

脱硫吸收塔除雾器性能的 实验研究和数值模拟

王 霄¹ 闵 健¹ 高正明^{1*} 王 昕² 陈智胜²

(1. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029; 2. 中国大唐集团科技工程有限公司, 北京 100089)

摘 要 实验研究了不同操作条件、板片型式及板间距对除雾器除雾效率及压降的影响规律, 并采用计算流体力学(CFD)方法对除雾器内流场进行了数值模拟与分析。研究结果表明, 操作条件对压降和流场影响较小, 而板片型式特别是迎风面的几何结构是影响流场与压降的关键因素; 随着气速的增大, 除雾效率增高, 但当气速增到某一临界值(4~5 m/s)后, 除雾效率随着气速的增大而迅速减小; 除雾器压降的数值模拟结果与实验值吻合良好; 除雾器内存在2个回流区, 回流区是产生除雾器临界气速的重要原因之一。研究结果可为除雾器优化设计提供指导。

关键词 除雾器 除雾效率 压降 计算流体力学(CFD) 流场

中图分类号 X701.3 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2008)11-1529-06

Experimental study and numerical simulation of characteristics of demister of absorbing tower in desulfurization system

Wang Xiao¹ Min Jian¹ Gao Zhengming¹ Wang Xin² Chen Zhisheng²

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. China Datang Technologies & Engineering Co. Ltd., Beijing 100089)

Abstract The effects of operation conditions, blade types, blade spacing on the separation efficiency and pressure drop of demister have been experimentally investigated. Meanwhile, the flow field was numerically simulated by using computational fluid dynamics (CFD) approach. The results show that the operation conditions have little effect on the pressure drop and flow field. The blade type, especially the structure of blade, has a significant effect on the flow field and pressure drop. The separation efficiency of demister increases as the gas velocity increasing until the velocity reaches a critical gas velocity (about 4~5 m/s), then it rapidly decreases with the increase of gas velocity. Good agreement can be found between the numerical simulation results and experimental values of pressure drop in the demister. There are two recirculation flow regions in the demister. The critical gas velocity is mainly caused by these two regions. The results are of importance to the optimum design of demister.

Key words demister; separation efficiency; pressure drop; computational fluid dynamics (CFD); flow field

二氧化硫是当今人类面临的主要大气污染物之一, 是大气环境的第一大污染物^[1]。它的污染排放问题已成为制约我国国民经济发展的一个重要因素, 因此采用有效的烟气治理技术来降低 SO₂ 的排放已刻不容缓。近十几年来, 洁净煤电发电技术得到了积极的研究与开发^[2,3]。现在国内大约有 50 000 MW 燃煤机组安装了烟气脱硫装置, 其中湿式烟气脱硫技术是最成熟的工艺, 该工艺已在投产的项目中占到 80% 以上^[4~6]。

吸收塔是湿法烟气脱硫工艺的核心设备, 而除雾器是吸收塔的关键部分, 其作用是将脱硫后烟气中携带的液滴分离出来。除雾器的性能直接影响着

湿法脱硫系统能否连续可靠的运行。如果除雾器发生故障, 不仅会造成脱硫系统的停运, 甚至还有可能导致整个机组停机^[7]。

目前, 国内大中型机组的烟气脱硫系统中使用的除雾器大部分为进口, 国内对除雾器的研究不是很多, 对除雾器的内部流场压力场分析则更加少见。压力损失和除雾效率是考核除雾器性能的重要指

收稿日期: 2008-03-28; 修订日期: 2008-05-21

作者简介: 王霄(1982~), 男, 硕士研究生, 主要从事流体混合与计算流体力学研究。E-mail: 2005000073@grad.buct.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: gaozm@mail.buct.edu.cn

标,除雾器的设计就是要以提高除雾效率和降低压力损失为宗旨^[8]。为了对除雾器进行优化设计,加速这一关键技术的国产化,本研究分别从实验与计算流体力学的角度来具体测定和模拟多种因素对除雾器除雾效果和压力损失的影响,并且通过内部流场压力分析来更进一步的了解除雾器的流体力学特性。

