

自然循环热水锅炉锅内射流 装置的理论及实验研究

李世国 (黑龙江省电力试验研究所)

〔摘要〕 从理论和实验两个方面对自然循环热水锅炉锅内射流装置进行了研究,从整个水循环回路的角度出发,得到了射流装置喷射系数的理论计算式。通过实验证明了该式的正确性,并得到了确定喷嘴与下降管入口最佳距离的方法。说明了用本文提出的方法所设计的锅内射流装置能够同时解决目前热水锅炉存在的停电保护和提高上升管水速问题。

关键词 锅炉 热水锅炉 自然循环 射流器

一、前言

目前,随着集中供热的发展,对较大容量热水锅炉的需求量与日俱增。近年来,我国自然循环热水锅炉生产的越来越多。它的工作原理和自然循环蒸汽锅炉的工作原理一样,但与蒸汽锅炉相比,热水锅炉的流动压头小得多,故循环水速较低。

自然循环热水锅炉上升管内水速过低,主要将产生过冷沸腾和出现氧腐蚀,直接影响锅炉的安全运行。为了解能用极其简单的办法来提高上升管内水速及解决停电保护问题,本文采用在自然循环热水锅炉下降管入口加一射流装置,使回路构成混合循环来解决此问题。

二、射流装置原理及工作过程

射流装置极为简单,就是在自然循环热水锅炉下降管入口加一喷嘴,如图1所示。

温度较低的锅炉回水以一定速度从喷嘴1射出,由于射流的卷吸作用,将锅筒内的一部分热水卷吸到下降管中。从喷嘴出来的流体叫工作流体,所卷吸的流体叫引射流体,两者混合后进入下降管的流体叫混合流体。工作流体从喷嘴射出后,其动能一部分传递给引射流体,使引射流体动能增加。在混合流体沿下降管流动过程中,速度逐渐均衡,压力随之升高,使混合流体的动能又转变成压力能和势能。在下降管Ⅲ—Ⅲ截面处,混合

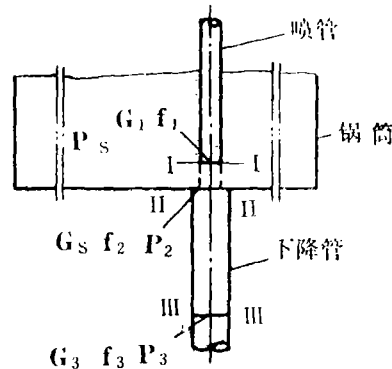


图1 射流装置原理图

流体的压力达到最大值 p_3 。然后混合流体沿下降管进入下集箱，最后回到锅筒。这样，在下降管、下集箱、上升管和锅筒所构成的循环回路中，当有电时，射流装置工作，使回路的循环水量增大；当突然停电时，虽然射流装置不工作，但回路自然循环仍在进行，从而起到了停电保护的作用。

三、回路基本方程的推导

在下降管入口加射流装置的情况下，回路的循环动力由两部分组成：一是由射流装置所提供的动力，使下降管入口压力升高；二是下降管与上升管内工质的重度差所产生的流动压头。两者共同作用于同一回路，使回路的基本方程发生了变化。

为了建立回路的基本方程，对图1所示的射流装置，首先做以下假设：

1. 工作流体从喷管射出后，从I—I断面到II—II断面工作流体的流束断面不变。

2. I—I断面、III—III断面流体速度分布均匀、II—II断面的引射流体速度分布均匀。

3. 喷嘴距下降管入口距离为最佳尺寸，即在该距离下，若其它条件相同，射流装置可继续射流流体达到最大值。

三点假设，对进口II—II断面与出口III—III断面对混合流体列动量方程：

$$\varphi_1 \left(\frac{r_1}{g} G_1 V_1 + \frac{r_2}{g} G_s V_2 \right) - \frac{r_3}{g} (G_1 - G_s) V_3 = (p_3 - p_2) f_3 \quad (1)$$

