

# 柴油车尾气中碳烟颗粒净化研究

张英才<sup>1</sup>, 陈明功<sup>2\*</sup>, 潘帆<sup>2</sup>, 荣俊锋<sup>2</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 王志荣<sup>1</sup>, 李明利<sup>1</sup>, 姚会军<sup>1</sup>

(1. 国家能源集团神东煤炭技术研究院, 陕西 神木 719315;

2. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**引入了一种自研并流式超重力旋转填料床(RPB)系统,基于气液耦合机制,显著提升了对微米级碳烟颗粒的捕集效率。以超重力因子(0~580)、气体流速(2.43~7.05 m/s)和液体喷淋量[4~16 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)]为主要研究参数,针对超重力旋转填料床系统的压降特性进行了系统性的试验研究,测试它们对静态压降、离心压降以及总压降等多个关键参数的影响。结果显示,在超重力因子为580、液体喷淋量为16 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)、气体流速为2.43 m/s的条件下,该系统对碳烟颗粒的捕集效率达到了98.1%,表现出卓越的性能。基于试验数据,成功建立了气相压降的预测模型,该模型对压降预测的偏差在±14%以内。RPB系统在柴油尾气处理中具有良好应用前景,所建立的模型可为系统优化设计提供参考。

**关键词:**并流旋转填料床;碳烟颗粒物;脱除率;气相压降

中图分类号:TQ051.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)02-0166-08

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.02.027

## Study on the purification of soot particles from diesel exhaust

ZHANG Ying-cai<sup>1</sup>, CHEN Ming-gong<sup>2\*</sup>, PAN Fan<sup>2</sup>, RONG Jun-feng<sup>2</sup>, LI Peng<sup>1</sup>,

WANG Zhi-rong<sup>1</sup>, LI Ming-li<sup>1</sup>, YAO Hui-jun<sup>1</sup>

(1. Shendong Coal Technology Research Institute, CHN Energy, Shenmu 719315, China; 2. School of

Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In this study, a self-researched concurrent-flow supergravity rotating packed bed (RPB) system was introduced to significantly improve the capture efficiency of micrometer-sized particles based on the gas-liquid coupling mechanism. The supergravity factor (0–580), gas-phase flow rate (2.43–7.05 m/s), and liquid spray density [4–16 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)] were utilized as the principal study parameters. A systematic experimental study was conducted to characterize the pressure drop of the supergravity rotating packed bed system, including several key parameters such as static packing pressure drop, centrifugal pressure drop and total pressure drop. The test results show that the capture efficiency of the system for fine particles reaches 98.1% with a supergravity factor of 580, a liquid spray density of 16 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) and a gas-phase flow rate of 2.43 m/s, which is an excellent performance. Based on the experimental data, a prediction model for the gas-phase pressure drop was successfully established, and the deviation of the pressure drop prediction of the model was within ±14%. The RPB system has a good application prospect in diesel exhaust treatment, and the established model can provide a reference for the system optimization design.

**Key words:** co-current rotating packed bed; soot particles; removal rate; gas phase pressure drop

随着工业发展和机动车数量的日益增加,柴油车尾气污染逐渐成为环保问题的焦点之一。这些尾气中含有大量PM<sub>2.5</sub>颗粒,包括可溶性有机物、元素碳等成分,不仅影响空气质量,更会危害人体健康<sup>[1-2]</sup>。目前常用的柴油车尾气处理技术如DOC和DPF虽然有一定效果,但都存在明显不足。DOC需要昂贵的贵金属催化剂,DPF则容易堵塞排气管并增加油耗<sup>[3-4]</sup>。低温等离子体技术虽然能分解NO<sub>x</sub>等气态形式的污染物,却需要耦合V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/

TiO<sub>2</sub>催化剂才能将颗粒物氧化效率从12%提升至67%,这种贵金属依赖特性大幅增加了运维成本<sup>[5-7]</sup>。

针对上述问题,本研究使用自研并流式超重力旋转填料床展开针对性试验。通过改变超重力因子、液体喷淋量、气体流速和气体中碳烟颗粒初始浓度等参数,考察对碳烟颗粒脱除率的影响;采用响应面分析法,考察超重力因子、液体喷淋量、气体流速3个参数两两之间交互作用对碳烟颗粒脱除率的影响;对流旋转填料床的气相压降进行研究,改变超重

收稿日期:2025-05-16;修回日期:2025-12-03

基金项目:安徽省现代环境工程国际联合研究中心(安徽理工大学)开放基金重点项目(XDHJGC2022002);安徽省现代环境工程国际联合研究中心(安徽理工大学)开放基金重点项目(XDHJGC2024003)

作者简介:张英才(1987-),男,本科,研究方向为柴油车尾气净化,674865911@qq.com;陈明功(1966-),男,博士,教授,研究方向为汽车尾气净化,通讯联系人,mgchen@aust.edu.cn。

力因子、液体喷淋量、气体流速,考察其对并流旋转填料床的静床压降、离心压降、干床压降和湿床压降的影响;通过对实验数据拟合,分别得出静床压降、离心压降和湿床压降的气相压降模型参数,确定并流旋转填料床的气相总压降关联式<sup>[8-11]</sup>。研究结果可为柴油车尾气治理提供新的解决方案<sup>[12-14]</sup>。

