

# 炉膛压力对增压锅炉热力参数的影响

杜晓建, 陈 明, 刘丽华, 胡 威

(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:** 在炉膛压力变化情况下, 对增压锅炉相关热力计算参数的变化规律进行了系统分析, 并针对某型增压锅炉进行了实例计算, 得出了其烟气流速及炉膛黑度随压力的变化曲线。增压锅炉炉膛压力升高时, 其容积热负荷和炉膛黑度将增大, 炉膛出口烟温及线性流速等将减小, 而烟气的对流换热系数等参数不变。

**关 键 词:** 增压锅炉; 炉膛压力; 热力计算; 热力参数

中图分类号: TK229 文献标识码: A

## 引 言

由于增压锅炉采用了增压燃烧系统, 为炉膛提供高压、高密度、高温度的助燃空气, 使得炉膛燃烧压力可以达到 0.2~0.6 MPa, 大大强化了燃烧和换热<sup>[1]</sup>。在增压锅炉中, 由于炉膛压力的提高以及涡轮增压机组与锅炉的能量交换, 使增压锅炉热平衡计算方法与常规锅炉有较大的不同。目前, 国内对增压锅炉的热力计算参数的影响进行系统分析的文献较少, 因此本研究结合工程实践, 运用热工理论及相关热力计算标准, 对炉膛压力对增压锅炉热力计算的相关参数的影响进行了系统的综合分析, 指出了相关特性参数随压力的变化趋势, 并针对某型增压锅炉进行了实例分析。这对揭示增压锅炉复杂热工过程的内部机理及增压锅炉的设计、运行奠定理论基础。

## 1 炉膛压力对锅炉烟气性质的影响

炉膛压力对增压锅炉热力参数的影响可以通过分析热力计算的主要过程这样的脉络来进行, 分析时暂不考虑压力变化对各项热损失的影响, 即锅炉计算燃料消耗量不变。

### 1.1 炉膛压力对气体物性参数的影响

现行的锅炉热力计算中, 一般都视空气及烟气

为理想气体。在做空气量及烟气量的计算时, 所有空气和气体容积计算的单位都是标准体积。

根据理想气体状态方程, 当温度一定时, 压力的增加将引起空气和烟气密度的下降。对于理想气体, 动力粘性系数和导热系数均与压力无关。而理想气体的比热也仅为温度的函数, 与压力无关, 故空气及烟气的比热并不随压力的改变而改变。因此  $Pr = \frac{\mu}{\nu} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ , 即压力对普朗特数  $Pr$  也无影响。

热力计算时当气体压力偏离 101.325 kPa 超过 5% 时, 气体的运动黏度按标准计算为<sup>[2]</sup>:

$$\nu_p = \frac{p_0}{p} \nu_0 \quad (1)$$

式中:  $p_0$ —标准大气压力,  $\nu_p$ —气体压力为  $p$  平均温度下的气体黏度,  $m^2/s$ ;  $\nu_0$ —标准大气压力、平均温度下的气体黏度,  $m^2/s$

由式(1)可知, 当锅炉炉膛压力增加时, 烟气运动粘度将减小。

对于烟气平均热容量:

$$V_{Cpj} = \frac{Q - I''}{T_{11} - T_1''} \quad (2)$$

式中:  $Q$ —炉膛有效放热量,  $kJ/s$ ;  $T_{11}$ —理论燃烧温度,  $K$ ;  $T_1''$ —炉膛出口烟温,  $K$

计算烟气焓值时比热容定为常数, 炉型及燃料选定, 理论燃烧温度为定值, 则炉膛有效放热量及炉膛出口烟焓可以表示为:

$$Q - (\sum CV)_1 T_1 - I'' = (\sum CV)_2 T_1''$$

则:

$$\frac{d(V_{Cpj})}{dp} = \frac{-(\sum CV)_2 (T_{11} - T_1'') dT_1''/dp}{(T_{11} - T_1'')^2} + \frac{[(\sum CV)_1 T_{11} - (\sum CV)_2 T_1''] dT_1''/dp}{(T_{11} - T_1'')^2} = \frac{[(\sum CV)_1 - (\sum CV)_2] T_{11}}{(T_{11} - T_1'')^2} \frac{dT_1''}{dp} \quad (3)$$

易知  $(\sum CV)_1 - (\sum CV)_2 > 0$  而由烟气黑度的推导可知  $dT_1''/dR < 0$  所以得到  $dV_{Cpj}/dR < 0$  即烟

