

## 氮氧联合过渡对 GPCA-TIG 焊焊缝的影响

黄 勇<sup>1,2</sup>, 王艳磊<sup>2</sup>, 张治国<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 针对外层引入氮氧混合气体的气体熔池耦合活性 TIG 焊, 通过改变焊枪内外喷嘴的相对位置, 分别研究了外层气体与熔池表面的耦合程度不同时焊缝成形、焊缝中氮氧含量及焊缝组织性能的变化规律。结果表明, 氮氧联合过渡时气体熔池耦合活性 TIG 焊焊缝窄而深; 低温冲击韧性高于母材及传统 TIG 焊的 7.5% 以上, 而抗拉强度和屈服强度均略低于母材; 焊缝组织晶粒细小, 奥氏体上沿晶界分布着少量铁素体。气体熔池耦合活性 TIG 焊焊缝中的氮氧含量可以通过调节焊枪内外喷嘴的相对位置进行微量控制。

关键词: 气体熔池耦合活性 TIG 焊; 氮氧联合过渡; 耦合度; 氮氧含量; 组织性能

中图分类号: TG 403 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)04-0001-04

## 0 序 言

近些年, 活性焊接法引起了世界范围内的广泛关注, 它是 20 世纪 60 年代发展起来的一种简单、高效、节能的焊接方法。兰州理工大学通过改变活性元素的引入种类和控制方式, 提出了一种活性焊接方法——GPCA-TIG 焊<sup>[1-3]</sup> (gas pool coupled activating TIG), 该方法采用内外两层气体进行 TIG 焊, 内层惰性气体保护熔池金属和钨电极, 外层活性混合气体引入元素 N 和活性元素 O, 通过调节外层活性气体与熔池金属耦合程度来微量调节元素 N 和 O 的引入区域和引入量, 可以方便地实现对焊缝成形和焊缝性能的控制。由于该方法不需要开发专用的活性剂材料, 焊接时不需要增加额外的活性剂涂敷工序和其它辅助工序, 操作简易, 并可实现焊接过程的全自动化, 保证焊接过程的稳定性, 突显了活性焊接方法低成本、高效率和高质的特点。

鉴于 O 和 N 元素过渡对焊缝成形和焊接质量的重要影响, 人们已给予了极大关注。但是关于氮氧联合过渡对焊缝组织性能的影响, 却没有人进行专门研究。Terashima 等人<sup>[4]</sup>发现当 GMAW 焊缝中氧含量低于 0.02% 时 O 元素引入都将由于促进针状铁素体形成而提高中低强度钢的冲击韧性, 而由于形成马氏体和贝氏体而引发裂纹使得高强钢的冲击韧性降低。Sato 等人<sup>[5]</sup>认为当焊缝中 O 元素含量

低于 0.002% 或在 0.4% ~ 0.5% 之间时焊缝冲击韧性较高。氮是奥氏体形成元素, 随着焊缝中 N 元素含量增加,  $\delta$  铁素体数量减少<sup>[6]</sup>。Bonnefois 等人<sup>[7]</sup>采用 Ar + N<sub>2</sub> 保护气体进行 A-TIG 焊时发现焊缝中 N 和 O 元素含量增加, 铁素体随着保护气体氮含量增加而增加, 焊缝韧性良好。Blake<sup>[8]</sup>指出, 在焊接过程中, 电弧与熔池中少量的 O 原子将有助于减少氮从熔池中的析出速率。Ogawa 等人<sup>[9]</sup>认为, 向保护气体中加入一定量的活性气体有助于抑制奥氏体焊缝中氮气孔的形成。Lancaster<sup>[10]</sup>的研究表明, 在电弧焊时 O 元素的存在, 使焊缝中氮含量明显增加。

文中通过调节焊枪内外喷嘴的相对位置改变 GPCA-TIG 焊的耦合程度, 分别对焊缝成形、焊缝中氮氧含量及焊缝组织性能进行分析, 综合分析氮氧联合过渡对气体熔池耦合活性 TIG 焊焊缝的影响规律。

