相变特性, 焊接过程中焊缝和熔合区易产生白口和淬硬组织。针对母材的化学成分及组织特点, 选取适当的焊材进行焊条电弧焊或氩弧焊是工程中常用的方法。然而, 实践证明, 由于高温电弧所引起的母材熔化, 在快速冷却条件下, 很难避免焊接区中硬质相的产生, 从而恶化了该区的力学性能。将喷焊技术用以改进并应用于钢铁件及铜合金件的焊接始于 90 年代初, 并已进入工程应用。其特点是焊接过程中母材不熔化, 通过液态焊材溶解界面母材, 进行原子互扩散形成过渡固熔体而实现的一种冶金结合。因而消除了因母材熔化而产生的熔合区及其白口组织。由于焊接热能输入少, 热影响区基本上不产生淬硬组织。作者就该技术在应用中存在的关键技术难题进行了研究, 给出了最佳喷熔温度判别与控制技术。日本学者用普通喷焊方法进行了钢铁材料焊接试验研究<sup>[2,3]</sup>, 观察分析了焊缝组织与硬度的联系, 但没涉及喷熔温度与组织特征之间的内在联系。文中旨在弄清喷熔温度对焊接区组织和性能的影响。

## 1 试验方法及条件

用氧乙炔火焰做热源, 以自制镍基合金粉末为

焊材, 在尺寸为 300 mm×300 mm×40 mm 的板材表面加工出宽 30 mm、深 30 mm 的 V 型槽, 用 Spray-2/H 喷焊炬在 V 型槽表面进行焊接。试板材质分别为 Q235 钢、灰铸铁和球墨铸铁。按动镜面状(ST<sub>3</sub>), 静镜面状(ST<sub>2</sub>)和准镜面状(ST<sub>1</sub>)三种液膜状态控制喷熔温度<sup>[1]</sup>。三种液膜状态所对应的喷熔温度范围如图 1 所示<sup>[1]</sup>。其温度分别在 650~750 °C、700~800 °C、800~950 °C 之间。沿 V 型槽横向加工成单肩力学性能试棒。测试焊接区强度和硬度。按标准金相技术观察接头组织。

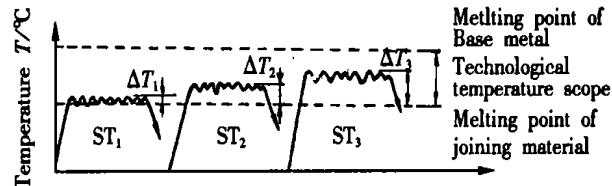


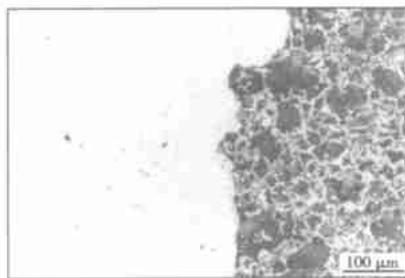
图 1 ST<sub>1</sub>、ST<sub>2</sub>、ST<sub>3</sub> 所对应的喷熔温度范围

Fig. 1 Scope of spray melt temperature for ST<sub>1</sub> (650~750 °C), ST<sub>2</sub> (700~800 °C), ST<sub>3</sub> (800~950 °C)

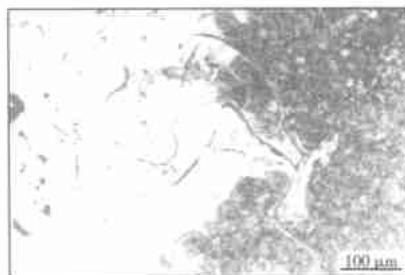
## 2 试验结果及分析

图 2 为扩散焊结合界面组织形貌, 焊缝均为镍基合金。由图可知, 界面母材不熔化, 仍保持原形貌特征。焊缝由  $\alpha$ -Ni 固溶体和晶间共晶体组成。在母材和焊缝金属之间(界面), 由于原子的互扩散, 形成了一定厚度的  $\alpha$ -(Ni-Fe) 固溶体过渡层,

