

加热法测量湿度探针取样过程的数值模拟与分析^{*}

(西安交通大学) 李炎锋 王新军 徐廷相
(西安热工研究院) 刘志江

[摘要] 建立了加热法测量湿度探针进口附近区域流场的数学模型, 并通过对其进行数值模拟来分析由于非等动能取样及汽流方向偏离轴线所造成的测量误差, 从而为加热法测湿探针的设计及其在工程中的运用提供依据。

关键词: 等动能取样; 流场模拟; 多孔度

中图分类号: TK 262

1 引言

目前, 在应用于测量涡轮及分离器中流动湿蒸汽湿度的方法中, 加热法由于具有原理简单、精度高以及对环境没有特殊要求等诸多优点而被选用。加热法测量湿度的过程中, 如何取得具有代表性的试样是测试成功的关键之一。但是要获取探针进口的全面定向并使探针前汽流扰动最小, 就需要一个很复杂的装置, 同时还必须对探针内部压力进行调节。MOORE设计了一套加热法湿度测量探针^[1], 其进口段采用一种简单的设计, 为了确定由于等动能取样造成的误差, 对进口处汽流进行二元位流计算, 得出了一系列结果。但是在上述计算中, 存在一些不足之处: (1) 计算时将汽流视为不可压缩理想流体, 并且只进行二维层流流场计算, 但实际涡轮末几级中汽流的马赫数大于0.3, 流动处于紊流状态, 采用原来的计算方法得到的结果就不合理; (2) 采用方管的进口段设计不太合理, 依据文献[2]取样头部一般应采用圆管的进口设计。(3) 当汽流方向与取样头部的轴线方向发生偏斜时, 必须进行三元流场计算。另外, 湿度测量的一个特点是: 直到目前为止, 还没有一套标准装置, 或者说还不能备置一份已知湿度或水滴直径的湿蒸汽流, 以供对新设计或制造的测量装置进行标定、校正或

比较, 这就对蒸汽湿度的测量提出了更高的要求。因此, 对取样头部附近流场的数值模拟显得更为重要。本文的主要工作为: (1) 建立取样头部附近流场的数学模型, 并对其数值模拟计算; (2) 通过数值计算来对分别由于非等动能取样及流动方向偏离轴线所带来的测量误差进行分析。

2 数学模型的建立

取样进口附近的流动是复杂的三维湍流流动, 当探针进口正对汽流方向时, 可简化为管道的某一对称截面二维流动, 本文采用K-ε模型进行计算, 为了简化计算, 作出以下假定: (1) 忽略流动过程中的相变; (2) 水珠大小相同且在汽流中均匀分布; (3) 探针的本身部分对计算区域开始处流场已没有干扰。

2.1 可压缩湍流流动的动量与能量控制方程

在三维圆柱轴对称坐标系中, 汽流在各个方向的分量为 (u, v, ω) , 其方程为:

连续方程:

$$\frac{\rho v}{r} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho \omega \phi) = \\ \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\Gamma r \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial \theta}) + S \end{aligned} \quad (2)$$

广义扩散系数 Γ

$$u, v, \omega \text{ 方程: } \Gamma = \mu + \mu_t$$

$$k \text{ 方程: } \Gamma = \mu + \mu_t / \sigma_k$$

$$\epsilon \text{ 方程: } \Gamma = \mu + \mu_t / \sigma_\epsilon$$

* 本文工作得到动力工程多相流国家重点实验室基金和陕西省科委基金的资助(97C15)

收稿日期: 1998-07-06 收修改稿: 1998-10-20

作者简介: 李炎锋(1971-), 男, 河南新密市人, 博士研究生, 主要从事涡轮及分离器中流动湿蒸汽的湿度加热法测量研究。通讯处: 710049 西安交大博士能动学院涡轮机教研室。

其中源项 S 的表达式见表 1。

表 1 动量方程中各参数源项的表达式

参数方程	源项表达式
u 方程	$-\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_{eff} r \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial \theta})$
v 方程	$-\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}[\mu_{eff} r \frac{\partial(\omega/r)}{\partial r}] - \frac{2\mu_{eff}}{r}(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} + \frac{v}{r}) + \frac{\rho \omega^2}{r}$
ω 方程	$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} r \frac{\partial \omega}{\partial \theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[\mu_{eff}(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{\omega}{r})] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}[\mu_{eff}(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} + \frac{2v}{r})] + \frac{\mu_{eff}}{r}[\frac{r}{r} \frac{\partial(\omega/r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}] - \frac{\rho \omega v}{r}$
k 方程	$G - \rho \epsilon$
ε 方程	$\frac{\epsilon}{K}(C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$

