

TIG 焊接过程中熔池对流形式的示踪分析

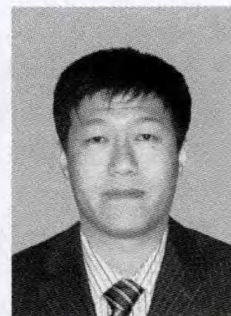
李冬杰, 陆善平, 李殿中, 李依依

(中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 为验证传统钨极惰性气体保护焊接过程和双层气流保护焊接过程的熔池表面对流形式, 确定双层气流保护焊接方法的熔池深度增加机理, 试验研究以钨颗粒为示踪相, 焊前将 300 ~ 500 μm 的钨颗粒均匀涂覆于焊件表面, 同时在熔池底部两侧插入钨板, 将焊接熔池中心区域和边缘区域阻隔开。传统钨极惰性气体保护焊接方法在熔池表面产生外向对流, 钨颗粒随对流集中于熔池边缘; 双层气流保护焊接方法在熔池表面产生内向对流, 钨颗粒随内对流集中于熔池中心。结果表明, 示踪试验确定了熔池流动方向, 为活性组元改变熔池表面对流方向提供了试验验证。

关键词: 钨极惰性气体保护焊; 示踪试验; 熔池对流; 钨颗粒

中图分类号: TG457.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)08-0045-04



李冬杰

0 序 言

钨极惰性气体保护焊(TIG)是利用外加气体作为保护介质的一种电弧焊方法, 其优点是电弧和熔池可见性好, 操作方便, 保护效果好, 无需焊后清渣; 它存在的不足是钨极载流能力有限, 熔深浅, 通常熔池深度和宽度之比(深宽比)仅为 0.2 左右, 单道可焊厚度只有 3 mm 左右。陆善平等^[1,2]提出在传统 TIG 焊接保护气氛中, 添加活性气体, 改变熔池表面对流方向, 提高了熔池深度, 但造成钨电极的氧化烧损, 影响电极的使用寿命。在此研究基础上, 陆善平等^[3]又提出了双层气流保护 TIG 焊接方法, 在向熔池过渡活性组元增加熔深的同时, 避免了钨电极氧化烧损。

对于活性组元增加熔池深度的机理, 有研究提出^[4,5], 对于铁系合金, O 元素是活性组元, 在一定温度下, 当其含量越过临界值时, 液态金属的表面张力温度系数符号将由负变正, 熔池表面 Marangoni 对流形式由外对流转为内对流, 阳极斑点热在熔池表面由中心向熔池底部传递, 从而得到深宽比较大的熔池形貌。近年来, 模拟研究^[6-9]也证实了活性组元在 TIG 焊接过程中可以改变熔池表面 Marangoni 对流的方向, 增加熔池深度。虽然活性组元的加

入可以控制熔池形貌已经得到广泛的共识, 但由于熔池尺寸较小, 温度高以及弧光的干扰, 对熔池表面流动形式的直接试验观测比较困难。

试验研究以马氏体不锈钢 0Cr13Ni5Mo 为基体材料, 焊接时在熔池中加入密度较大的钨颗粒, 用两片高熔点(3 700 K)钨板阻碍钨粒子扩散, 观察焊后焊缝边缘和焊缝中心沉积的钨颗粒浓度, 判断熔池对流方式。

1 试验方法

试验采用传统 TIG 焊接和双层气流保护 TIG 焊接两种方法, 焊接过程采用直流正接, 焊接电流 160 A, 焊接速度 2 mm/s, 钨极与母材之间距离 3 mm, 钨极不伸出喷嘴。其中, 传统 TIG 焊接方法采用纯氦气体保护, 气体流量为 10 L/min; 双层气流保护 TIG 焊接方法中^[3], 将普通 TIG 焊枪单一保护气体通道改为双层保护气体通道, 内层纯惰性气体(氦气, 10 L/min)保护电极, 外层为含惰性气体和微量活性气体的混合气体(氦气 + 10% 氧气, 10 L/min)向熔池过渡活性组元。

试验采用的焊接材料为马氏体不锈钢 0Cr13Ni5Mo, 其化学成分(质量分数, %)为 0.013C, 0.31Si, 0.71Mn, 0.028P, 0.013S, 4.673Ni, 12.52Cr, 0.550Mo。焊接试板尺寸为 100 mm × 50 mm × 10 mm, 焊前用 150 号砂纸打磨待焊表面并用酒精进行清洗, 用传统 TIG 焊接方法和双层保护 TIG 焊接方法分别在试板中心进行焊接, 焊后取焊

