

1890/25.4 - YM4 型锅炉高温再热器 泄漏原因分析与对策

徐春, 赵学峰, 贾永安, 朱志贵

(浙江大唐乌沙山发电有限责任公司, 浙江 宁波 315722)

摘要: 针对某电厂国产 600 MW 超临界机组锅炉高温再热器出口异种钢焊口的泄漏情况, 采用直读式光谱分析仪 Spectro SortCCD TSC17 对高温再热器 T91/TP347H 异种钢焊接接头两端母材和焊缝进行化学成分分析, 并且在 LECO300 显微硬度计下观察和测量显微硬度, 利用 Axiovert 200 MAT 金相显微镜观察和分析金相组织, 同时综合管排的结构、爆口的特点进行全面分析, 得出高温再热器出口异种钢焊口泄漏的原因, 有针对性的提出治理方案, 因此对同结构的锅炉有很好的借鉴意义。

关键词: 锅炉; 异种钢; 焊口; 高温再热器; 分析

中图分类号: TK223 文献标识码: B

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.039

引言

某电厂机组锅炉采用哈尔滨锅炉有限责任公司与三井巴布科克(MB)公司合作设计、制造的超临界本生(Benson)直流锅炉, 型号: HG-1890/25.4-YM4。高温再热器沿炉宽排列 95 片, 横向节距为 230 mm, 管屏中管子间距为 71.1 mm。每片管组采用 10 根管, 入口段管子为直径 57 mm、厚度 4 mm、材料为 12Cr1MoVG, 中间段管子为直径 51 mm、厚度 4 mm、材料为 SA-213 T91, 出口段的管子为直径 51 mm、厚度 4 mm、材料为 SA-213 TP347H, 其中出口段的 TP347H/T91 异种钢焊口位于顶棚下方 50 mm 处, 如图 1 所示。

在运行过程中该处异种钢焊口出现过泄漏, 严重影响机组的安全运行。泄漏的位置在 TP347H 管与 T91 管的焊口处, 且在 T91 管侧沿熔合线下部热影响区处开裂。

1 原因分析

1.1 爆口的宏观检查

检查该异种钢焊口可见导致泄漏裂纹在焊口

T91 侧 HAZ(热影响区), 距离焊缝边缘约 2 mm, 沿管子周向扩展, 裂纹走向与熔合线平行如图 2 所示。管子外壁裂纹长度约 35 mm, 裂纹张口宽度约 1.5 mm。泄漏管段附近无明显的塑性变形和胀粗现象。查看管子内壁, 发现焊口两侧母材内壁有车削痕迹如图 3 所示, 壁厚相对较薄, 其中 T91 侧内壁有明显氧化皮存在, 而 TP347H 侧没有。

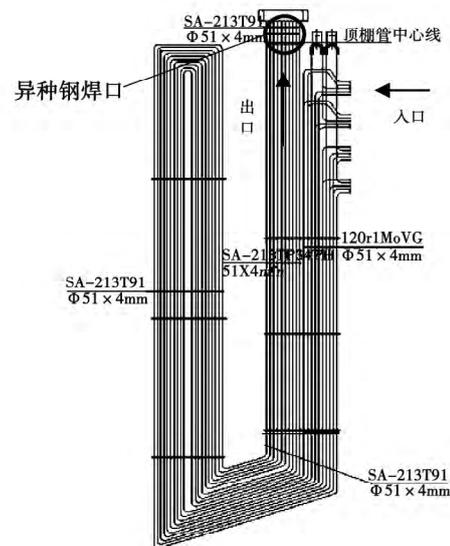


图 1 高温再热器爆口位置

Fig. 1 Location of the rupture of the high temperature reheater

在裂纹最宽处和裂纹边缘横跨焊缝取样 2 只, 分别为试样 1 和试样 2, 试样包括两侧母材和完整焊缝。对试样磨制、抛光、侵蚀后, 在低倍体视镜下观察, 试样 1 中裂纹已完全贯穿, 试样 2 中裂纹自外壁向内壁扩展, 但并未裂穿, 两只试样中裂纹距离焊缝外壁边缘均为 2 mm, 如图 4-图 6 所示。由焊缝坡口形貌来看, 近似为 V 形坡口。焊口两侧母材壁厚略有差异, 实测 T91 侧平均壁厚为 3.3 mm,

