

棒式文丘里除尘器气液两相流阻力特性

夏毅敏¹⁾✉, 杨端¹⁾, 胡承欢¹⁾, 唐浦华^{1 2)}, 卜英勇¹⁾

1) 中南大学机电工程学院, 长沙 410083 2) 长沙学院机电工程系, 长沙 410003

✉通信作者, E-mail: xiaymj@csu.edu.cn

摘 要 为了掌握棒式文丘里除尘器内气液两相流的阻力特性, 基于多相流理论, 建立其三维 CFD 模型, 研究分析棒间距、除尘风量和液气比对棒式文丘里除尘器阻力特性的影响, 并建立了阻力预测公式以及三者之间的关系式。结果表明: 文丘里棒层与下筒体的压力损失随着棒间距的减小和风量的增大呈幂指数关系增大; 随着液气比的增大呈近线性增大; 上筒体的压力损失与风量呈近平方关系; 通过与实验数据对比, 关系式最大误差为 16.88%, 验证了其有效性。

关键词 棒式文丘里; 阻力特性; 两相流; 数值模拟

分类号 U455.3⁺1

Resistance characteristics of gas-liquid two-phase flow in stick venturi scrubbers

XIA Yi-min¹⁾✉, YANG Duan¹⁾, HU Cheng-huan¹⁾, TANG Pu-hua^{1 2)}, BU Ying-yong¹⁾

1) School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410082, China

2) School of Mechanical and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410082, China

✉Corresponding author, E-mail: xiaymj@csu.edu.cn

ABSTRACT In order to grasp the resistance characteristics of gas-liquid two-phase flow in stick venturi scrubbers, based on the multiphase flow theory, a three-dimensional CFD model was established. The impacts of stick spacing, air flow and liquid-gas ratio on the pressure loss were studied, and a resistance characteristic model was established. The relationship among stick spacing, air flow and liquid-gas ratio was obtained based on the resistance characteristic model. The results show that the pressure loss between the venturi bar layer and the lower cylinder increases in power exponent with the decrease of stick spacing and the increase of air flow, and it increases in linear with the increase of liquid-gas ratio. The pressure loss of the upper cylinder increases in quadratic with the increase of air flow. The max error between the resistance characteristic model and experimental data is 16.88%, which verifies the model effectiveness.

KEY WORDS stick venturi; resistance characteristics; two-phase flow; numerical simulation

文丘里除尘器是一种构造简单、除尘效率高的湿式除尘器, 由于其具有占地少、能够有效处理含易燃、易黏着粉尘的气体的特点, 目前已广泛应用到矿井、隧道工程中。然而由于文丘里除尘器中高速气流的动能要用于雾化和加速液滴, 因此压力损失要大于其他湿式除尘器。为了更好的掌握文丘里除尘器的阻力特性, 许多学者已开展了相关的研究。Sun 等^[1]通过建立文丘里除尘器气相边界层的发展与分离模型, 较为准

确的预测了高压文丘里除尘器的压力损失。Viswanathan^[2]通过实验方法对 McInnis-Bischoff 可变换管文丘里除尘器压力损失进行了研究分析, 建立了简化的压力损失经验公式。Silva 等^[3]搭建了一个大型多功能文丘里管试验台用于测量工业应用中所需的相关参数, 并建立了可靠的实验数据库。Nasseh 等^[4]使用人工神经网络建立了文丘里除尘器的压力损失预测模型, 并通过遗传算法对其进行了优化, 该模型较传统

收稿日期: 2016-06-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA041801); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0209300); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016zzts292)

数学模型更加灵活。

近年来,随着计算机技术的快速发展,CFD(计算流体力学)技术在文丘里除尘器研究中的应用也越来越多。Pak 等^[5]针对环形皮斯-安东尼文丘里除尘器建立了一个三相流计算模型,其中气相流动通过 N-S 方程描述,采用欧拉法进行求解,粉尘和液滴运动采用 Basset-Boussinesq-Oseen (B-B-O) 方程描述,采用拉格朗日法进行求解;由于该模型中的液滴大小是不精确的且没考虑液膜的影响,因此所预测的压力损失较小。Lu 等^[6]在考虑相变传热与传质的情况下,建立了一个工业高温气体文丘里除尘器模型,并通过商业 CFD 软件进行了求解,研究结果表明,水的注射对压力、速度、温度和蒸汽的摩尔分数有着较大的影响,尤其是在喉管的喷雾区域。Guerra 等^[7]利用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF (volume of fluid) 多相流模型分析了矩形文丘里洗涤器在不同液体喷射量、喷射速度以及液气比下压力损失的变化规律,结果表明,在相同气、液流量的情况下,液体喷射口的数目对压力损失没有影响,但对液相体积分数分布有着较大影响。Sharifi 等^[8]第一次将粒数衡算方程 (population balance equation) 与欧拉-欧拉 CFD 模型相结合,用于预测文丘里除尘器中的压力损失。结果表明,不同结构与尺寸的喷嘴对文丘里除尘器的压力损失几乎没有影响。

