

针对持续低负荷运行中过热器管束泄漏的失效分析

王永盛¹, 李幸芬², 商颜芳¹, 王 萌³

(1. 中国石油化工股份有限公司济南分公司, 山东 济南 250000; 2. 国核电站运行服务技术有限公司, 上海 201101;
3. 山东济炼石化工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要:某型中压燃气蒸汽锅炉在近期一次持续低负荷运行后,其高温段过热器部分管排出现横向裂纹。根据该锅炉的设备参数、历史运行数据及流程结构特点,分析其运行中可能致使炉管泄漏的主要风险因素,并进一步利用硬度检测、渗透检测、拉伸试验和金相检测等试验检测技术,排除换热管材质使用不当,汽水品质造成炉管内部结垢以及低负荷运行期间金属局部过热等造成缺陷的可能,对其失效机理进行分析和对比,最终确定导致本次换热管开裂的主要原因是氯离子影响下的持续应力腐蚀。针对本锅炉给水流程的结构特点提出增设氯离子监测措施,避免装置异常串料污染锅炉给水的品质。

关 键 词:锅炉;过热器;氯离子;裂纹;失效分析

中图分类号:TK224.9+1 文献标识码:B DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.11.024

[引用本文格式]王永盛,李幸芬,商颜芳,等. 针对持续低负荷运行中过热器管束泄漏的失效分析[J]. 热能动力工程,2021,36(11):173-180. WANG Yong-sheng, LI Xing-fen, SHANG Yan-fang, et al. Failure analysis of superheater tube bank leakage in continuous low load operation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11):173-180.

Failure Analysis of Superheater Tube Bank Leakage in Continuous Low Load Operation

WANG Yong-sheng¹, LI Xing-fen², SHANG Yan-fang¹, WANG Meng³

(1. Jinan Branch of China Petrochemical Corporation, Jinan, China, Post Code:250000; 2. State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai, China, Post Code:201101; 3. Shandong Ji Lian Petrochemical Engineering Co., Ltd, Jinan, China, Post Code:250000)

Abstract: Transverse cracks were found in some tube banks of superheater in high temperature section, after a recently continuous low load operation of a certain medium pressure gas-fired steam boiler. The main risk factors that might cause the leakage of the boiler tube in operation were analyzed, according to the equipment parameters, historical operation data and process structure characteristics of the boiler. Further, the hardness testing, penetrant testing, tensile testing, metallographic testing and other testing techniques were used, to eliminate the possibility of defects caused by improper use of heat exchange tube material, internal scaling of furnace tube caused by steam water quality and local metal overheating during low load operation. Finally, it was confirmed that the main reason for the cracking of the heat exchange tube was the continuous stress corrosion affected by chloride ion, through analyzing and comparing the failure mechanism. According to the structural characteristics of the boiler water supply process, chlorine ion monitoring measures should be added, to prevent the quality of boiler feed water from being polluted by abnormal feeding in units.

Key words: boiler, superheater, chloridion, crack, failure analysis

引 言

某企业自备电站配备的 B&WB-130/3.82-Y 型中压蒸汽锅炉的额定蒸发量为 130 t/h,额定工作压力 3.82 MPa,自然循环,“Π”型结构,轻型炉墙露天布置,燃烧器置于前墙,该型锅炉原为燃油燃气锅炉,后经低氮燃烧改造为全燃气锅炉。采用混合式减温器调节其过热蒸汽温度,减温水与汽包供水均来自同一除氧器的产水。

该锅炉高温段过热器管束为全悬吊结构,布置于水平烟道内,换热管规格为 $\phi 38\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ 、材质 12Cr1MoVG,已累计运行 37 500 h。

为了满足企业生产、发展等多方面的需求,该锅炉长期处于低负荷运行状态(低于 30 % 额定负荷),甚至超低负荷运行(低于 15 % 额定负荷)状态。

在最近一次长时间持续低负荷运行后发现烟囱排气中含水量明显增大,烟囱底部滴水,排查烟道各段烟气压差和温差未发现明显变化,排查锅炉给水量、发汽量偏差未发现明显增大,炉膛底部和垂直烟道底部、引风机进出口均未发现漏水。停炉后,对锅炉进行全面检查,发现高温段过热器 6 片换热管排局部存在横向裂纹,如图 1 所示。初步判断排烟气含水量突增的原因是高温段过热器管束泄漏。



