

一种中空离心式喷嘴流场特性的研究

邱庆刚, 刘丽娜, 尹晓奇

(大连理工大学 能源与动力学院 辽宁 大连 116000)

摘 要: 利用 VOF(volume of fluid) 方法和 realizable 湍流模型对中空离心式喷嘴的气液两相流动进行了数值模拟, 并将模拟结果与实验数据进行了对比, 两者结果吻合良好。模拟结果表明: 旋流室内压力随半径的减小而减小; 在中心 1/3 半径范围内存在低压区, 其存在将会引起喷口外部空气抽吸, 形成空气心, 空气心半径越大, 液膜越薄, 在大于 1/3 半径区域内有较高的动压, 将引起液膜在该区域扩展喷淋。喷嘴出口处液相体积分数为 1, 离喷口距离越远, 液相体积分数越小; 出口速度随入口压力的增大而增大, 出口速度的方向以及喷嘴内流体迹线图表明了液体是旋转流出喷嘴的。

关 键 词: VOF; 离心式喷嘴; 两相流; 压强分布; 空气心; 速度流场

中图分类号: TH311 文献标识码: A

引 言

中空离心式喷嘴由于结构简单, 动能消耗低, 喷淋扩散角大, 雾化性能好等优点而在海水淡化、化工、石油、航空等行业中具有广阔的应用前景, 因此国内外学者对其进行了广泛的研究^[1~6]。这些研究大都从实验或者理论方面对喷嘴特性进行研究, 存在一定局限性: 实验研究周期长, 投资力度大; 理论模拟虽然受到国内外学者们的重视, 在一定程度上可以弥补实验的这些缺点, 但需要一定的实验数据验证其方法的正确性。

综合考虑了两种方法的优缺点, 应用 Fluent 软件对喷嘴进行模拟计算, 对中空离心式喷嘴进行了实验和数值模拟两方面的对比。经过实验数据验证其正确性后, 对其内外部流场进行进一步分析研究, 得到喷嘴内部压力和外部速度流场的分布规律。

1 实验研究

搭建如图 1 所示实验台, 实验装置如图所示。水箱中的水通过泵吸入喷嘴, 压力转换为流体动能

后以液膜射流的形式喷出。实验开始前先开启旁通阀, 然后开启泵, 调节调节阀开度大小并读取流量计某状态下流量和与之对应的入口压力和喷淋角度值, 改变喷淋状态以测量多组数据。

实验中采用条件喷淋角度, 利用数学公式 $\alpha_x/2 = \arctan \frac{y}{x}$ 计算得到喷淋半锥角 $\alpha_x/2$, 其定义如图 2 所示。实验中 y 值为 0.611 m, x 值依据入口压力的不同而取不同值。

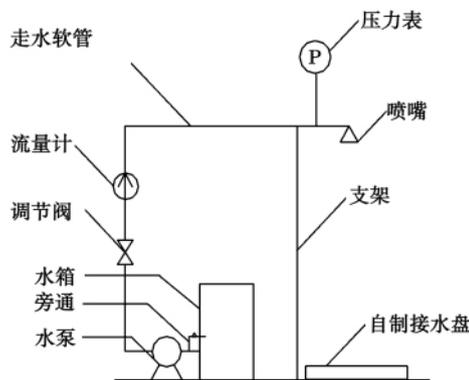


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Sketch of the test device

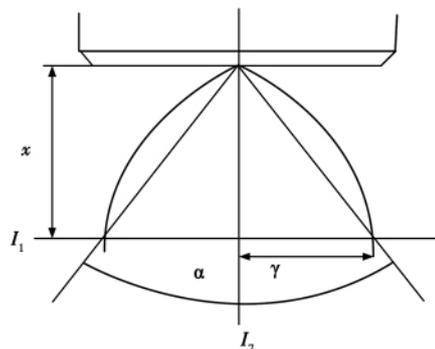


图 2 定义条件喷淋角度

Fig. 2 Definition of conditional sprinkling angle

收稿日期: 2010 - 10 - 20; 修订日期: 2010 - 12 - 06

作者简介: 邱庆刚(1969 -), 男, 辽宁大连人, 大连理工大学副教授, 博士。

2 数值模拟方法

2.1 计算模型

喷嘴内流动为典型的气液两相流动,在数值计算中采用目前最为广泛的 VOF 算法来追踪气-液相自由界面的流动情况。

VOF 方法最早由 Hirt 和 Nichols 提出^[7-9],是一种改进的 SLIC(Simple Line Interface Calculation)方法,此方法可适用于任何两种不可压缩、不混合,且相互间滑移可忽略的流体计算。本研究工质水和空气(当压缩性不强时)就适合 VOF 方法。

