

变工况下管内两相流与传热特性研究(I)^{***}

杨翔翔 李亮斌

(化工与生化工程系)

摘要 作为变工况下管内两相流与传热特性研究的实例,本文研究了热力发电厂除氧器滑压运行过程中的动态特性,分析了滑压运行时除氧器需要的安全余量达到最大值所需的时间,推导出最大安全余量的计算公式,计算过程中考虑了下降管中汽液两相流的存在,并以均相流模型计算了下降管中的压降,所得结果不但具有理论意义,而且可供热力工作者在设计和运行时参考。

关键词 动态特性,滑压运行,安全余量,两相流

0 前言

热力发电厂除氧器的运行方式,一般可分为定压运行、滑压运行和定滑压运行等三类。其中,滑压运行因具有提高热力系统经济性的独特优点而被广泛采用,但是它也相应给热力系统的安全运行带来潜在的危险。当除氧器滑压运行时,由于除氧器的突然降压,虽然给水箱中的水温相应降低,但是给水泵进口的水温却要延迟一段时间才会降低。因此,在同一时间内出现了两者不等的温度和不等的对应饱和压力,在这种情况下,仅当安全余量 ΔH 大于两者需要的安全余量 Δh 时,即 $\Delta H > \Delta h = v(P_s - P_t)$,才可能避免给水汽化^[1]。

以上分析表明,在滑压运行过程中,给水泵进口端有可能发生汽化,事实上,热力发电厂在运行中由此而发生事故的现象也屡有出现,因而促使广大热力工作者对除氧器运行的动态特性进行研究,以谋求寻找避免事故发生的有效措施。

1 下降管中给水压降的计算^[2,3]

当除氧器滑压运行时,为了避免给水汽化,要求设计的安全余量 ΔH 必须大于所需要的安全余量 Δh 。事实上,两者之间的压差的的形成是一个动态过程,随着时间的推移,所需的安全

• 本文 1991-10-21 收到。

•• 省自然科学基金资助项目。

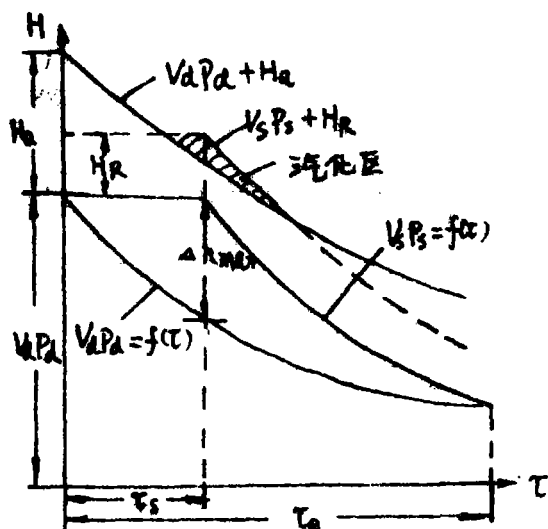


图1 安全余量变化动态过程

余量先增后减,在 $\Delta H < \Delta h$ 范围内形成一个汽化区,如图1所示,当下降管第一次换水完毕,即在时间迟滞 T 时,由于给水泵进口端与除氧器的水之间的温差最大,形成了最大需要的安全余量 ΔH_{min} ,也正是在这段时间下降管中发生了汽化。此时, ΔP 的计算应考虑流体的两相流动,而不应只是认为单相流动,并且应取第一次换水完毕时的流体状态参数作为计算 ΔP 的依据。

现考察一维两相流动,其动量方程为

$$-\frac{dP}{dX} = \frac{S}{A} \tau_0 + G^2 \frac{d}{dz} \left[\frac{X^2}{a\rho_0} + \frac{(1-X)^2}{(1-a)\rho_L} \right] + g \sin \theta [a\rho_0 + (1-a)\rho_L], \quad (1)$$