## 1 实验

采用自研的并流式超重力旋转床,液喷方式为外喷,气体从机体外部向填料内部区域流动,如图1所示。设备轴向顶部装有一个液体分布器,采用316不锈钢材料制成,管壁上均匀开6个喷淋孔用于转子区域进液。转子的填充物选用不锈钢丝网填料(内径为120 mm,外径和高度同为180 mm,喷淋孔直径为5 mm)。进液口与排液口的管径均为20 mm,进气口及出气口的直径为60 mm。支撑整个旋转系统的旋转轴直径为20 mm,总长500 mm。整个设备外部的不锈钢壳体为直径和高度均300 mm的圆柱形,旋转轴沿一侧轴心处进入,负责驱动转子旋转。采用忆悦工贸制造的WZB-25KZB-15型液体循环泵用于液体输送,其流量可达16 L/min;选用了余姚金泰仪表提供的转子流量计测量气体流量,量程为500~3 000 m<sup>3</sup>/h;同样来自该公司的LZB-3B型液体转子流量计,适用于最大流量为200 L/h的应用场景。使用了喆林机电生产的CY120型鼓风机,风量为408 m<sup>3</sup>/h;无锡禾田精工出品的6IK250RA-DF电机,额定转速为2 800 r/min;西门子公司制造的VFD022M12A变频器,功率为2.2 kW;聚创环保所提供了JCF-7000型管道粉尘浓度检测仪,能够对0~1 000 mg/m<sup>3</sup>范围内的粉尘浓度进行有效检测。

在进行试验时,首先启动柴油机,然后再开启进气阀门,随后将鼓风机开机,使设备内部形成负压通道,让待处理的废气依次通过气体流量计和进气口,最后进入并流超重力旋转床进行处理。循环液从循环储液槽中流出,通过液体流量计及进液口(液体分布器)喷入旋转床的填料区内,由循环泵驱动循环液的流动,在高速旋转的填料区与废气中的颗粒相互碰撞、聚并、吸附。在此过程中,废气沿转子填料的运动轨迹跟随转动,基于不同的密度特性,实现惯性分离。液体则从液体分配器的喷嘴处喷入设备内部,在自身质量以及转子填料快速旋转所产生巨大离心力的共同作用下,部分液体沿转子外壁流动,其余液体则沿着填料进行径向扩散。当旋转床稳定

运行时,废气与循环液以同向流动的方式充分接触且混合均匀,以充分吸附净化废气中的微小颗粒物。经过净化后的废气最终通过出气口排放,而液体则通过排水口流出,于循环储液槽中进行收集并重复利用。

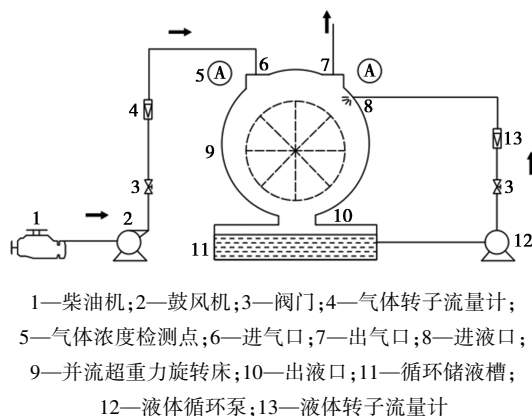


图1 并流式旋转填料床工艺流程图

## 2 试验研究

以自主研发的并流式旋转填料床为核心试验设备,通过控制不同操作条件,并设立不同的操作水平,重点考察了超重力因子、液体喷淋量、气体流速以及气体碳烟颗粒初始浓度等关键参数对碳烟颗粒脱除率的影响规律。在基于试验数据的分析后,借助响应面分析技术,对超重力因子、液体喷淋量及气体流速这3个关键变量之间的相互作用进行探究。

### 2.1 超重力因子对碳烟颗粒脱除率的影响

探究超重力因子( $\beta$ )对脱除率( $\eta$ )影响的试验中,气体流速设为2.43 m/s,液体喷淋量设为16 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),废气中的碳烟颗粒初始浓度控制在100 mg/m<sup>3</sup>。随后,调整超重力设备的转子速度,使超重力因子达到预定数值。通过粉尘浓度检测仪对旋转填料床出气口气体进行检测,得到碳烟颗粒脱除率,如图2所示。

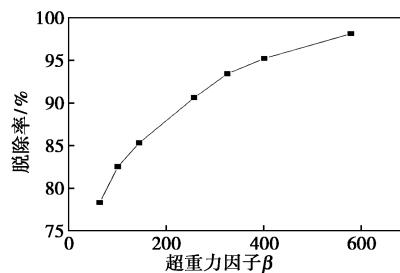


图2 超重力因子对碳烟颗粒脱除率的影响

由图2可知,随着提高转速来提高超重力因子,碳烟颗粒脱除率呈现出逐渐升高的趋势,但该趋势

随着超重力因子的继续增加而减弱,趋于极高的脱除率,达到 98% 以上。超重力因子超过 258 时,碳烟颗粒脱除率已大于 90%。主要原因是转子的高速旋转导致了液体被分散成细小的液滴,这些液滴与气体中的碳烟颗粒相互作用,通过碰撞、拦截以及凝聚的方式加快了颗粒的清除。此外,增强的离心力同时也促进了气相中碳烟颗粒的离心分离过程,从而进一步提升碳烟颗粒脱除率。

