

鄢曙光,蒋璨.塔环对湿法脱硫塔内流场影响的数值模拟[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(2):110-116. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.016

YAN S G, JIANG C. Numerical Simulation of the Influence of Tower Ring on the Flow Field in Wet Desulfurization Tower[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,37(2): 110-116. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.016

# 塔环对湿法脱硫塔内流场影响的数值模拟

鄢曙光\*,蒋璨

(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:**以武钢烧结分厂大型湿法脱硫塔为研究对象建立简化模型,应用 Fluent 软件模拟增设塔环几何构件对塔内流场的影响.将原塔的模拟结果与现场记录数据进行对比,发现模型的相关性较好,证实了其可靠性.安装塔环后,塔内壁流现象得以削弱,气流出喷淋区后分布的均匀性得到了提升,监测面的面积加权平均温度降低.对塔环的安装高度进行进一步优化研究,发现塔环距离喷淋层越近,抑制壁流的效果越明显,但太近也会削弱其对气相的整流作用,结果表明:模型塔环的最优高度为距离最低位喷淋层 1.5 m 处,监测面的速度相对标准偏差为 8.445%,较原塔降低了 7.686%;监测面的面积加权平均温度较原塔降低了 2.528 K.

**关键词:**数值模拟;脱硫塔;塔环;流场均匀性;温度场

**中图分类号:**TD926 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)02-0110-07

## Numerical Simulation of the Influence of Tower Ring on the Flow Field in Wet Desulfurization Tower

YAN Shuguang, JIANG Can

(College of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;  
Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources,  
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** To establish a simplified model with the large-scale wet desulfurization tower of WISCO Sintering Plant as the research object, using Fluent software to simulate the influence of adding tower ring geometrical components on the flow field in tower. First, comparing the simulation results of the original tower with the recorded data on site, the correlation was found that it was pretty good, the reliability of the simulation model was confirmed. Then, comparing the CFD results after installing the tower ring simplified model with the flow field of the original tower, the wall flow phenomenon in the tower was weakened and the uniformity of the air flow out of the spray area has been improved. Monitoring surface area's weighted average temperature decrease. In addition, further studying the optimization of tower ring installation height, it found that the closer the tower ring was to the spray layer, the more obvious the effect of suppressing wall flow, but too close will also weaken its rectification effect on the gas phase. The results show that the optimal height of the model tower ring is 1.5 meter away from

收稿日期:2021-05-06

基金项目:武汉科技大学大学生科技创新计划资助项目(18ZRA214)

\*通信作者,E-mail:yanshg68@163.com

the lowest spray layer, the relative standard deviation of the monitoring surface speed is 8.445%, which is 7.686% lower than the original tower; the weighted average temperature of the monitoring surface area is 2.528 K lower than before optimization.

**Keywords:** numerical simulation; desulfurization tower; tower ring; flow field uniformity; temperature field

“十三五”以来,国家有关部门采取了一系列举措推动钢铁行业全流程超低排放<sup>[1]</sup>.如何对钢铁企业已有的烟气脱硫技术进行优化,确保各项指标均达到环保的标准,实现资源回收利用,降低生产操作及投资设备费用具有十分重要的意义.

脱硫塔作为钢铁烧结工序的重要后处理设备,其脱硫效益的提高具有非常大的前景<sup>[2]</sup>.运行时期,塔内的烟气会出现附壁现象,即烟气沿塔壁流动的增加,导致气液接触的有效传质面积减少,液气交界面处的传质效率很低.以武钢烧结分厂的石灰石-石膏湿法脱硫塔为例,由于该湿法脱硫工艺以石灰石作为吸收剂,以石膏为脱硫产物,塔中吸收区的雾滴易发生凝聚而使烟气壁流较严重,工作站记录此时的脱硫效率最低为 81.29%,小于正常标准的 90%.因此,在优化脱硫塔如避免塔壁处气流“短路”等现象上还需进行更深入的研究.近年来,脱硫塔的外形尺寸持续快速增大,设计直径也在成倍增加,在需要了解塔内实际流场情况的时候,按比例缩小模型的实验模式费时费力且往往不能获得精确的结果.

