

浅析 13MnNiMo5-4 钢的焊接工艺试验

杨锦辉
(中国能源建设集团广东火电工程有限公司 广东 广州 510730)

摘要: 本文针对某电厂 13MnNiMo5-4 钢制厚板汽包下降管管座更换需要, 研究了采用手工氩电联焊焊接国产 13MnNiMo5-4 钢焊缝的各项性能, 通过对不同焊后热处理恒温时间的 13MnNiMo5-4 焊接试件接头检验数据的分析, 各项性能数据均能符合相关标准及使用要求, 并有较大裕量, 满足 13MnNiMo5-4 钢制厚板汽包下降管管座更换焊接工艺要求。

关键词: 13MnNiMo5-4 钢; 汽包; 焊接性能; 焊接工艺

0 引言

某 300MW 亚临界自然循环燃煤机组 2# 锅炉在 2020 年大修金属监督检查中发现汽包 #1 下降管管座母材上存在严重缺陷, 主要为表面裂纹、硬度不均、内部存在体积和面积型缺陷等, 经安全性评估, 需对该汽包 #1 下降管管座进行更换处理。该锅炉汽包外径为 $\Phi 2033\text{mm}$, 汽包筒壁厚度 145mm, 材料为 13MnNiMo5-4 钢, 锅身全长 22394mm, 总重量约为 166t, 下降管管座材质为 13MnNiMo5-4, 规格为: $\Phi 628 \times 104\text{mm}$ 。为了制订合理的焊接工艺, 在更换处理前进行了 13MnNiMo5-4 钢焊接工艺试验。

1 焊接性分析

13MnNiMo5-4 是由舞钢生产的一种可焊性良好的锰镍钼系低合金高强度结构钢, 该钢种首先由德国开发研制, 德标牌号 DIWA353 (BHW35), 对应国标牌号 13MnNiMoR; 该钢具有较高的中温屈服强度, 良好的塑性和韧性, 而且焊接性能良好, 可用作工作温度不高于 400°C 的电站锅炉锅筒, 压力容器、管道及其它部件。

1.1 材料成份及金相组织分析

根据下表 1 可知, 13MnNiMo5-4 钢的 C、S 及 P 元素的含量非常低, 因此焊接热裂纹倾向较小; 按照 GB 713-2014《锅炉和压力容器钢板》13MnNiMo5-4 钢供货状态为正火+回火, 正火时组织为贝氏体加铁素体, 回火时的组织为回火贝氏体加铁素体。钢材加入一定量 Cr、Mo 元素可以提高钢的淬透性, 提高钢的室温和中温强度, 能抑制钢热脆性和回火脆性, 热强性能高; Ni 的加入, 可以提高钢的淬透性, 保证大截面工件得到均匀的组织 and 性能; 可

以提高钢的抗疲劳能力和减少钢对缺口的敏感性; 一定量的 Nb 元素加入, 可以显著提高钢的相变点, 减小钢的淬硬性。在合理的热处理条件下, 晶粒细化、抗裂纹扩展敏感性好。

1.2 材料成份及金相组织分析

采用国际焊接学会 (IIW) 所推荐的碳当量计算公式: $CE=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Cu+Ni)/15$ (%)= 0.577% ; 采用日本 JIS 标准所规定的碳当量计算公式: $Ceq = C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$ (%)= 0.576% 。两种公式计算结果, 碳当量都大于 0.5%, 说明 13MnNiMo5-4 钢在焊接时有一定的淬硬倾向; 为了保证焊接质量, 防止焊接裂纹或热影响区性能下降, 从焊前准备、预热到焊接及焊后热处理的各个环节都需要进行严格控制。

2 焊接工艺试验

2.1 试验母材及焊接方法

采用舞阳钢铁生产的 45mm 厚 13MnNiMo5-4 钢板, 采用 GTAW 打底及 SMAW 填充盖面的焊接方法。

2.2 坡口形式及焊道布置

试板加工成双 V 形坡口, 坡口尺寸及焊道布置见图 1。

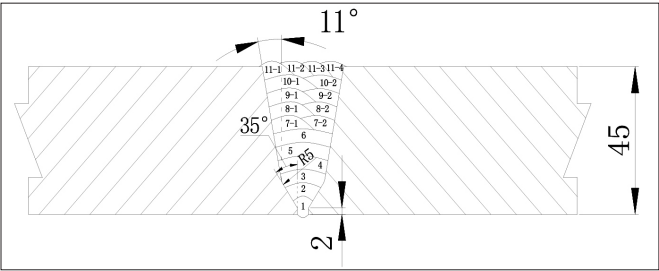


图 1 坡口尺寸及焊道布置

2.3 焊接材料

选用原上海电力修造总厂有限公司的 PP-TIG60-4C (ER60-G) ($\Phi 2.5\text{mm}$) 氩弧焊丝和 PP-TIG60-4C (ER60-G) ($\Phi 3.2$ 和 4.0mm) 焊条。

