

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.01.014

超临界锅炉省煤器蛇形管弯头泄漏原因分析

Cause analysis for the leakage of serpentine-tube elbow in
supercritical boiler economizer

李鹏刚

LI Penggang

(华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030)

(Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China)

摘要:为查找某电厂超临界锅炉省煤器蛇形管弯头(SA-210C 钢)泄漏原因,对弯头取样进行宏观形貌观察、化学成分分析、应力计算、力学性能测试、金相组织分析,分析结果表明,SA-210C 的化学成分、室温拉伸性能、直管段的硬度均满足相关标准要求,金相组织未见明显异常,但爆口处硬度远高于相关标准规定的上限值,塑性、韧性明显降低。受异物磕碰形成的凹坑处强度不满足管壁设计要求,凹坑底部因应力集中而产生微裂纹,运行时在管内介质压力和热应力的共同作用下,微裂纹快速扩展而引起脆性开裂。

关键词:省煤器管;蛇形管弯头;SA-210C 钢;凹坑;硬度;塑性;韧性;脆性开裂

中图分类号:TK 223. *3 **文献标志码:**B **文章编号:**1674-1951(2020)01-0068-05

Abstract: To find out the leakage cause for the serpentine-tube elbow(SA-210C steel) in a supercritical boiler economizer, macroscopic morphology observation, chemical component analysis, stress calculation, mechanical property test, and metallographic observation were implemented on the elbow samples. The results show that the chemical composition of SA-210C, tensile properties at room temperature and hardness of straight pipe met the requirements of relevant standards. There was no obvious abnormality in metallographic structure, but the hardness at cracking part was much higher than the upper limit, and the plasticity and toughness were significantly reduced. Since the tube wall pitted by the crushing of foreign material could not meet the designing requirement, there were micro-cracks at the bottom of the pit because of stress concentration. Under the action of pressure of medium and thermal stress during operation, the micro-cracks rapidly expanded and caused brittle cracking.

Keywords: tube of economizer; serpentine-tube elbow; SA-210C steel; pit; hardness; plasticity; toughness; brittle cracking

0 引言

SA-210C 是 ASME 标准钢号,为锅炉和过热器用无缝中碳钢管,属珠光体热强钢,其化学成分简单,除碳、锰含量较高外,其余与 20G 相近,故其屈服强度比 20G 高 20% 左右,而塑、韧性则与 20G 相当^[1]。该钢的生产工艺简单,冷热加工性能好,但该钢在服役过程中发生了一些爆管事故^[2-10]。本文针对某电厂超临界锅炉 SA-210C 省煤器蛇形管弯头爆管原因进行研究分析。

1 省煤器蛇形管弯头泄漏情况

某电厂锅炉采用东方锅炉厂制造的 DG1900/

25.4-Ⅱ2 型超临界直流锅炉,于 2006 年 10 月 23 日正式投运。

2017-01-25 T 20:31, #5 机组负荷 540 MW,自动发电控制(AGC)方式运行,炉膛出现正压(最大为 800 Pa),A 侧后烟井烟温下降(最低至 230℃),A 侧脱硝保护动作退出,给水流量同比增加约 150 t/h。经现场检查,发现 #5 锅炉后烟井 A 侧 8 楼(标高 54 m)处存在明显泄漏声响,判断为省煤器区域发生泄漏;01-26 T 02:40, #5 机组停运,累计运行约 50 000 h。

泄漏位置如图 1 所示。省煤器 A48-1 弯头发生泄漏后,将中隔墙管、鳍片及弯头防磨护板吹损(如省煤器至包墙的箭头线所示),并导致中隔墙 2 根管子破损,破损的中隔墙管泄漏的蒸汽又将省煤