本文针对井下矿产资源开采的恶劣环境,结合现有矿用除尘器,设计了一种新型文丘里除尘器:棒式文丘里除尘器。基于多相流理论,建立其三维 CFD 模型,研究分析棒间距、除尘风量和液气比对棒式文丘里除尘器阻力特性的影响,并建立棒式文丘里除尘器阻力特性预测模型,为棒式文丘里除尘器的设计提供依据。

1 棒式文丘里除尘器工作原理

棒式文丘里除尘器由文丘里棒层、下筒体、风机、上筒体等部分组成,如图 1 所示。与传统的文丘里除尘器不同,棒式文丘里除尘器在下筒体入口处安装一排开有缝隙的水管(缝隙与竖直方向夹角为 20°),这不仅简化了洗涤液的注射系统,而且由于采用缝隙注入,大大降低了喷嘴堵塞概率,保证了其在恶劣的矿采环境下的正常工作。含尘气体穿过文丘里棒层时,在棒层内产生负压,一定压力的水从缝隙喷射而出,并被加速后的混合气体冲击形成液滴喷雾,与液滴充分接触的混合气体沿切线方向进入下筒体,在离心力作用下,大部分粉尘被甩到筒壁,被液滴所形成的液膜捕捉;余下的小部分粉尘随着气流经过除尘风机,进入上筒体之中,再一次进行离心分离,以进一步提升除尘

效率。

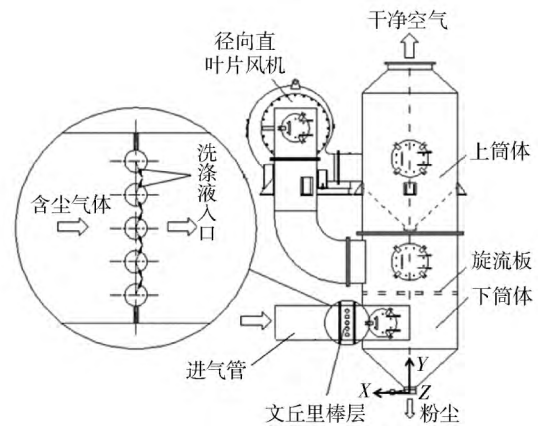


图1 棒式文丘里除尘器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of stick venturi scrubber

2 数学模型

空气和洗涤液在文丘里除尘器中的运动是极其复杂的气液两相流运动,本文基于欧拉-拉格朗日方法,通过适当简化,建立了三维稳态风流模型和液滴运动模型。

2.1 风流模型

通风空气的流动传热过程遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,其数学模型分别为连续方程、Navier-Stokes 方程和能量守恒方程,如下所示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla T \right) + s_T. \quad (3)$$

式中 ρ 为空气密度, t 为时间, $\mathbf{U} = (u_x, u_y, u_z)$ 为速度矢量, p 为压力, $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力, $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$ 是微元体上的体力矢量, T 为温度, k 为空气的传热系数, c_p 为空气定压比热容, s_T 为黏性耗散相。

除尘器内气体的流场为高速旋转的湍流。目前使用最广的湍流模型是 $k-\varepsilon$ 模型(蒋仲安等^[9], Toraño 等^[10], 杜翠凤等^[11], Kurnia 等^[12])。考虑到湍流漩涡的影响, Yakhot 等^[13]在标准 $k-\varepsilon$ 模型基础上,推导了 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,其对强流线弯曲、漩涡和旋转流动的预测有较高的精度。因此,本文采用三维不可压缩的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟棒式文丘里除尘器内的湍流流动,其模型如下所示:

湍流动能 k 方程,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon. \quad (4)$$

湍流耗散率 ε 方程,

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1 \varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

式中 $G_k = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 为平均速度梯度引起的湍动能产生项; $\mu_{\text{eff}} = \mu + C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ 为流场中有效黏性系数; $C_\mu = 0.0845$; $a_\varepsilon = a_k = 1.39$; $C_1 = 1.42$; $C_2 = 1.68 + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$ $\eta = (2S_{ij} S_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ $\eta_0 = 4.38$ $\beta = 0.012$.

