

# 联合循环余热锅炉汽包强度可靠性设计计算

郑心伟<sup>1</sup>, 苗安立<sup>2</sup>, 杜晓建<sup>3</sup>, 王光艳<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 无锡分部 江苏 无锡 214151; 3. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078; 4. 哈尔滨电力职业技术学院 动力系 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 锅炉强度可靠性对提高锅炉质量和市场竞争力具有重要意义,所以在介绍实际工程中汽包强度可靠性计算的同时,提出了一些具有普遍适用的确定重要随机变量设计参数的计算方法,以及封头直段和汽包环向焊缝强度可靠度计算方法;采用分析和论证的方法,提出了整台锅炉及其各受压件强度的目标可靠度,以及增加受压元件名义厚度与设计厚度之差有利于提高和保证强度可靠度;给出的计算方法适用于各种用途锅炉汽包强度可靠性计算。研究结果是对既有研究的补充、完善和发展,同时对锅炉受压元件强度计算标准中“名义厚度不小于设计厚度”的数值关系提出了强度可靠性要求。

**关键词:** 联合循环;余热锅炉;汽包强度;可靠性;设计计算;计算分析

中图分类号:TK222 文献标识码:A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.12.016

## 引言

锅炉强度可靠性设计计算是以我国锅炉受压元件强度计算标准及其相关标准<sup>[1]</sup>、规范为基础和依据,将概率论和数理统计与可靠性理论相结合,并考虑强度计算标准中相关设计参数的随机性,使用概率分布干涉模型计算锅炉强度可靠度的一种方法。该方法是对我国锅炉强度计算标准的补充、完善和发展,目前还处于研究阶段,是实际工程设计过程中不可缺少的部分<sup>[2~3]</sup>。联合循环余热锅炉是重要的节能产品之一,一方面产品量大而批量小,另一方面汽包是余热锅炉汽水循环的中枢,因此汽包强度可靠性问题就显得尤为突出和重要。

史进渊等人在总结既有研究成果的基础上,提出了锅炉强度可靠性设计方法<sup>[4]</sup>,但有关汽包筒体

和封头的一些重要随机变量设计参数在取法或算法上,封头直段和汽包环向焊缝强度可靠度计算方法,以及整台锅炉及其受压件强度目标可靠度确定方面还有待于进一步研讨,且鉴于目前缺乏工程应用的详细计算,所以本文结合实际工程开展上述工作。

## 1 计算原则和取值方法

以文献[1]及其相关标准、规范为基础和依据;随机变量和可靠度计算按正态或近似正态分布计算的前提条件是各个随机变量的变异系数均应小于0.3<sup>[4]</sup>,所以在计算过程中,应对此进行检验;随机变量均值的取值与文献[1]确定的数值完全相同,尺寸偏差按相关制造标准,其它偏差不采用文献[4]的估取法,按本研究进行。

## 2 汽包强度可靠性设计计算算例

### 2.1 汽包筒体强度可靠度计算

#### 2.1.1 计算压力变异系数计算

计算压力均值由强度计算结果确定为 $\bar{p} = 4.85$  MPa;计算压力最大值由强度校核计算结果确定为 $p_{\max, \lambda} = 5.91$  MPa(文献[4]未给出该值的确定方法)。这样,运用“3倍标准差原则”处理,计算压力变异系数为:

$$C_{p, \lambda} = \frac{p_{\max, \lambda} - \bar{p}}{3\bar{p}} = \frac{5.91 - 4.85}{3 \times 4.85} = 0.07285 < 0.3$$

#### 2.1.2 筒体内径变异系数计算

筒体内径均值由强度计算中结构设计确定为

收稿日期:2015-08-05; 修订日期:2016-01-19

作者简介:郑心伟(1966-),男,山东蓬莱人,哈尔滨工程大学副教授,工学博士。

通讯作者:王光艳(1970-),女,山东胶州人,哈尔滨电力职业技术学院副教授。

$\bar{D}_n = D_n = 1\ 200\ \text{mm}$  ;  $(D_{n,max} - D_{n,min})_{max} = 1\% \times D_n$  [5] , 则最大内径偏差  $\Delta D_{n,max} = 6\ \text{mm}$  。这样 , 运用“3 倍标准差原则”处理 , 筒体内径变异系数为 :

$$C_{D_n} = \frac{\Delta D_{n,max}}{3\bar{D}_n} = \frac{6}{3 \times 1\ 200} = 0.001\ 67 < 0.3$$