1 装置与方法

1.1 实验装置与测试方法

实验在高2 m,直径为0.8 m的有机玻璃槽中进行。喷淋系统采用了进口内径为0.012 m的螺旋型喷嘴,实验装置与喷嘴外形见图1。以清水为介质,喷嘴喷淋量固定为1.2 t/h,雾化平均粒径为600 μm。

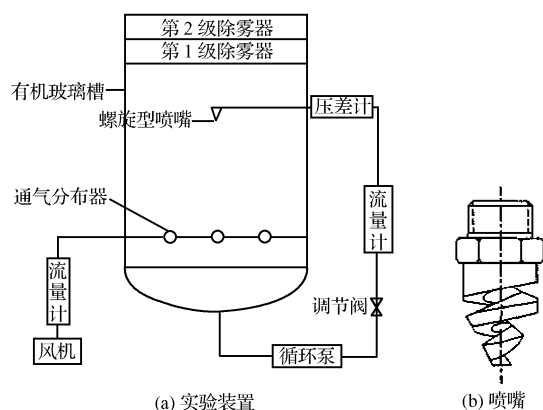


图1 实验装置与喷嘴示意图

Fig.1 Sketch map of experimental equipment and nozzle

实验目的是测量除雾器的压降与除雾效率,所以文中的气速是指通过除雾器的气体气速。实验室风机所能提供的最大气体流量为1 500 m³/h,对应有机玻璃槽的空塔气速为0.83 m/s,而除雾器正常操作气速为1~4 m/s,本实验的操作气速为1~6 m/s,为满足通过除雾器的气速要求,本实验只留出除雾器通道部分截面(面积为0.064 m²),对其余截面进行封堵。

测试在室温15~20℃下进行。测试前,先向槽中注入一定量清水。测试时,启动风机,调节风门挡板,依据空气流量与流通截面积来标定除雾器气速;然后打开循环泵,调节液体流量计前的阀门使液体压力与流量保持基本恒定,确保喷嘴在一系列测试中产生一定平均粒径的液滴群。实验过程中,液体循环流量固定在1 200 L/h,玻璃槽进口气体流量在300~1 400 m³/h之间变化,槽内液气比范围为0.857~4 L/m³。

除雾器进出口压降的测定使用精度为0.01帕的微压计。测量除雾器压降时,下部测压口在除雾

器进口中心,上部测压口分别在除雾器出口中心位置及其两端0.15 m位置处,每个测压点记录2个稳定值,总共6个值取平均得到除雾器压降。

测量除雾效率时,采用称重法^[9],即把自制采样探头伸进除雾器进出口的测量区域进行等时等速的采样,然后利用精度为0.1 mg的分析天平称取采样探头在干态和湿态下的重量,通过采样前后的重量差分别计算进出口的水量,最后使用下式计算除雾效率:

$$\eta = \frac{M_{\text{进}} - M_{\text{出}}}{M_{\text{进}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $M_{\text{进}}$ 为进口水量(g); $M_{\text{出}}$ 为出口水量(g)。

1.2 模拟方法

1.2.1 模拟域

在除雾器的设计过程中,为了过滤第1级除雾器中没有滤去的液滴,使用更小板间距的第2级除雾器来捕捉细小的液滴。2级除雾器的板片型式如图2所示。取2片除雾器板片之间的区域进行模拟。首先模拟三维流场,对结果分析可知,平板式除雾器可简化为二维流场模拟,因此后续的模拟计算则采用简化的二维模型进行。

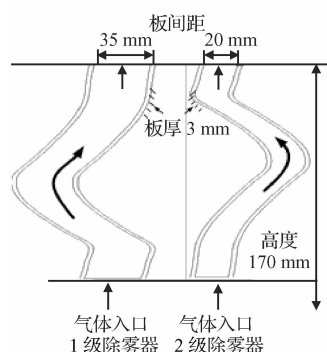


图2 除雾器板片型式示意图

Fig.2 Sketch map of demister blade

1.2.2 模型

在模拟中用气相(空气)作为连续相考虑,液相(液滴)作为离散相。对于多相流流动,特别是喷雾情况,湍流模型中的Realizable k-ε Model比Standard k-ε Model能更准确地预测喷射速度^[10,11]。

