

新型耐热钢 T23 的特性与早期失效分析

赵慧传¹, 凌荣华¹, 贾建民², 赵建仓³

(1. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京市 丰台区 100069; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西省 西安市 710032; 3. 苏州热工研究院有限公司, 江苏省 苏州市 215004)

New Heat-resistant Steel T23's Performance Characteristics and Early Failure

ZHAO Huichuan¹, LING Ronghua¹, JIA Jianmin², ZHAO Jiancang³

(1. ShenHua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co Ltd, Fengtai District, Beijing 100069, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co Ltd, Xi'an 710032, Shaanxi Province, China;

3. Suzhou Thermal Power Research Institute Co Ltd., Suzhou 215004, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The T23 steel is based on the T22 steel developed a new type of boiler steel by reducing C and strengthening, it the steel which develops with our country 102 (12Cr2MoWVTiB) has the approximate alloy system and the content, its normal temperature mechanical properties and the high temperature creep fracture intensity surpasses the T22 steel obviously, the cold crack sensitivity is lower than the T22 steel, the heat crack sensitivity is higher than the T22 steel far again, anti-steam oxidation susceptibility and T22 steel quite. But the T23 steel in the application of supercritical boiler superheater tube appears oxide spalling events led to burst pipes, in the application of ultra-supercritical boiler water cooling wall appeared the welding cracks, leaks and so on early failure problems. Based on the T23 steel's mechanical properties, the steam oxidation susceptibility and the welding performance analysis and the breakdown surface scaling, exploded mouth or the fracture metallography analysis, the cause of the malfunction was found out, the improvement suggestion was proposed that, the future ultra (ultra) supercritical boiler design and welding process improvement have reference value.

KEY WORDS: T23 steel; steam oxidation; falling off of oxide skin; reheat crack; structure stress; welding residual stress

摘要: T23 钢是 T22 钢经降 C 和强化而开发的新型锅炉用钢, 与我国开发的钢 102(12Cr2MoWVTiB)有近似的合金系统和含量, 其常温力学性能和高温蠕变断裂强度明显优于 T22 钢, 冷裂纹敏感性比 T22 钢低, 再热裂纹敏感性远高于 T22 钢, 抗蒸汽氧化性能与 T22 钢相当。但 T23 钢在超临界锅炉应用中先后出现了过热器管内壁氧化皮剥落导致爆管事件, 在超超临界锅炉中又出现了水冷壁焊缝裂纹、泄漏等早期失效问题。基于 T23 钢的力学性能、蒸汽氧化性能和焊接性能分析及故障件的表面剥落物、爆口或断口的金相分析, 找出故障原因, 提出改进建议, 对未来的超(超)临界

锅炉设计和焊接工艺改进均有参考价值。

关键词: T23 钢; 蒸汽氧化; 氧化皮剥落; 再热裂纹; 结构应力; 焊接残余应力

0 引言

T23 钢是日本三菱重工和住友金属联合开发的新型锅炉用钢, 它是在 T22 钢的基础上通过降低 C 含量和添加 W(固溶强化)、添加 V、Nb、B(微合金化和弥散析出强化)而获得的低碳、多元复合、高强度、高韧性的贝氏体型耐热钢。据住友及 V&M 的资料^[1-2]介绍: T23 钢的焊接性很好, 可不预热焊接, 焊后可不进行热处理, 是超超临界锅炉水冷壁的最佳候选材料。

近年来, T23 钢在我国超(超)临界机组中得到了一定程度的应用。某锅炉厂设计制造的首批次 600 MW 等级超临界锅炉的末级过热器和高温再热器管采用了 T23 材料, 经过约 6 000 至 10 000 h 的运行实践表明, T23 钢末级过热器管内壁生成的氧化皮易剥落, 堵塞下弯头而引起过热爆管事件^[3]。同样, 该锅炉厂设计制造的首批次 1 000 MW 等级超超临界塔式锅炉的水冷壁也采用了 T23 材料, 在机组调试和运行初期频繁发生水冷壁各类结构焊缝开裂导致的泄漏事件^[4], 严重影响了超超临界机组安全、稳定、经济运行。