### 2.1.3 最小减弱系数变异系数计算

最小减弱系数均值由强度计算结果确定为  $\bar{\varphi}_{min,j} = 0.822\ 2$  ; 允许最小减弱系数由强度校核计算确定为  $(\varphi_{min,j})_{min} = 0.675\ 2$  (文献[4]未给出该值的确定方法) 。这样 , 运用“3 倍标准差原则”处理 , 最小减弱系数变异系数为 :

$$C_{\varphi_{min,j}} = \frac{\bar{\varphi}_{min,j} - (\varphi_{min,j})_{min}}{3\bar{\varphi}_{min,j}} = \frac{0.822\ 2 - 0.675\ 2}{3 \times 0.822\ 2} = 0.059\ 60 < 0.3$$

### 2.1.4 许用应力变异系数计算

筒体在计算壁温  $263.3\ ^\circ\text{C}$  和材料为  $20\ \text{g}$  时的基本许用应力由  $[\sigma]_j = \min(R_m/2.7\ R_{eL}^{263.3}/1.5)$  确定 [6] ; 室温下  $20\ \text{g}$  抗拉强度  $R_m = 400\ \text{MPa}$  [7] , 则  $R_m/2.7 = 148\ \text{MPa}$  , 但由强度计算确定的计算壁温下  $20\ \text{g}$  的基本许用应力  $[\sigma]_j = 122\ \text{MPa}$  。由上述计算且经数值比较知  $[\sigma]_j = R_{eL}^{263.3}/1.5$  , 即计算壁温下  $20\ \text{g}$  基本许用应力由同温度下屈服强度决定 ,

$$S_{\delta_{min,j}} = \left\{ \frac{(2\bar{p}\bar{D}_n\bar{\varphi}_{min,j}[\bar{\sigma}])^2}{(2\bar{\varphi}_{min,j}[\bar{\sigma}] - \bar{p})^4} [C_{p,j}^2 + C_{D_n}^2 \left(1 - \frac{\bar{p}}{2\bar{\varphi}_{min,j}[\bar{\sigma}]}\right)^2 + C_{\varphi_{min,j}}^2 + C_{[\sigma]}^2] + (\bar{C}_1 C_{C_1})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left\{ \frac{(2 \times 4.85 \times 1\ 200 \times 0.822\ 2 \times 122)^2}{(2 \times 0.822\ 2 \times 122 - 4.85)^4} \times [0.072\ 85^2 + 0.001\ 67^2 \times \left(1 - \frac{4.85}{2 \times 0.822\ 2 \times 122}\right)^2 + 0.059\ 60^2 + 0.07^2 + (3.6 \times 0.060\ 19)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = 3.580\ 54\ \text{mm}$$

### 2.1.7 筒体名义厚度标准差计算

名义厚度均值由强度计算结构设计确定为  $\bar{\delta}_1 = 40\ \text{mm}$  , 则厚度偏差  $\Delta C_2 = \pm 1.00\ \text{mm}$  [9] 。这样 , 运用“3 倍标准差原则”处理 , 名义厚度标准差为 :

$$S_{\delta,j} = \frac{\Delta C_2}{3} = \frac{1.00}{3} = 0.333\ 33\ \text{mm}$$

### 2.1.8 筒体强度可靠度计算

设计厚度均值由强度计算确定为  $\bar{\delta}_{min,j} = 33.33\ \text{mm}$  , 并利用前述结果 , 得系数 [4] :

$$\beta = \frac{\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_{min,j}}{\sqrt{S_{\delta,j}^2 + S_{\delta_{min,j}}^2}}$$

且基本许用应力均值  $[\bar{\sigma}]_j = R_{eL}^{263.3}/1.5$  。这样 , 采用 Taylor 级数展开法 , 基本许用应力标准差为 :

$$S_{[\sigma]_j} = \left( \frac{\partial [\sigma]_j}{\partial R_{eL}^{263.3}} \right) \Big|_{R_{eL}^{263.3} = \bar{R}_{eL}^{263.3}} S_{R_{eL}^{263.3}} = \frac{S_{eL}^{263.3}}{1.5}$$

基本许用应力变异系数为 :

$$C_{[\sigma]_j} = \frac{S_{[\sigma]_j}}{[\bar{\sigma}]_j} = \frac{S_{eL}^{263.3}}{R_{eL}^{263.3}} = C_{R_{eL}^{263.3}}$$

