文章编号: 1001 - 2060(2011)01 - 0094 - 03

船用增压锅炉热平衡及热损失的计算方法

王永堂[1], 吴少华[1], 陈　明[2], 王建志[2]
(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与动力工程学院, 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, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘　要: 热平衡计算是锅炉热力性能计算的关键。针对带涡轮增压机组做功的增压锅炉结构特点和工作特点进行分析和阐述, 提出了考虑空气夹层吸热的船用增压锅炉热平衡及热损失的计算方法, 给出了进入炉膛热量、各种损失、特别是增压机组热损失和保热系数的计算式, 并对某增压锅炉有、无空气夹层的影响进行了热力校核计算, 计算结果接近实际情况。本研究提出的计算方法可为船用增压锅炉热力性能计算提供参考。

关　键　词: 船用增压锅炉; 热平衡; 空气夹层; 支配热; 散热损失

中图分类号: TK212　　**文献标识码**: A

引　言

船用增压锅炉装置是利用压气机代替鼓风机向锅炉炉膛输送具有一定压力的助燃空气的锅炉[1~2]。船用增压锅炉装置主要由增压锅炉和涡轮增压机组构成, 工作原理如图 1 所示。燃烧所需的空气经过涡轮增压机组的压气机压缩后大大提高了压力和温度, 经过锅炉空气夹层吸热后进入炉膛, 进入炉膛空气的温度比压气机出口的空气温度更高, 可达 180 ℃, 压力可达 0.3 MPa, 燃烧后的烟气经过蒸发管束、过热器、经济器换热后进入烟气涡轮做功推动压气机压缩空气。由于涡轮增压机组及空气夹层的吸热致使进入炉膛的热量增加, 提高了燃料的燃尽性、锅炉的理论燃烧温度及出口温度。然而, 我国目前还没有针对增压锅炉的标准热力计算方法, 因此本研究针对增压锅炉独特的炉型结构和工作特点, 对增压锅炉装置的热平衡进行计算分析, 提出了各种热损失和保热系数的计算式。

图 2 是带有辅汽轮机做功的增压锅炉的热流图, 从图中可以看出具有空气夹层的增压锅炉与普通的陆用电站锅炉不同之处在于进入增压锅炉的空气的能量是由涡轮增压机组与空气夹层加热后的热空气。空气夹层减小了锅炉向外面的散热损失, 而且增加了进入锅炉炉膛的空气温度。

