

试验研究

核电站安全壳用 SA738Gr.B 钢板焊接性能研究

蒋善玉

(山钢股份济南分公司 用户应用技术中心,山东 济南 250132)

摘要:以核电站安全壳用42.5 mm厚SA738Gr.B钢板为试验材料,研究了熔化极气体保护焊接过程中的热输入以及焊后热处理对试验钢焊接接头组织和性能的影响。结果表明,随着焊接热输入量的增加,焊接接头的低温冲击功有先增大后减小的趋势;抗拉强度相差不大;而焊后热处理对焊接接头的力学性能影响较小。随着线能量的增大,针状铁素体减小且伴随着一定程度的粗化,粗大的先析铁素体组织明显增多。焊接热输入量在1.2~2.0 kJ/mm范围内焊接时,焊接接头均可获得良好的综合力学性能。焊后消除应力热处理对焊接接头的性能影响不大,当采用较大线能量进行焊接时,建议进行焊后热处理以减小残余拉应力。

关键词:SA738Gr.B钢板;焊接;焊接接头;力学性能;金相组织;残余应力

中图分类号: TG457.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4620(2015)05-0042-03

1 前言

核电站安全壳内放置反应堆、蒸发器、稳压器等核岛设备,具有防止放射性泄露和保护核岛免受外来冲击的作用。第3代 AP-1000 核电站安全壳用 SA738Gr.B 钢板,性能要求较高,为了掌握该钢种的基本焊接性能,并在此基础上合理匹配焊接材料、优化焊接工艺,使 SA738Gr.B 钢的焊接接头性能满足应用需求,对 SA738Gr.B 钢板进行熔化极混合气体保护焊焊接接头综合力学性能及焊接工艺适应性系统研究。

2 试验方法

试验材料采用济钢生产的厚度为 42.5 mm 的 SA738Gr.B 钢板,生产工艺:转炉冶炼→LF+VD 炉外精炼→连铸→轧制→淬火+回火。钢板的化学成分见表 1。钢板屈服强度 ≥ 415 MPa,抗拉强度 585~705 MPa, $A_{50} \geq 20\%$ 。钢板的化学成分及力学性能符合 ASME SA-738/SA738M—2013 标准要求。

采用大西洋公司生产的 $\Phi 1.2$ mm ER90S-G 实心焊丝,焊丝成分见表 2。焊丝力学性能: $R_{m0.2} \geq 490$ MPa, $R_m \geq 620$ MPa, $A \geq 19\%$, -20°C $KV_2 \geq 47$ J。

表 1 SA738Gr.B 钢板的化学成分(质量分数) %

项目	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Ni	Cr	Mo	Cu
试验材料	0.1	0.28	1.31	0.007	0.001	0.02	0.03	0.02	0.33	0.1	0.1	0.01
标准要求	≤ 0.20	0.15~0.55	0.90~1.50	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 0.04	0.07	0.03	≤ 0.60	≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.35

表 2 $\Phi 1.2$ mm ER90S-G 焊丝的化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Ti
≤ 0.10	0.50~0.80	1.40~1.80	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.50	0.70~1.50	0.30~0.60	≤ 0.12

焊接设备采用奥地利福尼斯 TPS5000 CO₂ 气体保护焊机,试板尺寸为 450 mm × 125 mm,组对间隙 3 mm,反面清根双面焊接,焊接时不预热,环境温度为 20 °C,相对湿度 55%。

3 对接接头焊接工艺

焊接热输入量的变化将改变焊接冷却速度,影响焊接热循环过程,进而对焊接接头焊缝金属和热影响区的力学性能带来影响^[1]。本试验研究了在熔化极气体保护焊工艺条件下,从焊接接头的低温冲击韧性、拉伸强度、弯曲性能、显微硬度 4 个方面,研

收稿日期:2015-06-11

作者简介:蒋善玉,女,1967年生,1990年毕业于北京科技大学腐蚀与防护专业。现为山钢股份济南分公司用户应用技术中心高级工程师,从事产品研发与销售工作。

究不同焊接热输入量及焊后热处理(加热温度 600 °C、保温时间 10 h)对 SA738Gr.B 钢焊接接头力学性能的影响,为制定焊接工艺提供依据。冲击、拉伸、弯曲试验的执行 GB/T 2650—2008、GB/T 2651—2008 和 GB/T 2653—2008 标准,每个试板焊接接头力学性能评定采用全厚度拉伸试样 4 个,侧弯试样 4 个,焊缝区、熔合区、距离熔合线 1 mm、3 mm、5 mm 冲击试样各 3 个。

