

对苏制 TII82 型锅炉过热器再热器寿命损耗率计算

苏耀雷, 周云龙

(东北电力大学 能源与机械工程学院, 吉林 132012)

摘 要: 电厂中由于锅炉的壁温及使用寿命监测手段比较落后, 锅炉四管爆裂问题经常发生, 尤其是锅炉过热器和再热器, 而过热器和再热器超温爆管直接影响到机组的安全运行和经济性, 因此电厂中对锅炉过热器再热器壁温和寿命损耗率的计算显得很重要。对苏制 TII82 型锅炉过热器再热器的寿命损耗率的计算进行了研究, 根据文中提出的锅炉过热器再热器寿命损耗率计算的模型, 以某电厂的 1 号炉为例, 最后计算出寿命损耗率 $\phi=0.2214$, 为以后能够开发一套能准确计算锅炉过热器再热器壁温及寿命预测的在线监测与故障诊断系统提供了基础。

关 键 词: 锅炉; 过热器; 再热器; 寿命损耗率

中图分类号: TK223.3 **文献标识码:** B

引 言

计算锅炉过热器再热器金属管子寿命损耗的基础是准确计算金属管子的炉内壁温。因为在相同应力下, 钢材设计运行时间和工作温度 (管壁温度 T) 的关系一般用 L-M 公式表示:

$$T(C + kG) = \text{常数}$$

其中: G —和材料有关的一个常数, 不同珠光体钢的 C 值在 18~22 一般为 20。这是目前国内外过热器再热器寿命预测计算的最基本公式。通过计算可知, 如果长期超温 10°C 后, 部件寿命几乎降低一半。例如 12CrMoV 在工作应力下, 当壁温为 580°C 时, 其设计寿命为 10 万 h; 如果为 585°C 时, 使用寿命为 70 000 h; 而运行温度为 590°C 时, 使用寿命只有 40 000 h 左右。可见, 在线壁温计算的准确性将大大影响其寿命损耗。

本研究以苏制 TII82 型锅炉为对象, 对锅炉过热器再热器壁温进行计算, 然后再在壁温计算的基础上对锅炉过热器再热器的使用寿命进行计算。

1 过热器再热器壁温的热力计算方法

大容量电站锅炉过热器、再热器的受热条件非

常复杂。具体每一点汽温和壁温的高低受到各种蒸汽流动条件和辐射对流传热条件的影响。本研究所采用的壁温计算方法考虑了实际运行工况的各屏间和同屏各管间的蒸汽流量偏差、屏前、屏后、屏间及屏下的辐射和对流传热偏差, 以及管子阻力系数偏差等多个偏差因素, 所以与用前苏联 1957 年和 1973 年热力计算标准计算炉内壁温相比, 本研究提出的壁温计算方法具有更高的准确度。

管组中任一个管段的焓增计算式为^[2]:

$$\Delta i = \frac{K K_h E_0 d l}{D_i} (q_1 P_1 + q_2 P_2 + q_3 \xi_{1i} + q_4 \xi_{2i}) \quad (1)$$

式中: K 、 K_h —宽度和高度吸热偏差系数; q_1 —炉膛上部透射热量对该管段的辐射热负荷, 考虑了屏前和屏间烟气对这些辐射热量的部分吸收, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; q_2 —屏前、屏后、屏中、或屏下烟气空间对该管段的辐射热负荷, 考虑了屏间烟气对这些辐射热量的部分吸收, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; P_1 —炉膛上部透射热器、屏前、屏后、屏中、屏下烟气空间对该管段的辐射偏差系数; q_3 、 q_4 、 ξ_{1i} 、 ξ_{2i} —屏间烟气辐射和对流热负荷, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 及其偏差系数。

计算点的汽温计算式为:

$$t = t_0 + \frac{\sum \Delta i}{R} \quad (2)$$

式中: t_0 、 R —计算管段进口温度和蒸汽比热。

于是得到管子中某一截面处沿周界热负荷最大点的炉内管壁温度, 即要求的管壁温度为:

$$t = t_0 + \beta J q_0 \left(\frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{1}{1 + \beta} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (3)$$

式中: t_0 —计算截面的管内蒸汽温度, 即根据热偏差计算方法所求得的工质焓进行计算; J 、 β 、 α_2 —热均流系数、管径比和管内蒸汽对管壁的放热系数, $\beta = \frac{d}{d-2\delta}$, α_2 由热力计算标准确定; δ 、 λ —管壁厚度和