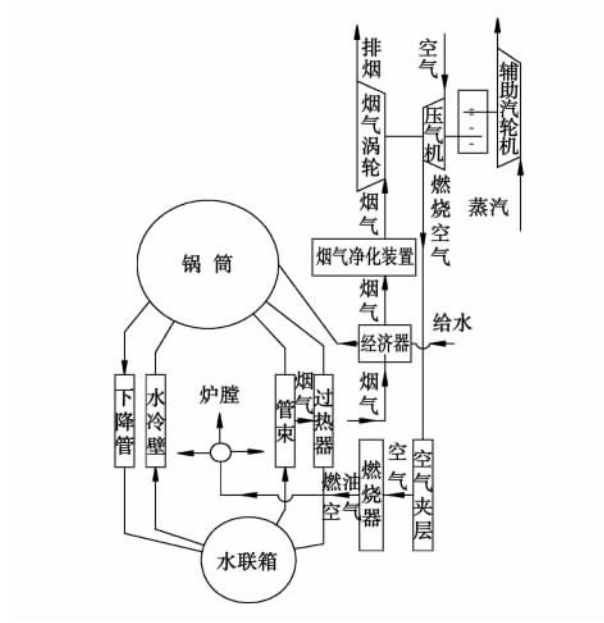

图 1　增压锅炉工作原理

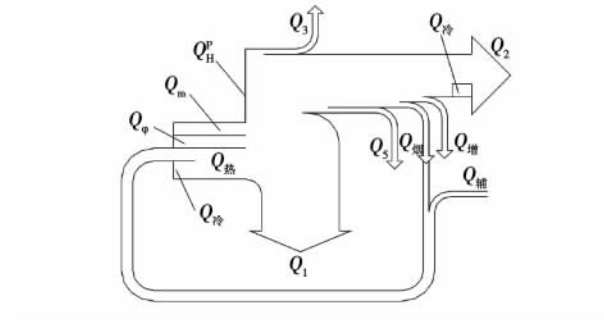

图 2　增压锅炉的热流图

1　增压锅炉装置热力计算

1.1　热平衡方程

根据热流图可知, 进入锅炉炉膛的热量由 4 部

收稿日期: 2009 - 11 - 07;　**修订日期**: 2010 - 02 - 04
作者简介: 王永堂(1979 -), 男, 黑龙江汤原人, 哈尔滨工业大学博士研究生, 现为中国船舶重工集团公司第七 O 三研究所工程师.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分构成: 燃料的低位发热量、燃油的物理热、雾化燃油的蒸汽热以及进入锅炉的热空气的热量。其中,热空气的热量由 3 部分构成,包括环境温度下的冷空气热、压气机压缩做功的热量以及压缩后的空气经过夹层所吸收的热量。因此增压锅炉的热平衡方程为:

$$Q_H^p + Q_m + Q_\varphi + Q_{热} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{增} + Q_{烟} + Q_5 \quad (1)$$

$$Q_{热} = Q_{冷} + Q_{辅} + Q_{烟} \quad (2)$$

式中: Q_H^p—燃料的低位发热量,kJ/kg; Q_m—燃料带入物理热,kJ/kg; Q_φ—燃油雾化蒸汽带入热量,kJ/kg; $Q_{热}$—热空气带入热量,kJ/kg; Q_1—锅炉的有效利用的热量,kJ/kg; Q_2—锅炉的排烟损失热量,kJ/kg; Q_3—燃料的化学不完全热损失热量,kJ/kg; Q_5—锅炉散热损失热量,kJ/kg; $Q_{增}$—增压机组损失的热量,kJ/kg; $Q_{烟}$—空气经过空气夹层吸收的热量,kJ/kg; $Q_{冷}$—冷空气带入热量,kJ/kg; $Q_{辅}$—涡轮增压机组的压气机压缩做功的热量,kJ/kg。

1.2　支配热量及锅炉效率的计算

根据热流图可知,锅炉的支配热量由 4 部分组成,其中燃料的低位发热量、雾化燃油所需蒸汽的热量、燃料带入的物理热 3 项都与常压锅炉的计算一致,但多了一项辅汽轮机带入的热量,计算为式(3);锅炉效率计算为式(4);辅汽轮机带入的热量计算为式(5):

$$Q_p^p = Q_H^p + Q_m + Q_\varphi + Q_{辅} \quad (3)$$

$$\eta = 1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (4)$$

$$Q_{辅} = 3600 \times 10^3 \times N_{bz} / B / \eta_{辅} \quad (5)$$

式中: Q_p^p—锅炉的支配热量,kJ/kg; N_{bz}—涡轮机不足功率,MW; η—锅炉效率,%; $\eta_{辅}$—辅汽轮机效率,%; q_2—锅炉排烟损失,%; q_3—燃料的化学不完全燃烧损失,%; q_4—燃料的机械不完全燃烧损失,%; q_5—锅炉的散热损失,%; q_6—涡轮增压机组的热损失,%。

1.3　各种损失的计算

1.3.1　q_2 的计算

q_2 是锅炉热损失中最主要的一项,舰用增压锅炉的排烟热损失一般在 10% ~20% 范围内。从图 1 增压锅炉装置的工作原理可知,从省煤器排出的烟气经过烟气涡轮做功后再排放,其排烟温度为烟气涡轮后的烟气温度,排烟损失 q_2 就大大降低,其计算式为[3]:

$$q_2 = (I_{yx} - \alpha I_{XB}^0) / Q_p^p \quad (6)$$

式中: I_{yx}—经过烟气涡轮换热后的排烟焓,kJ/kg; I_{XB}^0—冷空气理论焓,kJ/kg; α—过量空气系数。

1.3.2　q_3 与 q_4 选取

由于增压锅炉采用增压燃烧、拥有较大的容积热负荷,同时应用雾化蒸汽雾化燃油及燃烧器对冲的燃烧方式,所以在其正常工作的工况下机械不完全热损失 q_4 可以认为基本为零; 而燃料的化学不完全热损失变化范围为 0.2% ~0.5%[4],且随着负荷的增大而减小。

1.3.3　散热损失与保热系数的计算

锅炉热损失是由于锅炉与周围空气之间存在温差产生的,以每小时锅炉向外散热量计算,则得:

$$Q'_5 = \{ F_{对}\, a\Delta t + F_{辅}\, C\left[\left(\frac{T_{壁}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{均}}{100}\right)^4\right]\} \times 3.6 \quad (7)$$

