

# 300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系统的研究

管德清<sup>1</sup>, 莫江春<sup>1</sup>, 李 立<sup>1</sup>, 毛永忠<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 石门电厂, 湖南 石门 415300)

**摘 要:**采用三维有限元理论,对 300 MW 机组锅炉汽包在内压作用下的应力场进行了分析,所得到的理论应力集中系数比 TRD301 的推荐值大 17.3%,并用热弹性理论计算准稳态下汽包的热应力。在此基础上对 TRD301 给出的疲劳寿命计算方法提出了改进建议,开发了一套 300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系统。该系统利用计算机、智能化数据采集和通信转换对锅炉汽包运行全过程实行温度、压力和寿命的管理。经在某电厂 1 021 t/h 锅炉上运行,效果良好,达到了对锅炉汽包寿命进行在线监测和指导锅炉运行的目的。

**关 键 词:** 锅炉汽包; 疲劳寿命; 在线监测系统

中图分类号: TK225 文献标识码: A

## 1 引 言

随着用电结构的变化,电网负荷的峰谷差日益增大,300 MW 火力发电机组已参予调峰运行。电厂锅炉在调峰过程中,锅炉启停和变负荷运行使汽包受到交变应力作用,产生低周疲劳损伤。由于汽包疲劳损伤累积的增加,给电力生产安全留下隐患,因此研究锅炉汽包疲劳寿命计算方法,并对汽包寿命实行在线监测,指导锅炉运行,对于提高火电机组的安全性、经济性和现代化管理,具有重要的意义。

锅炉启停和变负荷运行过程中,汽包所承受的改变应力主要包括两个方面:一是汽包内蒸汽压力所产生的机械应力;二是启停过程中汽包壁暂态温度场引起的热应力。目前,汽包疲劳寿命计算主要采用德国 TRD301、美国 ASME 及英国 BS5500 标准给出的方法。这些标准对汽包筒体与下降管的不同连接方式给出了相应的理论应力集中系数,但是不考虑结构几何尺寸和焊缝局部几何形状对应力集中的影响<sup>[1]</sup>。文献[2]采用美国 ASME 标准,计算了 400 t/h 锅炉汽包的疲劳寿命。通过对结构进行细致的三维有限元分析可知,对于不同焊接结构形式

和不同几何尺寸的汽包,其理论应力集中系数是不相同的。所以,针对具体汽包采用有关标准统一给出的理论应力集中系数,有时会得到偏于危险的结果。因此,采用三维有限元理论研究具体锅炉汽包结构的应力场,对于汽包疲劳寿命分析是十分重要的。近年来,人们开始采用三维有限元方法计算汽包的应力场<sup>[3~4]</sup>,进而估算锅炉汽包的疲劳寿命。

随着计算机技术、传感技术和失效分析的快速发展,建立对各类结构的寿命预测和安全管理系统(PHM)具有重要应用前景。文献[5]指出,对于工业管理和维护而言,21 世纪将进入 PHM 时代。针对电厂锅炉建立安全管理系统受到国内外学者和工程技术人员的高度重视。Douglas J. Smith, Thomas C. Elliott 和 Robert Swanekamp 建立了电厂锅炉在线监测与诊断系统<sup>[6~7]</sup>;袁镇福等研制了电厂锅炉启动指导装置<sup>[8]</sup>;管德清等建立了 400 t/h 锅炉优化启动的数学模型<sup>[9]</sup>。这些工作对于提高电厂锅炉的安全管理和自动化水平具有重要作用。

本文以 300 MW 机组 1 021 t/h 锅炉为研究对象,采用国际通用的大型结构有限元分析软件 ANSYS6.0 计算汽包结构在内压作用下的应力场,依据三维有限元计算结果,采用德国《蒸汽锅炉技术规程》(TRD301)的方法估算疲劳寿命,并对 TRD301 推荐的理论应力集中系数提出了修改建议,开发了一套 300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系统。该系统利用计算机、智能化数据采集和通信转换对锅炉汽包运行全过程实行温度、压力和寿命的管理。经在某电厂 1 021 t/h 锅炉上运行,效果良好。