金属导热系数; q_m —计算截面处沿周界热负荷最大点的外壁热负荷, $q_m = \eta_q q$; η_q —热负荷不均匀系数, 对占据整个烟道的屏式过热器和水平烟道中的对流受热面取 1.3 即:

$$q = \frac{\theta_j - t}{\beta J \left(\frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{2}{1+\beta} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \frac{1}{\alpha_1} + 0.25\epsilon}$$

经过以上 3 种壁温计算方法的分析比较, 壁温计算决定采用第三种计算方法, 此方法的重点是能准确计算出烟气侧沿炉宽方向的不均匀性 K , 然后就能计算出锅炉的管壁温度^[2]。而且该计算方法能用于以后要设计的锅炉过热器再热器使用寿命的在线监测系统。

2 苏制 TII82 型锅炉过热器再热器寿命损耗率的计算

2.1 计算对象的选取

由于锅炉的锅筒和集箱等大型受压件难以更换, 而且直流锅炉一般都没有锅筒, 所以选取主蒸汽集箱、再热汽集箱、汽水分离器为计算对象^[3]。

2.2 过热器再热器寿命预测方法

锅炉过热器再热器寿命损耗预测主要是计算蠕变寿命损耗。寿命计算方法采用拉森—米勒参数式计算蠕变寿命损耗:

$$T(C + \lg \tau) = P(\sigma) \tag{4}$$

式中: T —钢材的温度, $^{\circ}\text{C}$; C —钢材常数; τ —蠕变断裂时间, s ; $P(\sigma)$ —热强参数, 应力的函数。此式即为锅炉过热器再热器使用寿命计算的最基本的公式。

实际应用中, $P(\sigma)$ 可表示为多项式形式:

$$P(\sigma) = C_0 + C_1 \lg \sigma + C_2 \lg^2 \sigma + C_3 \lg^3 \sigma \tag{5}$$

式中: 对于 12CrMoV 钢材, $C_0 = 38689.8$, $C_1 = -17500.9$, $C_2 = 8823.5$, $C_3 = -2112.1$, 钢材常数 $C = 22$ 。

由此得:

$$\lg \tau = -C + (C_0 + C_1 \lg \sigma + C_2 \lg^2 \sigma + C_3 \lg^3 \sigma) / T \tag{6}$$

式 (6) 可用来计算锅炉过热器再热器蠕变断裂时间。

如果应力按额定压力下的内压应力计算, 只有温度在变化, 得到:

$$\lg \tau = -C + \frac{C_{\text{const}}}{T} \tag{7}$$

式 (7) 为计算锅炉过热器再热器蠕断时间的简化, 适合于锅炉使用寿命的在线监测系统的设计。

由此得出结论, 由材料的工作温度和工作应力, 可以求出该参数下的使用寿命, 进而求出寿命损耗率。对于蠕变损伤, 满足线性累加原则^[4], 即可将寿命损耗累加, 得到总的寿命损耗。

有了相应工况的蠕变断裂时间 τ 可以应用罗宾逊法则求出蠕变寿命损耗^[5]:

$$\phi = K \sum_{j=1}^n \frac{\Delta \tau_j}{\tau_{rj}} \leq 1 \tag{8}$$

式中: K —考虑了疲劳和蠕变同时作用的系数, 根据经验, $K = 1.2$; $\Delta \tau_j$ —在参数下部件的各温度的累积运行时间; τ_{rj} —在参数下部件的各温度的蠕变断裂时间。

在线监测系统的设计方案也是针对式 (8) 进行设计编程的。

2.3 过热器再热器管壁应力的确定

采用薄壁圆筒的应力计算式计算管壁的应力。

(1) 应力计算式^[5]:

$$\sigma_p = \frac{P(D_n + S)}{2S} \tag{9}$$

由于金属管子在工作中要受到内外腐蚀和管子外部的磨损, 所以壁厚会减薄, 即:

$$S = S_0 - S_c - S_i - S_m \tag{10}$$

式中: S_0 —最初的管子壁厚, mm ; S_c 、 S_i 、 S_m —由于外部腐蚀, 内部腐蚀, 飞灰磨损管子减少的壁厚, mm 。

(2) 管子壁厚减少量的计算:

