

# 船用燃油锅炉炉膛传热计算的图算法

龚三省

(海军工程学院)

[提要] 本文利用苏联 Н.И.Пушкин 所介绍的热计算方法构成图线, 在计算船用燃油锅炉时便于方案论证、初步设计及估算辐射受热面积。比标准方法(苏联 ЦКТИ 和 ВТИ 联合标准)简便得多, 而且对已有的一些锅炉进行验算, 其结果比较接近, 误差不大。

主题词 船用锅炉 传热计算

## 一、炉膛热计算的 А.Л.Лубин-Герцук 法<sup>[1]</sup>(简称 Л-Г 法)

以往燃油锅炉炉膛传热计算套用苏联 ВТИ 和 ЦКТИ 联合标准, 它是基于下列两个基本公式:

$$1. \text{ 辐射传热公式 } Q'_r = a_1 c_0 \zeta \psi F_0 T_{rx}^4 \quad (1)$$

$$2. \text{ 热平衡方程式 } = Q''_r = \varphi B \Sigma V_c (T_0 - T_{c1}) \quad (2)$$

由式(1)和(2)可写出

$$\textcircled{1}^{-4} = \frac{\varphi B \Sigma V_c}{C_0 \zeta \psi F_0 T_0^4} \cdot \frac{1 - \textcircled{1} c_1}{a_1} \quad (3)$$

上列诸式中

$a_1$ ——炉膛黑度

$C_0$ ——辐射常数  $20.7 \times 10^{-8} \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{k}^4)$  [ $4.96 \times 10^{-8} \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{k}^4)$ ]

$\zeta$ ——系数  $\zeta = [1 - (\frac{T_b}{T_{rx}})^4]$

$\psi$ ——炉膛水冷度  $\psi = \frac{H_r}{F_b}$

$H_r$ ——辐射受热面积  $\text{m}^2$

本文收到日期: 1987年9月8日

$F_b$ ——炉膛总的壁面积  $m^2$   
 $T_{r,x}$ ——炉内燃烧产物的平均温度  $k$   
 $\varphi$ ——炉膛保热系数,可取为0.995  
 $B$ ——油耗  $kg/h$

$\Sigma V_c$ ——燃烧产物的平均单位热容量  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ,  $\Sigma V_c = \frac{I_0 - I_{c,1}}{T_0 - T_{c,1}}$

$I_0$ 、 $T_0$ ——燃烧产物的理论焓和理论燃烧温度,相应  $kJ/kg$  和  $k$   
 $I_{c,1}$ 、 $T_{c,1}$ ——燃烧产物离开炉膛时的焓和温度,相应  $kJ/kg$  和  $k$

④——无因次温度,即  $\textcircled{4} = \frac{T_{r,x}}{T_0}$ ,  $\textcircled{4}_{c,1} = \frac{T_{c,1}}{T_0}$ 。

Л-Г 法系将成 (3) 改写成

$$B'_0 = \frac{\varphi \Sigma B V_c}{C_0 H_f T_0^2} = \frac{C}{1 - \textcircled{4}_{c,1}} \tag{4}$$

式中  $B'_0$ ——Больцман 准则,其中各变量在热计算时均易确定;

$C = \textcircled{4}^4 \xi_{a,1}$ ——试验系数,其中各变量在热计算时不易确定。按苏联 Н.И.Пущкин 根据船用锅炉大量实践数据进行综合结果,认为  $C = f(B'_0)$ , 作成曲线见图 (1)

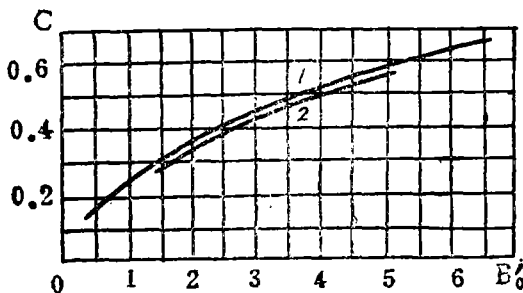


图 1  $C = f(B'_0)$  曲线

1—非增压炉膛  $\alpha = 1.05 \sim 1.4$ ,  $\psi = 0.64 \sim 0.93$   
 2—增压炉膛  $\psi = 0.88 \sim 0.92$

所示。在非增压锅炉中  $\alpha = 1.05 \sim 1.4$  和  $\psi = 0.64 \sim 0.93$  条件下为曲线 1 而增压锅炉  $\psi = 0.88 \sim 0.92$  时用曲线 2。并且他还综合这两根曲线

$$C = A (B'_0)^{0.525} \tag{5}$$

根据图中所示曲线 1, 可把它改写成

$$C = 0.255 (B'_0)^{0.525} \tag{5'}$$

## 二、辅助计算及一些有关数据的确定

### 1. 烟气的理论焓 $I_0$ 和温度 $T_0$ 。

$$I_0 = Q_{f,p} \left(1 - \frac{q_3}{100}\right) + \alpha V_0 C_{c,k} t_k, \tag{6}$$