2.4 焊接工艺参数及焊后热处理

采用 GTAW 打底+SMAW 填充盖面的焊接方法共焊接 3 副试件, 焊前预热温度: GTAW: $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 、SMAW: $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$; 整个焊接过程中控制层间温度 $\leq 300^{\circ}\text{C}$ 。焊后进行 $600 \sim 630$ (设定 615°C) 的高温回火热处理, 3 副试件

表 1 13MnNiMoR 的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu
≤ 0.15	0.15 ~ 0.50	1.20 ~ 1.60	≤ 0.010	≤ 0.020	0.2 ~ 0.4	0.60 ~ 1.00	0.20 ~ 0.40	0.005 ~ 0.020	≤ 0.30
0.13	0.38	1.50	0.0020	0.008	0.36	0.65	0.263	0.013	0.07

表 2 13MnNiMoR 的力学性能

抗拉强度 Rm/MPa	屈服强度 ReI/MPa	断后伸长率 A (%)	冲击吸收功 Ak/J (0°C)
570 ~ 720	≥ 390	≥ 18	≥ 47
633	521	24.5	142.7

焊后热处理恒温时间分别为 2.5h、4h、5.5h。焊接及热处理工艺参数规范见下表 5、6，13MnNiMo5-4 试件焊接及试件理化检验试样见图 2。

3 试验结果

3.1 拉伸试验

3 副试件焊接接头常温拉伸试验和 350℃ 高温拉伸试验数据见表 7、表 8。

从常温拉伸数据可以看出，A 组的焊接接头抗拉强度最高，B 组和 C 组强度值稍有降低。对于每一组数据，其焊缝强度值较母材标准（570 ~ 720MPa）都有较大裕量，并且波动不大，能稳定在一个很小的范围内。同时，从试样的断裂位置来看，拉伸试样全部断裂为母材上，说明焊缝的强度大于母材。在 350℃ 中温拉伸时，屈服强度和抗拉强度下降不明显，总体屈服强度较标准（ ≥ 306 ）有较大裕度，

表 3 PP-TIG60-4C（ER60-G）焊丝化学成分

元素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu
标准值	≤ 0.10	1.00 ~ 1.70	≤ 0.50	≤ 0.010	≤ 0.015	0.14 ~ 0.35	0.60 ~ 1.20	0.10 ~ 0.40	≤ 0.20
实测值	0.072	1.4	0.27	0.005	0.008	0.26	0.92	0.31	0.03

表 4 PP-TIG60-4C（ER60-G）焊条化学成分

元素	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo
标准值	≤ 0.12	1.00 ~ 1.70	≤ 0.80	≤ 0.015	≤ 0.025	0.60 ~ 1.20	0.10 ~ 0.40
实测值（3.2）	0.060	1.66	0.39	0.006	0.012	1.12	0.30
实测值（4.0）	0.053	1.61	0.29	0.005	0.014	0.98	0.22

表 5 A/B/C 3 副焊接试件

编号	材质	规格（mm）	焊接方法	焊接位置	焊接材料	热处理恒温温度	热处理恒温时间
试件 A	13MnNiMo5-4	$\delta = 45\text{mm}$	GTAW	3G	PP-TIG60-4C（ER60-G）	600 ~ 630（设定 615℃）	2.5h
			SMAW		PP-J607RH（E5915-G）		
试件 B	13MnNiMo5-4	$\delta = 45\text{mm}$	GTAW	3G	PP-TIG60-4C（ER60-G）	600 ~ 630（设定 615℃）	4h
			SMAW		PP-J607RH（E5915-G）		
试件 C	13MnNiMo5-4	$\delta = 45\text{mm}$	GTAW	3G	PP-TIG60-4C（ER60-G）	600 ~ 630（设定 615℃）	5.5h
			SMAW		PP-J607RH（E5915-G）		

