

新型半干式旋流脱硫塔内 气固两相流的数值模拟研究

宋健斐^{1,2}, 王迪^{1,2}, 张慧敏^{1,2}, 侯智³

(1. 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249;

2. 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249;

3. 中国蓝星(集团)股份有限公司, 北京 100029)

摘要:提出了一种新型半干式旋流脱硫塔,并采用雷诺应力模型(RSM)和颗粒随机轨道模型(DPM)考察了脱硫塔内气相和气固两相流场的特征。研究表明,该装置具有实现脱硫反应、气固分离及脱硫剂循环利用三者一体的可行性,增加了烟气在反应器内的路径,有助于脱硫反应的深度进行。同时,较高的切向速度可有效防止黏壁、结垢现象发生。

关键词:半干法;旋流脱硫塔;气固两相流;RSM;DPM

中图分类号:TE991.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)02-0184-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.02.044

Simulation of gas-solid two-phase flow in a new-type semi-dry swirling flow desulfurization tower

SONG Jian-fei^{1,2}, WANG Di^{1,2}, ZHANG Hui-min^{1,2}, HOU Zhi³

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, Beijing 102249, China;

3. China National Bluestar (Group) Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: A new-type semi-dry swirling flow desulfurization tower is proposed. The gas phase and gas-solid phase flow in the tower are simulated by using Reynolds Stress Model and Discrete Phase Model, respectively, based on the commercial software Fluent 6.3. The simulated results indicate that it is feasible for the tower to realize desulfurization reaction, gas-solid separation and recycling of desulfurization agent simultaneously. The path of flue gas in the tower is increased, which is helpful to deep desulfurization reaction. Furthermore, the high tangential velocities on the near wall can prevent the fouling.

Key words: semi-dry; swirling flow desulfurization tower; gas-solid flow; RSM; DPM

二氧化硫是燃煤和化工行业排放的主要污染物之一,我国近年来高度重视其排放及治理^[1]。《国家酸雨和二氧化硫污染防治“十二五”规划》中明确规定:新建的燃煤机组都必须同步建设脱硫脱硝装置。现有的脱硫工艺大致分为湿法、干法和半干法。半干法自1981年首次在美国应用以来,被广泛认为是最具商业价值和推广前途的脱硫方法之一。半干法循环流化床烟气脱硫技术具有低耗水、性能优良、投资少等诸多优点,应用前景可观^[2-6]。现有的半干式循环流化床烟气脱硫塔多采用布风板或文丘里管来均匀分配气流^[7-10],通过外置旋风分离器进行一级气固分离并实现部分脱硫剂的循环使用,脱硫反应与除尘过程在2个设备中独立进行,该布置方式导致均匀上行的平推流气相间剪切力较小,湍流程度低,烟气和脱硫剂的反应难以强化,同时工艺设备整体占地面积大,设备尺寸高,当需要在现有设备区

域进行加装改造时往往存在一定难度。因此,本文将脱硫塔与气固分离器一体化,提出一种新型半干式旋流脱硫塔^[11],即对该新结构内部的气固两相流场进行了初步的数值模拟研究。

1 物理模型

如图1所示,新型半干式旋流脱硫塔主要由烟气切向进气口、脱硫剂入口管、内筒脱硫反应室、上部的气固分离室、环形循环灰回料通道、净化气体出口管组成。切向入口截面尺寸92 mm × 178 mm,脱硫剂入口管位于脱硫塔底部中心位置,高268 mm,坐标原点也位于该中心处,取向上为正,脱硫反应室筒体直径 $D_1 = 300$ mm,高2 200 mm,外筒体直径 $D_2 = 500$ mm,高出脱硫反应室上沿300 mm,且与脱硫反应室相通,内外筒体形成的环形空间兼顾气固分离及脱硫剂循环2项功能。

2 数值模拟

2.1 数学模型

常规脱硫塔通常采用 $k-\varepsilon$ 模型计算塔内气相流场^[12-18],但旋流脱硫塔内是三维强旋湍流场,以各向同性为假设的 $k-\varepsilon$ 模型已不适用,因此,本文中采用基于各向异性的雷诺应力模型(RSM)计算塔内气相流场,压力梯度项采用 PRESTO! 方法处理,压力与速度耦合关系采用 SIMPLEC 算法,其他各向对流项采用 QUICK 差分格式处理。

气固两相模拟中,颗粒入口浓度选取 $C_i = 30 \text{ g/m}^3$,其对应的颗粒相体积分数 $\varepsilon = C_i/\rho_p \leq 1\%$,模拟空间属稀相范畴,可忽略颗粒之间的碰撞。颗粒相的计算采用非稳态耦合求解,用颗粒随机轨道模型计算颗粒轨道时,跟踪计算颗粒沿轨道的质量和动量的变化,将这些物理量引入到随后的气相流场计算中,既考虑气体对颗粒相的作用,又考虑颗粒对气体的作用,交替求解颗粒相与气相的控制方程,直到计算结果都达到收敛标准。由于脱硫塔内湍流强度较大,需考虑颗粒在湍流气流中的扩散,对此采用随机游走模型和涡生存时间模型计算颗粒的湍流扩散效应。