收稿日期: 2010-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874101); 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项基金资助项目(2009ZX04014-081); 中国科学院金属研究所研究生创新基金资助项目(1193002090)

缝前后各三分之一处的横截面试样,经过打磨、抛光,用盐酸+硫酸铜饱和溶液(体积比2:1)混合溶液腐蚀焊缝横截面,得到熔池形貌。

示踪试验采用插有两块厚度为1 mm 钨板的焊接试板,间距为2.5 mm,如图1所示。焊前在试板上涂覆混有酒精的钨颗粒,颗粒尺寸为300~500 μm 。钨板将熔池阻隔为1,2和3三个位置,若熔池表面 Marangoni 对流形式为外对流,焊后钨颗粒将聚集在1和3位置;若熔池表面 Marangoni 对流形式为内对流,焊后钨颗粒将聚集在2位置。焊后焊缝经取样、打磨、抛光和腐蚀,得到钨颗粒的分布情况。

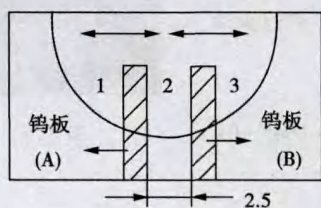


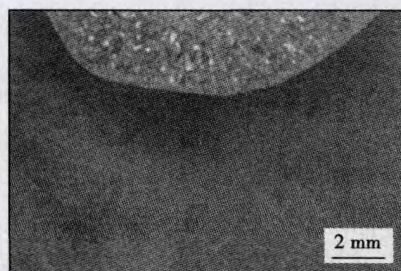
图1 示踪试验示意图(mm)

Fig. 1 Tracer experiment

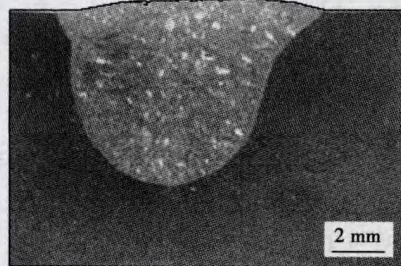
2 试验结果及分析

2.1 熔池形貌比较

图2为焊后熔池形貌,传统TIG焊中,熔池氧含



(a) 传统TIG焊接,纯He保护



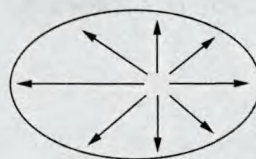
(b) 双层气流保护TIG焊接

图2 两种焊接方案熔池形貌对比

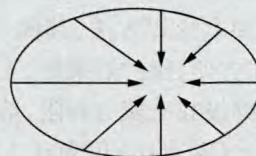
Fig. 2 Weld pool shapes under two welding conditions

量49 ppm,深宽比为0.28,焊缝呈浅宽型(图2a);双层气流保护TIG焊接中,熔池氧含量为130 ppm,深宽比为0.73,熔池呈深窄型(图2b)。

试验中,双层气流保护TIG焊接方法焊后熔池较深,达到6.7 mm,焊缝氧含量也相对较高。液态纯金属表面张力温度系数一般为负值($\partial\sigma/\partial T < 0$),熔池中心表面张力小于熔池边缘表面张力,形成外向 Marangoni 对流,阳极斑点热由熔池中心向熔池边缘传递,如图3a。文献[1-3]指出,液态金属内活性组元氧超过一定含量(100 ppm左右)时,表面张力温度系数 $\partial\sigma/\partial T$ 将由负变正,熔池表面的 Marangoni 对流由外向对流转为内向对流(图3b),阳极斑点热由熔池表面中心向熔池底部传递,熔池形貌变得窄且深。



(a) 液态纯金属



(b) O元素超过一定含量的熔池

图3 不同氧含量下熔池表面的 Marangoni 对流形式

Fig. 3 Marangoni convection of pool surface under different oxygen content

图4为示踪试验焊后熔池形貌。示踪试验中,钨板的插入使焊接过程中熔池内金属液流动性减弱,传统TIG焊接熔池仍呈现宽浅型,双层气流保护TIG焊接熔池形貌呈现深窄型。

2.2 示踪试验结果比较

示踪试验试板焊后经打磨、抛光和腐蚀,观察到钨颗粒的分布情况如图5所示。图6为不同对流形式下示踪试验结果示意图。传统TIG焊接方法中,可以明显看到位置1(图5a)和位置3(图5c)分布有钨颗粒,焊缝中心的位置2没有钨颗粒分布(图5b)。传统TIG焊接过程中,熔池表面产生外向 Marangoni 对流,钨颗粒被液态金属卷进熔池边缘,受熔池内钨板的阻挡,不能进入熔池中心部位,得到1,3位置分布钨颗粒,2位置没有钨颗粒分布的熔池形貌,如图6a所示。