2.2 液滴运动模型

在棒式文丘里除尘器除尘过程中,含尘气体经过文丘里棒层时,由于流通截面逐渐减少,气体得到加速,在棒层内侧产生负压区,一定压力的水从文丘里棒的缝隙中喷射出来,并被高速气流冲击雾化成具有一定直径的水滴,液滴与加速后的含尘气体发生强烈的相互作用,气体中的粉尘被液滴吸附和包裹。为了模拟液滴在棒式文丘里除尘器中的运动状态,本文对液滴模型做了适当的假设与简化:

(1) 假设从水管缝隙中喷射出来的是具有一定直径的液滴;

(2) 假设液滴为惰性球体,并不考虑液滴间的破碎及合并。

由于液滴的密度远大于空气密度,且除尘器内温度基本恒定,因此液滴所受的附加质量力、热泳力以及布朗力可以忽略。由此可简化单位质量液滴在空气中的运动方程为:

$$\frac{dU_p}{dt} = g + F_b + F_d + F_p. \quad (6)$$

对于球状液滴,其单位质量液滴的浮力 F_b 、绕流阻力 F_d 和压力梯度力 F_p 的计算公式如下:

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d Re_p}{24} (U_f - U_p), \quad (7)$$

$$F_b = -\frac{\rho}{\rho_p} g, \quad (8)$$

$$F_p = -\frac{1}{\rho_p} \nabla p_f. \quad (9)$$

式中 U_f 为空气流动速度矢量; U_p 为液滴速度矢量; μ 为空气动力黏度; ρ 为空气密度; ρ_p 为液滴密度; d_p 为液滴直径; p_f 为空气压力; 颗粒雷诺数 Re_p 的定义和绕流阻力系数 C_d 计算公式分别如下:

$$Re_p = \frac{\rho d_p |U_p - U_f|}{\mu}, \quad (10)$$

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}. \quad (11)$$

其中, a_1 、 a_2 、 a_3 为常数。

在文丘里除尘器中,气流激发液滴直径 d_p 的半经验公式^[14]如下:

$$d_p = \frac{4.22 \times 10^{-2} + 5.77 \times 10^{-3} (1000 Q_1 / Q_g)^{1.932}}{v_0}. \quad (12)$$

式中: v_0 为通过文丘里棒层时气流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; Q_1 为文丘里棒层喷出的水量, $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$; Q_g 为风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.3 网格划分与边界条件

棒式文丘里除尘器主要由文丘里棒层、下筒体、上筒体和径向直叶片风机组成,为了研究方便,本文建立了文丘里棒层与下筒体、上筒体和风机三个物理模型,分别对其阻力特性进行分析研究。

采用混合网格技术对这三个物理模型进行网格划分,如图2所示。文丘里棒层与下筒体和上筒体的出、入口分别设定为速度进口和 outflow 出口,风机的出、入口分别设定为压力进口和压力出口;壁面均为标准壁面边界;文丘里棒上的注射缝隙为面注射,液滴从此处进入除尘器;考虑到实际情况中,液滴碰到壁面后会附着在壁面之上,并由于离心作用,很难再回到空气之中,故假定液滴接触壁面时将完全被壁面吸附,终止液滴轨迹的计算。

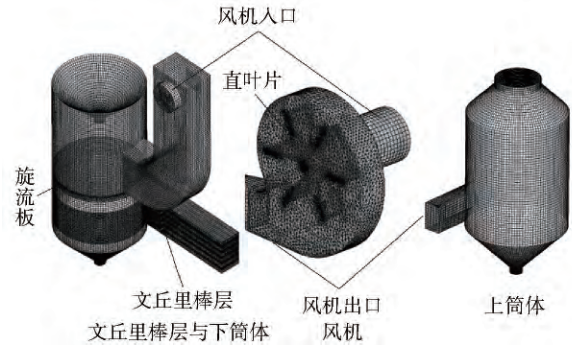


图2 棒式文丘里除尘器网格划分

Fig.2 Computation grid used for the stick venturi scrubber model

3 结果与讨论

利用 CFD 技术,分别对文丘里棒层与下筒体、上筒体和风机 3 个模型进行数值模拟。通过对数值模拟结果的分析,分别获得了各部分的阻力特性,并由此建立了棒式文丘里的阻力特性模型。

