# 基于响应面法的清扫车沉降室流场特性优化

曹国智<sup>\*</sup> (中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430063)

# Optimization of Flow Field Characteristics of the Sweeper Settling Chamber Based on Response Surface Method

CAO Guozhi<sup>\*</sup>

(China Railway Siyuan Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

**Abstract** In order to solve the problems of low dust removal efficiency and excessive particle concentration at the fan discharge port due to the irrational design of the gravity settling chamber, the flow field analysis and structural optimization design of the gravity settling chamber of a certain type of road sweeper was carried out. Firstly, FLUENT was used to simulate the internal flow field characteristics of the settling chamber and the movement of dust particles inside the chamber, and the single-factor effects of the key structural parameters of the settling chamber (angle of the dust shield, width of the dust baffle plate, and the distance of the inlet duct outlet from the top of the chamber) on the settling performance (velocity at the bottom of the chamber, velocity at the front of the outlet, and the along-travel pressure drop) were investigated. Based on Box-Behnken design and regression analysis, a multi-objective response surface optimization of the gravity settling chamber was carried out, and the optimial structural parameters of the gravity settling chamber were obtained. Finally, based on the DPM particle phase model, it was verified that the optimized gravity settling chamber had a better settling effect for dust particles with an equivalent particle size above 0.5 mm.

Keywords Road sweeper, Gravity settling chamber, Flow field characteristics, Response surface method

摘要 针对目前道路清扫车因重力沉降室结构设计不合理而导致除尘效率低下,风机排放口颗粒物浓度超标的问题,对 某型道路清扫车的重力沉降室进行流场分析与结构优化设计。利用 FLUENT 对沉降室内部流场特性及尘粒在其内部的运动 情况进行模拟,研究了沉降室的关键结构参数(挡尘罩夹角,挡尘板宽度和进风管出口距沉降室顶部距离)对沉降性能(沉降 室底部速度、出风口前部速度和沿程压力降)的单因素影响规律。基于 Box-Behnken 设计和回归分析对重力沉降室进行了多 目标响应面优化,得到了重力沉降室的最优结构参数。最后基于 DPM 颗粒相模型,验证了优化后的重力沉降室对当量粒径 0.5 mm 以上的尘粒有较优的沉降效果。

中图分类号	<b>寻:</b> U273.99	文献标识码:A	doi: <mark>10</mark> .	13922/j.cnki.cj	vst.202308004
关键词	道路清扫车	重力沉降室	流场特性	响应面法	

城市化进程加速、工业化程度提高以及交通运 输量的激增使得道路污染日益严重,道路清扫车已 成为目前城市路面养护工作中不可或缺的设备<sup>[1-3]</sup>。 重力沉降室作为清扫车的核心除尘部件,其流场特 性对清扫车除尘效果有着决定性的影响。解士翔<sup>[4]</sup> 对真空式吸尘车重力沉降室内的挡尘板结构形式 进行了研究,基于结构内部关键速度及流线分布情况提出了一种具有较优沉降效果的重力沉降室结构。孙勇<sup>[3]</sup>利用 CFD 对真空吸尘车除尘系统的内部流场进行分析,通过对存在涡流区域的不合理结构进行改进,提高了尘粒在清扫车除尘系统内的分离沉降效率。卢笑宇<sup>[6]</sup> 对清扫车的气力输送系统进

基金项目: 江苏省社会发展-重点项目-重大科技示范(BE2021621)

<sup>\*</sup>联系人: E-mail: 934135232@qq.com

行了流场特性分析,选取了系统内四个关键结构参数进行改进优化,优化后的气力输送系统压力梯度 减小、流场分布更均匀、基本无涡流现象。

上述研究对沉降室的结构设计具有理论指导 意义,但均只对影响沉降室除尘性能的结构参数进 行了单因素分析,即假设沉降室的各因素之间不存 在交互作用。但沉降室实际工作时,参数与参数之 间通常会存在交互作用,沉降室的沉降效果是各参 数共同作用的结果<sup>[7]</sup>。因此为了消除单因素分析带 来的结果偏差,本文借助 FLUENT 研究了重力沉降 室顶部距离对沉降性能的单因素影响规律,接着利 用 Box-Behnken 设计和回归分析<sup>[8]</sup>得到不同参数组 合对沉降室沉降性能的影响,以沉降室底部平均速 度、出风口前部平均速度和沿程压力降为性能评价 指标,对重力沉降室进行了多目标响应面优化。

