

带液滴辅助捕集结构的折板除雾器分离性能研究

刘丽艳*, 赵晨光

(天津大学化工学院, 天津 300072)

摘要:采用 Fluent 对折板除雾器内气液两相流场、分离效率和压降进行数值模拟。气相采用 SST $k-\omega$ 模型,液滴相采用离散相模型。为改善分离性能,引入液滴辅助捕集结构,对比前后除雾器内的流场和液滴轨迹的区别,结果表明,后者气相湍动能增强、出口液滴轨迹线减少。通过改变各级捕集结构高度并进行组合,研究效率和压降随着进口粒径的变化。然后改变进口粒径分布,模拟 27 种不同高度组合下的分离效率和压降,得到最优的组合方式,对除雾器设计有一定指导意义。

关键词:液滴辅助捕集结构;折板除雾器;流场模拟;分离效率

中图分类号:TQ050.3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)05-0159-04

Separation performance of wave-plate mist eliminator with auxiliary capture

LIU Li-yan*, ZHAO Chen-guang

(School of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The Fluent is adopted to simulate the separation efficiency and pressure drop of wave-plate mist eliminator with auxiliary capture installed in the tower. A numerical model is built on the basis of the given geometry, which uses SST $k-\omega$ for turbulence and disperses phase model for the motion of particles. The auxiliary capture is usually added to improve the performance of the eliminator. The analysis begins with flow field and droplet tracks both with and without auxiliary capture, it turns out that the turbulence is more intense and the tracks went out are less with auxiliary capture. Then the influence of the auxiliary capture's height on the separation efficiency and pressure drop is analyzed in each bend by altering structure parameters of the capture. Finally, several optimal combinations are concluded by 27 simulation cases, which can be used to direct the industrial production.

Key words: auxiliary capture; wave-plate mist eliminator; simulation of flow field; separation efficiency

除雾器广泛应用于石油、化工和气体工业中,除去气流中的液滴^[1],限制污染物排放,防止液体损坏下游设备,回收气相中的产品,提高气体纯度。折板除雾器应用于较大液滴尺寸,除雾效率低于丝网除雾器,但是压降也低^[2]。气流夹带液滴通过弯曲通道时,气流方向多次改变,液滴在惯性力作用下,撞击在通道壁面被捕集,形成的液膜在重力作用下排出^[3]。

近年来,发现添加液滴辅助捕集结构可使除雾效率大幅提升。Galletti 等^[4]模拟了波纹板除雾器内的气流和液滴的运动,分析了湍流模型的影响,提出一种改进的涡旋相互作用模型。Hadi 等^[5]分别利用 SST $k-\omega$ 和 RSTM 模拟湍流气相流场,研究了捕集结构尺寸对性能的影响。Kavousi 等^[6]利用 CFD 研究了排水通道几何参数对效率的影响,并得到了最佳几何参数。但是现有文献只考虑各级的排水通道高度相同的情况,并没有进行系统的优化组合研究。

拟采用 Fluent 对带辅助捕集结构的折板除雾器内气液两相流场进行数值模拟。通过调节液滴辅助捕集结构尺寸和工艺参数,研究各参数对除雾器的效率和压降的影响,以及流场、液滴轨迹、压力、速度情况,为设计提供指导。

1 模拟方法

因为进入除雾器内的液滴质量分数通常小于 10%^[4],所以仅考虑气流对颗粒的湍流作用,忽略液滴相对气流相的影响。应用离散相模型,先采用 SST $k-\omega$ 模拟气相的湍流运动,收敛后加入液滴相,得到液滴的运动轨迹,进而获得效率和压降^[7-8]。

1.1 模型假设

板间的气液流动是一种非常复杂的流动,将气体视为不可压缩气体;简化流场为二维流动;视气流为定常流动;液滴视作粒径不变的球体,并且忽略聚合、破裂等影响,壁面不考虑反弹、夹带,液滴一旦接触壁面就视作被捕集^[9]。

1.2 数值模拟

1.2.1 边界条件

气相进口速度 2 m/s,且在进口截面均匀分布,湍流度为 0.05,取进口处水力直径为通道特征长度 S_0 。压力出口为标准大气压。壁面应用黏性流动无滑移条件,静止无变形^[10]。液滴相为水, $\rho = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$,进口处液滴浓度均匀分布,且液滴初始速度等于气相速度,粒径范围 $3 \sim 20\ \mu\text{m}$ ^[4]。

