

肖向前, 鄢曙光, 王志远, 等. 基于流场分析的脱硫塔搅拌器布置优化[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(1): 22-29. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.004

XIAO X Q, YAN S G, WANG Z Y, et al. Optimization of Desulfurization Tower Stirrer Layout Based on Flow Field Analysis [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(1): 22-29. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.004

基于流场分析的脱硫塔搅拌器布置优化

肖向前, 鄢曙光*, 王志远, 张浩然

(武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;
武汉科技大学 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要: 以某厂湿法脱硫塔中浆液搅拌器位置分布为研究对象, 采用 CFD 软件模拟脱硫塔的底部浆液循环系统, 分析搅拌器的搅拌作用及循环泵抽吸作用对流场的影响, 提出了非对称布置搅拌器和氧化风管结构的优化方案, 并对优化后的设计方案进行两相流的模拟, 分析塔底浆液的水平和垂直截面的速度和气体分布, 对比优化前后的不同高度水平面的平均速度和气含率. 模拟结果表明: 原布置方案 45° 与 135° 处的搅拌器和氧化风管出口受循环泵抽吸作用影响, 整体旋流情况较差, 不利于氧化气体的分散. 优化改进后, 搅拌器相互位置更近, 产生更强的联合助推效果形成了旋转浆液流, 提高了氧化气体的扩散能力. 优化后关键平面的液相平均速度提高了 10% 以上, 亚硫酸钙与氧化气体反应区间的气含率提升了 12%~28%.

关键词: 脱硫塔; CFD 数值模拟; 搅拌器布置; 旋转流体; 气含率

中图分类号: X701.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2025)01-0022-08

Optimization of Desulfurization Tower Stirrer Layout Based on Flow Field Analysis

XIAO Xiangqian, YAN Shuguang, WANG Zhiyuan, ZHANG Haoran

(College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

Hubei Provincial Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Taking the position distribution of the slurry agitator in a wet desulfurization tower of a certain factory as the research object, CFD software is used to simulate the bottom slurry circulation system of the desulfurization tower, and the influence of the stirring effect of the agitator and the suction effect of the circulation pump on the flow field is analyzed, and a non-linear method is proposed. It optimizes the structure of the symmetrically arranged mixer and oxidation air duct, simulates the two-phase flow of the optimized design, analyzes the velocity and gas distribution of the horizontal and vertical sections of the slurry at the bottom of the tower, and compares the average velocity and gas holdup of horizontal planes at different heights before and after optimization. The simulation results show that the agitator and oxidation air duct outlet at 45° and 135° in the original layout plan are affected by the suction action of the circulation pump, and the overall swirl situation is poor, which is not conducive to the dispersion of oxidation gas. After optimization and improvement, the agitators are located closer

收稿日期: 2023-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52204282)

* 通信作者, E-mail: yanshg68@163.com

to each other, resulting in a stronger joint boosting effect to form a rotating slurry flow, which improves the diffusion capacity of oxidizing gas. After optimization, the average velocity of the liquid phase on the key plane has increased by more than 10%, and the gas content in the reaction zone between calcium sulfite and oxidizing gas has increased by 12% to 28%.

Keywords: desulfurization tower; CFD numerical simulation; blender layout; rotating fluid; gas holdup

SO₂ 气体是造成大气污染的主要因素之一^[1].目前世界各国对 SO₂ 都有着严格的排放标准,国家生态环境部最新排放标准规定烧结烟气 SO₂ 排放限值为 50 mg/m³,因此,控制钢铁行业烧结烟气 SO₂ 排放浓度十分必要^[2].而石灰石-石膏湿法脱硫技术因具有吸收剂容易获取、脱硫效率高和脱硫副产物石膏能够回收利用等特点被大型钢铁厂广泛采用^[3].