而分配热量  $Q_{f,p} = Q_D + C_r t_r$ ,  $kJ/kg$  (7)

式中  $Q_D$ ——燃油的低发热量, kJ/kg;

$C_{,t}$ ——燃油预热热量,  $C_{,}$ 为油的比热,  $C_{,}=1.738+0.00251t$ , kJ/(kg·°C);

$V_o$ ——燃烧一公斤燃油所需理论干空气容积,  $m^3/kg$ , 对国产 O\* 重油,

$$V_o = 10.95m^3/kg;$$

$C_{c,k}$ ——湿空气容积比热,  $C_{c,k} = C_{gk} + 0.0161C_{H_2O}$ , 这里  $C_{gk}$  为干空气容积比热,  $C_{H_2O}$  为水蒸气容积比热, kJ/( $m^3 \cdot ^\circ C$ );

$t_k$ ——助燃空气温度, °C;

$q_3$ ——化学的未完全燃烧百分比  $q=0.5$  按国产 O\* 重油, 预热温度  $t_{,}=80^\circ C$ ;

$C_{,}=0.465$ ;  $Q_D=42\ 050$  kJ/kg 因此, 不同空气过剩系数  $\alpha$  下的  $I_o$  见表 1 所示, 相应的理论燃烧温度则可从烟气焓温表 2 中查得。

表 1 不同  $\alpha$  下的  $I_o$  和  $T_o$  值

$\alpha$	1.05	1.1	1.2	1.3	1.4
$I_o$ kJ/kg	42 908	42 950	43 037	43 125	43 209
$T_o$ K	2340	2276	2143	2037	1938

2. 烟气平均单位热容量  $\Sigma V_c$  与空气过剩系数  $\alpha$  及烟气温度区间有关, 计算结果见表 2。

表 2 不同温度区间的烟气  $\Sigma V_c$  (kJ/kg) 值

$\alpha=1.05, I_o=42\ 908$		$\alpha=1.1, I_o=42\ 950$		$\alpha=1.2, I_o=43\ 037$		$\alpha=1.3, I_o=43\ 125$		$\alpha=1.4, I_o=43\ 209$	
$\theta_{c1}$ (°C)	$\Sigma V_c$	$\theta_{c1}$ (°C)	$\Sigma V_c$	$\theta_{c1}$ (°C)	$\Sigma V_c$	$\theta_{c1}$ (°C)	$\Sigma V_c$	$\theta_{c1}$ (°C)	$\Sigma V_c$
1200	22.61	1100	23.16	1200	24.95	1200	26.63	1200	28.34
1300	22.70	1200	23.24	1300	25.12	1300	26.71	1300	28.47
1400	22.82	1300	23.32	1400	25.16	1400	26.84	1400	28.59
1500	22.95	1400	23.41	1500	25.25	1500	26.92	1500	28.72
1600	23.07	1500	23.49	1600	25.33	1600	26.96		
1700	23.20	1600	23.58	1700	25.37				
1800	23.45	1700	32.66						

### 三、通用曲线 $\theta_{c1} = f(B/H_f \cdot \alpha)$ 的制订

分析式 (4) 可见 Больцман 准则中除  $B/H_f$  外, 其余诸值只和燃料及燃烧情况有关, 而和具体锅炉结构无关。 $B/H_f$  可理解为锅炉炉膛的强化程度。所谓燃炉情况可理解为燃烧完全程度及空气过剩系数。目前燃油设备已可做到燃烧完全, 这里在计算燃烧产物的理论焓时认为还有  $q_3 = 0.5\%$ 。但在计算烟气焓温表时认为完全燃烧, 虽有不符, 但出入甚微。因此, 将该式写成

$$\Theta_{c1} = \frac{T_{c1}}{T_0} = 1 - \frac{0.255}{(B_0/H_f)^{0.475}} \quad (8)$$

由式(8)不难看出  $\theta_{c1} = T_{c1} - 273 = f(\frac{B}{H_f} \cdot \Sigma V_c T_0)$ 。在一定的燃油品种时,  $\Sigma V_c$  和  $T_0$  都和  $\alpha$  有关, 因此,

$$\theta_{c1} = f(B/H_f \cdot \alpha) \quad (9)$$

设  $B/H_f$  范围为  $60-400 \text{ kg/m}^2\text{h}$ ; 而  $\alpha = 1.05-1.4$ 。为了便于计算, 将计算结果绘成曲线, 见图2。