气平均热容量是压力的递减函数。

### 1.2 炉膛压力对烟气焓值的影响

对于理想气体,比定压热容是温度的单值函数,其比焓值与压力无关,且只是温度的单值函数,故锅炉烟气及其组分气体的焓值大小与大气压力无关。

虽然压力的变化会引起气体体积的改变,但在进行热力计算时采用的是气体标准状况下的体积。在气体质量不发生改变的前提下,其标准体积不会发生改变,故压力的变化并不会对热力计算中温焓表的数值产生影响。

## 2 炉膛压力对对流换热系数的影响

### 2.1 炉膛压力对锅炉受热面烟气质量流速的影响

按热力计算标准<sup>[2]</sup>,锅炉烟气线性流速计算为:

$$w_p = \frac{B_{a1} V_p \vartheta_p + 273}{f} \frac{1}{273} \quad (4)$$

式中:  $w_p$ —炉膛压力为  $P$  时的烟气线性流速,  $m/s$ ;  $B_{a1}$ —计算燃料消耗量,  $kg/s$ ;  $\vartheta_p$ —炉膛压力为  $P$  时的烟气温度,  $^{\circ}C$ ;  $f$ —流通截面积,  $m^2$ 。

根据理想气体状态方程及连续方程,可以得到锅炉在增压和常压情况下运行时烟气线流速的比值:

$$\frac{w_p}{w_0} = \frac{B_{a1} P}{B_{a10} P_0} \frac{P_0}{P} \frac{\vartheta_p + 273}{\vartheta_0 + 273} \frac{P_0}{P} \quad (5)$$

由此分析知炉膛压力的增加会导致炉膛出口烟温的降低,锅炉烟气的线性流速随炉膛压力的增加而减小;而已假定  $B_{a1}$  不变,因此,烟气质量流速不随炉膛压力而改变。

### 2.2 炉膛压力对雷诺准则数的影响

对于锅炉烟气来说,考虑气体运动黏度的压力修正,雷诺准则数为:

$$Re_p = \rho_p w_p d / \mu \quad (6)$$

由于动力粘性系数与压力无关,烟气质量流速在  $B_{a1}$  不变的情况下亦与压力无关,所以炉膛压力对雷诺数无影响。

### 2.3 炉膛压力对对流换热系数的影响

在锅炉受热面中,流体的运动均属受迫流动,其对流换热的准则关系式为:

$$Nu_p = \frac{\alpha_{dp}}{\lambda_p} d = CR_p^{\xi} P_p^{\eta} \quad (7)$$

前面已经得出雷诺数和普朗特数均与压力无关,故由式(7)可知,压力的变化对努谢尔特准则数无影响,对对流换热系数也无影响。

值得一提的是,如果改变锅炉结构,在压力不变的情况下,减小横向节距,此时流通截面积减小,质量流速就会提高,则对流换热系数便会增加。

## 3 炉膛压力对炉膛容积热负荷的影响

炉膛容积热负荷表征了单位炉膛容积和单位时间内的燃烧换热量,是炉膛结构性能的一个重要指标。影响增压锅炉炉膛容积热负荷  $q_v$  值关系式可表示为<sup>[3]</sup>:

$$q_v = \frac{273 \times 3600 P \varphi Q_H}{V_p \tau T_p} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,对于增压锅炉,当燃料的品牌、成分及其低位发热值确定时,锅炉的炉膛容积热负荷  $q_v$  与炉膛压力  $P$  炉膛火焰充满程度  $\varphi$ 、炉膛温度  $T_p$  和燃烧时间  $\tau$  有关,且  $q_v$  与炉膛压力  $P$  成正比。

## 4 炉膛压力对炉内换热的影响

由于炉膛压力的增加,增压锅炉的结构布置的更加紧凑,炉膛内辐射换热和对流换热将同时存在而不可忽略,炉内辐射换热量的多少,很大程度上取决于炉膛出口烟温的高低。如果送入炉膛的热量一定,某些因素引起炉膛出口烟温的升高,则表明炉内辐射换热量的减少,反之。根据现有的热力计算标准,炉膛出口烟温可表达为:

$$T_{11}'' = T_{11} \left[ M \left\{ \frac{\sigma_0 \psi F a T_{11}^3}{\varphi B_{a1} V_{cpj}} \right\}^{0.6} + 1 \right] \quad (9)$$

式中:  $M$ —经验系数,对于一定的燃料及燃烧器布置型式,其值一定,与压力无关;  $\psi$ —热有效系数,对于结构一定的锅炉,其值也为定值而与压力无关;  $V_{cpj}$ —烟气平均热容量,由上面的讨论知,其大小也与压力无关;  $T_{11}$ —理论燃烧温度,其大小也与压力无关;  $\varphi$ —保热系数;  $\sigma_0$ —玻尔兹曼常数;  $F$ —炉壁面积;  $B_{a1}$ —计算燃料消耗量。