石灰石-石膏湿法脱硫技术在运行过程中出现了许多困难,如设备结垢堵塞、腐蚀、石膏脱水困难、脱硫塔反应闭塞等问题^[4],同时,氧化气体分布不均匀,导致亚硫酸钙氧化效率不高.其中脱硫塔底部存在沉淀物将造成石膏循环困难,增加泵的抽浆阻力以及降低脱硫效率^[5].妥善处理和解决这些问题是保证烟气脱硫系统长期稳定可靠运行的关键.某厂采用石灰石-石膏湿法脱硫技术,但一直存在脱硫塔底结垢和氧化效率低的问题,当吸收塔的石膏浆液中 CaSO₄ 过饱和度 ≥ 1.4 时^[6],溶液中的 CaSO₄ 就会在吸收塔内各组件表面析出结晶形成石膏垢.搅拌器在化工、医药、食品、冶金、造纸及污水处理等过程工业中应用广泛^[7],添加搅拌器能有效地解决脱硫塔底部生成沉淀物的问题^[8],该厂通过在“脱硫塔底部循环浆液”处添加 4 个对称的搅拌器推动底部浆液运动和氧化气体扩散,但由于搅拌器以及循环泵的位置设置不当导致问题仍然存在.

目前,国内外对脱硫塔内多相流场的 CFD 模拟研究越来越多,从两相流动、反应机理、运行效果方面已有较多研究成果^[9].CHEN 等^[10]采用数值模拟方法研究了导流板对喷淋塔流场均匀性和脱硫效率的影响;LI 等^[11]对添加波纹板的小型化脱硫反应器进行模拟,结果表明新结构极大提高了两相流的混合和停留时间;林瑜等^[12]利用欧拉-拉格朗日模拟两相流吸收塔内的气液两相流动分布和烟气降温对脱硫反应的关键性影响.CFD 技术对于脱硫塔内气液两相流的模拟是完全可行的.本文尝试利用 CFD 技术探究脱硫塔底部搅拌器对浆体流场的影响,提出一种改进的搅拌器布置方案,为同类型脱硫塔的优化提供理论参考.

1 物理模型

研究对象为国内某厂石灰石-石膏湿法脱硫塔,脱硫塔高 32 m,直径为 14 m.底部浆液层液位高度 12 m,设有 4 台循环泵、3 台石膏泵以及 4 台搅拌器,每一台搅拌器附近均设置 1 个氧化风管以供氧化空气,原设计结构如图 1.

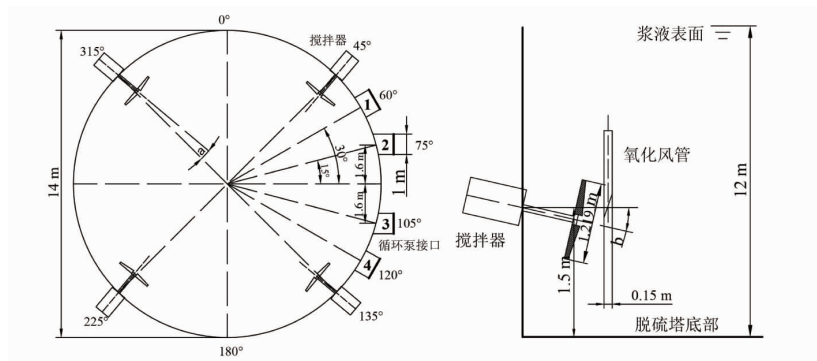


图1 脱硫塔底部结构

4 台循环泵的位置固定在 60°, 75°, 105° 和 120°, 距离塔底 1.46 m, 泵出口直径为 1.00 m, 排量 7 000 m³/h.循环泵在实际生产过程中仅开启 3 台,本文选取 1, 3, 4 号.4 台搅拌器对称布置在 45°, 135°, 225° 和 315° 位置,安装高度 1.500 m,搅拌器桨叶直径 1.219 m,其中 a, b 为搅拌器相对脱硫塔的横向偏角

与纵向偏角,均为待修改参数.氧化风管位于搅拌器前方,管径 0.15 m.石膏泵排量 $60 \text{ m}^3/\text{h}$,因流量远小于循环泵,对流场影响可以忽略,因此模型中未考虑.本模拟主要研究脱硫塔底部浆液流动,假设脱硫塔上部烟气流动和石灰水喷淋对底部浆液流场影响较小,且液面保持稳定,因此可以进行适当的简化,搅拌器-脱硫塔几何模型主要由浆液液面以下部分组成.

根据脱硫塔实际尺寸,使用 SpaceClaim 构建的几何模型如图 2 所示,该模型假设在喷淋区吸收了 SO_2 后的亚硫酸钙液滴均匀滴落在底部浆液池表面且液面保持稳定.对该模型使用 Fluent Meshing 生成网格,全部采用六面体网格,在模型边沿添加边界层,并对旋转流体区域进行局部加密处理,生成的网格数量为 378 119,随着网格数量继续增加,模拟特征数值趋于稳定,满足网格无关性验证要求.几何模型的网格平均质量均在 0.9 以上,无网格质量小于 0.2.