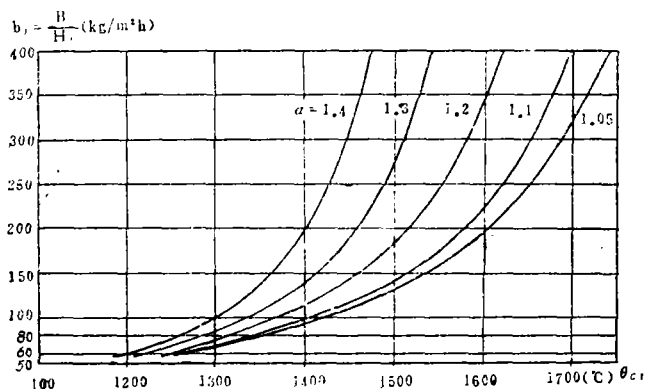


图2  $\theta_{c1} = f(B/H_f \cdot \alpha)$  曲线

#### 四、图算法的应用

1. 设计锅炉时, 根据要求的蒸汽数量和参数选用一定的热效率, 可先定出油耗  $B$ 。然后选择排出炉膛烟气温度  $\theta_{c1}$ 。从图2曲线上根据  $\theta_{c1}$  和  $\alpha$  即可查出单位辐射受热面积的油耗  $b_f = B/H_f$ 。这样, 就可以初步判断锅炉应有的炉膛辐射受热面积  $H_f = B/b_f$ 。

2. 对已有锅炉进行不同负荷下的传热计算, 则  $H_f$  为已知。按不同油耗  $B_1$ 、 $B_2$ 、……和  $\alpha$ , 先算出  $b_1 = B_1/H_f$ ,  $b_2 = B_2/H_f$ ……, 就可以从图2中曲线上查出相应的  $\theta_{c11}$ ,  $\theta_{c12}$ ……, 从烟气焓温表上查出  $I_{c11}$ 、 $I_{c12}$ ……, 则炉膛辐射受热面的吸热量为  $Q_{f1} = \varphi B_1(I_0 - I_{c11})$ ,  $Q_{f2} = \varphi B_2(I_0 - I_{c12})$ ……。

3. 对已有锅炉的固定  $B/H_f$  值下, 也可按试验所得的不同空气过剩系数  $\alpha$  值, 从曲线上查出  $\theta_{c1}$ , 从而算出炉膛吸收辐射热量  $Q_f$ 。

4. 为了验证此法计算的结果, 根据收集到的船用燃油锅炉热计算数据汇集成表3。

对结果分析如下:

(1) 36/46型锅炉原计算方法和本文介绍的方法一致, 从曲线查得的  $\theta_{c1}$  偏低。主要因烟气理论燃烧温度由于有空气预热器而偏高,  $T_0$  达到  $2353\text{K}$ , 本文曲线却基于  $T_0 = 2276\text{K}$ 。如果修正这点, 计算结果还是一致的。可以认为采用苏联重油 M-12 和国产 0\* 重油对热计算结果没有什么较大影响。

(2) 32/54型锅炉是我国上海锅炉厂设计制造的, 其所用计算方法为联配标准, 也因装有空气预热器,  $T_0$  偏高。修正后所得结果  $\theta_{c1}$  相差不超过  $2.5\%$ , 可以认为  $\pi-r$  法还是适用的。

(3) 苏联 KB-25 型锅炉对照计算结果偏差较大, 尽管由于空气预热,  $T_0$  偏高,

表 3

一些船用锅炉炉膛热计算结果

锅炉类型	油耗B (kg/h)燃油品种	辐射受热面积 H <sub>r</sub> (m <sup>2</sup> )	b <sub>r</sub> (kg/m <sup>2</sup> h)	空气过剩系数 α	原计算的烟气理论温度 T <sub>0</sub> (K)	原计算所得 θ <sub>0.1</sub> (℃)	修正T <sub>0</sub> 后计算所得 θ <sub>0.1</sub> (℃)	用本文曲线查得的 θ <sub>0.1</sub> (℃)	备注
苏联36/46 [1]中例题	2758 (M-12)	26.8	102.91	1.1	2353	1447	1443	1415	原用Π-Γ法计算
国产测量船锅炉32/54 [3]	2160 (0 <sub>2</sub> 重油)	31	69.67	1.2	2209	1331	1299	1280	原用联合计算标准法
苏联KB-25 [4]	1800 (M-40)	32.56	55.28	1.15	2300	1270	1236	1220	苏联50年代计算标准
苏联35/29 [5]	2680 (φ-20)	23.6	113.6	1.2	2173	1400	1419	1408	同上
苏联KB-76 [6]	7600 (φ-12)	18.9	402.1	1.2	2117	1610	1590	1618	同上

