

饱和蒸气湿度的理论计算

龚三省 (海军工程学院)

〔提要〕介绍用蒸发平面无因次负荷 K_F 代替以往常用的蒸发平面逸出速度 ω''_0 和汽部容积负荷 R_V 的依据。根据苏联Л.С.Стерман的公式改写成易于计算的形式,以便理论上计算饱和蒸汽的湿度。

主题词 蒸汽湿度 蒸发面无因次负荷

对于核动力装置中的蒸汽发生器和自然循环锅炉来说,在饱和蒸汽的汽水自然分离问题上,其机理是完全一致的。以往对饱和蒸汽湿度的衡量并无纯粹的理论计算公式可循。通常只是利用一些相对的指标作为判定汽水分离品质的参数依据。常用的有蒸发平面蒸汽逸出速度 ω_0'' (m/s)和汽水自然分离高度 H (m)(即从工作水位到出汽口的高度,由于上锅筒内真实水位难以判断,又往往从水位表中所指示的可见水位作为依据。这对蒸汽产生量大,上锅筒尺寸又小的舰船锅炉不太合适)。

如果在一定范围内认为 ω_0'' 和 H 对饱和蒸汽湿度的影响是直线线性的,又向用一汽部容积负荷 R_V (m³/m³s)作为相对指标。在立式蒸汽发生器中根据 ω_0'' 和 R_V 的定义可以写出

$$\omega_0'' = \frac{Dv''}{\frac{\pi}{4}d^2} \quad (1)$$

$$R_V = \frac{Dv''}{\frac{\pi}{4}d^2H} \quad (2)$$

即得

$$R_V = \omega_0''/H \quad (3)$$

上列诸式中:

D ——蒸汽产生量, kg/s;

v'' ——饱和蒸汽比容, m³/kg;

d ——蒸汽发生器内径, m。

在卧式上锅筒中,如果水位就在水平中心线上,而且分离高度 H 变化不太大时,同样可推出 $R_V \sim (\omega_0''/H)$ 关系式。但是这些关系式并不符合实际情况。从蒸汽温度 y 与 D (实质上也就是 ω_0'')的实验曲线(图1)可知,在临界点 A 以前 $y \leq 0.03\%$,而 $y = A(\omega_0'')^n$, $n = 1 \sim 3$ 。 A 点以后 y 随 ω_0'' 的增加而迅速加大, $n = 2.5 \sim 4$, $y = (0.03 \sim 0.2)\%$ 。 B 点以后 y 将急剧增加,此时在 $y > 0.2\%$ 时 $n = 8 \sim 10$ 。

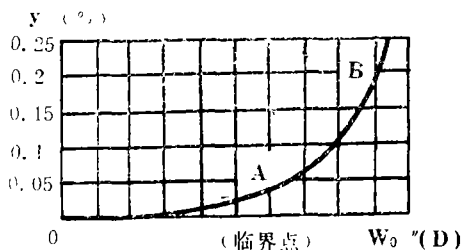
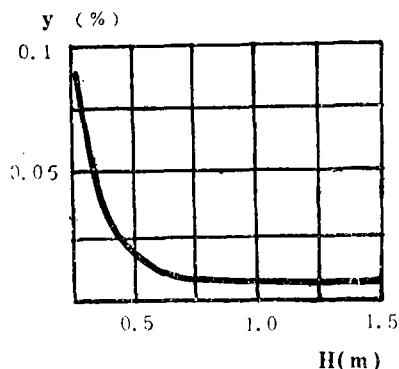


图1 y 与 D (即 ω''_0)的关系曲线

自然分离高度 H 对湿度的影响可由图2中看出。

图 2 y 与 H 的关系曲线

因此, 用 R_V 这一相对指标不尽合理, 似乎把 ω_0'' 和 H 对 y 的影响视作成直线线性关系了。一般认为在 $\omega_0'' \leq 0.4(\text{m/s})$ 、 $H \geq 0.5(\text{m})$ 、 $R_V = 0.67(\text{m}^3/\text{m}^3\text{s})$ 条件下, 而且锅水盐度 $s \leq 1200 \text{ ppm Cl}^-$ 时饱和蒸汽湿度 $y < 1\%$ [1]。根据文献[2] Л.С.Стерман 曾通过试验并综合整理了已有的许多锅炉实测数据, 认为

