

高温再热蒸汽管道P92钢焊接缺陷分析

靳彤¹, 王强², 安洪亮¹, 冯瑞², 王新伟²

1. 哈尔滨焊接研究院有限公司 黑龙江哈尔滨 150028

2. 陕西榆林能源集团横山煤电有限公司 陕西榆林 719000

摘要: 某1000MW超超临界机组安装过程中, 高温再热蒸汽P92钢管道焊缝中出现大量超标缺陷。通过无损检测、化学成分检测、力学性能检测和金相检验, 对超标缺陷进行了定性分析。结果表明: 缺陷类型为裂纹、气孔和夹渣, 缺陷呈断续、错位式分布, 断续分布长度超标。

关键词: 高温再热蒸汽管道; P92钢; 焊缝; 超标缺陷

1 序言

P92钢是20世纪90年代由日本新日铁公司在P91钢的基础上通过增加W含量(质量分数)至1.8%, 减少Mo含量至0.5%而研发生产的, 使其蠕变断裂强度和使用温度进一步提高, 具有低的热膨胀系数, 低成本的优势和优异的综合性能而成为新一代超超临界电站机组的理想用钢^[1]。

P92钢作为超超临界机组应用的新型耐热钢材料, 常用于高温、高压主蒸汽管道等部件。它比其他铁素体合金钢具有更强的高温强度和蠕变性能, 可以减轻锅炉和管道部件的质量; 同时这种材料的抗热疲劳性、热传导系数和膨胀系数优于奥氏体不锈钢, 且抗腐蚀性和抗氧化性能也很强。因而P92

材料允许更高的运行参数(温度、压力), 从而提高了机组的热效率。

P92钢管道的母材和焊接接头都是马氏体组织, 其韧性较低, 尤其是接头微观组织的不均匀性及由此引起的蠕变性能下降是其弱点^[2]。因此, P92钢的焊接难度大、工艺要求严格, P92钢管道的焊缝缺陷多数是以微小裂纹类缺陷为主, 易被忽视, 留下重大安全隐患, 其危害性往往较大。因此, 准确判断缺陷的性质, 避免危害性缺陷的产生, 是P92钢焊接的关键。本文选取高温再热蒸汽管道P92钢焊接缺陷的实例为对象, 对其缺陷的类型、性质及原因进行了分析讨论, 为防止P92钢管道焊接缺陷的产生提供了参考。

根部的应力集中, 降低焊缝断裂的几率。

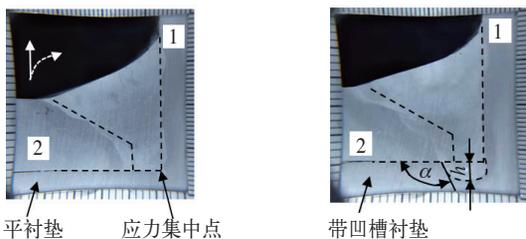


图5 平焊接衬垫接头(10×) 图6 带凹槽焊接衬垫接头(10×)

4 结束语

通过对铝合金T形接头全熔透焊缝背部两种不同垫板的接头焊接试验, 可以得到以下结论:

1) 在相同的焊接参数情况下, 背部添加带凹槽

焊接衬垫的接头, 其焊缝背部的成形质量、熔深情况明显好于平衬垫接头。

2) 背部添加带凹槽衬垫的接头焊缝强度明显高于背部添加平衬垫接头焊缝强度。因此, 在车辆运行过程中, 受疲劳载荷的作用, 带凹槽衬垫的接头焊缝开裂风险明显低于平衬垫接头焊缝。

3) 在实际生产应用中, 优先选择带弧形凹槽的焊接衬垫, 以确保焊缝背面成形的余高与母材反面之间的夹角 $\alpha > 90^\circ$, 从而更大程度上减小应力集中。

参考文献:

[1] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

MW 20200120

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

某1000MW超超临界机组，高温再热蒸汽管道材质为：SA335-P92，规格为： $\phi 890\text{mm} \times 70\text{mm}$ 。机组设备安装，管对接采用TIG+SMAW的焊接方法。焊接材料为钨极氩弧焊丝ER90S-G、 $\phi 2.4\text{mm}$ 和焊条E9018-G、 $\phi 3.2\text{mm}$ 。

(1) 化学成分 采用机械加工方法，自母材（管材）端部取样，依据GB/T 5310—2017《高压锅炉用无缝钢管》对10Cr9MoW2VNbBN（对应SA335-P92）的要求^[3]，对母材各项指标进行复验，

