

文章编号: 1005-8893 (2002) 03-0043-03

## 锅炉汽包壁温仿真计算方法<sup>\*</sup>

肖立川<sup>1</sup>, 薛国新<sup>2</sup>

(1. 江苏石油化工学院 能源工程系, 江苏 常州 213016; 2. 江苏石油化工学院)

摘要: 汽包壁温是燃煤锅炉开工过程中的重点关心对象。其精确动态计算较复杂。通过分析运行资料, 给出汽包内部温度的分布规律, 在此基础上提出了一种新的计算汽包壁温的近似方法。

关键词: 燃煤锅炉; 汽包; 仿真; 近似计算

中图分类号: TK 124 文献标识码: A

一般来说, 汽包壁温的计算并非一个独立的固体热传导问题, 而是汽包壁固体热传导和其内部气液两相流传热传质的耦合问题<sup>[1]</sup>。

对于固体热传导问题的求解, 研究已较为成熟, 应用最为普遍的软件是 ADINAT 软件。而气液两相流动是流体力学的一个分支, 研究尚较不成熟。其计算必须考虑两相间的相互作用, 还常常涉及到相变问题<sup>[2]</sup>。

人们通常首先根据问题的具体情况, 确定出流型。然后再用传热传质方程及动量传递方程进行计算。

目前描述流型的方法很多, 较为简单和实用的方法是形态学方法<sup>[3]</sup>, 它是按两种相的相对形态进行区分。例如, 常常划分成泡状流、弹性流、环状流和滴状流等。流型变化意味着相交界面形状变化, 因而意味着相之间的动量传递模式和热传递模式变化。这种变化改变了控制这类传递的诸效应之间的相对重要性。人们虽已提出了一些方法用于确定流型的类别以及各流型之间相互转化的过渡条件, 但并不存在通用的方法。

仿真中物料守恒定律被普遍地加以运用<sup>[4]</sup>。在定常流动和一维流动的假定下, 对于气液两相流动<sup>[5,6]</sup>, 质量守恒方程, 动量守恒方程和能量守恒

方程分别如下。

质量守恒方程:

$$d[\alpha\rho_v u_v + (1-\alpha)\rho_l u_l] = 0 \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  为空泡份额,  $\rho_v$  为气相密度,  $\rho_l$  为液相密度,  $u_v$  为气相速度,  $u_l$  为液相速度。

动量守恒方程:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{P_r}{A}\tau_0 + G^2 \frac{dv_{TP}}{dz} + \rho_m g \sin\theta \quad (2)$$

其中,  $p$  为压力,  $z$  为轴向坐标,  $P_r$  为湿周,  $A$  为横截面积,  $\tau_0$  为壁面剪应力,  $G$  为质量流速,  $v_{TP}$  为两相比容,  $\rho_m$  为真实密度即混合物密度,  $g$  为重力加速度,  $\theta$  为轴线方向即流动方向与铅垂线之间的夹角。

能量守恒方程:

$$-\frac{dp}{dz} = \rho \frac{dF}{dz} + \frac{1}{2} \rho G^2 \frac{d}{dz} \left\{ \frac{x^3}{\alpha^2 \rho_v^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-\alpha)^2 \rho_l^2} \right\} + \rho_g \sin\theta \quad (3)$$

其中,  $\frac{1}{\rho} = \frac{x}{\rho_v} + \frac{1-x}{\rho_l} = xv_v + (1-x)v_l = v$ 。  $x$  为质量含气率,  $F$  为流体与汽包内壁之间的阻力,  $q$  为热率密度。

综上所述, 易见使用精确方法对汽包壁温分布, 计算较为复杂。为此, 本文提出了一种近似算法。

\* 收稿日期: 2001-12-10

基金项目: 江苏省科技厅 2000 年度国际合作基金资助 (BS2000730)

作者简介: 肖立川 (1946-), 男, 江苏靖江人, 教授。

### 1 近似算法

考虑某锅炉汽包壁温的计算，将其内部蒸汽和水均看作为内部热源载体，用近似计算公式确定出其内部的温度分布，再在此边界温度条件下求解关于汽包壁温的瞬态非线性热传导问题。在开工过程中，汽包壁温分为两阶段计算，第一个阶段为上水阶段，第二阶段为升压阶段。在上水阶段，汽包内部底部热源温度为上水温度，而其顶部内部热源温度则自常温开始随着传热过程的进行而逐步升高；在升压阶段，汽包底部内部温度为欠饱和水温度，顶部内部温度则为饱和蒸汽温度。