$$y < 0.1\% \text{ 时, } y = C' \cdot K_F^{2.78} / H^{2.3} \quad (4)$$

$$0.1\% \leq y < 2\% \text{ 时, } y = C'' \cdot K_F^{0.6} / H^{5.5} \quad (5)$$

常数项

$$C' = 6.1 \times 10^9 \times (\rho' - \rho'')^{0.753} \nu^{2.2} / g^{0.6} \sigma^{0.5} (\rho'')^{0.258} \quad (6)$$

$$C'' = 1.15 \times 10^{25} \times (\rho' - \rho'')^{1.91} \nu^{4.6} / g^{1.6} \sigma^{0.7} (\rho'')^{1.21} \quad (7)$$

上述诸式中

ρ' 、 ρ'' ——锅炉工作压力下饱和水及汽的密度, kg/m^3 ;

σ ——锅炉工作压力下饱和水的表面张力, N/m ;

ν ——锅炉工作压力下饱和水的运动粘度, m^2/s ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

K_F ——蒸发平面的无因次负荷, 即

$$K_F = \omega_0'' \sqrt{\rho''} / \sqrt{g' \sigma (\rho' - \rho'')} \quad (8)$$

在文献[2]中用 K_F 替代常用的间接指标

ω_0'' (或 R_V)。 K_F 之导出是根据下列三个公式 (认为水滴是圆球形的)。

水滴在汽部空间的自然分离重力公式

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho' - \rho'') g \quad (9)$$

水滴受汽流向上流动作用的扬力

$$F_2 = \xi \pi r^2 \rho'' \times (\omega_0'')^2 / 2 \quad (10)$$

水滴在流动过程中抵抗被汽流撕裂的表面张力。

$$F_3 = 2 \pi r \sigma \quad (11)$$

上面三式中三力平衡, 式中

r ——水滴半径, m ;

ξ ——水滴在汽流中运动时受到阻力的阻力系数。

当然这三个公式是描述水滴在汽部空间的运动过程, 不可能也无法估量诸水滴相互撞击的影响。其次这是在没有分离设备的自然分离条件下, 而且又认为蒸汽流速是均匀的。这点在立式蒸汽发生器中要比卧式上锅筒中更接近些。然而, 从这点来看, 某些自然分离的锅炉上锅筒中虽然装有水下多孔板和汽部多孔集汽板, 严格讲, 它们不是分离设备, 仅仅是保证均匀引出蒸汽的辅助设备而已。

根据[2]中建议, 如果按式(8)计算所得的 $K_F \geq 0.7$, 要考虑安装专门的分离设备。显然在 K_F 中未涉及自然分离高度 H , 即使用 K_F 作为相对比较自然分离品质时, H 应能充分满足一定大小的水滴可以回入水面的条件。

文献[2]中还作出了查阅蒸汽湿度的诸模图。本文为了便于利用式(4)和(5)计算 y 起见, 作如下的变换, 即 $y < 0.1\%$ 时,

$$y = 6.1 \times 10^9 \frac{(\rho' - \rho'')^{0.068} \nu^{2.2} (\rho'')^{1.124}}{g^{1.29} \sigma^{1.19}} \cdot \frac{(\omega_0'')^{2.78}}{H^{2.3}} = A' \frac{(\omega_0'')^{2.78}}{H^{2.3}} \quad (12)$$

$0.1\% \leq y < 2\%$ 时

$$y = 1.15 \times 10^{-25} \frac{(\rho' - \rho'')^{0.26} \nu^{4.6} (\rho'')^{2.09}}{g^{3.25} \sigma^{2.35}} \cdot \frac{(\omega_0'')^{6.6}}{H^{5.5}} = A' \frac{(\omega_0'')^{6.6}}{H^{5.5}} \quad (13)$$

这里

$$\left. \begin{aligned} A' &= 6.1 \times 10^9 \frac{(\rho' - \rho'')^{0.086} \nu^{2.2} (\rho'')^{1.124}}{g^{1.29} \sigma^{1.19}} \\ A'' &= 1.15 \times 10^{-25} \frac{(\rho' - \rho'')^{0.26} \nu^{4.6} (\rho'')^{2.09}}{g^{3.25} \sigma^{2.35}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由此可见 A' 与 A'' 两常数项仅仅与蒸汽工作压力有关。因此, 可以绘制 $A' \sim P$ 和 $A'' \sim P$ 两曲线备查, 分别见图 (3) 和 (4)。