收稿日期: 2014-03-15; 修订日期: 2014-05-14

作者简介: 徐春(1986-), 男, 山东文登人, 浙江大唐乌沙山发电有限责任公司助理工程师。

TP347H 侧平均壁厚为 3.7 mm,均略低于 4.0 mm 的设计壁厚,这可能与坡口加工时管子端部内壁车削过有关。并且 T91 侧外壁沿焊缝熔合线部位有一处氧化缺口,深度约 0.8 mm 如图 5 所示。

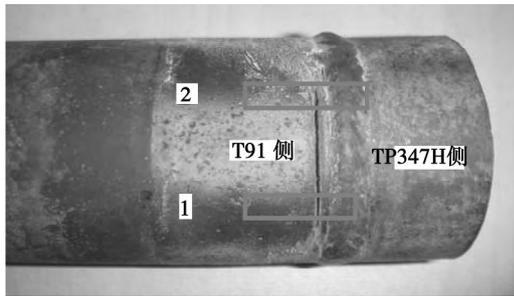


图 2 高温再热器异种钢焊口裂纹

Fig.2 Cracks at the welding joint of the high temperature reheater between different kinds of steel

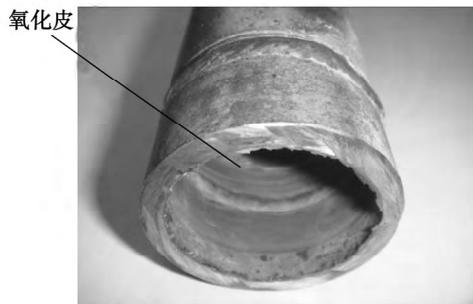


图 3 高温再热器异种钢焊口内壁

Fig.3 Inner wall of the welding joint of the high temperature reheater between different kinds of steel

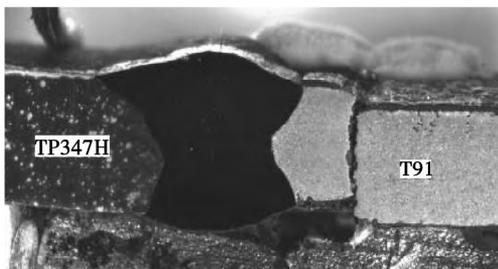


图 4 试样 1 整体形貌(×1.0)

Fig.4 Morphology of specimen No. 1 as a whole(×1.0)

1.2 焊口处的化学成分分析

通过对该高温再热器 T91/TP347H 异种钢焊接接头两端母材和焊缝进行化学成分分析:焊缝含 Ni 量极高,根据相关资料判断,应该采用了镍基焊材

INCONEL82 或 ERNiCr-3 作为填充材料。

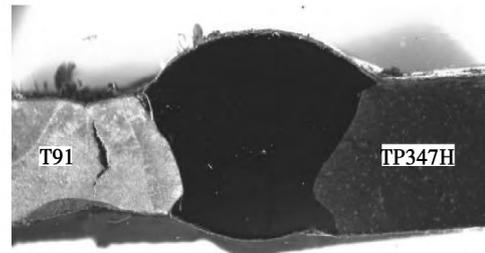


图 5 试样 2 整体形貌(×1.0)

Fig.5 Morphology of specimen No. 2 as a whole(×1.0)

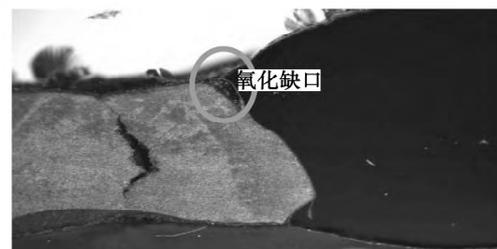


图 6 试样 2 中裂纹放大形貌(×2.0)

Fig.6 Morphology of the cracks enlarged of specimen No. 2(×2.0)

1.3 金相组织分析

对试样 1 和试样 2 中两只试样磨制、机械抛光和侵蚀,先在 LECO300 显微硬度计下观察和测量显微硬度,后在 Axiovert 200 MAT 金相显微镜下观察和拍照金相组织,试验结果如图 7 - 图 21 所示。

