

# 增压锅炉汽包疲劳损伤在线监测系统的研究

李斌<sup>1</sup>, 史良宵<sup>1</sup>, 陈丰<sup>1</sup>, 李彦军<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院 河北 保定 071003;

2. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对增压锅炉汽包外壁局部受热的特点, 提出了基于导热正反问题耦合求解的汽包瞬态温度场计算方法, 并开发了疲劳破坏在线监测系统。根据汽包外壁是否受热将汽包截面划分为外壁受热和不受热两个区域, 分别采用导热正、反问题求解两区域温度场, 对于耦合边界区域, 将反问题解法求得的交界温度值赋值给正问题解法作为已知边界条件, 从而实现正反问题耦合, 得到整个汽包的温度场。然后运用有限元方法, 按照平面应变问题对上述汽包截面的瞬态应力进行求解。在此基础上, 开发了汽包疲劳破坏在线监测系统, 达到对锅炉汽包疲劳损伤在线监测并指导运行的目的。利用 ANSYS(材料应力分析)对某锅炉冷态启动过程汽包温度场与应力场进行了计算, 对本研究的方法进行了验证。结果表明, 温度场和应力场的结果吻合很好, 各误差均在 5% 以内, 能满足工程应用的需要; 对汽包寿命影响最大的是数值较大的应力循环。

**关键词:** 锅炉汽包; 耦合解法; 温度场; 应力分布; 在线监测; 疲劳损伤

中图分类号: TK223.1 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.014

## 引言

汽包是锅炉最大的厚壁承压部件, 在启、停过程及变负荷运行时交变应力变化频繁, 将引起汽包的疲劳受损<sup>[1-2]</sup>。因此研究汽包的疲劳破损的计算方法, 对汽包进行在线监测提高锅炉的安全性、经济性具有重要意义<sup>[3-7]</sup>。

相对于电站锅炉而言, 增压锅炉汽包由于底部直接接触炉内火焰, 并且两侧夹层区域外壁与维持锅炉正压的热空气进行对流换热, 因此温度场和应力场较为复杂。传统的关于汽包寿命在线监测的研究大多依据 ASME 标准, 通过计算或测量汽包的上下壁温差和内外壁温差, 分别计算其引起的热应力, 并通过乘以相应的应力集中系数后将应力进行叠加, 温度场计算的简化导致最终疲劳寿命计算结果

与实际情况存在较大误差。

应力场是汽包疲劳计算的基础, 温度场计算又是汽包应力分析的基础, 因而如何在提高汽包温度场和应力场计算精度的同时又能保证较高的计算效率, 是汽包疲劳在线监测研究的关键。根据增压锅炉汽包外壁受热的特点, 为提高其温度场的计算精度, 本研究提出了导热正、反问题耦合求解汽包瞬态温度场计算方法, 综合应用导热正问题解法<sup>[8]</sup>与导热反问题解法<sup>[9-12]</sup>各自的优点, 求得整个汽包的瞬态温度分布, 应用二维有限元方法求解汽包瞬态应力。

以某增压锅炉启动过程为例, 对导热正、反问题耦合解法及有限元法进行了说明。并通过 ANSYS 软件对计算结果进行验证。在此基础上, 采用雨流计数法统计启停过程中不同应力幅的循环次数, 并据此评估汽包的疲劳破坏程度, 最终开发出一套汽包疲劳损伤在线监测系统, 实时监测汽包截面温度与应力, 并在线计算汽包的疲劳损伤, 达到对锅炉汽包疲劳损伤在线监测的目的。

## 1 疲劳的计算方法

### 1.1 温度场计算

锅炉汽包是一个长圆筒形压力容器, 汽包轴线方向上内部工质温度及换热条件变化不大, 因此简化为二维问题处理。图 1 为某增压锅炉汽包简化模型及其截面区域划分示意图。与常规电站锅炉汽包区别在于增压锅炉汽包底部区域外壁所处环境相对复杂: 两个灰色区域外壁与为维持锅炉正压的热空气进行对流换热; 两对流区域之间汽包外壁直接与炉内火焰接触, 受到炉内火焰辐射换热; 其余外壁不受热。