1.2.2 计算区域

折板除雾器几何结构如图 1 所示,水平布置。本研究只考虑单个通道情况下的流动和除雾情况,各参数值见表 1^[5]。

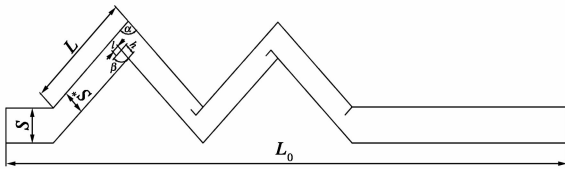


图 1 带液滴辅助捕集结构的折板除雾器结构图

表 1 带液滴辅助捕集结构的折板除雾器尺寸

S/mm	L/mm	S*/mm	$\alpha/(^\circ)$	l/mm	$\beta/(^\circ)$	L_0/mm
25	83.79	17.68	90	4.3	90	444

注: h 分别取 $0.35S^*$ 、 $0.48S^*$ 、 $0.60S^*$ mm。

1.2.3 网格划分

模拟采用结构化和非结构化结合的网格,壁面和直线通道处为四边形网格,转弯处为三角形网格;壁面和转弯处网格局部加密,每级通道的网格数目控制在 3 万左右。

1.2.4 模拟工况

辅助捕集结构的高度 h 对除雾器性能的影响要

表 2 不同捕集结构高度组合

序号	一级	二级	三级	序号	一级	二级	三级
1	$0.35S^*$	$0.35S^*$	$0.35S^*$	15	$0.48S^*$	$0.48S^*$	$0.60S^*$
2	$0.35S^*$	$0.35S^*$	$0.48S^*$	16	$0.48S^*$	$0.60S^*$	$0.35S^*$
3	$0.35S^*$	$0.35S^*$	$0.60S^*$	17	$0.48S^*$	$0.60S^*$	$0.48S^*$
4	$0.35S^*$	$0.48S^*$	$0.35S^*$	18	$0.48S^*$	$0.60S^*$	$0.60S^*$
5	$0.35S^*$	$0.48S^*$	$0.48S^*$	19	$0.60S^*$	$0.35S^*$	$0.35S^*$
6	$0.35S^*$	$0.48S^*$	$0.60S^*$	20	$0.60S^*$	$0.35S^*$	$0.48S^*$
7	$0.35S^*$	$0.60S^*$	$0.35S^*$	21	$0.S^*$	$0.35S^*$	$0.60S^*$
8	$0.35S^*$	$0.60S^*$	$0.48S^*$	22	$0.60S^*$	$0.48S^*$	$0.35S^*$
9	$0.35S^*$	$0.60S^*$	$0.60S^*$	23	$0.60S^*$	$0.48S^*$	$0.48S^*$
10	$0.48S^*$	$0.35S^*$	$0.35S^*$	24	$0.60S^*$	$0.48S^*$	$0.60S^*$
11	$0.48S^*$	$0.35S^*$	$0.48S^*$	25	$0.60S^*$	$0.60S^*$	$0.35S^*$
12	$0.48S^*$	$0.35S^*$	$0.60S^*$	26	$0.60S^*$	$0.60S^*$	$0.48S^*$
13	$0.48S^*$	$0.48S^*$	$0.35S^*$	27	$0.60S^*$	$0.60S^*$	$0.60S^*$
14	$0.48S^*$	$0.48S^*$	$0.48S^*$	28	0	0	0

注:第 28 组不带液滴辅助捕集结构。

远大于 l ^[5],所以不考虑 l 的变化对性能的影响,只考虑 h 改变对性能的影响。 h 大小分别取 $0.35S^*$ 、 $0.48S^*$ 和 $0.60S^*$,图 1 除雾器的结构中,设置了 3 个液滴辅助捕集结构,每个捕集结构高度取 3 个值,所以 3 个捕集结构可以得到 27 种组合方式,见表 2。

2 模拟预测结果及分析

2.1 网格独立性研究

对第 14 组结构采用不同的网格尺寸,得到对应的网格数为 18 万、12 万、7 万。对粒径为 $4.4\ \mu\text{m}$ 的液滴的分离效率如图 2 所示,12 万的网格就可满足本文中的精度要求,且可以减小计算消耗量。