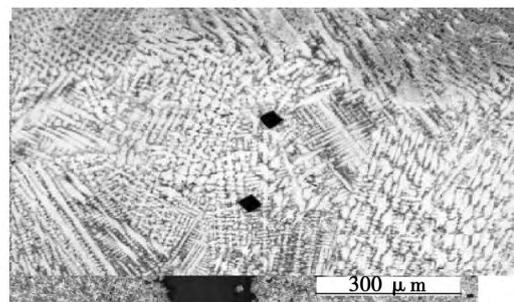


图 7 试样 1 焊缝金相组织(平均显微硬度 223HV0.3) (×100)

Fig.7 Metallurgical structure of specimen No. 1 (an average microscopic hardness of 223 HV0.3) (×100)

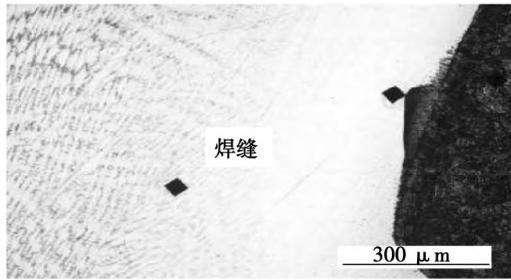


图 8 试样 1 焊缝 T91 侧熔合线形貌(×100)
Fig. 8 Morphology of the fusion line of specimen No. 1 at the side of T91 steel material(×100)

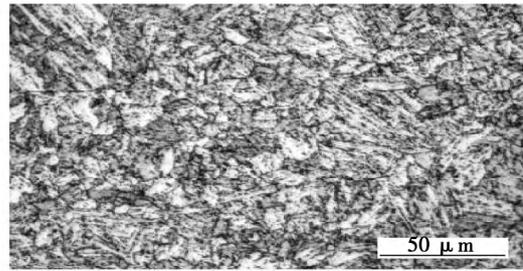


图 11 试样 1 中 TP347H 侧母材金相组织(×200)
Fig. 11 Metallurgical structure of the parent metal of specimen No. 1 at the side of TP347H steel material(×200)

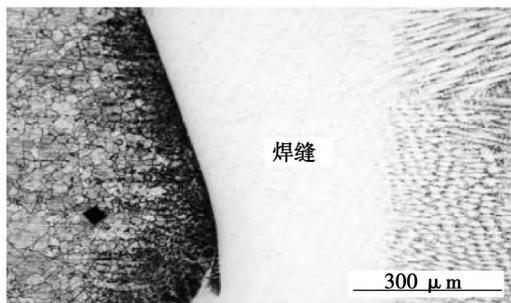


图 9 试样 1 焊缝 TP347H 侧熔合线形貌(×100)
Fig. 9 Morphology of the fusion line of specimen No. 1 at the side of TP347H steel material(×100)

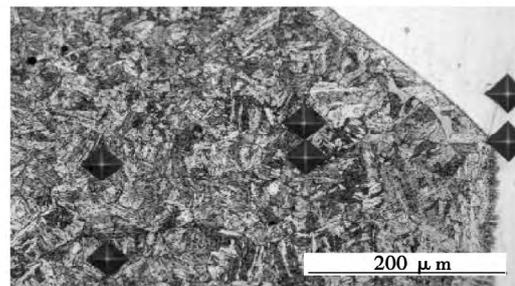


图 12 试样 1 中 T91 侧母材金相组织(×500)
Fig. 12 Metallurgical structure of the parent metal of specimen No. 1 at the side of T91 steel material(×500)



图 10 试样 1 焊缝 T91 侧外壁熔合线形貌(×100)
Fig. 10 Morphology of the fusion line of specimen No. 1 on the outer wall at the side of TP347H steel material(×100)

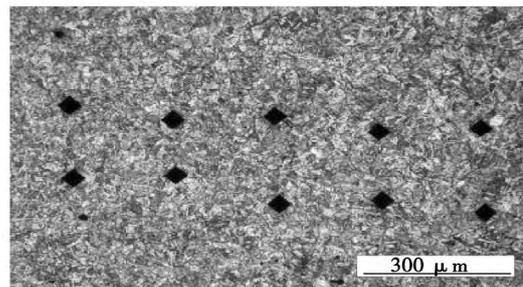


图 13 T91 侧熔合线金相组织(×200)
Fig. 13 Metallurgical structure of the fusion line at the side of T91 steel material(×200)