3.1 文丘里棒层与下筒体两相流场分布

文丘里棒间距、液气比、风量是影响除尘器内压力损失的 3 个关键因素,改变不同的参数如表 1 所示,对其进行数值模拟分析。图 3 为文丘里棒间距 $s = 25 \text{ mm}$,棒个数 x 为 4,棒直径 $d = 24 \text{ mm}$,风量 $Q_g = 900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,液气比 $L = 0.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ 条件下,文丘里棒层与下筒体内气液两相流各截面液滴质量浓度的分布图。

从图 3 可以看出,在文丘里棒层至下筒体入口段,

表 1 参数设定
Table 1 Parameters setting

| 参数 | 数值 |
|---|--------------------------------|
| 文丘里棒层棒间距 s/mm | 5, 10, 15, 25 |
| 风量 $Q_g/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | 300, 500, 700, 900, 1100, 1300 |
| 液气比 $L/(\text{L} \cdot \text{m}^{-3})$ | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |

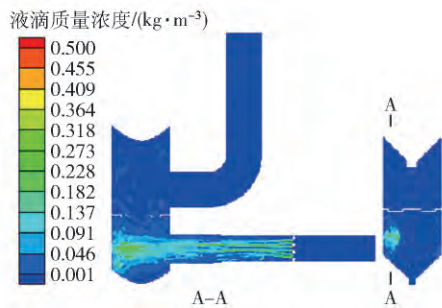


图 3 液滴质量浓度分布
Fig. 3 Droplet mass concentration distribution

从 6 个水管缝隙中喷射出来的液滴,由于加速气流的强烈冲击作用,这段区域内的液滴浓度较大,增大了粉尘与液滴碰撞的概率,有利于粉尘被液滴捕捉。气流

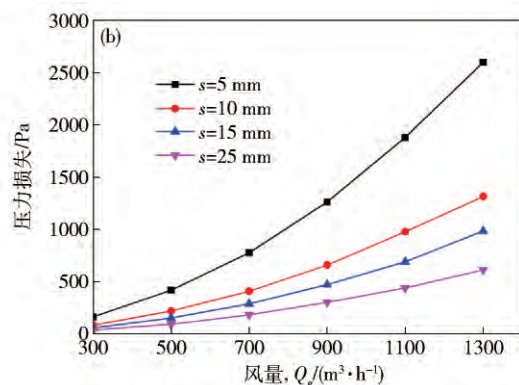
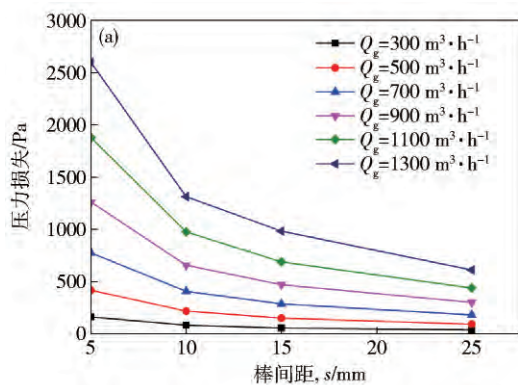


图 4 棒间距 (a) 和风量 (b) 对压力损失的影响
Fig. 4 Effects of stick spacing (a) and air flow (b) on pressure loss

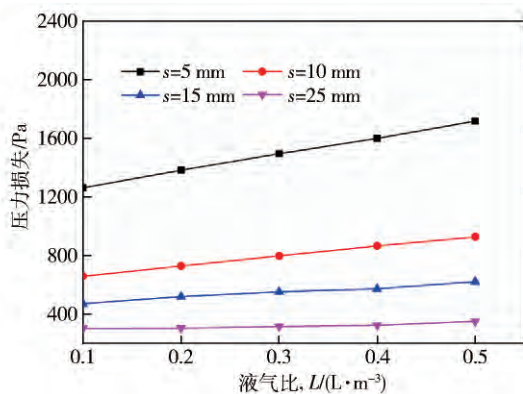


图 5 液气比与压力损失变化曲线
Fig. 5 Relation between liquid-gas ratio and pressure loss

携带液滴进入到下筒体下半部分,在靠近壁筒附近的液滴浓度较高,而在壁筒中心区域液滴浓度则较低,这是因为在离心力作用下,大部分液滴被甩到靠近壁筒附近区域,只有少部分粒径较小的液滴留在下筒体中心区域。当气流继续向上流动时,由于在旋流板和液滴自身重力作用下,一部分液滴被旋流板的壁面所捕捉,一部分液滴则下流至壁筒底部被壁面所捕捉,因此在气流经过旋流板后,下筒体的上半部分以及出口处的液滴浓度几乎为零,只在壁面附近有少量的水。