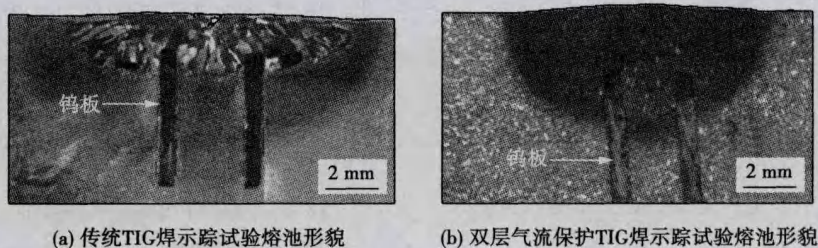


图4 两种焊接方案示踪试验熔池形貌对比
Fig. 4 Weld pool shapes after tracer experiment

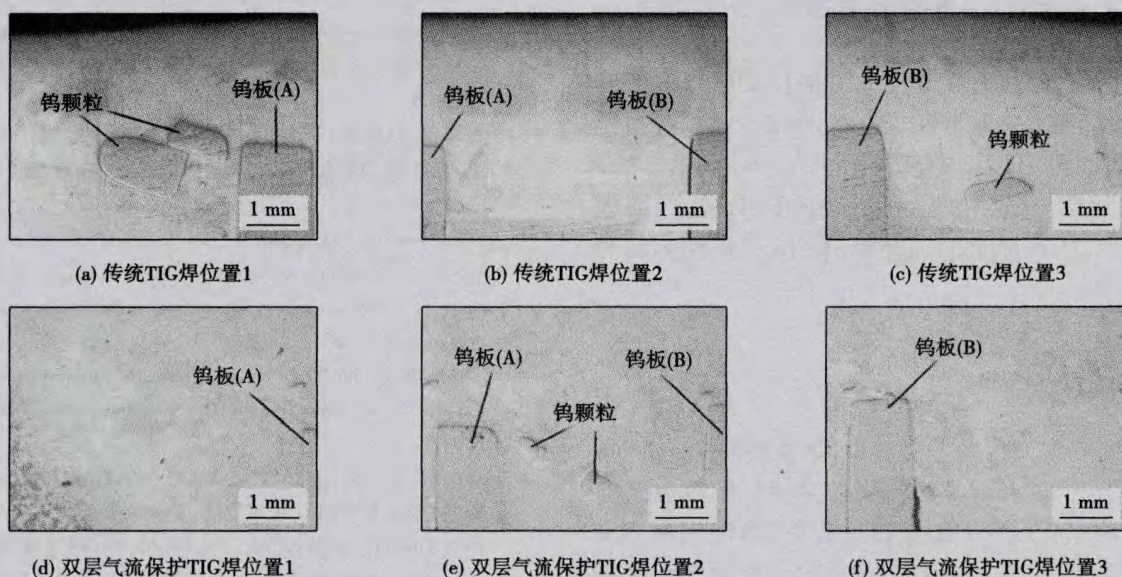


图5 两种焊接方法示踪试验不同位置钨颗粒分布
Fig. 5 Tungsten particle distribution

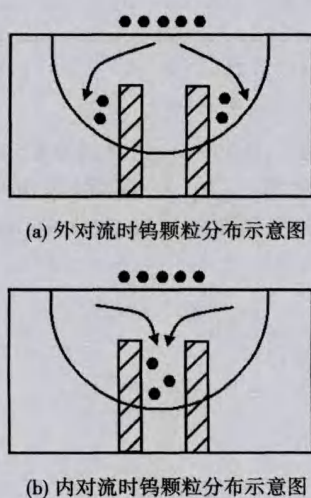


图6 不同 Marangoni 对流时钨颗粒分布示意图

Fig. 6 Tungsten particle distribution under different patterns of Marangoni convection

双层气流保护 TIG 焊接方法中,可以明显看到焊缝中心的位置2(图5e)分布有钨颗粒,焊缝边缘的位置1,3没有钨颗粒分布(图5d和图5f). 双层气流保护 TIG 焊接过程中,熔池表面产生内向 Marangoni 对流,焊前涂覆在试板表面的钨颗粒被液态金属卷进熔池中心,受熔池中两块钨板的阻挡,不能随液态金属进入熔池边缘部位,得到了位置2分布钨颗粒,1,3位置没有钨颗粒分布的熔池形貌,如图6b所示.