- 式中： G_1 ——工作流体流量；
 V_1 ——工作流体速度 ($V_1 = G_1/f_1$)；
 G_s ——引射流体流量；
 V_2 ——II—II断面引射流体速度 ($V_2 = G_s/f_2$)；
 f_3 ——III—III断面处流体静压；
 f_2 ——II—II断面处流体静压；

f_2 ——II—II断面处引射流体所占的截面积 ($f_2 = f_3 - f_1$)；

r_1 、 r_2 、 r_3 ——工作流体、引射流体和混合流体的重度；

φ_1 ——速度系数。

对于锅炉的下降管与上升管所构成的回路有：

$$p_3 - p_c = \Delta p' - s' \quad (2)$$

式中： p_c ——上升管出口静压；

$\Delta p'$ ——加射流装置后回路流动阻力；

s' ——加射流装置后回路流动压头。

锅炉的水循环回路，有无射流装置有效压头是不同的。无射流装置时，回路的流动压头等于流动阻力，并令 $\alpha = G_0/G_1$ ，则：

$$s = h(r_x - \bar{r}_s) = \xi_{0,x} \cdot \frac{r_x}{2g} \cdot \frac{\alpha^2 G_1^2}{f_3^2} \quad (3)$$

式中： h ——循环高度；

r_x ——下降管内工质重度；

\bar{r}_s ——上升管内工质平均重度；

G_0 ——无射流装置时回路的循环水量；

$\xi_{0,x}$ ——回路折算为下降管的流动阻力系数。

当下降管入口加射流装置时，回路的循环水量增大，而工质吸热量不变，则工质温升降低，回路的流动压头下降，此时的流动压头为：

$$s' = h(r_x' - \bar{r}_s')$$

而热水的重度与其温度有如下关系：

$$r = 1008.57 - 0.281t - 0.00219t^2$$

将该式代入前式整理得：

$$s' = h[(0.14 + 0.00219t')x\delta t_0' + 0.000548x^2\delta t_0'^2]$$

式中： t' ——加射流装置后下降管入口水温；

$\delta t_0'$ ——加射流装置后回路温升；

x ——平均温度修正系数。

若锅炉的回水温度为 t_r ，供水温度为 t_r ，

则由热量平衡可计算出下降管入口水温 t' :

$$t' = \frac{G_1 t_h + G_s t_r}{G_1 + G_s}$$

回路温升 $\delta t_0'$ 用下式计算:

$$\delta t_0' = Q_0 / (G_1 + G_s)$$

其中 Q_0 为回路总吸热量。

平均温度修正系数 x 的计算方法可参考文献[1]、[2]。

定义系数 β 为加射流装置后回路的流动压头与自然流动时回路的流动压头之比, 即:

$$\beta = \frac{s'}{s} = \frac{h[(0.14 + 0.00219t')x \cdot \delta t_0' + 0.000548x^2 \cdot \delta t_0'^2]}{\xi_{0x} \cdot \frac{r_x}{2g} \cdot \frac{\alpha^2 G_1^2}{f_3^2}}$$

$$\text{则: } s' = \beta \cdot \xi_{0x} \cdot \frac{r_x}{2g} \cdot \frac{\alpha^2 G_1^2}{f_3^2} \quad (4)$$

这里引用系数 β 完全是为了后面的推导整理方便。首先由前面的式子计算出系数 β , 然后再将 s' 写成(4)的形式。

对于由锅筒进入下降管的引射流体列能量方程有:

$$p_s = p_2 + \frac{1}{\varphi_2^2} \cdot \frac{r_2}{2g} \cdot \frac{G_s^2}{(f_3 - f_1)^2} \quad (5)$$

对于经回路引入到锅筒的混合流体列能量方程有:

$$p_c = p_s - \frac{1}{\varphi_3^2} \cdot \frac{r_2 V_2'^2}{2g} \quad (6)$$

式中: p_s ——锅筒压力;

φ_2, φ_3 ——速度系数;