分析金相试验结果,试样 1 中 T91 和 TP347H 侧母材和焊缝金相组织正常,分布为回火马氏体组织和奥氏体组织,焊缝为单相奥氏体柱状晶组织,且焊缝两侧熔合线处较难侵蚀。图 10 中 T91 侧外壁有明显氧化层,厚度约 0.15 mm。焊缝 T91 侧 HAZ 金相组织依次为马氏体粗晶区→马氏体细晶区→T91 母材,由图 15 可知裂纹位于马氏体细晶区。

试样 2 中 T91 和 TP347H 侧母材和焊缝金相组织正常,分布为回火马氏体组织和奥氏体组织,焊缝为单相奥氏体柱状晶组织,且焊缝两侧熔合线处较难侵蚀。焊缝 T91 侧外壁熔合线部位有一处氧化缺口,最大深度约 0.8mm,但该氧化缺口距离裂纹外壁近 2 mm,明显不是裂纹诱因。裂纹同样位于焊缝 T91 侧 HAZ 细晶粒区,裂纹外壁处开口较小,中间较大,并向内壁扩展,距离内壁 0.15 mm,尚未完全

贯穿。

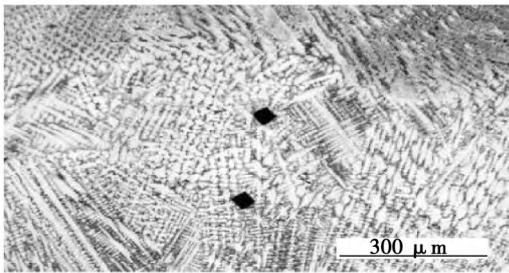


图 14 试样 1 中 T91 侧焊缝 HAZ 粗晶区金相组织(×100)

Fig. 14 Metallurgical structure of the welding seams of specimen No. 1 in the HAZ coarse crystal zone at the side of T91 steel material(×100)

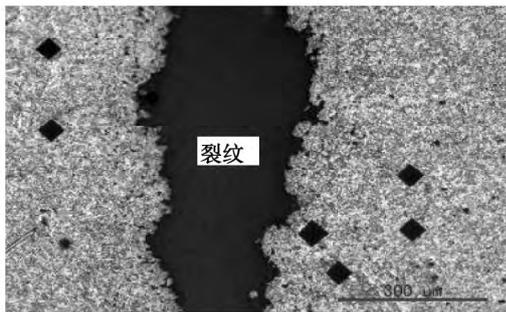


图 15 试样 1 中 T91 侧焊缝 HAZ 细晶区金相组织(×100)

Fig. 15 Metallurgical structure of the welding seams of specimen No. 1 in the HAZ fine crystal zone at the side of T91 steel material(×100)

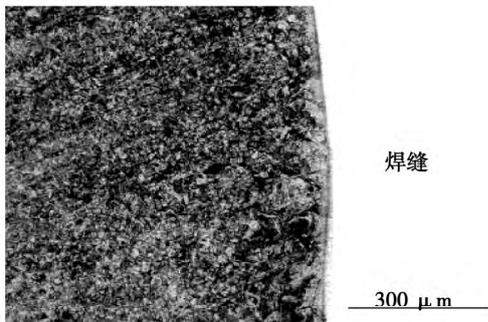


图 16 试样 2 焊缝 T91 侧熔合线形貌(×100)

Fig. 16 Morphology of the fusion line of specimen No. 2 at the T91 steel material(×100)

1.4 显微硬度分析

对试样 1 由焊缝向两侧 HAZ(热影响区) 和母

材测量显微硬度分布缺口, 测量结果列入表 1, 熔合线两侧显微硬度分布曲线如图 22 所示。

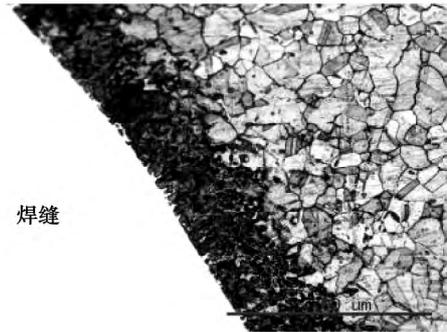


图 17 试样 2 焊缝 TP347H 侧熔合线形貌(×200)

Fig. 17 Morphology of the fusion line of specimen No. 2 at the side of TP347H steel material(×200)