因此,压力对增压锅炉炉膛辐射换热量是否有影响,关键在于压力对炉膛黑度  $a_{1y}$  有无影响。对增压锅炉,其炉膛黑度可以表示为:

$$a_{1y} = \frac{a_{1y}}{a_{1y} + (1 - a_{1y}) \psi} \quad (10)$$

### 4.1 火焰黑度与炉膛压力的关系

增压锅炉火焰黑度  $a_{1y}$  可计算为:

$$a_{ly} = m(1 - \bar{\epsilon}^{(k_1 \tau_1 + k_n)PS}) + (1 - m) \times (1 - \bar{\epsilon}^{-k_1 \tau_1 PS}) \quad (11)$$

式中:  $S$ —炉内介质的有效辐射厚度,  $m$ —炉膛压力, MPa;  $m$ —火焰发光系数, 取决于炉膛容积热负荷  $q_v$ , 其值可按文献 [4] 选取。

$$k_1 = 10 \left[ \frac{0.78 + 1.6 f_{H_2O}}{\sqrt{10 \tau_1 PS}} - 0.1 \right] \left[ 1 - 0.37 \frac{T_1''}{1000} \right] \quad (12)$$

式中:  $k_1$ —三原子气体的辐射减弱系数,  $1/(m \cdot MPa)$ ;  $f_{H_2O}$ — $H_2O$  的容积份额;  $\tau_1$ —火焰中三原子气体容积份额。

$$K_n = 0.03(2 - a_1'') \left( 1.6 \frac{T_1''}{1000} - 0.5 \right) \frac{C}{H} \quad (13)$$

式中:  $K_n$ —火焰中炭黑粒子的辐射减弱系数,  $1/(m \cdot MPa)$ ;  $C/H$ —燃料应用基中碳与氢含量的比值, 对于重油, 其值接近于 8。当  $a_1'' > 2$  时, 取  $K_n = 0$ 。

计算式确定后首先分析:

$$k_1 R_1 S = \left[ \frac{7.8 + 16 f_{H_2O}}{\sqrt{10 \tau_1 PS}} - 1 \right] \left[ 1 - 0.37 \frac{T_1''}{1000} \right] \times \tau_1 PS \quad (14)$$

由式 (14) 不能直接判断出  $k_1 R_1 S$  与压力  $P$  的变化关系, 假定  $T_1''$  随  $P$  的升高而降低, 如果最终由炉膛出口烟温计算式得出  $T_1''$  随  $P$  的升高而降低, 则假定正确。验证这一假定是很容易的, 当压力  $P$  升高时,  $T_1''$  降低, 则  $1 - 0.37 \frac{T_1''}{1000}$  升高。

$$\text{令: } y = \left[ \frac{7.8 + 16 f_{H_2O}}{\sqrt{10 \tau_1 PS}} - 1 \right] \tau_1 PS \quad x = \tau_1 S$$

$$\text{则: } \frac{dy}{dP} = \left[ \frac{3.9 + 8 f_{H_2O}}{\sqrt{10 Px}} - 1 \right] x \quad (15)$$

通常  $f_{H_2O} \geq 0$  取  $f_{H_2O} = 0$  要使  $dy/dP \geq 0$  则有:

$$x \frac{1.233}{\sqrt{P}} \leq 0 \quad (16)$$

解得:

$$0 \leq x \leq 1.233 \sqrt{P}$$

$$\text{即: } 0 \leq x \leq 1.233 \sqrt{P}$$

$$\text{又 } 0.3 \leq P \leq 0.5 \text{ MPa}$$

$$\text{则 } r = 0.3 \text{ 时, } S_{min} = 10.137 \text{ m}$$

而由实际的工程应用可知, 有效辐射层厚度  $s$  一般都远小于 10 m, 所以  $dy/dP > 0$  由此得到  $y$  是压力  $P$  的增函数, 即  $k_1 R_1 S$  随压力  $P$  的增加而增大。

对  $k_n PS$  令:

$$z = k_n PS = 0.03(2 - a_1'') \left( 1.6 \frac{T_1''}{1000} - 0.5 \right) \frac{C}{H} PS$$