采用《机电工程金属材料手册》中规定的方法来计算 S_c 、 S_i 。

计算实例中的过热器再热器所利用的钢材 12CrMoV 在烟气和蒸汽中的氧化参数的计算式为^[5]:

$$P_1 = \frac{14950}{T} - \lg \tau \tag{11}$$

$$P_2 = \frac{16900}{T} - \lg \tau \tag{12}$$

由氧化参数图, 腐蚀失重计算式为^[5]:

$$\lg \eta_1 = \alpha_1 + K_1 P_1 \tag{13}$$

$$\lg \eta_2 = \alpha_2 + K_2 P_2 \tag{14}$$

式中: $\alpha_1 = 4.0896$, $\alpha_2 = 7.5767$; $K_1 = -0.3806$, $K_2 = -0.5421$ 。

则 S_c 、 S_i 为^[5]:

$$S_c = \frac{10}{\rho} \eta_1; S_i = \frac{10}{\rho} \eta_2 \tag{15}$$

式中: ρ —金属密度, 对于 12CrMoV 钢材, $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ 。

S_m 的计算式为^[9]:

$$S_m = A \sqrt{\tau} \tag{16}$$

式中: $A=5.0 \times 10^{-4}$ 。

从而由式 (10) 就能求出管壁减薄后的厚度 S 由式 (9) 求出管壁减薄后的薄壁圆筒的应力。

3 过热器再热器寿命损耗率计算

3.1 计算步骤

由以上对锅炉过热器再热器壁温和使用寿命的研究为基础, 苏制 TII82 型锅炉过热器再热器寿命损耗率的计算步骤为:

(1) 首先假设一个时间段, 例如 100 000 h 即式 (8) 中的 $\Delta\tau_j=100\ 000\ \text{h}$ 其实锅炉在运行中都是做变负荷运行, 由式 (3) 求出管子金属在某个负荷下 (假如锅炉在该负荷下运行了 1 000 h) 的温度 T 从而由 $\Delta\tau_j$ (即 τ) 和 T 代入式 (9) ~ 式 (16) 求出管子金属由于腐蚀和磨损管壁减薄的壁厚, 进而求出管子残余的壁厚和管壁减薄后另外的负荷下的管壁金属的温度 T' , 依此类推不断的进行循环, 从而可求出各个负荷下的壁温;

(2) 由管子内部蒸汽的压力代入式 (9) 求出管子管壁减薄后的应力, 管壁的应力也随着管壁的不断减薄而发生变化, 所以应力的求取也随着步骤不断地进行循环计算;

(3) 把式 (3) 最后求出的各个负荷下的管壁减薄后的温度 T' 和式 (2) 求出的管壁减薄后的管子的应力代入式 (4) 和式 (5) 中, 求出当时负荷下的蠕变断裂时间;

(4) 式 (8) 中的 $\Delta\tau_j$ 是这段假设的时间 (100 000 h) 内各个负荷温度下的累计运行时间, 是定期进行统计从而计算出来的。把求出的这段时间内各个温度下的累计运行时间 $\Delta\tau_j$ 和蠕变断裂时间 τ_j 代入式 (8), 如果 $\phi \leq 1$, 重复上述步骤, 即再假设一个时间段 100 000 h 并且积累运行时间; 如果 $\phi \geq 1$ 时, 结束计算, 此时积累的运行时间就是管子的寿命, 即把所有的 $\Delta\tau_j$ 累加起来就是管子的寿命。该计算步骤的流程如图 1 所示。

本研究提出的苏制 TII82 型锅炉过热器再热器寿命损耗率的计算方法有较高的精确度, 原因在于对管壁温度的求取考虑了多个影响因素, 对减薄量的求取考虑了多个损耗因素。考虑管壁减薄后的金属管壁温度, 即金属管子的厚度越用越薄, 那么管子的壁温也随着管子厚度的变化在不断的变化。

3.2 计算实例

以某热电厂 1 号炉为例, 对苏制 TII82 型锅炉过热器再热器寿命损耗率进行计算, 该炉是苏制

TII82 型 300 MW 机组, 过热器系统由墙上辐射过热器、屏式过热器、顶棚过热器和一、二、三段对流过热器组成, 顶棚过热器采用 G20 碳钢, 其余采用 12CrMoV 钢, 该炉自 2000 年 12 月投产以来, 运行一段时间 52 700 h