收稿日期: 2014-08-03; 修订日期: 2014-10-23

作者简介: 李斌(1969-), 男, 河北保定人, 华北电力大学副教授, 博士。

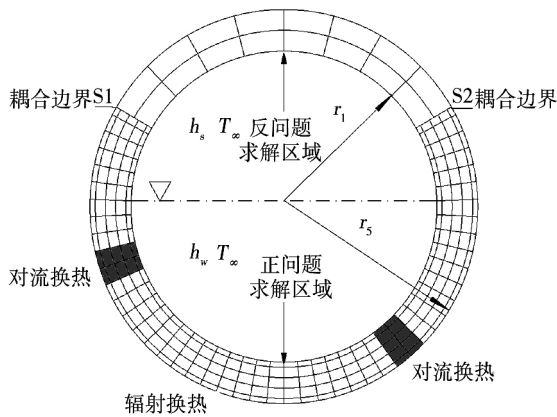


图 1 汽包简化模型及温度场计算网格示意图

Fig. 1 The schematic diagram of section grid and simplified model of boiler drum

图中  $r_1$ 、 $r_5$  分别为汽包内、外径 (m)  $h_s$ 、 $h_w$  分别为汽、水侧对流换热系数 ( $W/(m^2 \cdot K)$ )  $T_\infty$  为汽包内介质温度 ( $^\circ C$ )。

根据增压汽包外壁是否受热,将汽包截面划分不同的求解区域:反问题和正问题求解区域。反问题区域外壁近似绝热,在其边界上布置热电偶,通过测得的外壁温度值,采用导热反问题解法,求得该区域的温度场。反问题求解区域网格划分如图 2 所示,通过热电偶在外壁 11-17 处测得的外壁温度值,将能量守恒原理以及傅里叶导热定律应用于节点代表的控制容积,列写能量守恒方程式。

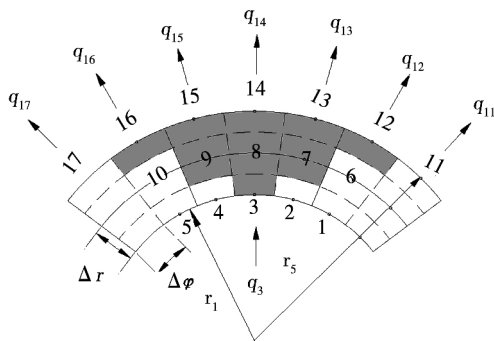


图 2 反问题解法网格示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the grid for inverse method

其中,节点 13-15 的能量守恒表达式为:

$$c\rho \frac{\Delta\varphi}{2}(r_5^2 - r_4^2) \frac{dT_{13}}{dt} = k \frac{T_{12} - T_{13}}{\Delta\varphi r_5} \frac{\Delta r}{2} +$$

$$k \frac{T_7 - T_{13}}{\Delta r} \times \Delta\varphi r_4 + k \frac{T_{14} - T_{13}}{\Delta\varphi r_5} \frac{\Delta r}{2} - q_{13} \Delta\varphi r_5 \quad (1)$$

$$c\rho \frac{\Delta\varphi}{2}(r_5^2 - r_4^2) \frac{dT_{14}}{dt} = k \frac{T_{13} - T_{14}}{\Delta\varphi r_5} \frac{\Delta r}{2} +$$

$$k \frac{T_8 - T_{14}}{\Delta r} \times \Delta\varphi r_4 + k \frac{T_{15} - T_{14}}{\Delta\varphi r_5} \frac{\Delta r}{2} - q_{14} \Delta\varphi r_5 \quad (2)$$

$$c\rho \frac{\Delta\varphi}{2}(r_5^2 - r_4^2) \frac{dT_{15}}{dt} = k \frac{T_{14} - T_{15}}{\Delta\varphi r_5} \frac{\Delta r}{2} +$$

$$k \frac{T_9 - T_{15}}{\Delta r} \times \Delta\varphi r_4 + k \frac{T_{16} - T_{15}}{\Delta\varphi r_5} \frac{\Delta r}{2} - q_{15} \Delta\varphi r_5 \quad (3)$$

式中:  $c$ —材料比热,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $\rho$ —材料密度,  $kg/m^3$ ;  $k$ —材料导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\Delta\varphi$ —容积角度变化量,  $rad$ ;  $\Delta r$ —容积径向变化量,  $m$ ;  $T_i$ — $i$  节点温度,  $^\circ C$ ;  $q_i$ — $i$  节点处的热流密度,  $W/m^2$ ;  $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ —沿半径递增方向各中间层半径,  $m$ 。

