

高温高压蒸汽系统 12Cr1MoV 部件材质老化分析及剩余寿命评估

何旺军

中石化巴陵石油化工有限公司

摘要: 通过试验和理论分析,对高温高压蒸汽系统 12Cr1MoV 部件材质老化进行分析,并对材质严重老化的部件剩余寿命进行评估,及时掌控高温高压蒸汽系统 12Cr1MoV 部件的质量情况,采取合理的措施,防止因设备长期带病运行等各种不利因素而引起各类事故,从而提高设备安全运行的可靠性。

关键词: 高温高压蒸汽系统; 12Cr1MoV ; 材质老化分析; 剩余寿命评估

1 引言

某石化热电部高温高压锅炉为杭州锅炉厂生产 NG220/100-1 型锅炉(详细参数见表 1),配套汽轮机为武汉汽轮机厂生产的 C25-8.83/0.98I 型单缸、单轴、单抽汽凝汽式汽轮机。

表 1 某石化热电部高温高压锅炉主要设计参数

项目	数值
额定蒸汽量/(t/h)	220
主蒸汽温度/℃	540
过热蒸汽出口压力/MPa	9.81
锅筒工作压力/MPa	11.28
给水温度	215

该机组于 1999 年投运至 2020 年 1 月累计运行已达 16 万 h,在对该机组高温高压蒸汽系统进行检验检测过程中,发现该机组自锅炉屏式过热器至汽轮机进汽调门材质为 12Cr1MoV 的所涉及的管道、弯头、阀门等均普遍达到 4.5 ~ 5 级的严重球化。

为了保证在此严重老化情况合法安全运行,选取运行工况恶劣、老化最为严重和不同规格的 4 个点进行剩余寿命评估,分别为:汽轮机主蒸汽管道隔离门后第一个弯头、锅炉主汽门后第 1

个弯头和汽机侧自动主汽门处下方 3[#] 导汽管、锅炉集汽集箱右数第 1 个导汽管等部件进行剩余寿命评估,发现汽轮机主蒸汽管道隔离门后第一个弯头达到 5 级严重球化状态且硬度 107HBW 明显低于标准要求最低值 139HBW。

同时为了彻底解决该老化问题启动对该机组高温高压蒸汽系统材质为 12Cr1MoV 的部件进行升级改造,升级改造内容包括:屏式过热器、集汽联箱、二级减温器、一级过热器入口集箱、主蒸汽管道,配套主蒸汽管道阀门、保温更换等。项目实施后,彻底消除该机组高温高压蒸汽系统的安全隐患,实现系统的长周期可靠运行。

2 12Cr1MoV 材质老化分析

2.1 材质老化分析及结果

对该机组高温高压蒸汽系统 12Cr1MoV 部件材质老化分析时,主要部位的分析内容及结果,见表 2。

3 12Cr1MoV 剩余寿命评估

选取锅炉集汽集箱右数第 1 个导汽管弯头、锅炉主汽门后第 1 个弯头、汽轮机来汽门后第 1 个弯头和汽机侧自

动主汽门处下方 3[#] 导汽管等部件(详见表 3),根据 GB/T30580—2014《电站锅炉主要承压部件剩余寿命评估技术导则》对其进行剩余寿命评估,评估金属部件的主要损伤模式为蠕变损伤。

3.1 评估内容及结果

3.1.1 资料审查

查阅锅炉的设计制造、安装调试资料,包括锅炉总图、锅炉说明书、产品质量证明书、锅炉安装技术资料以及金属材料材质证明书等,未提供锅炉主蒸汽管道的强度计算书,其他锅炉的设计制造资料以及安装调试资料未发现其他异常情况;查阅锅炉的超温记录、超压记录等,该锅炉存在超温超压现象,超温最高记录为 555℃,超压最高记录为 10.01 MPa,无累计超温、超压时间。查阅工业管道定期检验报告,汽轮机来汽门至主汽门第 2 个弯头抽检部位局部最大减薄 3.7 mm。查阅设备检修台账,本次评估的部件没有进行过修理改造及更换。

