

锅炉末级过热器 T92/HR3C 异种钢接头断裂原因分析

孙标¹, 杨贤彪², 肖杰², 杨超²

(1. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100069; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:介绍了某超超临界锅炉高温过热器 T92/HR3C 异种钢焊接接头发生的一种较罕见的断裂失效形式, 通过对失效试件断口形貌特征、胀粗管段的硬度分布规律及金相组织进行试验分析, 并结合失效试件的制造工艺和运行工况进行原因分析, 推断焊后热处理工艺控制不当导致 T92 侧母材金相组织异常和力学性能下降是导致异种钢过渡段发生胀粗和断裂失效的主要原因。提出了加强异种钢焊接接头热处理工艺控制以及对 T91/T92 侧焊缝热影响区进行硬度和金相组织检验的建议。

关键词:失效分析; 异种钢焊接接头; 焊后热处理; T92 钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG407

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2011)06-0077-04

某电厂 1 号炉为哈尔滨锅炉厂有限公司生产的 HG3100/27.6-YM3 型超超临界参数变压运行直流锅炉, 2009 年 12 月 28 日投产。2011 年 6 月 4 日运行人员发现锅炉泄漏, 当时机组主要运行参数为: 机组负荷 990 MW、主汽温度 590 °C、主汽压力 25.74 MPa、再热蒸汽温度 599 °C、再热蒸汽压力 5.48 MPa。截止至本次爆管停机, 已累计运行约 1 万 h。

1 失效部件情况介绍

经检查发现, 末级过热器出口段第 88 屏外向内数第 13 根管位于顶棚上方的 HR3C/T92 异种钢焊接接头沿 T92 侧熔合线处整体断裂, 如图 1 所示。

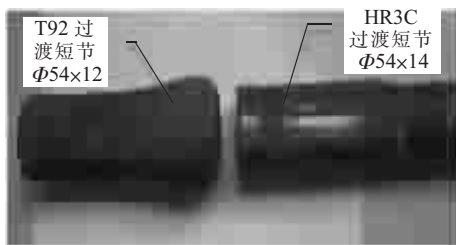


图 1 末级过热器异种钢焊接接头断裂照片

末级过热器管共有 100 屏, 每屏由 16 根管组成。管子材料除外三圈管子下弯头区域局部采用 SA213TP310HCbN 外, 进口段管子以 SA-213TP347H 为主, 下弯头及出口段管子则以 SA-213S30432 为主; 管子规格除外圈第 1 根管子规格为 $\Phi 57 \times 7.5$ 和 $\Phi 57 \times 9$, 其余 15 根管的管子规格为 $\Phi 44.5 \times 7.5$ 和 $\Phi 44.5 \times 9$ 。顶棚上方进口连接管材质为 T91, 出口连接管材质为 T92。为了避免现场异种钢焊接工作, 在 SA-213S30432 和 T92 材料的出口连接管之间设计了一段 300 mm 长的异种钢过渡段, 布置在锅炉顶棚管上方, 由 150 mm 长的 SA213TP310HCbN (即

HR3C) 过渡短节 ($\Phi 54 \times 14$) 和 150 mm 长 T92 过渡短节 ($\Phi 54 \times 12$) 组焊而成, 如图 2 所示。

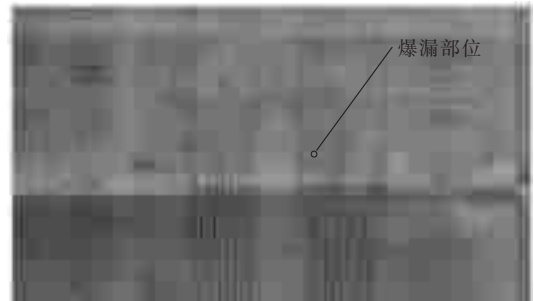


图 2 末级过热器出口异种钢接头部位示意图

该异种钢过渡段在锅炉厂内制造完成, 采用自动热丝 TIG 焊接工艺, 焊后经 705~730 °C 保温 40 min 的焊接退火热处理, 该热处理一般采用缝隙炉设备进行, 据了解也有采用单个加热器进行局部热处理。