对于某个典型开工过程，根据资料可确定出内部温度分布规律：

$$\theta = f_1(\bar{z}, H_E) = f_2(\bar{z}, H_1) \quad (4)$$

其中， $\bar{z} = \frac{z}{z_0}$  为无量纲高度参数， $z_0$  为汽包的整个高度， $z$  为从汽包底部到 (4) 式中温度计算点的高度， $H_E$  为典型开工过程中从开工初起到当前时刻的总的进料焓， $H_1$  为汽包内部总的焓增量，它等于  $H_E$  减去总的焓损失。在直到锅炉投入负荷和安全门开启泄压前，焓损失基本上是由汽包壁散热而引起。

对于实际的开工过程，其上水及点火升温升压速度与典型工况不一致。因此， $H_1 : H_E$  与典型开工过程不相同，也不存在一种对应关系。这时， $f_1(\bar{z}, H_E)$  和  $f_2(\bar{z}, H_1)$  并不代表实际的温度分布，但我们仍使用它们，我们假定温度为：

$$\theta = (1 - \beta(\bar{z})) f_1(\bar{z}, H_E) + \beta(\bar{z}) f_2(\bar{z}, H_1) \quad (5)$$

其中， $\alpha(\bar{z})$  是  $\bar{z}$  的严格单调上升函数，且  $\beta(0) = 0, \beta(1) = 1$ ，作为近似计算，可取  $\beta(\bar{z}) = \bar{z}$ 。

对于一般的而非以前经历有记载资料的开工过程， $H_E$  仍可由进入汽包底部的水流量及其温度变化的历史积分求得。 $H_1$  需根据对于本次开工过程进行的近似温度分布计算结果的历史值进行积分而求得。 $H_E$  和  $H_1$  均随时间而变化，在用 (5) 式确定了温度分布后，将其作为汽包内部的边界条件。这样，汽包壁温计算问题成为具有非正常温度边界条件的瞬态非线性热传导问题，将汽包壁的所占体积区域记为  $V$ ，表面部分记为  $S$ ，上述非线性热传导问题可表示为：

$$\begin{cases} C\dot{\theta} = (k\theta_r)_n + q^B, & \text{在 } V \text{ 内} \\ k \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_S = q^S + h(\theta_e - \theta) + h_r(\theta_r^2 + \theta)(\theta_r - \theta), & \text{在 } S \text{ 上} \end{cases} \quad (6)$$

其中， $k = k(\theta)$  是导热系数， $c = c(\theta)$  是单位体积的热容量， $q^B = q^B(x, t)$  是单位体积的热量生成速度， $q^S = q^S(x, t)$  是边界热流输入量， $\theta_e = \theta_e(x, t)$  是表面环境温度， $h = h(\theta_e, \theta, x, t)$  是边界对流系数， $n$  表示边界面外法线， $\theta_r = \theta_r(x, t)$  是辐射源温度，变量  $h_r = h_r(\theta, \theta_r, x, t)$  由 Stefan-Boltzman 常数、辐射源和吸收物质系数及几何形状因数等确定， $\theta$  是物体的温度， $x$  是座标  $(x, y, z)$ ， $t$  是时间。对于 (6) 式所表示的瞬态非线性热传导问题，可采用 ADINAT 软件进计算。

进一步地，对于上述所得温度分布进行修正。其办法如下，将 (5) 式中的  $\beta$  取为：

$$\beta(\bar{z}) = c_1 \bar{z} + (1 - c_1) \bar{z}^2, \quad c_1 > 0 \quad (7)$$

对于可测量数据的各开工过程，取用一系列不同的  $c_1$ ，对每一  $c_1$  值，可以算出各开工过程实测温度与 (5) 式温度之差对于汽包高度和时间域的二重积分的均方根，再用样条插值方法，拟合出此均方根对于  $c_1$  的变化曲线，求出其最小点  $c_{min}$ ，然后在以后的计算中取：