3.1 焊接热输入量对接头性能的影响

$\Phi 1.2$ mm ER90S-G 实心焊丝、80% Ar + 20% CO₂ 气体保护焊,钢板的常规焊接热输入为 1.0~2.0 kJ/mm,因此选取 1.2、1.6 和 2.0 kJ/mm 3 种焊接热输入,焊接 42.5 mm 厚度的 SA738Gr.B 钢板对接接头。焊层间温度 50 °C,其他焊接参数见表 3。

表3 熔化极气体保护焊焊接参数

编号	焊接 电流/A	电弧 电压/V	焊接速度/ (mm·min ⁻¹)	焊接热输入/ (kJ·mm ⁻¹)
1	224	26.8	300	1.2
2	240	29.7	270	1.6
3	249	30.1	220	2.0H*
4	249	30.1	220	2.0

*表示焊后热处理(600 °C × 10 h)。

3.1.1 力学性能

不同焊接热输入量下焊接接头的-29 °C横向低温冲击性能试验结果见图1。可以看出,焊缝和热影响区的冲击韧性均低于母材,而熔合线是焊接接头最薄弱的区域,冲击韧性最低。焊接热输入量对焊接接头冲击韧性有一定影响;随着焊接热输入量的增加,焊接接头各个区域的低温冲击吸收功均有先增大后减小的趋势;控制线能量在1.6 kJ/mm可获得最佳的冲击韧性。综合焊缝区、熔合线以及热影响区的性能,采用1.2~2.0 kJ/mm线能量焊接,焊接接头均完全能满足力学性能要求,其中在热输入量为1.6 kJ/mm时,焊接接头的冲击性能最好。经过消除应力退火处理后,冲击韧性变化不大。

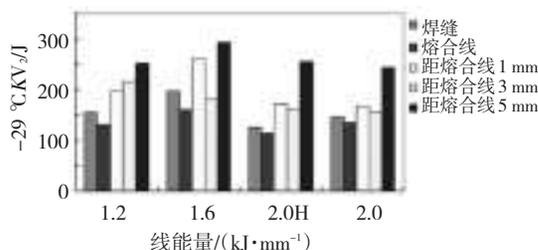


图1 焊接热输入对焊接接头低温冲击韧性的影响

不同焊接热输入量焊接接头拉伸试验结果见表4,试样断裂位置均在母材。不同热输入量下试

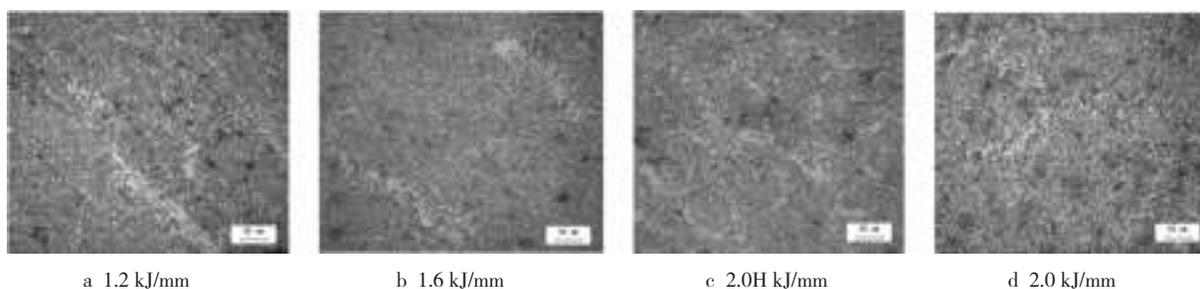


图2 不同热输入下及焊后消除应力处理后的焊缝金相组织

由于热影响区(HAZ)的力学性能尤其是韧性与晶粒尺寸有很大的关系,奥氏体晶粒的粗化和其他相的析出均有可能导致焊接接头性能的降低。因此,热影响区粗晶区是决定接头性能的重要区域。图3是不同热输入下得到的HAZ粗晶区组织。

由图3可以看出,钢板HAZ组织以板条马氏体和贝氏体组织为主。当热输入量较小(1.2 kJ/mm)时, A_{c3} 温度以上停留时间较短,冷却速度较快,组织主要是板条马氏体,马氏体的形貌呈细长条状、多

样的抗拉强度相差不大,均具有足够的富裕量。而经过热处理以后,抗拉强度有所下降,表明焊后消除应力退火会导致钢材一定程度的软化。为了减小软化程度,需要控制好退火温度。

表4 焊接热输入对焊接接头拉伸性能的影响

焊接热输入/ (kJ·mm ⁻¹)	抗拉强度/MPa	
	测量值	平均值
1.2	615,620,620,605	615
1.6	610,610,600,620	610
2.0H	590,585,600,600	594
2	610,625,615,615	616

