

火电锅炉烟气余热利用研究

徐民¹ 赵明² 梁俊宇² 向文国¹

(1. 东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室 江苏 南京 210096;
2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院 云南 昆明 650000)

摘要: 锅炉排烟温度高将严重影响燃煤电厂经济性运行。为了降低锅炉排烟温度,提高电厂发电效率,本研究提出了烟气分流余热利用和附加省煤器烟气余热利用两种余热梯级利用设计方案。将这两种烟气余热利用方式应用于选定的330 MW机组,并与低压省煤器方案进行分析比较。结果表明,两种余热梯级利用方案节能效果明显,均优于低压省煤器方式。当余热回收温度为20℃时,两种烟气余热梯级利用方案相对效率提高分别为1.08%和1.21%,相应的标准煤耗降低量分别为3.47 g/kW·h和3.89 g/kW·h。

关键词: 锅炉; 排烟温度; 余热回收; 节能

中图分类号: TK115 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.013

引言

我国火力发电厂煤炭耗量巨大,大约占全国煤产量的40%^[1]。目前,燃煤电站锅炉效率大约为88%~94%,锅炉排烟热损失是锅炉机组热损失中最大的一项^[2]。据统计,排烟温度每上升10~15℃,锅炉效率就下降1%,标准煤耗就上升3~4 g/kW·h^[3-4]。因此,降低电站锅炉排烟温度,提高火力发电厂效率成为关注焦点之一^[5]。

目前,有多种方法用于降低锅炉排烟温度。例如:加强受热面吹灰^[6];增加省煤器受热面;增加空气预热器受热面;安装低压省煤器等^[7];在空气预热器后加装低压省煤器,利用排烟热量直接加热汽轮机后的冷凝水,取代部分低压抽汽,可以实现烟气余热回收,降低排烟温度^[8];山东大学黄新元教授深入分析了低压省煤器的设计和运行的优化方式^[9]。以此为基础,采取电站锅炉深度余热利用方式增加了低温空气预热器^[10],将低压省煤器安装在低温空气预热器与原有的空气预热器之间,提高了流经低压省煤器的烟气的温度,节能效果较好。

目前,上海外高桥电厂在脱硫塔前安装汽水换热器,加热汽轮机后凝结水,将排烟温度从125℃降低到80~85℃,机组热耗降低0.7%^[11]。Sergio Espatolero讨论了使用塑料材质的尾部受热面可以采用的多种余热利用方式^[12]。黄圣伟分析了常规热平衡法和等效焓降法在烟气余热利用计算中结果的等价性^[13]。

在此基础上,本研究提出了一种通过热量置换实现锅炉排烟余热梯级利用的方法,在不影响锅炉运行的前提下回收利用烟气余热,降低排烟温度,能有效提高机组效率,增加机组发电量;并以某330 MW机组为例,运用本研究提出的方法,对机组排烟温度降低方案进行了热力性能的分析。

1 机组热力性能分析方法

1.1 等效焓降法

机组热力分析采用等效焓降法^[14],基于热力学第一定律和热力系统的结构特征,从抽汽做功能力的变化出发实现热力系统局部变化的定量分析。

回热系统一般由多级加热器组成,各级加热器的抽汽等效焓降 H_i (kJ/kg)为纯热量 q_i (kJ/kg)进入加热器引起的单位斥汽在汽轮机中的做功量,抽汽效率 η_i (%)为抽汽等效焓降 H_i 与纯热量 q_i 的比值^[15]。纯热量进入回热系统排挤 i 级抽汽口抽汽,新蒸汽等效焓降增量 ΔH (kJ/kg)为:

$$\Delta H = \eta_i \times q_w \quad (1)$$

式中: η_i —加热器的抽汽效率,%; q_w —外部纯热量,kJ/kg。

新蒸汽等效焓降 H' 为:

$$H' = H + \Delta H \quad (2)$$

收稿日期:2014-09-12;修订日期:2015-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51176033)

作者简介:徐民(1990-),男,山东泰安人,东南大学硕士研究生。

式中: H —新蒸汽焓降 kJ/kg 。

机组效率相对提高:

$$\delta\eta = \frac{\Delta H - \Delta Q\eta_{in}}{H'} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ΔQ —吸热增量 kJ/kg ; 纯热量加入再热热段时吸热增量为 0; η_{in} —汽轮机内效率, 100%。