2.2 边界条件

(1)入口边界条件:脱硫塔内流体设为常温常压状态下的空气,入口气速设定为 $V_i = 15 \text{ m/s}$ 。入口处湍流强度 $I = 3.69\%$ 及水力直径 $D_H = 0.1213 \text{ m}$ 。气固两相模拟中,颗粒选用 $100 \mu\text{m}$ 单一粒径 CaO 颗粒,颗粒密度为 3350 kg/m^3 ,颗粒入口处的射流采用面源,颗粒入口速度设为轴向 2 m/s ,入口浓度取 $C_i = 30 \text{ g/m}^3$,计算步长为 $2 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。

(2)出口条件:出口边界条件设置为充分发展出口(outflow),且为保证该条件成立,对旋流塔顶部气体出口管的长度进行充分加长。

(3)壁面条件:壁面采用无滑移边界条件,近壁网格采用标准壁面函数近似处理。气固两相计算中壁面设置为 reflect。

2.3 网格划分

脱硫塔全部空间采用六面体结构化网格(图1),网格节点数为 363 301 个,网格质量满足计算精度要求。

3 计算结果及分析

3.1 脱硫塔内气相流场

图2为脱硫塔内切向速度分布曲线。脱硫反应

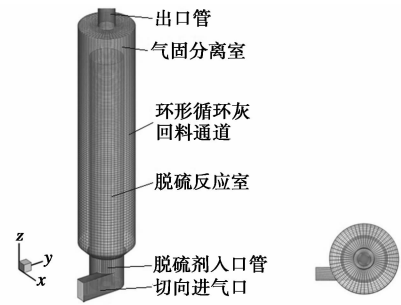


图1 新型半干式旋流脱硫塔的结构及网格划分

室内切向速度为内部准强制涡和外部准自由涡的双涡结构,呈明显的非轴对称性,切向速度峰值位于出气管直径范围内;沿轴向向上,切向速度最大轴向中心轴内移,各轴向高度切向速度分布曲线反映出脱硫反应室内涡核摆动强烈;在 $z = 2250 \text{ mm}$ 处,内部准强制涡受上方出口影响,旋转上升的气流失去脱硫反应室器壁的约束,外部准自由涡区域开始沿径向向外扩张,在气固分离室上端 $z = 2400 \text{ mm}$ 处,切向速度峰值位于 $r/R = 0.25$ 附近,而 $r/R > 0.25$ 的区域为准自由涡,且在 $r/R > 0.60$ 区域外切向速度变化较小;在内外筒形成的环形空间内(循环灰回料通道) $z = 2250 \text{ mm}$ 至 $z = 1200 \text{ mm}$ 区间,切向速度同样呈现双涡结构,近脱硫反应室外壁区域为准自由涡,近外筒壁区域为准强制涡,切向速度沿轴向向下衰减较为明显,旋转气流越接近环形空间底部切向速度沿半径方向变化越小。

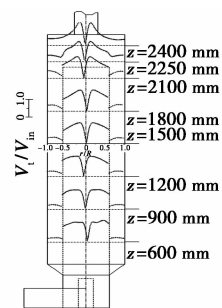


图2 时均切向速度分布曲线

图3为轴向速度分布曲线图。脱硫反应室内轴向速度同样呈非轴对称分布,边壁及中心区域为上行流,中心轴两侧小于 0.5 相对半径区域内有面积较小的下行流,轴向速度分布呈现不规则“W”型,中心上行流轴向速度峰值随轴向高度上升逐渐增大,在气体出口管下方中心区域轴向速度达到最大;在循环灰回料通道,轴向速度呈现近外筒壁区下行流,近内筒外壁区域上行流的明显特征,且上下行流面积相近,下行流轴向速度沿轴向向下而减小,上行

流轴向速度则沿轴向向上而增加。

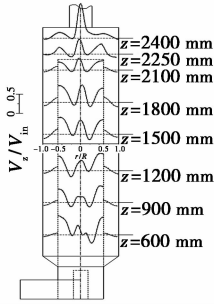


图 3 时均轴向速度分布曲线

图 4 为旋流脱硫塔内气相流线,清晰地表达了烟气在塔内的流动过程。气体由塔体底部切向进气口进入,受脱硫反应室筒壁的约束旋转而上,在到达脱硫反应室上沿时,一部分气流在气固分离室中心区域做旋转半径减小的加速旋转后由出气管直接流出,另一部分气流脱离内筒壁约束后扩大旋转半径,旋转至外筒上壁后沿外筒壁旋转向下,外旋流在进入循环灰回料通道底部锥形形段后转化成内旋流,又沿脱硫反应室外壁旋转上升后自出气管流走。气相流线说明了旋流脱硫塔实现脱硫、气固分离、脱硫剂循环三者一体的可行性,且增加了含尘烟气在脱硫塔内的运动路径,有效延长了烟气和脱硫剂颗粒的停留时间。



