

船用增压锅炉热平衡计算

王建志<sup>1</sup>, 吴少华<sup>1</sup>, 季清洲<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘 要:** 热平衡计算是船用增压锅炉 热力性能计算的基础, 由于增压机组参与锅炉 热力过程, 使增压锅炉 热平衡计算更加复杂。本文提出了 增压锅炉分段热平衡计算方法, 并对直接热平衡和分段热平衡两种方法进行了分析探讨; 提出了适用于增压锅炉变负荷计算的通用增压机组热损失公式, 给出了针对辅助汽轮机做功的燃料支配热量计算公式, 并进行了实例计算分析, 分段热平衡计算结果比较理想, 为船用 增压锅炉性能计算分析提供了参考。

**关 键 词:** 船用增压锅炉; 热平衡; 热损失; 支配热量

中图分类号: TK229      文献标识码: A

符号说明

$Q_1$ —有效利用的热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_2$ —排烟带走热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_3$ —燃料化学未完全燃烧损失热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_4$ —机械未完全燃烧损失热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_5$ —锅炉散热损失热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_{\text{增}}$ —增压机组损失热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_{\text{低}}$ —燃料发热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_{\text{气}}$ —热空气带入热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_{\text{汽}}$ —燃料雾化蒸汽带入热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_{\text{冷}}$ —冷空气带入热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_{\text{燃}}$ —燃料带入物理热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_{\text{汽机}}$ —辅助汽轮机做功带给热空气的热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_s$ —热损失/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $Q_r$ —支配热量, 即入炉热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $\Delta t_w$ —涡轮中烟气焓降/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $\Delta t_{y2}$ —经过压气机后排放掉空气的焓升/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $I_{\text{py}}$ —烟气涡轮出口烟焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $I_k$ —空气焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $\alpha$ —过量空气系数;  
 $q_i$ —热损失/ $\%$ ;  
 $B$ —燃料量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $I_{\text{lk}}$ —冷空气焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $\Delta t_{y1}$ —每公斤燃料所需空气焓升(涡轮做功部分)/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $\eta$ —装置效率/ $\%$ ;

$I_j$ —经济器出口烟焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  
 $\eta_1$ —不考虑增压机组回收热量的锅炉效率/ $\%$ ;  
 $Q_{\text{H}}^p$ —燃料低位发热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

1 前 言

船用增压锅炉以其工作可靠性、生命力、耐久性和维修性等方面的良好性能, 尤其是重量轻、尺寸小和机动性好的显著特点, 越来越受到船用领域的青睐, 是现代船用锅炉的发展方向<sup>[1~3]</sup>。锅炉效率指标是体现锅炉经济性的重要指标, 锅炉热平衡计算是确定效率和燃料耗量的重要计算途径。常规船用锅炉热平衡计算方法早已被锅炉设计者所熟知, 但在增压锅炉中, 由于涡轮增压机组参与锅炉能量交换, 使增压锅炉热平衡计算方法与常规锅炉有了较大的不同。目前我国还没有标准的增压锅炉热平衡计算方法, 本文针对船用增压锅炉的技术特点, 提出了船用增压锅炉热平衡及效率计算方法。

2 增压锅炉的技术特点

2.1 增压锅炉工作原理

增压锅炉是采用了增压燃烧系统, 利用压气机取代了鼓风机, 为炉膛提供高压、高密度、高温度的助燃空气, 炉膛燃烧压力可以达到 0.2~0.3 MPa 表压, 大大强化了燃烧和换热。

锅炉燃烧产生的高温高压烟气经过锅炉受热面换热后, 进入增压机组的烟气涡轮做功, 产生的功率用于压气机增压和加热空气, 回收烟气热量。当烟气涡轮功率有剩余时, 可以对外输出功率, 当烟气涡轮功率不足时, 利用辅助发动机增加功率, 一般采用辅助汽轮机增加压气机的输出。对于船用增压锅炉, 增压机组一般不对外输出有效功率, 烟气涡轮功率完全用于压气机增压空气, 功率过剩时, 通过排放部分热空气的方法来维持平衡。

