

半干法压力旋流式喷嘴雾化性能数值模拟

高继慧, 陈国庆, 高建民, 秦裕琨

(哈尔滨工业大学 燃烧工程研究所, 哈尔滨 150001, chengqhit@163.com)

摘要: 对压力旋流式脱硫雾化喷嘴雾化特性进行了数值模拟研究, 分析了各因素对雾化液滴粒径的影响, 得到了喷嘴下游流场内液滴粒径和速度空间分布. 计算结果表明: 雾化液滴粒径与雾化压力和喷嘴直径成正比, 与雾化介质黏度和表面张力成反比; 液滴速度沿轴向方向急剧衰减, 在距喷嘴 200 mm 处几乎不发生变化, 而在径向方向上呈中心低, 边缘高的分布; 在破碎和聚合的作用下, 液滴粒径沿轴向方向呈先减小、后增加的趋势, 大颗粒主要集中在雾炬外围. 试验结果与计算值基本吻合.

关键词: 压力雾化; 雾化特性; 半干法; 数值模拟

中图分类号: TK224.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)03-0437-05

Numerical simulation on atomizing performance of pressure swirl nozzle for semi-drying FGD

GAO Ji-hui, CHEN Guo-qing, GAO Jian-min, QIN Yu-kun

(Combustion Engineering Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 15001, China, chengqhit@163.com)

Abstract: The numerical simulation on spray characteristic of pressure swirl nozzle was carried out, and the main factors effecting the atomizing performance of the nozzle were studied. The distributions of velocity and diameter of droplets were obtained at different special sections. Simulation results were compared with the experimental results. The simulation results indicate that the droplet size is proportional to pressure and nozzle diameter, and inversely proportional to viscosity and surface tension of liquid. Along the spray axis, droplet velocity decreases acutely, and keeps steady at the downstream of 200 mm. Along the radial direction, the axial velocity of droplet in the center is lower than that on the edge, where the droplet size is maximum. Due to droplet collision and breakup, the droplet size decreases first, and then slowly increases. The simulation results are in good agreement with experimental results.

Key words: pressure atomization; spray characteristics; semi-drying FGD; numerical simulation

半干法烟气脱硫技术的共性特点是工艺过程中水的适量介入, 对于典型工艺而言, 其介入方式是将水或浆液雾化成一定粒径的液滴, 与烟气进行传热传质, 将 SO_2 以稳定硫酸盐的形式固定下来. 在此过程中, 喷嘴的雾化特性直接决定了液滴在塔内的有效停留时间和脱硫塔的安全稳定运行. 了解脱硫塔内雾化液滴的分布及蒸发特性, 提

高喷嘴的利用效率是进一步优化半干法脱硫工艺、提高设备运行的稳定性和脱硫剂利用率的有效途径之一.

近年来, 许多学者对喷嘴的液滴分布特性及应用进行了相关的研究^[1-4]. 雾化液滴在运动过程中, 在气流剪切力、曳力等力的作用下发生二次破碎和聚合. 到目前为止, 还没有切实有效的实验方法可以观测到这一重要的复杂变化过程, 而采用数值模拟方法结合雾化液滴碰撞和破碎模型, 可以有效经济地研究液滴的雾化及在气相中破碎、聚合、运动过程.

本文针对压力旋流式雾化喷嘴建立液滴雾

收稿日期: 2008-12-29.

基金项目: 国家“十一五”重点科技支撑计划资助项目(2006BAA01B04);
国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA05Z307).

作者简介: 高继慧(1971—), 男, 副教授;

秦裕琨(1933—), 男, 教授, 博士生导师, 工程院院士.