联立求解上述方程可得中间层节点 7-9 的温度。同理,对中间层节点 8 列写能量守恒表达式,最终解得内层节点 3 的温度:

$$T_3 = T_{14} + \left[ \frac{(r_4^2 - r_2^2)}{r_2} + (r_5^2 - r_4^2) \left( \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_2} \right) \right]$$

$$\frac{\Delta r}{2\alpha} \frac{dT_{14}}{dt} + \frac{(\Delta r)^2 (r_5^2 - r_4^2) (r_4^2 - r_2^2)}{4\alpha^2 r_2 r_4} \frac{d^2 T_{14}}{dt^2} -$$

$$\frac{(\Delta r)^3}{2\alpha r_2 r_4 (\Delta\varphi)^2} \times \left[ \frac{(r_5^2 - r_4^2)}{r_3} + \frac{(r_4^2 - r_2^2)}{2r_5} \right] \times \left( \frac{dT_{13}}{dt} - 2$$

$$\frac{dT_{14}}{dt} + \frac{dT_{15}}{dt} \right) - \frac{(\Delta r)^2}{(\Delta\varphi)^2} \left( \frac{1}{2r_4 r_5} + \frac{1}{2r_2 r_5} + \frac{1}{r_2 r_3} \right) (T_{13} -$$

$$2T_{14} + T_{15}) + \frac{r_5 \Delta r}{k} \left( \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_2} \right) q_{14} + \frac{(\Delta r)^2 (r_4^2 - r_2^2) r_5}{2\alpha r_2 r_4 k}$$

$$\frac{dq_{14}}{dt} + \frac{(\Delta r)^2}{r_2 r_3 (\Delta\varphi)^2} \times \left[ \frac{(\Delta r)^2}{r_4 r_5 (\Delta\varphi)^2} \left( \frac{1}{2} T_{12} - 2T_{13} + \right.$$

$$\left. 3T_{14} - 2T_{15} + \frac{1}{2} T_{16} \right) - \frac{r_5 \Delta r}{r_4 k} (q_{13} - 2q_{14} + q_{15}) \quad (4)$$

根据外层节点的温度,可逐次内推求得内层节点的温度。改变不同外层节点位置,相应地得到整个反问题求解区域内层节点温度,从而得到汽包横截面反问题解求区域的瞬态温度场。

图 1 所示的底部外壁受热区域为正问题求解区域。正问题解法采用 SIMPLE 算法,在已知结构参数、热物性参数、初始条件和边界条件的前提下,通过求解导热微分方程,得到该区域的温度场,为保证正问题求解边界条件的封闭,根据反问题求解结果,将耦合边界 ( $S_1$ 、 $S_2$ ) 处的温度作为第一类边界条件,赋值给正问题解法,因此实现导热正问题耦合

求解。

导热微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \quad (5)$$

边界条件:

耦合边界:

$$T_{\text{正}} = T_{\text{反}} \quad (6)$$

绝热边界:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_5} = 0 \quad (7)$$

内壁边界:

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1} &= h_w (T_{\infty} - T|_{r=r_1}) - k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \\ &= h_s (T_{\infty} - T|_{r=r_1}) \end{aligned} \quad (8)$$

夹层对流:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_5} = h_j (T|_{r=r_5} - T_f) \quad (9)$$

辐射传热:

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_5} = q \quad (10)$$

初始条件:

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (11)$$

式中:  $T_{\text{正}}$ 、 $T_{\text{反}}$ —导热正、反问题耦合边界处温度, °C;  $T_f$ —夹层热空气温度, °C;  $h_j$ —夹层对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $q$ —底部辐射区域热流密度,  $W/m^2$ ;  $T_0$ —初始温度, °C。

### 1.2 应力场计算

采用二维有限元方法对汽包应力进行分析, 根据汽包结构特点, 将其简化为平面应变问题。应力计算采用平面 8 节点等参单元, 将汽包截面划分为 288 个单元, 1 008 个节点, 如图 3 所示。

由于温度场和应力场采用了不同的网格, 采用线性插值的方法将计算得到的温度值赋给有限元应力计算的各个节点, 用于瞬态应力分析。

### 1.3 疲劳损伤的计算

锅炉汽包的疲劳破坏是累积的过程, 由于载荷大小及出现次数对疲劳强度都存在影响, 所以要统计各级载荷随时间历程出现次数(载荷谱)。先采用雨流计数法统计载荷谱, 然后再基于 Miner 线性累积损伤理论计算设备的疲劳程度。

雨流计数法又称“塔顶法”, 是一种以一个应力应变迟滞回线作为一个循环的计数方法<sup>[13]</sup>。雨流计数法的流程计数: 首先, 根据采样定理得到监测点

应力的时程记录; 再进行峰谷检测, 将应力时程曲线转化为相应地应力峰谷值时程曲线; 然后忽略幅值很小的循环, 将载荷时间历程重新进行调整或者对接使其均从最大值(最小值)开始或结束, 之后再雨流计数法进行计数, 统计出应力循环。根据雨流计数法的统计计数原理, 编制了通用的雨流计数法程序, 将应力时程分布整合为一张载荷谱, 记录载荷的幅值、均值与次数。