图 1 存在多处裂纹的换热管
Fig. 1 Heat exchange tube with multiple cracks

高温段过热器管束结构如图 2 所示,减温器出口的过热蒸汽自入口集箱进入高温段过热器换热管,进一步加热后,从出口集箱排出。炉膛出口烟气自左侧进入高温段过热器,从右侧排出,烟气与蒸汽流向为错流。裂纹均集中于高温段过热器管束烟气侧出口、蒸汽侧入口的立管上,且均位于换热管的背火一侧。

近年来,关于锅炉水冷壁、再热器、过热器等受热面管失效分析的研究,基本集中于沿管路方向的纵向裂纹、减薄爆裂、高周疲劳开裂等方面^[1],并且锅炉运行负荷均为接近满负荷状态,但是针对持续低负荷运行锅炉的受热面管横向裂纹的研究鲜有报

道。因此,为了进一步确认该换热管开裂泄漏的原因,利用光谱分析、显微维氏硬度检测、渗透检测、室温拉伸试验、金相检测等多种检测手段和试验方法对其失效原因展开分析^[2]。

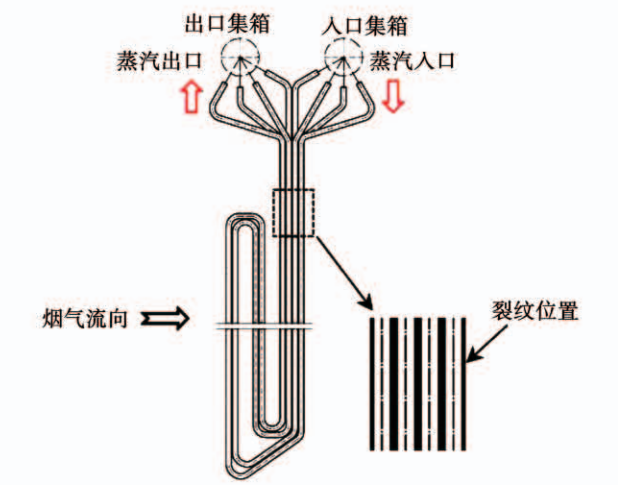


图 2 高温段过热器结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of high temperature superheater

1 运行数据统计与问题排查

1.1 主要运行数据

运行数据显示该锅炉无超压运行记录,泄漏前已连续运行 14 501 h,各工况的运行时长统计如表 1 所示。

表 1 各负荷区间运行时长
Tab. 1 Operation duration of each load section

发汽量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	累计运行时长/h	最长连续运行时长/h
15 ~ 20	3 844	2 195
20 ~ 30	6 149	683
30 ~ 40	1 016	102

各运行工况下,高温段过热器的出、入口蒸汽温度统计如表 2 所示,其烟气侧的入口温度如表 3 所示。

表 2 出、入口蒸汽温度
Tab. 2 Inlet and outlet steam temperatures

发汽量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	出口蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$		入口蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	
	范围	平均值	范围	平均值
15 ~ 20	381 ~ 439	402	268 ~ 360	322
20 ~ 30	438 ~ 447	446	250 ~ 255	251
30 ~ 40	434 ~ 450	441	248 ~ 253	250

表 3 烟气入口温度

Tab.3 Flue gas inlet temperature

发汽量/t·h ⁻¹	入口烟气温度/℃	
	范围	平均值
15 ~ 20	434 ~ 590	460
20 ~ 30	639 ~ 688	669
30 ~ 40	656 ~ 737	697

锅炉发汽量在 20 ~ 40 t/h 区间各运行工况下,其高温段过热器蒸汽的入口和出口温度基本接近,高温段过热器烟气侧的入口平均温度约下降30℃。在此期间高温段过热器换热基本稳定,减温器的调温自控功能正常。