项目包括：化学成分、室温拉伸及室温冲击。

母材化学成分分析结果符合GB/T 5310—2017《高压锅炉用无缝钢管》中表3、表4对10Cr9MoW2VNbBN（对应SA335-P92）的成分要求。焊接材料为钨极氩弧焊丝ER90S-G、 $\phi 2.4\text{mm}$ 和焊条E9018-G、 $\phi 3.2\text{mm}$ 。焊材产品说明书显示均为熔敷金属的化学成分例值，故进行熔敷金属化学成分检测，焊丝和焊条的熔敷金属化学成分检测结果均与产品说明书例值基本相当。母材及焊材化学成分检测结果见表1。

(2) 力学性能 沿母材横向（圆周方向）截

表1 P92钢管材及焊材化学成分与标准要求值对照（质量分数） (%)

元素	C	Si	Mn	S	P	Cr	W	Mo	V	Nb	
母材	实测值	0.096	0.11	0.43	0.0029	0.017	8.84	1.55	0.48	0.18	0.057
	要求值	0.07~0.18	≤0.50	0.30~0.60	≤0.010	≤0.020	8.50~9.50	1.50~2.00	0.30~0.60	0.15~0.25	0.04~0.09
焊丝	实测值	0.09	0.21	0.53	0.004	0.009	8.57	1.52	0.43	0.18	0.07
	要求值	0.10	0.29	0.55	0.003	0.005	8.78	1.79	0.47	0.18	0.06
焊条	实测值	0.10	0.14	1.04	0.007	0.014	8.70	1.51	0.46	0.20	0.042
	要求值	0.11	0.18	1.11	0.006	0.008	8.91	1.79	0.47	0.21	0.054

取 $\phi 10\text{mm}$ 圆棒试样，分别进行20℃、200℃、400℃、600℃的拉伸试验，试验结果全部符合GB/T 5310—2017的要求。随着试验温度的升高，母材的屈服强度和抗拉强度呈降低趋势；母材的断后伸长率在400℃时处于较低水平，在600℃时大幅回升。拉伸试验结果见表2。

表2 P92钢管材的拉伸试验结果

试验温度 /℃	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		断后伸长率 (%)	
	实测值	要求值	实测值	要求值	实测值	要求值
20	519	≥440	675	≥620	22.5	≥16
200	468	≥406	590	无规定	18.5	无规定
400	444	≥377	544		14.5	
600	311	≥251	323		25.0	

沿母材横向（圆周方向）截取冲击试样（10mm×10mm×55mm），试样采用标准的V型缺口。在室温的环境下，测得三次冲击试验结果分别为103J、83J、73J，平均值为86J；GB/T 5310—2017《高压锅炉用无缝钢管》的要求值为≥27J。冲击试验结果符合标准要求值。

2.2 焊接工艺

焊接工艺采用GTAW+SMAW。钨极氩弧焊丝为ER90S-G、 $\phi 2.4\text{mm}$ ，焊条为E9018-G、 $\phi 3.2\text{mm}$ ，

主要焊接参数见表3，焊后热处理曲线如图1所示，管道焊接坡口形式如图2所示。

2.3 试验方法

首先采用数字超声波检测方法对P92钢管道的焊口进行无损检测；其次对超标缺陷部位进行宏观

表3 焊接参数

焊道	焊接方法	焊材型号及规格/mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹
1	GTAW	ER90S-G (92) / $\phi 2.4$	75~110 (直流正接)	9~11	40~50
2	GTAW	ER90S-G (92) / $\phi 2.4$	75~110 (直流正接)	9~11	40~50
≥3	SMAW	E9018-G (92) / $\phi 3.2$	90~143 (直流反接)	22~24	70~90
盖面	SMAW	E9018-G (92) / $\phi 3.2$	90~143 (直流反接)	22~24	70~90

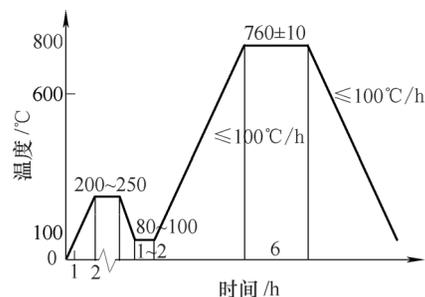


图1 焊后热处理曲线

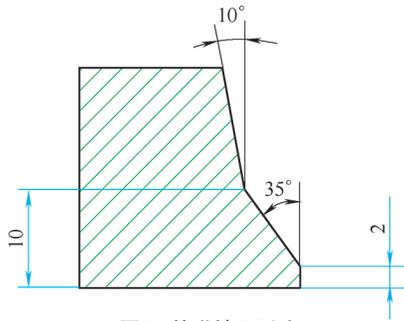


图2 管道坡口形式

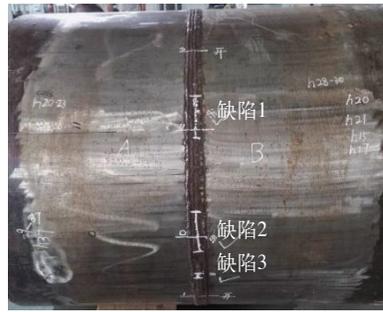


图3 超标缺陷标记位置

检测；最后利用OLYMPUS GX51光学金相显微镜对缺陷的类型、组织特征进行观察。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