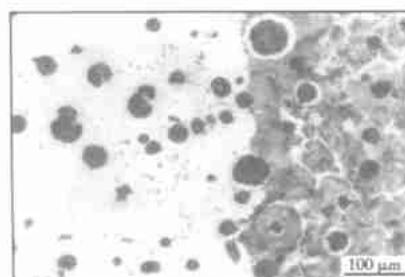
尺寸在  $50 \sim 200 \mu\text{m}$  范围。焊缝与母材结合良好。图3给出了界面原子互扩散分析结果。不难看出, Fe 原子由母材向焊缝一侧扩散, Ni 原子由焊缝向母材一侧扩散, 两者扩散方向相反, 形成相反的扩散梯度 ( $\frac{\partial \text{Ni}}{\partial x}, -\frac{\partial \text{Fe}}{\partial x}$ ), 并且, 在界面中央  $|\frac{\partial \text{Ni}}{\partial x}| < |-\frac{\partial \text{Fe}}{\partial x}|$ , 表明, Ni 原子的扩散通量  $J_{\text{Ni}}$  大于 Fe 原子的扩散通量  $J_{\text{Fe}}$ 。自制镍基合金粉末与钢铁材料具有很强的原子置换性, 易于实现较高的结合强度。由于焊缝金属和母材金属中 Si 的含量较低, 且在同一数量级, 因此, 界面 Si 浓度起伏不大, 曲线比较平滑, 原子扩散不显著。



(a) Q235 steel parent material



(b) Gray cast iron parent material



(c) Ductile cast iron parent material

图2 扩散焊结合界面

Fig. 2 Interface between matrix and weld

三种液膜状态  $\text{ST}_1$ 、 $\text{ST}_2$ 、 $\text{ST}_3$  所对应的接头组织如图4所示。图中, 母材为 HT250, 焊缝组织为  $\alpha$ —(Ni, Fe) 及少量低熔点共晶。图4a 喷熔温度低, 界面组织由未溶的块状珠光体、镍铁过渡固溶体及未溶石墨片组成, 热影响区因受热程度较轻, 未发生奥氏体化转变, 仍保持原珠光体的形貌特征。偶尔可见微小的晶间空洞和少量的非金属夹杂物。这主要

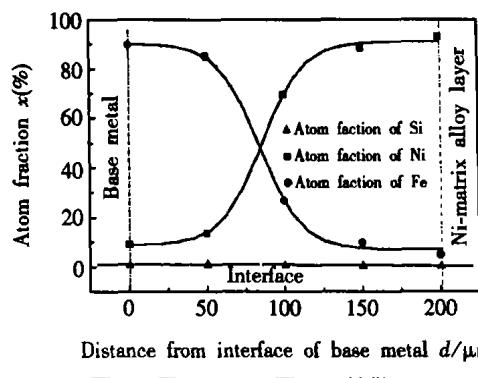


图3 界面 Ni、Fe 原子互扩散

Fig. 3 Mutual diffusion of Ni, Fe atoms at interface

与喷熔温度低, 合金粉材液化不充分, 液膜过热程度小, 粒间润湿性差, 粘度较大, 脱氧产物不易浮出等有关。b 中界面组织与 a 基本相同, 因喷熔温度稍高, 界面中岛屿状未溶珠光体量减少, 石墨片分解程度增大, 界面基体组织仍为珠光体, 但因喷熔温度的提高在石墨片周围产生了少量的铁素体。c 为动镜面状液膜状态所对应的热影响区近缝区的组织。由于喷熔温度较高, 界面母材受热程度严重, 在快速冷却条件下发生了部分奥氏体向贝氏体的转变。

(a)  $\text{ST}_1$  ( $650 \sim 750$  °C)(b)  $\text{ST}_2$  ( $700 \sim 800$  °C)(c)  $\text{ST}_3$  ( $800 \sim 950$  °C)

图4 液膜状态对界面组织的影响

Fig. 4 Effects of liquid film state on interface microstructure

图5为对应三种液膜状态所测出的焊接接头强度。准镜面液膜状态下施焊所获得的接头强度稍低。主要与喷熔温度低, 原子扩散驱动力小、焊缝存在少量粒间空洞有关。动镜面液膜状态下施焊时喷焊温度较高, 焊缝金属晶粒较为粗大, 接头强度提高不显著。而静镜面液膜状态焊接温度适中, 母材受热程度较小, 晶粒长大不严重, 焊缝中夹渣和孔洞很

少, 晶粒结合致密, 具有较高的抗拉强度。从焊缝中心向外围测试硬度, 发现焊接区硬度峰值处位于紧邻界面的母材热影响区上, 结果如图 6 所示。图 7 为三种液膜状态所对应的焊缝与母材结合界面硬度值。从中可见, 随着喷熔温度的提高, 结合界面处(无论偏向焊缝一侧还是母材一侧)的硬度值均有不同程度的升高。在  $ST_1 \sim ST_2$  温区, 硬度值升高幅度较小, 而从  $ST_2$  升温到  $ST_3$  时, 硬度值增幅较大。尤其是偏向母材一侧, 硬度值升幅达 60 HB。这是由于随着喷熔温度提高, 液膜状态由准镜面经静镜面到动镜面转化, 在焊缝与母材结合界面原子扩散的能量不断提高, Ni、Fe 原子互扩散加剧, 这样在结合界面偏向焊缝一侧, 形成  $\alpha$ -Ni-Fe 过渡固溶体, 较焊缝金属硬度有所提高。在结合面偏向母材一侧, 随喷熔温度的提高, 母材受热程度增加, 界面母材硬度值明显升高。当界面温度高于共析温度(钢为 723 °C, 铸铁为 810 °C)时, 界面母材奥氏体化, 在焊后的快速冷却过程中, 易形成淬硬组织如索氏体、贝氏体甚至马氏体等, 导致界面母材硬度值增大, 如图 7 所示。其结果使焊接区性能匹配性较差, 加工性能和使用性能受到影响。因此, 生产中通过控制液膜状态来控制焊接温度, 焊接过程保持静镜面液膜状态, 可实现高性能的连接。