为简化计算,本文以均相流作为流体流动状态,因此,对于均相方程有

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{dP_f}{dz} + G^2 \frac{dv_u}{dz} + \rho_u g \sin \theta, \quad (2)$$

$$\text{式中 } v_u = \frac{X}{\rho_0} + \frac{1-X}{\rho_L}, \frac{1}{\rho_u} = \frac{X}{\rho_0} + \frac{1-X}{\rho_L}.$$

假定所有物性不变,并设 $\varphi_{L_0}^2 = \frac{dP_f/dz}{(dP_f/dz)_{L_0}}$, 则有动量方程的积分形式

$$\Delta P = - \left(\frac{dP_f}{dz} \right)_{L_0} \int_0^L \varphi_{L_0}^2 dz + G^2 \left[\frac{X^2}{a\rho_0} + \frac{(1-X)^2}{(1-a)\rho_L} - \frac{1}{\rho_L} \right] + g \sin \theta \int_0^L [a\rho_0 + (1-a)\rho_L] dz, \quad (3)$$

式中 a, X 分别为在距离 L 处的空泡份额与含汽率, $\left(\frac{dP_f}{dz} \right)_{L_0}$ 是假定总流量具有液体物性在同一管中流动时的摩擦压力梯度。

从含汽率为零这点开始到离这点距离为 L 的下游某一点为止,对均相方程式(2)进行积分,可得到通过长度 L 的两相流压降

$$\Delta P = - \left(\frac{dP_f}{dz} \right)_{L_0} \int_0^L \varphi_{L_0}^2 dz + G^2 \left(\frac{X}{\rho_0} + \frac{1-X}{\rho_L} \right) + \int_0^L \frac{1}{\left(\frac{X}{\rho_0} + \frac{1-X}{\rho_L} \right)} g dz, \quad (4)$$

$$\text{式中 } \left(\frac{dP_f}{dz} \right)_{L_0} = - \frac{4f_{L_0}}{D} \cdot \frac{G^2}{2\rho_L}, f_{L_0} = \frac{G}{R_0^{0.2}}.$$

因为在许多流型中,大部分液体是靠近壁面流动的,所以取 $\mu_u = \mu_L$, 因而 $\varphi_{L_0}^2 = \frac{\rho_L}{\rho_u} = \rho_L \left(\frac{X}{\rho_0} + \frac{1-X}{\rho_L} \right)$, 这时沿下降管 L 长的压降为

$$\Delta P = - \left(\frac{dP_f}{dz} \right)_{L_0} \int_0^L \rho_L \left(\frac{X}{\rho_0} + \frac{1-X}{\rho_L} \right) dz + G^2 \left(\frac{X}{\rho_0} + \frac{1-X}{\rho_L} \right)$$

$$+ g \int_0^L \frac{1}{\left(\frac{X}{\rho_0} + \frac{1-X}{\rho_L}\right)} dz, \quad (5)$$

式中, $\left(\frac{dP_f}{dz}\right)_{L_0} = \frac{2C_1 G^2 \mu_L^{0.2}}{\rho_L G^{0.2} D^{0.4}}$.

2 最大安全余量 Δh_{\max} 的计算^(1,4)

2.1 几点假设

(1) 进入除氧器的凝结水温取最低的且不变的热井水温。(2) 汽机甩负荷后, 各级抽汽与主汽门连锁自动关闭, 因此进入除氧器的抽汽和高压加热器的疏水近乎为零。(3) 进入除氧器的凝结水量和给水泵吸取的水量在整个动态过程中保持平衡。

2.2 除氧器给水焓的确定

由图2可得除氧器能量平衡式

$$M di_d = Wi_{(c)} d\tau - Wi_d \cdot d\tau, \quad (6)$$

设自用负荷开始, 水容量 M_w 的减少正比于凝结水焓值的减少, 且其比值保持不变, 即

$$a = \frac{i_{LH} - i_c}{M_w}. \quad (7)$$

从式(6)可见, 除氧器中给水焓的衰减规律为: (1) 热井水进入除氧器前, 由于凝结水管系有蓄热, 进入除氧器的凝结水焓 $i_{(c)}$ 是时间 τ 的函数, 甩负荷后低压加热器出口焓 i_{LH} 逐渐降至热井水焓 i_c , 它的下降速度在凝结水量不变时, 取决于凝结水管系的水容量 M_w 的大小, M_w 愈大, $i_{(c)}$ 降得愈慢; (2) 当热井水开始进入除氧器后, $i_{LH} = i_c$, $a = 0$, 即从凝结