V_2' ——混合流体引入锅筒时的速度。

将式(5)代入式(6)中有:

$$p_c = p_2 + \frac{1}{\varphi_2^2} \cdot \frac{r_2}{2g} \cdot \frac{G_s^2}{(f_3 - f_1)^2}$$

$$- \frac{1}{\varphi_3^2} \cdot \frac{r_2 V_2'^2}{2g} \quad (7)$$

循环回路的流动阻力 $\Delta p'$ 可用下式计算:

$$\Delta p' = \xi_{0x} \cdot \frac{r_3}{2g} \cdot \frac{(G_1 + G_s)^2}{f_3^2} \quad (8)$$

将式(4)、(7)、(8)代入式(2)得:

$$p_3 - p_2 = \xi_{0x} \cdot \frac{r_3}{2g} \cdot \frac{(G_1 + G_s)^2}{f_3^2} - \beta \xi_{0x} \cdot \frac{r_x}{2g} \cdot \frac{\alpha^2 G_1^2}{f_3^2} + \frac{1}{\varphi_2^2} \cdot \frac{r_2}{2g} \cdot \frac{G_s^2}{(f_3 - f_1)^2} - \frac{1}{\varphi_3^2} \cdot \frac{r_2 V_2'^2}{2g} \quad (9)$$

经计算可知, 式(9)中右端最后两项较前两项小得多, 且此二项的绝对值较接近, 故将此二项略去, 并代入方程(1)得:

$$\left(1 + \frac{\xi_{0x}}{2} - \varphi_1 \cdot \frac{r_2}{r_3} \cdot \frac{m}{m-1}\right) u^2 + (2 + \xi_{0x}) u + 1 + \frac{\xi_{0x}}{2} \left(1 - \frac{r_2}{r_3} \beta \alpha^2\right) - \varphi_1 \cdot \frac{r_2}{r_3} m = 0 \quad (10)$$

方程中的无因次参数 $u = G_s / G_1$, $m = f_3 / f_1$ 定义无因次流量比 u 为喷射系数。

根据文献[3]、[4], 取速度系数 $\varphi_1 = 0.975$ 。在热水锅炉的水温范围内, 忽略重度差的影响, 则可以方程(10)中解出 u :

$$u = (-b + \sqrt{b^2 - 4ac}) / 2a \quad (11)$$

$$\text{其中: } a = 1 + \frac{\xi_{0x}}{2} - 0.975 \cdot \frac{m}{m-1};$$

$$b = 2 + \xi_{0x};$$

$$c = 1 + \frac{\xi_{0x}}{2} (1 - \beta \alpha^2) - 0.975 m$$

折算阻力系数 ξ_{0x} 是将循环回路的阻力

系数折算为下降管的阻力系数，可用下式计算：

$$\xi_{0x} = \Sigma \xi_x + \varphi^2 \cdot \Sigma \xi_s$$

式中： $\Sigma \xi_x$ ——下降管总阻力系数；

$\Sigma \xi_s$ ——上升管总阻力系数；

φ ——下降管与上升管截面比 (f_x/f_s)。

变换式 (11) 便可得到在给定喷射系数 u 及回路特性情况下所需的截面比 m 。

四、射流装置的实验研究

针对所研究的问题，设计了如图 2 所示的冷态实验装置，模拟下降管的内径为 26.5mm。实验时，用改变喷管内径的方法来改变射流装置的截面比 m 。共用了五种不同内径的喷管，如表 1 所示。喷嘴距下降管入口距离可以调节。

表 1 喷管内径及截面比

喷管内径 d_1 (mm)	8	9.7	12	15	17.5
截面比 m	10.97	7.46	4.88	3.12	2.29

该实验装置为开式系统，这是为了模拟自然循环热水锅炉的水循环特点而设计的。但是，由于该实验装置为冷态，无论射流装置是否工作，自然循环动力是不变的；亦即系数 $\beta \equiv 1$ 。

