

# 舰船锅炉炉膛热力计算方法的修正

李志涛<sup>1</sup>, 张钰辉<sup>1</sup>, 陈 滨<sup>1</sup>, 原立涛<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2. 黑龙江省煤炭工业学校, 黑龙江 哈尔滨 150009)

**摘要:** 针对舰船锅炉炉膛的特点, 在实践中分析比较了《73年联合标准》等不同方法的计算结果, 推荐一种适应锅炉炉膛变工况热力计算的修正方法。

**关键词:** 舰船锅炉; 热力计算; 炉膛传热

中图分类号: TK212 文献标识码: A

## 1 引言

炉膛内的传热和炉膛出口烟气温度对锅炉的结构、使用性能和安全可靠性能都有深远影响, 因此在锅炉设计时, 设计者们都把炉膛传热计算看成是锅炉热力计算中极其重要的部分; 锅炉科研人员也长期致力于炉膛传热的研究, 力求提出一种简单方便、适用范围较广、又较精确的计算方法。但是, 炉膛传热过程极其复杂, 到目前为止尚没有完善的、准确的计算方法。国内外多采用经验或半经验公式来计算, 有些计算结果的误差之大是可想而知的。

当前, 我国在舰船锅炉设计中炉膛计算的依据主要是同类型锅炉的计算书和原苏联 1973 年版《锅炉机组热力计算标准方法》(以下简称《73 年联合标准》), 以及原苏联一些著名学者的有关舰船锅炉的著作, 尚未建立一套较完善的计算方法。同类型锅炉的计算书中的计算方法也是在对该型产品进行了大量试验后修正而得, 它只适用于限定的炉膛结构。

我国设计的舰船锅炉炉型均是圆形炉膛。这种炉型具有良好的重量尺寸指标, 在额定工况下具有高的炉膛容积热负荷、炉膛火焰充满度好, 负荷变化范围大, 能够适应舰船动力装置对可靠性、经济性、机动性、工况适应性等的要求。

也就是说, 在不同运行工况中, 炉膛容积热负荷  $q_v$  将在 10:1 范围内变化, 空气过剩系数  $\alpha$  可能在 1.10~1.80 甚至更大的范围内变动, 燃烧火焰截面和炉膛火焰充满度以及炉膛空气动力场等都将有很大变化, 这将直接影响炉膛内的辐射传热, 从而影响炉膛出口烟气温度。

众所周知, 炉膛出口烟气温度是炉膛的一个非常重要的热力特性, 它决定着锅炉的可靠性、炉膛温度水平、燃烧完善程度和稳定性; 在设计时合理确定炉膛出口烟气温度, 能使炉膛辐射受热面和炉膛后部的对流受热面的匹配优化。对于舰船锅炉, 如能精确地计算出各工况的炉膛出口烟气温度, 将使锅炉为动力装置运行在各个工况时提供稳定的蒸汽参数有了保证。

我们在舰船锅炉的研制过程中应用了多种方法, 积累了一些设计经验, 本文对此讨论, 意图获得供当前应用的较合适的计算方法。

## 2 现有计算方法的分析和讨论

《73 年联合标准》是原苏联 ЦКТИ—ВТИ (中央锅炉汽轮机研究所—全苏热工研究所) 经过大量试验及理论分析, 联合制订的一套较为完整、全面的计算方法, 主要适用于固定式电站锅炉。这项标准方法对炉膛传热计算中几个有重要影响的参数(火焰黑度、系数  $M$ 、污染系数)作了较大修正。标准仍然是以原苏联科学技术博士古尔维奇 (А. М. Гурвич) 教授的理论为依据, 结合他和他的同行们在锅炉研究方面的经验, 在我国锅炉行业也得到广泛的应用或参照。

但是, 在我国电站锅炉的设计中, 尽管大多采用了这些标准方法(包括《57 年 ЦКТИ 标准》、或加《62 年通报》、或《73 年联合标准》), 有关的工程技术人员还都根据自己积累的经验作了某些修正。我们在舰船锅炉设计中, 也是采用上述几项标准方法为主要依据进行热力计算的。