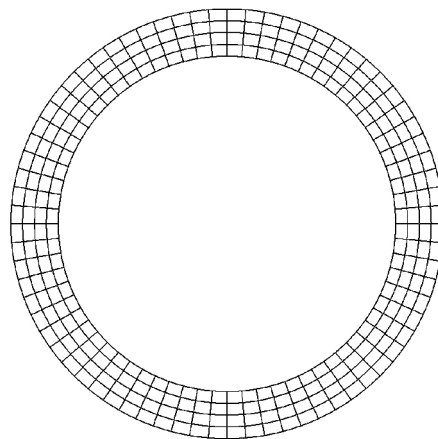


图 3 汽包截面应力分析网格示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the grid of stress analysis of drum section

Miner 线性累积损伤理论是工程上应用最广泛的一种疲劳破坏的计算方法。多级加载时, 总损伤等于各损伤比总和, 并且损伤比总和大于 1 时发生破坏。多级载荷作用下的损伤计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (12)$$

式中:  $n_i$ —设备在第  $i$  级载荷作用下的循环次数, 由雨流计数法得到;  $N_i$ —设备在第  $i$  级载荷作用下不产生破坏的最大循环次数, 由应力-寿命曲线( $S-N$  曲线)得到。

计算时采用拟合后的英国 BS5500 设计疲劳曲线<sup>[15]</sup>, 拟合公式为:

$$\lg N = 12.23088 - 3.579771 \lg \sigma_a \quad (13)$$

式中:  $\sigma_a$ —循环应力幅大小, MPa;  $N$ —该循环应力幅下允许发生的次数。

### 1.4 计算方法的验证

为了验证计算方法的正确性, 利用 ANSYS 软件对锅炉冷态启动过程汽包的温度场和应力场进行计算。验证时汽包计算参数如表 1 所示。

表 1 汽包计算参数

Tab.1 The calculated parameters of drum

参数	数值
汽包内径 $r_1/m$	0.65
汽包外径 $r_5/m$	0.74
汽侧对流换热系数 $h_s/W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	2 000
水侧对流换热系数 $h_w/W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	1 000
热空气温度 $T_f/^\circ C$	127
初始温度 $T_0/^\circ C$	70
底部辐射区域热流密度 $q/W \cdot m^2$	5 000
弹性模量 $E/MPa$	$2.1 \times 10^5$
线膨胀系数 $\alpha/K^{-1}$	$1.11 \times 10^{-5}$

启动过程汽包内水(水蒸气)压力及其对应饱和温度随时间的变化近似按线性处理,温升率为  $0.2^\circ C/s$ ,当达到 1 400 s 时候,压力升到 16.53 MPa 相应的饱和温度达到稳定值  $350^\circ C$ ,之后维持不变,如图 4 所示。

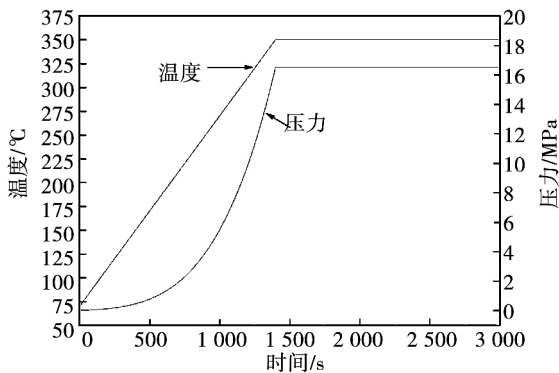


图 4 汽包压力及温度随时间变化曲线

Fig.4 The curve of pressure and temperature variation of the drum

验证方法:首先,应用 ANSYS 软件根据表 1 条件计算汽包启动过程的温度场和应力场;然后,将 ANSYS 软件求解得到的启动过程各时刻对应反问题求解区域的汽包外壁温度作为该区域的已知条件,正问题求解区域采用的初始条件、边界条件等与 ANSYS 计算相同,重新计算汽包启动过程的温度场和应力场。最后将两者计算结果进行比较分析。

## 2 计算结果分析

### 2.1 温度场分析

第 1 000 s 时汽包沿圆周方向的内外壁温度如

图 5 所示。从图中可以看出,ANSYS 计算结果与导热正反问题耦合解法程序计算结果吻合度较高,  $0^\circ - 90^\circ$  区间,启动过程中汽包内上部汽空间由于内壁面温度较饱和蒸汽温度低,蒸汽产生凝结换热,释放大量化潜热<sup>[16]</sup> 相对于下部水空间而言换热系数大,内外壁温度要偏高;汽水交界面附近温度逐渐由汽空间过渡到水空间;  $135^\circ - 145^\circ$  与  $245^\circ - 255^\circ$  两夹层区域由于此刻外壁温度高于热空气温度,二者进行对流换热,导致外壁温度有降低趋势,但是由于附近区域热流作用影响,下降并不明显;底端辐射区域( $145^\circ - 245^\circ$ ) 相对于汽包下部外壁绝热区域(如  $120^\circ$  附近),外壁由于受到热流作用,导致温度阶梯上升,内外壁温差有所降低。其它区域分析与上述类似。启动 1 400 s 时部分角度处程序与 ANSYS 解得的内外壁温度值对比如表 2 所示,可以看出两者的计算结果吻合度较高,最大误差为 0.946%,满足工程应用需要。