对微观液体颗粒在主体气流中的流动模拟采用离散相模型^[12],当计算颗粒的轨道时,跟踪计算颗粒沿轨道的热量、质量、动量的得损,之后将这些物理量加入随后的连续相计算中。这样,在连续相影响离散相的同时,也考虑离散相对连续相的作用。交替求解连续相和离散相的控制方程,直到两者均收敛为止,以实现双向耦合。

1.2.3 粒径分布

在相同的喷淋液量下,液滴雾化粒径不同,塔内

压力损失显著不同,因此,必须准确输入液滴初始粒径^[13]。在 FLUENT 中,颗粒尺寸分布用 Rosin-Rammler-Logarithmic 分布描述,该分布假定颗粒直径 $d(\mu\text{m})$ 与大于此直径的颗粒质量分数 Y_d 之间存在指数关系:

$$Y_d = \exp[-(d/\bar{d})^n] \quad (2)$$

其中, n 是非均匀性指数, $\bar{d}$ 是特征尺寸(μm), 均可由喷淋实验数据拟合得到。喷嘴供应商提供的喷淋液滴 PDPA 实验数据中包括液滴累积粒径分布数据,从中选取具有代表性的 9 个点进行数据拟合,可得喷淋液滴的 Rosin-Rammler 分布曲线。由(2)式可知, $\bar{d}$ 为 $Y_d = e^{-1} \approx 0.368$ 时的颗粒直径,可计算出 $\bar{d} = 3\,696\,\mu\text{m}$ 。

n 值由下式给出:

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d/\bar{d})} \quad (3)$$

把 Y_d 与 $d/\bar{d}$ 的数值代入(3)式可得到 n 值及其平均值 n_{aver} ,将算得的 $\bar{d}$ 与 n_{aver} 输入到 FLUENT 中,即可准确给定液滴的初始粒径分布。

1.2.4 液滴破碎和凝并

模拟中要跟踪非稳态液滴,需要在计算过程中考虑液滴的破碎和凝并,并考虑液滴相互之间的碰撞,才可准确描述液滴运动轨迹。为了更准确地捕捉颗粒的运动状态,需要准确获得液滴的曳力系数。FLUENT 依赖液滴形状的变化以动态形式确定曳力系数,在模拟过程中采用动态曳力模型。

1.2.5 壁面边界层及网格

壁面采用壁面膜来处理,并对弓形进行壁面加密,在 Gambit 中,尝试了 2 组壁面边界层的设置。

网格稀疏对模拟最终结果影响很大,所以需要在保证结果准确的条件下,找出最优化的网格。本次模拟在壁面边界层 I 条件下采用 4 种网格大小,在壁面边界层 II 条件下采用 2 种网格大小。模拟策略见表 1。

表 1 壁面边界层及网格策略

Table 1 Boundary layer and grid strategy

	壁面边界层 I				壁面边界层 II	
网格尺寸(mm)	8	5	3	1	1	0.8
节点数	364	660	1 368	7 918	8 988	13 617

模拟中,所有初始条件相同,入口风速均取 $1\,\text{m/s}$ 。气体进入流道,由于流道的变化,导致风速波动。在网格尺寸较大(8、5 和 $3\,\text{mm}$)的情况下,对板片弧度变化剧烈的地方无法准确描述。直到网格尺寸减小到 $1\,\text{mm}$ 时,才捕捉到了速度变化的准确信息;同样,在网格尺寸为 $1\,\text{mm}$ 时对比 2 种壁面边界层,壁面边界层 II 更精确,在此基础上再减小网格尺

度则变化不大。因此在后续的研究中,统一选取壁面边界层 II 和网格尺寸 $1\,\text{mm}$ 进行模拟,基本排除了网格的影响,保证了计算的精度与高效。

2 结果与讨论

2.1 影响压降的因素

脱硫吸收塔除雾器系统的压降是指烟气通过除雾器前后的压力损失。一般来说,压降越低,系统需要补充的动力越少,能耗越低^[8]。

2.1.1 操作条件对压降的影响

第 1 级板间距采用 $35\,\text{mm}$,第 2 级板间距采用 $20\,\text{mm}$ 。实验测定该系统在不同操作条件下的压降并进行比较,结果如图 3 所示。

