

湿法烟气脱硫系统中折板式除雾器性能的数值模拟

陈凯华 宋存义 李强 刘枫
(北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083)

摘要 采用CFD软件对湿法烟气脱硫系统中广泛使用的折板式除雾器的主要性能进行了数值模拟。建立了数学模型,对气相采用基于雷诺时均方程的SST $k-\omega$ 湍流模型封闭N-S方程,对液滴相采用基于Euler-Lagrange的DPM方法。通过调节除雾器的结构参数和工作参数,揭示了气液两相流动的流场,分析了结构参数对除雾器分离效率和工作压力降的影响,可用于湿法烟气脱硫系统中折板式除雾器的设计和优化。

关键词 Wet-FGD 折板式除雾器 CFD 分离效率 压力降

中图分类号 X701.3 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)07-0091-06

Numerical simulation of performance of chevron mist eliminator in wet-FGD

Chen Kaihua Song Cunyi Li Qiang Liu Feng

(College of Civil & Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract A CFD software was used to simulate the characteristics of flow fields and performance of chevron mist eliminator in wet-FGD. A mathematical model was established for simulating the separation efficiency and pressure drop of the mist eliminator. The N-S equations are closed with SST equations and DPM, which is based on Euler-Lagrange method. By calculating the separation efficiency and pressure drop of various mist eliminators with different structural parameters and working parameters, their effects on efficiency and pressure drop have been analyzed. The results can be used for designing and optimizing mist eliminator in wet-FGD.

Key words wet-FGD; chevron mist eliminator; CFD; separation efficiency; pressure drop

湿法烟气脱硫(WFGD)的特点是“三传一反”过程(通常指动量传递、热量传递、质量传递和化学反应工程)均在湿态下进行。由于经过喷淋层的烟气携带了大量的微小雾滴,且操作温度低于露点,故烟气需经除雾器将液滴分离,防止或减轻烟气中的液滴对烟气再热器及后部烟道和风机等处的沾污和腐蚀,所以除雾器是湿法脱硫系统中的关键设备,其性能直接影响到湿法烟气脱硫系统能否连续可靠运行^{1,8}。因此,科学合理地设计、使用除雾器对保证湿法烟气脱硫系统的正常运行有着非常重要的意义。

在湿法脱硫系统中,常采用波板式除雾器和折板除雾器,其工作原理是通过弯曲通道所造成的弯流来分离气流中夹带的液滴,液滴颗粒在惯性力的作用下,不能及时随气流改变流向而与折板或集液槽碰撞而被捕集。优良的除雾器应该具有较高的液滴去除率、较大的临界流速(不发生再携带时)、较低的压力降 ΔP 且不易结垢和磨损^[2]。因为液滴去

除的机理就是惯性碰撞,所以液滴去除率主要受液滴自身的惯性的影响,液滴和气体的物性(包括液滴密度 ρ_p 、液滴直径 d_p 、气体动力粘度 μ_g 和气流速度 v_g)和除雾器结构参数(包括折板转折角 θ 、除雾器级数 n 、除雾器波纹板间距 b 和表征除雾器基本特性的参数 K)都会影响到除雾效率^[3]。

本研究根据气液两相流体力学的基本理论,对折板式除雾器应用流体力学商业计算软件FLUENT进行内部流场、除雾器分离效率和工作压力降的数值计算。通过调节除雾器的结构参数和工作参数,分析各个参数对除雾器的分离效率及压力降的影响,以便进一步优化除雾器的设计。

收稿日期:2007-03-06; 修订日期:2007-05-23

作者简介:陈凯华(1981~),男,博士研究生,主要从事大气污染控制及烟气脱硫脱硝研究工作。

E-mail:chenkaihua1981@yahoo.com.cn

1 除雾器内气液两相流动的数学模型

在除雾器实际工作过程中,含液滴气流在弯曲通道中的流动是一种三维、非定常、可压缩粘性流体的流动过程。在湿法烟气脱硫吸收塔内,除雾器各个工作区域具有对称性和空间重复性,故我们在实际模拟的过程中只选取了一个工作区作为模拟对象,忽略了喷淋塔的边壁效应和非对称性结构对除雾器各个工作区域的影响。另外,在模拟计算的过程中,在误差允许范围内根据实际情况对模型作了适当的简化。