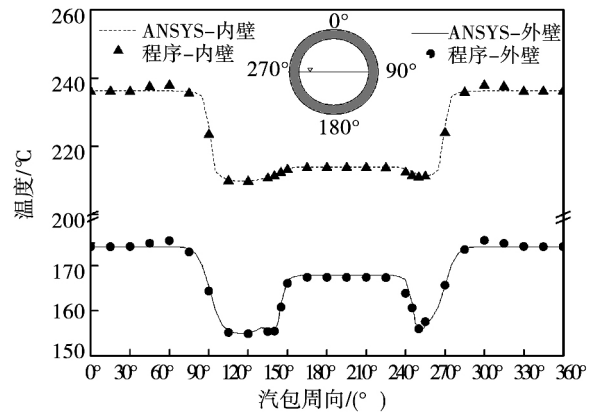


图 5 汽包截面圆周方向内外壁温度变化曲线

Fig.5 The curve of temperature variation along the circumferential direction at internal and outer of the drum

由于 ANSYS 方法直接加载边界条件进行计算,并没有按照程序计算方法分区域耦合求解,但通过上述对比分析可知:两种方法得到的温度场结果高度吻合,由此验证了反问题解法、正问题解法以及耦合边界的处理都是可行的。

### 2.2 应力场分析

根据求解得到的温度场,运用有限元方法对汽包截面的瞬态应力进行求解分析。

图 6 为外层节点 22 处热应力、机械应力和总应力时程变化关系。开始时刻由于内压较小,机械应

力几乎为零,热应力占主要作用;机械应力和热应力均为拉应力,方向相同,合成总应力时相互叠加。达到 1 400 s 时 3 种应力均达到最大值,此时总应力值比内壁处要大,之后由于热应力逐渐减小趋于零,总应力有所降低,最终趋于机械应力值并维持稳定。

表 2  $t = 1\ 400\ \text{s}$  时两种算法计算所得部分节点温度值对比

Tab. 2 Comparison of temperatures at partial nodes obtained by two methods at  $t = 1\ 400\ \text{s}$

角度 / (°)	内壁温度 / °C			外壁温度 / °C		
	程序	ANSYS	误差 / %	程序	ANSYS	误差 / %
30	313.7	313.9	0.051	247.1	247.0	0.031
60	315.4	313.9	0.483	249.1	247.0	0.878
90	299.0	301.8	0.946	233.6	235.1	0.635
150	286.0	285.7	0.048	230.4	231.7	0.570
210	287.1	287.5	0.131	234.1	234.8	0.306

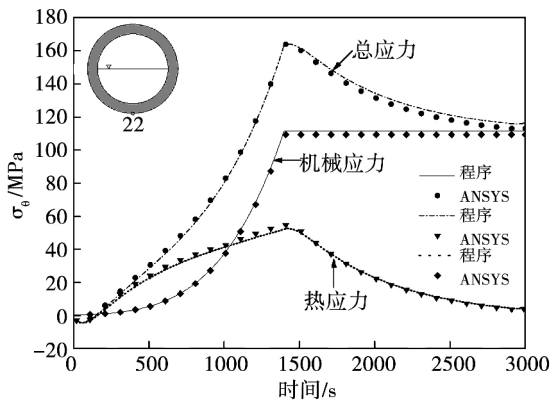


图 6 外壁节点 22 处 3 种应力随时间的变化曲线  
Fig. 6 The curve of three stresses changing with time at external surface node 22

程序与 ANSYS 所得的不同时刻外壁节点 22 处的热应力与总应力值如表 3 所示。由表可知二者吻合较好,由于机械应力与内压基本成正比关系,两种算法的误差基本为一定值 2.24% 表中不再罗列。

图 7 表示 1 000 s 时沿圆周方向外壁周向热应力分布。所有节点中空间位置 240° 处的节点相对误差最大,误差为 4.02%,但能满足工程需要。与常规电站锅炉汽包相比,由于增压锅炉汽包底端外壁受辐射热流作用,外壁温度值相对更高,温差比其他区域小,热应力也相应减小,导致最终会对总应力起到一定的削弱作用。