## 2.2 气体流速对碳烟颗粒脱除率的影响

通过固定超重力因子为 580、液体喷淋量为  $16 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  以及碳烟颗粒初始浓度为  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 调节气体流速至不同数值水平 (2.43、3.20、3.97、5.51、7.05 m/s), 探究其对碳烟颗粒脱除率的影响。利用粉尘浓度检测仪对出气管道内部的废气进行检测, 得到此时废气的颗粒浓度, 计算此时碳烟颗粒脱除率, 如图 3 所示。

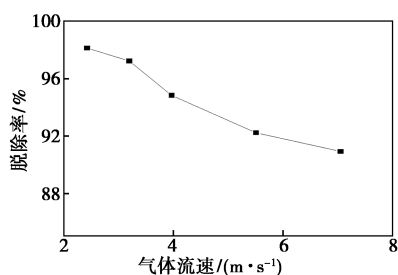


图 3 气体流速对碳烟颗粒脱除率的影响

由图 3 可知, 随着气体流速的逐渐增加, 碳烟颗粒脱除率反而减低。首先, 随着气体流速逐渐增加, 柴油机尾气排放量增大, 待处理的碳烟颗粒增多; 其次, 由于气体具备较高的流速, 降低了其在设备内的停留时间, 从而缩短了气体与填料、液滴之间的接触时间, 进而影响了设备对颗粒的捕集。

## 2.3 液体喷淋量对碳烟颗粒脱除率的影响

将超重力因子设定为 580, 气体流速设定为 2.43 m/s, 同时将柴油机排放尾气的碳烟颗粒初始浓度控制在  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 将液体喷淋量设定为不同的水平, 研究碳烟颗粒脱除率, 结果如图 4 所示。

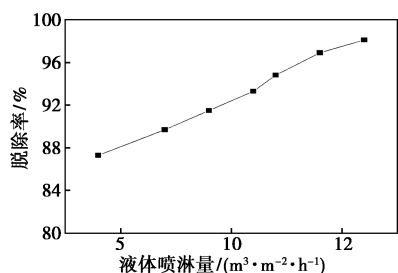


图 4 液体喷淋量对碳烟颗粒脱除率的影响

由图 4 可知, 当液体喷淋量从  $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  增加到  $16 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时, 碳烟颗粒脱除率持续上升。这一现象可能由以下两个原因导致: 增大的液体喷淋量有助于改善超重力旋转床内液滴的分布情况, 使液滴在填料床内部的分布变得更加均匀密集, 从而提高了循环液滴对碳烟颗粒的捕获能力, 使其脱除率提高; 在大流量循环液喷入的情况下, 转子填料表面得到更有效的润湿, 这不仅可以减少颗粒物在填料层内的堆积, 还促进液滴对残留颗粒物的有效清除, 进而提升整体去除效果。

## 2.4 气体中碳烟颗粒初始浓度对脱除率的影响

将超重力因子维持在 580 不变, 气体流速设定为 2.43 m/s, 液体喷淋量保持在  $16 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 通过调整柴油机排放气体中碳烟颗粒的初始浓度分别在 100、110、120、130、140  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 并在出气口采用粉尘浓度检测仪进行检测, 得到被处理后气体中碳烟颗粒浓度, 并计算出碳烟颗粒脱除率, 如图 5 所示。

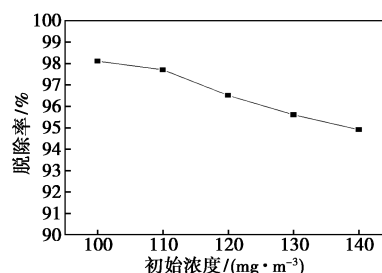


图 5 气体碳烟颗粒初始浓度对碳烟颗粒脱除率的影响

由图 5 可知, 当气体中碳烟颗粒初始浓度持续提高时, 碳烟颗粒脱除率呈现下降趋势。在试验中, 碳烟颗粒脱除率均保持在 94.9% 以上, 去除效果较高, 说明气体中碳烟颗粒初始浓度在此范围内时, 即便其发生变化, 对碳烟颗粒去除效果的影响并不明显。

## 2.5 响应面分析

采用《Design-Expert. V8. 6. 0. 1》软件作为响应面分析试验的数据分析平台, 尝试探究不同操作水平下的最优解。通过拟合试验数据, 构建了相应的数学模型与公式, 并进一步优化以求得最佳的试验参数条件。按照该软件的操作流程, 选取超重力因子 ( $\beta$ )、液相喷淋量 ( $q$ ) 及气体流速 ( $u$ ) 作为独立变量, 将脱除率 ( $\eta$ ) 视为因变量, 设计出 17 组试验方案, 具体试验参数详见表 1。基于上述实验布局, 建立了脱除率与超重力因子、液体喷淋量、气体流速之

间的回归关系模型及其方程式。

表 1 响应面实验方案及结果分析

实验	A $\beta$	B $q/(m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	C $u/(m \cdot s^{-1})$	$\eta/\%$
1	322	10.00	4.74	87.3
2	322	16.00	2.43	94.5
3	580	4.00	4.74	86.4
4	64	16.00	4.74	82.9
5	580	10.00	2.43	94.5
6	64	4.00	4.74	73.2
7	322	4.00	2.43	83.7
8	64	10.00	2.43	80.2
9	64	10.00	7.05	74.8
10	322	10.00	4.74	86.7
11	580	10.00	7.05	89.7
12	322	10.00	4.74	87.6
13	322	10.00	4.74	87.1
14	322	10.00	4.74	87.5
15	580	16.00	4.74	96.8
16	322	16.00	7.05	90.4
17	322	4.00	7.05	78.5