其中

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{r \partial \theta} + \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{r \partial \theta} \right]^2 + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{\omega}{r} \right]^2 \right\}$$

依据文献 [3], 常数 $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为 1.44、1.92、1.0、1.3。

汽流状态方程采用文献 [4] 的水蒸气状态方程:

$$\begin{aligned} P &= \rho RT(1 + B\rho + C\rho^2) \\ B &= a_1(1 + \tau/\alpha_b)^{-1} + a_2 e^\tau(1 - e^{-\tau})^{5/2} + \tau^{-1/2} + a_3 \tau \\ C &= a(\tau - \tau_0)e^{-a\tau} + b \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\tau = 1500/T$

$$\begin{aligned} \alpha_b &= 10\,000.0 & a_1 &= 0.001\,5 \\ a_2 &= -0.009\,42 & a_3 &= -0.000\,488\,2 \\ \tau_0 &= 0.897\,8 & \alpha &= 11.16 \\ a &= 1.772 & b &= 1.5 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

在计算的过程中, 由于区域内汽流参数尤其是温度变化较小, 采用简化的计算公式

$$\rho = P/RT(1 + B\rho_{in} + C\rho_{in}^2) \quad (4)$$

其中, ρ_{in} 为区域开始处汽流的密度, T 为汽流绝对温度。文献 [5] 对船用涡轮进汽阀箱内汽流进行此种简化处理, 并进行过考核计算, 表明该简化能够达到所要求的精度。

2.2 水滴运动方程

在求解的过程中, 采用拉格朗日方法计算水滴的轨迹, 在此不考虑水滴对汽流的影响, 并且根据文献 [6] 假定湿蒸汽流中包含具有同一直径 d_{32} (Sauter 直径) 的水滴。水滴在各个方向的运动方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = G(u - u_p)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = G(v - v_p)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} = G(\omega - \omega_p) \quad (5)$$

其中 $G = \left[\frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} \right] / g(Re)$
 $g(Re) = C_D Re / 24.$

$1/G$ 表示水滴的惯性松弛时间, 即从湿蒸汽出现速度不平衡开始, 经过该段时间后, 水滴速度的偏离值为初始值的 $1/e (= 0.3679)$ 。式中 C_D 为阻力系数。

依据对式 (6) 积分得出水滴的运动方程和位移方程

$$u_{p1} = u - (u - u_{p0}) \exp(-G^* \Delta t) \quad (6)$$

$$x_{p1} = x_{p0} + u \Delta t - (u - u_{p0}) [1 - \exp(-G \Delta t)] / g \quad (7)$$

y 方向和 z 方向的方程与 x 方向相类似。

为了研究不同取样直径管道和不同直径的水珠的运动, 定义无因次惯性参数 P_1

$$P_1 = \frac{GD}{u_\infty} = \frac{18\mu D}{d_p^2 u_\infty \rho_p} g(Re) \quad (8)$$

3 数值模拟方法

3.1 边界条件的处理

进口: 给定流量与 x, y, z 方向上的分速度, 进口焓值、湍流动能及耗散率; 出口: 给定管内管外的出口压力; 管壁: 采用壁面函数法处理; 区域边界: 采用自由流动边界条件。

3.2 固体空度的处理

为了模拟放置与流场中的探针取样头部, 本文引入多空度概念并结合壁面函数来模拟。对于任意一个单元控制体 P 把它想象成一个多孔性质的物体, 其六个面都存在面积空度 (= 通流面积/总面积)

和体积空度(= 通流体积/总体积), 于是, 就可以对 P 内实际流体写出其控制方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi VP_{ov})_p + \sum_{e, w, n} [(\rho V\phi - \Gamma_{grad}\phi) \cdot AP_{oa}] = (S\phi VP_{ov})_p \quad (9)$$