3.1.2 壁厚测量

锅炉集汽集箱右数第 1 个导汽

表 2 评估内容及结果

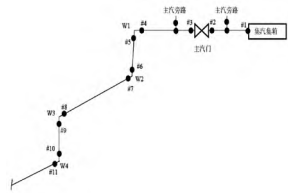
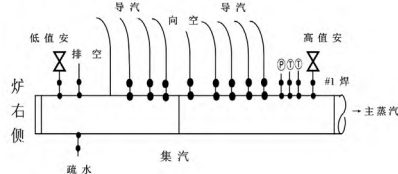
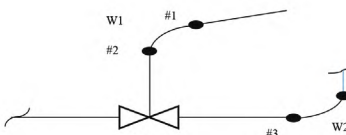
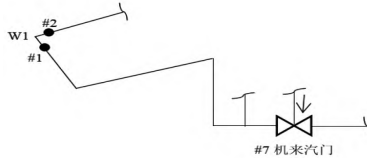
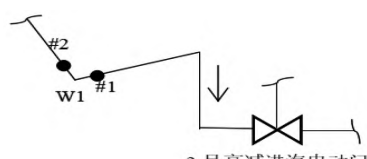
序号	部件名称	检验结果	附图
1	锅炉侧主蒸汽管道及阀门	(1) #1、#4 ~ #9、#11 对接焊缝的焊缝组织为铁素体 + 贝氏体, 母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别 4.5 级 (2) 主汽门阀体母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别 4.5 级 (3) W1 ~ W4 弯头母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别 4.5 级	 <p>主汽门后 W1 弯头母材金相组织</p>
2	集箱及其导汽管	(1) 集汽集箱炉右数第 1 个导汽管弯头母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别 4.5 级 (2) 集汽集箱母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别 4 级 (3) 屏过小集箱、二级减温器入口集箱 (上)、二级减温器入口集箱 (下) 母材组织均为铁素体 + 珠光体, 球化级别均为 4.5 级	 <p>集汽集箱炉右数第 1 个导汽管母材金相组织</p>
3	汽机侧主蒸汽管道及阀门	(1) 汽轮机来汽门后第 1 个弯头 W2 母材硬度不符合标准要求 (2) 主蒸汽管道 (汽机侧) #1 ~ #4 对接焊缝直管段母材组织均为铁素体 + 珠光体, 球化级别均为 4.5 级 (3) 汽轮机来汽门后第 1 个弯头 W2 母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别 5 级	 <p>汽轮机来汽门后 W2 母材金相组织</p>
		(4) 主蒸汽管道 (汽机侧) #1 对接焊缝直管段母材、W1 弯头母材、电动门母材组织均为铁素体 + 珠光体, 球化级别均为 4.5 级	
		(5) 汽机侧主蒸汽连通管 #1 对接焊缝直管段母材和弯头 W1 母材组织均为铁素体 + 珠光体, 球化级别均为 4 级	
		(6) 3 号高减进汽管 #1、#2 对接焊缝直管段母材和弯头 W1 母材组织均为铁素体 + 珠光体, 球化级别均为 4.5 级	
		(7) 汽机侧自动主汽门处下方 4 个导汽管母材组织均为铁素体 + 珠光体, 球化级别均为 4 级	 <p>汽机侧自动主汽门处下方 #3 导汽管母材金相组织</p>
4	汽机侧阀门、汽缸	(1) 高调门右侧导汽管母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别为 4 级 (2) 高调门右侧导汽管异型弯母材组织为铁素体 + 贝氏体, 球化级别为 4 级 (3) 高调门左侧导汽管母材组织均为铁素体 + 贝氏体, 球化级别为 4 级 (4) 高调门阀体母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别为 4.5 级。 汽缸上缸母材组织为铁素体 + 珠光体, 球化级别为 3 级	

表 3 评估管道部件材料及规格参数

部件名称	材质	规格 /mm	温度 /℃	压力 /MPa
锅炉集汽集箱右数第一个导汽管弯头	12Cr1MoV	φ 133×13	540	10.4
锅炉主汽门后第一个弯头	12Cr1MoV	φ 273×20	540	9.8
汽轮机来汽门后第 1 个弯头	12Cr1MoV	φ 273×20	540	9.3
汽轮机侧自动主汽门下方 3# 导汽管	12Cr1MoV	φ 168×14	540	9.3

管，测点位于集汽集箱炉右数第 1 个导汽管垂直于正外弧截面，以正外弧为起点，逆时针每隔 90° 测一点，实测最小壁厚为 11.58 mm，实测壁厚均小于公称壁厚 13 mm，大于最小需要壁厚 10.5 mm；锅炉主汽门后第 1 个弯头实测最小壁厚为 18.14 mm，实测壁厚均小于公称壁厚，大于最小需要壁厚 17.4 mm。