对于以上的 3 个试验因素  $\beta$ (超重力因子)、 $q$ (液体喷淋量)和  $u$ (气体流速),二阶多项式模型可以表示为:

$$\eta = A_1 + A_2\beta + A_3q - A_4u + A_5\beta q + A_6\beta u + A_7qu - A_8\beta^2 - A_9q^2 - A_{10}u^2$$

本研究选取了 17 组试验数据作为后续分析的数据基础,将脱除率视为实验目标,通过响应面法对其最优解进行探究。基于以上结论,构建了一个关于三因素( $\beta$ 、 $q$ 、 $u$ )的二阶回归模型,以描述它们与  $\eta$  之间的联系:

$$\eta = 71.16862 + 0.046190\beta + 0.88344q - 0.89939u + 1.13049 \times 10^{-4}\beta q + 2.51686 \times 10^{-4}\beta u + 0.019841qu - 3.20759 \times 10^{-5}\beta^2 - 6.11111 \times 10^{-3}q^2 - 0.045912u^2$$

表 2 呈现了响应面模型的方差分析结果,基于超重力因子、液体喷淋量和气体流速这 3 个因素,利用实验数据构建了响应面模型。该回归模型的  $F$  值达到 268.85,远大于 1,且回归项的  $P$  值低于 0.0001,说明选择的参数对于此模型具有极高的显著性;失拟项的  $P$  值为 0.1108,高于 0.05,表明失拟项不显著;模型复相关系数  $R^2$  为 0.9971,调整系数  $R^2_{adj}$  为 0.9934,  $R^2_{pred}$  为 0.9645;变异系数  $C.V$  为 0.62%,表明该模型离散程度小,输出的数据稳定。

综合以上的数据进行分析,各种操作条件对碳烟颗粒脱除率的影响程度为:超重力因子>液体喷

淋量>气体流速。

表 2 响应面方差分析表

因素	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
模型	694.61	9	77.18	268.85	<0.0001
A- $\beta$	396.21	1	396.21	1380.18	<0.0001
B- $q$	228.98	1	228.98	797.64	<0.0001
C- $u$	47.53	1	47.53	165.57	<0.0001
AB	0.12	1	0.12	0.43	0.5345
AC	0.09	1	0.09	0.31	0.5930
BC	0.30	1	0.30	1.05	0.3388
A <sup>2</sup>	20.29	1	20.29	70.67	<0.0001
B <sup>2</sup>	0.20	1	0.20	0.71	0.4273
C <sup>2</sup>	0.25	1	0.25	0.88	0.3793
残差	2.01	7	0.29		
失拟项	1.50	3	0.50	3.90	0.1108
纯误差	0.51	4	0.13		
总误差	696.62	16			

注: $P < 0.01$  为非常显著,  $P < 0.05$  为显著,  $P > 0.05$  为不显著。

图 6、图 7、图 8 分别反映了不同操作参数之间的交互作用,并分析不同参数对脱除率的影响。图中数据显示,随着超重力因子和液体喷淋量增加,碳烟颗粒脱除率升高,并且存在一定的协同作用;而气体流速提高时,碳烟颗粒脱除率下降。在这 3 个影响因素中,影响程度也存在差异。其中,超重力因子的变化对脱除率的影响最为显著,其次是液体喷淋量,最后是气体流速。表 2 显示,超重力因子、液体喷淋量及气体流速的  $P$  值均小于 0.01,进一步证实了这些变量对于脱除率确实存在着显著影响,其影响大小则根据具体试验情况有所不同。

图 6(a)为超重力因子与液体喷淋量对脱除率的协同作用。在保持液体喷淋量恒定的情况下,随着增加超重力因子,脱除率会显著提升;当超重力因子维持不变时,提高液体喷淋量同样能够促进脱除率的升高,但升高趋势不如提高超重力因子时明显。当超重力因子为 580、液体喷淋量为  $16 m^3/(m^2 \cdot h)$  时,达到了最高脱除率,高达 98.1%。表明超重力因子和液体喷淋量之间存在协同效应,在同时提高的情况下可以有效提高整体的脱除率。图 6(b)所示的等高线图形貌近似于圆形,表明交互作用较小。超重力因子与液体喷淋量之间的  $P$  值均超过 0.05,验证了等高线的分布情况。等高线的形态近似于圆形,表明在该系统中各因素对系统性能的影响较为独立,交互较弱。超重力因子与液体喷淋量之间的  $P$  值均显著高于 0.05,再次验证了等高线的分布特征,即在该实验范围内,这两个因素之间不存在显著