3.2 棒式文丘里除尘器阻力特性的变化规律

3.2.1 文丘里棒层与下筒体阻力特性

图 4 为液气比 $L = 0.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,不同棒间距与不同风量对文丘里棒层与下筒体压力损失的影响关系,图 5 为风量 $Q_g = 900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,不同棒间距情况下液气比与压力损失的关系。从图 4 可以看出,文丘里棒层与下筒体的压力损失随棒间距增大呈幂指数降低,且下降幅度不断减小;压力损失随风量的增大呈幂指数增大,且上升幅度不断增大。从图 5 可以看出,压力损失随着液气比的增大而增大,且近似呈直线规律。随着棒间距的减小,压力损失与液气比的关系曲线斜率越来越大。

根据流体力学理论,在工程上对于除尘器的阻力计算模型为^[15]:

$$\Delta p = \frac{1}{2} f \rho V^2, \quad (13)$$

$$f = c \frac{L_c}{d_h} Re^m, \quad (14)$$

$$V = \frac{Q_g}{s(x-1)b}, \quad (15)$$

$$Re = \frac{V d_h}{\nu}. \quad (16)$$

式中: f 为阻力系数, ρ 为喉管处混合气体密度, V 为棒式文丘里喉管处速度, c 、 m 为待定系数; L_c 表示通道特征长度; d_h 表示特征水力直径; $b = 0.174 \text{ m}$ 为文丘里棒

层宽度. ν 为运动黏度 取空气值 $\nu = 1.57 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

阻力计算公式(14)是工程上计算单相流阻力系数的常用形式. 对于棒式文丘里管内气液两相流阻力系数计算, 在公式(14)的基础上增加液相修正的办法来处理, 则棒式文丘里气液两相流阻力系数计算公式为:

$$f = c \frac{L_c}{d_h} Re^m L^{c_4}. \quad (17)$$

将式(15)~(17)代入到式(13)中得:

$$\Delta p = c \frac{L_c}{2\rho} \frac{d_h^{m-1} Q_g^{m+2}}{\nu^m (x-1)^{m+2} b^{m+2} s^{m+2}} L^{c_4}. \quad (18)$$

其中, 文丘里棒层的水力直径 d_h 计算公式为:

$$d_h = (x-1) \frac{sb}{s+b}. \quad (19)$$

由于 $b = 174 \gg s = 5 \sim 25 \text{ mm}$, 因此采用在棒间距 s 上加上一个修正指数的方式近似替代水力直径 d_h , 对常数项进行合并后, 棒式文丘里管气液两相流阻力经验公式化简为:

$$\Delta p = c_1 s^{c_2} Q_g^{c_3} L^{c_4}. \quad (20)$$

其中, c_1, c_2, c_3, c_4 为经验系数. 利用大量不同参数下数值模拟结果, 拟合得到文丘里棒层与下筒体阻力特性经验关系式:

$$\Delta p_1 = e^{5.1176} s^{-0.9655} Q_g^{1.9429} L^{0.1574}. \quad (21)$$

适用范围: $5 \leq s \leq 25 \text{ mm}$, $300 \leq Q_g \leq 1300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $0.1 \leq L \leq 0.5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$.

3.2.2 风机特性

为了分析风机特性, 在风机入口装一个直管, 出口装一个文丘里管. 由前面分析可知, 进入到风机的气流所含液滴质量浓度较低, 基本忽略不计, 故对风机只进行单相流分析. 通过改变出口文丘里管直径, 得到在不同风机转速 n 下, 风量 Q_g 与风机全压差 Δp_e 的关系, 其结果如图6所示.