随着计算流体力学技术的发展,工业方面的仿真应用越来越成熟,也解决了上述难题. Dudek 等<sup>[3]</sup>最早利用 CFX 计算平台考察了浆液在不同喷射速度下的浆液体积分数分布与烟气的速度分布,计算结果与实测数据吻合较好; Brown 等<sup>[4]</sup>通过对脱硫塔喷嘴设计的改进,有效地减少了吸收剂物料量; Kallinikos 等<sup>[5]</sup>模拟湿法脱硫系统的动力学模型,发现系统的脱硫性能受到浆液粒径的显著影响;马科伟等<sup>[6]</sup>、杨景香等<sup>[7]</sup>采用 CFD 进行增加托盘后的脱硫塔数值模拟,结果均表明有筛板式托盘的脱硫塔内气液接触更充分,对比实验数据的相关性较好,说明基于计算流体力学的脱硫塔优化设计是可行的;张丽珍<sup>[8]</sup>通过在小型脱硫塔实验设备中增设液体再分布环等改进装置,脱硫效率得到显著提升,但研究并未对环的高度效益等条件进行进一步分析,且模型塔径较小,难以将结论直接应用到实际的大型脱硫塔中.基于以上研究现状,笔者尝试应用 Fluent 软件探究安装塔环对钢企类大型脱硫塔内流场的影响,并找到安装塔环的适宜高度,以此达到优化脱硫塔运行过程的目的,为大型脱硫塔的优化设计提供借鉴.

## 1 模拟过程的建立

根据湿法脱硫塔的流体特性,可将脱硫塔分为烟气入口区、喷淋区和除雾区 3 个特定区域<sup>[9]</sup>,各区域无一例外表现为两相流的特性.脱硫塔内的流动过程:烧结烟气通过入口烟道进入脱硫吸附塔,然后向上进入喷淋层,在与浆液的对流接触过程中,发生吸收反应传热与传质,去除烟气中的  $\text{SO}_2$ ;随后在除雾区进行气水分离,捕集被烟气附带的细小液滴;最后通过吸收塔顶部的烟囱口排放到大气中,吸收  $\text{SO}_2$  之后的浆液滴则落入浆液池中进一步反应.

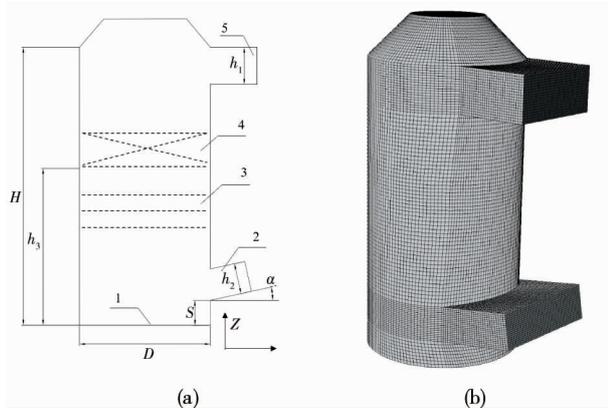
### 1.1 模拟对象

脱硫塔模型参照武钢烧结分厂石灰石-石膏法脱硫塔,塔体结构按实际尺寸适当简化后,运用 Pro/E5.0 软件创建,脱硫塔模型如图 1 所示.图 1 中脱硫塔的总高度  $H=26\text{ m}$ ,出口烟道高度  $h_1=4\text{ m}$ ,宽  $9\text{ m}$ ;入口烟道高度  $h_2=3.2\text{ m}$ ,宽  $10\text{ m}$ ,入口角  $\alpha=12^\circ$ ;除雾区设置高度  $h_3=15\text{ m}$ ,烟气出口直径  $D=14\text{ m}$ .分别在塔高  $Z$  为 9, 11, 13 m 处设置面喷射源,液滴粒径为中位数  $R=0.002\text{ m}$  的 Rosin-Rammler 分布.图 1b 为结构网格划分图.本文主要研究塔内喷淋浆液与烟气间的相互作用,故忽略喷淋管道等其他组件对烟气流场的影响,并假设:(1)将烟气看作不可压缩的牛顿流体;(2)液滴遵循球形颗粒物性,不考虑传热过程中液滴的雾化蒸发;(3)暂不考虑烟气与液滴之间的传质.

