

Separation performance optimization of wave-plate mist eliminator based on response surface methodology

Weiwei MA^{1,3}, Xiaolin WU^{1,3}, Zhongli JI^{2,3*}

1. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

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

Abstract: The influences of different drainage structures on the gas-liquid separation performance of wave-plate mist eliminator were analyzed and the parameters of drainage structure were optimized by response surface methodology. The single factor experiment was used to select the key parameters which had significant influence on the performance of the mist eliminator. The multivariate regression model was established using center compound design experiment in order to analyze the interaction of parameters which had influence on mist eliminator performance coefficient. The results showed that the key parameters which had significant influence on the performance of the mist eliminator and their values were separation gas velocity 2.6 m/s, height of drainage hook 7.3 mm, width of front-drainage pocket 3.1 mm and width of rear-drainage pocket 2.3 mm. The calculated value of mist eliminator performance coefficient was 2.073 while the test value was 1.875 which indicated that the optimization result of response surface methodology was credible.

Key words: wave-plate mist eliminator; response surface methodology; separation performance; performance coefficient; optimization design

基于响应面法的折流板除雾器分离性能优化

马巍威^{1,3}, 吴小林^{1,3}, 姬忠礼^{2,3*}

1. 中国石油大学(北京)化学工程学院, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

3. 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249

摘 要: 用响应面分析法分析不同排液结构对新式异型折流板除雾器气液分离性能的影响, 并对排液结构参数进行优化设计. 通过单因素实验对比筛选对除雾器性能具有显著影响的关键参数, 用中心复合设计实验建立响应面多元回归模型, 分析影响除雾器性能系数的参数间交互作用, 得出最优参数. 结果表明, 影响除雾器性能参数的最优取值为分离气速 2.6 m/s、排液钩高度 7.3 mm、前置排液槽和后置排液槽宽度分别为 3.1 和 2.3 mm. 优化的折流板除雾器性能系数计算值为 2.073, 实验值为 1.875, 优化结果较可靠.

关键词: 折流板除雾器; 响应面法; 分离性能; 性能系数; 优化设计

中图分类号: TQ051.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)04-0689-08

1 前 言

工业过程中气流中常夹杂微小液滴杂质, 会腐蚀和

破坏机械设备, 排放到空气中会造成大气污染, 同时也增大气体输送能耗及提高提取气流中有价值产品的成本. 折流板除雾器是一种结构简单、压降低、处理气量

收稿: 2017-10-18, 修回: 2018-01-15, 网络发表: 2018-04-26, Received: 2017-10-18, Revised: 2018-01-15, Published online: 2018-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51474229)

作者简介: 马巍威(1989-), 男, 天津市人, 博士研究生, 动力工程与工程热物理专业, E-mail: mavv1989@163.com; 姬忠礼, 通讯联系人, E-mail: jizhongli63@vip.sina.com.

引用格式: 马巍威, 吴小林, 姬忠礼. 基于响应面法的折流板除雾器分离性能优化. 过程工程学报, 2018, 18(4): 689-696.

Ma W W, Wu X L, Ji Z L. Separation performance optimization of wave-plate mist eliminator based on response surface methodology (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 689-696, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217369.

大的气液惯性分离器, 在工业中广泛应用^[1,2].

已有学者对折流板除雾器机理和性能进行了研究, 折流板除雾器性能影响因素主要包括操作参数、结构形式和液滴运动^[3], 对以上因素进行了大量研究^[4-9], 对除雾器流道结构和操作参数进行了设计优化, 提出了除雾器效率模型和压降模型. 研究^[10-14]发现在较高气速下除雾器内部的液滴二次夹带会严重影响除雾器性能, 并对折流板的排液结构开展了实验和 CFD 模拟, 证明折流板的排液结构对整体性能有显著影响. 国内外学者^[15-18]采用多种方法对折流板的排液结构进行了研究和优化设计.

已有研究基本针对常规形式的折流板型(三角形、梯形、波浪形), 排液结构单一, 已不能处理实际工业过程中液滴工况较复杂的含液气流. 对实际应用的新式折

流板除雾器目前研究尚少. 本工作采用响应面法(Response Surface Methodology, RSM)研究用于海上风电机组进气口除雾器的新式异型折流板的不同形式排液结构关键尺寸对除雾器整体性能的影响, 建立了气液分离性能多元回归模型, 得到最佳参数, 为新式折流板除雾器的优化设计提供参考.