当锅炉发汽量小于 20 t/h 后,高温段过热器烟气侧的入口平均温度约下降 200℃,其蒸汽的入口平均温度升高 70℃、出口平均温度降低 44℃。在此期间,高温段过热器的热交换强度明显减弱,并且减温水调节阀较长时间处于关闭状态或间断性开启,减温器出口的蒸汽温度波动频繁、变化幅度较大,减温器的调温自控功能失常。

1.2 问题排查

研究表明,对于裂纹周边材质未发生颈缩等变形的脆性断裂,其产生原因多为原材料质量不合格,或使用中金属组织因过热而劣化等^[3]。因此,本次高温段过热器换热管泄漏的原因主要从 4 方面进行排查。

(1) 过热器换热管材质及管材原始缺陷

查询锅炉设计说明书得知,锅炉在满负荷工况时高温段过热器换热管的壁面温度为 460℃,设计选用材质应为 12Cr1MoVG。利用光谱分析技术对换热管材质予以确认,利用金相检测技术对管材是否存在原始缺陷予以确认。

(2) 换热管管材的金属力学性能

依据《火力发电厂金属材料选用导则》DL/T 715-2015 技术要求 12Cr1MoVG 钢适用于管壁温度不高于580℃的环境。已知当该炉发汽量超过 20 t/h 时,高温段过热器烟气侧的入口温度高于 636

℃。在此期间,若存在高温段过热器各管排内蒸汽量分布不均匀、对换热管的冷却不充分的情况,则换热管的管壁温度有可能超过 580℃。若锅炉长期低负荷运行,换热管长期超温运行必将造成有害的金相组织变化,金属力学性能持续衰退,这是造成锅炉爆管泄漏的主要原因^[4-5]。

(3) 换热管局部急冷引发应力变化

锅炉长期超低负荷运行情况下,换热管持续高温运行,减温水可能造成换热管短时间内局部急冷。

运行数据显示,该锅炉发汽量低于 20 t/h 时,减温器调温自控功能失常,在过低负荷下减温水进入减温器但未雾化,减温水可能造成换热管短时间内局部急冷。换热管内外侧介质的温差大幅度频繁变化致使金属发生热疲劳,进而造成换热管产生横向裂纹^[6]。

(4) 锅炉汽水质

在锅炉汽水质长期严重超标情况下炉管内表面可能存在严重结垢现象,最终因局部过热或垢下腐蚀使管壁减薄导致泄漏。

该锅炉的给水主要由 3 部分组成:除盐水装置的产水,来自汽轮机组的凝结水,企业各生产装置回收来的凝结水。

研究表明,凝结水是电站金属材料发生腐蚀的必要条件^[7]。因此,对锅炉给水品质的影响,风险最大的是各生产装置回收的凝结水。一方面,这部分凝结水未配置精处理措施;另一方面,其连续在线监测仪表配置不全,只配有水中油分析和电导监测,且日常只对 Fe⁺ 含量每天进行一次人工分析。一旦生产装置异常,油品、酸、碱、硫磺等串入凝结水管路,将污染锅炉给水的品质。

2 试验检测与验证

由于换热管向火面和背火面热负荷差异较大,有裂纹和无裂纹的管段力学性能也存在差异,因此从高温段过热器的换热管排上采集多个试样进行试验检测^[8]。

2.1 宏观检查

对存在裂纹的换热管沿其轴向截面和垂直轴向的截面进行剖切,如图 3 ~ 图 5 所示。

从图中可以看出,换热管外表面附着有红色氧化物,无严重的腐蚀凹坑;换热管内表面附着有一层黑色物质,无明显结垢,表面存在细微腐蚀凹坑。管道无明显的胀粗变形,壁厚均匀。裂纹与管道轴线垂直,间隔分布、长度不一;裂纹具有沿周线扩展的趋势,在管壁内、外表面的发展趋势相同;裂纹呈贯穿管壁的形态,断口齐平,呈脆性断裂;裂纹周边有红色氧化物。综上所述,其符合水侧酸性腐蚀爆口的特征^[9]。



