

# 增压锅炉机组重要热工参数的选择

沈志刚<sup>1</sup>, 邹积国<sup>2</sup>, 姜任秋<sup>1</sup>, 陈起铎<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学, 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:** 介绍船用增压锅炉的主要技术特点, 由此对其热力计算中重要热工参数的选择进行了探讨, 为研究船用增压锅炉机组的热力计算技术奠定一定理论基础。

**关键词:** 船用增压锅炉机组; 热工参数; 选择

中图分类号: U664.111 文献标识码: A

## 1 前言

增压锅炉是船用蒸汽动力装置主锅炉的发展方向, 加强对船用增压锅炉的研究和发展势在必行。目前我国尚没有完整的船用增压锅炉热力计算标准和资料, 也没有相应的试验验证手段, 研究中对于其中重要的热工参数的选择较为困难。笔者根据近几年国内对船用增压锅炉技术的研究成果并结合自己的研究实践, 对其中重要热工参数的选择提出一些看法。

## 2 增压燃烧技术特点

所谓增压燃烧, 就是利用压气机取代鼓风机产生高增压比的压缩空气, 并送入炉膛, 为炉膛提供高密度与高温度的助燃空气所进行的燃料燃烧。由于采用增压燃烧技术, 使得锅炉具有如下主要特点:

(1) 重量轻、尺寸小。提高受热面热负荷, 增大各受热面的吸热率, 是减轻锅炉重量, 减小锅炉尺寸的有效措施。炉膛中, 空气增压比  $\epsilon$  与炉膛容积热负荷  $q_{\text{炉}}$  之间具有近似的正比关系, 即:

$$q_{\text{炉}} = \epsilon^n q_0 \quad (1)$$

式中:  $q_0$ —常压锅炉的炉膛容积热负荷,  $\text{kW}/\text{m}^3$ ;  $n$ —指数, 由实验得出, 其值接近 1。

从上式可知, 与常压锅炉相比, 增压比越大, 炉膛容积热负荷越高, 使得炉膛的容积大大减小, 有效减小了锅炉尺寸和降低重量。

在对流受热面中, 其吸热率  $q$  用下式表示:

$$q = K \Delta t \quad (2)$$

式中:  $K$ —传热系数,  $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta t$ —对数平均温差, 又称温压,  $^\circ\text{C}$

由于管束吸收烟气辐射热量相对于吸收对流热量很少, 故忽略辐射热量。在计算传热系数  $K$  过程中, 和烟气压力有关系的只有烟气线性速度  $W$  和运动粘度系数  $\nu$ , 表达式如下:

$$K = f((W/\nu)^n) \quad (3)$$

式中:  $n$ —指数, 与烟气冲刷受热面的特性有关, 其值小于 1。

增压燃烧时的运动粘度系数  $\nu$  与常压的运动粘度系数  $\nu_0$  有如下关系:

$$\nu = 1.033 \nu_0 / P = \nu_0 / \epsilon \quad (4)$$

常压燃烧的烟气线性速度  $W_0$  和增压燃烧的烟气线性速度  $W$  分别计算如下:

$$W_0 = \frac{BV_{\Gamma}(\theta_{\text{cp}} + 273)}{3600 \times 273f} \quad (5)$$

$$W = \frac{1.033BV_{\Gamma}(\theta_{\text{cp}} + 273)}{3600 \times 273fP} \quad (6)$$

式中:  $B$ —锅炉燃料消耗量,  $\text{kg}/\text{h}$ ;  $V_{\Gamma}$ —烟气总容积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $\theta_{\text{cp}}$ —受热面烟气平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $f$ —烟气流通过面积,  $\text{m}^2$ ;  $P$ —烟气压力,  $\text{MPa}$ 。

在增压燃烧下, 若不希望烟气流动阻力有较大增加, 往往可通过诸如减小  $f$  等措施, 使烟气线性速度  $W$  取得与常压燃烧时的烟气线性速度  $W_0$  相一致, 即:

$$W = W_0 \quad (7)$$

此时由于减小  $f$ , 使得锅炉尺寸也随之减小, 将式(4)、式(7)代入式(3)中, 即得到:

$$K = f\left[\left(\frac{W_0}{\nu_0/\epsilon}\right)^n\right] = f((W_0/\nu_0)^n \epsilon^n) = \epsilon^n K_0 \quad (8)$$

从上式可知, 与常压锅炉相比, 增压比越大, 即使不增加实际烟气线性速度, 其传热系数仍然成  $\epsilon^n$  倍增大, 也即增大了各受热面吸热率, 使得对流受热面积大为减小, 由此减小锅炉尺寸和降低重量。