式中: Q'_5—锅炉的向外散热量,kJ; $F_{对}$—被外界空气所冷却(对流换热)的锅炉外壳面积,m^2; a—从外壳表面到周围空气的放热系数,W/(m^2 · K); Δt—外壳表面与周围空气的平均温度差,K; $F_{辐}$—锅炉外壳辐射放热面积,等于 $F_{对}$,m^2; C—引用辐射系数,$\times 10^{-8}$ W/(m^2 · K^4); $T_{壁}$—锅炉外壳辐射放热表面的绝对温度,K; $T_{均}$—周围空气的绝对平均温度,K。

锅炉散热损失计算为:

$$q_5 = \frac{Q'_5}{Q_p^p B} \quad (8)$$

式中: B—锅炉燃料消耗量,kg/h。

根据增压锅炉的原理及热流图可知,空气夹层能吸收部分锅炉向外的散热,降低锅炉的向外散热损失 q_5,同时空气夹层吸收的这部分热量进入锅炉提高了炉膛内的理论燃烧温度,使锅炉的容积热负荷上升。此时的锅炉保热系数的计算为:

$$\Phi = 1 - \frac{q_5}{q_5 + \eta} \quad (9)$$

1.3.4　增压机组热损失计算

增压机组热损失是指从利用烟气涡轮带动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,计算为:

$$q_6 = (\Delta I_W - \Delta I_{wj}) / Q_p^p \quad (10)$$

式中: ΔI_W—烟气轮机中烟气焓降,kJ/kg; ΔI_{wj}—压气机内空气由涡轮机所产生焓升,kJ/kg。

1.4　炉内热量的计算

由于增压锅炉拥有独特的涡轮增压机组和空气

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

夹层设计，其进入锅炉炉膛的能量相对于陆用电站锅炉，不同在于其进入锅炉的冷空气变为了热空气，热空气能量的来自于涡轮增压机组的做功以及空气夹层的吸热。进入锅炉炉膛的热量计算为：

$$Q_{炉} = (100 - q_3)\, Q_H^p + Q_m + Q_\varphi + Q_{热} \tag{11}$$

$$Q_r = \alpha V^\circ (ct)_B \tag{12}$$

式中：$Q_{炉}$—进入锅炉炉膛的热量，kJ/kg；$(ct)_B$—锅炉空气夹层出口比焓（压气机出口空气的比焓），kJ/m^3；V°—燃料燃烧的理论空气量，m^3/kg。

1.5　炉膛热力计算

炉膛出口无因次温度为：

$$\theta_1 = \frac{T_1}{T_0} = \frac{B_O^{0.55}}{A + B_O^{0.55}} \tag{13}$$

式中：θ_1—炉膛无因次温度；T_1—炉膛出口烟气温度，℃；T_0—炉膛理论燃烧温度，℃；B_O—波尔兹曼准则系数。A—反应炉膛燃烧特性的参数，与锅炉结构、燃料种类及燃烧情况等有关的参数，对于船用锅炉其值变化范围为 0.9 ~ 1.2。

1.6　涡轮增压机组做功的计算

涡轮增压机组吸收了从经济器排出的烟气部分能量来提供给压气机做功，以此提高空气的压力及温度。当烟气涡轮吸收的能量不足压气机的需要时，这时需要辅汽轮机提供额外的能量来带动压气机，此时烟气涡轮、压气机以及辅汽轮机发出功率计算为：

$$N_w = \frac{B\Delta I_W \eta_W \eta_{Wj}}{3.6 \times 10^{10}} \tag{14}$$

$$N_y = G_y H_y / (\eta_y \eta_{yj}) \times 10 \tag{15}$$

$$N_{bz} = N_y - N_w + N_j \tag{16}$$

式中：N_w—烟气涡轮发出功率；N_y—压气机做功功率，MW；N_j—机械损失功率，MW；G_y—压气机中空气流量，kg/s；H_y—每公斤空气所消耗绝热压缩功，kJ/kg；η_y—压气机内效率，%；η_{yj}—压气机机械效率，%。

2　计算实例

根据上述计算式，对某增压锅炉有无空气夹层的影响进行了热力校核计算，计算结果如表 1 所示。

由表 1 可知，空气夹层的建立使锅炉的散热损失大大降低，提高锅炉的效率。并且，空气夹层吸收了锅炉散热的部分热量进入锅炉用以提高进入锅炉的空气焓值，从而提高了锅炉燃烧后的烟气焓值，最终提高了锅炉的单位容积热负荷、炉膛的理论燃烧温度及炉膛出口的烟气温度。