### 1.2 边界条件

张悦等<sup>[10]</sup>、Guanwen Zhou 等<sup>[11]</sup>的模拟结果表明: RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型分析具有强弯曲度面的脱硫塔内

的流动情况可以得到较满意的计算结果,所获得的流场参数与实验结果较为接近.因此,选择修正后的 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型进行模拟,烟气出入口设为速度入口和压力出口,浆液面设为壁面条件,颗粒与浆液面接触视为逃逸,到达其他壁面则认为颗粒被捕捉.表1为气液相参数设置,数据来源参照文献[12]中同为石灰石-石膏法脱硫的两相材料设置.



1.浆液面;2.烟气入口;3.喷淋层;4.除雾层;5.烟气出口

图1 脱硫塔模型

表1 气液相参数设置

相	参数	数值
气相	烟气导热率/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$3.45 \times 10^{-2}$
	烟气密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.129
	烟气动力黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	$2.28 \times 10^{-5}$
	烟气温度/K	395
液相	浆液导热率/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.64
	浆液密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 142
	浆液动力黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	$4.39 \times 10^{-3}$
	浆液温度/K	323
	喷嘴喷出速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	6

由于脱硫塔中液滴所占的体积比例很小( $<10\%$ ),可以应用连续气流中离散相颗粒(液滴)运动模型对喷淋塔中不同粒径喷雾液滴的颗粒运动轨迹进行预测计算.连续介质中离散相的轨迹计算基于对颗粒力平衡方程的积分求解.在  $X$  坐标轴方向,气流中颗粒的力平衡方程为<sup>[13]</sup>

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$$

式中:  $u_p$  为颗粒速度,  $\text{m/s}$ ;  $F_D$  为单位质量颗粒所受到的气流阻力系数,  $F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \cdot \frac{C_D Re}{24}$  (其中  $\mu$  为气体动力黏度,  $\text{Pa/s}$ ;  $D_p$  为颗粒直径,  $\text{m}$ ;  $Re$  为相对雷诺数);  $u$  为气流速度,  $\text{m/s}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $\rho_p$  为颗粒密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho$  为气体密度,  $\text{kg/m}^3$ .

### 1.3 评判标准

模拟温度场能代表塔内  $\text{SO}_2$  的吸收情况<sup>[14]</sup>,另外,也有研究采用速度标准偏差  $\sigma$ 、速度相对标准偏差  $C_v$  对吸收塔内部的气流分布均匀性进行评价,进而对脱硫效率的高低进行评判<sup>[15]</sup>,并证实气流分配不均匀确实是影响脱硫效率的一个主要因素.以截面内的速度相对标准差  $C_v$  为例,以表征数据离散程度的标准差为基础来进行指标计算,计算公式为

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{v}} \times 100\%;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{(n-1)}}.$$

式中:  $\sigma$  为截面上的速度标准偏差;  $\bar{v}$  为截面上的平均流速;  $v_i$  为截面上各节点的流速;  $n$  为测试截面上的节点总数.

在 CFD 模拟中,截面的  $\sigma$  与  $\bar{v}$  可直接通过后处理获得,  $C_v$  是一个无量纲值,可通过  $C_v$  值来评价截面上流场的均匀性,  $C_v$  值越小,流场的均匀性越好.

## 2 流场特性验证

武钢烧结分厂脱硫系统喷淋塔稳定工作时,在监测站现场观察并记录塔内 8.2 m 高度轴中心(测点

1)的温度和距离出口高度 1.5 m 处近壁面(测点 2)的速度.每隔 15 min 记录一次,一共记录 120 min.记录数据如表 2.

表 2 脱硫塔监测记录结果

时间/min	测点 1 温度/K	测点 2 速度/(m/s)
15	338.57	2.14
30	337.14	1.84
45	337.48	2.05
60	329.47	1.97
75	338.75	1.78
90	335.68	1.99
105	334.57	2.09
120	327.36	1.89
平均值	332.54	1.88

图 2 为采用现场工况设置值的模拟结果曲线.图 2 中可取对应测量点的对比值,实验和测量结果的对比见表 3.由表 3 可知:2 个测量点的模拟结果与测量结果的相对误差均不超过 5%,因此,认为模拟结果可靠.该结论可为后面的流场改善设计提供可行性依据.