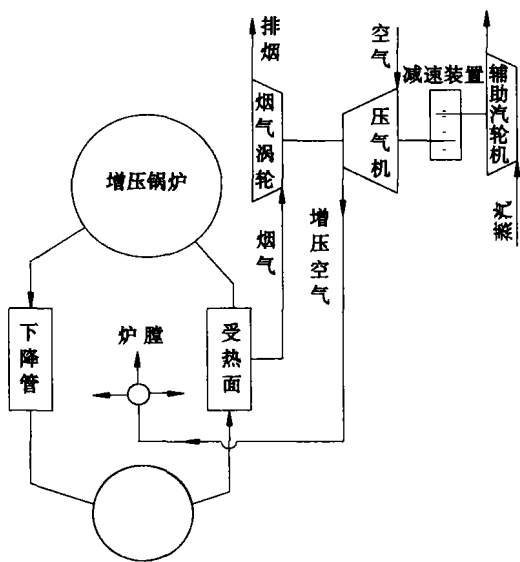


图 1 增压锅炉工作原理

2.2 增压锅炉热流图

图 2 为带有辅助汽轮机做功的增压锅炉热量流向图, 从图中可以看出, 进入锅炉的热量主要由燃料低位发热量、雾化燃料的蒸汽带入热量、燃料的物理热和热空气带入热量等几部分组成, 其中热空气带入热量又分为烟气涡轮做功带给空气的热量和辅助汽轮机做功带给空气的热量两部分。

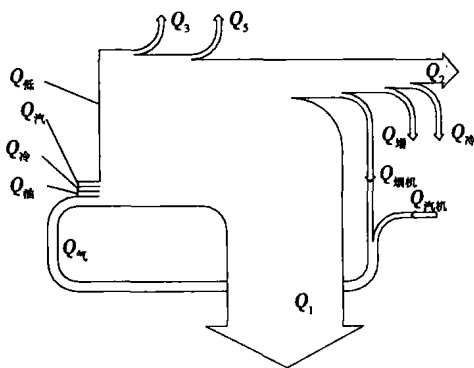


图 2 增压锅炉热流图

3 增压锅炉热平衡及锅炉效率的计算

热平衡计算对于增压锅炉热力性能计算及锅炉经济性指标的确定十分重要<sup>[3~4]</sup>。

对于增压锅炉, 热平衡方程为:

$$Q_p^p = Q_1 + \sum_{i=2}^5 Q_i + Q_{增}$$

(1)

增压机组参与了锅炉的热平衡过程, 经济器出口的烟气余热有一部分通过增压机组做功以热空气的形式回收并送回炉膛, 而增压机组在回收热量的同时, 又引入了新的热损失  $Q_{增}$ , 即增压机组热损失。当烟气涡轮功率不足时, 辅助汽轮机做功而带给锅炉的热量, 也对热平衡计算有一定的影响。

3.1 增压锅炉热平衡计算

普通锅炉的热平衡计算方法比较简单, 有通用的计算方法可以遵循, 但增压锅炉的热平衡计算不能简单地按照通用公式进行计算。根据上述分析认为, 增压锅炉热平衡计算可以分为两种计算方法。

第一种方法: 将增压机组简单地当作利用烟气加热的空气预热器考虑, 支配热量中不考虑热空气带入热量, 计算公式为:

$$Q_p^p = Q_H^p + Q_{汽} + Q_{燃}$$

(2)

$$\sum Q_s = Q_2 + Q_3 + Q_5 + Q_{增}$$

(3)

将烟气涡轮出口温度作为锅炉排烟温度, 并以此计算锅炉的排烟热损失, 即:

$$Q_2 = I_{py} - \alpha I_k$$

(4)

$$q_i = Q_i / Q_p^p \times 100\%$$

(5)

$$\eta = 1 - q_2 - q_3 - q_5 - q_{增}$$

(6)

$$B = Q_1 / Q_p^p \eta$$

(7)

该算法较易被接受, 且在功率平衡点以上是适用的。但是, 当辅助汽轮机做功时, 由于支配热中没有考虑辅助汽轮机带入的外来热量, 计算结果将有较大偏差。

根据前述分析认为, 当辅助汽轮机做功时, 应该将外来热量计入支配热量。即:

$$Q_p^p = Q_H^p + Q_{汽} + Q_{燃} + Q_{汽机}$$

(8)

该计算工作需要增压机组和锅炉计算交叉进行, 反复假设和修正, 计算过程较为复杂。

第二种算法: 考虑到上述情况, 提出了分段式热平衡计算方法, 可以使计算简化, 即先按照经济器出口烟温计算  $Q_2$ , 从而可以先不考虑增压机组热损失, 根据热流图可以看出, 应将辅助汽轮机做功带入的热量作为外来热量计入入炉支配热量, 即:

$$Q_{p1}^p = Q_H^p + Q_{汽} + Q_{燃} + Q_{汽机} + Q_{烟机}$$

(9)

$$q_2 = Q_2 / Q_{p1}^p \times 100\% = (I_j - \alpha I_k) / Q_{p1}^p \times 100\%$$

