

2205 双相不锈钢焊接接头微区耐点蚀性能分析

包晔峰¹, 胡网勤¹, 蒋永锋¹, 杨 可^{1,2}

(1. 河海大学 机电工程学院, 常州 213022; 2. 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 镇江 212003)

摘 要: 采用光学显微镜观察了 2205 双相不锈钢焊接接头的组织形貌, 采用自制的微电化学测试系统测量了母材、焊缝和 HAZ 的微区循环伏安曲线。结果表明, 2205 双相不锈钢焊接接头的组织为铁素体 + 奥氏体, 焊缝中铁素体含量约为 48%, 与母材相当, HAZ 中铁素体平均含量高于 50%; 在 3.5% 的 NaCl 溶液中 2205 双相不锈钢焊接接头焊缝微区的耐点蚀性能与母材趋于一致, 但其自修复能力不及母材, HAZ 微区的耐点蚀性能最差, 自修复能力最弱, 此耐点蚀性能上的差异与接头中两相比比例和合金元素在两相中的分配差异有关。

关键词: 双相不锈钢; 显微组织; 微电化学技术; 点蚀

中图分类号: TG174.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)11-0081-04



包晔峰

0 序 言

双相不锈钢具有优良的力学及耐腐蚀性能, 广泛应用于石油、化工和海洋工程等行业。焊接的局部加热和冷却作用, 使焊接接头的显微组织与母材相比有较大变化, 从而影响接头的耐腐蚀性能^[1]。

金属的腐蚀大多为电化学腐蚀, 常用电化学测试技术分析, 但常规电化学测量方法的测试范围为厘米级, 只能宏观判断被测试样的耐蚀性能。焊接接头的热影响区非常狭小, 常规电化学方法无法精确试验与评价其耐腐蚀性能, 而微电化学方法的测试范围为微米级, 是研究微区腐蚀、甚至单相组织电化学行为的有效手段, 可用于焊接接头微区电化学性能的研究。西班牙的 Garcia 等人^[2]分别采用微电化学和包封法对比分析了奥氏体不锈钢焊接接头微区的耐点蚀性能, 认为采用微电化学方法测得的结果更精确, 而国内对微电化学技术在焊接接头耐蚀性能方面的研究较少。文中分析了 2205 双相不锈钢焊接接头的显微组织, 采用自制的微电化学测试系统, 研究了焊接接头的微区耐点蚀性能。

1 试验方法

1.1 试验材料及其焊接工艺

试验材料选用 16.6 mm 厚的 SAF2205 双相不

锈钢。60°V 形坡口, 钨极氩弧焊 (GTAW) 打底, 焊丝为 ϕ 2.0 mm 的 ER2209, 焊接电流为 75 ~ 145 A, 电压为 12 ~ 16 V; 焊条电弧焊 (SMAW) 填充盖面, 焊条为 ϕ 2.5 mm 的 22.9.3. LR, 焊接电流为 70 ~ 100 A, 电弧电压为 23 ~ 30 V, 热输入为 0.5 ~ 2.0 kJ/mm, 最高层间温度控制在 120 °C。母材和焊材的化学成分见表 1。

表 1 母材和焊材的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of pipe and welding material

材料	C	Cr	Ni	Mo	N	其它	Fe
母材	0.014	22.67	5.69	3.23	0.170	1.830	余量
22.9.3. LR	0.030	22.36	8.89	2.87	0.158	1.912	余量
ER2209	0.015	22.50	8.50	3.00	0.150	2.135	余量

1.2 显微组织观察试验

金相试样经打磨、电解抛光和腐蚀后, 在 XJG-05 显微镜下观察焊接接头的显微组织, 用 TCI 图像分析软件计算接头各区域的铁素体含量。

1.3 微电化学试验

微电化学系统由定位装置、微区腐蚀电池单元、PS-268A 型电化学测量仪和 PC 机构成, 如图 1 所示。定位装置包括升降台和二维水平调节平台, 用于精确定位测试微区。电化学测量仪作为电化学试验的电控单元, 用于控制极化试验的电流、电压和时间等参数, PC 机存贮、处理和管理数据。