金属材料机械性能变异系数可查文献[8]等专著 , 给出的金属材料屈服强度变异系数为  $0.07$  , 并由上式可知  $C_{[\sigma]_j} = 0.07$  , 所以许用应力变异系数  $C_{[\sigma]} = 0.07 < 0.3$  。

文献[4]未给出上述计算方法。

### 2.1.5 附加厚度变异系数计算

附加厚度均值由强度计算确定为  $\bar{C}_1 = 3.6\ \text{mm}$  , 则厚度偏差  $\Delta C_1 = \pm 0.65\ \text{mm}$  [9] 。这样 , 运用“3 倍标准差原则”处理 , 附加厚度变异系数为 :

$$C_{C_1} = \frac{\Delta C_1}{3\bar{C}_1} = \frac{0.65}{3 \times 3.6} = 0.060\ 19 < 0.3$$

### 2.1.6 筒体设计厚度标准差计算

计算壁温下  $20\ \text{g}$  许用应力均值由强度计算确定为  $[\bar{\sigma}] = 122\ \text{MPa}$  , 并利用前述结果 , 得设计厚度标准差 [4] 为 :

$$= \frac{40 - 33.33}{\sqrt{0.333\ 33^2 + 3.580\ 54^2}} = 1.85$$

查文献[4]得筒体的强度可靠度  $R_{S,j} = 0.967\ 84$  。

## 2.2 含人孔封头强度可靠度计算

### 2.2.1 计算压力变异系数计算

计算压力均值由强度计算确定为  $\bar{p} = 4.85\ \text{MPa}$  , 计算压力最大值由强度校核计算确定为  $p_{max,2} = 5.10\ \text{MPa}$  (文献[4]未给出该值确定方法) 。这样 , 运用“3 倍标准差原则”处理 , 计算压力变异系

数为:

$$C_{p,2} = \frac{p_{\max,2} - \bar{p}}{3\bar{p}} = \frac{5.10 - 4.85}{3 \times 4.85} \\ = 0.01718 < 0.3$$

### 2.2.2 封头内径变异系数计算

因为封头和筒体内径相同,按文献[5]查出的内径偏差相同,因此变异系数与筒体的相同,即  $C_{D_n} = 0.00167 < 0.3$ 。

### 2.2.3 封头形状系数变异系数计算

封头内高由强度计算结构设计确定为  $\bar{h}_n = 300$  mm,由强度计算结构设计可知封头内径与筒体相等,即  $\bar{D}_n = 1200$  mm。

强度计算标准中形状系数  $Y = 1/6 \times [2 + (D_n/2h_n)^2]$ ,则  $h_n = 1/4D_n$ 。采用 Taylor 级数展开法,得上式标准差  $S_{h_n} = 1/4S_{D_n}$ ,即  $C_{h_n}\bar{h}_n = 1/4C_{D_n}\bar{D}_n$ ,则内高变异系数  $C_{h_n} = C_{D_n}\bar{D}_n/4\bar{h}_n$ 。因此,

$$C_{h_n} = \frac{0.00167 \times 1200}{4 \times 300} = 0.00167 < 0.3$$

强度计算标准中封头形状系数可改写成  $Y = 1/3 + 1/24 (D_n/h_n)^2$ ,对此式采用 Taylor 级数展开法,得形状系数标准差为:

$$S_Y = \frac{1}{12} \left[ \left( \frac{\bar{D}_n}{\bar{h}_n} \right)^4 \left( \frac{S_{D_n}}{\bar{D}_n} \right)^2 + \left( \frac{\bar{D}_n}{\bar{h}_n} \right)^4 \left( \frac{S_{h_n}}{\bar{h}_n} \right)^2 \right]^{1/2} \\ = \frac{1}{12} \left( \frac{\bar{D}_n}{\bar{h}_n} \right)^2 (C_{D_n}^2 + C_{h_n}^2)^{1/2}$$

因为变异系数  $C_Y = \frac{S_Y}{\bar{Y}}$ ,所以形状系数变异系数为:

$$C_Y = \frac{1}{12\bar{Y}} \left( \frac{\bar{D}_n}{\bar{h}_n} \right)^2 [C_{D_n}^2 + C_{h_n}^2]^{1/2}$$