VOF 方法的基本思想是使用一个标量场函数体积分数 f 来表征第二流体(空气为第一流体,水为第二流体)在计算网格中的分布,其大小为第二流体在网格中所占体积百分比。当 f 取 1 时,表示网格中全为第二流体;当 f 取 0 时,表示网格中全为第一流体;当 f 取 0 到 1 之间的值时,则表明网格中部分为第二流体,部分为第一流体,而任何 0 到 1 之外的值都没有物理意义。

标准 $k-\varepsilon$ 模型对时均应变率较大的情形时,有可能导致负的正应力,为了使流动符合湍流的物理定律,根据文献选择 realizable 湍流模型^[10]。

2.2 三维网格划分

对离心式喷嘴按照 1:1 绘制结构简图并进行网格划分。喷嘴旋流室采用四面体混合网格划分,以适应复杂的旋转流动,其余部分采用六面体结构网格划分,网格总数为 471611,节点数为 245163。选取旋流室顶部中心为坐标原点,沿旋流室半径方向平面取为 $x-y$ 平面,其法线方向取为 z 轴方向。三维网格划分如图 3 所示。

2.3 控制方程

实际喷淋中,不考虑化学反应和物理相变,不考虑相间的热交换。

VOF 模型控制方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \quad (2)$$

体积分数方程:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

式中: p —流体时均压力; u —流体速度; g —重力加速度; F —体积力; ρ —流体密度; f —液相体积分数 $\rho = f\rho_1 + (1-f)\rho_2$, $\mu_i = fu_{i1} + (1-f)u_{i2}$, 下标 1 和 2 表示气相和液相; i, j —张量符号。

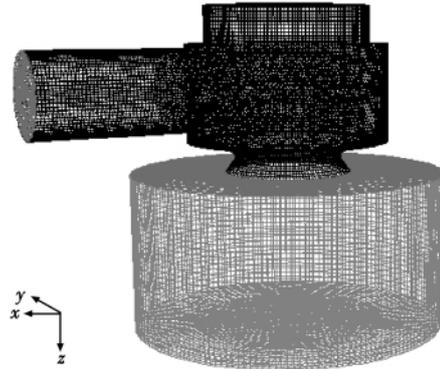


图 3 三维网格划分

Fig. 3 3D grid division

realizable $k-\varepsilon$ 模型的 k 和 ε 输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad (5)$$

式中: ρ —流体密度; k —湍动能; ε —湍动耗散率; u_i —时均速度; G_k —由于平均速度梯度引起的湍动能的产生项; σ_k 和 σ_ε — k 和 ε 的湍流 Prandtl 数; μ_t —湍动黏度 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 。

在 realizable $k-\varepsilon$ 模型中,湍动粘度计算式中的

$$\text{系数 } C_\mu \text{ 不再是常数, } C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon}$$

方程中 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $C_1 = \max(0.43,$

$$\frac{\eta}{\eta + 5}, C_2 = 1.9)^{[10]}$$

2.4 边界设置

喷嘴进口设置为速度入口,入口第二相容积比率设置为 1,即进口全为液体(水);喷嘴出口为压力出口,出口第二项回流比设置为零,即当发生回流时,回流全部为气体(空气);其它边界采用标准壁面函数进行计算。