(10)

$$\eta_1 = 1 - q_2 - q_3 - q_5$$

(11)

$$B = Q_1 / Q_{p1}^p \eta_1$$

(12)

应用上述公式确定燃料量后, 再用式(6)计算装置效率, 其中  $q_2$  用式(4)计算。

### 3.2 排烟热损失的确定

增压锅炉排烟损失的计算取决于锅炉总体热平衡的计算方法, 如果将增压机组和锅炉作为整体来计算, 排烟损失应该按照烟气涡轮出口烟焓来计算; 如果按照锅炉和增压机组分段计算, 锅炉部分排烟损失则应该按照经济器出口烟焓来计算。

### 3.3 增压机组热损失的确定

增压机组热损失是指从压气机中所回收到的热量, 与烟气在烟气涡轮中所放出的热量之间的热损失百分比。增压机组热损失是增压锅炉热平衡计算所特有的, 其数值可达 2% 以上。 $q_{\text{增}}$  的大小取决于空气流量、压气机和燃气轮机的机械效率、压比以及烟气和空气的绝热指数等。该损失的确定对整个锅炉热平衡计算都有较大影响。

当烟气涡轮具有剩余功率时, 烟气在涡轮中的总焓降可以理解为用于带动压气机, 使空气热焓升高和建立剩余功率两部分, 此时增压机组热损失也分为两部分, 即烟气用于带动压气机的焓降与空气总焓升差额和烟气用于产生剩余功率的焓降与剩余功率实际输出热量之差额。当功率平衡时, 烟气在涡轮中的焓降全部用于带动压气机, 使空气热焓升高; 此时烟气焓降与空气焓升之间的数值差额, 即为增压机组的热损失。

当功率不足时, 烟气在涡轮中的焓降也全部用于带动压气机, 使空气热焓升高。但是, 空气热焓的升高还有一部分来自辅助发动机的附加功率, 此时增压机组的热损失为烟气在涡轮中的焓降与空气从涡轮做功中所得那部分焓升之间的差额百分比。

对于船用增压锅炉, 为简化系统, 剩余功率一般都被压气机消耗, 并以多余空气的形式排放掉, 因此, 剩余功率不是锅炉的有用功率, 也必须归入增压机组热损失的一部分, 因此, 增压机组热损失计算公式可以简化为一个通用公式, 该计算公式在增压锅炉各种工况下都适用。

$$q_{\text{增}} = \frac{Q_{\text{增}}}{Q_{\text{P}}} \times 100\% = \frac{(\Delta t_{\text{w}} - \Delta t_{\text{v1}} + \Delta t_{\text{v2}})}{Q_{\text{P}}} \times 100\% \quad (13)$$

### 3.4 支配热量的计算

支配热量指随每公斤燃料送入锅炉的热量, 该指标影响到锅炉效率和燃料量的准确确定。当没有辅助汽轮机工作时, 支配热量计算公式为:

$$Q_{\text{P}} = Q_{\text{H}} + Q_{\text{汽}} + Q_{\text{燃}} \quad (14)$$

这与普通锅炉是一致的。当有辅助汽轮机做功

时, 送入锅炉的热空气热量包含有辅助汽轮机带入的附加热量, 该部分热量必须加以考虑, 因此, 支配热量计算公式应变为:

$$Q_{\text{P}} = Q_{\text{H}} + Q_{\text{汽}} + Q_{\text{燃}} + Q_{\text{汽机}} \quad (15)$$

即支配热量相当于在原有支配热的基础上, 增加了汽轮机带入的附加热量。

### 3.5 计算实例

按照本文所述方法对某增压锅炉进行了校核计算, 计算结果见表 1。根据结果可见, 第一种算法由于没有考虑辅助汽轮机做功对支配热量的影响, 使热量损失的计算值偏高, 计算结果误差较大, 而第二种算法的计算结果比较理想。

表 1 增压锅炉热平衡计算结果

	第一种算法	第二种算法
排烟损失 $q_2$ /%	17.37	16.4
增压机组热损失 $q_{\text{增}}$ /%	0.85	0.84
计算效率 /%	81.3	82.2
反平衡效率 /%	82.2	82.2
效率误差 /%	1	0

## 4 结 论

热平衡计算是船用增压锅炉热力性能计算的基础, 由于增压机组参与锅炉热力过程, 使增压锅炉热平衡计算更加复杂。增压锅炉热平衡计算过程中, 支配热量和增压机组热损失的确定对于锅炉热力计算影响较大。当增压机组的辅助汽轮机做功时, 支配热量计算应该加入辅助汽轮机做功带入的热量。采用分段式热平衡计算方法对于增压机组热平衡计算更加直观, 计算结果也比较理想。该方法经过进一步验证后, 可以为增压锅炉性能计算提供技术支撑。

### 参考文献:

[1] 李 章, 张 宁, 刘祥源, 等. 舰用增压锅炉装置[M]. 北京: 海潮出版社, 2000.