其中 A —— 网格面积, V —— 网格体积, P_{oa} —— 面空度, P_{ov} —— 体积空度。

对于实心固体, 体积空度及面积空度均为零, 这样, 通过给定各个网格的空度, 便可以从数学上模拟出积分区域不同形状及性质的物体。

3.3 扩充区域的处理

由于探针的头部进行削尖处理, 采用区域扩充法把计算扩展到圆柱坐标或直角坐标容易描述的区域, 见图 1, 这样就容易

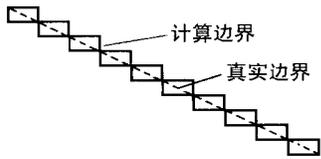


图 1 削尖头部的计算处理

对削尖的头部进行数值模拟, 并在削尖区域内网格加密, 以使计算边界更接近实际边界。

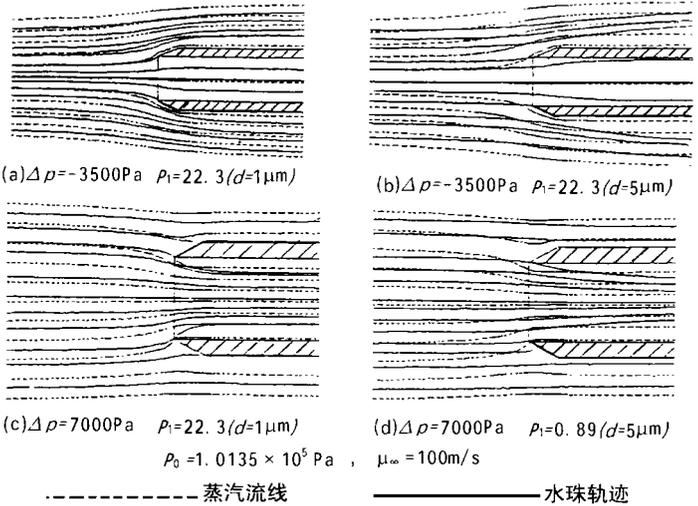


图 3 取样管进口水珠轨迹计算图

4 流场的数值分析

进行数值模拟时, 探针取样头部的直径为 10 mm, 计算的区域为上游距取样进口的距离为管径的 10 倍, 下游边界距取样进口的距离为 5 倍的管径, 外部边界距管道中心的距离为管道半径的 11 倍柱形区域。依据文献[6]在该区域的起始处可以不予考虑取样头部对汽流的干扰。

4.1 探针进口正对气流时数值分析

当探针进口正对准气流方向时, 三维圆柱轴对称问题可以简化为某一截面的二维问题。计算区域网格划分为 100×60, 其中沿轴线方向划分为 60 个网格, 并在

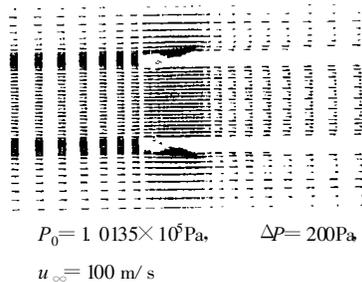


图 2 管道进口处理速度矢量放大图

固体区域及其附近网格加密。图 2 给出探针取样头部附近区域的速度矢量放大图, P₀ 为区域进口压

力, ΔP 为计算区域进口和取样探针头部管内压力之差, 可以看出由于头部的存在及管道内外压力的不同, 流线在进口附近发生弯曲, 同时从矢量图中可以看到由于进口的削尖, 使汽流的流动在进口发生弯曲的程度减少。图 3 分别给出了不同管道内压力情况下的蒸汽流线及水珠的轨迹。从图中可以看到, 当水珠直径比较小时, 其轨迹基本与流线方向一致, 而当水珠直径较大, 其轨迹在进口附近与流线有较大的偏差。其偏差程度与速度方向变化的剧烈程度有关。