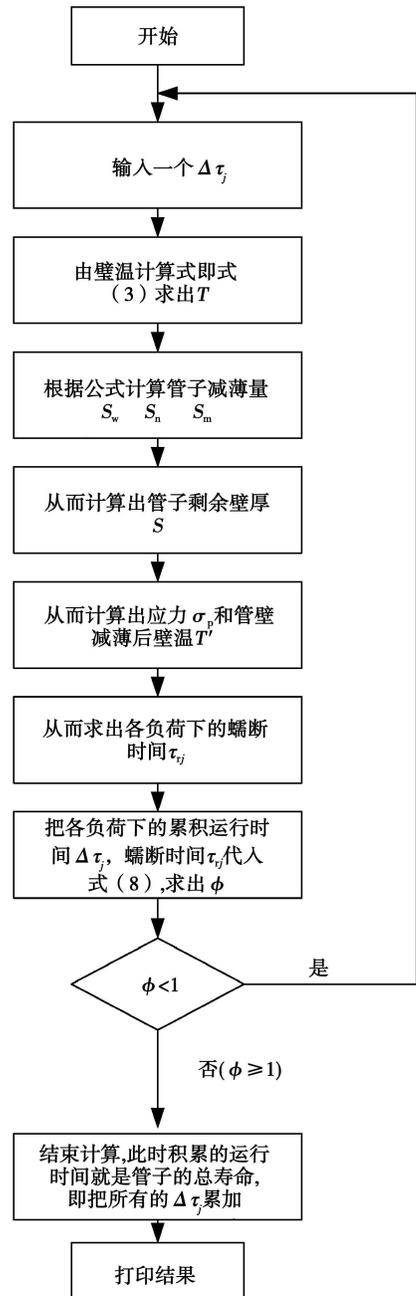


图 1 锅炉过热器再热器使用寿命计算方法的流程

根据上述步骤, 由步骤 (1) 求出开始时的壁温 T 如表 1 所示, 然后由 $\tau=57\ 200\ \text{h}$ 壁温取 100% 负荷下的壁温 $T=578.5\ ^\circ\text{C}$ 代入式 (9) ~ 式 (16) 计算出壁厚减薄量, 该锅炉过热器管的原壁厚为其 $S_0=6.5\ \text{mm}$, 其中, 内壁氧化参数 12.836.2 外壁氧化参

数 15.125 g, 内壁单位面积失重 0.160 0 g/cm², 外壁单位面积失重 0.238 2 g/cm², S_n=0.205 1 mm, S_v=0.305 4 mm, S_m=0.119 6 mm, S_b=6.5 mm, 剩余壁厚为 S=6.5-0.2051-0.3054-0.1196=5.869 9 mm。进而求出管壁减薄后的壁温 T', 100%负荷时为 576.5 °C, 90%负荷时为 572.0 °C, 80%负荷时为 569.0 °C, 70%负荷时为 565.5 °C, 60%负荷时为 563.5 °C。

表 1 各负荷下 1号炉运行情况

负荷 /%	壁温 /°C	压力 /MPa	运行时间 /h
100	578.5	17.6	4 380
90	573.5	17.2	6 550
80	571.5	16.6	13 160
70	567.5	16.1	19 710
60	565.5	15.5	8 420

由步骤 (2) 求出管子所承受的应力, 其中, D_n=44.5 mm, S=5.869 9 mm, 求出各个负荷参数下的管壁应力, 如表 2 所示。如果不考虑壁厚的减薄量, 即都采用原壁厚 S_b=6.5 mm 计算不同负荷下的管壁应力, 计算结果分别为 68.88、66.79、64.96、63.6 和 61.23 MPa, 可见考虑壁厚的减薄量求出的应力大小与不考虑的情况相差较大, 如此可见壁厚的减薄量的求取是一个不可忽视的影响因素。

表 2 各负荷下 1号炉应力值

负荷 /%	压力 /MPa	应力 /MPa
100	17.6	75.51
90	17.2	73.79
80	16.6	71.22
70	16.1	69.07
60	15.5	66.50

由式 (6) 求出各负荷下的蠕变断裂时间: 100% 负荷时为 100 000 h, 90% 负荷时为 165 744 h, 80% 负荷时为 273 469 h, 70% 负荷时为 473 095 h, 60% 负荷时为 728 949 h。