化、碰撞和破碎的数学模型,分析了雾化工质及喷嘴运行参数对雾化颗粒粒径的影响,得到了喷嘴下游区域液滴速度和粒径分布,计算结果与试验结果吻合良好。

1 数学模型

1.1 气相控制方程

在计算中,将烟气作为连续相介质处理,在欧拉坐标系中采用标准 $\kappa - \varepsilon$ 双方程模型,使用 SIMPLE 算法求解。气相控制方程通用形式可表示如下:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad } \phi) + S_{\phi}.$$

式中: ϕ 为通用变量, Γ_{ϕ} 为广义扩散系数, S_{ϕ} 为广义源项。

1.2 气液两相流模型

喷嘴雾化过程涉及到液滴和烟气的两相流动,本文在计算过程中,将雾化液滴作为离散相处理,液滴在烟气中运动时,受到气相曳力、液滴自身重力、Basset 力等共同作用,在本文计算中只考虑曳力和重力。根据牛顿第二定律可以得到液滴运动方程如下:

$$\frac{du_1}{dt} = F_D(u - u_1) + \frac{g_x(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}.$$

式中: $F_D(u_g - u_1)$ 为单位质量曳力; u_g 为气相速度; ρ_g 为气相密度; u_1 为液滴速度; ρ_l 为液滴的密度。

1.3 雾化模型

根据喷雾过程的发生和发展,将雾化过程分为两个子阶段,分别称一次雾化和二次雾化。本文根据现有理论对上述两个阶段分别采用线性不稳定液膜雾化模型和 TAB 破碎模型求解液滴雾化过程。

Taylor 认为雾化是由液膜的不稳定而引起的。液滴从喷嘴喷出后形成液膜,液膜表面受到扰动产生波,且波长逐渐增加直至半个波长或整个波长的液膜被撕裂形成线状液膜,然后在液体表面张力的作用下收缩成液滴。所以,首先引起液膜不稳定波动并导致液膜破碎的临界波长值是决定和影响雾化液滴粒径的主要因素,表示如下:

$$\lambda_{cr} = 2\pi \left(\frac{4\mu_l \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l}}}{\beta \rho_g (u_g - u_1)^2} \right)^{\frac{2}{3}}.$$

式中: σ 为液滴表面张力; μ_l 为液滴粘度。当扰动波的波长小于该临界波长时,扰动波增长为负,波幅迅速衰减;反之迅速增加。

本文采用泰勒类比模型来求解液滴的二次破碎,将液滴的变形类比为在外力作用下的有阻尼弹性变形,服从有阻尼强迫振动方程。并用无量纲为 1 的位移 y 来判断液滴是否破碎分裂。 y 的数学表达式如下:

$$y = x/(C_b r).$$

式中: x 为实际液滴赤道与其为球形时赤道的两者之间的变形位移, r 为液滴的半径, C_b 为经验常数,通常取 0.5。

当 $y > 1$ 时,液滴发生破碎分裂。对于无阻尼液滴,若假设相对速度不变,通过对受迫、有阻尼振动控制方程的泰勒类比和无量纲化可以求解 y 。

$$y(t) = We + e^{-(\frac{t}{t_d})} (y_0 - We_c) \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega} \left(\frac{dy_0}{dt} + \frac{y_0 - We_c}{t_d} \right) \sin(\omega t) e^{-(\frac{t}{t_d})}.$$

分裂后的液滴粒径与速度,按 O'Rourke 和 Amsden^[5] 提出的分裂前后能量守恒求出。

1.4 碰撞模型

为减少计算量,将雾化液滴分成若干液滴组,各液滴组内液滴的速度粒径分布相同。液滴在碰撞过程为两两液滴组碰撞,且为一个瞬时过程,碰撞的结果分为:合并、反弹及破碎。当表面力占主导时将会合并,当动能占主导时将会发生分裂。由于喷嘴雾化液滴间相对速度较小^[6],本文仅考虑液滴合并和反弹两种情况。关于液滴碰撞的具体分析详见参考文献[7]和[8]。

2 计算域及边界条件

本文计算对象为半干法脱硫工艺中使用的压力旋流式雾化喷嘴,喷嘴出口直径 4 mm,雾化压力为 4 MPa,喷嘴流量为 6.0 kg/h,雾化介质为水,初始温度为 300 K。本文雾化区域的计算域是室温、常压条件下直径为 200 mm,高为 700 mm 的三维圆柱反应器。反应器内部气流速度模拟脱硫塔内烟气流速。