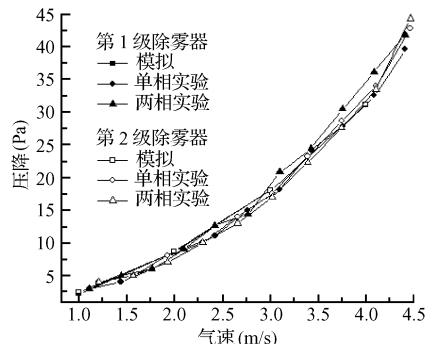


图 3 不同操作条件下 2 级除雾器压降的比较
Fig. 3 Comparison of pressure drop of two levels of demister under different operation conditions

由图 3 可知,当存在液滴喷淋时,除雾器的压降比无喷淋条件下的略大,但是都在 3 帕以内,所以 2 级除雾器的压降在有无喷淋条件下基本相同,即塔体中的液滴对除雾器进出口的气体压降基本没有影响。因此,在工业项目当中对压降的估算可以在空塔中进行,在保证准确性的基础上节约资源与人力。在接下来的压降实验中,为了简化实验条件,均采用单相操作条件进行测量。

另外,2 级除雾器板片的曲线相同,流向相反,板间距不同,但是压降基本一致。各级压降的统一对于工业过程很重要,以此减少了不必要的能量浪费和机械磨损,是多级除雾器的优化设计准则之一。

从图中还得出结论,在单一气相条件下,模拟值和实验值保持一致,所以本文的计算方法和各项设置对于除雾器体系是可行的,可以很好地预测系统压降。

2.1.2 板片型式对压降的影响

由图 4 可知,相同板间距条件下,第 1 级和第 2 级除雾器的压降均随风速的增加而增大,并且第 2 级除雾器的压降相对第一级除雾器的要高。这是由于第 2 级除雾器除雾板迎风面所占除雾器板片总高

度的比例较第1级除雾器高,而迎风面是压降产生的主要区域,所以在相同间距下,第2级除雾器压降高,系统所需的动力多,能耗高。因此,板片型式尤其是迎风面的设计对整个除雾器的压降影响很大。

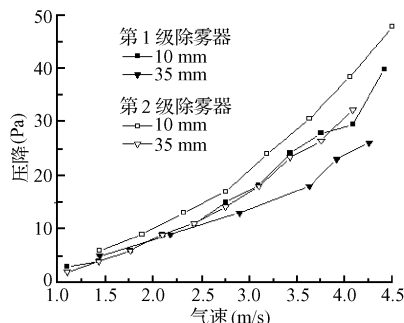


图4 2级除雾器的压降比较

Fig.4 Comparison of pressure drop of two levels of demister

2.1.3 板间距对压降的影响

从图5a可以看出,在低风速的情况下,随着板间距的增大,第1级除雾器基本无变化;但随风速的增加,不同板间距下的压降出现不规则的波动,并且板间距为24 mm左右时,压降出现了极低值。分析出现以上现象的原因,主要在于板间距的变化改变了气流在除雾板之间的流通截面积及流型,同时弯曲板片弓形结构的影响也是至关重要的。同样在20 mm处,2级除雾器的板片型式正好相反,压降出现了相对较大值。

从图5b可以看出,在相同风速条件下,随着板间距的增大,第2级除雾器的压降波动频繁。但是板间距为50 mm左右时,第2级除雾器出现了压降的极小值。这一现象与除雾器板片的弓形几何参数有直接的关系。由于除雾器板片弓形高度约为50 mm,这就使得在间距增大的过程中,气流逐渐不顺着除雾器上行,而是直接从除雾器板片之间的垂直窄缝中通过,使得板间气流的阻碍减小,湍流程度明显减弱,因此压降减小。随着板间距的继续增大,垂直窄缝消失,导致压降大幅增加。

从流体力学的角度来分析,非圆形管内的压力损失可以通过下式来计算:

$$\Delta p = \lambda \frac{l \rho u^2}{d_e} \quad (4)$$

$d_e = 4 \times \text{流体流过的截面积}(\text{m}^2) / \text{流体接触的周边}(\text{m}) \quad (5)$

式中, λ 是摩擦因数,无因次; l 是管道长度(m); ρ 是流体密度(kg/m^3), u 是流体流速(m/s); d_e 是当量直径(m),用以表示某一非圆形管相当于直径为多少的圆管^[14]。