## 1 试验方法

试验时分别采用直流正接 TIG 焊和 GPCA-TIG 焊进行表面熔焊, TIG 焊的保护气体为纯氩, GPCA-TIG 电弧的内层气体为纯氩, 外层气体采用 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的混合气体, 焊接工艺参数如表 1 所示。试验材料为 SUS304 不锈钢板, 规格尺寸为 200 mm × 80 mm × 8 mm。焊接前先用丙酮擦拭工件表面以除去表面油污, 然后用砂纸清理表面, 直到露出金属光泽为止。待焊件冷却至室温后, 进行制样、抛光和腐蚀, 对比不同耦合程度下 GPCA-TIG 与普通 TIG 焊的焊缝成形、截面形貌、焊缝力学性能及显微组织形态,

并检测不同耦合程度下焊缝内的氮氧含量,综合分析氮氧联合过渡对焊缝成形与组织性能的影响。

由于外层气体与熔池表面的耦合程度不易直接测量,用焊枪内外喷嘴的相对高度来表征。当内外

表 1 不同耦合度 GPCA-TIG 焊工艺参数

Table 1 Process parameters of GPCA-TIG welding under different coupling degrees

| 焊接电流<br>$I/A$ | 焊接速度<br>$v/(mm \cdot min^{-1})$ | 钨极直径<br>$d/mm$ | 钨极伸出长度<br>$L_1/mm$ | 钨极尖端角度<br>$\theta/(^\circ)$ | 电弧长度<br>$L_2/mm$ | 内层氩气流量<br>$Q_1/(L \cdot min^{-1})$ | 外层气体流量<br>$Q_2/(L \cdot min^{-1})$ | 内外喷嘴耦合度<br>$h$ |
|---------------|---------------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|
| 180           | 60                              | 2.4            | 3                  | 45°                         | 4                | 10                                 | 2.5+2.5                            | 0 或 +2         |

喷嘴的相对高度相差为  $x$  mm 时,定义其耦合度  $h = x$ ;当外喷嘴端面高于内喷嘴的时,耦合度为正值,反之为负值;当内外喷嘴平齐时,其耦合度为 0。

## 2 试验结果

### 2.1 焊缝成形与形貌

普通 TIG 焊与不同耦合度的 GPCA-TIG 焊焊缝形貌与截面形貌对比如图 1 所示。可知, GPCA-TIG 焊焊缝较窄,8 mm 厚的试板不开坡口一次性被焊透,焊缝表面有一层轻微氧化皮。耦合度为 +2 的 GPCA-TIG 焊焊缝表面成形质量高于耦合度为 0 的,其中焊缝表面熔渣较少,表面鱼鳞纹较均匀。