不同焊接热输入量下焊接接头横向侧弯180°(d=4 a)全部合格。与拉伸测试结果相似,各种热输入下的试样均合格,体现了较好的抗弯曲性能。因此,SA738Gr.B钢对热输入量具有良好的适应性,在1.2~2.0 kJ/mm的焊接热输入范围内,钢板焊接接头具有良好的力学性能,且力学性能富裕量较大。比较而言,在热输入量为1.6 kJ/mm时,焊缝和热影响区的综合力学性能最好,而焊后热处理对焊接接头的力学性能影响较小。

3.1.2 金相组织

图2为不同热输入下及焊后消除应力退火处理后焊接接头的焊缝组织。由图2可知,采用熔化极气体保护焊时,SA738Gr.B钢的焊缝组织以细小、均匀的针状铁素体为主,在原始奥氏体晶界上分布有少量先共析铁素体。随着热输入线能量的增大,针状铁素体数量逐渐减小且伴随着一定程度的粗化,粗大的先共析铁素体组织明显增多。比较图2c、图2d可以看出,经过消除应力退火以后,先共析铁素体呈网状分布,对接头的韧性会产生不利影响。

个板条平行排列,同方向生长形成板条束,板条束之间呈大倾角相交,强度较高,韧性较好。当采用中等焊接热输入(1.6 kJ/mm)时,由于冷却速率较低,开始有少量下贝氏体和针状铁素体出现。随着焊接热输入的增加,热影响区的板条状马氏体和贝氏体组织粗化,导致该区域冲击韧性变差。图3表明,当热输入为1.6 kJ/mm时,组织为细小的板条马氏体、下贝氏体以及针状铁素体(图3b),既有较高的强度,同时冲击韧性也最好。

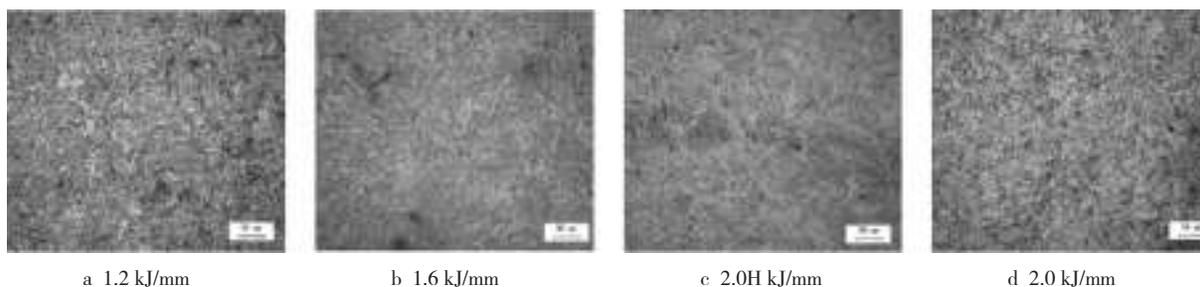


图3 不同热输入下钢板HAZ粗晶区金相组织

3.1.3 显微硬度

不同热输入下焊接接头的显微硬度见图4。

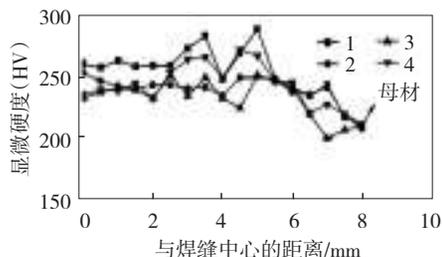


图4 不同热输入下焊接接头的显微硬度

图4表明焊接接头的硬度最大值都出现在完全淬火区,这跟此区域的粗大马氏体组织有关。比较1、2、4曲线,可知随着线能量的增大,热影响区最高硬度先减小后增大,这是由于热输入较小(1.2 kJ/mm)时,热影响区为低碳马氏体组织,硬度最高;而热输入为1.6 kJ/mm时,马氏体有了一定程度的长大,同时有少量的下贝氏体组织生成,硬度有所下降;当热输入增大到2.0 kJ/mm时,碳化物大量析出长大,硬度又增大。比较3、4曲线,可以得到碳化物大量析出长大,硬度又增大;焊后经过消除应力退火处理,硬度下降。