的交互作用。

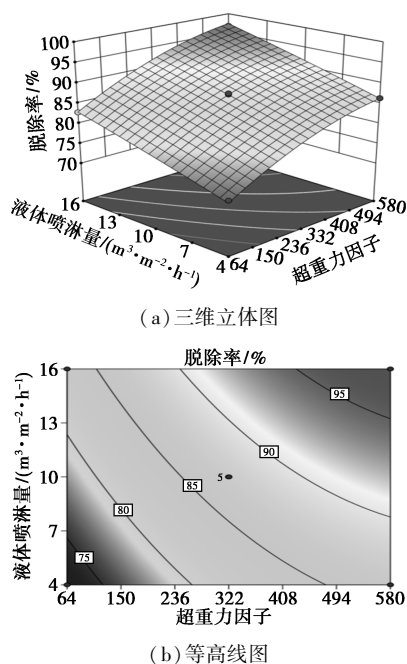


图 6 超重力因子和液体喷淋量的交互作用

图 7 展示超重力因子与气体流速对碳烟颗粒脱除率的综合影响。保持超重力因子不变,气体流速增加,碳烟颗粒脱除率反而下降;反之,气体流速固定时,提高超重力因子则有助于提升脱除率。当两个操作参数同时增加时,碳烟颗粒脱除率的增长幅度逐渐减弱,但脱除率没有降低,表明超重力因子对于碳烟颗粒的去除效果更为突出。超重力因子与气体流速之间的交互作用  $P$  值均超过 0.05,说明它们之间不存在显著性关联。

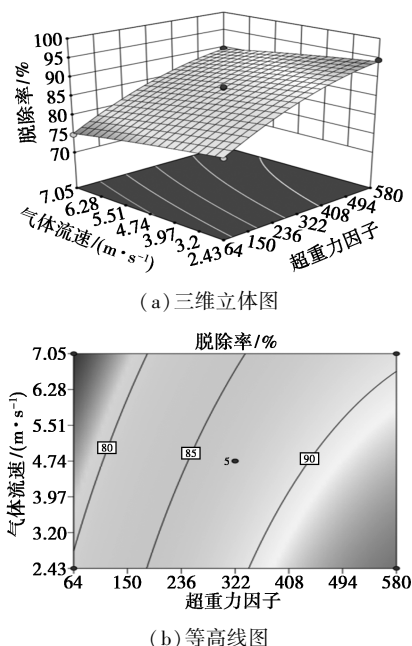


图 7 超重力因子与气体流速的交互作用

图 8 中展现了液体喷淋量与气体流速对脱除率的影响。试验结果显示,保持气体流速不变,随着液体喷淋量的增加,碳烟颗粒脱除率随之提高;固定液体喷淋量,将气体流速提高会导致脱除率的下降。两个操作参数同时提高时,脱除率的增长趋势较为平缓,说明气体流速对试验的影响逐渐得到增强。液体喷淋量和气流速度之间的  $P$  值均大于 0.05,这意味着二者之间不存在显著的交互作用。

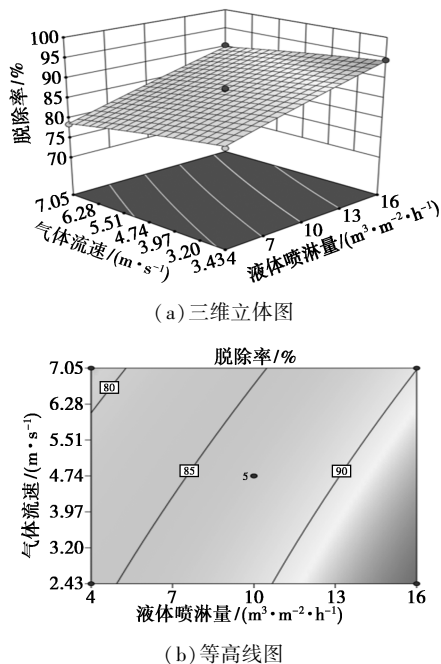


图 8 液体喷淋量与气体流速的交互作用

### 3 气相压降研究

以并流旋转填料床作为主要设备,在超重力因子介于 0~580 之间、气体流速在 3.42~7.05 m/s 之间、液体喷淋量在 4~19 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) 的条件下,对设备的整体气相压降进行试验探究。通过改变超重力因子、液体流量和气体流速等变量,探讨了这些因素如何影响静止状态下、离心作用下、干燥状态及湿润状态下的压降特性。依据试验所得数据拟合出了模型参数,分别针对干床、离心、湿床的工况构建了一个描述并流旋转填料床气相压降方程,可以通过方程计算得到不同操作参数下的总体压降值,并进行预测。该方程预测值与实测结果之间的相对偏差被控制在 ±14% 之内,具备较为优秀的预测能力。

#### 3.1 气体流速对静床压降 ( $\Delta p_s$ ) 的影响

在超重力因子为 0、无喷水的条件下,调节气体流速分别为 2.43、3.20、3.97、5.51、7.05 m/s,研究了气体流速对静床压降的影响规律,如图 9 所示。

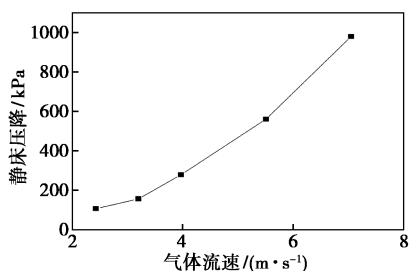


图9 气体流速对静床压降的影响

由图9可知,在气体流速低于3.2 m/s的情况下,设备的整体压降变化较小,在300 kPa以内。这是由于气体与填料之间产生的摩擦压降较为有限,难以产生较大的摩擦压降,因此整体上从入口到出口处的气相总压降变化不大。然而,当气体流速超过3.20 m/s时,随着气体流速的增加,设备压降呈现出快速上升的趋势。这是因为较高的气体流速加剧了气体与填料间的相互作用,导致摩擦力增大,从而使得整个系统的气相总压降大幅增加。