表 1　夹层吸热影响对比结果

	夹层吸热	无夹层吸热
q_5	0.42	1
Φ	0.987 7	0.987 6
η	80.3	79.7
Q_v/MW · m^{-3}	13.49	13.42
T_0/℃	1 970	1 960
T_1/℃	1 729	1 722

注：散热损失根据试验数据计算得出。

3　结　论

空气夹层是船用锅炉的独特设计，不但可以使锅炉的散热损失降低，而且可以提高炉膛的理论燃烧温度及出口烟温，提高了炉膛的容积热负荷，最终提高锅炉的效率。

针对船用增压锅炉的特点提出的考虑空气夹层吸热的热力计算方法使锅炉的热力计算更为全面直观。相对于原有不考虑加层吸热的热力计算结果，利用考虑空气夹层的热力计算方法得到的散热损失（q_5）与试验结果吻合的更好，炉膛容积热负荷（Q_v）和锅炉效率（η）更接近设计值，炉膛的理论燃烧温度（T_0）及炉膛出口的烟气温度（T_1）计算结果也更为接近于实炉运行情况。本研究所提出的热力计算方法可以为增压锅炉性能计算提供技术支撑。

参考文献：

[1]　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.

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

[3]　王建志，吴少华，季清洲. 船用增压锅炉热平衡计算[J]. 热能动力工程，2006，21(5)：470 - 472.

[4]　李彦军，姜任秋，孙宝芝. 船用增压锅炉热力计算方法有关问题分析[J]. 热能动力工程，2005，20(1)：93 - 96.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

89 ~ 93

With the help of CFD (computational fluid dynamics) software Fluent and by choosing a rational mathematical model, a numerical simulation was performed of a 600 MW ultra-supercritical wall-type-arranged tangentially-fired boiler. The influence of the aerodynamic field, temperature field, component field and different SOFA (separated over-fired air) air ratios on the NO_x generation and flue gas constituent characteristics of the boiler in question were mainly studied. The research results show that the in-furnace tangential circle is completely formed with a relatively good filling degree, but the tangential circle being formed is excessively large, the temperature nearing the wall surfaces is unduly high and the slagging tendency is conspicuous. Such a conclusion is in good agreement with that obtained from the fog tracer test performed on a test stand, having proved that the simulation is reliable. With an increase of the SOFA air ratio, the oxygen concentration in the main combustion zone will decrease and NO_x produced in the main combustion zone will also diminish. Under the condition of the SOFA air ratio being excessively high, the NO_x produced in the later-stage combustion will increase greatly and the NO_x emissions will not be necessarily low as a whole. Therefore, it will be necessary to rationally optimize the SOFA air ratio. **Key words**: wall type tangentially-fired boiler, NO_x, SOFA (separated over-fired air) air ratio

船用增压锅炉热平衡及热损失的计算方法 = **Method for Calculating the Heat Balance and Thermal Loss of a Marine Turbocharged Boiler** [刊,汉] WANG Yong-tang, WU Shao-hua (College of Energy Science and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) , CHEN Ming, WANG Jian-zhi (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 94 ~ 96

Heat balance calculation is crucial for calculating the thermodynamic performance of a marine turbo-charged boiler. By performing an analysis and explanation in the light of the structural and operation features of a turbocharged boiler with its turbocharged unit doing work, the authors have proposed a method for calculating the heat balance and thermal loss of a marine turbocharged boiler with the heat absorbed by the air interlayer being taken into account, presented a formula for calculating the heat entered into the furnace and various losses, especially the thermal loss and heat isolation coefficient of the turbocharged unit and performed a thermodynamic check calculation of the turbocharged boiler with or without the influence of the air interlayer. The calculated results approximate to the actual conditions. The calculation method being proposed by the authors can provide reference for thermodynamic performance calculation of marine turbocharged boilers. **Key words**: marine turbocharged boiler, heat balance, air interlayer, heat dominated, heat dissipation loss

基于最小二乘支持向量机的煤粉着火温度预测分析 = **Prediction and Analysis of Pulverized Coal Ignition Temperature Based on a Least Square Supportive Vector Machine** [刊,汉] CHANG Ai-ying, WU Tie-jun, ZHAO Hong, et al (National Key Laboratory on Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . -97 ~ 99

In the light of the problem relating to the economic and safe operation of a boiler that it is difficult to predict the ig-

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net