(1) 超声波检测结果 采用数字超声波双面双侧检测方法对焊口进行无损检测，依据DL/T 820—2002《管道焊接接头超声波检验技术规程》进行，探伤采用B级检验级别^[4]，并依据DL/T 868—2014《焊接工艺评定规程》进行焊口质量验收，合格级别为I级^[5]。检测结果表明：焊口内部存在三处断续分布长度超标缺陷（Ⅲ级），焊口质量不合格。超标缺陷标记位置如图3所示。

(2) 宏观检验结果 采用机械加工方法，沿焊缝横截面解剖，对三处超标缺陷进行观察，缺陷在不同截面上形态和深宽位置并不一致，无明显的分布规

律，显示为孤立点状缺陷，缺陷位置具有随机性和断续性，与超声波检测结果相吻合，如图4所示。

(3) 微观检验 通过对缺陷进行金相分析，发现缺陷类型为裂纹、气孔和夹渣，缺陷类型的微观形貌如图5所示。缺陷呈断续、错位式分布，在一定范围内断续分布长度超标，在裂纹、气孔及夹渣中都发现了氧化物。

在接头截面上进行组织观察，检测区域依次为近外表面、1/4壁厚、1/2壁厚、3/4壁厚、近内表面，不同厚度位置的金相组织未见明显差异，焊缝及热影响区中均未见裂纹、无过热组织、无淬硬马氏体组织，焊缝金相组织为回火索氏体，仍保持原马氏体位向特征，未见明显 δ -铁素体。微观金相检验结果符合DL/T 868—2014要求。焊缝金相组织形貌如图6所示。

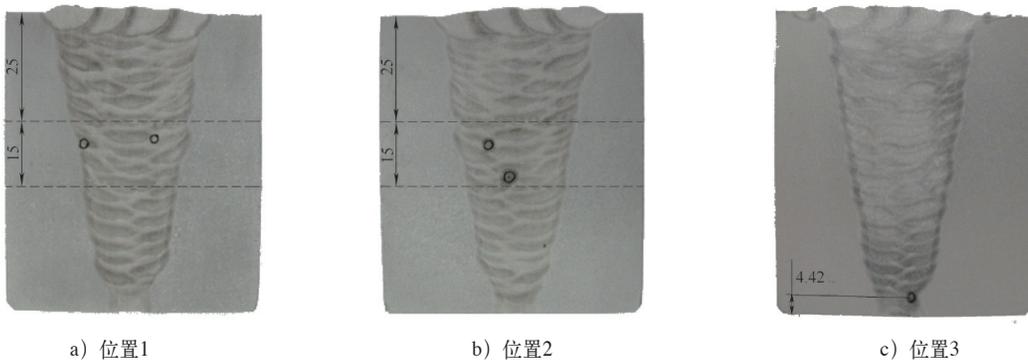


图4 超标缺陷在焊缝中的位置示意

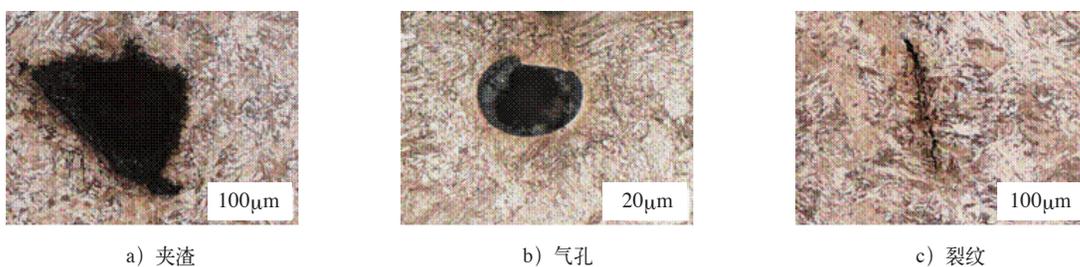
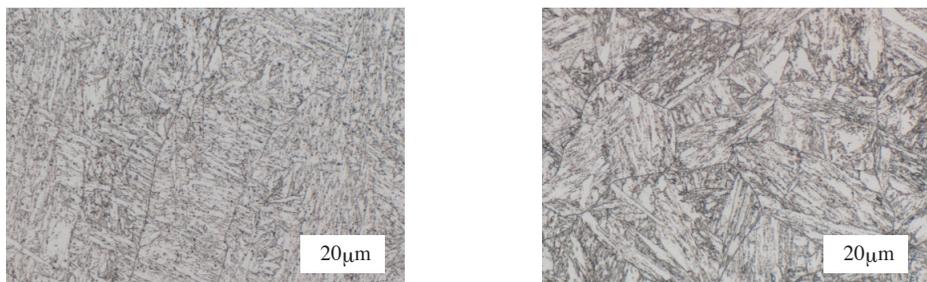