2 宏观分析

2.1 断口形貌分析

对上、下断口进行仔细观察, 发现断裂沿异种钢接头 T92 侧熔合线和热影响区发生, 如图 3 所示。内壁在距离异种钢焊缝根部熔合线 1~2 mm 处开始颈缩变形, 断口平整如图 4 所示。T92 过渡短节靠近异种钢焊缝附近严重胀粗减薄, 管子胀粗部位内外壁表面均可见龟裂纹, T92 侧断口也较平整, 如图 5、图 6 所示。仔细观察, 两侧断口表面均有舌苔状金属附着物, 呈剪切断裂特征。

2.2 尺寸胀粗测量

现场检查发现, HR3C 不锈钢过渡短节及焊缝均无明显胀粗变形, 而 T92 过渡短节在靠近异种钢对接焊缝附近的局部管段却发生了严重的胀粗变形。用游标卡尺对上下断口的内外缘进行尺寸测量, 如图 7 所示。HR3C 不锈钢侧断口内缘直径为 33.2



图 3 不锈钢焊缝侧断口全貌照片



图 4 不锈钢焊缝侧断口局部细部特征照片



图 5 T92 侧断口照片(侧面)



图 6 T92 侧断口照片(正面)

mm(同位置焊缝根部熔合线内缘直径为 31.2 mm),断口最高处外缘直径为 52.5 mm(同位置焊缝熔合线外缘直径为 55.0 mm);T92 侧断口内缘直径为 52.2 mm,T92 侧断口外缘直径为 64.0 mm,T92 侧断口的内缘直径几乎与 HR3C 不锈钢侧断口的外缘尺寸相当。说明异种钢接头 T92 侧热影响区内外表面在断裂发生前均发生了变形开裂和颈缩过程。



图 7 断口放大照片

采用游标卡尺对 T92 过渡短节进行管径胀粗测量,如图 8 所示,测量结果如表 1 所示。可见,T92 过渡短节在异种钢焊缝附近的局部管段严重胀粗,最大胀粗尺寸为 67.7 mm,发生在距异种钢焊缝约 15 mm 处,胀粗率高达 25.4%,距异种钢焊缝约 50 mm 处管子胀粗率降为 7.2%,距异种钢焊缝约 75 mm 处管子胀粗率降为 1.9%。



图 8 胀粗测量部位示意图

表 1 失效管胀粗测量结果

测试位置编号	距离断口边缘/mm	测试结果/mm	胀粗率/%
1	15	67.7	25.4
2	50	57.9	7.2
3	75	55.0	1.9
4	120	54.3	0.6

3 试验分析

3.1 光谱材质复核

使用现场直读式光谱仪对发生胀粗的 T92 过渡短节进行光谱材质复核,材质符合设计要求。

3.2 硬度测试

采用里氏硬度计对发生胀粗的 T92 过渡短节进行了硬度测试,测试部位如图 9 所示,测试结果如表 2 所示。测试结果显示:发生胀粗的 T92 过渡短节局部硬度异常,低于 DL/T 438—2008《火力发电厂金属技术监督规程》标准附录中关于 T/P91, T/P92 钢材料推荐硬度范围 180~250 HB 的下限,且呈现越靠近异种钢焊缝硬度越低的规律,而远离异种钢焊缝的一端硬度完全符合规程要求。

3.3 金相分析

对 T92 过渡短节的胀粗最严重部位(见图 9,距焊缝约 15 mm 处)取样进行横向截面的金相组织观察,组织为铁素体+碳化物+贝氏体(残余奥氏体



图 9 硬度及金相检验部位示意图

表 2 胀粗失效的 T92 短节表面硬度测试结果 HB

测试位置编号	测试数据	备注
1	140	
2	150	硬度测试为图 9
3	165	中打磨部位, 测
4	170	试编号及相对
5	178	位置参见图 9 上
6	200	方箭头标注, 测
7	220	试仪器型号为
8	228	HT-2000A
9	225	

转变), 而非正常的回火马氏体组织, 分析为高温相变组织 (见图 10), 可能为焊后热处理温度过高所致, 该部位的显微硬度检测为 167HV0.2, 对应部位表面硬度测试值为 150 HB; 而对该 T92 过渡短节未明显胀粗部位进行覆膜金相检验 (见图 9), 检验结果显示金相组织正常 (见图 11), 对应部位表面硬度测试值为 200 HB 和 220 HB。