形状系数均值由强度计算确定为  $\bar{Y} = Y =$

1.0 则

$$C_Y = \frac{1}{12 \times 1} \times \left( \frac{1200}{300} \right)^2 \times (0.00167^2 + \\ 0.00167^2)^{1/2} = 0.00315 < 0.3$$

文献[4]未给出封头内高和形状系数变异系数计算方法。

### 2.2.4 封头减弱系数变异系数计算

人孔长轴偏差  $\Delta d = {}_{-2}^{+4}$  mm<sup>[10]</sup>,人孔长轴由强度

计算结构设计确定为  $d = 444$  mm,则  $d_{\max} = d + \Delta d = 444 + 4 = 448$  mm,  $d_{\min} = d - \Delta d = 444 - 2 = 442$  mm。因此,运用“3倍标准差原则”处理,人孔长轴变异系数为:

$$C_d = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{3(d_{\max} + d_{\min})} = \frac{448 - 442}{3 \times (448 + 442)} \\ = 0.00225 < 0.3$$

强度计算标准中减弱系数  $\varphi = 1 - d/D_n$ ,对其采用 Taylor 级数展开法,得封头减弱系数标准差为:

$$S_\varphi = \left[ \left( \frac{d}{D_n} \right)^2 \left( \frac{S_{D_n}}{D_n} \right)^2 + \left( \frac{d}{D_n} \right)^2 \left( \frac{S_d}{d} \right)^2 \right]^{1/2} \\ = \frac{d}{D_n} (C_{D_n}^2 + C_d^2)^{1/2}$$

因为变异系数  $C_\varphi = S_\varphi/\bar{\varphi}$ ,所以封头减弱系数变异系数计算公式为:

$$C_\varphi = \frac{\bar{d}}{\bar{\varphi} D_n} (C_{D_n}^2 + C_d^2)^{1/2}$$

因为人孔长轴均值  $\bar{d} = 444$  mm,封头减弱系数均值由强度计算确定为  $\bar{\varphi} = 0.63$ ,并利用前述结果,封头减弱系数变异系数数值为:

$$C_\varphi = \frac{444}{0.63 \times 1200} \times (0.00167^2 + \\ 0.00225^2)^{1/2} = 0.00165 < 0.3$$

文献[4]未给出含人孔封头减弱系数的变异系数计算方法。

### 2.2.5 封头许用应力变异系数

封头与筒体的材料和计算壁温相同,所以许用应力变异系数与筒体相同,即  $C_{[\sigma]} = 0.07 < 0.3$ 。

### 2.2.6 附加厚度变异系数计算

附加厚度均值由强度计算确定为  $\bar{C}_3 = 5.43$  mm,则厚度偏差  $\Delta C_3 = \pm 0.75$  mm<sup>[9]</sup>。因此,运用“3倍标准差”原则,附加厚度变异系数为:

$$C_{C_3} = \frac{\Delta C_3}{3\bar{C}_3} = \frac{0.75}{3 \times 5.43} = 0.04604 < 0.3$$

### 2.2.7 封头设计厚度标准差计算

计算壁温下 20 g 的许用应力均值由强度计算确定为  $[\sigma] = 122$  MPa,并利用前述结果,得设计厚度标准差<sup>[4]</sup>为:

$$S_{\delta_{\min 2}} = \left\{ \frac{(2\bar{p} \bar{D}_n \bar{\varphi} [\bar{\sigma}] \bar{Y})^2}{(2\bar{\varphi} [\bar{\sigma}] - \bar{p})^4} [C_{p 2}^2 + (C_{D_n}^2 + C_Y^2) \left(1 - \frac{\bar{p}}{2\bar{\varphi} [\bar{\sigma}]}\right)^2 + C_{\varphi}^2 + C_{[\sigma]}^2] + (\bar{C}_3 C_{C_3})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left\{ \frac{(2 \times 4.85 \times 1200 \times 0.63 \times 122 \times 1)^2}{(2 \times 0.63 \times 122 - 4.85)^4} \times \left[ 0.017 18^2 + (0.001 67^2 + 0.003 15^2) \times \left(1 - \frac{4.85}{2 \times 0.63 \times 122}\right)^2 \right. \right.$$

$$\left. \left. + 0.001 65^2 + 0.07^2 \right] + (5.43 \times 0.046 04)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = 2.924 44 \text{ mm}$$