图3 换热管外表面
Fig.3 Outer surface of heat exchange tube



图4 换热管内表面
Fig.4 Inner surface of heat exchange tube



图5 裂纹截面
Fig.5 Crack section

2.2 材质确认

为确认管材组成元素,依据《电力设备金属光谱分析技术导则》(DL/T 991 – 2006),对管材截面进行光谱分析,结果如表4所示。比对《高压锅炉用无缝钢管》(GB/T 5310 – 2017)中化学元素成分,

确认该换热管材质为 12Cr1MoVG。

表4 光谱分析数据

Tab.4 Spectral analysis data

元素	质量分数实测值/%	GB/T 5310 规定的质量分数范围
Mn	0.51	0.40 ~ 0.70
Cr	1.11	0.90 ~ 1.20
Mo	0.29	0.25 ~ 0.35
V	0.2	0.15 ~ 0.30

2.3 显微维氏硬度检测

依据《金属材料维氏硬度试验 第1部分:试验方法》(GB/T 4340.1 – 2009),在换热管背火面的外表面、内表面和截面位置分别进行显微维氏硬度试验,每个表面检测3次,结果如表5所示。数据比对《高压锅炉用无缝钢管》(GB/T 5310 – 2017)中 12Cr1MoVG 钢的力学性能,确认硬度值符合要求。

表5 显微维氏硬度数据

Tab.5 Micro Vickers hardness data

位置	HV 硬度数据			
	第1次	第2次	第3次	平均值
外表面	172	178	178	176
内表面	168	177	179	175
截 面	168	171	172	170

注:依据 GB/T 5310 – 2017 HV 硬度平均值范围 135 ~ 195。

2.4 渗透检测

取一段裂纹分布较集中的管道,对其内、外壁分别进行着色渗透检测,如图6所示。

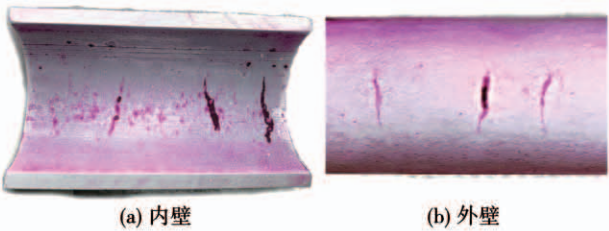


图6 内、外表面渗透检测

Fig.6 Penetrant testing of internal and external surfaces

(1) 背火面内壁有3条较明显的裂纹,方向与轴线垂直。同时,同一轴线上还分布有十分密集的

同方向细小裂纹和腐蚀坑。

(2) 背火面外壁只有 3 条较明显的裂纹,由内壁贯穿至外壁。

由此推断,裂纹是从背火面内壁产生,而外壁的裂纹为内壁细小裂纹扩展后贯穿管壁形成。

2.5 室温拉伸试验

在未开裂管段的背火面及向火面各取 2 根试样,首先对其进行表面渗透检测,结果显示均无裂纹或缺陷,然后依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)进行纵向室温拉伸试验,得到试验结果,如表 6 所示。

对比《高压锅炉用无缝钢管》(GB/T 5310-2017)中 12Cr1MoVG 钢的力学性能,该换热管的抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{p0.2}$ 和断后伸长率均符合标准,但是其抗拉强度 R_m 接近标准数据的下限。

表 6 室温拉伸试验数据

Tab.6 Tensile test data at room temperature

位置	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长 率 A/%
向火面 1	485	334	21.5
向火面 2	472	298	21.5
背火面 1	471	313	23.5
背火面 2	471	319	26.5

注:依据 GB/T 5310,抗拉强度 R_m 范围为 470~640 MPa,屈服强度 $R_{p0.2} \geq 255$ MPa,断后伸长率 $A \geq 21\%$ (纵向)。