图 10 T92 短管胀粗部位金相组织照片

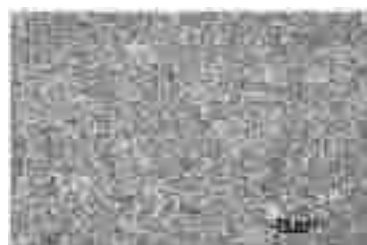


图 11 T92 短管未明显胀粗部位覆膜金相照片

4 原因分析

管子断裂沿异种钢接头 T92 侧熔合线和热影响区发生, 内壁在距离异种钢焊缝根部熔合线 1~2 mm 处开始拉伸变形开裂, T92 过渡短节靠近异种钢焊缝附近严重胀粗减薄, 管子的胀粗部位内外壁

表面均可见到大量龟裂纹, 两侧断口均较平整, 仔细观察断口表面均有舌苔状金属黏连颗粒, 呈剪切断裂特征。

HR3C 不锈钢过渡短节及焊缝均无明显胀粗变形, 而 T92 过渡短节在靠近异种钢对接焊缝附近的局部管段却发生了严重的胀粗变形。HR3C 不锈钢侧断口内缘直径 33.2 mm, 同位置焊缝根部熔合线内缘尺寸为 31.2 mm, 断口最高处外缘直径为 52.5 mm, 而同位置焊缝熔合线外缘尺寸为 55.0 mm, 说明异种钢接头 T92 侧热影响区内外表面在断裂发生前均发生了变形开裂和颈缩过程; T92 侧断口内缘直径为 52.2 mm, T92 侧断口外缘直径为 64.0 mm, T92 侧断口的内缘直径几乎与 HR3C 不锈钢侧断口的外缘尺寸相当, 说明断裂发生时, 断裂面发生了快速的剪切滑移过程, 这与断口表面呈现的舌苔状金属黏连颗粒形貌特征吻合。

对发生胀粗的 T92 过渡短节进行光谱材质复核, 材质成分符合相关标准要求, 未错用材料; 对发生胀粗的 T92 过渡短节进行了硬度测试, 未发生胀粗的管段硬度正常, 只有发生胀粗的管段局部硬度异常, 低于 DL/T 438—2008《火力发电厂金属技术监督规程》标准附录中关于 T/P91, T/P92 钢材料推荐硬度范围 180~250 HB 的下限, 且呈现越靠近异种钢焊缝硬度越低的规律。T92 过渡短节的胀粗最严重部位取样进行金相组织观察, 组织为铁素体 + 碳化物 + 贝氏体 (残余奥氏体转变), 而非正常回火马氏体组织, 明显为相变组织, 而对该 T92 过渡短节未明显胀粗部位进行覆膜金相检验, 检验结果显示金相组织正常。这也正好解释了该 T92 过渡短节发生局部胀粗的原因。

一段 150 mm 长的 T92 管段为何一端硬度和组织正常, 另一端靠近异种钢焊缝侧却呈现金相组织异常和硬度逐步降低呢? 由于胀粗管段处于顶棚上方约 200 mm, 且位于密封浇注料内, 不可能直接受到炉膛高温烟气直接加热, 蒸汽温度过热也不可能使管子局部硬度和组织发生变化, 因此, 基本可以排除运行过程中, 管子硬度和组织发生变化的可能。发生这种情况的最可能原因, 是制造或安装过程中该管段受到局部异常加热。有关文献研究认为, 760℃, 30 min 的焊后热处理, 有助于改善 T92/HR3C 异种钢焊接接头的综合力学性能^[1]。从锅炉厂服务技术人员了解到, 该异种钢焊接接头需进行焊后热处理, 且热处理可能采用加热器对焊接接头进行局部加热。而 T92 焊缝、母材的硬度和抗拉强度均随回火温度升高而降低。焊缝附近未回火的 T92 母材的马氏体粗大, 呈细针状; 经 740~780℃回火, 马氏体组

织会变细,但板条特征明显;超过 780 °C,马氏体板条特征消失,表现为屈氏体组织;随回火温度升高,母材碳化物会产生偏聚,铁素体含量增加;780 °C以下回火母材力学性能满足 ASME 标准要求^[2]。因此分析有可能在进行焊后热处理过程中,存在因控温热电偶损坏或热电偶安装位置不当等原因导致的热处理温度过高,超过了 780 °C,而使焊接接头附近的 T92 管段发生局部组织异常和硬度强度性能下降。