### 2.1 《73 年联合标准》的规定方法

按此方法, 炉膛出口温度的计算公式如下:

$$\Theta''_L = \frac{Bo^{0.6}}{Ma_L^{0.6} + Bo^{0.6}}$$

$$T''_L = \Theta''_L \cdot T_j$$

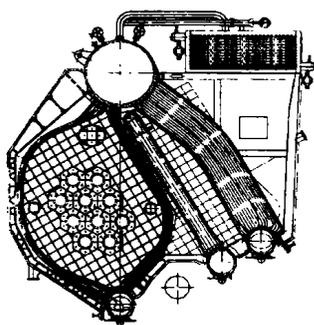
式中:  $T''_L$ —炉膛出口烟温, (K);  $T_j$ —绝热燃烧温度, (K);  $\Theta''_L$ —炉膛出口无因次温度;  $B_0$ —波尔兹曼准则;  $a_L$ —炉膛系统黑度;  $M$ —系数。它决定于燃烧方式、燃烧工况、燃料、火焰形状及火焰温度最高点的相对位置等。一般情况, 火焰温度最高点的相对位置主要决定于燃烧器的布置。

$M$  值由下式计算:

$$M = A - B \cdot Xr$$

式中  $Xr$ —燃烧器布置的相对位置;

$A$  和  $B$ —取决于燃料和燃烧方式。对燃气或液体燃料时取:  $A = 0.54$ ;  $B = 0.2$ 。



对于舰船锅炉所采用的圆形炉膛结构, 炉膛出口位于整个后墙, 其燃烧器布置于炉膛的中间部位(如图 1 所示), 根据负荷要求成对投入, 两侧对冲燃烧, 火焰最高温区也基本位于炉膛中心部位, 所以按此标准方法计算出各工况下的  $M$  值基本相同, 约在 0.445 左右。锅炉在高工况时, 炉膛火焰充满度很高,  $M$  的计算值基本能满足要求。但在中低工况时, 由于炉膛火焰充满度的降低, 炉膛热负荷也大幅度下降, 所以,  $M$  的计算值就不能真实地反映炉膛温度场和炉膛黑度对炉膛辐射传热的影响, 造成很大的计算偏差。

图 1 舰船锅炉结构示意图

2.2 别尔洛夫计算方法

原苏联很多学者对于圆形炉膛的炉膛热力计算的修正进行了大量的工作, 别尔洛夫(Г. В. Берлов)在文献[3]中对基于《57年ЦКТИ标准》的公式中的综合系数  $M$  作了修正。修正的建议如下:

当炉膛壁面热负荷  $\frac{B \cdot Q_{Dw}^Y}{F_L} \geq 0.9304 \times 10^3$  kW/m<sup>2</sup>

$$M = 0.445;$$

当炉膛壁面热负荷  $\frac{B \cdot Q_{Dw}^Y}{F_L} < 0.9304 \times 10^3$  kW/m<sup>2</sup>

$$M = \frac{1}{0.7 + 1.72 \times 10^{-3} \cdot \frac{B \cdot Q_{Dw}^Y}{F_L}}$$

式中,  $B$ —燃料消耗量, kg/s

$Q_{Dw}^Y$ —燃料低位发热值, kJ/kg

$F_L$ —炉膛炉墙表面积, m<sup>2</sup>

正如古尔维奇(А. М. Гульвич)解释的那样: 经过试验表明, 炉膛出口烟温的计算结果在炉膛壁面热负荷小于  $0.9304 \times 10^3$  kW/m<sup>2</sup> 时, 炉膛出口烟温的计算值明显高于实测值, 随着炉膛壁面热负荷的降低, 此差值也增大。

从计算结果看, 我们认为这个修正较为适当。但要说明的是, 计算中火焰黑度、炉膛黑度、污染系数等必须按《57年ЦКТИ标准》规定来选取, 而这些参数在此后的各计算标准方法版本直至《73年联合标准》均已作了大的改动, 对炉膛辐射传热特性及各因素的认识更加完整。因此, 在《73年联合标准》的基础上应用此修正方法时, 对  $M$  的修正公式必须进行调整。

### 2.3 普希金计算方法

原苏联普希金(Н. И. Пущин)教授在文献[4]中推荐了依据炉膛出口过剩空气系数的大小建立的化学准则修正的方法, 即炉膛传热计算基于公式:

$$\frac{\Theta''_L}{1 - \Theta''_L} = \frac{1}{M} \cdot (\Pi \frac{B_0}{\alpha_L})^{0.6}$$

$$\Pi = \frac{1.3\alpha^2}{\alpha^2 + 2(\alpha - 1)}$$

式中  $\Pi$ —考虑炉膛出口过剩空气系数  $\alpha$  影响的化学准则, 其余符号同上。

上述公式是原苏联研究人员对锅炉负荷变动范围较小的固定式蒸气锅炉炉膛传热进行广泛试验研究后得到的。化学准则  $\Pi$  的修正推荐在炉膛出口过剩空气系数大于 1.35 或小于 1.1 时应用, 在此条件下炉膛出口烟温的计算值与实测值较为吻合。此修正方法也被用于锅炉变工况时的炉膛计算(计算时的系数  $M$  仍按标准方法查用), 但是, 其效果不理想, 这在计算中得到了证实。