T23 锅炉管的早期失效问题已引起业界的广泛关注, 应用前景受到了质疑。

1 T23 钢的化学成分、显微组织和力学性能

T23 钢的主要化学成分见表 1。

表1 T23、T22、钢102的主要化学成分

Tab. 1 Main chemical composition of T23, T22 and 102 steel

标准	钢号	C	P	S	Cr	Mo	V	W	Nb	B
ASTM A213	T23	0.04~0.10	≤0.03	≤0.01	1.90~2.60	0.05~0.30	0.20~0.30	1.45~1.75	0.02~0.08	0.000 5~0.006
三菱住友	HCM2S(T23)	0.04~0.10	≤0.03	≤0.01	1.90~2.60	0.05~0.30	0.20~0.30	1.45~1.75	0.02~0.08	0.000 5~0.006
GB5310	钢 102	0.08~0.15	≤0.03	≤0.03	1.60~2.10	0.50~0.65	0.28~0.42	0.30~0.55	—	0.002~0.008
ASTM A213	T22	≤0.15	≤0.03	≤0.03	1.90~2.60	0.87~1.13	—	—	—	—

由表 1 可以看出, T23 钢与我国开发的钢 102(12Cr2MoWVTiB)有近似的合金系统和含量。

ASTM A213 规定了 T23 的热处理规范: 正火>1040 °C+>730 °C回火。热处理后 T23 常温显微组织是回火贝氏体, 如图 1 所示, T23 钢的主要常温力学性能见表 2。

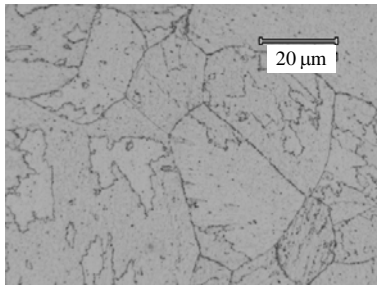


图 1 T23 钢的显微组织

Fig. 1 Microstructure of T23 steel

表 2 T22、T23 和 T91 钢的常温力学性能

Tab. 2 Room temperature mechanical properties of T22, T23 and T91 steel

标准	钢号	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ %	$A_{KV}/$ (J)(20°C)	硬度*/HB
ASTM A213	T22	>205	>415	>30	—	—
ASTM A213	T23	>400	>510	>20	280	≤220
ASTM A213	T91	>415	>585	>20	220	≤250

注: *为电站常用金属材料硬度参考值^[5], T22 硬度控制范围为 120~163 HB, T23 硬度控制范围为 150~220 HB, T91 硬度控制范围为 180~250 HB。

由表 2 可以看出, T23 钢比 T22 钢的常温力学性能有显著提高, 某些性能指标接近 T91 钢。

图 2^[2]所示为 T23、T22、和 T91 钢在 500~600 °C 温度区间 10 万 h 的蠕变断裂强度。T23 钢的蠕变断裂强度介于 T22 和 T91 钢之间, 600 °C 10 万 h 的蠕变断裂强度比 T22 钢高 93%, 接近 T91 钢。

综上, T23 钢是在 T22 钢的基础上, 降低 C 含量、降低杂质含量、添加微合金化元素(V、Nb、B)、添加固溶强化元素(W), 通过强韧化的成材加工, 得到常温性能优良、加工性能良好的钢, 600 °C 蠕变断裂强度比 T22 钢高 93%, 是超(超)临

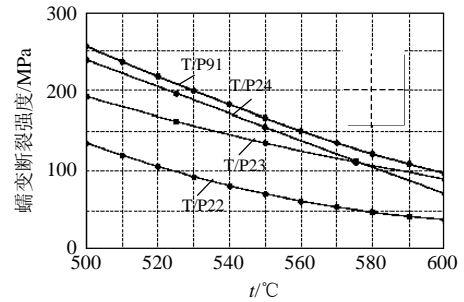


图 2 500~600 °C、10 万 h T23、T22 和 T91 钢的蠕变断裂强度

Fig. 2 500~600 °C, 100 000 h, creep rupture strength of T23, T22 and T91 steel

界锅炉受热面管候选材料之一。

2 T23 钢的抗蒸汽氧化性能

Cr 是提高钢抗蒸汽氧化性能的重要元素。T23 钢与 T22 钢的 Cr 含量相当, 二者抗蒸汽氧化性能基本相近。图 3^[6]比较了 T23、T22、T91、TP347H 钢的抗蒸汽氧化性能, 可以看出, T23 钢的蒸汽氧化层厚度与 T22 钢的相近, Cr 含量更高的 T91 钢和 TP347H 钢的抗蒸汽氧化性能比 T23 钢和 T22 钢好得多。

