

# 液幕状气液两相流流动特性的实验研究

周屈兰, 宋洪鹏, 惠世恩, 徐通模

(西安交通大学 热能工程系, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 提出了一种名为“液幕状气液两相流”的新流型。对液幕状气液两相流的流动特性进行了实验研究, 着重研究液幕状气液两相流的床层高度和阻力特性以及气相和液相流动速度之间的关系, 得到了当量床层高度、实际床层高度以及液幕床层阻力系数计算的关联式。这些关联式为液幕状气液两相流的研究提供了基础性的科学实验数据。

**关 键 词:** 气液两相流; 流体动力学; 实验研究

中图分类号: O359 文献标识码: A

## 1 前 言

作者提出了一种气液吸收的新方法, 该方法继承和发展了传统的液柱法利用喷泉状流动增加液体停留时间的思路, 吸收液使用喷嘴垂直向上喷出并由重力的作用回落, 可大幅增加喷嘴的密度, 提高截面的液体含量, 使气液流动状态由液柱法的喷泉状转化为类似于鼓泡床的强烈混合上升一下降流动。由于此时喷嘴中的浆液射流不再独立成为一个个的喷泉, 而连接成为一片片的液幕, 其气液两相流的流型完全不同于已经研究过的泡状流、弹状流、块状流、纤维状流、雾状流或环状流<sup>[1]</sup>, 是一种新的流型, 我们将其命名为“液幕状气液两相流”, 由此流型组织的吸收床称为“液幕床”。由于吸收床的流动特性是其最主要的特性, 本文即是对液幕床中气液两相流的流动特性进行实验研究的一个小结。

## 2 实验系统

本实验系统包括液幕床本体、风系统、浆池、循环水池以及温度测量系统。吸收装置本体采用方形横截面, 分顺流塔和逆流塔两个塔体。这使得试验系统可以分别对顺流和逆流两种流动方式进行测量研究, 也可以将两种方式组合到一起进行试验研究。风系统主要是供应热空气, 参与气液换热后的空气

排入大气。水系统主要由循环水泵、冷却水泵、阀门、流量计、管道和喷嘴组成。水首先由循环水泵送入管道, 经喷嘴喷射进入吸收塔形成液幕, 与热空气换热后靠重力降至浆池, 由冷却水泵送回到循环水池冷却。

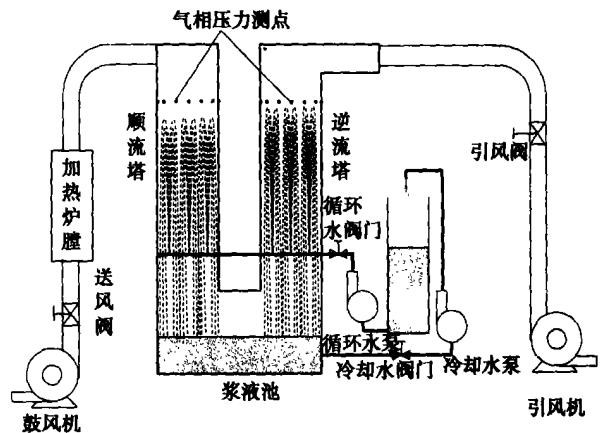


图 1 实验系统与气相压力测点布置

根据工程上的命名习惯, 顺流塔中, 气相的流动方向与液体下落的方向相同, 而与液幕喷射的方向相反; 逆流塔中, 气相的流动方向与液体下落的方向相反, 而与液幕喷射的方向相同。

## 3 当量床层高度与喷射压力的关系

液幕床中床层高度是液幕床重要的特性参数。决定液幕床层的高度主要因素有两个: 第一个是液幕喷嘴向上喷射液体的初速度, 可以用喷射管中流体的全压(即喷射压力)来代表; 第二个是气体通过床层的速度, 可以用气体在床体中的空截面流速来代表。为了研究方便, 我们把按照以下公式计算的高度称为“理论床层高度” $h_1$ :

收稿日期: 2004-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276051)

作者简介: 周屈兰(1974-)男, 湖南涟源人, 西安交通大学讲师。

$$h_1 = \frac{p_0}{\rho g} = \frac{v_1^2}{2g} \quad (1)$$

其中： $h_1$ —理论床层高度，m； $p_0$ —喷射压力，Pa； $\rho$ —流体密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $g$ —重力加速度， $\text{m}/\text{s}^2$ ； $v_1$ —喷射速度， $\text{m}/\text{s}$ 。