收稿日期:2019-08-05;修回日期:2019-08-26

器 A47 - 1, A49 - 1 吹损(如包墙至省煤器的箭头线所示)。

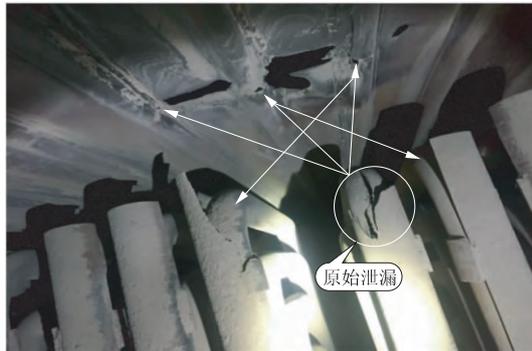


图 1 泄漏位置
Fig.1 Leakage location

2 试验分析项目

对省煤器 A48 - 1 管弯头进行取样(如图 2 所示),进行以下试验分析:对泄漏位置进行宏观形貌检查;采用 DL/T 5366—2014《发电厂汽水管应力计算技术规程》对该段管子进行应力计算;用 NJ - ZN208 型多元素分析仪进行化学成分分析;按照 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》,采用 WDS - 1 数显电子万能拉力试验机对弯管的直管段进行拉伸试验;按 GB/T 231.1—2009《金属材料布氏硬度试验第一部分:试验方法》,采用华银 HB - 3000 型布氏硬度计(压头直径为 2.5 mm,试验力为 1.839 kN)对取样管进行布氏硬度测试;用 OLYMPUS GX71 显微镜对取样位置进行金相组织分析;采用日本 JSM - 6700F 型扫描电子显微镜和 Oxford INCA 能谱仪对爆口断面进行扫描电镜观察及能谱分析。



图 2 省煤器取样弯头
Fig.2 Sampling elbow of the economizer

3 试验结果

3.1 宏观形貌检查

SA - 210C 弯头爆口宏观形貌如图 3 所示,爆口位于蛇形管弯头的外弧面,沿管子纵向长约 150

mm,爆口 I, II 区连接处呈 z 字形。观察爆口 II 区,发现该处有明显汽水冲刷的痕迹,爆口周围管壁在汽水冲刷下明显减薄。结合爆管现场的观察和分析,可以确定该弯头爆口 II 区是上方管子被吹漏后其内部介质反吹而形成的,因此,可以判断原始爆口为 I 区。以下爆口试验与分析仅针对原始爆口进行。

对送检弯头的爆口 I 区进行宏观检查(如图 4 所示),可见该爆口齐平,呈一字形,周围未见纵向小裂纹,爆口周围的管径未见明显胀粗,壁厚未见明显减薄,爆口呈脆性开裂特征。爆口内壁为剪切唇(如图 5 所示),可见该爆口是从外壁向内壁扩展形成的。

由图 4 可见,该弯头外壁起弧点附近存在一个异物磕碰形成的直径约 3.00 mm 凹坑,经测量,凹坑处最小壁厚仅为 3.92 mm。对爆口处内壁和外壁进行宏观检查,均未见纵向裂纹及明显腐蚀产物。



图 3 弯头爆口宏观形貌
Fig.3 Macro-morphology of the crack in the elbow



图 4 爆口 I 区外壁宏观形貌
Fig.4 Macro-morphology of the crack's outer wall in zone I



图 5 爆口 I 区内壁宏观形貌
Fig.5 Macro-morphology of the crack's inner wall in zone I

3.2 应力计算

根据 DL/T 5366—2014《发电厂汽水管应力

计算技术规程》，工作状态下管子由内压产生的折算应力为

$$\sigma_{eq} = \frac{p [0.5D_o - Y(S - \alpha)]}{\eta(S - \alpha)} \leq [\sigma]', \quad (1)$$

式中： σ_{eq} 为内压折算应力，MPa； p 为设计压力，30.9 MPa； D_o 为管子外径，50.80 mm； S 为管子实测最小壁厚，3.92 mm； Y 为修正系数，按规程规定，该钢管取 0.4； η 为许用应力修正系数，按规程规定，该钢管取 1.0； α 为有腐蚀、磨损和机械强度要求的附加厚度，此处不考虑附加厚度，取 0； $[\sigma]'$ 为钢材在设计温度下的许用应力，134.0 MPa。

经计算，该省煤器管凹坑处由内压产生的折算应力 σ_{eq} 为 187.9 MPa，超过该材料在设计温度下的许用应力，凹坑处的强度不满足设计要求。

经查《锅炉受压元件强度计算书》，省煤器蛇形管的设计温度为 350℃，设计压力为 30.9 MPa，外径为 50.8 mm，直管计算的最小壁厚为 5.5 mm，取用壁厚为 7.1 mm，而弯头外弧面凹坑处的实测壁厚值远小于所连直管计算的最小壁厚。