2 实验

2.1 实验装置

实验装置如图1所示. 安装在扩散腔顶部的空气雾化喷嘴产生大量液滴, 在扩散腔中与空气初步混合. 液滴一部分在腔内沉降, 一部分与空气共同在风机的作用下水平进入后续混合管段. 混合管段长1 m, 其作用为使液滴与空气充分混合, 在气流中分布更均匀, 同时使

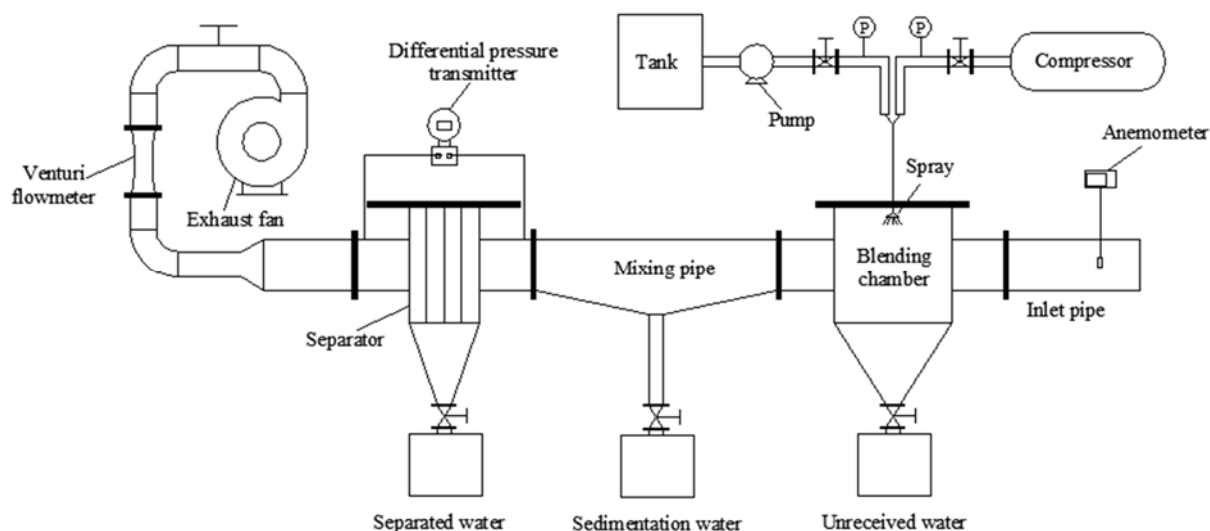


图1 折流板除雾器性能评价装置示意图

Fig.1 Schematic illustration of apparatus for performance evaluation of wave-plate mist eliminator

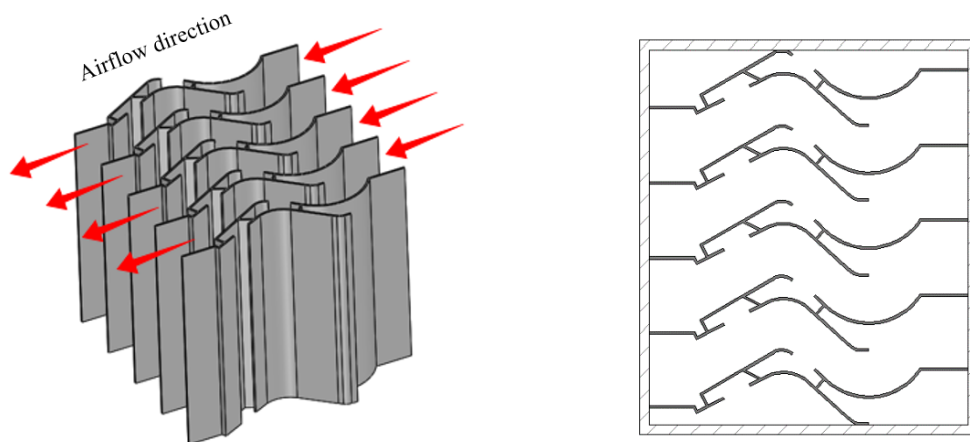


图2 折流板结构示意图

Fig.2 Schematic illustration of wave-plate structure

液滴和气流运动方向更趋于水平. 混合管段后为除雾器, 充分混合后的含液气流通过截面积 $400\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 的入口进入除雾器, 除雾器中装有 5 个叶片, 组成了 4 个固定间距为 30 mm 的水平流道(图 2). 被除雾器分离的液滴收集称重, 未分离的液滴随空气排入大气中, 通过气流管路上的文丘里流量计控制风速为 $1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0$ 和 8.0 m/s , 波动范围小于 $\pm 0.1\text{ m/s}$. 在管路入口处设有热线风速仪, 与流量计测量结果对比验证.

2.2 参数测量

2.2.1 压降测量

含液气流通过除雾器中叶片时的压降用差压变送器(精度等级为 0.1 级, 上海倍福公司生产)测量. 采压点分别设置在距除雾器入口和出口截面的 50 mm 处. 由于实验管路截面积较大, 为保证精度采用环形采压方式, 如图 3 所示.

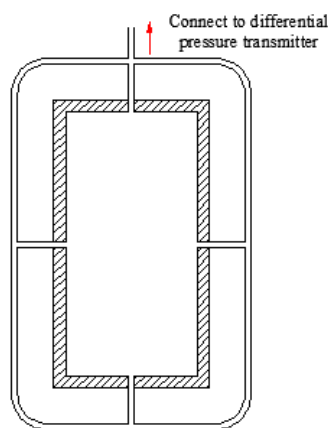


图3 采压点示意图

Fig.3 Schematic illustration of pressure collection points

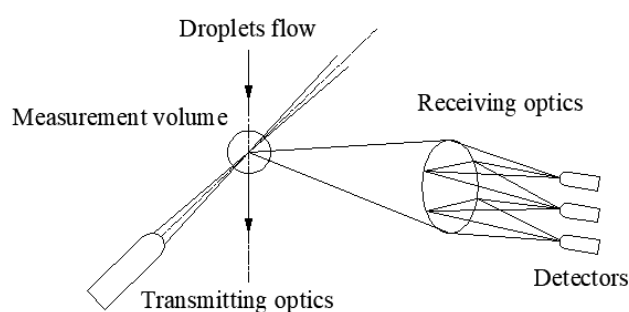


图4 相位多普勒粒子分析仪光路示意图

Fig.4 Beam path diagram of phase doppler particle analyzer

2.2.2 效率测量

采用称重法, 用电子天平(深圳市安衡衡器电子有限公司)称量各集液水箱中水的质量, 计算分离效率 η :

$$\eta = \frac{m_4}{m_1 - m_2 - m_3} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, m_1 为喷嘴出水质量, m_2 为未接收水质量, m_3 为沉降水质量, m_4 为被叶片分离的水的质量. 为减少实验误差, 每组实验中加水量不少于 5 kg , 多次测量取平均值. 每次实验前将装置内部管路充分润湿, 使湿度保持恒定.

2.2.3 液滴粒径测量

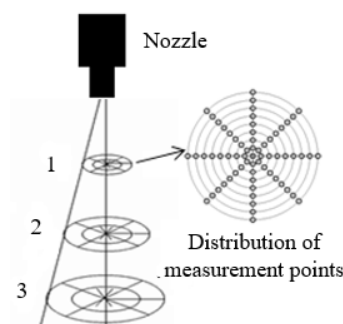
喷嘴出口处的液滴粒径用相位多普勒粒子分析仪(精度等级为 1 级, 丹麦 Dantec 公司)测量, 利用运动粒子的光散射效应测量, 通过激光在液滴内两次折射后产生的相位差精确测量液滴平均直径, 相位计算如下:

$$\varphi = \alpha \beta, \quad (2)$$

$$\alpha = \pi n_1 D / \lambda, \quad (3)$$

其中, φ 为接收器接收到的多普勒脉冲相位, n_1 为散射介质的折射率, D 为液滴粒径, λ 为真空中激光的波长.

由于液滴在离开喷嘴后呈锥形扩散, 为使测量结果更精确, 分别在与喷嘴出口垂直的 3 个不同截面上多点进行环形测量(图 4). 喷嘴出口液滴粒径分布如图 5 所示, 可知喷嘴产生的液滴直径为 $15 \sim 210\text{ }\mu\text{m}$, 各粒径液滴分布较均匀, 符合实际应用工况中液滴粒径分布范围广、气流含液浓度较高、气流中大液滴较多及几乎不含固体颗粒等特点.



2.3 响应面法

2.3.1 单因素实验

单因素实验选取分离风速(V)、排液钩高度(H)、排液钩长度(L)、前置排液槽宽度(W_1)和后置排液槽宽度(W_2)五个因素, 各因素示意图如图 6 所示, 取值范围见

表 1. 考察各因素对除雾器性能参数(压降和效率)的影响, 3 次平行实验取平均值.

2.3.2 响应曲面优化实验

根据单因素实验结果选取对除雾器性能有显著影响的因素, 利用中心复合设计(Central Composite Design,

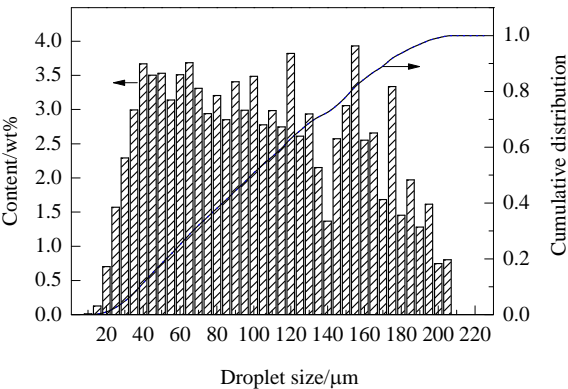


图 5 喷嘴出口液滴粒径分布
Fig.5 Droplets size distribution of nozzle outlet

CCD)设计多因素多水平综合实验,采用 Design-Expert 10.0.3 软件处理数据,除雾器性能和各参数的关系用 1 个多项式表达.

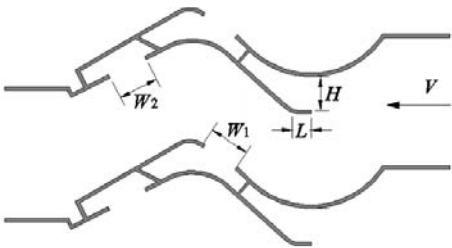


图 6 因素示意图
Fig.6 Schematic illustration of factors

表 1 单因素实验设计
Table 1 Single factor experiment design

Factor	Data range	Value of other factors
Gas velocity, $V/(m/s)$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	$H=10, L=6, W_1=4, W_2=4$
Height of drainage hook, H/mm	5, 10, 15, 20	$V=5, L=6, W_1=4, W_2=4$
Length of drainage hook, L/mm	6, 8, 10, 12, 14	$V=5, H=10, W_1=4, W_2=4$
Width of front-drainage pocket, W_1/mm	0, 2, 4, 6, 8	$V=5, H=10, L=6, W_2=4$
Width of rear-drainage pocket, W_2/mm	0, 2, 4, 6, 8	$V=5, H=10, L=6, W_1=4$

3 结果与讨论

3.1 单因素实验

3.1.1 分离气速对除雾器性能的影响

分离气速对除雾器性能的影响如图 7 所示. 由图可知, 随分离气速提高, 除雾器压降呈指数增长趋势, 原因是提高气速使除雾器流道中气流湍流度变大, 由摩擦引起的沿程损失增大. 除雾器效率先上升后下降, 提高气速增强了气流中液滴的惯性, 易于分离. 当气速超过除雾器临界气速时, 二次夹带的影响显著, 叶片表面的液膜破碎飞溅, 产生的小液滴再次被气流带走, 除雾器效率开始下降, 除雾器效率最高时分离气速约为 5 m/s.

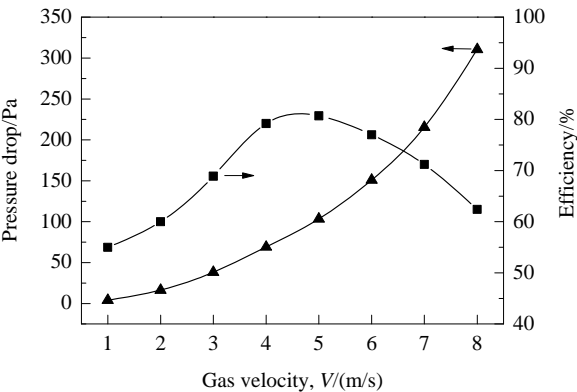


图 7 分离气速对除雾器性能的影响
Fig.7 Effect of separation gas velocity on separator performance

3.1.2 排液钩长度对除雾器性能的影响

排液钩长度对除雾器性能的影响如图 8 所示. 排液钩长度增加方向与流道内气流方向一致, 长度增加对其附近的气流有一定的整流作用, 使除雾器整体压降略微下降. 当排液钩长度达原尺寸的 2 倍时, 除雾器压降仅下降 6 Pa, 效率变化小于 1%, 排液钩长度对除雾器性能的影响较小.

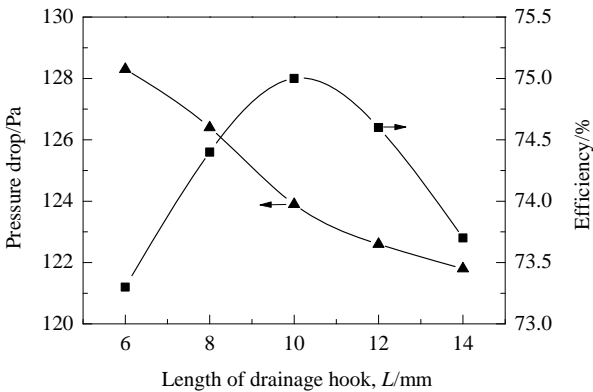


图 8 排液钩长度对除雾器性能的影响
Fig.8 Effect of length of drainage hook on separator performance

3.1.3 排液钩高度对除雾器性能的影响

排液钩高度对除雾器性能的影响如图 9 所示. 由图可知, 排液钩高度由 5 mm 增至 15 mm, 除雾器压降缓慢升高, 效率几乎不变, 除雾器性能稳定. 排液钩高度超过 15 mm 时, 除雾器性能剧烈变化, 压降成倍上升,

效率跌至 38%，原因是排液钩高度过大，占据了大部分流道宽度，气流通过排液钩附近时有效流通面积急剧减小，气流局部速度增大，静压减小，气流摩擦阻力损失增大使除雾器压降升高；排液钩局部湍流强度增加导致了严重的二次夹带，除雾器效率降低。

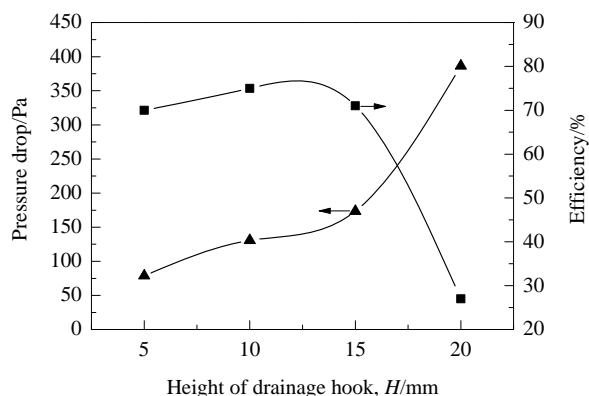


图9 排液钩高度对除雾器性能的影响

Fig.9 Effect of height of drainage hook on separator performance

3.1.4 前置排液槽宽度对除雾器性能的影响

前置排液槽宽度对除雾器性能的影响见图 10。由图可知，前置排液槽宽度对除雾器压降影响不明显，前置排液槽宽度为 4 mm 时除雾器效率最高，宽度继续增大，除雾器压降上升而效率开始降低。这是因为当排液槽宽度过小时，开口处产生的涡流尺度较小，气流中小液滴由于惯性较难被涡流卷入排液槽中；排液槽宽度过大时，对内部已分离的液滴保护作用下降，气流再次将小液滴带走。

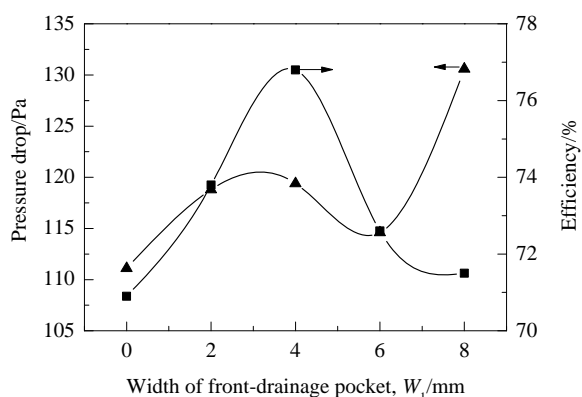


图10 前置排液槽宽度对除雾器性能的影响

Fig.10 Effects of width of front-drainage pocket on separator performance

3.1.5 后置排液槽宽度对除雾器性能的影响

后置排液槽宽度对除雾器性能的影响如图 11 所示。由图可知，后置排液槽宽度对除雾器整体压降的影响与

前置排液槽类似，但对除雾器效率的影响比前置排液槽明显。这是因为后置排液槽位于流道转角的下流区域，该区域为除雾器中主要的分离区域，对除雾器整体性能影响更显著。当后置排液槽宽度为 4 mm 时，除雾器性能最优。

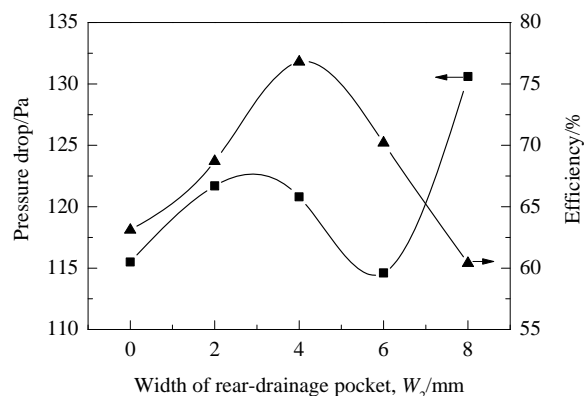


图11 后置排液槽宽度对除雾器性能的影响

Fig.11 Effect of width of rear-drainage pocket on separator performance

3.2 响应面法优化实验

3.2.1 中心复合设计

由单因素实验可得出，折流板除雾器整体性能受排液钩长度影响不明显，受分离气速、排液钩高度、前置排液槽宽度和后置排液槽宽度影响较大。设排液钩长为 6 mm，后 4 个因素各取 3 个水平，设计方案见表 2。根据设计进行 30 组实验，其中 24 个实验点是析因点，6 个实验点为区域的中心点。

表2 中心复合设计各因素水平

Table 2 Factors and levels of central composite design

Factor	Level		
	-1	0	1
Gas velocity, V/(m/s)	4	5	6
Height of drainage hook, H/mm	5	10	15
Width of front-drainage pocket, W ₁ /mm	2	4	6
Width of rear-drainage pocket, W ₂ /mm	2	4	6

3.2.2 响应面实验结果

根据中心复合设计方案得到的实验结果如表 3 所示。从表可看出，除雾器效率最高为 75.4%，压降为 112.5 Pa；除雾器压降最低为 41.5 Pa，效率仅为 49.1%。用折流板除雾器性能系数 P_F 对除雾器的压降 Δp 和分离效率 η 进行综合评价：

$$P_F = \frac{\eta \times 100}{\Delta p} \quad (4)$$

采用三阶多项式拟合得到折流板除雾器性能系数回归模型：

$$P_F = 3.674 + 0.113H + 0.299W_1 - 0.040W_2 - 0.830V - 0.026HW_1 +$$

$$9.725 \times 10^{-3} HW_2 - 0.041 HV - 5.688 \times 10^{-3} W_1 W_2 -$$
$$1.999 \times 10^{-4} W_1 V - 3.325 \times 10^{-3} W_2 V - 9.373 \times 10^{-3} H^2 - 0.032 W_1^2 +$$

$$0.062 V^2 + 3.550 \times 10^{-4} H W_1 W_2 + 8.350 \times 10^{-4} H W_2 V -$$
$$7.170 \times 10^{-4} H^2 W_2 + 2.692 \times 10^{-3} H^2 V + 2.885 H W_1^2.$$

(5)

表 3 除雾器性能中心复合设计实验结果

Table 3 Results of central composite design experiment for separator performance

No.	Factor				Efficiency, $\eta/\%$	Pressure drop, $\Delta p/\text{Pa}$	Performance coefficient, P_F
	Gas velocity, $V/(\text{m/s})$	Height of drainage hook, H/mm	Width of front-drainage pocket, W_1/mm	Width of rear-drainage pocket, W_2/mm			
1	6	5	2	2	72.2	110	0.66
2	4	15	6	6	59.8	102.7	0.58
3	5	10	4	4	73.8	112.8	0.65
4	4	5	6	6	65.3	49.7	1.31
5	5	10	4	4	73.9	113.2	0.65
6	4	15	2	2	68.1	96.5	0.71
7	6	5	6	6	68.3	111.4	0.61
8	5	10	8	4	73.9	122.3	0.60
9	4	15	2	2	68.4	96.5	0.71
10	6	15	2	6	62.6	209.5	0.30
11	6	15	2	2	63.4	207.4	0.31
12	4	5	6	2	66.3	46.8	1.42
13	5	10	4	4	73.8	112.8	0.65
14	5	10	4	8	75.4	112.5	0.67
15	5	10	0	4	72.9	119.2	0.61
16	5	10	4	4	73.2	112.8	0.65
17	4	15	6	2	66.9	99.3	0.67
18	4	5	2	2	68.7	50.5	1.36
19	5	10	4	4	75.3	112.8	0.67
20	4	15	2	6	62.9	97.8	0.64
21	6	5	2	6	69.8	111.8	0.62
22	5	10	4	4	74.8	112.8	0.66
23	4	5	2	6	66.1	50.8	1.30
24	5	0	4	4	59.5	41.7	1.43
25	7	10	4	4	51.2	213	0.24
26	5	20	4	4	49.1	386.5	0.13
27	6	15	6	6	59.4	228.8	0.26
28	6	15	6	2	57.1	219.6	0.26
29	5	10	4	0	72.4	112.1	0.65
30	3	10	4	4	65.2	41.5	1.57

表 4 除雾器性能回归模型方差分析结果

Table 4 ANOVA for the regression equation describing the separator performance

Source of variance	df	Sum of squares	Mean square	F value	P value
Model	17	4.27	0.24	3758.28	<0.0001
Height of drainage hook (A), H	1	2.898×10^{-3}	2.898×10^{-3}	45.91	<0.0001
Width of front-drainage pocket (B), W_1	1	0.022	0.022	353.17	<0.0001
Width of rear-drainage pocket (C), W_2	1	4.250×10^{-4}	4.250×10^{-4}	6.73	0.0249
Gas velocity (D), V	1	0.079	0.079	1257.65	<0.0001
AB	1	0.022	0.022	343.40	<0.0001
AC	1	1.931×10^{-3}	1.931×10^{-3}	30.59	0.0002
AD	1	0.010	0.010	159.83	<0.0001
BC	1	1.133×10^{-3}	1.133×10^{-3}	17.94	0.0014
BD	1	2.108×10^{-6}	2.108×10^{-6}	0.033	0.8583
CD	1	9.252×10^{-5}	9.252×10^{-5}	1.47	0.2514
A ²	1	9.947×10^{-3}	9.947×10^{-3}	157.59	<0.0001
B ²	1	0.019	0.019	305.23	<0.0001
D ²	1	0.11	0.11	1677.44	<0.0001
ABC	1	6.644×10^{-4}	6.644×10^{-4}	10.53	0.0078
ACD	1	9.190×10^{-4}	9.190×10^{-4}	14.56	0.0029
A ² C	1	6.398×10^{-3}	6.398×10^{-3}	101.37	<0.0001
A ² D	1	0.022	0.022	353.30	<0.0001
AB ²	1	0.016	0.016	259.65	<0.0001
Residual	11	6.943×10^{-4}	6.312×10^{-5}		
Lack of Fit	5	3.443×10^{-4}	6.887×10^{-5}	1.18	0.4160
Pure Error	6	3.500×10^{-4}	5.833×10^{-5}		
Cor Total	29	4.27			

为保证模型的适应性和准确性,对模型进行方差分析,结果见表4。 $P<0.05$ 表明该因素为显著项,模型失拟项 $P=0.4160$,不显著,相关系数 $R^2=0.9998$,模型适用于拟合折流板除雾器性能。

3.2.3 影响除雾器性能的参数间的交互作用

影响折流板性能的参数间交互作用如图12所示。由图12(a)可看出,分离气速和排液钩高度对除雾器性能系数影响明显,曲面坡度较大,性能系数随这两个参数增大先急速下降后趋于平缓,分离气速和排液钩高度对除雾器性能系数的影响程度相似。由图12(b)和12(c)

可看出,分离气速与前置排液槽宽度和后置排液槽宽度的交互作用较一致,前后排液槽宽度对除雾器性能系数的影响均明显弱于分离气速的影响,且当分离气速处于较低范围时除雾器性能系数较大。由图12(d)可看出,在不同取值范围内,排液钩高度和前置排液槽宽度的交互作用发生变化。随前置排液槽宽度增大,排液钩高度较小时除雾器性能系数先增大后减小,排液钩高度较大时除雾器性能系数先减小后增大。由图12(e)可看出,除雾器性能系数随排液钩高度和后置排液槽宽度减小而减小,排液钩高度的影响较显著。由图12(f)可看出,前置

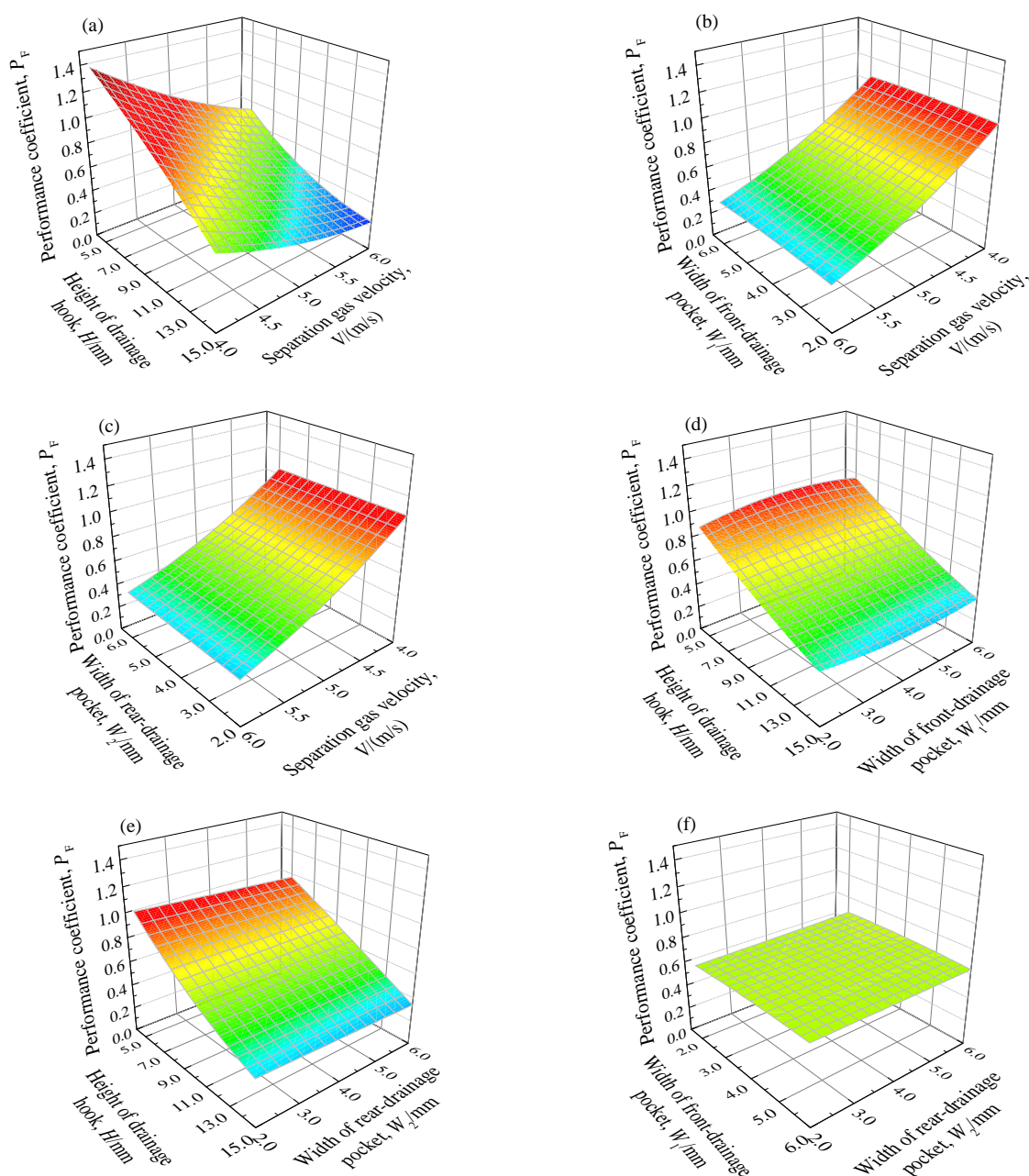


图12 影响除雾器性能的参数间的交互作用

Fig.12 Interaction between parameters affecting separator performance

排液槽宽度和后置排液槽宽度的曲面接近于平面,表明两个参数对除雾器性能系数的影响程度近似相同。

3.2.4 模型验证

用 Design-Expert 10.0.3 软件对回归模型进行计算,得到最佳参数组合为分离气速 2.6 m/s、排液钩高 7.3 mm、前置排液槽和后置排液槽的宽度分别为 3.1 和 2.3 mm,该条件下折流板除雾器性能系数为 2.073。用最佳参数组合进行 3 次平行实验,除雾器性能系数平均值为 1.875,与计算值相差较小,吻合度较好。

4 结 论

采用响应面法对新式异型结构折流板的排液结构进行分析及优化,筛选出对除雾器性能影响显著的关键参数,分析了各参数间的交互作用,确定了最佳参数组合,得到以下结论:

(1) 对除雾器效率和压降影响显著的参数为分离气速、排液钩高度、前置排液槽宽度和后置排液槽宽度。

(2) 采用中心复合设计法对筛选出的 4 个影响显著的参数进行实验设计,建立了除雾器性能系数的多元回归模型,运用方差分析检验了预测模型的拟合度,拟合度较好,能反映参数与响应值之间的相关性。

(3) 基于多元回归模型计算得各参数的最佳取值为分离气速 2.6 m/s、排液钩高度为 7.3 mm、前置排液槽和后置排液槽的宽度分别为 3.1 和 2.3 mm,优化后折流板除雾器性能系数计算值为 2.073,实验值为 1.875,相差不大,采用响应面法对新式异型结构折流板排液结构进行性能分析及优化结果可靠。

参考文献

- [1] 李嘉,黄素逸,王晓墨,等. 波形板分离器的冷态实验研究 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 112-114.
Li J, Huang S Y, Wang X M, et al. Experimental research of cold state operation of corrugated-plate separator [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(1): 112-114.
- [2] 夏芃力, 杨静. 折流板式除沫器性能分析及研究进展 [J]. 化工设备与管道, 2013, 50(6): 33-36.
Xia P L, Yang J. Performance analysis and research progress of wave-plate demister [J]. Process Equipment & Piping, 2013, 50(6): 33-36.
- [3] Houghton H G, Radford W H. Measurements on eliminators and the development of a new type for use at high gas velocities [J]. Transactions of the American Chemical Engineers, 1939, 35: 427-433.
- [4] McNulty K J, Monat J P, Hansen O V. Performance of commercial chevron mist eliminators [J]. Chem. Eng. Prog., 1987, 83(5): 48-55.
- [5] Bürkholz A, Muschelkautz E. Tropfenabscheider. übersicht zum stande des wissens [J]. Chemie Ingenieur Technik, 1972, 44(8): 503-509.
- [6] Wörrlein D I K. Druckverlust und fraktionsabscheidegrad in periodisch gewinkelten kanälen ohne einbauten [J]. Chemie Ingenieur Technik, 1975, 47(16): 687-687.
- [7] Ushiki K, Nishizawa E, Beniko H, et al. Performance of a droplet separator with multistage rows of flat blades [J]. J. Chem. Eng. Jpn., 1982, 15(4): 292-298.
- [8] 刘丽艳, 杨静, 孔庆森, 等. 折板除沫器流场与分离效率的数值模拟 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(8): 755-761.
Liu L Y, Yang J, Kong Q S, et al. Numerical simulations of flow field and separation efficiency for wave-plate mist eliminator [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(8): 755-761.
- [9] Song J, Hu X. A mathematical model to calculate the separation efficiency of streamlined plate gas-liquid separator [J]. Sep. Purif. Technol., 2017, 178: 242-252.
- [10] Azzopardi B J, Sanaullah K S. Re-entrainment in wave-plate mist eliminators [J]. Chem. Eng. Sci., 2002, 57(17): 3557-3563.
- [11] James P W, Wang Y, Azzopardi B J, et al. The role of drainage channels in the performance of wave-plate mist eliminators [J]. Chem. Eng. Res. Des., 2003, 81(6): 639-648.
- [12] Kavousi F, Behjat Y, Shahhosseini S. Optimal design of drainage channel geometry parameters in vane demister liquid-gas separators [J]. Chem. Eng. Res. Des., 2013, 91(7): 1212-1222.
- [13] Ruiz J, Kaiser A S, Zamora B, et al. CFD analysis of drift eliminators using RANS and LES turbulent models [J]. Appl. Therm. Eng., 2016, 105: 979-987.
- [14] 臧丽叶, 田瑞峰, 孙兰昕, 等. 横掠气流作用下波形板壁降膜破裂分析 [J]. 化工学报, 2014, 65(3): 862-869.
Zang L Y, Tian R F, Sun L X, et al. Breakdown of liquid films driven by horizontal gas flow in wave-plate channel [J]. CIESC Journal, 2014, 65(3): 862-869.
- [15] 赵健植, 金保升, 仲兆平, 等. 基于响应曲面法的除雾器叶片效率模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 61-65.
Zhao J Z, Jin B S, Zhong Z P, et al. Simulation study of separation efficiency of demister vane based on response surface methodology [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2007, 27(23): 61-65.
- [16] Venkatesan G, Kulasekharan N, Iniyan S. Design and selection of curved vane demisters using taguchi based CFD analysis [J]. Desalination, 2014, 354: 39-52.
- [17] Venkatesan G, Kulasekharan N, Iniyan S. Numerical analysis of curved vane demisters in estimating water droplet separation efficiency [J]. Desalination, 2014, 339: 40-53.
- [18] Xu Y, Yang Z, Zhang J. Study on performance of wave-plate mist eliminator with porous foam layer as enhanced structure [J]. Chem. Eng. Sci., 2017, 171: 650-671.