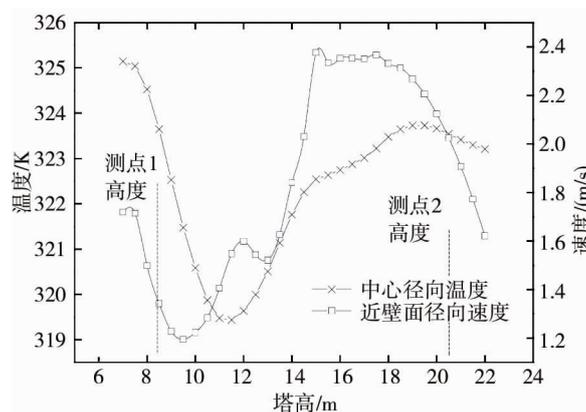


图 2 模拟结果曲线

表 3 实验与测量结果对比

数据结果	测点 1 温度	测点 2 速度
平均测量值	335.54 K	1.97 m/s
模拟结果	323.90 K	1.88 m/s
误差	3.47%	4.57%

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 塔环几何构件对流场的影响

流动流场模拟表明:在顺流区塔壁增加塔环构件可以增强气流对浆液的扰动,延长停留时间,有利于提高脱硫效率,但塔环下沿容易发生固体物的沉积,因此,塔环不宜过大.塔环安装方式如图 3 所示,在距离最低位喷淋层  $d=1$  m 处安装塔环,运行后与原脱硫塔流场进行对比.

图 4 为加装塔环前后,塔内截面  $Z=14$  m(高于最高喷淋层 1 m)处的气相速度云图.由图 4 可知:原塔中靠近塔环中心处的气流分布很不均匀,低速区域较多且面积较大,部分区

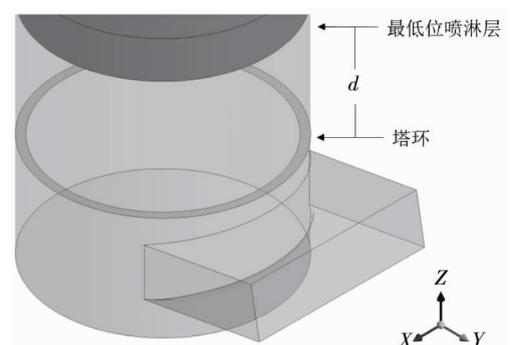


图 3 塔环安装

域的速度仅为 2 m/s,由于喷淋区浆液的阻力作用使近壁面处运动的烟气量较多,附壁运移的气速较大,最高速度约为 9 m/s.图 4b 加装塔环后,近壁面气流速度减小,较之前有明显改善,塔环截面靠近内壁的地方,气流强烈上升的区域明显减少,低流速区的减少使得整体流速较平均,约为 3 m/s,说明塔环有效地抑制了壁流,气流短路现象得以削弱,气流流出喷淋区后分布的均匀性也得到了提升.图 5 为加装塔环前后塔内截面  $Z=14$  m 处的温度云图.由图 5 可以看出:布置塔环后,气液间的传质传热顺利,流出吸收段的烟气温度的基本为 323 K,贴近浆液温度,说明气液两相间进行的热传递较好,而原塔由于壁流现象严重,气液间的反应不充分,使得入口烟道侧浓度过高的烟气未完全接触喷淋液进行热量交换,部分区域的温度较高.

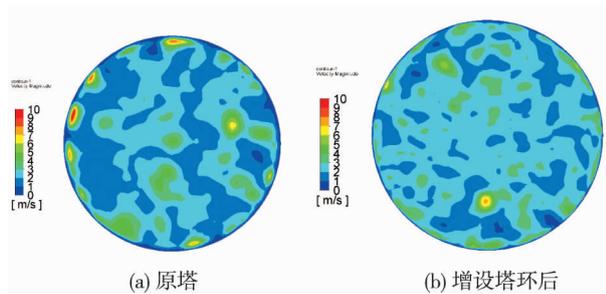


图 4 塔内截面  $Z=14$  m 处的气相速度云图(单位:m/s)

