

# 蒸汽供热系统对流水击研究

尚德敏 陈安斌 张文昌

(哈尔滨工业大学)

[摘要] 汽水管路、贮水容器或蒸汽锅筒等蒸汽供热设备经常发生水与蒸汽的对流冲击,是影响锅炉及用汽设备稳定运行的常见故障之一。本文分析产生对流水击的热力学原因,导出对流水击速度与强度的计算方法,并结合实例给出计算结果。

关键词 锅炉 对流水击 热力学

分类号 TK224.21

## 1 引言

蒸汽通过管路流入某一贮水容器,或冷水通过管路流入某一蒸汽空间,是锅炉及用汽设备常见的结构。当冷水与蒸汽相遇时,常发生冷水突然迎着蒸汽来流方向,高速冲进蒸汽管道或蒸汽空间的水冲击现象<sup>[1,2]</sup>。关于蒸汽系统的水击是如何发生的?有关文献指出两种不同性质的原因:(1)积聚在管路中的凝水,突然被高速流动的蒸汽托起和带走<sup>[3]</sup>;(2)蒸汽与低温积水相遇时,蒸汽凝结,造成局部真空,引起周围介质高速冲击<sup>[4]</sup>。

由第一种原因发生水击时,水击方向与蒸汽流动方向相同;由第二种原因发生水击时,水击方向与蒸汽流动方向相反,即水与蒸汽对流冲击。

工程实践及实验室实验均证实:低温水与高温蒸汽相遇,不一定发生对流冲击。那么,对流水击究竟是怎样发生的?对流水击速度与强度怎样计算?本文在实验基础上,设计出了对流水击的物理模型,并以热平衡、质量

平衡等热力学方法,分析了产生对流水击的原因和条件,最后导出有关的计算式。这些结果可为锅炉及用汽设备的设计和安全运行提供参考。

## 2 蒸汽系统对流水击过程分析

以图1所示的蒸汽热水器为例,具体分析对流水击过程。

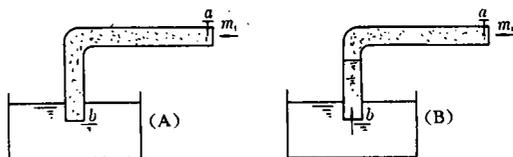


图1 热水器的汽水对流过程

$a$  为进气调节阀,  $b$  为沉入水中的蒸汽管排汽口。打开进气阀  $a$ , 调节进汽流量  $m_i$ , 使之恰好等于  $a, b$  管段的沿途凝结率, 蒸汽到达水面  $b$ , 但尚未凝入水中, 如图1(A)所示。忽略高温凝水显热, 有如下能量平衡方程:

$$r m_i = K \pi D L (t_s - t_0) \quad (1)$$

式中  $r$  为汽化潜热,  $K$  是从温度为  $t_s$  的蒸汽到温度为  $t_0$  的环境空气的传热系数,  $L$  为  $ab$  段的管长,  $D$  为管子内径。当蒸汽接触水面  $b$ , 由于蒸汽与水面的对流换热系数很大, 加快了蒸汽凝结, 使管内蒸汽凝结速率大于进汽流量, 管内蒸汽质量减少, 水面上升, 如图 1(B) 所示。管内与蒸汽接触的流动水面, 通常是一个复杂曲面。对于流动水面面积  $A$  的计算, 可用流动截面积乘上一个面积扩展倍数  $\sigma$ :

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \sigma \quad (2)$$

如果水温度与环境温度相等 ( $t_w = t_0$ ), 近似认为在水流动过程中, 管内水面温度保持不变, 则考虑了水面凝结的能量方程为:

$$r m_i = K \pi D (L - \Delta L) (t_s - t_0) + \alpha \frac{\pi}{4} D^2 \sigma \times (t_s - t_0) \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为蒸汽在水面凝结过程中的对流换热系数,  $\Delta L$  为水面进入蒸汽管内的长度。由式 (1)(3) 联立求解可得出  $\Delta L$  为

$$\Delta L = \sigma \frac{\alpha D}{4K} \quad (4)$$

实际上, 水进入蒸汽管后, 蒸汽不断凝结, 水面温度升高, 蒸汽凝结量减少, 水进入蒸汽管内的距离小于上式计算结果。

图 2 所示为另一个蒸汽热水器, 它与上一个热水器不同之处, 仅是在距管口  $b$  小于  $\Delta L$  的管上某处, 有一个扰流障碍物  $C$ , 如阀门、孔板、变径、直角弯头等。

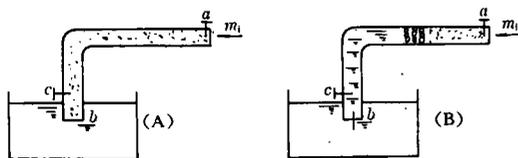


图 2 热水器的对流水击过程

因为蒸汽在水面凝结, 增大了蒸汽凝结速率, 水进入蒸汽管, 与障碍物  $C$  发生撞击, 产生大量形状不规则又不连续的单元水体。水蒸气立刻在大量单元水体的表面凝结, 形

成低压, 又促使更多的水以极快的速度冲进蒸汽管中, 形成水与蒸汽的对流冲击。我们进行的可视化实验表明: 这种对流水击过程极其迅速、剧烈, 并伴有沉重的响声与震动。

进入到蒸汽管的流动水体中, 最前部为单元水体与蒸汽组成的汽水混合物。单元水体的总质量  $m$  与多种因素有关, 本文建议按下式计算:

$$m = \frac{\pi}{4} D^3 \rho' \quad (5)$$

式中  $\rho'$  为单元水体密度。假定单元水体均为球形, 其当量直径均为  $D_0$ , 则每个单元水体的体积为  $\frac{1}{6} \pi D_0^3$ , 表面积为  $\pi D_0^2$ 。全部单元水体的表面积为:

$$A = \frac{m/\rho'}{\frac{1}{6} \pi D_0^3} \pi D_0^2 = 6 \frac{m}{\rho' D_0} \quad (6)$$

在发生对流水击的一瞬间, 蒸汽在大量单元水体表面的凝结与在管内壁面的凝结相比, 后者可忽略不计, 认为蒸汽凝结放热全部用于加热单元水体, 管内凝结换热总面积按式 (6) 计算。

在对流水击过程中, 流动水体进入的管段, 原有蒸汽都已凝结在水中。由于每个单元水体体积都很小, 且处在剧烈的运动中, 可认为单元水体内部与表面温升相同。如果流动水体进入蒸汽管内长度为  $L_v$ , 忽略凝结水显热, 则单元水体温度  $t'_w$  为:

$$t'_w = \frac{r \rho' \frac{\pi}{4} D^2 L_v}{C_{pw} \cdot m} + t_w \quad (7)$$

式中  $\rho'$  为饱和蒸汽密度,  $C_{pw}$  为饱和水定压比热。蒸汽凝结速率为:

$$m_c = \alpha A (t_s - t'_w) / [r + C_{pw} (t_s - t'_w)] \quad (8)$$

当对流水击发生时, 管内蒸汽凝结速率  $m_c$  大于进汽流量  $m_i$ , 而其差值 ( $m_c - m_i$ ) 即为管内蒸汽质量减少的速率。如果不考虑流动阻力, 认为管内蒸汽压力、温度、密度不变, 根

据蒸汽质量变化率计算蒸汽容积变化率,从而进一步计算出对流水击的速度  $u$  为:

$$u = \frac{(m_c - m_1) / \rho'}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (9)$$

### 3 蒸汽锅炉对流水击计算实例

蒸汽锅炉的省煤器、锅筒、汽水管路等都是容易发生对流水击的设备。

省煤器布置在锅炉尾部烟气之中,如果局部烟温过高,或某时刻给水温度过高,都可能使给水在省煤器的部分管段内沸腾,产生蒸汽,并充满一段管内空间。通常在汽水分界处,蒸汽与水面温度相同,不会发生蒸汽突然在水面大量凝结的情况。但有多种因素可能使水温下降,如省煤器的给水温度降低,或给水流到低温烟气区,或蒸汽进入省煤器的集箱,集箱中的水温可能较低等。当蒸汽与低温水面接触时,蒸汽在水面凝结。如果流动的水体受到扰动,分裂出大量单元水体,同前所述,将不可避免地发生水与蒸汽的对流冲击。

带有阀门或孔板的热水管路,由于阀门或孔板的节流作用,可能使管路中的热水(尤其是饱和热水)产生蒸汽,并在管路中某一段空间蓄积,当周围的热热水降温时,就可能引发对流水击。

锅炉中还有两处由于向蒸汽空间注水,而引起对流冲击:一是过热器和再热器中的喷水减温器;二是在锅筒中,当锅筒水位低于给水管管口时,给水注入蒸汽空间。在这两种

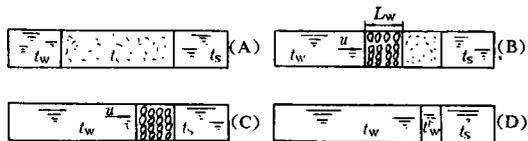


图 3 管内汽水对流冲击过程

情况下,蒸汽可能通过部分喷水孔进入到冷水管内,引起水与蒸汽对流冲击。

上述几种情况都可用存有一段蒸汽空间的一段给水管来表示,其中所发生的对流水击过程如图 3 所示。

图 3(A) 表示管内有一段蒸汽空间,两侧被水封闭,其中左侧水温为  $t_w$ ,它低于蒸汽温度  $t_s$ ; (B) 表示对流水击进行中,处于流动水体前端的单元水体占据管长为  $L_w$ ; (C) ~ (D) 表示撞击过程,全部单元水体被挤压成与管内空间形状相同的一段连续水体。

撞击持续时间  $\tau$  由单元水体占据的管长  $L_w$  和撞击速度  $u$  决定。

$$\tau = L_w / u \quad (10)$$

令  $\xi$  为单元水体总体积与其所占有的管内空间之比,即

$$\xi = \frac{m / \rho'}{\frac{\pi}{4} D^2 L_w} \quad (11)$$

则

$$L_w = \frac{m / \rho'}{\frac{\pi}{4} D^2 \xi} \quad (12)$$

如果每个边长为  $D_0$  的正方形空间内有一个直径为  $D_0$  的球形单元水体,则占空比  $\xi$  为:

$$\xi = \frac{\frac{1}{6} \pi D_0^3}{D_0^3} = \frac{\pi}{6} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),得到

$$L_w = \frac{24m}{\rho' \pi^2 D^2} \quad (14)$$

当用式(9)计算如图 3 所示的对流水击速度时,因为没有进汽,即  $m_1 = 0$ ,对流水击速度为

$$u = \frac{m_c / \rho'}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (15)$$

对流水击时,两侧水体相撞的撞击力  $F$  按动量原理计算:

$$F = \frac{\Delta M u}{\tau} \quad (16)$$

式中  $M$  为管中以速度  $u$  运动的水体总质量。

举例计算如下:有一热水管路,内径  $D$  为 50 mm,管内压力为 4 MPa,被水封闭的一段空间的蒸汽与一侧热水的饱和温度  $t_s$  为 250℃,另一侧低温热水温度  $t_w$  为 220℃。蒸汽段长度  $L_v$  为 0.15m,低温热水段长度  $L_w$  为 2m。求对流水击中,两侧水体相撞击时,运动水体的速度与撞击作用力。

解:查得有关热力参数值如下:

$$t_s = 250^\circ\text{C 时,}$$

$$P_s = 4 \text{ MPa, } \rho' = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho'' = 20.1 \text{ kg/m}^3,$$

$$\alpha = 5800 \text{ w/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)},$$

$$r = 1712.9 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{pw} = 4.866 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$t_s = 220^\circ\text{C 时, } \rho' = 840.3 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{pw} = 4.600 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

单元水体总质量  $m$  按式(5)估算:

$$m = \frac{\pi}{4} D^3 \rho' = \frac{3.14}{4} \times 0.05^3 \times 840.3 = 0.082 \text{ (kg)}$$

按上式估算结果,单元水体总质量取为 0.1 kg。如果单元水体当量直径选为 0.02 m,则单元水体全部表面积按式(6)计算为:

$$A = 6 \frac{m}{\rho' D_0} = 6 \times \frac{0.1}{840.3 \times 0.02} = 0.0357 \text{ (m}^2\text{)}$$

发生撞击时,单元水体温度  $t'_w$  按式(7)计算:

$$t'_w = \frac{r \rho'' \frac{\pi}{4} D^2 L_v}{C_{pw} \cdot m} + t_w = \frac{1712.9 \times 20.1 \times 0.785 \times 0.05^2 \times 0.15}{4.600 \times 0.1} + 220 = 242(^\circ\text{C})$$

$$+ 220 = 242(^\circ\text{C})$$

撞击前的瞬间,蒸汽在单元水体表面凝结速率  $m_c$  按式(8)计算为

$$m_c = \frac{\alpha A (t_s - t'_w)}{r + C_{pw} (t_s - t'_w)} = \frac{5800 \times 0.0357 \times (250 - 242)}{1712.9 + 4.866 \times (250 - 242)} = 0.945 \text{ (kg/S)}$$

撞击速度  $u$  按式(15)计算为:

$$u = \frac{m_c / \rho''}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{0.945 / 20.1}{0.785 \times 0.05^2} = 23.97 \text{ (m/s)}$$

撞击前,单元水体占据管段长度  $L_w$  用式(14)计算:

$$L_w = \frac{24m}{\rho' \pi^2 D^2} = \frac{24 \times 0.1}{800 \times 3.14^2 \times 0.05^2} = 0.12 \text{ (m)}$$

撞击持续时间  $\tau$  为:

$$\tau = L_w / u = 0.12 / 23.97 = 0.005 \text{ (S)}$$

以速度  $u$  运动的低温热水总质量  $M$  为

$$M = \frac{\pi}{4} D^2 L_w \rho' = 0.785 \times 0.05^2 \times 2 \times 840 = 3.29 \text{ (kg)}$$

撞击力  $F$  按(16)式计算:

$$F = \frac{\Delta M u}{\tau} = \frac{3.29 \times 23.97}{0.005} = 15772 \text{ (N)}$$

## 参 考 文 献

- 1 黄绍莹. 工业锅炉安全运行基础. 科技文献出版社, 1987
- 2 江红辉. 工业锅炉技术大全. 科学普及出版社, 1990
- 3 张昌煜. 工业蒸汽的有效利用. 上海科学技术出版社, 1984
- 4 贺平. 供热工程. 中国建筑工业出版社, 1989

作者简介 尚德敏 1943年1月生,1967年哈尔滨工业大学涡轮机专业毕业,现为该校能源科学与工程学院教授,多年来从事动力工质热物性和热能有效利用方面的科研与教学,发表专著1本、论文30篇,主持国家自然科学基金及航天部基金项目各一项,曾获国家自然科学基金,国家教委、航天部、黑龙江省等5项科技进步奖,国家级优秀教学成果特等奖。

通讯处 150001 哈尔滨工业大学热工教研室

蒸汽供热系统对流水击研究=A Study on the Convection Water Hammer of a Steam Heat Supply System[刊,中]/Shang Demin, Chen Anbin, et al (Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(4)-193~196

Convection hammering of water and steam often occurring in steam heat supply systems such as water/steam pipings, water storage vessels and steam drums is one of the most common malfunctions leading to the instable operation of boilers and steam supply equipment. The present paper analyses the thermodynamic cause of the convection water hammer and presents a method for calculating its speed and intensity with results of calculation being given for some specific examples. **Key words:** boiler, convection water hammer, thermodynamics

回热加热器的散热对机组热经济性的影响=The Effect of Heat Release of a Regenerative Heater on the Economics of a Steam-Electric Generating Set[刊,中]/Li Luping (Changsha Electrical Engineering Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(4). -197~200

By the use of an equivalent heat drop method an analysis was performed of the effect of regenerative heater heat release on the thermodynamic economics of a turbine-electrical generating set with the conception of an effective steam extraction factor being proposed, The effective steam extraction factor can be employed to evaluate the effect of the heater heat release loss on the thermodynamic economics of the above-cited generating set. **Key words:** turbine-electrical generating set, regenerative heater, equivalent heat drop, effective steam extraction factor

热电联产热电分摊新概念=A New Conception on the Apportionment of Heat and Electricity for a Cogeneration Plant [刊,中]/ Wang Shizhong (Nantong Cogeneration Plant)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(4). -201~204

Proceeding from a calorimetry method and by way of multi-layer analysis the author has come up with a new conception of apportionment. Through a mathematical derivation obtained is the mathematical expression of an actual enthalpy drop method (also called internal work method), which features conception clarity, a clear-cut physical meaning and compliance with the principle of integrity, thus ensuring the economic benefits of both the heat and electricity producers. **Key words:** cogeneration, apportionment ratio of heat and electricity based on quality, steam extraction heat supply unit, steam extraction power generation

高效液力偶合器的动态特性分析=Dynamic performance Analysis of a High-efficiency Hydraulic Coupling [刊,中]/Wang Liwen, Xie Wenlan, et al (Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(4). -205~208

This paper analyses the dynamic performance of a high-efficiency hydraulic coupling transmission system and studies the transfer function under three kinds of basic loading modes. Through the analysis of