2.6 金相检测

根据《金属显微组织检验方法》(GB/T 13298-2015),在换热管背火面外表面可见裂纹处截取一段断口样品作为金相检验试样,经镶样、磨制、抛光,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀后,采用蔡司 Axio Imager A2m 型光学显微镜观察其显微组织。

金相检验可应用金相学方法观察金属材料的宏观和微观组织特征,进而结合《钢的显微组织评定方法》(GB/T 13299-1991)判定材料或部件的劣化情况以及裂纹走向与断裂形式(穿晶或沿晶断裂)。

经金相检验确认:(1) 该换热管截面的金相组织为铁素体+珠光体+贝氏体,珠光体与贝氏体形态较清晰,如图 7 所示。依据《火电厂用 12Cr1MoV 钢球化评级标准》(DL/T 773-2001)可将其球化等

级评为 2 级轻度球化。

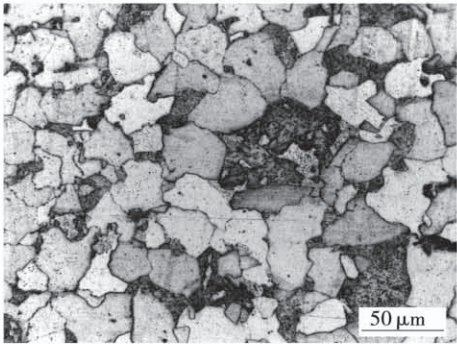


图 7 金相组织结构(500 ×)

Fig.7 Metallographic structure(500 times)

(2) 背火面内壁表面除了一条贯穿裂纹之外,还密集分布着多条深浅不一的微裂纹,内表面有少量氧化物,如图 8 所示。

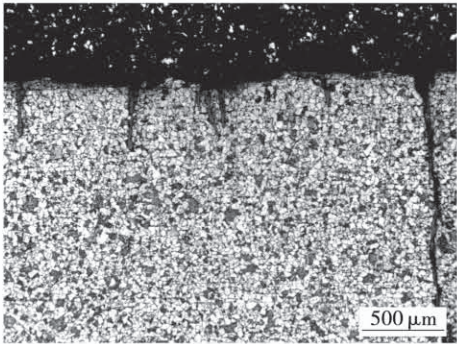


图 8 内壁表面裂纹分布(50 ×)

Fig.8 Distribution of cracks on the inner wall surface(50 times)

(3) 背火面外壁表面仅存在贯穿截面的裂纹,外表面氧化物较厚,如图 9 所示。

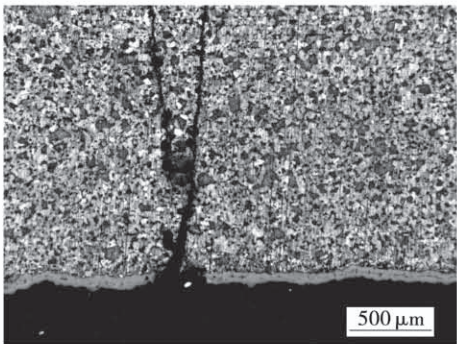


图 9 外壁表面裂纹分布(50 ×)

Fig.9 Distribution of cracks on the outer wall surface(50 times)

(4) 背火面内壁表面裂纹形貌如图 10 所示。在裂纹表面存在腐蚀坑,裂缝内部充满氧化物,裂纹走向与内表面垂直,裂纹呈穿晶和沿晶的混合形态。

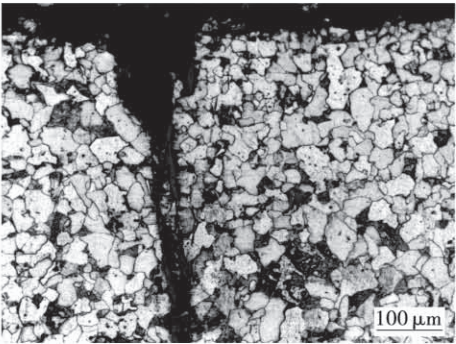


图 10 由内壁发展的表面裂纹形貌(200 ×)
Fig.10 Surface crack morphology developed from the inner wall(200 times)