则:

$$\frac{dz}{dP} = 0.03(2 - a_1'') \left( 1.6 \frac{T_1''}{1000} - 0.5 \right) \frac{C}{H} S$$

$$\text{易知: } a_1'' \leq 2 \quad 1.6 \frac{T_1''}{1000} - 0.5 > 0$$

则 同样是压力  $P$  的增函数。

因此, 由炉膛火焰黑度计算式可知  $a_{ly}$  是炉膛压力  $P$  的单增函数, 即炉膛火焰黑度随着炉膛内压力的增加而变大。

由式 (10) 可以知道对增压锅炉, 其炉膛黑度  $a_1$  是炉膛火焰黑度的单增函数。

综上所述, 最终可以得到炉膛黑度  $a_1$  是压力  $P$  的单增函数, 随着压力  $P$  的增大而增大。由炉膛出口烟温计算式可知, 炉膛压力升高, 炉膛出口烟温降低。即证明前面烟温变化的假设是正确的。同时也说明, 对同一形式的锅炉, 炉膛压力升高, 炉膛辐射换热量将会增加。

#### 4.2 计算实例

针对某船用锅炉, 对其炉膛出口烟温及炉膛黑度随炉膛压力的变化趋势进行了计算。部分相关计算参数为: 燃料国产 0 号重油, 炉膛压力变化范围 0.1~1.0 MPa, 过量空气系数 1.2, 燃料消耗量 2.5 kg/s, 锅炉进口空气温度 32 °C。计算结果如图 1~图 3 中的曲线变化情况。

图 1 为不同炉膛压力及炉膛出口烟温下的炉膛出口处烟气流速。

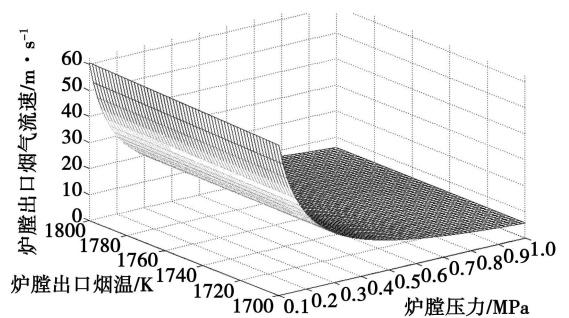


图 1 炉膛出口烟气流速与炉膛压力及烟温的变化曲线

图 2 为假定不同炉膛出口烟温 ( $T = 1600, 1700, 1750, 1800 \text{ K}$ ), 增压锅炉炉膛黑度随炉膛压力的变化曲线。从图中可以看出, 炉膛黑度随着炉

膛压力的增加而增加,而且炉膛的黑度随炉膛出口烟温的升高是降低的,这也可从图3炉膛黑度与炉膛出口烟温的变化曲线中得出相同的结论,而这也正好印证了前面结论的正确性。

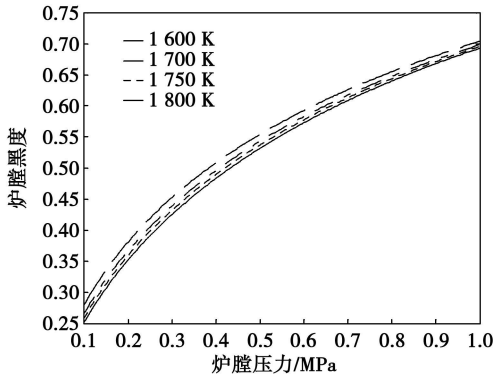


图2 炉膛黑度与炉膛压力的变化关系

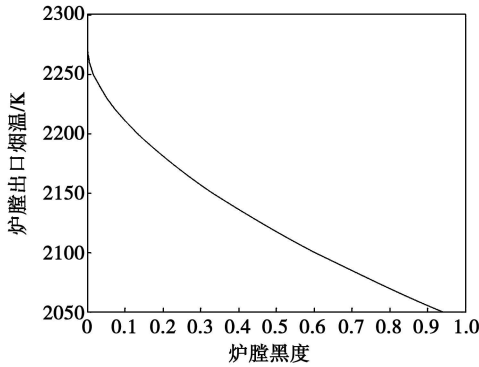


图3 炉膛出口烟温与炉膛黑度的变化关系

### 5 结论

当锅炉结构确定后在不考虑压力的增加对炉膛热效率的影响,结合热工基础理论,定性分析了压力变化对增压锅炉热力计算过程中相关参数的影响。通过上述分析得出如下结论:

(1) 锅炉烟气密度和炉膛容积热负荷与炉膛压力成正比;烟气线性流速、运动粘性系数与炉膛压力成反比;而烟气的质量流速、动力粘度、导热系数、比热、雷诺数、普朗特数以及焓值等不随压力变化。