汽轮机主蒸汽管道，测点位于主蒸汽管道（汽机侧）来汽门后第 1 个弯头正外弧截面，实测最小壁厚为 18.97 mm，实测壁厚有 3 个测点均小于公称壁厚，大于最小需要壁厚 17.9mm；汽轮机侧自动主汽门下方 3# 导汽管实测最小壁厚为 13.14 mm，实测壁厚均小于公称壁厚 14 mm，大于最小需要壁厚 11.2 mm，见表 4。

3.1.3 内压应力分析

弯头部位的最大环向应力弯头部位的最大环向应力按式（1）计算：

$$\sigma_{\theta \max} = \frac{P D_i}{2S} \left[1 + \frac{3 D_i e}{2S} \cdot \frac{1}{1 + P \left(\frac{1 - \nu^2}{2E} \right) \left(\frac{D_i}{S} \right)^3} \right] \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\theta \max}$ ——最大环向应力，MPa；
 e ——弯头不圆度；
 P ——管道正常运行下的压力，MPa；
 S ——弯头（弯管）的最小壁厚，mm；
 ν ——泊松比，0.3；
 E ——材料弹性模量，MPa；
 D_i ——管道内直径，mm。

对锅炉侧主汽门后第 1 个弯头主蒸汽管道、锅炉集汽集箱炉右数第 1 个导汽管弯头、主蒸汽管道（汽机侧）来汽门后第 1 个弯头，计算选取的管道环向应力的各参数值及计算的最大环向应力值，见表 5。

3.1.4 导汽管的环向应力

导汽管的内压折算应力为：

$$\sigma_{\theta} = \frac{P(D_o - S)}{2S} \quad (2)$$

式中 σ_{θ} ——管道环向应力，MPa；
 D_o ——管道外径，mm；
 P ——管道正常运行下的压力，MPa；
 S ——管道壁厚，mm。

对于 7# 汽轮机侧自动主汽门处下方 3# 导汽管，计算的管道环向应力，见表 6。

3.1.5 寿命计算

根据 GB/T30580—2014《电站锅炉主要承压部件寿命评估技术导则》对以蠕变为主要失效方式的部件，可采用 L-M 参数方法进行寿命评估，取安全系数 $n=1.5$ 。

锅炉集汽集箱右数第一个导汽管弯头，材料为 12Cr1MoV，规格 $\phi 133 \times 13$ mm，计算温度 540℃、计算压力 10.4 MPa。计算剩余寿命得 $t=91\,842.76$ h。

表 4 评估管道部件测量壁厚

部件名称	规格 /mm	壁厚 /mm				最小需求壁厚 /mm
锅炉集汽集箱右数第一个导汽管弯头	φ 133×13	11.76	11.58	13.11	12.54	10.5
锅炉主汽门后第一个弯头	φ 273×20	18.14	18.16	18.59	18.92	17.4
汽轮机来汽门后第 1 个弯头	φ 273×20	18.97	19.23	20.11	19.87	17.9
汽轮机侧自动主汽门下方 3# 导汽管	φ 168×14	13.53	13.14	13.23	13.26	11.2

表 5 弯头部位的最大环向应力计算结果

部件名称	P	$D_o^{①}$	S	$D_i^{②}$	$\sigma_{\theta \max}$
锅炉集汽集箱右数第一个导汽管弯头	10.4	133	11.58	108.88	58.98
锅炉主汽门后第一个弯头	9.8	273	18.14	236.27	81.43
汽轮机来汽门后第 1 个弯头	9.3	273	18.97	233.92	72.49

注：①外径为公称外径；
②内径为公称外径减去最小壁厚再减去逆时针隔 180° 测得的壁厚。

表 6 导汽管环向应力计算结果

部件名称	P	D_o	S (最小壁厚)	σ_θ
汽轮机侧自动主汽门下方 3 [#] 导汽管	9.3	168	13.14	54.80

表 7 剩余寿命计算结果

部件名称	材质	规格 /mm	计算剩余寿命 /h
锅炉集汽集箱右数第一个导汽管弯头	12Cr1MoV	$\phi 133 \times 13$	91842.76
锅炉主汽门后第一个弯头	12Cr1MoV	$\phi 273 \times 20$	6691.037
汽轮机来汽门后第 1 个弯头	12Cr1MoV	$\phi 273 \times 20$	11788.28
汽轮机侧自动主汽门下方 3 [#] 导汽管	12Cr1MoV	$\phi 168 \times 14$	150750.00

锅炉主汽门后第一个弯头, 材料为 12Cr1MoV, 规格 $\phi 273 \times 20$ mm, 计算温度 540℃、计算压力 9.8 MPa。计算剩余寿命得 $t=6691.037$ h。

汽轮机来汽门后第 1 个弯头, 材料为 12Cr1MoV, 规格 $\phi 273 \times 20$ mm, 计算温度 540℃、计算压力 9.3 MPa。计算剩余寿命得 $t=11\ 788.28$ h。

汽轮机侧自动主汽门下方 3[#] 导汽管, 材料为 12Cr1MoV, 规格 $\phi 168 \times 14$ mm, 计算温度 540℃、计算压力 9.3 MPa。计算剩余寿命得 $t=150\ 750$ h。

3.2 结论与建议

3.2.1 结论

资料审查结果表明, 锅炉存在超温超压现象。4 个部件外观无明显表面缺陷, 无损检测未发现可记录相关缺陷。4 个部件实测最小壁厚均小于公称壁厚。除汽轮机主蒸汽管道(汽机侧)来汽门后第 1 个弯头硬度值低于标准值外, 其他三个部件硬度值均满足标准要求。锅炉集汽集箱炉右数第 1 个导汽管弯头母材老化级别 4.5 级, 锅炉主汽第 1 个弯头母材组织老化为 5 级(与原检测报告评级定级有所差异), 汽轮机主蒸汽管道(汽机侧)来汽门后第 1 个弯头母材老化级别为 5 级, 汽轮机汽机侧自动主汽门处下方 3[#] 导汽管母材老化级别 4 级。

以蠕变为主要失效方式的部件, 剩余寿命计算结果汇总如下表 7 所示。

3.2.2 建议

锅炉侧主蒸汽管道主汽门后第 1 个弯头, 剩余寿命计算结果为 6691 h, 材料老化 5 级, 建议立即安排更换该部件。

汽轮机来汽门后第 1 个弯头, 剩余寿命计算结果为 11 788 h, 材料老化 5 级、硬度低于标准值, 建议立即安排更换该部件。

锅炉集汽集箱炉右数第 1 个导汽管、7[#] 汽轮机汽机侧自动主汽门下方 3[#] 导汽管剩余寿命计算结果在 9 万 h 以上, 材料存在老化现象, 老化级别分别为 4.5 级和 4 级, 建议利用停炉机会进行金相组织检查及相关检测, 避免超温超压, 加大监控力度, 或割管取样, 进行试验室组织及性能试验, 进一步深度评估。

4 结语

某石化热电部发现该高温高压蒸汽系统 12Cr1MoV 材质严重老化后, 通过进行全面的材质老化普查和评估, 选取具有代表意义的 4 个部位进行剩余寿命评估, 及时掌控了该高温高压系统的 12Cr1MoV 材质老化情况, 适时地提出对该高温高压蒸汽系统 12Cr1MoV 材质部件进行升级改造的隐患治理计划, 这样可以有效避免因系统长期带病运行而引发各类生产安全事故。这也为同类高温高压蒸汽系统的长周期安全运行提供了

参考, 下阶段待升级改造项目实施后将选取有代表性的组织进行进一步分析。

参考文献:

- [1] 任敏, 任恒昌. 12Cr1MoV 钢主蒸汽管道寿命评估[J]. 化工设备与管道, 2002, 39 (1): 51-55.
- [2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电站锅炉主要承压部件剩余寿命评估技术导则: GB/T 30580-2014[S]. [2014-05-06].
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 锅炉安全技术监察规程: TSG G0001 - 2012[S]. [2012-10-23].
- [4] 国家能源局. 火力发电厂金属技术监督规程: DL/T 438-2016[S]. [2016-08-16].
- [5] 国家能源局. 火电厂金相检验与评定技术导则: DL/T 884 - 2019[S]. [2019-06-04].
- [6] 国家能源局. 火电厂用 12Cr1MoV 钢球化评级标准: DL/T 773 - 2016[S]. [2016-08-16].
- [7] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 碳钢石墨化检验及评级标准: DL/T 786 - 2001[S]. [2001-10-08].
- [8] 国家能源局. 火力发电厂焊接技术规程: DL/T 869 - 2012[S]. [2012-01-04].