由以上计算结果可得:

$$\Delta b^n = b^n \times \delta\eta \quad (4)$$

式中: b^n —为其标准煤耗 g/kWh 。

1.2 焓分析

工质焓是状态量, 表示对一定的环境, 工质在某一状态下所具有的热能在理论上可以转化为可用能的部分。焓分析结合了热力学第一定律和热力学第二定律, 因此焓分析可以进一步分析能量利用情况, 揭示能量损失原因。假设传热过程前后压力保持不变, 质量流量相同, 则该热力过程前后焓变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{h1} - E_{h2} = (h_{h1} - h_{h2}) - T_0 c_p \ln(T_{h1}/T_{h2}) \\ &= c_p (T_{h1} - T_{h2}) - T_0 c_p \ln(T_{h1}/T_{h2}) \end{aligned} \quad (5)$$

通常热量平衡和能量转换效率不能表示焓的利用情况, 因此需要引入焓效率 η 。焓效率为收益焓 P 与支出焓 F 的比值。

$$\eta = \frac{P}{F} \quad (6)$$

2 机组结构及主要运行参数

选用某电厂 330 MW 机组为研究对象, THA(热耗率验收工况) 工况下主蒸汽流量为 1 016.55 t/h, 主蒸汽参数为 537 °C/16.7 MPa。再热蒸汽参数为 537 °C/3.654 MPa。回热系统采用 4 级低压加热器、除氧器和 3 级高压加热器的布置方式。其结构如图 1 所示, 各级加热器的运行参数如表 1 所示。

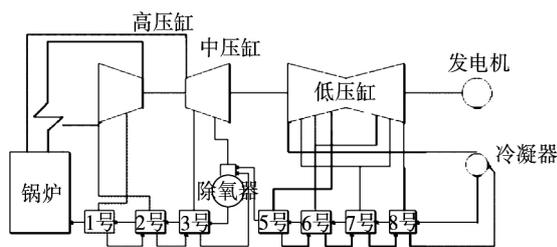


图 1 参考机组结构图

Fig. 1 Structure diagram of reference unit

表 1 各级加热器运行参数

Tab. 1 Operating parameters of all the heaters

编号	进口水温 /°C	出口水温 /°C	抽汽焓 /kJ·kg ⁻¹	抽汽流量 /t·h ⁻¹	疏水焓 /kJ·kg ⁻¹
1 号	282.1	249.4	3 164.4	78.0	1 110
2 号	249.4	206.5	3 045	72.0	907.2
3 号	206.5	178.2	3 328.6	36.2	780
4 号	178.2	138.3	3 139.4	43.0	
5 号	138.3	106.8	2 934.5	41.7	471.1
6 号	106.8	86.5	2 746.8	26.2	385.4
7 号	86.5	63.6	2 623.8	28.7	289.3
8 号	63.6	33.4	2 491.4	36.8	162.9

春秋季节, 该机组锅炉运行排烟温度达到 153 °C, 远高于烟气酸露点温度, 能量损失较大, 有较大的利用空间。

3 低压省煤器余热利用方式(方案 1)

低压省煤器位于锅炉空气预热器后部烟道中, 回收烟气余热, 降低锅炉排烟温度。回收的烟气余热加热汽轮机冷凝水, 排挤汽轮机的低压抽汽, 被排挤的抽汽继续在汽轮机中做功, 增加机组发电量。

烟气余热用于加热凝结水, 烟气与凝结水之间存在一定的温差, 设定端差 30 °C。较好的布置是将低压省煤器与 6 号低压加热器并联运行。其机组结构如图 2 所示, 设计参数列于表 2 中。

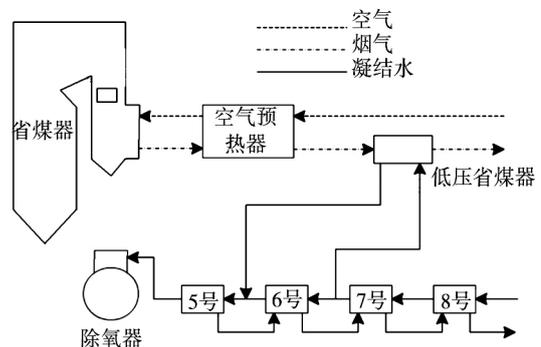


图 2 低压省煤器方案

Fig. 2 Low pressure economizer scheme

表 2 低压省煤器方案参数

Tab. 2 Parameters of low pressure economizer scheme

进口烟温/°C	出口烟温/°C	进口水温/°C	出口水温/°C
153	133	86.5	123

4 烟气余热梯级利用方式

4.1 烟气分流余热利用(方案 2)