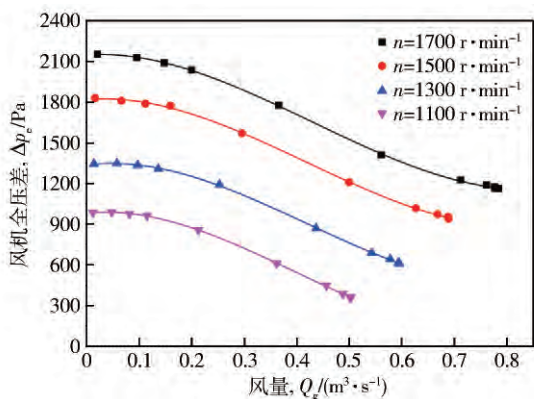


图6 风机特性曲线

Fig. 6 Fan performance curves

对图6中的仿真数据进行三次多项式拟合, 得到不同转速下的风机特性公式:

$$\begin{cases} n = 1700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, \Delta p_e = 3807 Q_g^3 - 4905 Q_g^2 + 256.6 Q_g + 2148; \\ n = 1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, \Delta p_e = 4078 Q_g^3 - 5119 Q_g^2 + 323.7 Q_g + 1820; \\ n = 1300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, \Delta p_e = 4328 Q_g^3 - 5448 Q_g^2 + 490.9 Q_g + 1338; \\ n = 1100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, \Delta p_e = 4607 Q_g^3 - 5516 Q_g^2 + 370.1 Q_g + 983.2. \end{cases} \quad (22)$$

3.2.3 上筒体阻力特性

影响上筒体阻力的主要参数是风量, 对不同风量下上筒体流动过程进行模拟, 其结果如图7所示. 拟合压力损失与筒体风量的函数关系式:

$$\Delta p_2 = 8932 Q_g^{2.041}. \quad (23)$$

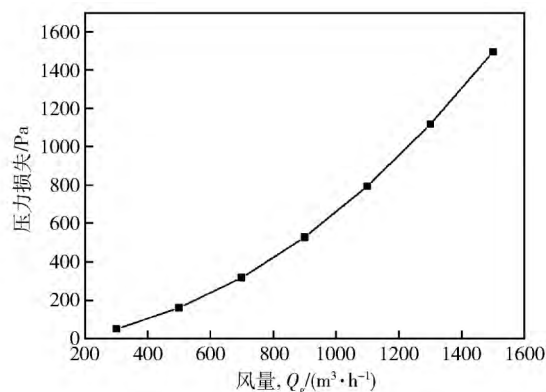


图7 上筒体阻力特性曲线

Fig. 7 Upper cylinder resistance performance curve

由式(23)可知, 在单相流分析中, 对于结构尺寸一定的上筒体, 其压力损失与风量成指数关系, 而且是接近平方的关系.

3.3 棒式文丘里除尘器阻力特性公式

对棒式文丘里除尘器进出口列伯努利方程式:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \Delta p_e = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \Delta p_f. \quad (24)$$

式中 v_1, v_2 分别为除尘器进口和出口的气流平均速度; ρ 近似的取空气的密度 $\rho = 1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; Δp_f 为除尘器的所有压力损失之和; p_1, p_2 分别为除尘器进口和出口的静压, 由于进出口直接与大气相连所以 $p_1 = p_2$, 则有:

$$\Delta p_e = \frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2} + \Delta p_f. \quad (25)$$

由于除尘器的总压力损失是在一定风量下文丘里棒层与下筒体和上筒体共同所消耗的压力, 因此 Δp_f 有:

$$\Delta p_f = \Delta p_1 + \Delta p_2 = e^{2.5499} s^{-1.0192} Q_g^{1.9606} L^{0.1857} + 560.5 Q_g^{2.044}. \quad (26)$$

将式(26)代入到式(25), 且 $v_1 = \frac{Q_g}{A_1}$, $v_2 = \frac{Q_g}{A_2}$, $A_1 =$

0.0303 m^2 为入口面积, $A_2 = 0.0079 \text{ m}^2$ 为出口面积, 得到除尘器风机的全压差 Δp_e , 即除尘器的阻力 Δp 预测

公式:

$$\Delta p_e = \Delta p = e^{-2.5499s^{-1.0192}} Q_g^{1.9606} L^{0.1857} + 560.5 Q_g^{2.044} - 15.17 Q_g^2. \quad (27)$$