理论床层高度实际上是忽略气液两相之间的作用力，由机械能守恒得到的液体喷射高度。

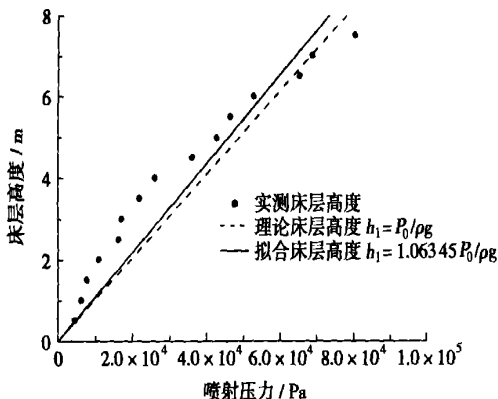


图 2 液幕床内当量床层高度与喷射压力的关系

为研究方便，对于实际的液幕床，把气相空截面流速等于零时实测的床层高度作为一个参考的实际床层高度，成为“当量床层高度” $h_d$ 。液幕床内当量床层高度与喷射压力的关系如图 2 所示。根据实验结果，拟合的公式为：

$$h_d = 1.06345 \frac{p_0}{\rho g} = 1.06345 \frac{v_1^2}{2g} \quad (2)$$

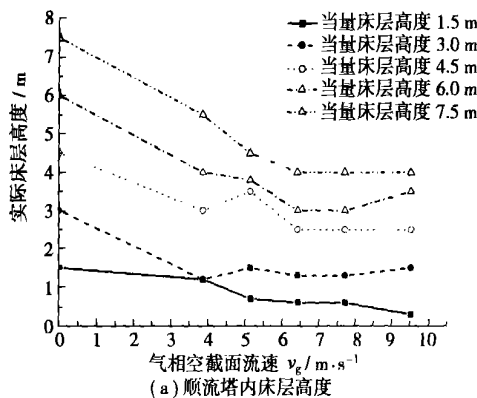
其中： $h_d$ —当量床层高度，m； $p_0$ —喷射压力，Pa； $\rho$ —流体密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $g$ —重力加速度， $\text{m}/\text{s}^2$ ； $v_1$ —喷射速度， $\text{m}/\text{s}$ 。

拟合公式的线性相关系数 0.9799。可以看出，当气相空截面流速等于零时，床层高度与理论床层高度非常接近，实测的数据还略高。这是因为我们在测量床层高度时，选取的高度是液体所能达到的最高高度。在床层中，液相处于脉动状态，并且由于液幕中液体的相互作用，液相在床层顶部还有一些飞溅的现象，所以实测的当量床层高度  $h_d$  比由理论计算的高度  $h_1$  略高。

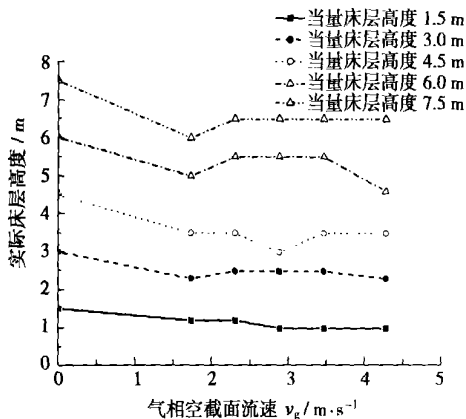
#### 4 实际床层高度与气液两相流速的关系

当气相空截面流速不等于零时，受气液两相之间的相互作用，床层的高度将发生变化。实测的床层高度与气相空截面流速  $v_g$  的关系如图 3 所示。

从图 3(a) 可以看出，顺流塔内实际床层高度随气相流速的提高而下降。从图中还可得知，顺流塔中，气相的流动方向与液幕喷射的方向相反，气相的流动方向是将液相床层“压低”，因此顺流塔内实际床层高度随气相流速的提高而下降。



(a) 顺流塔内床层高度



(b) 逆流塔内床层高度

图 3 实际床层高度与气相空截面流速的关系

从图 3(b) 可以看出，逆流塔内实际床层高度也随气相流速的提高而下降。从图中可以知道，逆流塔中，气相的流动方向与液幕喷射的方向相同，气相的流动方向是将液相床层“抬高”。但应注意到，在本实验的范围中，气相的流速在 0 ~ 4.3 m/s 的范围内，而液相的喷射速度在 3.9 ~ 12.7 m/s 的范围内，气相速度低于液相喷射速度，因此，根据气液两相之间的摩擦力作用，气相的存在仍将使液相动能有所损失，从而降低了床层高度。但逆流塔中，床层高度的降低幅度远远小于顺流塔中的降低幅度。