(1) 由于进入除雾器弯曲通道内的气流速度较小,且工作区压力相对变化 $\Delta P/P$ 较小,故可以把这种气体视为不可压缩气体来处理;

(2) 由于弯曲通道的高度与宽度之比很大,且除雾器任意流动截面都相同,故可以简化流场为二维平面流场;

(3) 在实际的稳定工作条件下,气体流动各参数与时间的联度可以忽略,同时忽略气流的振荡对流场的影响,因而气流流动可视为定常流动;

(4) 由于液滴粒径较小,所以在计算中可以当作直径保持不变的球来处理,并且忽略蒸发、摩擦、聚合、撕裂及热效应的影响;

(5) 液滴碰到壁面后即可认为被捕集,不考虑反弹及壁面水膜撕裂的影响。

综合考虑以上简化,本文对气相采用基于雷诺时均方程的 SST $k-\omega$ 湍流模型封闭 N-S 方程,对液滴相采用基于 Euler-Lagrange 方法的 DPM (Discrete Phase Model, 离散相模型) 进行计算^[4,5]。

(1) 气相控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

二维 N-S 方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{R_e} \left[\frac{\partial u}{\partial x^2} + \frac{\partial u}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{R_e} \left[\frac{\partial v}{\partial x^2} + \frac{\partial v}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

SST $k-\omega$ 流动方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (5)$$

在该组方程中, G_k 是由层流速度梯度而产生的湍流动能; G_ω 是 ω 的方程; Γ_k 和 Γ_ω 表明了 k 和 ω 的扩散率; Y_k 和 Y_ω 代表 k 和 ω 的发散项。另外,该组方程还考虑了正交发散项 D_ω , 从而使方程在近壁面和远壁面都适合^[4,6]。

(2) 液滴轨道控制方程

颗粒运动方程:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (6)$$

其中 $F_D(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力, $\frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 项考虑了颗粒受到的重力和浮力作用, F_x 考虑了其他作用力,如附加质量力等^[6]。

2 CFD 计算

2.1 计算模型

连续相的计算采用 FLUENT 提供的分离求解器,分别用二阶迎风格式求解时均 N-S 方程、连续性方程以及湍流附加方程,速度场和压力场的耦合计算采用改进的 SIMPLE 算法。液滴运动轨迹的计算选用了基于 Euler-Lagrange 方法的 DPM (Discrete Phase Model, 离散相模型) 模拟颗粒的运动。对已知的气体流场,运用拉格朗日方法就可以求出各个粒径颗粒的运动轨迹^[6,7]。

2.2 计算平台

采用 FLUENT6.2 作为计算平台。

2.3 计算区域

计算区域及网格划分采用三角形网格,网格步长为 2 个单位,共生成 913 个节点,1622 个三角形网格,如图 1 所示。在实际计算过程中,网格步长设置为 1 个单位,共生成 6232 个三角形网格。

2.4 边界条件

连续相(气体):

进口条件: $u = u_{in}$, 其中 u_{in} 在进口界面假设为均匀分布,湍流烈度为 5%; 出口条件: $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0$, 出口压力 $P_{out} = 0$ (相对压力)。

壁面条件: 在左右边界形成的壁面上,应用粘性流动无滑移条件,即速度为 $u = v = 0$, 且无热量交换。

离散相(雾滴):

雾滴物理性质: 雾滴为脱硫循环浆液,密度 $\rho =$

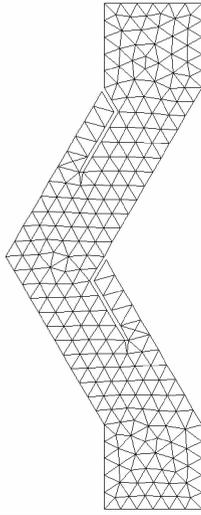


图 1 计算区域网格

Fig. 1 The mesh zone for calculating

1225 kg/m³, 雾滴直径 d_p 符合 Rosin-Rammler 分布,

最小粒径 d_{min} 取值为 10 μm , 最大粒径 d_{max} 取值为 80 μm , 平均粒径 \bar{d} 为 45 μm , 分布指数 $n = 5$ 。