此外,由于增压机组既起着常压锅炉鼓风机的作用,又起着空气预热器的作用,也是增压锅炉重量尺寸减小的另一原因。

(2) 经济性好。从锅炉排出的烟气具有足够的热量,推动增压机组做功,而不必消耗锅炉产生的蒸汽。相对鼓风机而言,增压机组省去大量锅炉耗汽损失(这部分耗汽量约达8%~14%或20%~25%之多。前者对风机压头10~14 kPa而言,后者对风机压头30 kPa而言),提高了整个动力装置的经济性。

(3) 机动性好。增压锅炉炉膛尺寸减小,锅水、金属及其它非金属元件的蓄热能力也降低,亦即其启动与改变负荷的热惯性减小。在实现全自动化的条件下,锅炉从冷态达到全负荷工况的时间缩短,如美国福斯特—惠勒增压锅炉为15 min,前苏联KB90型增压锅炉为8~15 min,多次强制循环增压锅炉只需5~8 min。而较先进的船用常压锅炉需17~30 min。其它诸如适应负荷变化能力和快速停炉等机动性能也较常压锅炉好。比如,福斯特——惠勒增压锅炉,在30 s内能由10%功率达到全功率。

### 3 重要热工参数的选择

#### 3.1 过剩空气系数 $\alpha$

过剩空气系数  $\alpha$  是锅炉运行重要的经济性指标,其大小与燃料品质、燃烧方式、燃烧设备和锅炉负荷情况有关。对于常压锅炉而言, $\alpha$  太小则不能保证燃料完全燃烧, $\alpha$  太大则会增加锅炉排烟热损失。而排烟热损失增加,将降低锅炉效率,锅炉经济性下降。因此只要能够满足燃烧要求,燃烧损失不至太大,则应尽可能减小  $\alpha$ 。对于增压锅炉机组, $\alpha$  值增大时,燃气轮机产生的功率要比压气机消耗的功率增长得快,增压机组的剩余功率得以提高,因此  $\alpha$  值的增加也有其有利的一面。实际上,为避免船用增压锅炉过于笨重和庞大,增压机组所产生的剩余功率往往得不到利用,此时增压机组只起到增压和预热空气的作用,因而  $\alpha$  值的选取便和常压锅炉一样,应当是越小越好。

从燃烧角度分析看,增压燃烧时炉膛中充满了高密度的高温空气,极大地强化了燃烧,因此增压锅炉的  $\alpha$  值有条件选得更小一些,推荐  $\alpha = 1.10 \sim 1.20$ 。

#### 3.2 炉膛容积热负荷 $q_v$

$q_v$  是对可靠性和重量尺寸影响最大的指标,其大小对一般锅炉而言,主要受超负荷时砖墙的可

性、燃烧的完全性和低负荷时燃烧的稳定性的限制。对于增压锅炉, $q_v$  在很大程度上还受燃烧器的布置和受热面极限热负荷的限制。

在增压锅炉内,由于烟气压力和温度以及反应物浓度较高,燃烧大大强化,因而燃料着火时间提前,油滴在炉内燃尽时间相对延长。ЦКТИ 试验研究证实了这一点。试验指出,在压力燃烧炉膛内,热强度的分布是随火炬喷出的距离而增大的;当压力提高而炉膛热负荷维持不变,则此时近火焰根部区域的炉膛断面热负荷有提高的趋势。这样一来就有可能在不增加燃烧损失的前提下,组织较高的炉膛容积热负荷。一般认为  $q_v$  提高的多少与压力提高的大小成正比,由于燃气的比容反比于绝对压力,燃烧过程所需空间减小,给定的炉膛容积内可以成比例地增加燃料和空气量。因此用来衡量炉膛工作的好坏应该是相对于大气压力下的炉膛热负荷  $BQ_v^p / V_T P_T$ , 而不是总的热负荷值  $BQ_v^p / V_T$ 。

一般而言,总是力求提高炉膛容积热负荷。对于圆形炉膛,由于采用双面燃烧,燃烧器的布置不会有太大困难, $q_v$  可以取用较大数值。然而,由于必须保证一定的水循环高度和较为满意的近似圆形的炉膛截面,使得炉膛的水冷度大大减小,则  $q_v$  值不宜取得太大,以保证炉膛具有较低的出口温度,即炉膛出口温度维持在  $1800^\circ\text{C}$  以下,能确保炉膛砖墙和锅炉材料工作的可靠性。为此,推荐  $q_v$  取值为  $17 \sim 30 \text{ MW/m}^3$ 。