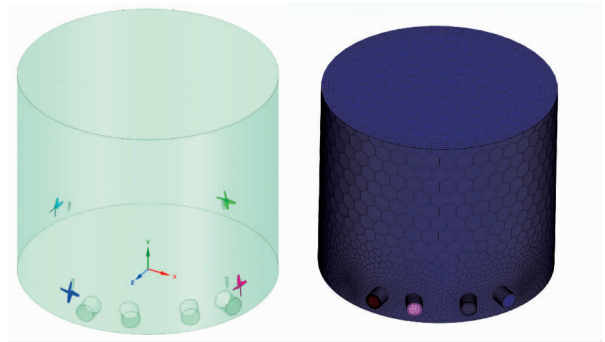


图 2 搅拌器对称布置下的脱硫塔几何模型

2 计算设置

2.1 多相流模型

单相流与两相流设置下的湍流模型均采用计算稳定、收敛速度快的标准 $k-\varepsilon$ 模型^[13],壁面函数设置为标准壁面函数(SWF);此外在两相流设置下选择湍流两相流模型为“分散的”.

两相流模型采用非均质模型下的欧拉模型^[14],可以更精确地追踪流场运动情况,定义石膏浆液为第一相,氧化空气为第二相,其气泡直径设置为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$,设置气液相间曳力模型为 GRACE 模型,并定义表面张力系数为 $0.071 \text{ N} \cdot \text{m}$.

欧拉模型的连续性方程及动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_q \rho_q) + \nabla(V_q \rho_q v_q) = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_q \rho_q v_q) + \nabla(V_q \rho_q v_q v_q) = -V_q \Delta p + \nabla \bar{\tau}_q + \sum F_{pq} + V_q \rho_q g.$$

式中: V_q 为第 q 相的体积分数; ρ_q 为第 q 相的密度; v_q 为第 q 相的速度; g 为重力加速度; F_{pq} 为相间相互作用力; p 为各项共享的相同压力; $\bar{\tau}_q$ 为第 q 相的应力-应变张量.

2.2 边界条件设置

循环泵设置为速度出口模拟标准排量的实际情况,氧化风管定义为气相入口.为保持浆液池物料平衡,顶部液面设置为压力入口,允许浆液流入以及气体逸出.搅拌器旋转应用 MRF 模型解决,4 个搅拌器均划份额外的旋转流体域,并定义其壁面为旋转壁面,在交界处设置交界面,其余面设置为壁面.边界条件相关详细参数见表 1.收敛残差为 1×10^{-3} ,操作环境为一个标准大气压,时间设置为“稳态”并打开“重力”设置 Y 轴加速度为 -9.81 m/s^2 .

表 1 边界条件参数

	参数	数值
循环泵	浆液密度/(kg/m^3)	1 150
	排量/(m^3/h)	7 000
	出口流速/(m/s)	2.5
搅拌器	功率/ kW	30
	轴向排量/(m^3/h)	12 928
	转速/(r/min)	183
氧化风管	气相密度/(kg/m^3)	1.32
	出口管径/ m	0.15
	排量/(m^3/min)	93

3 模拟结果与分析

3.1 对称布置下的流动特点

3.1.1 单相流计算

在设定横向偏角 a 为 5° 、纵向偏角 b 为 10° 的情况下,计算对称布置下的搅拌器—脱硫塔系统,可得到在不开启循环泵情况下的搅拌器的最佳布置方案,搅拌器之间间距相等最有利于旋转流体的形成.单相流对称布置下的 1.5 m 流场速度分布情况见图 3.