进口条件: 进口处单位体积内粒子的浓度均匀分布, 初始速度: $u_p = u_{in}, v_p = 0$ 。

壁面条件: 雾滴碰到流道壁面后就被认为被捕集, 不考虑反弹和液膜破裂而导致的二次携带。

2.5 计算工况变量

本文根据湿法烟气脱硫实际情况, 设定计算结构参数和工作参数变量如表 1 所示^[8]。

3 结果与讨论

不同的初始入口位置雾滴的运动轨迹也不同, 如图 2 所示。大部分雾滴在惯性力的作用下撞击到除雾器壁面或集液槽内而被捕集, 而少部分粒径较小的雾滴与气体有很强的跟随性, 在通过整个流道的过程中都不被捕集。

表 1 结构参数和工作参数变量

Table 1 Different structural parameters and working parameters

基本结构	计算参数	计算取值
	板间距 b (mm)	20, 30, 40, 50, 60
	高度 L (mm)	$2b \sec(\theta/2) + 2b$
	表观气速 v_g (m/s)	2, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7
	转折角 θ ($^\circ$)	90, 106, 120
	带水负荷 T (g/Nm ³)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
	液滴直径 (μm)	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80
	集液槽长 (mm)	$4b/3 \sin\theta$
	集液槽宽 (mm)	$b/3$
	集液槽板材厚度 (mm)	2 ~ 3

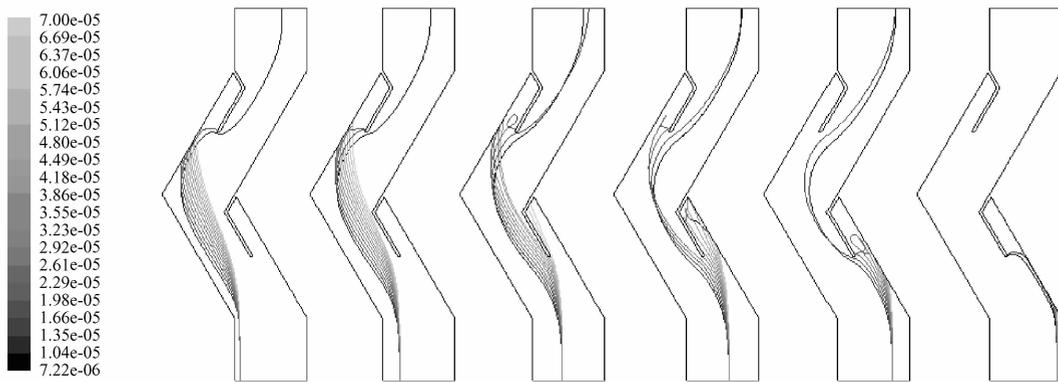


图 2 不同的初始入口位置的雾滴的轨迹

Fig. 2 Droplet traces of different extent in inlet zone (droplet traces colored by particle diameter (m))

如在进口处分布同一粒径 D_i 的液滴有 N 个, 其中有 M 个撞击到除雾器壁面而被捕集, 则液滴的单直径分离效率为 $\eta_d = M/N$ 。Rosin-Rammler 分布假设在颗粒直径 d 与大于此直径的颗粒的质量分数 Y_d 之间存在指数关系:

$$Y_d = \exp[-(d/\bar{d})^n] \quad (7)$$

则雾滴的整体分离效率可为:

$$\eta = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} n \left[1 - \exp\left\{-\frac{K\rho_p d_p^2 v_g (\pi - \theta)}{\mu_g b (1 - \cos\theta)}\right\} \right] \cdot \frac{d_p^{n-1}}{d^n} \cdot \exp\left[-\left(\frac{d_p}{d}\right)^n\right] dd_p \quad (8)$$

3.1 计算区域的流场分析

图3给出计算得到的折线型挡板除雾器内连续相(气体)和离散相(液滴)的运动轨迹。从图3可知, 雾滴运动轨迹在集液槽的前沿产生了较高弯曲, 在集液槽前沿和挡板脊顶气流和雾滴发生了较大的轨道滑移和被动流动, 这对于设计高效率的惯性除雾器有着重要的指导意义。另外, 从图2可知, 入口靠近折板位置的雾滴基本上能够被完全从气流中分离, 而入口中部粒径较小的雾滴与气流有良好的跟随性, 能够通过拐道而不被捕集, 故入口的几何参数的设定对提高除雾器性能也有较大作用。