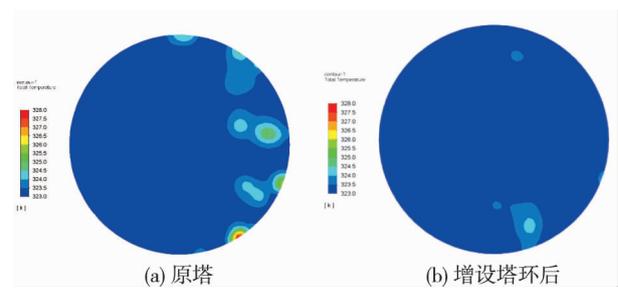


图 5 塔内截面  $Z=14$  m 处的温度云图(单位:K)

图 6 为加装塔环前后的吸收段轴线静压分布.由图 6 可以看出:一方面,由于塔环的阻碍作用,导致该层区域内的层静压急剧增大;另一方面,由于塔环具有一定的整流作用,使得流场分布更为均匀,导致喷淋层区域内的压降有所减小.因此,在进行塔环的参数设计时,应该综合考虑这两个方面的影响,需要针对不同的塔型,设计出最佳的塔环安装位置.

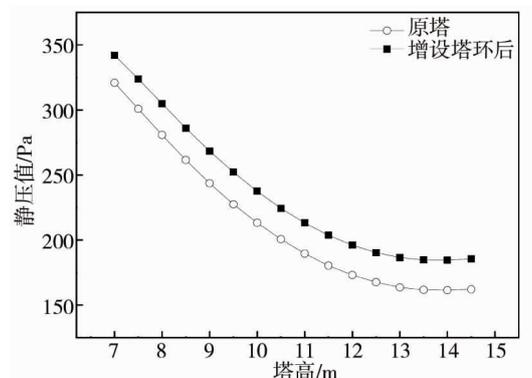


图 6 塔内吸收段轴线静压分布

### 3.2 寻找合适工况

对不同安装高度的塔环,即与最低位喷淋层的距离  $d$  为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m 时的塔内流场情况进行模拟,对如何选取合适的参数设计塔环进行讨论分析.

图 7 为塔环在不同高度工况下,塔中心纵截面的速度云图.由图 7 可以看出:原塔中的喷淋段烟气流速较高,说明烟气在塔内吸收过程中的停留时间较短,气液间的传热传质不充分;而增设塔环后该情况则明显得到改善,吸收段的气速大大降低,高气速区域被限制在入口段一层,同时近出口塔壁的高气速带的面积减小,表明气液两相间相互作用的时间增加,改善了作用效果,间接提升了脱硫性能.但塔环的安装高度不是越高越好,安装塔环后,入口对侧壁面增加了一个高气速区,这是由于部分气流在喷淋液滴的曳力作用下,沿浆液面运移到对侧后向上附壁运动,受到塔环结构的阻挡等多重影响形成一个回路,高气速区的面积随着塔环安装高度的增加先增大后减小,在  $d=1.5$  m 时高气速区的面积最大,喷淋段的气速最低,继续升高塔环的位置后,高气速区的面积减小,同时吸收区的烟气流速增大,均匀性降低,说明此时塔环的整流作用降低.