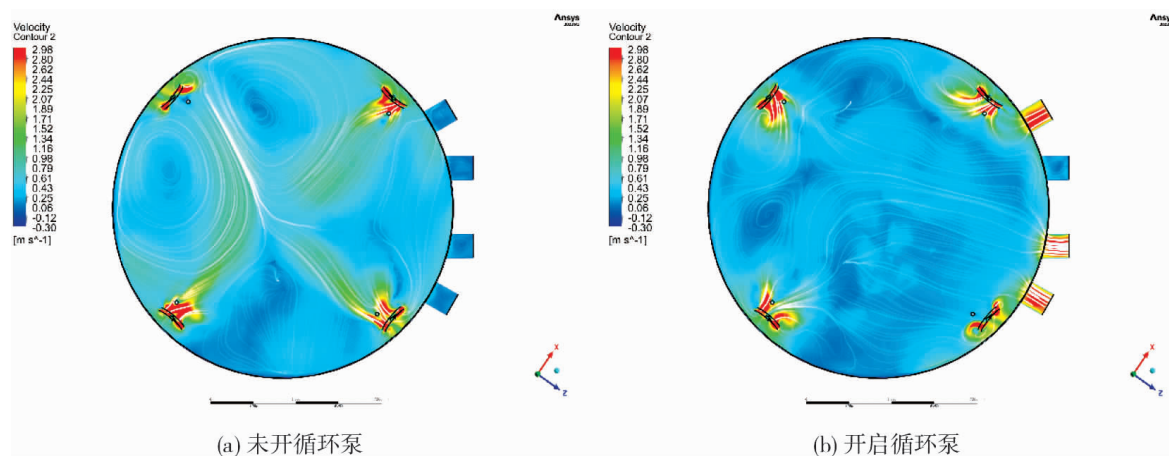


图3 对称—单相流的 1.5 m 液相速度分布

图3所示的2张图片展示了在搅拌器对称布置下的 1.5 m 特征平面速度分布情况,图3(a)所展示的是未开循环泵的速度分布情况.由图3(a)可以看出:在未开循环泵的情况下,对称分布的4个搅拌器也很难在脱硫塔底部形成较好的旋转浆液流,315°处搅拌器无法有效助推旋流的主要原因:(1)搅拌器尺寸相对于脱硫塔尺寸过小;(2)经过225°处搅拌器的助推作用,旋流的径向速度较大而切向速度较小,与315°处搅拌器相互冲突;(3)横向偏角与纵向偏角过小,对旋流影响较小.

图3(b)所展示的是开启1号、3号和4号循环泵的速度分布情况.当打开循环泵并给予它标准参数下的排量位时,浆液流的旋转情况更差,几乎呈一个方向被循环泵吸走,主要原因为循环泵距离45°处与135°处搅拌器过近,经过搅拌器作用的浆液流未经过旋转流动就被循环泵抽走,导致315°与225°处搅拌无法发挥作用,就呈现出整个浆液流被抽走的情况.

3.1.2 两相流计算

两相流设定的横向偏角 a 与纵向偏角 b 均与单相流相同,区别在于引入氧化风管喷出氧化空气,可分析在特征平面 1.5 m 下的气相分布情况.两相流对称布置 1.5 m 流场速度分布情况见图4所示.情况与单相流相同,引入气体并未对浆液流的速度分布产生较大影响.

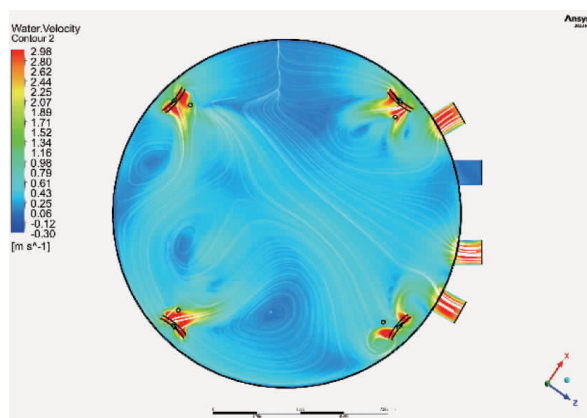


图4 对称—两相流的 1.5 m 液相速度分布

两相流对称布置 1.5 m 流场气相分布情况见图 5, 气相的分布情况呈现出: 从氧化风管开始向外扩散的情况, 搅拌器所带动的旋转浆液流未对气相分布产生较大影响; 且由于循环泵的存在, 45° 与 135° 处氧化风管的逸散情况相较于 315° 与 225° 处更差, 135° 处气体甚至直接被循环泵抽走一部分. 分析可知形成该情况的主要原因: (1) 搅拌器并未形成良好的旋转浆体流, 所以气相并未跟随液相扩散而均匀分布; (2) 搅拌器有横向偏角, 氧化风管没有, 导致用氧化风管喷出的气体初始速度方向与搅拌器助推方向不一致, 所以导致气相分布情况受搅拌器影响较小; (3) 氧化风管距离循环泵过近导致气体无法逸散.