### 2.2.8 封头名义厚度标准差计算

名义厚度均值由强度计算结构设计确定为  $\bar{\delta}_2 = 48 \text{ mm}$  ,则厚度偏差  $\Delta C_2 = \pm 1.10 \text{ mm}$  [9]。这样,运用“3 倍标准差原则”处理,名义厚度标准差为:

$$S_{\delta_2} = \frac{\Delta C_2}{3} = \frac{1.10}{3} = 0.366 67 \text{ mm}$$

### 2.2.9 封头强度可靠度计算

设计厚度均值由强度计算确定为  $\bar{\delta}_{\min 2} = 44.51 \text{ mm}$  ,并利用前述结果,得系数 [4]

$$\beta = \frac{\bar{\delta}_2 - \bar{\delta}_{\min 2}}{\sqrt{S_{\delta_2}^2 + S_{\delta_{\min 2}}^2}} = \frac{48 - 44.51}{\sqrt{0.366 67^2 + 2.924 44^2}}$$

$$S_{\delta_{\min 3}} = \left\{ \frac{(2\bar{p} \bar{D}_n [\bar{\sigma}])^2}{(2[\bar{\sigma}] - [\bar{p}])^4} [C_{p 2}^2 + C_{D_n}^2 \left(1 - \frac{\bar{p}}{2[\bar{\sigma}]}\right)^2 + C_{[\sigma]}^2] + (\bar{C}_1 C_{C_1})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left\{ \frac{(2 \times 4.85 \times 1 200 \times 122)^2}{(2 \times 122 - 4.85)^4} \times \left[ 0.017 18^2 + 0.001 67^2 \times \left(1 - \frac{4.85}{2 \times 122}\right)^2 \right. \right.$$

$$\left. \left. + 0.07^2 \right] + (3.6 \times 0.060 19)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = 1.803 19 \text{ mm}$$

### 2.3.2 封头直段强度可靠度计算

名义厚度标准差与封头相等,名义厚度均值由强度计算确定为  $\bar{\delta}_2 = 48 \text{ mm}$  ,设计厚度均值由强度计算确定为  $\bar{\delta}_{\min 3} = 27.94 \text{ mm}$  ,并利用前述结果,得系数 [4]

$$\beta = \frac{\bar{\delta}_2 - \bar{\delta}_{\min 3}}{\sqrt{S_{\delta_2}^2 + S_{\delta_{\min 3}}^2}} = \frac{48 - 27.94}{\sqrt{0.366 67^2 + 1.803 19^2}} = 10.9$$

查文献 [4] 得强度可靠度  $R_{S_3} = 1.0$ 。

文献 [4] 未给出该计算方法。

### 2.4 汽包环向焊缝强度可靠度计算

#### 2.4.1 环向焊缝许用应力均值及标准差计算

焊缝许用应力以  $[\sigma]_h$  表示,焊缝系数以  $\varphi_h$  表示,汽包母材许用应力以  $[\sigma]$  表示,根据焊缝系数定义有  $[\sigma]_h = \varphi_h [\sigma]$  ,则焊缝许用应力均值为

$$= 1.18$$

查文献 [4] 得强度可靠度  $R_{S_2} = 0.881 0$ 。

### 2.3 封头直段强度可靠性计算

#### 2.3.1 封头直段设计厚度标准差计算

计算压力、许用应力、内径的变异系数及其均值与封头相同;附加厚度由强度计算知与筒体相等,所以其变异系数也与筒体的相等。

由强度计算结构设计知封头及其直段无拼接,采用 Taylor 级数展开法,得封头直段设计厚度标准差为:

$[\sigma]_h = \varphi_h [\sigma]$  ,焊缝许用应力标准差为  $S_{[\sigma]_h} = \varphi_h C_{[\sigma]} [\sigma]$ 。

本算例的焊缝系数由强度计算确定为  $\varphi_h = 1.0$  ,并利用前述结果,  $[\sigma]_h = 1.0 \times 122 = 122 \text{ MPa}$  ,  $S_{[\sigma]_h} = 1.0 \times 0.07 \times 122 = 8.54 \text{ MPa}$ 。

#### 2.4.2 筒体有效厚度变异系数计算

筒体有效厚度均值由强度计算确定为  $\bar{s}_y = s_y = 36.4 \text{ mm}$  ,则厚度偏差  $\Delta C_y = \pm 1.00 \text{ mm}$  [9]。因此,运用“3 倍标准差”原则,有效厚度变异系数为:

$$C_{s_y} = \frac{\Delta C_y}{3\bar{s}_y} = \frac{1.00}{3 \times 36.4} = 0.009 16 < 0.3$$