非等动能误差的计算是根据文献[1]提供的方法。由于对流场处理方法的不同, 本文采用计算区域进口动能 K₁ 和取样管道进口有一定距离处截面(在该截面处管内气流基本达到稳定)的平均动能 K₂(面积平均)之比作为变量。图 4 给出非等动能取样误差计算示意图。由于非等动能取样引起的水在试样中所占蒸汽份额的误差 e_y 为:

$$e_y = \frac{Y - Y_T}{T_T} = \left[\frac{e}{a} - 1 \right] (1 - Y) \quad (10)$$

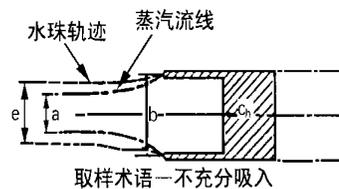


图 4 非等动能取样误差计算示意图

图 6 给出不同取样速度下的由于非等动能取样所造成的误差, 同时讨论了由于水珠直径的不同所造成的影响。计算条件是 P₀=1.0135×10⁵Pa, 进口速

度 $u_{\infty}=100\text{ m/s}$, $b=10\text{ mm}$ 。以 $d=1\text{ }\mu\text{m}$ 为例, 当取样偏离等动能程度在 $0.7 < k_2/k_1 < 1.3$ 的范围内, 所造成的测量误差不超过 5%。因此在测量湿度过程中, 谨慎合理操作可以避免由于非等动能而造成的测量误差。同时可以看到: 随着偏离等动能取样的程度增加, 误差加大, 在同一取样速度下, 含大直径水珠汽流的误差要增大。图 7 给出在区域进口压力相同而进口速度不同的条件下, 为保证等动能取样须维持取样探针头部管内的压力。

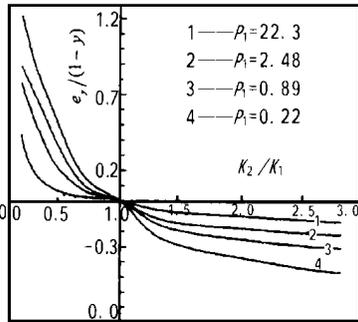


图 5 来源于非等动能取样的误差

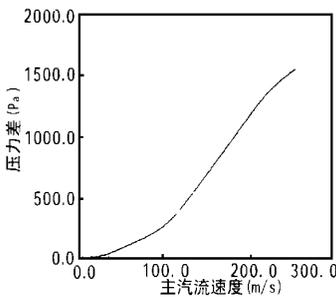


图 6 不同速度下等动能取样的压力差

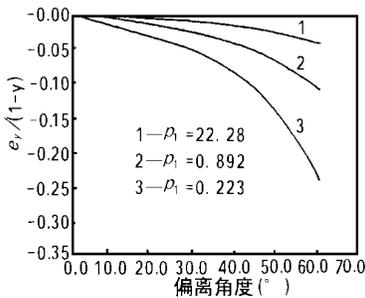


图 7 不同偏角的湿度测量误差

截面内的水珠全部进入探针内部, 其中参考面积

S_e 取为垂直于汽流方向的管道截面积的投影。

$$e_y = \frac{Y - Y_T}{Y_T} = \left[\frac{S_e}{S_a} - 1 \right] (1 - Y) \quad (11)$$

图 7 给出不同大小的水滴分别受汽流流动方向偏离轴线的影 响, $P_0=1.0135 \times 10^5\text{ Pa}$ 进口速度 $u_{\infty}=100\text{ m/s}$ 。从图中可以看出: 偏离所造成的测量结果偏低, 且随着偏离的角度的增加, 取样误差增加; 当水滴的直径较小时, 在较大的角度范围内误差较小。以 $P_1=0.832$ ($d=5\text{ }\mu\text{m}$) 为例, 当偏离角度在 $0 \sim 45^\circ$ 范围内, 所造成的测量误差并不超过 5%。而涡轮末几级的汽流湿度很小 ($< 15\%$), 水滴的平均直径很小, 因此, 测量时在小角度偏离的范围内, 取样效率还是比较高的。

5 结论

本文建立了测湿探针进口附近区域流场的数学模型, 并对其数值模拟来分析由于非等动能取样所造成的测量误差。通过分析模拟结果发现: 随着偏离等动能的程度增大, 取样误差增加, 且随着汽流湿度的增加误差增大, 但在一定的偏离程度内, 误差不超过 5%, 从而为简化取样进口的设计提供依据。当汽流方向偏离轴线时对于温度较小的汽流, 在一定的角度范围内取样管道中汽流动能与主汽流的动能, 所造成的测量误差较小。