微区腐蚀电池单元是微电化学测量系统的关键, 自制的微区腐蚀电池单元如图 2 所示, 由辅助电

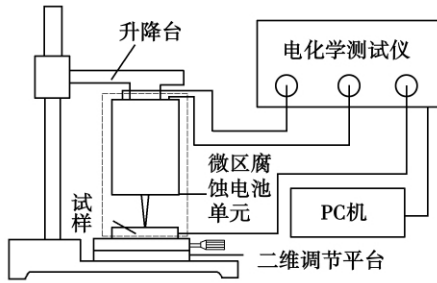


图1 微电化学测试系统

Fig. 1 Micro-electrochemical system

极、参比电极、微探针、电解池和试样构成。辅助电极采用铂丝电极，参比电极采用饱和甘汞电极。辅助电极与微工作电极构成极化回路，微工作电极为微探针与试样表面的接触区域，测试区范围由微探针端头的大小决定。因焊接接头的 HAZ 宽度非常小，约 100 μm ，故自制微探针端头直径控制在 80 μm ，能对 HAZ 进行精确测量。微探针由玻璃毛细管制成，外壁用环氧树脂封装，避免在外力作用下破损，端头镶有“O”形圈硅橡胶，起密封作用。

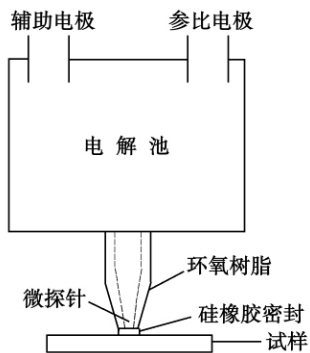


图2 微区腐蚀电池单元

Fig. 2 Microcell

试样规格为 35 mm $\times$ 16.6 mm $\times$ 8 mm。测试微区分别选在母材、中部焊缝和 HAZ 3 个区域。腐蚀介质为 3.5% 的氯化钠溶液，试验温度为室温，试验初始电位为 -650 mV，回扫电位为 1 500 mV，扫描速度为 60 mV/min，延时时间设为 600 s。

1.4 焊接接头各区域中两相的成分分析

为了分析微区成分与微区耐点蚀性能之间的关系，在 SEM 下用 EDS 测量了焊接接头各区两相中的合金元素的含量。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

2205 双相不锈钢母材、焊缝和 HAZ 的显微组

织如图 3 所示，由图 3 可见，3 个区域的组织均为铁素体 + 奥氏体，其中白色为铁素体，灰色为奥氏体。

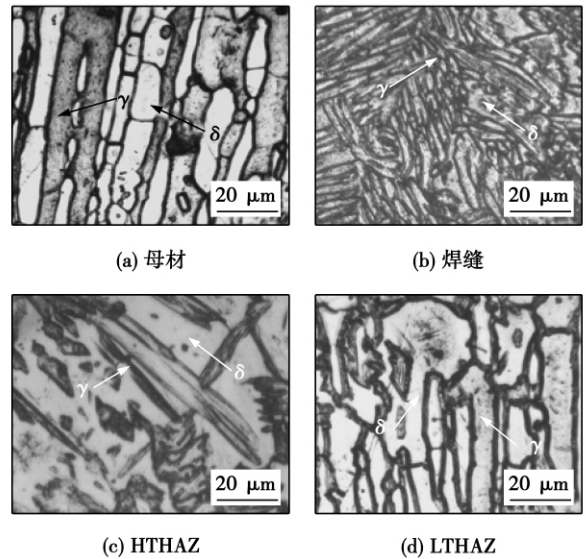


图3 焊接接头不同区域的显微组织形貌

Fig. 3 Microstructures of different zones of welded joint

由图 3a 可见，轧制状态的母材中奥氏体被铁素体基体组织包围，呈条带状，铁素体含量大约为 50%。在焊缝中部，从铁素体相中析出的奥氏体组织细小，呈鱼刺状（图 3b），铁素体含量约为 48%。因经历的焊接热循环峰值温度不同，HAZ 可分为高温热影响区（HTHAZ）和低温热影响区（LTHAZ）两种区域，如图 3c, d 所示。HTHAZ 的铁素体相中有羽毛状和条块状的奥氏体相析出，LTHAZ 中两相组织仍保持原有的轧制状态。HTHAZ 与 LTHAZ 中的铁素体含量分别约为 60%、52%。

2.2 微区循环伏安曲线

由于 HTHAZ 的宽度极窄，难与 LTHAZ 分开，自制的微探针端口直径为 80 μm ，超过 HTHAZ 宽度范围，因此测量 HAZ 的微电化学数据时，仅确保测试微区在 HAZ 内，不再进一步区分 HTHAZ 与 LTHAZ。图 4 为 2205 双相不锈钢焊接接头的 3 个微区（母材、焊缝和 HAZ）在 3.5% NaCl 溶液中的循环伏安曲线。