表 3 锅炉过热器再热器寿命损耗率

	低温 过热器	一级屏式 过热器	末级 过热器	低温 再热器	末级 再热器	寿命不 足部件
寿命消 耗量 /h	710	690	578	821	712	无
寿命损 耗率 /%	0.221 4	0.241 1	0.223 1	0.118 2	0.118 2	

根据式 (8) 得 1号炉的蠕变寿命损耗率为^[7]:

$$\phi = K \sum_{j=1}^n \frac{\Delta \tau_j}{\tau_{rj}} = 1.2 \times \left\{ \frac{4380}{1000000} + \frac{6550}{165744} + \frac{13160}{273469} + \frac{19710}{473095} + \frac{8420}{728949} \right\} = 0.2214 \leq 1$$

该计算结果说明过热器最危险点的寿命损伤最大值小于 1, 因而其目前的运行状况是安全的, 可以继续运行, 运行过程中的计算结果还包括过热器再热器金属寿命损耗量和寿命损耗率、过热器超温工作时间, 表 3 是该炉在这段时间内的各研究对象的金属的寿命损耗量和寿命损耗率的示意图。重复上述步骤, 直到 ϕ 的值大于或等于 1 结束计算, 此时积累的运行时间就是管子总的使用寿命。根据上述步骤, 经过多次循环计算, 积累的运行时间为 501 568 h, 一天按 24 h, 一年按 365 天计算, 即该炉理论使用寿命约为 57 年, 但锅炉实际运行过程中, 由于有些因素的影响, 实际使用寿命要远低于这个理论使用寿命。

4 结 论

(1) 分析了电厂锅炉过热器再热器壁温的各种计算方法, 并对各种方法进行了比较, 最后得出比较准确的适合在线监测的计算方法, 并分析了壁温计算的准确性的重要意义以及对锅炉过热器再热器使用寿命计算的关键性。

(2) 对寿命预测的方法进行了研究, 即采用时间-温度参数法对过热器再热器的蠕变寿命进行了计算, 并以某电厂的 1号炉为例, 该炉是苏制 TII82 型锅炉, 自 2000 年 12 月开始投产, 对锅炉过热器再热器的寿命损耗率的计算进行了研究, 用于锅炉过热器再热器使用寿命的在线监测系统的设计。

参考文献:

- [1] 杨 栋, 王忠元. 锅炉高温受热面管束寿命在线监测技术研究 [J]. 中国电力, 2004, 37(4): 13-14.
- [2] 池作和, 周 昊, 蒋 啸, 等. 大容量直流锅炉在线寿命监测系统 [J]. 锅炉技术, 1995, 27(3): 16-17.
- [3] 杨 栋, 王忠元. 锅炉高温受热面管束寿命在线监测技术研究 [J]. 上海电力, 2003(3): 228-231.
- [4] 刘 彤, 徐 钢, 庞力平, 等. 锅炉炉内承压部件的蠕变分析及寿命计算 [J]. 动力工程, 2004, 24(5): 631-634.
- [5] 魏铁铮, 谢英柏. 锅炉高温受热部件寿命的计算方法 [J]. 动力工程, 2000, 20(1): 528-530.
- [6] 徐 钢. 全面的锅炉寿命在线监测和管理系统的研究与开发 [D]. 北京: 华北电力大学, 2003.

(编辑 陈 滨)

model and local non-heat balance heat conduction theory were used to conduct a theoretical analysis of the convection-based heat conduction outside the longitudinally swept heat conduction tubes. Finally the results obtained from the theoretical analysis were verified and corrected. A criterion equation incorporating the average Nusselt number for convection heat conduction of fluids longitudinally sweeping the outer surface of heat conduction tubes in a laminar flow and a formulae for calculating the pressure drop of an air flow longitudinally sweeping the outer surface of heat conduction tubes arranged in line in the porous foam metal were derived. Key words: porous foam metal heat exchanger, fluid longitudinal sweeping, heat conduction tube

基于焓分析的发电厂改造方法研究 = Study of a Method for Modifying Power Plants Based on an Exergy Analysis [刊, 汉] JIANG Yuan-yuan, ZHOU Shao-xiang, XU Hong (College of Energy Source and Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3), — 310 ~ 314