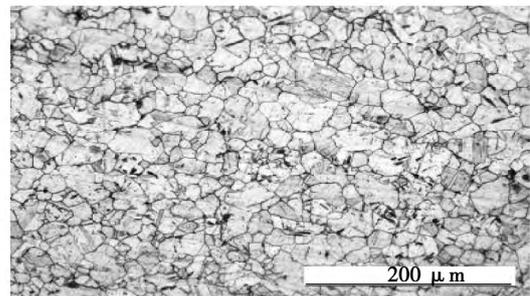


图 18 试样 2 中 TP347H 侧母材金相组织(×200)

Fig. 18 Metallurgical structure of the parent metal of specimen No. 2 at the side of TP347H steel material(×200)

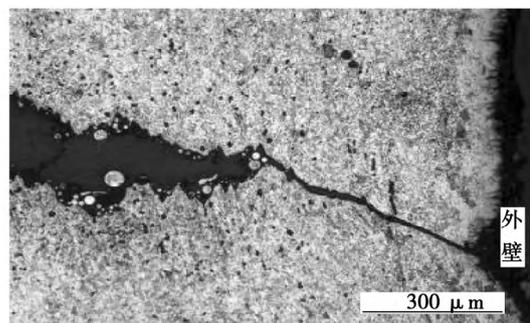


图 19 试样 2 中裂纹外壁金相组织形貌 ×100

Fig. 19 Morphology of the metallurgical structure of the cracks of specimen No. 2 on the outer wall ×100

分析显微硬度试验结果, 可见在焊缝 T91 侧 HAZ 粗晶区存在显微硬度峰值, 最高为 270 (N/mm²) HV0.3, 在裂纹两侧显微硬度最低, 分别为 170

(N/mm²) HV0.3 和 172HV0.3 ,出现比较明显的显微硬度低谷。而焊缝 TP347H 侧没有明显的显微硬度起伏。

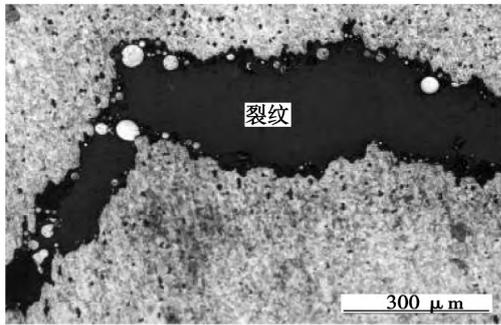


图 20 试样 2 中裂纹中间金相组织形貌(×100)
Fig. 20 Morphology of the metallurgical structure of e cracks on the inner wall of specimen No. 2(×100)

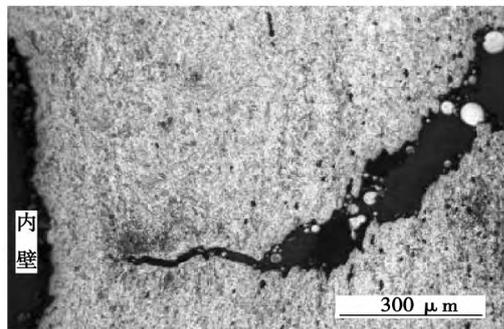


图 21 试样 2 中裂纹内壁金相组织形貌(×100)
Fig. 21 crack wall microstructure morphology of specimen 2(×100)

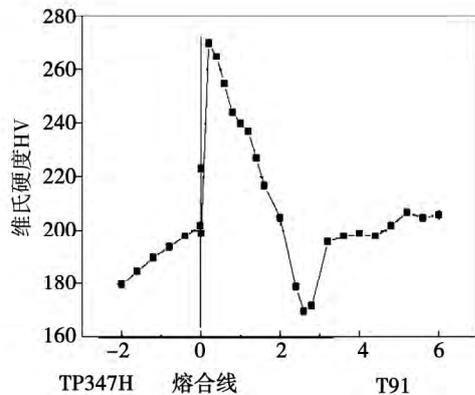


图 22 试样 1 焊缝向两侧显微硬度分布图
Fig. 22 Chart showing the distribution of the microscopic hardness at both sides of the welding seam of specimen No. 1

表 1 试样 1 焊缝向两侧显微硬度测量结果(HV0.3)

Tab. 1 Measuring results of the microscopic hardness at both sides of the welding seam of specimen No. 1(HV0.3)