由于是焊后热处理导致的焊缝附近的 T92 管段局部组织异常和性能下降,在高温高压蒸汽内压力作用下,在紧邻焊缝的 T92 管段发生了局部胀粗,然而奥氏体不锈钢材质的焊缝强度未受到任何影响,因而对 T92 侧管子的环向鼓包胀粗起到拘束限制作用,从失效 T92 管端的最终形态看,局部管段已逐渐胀粗变形趋于球状,因此,在受到焊缝严重拘束作用下的 T92 侧焊缝热影响区的管子轴向应力已逐渐接近管子周向应力。T92 侧热影响区在管子胀粗带动下产生整圈均匀变形和内外表面开裂,当表面开裂和变形减薄到一定程度,开始沿最薄弱部位(距离焊缝 1~2 mm 处)产生快速的剪切滑移,直至最终断裂。

据了解该厂 2 号炉也曾在 168 h 试运行期间发生一次高过出口异种钢过渡段 T92 短节的胀粗鼓包开裂爆管,推断导致 T92 短管发生失效的根本原因应相同。导致失效的表象不完全相同的原因可能有两个:一是有可能焊后热处理时加热器中心位置偏离了焊缝,导致硬度和强度最薄弱带离开了焊缝;另一个原因是试运行初期系统内杂物较多,节流孔极易发生异物堵塞导致个别管子汽温超温幅度较高,由于蠕变速度的不同导致发生不同的失效现象。

5 结束语

(1) 该锅炉末级过热器出口的 T92/HR3C 异种

钢焊接接头发生局部胀粗和环向剪切断裂失效的最主要原因是焊缝附近的 T92 管段组织异常和性能下降。导致这一情况发生的最可能原因是该焊接接头在进行焊后热处理时,工艺控制不当导致实际热处理温度过高。

(2) 同类型锅炉为了避免发生类似情况,建议对高过出口所有 T92/HR3C 异种钢过渡段的 T92 侧管段进行宏观、胀粗及硬度检查,且应重点检查靠近异种钢焊缝的管段,发现管子胀粗鼓包开裂等异常应更换异种钢过渡段;硬度明显异常(低于 170 HB)应进行金相组织检查,必要时也应更换异种钢过渡段。

(3) 建议今后对 T91 或 T92 材料与不锈钢对接的异种钢焊接接头验收的时候,应增加 T91、T92 侧热影响区和母材的硬度检验,必要时进行金相检验抽查。

(4) 设计时应要求异种钢焊接接头布置在顶棚上方,且最好应高于顶棚密封浇注料 150 mm,以便于异种钢焊接接头的定期检查。

参考文献:

- [1] 刘俊建,陈国宏,余新海,等. T92/HR3C 异种钢焊接接头的组织结构和力学性能[J]. 材料热处理学报,2011,32(2): 54-60.
- [2] 齐向前,田旭海. 焊后热处理对 T92 钢焊接接头组织及性能的影响[J]. 理化检验(物理分册),2008,44(3): 115-118.

作者简介:

- 孙 标(1970-),男,吉林人,工程师,从事火力发电厂金属材料
和焊接专业技术及失效分析工作;
- 杨贤彪(1970-),男,江苏南京人,高级工程师,从事锅炉压力容器
检验、电厂金属技术监督和失效分析工作;
- 肖 杰(1966-),男,湖南汉寿人,高级工程师,从事锅炉技术监
督和失效分析等专业技术工作;
- 杨 超(1979-),男,湖北监利人,工程师,从事金属材料理化检
验和失效分析工作。

Failure Analysis on Welded Joints of T92/HR3C Final Superheater of Ultra-supercritical Boiler

SUN Biao¹, YANG Xian-biao², XIAO Jie², YANG Chao²

(1. Shenhua Guohua Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 100069, China;

2. Jiangsu Fangtian Electric Power Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: An infrequent fracture failure of T92/HR3C dissimilar steel welded joints of an USC final superheater was analyzed by hardness distribution and microstructure. Meanwhile, manufacture process and equipment operating conditions were investigated. The results indicate that post welding heat treatment process has a great influence on the weld line, the microstructure and mechanical property of T92 steel. The relevant suggestion was put forward to strictly control post welding heat treatment process. The microstructure of the heat-affected zone in the side of T91/T92 should be analyzed, and the micro-hardness test for the welded joints should be performed as well.

Key words: failure analysis; dissimilar steel welded joints; post welding heat treatment; T92 steel; microstructure; mechanical property