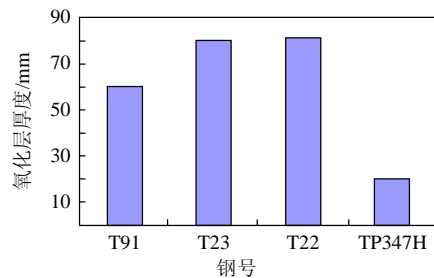


图 3 T23 钢与 T22、T91、TP347H 钢 600 °C、500 h 的抗蒸汽氧化试验比较

Fig. 3 T23, T22, T91, TP347H steel steam oxidation test (600 °C、500 h) comparison

3 T23 钢的焊接性能

T23 钢无裂纹倾向预热温度为 100 °C^[7], 而 T22 钢的无裂纹倾向预热温度为 300 °C。可见 T23 钢有一定的冷裂纹倾向, 但比 T22 钢的冷裂纹敏感性低。

T23 钢的再热裂纹倾向远高于 T22 钢，其再热裂纹敏感温度为 600~770 °C^[6]或 580~750 °C^[8]。晶界上杂质元素造成的晶界弱化和微合金元素形成的晶粒内强化是 T23 钢产生再热裂纹的内在因素，结构应力和焊接残余拉应力是再热裂纹萌生和扩展的外在主导因素，二者综合作用的结果是 T23 钢具有再热裂纹敏感性的主要原因^[9]。

预防 T23 钢再热裂纹的措施^[8-10]有：①小线能量焊接(小于 25kJ/cm)避免粗晶区晶粒的明显粗化；②采取预热、多道焊或增加回火焊道等；③尽可能改善焊趾部位的形状以减少应力集中程度；④进一步降低杂质元素的含量。

不同的焊接方法获得的焊接接头常温性能不同。氩弧焊接头，焊接区域的硬度较低，接头各区域的冲击韧性优良，脆性转变温度低，氩弧焊小直径管构件可以不进行焊后热处理。焊条电弧焊和埋弧自动焊的大直径厚壁构件，需要有焊后热处理来改善焊缝韧性和消除焊接应力^[6,11]。

4 超临界锅炉 T23 过热器管的早期失效问题

4.1 相关情况

某厂 600MW 等级超临界变压运行螺旋管圈直流炉，末级过热器为逆流布置，共计 82 排，每排 12 根管，为冷热段布置。末级过热器设计材料为 T23、T91 铁素体钢和 TP347H 奥氏体钢。

2007 年 6 月 22 日，该锅炉泄漏报警，停炉检查发现锅炉末级过热器发生 2 处爆管。

一个爆口位于末级过热器出口段右数第 14 排前数第 9 管，距顶棚 2m 处，爆口呈现短期过热特征；另一个爆口位于右数第 24 排前数第 11 根管距顶棚 2.5 m 处，爆口部位胀粗特征明显，割开该爆口下弯管发现内部积聚氧化皮，取出约 90g 重的氧化皮剥落物，如图 4 所示。



图 4 割管取出氧化皮重约 90g
Fig. 4 Pipe cutting out the weight of about 90 g oxide skins

4.2 原因分析

图 5—7 分别为 T23 管样纵剖内壁宏观形貌、

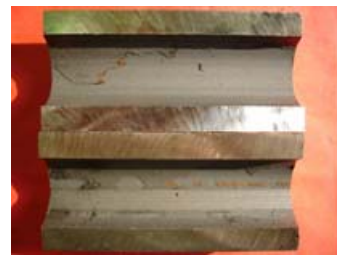


图 5 T23 管样的纵剖内壁形貌
Fig. 5 Visual features of internal appearance of the tested T23 tube