## 2 300 MW 机组锅炉汽包疲劳寿命估算方法

### 2.1 汽包应力场的三维有限元计算

汽包所受交变应力中,机械应力占主要部分。

收稿日期: 2004-04-12; 修订日期: 2004-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372087); 湖南省自然科学基金资助项目(04JB027); 湖南省科技计划基金资助项目(04GK3051)

作者简介: 管德清(1961-)男,湖南常德人,长沙理工大学教授。

本文用有限元方法计算汽包内压引起的机械应力的应力场, 而用热弹性理论计算准稳态下汽包的热应力。

锅炉设备概况如下:

型号: HG-1021/18.2-540/540-WM10; 额定蒸发量: 1 021 t/h; 饱和蒸汽压力: 19.6 MPa; 饱和蒸汽温度: 363 °C; 汽包材质为 SA-299; 汽包内径  $D=1\ 778$  mm; 壁厚  $S=200$  mm; 筒身长  $L_1=18\ 000$  mm; 下降管内径  $d=710$  mm; 下降管壁厚  $d_1=135$  mm。

为了求得汽包在内压作用下的理论应力集中系数, 我们采用国际上通用的有限元结构分析程序 ANSYS6.0 计算汽包结构的应力场。在对汽包结构进行有限元应力分析时, 作出如下简化假定: (1) 筒身除下降管以外的其它开孔均忽略不计; (2) 下降管与筒体连接处焊缝结构较大, 焊缝建模按实际结构尺寸, 一般焊缝对整体结构影响不大, 不作考虑; (3) 根据结构的对称性, 取汽包的四分之一进行网格划分, 并在对称面上施加相应的位移约束; (4) 只研究内壁受均匀压力作用, 不分析其它载荷的影响。

根据结构的对称性, 取汽包的 1/4 进行网格划分, 如图 1 所示。在汽包厚度方向取六层单元, 采用的单元为六面体八节点等参单元。单元总数为 9 816 个, 节点总数为 11 041 个。计算了

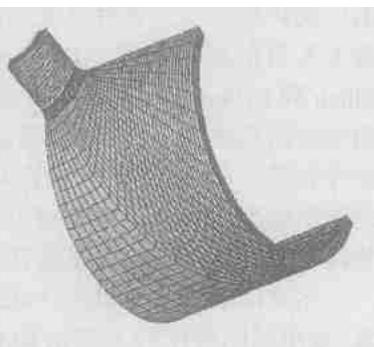


图 1 汽包有限元网格划分

汽包内压  $P=19.6$  MPa 作用下, 如图 2 所示 A 点的环向应力。

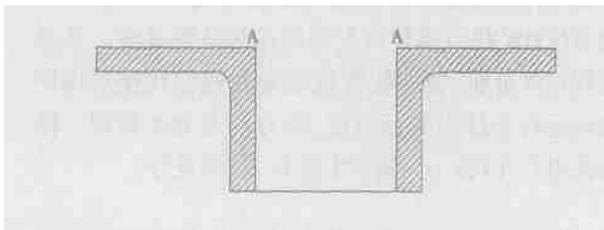


图 2 最大应力点位置

无孔汽包在  $P=19.6$  MPa 作用下的环向应力  $\sigma_{\theta}^{(n)}=96.92$  MPa。有限元计算结果为:  $\sigma_{\theta_{max}}=296$  MPa。所以, 理论应力集中系数  $\alpha_{m0}=\frac{\sigma_{\theta_{max}}}{\sigma_{\theta}^{(n)}}=3.05$ 。

下降管与锅筒连接属于插入式焊接管接头, 按德国《蒸汽锅炉技术规程》(TRD301) 标准, 在内压作用下的理论应力集中系数  $\alpha_m=2.6$ 。有限元计算结果比 TRD301 标准推荐值要大 17.3%。因此, 如选用此规程推荐的理论应力集中系数计算 1 021 t/h 锅炉汽包寿命, 将会给出偏于危险的结果。所以, 从安全角度考虑, 本文对其进行修正, 取  $\alpha_{m0}=3.05$ 。