用上述三种方法计算的计算结果与实测值列于表 1。

表 1 三种炉膛传热计算方法的计算结果与实测值

锅炉负荷	100%		39%		13%	
项 目	$T''_L$ (°C)	$\Theta''_L$	$T''_L$ (°C)	$\Theta''_L$	$T''_L$ (°C)	$\Theta''_L$
方法 1	1 633.1	0.904 5	1 448.7	0.862 9	1 217.9	0.822 9
方法 2	1 588.2	0.883 2	1 383.1	0.830 1	912.7	0.654 4
方法 3	1 633.1	0.904 5	1 440.2	0.858 6	1 197.7	0.811 8
实测值	1 590	0.884 0	1 300	0.788 4	887	0.640 3

比较看出,用不同方法计算额定工况时的炉膛出口烟温与实测值比,误差均小于 100 °C,其中以第二种方法为最小。

由中低工况时的计算结果可看出,用《73 年联合标准》(第一种方法)和第三种方法计算的误差都随着热负荷降低而急剧上升;第三种方法计算的误差随着热负荷降低而上升的速率比第一种方法稍有缓和,但仍然不低。用第二种方法计算时,计算误差变化很平缓,且误差绝对值都能小于 100 °C。

### 3 适用于舰船锅炉炉膛热力计算的修正方法

由以上分析可知,《73 年联合标准》的炉膛传热计算的理论依据比前几项标准方法要完善,特别是对炉壁的辐射特性的研究和认识有很大进展,采用热有效系数  $\Psi$ (定义为辐射受热面吸热量与投射到炉壁上的热量之比)以及污染系数  $\xi$  选用值的修订对准确进行炉膛辐射传热计算十分有利。而考虑到燃料种类、燃烧方式、炉型、燃烧器布置及火焰中心位置等因素的综合修正系数和火焰黑度的计算更趋合理。

因此,以《73 年联合标准》为基础,根据计算对象的特点对其进行必要的修正,是可以用作舰船锅炉炉膛热力计算方法的。

分析认为,在燃用液体燃料时,应当考虑到发火焰在炉膛中占领的容积和对炉膛内烟气温度的影响,在炉膛出口过剩空气系数过大或过小时,采用化学准则 II 进行修正是必要的。但是,随着热负荷的降低,仅这项修正便显得不足了。而炉膛壁面热负荷在一定程度上可以反映在高热负荷的舰用锅炉炉膛传热中对流传热的影响,因而在采用化学准则 II 进行修正的同时,用炉膛壁面热负荷对中低工况炉膛热力计算进行修正是可行的。

因此,根据经验、实测数据和计算,对于高热负荷的锅炉炉膛,我们采用了文献[4]中推荐的用考虑炉膛出口过剩空气系数影响的化学准则修正的计算公式(见 2.3),在中低工况时,同时还参照文献[3]推荐的依据炉膛壁面热负荷的影响对系数  $M$  进行修正,其余均按《73 年联合标准》的规定,其计算结果的精度都可以满足要求。具体的  $M$  值计算公式如下:

$$\text{当炉膛壁面热负荷 } \frac{B \cdot Q_{\text{DW}}^{\text{Y}}}{F_{\text{L}}} \geq 1.05 \times 10^3 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

时,

$$M = 0.56;$$

当炉膛壁面热负荷  $\frac{B \cdot Q_{\text{DW}}^{\text{Y}}}{F_{\text{L}}} < 1.05 \times 10^3 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  时,

$$M = \frac{1}{0.55 + 1.16 \times 10^{-3} \cdot \frac{B \cdot Q_{\text{DW}}^{\text{Y}}}{F_{\text{L}}}}$$

据此修正后的计算结果比较列于表 2。

表 2 修整后的炉膛传热计算结果与实测值

锅炉负荷	100%		39%		13%	
项 目	$T''_{\text{L}}(\text{°C})$	$\theta''_{\text{L}}$	$T''_{\text{L}}(\text{°C})$	$\theta''_{\text{L}}$	$T''_{\text{L}}(\text{°C})$	$\theta''_{\text{L}}$
计算值	1 585.4	0.881 9	1 367.5	0.822 2	891.1	0.642 6
实测值	1 590	0.884 0	1 300	0.788 4	887	0.640 3

从表中可以看出,采用本文提供的修正公式进行计算的结果是较为精确的,对于圆形炉膛这种锅炉结构是适用的。

### 4 结语

《73 年联合标准》中对于炉膛热力计算的几个主要参数如火焰黑度、污染系数、热有效系数等的修订基本能适应高热负荷舰船锅炉圆形炉膛的热力计算;