表 6 A/B/C 3 副试件焊接工艺参数

焊道、焊层	焊接方法	填充金属		焊接电流		电弧电压（V）	焊接速度（cm/min）	线能量（kJ/cm）
1	GTAW	ER60-G（TIG60-4C）	$\phi 2.5$	直流正接	90 ~ 130	9 ~ 13	4 ~ 10	15 ~ 35
2	GTAW	ER60-G（TIG60-4C）	$\phi 2.5$	直流正接	90 ~ 130	9 ~ 13	4 ~ 10	15 ~ 35
3	SMAW	E5915-G（J607RH）	$\phi 3.2$	直流反接	100-130	20 ~ 28	5 ~ 12	15 ~ 35
≥ 4 层	SMAW	E5915-G（J607RH）	$\phi 3.2$ $\phi 4.0$	直流反接	100-130 140-170	20 ~ 28	5 ~ 15	15 ~ 35
盖面层	SMAW	E5915-G（J607RH）	$\phi 3.2$	直流反接	110-140	20 ~ 28	5 ~ 13	15 ~ 35



图 2 13MnNiMo5-4 试件焊接及试件理化检验试样

随着保温温度的延长强度变化不明显。

3.2 冲击试验

焊缝及热影响区 0℃ 冲击试样数据见表 9。

从以上 0℃ 冲击数据可以看出，对于不同焊后热处理恒温时间的焊缝，处于热影响区的母材冲击性能均较高，且随着恒温时

间的延长，冲击值无下降迹象。对于焊缝区的冲击性能，随着热处理恒温时间的延长，冲击性能有稍许下降，但下降的趋势不统一。从三组数据看来，0℃冲击性能都能很好地满足标准要求，并且裕度较大。

3.3 弯曲试验

按照 NB/T47014-2011 标准，对 A/B/C 3 副试件各取 4 组侧弯试件，进行 180° 弯曲，弯曲试验均合格，都能很好地满足标准要求。

3.4 硬度试验

从表 10 硬度数据可以看出，焊接接头各部位的硬度值相差不大，数值比较均匀，完全符合 DL/T 869-2012 的标准规定。

3.5 金相

不同焊后热处理恒温时间状态下，试件焊缝及热影响区组织均为回火贝氏体，随着保温时间的延长，晶粒趋向均匀，粒状贝氏体含量增加尺寸无明显变化，见图 3 和图 4。

4 结语

针对 13MnNiMo5-4 汽包用钢采用钨极氩弧焊打底、焊条电弧焊填充、盖面，焊接质量符合国标与图纸的要求。按照 NB/T47014-2011 规定进行焊接试件检验并测定性能，得出所选钨极氩弧焊焊接电流 100 ~ 130A、焊接电压 9 ~ 13V、焊接速度 4 ~ 10cm/min，焊条电弧焊焊接电流 110 ~ 140A(3.2mm)/140 ~ 170A(4.0mm)、焊接电压 20 ~ 28V、焊接速度 5 ~ 12cm/min，焊后热处理温度设定为 600 ~ 630℃的工艺合格。

本次试验采用的焊接和热处理规范完全符合锅炉汽包管座更换相关生产工艺标准，试验结果完全满足相关标准要求，焊缝性能稳定，并且各项性能指标均有较大裕量。按照上述既定焊接工艺试验结果并根据现场汽包管座更换工况，制定了该电厂 2#

表 7 常温拉伸试验性能

试件编号	试样编号	试样宽度 (mm)	试样厚度 (mm)	横截面积 (mm ²)	最大载荷 (KN)	抗拉强度 (MPa)	断裂部位和特征
试件 A	1	45.20	25.10	1134.52	734.00	647.00	母材断 / 无明显缺陷
	2	45.50	25.04	1139.32	730.00	641.00	母材断 / 无明显缺陷
试件 B	1	45.00	25.10	1129.50	700.00	620.00	母材断 / 无明显缺陷
	2	44.10	25.00	1102.50	692.00	628.00	母材断 / 无明显缺陷
试件 C	1	45.00	25.10	1129.50	718.00	636.00	母材断 / 无明显缺陷
	2	45.20	25.00	1130.00	712.00	630.00	母材断 / 无明显缺陷

表 8 350℃ 高温拉伸试验性能

试件编号	试样尺寸 (mm)	横截面积 (mm ²)	抗拉强度 (MPa)	规定塑性延伸强度 RP0.2(MPa)	断后伸长率 A(%)	断面收缩率 Z(%)	断裂部位和特征
试件 A	Φ10.03	79.01	552.00	455.00	16.50	72.00	母材断 / 无明显缺陷
试件 B	Φ10.02	78.85	551.00	442.00	17.00	73.00	母材断 / 无明显缺陷
试件 C	Φ10.03	79.01	550.00	456.00	16.00	72.00	母材断 / 无明显缺陷