#### 2.4.3 环向焊缝最小许用应力计算

环向焊缝承担轴向应力,所以焊缝最小许用应力为:

$$[\sigma]_{h \min} = \frac{p(D_n + s_y)}{4s_y}$$

$$= \frac{4.85 \times (1\ 200 + 36.4)}{4 \times 36.4}$$

$$= 41.19 \text{ MPa}$$

#### 2.4.4 环向焊缝最小许用应力标准差计算

采用 Taylor 级数展开法, 得环向焊缝最小许用应力标准差为:

$$S_{[\sigma]_{h \min}} = \frac{\bar{p} \bar{D}_n}{4 \bar{s}_y} \left[ \left( 1 + \frac{\bar{s}_y}{\bar{D}_n} \right)^2 C_{p,1}^2 + C_{D_n}^2 + C_{s_y}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{4.85 \times 1\ 200}{4 \times 36.4} \left[ \left( 1 + \frac{36.4}{1\ 200} \right)^2 \times \right. \\ \left. 0.072\ 85^2 + 0.001\ 67^2 + 0.009\ 16^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 3.023\ 33 \text{ MPa}$$

环向焊缝最小许用应力变异系数

$$C_{[\sigma]_{h \min}} = \frac{S_{[\sigma]_{h \min}}}{[\bar{\sigma}]_{h \min}} = \frac{3.023\ 33}{122}$$

$$= 0.024\ 78 < 0.3$$

#### 2.4.5 环向焊缝强度可靠度计算

利用前述结果, 得系数:

$$\beta = \frac{[\bar{\sigma}]_h - [\sigma]_{h \min}}{\sqrt{S_{[\sigma]_h}^2 + S_{[\sigma]_{h \min}}^2}}$$

$$= \frac{122 - 41.19}{\sqrt{8.54^2 + 3.023\ 33^2}}$$

$$= 8.92$$

查文献 [4] 得强度可靠度  $R_{S_h} = 1.0$ 。

文献 [4] 未给出该计算方法。

#### 2.5 汽包强度可靠度计算

$$\text{汽包强度可靠度为 } R_S = R_{S,1} R_{S,2}^2 R_{S,3}^2 R_{S,h} =$$

$$0.967\ 84 \times 0.881\ 0^2 \times 1.0^2 \times 1.0^2 = 0.751\ 20。$$

### 3 强度可靠度讨论

锅炉爆炸事故产生灾难性后果<sup>[11]</sup>, 为了避免这种情况发生, 推荐的可靠度为 0.999 99 ~ 1.0<sup>[12]</sup>, 因此在设计时就应保证锅炉各受压件和整台锅炉的强度可靠度达到该目标值, 这也是目前计算中缺少的方面。

从  $\beta$  计算表达式及其可靠度计算表可以看出, 增加名义厚度与设计厚度的差值有利于提高和保证强度可靠度。

### 4 结 论

本文以实际工程中联合循环余热锅炉汽包强度

可靠性设计计算为例, 在给出详细计算同时, 对比了已有研究成果, 得出如下结论:

(1) 提出了以强度计算标准中校核计算结果为基础的汽包筒体和封头的最大计算压力、汽包筒体最小减弱系数的确定方法, 材料许用应力、封头内高和形状系数、含人孔封头减弱系数的变异系数计算方法, 以及封头直段和汽包环向焊缝强度可靠度计算方法, 具有适用的普遍性;

(2) 提出了整台锅炉及其受压件强度目标可靠度, 使强度可靠性计算结果有章可循;

(3) 虽然我国锅炉受压元件强度计算标准规定名义厚度不小于设计厚度, 但是该差值还应满足强度目标可靠度要求;

(4) 由于各种用途的锅炉汽包筒体和封头的强度计算均按现行强度计算标准及其相关标准、规范进行, 而强度可靠性计算正是以上述为基础和依据, 所以给出的计算方法适用于各种用途锅炉汽包强度可靠性计算。