### 3.2 超重力因子对离心压降( $\Delta p_c$ )的影响

在无喷水、无进气的条件下,将超重力因子设为64、101、145、258、326、402、580,通过多水平的超重力因子,对设备的离心压降进行研究,关系如图10所示。

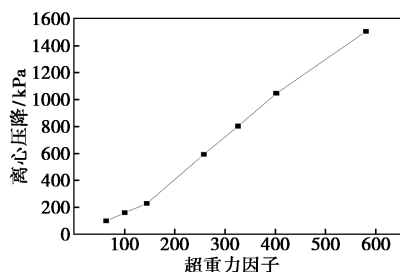


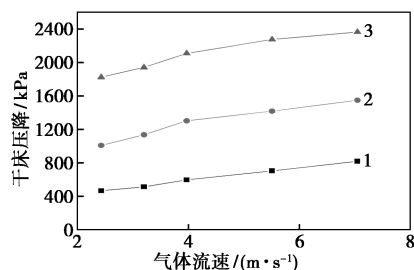
图10 超重力因子对离心压降的影响

随着超重力因子增至580,设备的离心压降也从99.96 kPa增长至1502.4 kPa,显著升高。这一现象归因为超重力因子的提升导致了离心力的加强,进而使得气体在进口与出口之间的总压降显著增大。鉴于超重力因子内含转速的平方项,离心压降与之呈现线性关联<sup>[15]</sup>。通过全面考量可以得出结论,影响气体压力损失的主要因素按其影响力大小排序为:超重力因子大于气流速度。

### 3.3 气体流速对干床压降( $\Delta p_d$ )的影响

在无喷水条件下,调节气体流速为2.43、3.20、3.97、5.51、7.05 m/s,研究了在超重力因子分别为145、326、580下的干床压降随气体流速的变化关系,得到气体流速对干床压降的影响规律,如图11

所示。



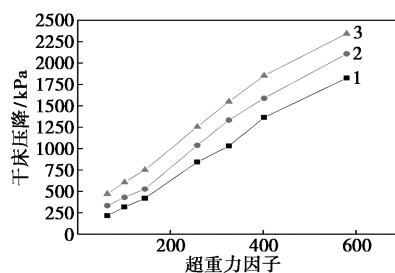
1— $\beta=145$ ; 2— $\beta=326$ ; 3— $\beta=580$

图11 气体流速对干床压降的影响

图11展示了在3种超重力因子水平下,气体流速和超重力因子对干床压降的影响规律。随着气体流速的逐渐增加,设备的干床压降呈现出明显的线性上升趋势,气体流速是影响压降的关键因素之一。当超重力因子固定为145时,气体流速从2.43 m/s提升至7.05 m/s,干床压降从469.42 kPa显著增加至820.6 kPa,增长了351.18 kPa。而在更高的超重力因子(580)条件下,干床压降从1822.8 kPa升高至2362.2 kPa,增长了539.4 kPa。超重力因子的增大不仅提升了系统的压降水平,还使得压降对气体流速变化的敏感性进一步增强。在较高气体流速、超重力因子的条件下,由摩擦而引起的压降更加明显,同时,气体在高速下为了快速通过设备,克服了更大的离心力,进而导致离心压降也随之增大。

### 3.4 超重力因子对干床压降( $\Delta p_d$ )的影响

在无喷水条件下,将气体流速分别设置为2.43、3.97、7.05 m/s,探究干床压降随着超重力因子变化的关系,如图12所示。



1— $u=2.43$  m/s; 2— $u=3.97$  m/s; 3— $u=7.05$  m/s

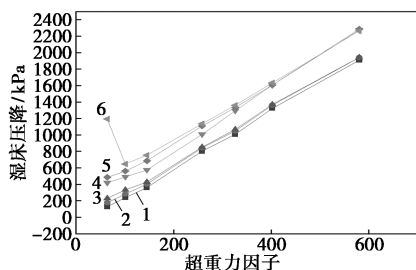
图12 超重力因子对干床压降的影响

由图12可知,气体流速为2.43 m/s、超重力因子从64增加到580时,干床压降也随之发生了变化,从215.6 kPa增长至1822.8 kPa;当气体流速提高到3.97 m/s时,相同范围内的超重力因子变化导致干床气相压降由334.18 kPa增至2170 kPa;而当气体流速进一步上升至7.05 m/s时,干床压降则从

470.4 kPa 提升到了 2 342.2 kPa。在较低的超重力因子条件下,干床压降增长相对缓慢;然而,一旦进入高的超重力因子区间,干床压降的增幅变得十分显著。这种现象背后的原因在于,在低超重力状态下,由于作用于填充材料上的离心力较小,因此离心引起的压降也较小,此时气体与填料之间产生的摩擦阻力成为总压降的主要来源。但随着超重力因子逐步增大,转子高速旋转所引发的摩擦阻力及形态阻力逐渐占据了主导地位,从而导致了离心压降的大幅度提升<sup>[16-17]</sup>。