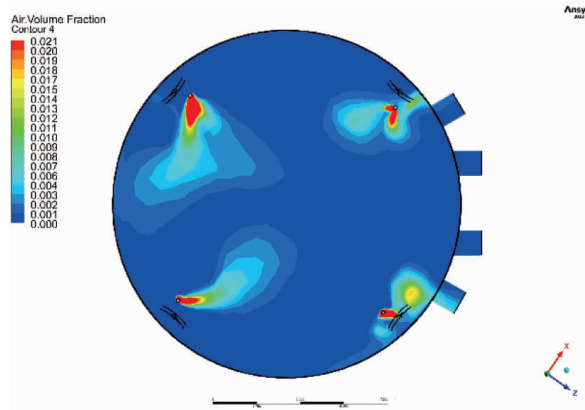


图 5 对称—两相流的 1.5 m 气相分布

3.2 搅拌器位置布置优化

通过对称情况下的云图可知: 45° 与 135° 处的搅拌器因靠近循环泵导致无法对浆液流起到较好的助推作用帮助其形成旋转流, 而且 135° 处的氧化风管也有一部分气体被循环泵抽走, 气相分布均匀程度较差, 这将会导致亚硫酸钙的氧化效果变差、循环效率降低; 除此之外搅拌器布置得不科学易造成搅拌器故障^[13]. 改进后的搅拌器非对称布置方案如图 6 所示.

- 1) 调整 4 个搅拌器相对位置, 使搅拌器至少距离循环泵有 25° ;
- 2) 调整搅拌器的横向偏角至 10° ;
- 3) 调整氧化风管出口方向, 以中心平行直径为起点, 绕自身轴线转动 10° .

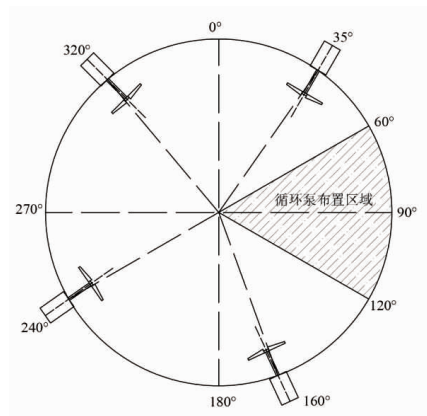


图 6 非对称布置下的搅拌器位置

3.3 优化后的流场数值计算

单相流仿真模拟仅为在两相流仿真模拟进行前初步分析流场情况^[15], 在非对称布置下则不再进行单相流的仿真模拟. 优化后的仿真模拟计算仅有模型的区别, 网格划分、前处理以及边界条件设置均与前文一致. 非对称布置下的液相速度分布图如图 7 所示. 通过调整搅拌器位置及相关参数后, 水平和垂直截面的速度分布更均匀, 除了搅拌器附近的高流速区域, 形成了多个旋转浆液流区域, 因此相对于单一对称平均设置, 非对称布置可以满足更复杂情况下的脱硫塔系统设置. 在脱硫塔内, 35° 与 320° 搅拌器处、 160°

与 240° 搅拌器处以及脱硫塔中心均形成了旋转浆液流,分析其形成原因有如下几点:

- 1) 调整后的搅拌器位置相对于循环泵较远,受其影响较小;
- 2) 靠近 160° 搅拌器处的 2 个循环泵,其抽吸作用在一定程度上会促进旋转浆液流的形成;
- 3) 240° 搅拌器与 320° 搅拌器相对于其他搅拌器的位置更近,搅拌器之间的联合助推作用更强;
- 4) 增大搅拌器横向偏角有助于旋转浆液流的形成。

非对称布置下的气含率分布图如图 8 所示.调整了氧化风管出口位置后,气相逸散的方向与图 7 所示的液相速度分布方向相同,说明搅拌器对于气相的分布起到了作用,且非对称情况下从氧化风管喷出的气体未被循环泵吸走,分布程度在横向以及纵向上均较非对称情况分散且范围广。