3.3 化学成分分析

按照 GB/T 223—2008《钢铁及合金化学成分分析方法》对取样的 SA-210C 弯头进行化学成分分析，结果见表 1。由试验结果可知，该泄漏弯头化学成分满足 ASME SEC II A SA-210/SA-210M—2002《无缝中碳钢锅炉和过热管用规范》(以下简称 ASME) 中关于 SA-210 钢的相关要求。

表 1 SA-210C 化学成分分析结果

Tab. 1 Chemical composition analysis results of SA-210C

| 项目 | SA-210C | ASME 规定值 | % |
|---------|---------|-----------------|---|
| $w(C)$ | 0.2300 | ≤ 0.3500 | |
| $w(Si)$ | 0.2500 | ≥ 0.1000 | |
| $w(Mn)$ | 0.8100 | 0.2900 ~ 1.0600 | |
| $w(P)$ | 0.0180 | ≤ 0.0350 | |
| $w(S)$ | 0.0039 | ≤ 0.0350 | |

3.4 室温拉伸试验

在省煤器弯头的直管段上取样进行室温拉伸试验，结果见表 2。由试验结果可知，SA-210C 泄漏弯头直管段室温下的规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A 均满足 GB 5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》(以下简称 GB 5310—2008) 中相近牌号 25MnG 钢的相关要求。

3.5 硬度测试

对 SA-210C 弯头进行布氏硬度测试，测试区域如图 6 所示，测试结果见表 3。由表 3 可知，除 #4 直管段的硬度满足 ASME 和 DL/T 438—2016《火力发电厂金属技术监督规程》(以下简称 DL/T 438—

表 2 室温拉伸试验结果

Tab. 2 Tensile test results at room temperature

| 项目 | 试验值 | GB 5310—2008 规定值 |
|-----------------|-----------|------------------|
| $R_{p0.2}$ /MPa | 330 312 | ≥ 275 |
| R_m /MPa | 516 508 | 485 ~ 640 |
| A (纵向) /% | 28.0 25.5 | ≥ 20.0 |

2016) 中 SA-210 钢的相关要求外，该弯头的爆口处(230 ~ 237 HB)、弯曲中心(216 ~ 237 HB) 以及起弯处(181 ~ 186 HB) 的硬度均高于 ASME 和 DL/T 438—2016 中 SA-210 的相关要求，可见整个弯头的硬度高于标准要求。这是由于冷弯后，形变强化作用造成弯头处的硬度较直管段明显升高。

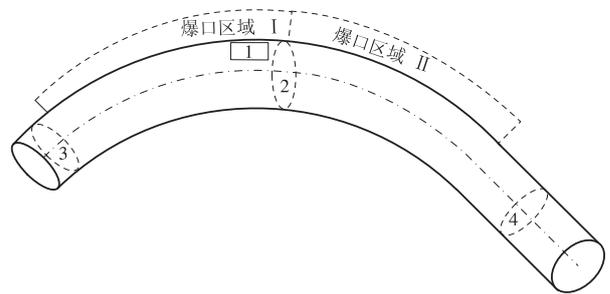


图 6 硬度测试及金相取样位置示意

Fig. 6 Sampling sites for hardness test and metallographic test

表 3 布氏硬度测试结果

Tab. 3 Brinell hardness test results

| 测试区域 | 测试值 | 平均值 | HB |
|-------------------|------------|---------------|-------|
| 爆口区域 | #1 横截面 | 235, 234, 235 | 230.0 |
| | | 231, 228, 231 | 234.7 |
| | #2 外弧面(爆口) | 238, 237, 235 | 236.7 |
| | | 214, 215, 219 | 216.0 |
| 弯头起弯处 | #3 外弧面 | 183, 181, 181 | 181.7 |
| | | 188, 185, 183 | 185.3 |
| 直段处 | #4 | 153, 154, 155 | 154.0 |
| ASME 规定值 | | ≤ 179 | |
| DL/T 438—2016 规定值 | | 130 ~ 180 | |