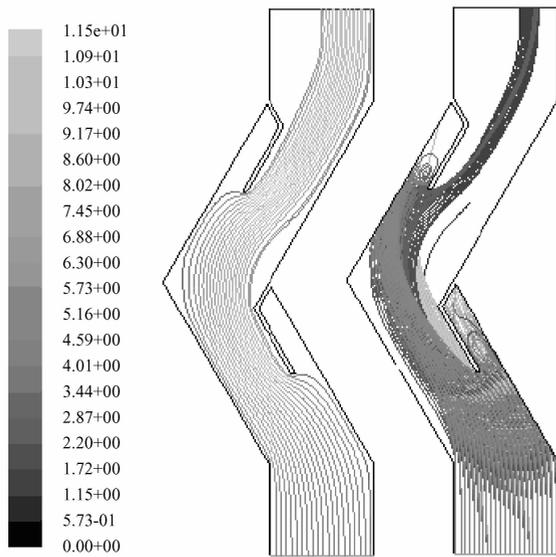


图3 连续相(左)和离散相(右)运动轨迹图
Fig. 3 Path lines of air(left) and droplet(right) (path lines colored by velocity magnitude(m/s))

3.2 除雾器效率的影响参数

除雾性能可用除雾效率来表示, 除雾效率指除雾器在单位时间内捕集到的液滴质量与进入除雾器

液滴质量的比值, 除雾效率是考核除雾器性能的关键指标。在实际工作过程中影响除雾效率的因素很多, 主要包括: 烟气流速、通过除雾器断面气流分布的均匀性、叶片结构、叶片之间的距离及除雾器布置形式等。

对于脱硫工程, 目前用于衡量除雾性能的参数主要是除雾后烟气中的雾滴含量。一般要求, 通过除雾器后雾滴含量一个冲洗周期内的平均值 $< 75 \text{ mg/Nm}^3$ 。该处的雾滴是指雾滴粒径 $> 15 \mu\text{m}$ 的雾滴, 烟气为标准干烟气。其取样距离为离除雾器距离 $1 \sim 2 \text{ m}$ 的范围内。

对于一个给定的除雾器对除雾效率影响最大的是雾滴的直径, 其次是气体流速。液滴直径越小, 质量就越小, 其惯性就越小, 与气流的跟随性就越好, 除雾器对其捕集能力就越小。气体流速越高, 气流携带的雾滴的动量就越大, 在相同的气流曳力的作用下, 要改变其运动方向所需要的时间越长, 而高速的气流又以极短的时间通过有效除雾区域, 雾滴和气体的速度发生较大的横向滑移, 有利于雾滴的捕集。同时对曳力占优势的微小液滴(直径 $\leq 10 \mu\text{m}$) 来说, 气流速度的增加却有利于它们的逃逸, 在中心入口区域的液滴尤其明显。

在除雾器板间距为 $d = 30 \text{ mm}$, 转折角为 120° , 工作时带水负荷为 20 g/Nm^3 (相关其他参数见表1), 不同工作表观气速下不同雾滴直径的脱除效率如图4所示。

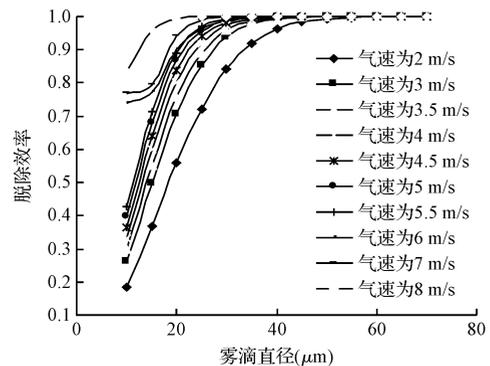


图4 不同气流速度下不同粒径雾滴的脱除效率
Fig. 4 Separation efficiency of droplet in different diameters and gas velocities

其次除雾器的结构, 特别是板间距 b 对除雾器的效率也有很大的影响, 如图5所示。对于同一转折角的除雾器来说, 板间距越大, 其除雾效率越低。

板间距的增大缩小了有良好除雾效率的临边界层的宽度比例,使得一部分中粒径的雾滴和大部分小粒径的雾滴可跟随气流无阻碍地通过除雾器中间区域,从而降低了除雾器的除雾效率。