实验中,板间距的变化只引起了流体流过截面

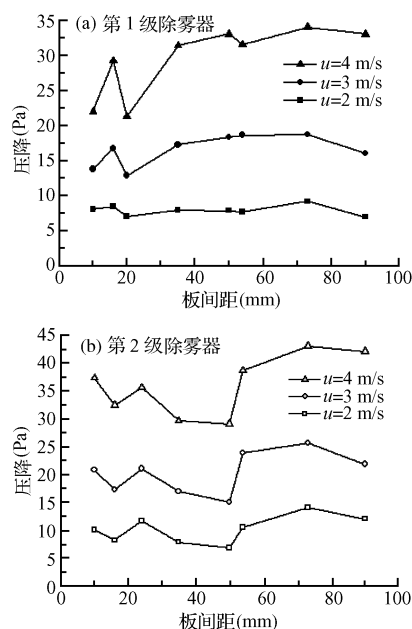


图5 不同板间距对压降的影响

Fig.5 Pressure drop in different blade spacing

积的变化。依照式(4),其他条件不变的情况下,如果仅改变 d_e 的值,除雾器内的压力损失应该是成线性变化,不会出现不规则分布。分析原因,主要有2点:(a)式(4)成立的前提条件是管道截面的长宽比不能超过3:1,而板片截面的长宽比最高达40:1,因此算式在这一系统中失去了可靠性;(b)除雾器内的复杂折流结构对压降的频繁波动具有很大影响。

从上面的分析得出结论,板间距对压降的影响,很难用流体力学的理论去推导,也不易得到具有推算意义的公式,只有通过具体的板片型式进行大量的实验数据来绘制图表,并根据图表来进行各方面的权衡,以达到优化设计的目的。

2.2 除雾效率

除雾效率是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^[8]。本单元考察第1级除雾器和第2级除雾器在不同风速下的除雾效率,实验与计算结果如图6所示。

由图6可知,随着风速的增大,除雾效率增高,但当风速增到一定程度时,除雾效率反而随着风速的增大而减小,出现了临界风速^[6,15]。

弓形除雾器是通过气流中的液滴高速撞击板片来实现气液分离的,但是一些低速的小粒径液滴还是能被导出除雾器。在临界风速以下,随着风速的增加,携带的液滴速度大,这样能够允许更多小粒径的液滴高速撞击并粘附到板片上,有利于气液分离,所以除雾效率能够随风速的增加而提高;但当风速

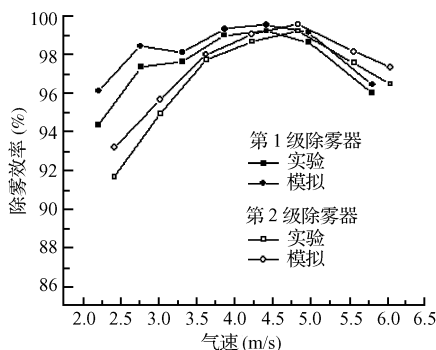


图 6 2 级除雾器不同风速下的除雾效率

Fig. 6 Separation efficiency of two levels of demister at different gas velocities

超过临界值后,随着风速增大,液滴高速撞击板片,一部分破碎的微小液滴会重新回到气流中,并被夹带出除雾器;另外,风速过高后,一部分残留在板片上的小液滴也会被气流冲出除雾器,这样就导致了更多液滴的逸出,除雾效率明显下降。因此,为达到良好的除雾效果,必须选择一个合适的风速范围:最高风速不能超过临界风速(本系统中,临界风速约为 4~5 m/s),最低风速要确保能达到所要求的最低除雾效率。

从图 6 中还可以看出:达到临界风速之前,在相同风速下的第 1 级除雾器除雾效率要高于第 2 级,这是由于板间距大的除雾器气流流线改变也比较大,因此流线的偏折能够产生较大的撞击力,有利于气液分离,提高除雾效率;达到临界风速之后,由于第 1 级除雾器板间距大,气流通过的空间大,夹带出的破碎液滴数量较多,所以除雾效率相对于第 2 级较低。