点蚀电位 E_{br} 为钝化膜开始破裂的起始电势，点蚀电位越高，耐点蚀性能越好。再钝化电位 E_p 是评价钝化膜是否容易修复的特征电势， E_p 越高，越接近 E_{br} ，即 $(E_{br} - E_p)$ 值越小，说明钝化膜的自修复能力越强。图 4 中母材、焊缝和 HAZ 的钝化区间、点蚀电位 E_{br} 和再钝化电位 E_p 的数据列于表 2。

3 个微区域组织不同，所以其电化学特征存在差异。具体如下。（1）从其钝化区间范围看，焊缝

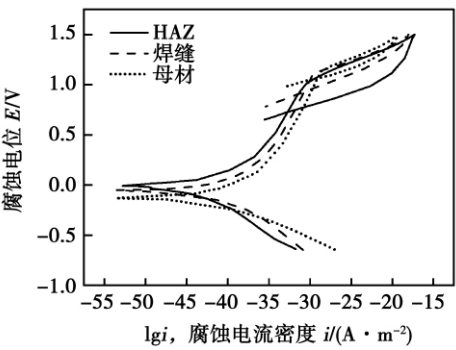


图 4 焊接接头 3 个微区在 3.5% NaCl 溶液中的循环伏安曲线

Fig. 4 Cyclic voltammety curves of mirco-zones of welded joint in 3.5% NaCl solution

表 2 循环伏安曲线的分析数据

Table 2 Data provided by cyclic voltammety curves

微区	点蚀电位 E_{br}/V	再钝化电位 E_{rp}/V	钝化区间 $\Delta E/V$	电位差 $(E_{br}-E_{rp})/V$
母材	1.131	1.069	0.102	0.062
焊缝	1.108	0.926	0.981	0.182
HAZ	1.009	0.733	0.697	0.276

与母材的钝化区间基本持平,而 HAZ 的钝化区间最小,这表明 HAZ 在溶液中生成的钝化膜的稳定性比母材和焊缝差。(2) 从点蚀电位看,焊缝与母材的点蚀电位相当,即两者的点蚀敏感性相差不大,而 HAZ 的点蚀电位最低,说明 HAZ 的点蚀敏感性最高。(3) 从 $(E_{br}-E_{rp})$ 值及滞后环包络面积来看,焊缝的 $(E_{br}-E_{rp})$ 值比母材高,滞后环包络面积也比母材稍大,说明焊缝钝化膜的自修复能力较母材差,而 HAZ 的 $(E_{br}-E_{rp})$ 值和滞后环包络面积在三者中最大,由此判断,HAZ 钝化膜的自修复能力最差。综上所述,在相同的试验条件下,焊缝的耐点蚀性能和母材相当,但其自修复能力比母材差,而 HAZ 的耐点蚀性能最差,其钝化膜的自修复能力最弱。

2.3 讨论与分析

双相不锈钢的两相比比例很大程度上决定了双相不锈钢的耐蚀性能。双相不锈钢的焊接要求母材、焊缝和 HAZ 中的铁素体含量都控制在 30% ~ 60% 之间,焊接接头才有较好的耐点蚀性能,在此范围内, δ/γ 比例越接近 1,耐点蚀性能越好^[3]。由图 3a 可见,母材中的两相约各占 50%,是耐点蚀性能较好的原因之一。试验接头采用多道多层焊,并严格控制层间温度,后续焊道对前层焊道有后热作用,降低了前层焊道的冷却速度,使得 Ni, N 等奥氏体化元素有更多的时间扩散和聚集,促进奥氏体从铁素体中析出^[4],前层焊道中的 δ 相能进一步转变成 γ