### 2.2 汽包疲劳寿命计算

按照 TRD301 规范的基本思路计算汽包疲劳寿命。汽包疲劳寿命以集中下降管与锅筒内壁轴向截面转角处 A 点作为考核点。

根据内压引起的机械应力和径向温差引起的热应力来确定应力循环范围。汽包内压和径向温差引起的总应力为:

$$\sigma = \alpha_m \frac{P(D+S)}{2S} + 2\sigma_{\theta} \tag{1}$$

式中:  $P$ —工作压力;  $D$ —汽包内径;  $S$ —壁厚;  $\sigma_{\theta}$ —无孔汽包径向温差引起的环向热应力;  $\alpha_m$ —薄膜应力集中系数。在 TRD301 规范中, 考虑不圆度应力集中系数的影响, 有:

$$\alpha_m = \alpha_{m0} \times \frac{1}{1-0.5(d/D)^2} + f_u \alpha_b \tag{2}$$

式中:  $\alpha_{m0}$ —理论应力集中系数;  $f_u \alpha_b$ —不圆度应力集中系数。

由热弹性理论可得, 无孔汽包径向温差引起的环向热应力为:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha_1 E \nu R_1^2}{8 \alpha (1-u)} (3\beta^2 - 1 - \frac{4\beta^4}{\beta^2 - 1} \ln \beta) \tag{3}$$

式中:  $\alpha_1$ —线膨胀系数;  $E$ —弹性模量;  $u$ —波松比;  $R_1$ —汽包内半径;  $\nu$ —升温或降温速度;  $\alpha$ —热扩散率;  $\beta$ —汽包外径与内径之比。

在每个启停或升温与降温过程中, 内压  $P$  与热应力  $\sigma_{\theta}$  都随时间而变化, 求出孔边最大总应力  $\sigma_{max}$  与最小总应力  $\sigma_{min}$ , 则应力循环范围为  $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ , 并按平均应力及应力—应变非线性关系对循环应力范围修正后得到有效循环应力范围。再根据 TRD301 疲劳设计曲线求得相应的允许循环次数  $N$ 。由式(4) 计算疲劳损耗值  $D$ , 依据 TRD301 规范  $D \leq 0.5$  判断汽包疲劳安全性。

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \leq 0.5 \tag{4}$$

式中:  $n_1, n_2$  和  $\dots n_n$ —不同循环应力的循环次数;  $N_1, N_2$  和  $\dots N_n$ —相应各种循环应力允许的循环次数。