表 4

理论燃烧温度不同的修正方法

次序	项 目	符 号	单 位	计算公式或数据来源	结 果	备 注
1	由曲线查得的排出炉膛烟气温度	θ <sub>0.1</sub>	K	从本文曲线(图2)查出	1220	这里T <sub>0</sub> 取作曲线时用的2212K
2	排出炉膛烟气的无因次温度	Θ	—	Θ = (θ <sub>0.1</sub> + 273) / T <sub>0</sub>	0.6750	
3	和理论燃烧温度的有关项	A	—	A = (1 - Θ)	0.3250	
4	原始计算空气预热后的理论燃烧温度	T <sub>0</sub> '	K	原计算说明书	2300	
5	修正T <sub>0</sub> 不同后的有关项	A'	—	A' = A (T <sub>0</sub> ' / T <sub>0</sub> ) <sup>1.425</sup>	0.3436	
6	修正T <sub>0</sub> 后的烟气无因次温度	Θ'	—	Θ' = 1 - A'	0.6564	
7	修正T <sub>0</sub> 后的排出炉膛烟气温度	θ <sub>0.1</sub> '	K	θ <sub>0.1</sub> ' = (Θ' · T <sub>0</sub> ') - 273	1236	

注: 这里根据  $1 - \Theta = \frac{0.255}{(B_0')^{0.475}} = A$ , 即  $A \sim \frac{1}{(B_0')^{0.475}}$ . 因为在波兹曼准则中  $B_0 \sim \frac{1}{T_0^3}$ ,

故  $A \sim (T_0')^{0.475} \sim T_0^{1.425}$ . 所以可写出  $A' = A \left(\frac{T_0'}{T_0}\right)^{1.425}$ . 本表中所列的数据是按表3中苏联KB-25的实例.

修正后 θ<sub>0.1</sub> 仍相差34℃, 可能与 b<sub>r</sub> 值太小有关. 按 Пушкин 综合的曲线(图1)已在范围边缘.

(4) 苏联35/29系[4]中例题, KB-76 均属采用苏联50年代的炉膛热计算标准. 尽管前者用了预热空气, 但 T<sub>0</sub> 为 2173K 和本文曲线所用的 T<sub>0</sub> 为 2148K 比较接近, 因此能得出比较接近的结果, 后者也是一样.

5. 修正 T<sub>0</sub> 的计算方法见表 4

## 五、结 论

1. 本文根据[1]中介绍的船用锅炉炉膛热计算方法构图算曲线, 在一定的  $\alpha$  和  $b_r$  范围内, 有其通用性, 正确程度有一定的可靠性。

2. 无论是设计计算或是校核计算, 使用图算法可以简捷得多。尤其作为初步设计, 可以从选择  $\theta_{e,1}$ , 从而判断  $H_r$  的大小, 便于组织炉膛型式。

3. 苏联 M—12, M—40 (原  $\phi$ —12) 等船用重油与国产 0\* 重油尽管成分各异, 但用于船用锅炉膛热计算, 对计算结果影响不大。

4. 如果锅炉有空气预热器, 助燃空气温度远超过 60K, 则利用曲线查出的  $\theta_{e,1}$  误差较大。主要因为理论燃烧温度  $T_0$  改变了。如果加以修正, 则所用的  $\Pi$ — $\Gamma$  法仍有一定的准确性。

5. 本文所收集到的船用锅炉实例不多, 有待进一步收集更多的实例进行验算, 尤其是英、美、日等国的船用锅炉。

## 参 考 文 献

- [1] Н.И.Пушкин: «Судовые парогенераторы», 1977
- [2] 龚三省: 舰用锅炉原理和管理法, 1984.7
- [3] 上海锅炉厂《热计算说明书》
- [4] КВГ—25设计计算说明书
- [5] Лерлов Г.В.: КВ—35/29热计算Судовые Котлы, 1931.
- [6] КВГ—76 热计说明书

## A Diagram Method for Marine Oil—Burning Boilre Furnace Heat Transmission Calculations

Gong Sansheng

(Naval Academy of Engineering)

### Abstract

On the dasis of a heat scalculation method introduced by Н.И.Пушкин of Russia, dtagrams are formed which are convenient for the scheme technical argumentation and preliminary design and estimatation of the radiant heat-absorbing area in marine oil-burning boiler calculations. This method is much simpler and more convenient than the standard method (Russian combined ЦКТИ & ВТИ standard). Cheching calculations on some existing boilers are made, the results of which are comparatively close to the original, with little error.

**Key words:** marine boiler, heat transimission calculation