相,同时焊条中的镍含量较母材高,能促使奥氏体相析出,保证焊缝中两相组织较均匀,约各占 50%,如图 3b 所示,从相比比例的角度可见,焊缝的耐点蚀性能较好,与母材相当。由图 3c, d 可见 HTHAZ 和 LTHAZ 两相比比例存在差异。因 HTHAZ 经历的峰值温度较高,处于铁素体固溶线至固相线温度之间,加热时 γ 相能全部溶入 δ 相,在冷却过程中,因冷却速度快, γ 相析出不完全, γ 相数量明显减少,含量接近 40%;而 LTHAZ 经历的最高温度低,几乎不发生 δ 与 γ 组织转变,冷却至室温时,LTHAZ 中的 γ 相含量基本保持原始母材的水平。整体而言,HAZ 的奥氏体相平均含量小于 50%,低于母材和焊缝,从相比比例角度看,HAZ 的耐点蚀性能比焊缝和母材要差,该结论与微区电化学试验结果一致。

由铁素体含量测试结果可知,焊接接头各微区的相比比例均在能够保证具有较好的耐点蚀性能的范围内,但差异不大。为进一步分析微区耐点蚀性能,测试了母材、热影响区和焊缝 3 个微区中两相组织的合金元素含量。因为在焊接热循环的作用下,合金元素的扩散及重新分布,致使相同相在焊接接头不同的区域中有不同的成分含量,从而影响焊接接头的微观腐蚀行为。在氯化物环境中影响点蚀性能的主要合金元素为 Cr, Mo 和 N,一般用点蚀当量 (pitting resistance equivalent) P_{RE} 值来描述合金元素与腐蚀性能之间的关系, $P_{RE} = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$ 。由于 Cr, Mo 和 N 元素在两相间的分配不平衡,会造成 Cr, Mo 和 N 元素含量低的相优先腐蚀,双相不锈钢的实际耐点蚀能力取决于钢中 P_{RE} 值低的相^[3]。表 3 为在电镜下用 EDS 测得的 2205 双相不锈钢焊接接头 3 个区域两相组织中的 Cr, Mo, Ni 元素含量。

表 3 焊接接头各区两相中的 Cr, Ni, Mo 元素含量(质量分数, %)

Table 3 Cr, Ni, Mo contents of two phases in different zones of welded joint

微区	Cr		Ni		Mo	
	δ 相	γ 相	δ 相	γ 相	δ 相	γ 相
母材	24.76	21.21	4.19	5.90	3.36	2.02
焊缝	24.09	23.23	7.05	6.95	3.40	2.58
HAZ	24.09	21.05	4.02	6.70	3.03	1.42

由表 3 可见, Cr, Mo, Ni 元素在母材的两相组织中的含量差异大, Cr, Mo 元素更多集中于铁素体内, Ni 元素则相对集中在奥氏体内。在焊缝金属的两相组织中, Cr, Ni 元素的分配差异较母材小,

分配系数接近于 1, 但 Mo 元素差别较大, 这跟高温下合金元素在铁素体相中有较高的扩散速率, 使其快速均匀化有关. 因 HAZ 特有的焊接热循环过程, Cr, Mo, Ni 元素在 HAZ 两相中的分布差异比母材中稍大. P_{RE} 值由 Cr, Mo, N 三个元素共同决定, 因 N 元素原子量较小, 能谱分析难以测出其含量, 因此, 在仅考虑 Cr, Mo 元素含量的情况下, 计算了 3 个区域两相的 P_{RE} 值, 结果得到母材、焊缝和 HAZ 中铁素体相的 P_{RE} 值分别为 35.848, 35.310, 34.089; 奥氏体相的 P_{RE} 值分别为 27.876, 31.744, 25.736. 可见, 无论哪个微区, 奥氏体相的 P_{RE} 值均低于铁素体相的 P_{RE} 值, 且差值较大, 即双相不锈钢焊接接头的耐点蚀性能取决于奥氏体相的耐点蚀性能. 比较 3 个区域中奥氏体相的 P_{RE} 值可知: P_{RE} 焊缝 > P_{RE} 母材 > P_{RE} HAZ, 由此推断, 焊缝的耐点蚀性能比母材好, HAZ 的耐点蚀性能最差. 而微区电化学试验结果显示, HAZ 的耐点蚀性能最差, 与 P_{RE} 计算结果一致, 焊缝的耐点蚀性能与母材相当, 与 P_{RE} 的计算结果不一致, 分析原因, 与计算 P_{RE} 时, 没有计入 N 元素含量有关. 由 P_{RE} 计算公式可见, 氮含量的系数比铬、钼含量的系数大得多, N 元素对耐点蚀性能的影响较大, 研究表明^[3], 适当提高氮含量, 可显著改善钢的耐点蚀性能, 母材中氮含量较高, 且大多集中在奥氏体相中, 能显著提高母材的点蚀抗力; 焊缝中的 N 元素主要由焊接材料中的 N 元素过渡而来, 由表 1 可知, 焊材中的氮含量比母材低, 焊缝中的 N 元素还与过渡系数有关, 一般低于焊材, 因此, 计入氮时, 母材的 P_{RE} 有可能接近焊缝的 P_{RE} , 即母材与焊缝的耐点蚀性能能够相互接近.