T91 侧, 距离熔合线距离/mm		TP347H 侧, 距离熔合线距离/mm			
距离	硬度 HB	距离	硬度 HB	距离	硬度 HB
0.01	199	3.20	196	0.01	202
0.20	270	3.60	198	0.40	198
0.40	265	4.00	199	0.80	194
0.60	255	4.40	198	1.20	190
0.80	244	4.80	202	1.60	185
1.00	240	5.20	207	2.00	181
1.20	237	5.60	205		
1.40	227	6.00	206		
1.60	217				
2.00	205				
2.40	179				
2.60	裂纹				
2.80	裂纹				

1.5 管排结构分析

高温再热器布置于水平烟道内,采用逆顺混合换热布置。沿炉宽排列 95 片 横向节距为 230 mm , 每片管组采用 10 根管 ,管子的间距为 72 mm。

通过对高温再热器泄漏管排的检查,发现泄漏的管子弯曲较大,已超出管屏 110 mm(相当于 2 倍的管径),其余管子未发现变形。由此可以判断管屏在加工过程中,出现管间距不等的现象,泄漏管子的间距小于 72 mm,该管子 在运行过程中受到相邻管子的阻碍,出现膨胀受阻,在异种钢焊口处产生较大的拉应力。

2 综合分析

高温再热器异种钢焊接接头,在服役条件下温度高,且承受一定的介质内压,在实际运行过程中因温度、压力波动不可避免存在交变应力,另外该焊口位于顶棚下方 50 mm 部位,还要承受因炉内管排运行时晃动引起的振动应力,管子膨胀受阻产生的拉应力,以上多种应力因素的叠加使焊接接头的熔合线附近受到应力幅值较高的疲劳载荷^[1]。

显微硬度结果显示,焊缝 T91 侧 HAZ 显微硬度从熔合区向母材逐渐降低,且在接近母材处存在一个明显的软化区。从这一特征分析认为,该焊口焊

后没有进行热处理。焊接后熔合区最接近焊接熔池,温度最高,冷却速度最快,离熔池距离越远,温度越低,冷却速度也越慢,相当于对不同部位进行了一次温度不同的淬火处理,故显微硬度呈现这一变化规律。如果进行了焊后热处理,则显微硬度会相对均匀,硬度差异不会如此明显。裂纹刚好位于焊缝T91侧HAZ软化区薄弱部位上,裂纹两侧显微硬度相最低。而根据DL/T 752-2001《火力发电厂异种钢焊接技术规程》规定,对T91/TP347H类AM组异种钢焊接接头应进行焊前预热、焊后热处理,众多参考文献中关于T91/TP347H异种钢焊接性能和工艺分析研究均强调了焊后热处理的重要性^[2-6]。

综上所述,由于没有进行焊后热处理,热影响区存在一个明显的软化区,性能差强度低,且该焊口处于应力相对集中部位,承受应力值较高的疲劳载荷。在机组启停或负荷变化较大时,首先在该焊接接头HAZ软化区形成微裂纹,并在运行过程中逐步扩展,最终造成泄漏。

3 解决对策

针对高温再热器出口异种钢焊口应力集中的问题,将异种钢焊口移至炉顶大包内,减少交变应力的作用,提高锅炉受热面运行的可靠性。并且在T91/TP347H异种钢焊口射线检查合格后进行热处理,热处理加热至 760 ± 10 °C,保温60 min,升降温速度不大于150 °C/h,环境温度不低于5 °C。焊口热处理采用履带加热器,外缠保温棉。

4 改造实施情况

高温再热器异种钢焊口改造从停机开始计时共计35天,其中停机冷却需要3天,冲灰、管屏加固、搭架子、保温拆除需要3天。新管加工、制作坡口,需要8天。人工安排方面:焊工11人(其中一名为焊接技术员)、热处理6人、金属检验4人,焊接、热处理、金属检验全部完工共计21天。

焊接热处理方案:按左右两侧分段,上下两部分同时进行焊接,以中间第48排为界,左右两侧各47排。首先焊接左侧1-48排,上下两部同时从1-48排第10根依次由炉后向前焊接,依次10→9→8→7→6→5→4→3→2→1的顺序焊接。每天焊完上下96道焊口(含48排2道焊口)。然后进行射线检