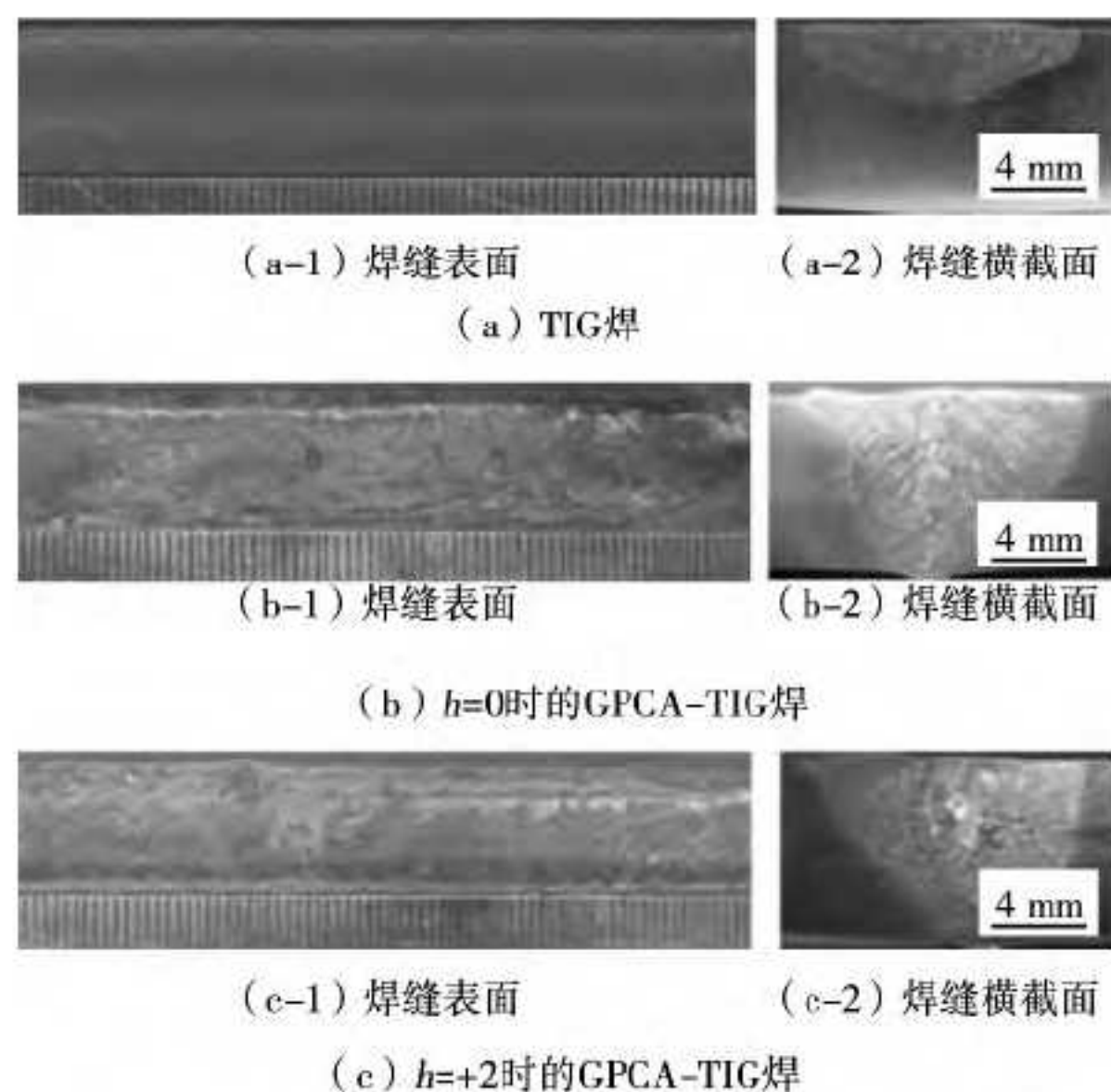


图 1 TIG 焊与不同耦合度 GPCA-TIG 焊的焊缝成形  
Fig. 1 Weld appearances of TIG welding and GPCA-TIG welding under different coupling degrees

### 2.2 焊缝中氮氧含量及铁素体含量测定

焊缝中氮氧含量及铁素体含量的多少,对焊缝的组织与性能有着重要影响。对 GPCA-TIG 焊在不同耦合度下的焊缝进行取样制备,分别依据国家标准 GB/T20124—2006《钢铁氮含量的测定惰性气体熔融热导法》,国家标准 GB/T11261—2006《钢铁氧

含量的测定脉冲加惰气熔融—红外线吸收法》,GB/T1954—2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测定方法》,利用氮氧分析仪与铁素体测试仪对焊缝中的 O、N 元素含量进行检测。结果见表 2,当耦合度为 0 时,N 元素与 O 元素联合过渡到焊缝中的含量高于耦合度为 +2 时的,N 元素含量相差 0.005%,O 元素含量相差 0.002%。由此可以看出,通过改变外层气体与熔池表面之间的耦合度  $h$ ,即调节焊枪内外喷嘴的相对位置,可以微量调节 GPCA-TIG 焊焊缝中的氮氧含量。

表 2 氮氧含量测试结果

Table 2 Measurement contents of nitrogen and oxygen elements as well as those of ferrite

| 编号 | 样品名称        | 耦合度<br>$h$ | 元素含量<br>$w$ (质量分数,%) |         |
|----|-------------|------------|----------------------|---------|
|    |             |            | N                    | O       |
| 1  | TIG 焊缝      | —          | 0.039                | 0.001 7 |
| 2  | GPCA-TIG 焊缝 | +2         | 0.056                | 0.005 8 |
| 3  | GPCA-TIG 焊缝 | 0          | 0.061                | 0.007 8 |