表 3 外壁节点 22 处应力值对比

Tab. 3 Comparison of stress values at external surface node 22

时间 / s	热应力 / MPa			总应力 / MPa		
	程序	ANSYS	误差 / %	程序	ANSYS	误差 / %
500	23.01	24.03	4.22	29.41	30.49	3.55
1 000	41.45	42.63	2.77	81.52	82.91	1.67
1 500	49.75	50.90	2.26	161.4	160.1	0.81
2 000	22.44	22.13	1.55	134.1	131.3	2.12
2 500	9.315	8.951	4.08	120.9	118.1	2.38

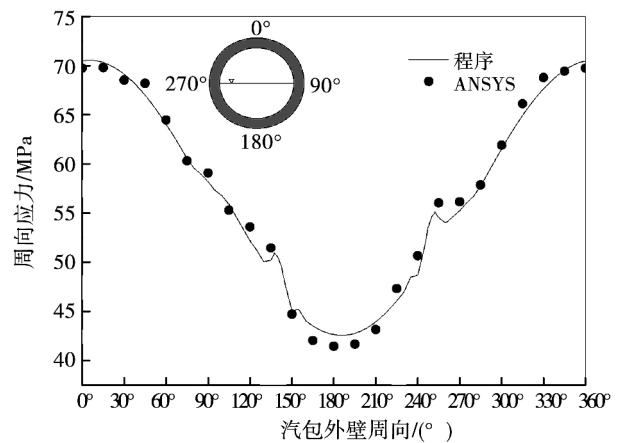


图 7 1 000 s 汽包截面圆周方向外壁热应力变化曲线

Fig. 7 The curve of stress variation along the circumferential direction at outer of the drum at 1 000 s

由图 6、图 7 与表 3 可知,无论是时程还是空间位置,程序计算结果与 ANSYS 计算结果吻合度很好。在锅炉运行过程中实时监测最高应力区域,防止应力过大影响汽包寿命。

### 3 疲劳损伤的在线监测系统的开发

#### 3.1 疲劳损伤在线监测系统

后台程序总体分为温度场、应力场、疲劳受损计算 3 个模块,通过编制相关求解程序,并完成各模块之间相互衔接,实现计算过程的程序化,形成完整的软件系统,实现总体计算功能。现场采集过来的外壁测点数据通过 OPC(用于过程控制的对象连接嵌入技术)协议端口传输到后台进行计算,后台程序运行结果保留在相应的 ORACLE 数据库中;前台采用相关的组态工具,制作相关前台显示功能界面,数据

显示采用 Borland C + + Builder 与数据库实现动态链接,将求解的整个汽包和危险点的温度、应力、损耗等结果实时显示出来,实现整个运行过程的实时在线监测。

在线监测系统主要作用为:

(1) 在线采集并存储测点的温度、压力、水位等数据;

(2) 在线计算并生成和显示测点的温度、应力以及时程曲线;

(3) 在线计算和分析被测点的温差、机械应力和热应力及总应力,并判断是否超限报警;

(4) 在线计算并分析被监测部件的蠕变-疲劳寿命累积损耗;

(5) 在线分析和评定被监测部件的损伤和剩余安全裕度,进而分析判断部件结构的完整性;

(6) 通过人机对话方便迅速地实现历史数据以及图形的查询和显示。

### 3.2 疲劳损伤计算举例

图 8 为一次冷态启动过程中汽包的综合应力时程图,在线监测系统每 10 s 计算一次应力值。

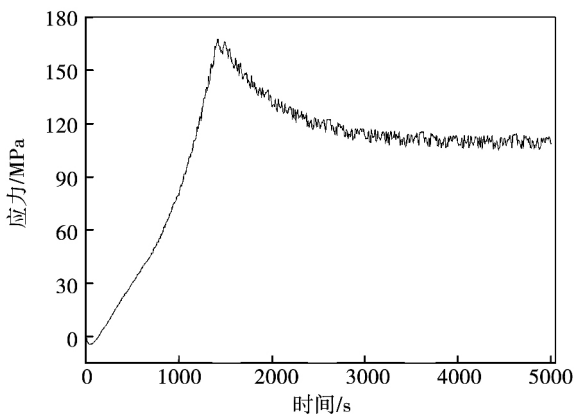


图 8 一次冷态启动汽包综合应力图

Fig. 8 The comprehensive stress of drum during a cold start-up process

表 4 疲劳损伤统计结果

Tab. 4 The results of fatigue loss

参 数	数 值				
应力幅/MPa	0-3	3-6	6-10	10-80	80-85
循环次数	112	25	0	0	1
最大循环次数(×10 <sup>6</sup> )	398 578	7 808	995	20.55	2.02
疲劳损伤(×10 <sup>-10</sup> )	2.8	34.8	0	0	49 474
疲劳累积损伤/%	0.000 495				