图 4 旋流脱硫塔内气相流线图

3.2 脱硫塔内气固两相流场

图 5 给出了颗粒在脱硫塔内的运动轨迹。颗粒自入口面源喷出后,受到的径向曳力小于离心力,被甩至壁随强旋流气体旋转而上,脱硫反应室内壁上有明显的螺旋轨迹;当颗粒抵达脱硫反应室上端,摆脱了脱硫反应室内筒壁的束缚,在离心作用下,被甩至外筒内壁并旋转而下。脱硫塔内颗粒浓度分布如图 6 所示, (a) 为脱硫剂入口管上方 $z = 270$ mm 至 $z = 300$ mm 区域颗粒浓度沿直径的分布曲线,由图可见,颗粒喷出后受脱硫反应室内强旋流气体的影响,随气体做旋转运动,并在离心力的作用下向边壁移动,该区域内沿轴向向上中心区域颗粒浓度不

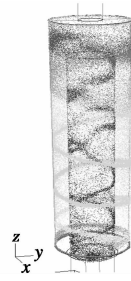
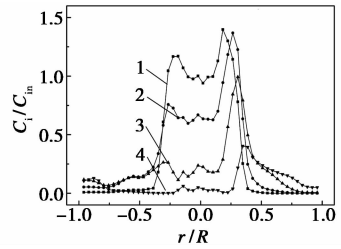
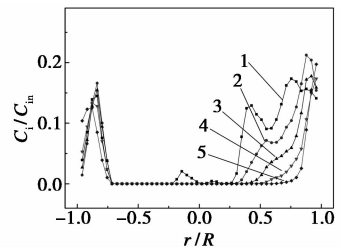


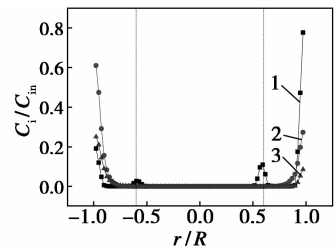
图 5 旋流脱硫塔内颗粒轨迹图



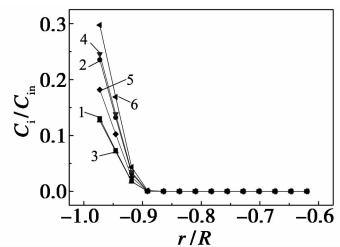
1— $z = 270$ mm; 2— $z = 280$ mm; 3— $z = 290$ mm; 4— $z = 300$ mm
(a)



1— $z = 310$ mm; 2— $z = 320$ mm; 3— $z = 330$ mm;
4— $z = 340$ mm; 5— $z = 350$ mm
(b)



1— $z = 2\ 200$ mm; 2— $z = 2\ 300$ mm; 3— $z = 2\ 400$ mm
(c)



1— $z = 600$ mm; 2— $z = 900$ mm; 3— $z = 1\ 200$ mm;
4— $z = 1\ 500$ mm; 5— $z = 1\ 800$ mm; 6— $z = 2\ 100$ mm
(d)

图 6 脱硫塔内颗粒浓度分布

断减小,边壁区域浓度不断增加,此时烟气和脱硫剂能充分接触并剧烈反应。(b)反映了在 $z=310\text{ mm}$ 至 350 mm 区间内,颗粒浓度分布仍呈现不规律性,颗粒高浓度区逐渐向器壁处移动,脱硫反应室内中心区域的颗粒浓度变化已较为平缓,但最高浓度还未出现在边壁处,在 $z=350\text{ mm}$ 处,颗粒浓度分布已基本呈现中心区域颗粒浓度趋近于0,分布较平,而边壁颗粒密集浓度较大的趋势,这说明颗粒已经在离心力的作用下发生了初步的分离,近壁区域形成了显著的颗粒浓集区。(c)为脱硫反应室上部及气固分离室截面的颗粒浓度分布,浓度分布曲线在 $r/R=0.6$ 处出现2个跃起,即颗粒到达脱硫反应室内壁上沿后,失去内壁约束而随旋转气流向外扩散,脱硫反应室流出的部分内旋流气体在此处加速旋转并由出口流出,而外旋流旋转至气固分离室顶部后反转向下,上下行气流在此混合,颗粒碰撞剧烈,有助于剪切脱硫剂内部尚未反应的新鲜剂,提高脱硫剂的使用率。(d)反映环形循环灰回料通道截面上 $z=600\text{ mm}$ 至 $2\ 100\text{ mm}$ 空间段各轴向高度颗粒浓度分布曲线图,在环形空间内,颗粒主要聚集于外筒壁区域, $|r/R|=0.6\sim 0.9$ 区域颗粒浓度分布较平,大于0.9区域外颗粒浓度较高且轨迹沿壁面呈螺旋状,环形空间兼顾气固分离及循环灰回料通道2项功能,在环形空间上部,灰带面积较宽,气固两相已产生初步的分离,且沿轴向向下外筒壁上的灰带上颗粒量增大,浓度增高,并且颗粒在环形空间下部产生聚集,分离效果明显。