### 2.3 低温冲击性能

依据国家标准 GB/T229—1994《金属夏比缺口冲击试验方法》,分别对母材、TIG 以及不同耦合度下的 GPCA-TIG 焊在  $-40$  °C 环境中进行冲击试验,冲击试样的尺寸为  $55$  mm  $\times$   $10$  mm  $\times$   $5$  mm,结果如表 3 所示。可以看出,普通 TIG 焊的焊缝的低温冲击性能相对母材略有降低,而耦合度为 0 和 +2 时的 GPCA-TIG 焊焊缝低温冲击性能相对母材都有一定的提升,分别增加了 7.96%,7.59%。在耦合电弧 AA-TIG 焊中也发现,焊缝的低温冲击韧性高于母材的现象<sup>[11]</sup>。

表 3 冲击试验结果

Table 3 Results of impact test

| 编号 | 样品名称     | 耦合度 $h$ | 温度 $T/^\circ\text{C}$ | 冲击吸收功 $A_{KV}/J$ |
|----|----------|---------|-----------------------|------------------|
| 1  | 母材       | —       | -40                   | 88.30            |
| 2  | TIG      | —       | -40                   | 87.00            |
| 3  | GPCA-TIG | +2      | -40                   | 95.00            |
| 4  | GPCA-TIG | 0       | -40                   | 95.33            |

## 2.4 拉伸性能

依据国家标准 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》分别对母材、TIG 焊和不同耦合度下的 GPCA-TIG 焊焊缝在室温环境中进行拉伸试验. TIG 焊试样断裂的位置在靠近焊缝的热影响区,不同耦合度下的 GPCA-TIG 焊试样断裂在靠近偏母材的热影响区,有的断裂在母材处. 对拉伸试验结果求平均值,结果如表 4 所示,可以看出,焊缝的抗拉强度与屈服强度均略低于母材的强度,但基本能达到母材的 93% 以上. 耦合度的改变对焊缝拉伸性能有一定影响. 为了观察 GPCA-TIG 焊缝处断口形貌,人为得在焊缝处制造缺陷,对其拉伸断口进行 SEM 分析,结果如图 2 所示. TIG 焊与不同耦合度下的 GPCA-TIG 焊试样的断口形貌主要以韧窝为主,表现出韧性断裂的特征,但相对于 TIG 焊,两种耦合度下的 GPCA-TIG 焊缝断口韧窝大小较均匀,

表 4 拉伸试验结果

Table 4 Results of tension test

| 编号 | 样品名称     | 耦合度<br>$h$ | 屈服强度<br>$R_{eL}/\text{MPa}$ | 抗拉强度<br>$R_m/\text{MPa}$ |
|----|----------|------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1  | 母材       | —          | 475.0                       | 775                      |
| 2  | TIG      | —          | 464.0                       | 742                      |
| 3  | GPCA-TIG | +2         | 468.0                       | 772                      |
| 4  | GPCA-TIG | 0          | 446.5                       | 758                      |

尺寸较小.

## 2.5 焊缝显微组织

从图 3 可知,与传统 TIG 焊相比,GPCA-TIG 焊缝中心区域显微组织,在局部奥氏体基体上沿晶界明显分布着一些铁素体. TIG 焊焊缝中心区组织主要以等轴晶形式存在,同时还存在一些柱状晶. GPCA-TIG 焊耦合度改变对焊缝的组织影响不大,铁素体形态与大小略有不同.