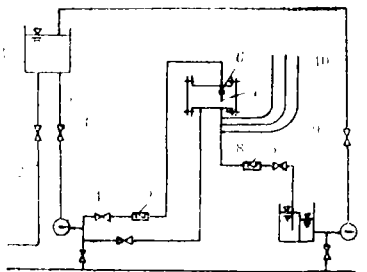


图 2 实验装置示意图

- 1—水箱 2—上水管 3—阀门 4—水泵 5—涡轮流量计
- 6—模拟铜筒 7—喷管 8—静压测孔 9—胶管 10—测压箱

首先用实验的方法在系数 $\alpha = 1$ 的情况下，确定喷嘴距下降管入口的最佳距离 l_j ，实验结果如图 3 及表 2 所示。可以看出喷嘴与下降管入口距离不随阻力系数 ξ_{0x} 的变化而变化，无因次量 l_j/d_1 只随截面比 m 呈现出一定的变化规律，可将这一规律回归成下面的经验公式：

$$l_j/d_1 = 0.357 + 0.3465m - 0.00646m^2 \quad (12)$$

表 2 无因次量 l_j/d_1 与截面比 m 的关系

m	2.29	3.12	4.88	7.46	10.97
d_1 (mm)	17.5	15	12	9.7	8
l_j (mm)	20	20	23	25	27
l_j/d_1	1.14	1.33	1.29	2.58	3.38

为了对前面的理论分析结果式 (11) 进行实验验证，分两步进行，即在系数 $\alpha = 1$ 与 $\alpha \approx 1$ 的情况下分别进行实验验证。

在 $\alpha = 1$ 的情况下，对于每一种喷管在其各自最佳几何位置的情况下进行实验，实验结果整理在图 4 上，其中实线为用 (11) 式的计算曲线。可以看出，实验值与计算值基本吻合，尤其在 $m \geq 3.2$ 时，实验值与计算值吻合得很好。另外截面比 m 与阻力系数 ξ_{0x} 对喷射系数 u 的影响很大，增大截面比或减小阻力系数均可使喷射系数 u 增大。

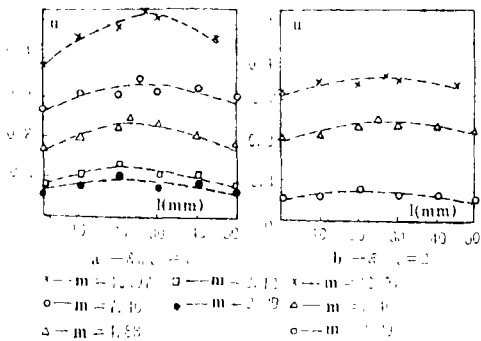


图 3 喷射系数 u 与喷管位置的关系

对 $\alpha \approx 1$ 时的实验结果整理在图 5 上，

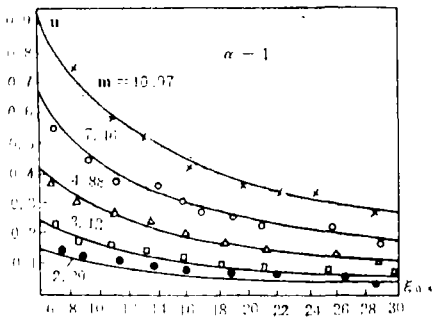


图4 在系数 $\alpha=1$ 的情况下, 喷射系数 u 与截面比 m 及阻力系数 ξ_{0x} 的关系

实线为计算曲线, 可见实验结果与计算值基本吻合。从图5上还可以看出, 系数 α 对 u 的影响不是很大, 但 α 对混合流体流量的影响很大。实验发现, 截面比 m 、系数 α 、折算阻力系数 ξ_{0x} 是最活跃的因素; 对于特定的水循环回路, 增大截面比 m (即减小喷管内径), 增大工作流体流量(即改变系数 α), 均可使回路的循环水量增加, 即上升管水速提高。