$$\beta(\bar{z}) = c_{min} \bar{z} + (1 - c_{min}) \bar{z}^2 \quad (8)$$

### 2 算 例

计算某锅炉的汽包壁温，汽包壁材料为 19Mn5 钢，其形状为一个平放的圆筒，圆筒直径为 1 600 mm，壁厚为 100 mm。垂直于其轴线于其中间切出一个剖面，剖面形状如图 1 所示。在该剖面上，没有垂直于该剖面方向上的热量流动，因此热传导问题成为平面非线性热传导问题。另外，由于左右对称关系，可只取出其一半进行计算。作如图 1 所示的 8 节点等参元划分。计算区域被划分为 6 个等参元，共含有 33 个节点，以这 33 个节点上的温度作为未知数。作有限元离散。应用 (5) 式算出 (6) 式中所需的内部表面温度边界条件，使用 ADINAT 软件求解温度分布。对于一个无先验数据的开工过程，我们用上述方法计算了汽包的上下壁温并与实测结果进行了比较。比较结果见表 1。

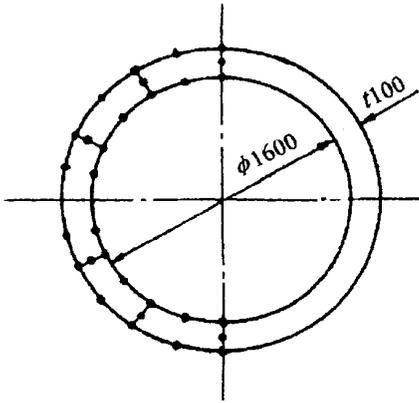


图1 汽包剖面有限元划分

表1 汽包上下壁温计算值与实测值的比较

t/min	上壁温/℃		下壁温/℃		上下壁温差/℃	
	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
4	43.7	43.9	54.6	54.0	-10.9	-10.1
8	49.9	51.3	60.4	59.6	-10.5	-8.3
12	56.1	55.9	64.6	64.0	-8.5	-8.1
16	65.6	64.8	73.0	72.0	-7.4	-7.2
20	75.1	74.0	81.1	80.0	-6.0	-6.0
24	82.6	81.5	87.2	86.0	-4.6	-4.5
28	93.5	92.9	96.8	96.0	-3.3	-3.1
32	102.7	103.6	103.7	104.0	-1.0	-0.4
36	116.3	116.1	113.8	114.0	2.5	2.1
40	132.2	131.2	127.4	128.0	4.8	3.2
44	145.2	146.4	138.4	140.0	6.8	6.4
48	161.1	162.8	151.6	154.0	9.5	8.8
52	186.7	188.1	174.5	176.0	12.2	12.1
56	201.2	203.1	189.7	192.0	11.5	11.1
60	228.6	230.9	217.6	220.0	11.0	10.9

在用 ADINAT 法时, 为了选择适当的时间步长  $\Delta t$ , 必须进行广义特征值问题的求解。为了节省其计算量, 我们根据原先各时间步长使用外推法确定出当前时间步长的近似值, 由此开始进行特征值的迭代计算。

### 3 结 论

求解使用本文提出的近似方法, 能以合理的计算规模, 确定出锅炉汽包壁温。这为对优化整个开工过程的操作提供了有力的研究手段。本文的简化思想可望推广应用于其它容器的壁温计算。

### 参考文献:

- [1] 冯俊凯, 沈幼庭. 锅炉原理及计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] 牛天况. 大型直流锅炉受热面设计方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 1987.
- [3] Hetsroni G. Handbook of Multiphase System [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1982.
- [4] 薛国新, 肖立川, 赵涤之. 网络分析方法在仿真中的应用 [J]. 江苏石油化工学院学报, 1996, 8 (1): 6-11.
- [4] Hewitt G F. Measurement of Two-phase Flow Parameters [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [5] Hsu Y Y, Graham W. Transport Processes in Boiling and Two-phase Systems [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1976.

## A New Accumulate Method Used for the Calculation of the Temperature

### Distribution of a Vapor-Bag Wall of a Boiler

XIAO Li-chuan<sup>1</sup>, XUE Guo-xin<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering, Jiangsu Institution of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China; 2. Jiangsu Institution of Petrochemical Technology)

**Abstract:** The calculation of the temperature distribution of the vapor-bag is an important problem concerned in the starting process of an coal-burning boiler. Its accurate dynamic calculation has a higher complexity. Through analyzing the running data, the temperature distribution inside a vapor-bag is given and a new accumulate method for the calculation of the temperature distribution of a vapor-bag wall is presented.

**Key words:** coal-burning boiler; vapor-bag; simulation; approximate calculation