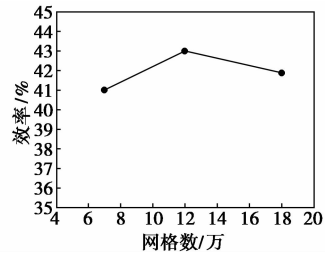


图 2 网格独立性分析

2.2 流场和轨迹分析

进口风速 2 m/s 下,由图 3 可见引入捕集结构之后,捕集结构处均产生了涡旋,增大了气流湍动能,同时高速区明显增多,速度变大,则液滴的惯性增加,将更有利于液滴的捕集。图 4 比较了液滴轨迹,取 10 000 条轨迹中的 20 条。由图 4(b)可见,引入捕集结构之后,出口的液滴轨迹数减少,表明捕集效率提高,同时轨迹变得更加不规则。

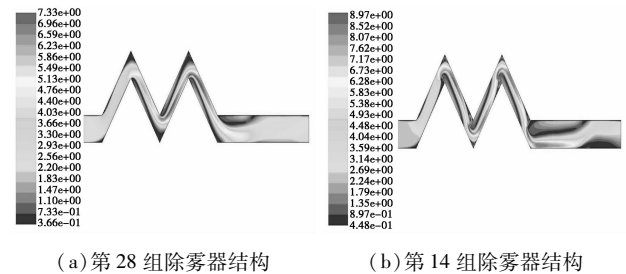


图 3 折板除雾器内气相流场图

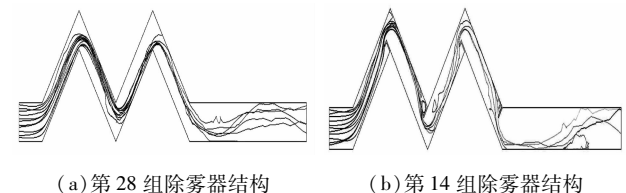


图 4 折板除雾器内液滴轨迹图

2.3 实验验证

在2 m/s进口风速下,采用第14组结构尺寸,模拟结果与实验数据^[4]进行比较。如图5所示,液滴直径在5 μm 以上,本文中模拟结果与实验趋势基本吻合,可以用来进行研究,后续模拟均取2 m/s的进口风速。

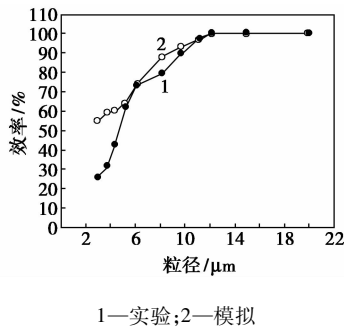


图5 2 m/s时实验数据与模拟数据对比

2.4 除沫器分离效率参数优化分析

2.4.1 液滴辅助捕集结构高度对压降的影响

Hadi等^[5]研究了捕集结构的尺寸对分离效率的影响,为了进一步量化各级捕集结构对分离性能的影响,分别研究了结构参数对总压降和分离效率的影响。表3为气流通过不同高度的总压降,假设与气液两相的压降相同,各级通道的总压降数值均小于工业上对单级通道压降150 Pa的极限值,所以后续研究捕集结构高度时,只考虑其对分离效率的影响。

表3 气流通过不同液滴辅助捕集结构高度的总压降

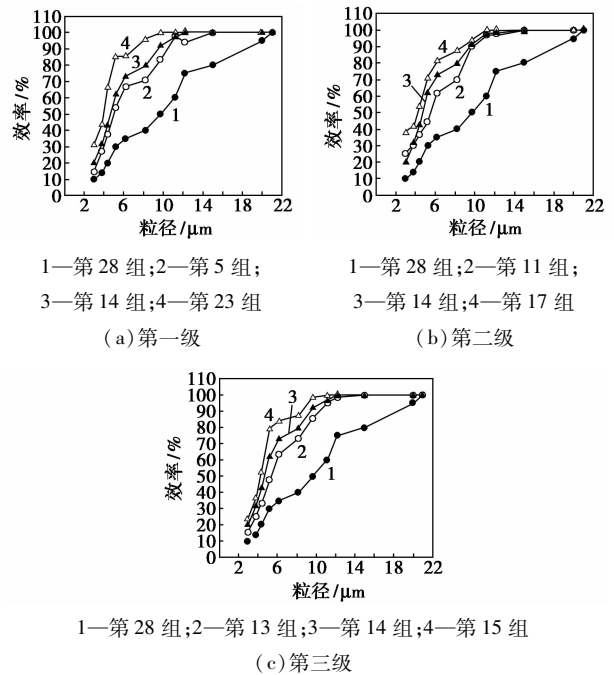
h/mm	0.35S*	0.48S*	0.60S*
一级总压降 ^① /Pa	90.0	104	127.0
二级总压降 ^② /Pa	83.5	104	104.5
三级总压降 ^③ /Pa	94.5	104	125.5