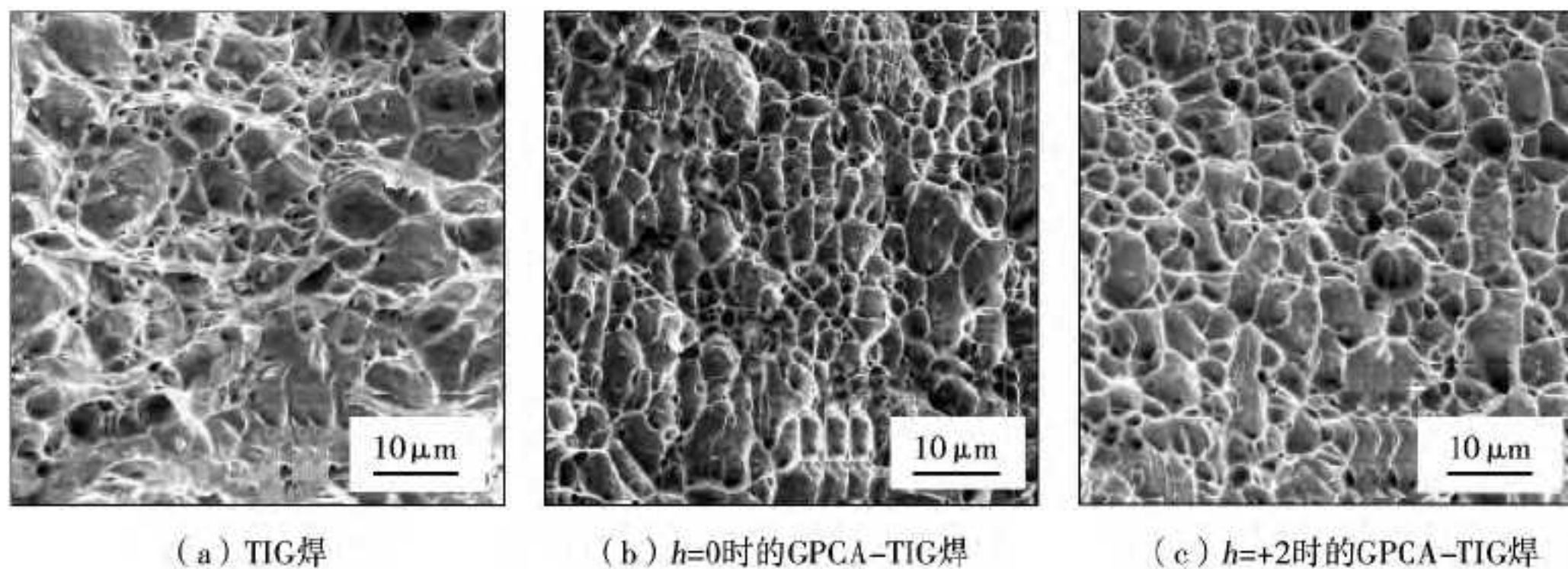


图 2 焊缝拉伸断口形貌

Fig. 2 Micro fracture appearances of tensile samples

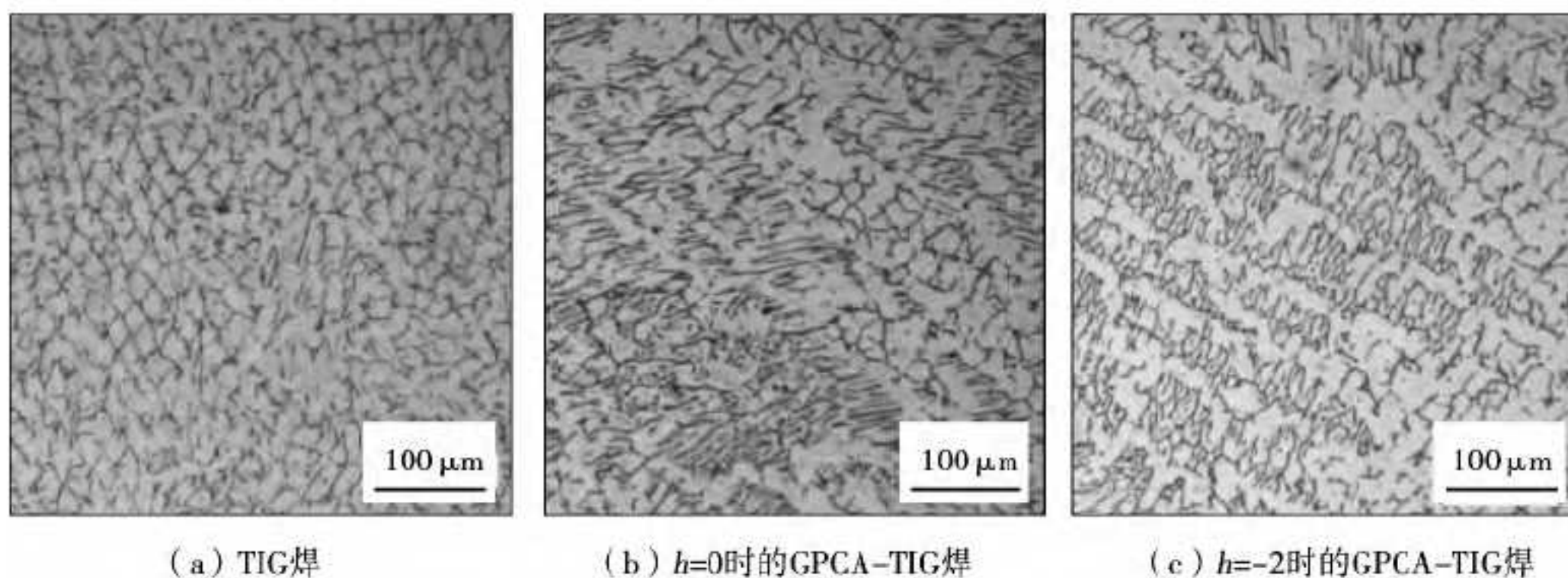


图 3 焊缝显微组织

Fig. 3 Weld microstructure

## 3 分析与讨论

GPCA-TIG 焊时,将  $\text{O}_2$  与  $\text{N}_2$  混合气体通过外

层气路引入到焊缝中,其低温冲击韧性 ( $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ) 高于母材的 7.5% 以上,屈服强度与抗拉强度均略低于母材,基本能达到母材强度的 93% 以上. 在其焊缝组织中,铁素体沿奥氏体晶界分布.

由于在奥氏体不锈钢中, N 是最有效的固溶强化元素之一. 当焊缝中的 N 原子主要以间隙固溶态存在时, 能够明显提高材料的抗拉强度与屈服强度, 改善焊缝的冲击韧性, 但是随着温度的下降, 氮在焊缝中的溶解减小, 室温时溶氮量不超过 0.001%<sup>[12]</sup>. 