低压省煤器方式利用的烟气温度较低、能量品位不高,排挤低压抽汽,有用能损失大。

烟气分流余热利用方式烟气、空气及凝结水流程如图 3 所示。此余热利用方式从省煤器排出的烟气被分流,部分烟气进入烟气高压加热器,其余进入空气预热器,两股烟气在空预器之后混合;烟气分流方式减少了进入空预器的烟气量,可以降低排烟温度;导热油循环流动于烟气换热器和空气换热器之间,实现冷空气提前预热。

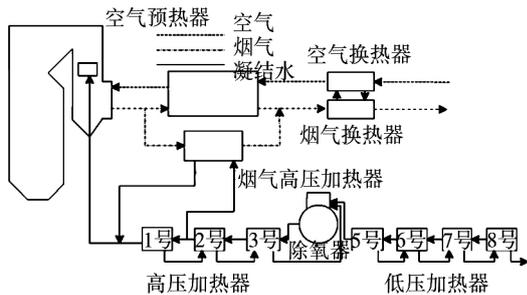


图 3 烟气分流余热利用结构原理图

Fig. 3 The system schematic diagram of an improved indirect flue gas heat recovery system

烟气分流余热利用方式采用能量置换方法,用温度较低的空气预热器排烟提前预热温度最低的入口一次风和二次风,置换出温度较高、能量品位较高的热能。置换出的高品位能量采用烟气分流方式在烟气高压加热器中被利用。

结合参考机组的运行参数,本方式中的烟气高压加热器合理的结构配置方式为与回热系统的 1 号、2 号、3 号高压加热器并联运行。参考机组烟气分流余热利用方案中的运行参数列于表 3 中。

4.2 附加省煤器烟气余热利用(方案 3)

附加省煤器余热利用方式的烟气、空气和凝结水的流程如图 4 所示。

省煤器排烟先进入烟气高压加热器加热给水,烟气温度降低;冷空气由烟气换热器和空气换热器提前预热,之后进入空气预热器。

本方案同样采用能量置换的方法。置换出来的高品位热量在烟气高压加热器中被用来加热高压凝

结水,排挤最后一级的高压抽汽,热电转换效率高。

表 3 烟气分流方案参数

Tab. 3 Parameters of the improved indirect flue gas heat recovery system

参数	数值
烟气高加烟气入口温度/℃	359.0
烟气高加烟气出口温度/℃	240.0
烟气分流份额/%	17.3
烟气高加凝结水入口温度/℃	178.2
烟气高加凝结水出口温度/℃	282.1
烟气换热器入口温度/℃	187.3
烟气换热器出口温度/℃	133.0
空气换热器入口温度/℃	20.0
空气换热器出口温度/℃	73.1
排烟温度降低量/℃	20.0

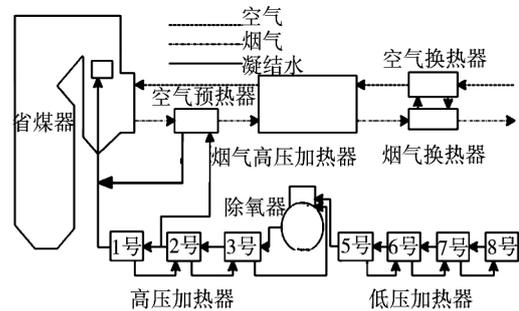


图 4 附加省煤器结构原理图

Fig. 4 The system schematic diagram of an additional economizer scheme

结合参考机组的运行参数,本余热利用方式中烟气高压加热器与 1 号高压加热器并联运行。其运行参数如表 4 所示。

5 讨论与分析

5.1 热力性能分析

这 3 种余热利用方式都将机组的排烟温度从改造前的 153 ℃降低到 133 ℃。现分别对 3 种余热利用方式进行热力学第一定律分析(等效焓降法)和焓分析。计算结果如表 5 所示。

常规低压省煤器方式相对效率提高量为 0.47%,相应的标准煤耗降低量为 1.50 g/kWh。方

案 2 和 3 两种余热梯级利用方式的相对效率提高量和标准煤耗降低量都远大于低压省煤器方式,为低压省煤器方案的两倍左右,节能效果明显。其中附加省煤器方式汽水流程比烟气分流方式简单,热电转换效率更高。

表 4 附加省煤器方案参数及计算结果

Tab. 4 Parameters of the additional economizer scheme and calculated results

参 数	数 值
烟气高加烟气入口温度/℃	359.0
烟气高加烟气出口温度/℃	339.0
烟气高加凝结水入口温度/℃	249.4
烟气高加凝结水出口温度/℃	282.1
烟气换热器入口温度/℃	201.0
烟气换热器出口温度/℃	133.0
空气换热器入口温度/℃	20.0
空气换热器出口温度/℃	116.0
排烟温度降低量/℃	20.0

表 5 余热利用结果汇总

Tab. 5 Analysis results summary of waste - heat utilization

方 案	1	2	3
凝结水抽取份额/%	33.9	6.1	18.4
相对效率提高/%	0.47	1.08	1.21
标准煤耗降低/g · kWh ⁻¹	1.50	3.47	3.89
焓效率/%	63.3	72.1	73.9

方案 2 和方案 3 的焓效率明显高于方案 1,这是因为案 2 和方案 3 采用能量梯级利用方式,按照烟气流程将烟气放热分成几个步骤,分别用于加热空气和水,通过合理布置受热面降低了传热过程的温差。此外,一次风和二次风在进入空气预热器前已经预热,空气预热器的壁面温度提高,减小了低温腐蚀的风险。同时,一次风和二次风的提前预热采用非直接传热方式,由导热油循环工作于烟气换热器和空气换热器之间,降低了烟气换热器发生低温腐蚀的可能性。

5.2 经济性分析

3 种余热利用方式初期投资成本不同,因此,对 3 种余热利用方式的评价还需要进一步进行经济性分析:3 种方案都需要新增受热面。除此之外,初期投资还包括阀门、导热油、泵、测量元件等设备费用,

施工费,设计费等。年直接收益按年发电 6 000 h,上网电价 0.43 元/kWh 计算。计算结果如表 6 所示。

由表 6 可以看出,方案 2 和方案 3 的年直接收益和总投资都远大于方案 1,但方案 2 和方案 3 的静态投资回收期稍小于方案 1 的 1.62 年。综合来看,方案 2 和方案 3 两种余热梯级利用方式投资经济性优于方案 1。

表 6 余热利用经济性分析结果

Tab. 6 Economic analysis results of waste - heat utilization

方 案	1	2	3
给水加热器面积/m ²	7 436.4	1 979.1	2 331.7
烟气加热器面积/m ²		3 608.3	3 980.2
空气加热器面积/m ²		3 145.3	3 464.3
增加发电量/KW	1 466	3 442	3 883
年直接收益/万元	378	987	1001
增加受热面费用/万元	485	720	760
设备费用/万元	50	150	150
施工费/万元	50	200	200
设计费/万元	30	100	100
总投资/万元	615	1 170	1 210
静态投资回收期/a	1.62	1.19	1.21

6 结 论

(1) 回收烟气余热加热凝结水,排挤汽轮机抽汽,可以提高机组相对效率,降低标准煤耗。

(2) 两种余热梯级利用方式余热回收效率更高,可以较大幅度提高锅炉效率,降低发电标准煤耗率。

(3) 两种余热梯级利用方式相比于低压省煤器方式,其传热焓效率更高。

(4) 两种改进型的余热利用方式初期投资大于低压省煤器方式,但年收益同样大于低压省煤器方式,其静态投资回收期略低于低压省煤器方式,综合来看,两种余热梯级利用方式经济性更好。

致谢:感谢国家自然科学基金(基金号 51176033)对本研究的资助,同时感谢许长春,赛俊聪,邱亚林等在本文的写作中所作的工作。

参考文献:

- [1] 冯俊凯,沈幼庭,杨瑞昌. 锅炉原理及计算[M]. 科学出版社,1992.
FENG Jun-kai, SHEN You-ting, YANG Rui-chang. The principle and calculation of boiler[M]. Science press, 1992.
- [2] 邢旺. 浅析锅炉排烟损失上升的根本原因[C]. 全国火电 100 MW 级机组技术协作会第 6 届年会论文集, 2007.
XING Wang. Root cause analysis of boiler flue gas losses rise[C]. National Thermal Power 100 MW unit-level technical collaboration would 6th Annual Conference, 2007.
- [3] 曾小中. 热电站锅炉排烟温度过高原因分析及对策[J]. 华北电力技术, 2004, 3: 44-46.
ZENG Xiao-zhong. Analysis and countermeasures on boiler exhaust gas superheating in cogeneration power plant. [J]. North China Electric Power, 2004, 3: 44-46.
- [4] 曹春山. 电除尘与省煤器相结合,降低排烟温度,提高机组效率[J]. 节能, 2003, 256(11): 24-25.
CAO Chun-shan. ESP combines with economizer, reduce exhaust gas temperature, improve unit efficiency [J]. China Energy Conservation, 2003, 256(11): 24-25.
- [5] 熊杰,张超,赵海波等. 基于热经济学结构理论的电站热力系统全局优化[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 65-71.
XIONG Jie, ZHANG Chao, ZHAO Hai-bo, et al. Global optimization of thermal power system based on structure theory of thermoeconomics [J]. Proceedings of CSEE, 2007, 27(26): 65-71.
- [6] 徐啸虎,周克毅,韦红旗等. 燃煤锅炉炉膛灰污染监测的炉膛出口烟温增量方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(29): 21-26.
XU Xiao-hu, ZHOU Ke-yi, WEI Hong-qi, et al. Increment of furnace exit gas temperature for monitoring ash fouling in the furnace of coal fired boilers [J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(29): 21-26.
- [7] 黄新元,孙奉仲,史月涛. 低压省煤器系统节能理论及其在火电厂的应用[J]. 山东电力技术, 2008(2): 3-6.
HUANG Xin-yuan, SUN Feng-zhong, SHI Yue-tao. Principle and engineering application of low pressure economizer system installed in power station [J]. Shan Dong Dian Li Ji Shu, 2008(2): 3-6.
- [8] Wang C, He B, Sun S, et al. Application of a low pressure economizer for waste heat recovery from the exhaust flue gas in a 600 MW power plant [J]. Energy, 2012, 48(1): 196-202.
- [9] 黄新元. 龙口电厂 1 号炉低压省煤器优化设计[J]. 锅炉技术, 1998, 29(3): 22-25.
HUANG Xin-yuan. The optimum design of low pressure economizer system of boiler No. 1 in Longkou power plant [J]. Boiler Technology, 1998, 29(3): 22-25.
- [10] 徐钢,许诚,杨勇平等. 电站锅炉余热深度利用及尾部受热面综合优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(014): 1-8.
XU Gang, XU Cheng, YANG Yong-ping, et al. Deep utilization of exhaust heat and comprehensive optimization of tail heating surface for utility boilers [J]. Proceedings of CSEE, 2013, 33(014): 1-8.
- [11] 冯伟忠. 1 000 MW 超超临界机组的综合优化和技术创新——外高桥电厂三期工程的节能减排之路[J]. 上海电力, 2007, 20(5): 441-446.
FENG Wei-zhong. The optimization and technical innovation of 1 000 MW ultra-supercritical units—energy saving road of Wai Gaoqiao power plant phase 3 project [J]. Shanghai Electric Power, 2007, 20(5): 441-446.
- [12] Espatolero S, Cortés C, Romeo L M. Optimization of boiler cold-end and integration with the steam cycle in supercritical units [J]. Applied Energy, 2010, 87(5): 1651-1660.
- [13] 黄圣伟,徐钢,杨勇平等. 电站锅炉烟气余热利用的热力学分析与优化设计原则[J]. 现代电力, 2013, 30(1): 1-8.
HUANG Sheng-wei, XU Gang, YANG Yong-ping, et al. Thermodynamic analysis and optimum design principle of the heat recovery of utility boiler's flue gas [J]. Modern Electric Power, 2013, 30(1): 1-8.
- [14] 胥建群,周克毅,张雄等. 关于常规热平衡法,等效焓降法整体算法和等效焓降法局部简化算法的一致性的探讨[J]. 汽轮机技术, 2000, 42(4): 214-218.
XU Jian-qun, ZHOU Ke-yi, ZHANG Xiong, et al. Analysis of equivalence between the equivalent enthalpy drop method and the habitual thermal balance method [J]. Turbine Technology, 2000, 42(4): 214-218.
- [15] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安交通大学出版社, 1994.
LIN Wan-chao. Energy saving theory in power plant thermal system [M]. Xi'an Jiaotong University Press, 1994.