#### 参考文献:

- [1] GB/T16507.4-2013, 水管锅炉受压元件强度计算[S]. GB/T16507.4-2013, Strength calculation of pressure parts for water-tube boilers[S].
- [2] 杨瑞刚. 机械可靠性设计与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008:2. YANG Rui-gang. Mechanical reliability design and application [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2008: 2.
- [3] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年) [EB/OL]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_240244.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm). State Council of the PRC. Development planning outline of the national medium and long term science and technology (2006-2020) [EB/OL]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_240244.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm).
- [4] 史进渊, 杨宇, 邓志成. 大容量电站锅炉可靠性与寿命的设计及评定[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008:98-148. SHI Jin-yuan, YANG Yu, DENG Zhi-cheng. Design and assessment of reliability and life in large capacity power plant boiler[M]. Beijing: China Power Press 2008: 98-148.
- [5] GB/T16507.5-2013, 水管锅炉制造[S]. GB/T16507.5-2013, Water-tube boilers fabrication[S].
- [6] GB/T16507.1-2013, 水管锅炉总则[S]. GB/T16507.1-2013, Water-tube boilers general requirement

[S]. drums [S].

[7] GB/T16507.2-2013 水管锅炉材料[S].  
GB/T16507.2-2013 Water-tube boilers materials [S].

[8] 陈良玉. 实用机械可靠性设计理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社 2003:79.  
CHEN Liang-yu. Practical design theory and method for mechanical reliability [M]. Beijing: Science Press 2003: 79.

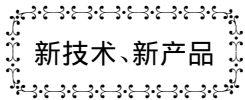
[9] GB/T709-2006 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差[S].  
GB/T709-2006 Dimension, shape, weight and tolerances for hot-rolled steel plates and sheets [S].

[10] JB/T1609-1993 锅炉锅筒制造技术条件[S].  
JB/T1609-1993 Technical specification for fabrication of boiler

[11] 郭元亮, 宋继红. TSG G0001-2012《锅炉安全技术监察规程》释义 [M]. 北京: 化学工业出版社 2013:8.  
GUO Yuan-liang, SONG Ji-hong. Paraphrases of supervision regulation on safety technology for boiler (TSG G0001-2012) [M]. Beijing: Chemical Industry Press 2013: 8.

[12] 郝静如, 米洁, 李启光. 机械可靠性工程 [M]. 北京: 国防工业出版社 2008:76.  
HAO Jing-ru, MI Jie, LI Qi-guang. Mechanical reliability engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 76.

( 单丽华 编辑)



## IPP 的升级改进将给 4 个 GT24 联合循环电站提供更多尖峰容量

据《Gas Turbine World》2014 年 3~4 月刊报道,IPP(独立电力生产者) GDF Suez 的升级改进计划将使 4 个联合循环电站的 14 台 GT24 燃气轮机的输出功率增加 5 到 10 MW,以便使电站的操作人员能以使机组转换到针对峰值负荷的最大输出功率或减少功率并延长大修间隔的方式运行。

Alstom(前身是 ABB)的 GT24 燃气轮机是 ABB 公司于 1994 年推出的采用顺序燃烧系统的一型高效率大功率燃气轮机。

自 1994 年面世以来,通过实际运行,一直定期地利用现代新技术对该型机组进行升级改进,以便增加输出功率、提高效率和延长使用寿命。GT24 近几年的升级改进如下:

升级改进和 推出年份	ISO 基本负荷额定 输出功率/kW	热耗率/kJ · (kWh) <sup>-1</sup>	效率/%
1994 年推出	165 000	9 100	37.5
2010 年升级改进	193 800	8 955	38.1
2011 年升级改进	230 700	8 531	40.0
2015 年升级改进	235 000	8 531	40.0

( 吉桂明 摘译)

**Cement Kiln when Co-processing Various Hazardous Wastes** [刊, 汉] PAN Shu-ping, PAN He-fang, MOU Yong-ming, XU Yin-yin (Zhejiang Province Environmental Monitoring Centre, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code: 310015) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(12). -92~96

Co-processing solid wastes with cement kiln has the advantages of volume reduction, pollution reduction and resource utilization. However, PCDD/Fs (polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans) are inevitably formed during the incineration process. The emission level may be influenced by the type of wastes and the amount of disposal, etc. This study investigated the emission levels and factors of cement production line (4000t/d) when co-processing various hazardous wastes (including electroplating sludge, organic solvent, nickel-contained waste and medical waste). The results were compared with previous study and showed that co-processing various hazardous wastes in different scales of cement production has little effect on the emission levels. All the emission data meet the current national standards. The PCDD/Fs are mainly formed by de novo pathway and exist in highly chlorinated PCDD/Fs. The emission factors are comparable to that of foreign cement kilns. This technology is demonstrated to be a feasible way for hazardous waste disposal. **Key words:** hazardous wastes, new type dry cement kiln, co-processing, flue gas, dioxins