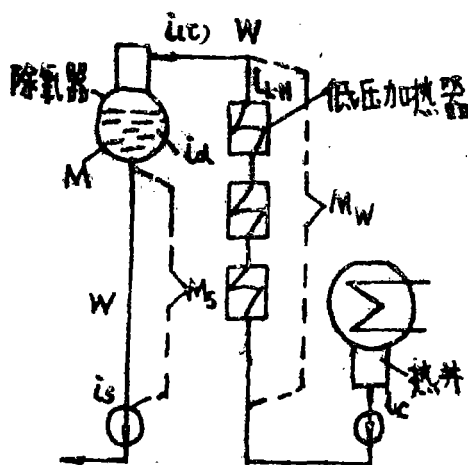


图2 除氧器热力系统

水管系的水含量全部进入除氧器开始, $\tau_w = \frac{M_w}{W}$, 因此, τ_w 是上述衰减规律的衔接点。

根据上述衰减规律可分别推导出(1) $\tau \leq \tau_w$ 和 $\tau > \tau_w$ 时除氧器给水焓的计算式。(1) 当 $\tau \leq \tau_w$ 时

$$i_{(c)} = i_{LH} - \frac{W\tau(i_{LH} - i_c)}{M_w} = i_{LH} - aW\tau, \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 解微分方程并以 $\tau=0, i_d=i_0$ 为边界条件, 则有

$$i_d = a(M - W\tau) + i_{LH} - (aM - i_0 + i_{LH})e^{-\frac{W}{M}\tau}, \quad (9)$$

当 $\tau = \tau_w = \frac{M_w}{W}$ 时, 代入上式可得

$$i_{d(w)} = a(M - M_w) + i_{LH} - (aM - i_0 + i_{LH})e^{-\frac{M_w}{M}}. \quad (10)$$

(2) $\tau > \tau_w$. 将 $i_c = i_{(c)}$ 代入(6), 解微分方程并以 $\tau = \tau_w, i_d = i_{d(w)}$ 为边界条件, 则有

$$i_d = i_c + [aM(e^{\frac{W}{M}} - 1) + (i_0 - i_{LH})]e^{-\frac{W}{M}\tau}. \quad (11)$$

2.3 最大安全余量 Δh_{\max} 的计算

为了计算 Δh_{\max} , 只需在计算 $\Delta i_{\max} = (i_s - i_d)_{\max}$ 时, 由 i_s 和 i_d 查取蒸汽表中相应的 ρ_s, ρ_d, v_s 和 v_d , 便可求出 Δh_{\max} 如下:

$$\Delta h_{\max} = (\rho_s - \rho_d) \frac{v_s + v_d}{2} \times 10^4. \quad (12)$$

3 达到最大安全余量所需时间 τ_{\max} 的计算

如图3所示, 根据时间的推进, 可以计算出最大的焓差 Δi_{\max} 以及相应的最大时间 τ_{\max} .

3.1 $\tau \leq \tau_s$

即在下降管第一次换水完毕以前, 至完毕的一段时间, 给水泵进口给水焓还未下降, 等于瞬态开始时水箱中的焓, 即 $i_s = i_0$. 由式(9)求得

$$\begin{aligned} \Delta i &= i_s - i_d \\ &= i_0 - [i_{LH} + a(M - W\tau) - (aM - i_0 + i_{LH})e^{-\frac{W}{M}\tau}], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta i}{d\tau} &= \frac{W}{M}(i_0 - i_{LH})e^{-\frac{W}{M}\tau} \\ &\quad + aW(1 - e^{-\frac{W}{M}\tau}), \end{aligned} \quad (14)$$

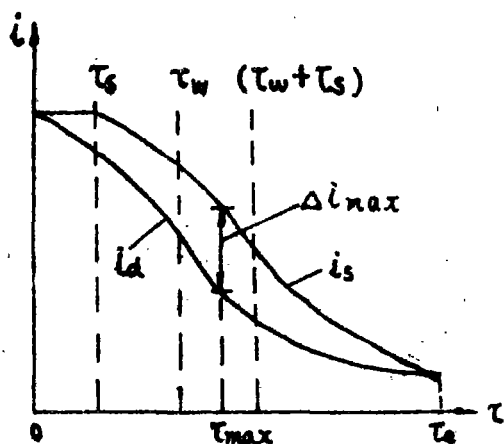


图3 水焓变化动态过程

由上式可见, 在 $\tau \leq \tau_w$ 范围内, $\frac{d\Delta i}{d\tau}$ 都是大于零, 说明 Δi 随时间递增.

3.2 $\tau_s < \tau \leq \tau_w$

即在下降管第一次换水完毕后, 至凝结水第一次换水完毕为止, 在这段时间内, 给水泵进口焓 i_s 和水箱中焓 i_d 都可由 $\tau \leq \tau_w$ 的规律求得. 由于 i_s 总是滞后一段时间 τ_s , 因此计算 i_s 时, 其时间 τ 应以 $(\tau - \tau_s)$ 代替, 将 $\tau_s = \frac{M_s}{W}$ 和 $a = \frac{i_{LH} - i_c}{M_w}$ 代入, 可得

$$\begin{aligned} \Delta i &= i_s - i_d = a[M - W(\tau - \tau_s)] + i_{LH} - (aM - i_0 + i_{LH}) \\ &\quad \cdot e^{-\frac{W}{M}(\tau - \tau_s)} - [a(M - W\tau) + i_{LH} - (aM - i_0 + i_{LH}) \cdot e^{-\frac{W}{M}\tau}], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{d\Delta i}{d\tau} = W\left(\frac{i_{LH} - i_c}{M_w} - \frac{i_0 - i_{LH}}{M}\right)(e^{\frac{M_s}{M}} - 1)e^{-\frac{W}{M}\tau}, \quad (16)$$

显然 Δi 在这段时间内仍随时间递增.

3.3 $\tau_w \leq \tau \leq (\tau_w + \tau_s)$

即热井水已通过除氧器, 但还未到达给水泵进口端, 正在下降管中. 由于 $\tau > \tau_w$, 给水箱中

的焓 i 虽然可用式(11)计算,但给水泵进口焓 i 因滞后一段时间 τ , 所以还是用超前 τ 时的给水箱中的水焓的衰减规律,即利用式(9)计算,以 $\tau = \tau - \tau_i$, $\tau_i = \frac{M_i}{W}$ 和 $\tau_w = \frac{M_w}{W}$ 代入,可得

$$\Delta i = a(M + M_i + M_w - W\tau) - [(aM - i_0 + i_{LH})(e^{\frac{N}{N^*}} - 1) + aMe^{\frac{N}{N^*}}]e^{-\frac{N}{N^*}\tau}, \quad (17)$$

$$\frac{d\Delta i}{d\tau} = -aW + \frac{W}{M}[(aM - i_0 + i_{LH})(e^{\frac{N}{N^*}} - 1) + aMe^{\frac{N}{N^*}}]e^{-\frac{N}{N^*}\tau}, \quad (18)$$

由上式可见,在 $\tau_w \leq \tau \leq (\tau_w + \tau_i)$ 范围内, $\frac{d\Delta i}{d\tau}$ 有一零值,即 Δi 有一最大值 Δi_{\max} ,其对应的时间为 τ_{\max} ,求出如下

$$\tau_{\max} = \frac{M}{W} \ln[e^{\frac{N}{N^*}} + \frac{(aM - i_0 + i_{LH})(e^{\frac{N}{N^*}} - 1)}{aM}], \quad (19)$$

如果以此时对应的参数计算,即可求得 Δh_{\max} .

3.4 $\tau > (\tau_w + \tau_i)$

即热井水到达给水泵进口端以后,这时 i_i 和 i 都按式(6)计算.不过 i 仍滞后一段时间 τ , 即 τ 以 $(\tau - \tau_i)$ 代入而得

$$\Delta i = [aM(e^{\frac{N}{N^*}} - 1) + (i_0 - i_{LH})](e^{\frac{N}{N^*}} - 1)e^{-\frac{N}{N^*}\tau}, \quad (20)$$

$$\frac{d\Delta i}{d\tau} = -\frac{W}{M}[aM(e^{\frac{N}{N^*}} - 1) + (i_0 - i_{LH})](e^{\frac{N}{N^*}} - 1)e^{-\frac{N}{N^*}\tau}, \quad (21)$$

此时 $\frac{d\Delta i}{d\tau} < 0$, 所以 Δi 随时间推移而减小.

4 实例计算

现以漳平火电厂实际运行情况为例,对除氧器改滑压运行时进行安全余量校核计算.

4.1 漳平火电厂提供的计算参数

$W = 58.0 \text{ kg/s}$, $H_R = 5.0 \text{ m}$, $M = 98000 \text{ kg}$, $P_0 = 6.0 \text{ atm}$, $M_i = 1650 \text{ kg}$, $P_i = 1.2 \text{ atm}$, $M_w = 2850 \text{ kg}$, $H_i = 16.0 \text{ m}$, $d = 310 \text{ mm}$, $i_0 = 668.8 \text{ kJ/kg}$, $i_e = 438.9 \text{ kJ/kg}$, $i_{LH} = 576.8 \text{ kJ/kg}$, $i_i = 125.4 \text{ kJ/kg}$.

4.2 下降管中压降

不计及两相流动时

$$\left(\frac{dP'}{dZ}\right)_L = -\frac{4f_L}{D} \frac{G^2}{2\rho_L},$$

代入相关参数计算得 $\Delta P' = 9.99 \times 10^3 \text{ Pa}$. 如考虑两相流动时

$$\Delta P = -\left(\frac{dP_f}{dZ}\right)_L \int_0^L \rho_L \left(\frac{X}{\rho_v} + \frac{1-X}{\rho_L}\right) dZ + G^2 \left(\frac{X}{\rho_v} + \frac{1-X}{\rho_L}\right) + g \int_0^L \frac{1}{\left(\frac{X}{\rho_v} + \frac{1-X}{\rho_L}\right)} dz,$$

经过适当推导并代入相应参数,通过计算机计算可得 $\Delta P = 1.37 \times 10^4 \text{ N/m}^2$.

4.3 设计安全余量 ΔH

$$\Delta H = H_s - H_A - v\Delta P = 9.60 \text{ m}.$$

4.4 需要的最大安全余量 Δh_{\max}

$n = \frac{i_{1,0} - i_0}{M_w} = 0.036$, $\tau_s = \frac{M_s}{W} = 19.14 \text{ s}$, $\tau_w = \frac{M_w}{W} = 22.43 \text{ s}$, $\tau_s = 494.49 \text{ s}$, $\tau_{\max} = 41.00 \text{ s}$, 因 $\tau_w < \tau_{\max} < (\tau_w + \tau_s)$, 所以采用式(11)计算得

$$i_s = 643.7 \text{ kJ/kg}.$$

查表得 $P_s = 5.19 \times 10^5 \text{ Pa}$, $v_s = 0.001095 \text{ m}^3/\text{kg}$, 代入式(12)求得

$$i_s = 660.4 \text{ kJ/kg}.$$

查表得 $P_s = 5.59 \times 10^5 \text{ Pa}$, $v_s = 0.001098 \text{ m}^3/\text{kg}$. 因此

$$\Delta h_{\max} = (P_s - P_s) \frac{v_s + v_s}{2} \times 10^4 = 4.43 \text{ m},$$

显然 $\Delta h_{\max} < \Delta H$. 因此, 热力系统改滑压运行是安全的.

5 结论

(1) 由于凝结水管系具有一定的水容量, 因此给水汽化最危险时刻不是出现在下降管第一次换水完毕, 而是出现在凝结水管系第一次换水完毕和凝结水管系加上下降管的第一次换水完毕的总时间之前的一段时间里.

(2) 现有热力发电厂改为滑压运行是可行的.

(3) 在研究除氧器动态特性时, 考虑两相流的存在具有重要意义. 因为在某些情况下, 两相流压降有可能非常之大.

(4) 作为今后进一步工作, 应随着除氧器压力的瞬态波动, 计算因这一波动引起的下降管两相流压降, 并进而分析压力波动与水泵进口流动情况的相互影响, 这样可以更真实地反映实际情况.

符 号 表

H_s ——除氧器水箱水位至给水泵轴心的几何高度; v_s ——除氧器中水的平均比容; P_s ——除氧器的工作压力; v ——下降管中水的平均的容; ΔP ——下降管中给水压降; H_A ——给水泵需要的净正吸入水头; v_s ——给水泵进口水的比容; P_s ——给水泵进口水温对应的汽化压力; H_s ——给水泵进口的有效汽蚀余量; ΔH ——设计安全余量; Δh ——为避免汽化所需的安全余量; Δh_{\max} ——最大安全余量; τ_s ——下降管第一次换水完毕所需时间; τ_w ——凝结水管系的水容量全部进入除氧器所需时间; τ ——时间; W ——进入除氧器的凝结水流量; P_0 ——暂态过程开始进除氧器中的压力; M ——除氧器水箱的贮水量; i_0 ——暂态过程开始时除氧器中给水焓; i_s ——除氧器中水焓; M_w ——凝给水管系原有水容量; M_s ——下降管中水容量; $i_{(0)}$ ——进入除氧器的凝结水焓; i_{LW} ——甩负荷后低压加热器出口焓; i_s ——热井水焓; i_s ——暂态开始时除氧器中给水焓; W ——进入除氧器的凝结水流量; i_s ——给水泵进口水焓; G ——下降管中水的质

量流速; α ——空汽份额; X ——汽相质量流量份额; ρ_g ——气体密度; μ_g ——气体粘性系数; u_g ——气体速度; μ_L ——液相粘性系数; ρ_L ——液相密度; ρ_H ——均相流密度; v_H ——均相流比容; α_L ——下降管下游 L 点的空汽份额; X_L ——下降管下游 L 点的汽相质量流量份额; d ——下降管直径; μ_H ——均相流粘性系数.

参 考 文 献

- [1] 马文智,除氧器的动态分析,电力技术,3(1980).
- [2] D·巴特沃思,两相流与传热,原子能出版社,(1985).
- [3] 汤焱孙,沸腾传热和两相流,机械工业出版社,(1980).
- [4] 蓬静欣、邓祖诚,除氧器滑压暂态过程及给水泵汽蚀余量降落值的计算,热力发电,5(1987).

A Study of Two—Phase Flow and Heat Transfer in a Pipeline under Changing Operating Condition

Yang Xiangxiang Li Liangbin

(Department of Chemistry and Biochemistry)

Abstract In relation to the two—phase flow and the heat transfer character in a pipeline under changing operating condition, the authors present a case study. The present work covers a study of dynamic performance of a deaerator used in a heat power plant during sliding pressure operation; an analysis of the time required for operating deaerator to reach maximum safety margin; and a formula derived for calculating the maximum safety margin. In calculation, the presence of gas-liquid two-phase in descending pipeline is taken into account, and the pressure drop within it is calculated in the light of a model of homogeneous flow. In addition to theoretical significance, the results may serve as a reference for the engineer of heat engineering.

Key words dynamic performance, sliding pressure operation, safety margin, two-phase flow.