根据雨流计数法,对应力数值去除无效幅值、峰谷检测、首尾对接后,共统计出 138 个循环,其应力幅统计结果如表 4 所示。可以看出,大部分应力幅小于 10 MPa,对汽包的损伤影响不大,对损伤影响最大的应力幅为 86.01 MPa,按照 Miner 线性累积损伤理论,计算出本次冷态启动过程设备的疲劳累积损伤为 0.000 495%。

## 4 结 论

(1) 导热正反问题耦合解法综合运用导热正问题、导热反问题两种解法的优势,计算精度高,关键节点温度值的最大相对误差为 0.946%,表明该解法在复杂边界条件下具有很好的适应性。

(2) 通过 ANSYS 数值模拟,验证了二维有限元方法计算的应力结果精度较高,机械应力、热应力以及总应力的计算误差均在 5% 以内,满足工程应用的要求。

(3) 一次冷态启动过程表明,对汽包疲劳破坏影响最大的是数值较大的应力循环。疲劳损伤在线监测系统能实时计算并显示汽包温度场、应力场并能分析汽包损伤,达到实时监测并指导运行的目的。

### 参考文献:

[1] 郑心伟,孙 瑜,王晓军. 增压锅炉汽包低周疲劳寿命计算方法研究[J]. 热能动力工程 2010 25(2):184-189.  
ZHENG Xin-wei, SUN Yu, WANG Xiao-jun. Study of the methods for calculating the low-cycle fatigue Life of a supercharged boiler drum[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010 25(2): 184-189.

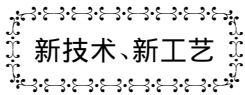
[2] 李立人,陈 玮,盛建国,等. 锅炉受压元件的高温蠕变-疲劳寿命设计计算方法[J]. 动力工程 2009 29(5):409-416.  
LI Li-ren, CHEN Wei, SHENG Jian-guo, et al. Creep-fatigue life design and calculation method for boiler pressure elements under elevated temperature[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(5): 409-416.

[3] 史进渊,施 俊,杨 宇,等. 4 台 300 MW 火电机组寿命管理系统的设计与应用[J]. 动力工程学报 2010(6):456-461.  
SHI Jin-yuan, SHI Jun, YANG Yu, et al. Design and application of a life management system for 4x300 MW coal-fired power generation units[J]. Power Engineering 2010(6): 456-461.

[4] 田 广,赵海飞. 增压锅炉锅筒内压应力三维有限元分析[J]. 锅炉制造 2013(1):61-64.  
TIAN Guan, ZHAO Hai-fei. Mechanical stress analysis of supercharged boiler drum by 3-d finite element method[J]. Boiler Manufacturing 2013(1): 61-64.

- [5] Gay R R ,Palmer C A ,Erbes M R. Power plant performance monitoring[M] . R-Squared 2004.
- [6] 刘 彤. 电站锅炉承压部件寿命分析及在线监测[D]. 北京: 华北电力大学 2007.  
LIU Tong. Power plant boiler pressure parts service life analysis and online monitoring[D]. Bei Jing: North China electric power university 2007.
- [7] 管德清,莫江春,李 立,等. 300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系统的研究[J]. 热能动力工程 2005 20(1): 57-60.  
GUAN De-qing ,MO Jiang-chun ,Li Li ,et al. The study of an on-line monitoring system for the service life of the steam-drum of a 300 MW power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2005 20( 1) : 57 - 60.
- [8] 陶文铨. 数值传热学(第二版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社 2001.  
TAO Wen-quan. Numerical heat transfer ( second edition) [M]. Xi'an: Xi'an jiaotong university press 2001.
- [9] CEBULA A ,TALER J. Determination of transient temperature and heat flux on the surface of a reactor control rod based on temperature measurements at the interior points[J]. Applied Thermal Engineering 2014 63( 1) : 158 - 169.
- [10] TALER J ,WGLOWSKI B ,SOBOTA T ,et al. Inverse space marching method for determining temperature and stress distributions in pressure components [J]. Developments in Heat Transfer ,In-Tech ,Rijeka/Shanghai/New York 2011: 273 - 292.
- [11] HU W S ,LI B ,CAO Z D ,et al. An inverse method for online stress monitoring and fatigue life analysis of boiler drums [J]. Journal of Chongqing University 2009 8( 2) : 89 - 96.
- [12] 李亚超,姜智春,李 斌,等. 锅炉汽包温度场在线监测新技术[J]. 锅炉制造 2007 ( 3) : 5 - 8.  
LI Ya-chao ,JIANG Zhi-wei ,Li Bin ,et al. A new technology of on-line monitoring for boiler drum ' s temperature [J]. Boiler Manufacturing 2007 ( 3) : 5 - 8.
- [13] 田 军,李 强. 改进的雨流法实时计数模型[J]. 北京交通大学学报 2009 33(1) : 28 - 31.  
TIAN Jun ,LI Qiang. Improved model of rain-flow real-time counting method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University ,2009 ,33 ( 1) : 28 - 31.
- [14] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社 2006.  
LIU Wei-xin. Mechanical reliability design [M]. Bei Jing: Tsinghua university press 2006.
- [15] BSI P D. Specification for unfired fusion welded pressure vessels [J]. British Standards Institution London 2000.
- [16] 段 鹏,周新雅,杨 菁,等. 锅炉汽包复杂应力状态及低周疲劳寿命研究[J]. 热力发电 2010 39( 8) : 28 - 32.  
DUAN Peng ,ZHOU Xin-ya ,YANG Jing ,et al. Study on complex stress situation and low-cycle fatigue life for boiler drums [J]. Thermal Power Generation 2010 39( 8) : 28 - 32.