在喷嘴出口液滴稠密区域,液滴的运动存在较大的随机性,液滴的碰撞是一种不可避免的行为。液滴的数密度是影响液滴碰撞的主要因素,在计算过程中主要受网格数量的影响,因此,为了降低计算结果对网格的依赖性,本文在喷嘴出口区域采用网格局部加密法,减小该区域网格尺寸。液滴粒子的加入是通过对粒子初始位置随机分布的取样来实现的,为了降低计算结果对液滴组的依赖性,本文在计算硬件条件允许的条件下将液滴组分为 10 000 个。在反应器壁面上取流体速度和相关紊流参数为零,用壁面函数法处理边界层流

场. 在计算液滴流场时,参照液滴在脱硫塔内碰壁情况,本文按照文献[9]的边界处理方式,采用液滴粘壁模式.

3 计算结果及讨论

为了验证数值模拟计算结果,本文分别采用了特纳和 Lewis-Nukiyama-Tanasawa^[10]提出的试验拟合式(分别标记为试验拟合结果1和试验拟合结果2)与计算结果进行比较.

3.1 影响雾化液滴粒径的因素分析

图1给出了不同雾化压力条件下,喷嘴雾化液滴 Sauter 平均直径分布情况. 由图中可以看出,随着雾化压力的增加,液滴平均粒径降低,且随着压力的增大,液滴粒径衰减程度降低. 分析原因认为:对于压力式喷嘴,雾化压力主要使液体从喷嘴出口高速流出,提高液膜的初始能量,在周围气体的曳力等作用下,破碎成为液滴. 压力越大液体流出速度越高,气液之间作用越强烈,雾化出液滴越小. 但当雾化压力大于一定值时,雾化效果提高得就不明显了. 因此,结合喷嘴运行的经济性,对于雾化喷嘴存在一个雾化压力的最佳值. 另外,从图中可以看出,数值模拟结果与喷嘴性能的试验拟合和公式基本吻合.

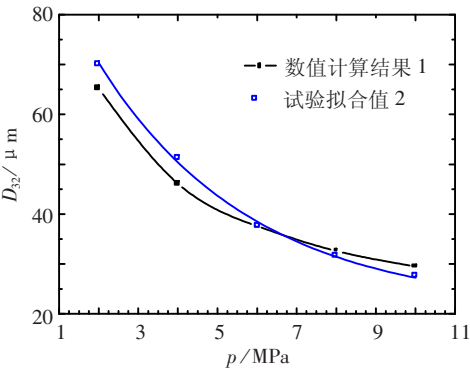


图1 雾化压力对雾化液滴粒径的影响

图2给出喷嘴出口直径对雾化液滴平均粒径的影响. 可以看出,随着喷嘴出口直径的增加,雾化液滴的粒径减小,与喷嘴试验性能试验拟合公式得出的趋势相反. 分析原因认为:本文计算喷嘴模型中所定义的喷嘴出口直径与实际喷嘴出口直径概念上存在差异. 压力式喷嘴在雾化过程中,流体在旋流室内高速旋转,在固壁表面形成液膜,液膜最后经过喷嘴流出喷口,因此在旋流室和喷嘴出口中心区就会形成空气芯. 本文计算雾化模型中所给的喷嘴出口直径是指空气芯直径. 因此,在雾化工质水质量流量和雾化压力不变的情况下,喷嘴出口液膜的速度保持不变,液膜的截面也保持不变. 若增大液膜的内径,则必然导致液膜变

薄,进而所形成线性液柱直径减小,破碎后形成的颗粒粒径减小.