表 9 0℃冲击试验性能

试件编号	试样编号	试样尺寸 (mm)	夏比 V 型缺口位置	试验温度	冲击吸收功 (J)						平均值
试件 A	1 ~ 5	5 × 10 × 55	氩弧	焊缝	0℃	90.5	94.0	89.5	95.0	104.5	94.7
	6 ~ 10	5 × 10 × 55		热影响区	0℃	102.5	98.0	103.5	107.0	99.0	102
	11 ~ 15	10 × 10 × 55	焊条	焊缝	0℃	109.0	136.0	147.0	142.5	147.0	136.3
	16 ~ 20	10 × 10 × 55		热影响区	0℃	121.5	221.5	241.0	184.5	85.5	170.8
试件 B	1 ~ 5	5 × 10 × 55	氩弧	焊缝	0℃	96.0	90.0	93.0	101.5	91.5	94.4
	6 ~ 10	5 × 10 × 55		热影响区	0℃	104.5	100.5	102.5	90.5	99.0	99.4
	11 ~ 15	10 × 10 × 55	焊条	焊缝	0℃	103.5	91.5	121.5	91.5	104.5	102.5
	16 ~ 20	10 × 10 × 55		热影响区	0℃	> 300	101.5	241.5	228.0	258.0	207.25
试件 C	1 ~ 5	5 × 10 × 55	氩弧	焊缝	0℃	84.0	90.5	89.5	89.5	90.5	88.8
	6 ~ 10	5 × 10 × 55		热影响区	0℃	101.5	103.5	101.5	103.5	94.0	100.8
	11 ~ 15	10 × 10 × 55	焊条	焊缝	0℃	118.0	83.0	113.5	122.5	89.5	105.3
	16 ~ 20	10 × 10 × 55		热影响区	0℃	110.0	204.5	217.5	256.5	208.5	199.4

表 10 硬度试验数据表 (HV10)

试件编号	母材	焊缝	热影响区
试件 A	195,206,193,203,199	221,237,228,237,237	199,237,247,285,285
试件 B	193,195,193,206,195	221,221,221,228,237	237,274,264,274,274
试件 C	203,199,213,221,199	245,213,228,237,221	197,240,247,242,257