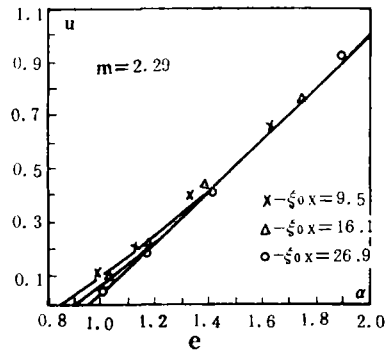
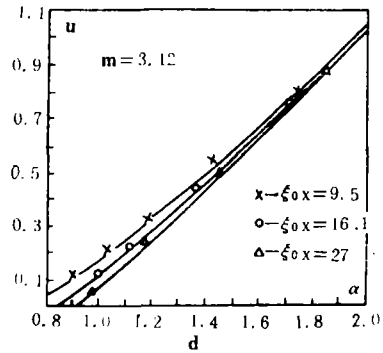
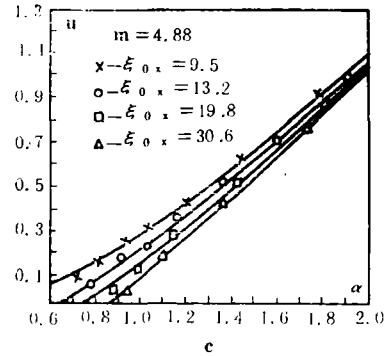
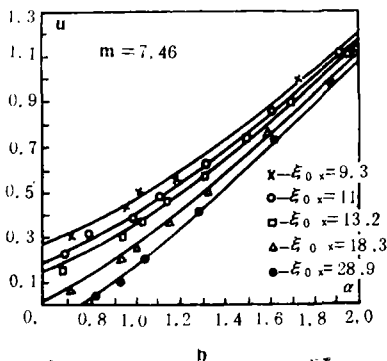
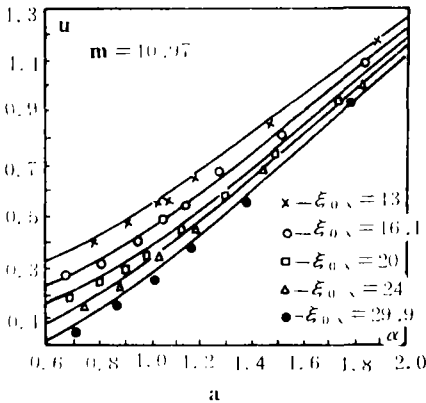


图5 系数 α 对喷射系数 u 的影响



在前面的实验中, 通过对模拟下降管入口段流体有无射流装置时静压升高值的测量发现, 静压升高的最在值在距下降管入口距离为 $l' = 185\text{mm}$ 处, 亦即无因次距离 $l'/d_3 = 7$ 左右下降管入口静压升高达到最大值。

五、结 论

1. 在锅炉下降管入口加射流装置后, 循环回路为混合循环, 同时解决了停电保护和提高上升管水速问题。

2. 为了工程应用方便, 从整个循环回路出发, 得到了理论分析基本方程式(11), 并经实验验证, 证明了该式是正确的。

3. 提出了下降管折算阻力系数的概念, 为设计计算带来了方便。

4. 喷嘴距下降管入口距离对喷射系数 u 有一定的影响、可用经验公式 (12) 来确定喷嘴距下降管入口最佳几何位置。

参 考 文 献

[1] 范柏章, 自然循环热水锅炉的水动力计算. 哈工大科学研究报告, 1983,10
 [2] 庞丽君、李清、范柏章. 自然循环热水锅炉水动力计算方法. 哈工大科学研究报告, 1986, 第14期
 [3] 陆宏圻. 液体射流泵理论及设计方法的研究. 水泵技术, 1972,2
 [4] E.Я.索科洛夫, H.M.津格尔. 喷射器. 科学出版社, 1977

An Analytical and Experimental Study of a Water Ejector Installed in the Drum of a Natural Circulation Hot-Water Boiler

Li Shiguo

(Electric Power Testing Institute of Heilongjiang Province)

Abstract

An analytical and experimental study of a water ejector installed in the drum of a natural circulation hot water boiler was undertaken by the author. A correlation of the flow ratio of the water ejector was investigated concerning the influence of the integral water flow circuit. The calculation method was examined and verified and the analytically calculated data were found to be in good agreement with experimental ones. A method for determining the optimum distance between the exit of jetting pipe and the entrance of the downcomer was put forward. By use of the water ejector designed by the method recommended in this paper, the boiler water circuit can be protected at the time of unexpected power cut and the water flow rate in the water wall tubes can be significantly increased.

Key words: boiler, hot-water boiler, natural circulation, water ejector

(渠源沥 编辑)