图5 焊缝中超标缺陷类型



a) 填充焊缝组织

b) 根部焊缝组织

图6 焊缝金相组织形貌

3.2 结果分析与讨论

1) P92钢焊接的常见缺陷类型有夹渣、未熔合和裂纹，超标气孔缺陷较为少见，气孔缺陷的产生一般与电弧周围生成的 H_2 和CO等有关。焊缝中气孔断续分布长度超标，主要与安装现场条件较差、焊接工艺执行不到位等因素有关。

2) 厚壁P92钢焊接坡口角度较小，在焊接顺序不合理的状况下，很容易在坡口等位置出现尖角或夹沟^[6]，造成层间打磨难度较大，易产生夹渣等缺陷。因此，坡口熔合线及焊道间圆滑过渡能够减少焊缝中出现死角、夹沟等，有效避免夹渣的形成。同时在焊接过程中，必须重视层间清渣工作，防止夹渣缺陷的产生。

3) P92钢焊缝中易出现微小裂纹缺陷，主要是焊接过程中焊条收弧时产生的弧坑裂纹^[7]。P92钢管道的焊缝中出现的裂纹，主要与焊接热输入过大、预热不足及收弧质量不良等因素有关，尤其收弧不良，形成弧坑，焊缝凝固收缩后期，液态金属补充不足，将引发微裂纹，即弧坑裂纹。焊接热输入过大、预热不足均将造成焊缝区域应力过大，焊条焊接时，采用摆动快速薄层的运条方式，焊条的摆动宽度范围控制在8~10mm，焊层厚度 < 2.5 mm，收弧点保证液态金属填满弧坑，可有效降低弧坑裂纹发生的风险。

4) P92钢焊接接头的强度及韧性是评价焊接接头质量的重要方面，较大的焊接热输入可以导致P92钢焊接接头性能变差，尤其焊缝的冲击韧性，即便是通过焊后的高温回火，也很难使得焊缝的韧性达到标准中的规定。合理的焊接热输入对焊口的质量起到至关重要的作用，在焊接工艺允许范围内，采用较小的焊接热输入，有效控制层间温度，并严格按照工艺要求进行焊前预热和焊后热处理，

能够有效保证焊缝的各项性能符合标准要求。

4 结束语

1) 再热蒸汽管道P92钢焊缝中超标缺陷与焊接工艺控制不严格有关，均属焊接缺陷，类型为断续、错位式分布的裂纹、气孔和夹渣。

2) 厚壁P92钢管道的焊接，采用合理的焊道布置、较小焊接热输入、快速摆动运条方式、提高焊条收弧质量等手段，可有效降低焊接缺陷发生的风险。

3) P92钢淬硬倾向较大，焊口强制组对、焊接冷速过大、热处理不及时等情况下，焊缝易产生冷裂纹，严格控制焊接热输入、层间温度、做好预热及焊后热处理等，可有效降低冷裂风险。

参考文献：

- [1] 王延峰, 郑开云, 吾之英, 等.T92钢管长时高温组织稳定性及性能研究[J].动力工程学报, 2010, 30(4): 245-252.
- [2] 王根士, 栗卓新, 魏福军, 等.P92钢焊接接头性能及其焊接材料研究进展[J].机械工程材料, 2007, 31(8): 1-4.
- [3] 李奇, 成海涛, 陈绍林, 等.GB/T5310-2017高压锅炉用无缝钢管[S].北京: 中国标准出版社, 2017.
- [4] 秦长荣, 池永滨, 于强, 等.DL/T820-2002管道焊接接头超声波检验技术规程[S].北京: 中国电力出版社, 2003.
- [5] 郭军, 乔亚霞, 梁军, 等.DL/T868-2014火力发电厂焊接技术规程[S].北京: 中国电力出版社, 2015.
- [6] 苏德瑞, 马延会, 刘建屏, 等.P92主蒸汽管对接焊缝裂纹和夹渣产生原因的探讨[J].华北电力技术, 2016(11): 63-66.
- [7] 陈君平, 杨文峰, 韩腾, 等.P91/P92钢管道对接焊缝微裂纹的超声波检测[J].无损检测, 2016, 38(8): 44-46, 50.

MW 20191220