将式(27)与式(22)联立即可得到不同转速下棒式文丘里除尘器风量 Q_g 、棒间距 s 、液气比 L 之间的关系如下:

$$\begin{cases} 16.68 Q_g^3 - 560.5 Q_g^{2.044} - 238.33 Q_g^2 - e^{-2.5499s^{-1.0192}} Q_g^{1.9606} L^{0.1857} + 93.32 Q_g + 4398 = 0 & n = 1700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, \\ 26.68 Q_g^3 - 560.5 Q_g^{2.044} - 273.93 Q_g^2 - e^{-2.5499s^{-1.0192}} Q_g^{1.9606} L^{0.1857} + 131.3 Q_g + 3393 = 0 & n = 1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, \\ 34.23 Q_g^3 - 560.5 Q_g^{2.044} - 297.83 Q_g^2 - e^{-2.5499s^{-1.0192}} Q_g^{1.9606} L^{0.1857} + 158.5 Q_g + 2530 = 0 & n = 1300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, \\ 4607 Q_g^3 - 560.5 Q_g^{2.044} - 300.43 Q_g^2 - e^{-2.5499s^{-1.0192}} Q_g^{1.9606} L^{0.1857} + 128.3 Q_g + 1811 = 0 & n = 1100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}. \end{cases} \quad (28)$$

通过式(28)可知,在文丘里棒层棒间距、直叶片风机转速和液气比已知的条件下,便可通过上式计算出棒式文丘里除尘器能够提供的风量,为棒式文丘里的设计提供了依据.

3.4 实验验证

棒式文丘里除尘器试验台如图8所示.通过控制不同的除尘器运行参数以获得相对应的风量,并与式(28)计算出的结果进行对比分析,以确定关系式的有效性.

效性.

图9分别为液气比 $L = 0.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$,棒间距 $s = 25 \text{ mm}$ 时,不同风机转速下风量的实验值与计算值对比;液气比 $L = 0.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$,风机转速 $n = 1700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,不同棒间距下风量的实验值与计算值对比以及风机转速 $n = 1700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,棒间距 $s = 25 \text{ mm}$ 时,不同液气比下风量的实验值与计算值对比.从图中可以看出,实验值与计算值随着风机转速、棒间距和液气比的变化,具有相同的变化趋势,且由于在建立CFD模型时,并没有考虑高速空气雾化洗涤液时的能量损失,因此计算值都略大于实验值.实验值与计算值的最大误差为16.88%,验证了关系式的有效性.



图8 棒式文丘里除尘器实验台

Fig. 8 Experimental station of the stick venturi scrubber

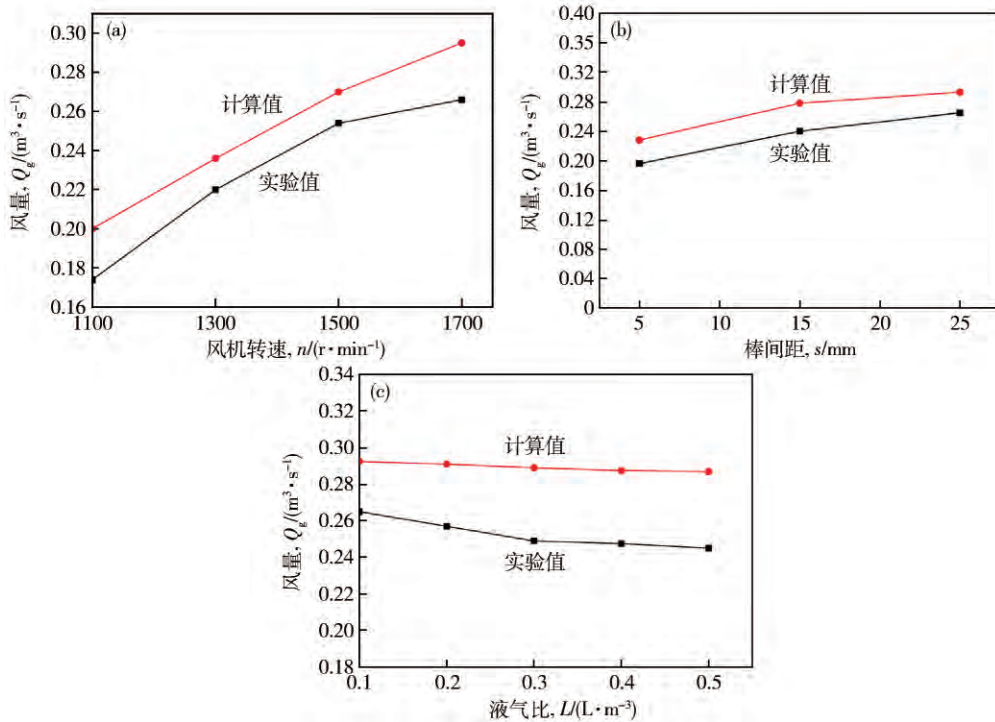


图9 不同参数下风量的实验值与计算值对比。(a) 风机转速;(b) 棒间距;(c) 液气比

Fig. 9 Comparison between experiment data and calculated values of air flow under different parameters: (a) fan rotation rates; (b) stick spacing; (c) liquid-gas ratios