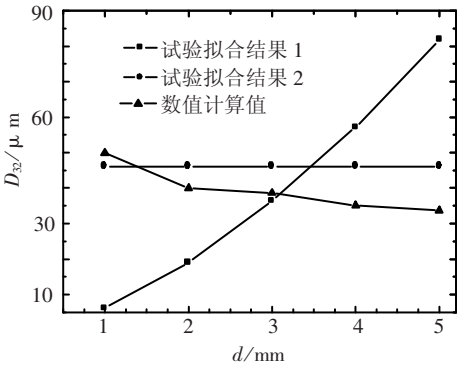


图2 喷嘴出口直径对雾化液滴粒径的影响

图3和图4给出了液滴的黏度和表面张力对雾化液滴平均直径的影响. 可以看出,在雾化压力和液体流量不变的情况下,随着黏度和表面张力的增加,喷嘴雾化液滴粒径增加. 分析原因认为,在压力式喷嘴雾化过程中,液体在旋流室内所具有的切向速度和径向速度是影响射流初始分裂的关键因素. 液体的黏性越大,流体在旋流室内旋流的程度就减弱,所形成的液膜也就较厚. 液膜经喷嘴喷出后要克服液体表面张力而破碎形成线状液膜,线状液膜再克服表面张力而收缩形成液滴,因此,液体的表面张力越大,液膜或线状液膜分裂、破碎就难于迅速进行,所形成的液滴也就比较大.

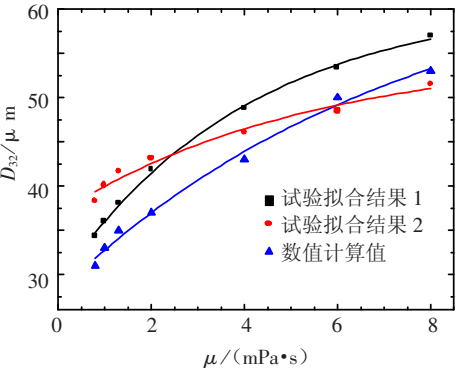


图3 液体动力黏性对雾化液滴粒径的影响

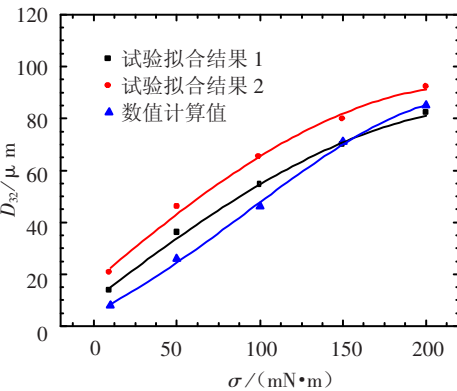


图4 液体表面张力对雾化液滴粒径的影响

其次,在液滴二次破碎过程中,液滴在流场中运动与气相发生作用,以表面张力、黏性力及惯性力为一方的聚合力,使液滴紧紧团聚在一起,而以空气阻力、曳力等为一方的破碎力使液滴进一步分裂为细小的液滴,减小表面张力和黏性力都有利于液滴的二次破碎,可以形成较小的液滴。

由图3和图4还可以看出数值模拟计算的结果与实验公式基本吻合。

3.2 喷嘴下游流场液滴速度分布

图5为喷嘴雾化轴向方向上液滴平均速度分布,从图中可以看出,液滴以较高的速度从喷嘴喷出,在沿轴向运动的过程中,受到气相曳力及液滴自身重力影响,速度急剧衰减,在200 mm后液滴速度几乎与气相速度基本相同。