# 1 沉降室仿真模型的建立

#### 1.1 尘粒的重力沉降机理

如下图1所示,道路上的尘粒被吸尘盘吸起后, 经气力输送管道进入重力沉降室中,在沉降室中依 靠自身重力沉降与气流分离<sup>[9]</sup>。



尘粒沉降的过程中,竖直方向主要受到自身重 力G、气流动力F<sub>D</sub>和气流浮力F<sub>f</sub>(即上升力)的作 用<sup>[10-11]</sup>。对于大质量的金属颗粒物、石块、树枝等, 气流对它们的气流动力和浮力远小于它们自身的 重力,这些垃圾会在降落过程中保持加速运动直至 接触沉降室底部;粒径极小、质量极低的灰尘颗粒 所受的气流动力和浮力大于其自身重力,难以依靠 自身重力下落,会随气流被输送至滤尘仓内被滤筒 吸附<sup>[12-13]</sup>。

对于质量相对较小的细小尘粒,其自身重力与 气流动力和气流浮力的大小相当,细小尘粒的沉降 过程按其受力不同主要分为以下三个阶段:

(1)初始状态: 尘粒从静止开始向下做自由落体运动, 此时尘粒的速度 $v_c$ 为 0, 尘粒所受气流动力 $F_{\rm D}$ 为 0。尘粒受到自身重力G和极小的气流浮力 $F_{\rm f}$ 共同作用获得竖直向下的加速度a, 所受合力 $F_{\rm H} = G - F_{\rm f} = m_{\rm c}a$ 。

(2)加速沉降: 尘粒竖直向下做加速运动, 气流动力增大, 此时所受合力 *F*<sub>H</sub> = *G* - *F*<sub>f</sub> - *F*<sub>D</sub> = *m*<sub>c</sub>*a*, 尘粒竖直向下的加速度因气流动力的增大而逐渐减小。

(3)匀速沉降:随着尘粒气流动力继续增大,当 竖直方向上合力F<sub>H</sub>为0时,尘粒的加速度a减小为0, 气流动力不再变化,尘粒进入匀速沉降阶段。各力 大小及尘粒所受的合力表达式分别如下:

$$F_{\rm D} = C_{\rm f} \pi v_c^2 d_{\rm D}^{-2} \rho / 8 \tag{1}$$

$$F_{\rm f} = \pi d_{\rm D}^{3} \rho g/6 \qquad (2)$$

$$G = \pi d_{\rm D}{}^3 \rho_{\rm r} g/6 \tag{3}$$

$$F_{\rm H} = F_{\rm f} + F_{\rm D} - G = m_{\rm c}a \qquad (4)$$

式中,  $C_f$ 为气动阻力系数, 湍流时取值为 0.44;  $v_c$ 为 气流与尘粒的相对速度, m/s;  $d_D$ 为尘粒的当量粒径, m;  $\rho$ 为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_r$ 为尘粒的真实密度, kg/m<sup>3</sup>;  $m_c$ 为尘粒的质量, kg; g为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

由式(1)~(4)可推导得到尘粒能够依靠自身重 力匀速沉降的临界风速:

$$v_{\rm c} = \sqrt{\frac{4d_{\rm D}(\rho_{\rm r} - \rho)g}{3\rho C_{\rm f}}} \tag{(5)}$$

本文所研究的清扫车滤尘仓可以过滤和吸附 当量粒径在 0.5 mm 以内的灰尘颗粒,为了确保沉降 室内当量粒径大于 0.5 mm 的尘粒都能依靠自身重 力沉降,取当量粒径 $d_{\rm D} = 0.5$  mm,路面典型尘粒<sup>[14]</sup> 中砂石的真实密度为 1500~2000 kg/m<sup>3</sup>,这里取最小 值 $\rho_{\rm r}$ =1500 kg/m<sup>3</sup>,将数据代入式(5)计算出:

#### $v_{\rm c} = 4.15 \text{ m/s}$

因此当沉降室底部风速v ≤ 4.15 m/s时,当量粒 径大于 0.5 mm 的尘粒到达沉降室底部后不会被气 流再次吹起,均可以依靠自身的重力沉降。

#### 1.2 沉降室结构参数

重力沉降室是清扫车除尘系统中用于沉降和 分离尘粒的核心部件,依靠沉降室中的挡尘罩、挡 尘板等惯性除尘器对携尘气流进行阻挡与分流,能 够更好的促使尘粒分离沉降。沉降室结构如下图 2 所示,主要结构参数包括:沉降室长度C<sub>1</sub>、宽度C<sub>2</sub>、 高度C<sub>3</sub>、进风管出口距顶部距离 *H*,挡尘罩夹角α, 挡尘板宽度 *L*,挡尘板高度 *R*。



图2 沉降室结构。(a)重力沉降室沿进风管横截面图,(b)重 力沉降室沿进风管横截面图

Fig. 2 Cross-sections of the settling chamber. (a) Cross-section along the inlet duct, (b)Longitudinal section along the inlet duct

重力沉降室是在清扫车的二类底盘基础之上 进行安装调试的,二类底盘上需同时布置离心风机、 水箱、液压系统、滤尘仓和沉降室等,当底盘型号确 定后,沉降室箱体的长度、宽度和高度一般就不做 改变<sup>[15]</sup>。因此本文主要研究挡尘罩夹角α、挡尘板 宽度L和进风管出口距沉降室顶部距离H对沉降室 沉降特性的影响。