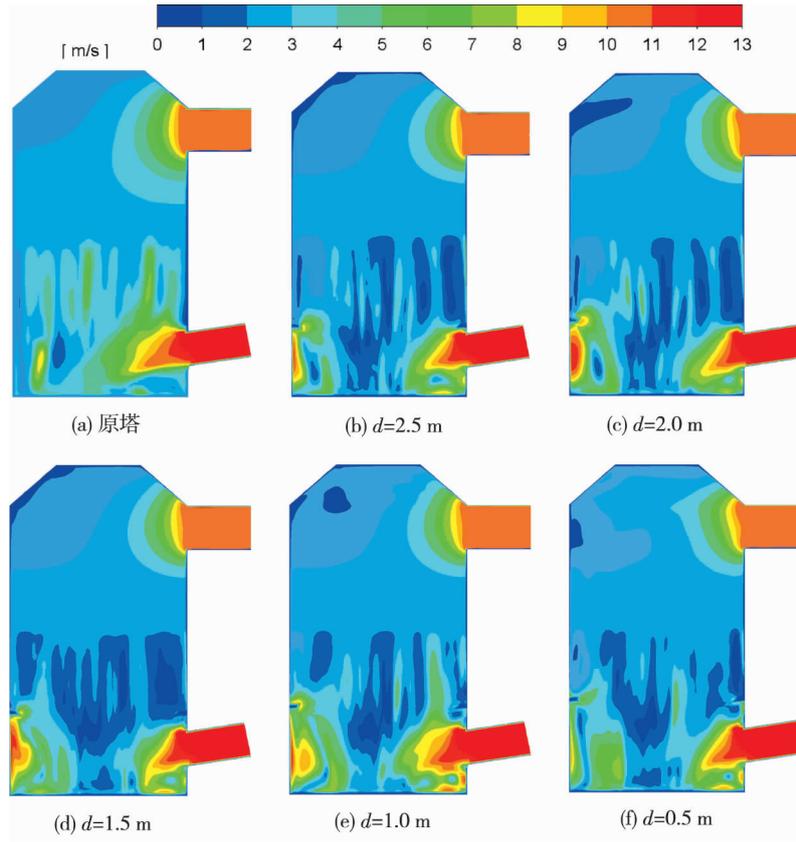


图 7 塔中心纵截面的速度云图(单位:m/s)

图 8 为 5 种工况下塔环吸收区截面的速度相对标准偏差.由图 8 可以看出:当塔环与最低位喷淋层的距离  $d \geq 1.5$  m 时,从烟气入口段到最高喷淋层段的流场速度相对偏差值  $C_v$  较稳定,维持在 17.6% 左右;各工况下  $C_v$  折线在塔环安装高度出现转折点,说明烟气流经塔环后,截面的  $C_v$  值降低,气流均匀性得到显著增加,显然所耗压降也会减小;塔环的安装位置距离最低位喷淋层越远,整流效果越明显,但  $d > 1.5$  m 时,气流经过喷淋层段时的速度相对偏差值有所波动,说明塔环离喷淋层更远也会使得烟气在流出烟道后的活动范围缩小,与浆液的接触面积降低,从而降低脱硫效果<sup>[16]</sup>;加装塔环后,喷淋区总的气流均匀性较好,各截面的  $C_v$  值降低到 20% 附近.

表 4 为塔环与最低位喷淋层的距离  $d$  与脱硫塔出入口压降  $\Delta P$  和附壁颗粒数的关系.由表 4 可以看出:由于喷淋层的设置和塔体的基本结构未发生变化,脱硫塔运行的压降差别较小,而壁面捕捉浆液颗粒数随着  $d$  的增大而增加,表明塔环距喷淋层越近,壁流现象相对减少,浆液利用率越高,能有效地降低液气比.综合流场的均匀性提升和相关的经济指标,预测塔环的最佳布置位置为  $d = 1.5$  m,即距离最低喷淋层 1.5 m 处.

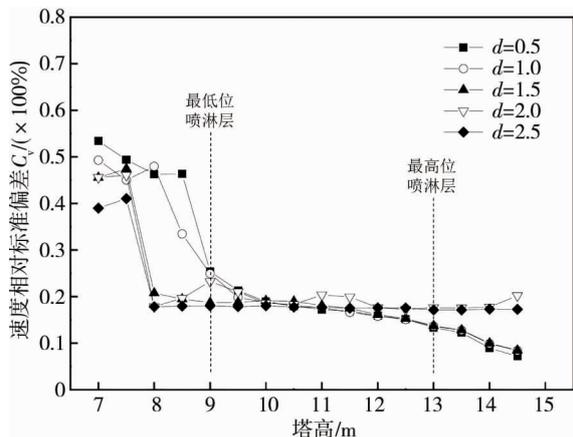


图 8 吸收段截面速度相对标准偏差

表 4 塔环不同安装位置与压降和壁面捕捉颗粒的关系

$d/m$	进出口压降 $\Delta P/Pa$	壁面捕捉颗粒数
0.5	538.72	2 567
1.0	549.59	2 648
1.5	534.17	2 850
2.0	554.71	2 991
2.5	549.18	3 252

### 3.3 验证预测结果

图9为不同工况时,塔纵截面 $Z=14\text{ m}$ 的速度标准偏差与面积加权平均温度的变化.由图9可以看出:塔环距离最低位喷淋层 $1.5\text{ m}$ 时的面积加权平均温度最低,与速度相对标准偏差 $C_v$ 随 $d$ 变化的趋势相同,验证了预测的正确性.其速度相对标准偏差为 $8.445\%$ ,监测面面积加权平均温度为 $322.83\text{ K}$ ,较原塔均有所降低.