材料自修复能力的强弱与金属阳极溶解的自催化效应的大小有关. 循环伏安试验时, 当正向扫描电位超过 E_{br} 后, 金属表面开始形成腐蚀孔, 导致电流急剧增大, 在回扫电位相同的情况下, 从 E_{br} 扫描至回扫电位的时间越长, 回扫电位对应的电流密度越大, 则说明孔底金属溶解越多, 孔内溶液中 H^+ 和 Cl^- 浓度越大, 自催化效应就越大. 逆向扫描时, 随着扫描电位降低, Cl^- 的电迁移速度减小, Cl^- 在金属表面的富集也随之减少, 缓解了孔内金属的溶解, 当降至某较低电位时, 孔内金属表面将重新钝化. 在此过程中, 自催化效应越大, 金属恢复至重新钝化状态的时间就越长, 滞后环的面积越大, E_{rp} 离距 E_{br}

越远, 即该金属的自修复能力越差^[5]. 因此由图 4 可推断, HAZ 的自修复能力最差, 母材的自修复能力最好, 焊缝的自修复能力介于两者之间.

3 结 论

(1) 2205 双相不锈钢焊接接头的显微组织为铁素体 + 奥氏体, 焊缝中铁素体含量与母材接近, 约为 50%; HAZ 中的铁素体平均含量最高, 高于 50%.

(2) 通过微电化学方法测试得出, 在 3.5% NaCl 溶液中 2205 双相不锈钢焊接接头焊缝微区的耐点蚀性能与母材相当, 但其自修复能力较母材差, HAZ 的点蚀敏感性最高, 自修复能力最差.

(3) 接头中两相比比例及合金元素在两相组织中的分配差异会影响双相不锈钢焊接接头耐点蚀性能, 由此分析的结果与微电化学方法测试结果一致.

参考文献:

- [1] 金小军, 霍立兴. 热输入对双相不锈钢管接头力学和腐蚀性能的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 109-112.
Jin Xiaojun, Huo Lixing. The effect of heat input on the mechanical properties and corrosion resistance of welded joints of duplex stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 109-112.
- [2] Garcia C, Martin F, Tiedra P de, et al. Pitting corrosion of welded joints of austenitic stainless steels studied by using an electrochemical minicell[J]. Corrosion Science, 2008(50): 1184-1194.
- [3] 吴 玖, 姜世振. 双相不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [4] 包晔峰, 宋晓科, 张孺洪, 等. 双相不锈钢埋弧焊焊接接头微观组织及力学性能[J]. 石油化工设备, 2008, 37(4): 4-7;
Bao Yefeng, Song Xiaoke, Zhang Ruhong, et al. Microstructure and mechanical properties of submerged-arc welded 2205 duplex stainless steel pipe[J]. Petro-Chemical Equipment, 2008, 37(4): 4-7.
- [5] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.

作者简介: 包晔峰, 男, 1966 年出生, 博士, 教授. 主要从事焊接材料及焊接设备方面的研究. 发表论文 50 余篇. Email: baoyf@hhuc.edu.cn

Electronic Technology, Guilin 541004, China). p 73 – 76

Abstract: A novel image processing approach is proposed to reduce the mixed noise in surface mount technology soldering image based on wavelet packet transformed adaptive threshold. At first, by using wavelet packet transform, the approach not only decomposes the image into the low frequency part but also into the high frequency part of image in several scales. After analyzing the wavelet packet tree coefficients, they were processed with the Wiener filter, and kept the wavelet packet tree low frequency coefficients without change. Secondly, an improved wavelet adaptive threshold algorithm is proposed to denoise the mixed noise again. At last, the inverse wavelet packet transform is applied to reconstruct the image and median filter is used to smooth the image. The experimental results have illustrated that the approach can obtain a better result in soldering image denoising compared with the conventional methods and can retain the image edges very well.