3 结果分析

3.1 实验结果与模拟结果的比较

在不同流量下喷嘴入口压力和喷淋半锥角的实验数据与模拟数据的比较,如图 4 所示:入口压力的实验值要比模拟值大,原因是实验中入口管段压力值的测量是在距离喷嘴入口一段距离的管段上测量的,而模拟值为喷嘴入口处的值,由于沿程和局部阻力损失,所以实验值要比模拟值大;压力变化会影响到喷淋半锥角,因此随着流量的增大,喷淋半锥角的模拟值和实验值之间的差距越来越小。入口压力的模拟结果和实验结果的最大误差为 12.9%,喷淋半锥角的模拟结果与实验结果的最大误差为 13.2%,从图中可以看出实验值和模拟值的变化趋势基本一致。其模拟值的计算是根据文献中公式 $\beta = (\arctan$

$$\sqrt{\frac{v_r^2 + v_t^2}{v_a^2}}) 180/\pi$$

得到^[11~12]。

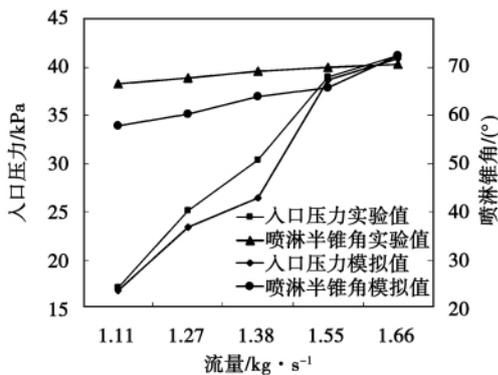


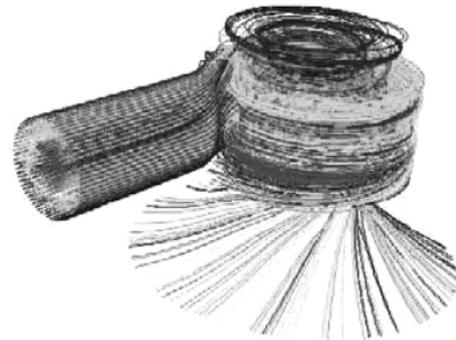
图 4 实验值与模拟值比较

Fig. 4 Drawing showing a comparison of the test and simulation value

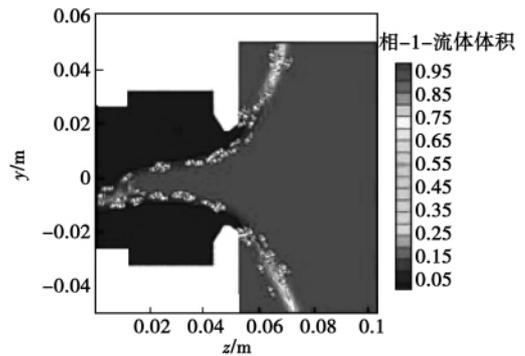
3.2 喷嘴内流体迹线和两相分布图

图 5(a) 为喷嘴内部的流体迹线图。通过图中的迹线可以形象直观地看到液体从喷嘴侧面入口进入旋流室,在其内部高速旋转,旋流室内下半部分迹线较上半部分密集,旋流强度大,最后在离心力的作用下以环形液膜的形式从喷口旋转喷出,从两相图中可以明显看到液膜的分布情况。图 5(b) 为喷嘴在入口压力 16.85 kPa, $x = 0$ 截面的两相分布图。由图得知,液体在旋流室内的不同位置,紧贴内壁的液膜厚度不同,由于中心低压以及旋转液膜的卷吸作用,对喷嘴出口处的大气形成抽吸,因此中心轴线附近会出现一个锥形的空气心,空气心半径越大,液

膜越薄;在喷嘴出口处液相体积分数为 1,即出口处仅为液膜,距离喷嘴出口的距离越远,液相的体积分数越小,在约 0.06 m 位置处液相体积分数为 0.5,选定该位置为气液交界面^[13]。



(a) 流场迹线



(b) 截面两相分布图(x=0)

图 5 流场迹线和截面两相分布(x=0)

Fig. 5 Drawing showing the trajectory of the flow field and two-phase distribution in various sections