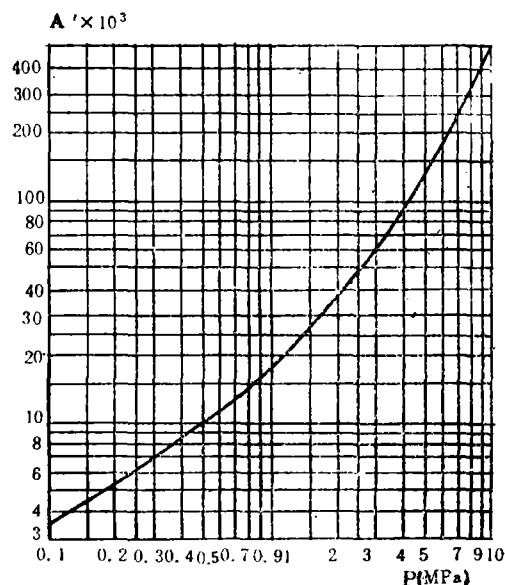


图 3 $A' \sim P$ 曲线

由这两曲线也可看出, 在锅炉工作压力增加时, A' 和 A'' 都将增加。据一般研究锅内汽水分离过程的书籍中所载, 增加锅炉工作压力, 会使水的表面张力减少, 于是逸出蒸发平面后的水滴变细、以致增加蒸汽湿度。这一结论自然在保持蒸发平面逸出蒸汽温度 ω_0'' 为常数时才正确。然而, 正是由于锅炉工作压力提高, 蒸汽的密度也将增加, 而蒸发平面逸出的蒸汽速度 ω_0'' 要下降。这一因素的影响比起表面张力的影响要大得多, 所以两者合并影响的结果, 会使蒸汽温度 y 减

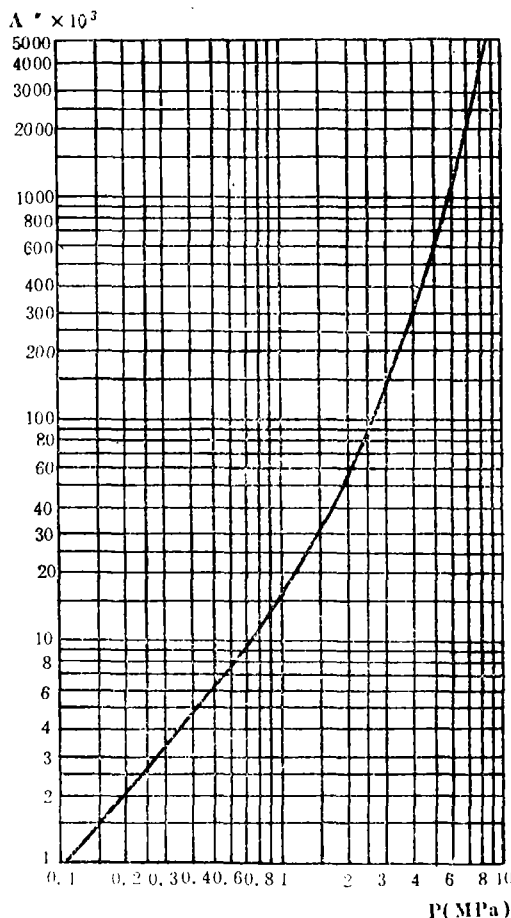


图 4 $A'' \sim P$ 曲线

少。因此, 讨论前提应在固定的蒸汽产生量条件下 (即 $D = ct$)。适当提高锅炉工作压力, 可以使饱和蒸汽品质有所改善。当然这种情况适用于变参数的锅炉中。我们在解决 КВГ—76 型锅炉饱和蒸汽湿度过大时所采取的措施之一, 就是适当提高锅炉低压运行时的压力 (由 25 气压升至 30 气压), 结果 y 由 0.23% 降至 0.053%。事实证明, 自 1978 年以来该类锅炉已消除了过热器内严重积盐所引起的电化学腐蚀现象, 当然还配合了其它运行和保养方面的措施。这样也就毋须改装筒内分离设备了。

参 考 文 献

- [1] Перлов Г.В.: Судовые паровые котлы, Судпромгиз, 1961.
- [2] Майзель С.С.: Определение влажности насыщенного пара в судовых паровых котлах, Судостроение, 1974, No. 12