## 4 结论

1) 增加塔环可使塔内中心区的脱硫效果得到明显改善,同时也能提高浆液的利用率,减少浆液壁流现象.

2) 塔环的安装高度对抑制壁流效果有一定影响,塔环与最低位喷淋层间的距离越近越能减少壁流雾滴,但太近也会减弱其整流作用.当塔环距离最低位喷淋层 $1.5\text{ m}$ 时,监测面的速度相对标准偏差为 $8.445\%$ ,较原塔降低了 $7.686\%$ ;监测面面积加权平均温度为 $322.83\text{ K}$ ,较原塔降低了 $2.528\text{ K}$ .

### 参考文献:

- [1] 生态环境部,国家发展和改革委员会,工业和信息化部,等.关于推进实施钢铁行业超低排放的意见[EB/OL].(2019-03-20)[2019-04-28].<http://www.mee.gov.cn>.
- [2] 杨光,张淑会,杨艳双.烧结烟气中气态污染物的减排技术现状及展望[J].矿产综合利用,2021(1):45-56.
- [3] Dudek S A, Rogers J A, Gohare W E. Computational fluid dynamics(CFD) model for predicting two-phase flow in flue-gas-desulfurization wet scrubber[C]//Proceedings of the EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium. Atlanta, 1991:16-20.
- [4] Brown K, Kalata W, Schick R. Optimization of  $\text{SO}_2$  scrubber using CFD modeling[J]. Procedia Engineering, 2014, 83:170-180.
- [5] Kallinikos L E, Farsari E I, Spartinos D N, et al. Simulation of the operation of an industrial wet flue gas desulfurization system[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(12):1794-1802.
- [6] 马科伟,杨迪,肖爱萍,等.流场数值模拟技术在脱硫塔托盘设计中的应用[J].广州化工,2016,44(5):172-174.
- [7] 杨景香,陈开银.含筛板式托盘的烟气脱硫塔的CFD数值模拟[J].能源环境保护,2018,32(1):38-40.
- [8] 张丽珍.某电厂 $4\times 300\text{ MW}$ 燃煤机组脱硫系统提效改造实例[J].环境科技,2018,31(2):49-51.
- [9] 郭东明.脱硫工程技术与设备[M].北京:化学工业出版社,2019.
- [10] 张悦,韩璞,张想.石灰石-湿法烟气脱硫吸收塔仿真模型设计与研究[J].系统仿真学报,2019,31(2):238-247.
- [11] Zhou G W, Zhong W Q, Zhou Y Q, et al. 3D simulation of sintering flue gas desulfurization and denitration in a bubbling gas absorbing tower[J]. Powder Technology, 2017, 314: 412-426.
- [12] Zhang Q, Wang S J, Zhu P, et al. Full-scale simulation of flow field in ammonia-based wet flue gas desulfurization double tower[J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 91(4): 619-629.
- [13] Michalski J A. Aerodynamic characteristics of flue gas desulfurization spray tower spoly dispersity consideration [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2000,39(9):3314-3324.
- [14] Yang L, Jiang J G, Li W F, et al. Optimum extraction Process of polyphenols from the bark of Phyllanthus emblica L. based on the response surface methodology[J]. Journal of Separation Science, 2015, 32(9):1437-1444.
- [15] 冉景煜,邓庆波,牛俊天,等.湿法脱硫塔内流场均匀性影响因素及其评价方法[J].动力工程学报,2020,40(10):825-831.
- [16] 刘嘉宇.WFGD过程中脱硫浆液液滴夹带特性的数值模拟研究[D].南京:东南大学,2015.

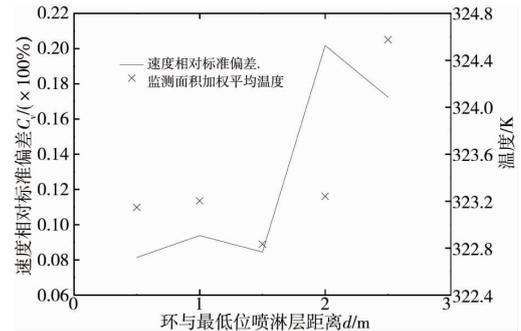


图9 监测面的速度标准偏差与平均温度