3.2 焊接工艺参数对焊缝表面成形的影响

焊接参数的变化会引起焊缝成形的变化,结合焊接线能量对焊接接头性能影响试验,研究了电流、电压以及焊接速度对焊缝外观成形的影响。

打底焊时需要保证充分熔透,且防止烧穿,故需采用小电流,低焊速。焊接工艺参数:焊接电流160 A,电压18.9 V,速度200 mm/min,焊缝成形良好。

不同焊接线能量下的焊缝成形情况表明,用小线能量(1.2 kJ/mm,焊接电流224 A,电弧电压26.8 V,焊速300 mm/min)焊接后的焊缝侧壁熔合较差,易出现侧壁未熔合等缺陷。考虑到焊接效率及可能出现焊接缺陷等因素,不推荐用于对接接头的焊接。当使用大线能量(2.0 kJ/mm,焊接电流249 A,电弧电压30.1 V,焊速220 mm/min)焊接时,侧壁熔合充分,但是飞溅较大,焊缝表面产生的杂质较多,焊接接头性能有所下降。考虑到其生产效率较高,可结合实际情况优化工艺采用。1.6 kJ/mm线能量焊接时,焊缝成形质量良好,且飞溅较小,可根据

焊接件性能要求进行选择。

3.3 焊接残余应力

残余应力测试试验根据ASTM E837—99标准,采用小直径盲孔法,利用ZS21B型残余应力检测仪进行测试,对线能量为2.0 kJ/mm的焊接接头消除应力热处理后再进行残余应力测试,测试结果和未处理前进行比较,结果见表5。

表5 不同热输入下焊接接头的残余应力

焊接热输入/ (kJ·mm ⁻¹)	距离焊缝 侧壁/mm	ε_1 ($\mu\varepsilon$)	ε_2 ($\mu\varepsilon$)	ε_3 ($\mu\varepsilon$)	σ_1 / MPa	σ_2 / MPa	θ / ($^\circ$)
1.2	7	-11.91	-54.60	-52.5	85.39	43.42	47.82
1.2	12	32.19	0.70	-10.5	-5.28	-38.10	25.43
1.2	17	57.39	11.20	-1.4	-32.48	-79.50	29.73
1.6	7	46.91	-12.54	-31.5	15.25	-46.06	27.37
1.6	12	30.09	26.61	17.5	-42.80	-52.38	-24.07
1.6	17	57.41	21.70	11.2	-50.33	-86.88	28.61
2.0	7	37.80	-58.10	-70.7	80.39	-14.59	37.52
2.0	12	32.91	-7.00	-28.7	18.10	-26.51	16.46
2.0	17	16.10	2.10	0.02	-27.62	-25.48	18.23
2.0H	7	46.22	-25.91	-30.8	20.08	-50.92	41.12
2.0H	12	46.20	9.09	-27.3	6.61	-44.43	0.56
2.0H	17	30.52	16.60	4.0	10.68	-35.61	43.92

从表5可以看出,焊接接头残余应力随着线能量的增加,拉应力先减小后增大,压应力先增大后减小。当线能量为1.6 kJ/mm时,残余拉应力最小,残余压应力最大。经过消除应力热处理后,残余拉应力大幅减小。所以当采用较大线能量进行焊接时,建议进行焊后热处理以减小残余拉应力。

5 结论

5.1 核电站安全壳用SA738Gr.B钢板具有良好的焊接线能量适应性,热输入量在1.2~2.0 kJ/mm范围内焊接时,焊接接头均可获得良好的综合力学性能。焊后消除应力热处理对焊接接头的性能影响不大。核电站安全壳用SA738Gr.B钢板具有较好的焊接性能。

5.2 经过消除应力热处理后,残余拉应力大幅减小。当采用较大线能量进行焊接时,建议进行焊后热处理以减小残余拉应力。

参考文献:

- [1] 赵辉,邓想涛.700 MPa级高强度调质钢板焊接性能研究[J].宽厚板,2014,2(1):9-13. (下转第48页)