**联合循环余热锅炉汽包强度可靠性设计计算 = Design Calculation on the Strength Reliability of Waste Heat Boiler Steam Drum for a Combined Cycle** [刊, 汉] ZHENG Xin-wei (College of Power and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang, China, Post Code: 150001), MIAO An-li (Wuxi Subsection of No. 703 Research Institute, CSIC, Wuxin, Jiangsu, China, Post Code: 214151), DU Xiao-jian (No. 703 Research Institute, CSIC, Harbin, Heilongjiang, China, Post Code: 150078), WANG Guang-yan (Power Department, Harbin Electric Power Vocational Technology College, Harbin, Heilongjiang, China, Post Code: 150030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(12). -97~102

Boiler strength reliability is of significant importance to improve the boiler quality and market competitiveness. In this paper, the calculation on the strength reliability of steam drum in practical engineering was introduced, and some universally applicable determination methods on the design parameters of important random variables were put forward, and followed by the strength reliability calculation methods on the head of the straight section and steam drum circumferential weld seam, and the determination of the target reliability of strength for the whole boiler and every pressure part. Increasing the difference between nominal thickness and design thickness is conducive to improve and ensure the strength reliability. The calculation methods of strength reliability presented in this paper are suitable for various boiler drums. This study is believed to extend the existing researches, and set a new requirement of strength reliability for boiler pressure parts, which are currently calculated through the numerical relationship of

“nominal thickness is not less than design thickness” in the Chinese standard. **Key words**: combined cycle ,waste heat boiler ,steam drum strength ,reliability ,design calculation ,computational analysis

三角腔体菲涅尔线聚焦集热器性能实验研究 = **Experimental Research on a Linedr Fresnel Solar Collector with a Triangle-Cavity Receiver** [刊 ,汉] SONG Jing-hui (Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. ,Ltd. ,Guangzhou ,Guangdong ,China ,Post Code: 510080) ,MA Ji-shuai ,CHEN Yu ,DAI Yan-jun (Institute of Refrigeration and Cryogenics ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(12). - 103 ~ 108

In this paper ,one kind of linedr Fresnel solar collector was introduced and relative performance tests were performed. The collector consists of a triangle-cavity receiver with tube rows ,a mirror field with ultra-white glass which is curved slightly when fixed on the support ,and the trace units in homotaxial manner. Referencing to the technical standards GB/T4271-2000 and ASHRAE 93-86 ,the transient method was used in the performance tests. According to the test data ,the no-load coefficient ,the heat loss coefficient and the thermal efficiency of the collector were calculated. The results showed that the thermal efficiency can reach 36.6% with the heat loss coefficient 110 W/m and operating temperature at 150 °C. **Key words**: Fresnel solar collector ,performance test ,no-load coefficient ,transient efficiency ,heat loss coefficient

运行中电站锅炉入炉煤元素组成的理论计算 = **Theoretical Calculation of Coal Ultimate Analysis for an Operating Thermal Power Plant** [刊 ,汉] HE Xiang ,MA Da-fu ,ZHOU Wen-tai ,SHI Hong-fei ,CHEN Duan-yu (Shanghai Power Equipment Research Institute ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(12). - 109 ~ 115

This paper put forward a method to calculate the ultimate analysis of coal and other crucial parameters in order to obtain the actual fuel consumption level of thermal power plants during the operation. The  $S_{ar}$  was estimated from the desulfidation unit ,and  $M_{ar}$  was obtained from coal pulverized system ,while the Boiler output was calculated through regenerative system and desuperheating system. Then the equation systems of general framework set were solved by Newton-Raphson iteration to obtain parameters of  $C_{ar}$  , $H_{ar}$  , $O_{ar}$  , $N_{ar}$  , $A_{ar}$  , $Q_{net,ar}$  ,and  $\eta$  (efficiency of boiler). Combining the operation data of power plant with this method ,the coal ultimate analysis and boiler efficiency can be obtained. This study is expected to provide a theoretical foundation for the further implementation of the online energy efficiency diagnosis and evaluation for power plant and for the enhancement in the management level of the operating equipments. **Key words**: Thermal plant ,mathematics model ,coal ultimate analysis