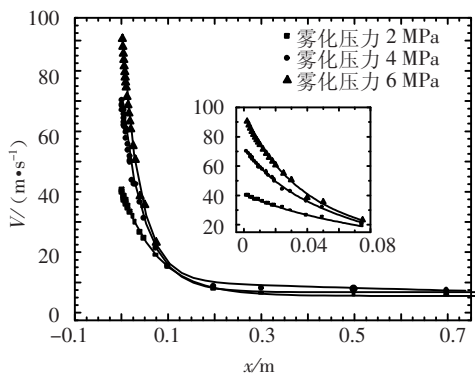


图5 沿喷嘴轴向方向液滴的速度分布

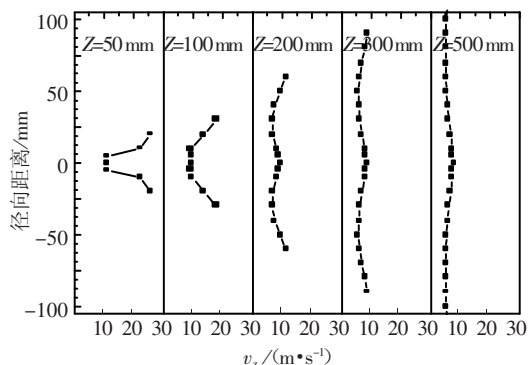
图6给出液滴轴向和径向速度沿着塔高在不同截面径向的变化情况,由图6(a)中可以看出,在同一截面上液滴的轴向速度分布呈中心低,雾炬边缘高的分布特点,边缘最高速度可以达到30 m/s,中心最低速度为10 m/s.且随着高度的增加,雾炬边缘颗粒的速度逐渐降低,中心区域颗粒速度逐渐升高.到 $z = 500$ mm后,液滴速度开始趋于均匀分布.分析原因认为,具有相同初始速度的液滴自喷嘴喷出后,由于大液滴的惯性大,贯穿能力强,速度衰减也就相对较慢,能很快进入雾炬的边缘,而小液滴质量小,贯穿能力差,在气相阻碍的作用下,速度迅速衰减,刚性变差,仅随气流流动,而非向四周扩散,因此造成雾炬中心区域液滴粒径小,速度小的分布特点。

图6(b)为液滴的径向速度分布.可以看出,其分布呈中心高,边缘低的特点,说明中心区域颗粒向四周扩散最剧烈.沿轴方向呈径向速度呈先增加后减小的分布特点,说明液滴的扩散强度沿轴向方向呈先增大后降低,最大值并不在喷嘴出口部分,而是在距喷嘴300 mm左右区域。

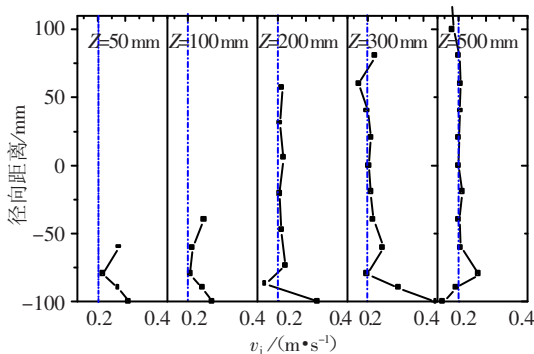
3.3 喷嘴下游流场内液滴粒径分布

图7为沿轴向方向液滴的平均粒径分布情

况,从图中可以看出,随着轴向高度的增加,液滴的平均粒径先减小,在到达100 mm后开始增加.分析原因认为,液滴自喷嘴喷出后,在空间内进行碰撞及二次破碎过程.由图7可以知在距离喷嘴出口较近高度内,液滴的速度很高,其韦伯数(We)较大,液滴碰撞后主要发生破碎.同时在此区域二次破碎剧烈,因此,液滴的平均直径降低.而随着高度的增加,液滴速度降低,二次破碎减弱,液滴间的碰撞主要以聚合为主,因此液滴的直径逐渐增大.但与不考虑二次破碎的过程相比,液滴的增加缓慢,说明在此区段仍旧发生二次破碎过程。



(a) 不同截面上液滴轴向速度分布



(b) 不同截面上液滴径向速度分布

图6 液滴速度沿径向变化

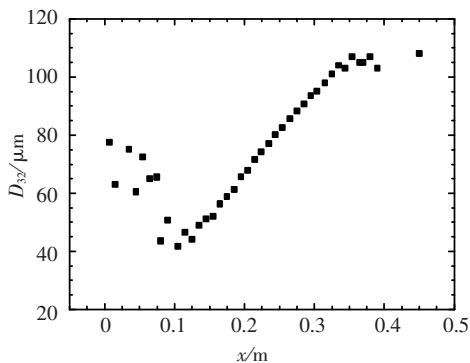


图7 沿喷嘴轴向方向液滴的粒径分布

图8为不同截面上液滴平均直径的径向分布特征,从图中可以看出喷嘴的雾炬基本为对称,在喷嘴出口,雾化中心区域颗粒较小,大颗粒主要分

布在雾炬边缘区域. 随着距离喷嘴出口截面高度的增加, 液滴粒径的分布逐渐趋于均匀. 分析原因认为主要是由于随着高度增加, 液滴速度降低, 在湍流扩散作用下, 气液混合趋于均匀. 在距离喷嘴 300 mm 截面上, 液滴的平均粒径基本相同. 本文计算结果趋势与文献[11]实验结果基本吻合.