另外,通过实验与模拟的比较得出结论,CFD 可以准确地预测除雾效率,但模拟值都略高于实验值,并且在低风速下的偏差相对较大。这一结果的出现有 2 个原因:(1)模拟计算在整个风速范围内,尤其是在低风速下,对二次夹带的模拟不是很准确,或者根本就没有捕捉到这一现象,而二次夹带造成除雾效率的下降;(2)实验中出现的微小粒径在模拟中没有得到体现,即模拟的粒径分布没有覆盖实际分布,尤其是破碎的微小液滴。

2.3 模拟结果与分析

2.3.1 流场分析

图 7 为入口风速为 1 m/s 时速度分布与速度定量分析图。对弓形折板流道中间曲线上的速度分量进行分析。其中,对速度进行无量纲化处理:

$$U = u_c / u_c \quad (6)$$

其中, U 为无量纲速度; u_c 为连续相速度分布

(m/s); u_c 为风速(m/s)。

气体的物性:密度 1.2 kg/m^3 ,粘度(μ) $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。除雾器的当量直径为 0.08 m 。 $Re = d_e u \rho / \mu = 5.3 \times 10^3$ ($u = 1 \text{ m/s}$),故除雾器内的流动状态为湍流。

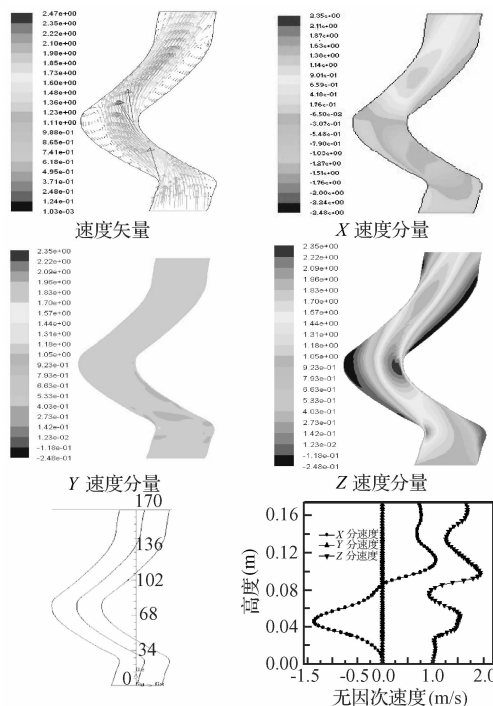


图 7 流场分析

Fig. 7 Analysis of flow field

从图 7 可知,气体从下部以速度 1 m/s (X 速度分量 = 0, Y 速度分量 = 0, Z 速度分量 = 1 m/s) 进入除雾器,在弓形折板 2 次折流作用下, X , Z 速度分量出现 2 次极值,而 Y 速度分量基本为 0,即气体在弓形流道通过时,基本没有沿着板面水平方向的流动与碰撞。 X 和 Z 速度分量的 3 个峰值都出现在弓形处,这样的结构有利于把气体携带的液滴以高速撞到弓形处并且粘附在板片上,先后经过 3 次这样的撞击分离,以达到良好的除雾效果。可见,通过流场分析,可以很直观地了解除雾器的除雾原理。

通过对速度矢量的分析,发现除雾器内部存在 2 个回流区。回流区的存在一方面有利于液滴的捕捉;通过该区域的液滴在回流气流的作用下粘附在板片上,从而增强了过滤作用;但是,如果风速过大,回流气流就会把已经粘附在板片上的液滴重新卷入主体气流并被夹带出除雾器,降低了除雾效率。因此,回流区的存在也是除雾器存在临界风速的原因之一。

2.3.2 操作条件对流场的影响

图8给出了第1级除雾器单一气相和有液滴情况下的速度分布的比较。

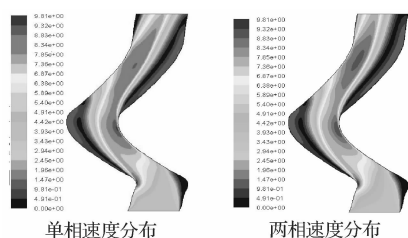


图8 不同操作条件下的速度分布

ig.8 Velocity distribution under different operation conditions

由图8可知,除雾器内部的速度分布与操作条件基本无关,即无论是单相操作还是两相操作,对于一定结构的除雾器,速度分布是一定的。综合2.1.1的结论可以确定,操作条件对除雾器压降和流场的影响都比较小。