### 3.5 超重力因子对湿床压降 ( $\Delta pl$ ) 的影响

在气体流速分别为 2.43 m/s 和 5.51 m/s 的条件下,将液体喷淋量分别调节至 9、12、16 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),并将超重力因子数值调整至相应水平,通过 U 形压差计实时读取设备的压降,研究超重力因子在不同水平下对湿床压降的影响,如图 13 所示。



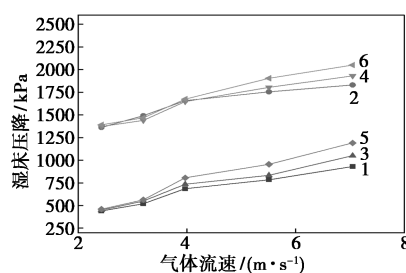
1— $u=2.43$  m/s,  $q=12$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 2— $u=2.43$  m/s,  $q=9$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 3— $u=2.43$  m/s,  $q=16$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 4— $u=5.51$  m/s,  $q=9$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 5— $u=5.51$  m/s,  $q=12$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 6— $u=5.51$  m/s,  $q=16$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)

图 13 超重力因子对湿床压降的影响

由图 13 可知,固定气体流速时,液体喷淋量对湿床压降的影响相对较小。然而,随着超重力因子的逐渐增加,压降先经历了一个短暂的下降阶段,之后则呈现持续增长的趋势。这种现象的原因在于,当超重力因子较低且液体喷淋量较大时,液体更多沿喷淋口落下,难以与填料发生有效碰撞,导致液体在设备内部分布不均,部分区域的液体汇集过多,呈现区域性的分布,从而引起压降显著增大。当超重力因子超过 101,旋转中的填料能更好地打散喷淋液体,使液体分布更均匀,从而导致设备压降随着超重力因子的增加而线性上升。

### 3.6 气体流速对湿床压降 ( $\Delta pl$ ) 的影响

将超重力因子,分别设置为 145 和 402,调整循环液的阀门,将液体喷淋量分别设置为 9、12、16 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),随后读取 U 形压差计的压差值,研究气体流速对湿床压降的影响,如图 14 所示。



1— $\beta=145$ ,  $q=12$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 2— $\beta=402$ ,  $q=9$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 3— $\beta=145$ ,  $q=9$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 4— $\beta=402$ ,  $q=12$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 5— $\beta=145$ ,  $q=16$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 6— $\beta=402$ ,  $q=16$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)

图 14 气体流速  $u$  对湿床压降  $\Delta pl$  的影响

由图 14 可知,整体湿床压降随着气体流速的提高而增加。气体流速低于 3.97 m/s 时,则由液体喷淋量所导致的压降变化较小;当气体流速较高时,湿床压降随着液体喷淋量的提升而进一步增加。在低转速下,流量的升高反而存在压降降低的现象,这可以归因于液体喷淋量的增加导致气体的流动空间减小,且转速较低,无法使液体分布均匀,导致局部压力升高或降低,对气体流动路线产生干扰,从而影响了设备整体压降。

### 3.7 气相压降模型的建立

旋转填料床的气相压降主要包括静止状态下的压降 ( $\Delta ps$ )、因转子旋转而产生的离心压降 ( $\Delta pc$ ) 以及湿态条件下的压降 ( $\Delta pl$ ) 等<sup>[18]</sup>。

#### (1) 静床压降

压降与气体流速的平方成正比,静床压降  $\Delta ps$  包括了进出口管路链接的阻力、填料床层的阻力和管路损失,根据伯努力方程可知<sup>[19]</sup>:

$$\Delta ps = \xi \rho_g u^2 / 2$$

式中: $\xi$  为气体阻力系数,是气体流速  $u$  的函数; $u$  为气体流速, m/s;  $\rho_g$  为气体密度, 取为 1.29 kg/m<sup>3</sup>, 计算得到  $\xi=3.29$ , 超重力旋转填料床的静床压降为:

$$\Delta ps = 2.12u^2$$

#### (2) 离心压降

假设忽略气相在高速旋转填料区的径向运动,忽略填料内外腔区的气相影响<sup>[20-21]</sup>。可采用刘有智等<sup>[22]</sup>的压降模型计算离心压降 (kPa):

$$\Delta pc = \rho_g \beta^a Du^b$$

式中: $a$ 、 $b$  为待定系数; $\beta$  为超重因子; $D$  为转子高度, mm。经过实验数据拟合可得  $a=1.27$ ,  $b=-0.51$ , 代入可得:

$$\Delta pc = 0.258\beta^{1.27}u^{-0.51}$$

#### (3) 液体引入引起的压降

提高设备内的液相含量,会导致气相路径减小,

从而提高气相阻力,同时减少形体阻力。采用焦伟洲等<sup>[23]</sup>研究的模型计算:

$$\Delta p_l = c\beta^d q^e u^f$$

式中: $c, d, e, f$ 均为待定系数,拟合得 $c = 105.62, d = 0.83, e = -0.01, f = 1.11$ 。代入可得液体引入引起的压降:

$$\Delta p_l = 105.62\beta^{0.83} q^{-0.01} u^{1.11}$$

旋转填料床的总气相压降为:

$$\Delta p_T = \Delta p_s + \Delta p_c + \Delta p_l = 2.21u^2 + 0.258\beta^{1.27} u^{-0.51} + 105.62\beta^{0.83} q^{-0.01} u^{1.11}$$