而 O 作为一种活性元素, 它的引入可使得焊缝熔池表面张力温度梯度改变, 从而导致熔池内液态金属流态改变, 显著增加焊缝熔深. 但是 O 元素的引入也将对焊缝的性能带来很大影响, 随着焊缝含氧量的增加, 其强度、塑性、韧性都有明显下降, 尤其是低温冲击韧性.

当氮氧联合过渡时, 氧与氮将在电弧外围低温区域 ( $< 7\,000\text{ K}$ ) 生成 NO, NO 在熔池金属表面将分解为氮和氧, 从而促进氮在熔池表面的吸附, 这将使得 N 原子在焊缝中的固溶量增加. 同时一定量的 N 元素与钢中的合金元素作用形成弥散相, 促使非自发晶核的固态质点增多, 造成结晶时的晶核数目大大增加, 从而提高了形核率, 细化晶粒, 导致焊缝的低温冲击韧性和抗拉强度性能得到提高<sup>[13]</sup>.

对 GPCA-TIG 焊, 当耦合度由 +2 改变为 0 时, 外层气体的挺度变差, 更多  $\text{N}_2 + \text{O}_2$  活性混合气体存在于电弧外围低温区域, 氧对氮吸附促进作用增强, 焊缝金属中氮的固溶度增加, 焊缝性能得到改善.

## 4 结 论

(1) 氮氧联合过渡时, 气体熔池耦合活性 TIG 焊熔深较深; 焊缝的低温冲击韧性高于母材 7.5% 以上, 屈服强度与抗拉强度略低于母材; 焊缝组织晶粒细小, 在奥氏体基体上沿晶界分布着少量的铁素体.