3.3 截面压力分布

图 6(a) 为喷嘴在入口压力 16.85 kPa, $z = 30$ mm 截面的静压云图。从图中可以看出,喷嘴在进口管段有最大静压值 14 kPa,进入旋流室后压力变化较大,沿着半径减小的方向压力逐渐减小,在中心区域存在明显的低压区(旋流室 1/3 半径区域内),最低压力为 1 kPa,在入口压力值大的时候中心区域甚至有负压值出现。这主要是由于液体刚进入喷嘴进口直管段时阻力损失小,压降损失较小,进入旋流室后,旋转加强,难以进入到中心区域,因此在中心处形成比入口压力值小很多的低压区(负压区)。同时旋流室中心形成的低压区,使得空气从喷口倒吸进入旋流室,在旋流室中心出口形成一个与外界大气相通的空气心。图 6(b) 为同工况下 $z = 30$ mm 截面的动压云图。从图上可以看到,在喷嘴入口处液体动压值较小,约为 2 kPa,进入旋流室后在大于

1/3 半径区域有较高的动压值,最高压力可以达到 8 kPa,从而引起液体在该区域内高速旋转;实验中喷淋液锥的周相均匀度存在一定偏差,可能与动压图中压力分布的不均匀性存在一定的关系。

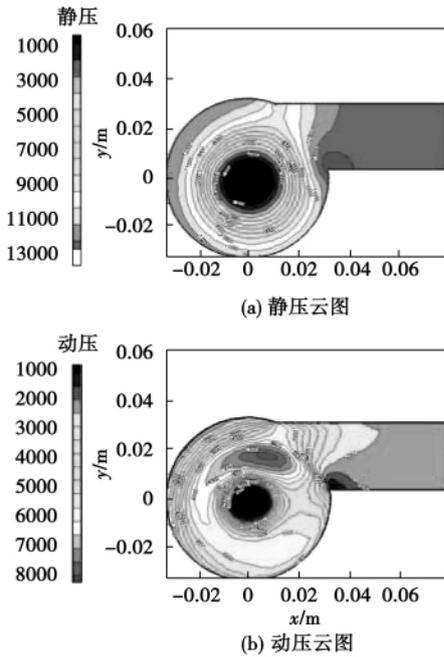


图6 截面压力云图($z = 30\text{ mm}$)

Fig. 6 Sectional pressure cloud atlas($z = 30\text{ mm}$)

3.4 出口速度分布

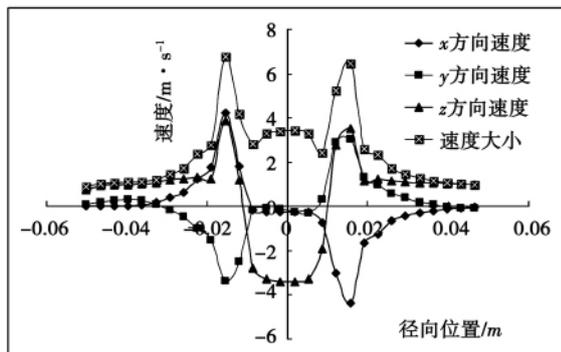


图7 喷嘴出口处速度分布图($z = 56\text{ mm}$)

Fig. 7 Velocity distribution chart at the outlet of a nozzle($z = 56\text{ mm}$)

图7为入口压力 40.87 kPa 时喷嘴出口处的各向速度曲线图。由图得知,喷嘴出口中心处速度较低,这是由于液体的高速旋转运动造成中心压力偏低所致; x 方向速度从正值变到负值, y 方向速度从负值变到正值,速度值最大约为 4 m/s,其沿着径向

呈现对称分布,表明液体是以旋转液膜的方式流出喷口的;在径向位置 0.01 m 范围内, z 方向速度大小为负值,该范围内主要为空气倒吸形成的空气心区域,所以速度沿 z 轴负方向,而在液膜扩散区的 0.01 ~ 0.02 m 范围内速度值为正值,说明液体是沿着 z 轴正方向喷出的。图8显示了入口压力为 7.06、23.4、40.87 kPa,距喷嘴出口 3 mm 处流场的速度分布情况。从计算结果可以看出,入口压力越大,出口速度也越大;速度最大值对称出现在径向位置的 0.01 ~ 0.02 m 范围内,该区域即为液膜喷射区域。