(姜雪梅 编辑)

igation ,Northwest Polytechnic University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710072) ZHENG Tao (CSIC No.703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015 ,30 (6) . – 873 – 879

To study the flow field and aerodynamic loss characteristics of a miniature impulse type partial admission turbine and then offer guidance for design of a miniature turbine for use in a underwater navigation vehicle ,a simulation model for 2 kW class turbines was established and the reliability of the model was verified through a contrast with the results obtained from the literatures. Through changes in the blade tip clearance ,axial clearance between the outlet of the nozzles and the rotating blades ,divergence angle of the nozzles ,partial admission degree and wheel disk structure ,the aerodynamic loss of the turbine was studied. It has been found that the miniature turbine has a dimensional effect ,which reflected by the fact that the acoustic velocity point in the nozzle shifts to the downstream of the throat of the nozzle and changes in the pressure on the surfaces of the working blades are relatively identical. With an increase of the geometrical parameters above-mentioned ,the influence of the blade tip clearance on the inner efficiency of the turbine will be most conspicuous and the influence of the axial clearance ,however ,can be ignored. When the partial admission degree is 0.35 ,the rise in the inner efficiency will tend to be stable and smooth. When the divergence angle of the nozzle is 8 degrees ,the inner efficiency of the turbine is higher than that when the partial admission degree is 6 and 10 degrees respectively. When no blade tip clearance is present ,the friction loss of the wheel disks not including the blades is about 1% . **Key words:** miniature impulse type turbine ,partial admission , aerodynamic loss ,numerical simulation ,inner efficiency

火电锅炉烟气余热利用研究 = **Study of Flue Gas Waste Heat Utilization of a Utility Boiler** [刊 汉] XU Min , XIANG Wen-guo (Education Ministry Key Laboratory on Energy Source Heat Conversion and Its Process Measurement and Control ,Southeast University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210096) ZHAO Ming ,LIANG Jun-yu (Electric Power Academy ,Yunnan Electric Power Experiment Research Institute (Group) Co. Ltd. ,Kunming ,China ,Post Code: 650000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015 ,30(6) . – 880 – 884

A high temperature of the flue gases from a boiler can seriously affect the economic operation of a whole coal-fired power plant. To lower the temperature of the flue gases and enhance the power generation efficiency of a power plant ,two waste heat staged utilization design versions were proposed ,including a flue gas splitting flow waste heat

utilization version and an additional economizer waste heat utilization version. Both versions were applied in a 330 MW unit chosen and analyzed and compared with the low pressure economizer version. It has been found that both waste heat utilization versions can lead to a conspicuous energy-saving result better than the low pressure economizer version. When the waste heat recovery temperature is 20 °C ,the relative efficiencies of both versions can increase by 1.08% and 1.21% respectively and their corresponding standard coal consumption rates can decrease by 3.47 and 3.89 g/kWh respectively. **Key words:** boiler ,exhaust flue gas temperature ,waste heat recovery , energy-saving

增压锅炉汽包损耗在线监测系统的研究 = **Study of a System for On-line Monitoring the Fatigue Life of Steam Drums in Supercharged Boilers** [刊 汉] LI Bin ,SHI Liang-xiao ,CHEN Feng (College of Energy Source , Power and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Baoding ,China ,Post Code: 071003) ,LI Yan-jun (College of Power and Energy Source Engineering ,Harbin Engineering University ,Harbin , China ,Post Code: 150001) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -885 -891

In the light of the steam drum in a supercharged boiler characterized by its local heating on the outer wall a method was proposed for calculating the transient temperature field in the steam drum based on the coupling method for seeking solutions to the positive and reverse heat conduction problems and an on-line fatigue life monitoring system was developed. In line with the fact that the outer wall of the steam drum is heated or not ,the cross section of the drum can be divided into two zones ,one is heated and another is not heated. The positive and reverse heat conduction problem methods were adopted respectively to seek solutions to the temperature fields in both zones. For the boundary zones coupled ,the temperature values on the interface obtained by using the reverse problem solution-seeking method were assigned to the positive problem solution-seeking method to serve as the known boundary conditions , thus realizing a coupling of the positive and reverse problem and obtaining the temperature field of the whole drum. Afterwards ,the finite element method was used to seek solutions to the transient stress in the section of the steam drum above-mentioned as per a plane strain problem. On this basis ,an on-line fatigue life loss monitoring system was developed to achieve the aim of on-line monitoring the fatigue life loss of steam drums on boilers and guiding the operation. By making use of the software Ansys ,the temperature and stress field of the steam drum on the boiler during its cold-state startup process were calculated. To this end ,the method in question was verified and the fatigue