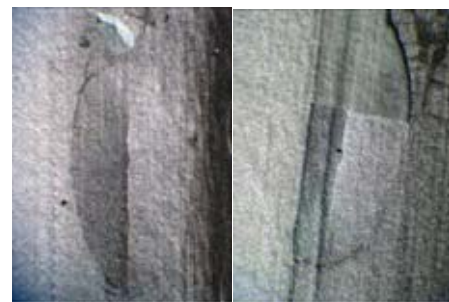


图 6 T23 管样纵剖内壁的体视显微镜照片
Fig. 6 Morphology features of internal surface of tested T23 tube under stereoscope with a low magnification

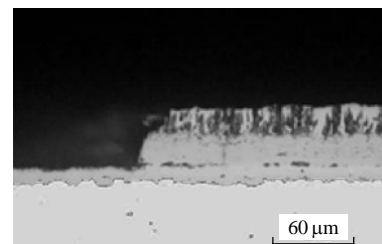


图 7 T23 钢管的氧化皮沿内层氧化物孔洞链脱落
Fig. 7 Local exfoliation of oxidation scale along the chains of micro cavity in the oxidation scale on internal surface of T23 tube

内壁体视显微镜照片、氧化皮沿内层氧化物孔洞链脱落金相照片；图 8 为脱落氧化皮折断面扫描电子图像，各区域 X 射线能谱成分分析结果见表 3。

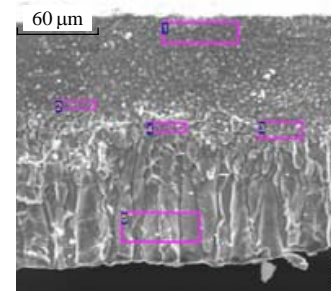


图 8 脱落氧化皮折断面扫描电子图像
Fig. 8 Tested sites of spectrum analysis on fracture surface of the exfoliated oxidation scale under SEM

表3 图8中测点位置的微区X射线能谱成分分析结果

Tab. 3 Spectrum analysis results of the tested sites shown in Fig.8

谱图	O	V	Cr	Fe	W
谱图1	24.3	0.33	2.12	72.5	0.71
谱图2	26.6	—	2.03	70.6	0.70
谱图3	21.8	—	1.09	76.5	0.60
谱图4	17.6	—	—	82.4	—
谱图5	22.4	—	—	77.6	—

T23 钢末级过热器运行管样发生了内壁氧化皮脱落^[12]。

T23 钢管样的原生氧化皮为 2 层结构^[13-14]：外层为具有粗大柱状晶的 Fe_3O_4 ；内层为具有等轴细晶的含 W 和 Cr 的尖晶石；Fe 易扩散到外层形成 Fe_3O_4 或 Fe_2O_3 ，W 的原子半径大，不易扩散沉积在内层，形成富 W 区。原生氧化皮内层存在 1 条或多条沿圆周方向排列的孔洞链，氧化物容易沿孔洞链分离，从而造成氧化物脱落^[15]。

脱落氧化皮结构为 2 层：外层仅含有 Fe 和 O，内层除 Fe 和 O 外还含有 W、Cr 和 V。脱落氧化皮内层含 W 元素，说明脱落氧化皮来自末级过热器 T23 钢管内壁，而非 T91 钢管内壁。

爆管的根本原因^[3]是末级过热器 T23/T91 钢管的 T23 管段内壁在长期高温蒸汽环境下生成氧化皮，机组启停过程中的管子热应力的急剧变化，导致缺陷(孔洞链)多的内层氧化物与基体金属分离，大量氧化皮脱落，顺汽流方向堆积到下弯管出汽边，致使管子通流截面减少、介质流量降低而产生过热，最终发生了爆管事故。

5 超超临界锅炉 T23 水冷壁焊缝的早期失效问题

5.1 相关情况

某锅炉厂设计制造的首台 1 000 MW 等级超超临界塔式锅炉的水冷壁采用了 T23 材料，在机组调试和运行初期频繁发生水冷壁各类接头焊缝开裂导致的泄漏。表 4 是该台锅炉投运第一年 T23 钢水冷壁焊缝发生的 14 次泄漏的分类统计，图 9—12 是该锅炉厂同批次制造的另一台塔式锅炉水冷壁泄漏宏观照片。