查,检查合格后进行下一根焊接。T91与TP347焊口48道需进行热处理。次日焊接右侧49-95排,上下两部同时从49-95排第10根依次向前焊接,依次是每排的10→9→8→7→6→5→4→3→2→1顺序焊接。每天必须焊完94道焊。然后进行射线检查,检查合格后进行下一根焊接,T91与TP347焊口47道需进行热处理。焊接按照焊接工艺进行,焊接前预热150 °C,T91与TP347H焊口用半径为2.5 ERNiCr-3焊丝全氩焊接Ar(99.95%以上)。高温再热器出口TP347H与TP347H焊口使用 $\Phi 2.4$ 、H0Cr20Ni10Nb焊丝焊接,焊接完毕进行外观、射线、着色检查^[7]。

热处理加热片根据现场管排的实际尺寸到厂家专门定制,异种钢焊口加热时为了保护不锈钢侧母材,在热处理加热片和不锈钢管之间加了一层硅酸铝纤维纸保护层。

焊接热规范:材质为TP347H,规格 $\Phi 51$ mm × 4 mm,焊前不需预热,焊后免做热处理。规格 $\Phi 51$ mm × 4 mm材质为TP347H/SA213T91,焊前预热,焊后热处理。焊口焊完后应进行清理,经自检合格后填写自检记录。焊接检验:焊接完毕后,应达到表面质量检验优良率100%,并遵照规程及时委托对所有焊口进行无损检验,如有不合格的焊口,返修后及时检验。热处理完毕后对焊缝进行光谱和着色复查。

SA-213T91与SA-213TP347H异种钢焊口焊后立即进行射线检验,对有超标缺陷的焊口立即返修处理,当天所有异种钢焊口射线检验合格后统一进行热处理,热处理采用履带加热器单根包裹,外缠保温棉。该异种钢焊后热处理 760 ± 10 °C,恒温1 h,升降温速度不大于150 °C/h,环境温度不低于5 °C。

焊口金属检验:配一组人员4个人负责异种钢焊口改造金属检验。新换的管子进入现场前必须进行外观及内壁检查(宏观和涡流检验),光谱检验,管子规格抽检等检验,确认是管子 $\Phi 51$ mm × 4 mm(TP347H)方可进行下料。高温再热器上下管排共计1900道焊口进行100%射线检验。

高温再热器管排更换完成后经金属检验合格,并经点检、监理验收合格后,进行保温及管夹恢复,脚手架及高温再热器联箱固定槽钢拆除工作。

5 改造后的效果

由于将高温再热器出口异种钢焊口移至大包内

的顶棚管上方,减少了应力集中。自2011年4月完成高温再热器出口异种钢焊口改造至今,高温再热器运行正常,没有出现异种钢焊口泄漏的问题,彻底解决了异种钢焊口位置设计不合理的缺陷。

7 结 论

锅炉高温再热器出口异种钢焊口由于结构设计不合理,同时焊口焊接完成后未进行热处理,管排间距不均匀,造成异种钢焊口处产生较大的拉应力,长时间运行导致焊口处产生裂纹。通过焊口位置上移,彻底解决了异种钢焊口设计缺陷,提高了锅炉设备的利用率,保证机组安全可靠长周期运行。

参考文献:

[1] 吕玉坤,王 建,卢 权等. 电厂锅炉高温再热器泄漏原因分析与对策[J]. 锅炉技术, 2008, 39(4): 58-61.
 LU Yu-kun, WANG Jian, LU Quan, et al. Analysis of the causes and countermeasures for leakages from the high temperature reheaters of a utility boiler [J]. Boiler Technology, 2008, 39(4): 58-61.

[2] 李 鹏,郭军,徐德录. T91 钢及其异种钢焊接接头裂纹敏感性分析[J]. 电力建设, 1999, 39(7): 20-23.

LI Peng, GUO Jun, XU De-lu. Sensitivity analysis of the cracks at the welding joint between T91 steel and other kinds [J]. Electric Power Construction, 1999, 39(7): 20-23.

[3] 杜文敏. 火电厂金属材料焊接技术与管[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
 DU Wen-min. Welding technologies for metal materials in thermal power plants and management [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

[4] Ska W, Keny F S. Microstructure and Properties of Nippon Fire-Resistant Steels [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1999, 10(8): 117-120.

[5] ROBERTS D I. Performance of Dissimilar Welds in Service [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1985, 107(8): 247-254.

[6] 许江晓. 马氏体钢与奥氏体钢的焊接工艺[J]. 焊接技术, 2010, 05(7): 4-41.
 XU Jiang-xiao. Martensitic steel and austenitic steel welding technology [J]. Welding Technology, 2010, 05(7): 4-41.