3.6 金相组织分析

对 SA-210C 泄漏弯头截取试样制备金相试样，金相组织如图 7 所示，金相组织检验结果见表 4。由金相检验结果可知，送检的 SA-210C 泄漏弯头起弯处、爆口、弯曲中心处以及直管段的金相组织均为铁素体 + 珠光体 + 少量魏氏组织，珠光体中的碳化物呈片状，未见明显分散^[11]，球化级别为 1 级。魏氏组织是钢管制造过程中热处理时温度过高而产生的，少量魏氏组织的存在对该管子的性能(强度、塑性)未造成明显影响。该开裂弯头的金相组织未见明显异常，爆口未见明显老化组织或因过热引起的异常组织。

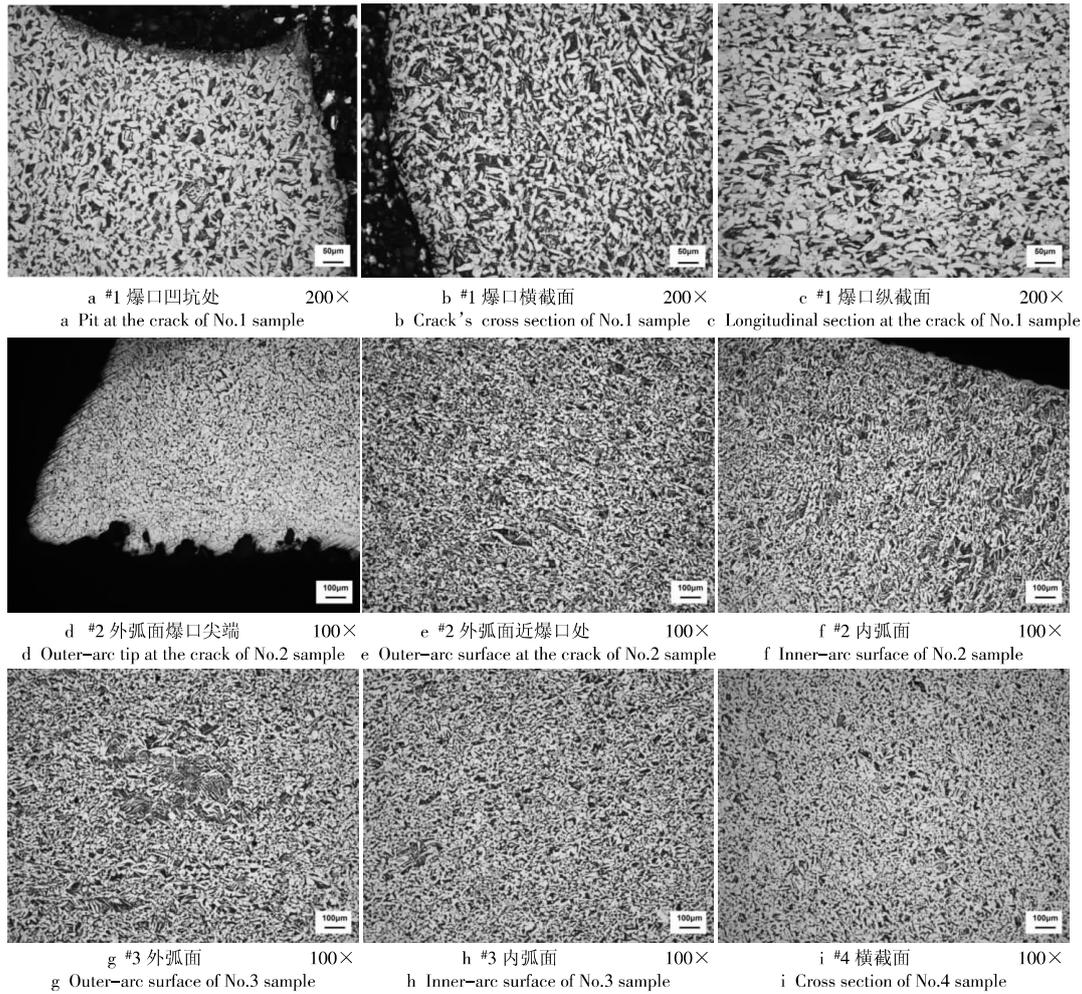


图 7 取样管金相组织形貌

Fig. 7 Sampling tube metallographic morphology

表 4 金相组织检验结果

Tab. 4 Metallographic test results

| 检验位置 | | 组织 |
|--------|------------------|--------------------|
| 爆口区域 I | 凹坑 | 铁素体 + 珠光体 + 少量魏氏组织 |
| | #1 爆口横截面 (块样) | 铁素体 + 珠光体 + 少量魏氏组织 |
| | 爆口纵截面 | 铁素体 + 珠光体 + 少量魏氏组织 |
| | 外弧面(爆口尖端) | 铁素体 + 珠光体 |
| | #2 外弧面(近爆口) (环样) | 铁素体 + 珠光体 + 少量魏氏组织 |
| | 内弧面 | 铁素体 + 珠光体 + 少量魏氏组织 |
| 起弯处 | #3 外弧面 (环样) | 铁素体 + 珠光体 + 少量魏氏组织 |
| | 内弧面 | 铁素体 + 珠光体 + 局部魏氏组织 |