2.3.3 气速对流场的影响

图9为气速取1、3、4和6 m/s的速度分布云图。

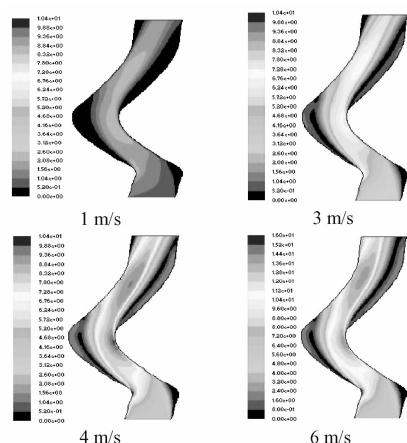


图9 不同气速下的速度分布

Fig.9 Velocity distribution in different gas velocities

如图9所示,流场分布规律基本不随气速的增加而剧烈改变,只是由于弓形折板的影响,在折流处的速度极值略有不同。因此,在设计除雾器时,只要板片结构与板间距固定,内部流场就基本确定,不会因为气速的不同而出现大的偏差。

通过比较发现,当气速为4 m/s时,最上端折流处附近的高速气流区域(图中显示为深色区域)基本都在靠近折流处位置;当增至6 m/s后,该区域开始远离折流处并向着除雾器出口偏移。这一偏移导致了更多的液滴没有经过碰撞而直接逸出除雾器,造成折流作用的下降。所以,临界气速的出现还有一个重要原因就是随着气速的增大,折流处的流场

发生了改变,高速区域向除雾器出口偏移。

3 结论

(1)对于一定结构与板间距的除雾器,操作条件对压降和流场影响较小,板片型式特别是迎风面的几何结构是影响流场与压降的关键因素。

(2)随着气速的增大,除雾效率增高,但当气速增到某一临界值(4~5 m/s)时,除雾效率随着气速的增大而迅速减小。

(3)除雾器压降与除雾效率的CFD预测结果与实验值吻合良好。计算结果证明,除雾器内部存在2个回流区,回流区是产生临界气速的重要原因之一。

参考文献

- [1] 冯玲,杨景玲,蔡树中. 烟气脱硫技术的发展及应用现状. 环境工程,1997,15(2): 19~24
- [2] 江哲生. 中国洁净煤发电技术的展望. 太原:第十四届国际匹兹堡会议及煤炭利用研讨会论文,1997. 2~4
- [3] 张新生,李长春,李光霞. 燃煤烟气脱硫. 北京:中国地质大学出版社,1991. 4~13
- [4] 中国环境科学学会. 脱硫技术. 北京:中国环境科学出版社,1995. 30~31
- [5] 刘忠,赵毅,胡满银,等. 脱硫新技术的发展和现状. 电力情报,1996, (3): 21~25
- [6] 杨柳,王世和,王小明,等. 湿法烟气脱硫系统除雾器特性试验研究. 热能动力工程,2005, 20(2): 145~147
- [7] 郎方年,陈金玉,吴建卫,等. 波纹板脱硫除雾器的除雾性能研究. 机床与液压,2003, (5): 137~140
- [8] 金定强. 脱硫除雾器设计. 电力环境保护,2001, 17(4): 16~18
- [9] 杨柳,王世和,王小明. 脱硫除雾器除雾特性的研究. 中国动力工程学报,2005, 25(2): 289~292
- [10] 何枫,谢峻石,杨京龙. 喷嘴内部流道型线对射流流场的影响. 应用力学学报,2001, 18(4): 114~119
- [11] 李勤,徐成海,伍沅,等. 撞击流湿法脱硫雾化喷嘴内流场数值模拟. 石油化工设备,2006,35(6): 1~4
- [12] 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
- [13] Jacek A. Michalski. Spraying angle and spray polydispersity in modeling of the aerodynamic characteristics of FGD towers. Atomization and Spraying, 2002, 20: 593~613
- [14] 谭天恩,麦本熙,丁惠华. 化工原理. 北京:化学工业出版社,2004. 38~46
- [15] 汪波. 湿法脱硫除雾器简介. 北京:第二届中国国际脱硫脱硝技术与设备展览会暨技术研讨会论文,2006. 232~238