(5) 背火面内壁表面微裂纹的形貌如图 11 所示。3 条微裂纹起始于腐蚀凹坑,裂纹内部充满氧化物,裂纹走向与背火面内壁表面垂直,裂纹呈穿晶和沿晶的混合形态,

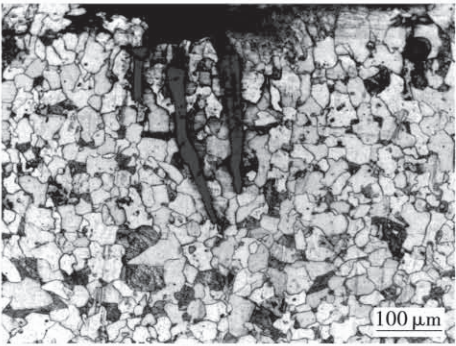


图 11 由内壁表面开始发展的微裂纹形貌(200 ×)
Fig.11 Microcrack morphology developed from the inner wall surface(200 times)

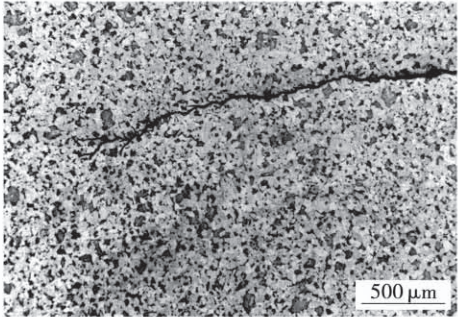
(6) 背火面外壁裂纹走势较直,呈树枝状分叉形态。裂纹呈穿晶和沿晶的混合形态,尾端圆润,如图 12 所示。

结合之前渗透检测的推断,可进一步确认裂纹从背火面内壁开始产生。

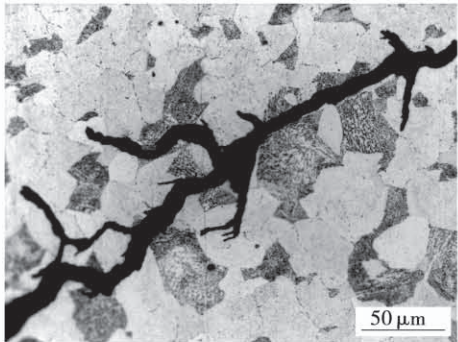
2.7 能谱分析

在过热器管束背火面内表面进行能谱分析,检测结果如表 7 所示。内表面除了较多的氧化产物之

外还存在卤素离子 Cl^- ,会对过热器管束内表面产生点腐蚀,形成腐蚀坑。



(a) 裂纹全貌(50 ×)



(b) 局部放大(200 ×)

图 12 外壁表面裂纹形貌

Fig.12 Crack morphology on the outer wall surface

表 7 能谱分析数据

Tab.7 Energy spectrum analysis data

元素	质量百分比/%
O	31.44
Na	0.93
Mg	0.34
Cl	0.33
K	0.24
Ca	0.18
Cr	0.32
Mn	0.78
Fe	65.44

3 失效机理

从能谱分析结果确认炉水中除去 Na^+ 、 Mg^+ 之外,还含有较多量的 Cl^- ,其均来源于减温水^[10]。

一般炉管在高温下表面会形成一层连续而致密

的 Fe_3O_4 保护膜,可以有效防止炉管金属在炉水中被腐蚀^[11]。有研究表明,当换热管壁面温度波动幅度大于 $30 \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,可能造成内壁氧化膜破坏^[12]。

另外, Cl^- 属于活化阴离子,同时管材表面微观结构存在不均匀性,水溶液中的 Cl^- 会优先附着于金属表面缺陷处,形成多个微电池,进而发生电化学腐蚀。当达到腐蚀电位时,表面保护膜最弱部分的电场强度会很高,致使 Cl^- 轻易地穿透膜空隙,并与金属形成氯化物,在闭塞电池环境的作用下形成点蚀核心^[13]。