(2) 当耦合度发生改变时, 气体熔池耦合活性 TIG 焊焊缝中的氮氧含量随之发生改变, 气体熔池耦合活性 TIG 焊能够通过内外喷嘴相对位置, 微控制焊缝中进入的氮氧含量, 实现对焊缝成形和焊缝力学性能的控制.

## 参考文献:

- [1] 黄 勇, 刘瑞琳, 樊 丁, 等. 气体熔池耦合活性 TIG 焊接方法 [J]. 焊接学报, 2012, 33 (9): 13 - 16.
- Huang Yong, Liu Ruilin, Fan Din, *et al.* Gas pool coupled activating TIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33 (9): 13 - 16.
- [2] 黄 勇, 刘瑞琳. 气体熔池耦合活性焊接方法: 中国, 201110074844.7 [P]. 2011-08-17.
- [3] 黄 勇, 郝延召, 刘瑞琳. 耦合电弧钨极 GPCA-TIG 焊工艺 [J]. 焊接学报, 2014, 35 (3): 19 - 22.
- Huang Yong, Hao Yanzhao, Liu Ruilin. Investigation on coupling arc electrode GPCA-TIG welding process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35 (3): 19 - 22.
- [4] Terashima S, Bhadeshia H K D H. Changes in toughness at low oxygen concentrations in steel weld metal [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11 (5): 509 - 516.
- [5] Sato Y, Kuwana T. Mechanical properties of extremely low oxygen steel weld metal [J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1993, 11 (1): 113 - 119.
- [6] Woo I, Kikuchi Y. Weldability of high nitrogen stainless steel [J]. ISIJ International, 2002, 42 (12): 1334 - 1343.
- [7] Bonnefois B, Coudreuse L, Charles J. A-TIG welding of high nitrogen alloyed stainless steels: a metallurgically high-performance welding process [J]. Welding International, 2004, 18 (3): 208 - 212.
- [8] Blake P D. Nitrogen in steel welds metals [J]. Metal Construction, 1979, 11 (4): 196 - 197.
- [9] Ogawa T, Suzuki K, Zaizen T. The weldability of nitrogen-containing austenitic stainless steel: Part II-Porosity, cracking and creep properties [J]. Welding Journal, 1984, 63 (7): 213 - 223.
- [10] Lancaster J F. Metallurgy of welding [M]. Cambridge: Abington Publishing, 1999.
- [11] 樊 丁, 刘自刚, 黄 勇, 等. 电弧辅助活性 TIG 焊焊缝组织及性能分析 [J]. 焊接学报, 2014, 35 (4): 1 - 5.
- Fan Ding, Liu Zigang, Huang Yong, *et al.* Study on the structure and property of arc assisted activating TIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35 (4): 1 - 5.
- [12] 唐殿福, 卯石刚. 钢的化学热处理 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009.
- [13] Uggowitzer P J, Harzenmoser M. Strengthening of austenitic stainless steels by nitrogen [C] // Focet J and Hendry A. Proceedings of the 1st International Conference on High Nitrogen Steels "HNS 88". London: The Institute of Metals, London, 1989: 174 - 179.

作者简介: 黄 勇, 男, 1972 年出生, 副教授, 博士. 主要从事高效焊接技术研究. 发表论文 60 余篇. Email: hyorhot@lut.cn

[1] 黄 勇, 刘瑞琳, 樊 丁, 等. 气体熔池耦合活性 TIG 焊接

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

### Effect of nitrogen in conjunction with oxygen on GPCA-TIG weld

HUANG Yong<sup>1,2</sup>, WANG Yanlei<sup>2</sup>, ZHANG Zhiguo<sup>2</sup>  
(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). pp 1 - 4

**Abstract:** For the gas pool coupled activating TIG (GP-CA-TIG) welding with outer mixing shielding gas of nitrogen and oxygen, by changing the relative position of the outer and inner nozzles of welding torch, the effect of coupling degree between the outer shielding gas and welding pool surface on nitrogen-oxygen content in the weld appearance, microstructure and properties. The results show that the gas pool coupled activating TIG weld was narrow and deep when nitrogen was introduced in conjunction with oxygen. The low temperature impact toughness of weld was 7.5% higher than that of parent metal and weld made by traditional TIG welding, while the tensile strength and yield strength of weld by GPCA-TIG was lower than those of parent metal. The grains in the weld were fine, and a small amount of ferrites distributed in the austenite grain boundaries. The nitrogen-oxygen content in the weld could be finely adjusted through changing the relative position of outer and inner nozzles in GP-CA-TIG welding.

