

WFGD 水力旋流器中石灰石颗粒分级试验与数值模拟

严祯荣¹, 耿丽萍¹, 杨 茉¹, 罗晓明²

(1 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093 2 上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200062)

摘 要:湿法烟气脱硫装置中水力旋流器分级试验表明, 进口石灰石浆液的颗粒质量浓度为 15% 时, 溢流口颗粒质量浓度达 30%, 溢流颗粒粒径则集中于 30 μm 以下; 随着颗粒粒径的增大, 颗粒底流口回收率也在增大, 当粒径达到 30 μm 时, 回收率已经接近 100%。数值模拟表明, 雷诺应力湍流模型、自由表面多相流动模型和斯托克斯拉格朗日模型能很好地描述水力旋流器内复杂三维运动的石灰石颗粒分级运动和规律。采用了初始边界条件不给出分流比、也不设定空气柱的模拟方法, 模拟结果显示了空气柱的形成、流体的旋流流动。模拟得到的不同粒径颗粒的分级效率与高进口质量浓度条件下的试验结果吻合较好。

关 键 词:湿法烟气脱硫; 水力旋流器; 石灰石颗粒; 分流分级; 数值模拟

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

引 言

先进的超超临界锅炉技术是实现“洁净煤”污染物控制的成熟技术。我国超超临界机组广泛应用了石灰石-石膏湿法烟气脱硫的设备及系统, 该系统中的石灰石浆液制备系统和石膏脱水系统中都采用水力旋流器这种关键设备^[1]。石灰石水力旋流器, 溢流口石灰石浆液的浓度和石灰石粒径的大小对石灰石的利用率、反应活性、对泵与管道的磨损都有很大的影响; 选择合适的水力旋流器, 可以合理分配杂质的去向, 提高石膏的品质^[2]。因此, 烟气脱硫装置中水力旋流器的性能将直接决定脱硫系统整套装置的性能^[3]。

目前, 国内外对水力旋流器的研究很多, 其颗粒分级性能一直是研究热点。早期研究水力旋流器的学者大多采用实验测量的方法获得水力旋流器内部流场的速度分布^[4~5]。近年来, 越来越多的学者使用计算流体力学 (CFD) 的方法对水力旋流器内部的强湍流流动进行数值模拟。Hsieh 和 Rajaman 等人使用了修正 Prandtl 混合长模型和无量纲涡一流函

数运动方程以及轴对称假设, 得到了模拟结果^[4]; Dyakowski 和 William 则用 Fluent 商业软件对水力旋流器内的流动状况和浓度分布进行了数值模拟^[5]; Dued 等人用数值模拟的方法对不同进口浓度下底流口悬浮液的排出角度进行了计算, 并指出该角度随悬浮液进口浓度的增加迅速减小^[6]。在颗粒分级性能的影响因素上, Michael J Doby B Wang T Neesse 等人研究表明, 水力旋流器的结构参数、操作参数和物性参数对水力旋流器分离性能均有重要影响^[7~9]。就颗粒本身而言, 赵立新针对当量直径 45 μm 尿素复合颗粒进行了分离特性研究^[10]; 耿丽萍研究指出进口浓度差异对高炉污泥水力旋流器颗粒分级性能影响不大^[11]。针对旋流器内中心空气柱, 褚良银等人采用了中心固体棒取消旋流器内的空气柱, 使旋流器的分离性能得到了有效的强化^[12]; L. Ma 等人也用数值模拟的方法探讨了空气柱对颗粒分级的影响^[13]。Cullivan J C 用数值模拟方法提出了颗粒两相流场和分级机理的新理解^[14]。

在前人研究工作基础上, 本研究以试验为主结合数值模拟的方法, 采用更合适的雷诺应力模型 (RSM) 来验证石灰石水力旋流器的颗粒分级情况, 同时探讨了计算中空气柱的处理方法对颗粒分级的影响。

1 试 验

1.1 试验系统

图 1 为试验系统, 主要由储槽、泥浆泵、水力旋流器及连接管道和测试仪表构成。为了保证试验石灰石浆液特性的稳定, 试验石灰石浆液采用闭式循环。调好浓度的石灰石浆液从储槽经过泥浆泵, 再通过进料控制阀进入水力旋流器内进行旋流分离。

收稿日期: 2009-08-11; 修订日期: 2009-09-16

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局科技计划基金资助项目 (2008 QK083)

作者简介: 严祯荣 (1972-), 男, 四川岳池人, 上海理工大学博士研究生。

分离出的细颗粒从水力旋流器的上出口排出, 取样后回到储槽中循环。分离出的粗颗粒从水力旋流器的下出口排出, 取样后亦回到储槽中。旁通阀是为控制系统中旁路石灰石浆液流量所设。旁通阀配合进料控制阀调节进入水力旋流器的试验石灰石浆液流量和压力。通过放空阀可将系统中石灰石浆液排净。该石灰石水力旋流器的结构尺寸为: 溢流口直径 25 mm, 底流口直径 12.5 mm, 入口是边长为 25 mm 的方形, 并与旋流器柱段相切。

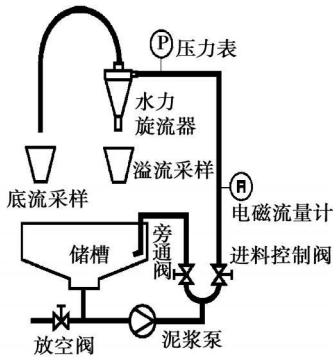


图 1 试验系统

该系统的主要目的, 是用水力旋流器进行石灰石浆液粗细颗粒分离, 在线测出旋流器进口压力及进口和上下两个出口的浓度和流量, 取得进口样品、溢流口样品及底流样品。然后用 FAM 激光散射粒度仪对三个样品进行离线的粒度分布测试, 由此计算出颗粒分级效率。用 FAM 激光散射测粒仪测试时, 将样品放在水中, 由于样品的比重较大, 放在水中沉降很快, 需要不停搅动, 因而样品颗粒分布测试有一定的随机性。为此, 测试过程中一个样品重复测量 3 次, 取平均值作为测量结果, 如重现性差则要剔除不正常的结果或重新取样测量。

1.2 试验结果及分析

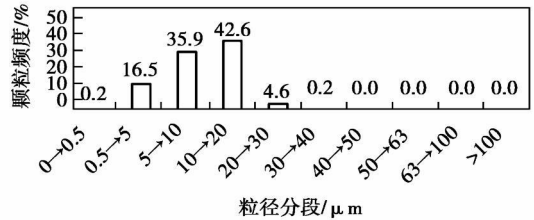
1.2.1 主要参数

石灰石浆液进口质量浓度 15%, 体积浓度 0.12%, 进口压力 0.2 MPa, 颗粒密度为 1798 kg/m³。石灰石浆液溢流口质量浓度 30%。

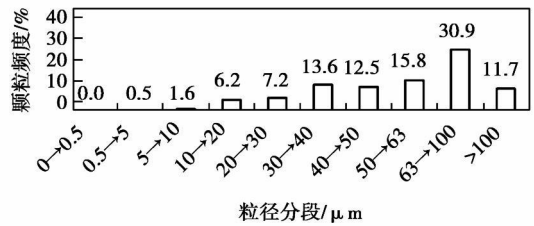
1.2.2 进口样、溢流口样及底流样的颗粒分布

石灰石浆液进口样品、溢流口样品及底流样品的颗粒分布情况如图 2 所示。很容易看出, 进料颗粒粒径分布范围很广, 从小于 1 μm 到大于 100 μm; 溢流颗粒粒径则集中于 30 μm 以下, 底流颗粒粒径则主要集中在 20 μm 以上。显然, 石灰石浆液经水力旋流器分离后, 溢流中集中了细颗粒, 底流则多是

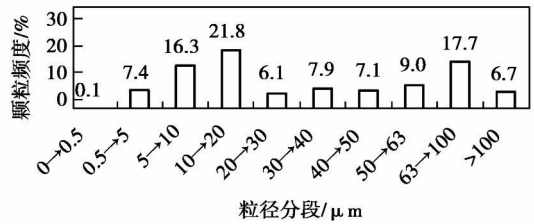
大颗粒。这样, 在实际工程应用中, 石灰石首先送到湿式球磨机内磨制并配成浆液, 石灰石浆液用泵输送进水力旋流器, 经分离后底流 (含粗大颗粒) 返回湿式球磨机进一步研磨; 溢流口的细颗粒石灰石浆液存贮于石灰石浆液池中, 然后经石灰石浆液泵送至烟气脱流装置中的吸收塔。



(a) 溢流颗粒粒径分布



(b) 底流颗粒粒径分布



(c) 进料颗粒粒径分布

图 2 颗粒分布

1.3 试验颗粒分级效率曲线

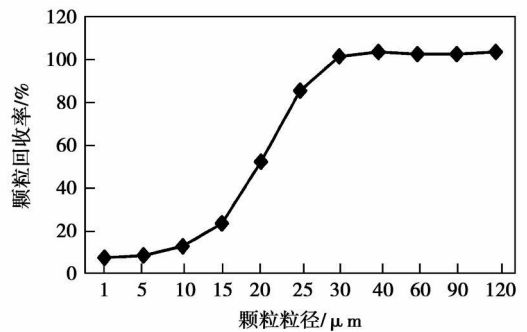


图 3 试验分级效率曲线

试验的颗粒分级效率曲线如图 3 所示。从图中可以看出, 随着颗粒粒径的增大, 颗粒底流口回收率也在增大, 当粒径达到 30 μm 时, 回收率接近

100%。

2 数值模拟

2.1 模型选用

已经发表的论文中,对于旋流分离中单相强湍流数值模拟大多采用基于 Boussinesq 涡粘性假设的湍流模型,如普朗特混合长模型、标准 $k-\epsilon$ 模型、代数应力模型等。这些模型不适合模拟复杂湍流运动,因为这些模型的涡粘性假设把雷诺应力与平均运动的应变率联系起来,从而无法描述湍流能量转变为平均运动能量的能量传递过程,也无法表示涡粘性系数是各向异性的张量,而不是各向同性的标量。计算结果也表明,上述模型都不同程度地存在缺陷,如标准 $k-\epsilon$ 模型既不能给出 Rankine 涡的合理结构,也不能预报近轴处的回流区^[15]。针对这一问题而提出的各种 $k-\epsilon$ 模型修正形式,虽然在一定程度上改善了预报结果,但其改进往往是局部和有限的。

雷诺应力模型 (RSM) 不采用各向同性的涡粘性假设,而是通过求解雷诺应力输运方程和耗散率方程来使雷诺时均方程得以封闭。由于 RSM 模型考虑了流线的弯曲、旋流和应变快速变化等影响,因而对于那些复杂的流动来说,可以给出更为精确的预测结果。虽然 RSM 模型并不总是能明显改善数值预测的精度,但是对于各向异性的流动来说 RSM 模型是很好的选择,诸如水力旋流器内的流动、燃烧器内的强旋流动等。因此,本研究在处理水力旋流器数值模拟的湍流模型时,采用的是雷诺应力模型。

处理液体和空气柱的交界面时采用了自由表面多相流动模型 (VOF)。利用 VOF 处理气液交界面时,根据对石灰石浆液的粒径分布试验结果,将进口中浆液颗粒按照粒径大小分成 11 组: 1、5、10、15、20、25、30、40、60、80 和 $100 \mu\text{m}$ 。对颗粒相的处理采用的是斯托克斯拉格朗日模型。

2.2 假设及边界条件

假定旋流器壁面不可渗透,不存在滑移速度,通过壁面函数方程来计算壁面剪切应力、近壁处的湍动能、湍流扩散率。

本研究的模拟部分采用了三维模型 (如空气柱的获得),进口采用与旋流器主体圆柱面相切的方形。水力旋流器入口采用速度进口的边界条件,溢流口和底流口设定为压力出口的边界条件。但是由于三维模型网格数量多,占用计算机内存多,模拟时

间长,所以分级效率的获取采用了二维模型。采用二维模型时水力旋流器内流动可以近似看成是轴对称的,因此可以将入口条件简化成流体从基圆周围各处均匀流入,颗粒相和水相速度相同,则流场的入口速度可以由质量守恒条件给出:

$$W_n = \frac{4Q_n}{\pi d}, \quad V_n = \frac{Q_n}{\pi d D}, \quad U_n = 0$$

K 和 ϵ 的入口条件可以表示: $K_n = 0.0144 W_n^2$, $\epsilon_n = K_n^{2/3} / 0.5 D$ 。式中轴线按照对称面来处理,令各个计算量在中轴线上的法向梯度为零。

2.3 数值方法

在具体模拟计算时,水力旋流器的底流口和溢流口的分流比可以按照试验时实际测得的实际分流比给定,然而不同尺寸和结构的水力旋流器的分流比在不同的操作参数下是不同的;模型中水力旋流器的空气柱一般假定为半径固定的圆柱,其半径是按照试验过程中某一时刻测得的尺寸确定的,然而实际的水力旋流器在进行颗粒分级的操作时其空气柱的形状是不断变化的,显然这些因素对模拟结果的推广应用会带来了一定的局限性。因此,采用初始边界条件不给分流比、也不设定空气柱的数值模拟方法来对水力旋流器内部的强旋流的颗粒分级流动进行研究。

压力与速度的耦合采用 SIMPLE 方法,动量方程、体积分方程、雷诺应力、 $k-\epsilon$ 方程均采用 QUICK 格式。模拟模型经过了网格大小和时间步长无相关性校核,模拟结果是可靠的。

2.4 计算结果及分析

2.4.1 网格划分

需要说明的是,文献 [11] 研究指出进口浓度差异对水力旋流器颗粒分级性能影响不大,同时本计算的模型适用稀相的液固两相流动,颗粒浓度过稀又不能进行试验,因此,数值计算时颗粒进口质量浓度取为 0.001 4%,而试验中颗粒进口质量浓度在 15% 左右。本计算采用的石灰石水力旋流器的三维模型网格如图 4 所示,流体从旋流器入口进入,分别从溢流口和底流口流出。采用 VOF 模型后自动生成空气柱的三维和二维模型如图 5 和图 6 所示。由图可见,空气柱处在水力旋流器中心,将溢流口与底流口贯通,是不规则的圆柱形,靠近底流口处的空气柱直径较小,而靠近溢流口处的空气柱直径较大,这与实验观察到的现象基本一致。

2.4.2 颗粒运动轨迹

三维流场中模拟得到的颗粒流动轨迹如图 7 所

示, 颗粒在水力旋流器内高速旋转流动, 入口颗粒在锥段分为向上流动经溢流口流出的内旋流和向下沿旋流器壁面流动最终经底流口流出的外旋流。

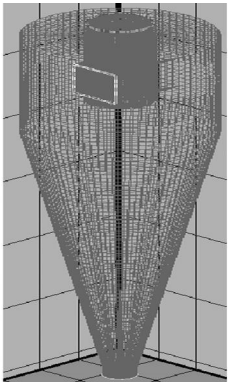


图 4 三维网格



图 5 三维空气柱



图 6 二维空气柱



图 7 流动迹线

2.4.3 分级效率曲线

分级效率是指经过水力旋流器底流口流出的某一粒径的固体颗粒占水力旋流器进口该粒径固体颗粒的比例, 所以分级效率可以直接看出水力旋流器对颗粒进行分级的效果。分级效率曲线如图 8 所示。从图中可以看出, 对于粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒, 模拟得到的分级效率与试验获得的分级效率基本吻合; 对于粒径在 $10 \sim 25 \mu\text{m}$ 间的颗粒, 模拟获得的分级效率小于试验获得的分级效率; 颗粒粒径大于 $30 \mu\text{m}$ 时, 模拟结果和实验结果又能够保持一致。分析原因: 从图 2 可知, 底流口处小于 $10 \mu\text{m}$ 颗粒频度小于 5%, 大部分从溢流口溢出, 溢流口样品颗粒小, 比重就较小, 试验时溢流口样品在水中沉降很慢, 用 FAM 激光散射测粒仪测试随机误差就小。另外, 计算模型更适合小直径颗粒的两相流动, 因此, 计算误差也比较小, 这样试验和计算吻合很好; 从图 2 还可知, 当进料颗粒粒径大于 $30 \mu\text{m}$ 时, 溢流口处大于 $30 \mu\text{m}$ 的颗粒频度约 4.6%, 说明大

部分颗粒从底流口流出, 测试误差就小; 当进料颗粒粒径在 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 之间时, 溢流口和底流口处的该粒径范围的颗粒频度的差异缩小, 测试随机误差变大。同时, 试验时进口料颗粒质量浓度为 15% 左右, 而数值计算时进料口颗粒质量浓度取为 0.0014%, 这就给试验结果和数值计算结果带来了一些误差。从图 8 也可以看出, 模拟得到的分离粒度 d_{50} 大于实验获得的分离粒径, 主要是模拟不设定空气柱, 也不设定分流比, 这样模拟时的空气柱比试验时的空气柱大, 削弱了水力旋流器的分级性能^[12], 得到了比试验更大的分离粒度 d_{50} , 说明空气柱的大小对颗粒的分级有重要的影响。

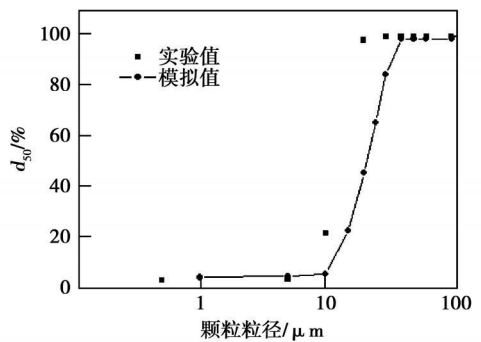


图 8 分级效率曲线

3 结 论

(1) 试验表明, 石灰石浆液进口质量浓度 15% 时, 溢流口处石灰石浆液质量浓度达 30%, 溢流颗粒粒径则集中于 $30 \mu\text{m}$ 以下, 底流颗粒粒径则主要集中在 $20 \mu\text{m}$ 以上。随着颗粒粒径的增大, 颗粒底流口回收率也在增大, 当粒径达到 $30 \mu\text{m}$ 时, 回收率已经接近 100%。

(2) 本研究采用了初始边界条件不需给分流比、也不需设定空气柱的数值模拟方法, 克服了以前靠试验给定分流比和设定空气柱的方法存在的主观因素, 增加了数值模拟的适应性。同时, 研究表明空气柱的大小对颗粒分级有重要影响。

(3) 数值模拟和试验结果对比表明, 雷诺应力湍流模型、自由表面多相流动模型和颗粒相采用的斯托克斯拉格朗日模型能很好地描述石灰石水力旋流器复杂三维运动的颗粒分级。水力旋流器内部不同粒径的颗粒随着主流体的强旋流运动分别进入内旋流向上或外旋流沿壁面向下运动从而完成了颗粒的分级。模拟得到的不同粒径颗粒的分级效率与高

进口质量浓度条件下的试验结果吻合较好, 但分离粒度 d_{50} 大于实验获得的分离粒度。

参考文献:

- [1] 熊立红. 超超临界机组烟气净化设备及系统 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009
- [2] 崔向丽, 刘 畅. 水力旋流器在湿法烟气脱流装置中的应用 [J]. 山东电力技术, 2005(6): 48-51.
- [3] 曹 卫, 方 莹. 烟气脱硫水力旋流器的性能参数研究 [J]. 盐城工业学院学报 (自然科学版), 2006 19(2): 31-34
- [4] HSEH K T RAJAMANIR K. Mathematical model of the hydrocyclone based on physics of fluid flow [J]. AChE Journal 1991 37 (5): 735-746
- [5] DYAKOWSKI T WILLIAMS R A. Modelling turbulent flow within a small diameter hydrocyclone [J]. Chem Eng Sci 1993 28 1143-1152
- [6] JOHANN DUECK MARTIN SCHNEIDER. Neesse thomas numerical calculation of the umbrella and rope discharge of a hydrocyclone [J]. Mineral Processing 2003 44(8): 12-21
- [7] DOBY MICHAEL J WANW LAIS KRAIPECH NOWAKOWSKI ANDRZEJ F. Numerical Prediction of outlet velocity Patterns in solid-liquid separator [J]. Chemical Engineering Journal 2005, 111: 173-180
- [8] WANG B YU A B. Numerical study of particle fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions [J]. Minerals Engineering 2006 19: 1022-1033
- [9] NEESSE T SCHNEIDER M GOLYK V et al. Measuring the operating state of a hydrocyclone [J]. Minerals Engineering 2004 17 (5): 697-703.
- [10] 赵立新, 蒋明虎, 温 青, 等. 水力旋流器分离细颗粒的试验研究 [J]. 化学工程, 2004 32(2): 42-46
- [11] 耿丽萍, 杨 荣, 周静伟, 等. 进口浓度对水力旋流器颗粒分级的影响 [J]. 工程热物理学报, 2006 27(4): 625-627.
- [12] 褚良银, 赵 扬, 陈文梅, 等. 水力旋流器分离性能强化研究 [J]. 过滤与分离, 2004 14(1): 1-4.
- [13] MA L NGHAM D WEN X. A numerical technique for dealing with the axis in simulating the fluid flows in polar cylindrical coordinates Numer J. Methods Linear Turbulent Flows 1997, 10: 203-214.
- [14] CULLIVAN J C WILLIAMS R A DYAKOWSKI T et al. New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics [J]. Minerals Engineering 2004 17: 651-660.
- [15] 陆耀军, 周立行, 沈 熊. 不同湍流模型在液-液旋流分离场计算中的应用及比较 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2001 41(2): 105-109

新技术、新工艺

柴油机—电力和燃料电池联合的推进系统

据《Marine Engineers Review》2008年9月号报道, 用于葡萄牙海军的两艘 209 PN级潜艇的第一艘艇, 也是葡萄牙海军的第一艘潜水艇, 于 2008年7月在 Howaldtswerke-Deutsche Werft下水。

NRP Tridente 潜艇长 68 m 潜航排水量 1 970 t。它采用柴油机—电力和燃料电池联合的推进系统, 并具有超现代化的传感器和集成的指挥和武器控制系统, 能最佳地适合于未来的战斗和侦察任务。

该艇的动力装置是由两台 4 177 kW MTU 16 V 396 柴油机、一台 Siemens Pemasyn 电动机和两个 240 kW HDW PEM 燃料电池组成的。

由于联合推进系统中具有燃料电池, 潜艇能以 AIP (不依赖空气的动力) 在水下长时间航行, 极大地提高了潜艇的生存力和战斗力。

用于这两艘潜艇的合同是葡萄牙政府和德国潜艇国际财团之间在 2004 年签订的。

(吉桂明 摘译)

WFGD水力旋流器中石灰石颗粒分级试验与数值模拟 = Gradation Experiment and Numerical Simulation of Limestone Particles in a WFGD (Wet method Flue Gas Desulfuration) Hydrocyclone [刊, 汉] / YAN Zhen-rong GENG Li-ping YANG Mo (College of Energy Source and Power Engineering Shanghai University of Science and Technology Shanghai China Post Code 200093), LUO Xiaoming (Shanghai City Special Purpose Equipment Surveillance and Inspection Technology Research Institute Shanghai China Post Code 200062) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 321 ~ 325

In a WFGD (Wet method Flue Gas Desulfuration) device, the gradation experiment of a hydrocyclone shows that when the particle mass concentration of limestone slurry is 15%, at the overflow port it will be 30%. The overflow particle diameter is concentrated at less than $30 \mu\text{m}$. With an increase of the particle diameter, the particle recovery rate at the bottom outlet will also increase. When the particle diameter reaches $30 \mu\text{m}$, the particle recovery rate will already approach 100%. The numerical simulation results show that the Reynolds stress turbulent flow model, free surface multi-phase flow model and Stokes-Lagrange model can depict very well the limestone particle gradation movement and regularity featuring a complex three-dimensional motion in the hydrocyclone. A numerical simulation method with no need to give a flow division ratio for the initial boundary condition and to preset an air column was adopted and the simulation results showed the formation of air column and eddy flow of the fluid. The gradation efficiency of particles in different diameters thus obtained is in relatively good agreement with that tested under the condition of a high inlet mass concentration. Key words: wet method flue gas desulfurization, hydrocyclone, limestone particle, flow division and gradation, numerical simulation

气液双流程烟气脱硫塔内脱硫效率与传质性能的研究 = Study of the Desulfuration Efficiency and Mass Transfer Performance of a Gas-liquid Double-flow-path Flue Gas Desulfuration Tower [刊, 汉] / SUN Zhong-wei (Department of Building Services Engineering Hong Kong Polytechnic University Kowloon Hong Kong Post Code), ZHOU Quan, HUI Shi-en, XU Tong-mo (National Key Laboratory on Multiple-Phase Flows in Power Engineering Xian Jiaotong University Xian China Post Code 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 326 ~ 329

With calcium carbide dregs serving as desulfuration agents in the test, a relevant experimental study was performed of the desulfuration performance and mass transfer characteristics of a gas-liquid double-flow-path liquid-curtain type desulfuration tower. Through tests and measurements, the influence of such main parameters as flue gas flow rate, circulating slurry quantity and liquid-gas ratio etc. on the desulfuration performance of the above desulfuration tower was given. In the meantime, a relevant mass transfer model for the gas-liquid double-flow-path liquid of a desulfuration tower was presented, for instance: $Sh=16.226Re^{0.863}Re^{-1.64}$ and $Sh=27.126Re^{-0.77}(L/G)^{-1.64}$. Based on the above-mentioned model, the complicated gas-liquid mass transfer process between the slurry and flue gases in the double-flow-path tower can be quantitatively calculated by using the empirical correlation formula expressed by the flue gas Reynolds number, slurry Reynolds number and liquid-gas ratio, the influencing law of which can offer important guiding data for studying the reaction characteristics of sulfur dioxide in the liquid curtain type wet method flue gas desulfuration system and its application in the practical engineering projects. It has been found during the test that when the circulating slurry quantity increases, the total desulfuration efficiency will enhance accordingly. With an increase of the liquid-gas ratio, the total desulfuration efficiency will also rise accordingly. When the flue gas flow rate increases, however, the related desulfuration efficiency will decrease correspondingly. The experimental study shows that when the liquid-gas ratio is higher than 20 L/m^3 , the desulfuration efficiency will be over 90%. The HH value, however, exercises a very little influence on the mass transfer. Key words: liquid curtain type gas-liquid two-phase flow, wet method flue gas desulfuration, mass transfer, desulfuration efficiency

半干法脱硫中应用蒸汽相变促进细颗粒脱除 = Application of the Steam Phase Change in Semi-dry method Desulfuration to Promote the Removal of Fine Particles [刊, 汉] / LIU Jin-hui, SONG Shi-juan, YANG Lin