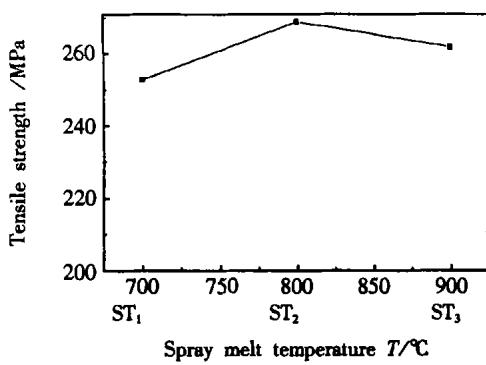


图 5 喷熔温度与抗拉强度的关系

Fig. 5 Relations between joint strength and spray melt temperature

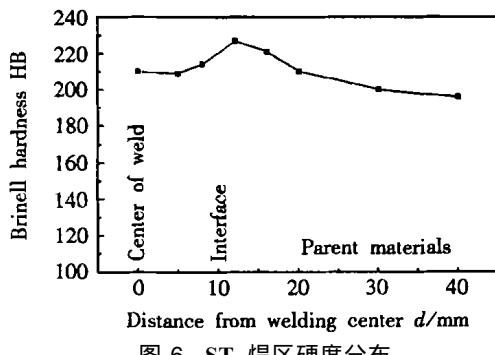


Fig. 6 Distribution of hardness in weld zone for  $ST_2$

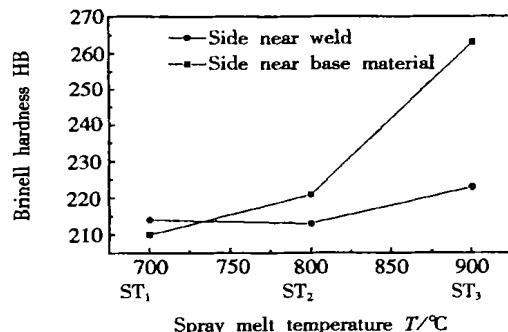


图 7 喷熔温度与界面硬度的关系

Fig. 7 Relations between interface hardness and spray melt temperature

在静镜面液膜状态下施焊, 接头结合强度与母材匹配性好, 界面母材不产生硬质相, 接头最高硬度与母材硬度相差小于 20 HB, 可满足钢铁件加工及使用性能要求。

### 3 结 论

(1) 液膜溶解扩散焊是一种基材不熔化、通过界面原子互扩散获得高强度连接的焊接方法。可满足钢铁材料焊接工艺性能和使用性能要求。

(2) 由液膜状态所表征的喷熔温度对接头组织和力学性能具有显著的影响。随喷熔温度的提高, 界面 Ni、Fe 原子互扩散加剧, 界面扩散结合层厚度增大, 界面母材产生淬硬组织的倾向性增大, 同时, 接头抗拉强度有所增加, 硬度值升高。在硬度分布曲线上, 硬度峰值位于紧邻界面的母材热影响区上。

(3) 以静镜面液膜状态所对应的喷熔温度(700 ~ 800 °C)工艺性能最优。保持静镜面液膜状态可获得无白口和淬硬组织的焊接区。

### 参考文献:

- [1] 徐锦锋, 翟秋亚, 魏兵, 等. 液膜溶解扩散焊最佳喷熔温度的判别与控制[J]. 铸造技术, 1996, (1): 13~16.
- [2] Yara H, Ikuta A, Fujiki D. Joining of cast iron used self-fluxing alloy coating[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1993, 11(4): 474~478.
- [3] Kamota S, Sakai M, Miyakoshi Y, et al. Bonding of ductile cast iron and mild steel with thermal spray coatings of Ni-Cr-C self-fluxing alloy [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1991, 55(4): 459~465.

**作者简介:** 翟秋亚, 女, 1963 年 9 月出生, 工学硕士, 讲师, 主要从事铸铁材料及其焊接性能方面的研究, 发表论文 20 余篇。Email: xujinf@public.xaonline.com