泄漏特征：①泄漏区域主要集中在锅炉标高 40~70 m 过渡段往下的螺旋段水冷壁；②鳍片角焊缝较多，泄漏点数占总数的 59.3%，尤其是 4 个转角弯管处鳍片的角焊缝；其次是刚性过渡梁与水冷

表4 T23 钢水冷壁焊缝泄漏分类统计表

Tab. 4 Classification table of T23 steel water wall weld leakage

项次	泄漏焊缝类别	总数量 (共 32 个)	制造数 (共 6 个)	安装数 (共 26 个)	所占 比例/%
1	管子对接焊缝	2	1	1	6.3
2	鳍片与管子角焊缝	19	2	17	59.3
3	刚性过渡梁与管子角焊缝	9	1	8	28.1
4	密封盒垫块与管子角焊缝	2	2	0	6.3



图9 锅炉转角鳍片与管子角焊缝泄漏

Fig. 9 Fillet weld leakage between fins and tube of boiler



图10 刚性梁与管子角焊缝泄漏

Fig. 10 Fillet weld leakage between rigid beam and tube



图11 制造厂对接焊缝泄漏

Fig. 11 Factory butt weld leakage

壁管之间的角焊缝，占 28.1%；再次是密封盒处的垫板与管之间的角焊缝，约占 6.3%；③对接焊缝较少，共发生 2 次泄漏，1 次为安装焊缝，1 次为制造焊缝；④安装焊缝泄漏点共计 26 个，占总泄漏点数的 81%。



图 12 填板端头与管子角焊缝泄漏

Fig. 12 Fillet weld leakage between filled plate and tube

5.2 原因分析

某 1 000 MW 等级超超临界塔式锅炉刚性梁与水冷壁管角焊缝裂纹处金相组织见图 13, 转角处水冷壁管子与鳍片角焊缝裂纹处金相组织见图 14。

裂纹在水冷壁管背火面, 主裂纹起源于焊缝与母材夹角, 裂纹沿熔合线方向在粗晶区启裂, 存在一定再热裂纹特征; 但在应力的作用下, 裂纹从外壁粗晶区向内扩展, 裂纹尖端止于细晶区。主裂纹较宽, 宏观发展方向同结构应力方向一致, 主裂纹应是应力过大而导致的冷裂纹。但沿熔合线的粗晶区存在晶界弱化现象, 晶界处有碳化物析出, 如果在应力的进一步作用下, 此处也可能将产生沿晶裂纹。

漏点位于水冷壁向火面管子与鳍片焊接接头, 该处叠加了埋弧焊及手工焊焊缝。微观金相检验表明, 主裂纹启裂于手工焊焊缝与母材较为尖锐的夹角处(应力集中处), 从外壁沿热影响区向内壁扩展, 裂纹尖端止于细晶区。主裂纹宏观发展方向同结构应力方向一致, 附近有 1 条与主裂纹平行的次裂纹, 属晶间扩展微裂纹。上述特征表明主裂纹形成的原因是由于在结构应力和焊接残余应力等的作用下, 在焊接接头薄弱区域形成的裂纹。金相检验同时表明裂纹扩展有沿晶特征, 并且由于焊接接头区域经过多次焊接及焊接热循环过程, 存在一定晶界弱化

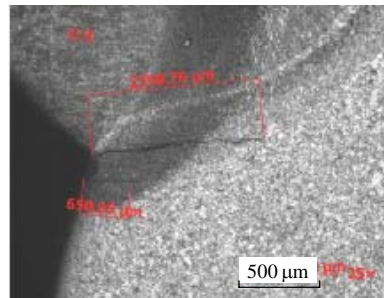


图 13 刚性梁与水冷壁管角焊缝裂纹处金相组织

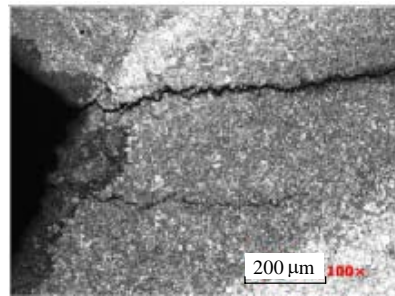
Fig. 13 Fillet weld cracks microstructure between rigid beam and water wall tube