### 3 300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系统

#### 3.1 系统特点

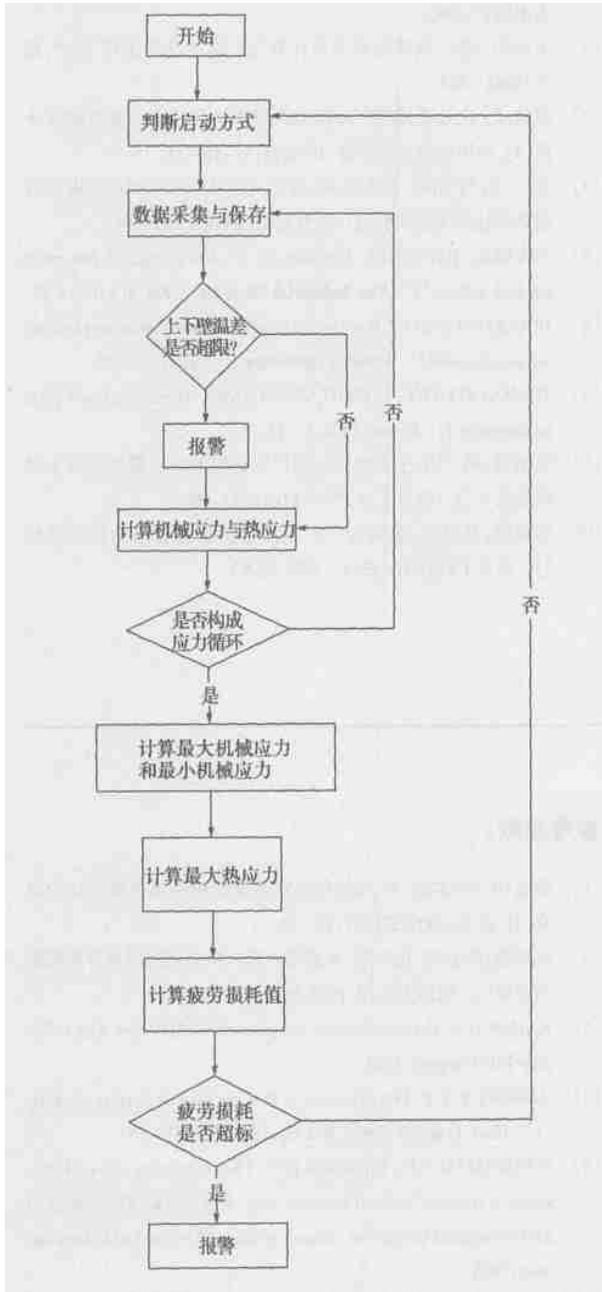


图 3 系统软件流程

(1) 通过对锅炉汽包温度、压力的监测及对测点数据的计算、记录、查询和变化趋势显示等采用间接计算的方法实现对锅炉汽包寿命的在线监测。

(2) 所选用的开发平台为 Borland 公司开发工具 Delphi 7.0, 系统可运行于安装了 Microsoft 公司的 Windows 9X, Windows NT4, Windows 2000 或 Windows

XP 操作系统的 PC 机上。

(3) 本系统可同时两台 1 021 t/h 锅炉汽包的寿命进行在线监测, 能分别给出每台锅炉汽包的相关数据, 供查询。

(4) 系统本身为一独立完整的系统, 但数据库可开放给其它系统, 如处于网络环境下, 所有监测及计算数据可供其它系统读取使用。

#### 3.2 系统构成

该系统由测试元件、智能化数据采集模块和计算机 3 部分组成。系统工作时, 由压力变送器和热电偶等测试元件测得汽包压力和内外壁温度等参数; 通过亚当模块 ADAM4018 和 ADAM 4520 进行数据传送与转换, 将测点数据传送到计算机, 并进行模数转换; 计算机将数据进一步处理, 实现对汽包寿命的在线监测。系统软件流程如图 3 所示。

#### 3.3 系统主要功能

(1) 对锅炉汽包压力、内壁温度和外壁温度实时数据采集与监测, 将各测点数据以棒图方式显示在数据显示区, 并给出汽包压力变化曲线、上下壁及内外壁温差变化曲线。

(2) 实时计算汽包最大应力点应力值和热应力值, 给出它们的变化曲线。

(3) 根据数据采集结果, 自动判断启动方式, 实时计算疲劳损耗值。汽包壁温差和疲劳损耗超过规定值时报警。

(4) 可查询锅炉历次启停有关数据, 如汽包压力变化曲线、上下壁及内外壁温差变化曲线、汽包最大应力点应力变化曲线、热应力变化曲线和疲劳损耗等。

(5) 根据优化理论得到的锅炉启停曲线, 指导锅炉运行。

#### 3.4 系统运行情况

该系统在湖南省石门电厂 300 MW 机组 1 021 t/h 锅炉上运行, 各项功能正常, 采集数据准确可靠, 并能长期运行。试验证明, 由于对锅炉汽包疲劳寿命进行了在线监测, 通过计算机管理, 保证了锅炉运行数据记载的准确性, 减轻了劳动强度, 提高了现代化管理水平。

### 4 结 论

(1) 利用计算机、智能化数据采集和通信转换, 开发了一套 300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系