[2] 刘长和. 船用增压锅炉技术的新进展[J]. 热能动力工程, 1999, 14(4): 241—245.

[3] 全苏热工研究所. 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.

[4] 沈志刚. 舰用增压锅炉传热计算及总体性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.

(何静芳 编辑)

回转式空气预热器风烟焓增模型及其效率分析 = **An Air-and-Flue Gas Enthalpy-increase Model for a Rotary Air Preheater and an Analysis of the Preheater Efficiency**[ 刊, 汉] / WANG Hong-yue, BI Xiao-long, SI Feng-qi, et al (Power Engineering Department, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 465 ~ 469

Rotary air preheaters usually serve as tail heating surfaces of large-sized utility boilers. An analysis of the relationship between their air leakage rate and boiler unit efficiency plays a major role in guiding the modification of the whole seal system for a preheater. Based on the thermodynamic cycle of a working medium, an air and flue gas enthalpy-increase model for a rotary air-preheater is presented for analyzing the impact of air leakage rate in preheater thermal process on the boiler unit efficiency. Furthermore, the extent of the impact of air leakage from the hot end on the boiler unit efficiency is verified quantitatively. A preliminary conclusion has been reached that the reduction of total air leakage can not guarantee an increase in boiler unit efficiency. Finally, the rationality of a technical modification for a power plant by adopting "VN" seals is analyzed by using the air and flue gas enthalpy-increase model of the rotary air preheater. **Key words:** rotary air pre-heater, enthalpy increase, efficiency, air and flue gas, air leakage

船用增压锅炉热平衡计算 = **Heat Balance Calculation of a Turbo-charged Marine Boiler**[ 刊, 汉] / WANG Jian-zhi, WU Shao-hua (Energy Source Science and Engineering College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), JI Qing-zhou (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 470 ~ 472

Heat balance calculation is a basis for the thermodynamic performance calculation of turbo-charged marine boilers. As the turbo-charger unit participates in the thermodynamic process of the boiler, there may result a more complicated heat balance calculation of the turbo-charged marine boiler. A sectionalized calculation method is proposed for the heat balance calculation of the turbo-charged boiler along with an analysis and exploratory study of the direct heat-balance and sectionalized heat-balance calculation method. A general heat-loss formula applicable to the variable load calculation of the turbo-charged boiler is presented. A calculation formula of available heat quantity for fuel used to do work in an auxiliary steam turbine is given and a calculation and analysis of specific cases also performed. The sectionalized heat-balance calculation results are relatively satisfactory, thus providing a guide for the performance calculation and analysis of the turbo-charged marine boilers. **Key words:** turbo-charged boiler, heat balance, heat loss, available heat quantity

自然循环热水锅炉水动力回路分析法的计算原理 = **Principle of Calculations for Hydrodynamic-loop Analysis Method Used for Natural Circulation Hot Water Boilers**[ 刊, 汉] / XU Yan-ying, DONG Peng, LAN Ri-hua (Energy Source Science and Engineering College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 473 ~ 476

Over a long period of time a graphic method has been used for the hydrodynamic calculation of natural circulation hot water boilers, which involves a relatively large calculation error, thus affecting the hydrodynamic safety of boilers. The principles of calculation for hydrodynamic-loop analytic method is expounded in detail. Also given for natural circulation hot water boilers are the equivalent pipeline chart of hydrodynamic-loop analytic method for water walls and convection tube-bundle circulation loops, hydrodynamic-calculation mathematical equations set and their corresponding mathematical solution method. The adoption of hydrodynamic-loop analytic method can not only enhance the reliability of natural circulation hot-water boiler hydrodynamic calculation and guarantee the hydrodynamic safety of hot water boilers but can markedly enhance the calculation efficiency due to the use of a computer-based numerical solution. Moreover, to facilitate the application of the hydrodynamic-loop analytic method for performing the hydrodynamic calculation of the above-cited hot water boilers, through a derivation process given are the equivalent pipeline charts of the hydrodynamic-loop analytic method of a water-wall circulation loop for other commonly seen natural circulation hot-water boilers. In addition, also presented