( 丛 敏 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.015

## 埃及内客批准大额 Siemens 协议

据《Gas Turbine World》2015 年 5 - 6 月刊报道 埃及内客已经批准了在埃及及电力股份公司和 Siemens 公司之间的侯同 ,建设、供应和安装具有 14 400 MW 联合发电容量的 3 个联合循环电站。

它是在 6 月份开始 Siemens 签订的为使北非国家电力生产增加 50% 而供应燃天然气电站和风力发电厂协议的一部分。

在埃及总统阿卜杜勒·法塔赫·塞西总统正式访问德国期间签订的该协议是 Siemens 得到的单笔最大的订单。该订单包括用于 3 个新的燃天然气电站的 24 台 Siemens H 级燃气轮机。

到现在为止 ,Siemens 已经销售了 48 台 H 级燃气轮机。具有高度的启动可靠性和利用率 ,这些燃杨中的 16 台早已投入了成功的工业运行。

Siemens 最近也宣告 ,与当地合伙人埃尔塞韦迪 PSP( 电力系统设计) 合作 ,它已经完成了向阿塔卡电站供应 4 台 E 级燃气轮机。

( 吉桂明 摘译)

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



life loss of the drum was analyzed. It has been found that the temperature and stress field in the steam drum calculated by using both methods are in very good agreement and various errors are within a range of 5% ,thus meeting the requirements for engineering applications. Moreover ,what mostly influences the service life of the steam drum is the stress cycle with a relatively large value. **Key words:** steam drum in a boiler ,coupling method for seeking solutions ,temperature field ,rain flow counting method

入口压力与浆液浓度对石膏旋流器分离特性影响的研究 = **Study of the Influence of the Inlet Pressure and Slurry Concentration on the Separation Characteristics of a Gypsum Cyclone** [刊 ,汉] SHEN Guo-qing ,LI Zhi-qiang ,AN Lian-suo ,FAN Peng ( National Research Center for Thermal Power Generation Engineering Technology ,North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30( 6) . -892 -896

With a gypsum cyclone serving as a core equipment item in a limestone wet-method flue gas desulfurization system in a thermal power plant ,the separation characteristics of the gypsum cyclone have gained increasingly high attention. By using a test method ,the authors have conducted a study of an existing gypsum dewatering system with the influence of the inlet pressure and slurry concentration on the separation performance of the gypsum cyclone being obtained. It has been found that in a certain range ,with an increase of the inlet pressure step by step ,all the production capacity ,separation and classification efficiency of the cyclone will gradually increase. With an increase of the slurry concentration ,the separation efficiency and the underflow mass concentration will also increase. When the inlet pressure is 0.030 MPa and the gypsum slurry concentration is 19.7% ,the volumetric flow rate of the gypsum cyclone is relatively high and both separation and classification efficiency of the gypsum cyclone are highest. **Key words:** inlet pressure ,slurry concentration ,production capacity ,separation efficiency ,classification efficiency ,gypsum cyclone

基于平均影响值算法和概率神经网络的制粉系统故障诊断 = **Fault Diagnosis of a Milling System Based on the Mean Impact Value Algorithm and a Probability Neural Network** [刊 ,汉] FAN Shuai ,XIAO Jun ,SUN Hui ( College of Information and Control Engineering ,Liaoning Petroleum and Chemical Engineering University , Fushun ,China ,Post Code: 113001) ,ZHANG Peng-zhan ( Information College ,East China University ,Shanghai ,