根据实验数据，我们拟合出实际床层高度  $h$  与气相空截面流速  $v_g$  和液相喷射速度  $v_1$  之间的关系：

$$h = C v_1^a v_g^b h_d \quad (3)$$

其中： $h_d$ —当量床层高度，m。

对于顺流塔,  $C = 0.562\ 27$ ,  $a = 0.338\ 79$ ,  $b = -0.417\ 38$ ; 对于逆流塔,  $C = 0.631\ 58$ ,  $a = 0.138\ 47$ ,  $b = -0.046\ 41$ 。

### 5 液幕床床层压降

液幕床的床层压降是液幕床最重要的流动特性参数之一。床层压降将是工程实际应用中主要的设计参数。由于在工程设计中, 常使用液气比 ( $L/G$ ) 作为设计参数, 因此, 本文在整理数据时也使用了液气比 ( $L/G$ )。

式中:  $\xi_t$ —塔体的阻力系数;  
 $Re_t$ —塔体气相进口雷诺数;  
 $\xi_s$ —顺流塔内液幕床层的阻力系数;  
 $Re_s$ —顺流塔内气相空截面时的雷诺数;  
 $\xi_n$ —逆流塔内液幕床层的阻力系数;  
 $Re_n$ —逆流塔内气相空截面时的雷诺数。  
 根据对数据的分析, 我们确定经验公式的形式为:

$$\xi_t = C \left( \frac{Re_t}{l} \right)^n \quad (6)$$

$$\xi_s = C \left( \frac{Re_s}{l_s} \right)^n \left( \frac{L}{G} \right) \quad (7)$$

$$\xi_n = C \left( \frac{Re_n}{l_n} \right)^n \left( \frac{L}{G} \right) \quad (8)$$

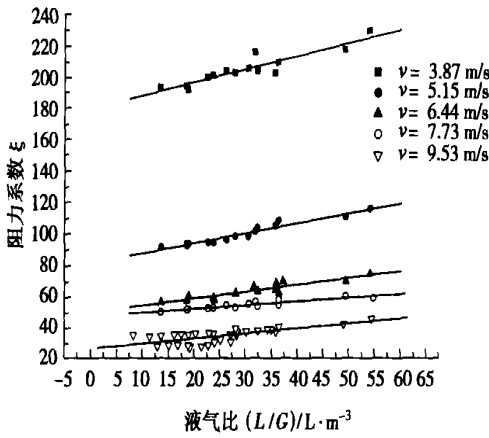


图 4 阻力系数与液气比 ( $L/G$ ) 的关系

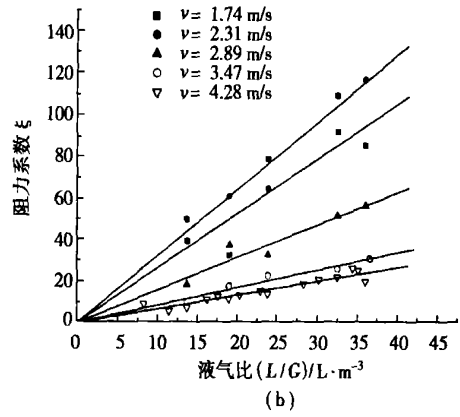
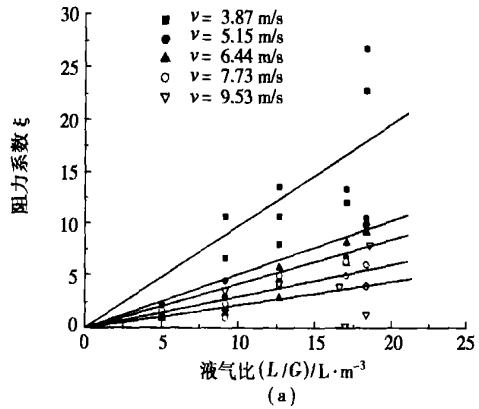


图 5 顺流液幕阻力系数(a)和逆流液幕阻力系数(b)与液气比 ( $L/G$ ) 的关系图

根据多元线性回归, 最终获得的经验公式形式为:

塔体:

图 4 所示是塔体内流动阻力系数与液气比 ( $L/G$ ) 之间的关系, 其计算公式为<sup>[3]</sup>:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2} = \frac{\Delta p l^2}{\frac{1}{2} \rho Re^2 \gamma^2} \quad (4)$$

其中:  $\Delta p$ —系统的压降, Pa;

$\frac{1}{2} \rho v^2$ —进口的气相流动动压, Pa.