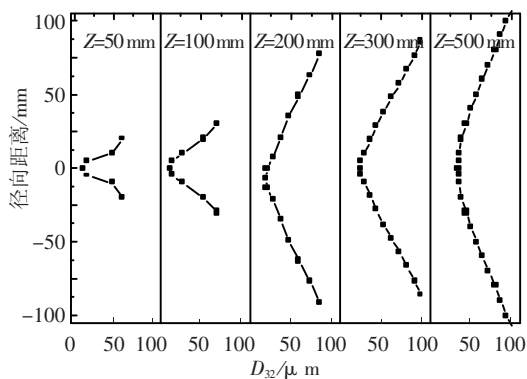


图8 不同截面上颗粒粒径的径向分布特征

4 结 论

1) 雾化压力、喷口直径、液体黏度及液体表面张力是影响压力旋流式雾化喷嘴雾化效果的主要因素. 喷嘴雾化液滴粒径与压力和喷口直径成反比, 与液体黏度和表面张力成正比. 数值模拟与经验计算结果基本吻合.

2) 本文所选雾化模型中的喷口直径是指空气芯直径, 与经验式中喷口直径意义不同, 趋势相反.

3) 液滴自喷嘴出口喷出后速度急剧衰减, 在距喷嘴出口 200 mm 处, 气液速度基本相等. 由于液滴破碎及相互间碰撞聚合, 液滴平均粒径沿塔高方向呈先减小后增加的分布趋势. 液滴的轴向速度沿径向呈中间低四周高的分布, 随着高度增加, 中心处速度增加. 在喷嘴下游流场中大颗粒主要分布在雾炬的边缘, 小颗粒主要集中在雾炬的中心.

参考文献:

- [1] 刘联胜, 吴晋湘, 杨华, 等. 气泡雾化喷嘴颗粒平均直径经验公式的拟合[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(5): 464-467.
- [2] 钱丽娟, 熊红兵, 林建忠. 湍流雾化射流液雾粒径分布的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 251-254.
- [3] SOMMERFELD M, QIU H H. Experimental studies of spray evaporation in turbulent flow[J]. Heat and Fluid Flow, 1998, 19: 10-22.
- [4] 王乃华, 骆仲泐, 岑可法. 半干法烟气脱硫喷嘴的雾化特性研究[J]. 燃烧化学学报, 2003, 32(4): 333-337.
- [5] O'ROURKE J P, AMESDEN A A. The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup[J]. SAE Technical Paper, SAE-872089, 1987.
- [6] MOON S, ABO-SERIE E, BAE C. The spray characteristics of a pressure-swirl injector with various exit plane tilts[J]. International journal of multiphase flow, 2008, 34: 615-627.
- [7] PHAM T. A computer Tool for Spray Modeling Using Lagrange Droplet Tracking in a Homogenous Flow Model[D]. West Lafayette, IN: Purdue University, 2000.
- [8] ANDRESSI L, UBERTINI S. Experimental and numerical analysis of high pressure diesel spray-wall interaction[J]. International journal of multiphase flow, 2007, 33: 742-765.
- [9] CELATA G P, CUMO M, LOMBARDO C, et al. Experimental result on rewetting of hot surfaces by droplet impingement[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29: 275-285.
- [10] 持田隆, 荃田嘉男, 今村滨. 喷雾干燥[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1981: 93-97.
- [11] 周林华. SNCR 气力式雾化喷嘴雾化特性的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 51-56.

(编辑 杨波)