4 结论

提出了一种新型半干式旋流脱硫塔,并采用雷诺应力模型(RSM)和颗粒随机轨道模型(DPM)初步探索了脱硫塔内气相和气固两相流场的特征,主要得出以下结论。

(1)脱硫反应室内气相呈内部准强制涡和外部准自由涡的双涡结构,轴向速度呈不规则“W”型;气固分离室内切向速度在 $r/R<0.6$ 区域内仍呈双涡分布, $r/R>0.6$ 处切向速度变化较小,轴向速度沿半径方向向外逐渐减小,近外筒壁区为速度较小的下行流;环形空间内也呈现内外旋流分布,且切向速度沿轴向向下衰减较为明显,轴向速度在近外筒壁区域下行,近内筒外壁区域上行。

(2)颗粒在脱硫反应室和环形空间外壁均形成明显的螺旋状灰带,颗粒浓度分布呈现中间稀边壁浓的特征,环形空间内颗粒浓集于外筒壁处,呈上稀

下浓的特征。

(3)脱硫反应室内强旋流造成的湍动流场可使烟气与脱硫剂颗粒充分混合接触,浓集于反应室内壁的颗粒及较高的切向速度增大了颗粒之间以及颗粒与壁面之间的摩擦,有效缓解黏壁及结垢现象的发生,同时颗粒间的碰撞也有助于脱去脱硫剂已反应的惰性表面,使得烟气与内部新鲜的脱硫剂继续反应以提高脱硫效率;而气固分离室及环形空间能有效将脱硫剂颗粒与洁净气体分离,并且延长了脱硫剂颗粒及烟气的停留时间,有助于脱硫反应的深度进行。

参考文献

- [1] 国家环境保护部. 2014年各省、自治区、直辖市和八家中国央企主要污染物总量减排考核结果公告[R]. 2015.
- [2] 朱廷钰. 烧结烟气净化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [3] 薛建明, 马果骏. 欧洲三种循环流化床脱硫技术及经济分析[J]. 中国环保产业, 2003, (1): 36-38.
- [4] 柳青. 半干法烟气脱硫技术研究现状及展望[J]. 广东化工, 2011, 38(9): 74-75.
- [5] 高翔, 刘海蛟, 滕斌, 等. 多级增湿对半干法烟气脱硫影响的实验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(12): 2082-2086.
- [6] 滕斌. 半干法烟气脱硫的实验及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [7] 王晓芳, 佟会玲, 李定凯, 等. 循环流化床常温半干法烟气脱硫技术的工程示范研究[J]. 动力工程, 2004, 24(3): 421-425.
- [8] 杨柳春. 内循环流化床烟气脱硫装置研究[J]. 化学工程, 2006, 34(7): 50-53.
- [9] Hartge E U, Rensler D, Werther J. Solids concentration and velocity patterns in circulating fluidized beds. Circulating Fluidized Bed Technology Proceedings of the Second International Conference [C]. 1988: 165-180.
- [10] Harris B J, Davidson F J, Xue Y. Axial and radial variation of flow in circulating fluidized bed risers[J]. Circulating Fluidized Bed Technology, 1994, 4(12): 103-110.
- [11] 宋健斐, 张慧敏, 严超宇, 等. 一种半干法循环流化床脱硫塔: CN, 201310444674. 6[P]. 2013-09-27.
- [12] 李少华. 除尘脱硫塔内气固两相流动数值模拟[J]. 东北电力学院学报, 2003, 23(2): 1-5.
- [13] 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.
- [14] 林军, 王凡, 张凡, 等. 半干半湿法烟气脱硫塔流场分析[J]. 环境科学, 2005, 18(6): 34-36.
- [15] 李伟. 多管文丘里循环流化床烟气脱硫冷态试验研究及数值模拟[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [16] 魏星. 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): 12-18.
- [17] 潘海浪. 脱硫塔内部流动优化的数值模拟[J]. 东北电力大学学报, 2007, 27(1): 49-52.
- [18] 宫国卓. 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. ■