4 结论

(1) 文丘里棒层与下筒体的压力损失随棒间距增大呈幂指数降低,且下降幅度不断减小;压力损失随风量的增大呈幂指数增大,且上升幅度不断增大;随着液气比的增大而成近线性增大。

(2) 文丘里棒层喷射出来的液滴绝大部分被下筒体所捕捉,进入到风机的液滴基本忽略不计。在转速一定的情况下,风机进出口压差随着风量的增大而减小。上筒体的阻力随着风量的增加而增大,而且是接近平方的关系。

(3) 通过与实验数据的对比,关系式最大误差为16.88%,验证了其有效性,为棒式文丘里除尘器设计和优化策略研究提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Sun H, Azzopardi B J. Modelling gas-liquid flow in venturi scrubbers at high pressure. *Process Saf Environ Prot*, 2003, 81(4): 250
- [2] Viswanathan S. Development of a pressure drop model for a variable throat venturi scrubber. *Chem Eng J*, 1998, 71(2): 153
- [3] Silva A, Teixeira J C F, Teixeira S F C F. Experiments in a large-scale venturi scrubber Part I: pressure drop. *Chem Eng Process*, 2009, 48(1): 59
- [4] Nasseh S, Mohebbi A, Sarrafi A, et al. Estimation of pressure drop in venturi scrubbers based on annular two-phase flow model, artificial neural networks and genetic algorithm. *Chem Eng J*, 2009, 150(1): 131
- [5] Pak S I, Chang K S. Performance estimation of a venturi scrubber using a computational model for capturing dust particles with liquid spray. *J Hazard Mater*, 2006, 138(3): 560
- [6] Lu T, Wang K S. Numerical simulation of three-dimensional heat and mass transfer in spray cooling of converter gas in a venturi scrubber. *Chin J Mech Eng*, 2009, 22(5): 745
- [7] Guerra V G, Béttega R, Gonçalves J A S, et al. Pressure drop and liquid distribution in a venturi scrubber: experimental data and CFD simulation. *Ind Eng Chem Res*, 2012, 51(23): 8049
- [8] Sharifi A, Mohebbi A. A combined CFD modeling with population balance equation to predict pressure drop in venturi scrubbers. *Res Chem Intermed*, 2014, 40(3): 1021
- [9] Jiang Z A, Liu X L, Du C F, et al. Numerical simulation of goaf sealing and inerting fire-fighting technology for fully mechanized coal faces. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 36(6): 722
(蒋仲安,刘祥龙,杜翠凤,等.综采工作面采空区封闭与惰化防灭火技术的数值模拟.北京科技大学学报,2014,36(6): 722)
- [10] Toraño J, Torno S, Menéndez M, et al. Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: validated CFD modeling of dust behavior. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2011, 26(1): 201
- [11] Du C f, Wang H, Jiang Z A, et al. Numerical simulations of dust distribution in a fully mechanized excavation face with far-pressing- near- absorption ventilation. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2010, 32(8): 957
(杜翠凤,王辉,蒋仲安,等.长压短抽式通风综掘工作面粉尘分布规律的数值模拟.北京科技大学学报,2010,32(8): 957)
- [12] Kurnia J C, Sasmito A P, Mujumdar A S. CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces. *Appl Math Modell*, 2014, 38(14): 3467
- [13] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization-group analysis of turbulence. *Phys Rev Lett*, 1986, 57(14): 1722
- [14] Ahmadvand F, Talaie M R. CFD modeling of droplet dispersion in a venturi scrubber. *Chem Eng J* 2010, 160(2): 423
- [15] Li X C, Hu Y F, Zhang W, et al. Resistance characteristics of dust separator based on liquid phase adjustment. *J China Coal Soc*, 2013, 38(2): 336
(李小川,胡亚非,张巍,等.基于液相调节的除尘器阻力特性.煤炭学报,2013,38(2): 336)