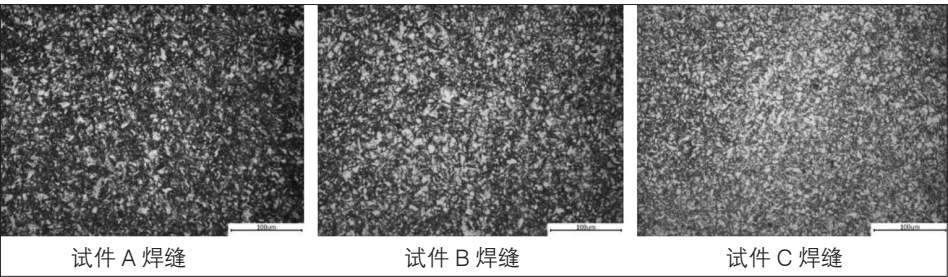


图 3 615℃ 时不同保温时间焊缝的微观组织

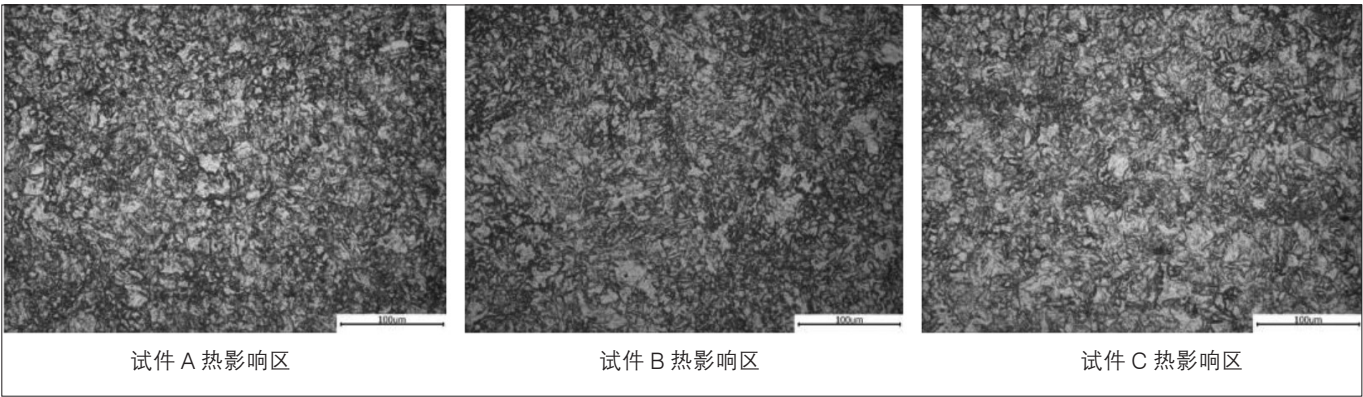


图 4 615℃ 时不同保温时间热影响区的微观组织

锅炉汽包下降管管座更换现场焊接及热处理焊接工艺规范严格执行，最终顺利完成了该电厂汽包下降管管座更换的工作，更换后的管座焊缝经 UT、相控阵、磁粉、硬度、焊接内应力等无损检验均合格。

参考文献：

[1] 压力容器用材料及热处理 [M]. 北京：化学工业出版社，2004.

[2] 《承压设备焊接工艺评定》：中国，NB/T47014-2011[P].2011.

[3] 《火力发电厂焊接技术规程》：中国，DL/T869-2012[P].2012.

[4] 刘洪，曾会强，刘志勇. 国产 13MnNiMo5-4 厚板焊接

工艺试验研究 [C]. 中西南十省区（市）焊接学会联合会第九届年会论文集，2006.

[5] 李克勇. 13MnNiMoR 钢焊接工艺 [J]. 电焊机，2010(09),69-72.

[6] 张熹，陈延清，章军，等. 13MnNiMoR 钢板焊接性研究 [J]. 电焊机，2012(07),17-21+39.

[7] 陈国喜，郭志强，谢曙光. 13MnNiMo54 钢汽包接管管座焊缝裂纹的成因及预防 [J]. 特种设备安全技术，2011(06),4-5.

作者简介：杨锦辉（1971.09-），男，汉族，广东汕头人，大学本科，高级工程师，研究方向：电力（核电、火电）安装工程施工技术管理。

（上接第 73 页）

通常冷却系统正常工作的情况下，如果出现温度升高的情况，分析是否存在液压锚杆钻机超载运行的情况，以及油泵、液压马达、液压阀组是否有异常情况。在最佳工况环境下，才能提高液压锚杆钻机的工作效率、安全因素以及钻机的使用寿命。

总之，影响液压锚杆钻机回转性能的因素很多，在设计等硬件条件均正常的情况下，最主要的影响因素还是液压系统的工作压力、工作流量以及液压油的温度。所以如果出现液压锚杆钻机回转性能的异常情况，应该统筹分析，找准问题原因的所在，精准下药，方能事半功倍。

3 结语

- (1) 影响电动锚杆钻机回转特性的主要因素为电动机的输入功率及电动机的输入电流，同一台钻机，随着输入电流的增大，电动锚杆钻机的输出转矩以及输出功率随之增大。
- (2) 影响气动锚杆钻机的主要因素为供气压力和气源的供气量。同时，在工作环境完全满足的情况下，也可以更换排气量更大的气马达来满足回转性能要求。

(3) 影响液压锚杆钻机回转性能的因素还有很多，从设计来讲，电动机的选配以及效率，液压管路的直径与液压系统的匹配程度，液压阀组的设计与调节，供电系统的电压、电流，都对液压锚杆钻机的回转性能有一定的影响。

总之，影响液压锚杆钻机回转性能的因素很多，在设计等硬件条件均正常的情况下，最主要的影响因素还是液压系统的工作压力、工作流量以及液压油的温度。

参考文献：

[1] 狄志勇，陈佳娥，李云峰，陈荣君，郭孝先. 煤矿用锚杆钻机通用技术条件：MT/T 688-1997[S]. 北京：煤炭工业出版社，1998.

[2] 李耀武，郭孝先，王维华. 煤矿用液压钻车通用技术条件：MT/T 199-1996[S]. 北京：煤炭工业出版社，1996.

[3] 陈桂娥，马继民，燕洪波，等. 煤矿用单体液压锚杆钻机：MT/T 974-2006[S]. 北京：煤炭工业出版社，2006.

[4] 郭孝先，李耀武. 煤矿回转钻机的基本特性与发展方向 [M]. 北京：煤炭工业出版社，2005.