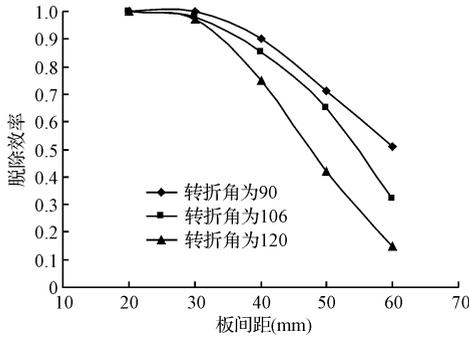


图 5 不同板间距和转折角对雾滴脱除效率的影响

Fig. 5 Separation efficiency of droplet in different turn-angles and shutter-spacings

另外,除雾器的级数对除雾效率也有很大的影响,以两级除雾器为例,它们之间的关系如下:

$$\eta = \eta_1 + (1 - \eta_1) \cdot \eta_2 \quad (9)$$

3.3 除雾器压力降的影响参数

压力降指烟气通过除雾器通道时所产生的压力损失,系统压力降越大,能耗就越高。除雾器的压力降主要表现在除雾器的沿程阻力损失和转折处和集液槽前端的局部压力损失。模拟的压力梯度见图 6。对于板间距为 30 mm,转折角为 120°的除雾器(其他相关参数见表 1),工作时带水负荷为 20 g/Nm³ 时其单级除雾器压力损失约为 75 Pa 左右。

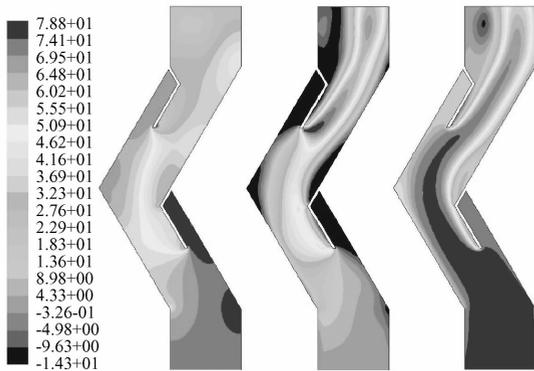


图 6 压力梯度图

(左为静压,中为动压,右为全压)

Fig. 6 Contours of pressure(Pascal)

(the left is static pressure,the middle is dynamic pressure,the right is total pressure)

对于单级除雾系统压降的大小主要与烟气流速 v_g 、转折角度 θ 、板叶片间距 b 及烟气带水负荷 T 等因素有关。板间距为 30 mm,烟气带水负荷 $T = 20 \text{ g/Nm}^3$ 时,烟气流速 v_g 、转折角度 θ 和压力降 ΔP 的关系见图 7。烟气流速 $v_g = 4 \text{ m/s}$ 、转折角度 $\theta = 120^\circ$ 时,板叶片间距 b 、烟气带水负荷 T 和压力降 ΔP 的关系见图 8。对于多级除雾系统,其工作压力降与级数 n 有近线性关系。

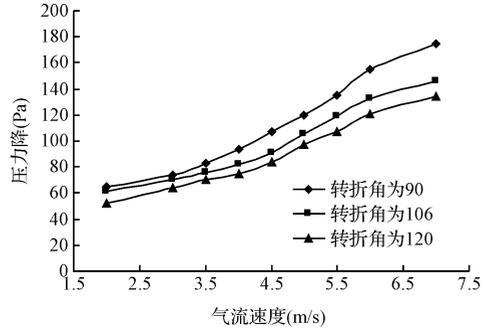


图 7 不同转折角和烟气流速对工作压力降的影响

Fig. 7 Press drop in different turn-angles and gas velocities

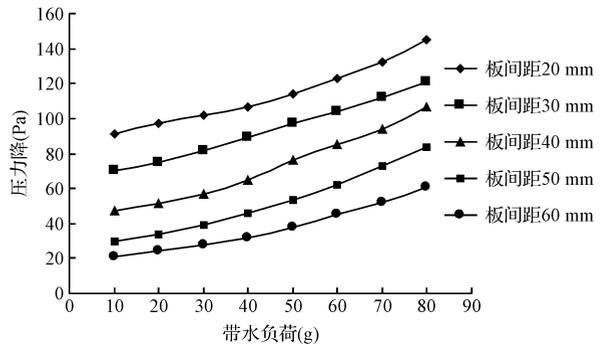


图 8 不同板间距和带水负荷对工作压力降的影响

Fig. 8 Press drop in different shutter-spacings and water-loads

3.4 除雾器的特性参数

3.4.1 除雾器临界分离粒径 d_{cr}

折板除雾器利用液滴的惯性力进行分离,在一定的气流流速下,粒径大的液滴惯性力大,易于分离,当液滴粒径小到一定程度时,除雾器对液滴失去了分离能力。除雾器临界分离粒径是指除雾器在一定气流流速下能被完全分离的最小液滴粒径。除雾器临界分离粒径越小,表示除雾器除雾能力越强。板间距为 30 mm,烟气带水负荷 $T = 20 \text{ g/Nm}^3$ 时,转