$\gamma$ —空气的运动粘度,  $m^2/s$

$l$ —吸收塔的当量直径, m.

可以看出, 在不同的操作速度下, 塔内的阻力系数基本上呈线性变化。其中, 系统的压降  $\Delta p$  可以看作由 3 部分组成: 一是塔体的阻力; 二是顺流塔内液幕床层的阻力; 三是逆流塔内液幕床层的阻力。图中各阻力系数的直线在纵坐标轴上的节距就是塔体的阻力, 此时液气比为零, 系统的阻力完全由塔体本身引起的。即:

$$\Delta p = \frac{1}{2} l^2 \xi_t \rho Re_t^2 \gamma^2 + \frac{1}{2} l_s^2 \xi_s \rho Re_s^2 \gamma^2 + \frac{1}{2} l_n^2 \xi_n \rho Re_n^2 \gamma^2 \quad (5)$$

$$\xi_t = 2.48 \times 10^{12} \left( \frac{Re_t}{l_t} \right)^{-1.89338} \quad (9)$$

顺流液幕:

$$\xi_s = 3.9 \times 10^8 \left( \frac{Re_s}{l_s} \right)^{-1.60338} \left( \frac{L}{G} \right) \quad (10)$$

逆流液幕:

$$\xi_n = 3.81 \times 10^9 \left( \frac{Re_n}{l_n} \right)^{-1.79367} \left( \frac{L}{G} \right) \quad (11)$$

验研究,着重研究液幕状气液两相流的床层高度和阻力特性以及气相和液相流动速度之间的关系,得到了当量床层高度、实际床层高度以及液幕床层阻力系数计算的关联式。这些关联式为液幕状气液两相流的研究提供了基础性的科学实验数据。

参考文献:

[1] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安: 西安交通大学出版社 1987.  
[2] 江宏俊. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.

## 6 结 论

本文对液幕状气液两相流的流动特性进行了实

# 几例节能措施在电厂中的应用

### 1 采用新型射水抽汽器抽凝汽器真空

1 号机(12 MW)原来使用射水抽汽器是由汽轮机厂家提供的单喷嘴抽汽器,它抽气速率慢,能耗较高,配套射水泵电机功率 30 kW。2 号机采用其厂提供的低耗高效多通道射水抽汽器,它的主要优点是:抽气速率快、能耗低和余速可利用等,抽汽器需射水泵电机功率仅为 18.5 kW。射水泵按每年运行 8 000 h 计算,每年可节约电能约  $8\,000 \times (30 - 18.5) = 9.2 \times 10^4$  kWh。

### 2 采用某厂生产的循环流化床锅炉专用冷渣机

原来排渣采用定期排渣方式,由操作工定期将炉渣放入人力车拉到渣场通风自然冷却,这样不仅热渣带走大量的物理热,还会造成放渣时炉况波动,现场环境卫生差,操作工工作环境恶劣等。该冷渣机设计新颖巧妙,属表面式换热装置,由除盐水与热渣在渣道间壁换热,除盐水被加热到 90 °C 进除氧器,冷渣温度可降到 100 °C 以下,由渣带输送到渣库,这样热渣携带的热量被合理利用,该装置还有以下优点。

- (1) 实现连续排渣,由变频电机控制冷渣机转速,从而控制出渣量,保证床温和料压稳定。
- (2) 渣与通渣管是滚动摩擦,磨损量小,寿命长。

设每小时出渣量 1 t,进渣温度 940 °C,出渣温度 100 °C,渣比热 0.89 kJ/(kg·°C),年运行 8 000 h,每年可节省折合标煤 204 t。

### 3 改给水泵为变速调节

电厂锅炉给水泵能耗大,约占厂用电量的 30%,原设计给水泵的流量调节采用变阀调节,即通过改变出口阀门开度方式调节,其节流损失大。经多方考察论证,决定采用液力偶合器变速调节,有效的降低了给水泵的用电量。给水泵的主要参数:流量 200~280 m<sup>3</sup>/h,扬程:1 680~1 480 m,转速:2 980 r/min;配用电机功率:1 600 kW,液力偶合器的型号为 GWT58。

系统正常需要给水量约 200 t/h;采用变阀调节需消耗轴功率约 1 164 kW;采用变速调节需消耗轴功率约 961 kW;按全年运行 5 000 h,每年可节省电能:(1 164-961)×5 000=101.5×10<sup>4</sup> kWh