#### 3.3 炉膛出口烟气温度

烟气从炉膛流出以后,传热方式和流动方式都发生明显变化:传热方式基本上从辐射变为对流,因而炉膛出口烟气温度是决定辐射受热面和对流受热面吸热比例的指数,烟气温度过低,势必要加大炉膛容积,使得炉膛容积热负荷下降;烟气流动方式从炉膛中的大空间进入密集的对流受热面,烟气线性速度极大提高,致使对流换热强烈,烟气温度过高,易造成对流区域内部分部件的安全性下降(如过热器管壁及锅炉护板内壁温度过高等)。由此可见,炉膛出口烟气温度应从两个方面,即经济性和安全性来确定。

一般来说,在确保所需的炉膛容积热负荷和锅炉部件工作安全可靠前提下,希望适当提高炉膛出口烟气温度,以提高对流区域的吸热率。文献[1]推荐船用增压锅炉炉膛出口烟气温度在  $1600 \sim 1800^\circ\text{C}$  之间。

### 3.4 烟气线性流速 $W$

烟气线性流速  $W$  的大小取决于锅炉燃料消耗量、每公斤燃料生成的烟气体积、烟气温度以及烟气流通过截面等因素。如何提高烟速来强化对流传热、降低锅炉重量尺寸是现代船用锅炉发展中至关重要的问题。在常压锅炉中, 由于风机压头的限制, 烟速的继续提高比较困难。因为风机的巨大耗汽量对动力装置的经济性可以说是得不偿失。增压锅炉就不受此限制。由于增压机组代替了鼓风机, 用来提高风压的机械功取自烟气本身在排出锅炉时所具有的能量。因此, 增压锅炉允许有较大的压降使烟速大大提高, 也即烟气阻力的增加在增压锅炉中已不成为主要矛盾。用增压来强化传热无疑是可取的。当然, 选择合理而恰当的烟速, 主要还是取决于锅炉烟气侧压力降的可能程度, 这涉及到锅炉受热面的结构布置以及增压机组的工作稳定性、启动功率要求和结构等问题。实际设计中, 对于压气机出口压力为 2~6 大气压时, 通过锅炉的压力降约为压气机出口压力的 5%~10%。当然, 增压机组所建立的压头愈大愈有利于提高烟速。

研究表明, 增压锅炉烟气线性流速高达 200~300 m/s(此为折算成常压下的速度值), 重量流速高达 300~500 N/(m<sup>2</sup>s) 都是允许的, 此时传热系数约可提高到 320~470 W/(m<sup>2</sup>·°C)。

### 3.5 燃气轮机进口烟气温度 $t'$

燃气轮机进口烟气温度  $t'$  的选取应当考虑装置的剩余功率、增压机组的金属材料及重量尺寸, 以及所选用的增压比等因素。

由简单的计算可知,  $\epsilon$  和  $t'$  的提高对燃气轮机功率的提高均有利, 并且只有两者同时提高时对功率的影响最为显著。然而  $t'$  的提高对锅炉本身未必有利。这是因为对同一排烟温度来说, 把燃气轮机置于高烟温区, 就等于需要将锅炉受热面移向受热强度较弱的低烟温区, 显然增加了受热面的重量尺寸。同时, 受燃气轮机叶片材料的限制, 避免其采用高级金属材料, 故  $t'$  不能选择过高。

基于上述, 笔者认为若增压机组只起压缩和预热空气作用时, 即使材料无问题, 也不能说  $t'$  越高越好。只有在希望使整个装置中的增压机组部分功率比重提高时,  $t'$  尽量提高才是最有利的。在船舶中, 若利用燃气轮机的剩余功率, 将增加传动装置, 增大整个装置的复杂性。反之, 若不利用剩余功率, 其能量损失严重。笔者建议在采用  $\epsilon=3\sim 4$  时,  $t'$  尽量控制在 450~550 °C 范围内。这样, 全负荷下的剩余

功率就不会太大, 而剩余功率为零的平衡点便可移向常用工况附近。

### 3.6 压气机增压比 $\epsilon$

对增压比  $\epsilon$  的选取: 应该考虑燃烧的完全性、增压机组的功率和重量尺寸、护板的强度与密封性等因素。

对整个装置而言, 提高  $\epsilon$  有其有利的一面:

(1) 燃烧化学反应速度提高。化学反应速度与  $\epsilon^{n-1}$  成比例, 对炭粒燃烧, 化学反应级数  $n=2$ , 故化学反应速度随  $\epsilon$  的提高单值性地提高了  $\epsilon$  倍。同时, 由于空气的密度随  $\epsilon$  的提高而增大, 化学反应速度又有所提高。(2) 烟气的辐射力大大增加, 从而使辐射传热有所增加。(3) 空气体积减小至  $1/\epsilon$  倍, 对减小调风机构的尺寸十分有利, 从而使得燃烧器在小尺寸炉墙上的布置较为容易。(4) 增压机组剩余功率增大, 动力装置总功率和总效率因而提高。