折角度 $\theta = 120^\circ$ 的除雾器的烟气流速 v_g 和其临界分离直径 d_{cr} 的关系如图 9 所示(当对该粒径的雾滴的去除效率超过 99% 时,便认为被完全分离)。

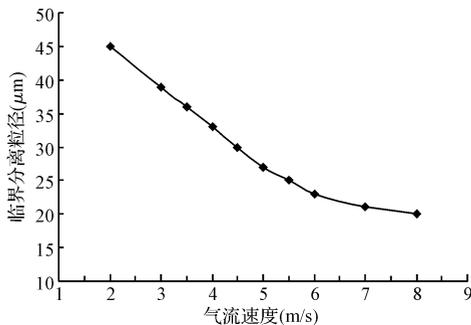


图 9 不同烟气流速下的临界分离粒径

Fig. 9 Critical diameter of separated droplet in different gas velocities

应用于湿法脱硫系统折板式除雾器,其除雾器临界分离粒径在 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 。

3.4.2 除雾器临界烟气流速

在一定烟速范围内,除雾器对液滴分离能力随烟气流速增大而提高,但当烟气流速超过一定流速后除雾能力下降,这一临界烟气流速称为除雾器临界烟气流速。临界点的出现,是由于产生了雾沫的二次夹带所致,即分离下来的雾沫,再次被气流带走,其原因大致是:(1)撞在叶片上的液滴由于自身动量过大而破裂、飞溅;(2)气流冲刷叶片表面上的液膜,将其卷起并带走。因此,为达到一定的除雾效果,必须控制流速在一合适范围:最高速度不能超过临界气速;最低速度要确保能达到所要求的最低除雾效率。

4 结论

本文作者运用两相流模型对折板式除雾器的主要性能进行数值模拟研究,展现了折板式除雾器内部流场,着重计算并分析了板间距、转折角、烟气流

速、液滴直径和带水负荷对除雾器分离效率和压力降的影响,揭示了实验手段难以测量和检测的数据和现象。计算结果表明:雾滴的直径的变化对分离效率影响最大,雾滴直径越大,分离效率越高。其次表观气速和除雾器的构造(板间距和转折角)对分离效率和工作压力降也有较大的影响。在低于临界流速的情况下,表观气速越大,分离效率越大,但压力降越大。板间距越小,分离效率越高,但压力降越大;转折角越小,分离效率越高,但压力降越大。可见分离效率和压力降这是我们在设计和应用除雾器时最应该权衡和关心的参数。对于一般的湿法烟气脱硫系统来说,采取板间距为 30 mm ,转折角为 120° 的两级除雾器较为适宜。

本文的计算结果和实际工况下所提供的运行参数基本吻合,这说明对气相采用基于雷诺时均方程的 SST $k-\omega$ 湍流模型封闭 N-S 方程,对液滴相采用基于 Euler-Lagrange 方法的 DPM 的模拟计算方法用于折板式除雾器的模拟计算是可行的,模拟结果具有一定的参考性意义。

参考文献

- [1] 陈明功,付永强,袁细宁.湿法喷雾脱硫塔内雾化器的应用.环境工程,2006,(4):40~44
- [2] 汤龙华.湿法烟气脱硫装置中除雾器的性能试验.电力环境保护,2006,(3):36~37
- [3] 金定强.脱硫除雾器设计.电力环境保护,2001,(4):16~18
- [4] 陈汉平.计算流体力学.北京:水利水电出版社,1995
- [5] 刘大有.两相流体动力学.北京:高等教育出版社,1993
- [6] Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998
- [7] Wang Y., James P. W. The calculation of wave-plate demister efficiencies using numerical simulation of the flow field and droplet motion. Transactions of the Institute of Chemical Engineers, 1998, 76A: 980~985
- [8] Burkholz A. Droplet Separation. New York: VCH Publishers, 1989