金属氯化物属于强酸弱碱盐,易水解生成 H^+ ^[2],导致腐蚀表面 pH 值降低,进一步腐蚀炉管金属。进入金属内部的氢原子与 C 元素结合生成 CH_4 ,气体的产生及膨胀致使金属内部产生压力,进而沿晶界出现裂纹^[13]。

同时,金属氯化物还与换热管内表面沉积物中的金属氧化物在高温下相互作用产生 Cl_2 。 Cl_2 通过微小空洞或裂纹进入金属内部并反应生成铁的氯化物。其在高温下由固态转变为气态^[3],并进一步在金属内部缺陷结构中蔓延。当其遇到氧则被氧化成为 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ,并再次释放出 Cl_2 ^[14]。如此过程重复, Cl_2 在强度较低的晶界周边逐渐由大量的微小空洞扩展成为裂纹,并在裂纹内不断形成金属氧化物,填充裂纹空隙。

如果锅炉给水中含有高浓度溶解氧时,腐蚀的速度及其破坏程度将会大大提升。炉水中氧浓度和氯离子浓度的乘积会有一个临界值,当超越此临界点时,腐蚀速度加倍^[15]。

金相检验的结果显示,炉管内表面密集分布有多条深浅不一的微裂纹,且均萌生于内表面的腐蚀凹坑。裂纹呈穿晶和沿晶的混合形态,其发展方向与内表面垂直,尾端圆润。裂纹内部充满氧化物。综合分析该形态符合在 Cl^- 作用下的晶间应力腐蚀的机理。

4 结 论

(1) 锅炉的高温段过热器换热管所使用的材质为 12Cr1MoVG,其现有的力学性能仍能满足标准技

术要求,金相组织结构尚未发生严重的退化或改变。

(2) 锅炉在低负荷运行期间,高温段过热器并无长期超温运行的情况,各换热管排内的蒸汽流量仍能够满足金属冷却需求。

(3) 由于锅炉使用的是混合式减温器,减温水与过热蒸汽、过热器换热管之间存在直接接触。能谱分析确认炉管已受到 Cl^- 侵蚀,金相检测呈现出穿晶与沿晶断裂的形貌,符合高温环境 Cl^- 持续作用下的应力腐蚀。因此,锅炉给水和减温水中 Cl^- 含量过高是导致本次炉管泄漏的主要原因。

实际运行过程中需要格外关注锅炉给水中 Cl^- 含量,尤其要重点关注回收凝结水的品质。在回收凝结水系统上增设 Cl^- 在线连续监测仪表,增加锅炉给水中 Cl^- 含量人工检测频次。当 Cl^- 含量一旦升高,立即将回收凝结水切出,并对其它来水组织排查,从而避免生产装置的异常串料造成过量 Cl^- 通过凝结水串入锅炉给水。

参考文献:

- [1] 马建宁,梁恩宝,殷海军,等. 电站锅炉过热器管蒸汽泄漏原因分析[J]. 电力安全技术,2020(12):28-29.
MA Jian-ning, LIANG En-bao, YIN Hai-jun, et al. Cause analysis for superheater tube steam leakage of a power plant boiler [J]. Electric Safety Technology, 2020(12):28-29.
- [2] 杨 峰,于庆波. 12Cr1MoV 钢高温运行过程中组织和性能的研究[J]. 热加工工艺,2009,38(20):28-30.
YANG Feng, YU Qing-bo. Study on microstructure and mechanical properties of 12Cr1MoV steel in long-term service at high temperature [J]. Hot Working Technology, 2009,38(20):28-30.
- [3] 张 克. 余热锅炉对流管裂纹原因分析[J]. 工业锅炉,2019(2):56-58.
ZHANG Ke. Analysis on crack of convection tube of heat recovery boiler [J]. Industrial Boiler, 2019(2):56-58.
- [4] 刘献良,赖云亭,马芹征,等. 电站锅炉过热器管爆管原因分析[J]. 热加工工艺,2021(6):158-160.
LIU Xian-liang, LAI Yun-ting, MA Qin-zheng, et al. Analysis on causes of tube burst in superheater of an utility boiler [J]. Hot Working Technology, 2021(6):158-160.
- [5] 杨瑞成,王 晖,郑丽平,等. 12Cr1MoV 钢高温时效过程中组织结构的演变[J]. 金属热处理,2002,27(9):18-22.