(2) 炉膛黑度  $a_1$  是压力  $P$  的单增函数。对于增压锅炉,由于炉膛内烟气压力的增加,三原子气体辐射减弱系数的减小,使得炉膛烟气黑度升高,炉膛内的辐射换热大大增强,所以炉膛出口烟温降低。

(3) 随着烟气压力的增加,管间辐射换热系数增加,但对流换热系数没有影响,因此锅炉的总体对流换热系数略有增加。

### 参考文献:

- [1] 王建志. 船用增压锅炉热平衡计算 [J]. 热能动力工程, 2006 21(5): 470-472
- [2] 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
- [3] 李章, 张宁, 刘祥源, 等. 船用增压锅炉装置 [M]. 北京: 海潮出版社, 2000
- [4] 陈学俊, 陈听宽. 锅炉原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1981.

(编辑 陈 滨)

### 新技术、新工艺

## 涡轮机轮盘的金相诊断方法

据《Теплоэнергетика》2010年1月号报道,在检查涡轮机转子整锻式轮盘时,仔细检查了下列主要部位:内圆角、叶片槽、叶片根部、卸载孔铆钉连接。通过检查可以确定,进行无损检验时最复杂的部位应该是整锻式轮盘的T形叶片槽,叶片根部和它们可拆卸的轮盘固定处。

文章分析了将超声波检查法与金属磁性记忆法结合使用(以下简称结合检查法)对涡轮机转子轮盘进行金相检验的可行性。使用结合检查法对叶片槽、轮盘、叶片根部和它们的紧固件进行的综合检查,展示了应用此法的效果和前景。

作为标准试样法的代替者,应用结合检验法进行轮盘轮缘检验时,可由金属磁性记忆法完成应力集中区域的内外划分,进而用超声波检查信号的比较进行诊断。在此条件下不需要标准试样,中等水平的专业人员即可完成所有的检查。

(吉桂明 摘译)

炉膛压力对增压锅炉热力参数的影响 = Influence of the Furnace Pressure of a Turbocharged Boiler on Its Thermal Parameters [刊, 汉] / DU Xào jiā, CHEN Míng, LIU Lì huà et al (CSIC No. 703 Research Institute Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 635~638

Under the condition of the furnace pressure undergoing a change, systematically analyzed was the variation regularity governing the relevant thermal calculation parameters of a turbocharged boiler. A case calculation was performed of a certain type of turbocharged boiler and the curves of its flue gas flow velocities and furnace blackness changing with its furnace pressure were obtained. When its furnace pressure increases, its volumetric thermal load and furnace blackness will also increase. The flue gas temperature and linear flow speed at the outlet of the furnace etc. will decrease and the convection heat exchange coefficient and other parameters of the flue gas, however, will maintain unchanged. Key words: turbocharged boiler, furnace pressure, thermal calculation, thermal parameter

锅炉钢材表面处理后耐磨损性能试验研究 = Experimental Study of the Wear-resistant Performance of the Steel Heating Surfaces of a Boiler After a Surface Treatment [刊, 汉] / ZHAO Xian Ping, YIN Xiang de, LU Shuai (College of Energy Source and Environment Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 639~641

Experimentally studied was the performance of the commonly used alloy steel 12Cr1MoV to resist hot state flying ash erosion and wear at a temperature ranging from 300 to 450 °C on the heating surfaces of a boiler after a surface boronizing treatment. The research results show that the alloy steel 12Cr1MoV following the treatment has a relative surface mass wear and tear wastage less than that prior to the treatment, i.e. the wear resisting property is improved. The relative surface mass wear and tear wastage will first decrease and then increase with an increase of the temperature. After the test, the test pieces were analyzed by using a SEM (scanning electron microscope) and a glow discharge spectrometric analyzer. It has been found that the thicker the test piece surface permeation layer, the higher the boron and titanium element content in the permeation layer and the more uniform the boron and titanium element distribution, then the better the wear resisting property. Key words: utility boiler heating surface, hot state flying ash wear, boronizing

FSSS的故障树建模及可靠性分析 = Modeling of a FSSS (Furnace Safety Supervisory System) Fault Tree and Its Reliability Analysis [刊, 汉] / SHEN Ji chen, LIXào Guang, LI Yang (College of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin, China, Post Code: 132012), LIU Xu Guang (Rizhao Iron and Steel Co. Ltd., Rizhao, China, Post Code: 276806) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 642~647

Described were a furnace safety supervisory system and its difference from a basic process control system when serving as a safety instrumentation system. A modeling of the fault tree of the system under discussion was performed and the relationship between various parts of the system was set up. Through the modeling of a fault tree, the above-