#### 1.3 仿真参数设置

利用 FLUENT 对尘粒在沉降室内的运动过程 进行模拟,采用欧拉-拉格朗日方法,建立颗粒相的 DPM 模型。假设离散相颗粒不发生形变,与沉降室 内的空气不存在耦合作用,将其简化为气固两相流 问题,即离散相颗粒在重力沉降室内的连续相空气 流域内的颗粒流动问题。

重力沉降室的流场仿真采用速度入口(Velocity-

inlet)和速度出口(Velocity -outlet)边界条件。道路 清扫车正常工作时风机转速为 1800 r/min,风机 流量为 11510 m<sup>3</sup>/h,利用毕托管风速测量仪测得重 力沉降室的进风口速度为 35 m/s,出风口速度为 11 m/s。

环境温度设置为 25℃,时间响应为稳态求解, 重力沉降室内部的空气流动为不可压缩流动,即空 气密度恒定。选用标准 *k-e* 湍流模型,有限体积法 (FVM)模拟重力沉降室工作时的内部流场。

# 2 沉降室结构参数对沉降性能的影响

沉降室沉降性能评价指标参考面如下图 3 所示。本文主要分析挡尘罩夹角α、挡尘板宽度L和进风管出口距沉降室顶部距离H对沉降室沉降特性的单因素影响。选择重力沉降室底部平均速度Y<sub>1</sub>、出风口前部平均速度Y<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>越小,则携尘气流在沉降室内部运动的时间越长,尘粒依靠自身重力沉降的可能性就越大。)和沿程压力降p<sub>0</sub>(沉降室的进风口至出风口的压强差,反映沿程压力损失的大小)作为重力沉降室沉降特性的评价指标。



Fig. 3 Reference surfaces for evaluation indicators

# **2.1** 挡尘罩夹角 α

设定进风管出口距沉降室顶部距离*H*为 300 mm, 挡尘板宽度*L*为 1000 mm,改变挡尘罩夹角α,对应 *Y*<sub>1</sub>、*Y*<sub>2</sub>和*Y*<sub>3</sub>的变化规律如下图 4 所示。

由图 4 可知:随着α从 60°逐渐增大至 180°, Y<sub>1</sub> 和p<sub>0</sub>先减小后增大, Y<sub>2</sub>先增大后减小。这是由于α 较小时,沿进风管出口排出的气流经由挡尘罩分流, 折射部位主要集中在沉降室顶部和侧壁的中下部, 此时沉降室底部受到折射气流的影响较大;随着α 逐步变大,气流的折射部位逐渐集中在沉降室顶部





和侧壁的上部,减少了对沉降室底部的扰动,Y<sub>1</sub>逐渐减少,Y<sub>2</sub>逐渐增大。同时气流在沉降室侧壁折射位置的上移,使气流从进风管出口至沉降室出风口的路径变短,沿程气力损耗降低,进而p<sub>0</sub>逐渐减小。

α继续增大至 180°的过程中, 挡尘罩的形状趋 近于平面, 逐渐失去了分流作用。大部分气流经沉 降室顶部折射后直接向下对底部空间造成较大扰 动, 此时 Y<sub>1</sub>增大, 出风口前部受到气流的扰动影响减 小, Y<sub>2</sub>减小。同时气流在从进风管出口至沉降室出 风口的路径变长, 沿程气力损耗增加, 进而 p<sub>0</sub>增大。 为确保 Y<sub>1</sub>小于 4.15 m/s, 挡尘罩夹角α的调整范围为 120°~150°。

# 2.2 挡尘板宽度 L

设定挡尘罩夹角α为 90°, 进风管出口距沉降室 顶部距离H为 300 mm, 改变挡尘板宽度L, 对应Y<sub>1</sub>、 Y<sub>2</sub>和p<sub>0</sub>的变化规律如下图 5 所示。



Fig. 5 Influence of L on settling characteristics

随着 L 从 800 mm 逐渐增大至 1600 mm, Y<sub>1</sub>和 Y<sub>2</sub>均逐渐减小, 而p<sub>0</sub>逐渐增大。这是由于进风管出 口排出的气流在平行于进风管纵截面方向上经由 挡尘罩分流, 而平行于进风管横截面方向的气流则 被挡尘板阻碍分流, 防止携带尘粒的气流从进风管 排出后直接进入沉降室出风口, 造成尘粒排放的二 次污染。而 L 的增加意味着挡尘板对气流的阻碍 分流作用增强, 气流从进风管出口至沉降室出风口 的沿程气力损耗增加, 进而 po增大。同时沉降室上 部受到气流的扰动影响也因为挡尘板宽度的增加 而减小, Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>均减小。