然而, 提高  $\epsilon$  也有其不利的一面: (1) 锅炉护板的强度要求更高, 密封更困难, 增大了护板在结构处理上的困难。(2) 增压机组的重量尺寸变大, 其设计、安装也变得更为复杂。(3) 增压机组剩余功率如不利用, 必然导致增压机组热损失增加, 锅炉效率下降。一般来讲, 增压比  $\epsilon$  在 3~6 的范围内较为恰当。

由上述分析, 笔者认为, 对要求剩余功率不大或不要求利用剩余功率的装置而言(船舶上常常如此), 只要能够满足燃烧条件, 尽可能取用较小的  $\epsilon$  值。推荐  $\epsilon$  在 3~4 范围内取值。

## 4 结束语

笔者用上述观点对数型船用增压锅炉机组进行热力校核计算, 取得了与实际情况相一致的结果。由此可见, 我们在船用增压锅炉机组热工基础理论研究方面取得一定突破。

### 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] 全苏热工研究所, 中央锅炉透平研究所. 锅炉机组热力计算——标准方法(1973年版)[M]. 上海: 上海工业锅炉研究所, 2001.
- [3] 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.
- [4] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.

(何静芳 编辑)

the research of long-term dynamic characteristics of a supercritical once-through boiler. **Key words:** supercritical once-through boiler, long-term dynamic characteristics, state-space method, modeling and simulation

增压锅炉机组重要热工参数的选择 = **The Selection of Major Thermodynamic Parameters for a Supercharged Boiler Unit** [刊, 汉] / SHEN Zhi-gang, JIANG Ren-qiu (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), ZOU Ji-guo, CHEN Qi-duo (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 27 ~ 29

The major technical features of a marine supercharged boiler are described and, on this basis, the selection of important thermotechnical parameters is explored during the thermodynamic calculations of the boiler. This has laid a theoretical basis for the study of thermodynamic calculation techniques for a marine supercharged boiler unit. **Key words:** marine supercharged boiler unit, thermotechnical parameters, selection

煤粉炉中痕量元素迁移影响因素的研究 = **A Study on the Influencing Factors of Migration of Trace Elements in a Pulverized Coal-fired Boiler** [刊, 汉] / HUANG Ya-ji, JIN Bao-sheng, ZHONG Zhao-ping, et al (Key Laboratory of Education Ministry on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 30 ~ 34

By using a Z-8200 atomic absorption spectrophotometer and a VF-320 X-ray fluorescent spectrograph the content of nine trace elements in raw coal, bottom slag and fly ash was measured quantitatively in a 220 t/h pulverized coal-fired boiler. On the basis of an improved relative enrichment factor of Meij and from the perspective of two aspects, namely, bottom slag and fly ash, a systematic analysis was performed of the influence of various factors on the law of migration. Such factors include: temperature, oxygen content, fly ash diameter, the properties of trace elements per se and the characteristics of coal rank. The results of the analysis indicate that an rise in furnace temperature can quicken the volatilization of some of the trace elements. The content of Cr and Mn in fly ash and bottom slag is comparable, but the two elements differ markedly in respect of relative enrichment factor. Low oxygen content does not always promote the volatilization of all trace elements. The content of Pb, Cd, Zn and Cr in the bottom slag and fly ash does not assume a linear relationship with their respective boiling points. The smaller the diameter of the fly ash, the greater the enrichment factor of the trace elements. The tendency of variation of various trace elements with the decrease in fly ash diameter has been found to be not identical for different trace elements. **Key words:** trace elements, relative enrichment factor, migration law, pulverized coal-fired boiler

燃煤排放正构烷烃类有机化合物的特征与形成演化机理研究 = **An Investigation on the Characteristics of the Discharge of Normal Paraffin Organic Compounds During a Coal-burning Process and Their Related Formation/evolution Mechanism** [刊, 汉] / LIU Hui-yong, SUN Zhi-kuan (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), SUN Jun-min, et al (Environment Protection Office under the Hunan Provincial Electric Power Co., Zhengzhou, China, Post Code: 450000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 35 ~ 38

An analysis was conducted of the content distribution and characteristic changes of normal paraffin compounds discharged during the process of flue-gas temperature reduction at Yunnan Yangzonghai Power Plant, Guizhou Guiyang Power Plant and the Experimental Power Plant of Beijing Tsinghua University. The above-mentioned content distribution and characteristic changes identified during the analysis were compared with those in the aerosol sample taken at the flue duct leeward side. After an investigation the authors hold that the formation and evolution of the normal paraffin compounds during a coal-burning process represents an important formative stage of complicated organic pollutants. In addition, the mechanism of the change of molecular characteristics in the process of coal burning and flue gas temperature reduction constitutes a major distinguishing feature specific to a free radical polymerization and cracking. **Key words:** normal paraffin, formation and evolution