**Key words:** gas pool coupled activating TIG welding; introduction of nitrogen in conjunction with oxygen; coupling degree; nitrogen-oxygen content; microstructure and property

### Technology and properties of Ti<sub>3</sub>Al/Ti/Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welding

WEI Hongmei<sup>1</sup>, LI Wanqing<sup>1,2</sup>, HE Peng<sup>1</sup>, GAO Lijiao<sup>1,3</sup>, LIN Tiesong<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Beijing Xinghang Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China). pp 5 - 8, 70

**Abstract:** Ti<sub>3</sub>Al and Ti<sub>2</sub>AlNb alloy were connected by diffusion bonding with Ti foil as interlayer. Through a number of analysis methods such as SEM, EDS and XRD, it was discovered that the typical interface structure of Ti<sub>3</sub>Al/Ti/Ti<sub>2</sub>AlNb joint was Ti<sub>3</sub>Al/ $\alpha$ -phase +  $\beta$ -phase/B<sub>2</sub>-rich phase/Ti<sub>2</sub>AlNb. The effect of process parameters, including thickness of interface layer, bonding temperature and holding time, on the interface morphology and property of the joint was investigated. The results show that when the thickness of Ti foil was 10  $\mu$ m, bonding temperature was 900  $^{\circ}$ C and holding time was 120 min, the resultant Ti<sub>3</sub>Al/Ti/Ti<sub>2</sub>AlNb joint had the optimized microstructure and

properties. Increasing the foil thickness caused uneven diffusion of Ti, Al and Nb. The direct bonding temperature of Ti<sub>3</sub>Al/Ti<sub>2</sub>AlNb was 1 000  $^{\circ}$ C, the addition of Ti foil interlayer could reduce the bonding temperature to 900  $^{\circ}$ C. So the damage of high temperature thermal cycling to Ti<sub>3</sub>Al alloy was decreased. The tensile strength of the joint increased from 795 MPa to 906 MPa. The holding time from 90 min to 120 min could ensure sufficient diffusion and reliable connection.

**Key words:** diffusion welding; titanium aluminum alloy; microstructure; property

### Research of seam tracker of capacitance inductance bridge

HONG Bo, ZHU Yafei, LI Xiangwen, CHEN Yu (Department of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China). pp 9 - 12, 24

**Abstract:** According to stagger problem of problem plate butt welding, this paper proposed a method with composite bridge by combining the capacitance and inductance for weld automatic tracking, and designed the structure of sensor. With sensitive detection of the plate spacing change by capacitance and of the edge change by inductance, this composite bridge seam tracking sensor can determine the relationship between horizontal and vertical position of the welding torch. This method is of non-contact, high sensitivity, strong anti-jamming capability, fast response speed and reliable operation, and can solve the misalignment problem during plate butt welding to a certain extent. Seam tracking experiments results made on a simple platform show that the effect was good and it provided a new method for seam automatic tracking technology.

**Key words:** bridge; capacitance; inductance; seam-tracking

### Numeral simulation of root fusion in double-sided TIG backing welding of thick plate

YANG Dongqing, LI Dayong, ZHANG Guangjun (State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). pp 13 - 16

**Abstract:** A finite element model for double-sided TIG backing welding of thick plate was established, and the reasonableness and accuracy of the model were verified by welding experiments. Then, the temperature fields in backing welding thick plate were simulated for different groove designs with different sizes of misalignment and root face, respectively. The results show that, with the increase of the reserved groove gap, the allowable range of root face increased using double-sided TIG backing welding, and the allowable range of misalignment increased first and then decreased. In backing welding of thick plate, when the