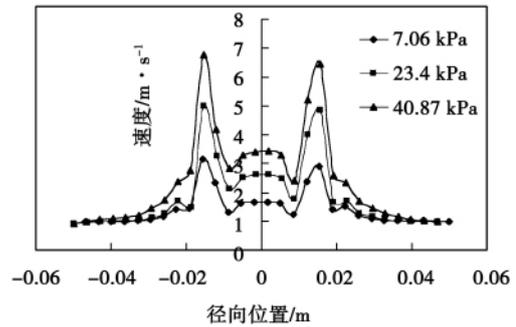


图8 不同入口压力下喷嘴出口处的速度分布

Fig. 8 Velocity distribution chart at various inlet pressures at the outlet of the nozzles

4 结论

(1) 应用 VOF 方法和 realizable $k - \epsilon$ 湍流模型对中空离心式喷嘴进行数值模拟,模拟结果与实验结果吻合良好。

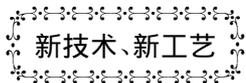
(2) 旋流室内压力分布随其半径的减小而减小;在旋流室中心 1/3 半径区域内存在低压区,其存在使空气从喷口倒流入旋流室,在其内部形成一个与外界大气相通的空气心,空气心半径越大,液膜越薄;在大于 1/3 半径区域内有较高的动压值,将引起液膜在该区域扩展喷淋。在喷嘴出口处液相体积分数为 1,即出口处仅为液膜,距离喷嘴出口的距离越远,液相的体积分数越小,在约 0.06 m 位置处液相体积分数为 0.5,选定该位置为气液交界面。

(3) 喷嘴出口中心处速度较低,这是由于液体的高速旋转运动造成中心压力偏低所致;出口 x 、 y 速度方向和喷嘴内流体迹线,表明液体是以旋转液膜的方式流出喷口的;出口速度随着入口压力的增大而增大。

参考文献:

- [1] MANDAL A ,JOG M A ,XUE J ,et al. Flow of power-law fluids in simplex atomizers [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow 2008 29(5) : 1494 – 1503.
- [2] YULE A J ,CHINN J J. The internal flow and exit conditions of pressure swirl atomizers [J]. Atomization and Spray ,2002 ,10 (2) : 121 – 146.
- [3] EUN J L ,SANG Y O ,HO Y K ,et al. Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various Reynolds numbers [J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2010 34(8) : 1475 – 1483.
- [4] LARYEA G N ,NO S Y. Spray angle and breakup length of charge-injected electrostatic pressure-swirl nozzle [J]. Journal of Electrostatics 2004 60(1) : 37 – 47.
- [5] 高继慧 陈国庆 高建民 等. 半干法压力旋流式喷嘴雾化性能数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报 2010 42(3) : 437 – 441. GAO Ji-hui ,CHEN Guo-qing ,GAO Jian-min ,et al. Numerical simulation of the atomization characteristics of semi-dry-method pressure swirling flow type nozzles [J]. Journal of Harbin Institute of Technology 2010 42(3) : 437 – 441.
- [6] 陈晓东 刘宇 杨威迦. 背压对液体离心喷嘴内液膜厚度的影响[J]. 航空动力学报 2010 25(1) : 198 – 202. CHEN Xiao-dong ,LIU Yu ,YANG Wei-jia. Influence of the back pressure on the thickness of the liquid film in a liquid centrifugal nozzle [J]. Journal of Aerospace Power 2010 25(1) : 198 – 202.
- [7] HIRT C W ,NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics 1981 39(1) : 201 – 225.
- [8] TOOREY M D ,CLOUTMAN L D ,MJOLSNESS R C ,et al. NASA-VOF2D: a computer program for incompressible flows with free surface [R]. LA-10621-MS ,New Mexico: Los Alamos Scientific Laboratory ,1985.
- [9] TOOREY M D ,STEIN L R. NASA-VOF3D: a three-dimensional computer program for incompressible flows with free surface [R]. LA-11009-MS ,New Mexico: Los Alamos Scientific Laboratory ,1987.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京 清华大学出版社 2004. WANG Fu-jun. Computational fluid dynamics analysis-CFD software fundamentals and applications [M]. Beijing ,Tsinghua University Publishing House 2004.
- [11] 孔德英 雷勇. 发动机燃烧室离心式喷嘴喷雾角的数值仿真[J]. 计算机仿真 2007 24(10) : 45 – 52. KONG De-ying ,LEI Yong. Numerical simulation of the atomization angle of a centrifugal type nozzle in the combustion chamber of an engine [J]. Computer-based Simulation 2007 24(10) : 45 – 52.
- [12] BISWAS G ,SOM S K. Coefficient of discharge and spray cone angle of a pressure nozzle with combined axial and tangential entry of power-law fluids [J]. Applied Scientific Research ,1986 ,43 (1) : 3 – 22.
- [13] KILLION J D ,GARIMELLAL S. Simulation of pendant droplets and falling films in horizontal tube absorbers [J]. Journal of Heat Transfer 2004 126(6) : 1003 – 1013.