- YANG Rui-cheng, WANG Hui, ZHENG Li-ping, et al. Evolution of microstructures of 12Cr1MoV steel during high temperature aging [J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(9): 18–22.
- [6] 龙会国, 陈红冬, 龙毅. 电站锅炉部件典型金属故障分析及防止措施[J]. 热力发电, 2011, 40(6): 97–99, 102.
- LONG Hui-guo, Chen Hong-dong, LONG Yi. Analysis of typical metallic parts failures occurred on utility boilers and preventive measures thereof [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(6): 97–99, 102.
- [7] 张贵泉, 孙雅萍, 苏尧, 等. 氯离子对电站常用金属材料腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2021(4): 14–18.
- ZHANG Gui-quan, SUN Ya-ping, SU Yao, et al. Influence of chlorine ion on corrosion behavior of metal materials used in power plants [J]. Corrosion & Protection, 2021(4): 14–18.
- [8] 齐 信, 祖平文. 某电厂机组低温再热器管泄漏原因分析[J]. 设备管理与维修, 2021(9): 60–62.
- QI Ji, ZU Ping-wen. Cause analysis of low temperature reheater tube leakage of a power plant unit [J]. Plant Maintenance Engineering, 2021(9): 60–62.
- [9] 张剑飞, 李红亮, 翟建元. 锅炉泄漏常见爆口特征[J]. 锅炉制造, 2017(3): 20–22, 28.
- ZHANG Jian-fei, LI Hong-liang, ZHAI Jian-yuan. The feature of common burst for boiler leaks [J]. Boiler Manufacturing, 2017(3): 20–22, 28.
- [10] 付红红, 樊 钊, 陈伟民, 等. 锅炉水冷壁爆管原因分析[J]. 工业锅炉, 2017(4): 51–55.
- FU Hong-hong, FAN Zhao, CHEN Wei-min, et al. Bursting reason analysis of a boiler water-wall tube [J]. Industrial Boiler, 2017(4): 51–55.
- [11] 李茂东, 曾 彬, 杨 麟, 等. 含 Cl^- 炉水对锅炉水冷壁管腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2013, 46(11): 61–64.
- LI Mao-dong, ZENG Bin, YANG Lin, et al. Effect of chloride ion in industrial boiler water on corrosion behavior of water-cooling wall tube [J]. Materials Protection, 2013, 46(11): 61–64.
- [12] 刘 勇, 喻红梅, 蔡建国, 等. HG2008 锅炉水冷壁管横向裂纹泄漏试验研究[J]. 热力发电, 1998(3): 9–11, 20.
- LIU Yong, YU Hong-mei, CAI Jian-guo, et al. Test on HG2008 boiler water-wall transverse cracking [J]. Thermal Power Generation, 1998(3): 9–11, 20.
- [13] 郑克伦. 氯离子对锅炉的腐蚀及有效防护分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(24): 4242.
- ZHENG Ke-lun. Analysis of corrosion and effective protection of chlorine ion to boiler [J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2018(24): 4242.
- [14] 熊维舟, 何建军, 张 炜, 等. 12Cr1MoV 钢在高温混合碱金属氯盐中的热腐蚀行为[J]. 机械工程材料, 2017, 41(4): 58–63.
- XIONG Wei-zhou, HE Jian-jun, ZHANG Wei, et al. Hot corrosion behavior of 12Cr1MoV steel in high temperature mixed alkali chloride salt [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2017, 41(4): 58–63.
- [15] 孙婷婷, 陈映彤, 陈映余. 水中氯离子对锅炉的危害及防护措施[J]. 科技风, 2014(20): 138.
- SUN Ting-ting, CHEN Ying-tong, CHEN Ying-yu. Harm of chloride ion in water to boiler and its protective measures [J]. Technology Wind, 2014(20): 138.

(王治红 编辑)