To perform an exergy analysis of various links in a power plant to find out a concrete loss link and to present a scheme for modifying a concrete position according to the exergy analysis theory with boilers, steam turbines and the thermal system of a power plant taken as a whole represents a new method for modifying power plants. With an ultra-supercritical unit serving as an example, the exergy analysis theory was used to find out the exergy loss link and the influence of the secondary air temperature and feedwater temperature on the boiler system and power plant thermal system. By adding a stage of HP heaters, the feedwater temperature was enhanced and in the meantime, by properly increasing the secondary air temperature under the precondition of maintaining the flue gas temperature of the boiler unchanged, analyzed was a change in the performance of the boiler and the whole unit under the dual action of the feedwater and secondary air temperature. The research results show that when the feedwater temperature increases from 299.5 °C to 322 °C and the secondary air temperature goes up from 327.8 °C to 360 °C, the exergy loss of the heat conduction in the boiler system will go down from 3 443 kJ/kg to 3 254 kJ/kg, the exergy loss in the combustion link drop from 6 204 kJ/kg to 6 158 kJ/kg, the exergy efficiency of the boiler rise from 54.15% to 54.45% and the target exergy efficiency of the unit increase from 42% to 47.7%. Key words: exergy analysis, exergy loss, target exergy efficiency, power plant, boiler

对苏制 TII82型锅炉过热器再热器寿命损耗率计算 = Calculation of the Life Loss Rate of the Superheater and Reheater of a Soviet Union made TII82 Type Boiler [刊, 汉] SU Yao-qi, ZHOU Yun-long (College of Energy Source and Mechanical Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3), — 315 ~ 318

Because of the measures for monitoring the wall surface temperature and service life of a boiler in power plants falling behind relatively, rupture problems of four types of boiler tubes often take place, especially boiler superheaters

and reheaters. The tube rupture due to an overtemperature of a superheater and reheater directly affects the safe operation and cost effectiveness of their unit. Hence, calculation of wall surface temperature and life loss rate of a boiler superheater and reheater in a power plant is very important. The authors have performed a study of the calculation of the life loss rate of the superheater and reheater of a Soviet Union made T1182 type boiler. According to the model for calculating the life loss rate of superheaters and reheaters of boilers presented by the authors with No. 1 boiler of a power plant serving as an example, the life loss rate of the boiler superheater and reheater was calculated as $\lambda = 0.22141$. Therefore, the foregoing can provide a basis for developing an on-line monitoring and fault diagnosis system in the future, which can accurately predict wall surface temperature and service life of a boiler superheater and reheater. Key words: boiler superheater, reheater, lifetime loss rate.

热水锅炉补水系统氮气稳压及效果 = Nitrogen based Pressure Stabilization and Its Effectiveness of the Makeup Water System of a Hot Water Boiler [刊, 汉] WANG Deming, LONG Tengru (College of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400045), DING Deyu, LIU Cheng (Department of Power Engineering, Chongqing College of Electric Power, Chongqing, China, Post Code: 400053) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 319 ~ 322

By utilizing the thermodynamic theory, analyzed was the principle for nitrogen based pressure stabilization. A nitrogen based pressure stabilization device was additionally installed in the makeup water system of a hot water boiler. The thermodynamic state and process of nitrogen experienced during the pressure stabilization were described and the relationship of the makeup water periods of the hot water boiler system with and without a nitrogen based pressure stabilization device, obtained. As a result, the authors came to a conclusion that the heating network system with a nitrogen based pressure stabilization device enjoys a relatively long makeup water period and can enhance the stability and safety of the system during its operation. As the period of the makeup water pump is prolonged, its startup and shutdown frequency decreases and its service life is extended, its power consumption will be reduced accordingly, therefore the labor intensity of the operators can be lightened. Key words: heating network system, thermodynamic analysis, pressure stabilization, safety, water pump, boiler.

船用增压锅炉风烟系统的流体网络模型 = Fluid Network Model for the Air and Flue Gas System of a Marine Turbocharged Boiler [刊, 汉] FEI Jingzhou, MA Xiuzhen (College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 323 ~ 327

The air and flue gas system of a turbocharged boiler and its turbocharged unit enjoy a very strong thermal coupling relationship, the resistance characteristics of which have an important influence on theirmatching performance. For