适当增加 L,虽然会增加气力输送过程中的沿程损耗,即  $p_0$ ,但是可以有效降低  $Y_1$ 和  $Y_2$ ,提高沉降室的降尘能力,挡尘板宽度 L的调整范围为 1200~1400 mm。

#### 2.3 进风管出口距沉降室顶部距离 H

设定挡尘罩夹角α为 90°, 挡尘板宽度 L为 1000 mm, 改变进风管出口距沉降室顶部的距离*H*, 对应*Y*<sub>1</sub>、*Y*<sub>2</sub>和*Y*<sub>3</sub>的变化规律如下图 6 所示。



图6 进风管出口距沉降室顶部距离对沉降特性的影响 Fig. 6 Influence of *H* on settling characteristics

随着H从 300 mm 逐渐增大至 700 mm, Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub> 先减小后增大,沿程压力降先增大后减小。在H为 300~500 mm 时,进风管出口位置高于挡尘板最下 端,气流从进风管出口流出后,呈发散辐射的趋势, 随后受到挡尘罩和挡尘板的阻碍分流。H越来越大 时,气流受到挡尘罩和挡尘板的阻碍前辐散的程度 越大,气力损耗越大,速度下降得越快。此时气流 到达挡尘罩时速度下降,因此Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>减小, p<sub>0</sub>增加。

当H超过 500 mm 后,进风管出口位置低于挡 尘板最下端,此时气流从进风管出口流出后,一部 分发散辐射的气流直接从挡尘板下部通过进入沉 降室出风口。随着H的增加,更多气流直接从挡尘 板下部通过,挡尘板的阻碍分流作用大幅下降,气 流的沿程气力损耗减小, po减小,同时Y1和Y2均增大。 为确保Y1小于 4.15 m/s,进风管出口距沉降室顶部

971

距离 H 的调整范围为 400~500 mm。

# 3 Box-Behnken 试验与响应面分析

上节的单因素试验已对挡尘罩夹角α、挡尘板 宽度 L、进风管出口距沉降室顶部距离 H进行了参 数的初步优选,有效减少了后续试验的次数,提高 试验设计的效率。因此针对单因素优选后的范围 值,设计三因素三水平的 Box-Behnken 试验,因素水 平设置入下表1 所示。

表1 因素水平表

	Tab. 1 Fa	ctor levels table	
水平	α/°	<i>L</i> /mm	<i>H</i> /mm
-1	120	1200	400
0	135	1300	450
1	150	1400	500.

#### 3.1 Box-Behnken 试验设计

根据软件 Design-Expert 生成的 Box-Behnken 试验设计表进行仿真模拟试验,以沉降室各结构参 数为自变量,以沉降室底部平均速度 $Y_1$ 、出风口前 部平均速度 $Y_2$ 和沿程压力降 $p_0$ 作为评价指标,试验 结果如下表 2 所示。

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Tab. 2 Design and results of the Box-Behnken test

试验	α/°	L/mm	<i>H</i> /mm	$Y_1/m/s$	$Y_2/m/s$	p <sub>0</sub> /Pa
1	150	1300	500	3.52	7.84	963.23
2	150	1300	400	3.83	7.95	965.46
3	120	1200	450	4.02	8.15	958.5
4	150	1200	450	3.93	8.29	955.44
5	120	1300	500	3.65	7.59	965.83
6	135	1200	500	3.88	8.23	952.71
7	120	1300	400	3.91	7.72	968.72
8	135	1300	450	3.59	7.69	970.18
9	135	1400	500	3.62	7.19	978.64
10	120	1400	450	3.49	7.01	984.92
11	135	1400	400	3.52	7.35	980.38
12	135	1300	450	3.73	7.70	970.18
13	135	1300	450	3.69	7.76	970.24
14	135	1300	450	3.71	7.74	969.27
15	150	1400	450	3.12	7.41	981.84
16	135	1200	400	4.14	8.24	953.98
17	135	1300	450	3.74	7.75	970.19

根据表 2 的数据样本, 通过软件 Design-Expert 分别得到 $Y_1$ 、 $Y_2$ 和 $p_0$ 与结构参数: $\alpha$ 、L和H的三元 二次回归方程:

$$Y_1 = 3.69 - 0.0837\alpha - 0.2775L - 0.0913H - 0.0700\alpha L - 0.0125\alpha H + 0.0900LH - 0.0573\alpha^2 + 0.0052L^2 + 0.0928H^2$$
(6)

$$Y_{2} = 7.73 + 0.1275\alpha - 0.4937L - 0.0512H + 0.0650\alpha L + 0.0050\alpha H - 0.0375LH + 0.0047\alpha^{2} - 0.0178L^{2} + 0.0423H^{2}$$
(7)

$$P_{0} = 970.01 - 1.50\alpha + 13.1400L - 1.0200H - 0.0050\alpha L + 0.1650\alpha H - 0.1175LH - 0.2273\alpha^{2} + 0.3902L^{2} - 3.9700H^{2}$$
(8)

#### 3.2 回归模型的显著性检验

在模型的显著性检验中,模型的 P 值越小 (P<0.05),且失拟项不显著(P>0.05),则该模型的 拟合精度越高,响应面拟合模型能够更好地解释因 变量的变异。

沉降室底部平均速度*Y*<sub>1</sub>回归模型的方差分析 结果如下表 3 所示。回归模型的 *P* 值为 0.0038 (<0.05);同时失拟项的 *P* 值为 0.0750(>0.05),表 明*Y*<sub>1</sub>的回归模型显著且拟合精度较好。由α、*L*、*H* 的 *P* 值可判断:各结构参数对*Y*<sub>1</sub>的影响程度从大到 小依次为*L*>*H*>α。

表 3	沉降室底部平均速度Y1二次多项式的方差分析

Tab. 3 ANOVA of quadratic polynomial model for  $Y_1$ 

			-	
方差来源	平方和	自由度	均方	P 值
模型	0.8394	9	0.0933	0.0038
α	0.0561	1	0.0561	0.0494
L	0.6160	1	0.6160	0.0001
Н	0.0666	1	0.0666	0.0362
$\alpha L$	0.0196	1	0.0196	0.2035
$\alpha H$	0.0006	1	0.0006	0.8094
LH	0.0324	1	0.0324	0.1144
$\alpha^2$	0.0138	1	0.0138	0.2777
$L^2$	0.0001	1	0.0001	0.9171
$H^2$	0.0362	1	0.0362	0.0983
残差	0.0698	7	0.0100	
失拟项	0.0553	3	0.0184	0.0750
纯误差	0.0145	4	0.0036	
总和	0.9092	16		

出风口前部平均速度Y<sub>2</sub>回归模型的方差分析 结果如下表4所示。回归模型的P值小于0.0001; 同时失拟项的P值为0.5933(>0.05),表明Y<sub>2</sub>的回 归模型显著且拟合精度较好。由α、L、H的P值可 判断:各结构参数对出风口平均速度Y<sub>2</sub>的影响程度 从大到小依次为L>α>H。

Tab. 4	ANOVA	of quadratic	polynomial	model for	$Y_2$

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>P</i> 值
模型	2.13	9	0.2370	< 0.0001
α	0.1301	1	0.1301	< 0.0001
L	1.95	1	1.95	< 0.0001
Н	0.0210	1	0.0210	0.0016
$\alpha L$	0.0169	1	0.0169	0.0029
$\alpha H$	0.0001	1	0.0001	0.7418
LH	0.0056	1	0.0056	0.0369
$\alpha^2$	0.0001	1	0.0001	0.7480
$L^2$	0.0013	1	0.0013	0.2519
$H^2$	0.0075	1	0.0075	0.0207
残差	0.0060	7	0.0009	
失拟项	0.0021	3	0.0007	0.5933
纯误差	0.0039	4	0.0010	
总和	2.14	16		

沿程压力降*p*<sub>0</sub>回归模型的方差分析结果如下 表 5 所示。回归模型的 *P* 值小于 0.0001; 同时失拟 项的 *P* 值为 0.4307(>0.05), 表明 *Y*<sub>3</sub>的回归模型显 著且拟合精度较好。由α、*L*、*H* 的 *P* 值可判断: 各 结构参数对沿程压力降*p*<sub>0</sub>的影响程度从大到小依次 为*L*>α>*H*。

Tab. 5	ANOVA of quadratic polynomial model for $p_0$			
方差来源	平方和	自由度	均方	<i>P</i> 值
模型	1475.92	9	163.99	< 0.0001
α	18.00	1	18.00	< 0.0001
L	1382.07	1	1382.07	< 0.0001
Н	8.26	1	8.26	0.0003
$\alpha L$	0.0001	1	0.0001	0.9820
$\alpha H$	0.1089	1	0.1089	0.4667
LH	0.0552	1	0.0552	0.6007
$\alpha^2$	0.2174	1	0.2174	0.3128
$L^2$	0.6412	1	0.6412	0.1041
$H^2$	66.52	1	66.52	< 0.0001
残差	1.29	7	0.1839	
失拟项	0.5963	3	0.1988	0.4307
纯误差	0.6907	4	0.1727	
总和	1477.21	16		

表 5 沿程压力降 po 二次多项式的方差分析

.

#### 3.3 沉降室参数的交互响应面分析

根据回归模型的分析结果,利用 Design-Expert 绘制各因素的 3D 交互响应曲面图。结构参数:挡 尘罩夹角α、挡尘板宽度 L、和进风管出口距沉降室 顶部距离 H 对沉降室底部平均速度 Y<sub>1</sub>、出风口前部 平均速度 Y<sub>2</sub>和沿程压力降 p<sub>0</sub>的因素交互响应曲面分 别如下图 7、8 和 9 所示。



图7 沉降室底部平均速度 $Y_1$ 的因素交互响应曲面。(a)L和 $\alpha$ 的交互响应面,(b)H和 $\alpha$ 的交互响应面,(c)H和L的交互响应面

Fig. 7 Factor interaction response surface for  $Y_{1.}$  (a) Response surface of L and  $\alpha$ , (b) response surface of H and  $\alpha$ , (c) response surface of H and L



图8 出风口前部平均速度 Y<sub>2</sub>的因素交互响应曲面。(a)L 和α的交互响应面,(b)H 和α的交互响应面,(c)H 和 L 的交互响应面

Fig. 8 Factor interaction response surface for  $Y_2$ . (a) Response surface of L and  $\alpha$ , (b) response surface of H and  $\alpha$ . (c) response surface of H and L



图9 沿程压力降 $p_0$ 的因素交互响应曲面。(a)L和 $\alpha$ 的交互响应面,(b)H和 $\alpha$ 的交互响应面,(c)H和L的交互响应面 Fig. 9 Factor interaction response surface for  $p_0$ . (a) Response surface of L and  $\alpha$ , (b) response surface of H and  $\alpha$ , (c) response surface

of H and L

(1)沉降室底部平均速度Y<sub>1</sub>的响应面分析

从图 7 (a) 可以看出随着 L 和α的增加, Y<sub>1</sub>越来 越小, α对 Y<sub>1</sub>的影响程度随着 L 的增加而增加; 从 图 7(b) 可以看出, 随着α和 H 的增加, Y<sub>1</sub>略微减小, 当 H 较小时, α对 Y<sub>1</sub>的影响程度很小; 如图 4 所示, L 越大, Y<sub>1</sub>越小, H 对 Y<sub>1</sub>的影响程度随着 L 的增加而 减小。

(2)出风口前部平均速度Y2的响应面分析

由图 8(a) 可知 L 越大, α越小, Y<sub>2</sub>越小, α对Y<sub>2</sub>的 影响程度随着 L 的增加而增加; 由图 8(b) 可知随着 α的增加, Y<sub>2</sub>略微增大, 同时 H 对Y<sub>2</sub>的影响程度很小; 如图 8(c) 所示, L 越大, Y<sub>2</sub>越小, 同时 H 对Y<sub>2</sub>的影响 程度很小。

(3)沿程压力降po的响应面分析

由图 9(a) 可知: L 越小, Y<sub>3</sub>越小, 同时α对Y<sub>3</sub>的 影响程度很小; 由图 9(b) 可知随着 H 的增加, Y<sub>3</sub>先 增大后减小, 而此时α对Y<sub>3</sub>的影响程度很小; 如 图 9(c) 所示, L 越大, Y<sub>3</sub>越大, Y<sub>3</sub>随着 H 的增加呈现 出先增大后减小的趋势。

# 3.4 沉降室参数的多目标响应面优化

针对 $Y_1$ 、 $Y_2$ 和 $p_0$ 的回归模型, 以 $Y_1$ 、 $Y_2$ 和 $p_0$ 同时 取最小值为约束条件, 运用 Design-Expert 软件的 Optimization 功能进行多目标响应面优化。

求解回归模型得到的重力沉降室最优参数为:  $\alpha$ =150°、*L*=1360 mm、*H*=500 mm。最优参数下的 *Y*<sub>1</sub>=3.39 m/s, *Y*<sub>2</sub>=7.57 m/s, *p*<sub>0</sub>=971.53 Pa。

为验证响应面优化参数的可靠性,在最优参数 条件下进行 Fluent 仿真试验,仿真结果为 $Y_1$ =3.54 m/s,  $Y_2$ =7.41 m/s,  $p_0$ =965.44 Pa。响应面优化得到的近 似值与仿真计算结果的误差率分别为 4.23%, 2.16% 和 0.63%,表明该响应面优化得到的参数具有较高 的可靠性。

# 4 优化后重力沉降室的流场特性分析

根据上文对沉降室的单因素分析与多目标响 应面优化,对沉降室参数进行改进:α由90°调整为 150°,L由1000 mm调整为1360 mm,H由300 mm 调整为500 mm。为了验证沉降室优化后的沉降特 性,对其内部流场和颗粒相运动情况进行分析。

#### 4.1 气相分析

优化后的重力沉降室沿进风管横截面速度分 布情况如下图 10 所示。从图中可以看出,在进风管 的横截面,气流从进风管出口高速流入沉降室后发 生辐散,气流两侧区域速度迅速下降,与挡尘板接 触时气流速度已下降至 13~18 m/s;由于 H和 L 的 增大,气流与挡尘板接触后,挡尘板充分发挥了阻 碍和导流作用,将部分气流引向沉降室后部,此时 气流速度稳定在 7~10 m/s,无涡流产生。Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>较 优化前均下降至 3.5 m/s 和 7 m/s 左右,均有利于尘 粒在沉降室依靠自身重力进行沉降。



优化后的重力沉降室沿进风管纵截面速度分 布情况如下图 11 所示。从图中可以看出,在进风管 的纵截面,从进风管出口高速流出的气流受到了挡 尘罩的阻碍和分流作用;由于α增加,气流的折散部 位较优化前发生了上移,主要集中在沉降室顶部和两侧壁的上部,此处的速度下降至12~17 m/s;此时 沉降室底部受到两侧壁的折散气流扰动大幅下降, 气流速度下降至3~4 m/s,气流对尘粒的沉降过程影 响较小。



图11 沿进风管纵截面速度分布



优化后的重力沉降室底部速度分布情况如下 图 12 所示。从图中可以看出,气流主要从沉降室两 侧壁后方的向沉降室中前部运动,速度基本呈现对 称分布;风速较高的区域较优化前大幅减小,主要 集中在进风管与挡尘板附近和沉降室尾部侧壁,最 大速度为4.27 m/s,绝大部分区域风速在4 m/s 以下。 优化后的进风管、挡尘板和挡尘罩的结构及布置合 理,使挡尘板和挡尘罩能够起到充分的阻碍与分流 作用,到达沉降室底部的气流速度较优化前大幅下 降,有利于尘粒的沉降。



图12 沉降室底部速度分布 Fig. 12 Velocity distribution at the bottom

# 4.2 颗粒相分析

将尘粒描述为离散的 DPM 颗粒相模型,模拟 颗粒相在优化后的沉降室连续相流体域内的运动 情况。颗粒相的特征参数如表 6 所示。

颗粒在优化后沉降室内部的运动轨迹如下图 13 所示。从图可知, 尘粒经进风管进入沉降室后, 在 挡尘罩和挡尘板的分流阻碍作用下, 绝大部分尘粒

表 6 颗粒相特征参数

Tab. 6 Characteristic parameters of granular phase

参数名	特征参数
当量粒径/mm	0.5
颗粒密度/kg/m <sup>3</sup>	1500
质量流量/kg/s	1
X方向速度/m/s	0
Y方向速度/m/s	35
Z方向速度/m/s	0
注入面	沉降室进风口
捕捉条件	沉降室底部
反弹条件	沉降室侧壁
逃逸条件	沉降室出风口



图13 颗粒相运动轨迹。(a)重力沉降室沿进风管横截面图, (b)重力沉降室沿进风管纵截面图

Fig. 13 Trajectories of the particle phases. (a) Cross-section along the inlet duct, (b) longitudinal section along the inlet duct

被气流带向沉降室底部, 尘粒在自身重力的作用下 开始沉降; 由于沉降室底部气流速度较优化前大幅 降低至4m/s, 大部分尘粒到达沉降室底部后不会再 被气流吹起, 极小一部分尘粒在沉降室底部重新被 高速气流带起向出风口聚集并逃逸, 优化后的沉降 室具有较优的沉降效果。

利用 DPM Iteration 统计当量粒径 0.5 mm 的尘 粒在重力沉降室内的沉降效率。重力沉降室的进 风口注入尘粒数为 1792 个,优化前:沉降室出风口 的尘粒逃逸数为 274 个,沉降效率为 84.71%;优化 后:沉降室出风口颗粒逃逸数为 104 个,沉降效率提 升至 94.20%。

#### 4.3 沉降性能

优化后沉降室的沉降特性较优化前显著改善, 主要体现在: 在p<sub>0</sub>略微增加的前提下, Y<sub>1</sub>从 4.84 m/s 下降至 3.54 m/s, 降低 26.86%; Y<sub>2</sub>从 8.4 m/s 下降至 7.41 m/s, 降低 11.79%; 当量粒径 0.5 mm 的尘粒在 沉降室中的沉降效率从 84.71% 提升至 94.20%。以 上对比分析表明, 优化后的重力沉降室对当量粒径 0.5 mm 以上的尘粒有较优的沉降效果, 达到了流场 特性优化的目的。

# 5 结论

本文利用 FLUENT 研究了重力沉降室的挡尘 罩夹角a, 挡尘板宽度 L 和进风管出口距沉降室顶 部距离 H 对沉降特性的影响, 具体结论如下:

(1)对沉降特性进行单因素分析,获得了沉降
性能较优的参数取值范围: α为 120°~150°, L为
1200~1400 mm, H为 300~500 mm;

(2)利用 Box-Behnken 设计和响应面分析得到
重力沉降室的最优结构参数: α为 150°, L 为 1360
mm, H 为 500 mm;

(3)优化后的重力沉降室较优化前:沿程压力 降*p*<sub>0</sub>略微增加, *Y*<sub>1</sub>降低 26.86%, *Y*<sub>2</sub>降低 11.79%, 尘粒 的沉降效率提升至 94.20%;

本文提出的清扫车沉降室的结构优化设计思路(参数化建模、流场仿真、多目标响应面优化、气固两相流验证)可用于指导实际生产中清扫车沉降 室结构的研发设计。

#### 参考文献

- [1] Zhang Dongbo. Development status and future trend of new energy sweeper in China[J]. Automobile Practical Technology, 2020(03): 27-29 (张栋波. 我国新能源清 扫车发展现状与未来趋势 [J]. 汽车实用技术, 2020(03): 27-29(in chinese))
- [2] Min Haitao, Zhang Zhiwei, Yu Yuanbin et al. Development trend of intelligentized control of road sweeper topmounted operating mechanism[J]. Specialized Vehicle, 2019(08): 64-68 (闵海涛, 张明智, 于远彬, 等. 道路清 扫车上装作业机构智能化控制发展趋势 [J]. 专用汽车,

2019(08): 64-68(in chinese))

- [3] LIU Yang, ZHANG Ke. Introduction and development trend analysis of road sweeper[J]. Automobile Practical Technology, 2018(15): 269-271 (刘洋, 张珂. 道路清扫 车介绍及发展趋势分析 [J]. 汽车实用技术, 2018(15): 269-271(in chinese))
- [4] Xie Shixiang. Flow field analysis and structural improvement of vacuum truck suction system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016 (解士翔. 真空吸尘车吸尘系 统的流场分析及结构改进 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016(in chinese))
- [5] SUN Yong. Optimized design and simulation analysis of air circuit system of vacuum cleaner[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008 (孙勇. 真空吸尘车气路系 统优化设计与仿真分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008(in chinese))
- [6] Lu Xiaoyu. Research on pneumatic conveying system and high speed flow field of sweeper[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022 (卢笑宇. 清扫车气力输送系统及高速 流场研究 [D]. 西安: 长安大学, 2022(in chinese))
- [7] WANG Guo-Zhi, TAN Yuan-Wen. Optimized design of vacuum hood structure based on FLUENT-EDEM coupling[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(10): 996-1001 (王国志, 谭元文. 基于 FLU-ENT-EDEM 耦合的吸尘單结构优化设计 [J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(10): 996-1001(in chinese))
- [8] QIAN Xiaoming, WANG Hao, WANG Lijing, et al. Optimization of the preparation and properties of β-cyclodextrin wormwood essential oil inclusion complexes by Box-Behnken response surface method[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2022, 41(06): 49–56 (钱晓明, 王浩, 王立晶, 等. Box-Behnken 响应面法优化 β-环糊 精艾草精油包合物的制备及其性能 [J]. 天津工业大学 学报, 2022, 41(06): 49–56(in chinese))
- [9] LUO Peng, LEI Zeyong, ZHONG Lin. Flue gas flow characteristics during decommissioned metal melting and optimization of dust extraction hood[J]. Mechanical Research and Application, 2022, 35(06): 116–119+123 (罗 鹏, 雷泽勇, 钟林. 退役金属熔炼过程中的烟气流动特 性及吸尘罩的优化 [J]. 机械研究与应用, 2022, 35(06): 116–119+123(in chinese))
- [10] Kimberly S, Heyden, etc. Effect of Particle Characteristics on Particle Pickup Velocity[J]. Power Techonology, 2003, 131(1): 7–14
- [11] Kalman H, Satran A, Meir D, et al. Pickup (Critical) speed of particles[J]. Power Technology, 2005, 160(2):

103-113

- [12] Wang Xingwang. Research on the structure design and performance matching optimization of pneumatic system of 8-ton sweeper[D]. Yantai: Yantai University, 2022 (王 兴旺. 8 吨洗扫车气力系统结构设计与性能匹配优化研 究 [D]. 烟台: 烟台大学, 2022(in chinese))
- [13] Xiong Zongqian. Design and analysis of dust removal system for sweeper based on gas-solid coupling[D]. Xiamen: Xiamen Institute of Technology, 2021 (熊宗钱. 基 于气固耦合的清扫车除尘系统设计与分析 [D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021(in chinese))
- [14] HU Junping, ZHANG Ling, SHI Tianliang et al. Numerical simulation and test of the flow field of a new type of

dust suction device based on the initiation characteristics of dust particles[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020, 51(09): 2442-2450 (胡 均平, 张灵, 史天亮, 等. 基于尘粒启动特性的新型吸尘 装置流场数值模拟及试验 [J]. 中南大学学报 (自然科 学版), 2020, 51(09): 2442-2450(in chinese))

[15] Technical Committee for Standardization of Construction Machinery of Machinery Industry. JB/T 7303-2007, Road Sweeper[S]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2007 (机械工业工程机械标准化技术委员 会. JB/T 7303-2007, 路面清扫车 [S]. 北京: 国家发展和 改革委员会, 2007(in chinese))