本文推荐的对  $M$  系数的修正用于本文所述类型锅炉炉膛的变负荷工况热力计算时,其精度能满足需要;

《73 年联合标准》中尚缺乏有关轻质燃料油的修正数据,在计算中应根据经验运用;

计算方法的准确程度还取决于对炉内传热过程的复杂特性的了解深度。本文的介绍仅限于作者工作范围内的经验,我们将不断认识、不断积累、不断完善。

### 参考文献:

- [1] 锅炉机组热力计算标准方法(1973 年版)[S]. 哈尔滨: 哈尔滨锅炉厂标准化室, 1985.
- [2] 秦裕琨. 炉内传热(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] ПЕРЛОВ Г В. Судовые Паровые Котлы [M]. Лени изд.: Судпром изд., 1961.
- [4] ПУШКИН Н И. Судовые Паровые Котлы (Теория и Расчеты) [M]. Лени изд.: ИЗД. Судостроение, 1965.

(何静芳 编辑)

so played a beneficial role in devising a method for the modeling of combustors with a complicated shape. **Key words:** single-tube return-flow combustor, numerical simulation, turbulent flow

舰船锅炉炉膛热力计算方法的修正 = **Revision of the Thermodynamic Calculation Method for a Naval Boiler Furnace** [刊, 汉] / Li Zhi-tao, Zhang Yu-hui, Chen Bing, *et al* (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 83 ~ 85

With regard to the specific features of a naval boiler furnace the authors have analyzed and compared the calculation results obtained when using various methods set forth in "the United Standards of 1973" etc. In the present paper recommended is a revision method adapted for the thermodynamic calculation of boiler furnace off-design conditions. **Key words:** naval boiler, thermodynamic calculation, furnace heat transfer

国产 200 MW 汽轮机转子在线热应力监测与寿命管理 = **On-line Monitoring of Rotor Thermal Stresses and Service Life Management for a Chinese-made 200 MW Steam Turbine** [刊, 汉] / Li Ai-jun, Xie Dan-mei, Yang Jun, Wang Jian-mei, Liu Xian-fei (Power Engineering Department, Wuhan University of Water Resources and Electrical Power, Wuhan, China, Post Code: 430072), Huang Shu-hong, Shen Tao (Power Engineering Department, Central China National University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 86 ~ 88

Through the use of an object-oriented language the authors have developed a software designed for the on-line monitoring of rotor stresses and service life management for a Chinese-made 200 MW steam turbine. In addition to thermal stress monitoring the software is also capable of abnormal data inquiry, offering guidance for start-up and shutdown operations as well as their recollection, etc. **Key words:** steam turbine, rotor, thermal stress, service life

能源消费与国民经济发展的灰色关联分析 = **Grey Correlation Analysis of Energy Consumption and National Economy Development** [刊, 汉] / Huang Fei (Wuxi Division under the Harbin Institute of Technology, Wuxi, China, Post Code: 214151) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 89 ~ 90

Grey correlation analysis is a kind of systemic analytical method. Through the use of this analysis it is possible to identify the major factors which influence the evolution and variation of key variables. Analyzed in this paper is the grey correlation of energy consumption and national economy development. The results obtained therein may serve as reference data for relevant administrative departments and sectors. **Key words:** grey correlation analysis, energy consumption, national economy development

亚临界炉锅水 pH 降低原因分析及预防对策 = **An Analysis of the Causes of Boiler Water pH Value Reduction in a Subcritical Pressure Boiler and Some Measures Taken for Its Prevention** [刊, 汉] / Yang Zhong-hao (North China Institute of Water Resources and Hydroelectric Power Engineering, Zhengzhou, China, Post Code: 450045) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 91 ~ 92, 100

In connection with a series of boiler water quality failures occurring at a certain power plant an analysis was conducted of the cause of the decrease in boiler water pH value. As a result, it is ascertained that the above-cited decrease has been caused by the leakage of mixed bed resin into the main system. The use of a water distribution device equipped with stainless steel trapezoid-shaped wound wires and a negative-pressure reverse-rinsing resin catcher has led to the prevention of the above-mentioned failure. **Key words:** thermal power plant, operation, accident analysis, feedwater, boiler water pH value

新型的烟气分析设备及其应用 = **A New Type of Flue-gas Analyzing Device and Its Applications** [刊, 汉] / Wang Tie-cheng, Liu Min, Xun Bai-qiu, *et al* (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 101 ~ 104