统。该系统能对锅炉汽包运行全过程实行温度、压力和寿命的管理,并指导锅炉运行。

(2) 开发的汽包疲劳寿命在线监测系统运行稳定,各项数据准确可靠。系统启动以后,即可自行完成采集、判断、计算和报警等各项功能,自动化程度高。

(3) 本系统所选用的开发平台为 Delphi 7.0。它采用了弹性可重复利用的完整的面向对象程序语言和当今世界上最快的编辑器和最为领先的数据库技术。因而该系统软件先进,易于推广和进行二次开发。

(4) 通过对 300 MW 机组锅炉汽包应力场的三维有限元计算,得到了汽包在内压作用下的理论应力集中系数,计算结果比德国《蒸汽锅炉技术规程》(TRD301)标准推荐的理论应力集中系数大 17.3%。并以有限元计算结果代替 TRD301 推荐的理论应力集中系数,再计算汽包疲劳寿命,这样的处理偏于安全。在对其它类型电厂锅炉进行疲劳寿命分析时,建议应力集中系数的选取应以有限元计算结果为

准。

#### 参考文献:

- [1] 吕邦泰,沈月芬. 锅炉承压部件强度及寿命[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [2] 王运明. 电厂锅炉锅筒寿命计算[J]. 热能动力工程, 1997, 12(6): 442-444.
- [3] 赵铁成, 沈月芬, 梁艳明, 等. 电厂锅筒内压应力三维有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 31-33.
- [4] 郑克, 刘志刚, 李益民, 等. 辛店电厂 DG670/140-2 型锅炉汽包低周疲劳寿命研究[J]. 热力发电, 2000(3): 49-54.
- [5] BECKER, BYINGTON, FORBES, et al. Predicting and preventing machine failures[J]. *The Industrial Physicist* 1998, 4(4): 20-23.
- [6] DOUGLUS J SMITH. Monitoring/ diagnostic systems enhance plant asset management[J]. *Power Engineering* 1992(6): 23-28.
- [7] THOMAS ELLIOTT, ROBERT SWANEKAMP. Monitoring power plant performance[J]. *Power*, 1994(5): 15-32.
- [8] 袁镇福, 周洁, 宁安坤, 等. 电厂锅炉启动曲线最优化及实时启动指导[J]. 动力工程, 1997, 17(4): 40-45.
- [9] 管德清, 莫江春, 张学纶, 等. 电站锅炉优化启动的数学模型[J]. 动力工程, 2003 23(2): 2279-2283.

(上接第 47 页)

## 5 结 论

本文结合倾斜式冷凝器冷凝回流的试验,建立了相应的数学模型,并根据试验测得的数据结果,采用数值模拟的方法,获得了在不同参数下,截面汽相所占有的份额和汽液两相流速沿管长方向上的分布,并得到了一些有价值的结论。

(1) 截面汽相所占有的份额沿管长方向逐渐增大,冷凝能力足够大时,在冷凝器的末端  $\alpha = 1$ ;

(2) 汽液两相流速沿管长方向逐渐减小,冷凝能力足够大时,在冷凝器的末端应为零;

(3) 在同一压力下,当倾角  $\beta = 90^\circ$  时,液膜最薄,两相流速沿管长的变化最为显著;

(4) 在同一倾角  $\beta = 90^\circ$  下,随着压力的减小,液膜厚度也逐渐减小。

#### 参考文献:

- [1] 陈文仲, ROEIZEL W. 倾斜往返式冷凝器中液阻速度的试验研究[J]. 真空, 2000 171(1): 22-25.
- [2] 陈海燕, 陈玉宙, 张忠岳. 垂直管内蒸汽冷凝回流阻液分析模型的研究[J]. 核动力工程, 1999, 20(3): 223-226.
- [3] WALLIS G B. One-dimensional two-phase flow[M]. New York: McGraw Hill Company, 1969.
- [4] ALEKSEEV V P. Determination of flooding rates in regular packings[J]. *Heat Transfer Soviet Res Bd* 1972(4): 143-159.
- [5] SCHOENFELD P D, KROEGER D G. Flooding during reflux condensation of steam in inclined elliptical tube[R]. Lisbon: Proceedings of the International Conference, Heat Exchangers for Sustainable Development 1998.
- [6] CHEN WEN ZHONG. Fluten bei gegenstromkondensation in geneigten rohren[D]. Hamburg: Universitat Der Bundeswehr Hamburg, 1998.
- [7] 王补宣, 杜小泽. 细竖管内流动凝结的换热特性[J]. 上海交通大学学报, 1999 33(8): 970-972.
- [8] 杨鲁伟, 陈听宽, 徐进良. 界面切应力对垂直圆管内回流冷凝传热的影响[J]. 核动力工程, 1995, 16(2): 154-159.
- [9] 孔珑. 工程流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