钨颗粒的能谱分析如图7所示. 高纯度钨颗粒的应用,使熔池在焊接过程中引入高密度高熔点的质点,质点不随母材熔化而溶解进入金属液中,焊后便于观察;质点随对流进入熔池不同位置,因高密度不易越过钨板进入其它位置,焊后可通过质点分布确定焊接过程中熔池表面 Marangoni 对流方向.

TIG 焊接熔池的运动由液态金属内的电磁力、电弧力、浮力和表面张力共同决定. 钨颗粒分布是熔

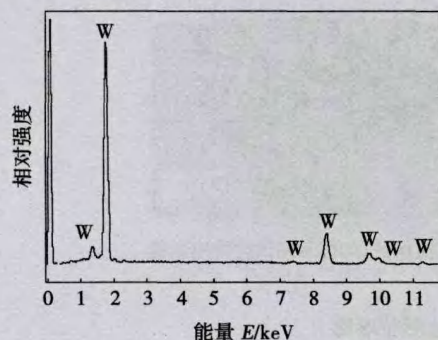


图7 熔池内钨颗粒能谱分析

Fig. 7 Analysis of tungsten particles in weld pool

池运动的综合表现,在双层气流保护 TIG 焊接条件下,电弧向熔池过渡活性组元氧,当氧含量超过临界值时,表面张力温度梯度符号由负变正,内向 Marangoni 对流导致钨颗粒由表面中心向熔池底部运动。可见,Marangoni 对流是控制 TIG 焊接池运动的主要对流。

3 结 论

(1) 传统 TIG 焊接过程中,熔池表面 Marangoni 对流形式为外对流,焊后钨颗粒聚集在熔池边缘位置;双层气流保护 TIG 焊接过程中,熔池表面 Marangoni 对流形式为内对流,焊后钨颗粒聚集在熔池中心位置。

(2) 双层气流保护 TIG 焊接方法,通过外层保护气体向熔池过渡活性组元氧,改变熔池表面对流形式,促进阳极斑点热由熔池表面中心向熔池边缘传递,增加熔池深度,提高焊接效率。

参考文献:

[1] Lu S P, Fujii H, Nogi K. Sensitivity of marangoni convection and weld shape variations to welding parameters in O_2 -Ar shielded GTA welding[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(3): 271-277.

- [2] Lu S P, Fujii H, Nogi K. Effect of oxygen content in He- O_2 shielding gas on weld shape in ultra deep penetration TIG[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(8): 689-695.
- [3] 陆善平, 李冬杰, 李殿中, 等. 双层气流保护 TIG 焊接方法[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 21-25.
Lu Shanping, Li Dongjie, Li Dianzhong, et al. Double shielded TIG welding method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 21-25.
- [4] Burgardt P, Heiple C R. Interaction between impurities and welding variables in determining GTA weld shape[J]. Welding Journal, 1986, 65: 150-155.
- [5] Sahoo P, DebRoy T, McNallan M J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. Metallurgical Transactions. B, 1988, 19(6): 483-491.
- [6] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 焊接电弧与活性组元对 TIG 熔池形貌影响的数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 49-52.
Dong Wenchao, Lu Shanping, Li Dianzhong, et al. Numerical simulation of welding arc and surface-activating element on weld shape in TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 49-52.
- [7] Tanaka M, Ushio M, Lowke J J. Numerical study of gas tungsten arc plasma with anode melting[J]. Vacuum, 2004, 73: 381-389.
- [8] 赵玉珍, 雷永平, 史耀武. A-TIG 焊中氧含量对熔池流动方式影响的数值模拟[J]. 金属学报, 2004, 40(10): 1085-1092.
Zhao Yuzhen, Lei Yongping, Shi Yaowu. Modeling of the effects of oxygen content on flow patterns in A-TIG welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(10): 1085-1092.
- [9] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 微量活性组元氧对焊接熔池 Marangoni 对流和熔池形貌影响的数值模拟[J]. 金属学报, 2008, 44(2): 249-256.
Dong Wenchao, Lu Shanping, Li Dianzhong, et al. Numerical simulation of effects of the minor active-element oxygen on the Marangoni convection and the weld shape[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(2): 249-256.

作者简介: 李冬杰,男,1984 年出生,博士研究生。主要从事高效率焊接工艺方面的研究。发表论文 4 篇。Email: djli@imr.ac.cn

通讯作者: 陆善平,男,研究员。Email: shplu@imr.ac.cn