注:改变第一级捕集结构高度,其他两级高度0.48S*;改变第二级高度,其他两级高度0.48S*;改变第三级高度,其他两级高度0.48S*。

2.4.2 液滴辅助捕集结构高度对分离效率的影响

进口风速2 m/s下,改变各级捕集结构高度,分离效率随着进口液滴粒径的变化曲线如图6所示。带捕集结构的除雾器效率明显大于不带捕集结构的,表明布置捕集结构更利于液滴相分离。

由图6(a)可见,随着粒径增大,效率明显增加。对于粒径小于5.2 μm 的液滴,效率变化较大;粒径在5.2~8.5 μm 时效率变化平缓,且当捕集结构高度 h 越低时,对于粒径大于8 μm 的液滴,效率变化幅度越平缓。上述分析表明,改变捕集结构高度对



改变第一级捕集结构高度,其他两级高度0.48S*;改变第二级高度,其他两级高度0.48S*;改变第三级高度,其他两级高度0.48S*。

图6 不同液滴辅助捕集结构高度分离效率随粒径的变化曲线

提高小液滴的分离效果更明显,对于大尺寸液滴则可选用较低高度的捕集结构,效率改变不大,压降较小,且材料较少。

为了量化高度对效率的影响,对图6(a)中不同高度的分离效率进行计算,0.60S* mm比0.48S* mm增加了25%,0.35S* mm比0.48S* mm减小了27.1%,但前者分离效率改变幅度更大,说明捕集结构高度的增加对效率的影响较大。

图6(b)中,总体趋势同前所述,但曲线转折值不同,液滴粒径小于6.1 μm 或大于8 μm 时,效率随粒径变化幅度明显;在两者之间时,变化趋向平缓,且随着捕集结构高度变大,效率变化越平缓,此趋势与第一级相反。对于粒径小于9.5 μm 的液滴,采用较大高度的捕集结构利于改善液滴分离效率;对于粒径大于9.5 μm 的液滴,不同高度的效率曲线几乎重合,改变捕集结构高度参数对液滴分离效率已无影响。以上分析说明,在2 m/s的气速下,平均粒径大于9.5 μm 液滴分离时,适宜采用尽可能小的液滴辅助捕集结构或不加该结构。

在2 m/s进口风速下,改变第三级捕集结构高度,效率随着进口粒径的变化如图6(c)所示。由图6(c)可知,液滴粒径在6.3~8.5 μm 时,3种高度下

曲线的变化幅度较平缓;对于粒径大于 $8.5 \mu\text{m}$ 和小于 $6.3 \mu\text{m}$ 的液滴,曲线变化较明显。通过观察图 6(c) 中曲线间的差别,对于粒径在 $4.4 \sim 11.3 \mu\text{m}$ 的液滴,捕集结构高度的变化对液滴分离效率的影响较显著。对于平均粒径在 $4.4 \sim 11.3 \mu\text{m}$ 的液滴,适宜采用高度为 $0.60S^*$ mm 的捕集结构;对于粒径大于 $11.3 \mu\text{m}$ 和小于 $4.4 \mu\text{m}$ 的液滴,适宜采用高度为 $0.48S^*$ mm 的捕集结构,因为其效率与 $0.60S^*$ mm 情况相近,且压降较小。

2.4.3 组合优化结构尺寸对性能的影响

为了更加接近实际情况,考虑进口液滴粒径分布为 R-R 分布,同时为得到最优的组合,综合考虑不同捕集结构高度的组合下的除雾器性能,如表 2 所示,为 3 个不同高度的液滴辅助捕集结构在不同位置组合的 27 组情况。为了确保工艺条件相同,模拟均为 2 m/s 的进口风速,液滴的质量分数为 10%,尺寸分布为 R-R 分布,考虑 DRW 扩散模型。

CFD 模拟结果表明,在 2 m/s 的气速下,不带捕集结构时,效率为 43%,压降为 37.5 Pa ;图 7(b) 中各组总压降在 $72 \sim 165 \text{ Pa}$,较未设液滴捕集装置的压降明显增加,说明设置液滴辅助捕集结构增大流体流动阻力。且在第一、二级捕集结构尺寸分别相同的情况下,压降随着第三级捕集结构高度的增加而增加。