[7] 李 勇. TP347H 与 T91 异种钢焊接性能分析[J]. 广东电力, 2007, 20(7): 19-21.
 LI Yong. Analysis of the welding performance between the TP347H and T91 steel material [J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(7): 19-21.

(陈 滨 编 辑)

(上接第 18 页)

[12] Morini G L. Scaling effects for liquid flows in microchannels [J]. Heat Transfer Engineering, 2006, 27(4): 64-73.

[13] Tiselj I, Hetsroni G, Mavko B, Mosyak A, Pogrebnyak E, Segal Z. Effect of axial conduction on the heat transfer in micro-channels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(12-13): 2551-2565.

[14] 王国栋. 微通道内稳定流动沸腾的特性及沸腾不稳定性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
 WANG Guo-dong. Investigation of the boiling characteristics and boiling instability of a steady flow in a microchannel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao-tong University, 2008.

[15] Walrafen G E, Hokmabadi M S, Yang W H. Raman isosbestic points from liquid water [J]. Journal of Chemical Physics, 1986,

85(12): 6964.

[16] Walrafen G E, Fisher M R, Hokmabadi M S, Yang W H. Temperature dependence of the low- and high-frequency Raman scattering from liquid water [J]. Journal of Chemical Physics, 1986, 85(12): 6970.

[17] Sarrazin F, Salmon J B, Talaga D, Servant L. Chemical reaction imaging within microfluidic devices using confocal Raman spectroscopy: The case of water and deuterium oxide as a model system [J]. Analytical Chemistry, 2008, 80(5): 1689-1695.

[18] Incropera F P, DeWitt D P, Bergman T L, Lavine A S. Fundamentals of heat and mass transfer [M]. 6th ed. : New York: John Wiley, 2006.

(陈 滨 编 辑)

(Northern Energy Source Development Co. Ltd. ,Shenyang ,China ,Post Code: 110179) ,LI Zhi-long (Shenhua (Fujian) Energy Source Limited Liability Company ,Fuzhou ,China ,Post Code: 350000) ,LI Fa-zhong (Huaneng Yuhuan Power Plant ,Taizhou ,China ,Post Code: 317604) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1) . -145 -149

After the four sets of 1 000 MW unit in Yuhuan Power Plant had been put into operation ,under the operating condition at the full load ,the opening degree of the water level regulating valve of the deaerator was around 18% . Through a variable frequency modification to the condensate water pump ,the pressure in the main line of the condensate water decreased from 3. 3 MPa to 2. 6 MPa and the opening degree of the regulating valve increased to 60% ,thus weakening the throttling effect and the power consumed by the condensate water pump declined by 21% . The authors conducted a theoretical analysis of the principles controlling the energy saving and described the matters needing attention concerning the version selection ,commissioning process ,logic configuration and operation control etc. during the variable frequency modification to the pump group for reference by others facing similar problems. **Key Words:** condensate water pump ,variable frequency ,modification ,energy saving

1890/25.4-YM4 型锅炉高温再热器泄漏原因分析与对策 = **Analysis of the Causes for Leakage from the High Temperature Reheater of a 1890/25.4-YM4 Type Boiler and Its Countermeasures** [刊 汉]XU Chun , ZHAO Xue-feng ,JIA Yong-an ,ZHU Zhi-gui (Zhejiang Datang Wushashan Power Generation Limited Liability Company ,Ningbo ,China ,Post Code: 315722) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1) . -150 -156

In the light of the leakage from the welding joint between different kinds of steel at the outlet of the high temperature reheater in a domestically-made 600 MW supercritical boiler in a thermal power plant ,a chemical composition analysis was performed of the parent material and welding seam at both ends of the welding joint between different kinds of steel T91/TP347H in the high temperature reheater by using the direct-read type spectrum analyzer Spectro SortCCD TSC17 and the microscopic hardness was observed and measured under the microscopic hardness meter LECO300. The metallurgical structure was observed and analyzed by using Axiovert 200 MAT metallurgical microscope and at the same time ,an analysis in a comprehensive way was conducted in combination with the features of the structure of the tube bank and joint being ruptured and the causes for the leakage from the welding joint between different kinds of steel in the high temperature reheater were identified. On this basis ,a special-purpose treatment version was proposed ,thus offering very good reference for boilers of the same structure. **Key Words:** boiler ,different kinds of steel ,welding joint ,high temperature reheater ,analysis