(陈 滨 编辑)



普拉特和惠特尼动力系统

普拉特和惠特尼动力系统 依靠出售三个模块化的纯循环有机朗肯循环机组 进入了土耳其再生能源市场 该机组可以产生净地热功率达到 780 kW。

原有低温地热资源 大约 120 ℃ 将用来供给三个纯循环系统燃料。

该工程将由约旦地热公司拥有 并负责安装和运行 , 该公司为一个合资公司。

摘译自柴油机和燃气轮机世界 2011 年 3 月刊

wall Tubes [刊 汉] ZHAO Zhi-yuan, XU Hong, LIN Zhen-xian (College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 26(5). - 593 ~ 598

To obtain the circumferential temperature distribution and the internal wall surface oxide film growth characteristics of the waterwall tubes of a boiler, through conducting a study of its heat transfer process, the authors established a numerical model for predicting the temperature distribution on the tubes with an internal wall surface oxide film. On the basis of the heat flux densities measured from the tubular heat flux equipment items, a calculation was performed according to the actual operating condition of the waterwall tubes in a power plant. It has been found that when the circumferential angle is 120 degrees, the temperatures and thicknesses of oxide films at various interfaces are smallest. When the circumferential angle is 0 degree, the temperatures and thicknesses of oxide films at various interfaces are biggest. Compared with the actual operating data, they correspond very well, indicating that to use the method in question to predict the thickness of an oxide film and temperatures at various interfaces of the tube wall is feasible. **Key words:** waterwall, oxide film, growth, prediction, new method

一种中空离心式喷嘴流场特性的研究 = Study of the Flow Field Characteristics of a Hollow Centrifugal Type Nozzle [刊 汉] QIU Qing-gang, LIU Li-na, YIN Xiao-qi (College of Energy Source and Power, Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 26(5). - 599 ~ 603

By making use of the VOF (volume of fluid) method and realizable $k - \varepsilon$ turbulent flow model, the authors conducted a numerical simulation of the gas-liquid two-phase flow in a hollow centrifugal type nozzle and compared the simulation results with the test data. Both were in good agreement. The simulation results show that the pressure inside the swirling flow chamber will decrease with a decrease of its radius and a low pressure zone exists in a range of 1/3 of the radius around the center. The existence of such a low pressure zone will result in suction to the air outside the nozzle, forming an air core. The bigger the radius of the air core, the thinner the liquid film. There exists a relatively high dynamic pressure in the area greater than 1/3 of the radius. This will cause the liquid film to extend its sprinkling in the area. If the liquid phase volumetric fraction at the outlet of the nozzle equals to 1, the more remote from the nozzle, the smaller the liquid phase volumetric fraction. The outlet speed will increase with an increase of the inlet pressure. The direction of the outlet speed and the fluid trajectory chart inside the nozzle show that the fluid flows out of the nozzle in a rotating state. **Key words:** VOF (volume of fluid), centrifugal type nozzle, two-phase flow, pressure distribution, air core, velocity flow field

喷淋式脱硫塔脱硫特性的试验研究 = Experimental study of the Desulfurization Characteristics of a Sprinkling Type Desulfurization Tower [刊 汉] FANG Li-jun (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: