

灰钙循环烟气脱硫反应器气固两相流动数值模拟

龚艳艳^{1,2,3}, 王乃继^{1,2,3}, 肖翠微^{1,2,3}, 张鑫^{1,2,3}, 李婷^{1,2,3}, 于清航^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 节能工程技术研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013)

摘要:灰钙循环烟气脱硫反应器内气固两相流动及流场特性是直接影响装置稳定有效运行的关键因素, 采用CFD软件Fluent中 $k-\varepsilon$ 湍流模型对灰钙循环烟气脱硫反应器进行了数值模拟, 确定反应器内各段阻力及流场分布。研究表明: 灰钙循环烟气脱硫反应器的循环物料入口设置是影响反应器内流场分布的重要因素, 且进料口前阻力占反应器总阻力大于90%, 并对其在20 t/h煤粉工业锅炉配套灰钙循环烟气脱硫装置上进行了实验验证, 在各测点测量气速与静压, 结果证明模拟结果可靠, 进料口前阻力模拟偏差率仅为1.7%。同时采用双进料口对反应器流场进行了优化, 模拟结果验证该优化方法确实可行, 计算得到良好的流场。

关键词:烟气脱硫; 灰钙循环; 数值模拟; 气固两相流; 结构优化

中图分类号: TQ534.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2015)02-0117-05

Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in circulating flue gas desulfuration reactor

GONG Yanyan^{1,2,3}, WANG Naiji^{1,2,3}, XIAO Cuiwei^{1,2,3}, ZHANG Xin^{1,2,3}, LI Ting^{1,2,3}, YU Qinghang^{1,2,3}

(1. Energy Saving Engineering Technology Branch, Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: The gas-solid two-phase flow and flow field characteristics of active calcium circulating flue gas desulfuration (FGD) reactor were the key factors which influenced directly device operation. The $k-\varepsilon$ turbulence model was used to make numerical simulation of the reactor. The resistance in different parts of reactor and flow field distribution were determined. The results showed that the inlet of circulating materials had major impact on the flow field, the percentage of the feed port resistance in total resistance was more than 90%. The results were verified on 20 t/h FGD reactor. The numerical results of air velocity and static pressure showed good agreement with measuring results. The simulation variation rate of the feed port resistance was 1.7%. At the same time, the reactor structure has been optimized for dual-inlet.

Key words: flue gas desulfuration; active calcium circulating flue gas; numerical simulation; gas-solid two-phase flow; structure optimization

0 引言

由于我国环保指标的日益严格, 煤粉工业锅炉等中小型工业锅炉脱硫问题急需解决。而大型电站

锅炉虽已配套脱硫装置, 但其脱硫技术占地、设备、操作均不适用于中小型煤粉工业锅炉。灰钙循环烟气脱硫技术是以循环流化床原理为基础, 针对煤粉工业锅炉开发的新型烟气脱硫除尘一体化技术。国

收稿日期: 2015-01-26; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.027

基金项目: 科技部2012年国际合作资助项目(2012DFA60860); 煤炭科学研究总院技术创新基金资助项目(2011CX03); 煤炭科学研究总院技术创新基金资助项目(2014CX03)

作者简介: 龚艳艳(1990—), 女, 江苏南通人, 工学硕士, 研究方向为煤炭洁净燃烧。E-mail: 820120854@qq.com

引用格式: 龚艳艳, 王乃继, 肖翠微, 等. 灰钙循环烟气脱硫反应器气固两相流动数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 117-121.

GONG Yanyan, WANG Naiji, XIAO Cuiwei, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in circulating flue gas desulfuration reactor [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 117-121.

外循环流化床烟气脱硫技术较为成熟,主要分为 Lurgi 公司的 CFD-FGD 技术、Wulff 公司的 RCDF-FGD 技术、FLS 公司的 GAS 技术以及 ABB 公司的 NID 技术。而国内对该技术的研究尚处于基础研究、工业性实验或刚进入商业应用阶段。灰钙循环烟气脱硫技术其脱硫反应是在反应器内发生,因此反应器内气固两相流动及流场特性是直接影响该装置稳定有效运行的关键因素^[1],理想状态是在不同塔高截面上气流分布尽可能均匀一致,以便充分发挥脱硫反应器内所有空间的作用^[2-3]。国外在脱硫反应器设计中大量采用 CFD 用于流场数值模拟和计算,并根据数值计算的结果对脱硫反应器进行优化,取得了巨大的经济效益。合理利用 CFD 进行脱硫系统的仿真数值模拟,不仅能缩短设计周期,降低设计成本,而且能提高设计质量,其优越性是传统的实验方法所无法比拟的^[4]。直到 21 世纪初,学者们才开始对循环流化床烟气脱硫的气固流动规律进行模拟研究,至今出现了许多关于脱硫塔内流场分析和脱硫模型的文献。在宏观的尺度上,针对流态化系统的动态非均匀特征,可分为离散颗粒模型 (Discrete-Particle-Model) 及双流体模型 (Two-Fluid-Model) 两大类^[5]。笔者针对灰钙循环烟气脱硫技术中管式反应器内气固两相流动进行了冷态数值模拟,分析反应器内流场分布提出优化方案并进行比较,同时对反应器压差的数值模拟进行实验验证,确定模拟可靠性。

1 研究对象及研究方法

1.1 研究对象及物理模型

灰钙循环烟气脱硫技术工艺流程如图 1 所示。由锅炉产生的烟气通过管式反应器底部后形成快速气流,循环灰受到气流的冲击形成强烈湍动的流化床,脱硫反应后产物经旋风分离器及布袋除尘器分离后,洁净烟气通过烟囱排出大气。固体颗粒物进入灰仓后增湿重回塔内继续参加反应,通过粉煤灰^[6-7]的多次循环,增加了反应器内钙硫摩尔比,提高了脱硫效率。

研究对象为 20 t/h 灰钙循环烟气脱硫反应器,如图 2 所示。主要考察烟气单相流场,通过数值模拟加入粉煤灰循环颗粒对反应器流场的影响^[8]。

在数值模拟过程中,物理模型主体是以烟气、粉煤灰两相混合的三维非均匀流场区域。使用 ICEM CFD 14.0 软件^[9],依据 20 t/h 灰钙循环烟气脱硫反

应器实际尺寸等比例建模,同时对结构进行适当简化。烟气近似为空气视作由入口均匀进入反应器,冷态模拟将空气近似为常温常压的不可压缩流体^[10]。

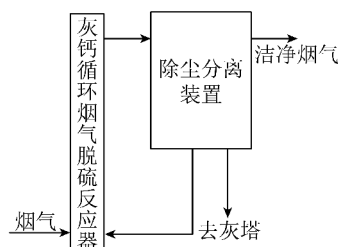


图 1 灰钙循环烟气脱硫工艺流程

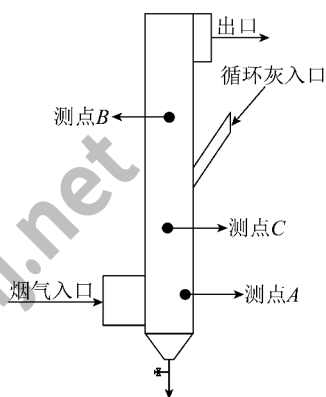


图 2 20 t/h 灰钙循环烟气脱硫反应器示意

1.2 反应器内气固两相流动的数学模型

灰钙循环烟气脱硫反应器主体部分为气固两相发生混合的湍流过程^[4]。模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型。由于固体颗粒最高气速小于 100 m/s,将气相视为不可压缩流体,空气为理想气体,粉煤灰物性使用 Flunt 数据库中飞灰物性。由于固体颗粒物所占流体体积比小于 0.1,故采用欧拉-拉格朗日离散相模型 (DPM) 计算气固两相间的相互作用,并用 Rosin-Rammler 分布描述煤粉颗粒的粒径分布特性。

1.3 网格划分和边界条件

使用 ICEM CFD 14.0 软件,依据 20 t/h 灰钙循环烟气脱硫反应器实际尺寸等比例建模,并采用以结构网格为主的六面体网格对其几何模型进行划分。总网格数量为 1632879,考察其网格质量,发现均大于 0.5,满足计算要求。

由于涉及细长管路,使用三维双精度求解器进行求解,并且基于压力,以稳态法求解,使用 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型对冷态下反应器进行数值计算^[11-12],流体压力-速度耦合基于 SIMPLE 算法,对流项差分

格式采用二阶迎风,迭代收敛精度设置为质量源绝对值之和小于 1.0×10^{-4} 。烟气(近似为空气)入口采用速度入口边界条件,速度设为 20 m/s,表压设为 -500 Pa,并假设在入口截面上速度分布均匀。粉煤灰颗粒物入口采用速度入口边界条件,入口速度设为 20 m/s,表压设为 -500 Pa,并假设颗粒物在入口截面上分布均匀,同时为离散相设置喷射边界条件,设置质量流量为 30 kg/s,颗粒物 x 及 y 方向速度均为 8 m/s。由于反应器进出口静压差别不大,因此出口采用自由出流型边界条件^[13]。壁面采用无滑移边界条件,近壁面区域采用标准壁面函数,壁面粗糙度设为 0.02^[14]。

2 结果与讨论

2.1 流场分布

将上述网格文件导入 Fluent 14.0 后,按之前所述选择模型及设定边界条件,进行数值计算,迭代收敛^[15]。计算结果如图 3 所示。由图 3a 可见,在进料口前段气速最大,为 50 ~ 60 m/s,主反应段气速平均约为 20 m/s。由图 3b 可见,在进料口附近湍流强度最大,且在进料口处湍流集中且最强,流场分布不均。由图 3c、图 3d 可看出流场分布不均主要是由于颗粒进入反应器导致的,故进料口设置是影响反应器内流场分布的关键^[16]。

2.2 阻力损失计算

如图 2 测点所示,进料口前段压差 $\Delta P = P_B - P_A$ (Pa),反应器总压差为差压变送器读数。而由于反应器为立式,由单位体积流体为基准的机械能衡算方程^[17]:

$$\rho g H_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + P_1 = \rho g H_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + P_2 + P_f \quad (1)$$

式中, ρ 为流体密度, kg/m^3 ; g 为常数, 9.81 m/s^2 ; H_1 、 H_2 分别为 1、2 两处的高度, m; u_1 、 u_2 分别为 1、2 两处的流体速度, m/s; P_1 、 P_2 分别为 A、B 两处的静压, Pa; P_f 为 A 至 B 的管路阻力, Pa。

故实际测量所得压差 ΔP 不仅仅包括单位体积流体流经管道时的阻力损失 P_f , 还包括重力损失 $\rho g (H_2 - H_1)$ 以及动力损失

$$\frac{\rho(u_2^2 - u_1^2)}{2}$$

故

$$P_f = \Delta P - \rho g (H_2 - H_1) - \frac{\rho(u_2^2 - u_1^2)}{2} \quad (2)$$

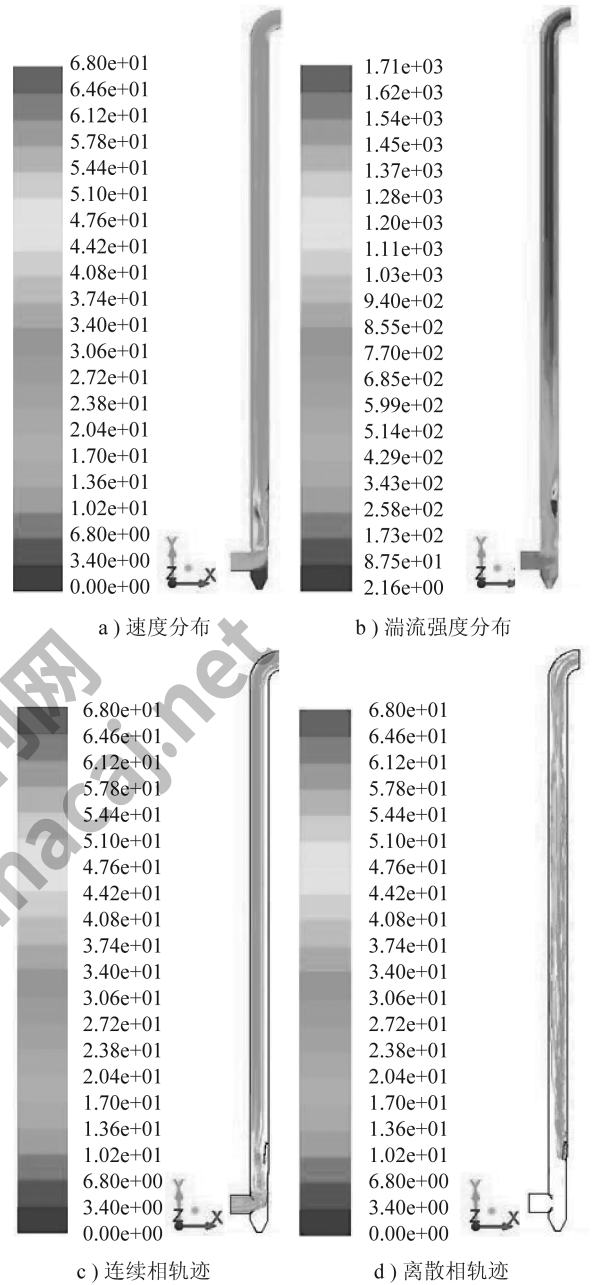


图 3 灰钙循环烟气脱硫反应器内两相流动的流场分布

不考虑进料口前后及主反应段气速变化故

$$P_f = \Delta P - \rho g (H_2 - H_1) \quad (3)$$

按图 2 所示在测点 A、B、C 点通过模拟计算得 3 点表压分别为 -687, -1267, -1491 Pa, 后计算得图中进料口前段和主反应段阻力压差为 580 和 224 Pa, 则通过式(3) 计算得反应器进料口前段及主反应段阻力损失分别为 549 和 19 Pa。

2.3 实验验证

针对高倍率灰钙循环烟气脱硫系统实验装置, 使用皮托管、手持德图压力计和差压变送器, 进料口

前段阻力与气速的关系如图2所示,分别进料口前后位置A、B及进料口处C等位置设置测试孔。冷态下,通过调节鼓、引风量,测试不同气量下的参数。冷态物料循环时,测得的相应气速下的进料口前段阻力与气速的关系如图4所示。

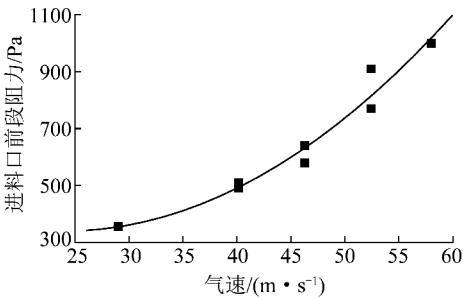


图4 进料口前段阻力与气速的关系

可见进料口前段阻力实测值与二次拟合曲线相当吻合,阻力计算的公式为 $P_f = \lambda \times \frac{L}{D} \times \frac{\rho u^2}{2}$ (式中 λ 为摩擦系数,无量纲; L 为管长,m; D 为管径,m; μ 为流体速度,m/s),也为气速的二次曲线。同时在实测所得拟合曲线上可得气速在50 m/s时的进料口前段阻力约为700 Pa。同时测得风量为25180 m³/h时,主反应段阻力损失为30 Pa。实验证明在此阻力下反应器运行稳定,同时不影响锅炉燃烧。

数值模拟和实验结果所得进料口前段阻力和主反应段阻力见表1,同时计算以实验值为基准的数值模拟偏差值以及进料口前段阻力占反应器总阻力的比例。

表1 阻力比较

方法	进料口前段阻力/Pa	主反应段阻力/Pa	进料口前段占总阻力比例/%
数值模拟	580	19	97
实验结果	700	30	96
偏差率/%	1.7	36.7	—

由表1可知,数值模拟以及实验验证中进料口前段阻力占总阻力的比例均大于90%。数值模拟值比现场实测所得值偏小,以实验值为基准,数值模拟所得进料口前段阻力偏小1.7%,主反应段阻力比实际所得小11 Pa,偏差值为36.7%,分析其原因主要是由于模拟情形较为理想,而主反应段气速较小且位头损失占压差主体部分,故难以校准。但基本可以认为实验数据与数值模拟所得阻力相符,验证了灰钙循环烟气脱硫反应器模拟结果的可靠性。

3 反应器改进方案及模拟结果

为改善反应器内流场分布,考虑将循环灰进料口在原高度改为对称于烟气入口的两侧进入,具体如图5所示。

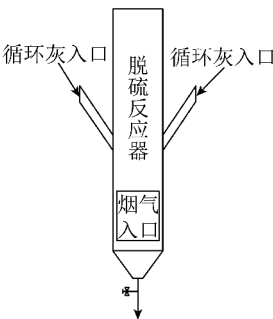


图5 灰钙循环烟气脱硫双进料反应器示意

在ICEM中相应改变几何模型、划分网格后进行数值模拟,设置粉煤灰颗粒物入口边界条件时,与单进料口反应器设置相同,在为离散相设置喷射边界条件时,各进料口均设置一股离散相,质量流量均为15 kg/s,颗粒物y及z方向速度均为8 m/s,模拟结果如图6所示。由图6a可见,速度场与单进料反应器相比变化不大,在进料口前段气速最大,为50 m/s左右,主反应段气速平均约为20 m/s。由图6b可得,在进料口附近湍流强度分布明显均匀,不存在单进料反应器内的集中且强的湍流。由图6c、图6d看出,将循环物料分为对称于烟气入口的两股入射流进入反应器,对流场分布改善明显。

4 结 论

1)灰钙循环烟气脱硫反应器的速度进料口前段气速最大,为50~60 m/s,主反应段气速平均约为20 m/s,与实测值较为符合。并且湍流强度为进料口前段较强,可见进料口前段结构对反应器内气固混合作用很大。但观察反应器内流场发现单进料口流场分布不均,偏颗粒进口侧。

2)脱硫反应器阻力计算得出,其阻力主要存在于进料口前段,阻力占反应器总阻力的比例大于90%。模拟计算所得阻力略小于实际所测值,以实验测定结果为准,则数值模拟所得进料口前段阻力偏差在7.8%,主反应段阻力差值在20 Pa以内,可以认为模拟结果真实可信。

3)为改进反应器内流场分布的不均匀性,将单进料口改为对称于烟气入口的双进料口,进行数值模拟所得湍流强度及颗粒物轨迹与单进料口反应

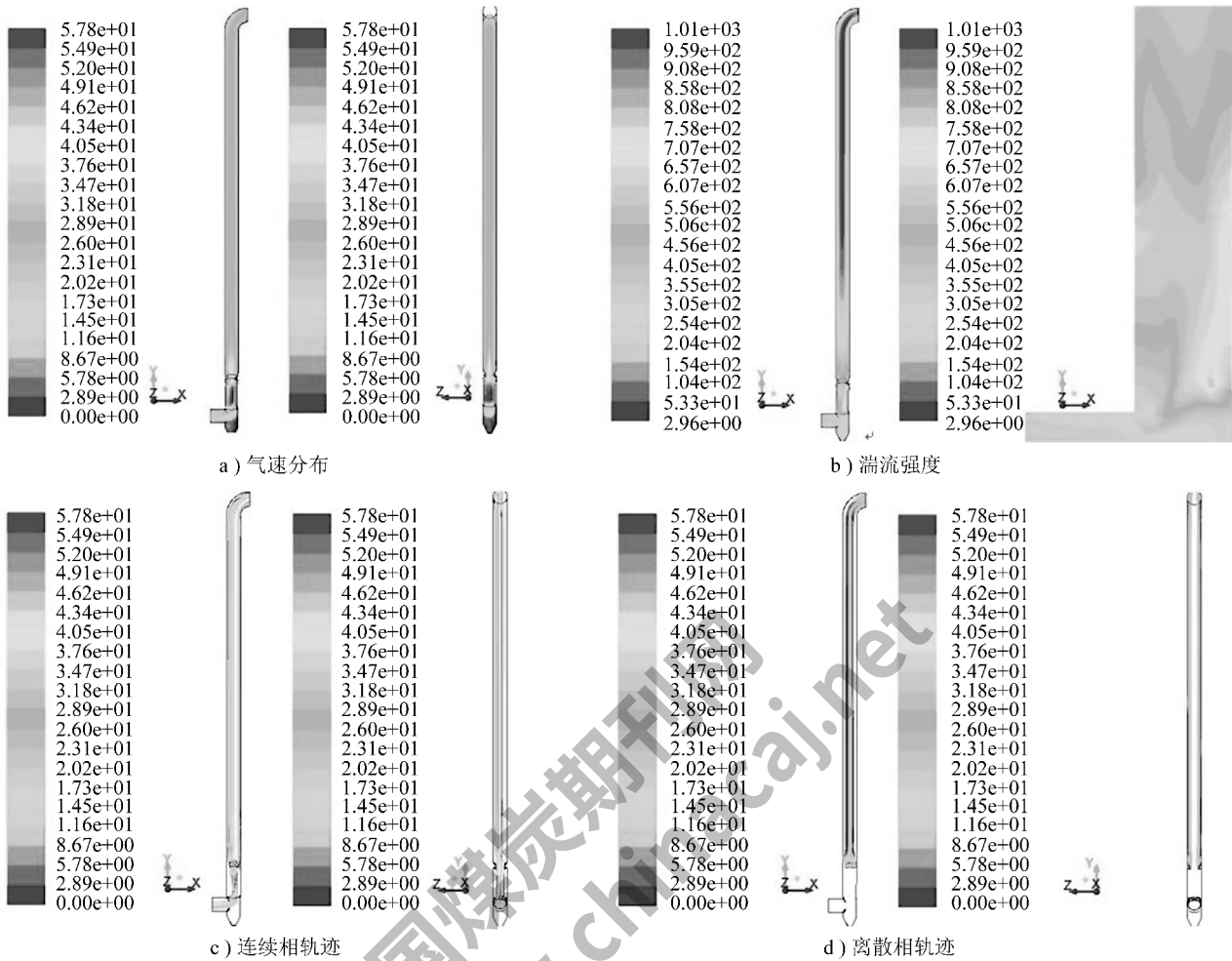


图6 双进料反应器内两相流动的流场分布

器相比单进料口反应器流场对称且均匀,且不影响速度场分布。

参考文献:

[1] 宫国卓,叶树峰,陈运法,等. 循环流化床烟气脱硫塔进口流场模拟及优化[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(1):104-108.

[2] 刘玲,卢平. CFB-FGD 文丘里管阻力损失与结构优化的数值模拟[J]. 环境科学与技术,2013,36(9):154-158.

[3] 魏星,李伟力,凡凤仙,等. 脱硫塔气固两相流场优化的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(7):12-19.

[4] 刘峰,谢安国. 循环流化床烟气脱硫反应器出口结构优化研究[J]. 冶金能源,2007,26(5):26-29.

[5] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1993.

[6] 李婷,肖翠微,张鑫,等. 粉煤灰在燃煤工业锅炉烟气脱硫中的应用[J]. 洁净煤技术,2013,19(5):81-84.

[7] 周曲兰,刘尧祥,惠世恩. 高钙粉煤灰直接应用于烟气脱硫的试验研究[J]. 动力工程,2007,27(1):117-121.

[8] 林永明,高翔,俞保云,等. 计算流体力学(CFD)在大型湿法烟气脱硫系统中的研究与应用进展[J]. 热力发电,2005,34(12):34-37.

[9] 纪兵兵,陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014:75-90.

[10] 王虎. 烟气循环流化床脱硫塔内气液固混合特性研究[D]. 保定:华北电力大学,2013:23-26.

[11] 侯士锋. 旁通式循环流化床脱硫塔两相流动及烟气脱硫特性的数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2011:33-40.

[12] 李艳平. 循环流化床脱硫反应器流动特性的实验研究与数值模拟[D]. 天津:天津大学,2005:37-45.

[13] 赵凯. 循环流化床脱硫器气固流动特性实验研究与模拟计算[D]. 天津:天津大学,2006:40-50.

[14] 林永明,高翔,施平平,等. 湿法烟气脱硫(WFGD)喷淋塔内烟气流场的数值模拟研究[J]. 热力发电,2006,35(4):20-24.

[15] 胡金榜,李艳平,陈安新,等. 循环流化床脱硫反应器入口结构对气体流动影响数值模拟[J]. 化学工程,2005,33(1):20-23.

[16] 李进龙. 循环流化床脱硫器进气装置对速度场影响实验与数值分析[D]. 天津:天津大学,2006:21-25.

[17] 谭天恩,宴梅,周明华,等. 化工原理[M]. 3版. 北京:化学工业出版社,2007:6-21.