

固溶处理对 2205 双相不锈钢 FCAW 接头组织及力学性能的影响

李添祺¹, 张莹莹¹, 高磊¹, 张云昊², 刘建美³

(1. 辽宁石油化工大学, 辽宁 抚顺 113000; 2. 南昌航空大学, 南昌 330000;
3. 大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 利用气体保护药芯焊丝焊接 2205 双相不锈钢, 并对焊接接头进行固溶处理。采用金相显微镜、扫描电子显微镜和能谱仪对焊接接头的显微组织和断口形貌进行了观察与分析, 并测试了焊接接头的冲击韧性和显微硬度。结果表明, 未经处理的焊接接头熔合区较宽, 主要为基体铁素体组织, 并且晶粒粗大。热影响区的铁素体和奥氏体边界有少量析出相 χ 相, 铁素体内部有颗粒物析出; 焊缝区铁素体内部有 σ 相和 γ_2 相析出。1 050 ℃固溶处理后焊接接头析出相和颗粒物消失, 奥氏体组织含量提高, 冲击断口等轴韧窝增多, 韧性增加, 硬度值降低。

关键词: 双相不锈钢; 药芯焊丝; 热处理; 析出相
中图分类号: TG442

0 前言

2205 双相不锈钢含有铁素体和奥氏体两相组织, 简称 $\alpha + \gamma$ 双相不锈钢, 且两相比比例通常接近 1:1, 具有良好的力学性能和耐腐蚀性能, 在石油化工、海洋工程、核电等领域得到了广泛的应用^[1]。铁素体和奥氏体的相平衡和耐腐蚀性能通常通过调整铬 (Cr)、镍 (Ni) 和氮 (N) 的含量来实现^[2]。由于大量的合金元素的存在, 两相的微观结构可能会不稳定, 例如在焊接等热加工过程中, 许多沉淀相 (χ 相、 σ 相和二次奥氏体 γ_2 等) 会析出^[3-8], 这些析出相富含 Cr、Mo 和 Ni 等元素, 使邻近的基体缺少这些元素, 从而导致力学性能和耐腐蚀性能的恶化^[1]。另外, 合金元素在铁素体中的扩散速率大约是奥氏体的 100 倍^[4-5], 这说明铁素体不稳定, 会优先析出各类碳化物、氮化物和沉淀相等。药芯焊丝具备焊接工艺适应性强、熔敷率

高、飞溅率低和经济效益好等诸多优点, 具有良好的应用前景^[6], 但其引入活性气体和流动性太强导致的气孔以及由于药芯焊丝本身的杂质导致的夹渣在所难免, 在国内应用比例较小, 针对药芯焊丝焊接接头研究也相对较少。文中采用 ER2209 药芯焊丝焊接 2205 双相不锈钢, 通过 1 050 ℃固溶处理对焊接接头组织结构进行改变, 对比了固溶处理后焊缝区和热影响区组织和力学性能的变化, 对理论研究和实际生产具有指导意义。

1 试验材料及方法

试验母材采用 12 mm 厚的 2205 双相不锈钢, 焊接材料采用 1.2 mm 的 ER2209 药芯焊丝, 母材和焊丝主要化学成分见表 1, 可以看出焊丝 Ni 含量明显高于母材, Ni 为强奥氏体化元素, 能够提高铁素体向奥氏体的转变温度。

表 1 母材 2205 及焊丝 ER2209 化学成分(质量分数, %)

材料	C	Si	Mn	P	S	N	Mo	Ni	Cr
2205	0.015	0.37	1.39	0.013	0.002	0.15	3.22	5.66	22.35
ER2209	0.021	0.66	1.07	0.012	0.004	0.16	3.33	7.98	22.56

焊前用不锈钢专用砂轮片打磨坡口及坡口两侧各 30 mm 范围, 并用丙酮清洗, 以除去氧化膜、油污、杂质等。焊接电源采用直流反接法, 坡口为 V 形, 角度约为 60°, 焊接电流范围 240 ~ 270 A, 电弧电压 24 ~ 26 V,

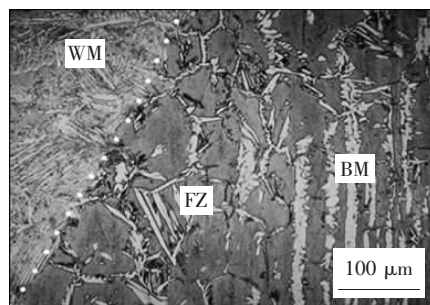
收稿日期: 2018 - 12 - 25
基金项目: 辽宁省教育厅青年基金(L2017LFW014)
doi: 10.12073/j.hj.20181225002

焊接速度 20 ~ 23 cm/min, 保护气体为纯度 99.99% 的 CO_2 。填充和盖面采用多层多道焊焊接, 层间/道间温度不超过 100 °C。将焊接试板沿垂直于焊缝方向切割开以做固溶处理, 温度为 1 050 °C, 保温 60 min 后快速水冷至室温。采用垂直焊接方向的截面为试样观察表面, 试样区域应包括焊缝区、熔合区和热影响区。打磨抛光后, 采用 1 g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 30 mL HCl + 80 mL H_2O 溶液浸蚀, 浸蚀时间为 3 ~ 10 s。利用 Leica 光学显微镜和日立 S4800 型冷场发射扫描电子显微镜观察浸蚀后的微观组织和冲击断口形貌。根据 GB/T 229—2007 《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》标准, 将焊接试样加工成 5 mm × 10 mm × 55 mm 的 V 形缺口冲击试样, 冲击温度为 -40 °C, 冲击试验机型号为 JB-300B, 利用维氏硬度仪测量处理后试样的硬度。

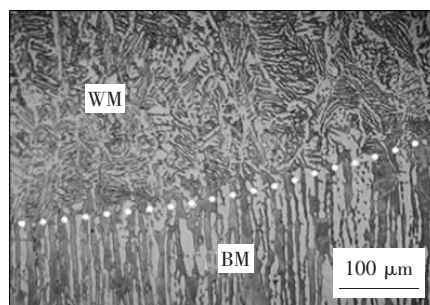
2 试验结果及分析

2.1 显微组织

焊接接头组织的 OM 图像如图 1 所示, 其中深色的是被浸蚀的铁素体组织, 浅色的是奥氏体组织。未经过焊后热处理的焊接接头熔合区较宽, 晶粒粗大, 组织以铁素体为主, 少量奥氏体以条状和块状分布在铁素体基体上, 如图 1a 所示。热影响区铁素体和奥氏体成带状交替分布, 在 α/γ 相界面处有明显的黑色析出相, 一般认为, 黑色析出相多数为 σ 相^[7-9], 实际是铁素体发生共析转变的结果, 即铁素体分解成 σ 相和一种新的奥氏体相 (γ_2), 直到铁素体转变完全为止^[10]。图 1b 为 1 050 °C 固溶处理后的焊接接头组织, 可以看出 σ 相消失, 只存在铁素体和奥氏体组织。焊缝中奥氏体的含量比焊态明显增多, 说明固溶处理增加了铁素体向奥氏体转变的时间, 使焊缝在冷却时来不及转变的奥氏体在焊后热处理过程中转变析出。另外, 熔合区同样消失不见, 说明高温保温阶段为熔合区附近的组织生长提供了条件, 母材与焊缝金属能够很好地熔合, 减少了熔合区与母材和焊缝显微组织的差异性。



(a) 焊态

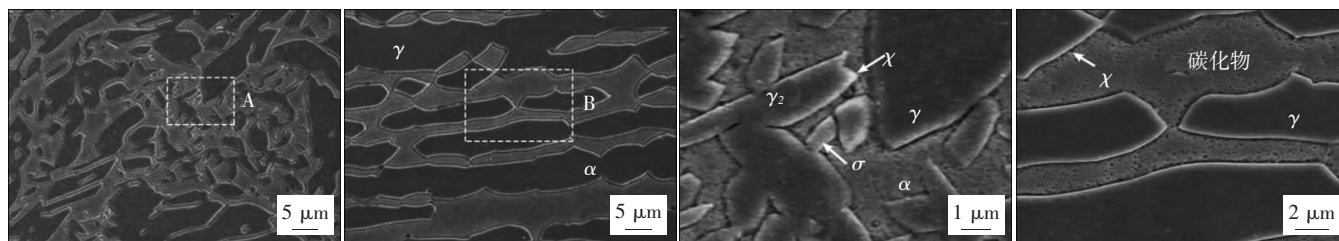


(b) 1 050 °C

图 1 2205 双相钢焊接接头显微组织

图 2 为未经热处理的焊缝及热影响区 SEM 组织, 可以看出焊缝区铁素体中存在少量析出相, 经 EDS 分析可以明确析出相包括 σ 相、 γ_2 相和 χ 相, 其中 σ 相为灰白色, 而 χ 相是亮白色^[8,11-12], 局部放大如图 2c 所示。EDS 元素分析结果见表 2, 其中析出相 χ 相中 Mo 含量较高, 而 σ 相中 Cr 含量较高, 这与 I. Calliari 等人^[11-12]的结论一致。热影响区的奥氏体组织主要以条状形式分布于铁素体基体上, 铁素体基体中未发现 σ 相析出, 但有少量黑色颗粒析出, 并且 α/γ 相界面处有亮白色析出相 χ 相。

图 3 为 1 050 °C 固溶处理后的焊接接头组织, 可以看出组织无析出相, 这与图 1c 得出的结论一致, EDS 元素分析同样证实了这个结论。这是因为温度升高, 奥氏体相聚集, α/γ 相界面减少, 使得 σ 相的形核位置减少。另一方面, Mo 元素可以扩大 σ 相形核的温度范围, 缩短



(a) 焊缝区

(b) 热影响区

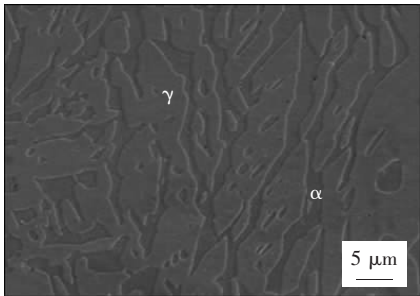
(c) A 区放大

(d) B 区放大

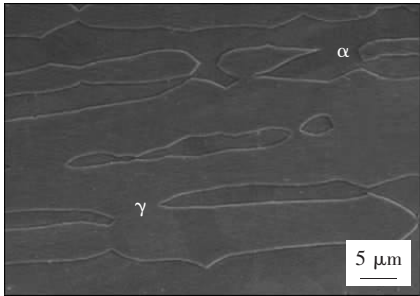
图 2 未经热处理的焊缝及热影响区 SEM 组织图

表2 焊缝中的 $\alpha, \gamma, \chi, \sigma$ 相 EDS 化学成分(质量分数,%)

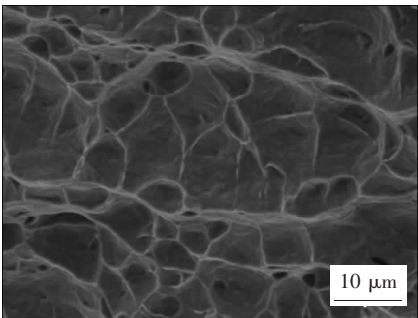
相	Cr	Mo	Ni	Fe	Mn	Si
α	26.41	5.59	4.19	61.98	1.02	0.81
γ	22.36	4.35	8.76	62.73	1.14	0.66
χ	25.93	10.71	3.67	57.56	1.46	0.67
σ	27.67	8.08	3.97	57.98	1.51	0.79



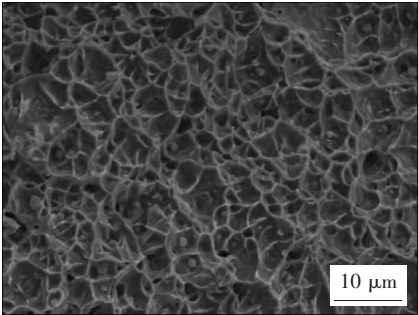
(a) 焊缝



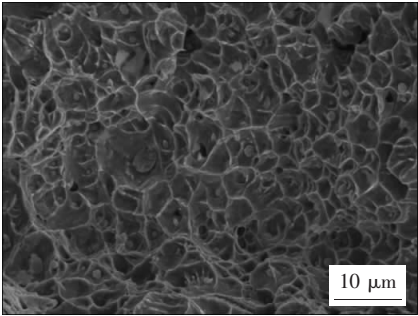
(b) 热影响区



(a) 母材(未做热处理)



(b) 焊缝(未做热处理)



(c) 焊缝(1 050 °C固溶)

图3 1 050 °C固溶处理下焊缝及热影响区的 SEM 组织图

σ 相的形成时间^[13],而 Cr,Mo 等元素迁移速度随着温度的升高而增加,这会使这些元素在两相中的分配系数发生改变,从而使 Cr,Mo 等元素不在铁素体中偏聚,最终导致 σ 相的析出敏感性减小,这就阻碍了 σ 相的析出^[14-15]。

2.2 冲击韧性

根据 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》标准,将焊接试样加工成 5 mm × 10 mm × 55 mm 的 V 形缺口冲击试样,并根据 ASTM A923—2006 进行 -40 °C 冲击试验,冲击断口形貌如图 4 所示。由图 4a 可以看出,未经热处理的母材冲击断口上存在较大且较深的韧窝,表现出了良好的韧性,实测冲击吸收能量为 103 J;图 4b 为焊缝区冲击断口形貌,可以看出断裂机制是以韧性断裂为主,并存在少量解理断裂的韧脆混合断裂机制,断口上的韧窝和撕裂棱虽然很均匀,但韧窝大小和深度远不及母材。韧窝中有大量颗粒,利用 EDS 对颗粒成分进行分析,发现氧元素含量接近 50%,可以肯定颗粒为氧化物夹渣。药芯焊丝焊接过

图4 不同热处理温度焊接接头冲击断口形貌

程中,夹渣是不可避免的,只能通过合理的焊丝成分设计和焊接工艺参数来减少夹渣所占比例。夹渣的存在会削弱焊缝的冲击韧性,焊缝实测冲击吸收能量为 41 J,远远小于母材,主要原因可能是焊接夹渣等缺陷的作用。图 4c 为焊后 1 050 °C 固溶处理的断口形貌,固溶后的断口仍然以韧性断裂为主,相比未固溶处理的焊缝组织,冲击吸收能量有所增加,实测值为 57 J,断

口中存在着大量的等轴韧窝,并且韧窝更加均匀。

2.3 显微硬度

图5为不同热处理温度焊接接头显微硬度测试结果,可以看出,未经热处理的焊接接头中热影响区硬度值最高,这是由于热影响区的冷却速度较快,奥氏体转变不充分,组织中铁素体含量较多,而铁素体为体心立方晶格,奥氏体为面心立方晶格,所以铁素体硬度高于奥氏体。1050℃固溶处理后的焊接接头硬度值大幅度降低,主要是因为组织中 σ 相消失以及奥氏体含量增加。

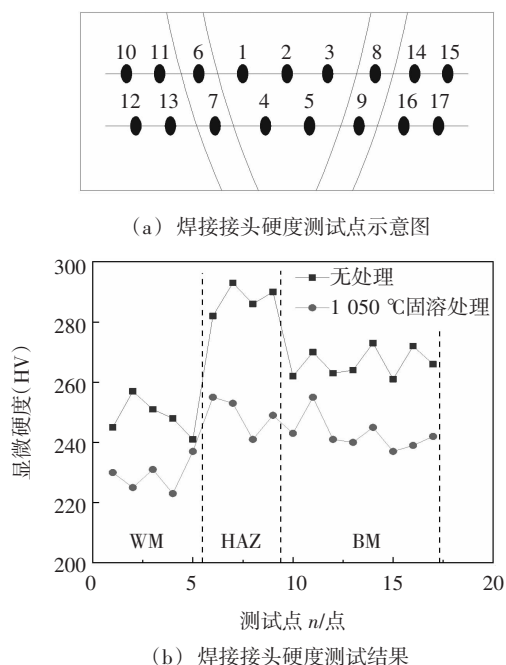


图5 固溶处理对焊接接头硬度值的影响

3 结论

(1) 未经热处理的2205双相钢焊缝区有少量 χ 相、 σ 相和 γ_2 析出,热影响区有 χ 相和颗粒析出。焊接接头熔合区较宽,晶粒粗大,组织以铁素体为主。

(2) 1050℃固溶处理后焊接接头的析出相消失,奥氏体含量增加,硬度有所降低,冲击韧性提高。

参考文献

- [1] Gunn R N. Duplex stainless steels, microstructure, properties and applications[M]. Abington Publishing, Cambridge, United Kingdom, 1997.
- [2] Ezuber H M, El-Houd A, El-Shawesh F. Effects of sigma phase precipitation on seawater pitting of duplex stainless steel[J]. Desalination, 2007, 207(1-3): 268-275.
- [3] Yang S M, Chen Y C, Chen C H, et al. Microstructural characterization of $\delta/\gamma/\sigma/\gamma_2/\chi$ phases in silver-doped 2205

- duplex stainless steel under 800℃ aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 633: 48-53.
- [4] Badji R, Bouabdallah M, Bacroix B, et al. Effect of solution treatment temperature on the precipitation kinetic of σ -phase in 2205 duplex stainless steel welds[J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 496(1): 447-454.
- [5] Li T Q, Zhang Y Y, Gao L, et al. Optimization of FCAW parameters for ferrite content in 2205 DSS welds based on the taguchi design method[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018.
- [6] 喻萍, 尹士科. 结构钢用气体保护药芯焊丝的发展趋势[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2011(5): 18-22, 32.
- [7] He Y L, Zhu N Q, Lu X G, et al. Experimental and computational study on microstructural evolution in 2205 duplex stainless steel during high temperature aging[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 528(2): 721-729.
- [8] Warren A D, Harniman R L, Guo Z, et al. Quantification of sigma-phase evolution in thermally aged 2205 duplex stainless steel[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(2): 694-707.
- [9] Huallpa E A, Monlevade E F, Capó Sánchez J, et al. Use of magnetic barkhausen noise (MBN) to follow up the formation of sigma phase in SAF 2205 (UNS S31803) duplex stainless steel[J]. Materials Research, 2016, 19(5): 1008-1016.
- [10] 邹德宁, 韩英, 李姣, 等. 热处理对2205双相不锈钢焊接接头力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 85-89.
- [11] Calliari I, Zanesco M, Ramous E. Influence of isothermal aging on secondary phases precipitation and toughness of a duplex stainless steel SAF 2205[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(22): 7643-7649.
- [12] Sun Q, Wang J, Li H B, et al. Chi phase after short-term aging and corrosion behavior in 2205 duplex stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(10): 1071-1079.
- [13] 刘雄, 何燕霖, 丁秀平, 等. 高温时效对2205双相不锈钢中 σ 相析出行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(3): 48-51.
- [14] 李继红, 唐江, 张敏. 固溶处理对2205双相不锈钢焊接接头组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(7): 13-16.
- [15] 仇璐. 超低碳双相不锈钢焊接及固溶处理工艺研究[D]. 江苏镇江: 江苏科技大学硕士学位论文, 2015.

第一作者简介: 李添祺, 1988年出生, 硕士; 从事金属材料焊接技术的研究; 已发表论文5篇。

通信作者简介: 张莹莹, 1981年出生, 博士; 从事压力容器特种焊接材料研发、焊接及应用方面的研究; 已发表论文50篇。