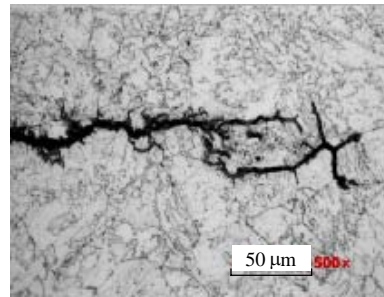
(a) 管子与鳍片角焊缝横截面宏观形貌



(b) 主裂纹与次裂纹金相照片(25 倍)



(c) 主裂纹与次裂纹金相照片(100 倍)



(d) 主裂纹尖端金相照片(500 倍)

图 14 转角处水冷壁管子与鳍片角焊缝裂纹处金相组织

Fig. 14 Fillet weld cracks microstructure between water wall tube and fins

现象, 这些因素表明裂纹具有再热裂纹特征。

综上, 裂纹形成的主要原因^[4]是由于大的结构应力和焊接残余应力等为主要作用而导致的裂纹, 并且由于焊接接头区域经过多次焊接及焊后热处理过程产生晶界弱化现象, 部分裂纹具有再热裂纹特征。

6 结论

1) 尽管 T23 钢的常温力学性能和高温蠕变断裂强度明显优于 T22 钢, 由于 T23 钢蒸汽氧化性能与 T22 钢基本相当, 而且内壁氧化皮较 T22 钢易于脱落, 因此限制了 T23 钢管应用于更高壁温的锅炉受热面。所以, 超临界锅炉高温受热面 T23 钢管计算壁温应控制在 570 °C 以内。

2) T23 钢具有较强的再热裂纹敏感倾向, 焊接接头区域经过多次焊接及热循环过程而产生晶界弱化现象, 为再热裂纹的萌生提供了条件。

3) 较高的结构应力和焊接残余应力, 是导致 T23 钢角焊缝沿焊缝与母材夹角的应力集中处产生裂纹及裂纹扩展的主要因素。

参考文献

- [1] Sumitomo metal industries, Ltd. Alloy design and properties of HCM2S steel tube[R]. 2000.
- [2] T23/T24 管材手册[R]. 瓦鲁瑞克·曼内斯曼钢管公司. T23/T24 tubing handbook[R]. Vallourec & Mannesmann Tubes.
- [3] 赵慧传, 贾建民, 陈吉刚, 等. 超临界锅炉末级过热器爆管原因分析[C]//超(超)临界锅炉用钢及焊接技术协作网第三次论坛大会论文集. 天津: 电力行业电力锅炉压力容器安全监督管理委员会, 2009: 571-577.
Zhao Huichuan, Jia Jianmin, Chen Jigang, et al. Failure analysis of superheater tube used in supercritical boiler[C]//Supercritical (ultra) Supercritical Boiler Steel and Welding Technology Collaboration Proceedings Conference of the Third Forum. Tianjin: Power Industry Boiler and Pressure Vessel Safety Supervision and Management Committee, 2009: 571-577(in Chinese).
- [4] 成鹏, 赵建仓, 梁振新, 等. 超超临界锅炉 T23 钢水冷壁裂纹原因分析[C]//超(超)临界锅炉用钢及焊接技术协作网第三次论坛大会论文集. 天津: 电力行业电力锅炉压力容器安全监督管理委员会, 2009: 551-555.
Cheng Peng, Zhao Jiancang, Liang Zhenxin, et al. Ultra supercritical boiler T23 steel water cooling wall crack reason analyzes[C]//Supercritical (ultra) Supercritical Boiler Steel and Welding Technology Collaboration Proceedings Conference of the Third Forum. Tianjin: Power Industry Boiler and Pressure Vessel Safety Supervision and Management Committee, 2009: 551-555(in Chinese).
- [5] 中华人民共和国国家能源局. DL/T 438—2009 火力发电厂金属技术监督规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
People's Republic of China Country Energy Bureau. DL/T 438—2009 The technical supervision codes for metal in fossil-fuel power plant[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009(in Chinese).
- [6] 杨富, 章应霖, 任永宁, 等. 新型耐热钢焊接[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 72-86.
Yang Fu, Zhang Yinglin, Ren Yongning, et al. New heat-resistant steels welding[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 72-86(in Chinese).
- [7] 叶上云, 赵伟珍, 杨惠琴. T23 管子焊接工艺试验研究及生产应用[C]//超(超)临界锅炉用钢及焊接技术论文集. 苏州: 电力行业电力锅炉压力容器安全监督管理委员会, 2005: 340-346.
Ye Shangyun, Zhao Weizhen, Yang Huiqin. T23 pipe welding experiment and application[C]//Supercritical (ultra) Supercritical Boiler Steel and Welding Technology Proceedings. Suzhou: Power Industry Boiler and Pressure Vessel Safety Supervision and Management Committee, 2005: 340-346(in Chinese).
- [8] 王学, 徐德录, 陈玉成, 等. T23 钢再热裂纹敏感性[C]//超(超)临界锅炉用钢及焊接技术协作网第三次论坛大会论文集. 天津: 电力行业电力锅炉压力容器安全监督管理委员会, 2009: 326-329.
Wang Xue, Xu Delu, Chen Yucheng, et al. Reheat cracking susceptibility of T23 steel[C]//Supercritical (ultra) Supercritical Boiler Steel and Welding Technology Collaboration Proceedings Conference of the Third Forum. Tianjin: Power Industry Boiler and Pressure Vessel Safety Supervision and Management Committee, 2009: 326-329(in Chinese).
- [9] 张波, 高子瑜, 王德泰, 等. HCM2S 钢再热裂纹敏感性的试验研究[J]. 动力工程, 2006, 26(2): 300-303.
Zhang Bo, Gao Ziyu, Wang Detai, et al. Tests studies on HCM2S steel's susceptibility to reheat cracking[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(2): 300-303(in Chinese).
- [10] Dhooge A, Vekeman J. New generation 2.25Cr steels T/P23 and T/P24 weldability and high temperature properties[J]. Welding in the World, 2005, 49(9/10): 31-49.
- [11] Vaillant J C, Vandenberghe B, Hahnc B. T/P23, 24, 911 and 92: New grades for advanced coal-fired power plants-Properties and experience[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(12): 38-46.
- [12] 西安热工研究院有限公司. 某电厂 T23/T91 钢管材料状态与氧化皮影响评定报告[R]. 西安: 西安热工研究院

- 有限公司, 2008.
Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. Assessed report of a power plant T23/T91 steel tube material situation and the impact pipe wall oxides [R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, 2008(in Chinese).
- [13] Wright I G, Tortorelli P F, Schütze M, et al. Program on technology innovation: Oxide growth and exfoliation on alloys exposed to steam[R]. Palo Alto, CA: EPRI, 2007. 1013666.
- [14] 李婷, 赵钦新, 王云刚, 等. STBA24 钢管蒸汽氧化的微观特征研究[J]. 动力工程学报, 2010, 30(4): 293-297.
Li Ting , Zhao Qinxin , Wang Yungang , et al. Microstructure features of steam oxidation scales on STBA24 steel tubes[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(4): 293-297(in Chinese).
- [15] 黄兴德, 周新雅, 游喆, 等. 超(超)临界锅炉高温受热

面蒸汽氧化皮的生长与剥落特性[J]. 动力工程, 2009, 29(6): 602-608.

Huang Xingde , Zhou Xinya , You Zhe , et al. Supercritical(ultra) supercritical steam boiler heating surface temperature oxide growth and spalling characteristics[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(6): 602-608(in Chinese).



赵慧传

收稿日期: 2010-11-05。

作者简介:

赵慧传(1963), 男, 教授级高工, 主要从事火力发电厂金属技术监督及高温承压部件失效分析工作, zhaohc66@126.com。

(责任编辑 张媛媛)