### 4 汽轮机的配汽方式改为喷嘴调节

60 MW 机组配汽是通过开大或关小 4 只调节汽阀来实现的,其控制方式采用高压纯电调,每只调节汽阀由 1 个油动机控制,厂家设计两种阀门管理方式,即节流调节(单阀调节)和喷嘴调节(顺序阀调节)。运行以来,一直使用节流调节方式。众所周知,节流调节由于汽阀对蒸汽的节流作用,降低了蒸汽作功能力,等熵焓降减少,机组效率低,特别在低负荷运行下,经济性低。经与有关单位协商,将 DEH 阀门调节改为喷嘴调节方式,大大提高了机组的效率。在电负荷、抽汽负荷和真空度等参数不变情况下,喷嘴调节比节流调节进汽量有不同程度的降低,节省大量高压蒸汽。

### 5 采用汽液两相流疏水器,稳定了高加液位,降低了高加的蒸汽消耗

原使用高加疏水装置是由汽轮机厂家提供的内置浮球式疏水器,长期运行以来,由于疏水器机械部分磨损和冲刷,导致疏水器不能保证高加液位,加热蒸汽来不及与给水换热,即由疏水管道排至除氧器,造成疏水管道冲刷和磨损严重,高加进汽量增加。采用汽液两相流疏水器,避免了上述现象发生,降低了高加进汽量。

(山东恒通化工股份有限公司 热电厂 高元圣 孙 飞 供稿)

An analysis was performed of the variation relationship between the flow-straightening tube length and the steam-jet factor. The results of the analysis indicate that under identical operating conditions the nozzle structure of a straightened flow can effectively enhance the steam jet factor of the jet ejector. Meanwhile, there exists an optimum length of the flow-straightening tube corresponding to the maximum jet factor. In addition, the above-mentioned nozzle structure is conducive to effectively preventing the deterioration of equipment performance caused by a reduction of operating fluid pressure, thus increasing the stability of the steam jet pump operation. **Key words:** jet pump, nozzle, steam jet factor, numerical simulation

关于换热系统优化目标函数的探讨 = **An Exploratory Study Concerning the Target Function of Heat Exchange System Optimization** [刊, 汉] / XU Wen-zhong (Department of Architectural Environment and Equipment under the Civil Engineering College of Shandong University of Science & Technology, Taian, Shandong Province, China, Post Code: 271019), ZHANG Kai (Energy & Power Engineering Institute under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), YANG Dong (Air Conditioning Department, Shandong Architectural Engineering Institute, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 510 ~ 512

Through an analysis of the various factors liable to affect expenses caused by the loss of available energy of an heat exchange system a comprehensive consideration has been given to the material consumption expenses of a heat exchanger. A target function based on the second law of thermodynamics was proposed for the optimization of the heat exchange system. Moreover, by making use of the theory of engineering thermodynamics, fluid mechanics and thermo-economics a derivation of the target function was carried out, resulting in the acquisition of a calculating formula for the target function. **Key words:** the second law of thermodynamics, heat exchange system optimization, target function, expenses due to the loss of available energy

液幕状气液两相流流动特性的实验研究 = **Experimental Investigation of the Flow Characteristics of a Gas-liquid Two-phase Flow Assuming the Form of a Gas-liquid Screen** [刊, 汉] / ZHOU Qu-lan, SONG Hong-peng, HUI She-en, et al (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 513 ~ 516

A new flow pattern, the so-called “gas-liquid screen”, is proposed and an experimental investigation of the gas-liquid two-phase flow characteristics based on this new flow pattern conducted. The investigation of the flow characteristics has been focused on the relationship between the above-mentioned bed layer height of the gas-liquid two-phase flow and resistance characteristics on the one hand and gas phase and liquid phase flow speed on the other. As a result, correlation equations for calculating equivalent bed layer height, actual bed layer height and the resistance factor of the gas-liquid screen bed layer were obtained. These correlation equations provide basic scientific test data for the research of the gas-liquid two-phase flow assuming the form of a gas-liquid screen. **Key words:** gas-liquid two-phase flow, fluid dynamics, experimental research

节流件阻力特性的 CFD 研究 = **CFD (computational fluid dynamics) Research on the Resistance Characteristics of a Throttling Element** [刊, 汉] / FU Jian-qiang, CHEN Jun, YANG Yan-hua (Department of Nuclear Science and System Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 517 ~ 520

One of the major measures to suppress flow instability in a boiling tube consists in increasing the flow resistance at the boiling tube inlet section. With the help of a CFD (computational fluid dynamics) software “CFX” computations and analyses have been performed of a boiling tube inlet section fitted with a tiny throttling element and a formula for calculating the friction resistance of that inlet section was obtained. The calculation results agree well with the experimental data.