#### (4) 实验值与模型计算值比较

在固定操作参数的条件下,进行多组预测试验,如图15所示,该模型预测结果的相对偏差在14%以内,验证了该模型具备良好的预测效果。

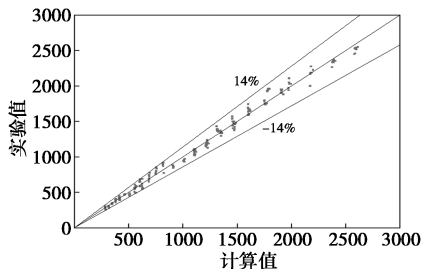


图15 压降模型计算值(kPa)与实测值(kPa)的对比图

## 4 结论

以并流旋转填料床作为核心装置,系统性地研究了超重力因子、液体喷淋量、气体流速以及气体中碳烟颗粒初始浓度对碳烟颗粒脱除率的影响,并深入分析了各操作参数之间的交互作用机制。通过大量试验数据的拟合分析,确定了静床压降( $\Delta p_s$ )、离心压降( $\Delta p_c$ )和湿床压降( $\Delta p_l$ )的气相压降模型参数,构建整体气相压降( $\Delta p_T$ )的计算表达式。在不同工况下,碳烟微粒脱除率随着超重力因子和液体喷淋量的增加而显著提升,且二者之间存在明显的协同促进作用。然而,气体流速的增加则会导致脱除率的下降。在超重力因子为580、液体喷淋量为 $16 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、气体流速为 $2.43 \text{ m/s}$ 的优化条件下,系统能够实现高达98.1%的碳烟颗粒脱除率。通过Design-Expert V8.6.0.1软件对试验数据进行拟合,预测相对偏差不超过14%,充分验证了该模型的准确性和可靠性。此外,还明确了各操作参数对脱除率的影响程度为:超重力因子>液体喷淋量>气体流速。研究结果为并流旋转填料床内气相压降的精确计算提供坚实的理论基础和实用指导。

## 参考文献

- [1] 马兆壮.金属材料柴油机颗粒捕集器工作特性试验及仿真研究[D].长春:吉林大学,2021.
- [2] 张丽君.钙钛矿型催化剂同时去除柴油机尾气中碳烟颗粒物和 $\text{NO}_x$ 的研究[D].北京:北京工业大学,2020.
- [3] 胡俊,孙平,梅德清,等.颗粒捕集器捕集效率及对柴油机性能影响的研究[J].机械设计与制造,2013,(6):134-136.
- [4] 闵振宇.柴油机颗粒捕集器捕集与再生技术研究[D].大连:大连海事大学,2023.
- [5] 沈星.等离子体协同催化净化柴油机尾气颗粒物研究[D].杭州:浙江工商大学,2016.
- [6] 侯岩峰.催化技术与等离子体应用于柴油机尾气净化的研究[D].天津:天津大学,2006.
- [7] 李香香.基于低温等离子体协同催化脱除碳烟颗粒的研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [8] 陆佳冬,王广全,耿康生,等.超重力旋转床转子结构与性能研究进展[J].化工进展,2017,36(10):3558-3568.
- [9] 郭林雅,祁贵生,刘有智.颗粒特性对超重力湿法除尘性能的影响[J].天然气化工(C1化学与化工),2019,44(2):86-90.
- [10] 付加,祁贵生,刘有智,等.超重力湿法脱除气体中细颗粒物研究[J].化学工程,2015,43(4):6-10.
- [11] 王庭飞.超重力旋转填料床的计算流体力学模拟[D].淮南:安徽理工大学,2022.
- [12] 魏少凯.气流对向剪切旋转填料床除尘性能研究[D].太原:中北大学,2018.
- [13] 王探,祁贵生,刘有智,等.超重力湿法脱除气体中低浓度粉尘[J].过程工程学报,2017,17(1):92-96.
- [14] Yeh H. Geophysical fluid dynamics in the hypergravity field[J]. Acta Mechanica Sinica, 2024, 40(2): 723296.
- [15] 祁贵生,刘有智,王焕,等.错流旋转填料床气相压降的模型化及实验研究[J].中北大学学报(自然科学版),2014,35(1):63-67.
- [16] 王焕,祁贵生,刘有智,等.错流旋转填料床气相压降特性实验研究[J].天然气化工(C1化学与化工),2013,38(6):38-41.
- [17] 赵志强.规整填料旋转填料床压降特性及传质性能研究[D].北京:北京化工大学,2014.
- [18] Chen W C, Meng W H, Liu Z H, et al. Hydrodynamics of gas flow in a rotating packed bed under floating motions: Experimental and simulation study[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 442: 136149.
- [19] 赵志强,初广文,罗勇,等.规整丝网填料旋转填料床的气相压降特性及脱硫性能[J].过程工程学报,2014,14(5):770-775.
- [20] 单从云,罗勇,初广文,等.整体式碳化硅填料旋转填料床并流压降特性研究[J].高校化学工程学报,2014,28(4):701-706.
- [21] 李航天.逆流旋转填料床中液体的流动特性研究[D].太原:中北大学,2019.
- [22] 刘有智,刘振河,康荣灿,等.错流旋转填料床气相压降特性[J].化工学报,2007,58(4):869-874.
- [23] 焦伟洲,刘有智,祁贵生.新型填料结构旋转床流体力学特性[J].化学反应工程与工艺,2009,25(1):29-35. ■