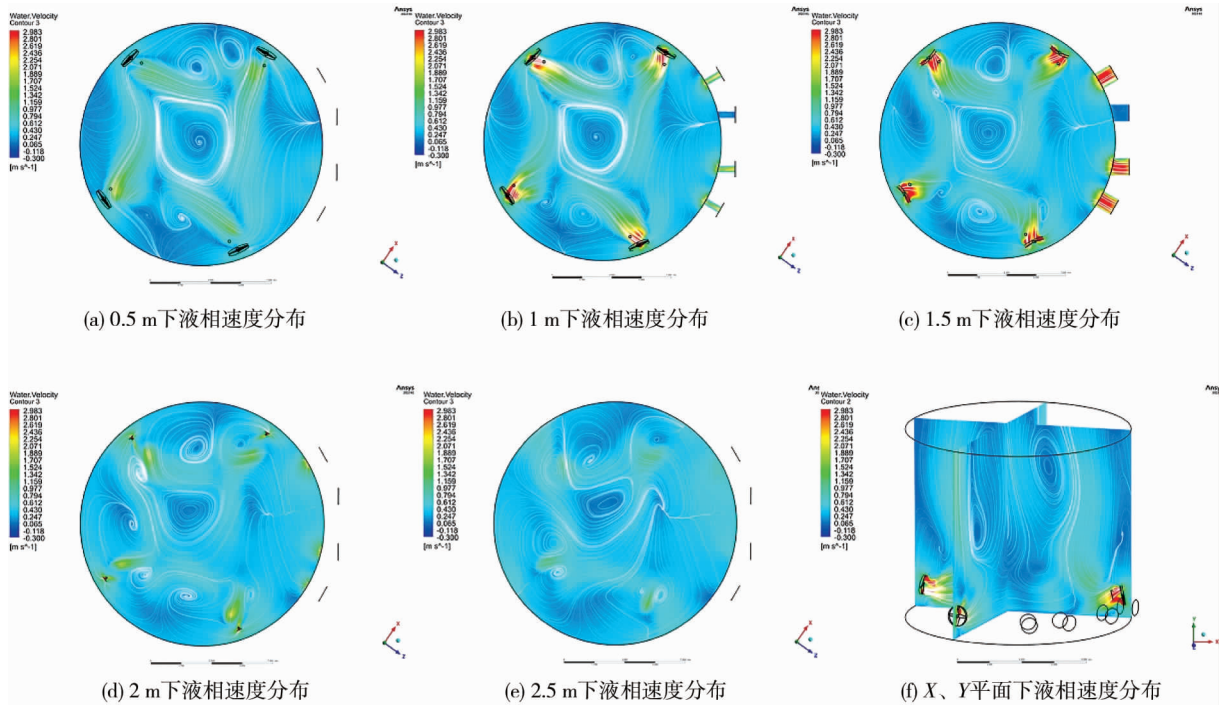


图 7 非对称—两相流的液相速度分布

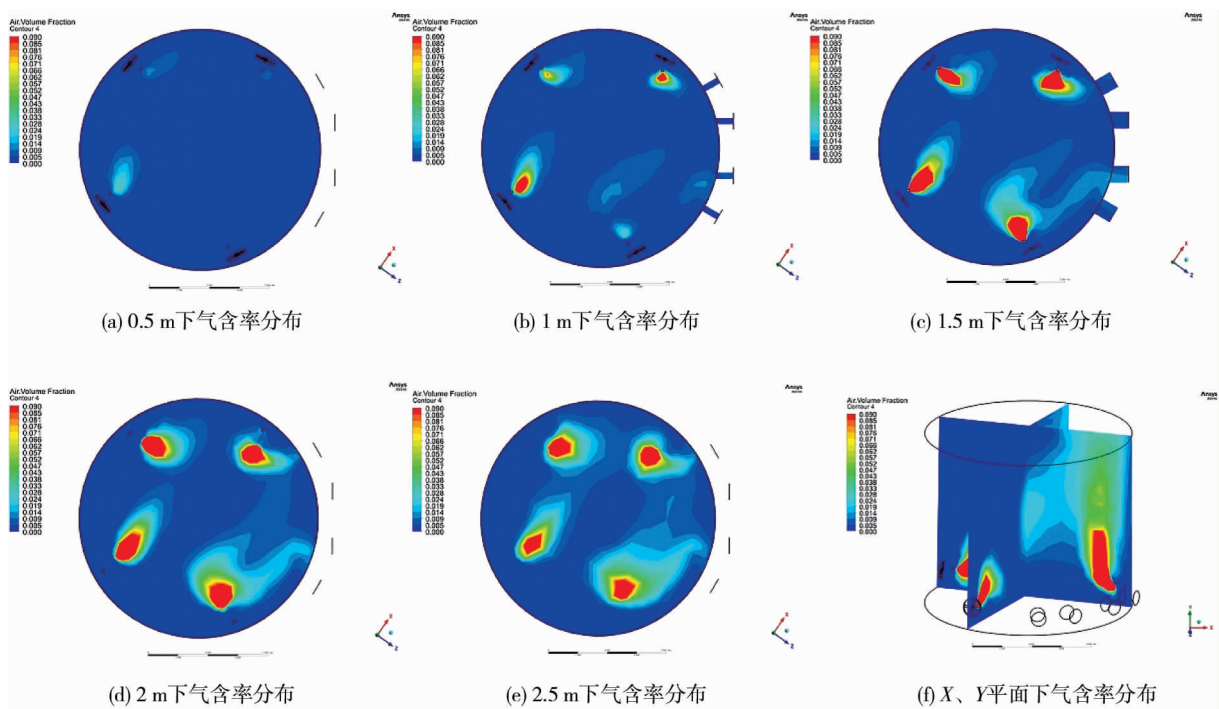


图 8 非对称—两相流的气含率分布

4 流场特性分析

4.1 不同平面液相平均速度

通过仿真模拟计算得到了在对称—单相流(关闭循环泵)、对称—单相流(开启循环泵)、对称—两相流(开启循环泵)、非对称—两相流(开启循环泵)等 4 种情况下的不同平面液相平均速度(见图 9)。由图 9 可知:在“对称—单相流(关闭循环泵)”的设置下,各平面液相平均速度均大于其他 3 种设置,这也说明在该设置下防沉底效果最好,这种情况与实际运行状况不符,但可以用作最佳对比组。而“非对称—两相流(开启循环泵)”设置下的各平面液相速度均高于“对称—两相流(开启循环泵)”,在平面高度为 1.0、1.5 m 时液相速度分别提高了 12.2% 和 10.8%,说明使搅拌器远离循环泵来增强搅拌器助推作用的调整方案是可行的。同时,4 台搅拌器互相协同带动浆液层产生了更强的整体旋流效果,速度分布更均匀,在可能产生石膏沉淀的 0~1.5 m,使石膏结垢的流场死区范围减小,石膏垢将更容易被带入流场中,随石膏泵抽出。进一步分析数据可知:

1) 4 种设置下的 1 m 平面液相速度均高于 1.5 m 平面液相速度,这是由于搅拌器的纵向偏角所造成的;

2) 相对于“对称—单相流(关闭循环泵)”的设置,平面高度越低,其他设置下的液相速度与其差值就越小,这是由于越靠近底面,速度梯度越大^[16],剪切应力越大导致搅拌器的作用就越小,所以不同设置下的速度差就越小;

3) 在平面高度 2 m 以上,其他设置相对于“对称—单相流(关闭循环泵)”设置的液相速度差就越大,但是石膏防沉底与 2 m 以上的液相速度相关性不强,所以影响甚微。

4.2 不同平面气含率

在两相流对称与非对称设置下的不同平面气含率见图 10。在 0.5 m 和 1.0 m 平面高度下,对称设置下的气含率均高于非对称设置下的气含率,但在 1.5 m 平面高度之后均是非对称设置下的气含率高,且提升了 12%~28%,分析其原因可知:非对称设置的平面液相速度较大,导致气相经氧化风管喷出之后易被搅动起来,不仅在平面上分布均匀,而且向上逸散的强度也更大。通过相关文献可知:亚硫酸钙与氧化气体的反应区间在循环泵出口平面之上^[17],验证了本次仿真模拟 1.5 m 高度以上的气含率是更有效的,调整后的搅拌器非对称布置提高了亚硫酸钙与氧化气体的接触概率,能提高脱硫塔的整体脱硫效率。