| 直段处 | #4 横截面 (环样) | 铁素体 + 珠光体 + 少量魏氏组织 |
| | GB 5310—2008 规定值 | 铁素体 + 珠光体 |

3.7 扫描电镜及能谱分析

对省煤器 SA-210C 泄漏弯头的爆口断面进行扫描电镜观察及能谱分析,爆口断面微观形貌照片及能谱分析结果如图 8—9 所示。由图 8 可知,该泄漏弯头的爆口断面微观形貌为舌状花样,为典型的解理断裂^[12]形貌特征,是一种脆性断裂^[13],这与爆口宏观形貌分析结果一致。能谱分析结果显示,爆口上覆盖物为铁的氧化物,这是由于 SA-210C 为碳钢,新鲜的断口在高温、水的作用下易发生锈蚀。

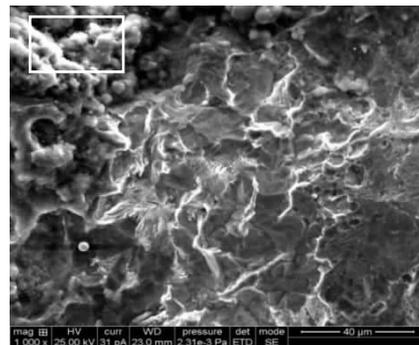


图 8 省煤器爆口微观形貌

Fig. 8 Microscopic morphology of the explosion of the economizer

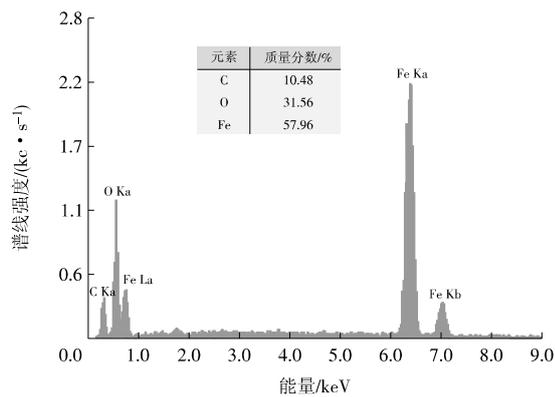


图 9 省煤器爆口覆盖物能谱分析结果

Fig. 9 Energy spectrum analysis of the cover on the explosion of the economizer

4 弯头泄漏原因分析

弯头直管段的力学性能满足相关标准要求,金相组织未见明显异常。原始爆口呈脆性断裂特征,爆口处硬度高达 237HB,远高于 ASME 和 DL/T 438—2016 规定的上限值,说明冷弯后在形变硬化作用下,该弯头的强度、硬度显著升高,同时塑性、韧性明显降低。受异物磕碰形成的凹坑处强度不满足管壁设计要求,凹坑底部因应力集中而产生微裂纹,运行时在管内介质压力、热应力等共同作用下,微裂纹快速扩展,从而引起脆性开裂。

参考文献:

- [1] 徐沁,王煜,毛洁. 高压锅炉用碳钢 SA210A-1、SA210C、20G 比较分析[J]. 锅炉技术,2016,47(6):59-61,66.
XU Qin, WANG Yu, MAO Jie. Comparison of SA210A-1, SA210C and 20G seamless steel tube used for high pressure boiler [J]. Boiler Technology, 2016, 47(6): 59-61, 66.
- [2] 刘尚慈. 火力发电厂金属断裂与失效分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 94-105.
- [3] 张少波,胡皆如. SA-210C 高压锅炉用无缝钢管的开发[J]. 江西冶金, 2005, 25(4): 15-17, 20.
ZHANG Shaobo, HU Jieru. The development of SA-210C seamless steel tube used for high pressure boiler [J]. Jiangxi Metallurgy, 2005, 25(4): 15-17, 20.
- [4] 杜晋峰,梁军,孙标. 火力发电厂亚临界机组低温过热器 SA210C 管的泄漏原因[J]. 机械工程材料, 2013, 37(10): 101-104.
DU Jinfeng, LIANG Jun, SUN Biao. Reasons for leakage of low temperature superheater pipe SA210C in subcritical units for a thermal power plant [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(10): 101-104.
- [5] 刘波,胡晓涛,龚正春. 关于 SA-210C 钢管泄漏原因分析[J]. 锅炉制造, 2007(1): 37-39.
LIU Bo, HU Xiaotao, GONG Zhengchun. Analysis of leakage cause for SA-210C steel pipe [J]. Boiler Manufacturing, 2007(1): 37-39.
- [6] 石顺梅. SA210C 钢水冷壁爆管原因分析[J]. 广西电力, 2009, 32(2): 90-92.
SHI Shunmei. Reason analysis of SA210C steel water cooled wall tube burst [J]. Guangxi Electric Power, 2009, 32(2): 90-92.
- [7] 李福松,张生凯,杜允跃,等. 锅炉省煤器管泄漏原因分析与对策[J]. 冶金设备管理与维修, 2007(4): 38-39.
LI Fusong, ZHANG Shengkai, DU Yunyue, et al. Analysis and countermeasures for the economizer pipe leakage of boiler [J]. Metallurgical Equipment Management and Maintenance, 2007(4): 38-39.
- [8] 马燕勤,李佟年,游菊. 锅炉省煤器管穿孔原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2003, 39(12): 639-641.
MA Yanqin, LI Tongnian, YOU Ju. Analysis for holed tubes of one set of boiler economizer [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2003, 39(12): 639-641.
- [9] 雷声辉,孙奉仲,史月涛,等. 大型电站锅炉省煤器爆管的分析与处理[J]. 华东电力, 2004, 32(10): 39-41.
LEI Shenghui, SUN Fengzhong, SHI Yuetao, et al. Analysis of explosion of economizer tube for large boiler and its treatment [J]. East China Electric Power, 2004, 32(10): 39-41.
- [10] 马士东,朱道华,马运平. 超临界直流锅炉省煤器爆管泄漏原因分析[J]. 华电技术, 2012, 34(1): 59-60, 79.
MA Shidong, ZHU Daohua, MA Yunping. Analysis on reasons of tube cracking and leakage of economizer of supercritical once-through boiler [J]. Huadian Technology, 2012, 34(1): 59-60, 79.
- [11] 蔡煜,张伟,戴敏明,等. SA210C 无缝中碳钢管带状组织的评定方法[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(5): 322-324, 336.
CAI Yu, ZHANG Wei, DAI Mingming, et al. Evaluation methods for banding structure of SA210C seamless medium carbon steel tubes [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2017, 53(5): 322-324, 336.
- [12] 陈剑虹,曹睿. 焊缝金属解理断裂微观机理[J]. 金属学报, 2017, 53(11): 1427-1444.
CHEN Jianhong, CAO Rui. Micromechanism of cleavage fracture of weld metals [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(11): 1427-1444.
- [13] 杨新辉. 脆性/韧性断裂机理与判据及裂尖变形理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

李鹏刚(1987—),男,陕西咸阳人,工程师,从事火力发电厂金属技术监督、锅炉压力容器定期检验、发电厂金属部件失效分析工作(E-mail: penggang-li@chder.com)。