Key words: surface mount technology solder joint; image denoising; wavelet packet transform; adaptive threshold

Compared study on properties of SnZn-based lead free solders

LAI Zhongmin¹, ZHANG Liang², WANG Jianxin¹ (1. School of Materials Science & Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. School of Mechanical & Electrical Engineering, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China). p 77 – 80

Abstract: The wettability, creep resistance and mechanical properties of four SnZn-based solders were compared. Base on the wetting-balance test, the wettability of SnZnAg/SnZnGa/SnZnAl is better than SnZn solders. The addition of alloying elements can improve the wettability of SnZn alloys. With the testing of nanoindentation creep behavior of SnZn solders, it is found that the creep resistance of SnZnAg solder is highest of all, the mechanism is Ag-Zn particles acting as barriers to the motion of dislocations. In addition, with the testing of mechanical properties, the results show that the mechanical and thermal-fatigue resistance properties can be enhanced with the addition of alloying elements, the mechanical properties of SnZnAg solder joints is 20% higher than that of SnZn solder joints, the function of Ga/Al is less than Ag. Furthermore, using diode laser soldering, the mechanical properties of SnZn solder joints can increase up to 116.7%.

Key words: lead-free solders; creep resistance properties; intermetallic compounds; diode laser soldering

Pitting corrosion resistance of micro-zones in welded joint of 2205 duplex stainless steel

BAO Yefeng¹, HU Wangqin¹, JIANG Yongfeng¹, YANG Ke^{1,2} (1. Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China; 2. Advanced Welding Technology of Provincial Key Laboratory, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China). p 81 – 84

Abstract: The microstructures of welded joint of 2205 duplex stainless steel were studied by optical microscope. Cyclic voltammetry curves of base material, weld metal and HAZ were measured by a self-designed micro electrochemical system respectively. The results show that the microstructures of welded

joint of 2205 duplex stainless steel are ferrite and austenite. The percentage of ferrite in weld metal is about 48%, which is equivalent with that in base material, while the average ferrite content in HAZ is more than a half. In the 3.5% NaCl solution, the weld metal shows the consistent pitting corrosion resistance with the base material, but its repassivation behavior is not as good as the base material. Among the three micro-zones of the welded joint, HAZ shows the poorest pitting corrosion resistance and repassivation behavior. The differences on pitting corrosion resistance of different micro-zones of welded joint are relevant to the phase ratio and the distribution of alloy elements in phases.

Key words: duplex stainless steel; microstructure; micro-electrochemical method; pitting corrosion

Impact toughness of simulated CGHAZ with high heat input for adding trace Zr oil tank steel

LIANG Guoli^{1,2,3}, YANG Shanwu¹, WU Huibin², LIU Xueli² (1. Department of Material Physics and Chemistry, University of Science Technology of Beijing, Beijing 100083, China; 2. National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science Technology of Beijing, Beijing 100083, China; 3. Department of Electro-Mechanical Engineering, Tangshan College, Tangshan 063000, China). p 85 – 88

Abstract: The effects of trace Zr element on impact toughness of coarse grain heat affected zone (CGHAZ) of 690 MPa grade oil tank steel was investigated with the high heat-input welding cycle using Gleeble3500. The results showed that trace Zr treated steel can significantly improve low temperature impact toughness of base metal, but it could seriously worsen the impact toughness of CGHAZ. The M-A component of trace Zr treated steel coarsened with the heat input increasing, the area percentage of M-A component decreased with the heat input increasing, which resulted in the steel toughness decreasing. The size of inclusions containing Zr are all micron level, and were precipitated in the solidification process, which have little effect on strengthen and grain refinement, but has a very important influence on impact toughness. The oversize inclusions (1–3 μm) could result in the impact toughness decreasing.

Key words: oil tank steel adding trace Zr; high heat-input welding; CGHAZ; impact toughness

Sensitivity analysis and prediction of double ellipsoid heat source parameters

LI Peilin, LU Hao (School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China). p 89 – 91, 95

Abstract: When the arc force is strong, the double ellipsoid heat source model is the most widely used heat source model. The influence of the heat source parameters on the weld size was researched, and the sensitivity of the double ellipsoid heat source parameters was obtained for SAW. The multiple regression analysis was applied to research the relationship between the weld size and the heat source parameters. An empirical formula was put forward, and the heat source parameters corresponding to the weld width and penetration can be easily calculated by the empirical formula. The trial time is reduced and the simulation precision is increased.

Key words: submerged arc welding; double ellipsoid