law governing the influence of various parameters on the system performance. The above results can provide a theoretical basis for the optimized design and the selection of optimized operating conditions for a combined heat and electric power (cooling) system. **Key words:** finite-time thermodynamics, combined heat and electric power (cooling) system, parameter optimization, configuration optimization

300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系统的研究 = **The Study of an On-line Monitoring System for the Service Life of the Steam-drum of a 300 MW Power Plant** [刊, 汉] / GUAN De-qing, MO Jiang-chun, LI Li, et al (College of Energy and Power Engineering under the Changsha University of Science & Technology, Changsha, China, Post Code: 410076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 57 ~ 60

By using a three-dimensional finite element theory a finite element analysis was conducted of the stress field of a 300 MW power plant boiler-drum under the action of an internal pressure. The theoretical stress concentration factor thus obtained is greater than the recommended value of TRD 301 by 17.3%. The thermal stress of the boiler drum under a quasi-steady state was calculated by using the theory of thermal elasticity. On this basis a proposal was put forward to improve the TRD301-based method for calculating fatigue life and an on-line monitoring system for the service life of a 300 MW plant boiler-drum developed. By utilizing a computerized and intelligent data acquisition system and communications data conversion the management of temperature, pressure and service life was implemented for the whole process of the boiler drum operation. The use of the monitoring system on a 1021 t/h boiler at a power station has attested to the effectiveness of the system, which has attained the aim of on-line monitoring of boiler drum life and of properly guiding the boiler operation. **Key words:** boiler drum, fatigue life, on-line monitoring system

电站锅炉炉内三维温度场在线检测与分析 = **On-line Detection and Analysis of the Three-dimensional Temperature Field in a Utility Boiler** [刊, 汉] / LOU Chun, ZHOU Huai-chun (National Key Laboratory on Coal Combustion under Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), LU Chuan-xin, PEI Zhen-lin (Wuhan Steel and Electric Power Co. Ltd., Wuhan, China, Post Code: 430082) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 61 ~ 64

A set of visual monitoring system for three-dimensional temperature fields was installed on a 670 t/h utility boiler. The system comprises several image detectors of furnace flame, a video-frequency slicer and an industrial control device, etc. Through the radiation image treatment of furnace flame and by adopting a regularization method an on-line monitoring was implemented for the in-furnace three-dimensional temperature field (12 layers of cross-section divided along the boiler height direction). The results of the detection indicate that due to the supplementary burning of blast-furnace gas two high-temperature combustion zones have been formed along the furnace height direction. In-furnace average temperature correlates relatively well with boiler load and main steam pressure. Through the analysis of a boiler flame-extinction incident it can be shown that the monitoring system plays an important role in combustion diagnosis. **Key words:** utility boiler, flame radiation image, three-dimensional temperature field, on-line monitoring, combustion diagnosis

MPS 磨煤机工作特性试验研究 = **Experimental Investigation of the Operating Characteristics of a MPS Coal Pulverizer** [刊, 汉] / YUE Jun-feng, HUANG Lei, CHEN Hua-gui (Technical Center of Jiangsu Provincial Electric Power Co., Nanjing, China, Post Code: 210036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 65 ~ 68

By using a zero-pressure pendulum sampler and an isokinetic sampling method the samples of pulverized coal were taken at the outlet piping of a MPS coal pulverizer. Through an analysis of the fineness, moisture content and mass of the pul-