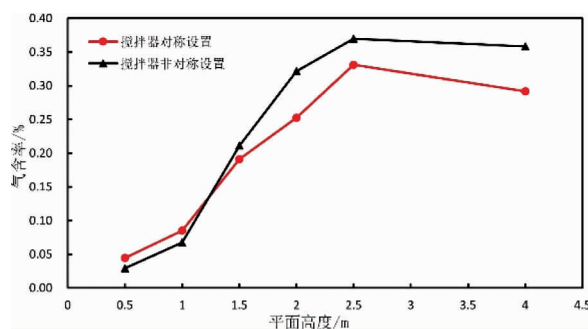


图 10 不同平面气含率曲线

5 结论

1) 原布置方案 45° 与 135° 处的搅拌器和氧化风管出口受循环泵抽吸作用影响,导致无法对浆液流起到助推和帮助气体在浆液中扩散的作用,影响氧化效率。

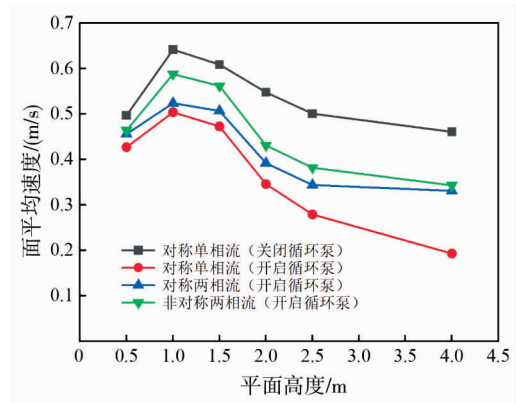


图 9 不同平面液相平均速度

2)改进后非对称布置的搅拌器相互位置更近,产生更强的联合助推效果,抽吸作用在一定程度上促进旋转浆液流的形成,整体浆液流动有助于氧化气体的分散。

3)改进方案在各平面的液相速度均增加,且在关键平面的速度提高了10%以上,石膏垢形成的可能性降低,亚硫酸钙与氧化气体反应区间的气含率提升了12%~28%。

参考文献:

- [1] LI X K, HAN J R, LIU Y, et al. Summary of research progress on industrial flue gas desulfurization technology[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 281: 119849.
- [2] 吕建燚, 李定凯. 可吸入颗粒物研究现状及发展综述[J]. 环境保护科学, 2005, 31(2): 5-8.
- [3] 余昭, 何育东, 李兴华, 等. 石灰石-石膏法串联脱硫塔系统[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 91-95.
- [4] 夏桂芳. 石灰石石膏法锅炉烟气脱硫技术常见问题分析[J]. 能源与环境, 2017(4): 87-88.
- [5] 李妮妮, 郑鹏辉, 皇甫瑞丽. 石灰-石膏湿法烟气脱硫塔体结垢的原因及装置的技术改造[J]. 科技创新与应用, 2014, 4(30): 124.
- [6] 殷红. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫的影响因素[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2006, 11(3): 20-23.
- [7] 黎义斌, 梁开一, 李正贵. 基于流固耦合的斜轴式搅拌器水力性能数值分析[J]. 过程工程学报, 2020, 20(12): 1424-1431.
- [8] 张高科, 陈克政, 赵光辉. 石灰石-石膏湿法脱硫系统在水泥生产中的应用[J]. 水泥技术, 2023(1): 68-73.
- [9] 聂鹏飞, 高志, 孟德润, 等. CFD数值模拟在两级串塔脱硫系统中的应用[J]. 环境工程, 2021, 39(8): 119-124.
- [10] CHEN Z, WANG H M, ZHUO J K, et al. Experimental and numerical study on effects of deflectors on flow field distribution and desulfurization efficiency in spray towers[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 162: 1-12.
- [11] LI G, GUO P Y, ZHANG H, et al. Numerical investigation on flow characteristics in a novel desulfurization reactor with structure optimization[J]. Powder Technology, 2022, 409: 117830.
- [12] 林瑜, 陈德珍. 大型脱硫塔喷淋段气液两相流动与传热的数值仿真及验证[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(1): 1-8.
- [13] LIU J, TOMASSONE M S, KUANG X Y, et al. Operation parameters and design optimization based on CFD simulations on a novel spray dispersion desulfurization tower[J]. Fuel Processing Technology, 2020, 209: 106514.
- [14] TSENG C C, LI C J. Eulerian-Eulerian numerical simulation for a flue gas desulfurization tower with perforated sieve trays[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 116: 329-345.
- [15] 朱苗勇, 娄文涛, 王卫领. 炼钢与连铸过程数值模拟研究进展[J]. 金属学报, 2018, 54(2): 131-150.
- [16] 毛枚良, 闵耀兵, 王新光, 等. 可压缩湍流边界层壁面函数方法综述[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(2): 1-11.
- [17] 马双忱, 周权, 曹建宗, 等. 湿法脱硫系统动态过程建模与仿真[J]. 化工学报, 2020, 71(8): 3741-3751.