参考文献

- [1] Moore M J. The measurement of steam wetness fraction in operating turbines sixth thermodynamics and fluid meachanic convection, *Insh. Mech. Engrs.*, 1976 :11~29.
- [2] 机械工业部设计标准, JB 2829-80 北京, 1982.
- [3] 陶文铨. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 1988.
- [4] Yong J B. An equation of state for steam for turbomachinery and other flow calculation. *ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1988, 110 (1).
- [5] 李思琦. 船用汽轮机进汽阀箱气动性能的数值研究. 西安交通大学硕士论文, 1998
- [6] Moore M J. and Sieverding C H Two-phase steam flow in turbines and separators. *McGraw-Hill*. 1976.
- [7] Grane R I & Moore M J. Intepretation of pitot pressure in compressible two-phase flow. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1972, 14 (2) :128~133

(复 编)

更 正

本刊 99 年第 1 期发表的《变工况下汽轮机反动度的统一表达式》作者李维特教授, 误刊副教授, 特向作者致歉。 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net> 编辑部

化学水处理计算机监控系统=A Computer-based Monitoring System for a Chemical Water Treatment System [刊, 中] /Shi Jianping, Yun Ruitian (Harbin No. 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. -1999, 14 (4). -

A brief description is given of a chemical water treatment system. The concrete implementation of a control system for the chemical water treatment is expounded in detail with some difficulties identified and their methods of resolution presented. **Key words:** chemical water treatment, computer-based control system

加热法测量湿度探针取样过程的数值模拟分析=Numerical Simulation and Analysis of the Sampling Process of Wetness Measurement Probe through the Use of a Heating Method [刊, 中] /Li Yanfeng, Wang Xinjun, Xu Tingxiang (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. -1999, 14 (4). -

A mathematical model has been set up for a region near the inlet of a heating method-based wetness measurement probe. By way of a numerical simulation an analysis was conducted of the measurement error due to a non-isokinetic sampling and an axial deviation in the steam flow direction. The results of such an analysis provide useful data for the design and engineering application of the heating method-based wetness measurement probes. **Key words:** isokinetic sampling, flow field simulation, porosity

SO₂ 气体的辐射特性=Radioactive Properties of SO₂ Gas [刊, 中] /Liu Linhua, Yan Youcai (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. -1999, 14 (4). -

On the basis of the spectrum data given in HITRAN database proposed is a line-by-line integral method for the calculation of SO₂ gas spectrum radioactive properties. Relevant charts are given for calculating SO₂ emissivity within the range of the following parameters: total pressure 0. 1 MPa, temperature 200 ~2000 K, pressure range 0. 00006 ~ 1 MPa. **Key words:** radioactive property, SO₂ gas, line-by-line calculation method

燃用宽筛分煤循环流化床锅炉燃烧模拟计算=Numerical Simulation of the Combustion in a Large Mesh Size Coal-Fired Circulating Fluidized Bed Boiler [刊, 中] /Liu Wentie Li Bingxi, Zhao Guangbo, et al (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. -1999, 14 (4). -

Described in this paper is a mathematical model of large mesh-size coal particle combustion and desulfurization reaction in a circulating fluidized bed boiler furnace. The model has taken into account such specific features as a dense-phase zone involving high particle size concentration at the furnace lower portion and a dilute-phase zone at the furnace upper portion dominated by low particle size concentration. As a result of simulation computations obtained are the flue gas temperature, heat flux and the axial distribution of various gas components (O₂, C₂O, CO, H₂O and S₂O). The trend as indicated by the results of the simulation calculation is found to be rational. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, numerical simulation calculation, combustion

论 DZF 循环是又一个第二类永动机=DZF Cycle as a yet Another Perpetual Motion Machine of the Second Category [刊, 中] /Chou Qiaoli, Xu Guang, Li Xinqiu (Nuclear Science Research Institute Under the Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. -1999, 14 (4). -

The thermodynamic analysis of an invention patent to be examined and evaluated for official publication ([刊, 中 21] application No. 96111171. 2 and entitled "Refrigeration-based electrical power generation by utilizing a low boiling point working medium and a refrigeration power station") has shown that this pertains to yet another doomed-to-fail perpetual motion machine of the second category due to its infraction of the second law of thermodynamics and an impossibility of its independent existence. **Key words:** second law of thermodynamics, perpetual motion machine of the second category, refrigeration cycle, thermodynamic cycle

燃煤电站锅炉塌灰落渣引发灭火的爆燃机理分析=An Analysis of the Mechanism of Flame Failure Triggered