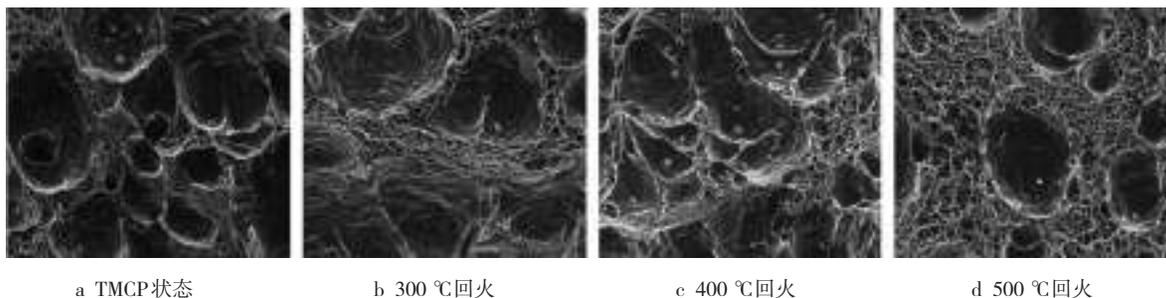


图5 TMCP状态及不同温度回火后试验钢的断口形貌(韧窝) 1 000×

火温度升高至500℃, P_m 增加, E_2 和 E_3+E_4 降低, 止裂性能变差。

4.3 TMCP试验钢的组织为粒状贝氏体(GB)、板条贝氏体(LB)和针状铁素体(AF)。经250~500℃回火30 min后, 随着温度升高, GB体积分数增加, LB和AF减少, 碳化物析出数量增加, 组织逐渐粗化。AF在回火过程中变化不大。

参考文献:

- [1] 孙明雪, 王猛, 衣海龙, 等. 回火温度对低碳贝氏体高强度钢组织性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(12): 1 725-1 729.
- [2] 夏志伟, 孙新军, 雍岐龙, 等. 新型Mn系超低碳贝氏体高强高韧钢的开发[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(3): 125-129.
- [3] Hong S G, Lee W B, Park C G. The effects of Tungsten Addition

on the Microstructural Stability of 9Cr-Mo steels [J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 288: 202-207.

- [4] 王克鲁, 鲁世强, 陈庆军, 等. 回火温度对热轧低碳贝氏体钢显微组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2009, 33(5): 9-11.
- [5] 黄少文, 周平, 霍孝新. 回火热处理对X100管线钢组织和冲击断裂行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(Z): 122-128.
- [6] 高古辉, 张寒, 白秉哲. 回火温度对Mn系低碳贝氏体钢的低温韧性的影响[J]. 金属学报, 2011, 47(5): 513-519.
- [7] 邓伟, 高秀华, 秦小梅, 等. X80管线钢的冲击断裂行为[J]. 金属学报, 2010, 5(46): 533-540.
- [8] 李红英, 魏冬冬, 林武, 等. X80管线钢冲击韧性研究[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(11): 73-78.
- [9] 崔钧贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 120-281.

Influence of Tempering on Microstructure and Properties of Low Carbon Bainite Steel

HUANG Shaowen

(The Heavy Plate Business Division of Laiwu Iron and Steel Group Corporation, Laiwu 271100, China)

Abstract: The effects of tempering process kept from 250 °C to 500 °C × 30 min on microstructure and properties of low carbon bainite steel were investigated. The test results show that microstructure of TMCP test steel consists of lath bainite (LB), granular bainite (GB), acicular ferrite (AF). With increasing of the temper temperature, volume fraction of GB increased, LB and AF decreased. After tempered at 350 °C, the test steel's $R_{0.5}$ is 735-765 MPa, R_m is 845-865 MPa, $R_{0.5}/R_m$ is 0.87-0.88, impact energy -20 °C is 218-257 J, the strength and toughness are improved. When the tempering temperature is between 250-400 °C, the crack formation energy (E_1), ductility fracture propagating energy (E_2) and brittle crack propagation energy (E_3) + brittle crack arrest energy (E_4) are better, that presents a good anti-crack ability.

Key words: low carbon bainite steel; tempering; microstructure; strength and toughness

(上接第44页)

Study on the Welding Performance of SA738Gr.B Steel for the Safety Shell of Nuclear Power Station

JIANG Shanyu

(The Consumer Application Technology Center of Jinan Branch Company of Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250132, China)

Abstract: The SA738Gr.B steel plate with 42.5 mm thickness for the safety shell of a nuclear power plant is used as the experimental material, the GMAW welding heat input and post weld heat treatment on the microstructure and properties of welded joint were studied. The results show that, with increasing of the welding heat input, low temperature impact toughness of welded joint increased firstly and then decreased; the tensile strength difference is lesser, and the post weld heat treatment has little effect on the mechanical properties of the welding joint. Weld microstructure has fine and homogeneous acicular ferrite, with increasing of input energy lines, acicular ferrite prime number gradually decreased and accompanied by a certain coarsening, massive pro-eutectoid ferrite increased significantly. Welding heat input in the range of 1.2-2 kJ/mm in the range of welding, the better comprehensive mechanical properties can be obtain in welding joint, on this condition post weld stress relief heat treatment has little effect on the properties of welded joints. When using large line energy welding, heat treatment after welding is recommended to reduce the residual tensile stress.

Key words: SA738Gr.B plate; welding; welded joint; mechanical property; microstructure; residual stress