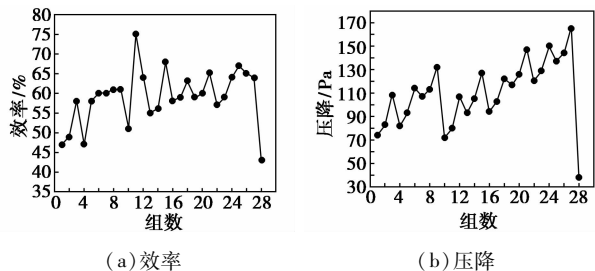


图 7 效率和压降随不同组数的变化曲线

综合考虑全部 27 组情况,第 11 组的效率最大,为 75%,总压降为 80 Pa ,仅仅比第 1 组、第 10 组的压降大;且用材较少,因此建议工程上采用配置这种捕集结构的折板除雾器。

3 结论与展望

采用 CFD 研究液滴辅助捕集结构高度对除雾器性能的影响。通过不同高度组合,得到了一系列指导工程设计的结论。先研究不同捕集结构高度下效率随进口液滴粒径的变化;对于第二级捕集结构,分析 2 m/s 风速时效率随粒径的变化趋势,得到结

论:对于粒径小于 $9.5 \mu\text{m}$ 时宜采用 $0.60S^*$ mm 捕集高度的辅助装置,大于 $9.5 \mu\text{m}$ 时宜采用 $0.35S^*$ mm 的捕集高度;对于第一、三级捕集结构,同样分析了效率的变化,得到了分离效果较好的捕集结构高度。

同样在 2 m/s 的气速下,采用 RR 函数表示进口粒径分布,模拟了 27 组不同高度组合下的效率和压降。综合考虑两者,得到第一级高度 $0.48S^*$ mm、第二级高度 $0.35S^*$ mm、第三级高度 $0.48S^*$ mm 时效率最大,且压降较小,综合性能最好。

CFD 方法研究除雾器性能可以任意改变结构尺寸,得到不同工况下的除雾器性能,方便快捷,而且随着模拟方法和软件的更新,模拟结果的精确度也越来越高。在今后的工作中,将在模拟中考虑二次夹带,以便可以模拟更高风速情况,为工业应用提供指导。

参考文献

- [1] 徐淑君,姚征,朱懿渊. 波纹板除雾器两相流动的数值模拟与分析[J]. 上海理工大学学报,2007,29(3):275-280.
- [2] 张晓晨,张铭,胡孔诚. 海水淡化用汽液分离元件研究进展[J]. 化学工业与工程,2012,29(2):63-69.
- [3] James P W, Azzopardi B J, Wang Y, et al. A model for liquid film flow and separation in a wave-plate mist eliminator[J]. Chemical Engineering Research and Design,2005,83:469-477.
- [4] Galletti Chiara, Brunazz Elisabetta, Tognotti Leonardo. A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels[J]. Chemical Engineering Science,2008,63:5639-5652.
- [5] Hadi Mohammad, Estakhrsar Hamed, Rafee Roohollah. Effect of drainage channel dimensions on the performance of wave-plate mist eliminators[J]. Korean J Chem Eng,2013,30(6):1301-1311.
- [6] Kavousi Fatemeh, Behjat Yaghoob, Shahhosseini Shahrokh. Optimal design of drainage channel geometry parameters in vane demister liquid-gas separators[J]. Chemical Engineering Research and Design,2013,91:1212-1222.
- [7] Zamora B, Kaiser A S. Comparative efficiency evaluations of four types of cooling tower drift eliminator, by numerical investigation[J]. Chemical Engineering Science,2011,66:1232-1245.
- [8] Rafee R, Rahimzadeh H, Ahmadi G. Numerical simulations of air-flow and droplet transport in a wave-plate mist eliminator[J]. Chemical Engineering Research and Design,2010,88:1393-1404.
- [9] Narimani Elhame, Shahhosseini Shahrokh. Optimization of vane mist eliminators[J]. Applied Thermal Engineering,2011,31:188-193.
- [10] 孙志春. 鼓泡脱硫塔除雾器除雾特性数值研究及实验验证[J]. 中国电机工程学报,2010,30(8):68-75. ■