

移动式颗粒床气固分离性能冷态试验

樊英杰^{1,2}, 刘今乾², 马琛¹, 郭伟¹, 杨伯伦¹, 吴志强¹

(1. 西安交通大学 化学工程与技术学院 陕西省能源化工过程强化重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘要:以热解为首要步骤的煤炭分质转化技术可在较温和的条件下实现煤炭高效利用,其中含尘热解气净化是该技术规模化应用需要解决的关键问题之一。颗粒床过滤技术具有过滤效率高、滤料成本低等优势。为考察移动式颗粒床对粉煤热解气除尘过滤的有效性,选用小麦为颗粒床冷态试验的滤料介质,硅胶粉为试验粉尘,在自行设计的冷态试验平台上考察各操作条件对颗粒层过滤除尘效率的影响规律。结果表明:过滤效率的影响因素顺序为:表观风速>过滤层厚度>滤料下料速度;过滤效率随表观风速的增大而减小,随过滤层厚度的增加而增大。过滤层厚度增至 200 mm 以上时,过滤效率变化较小;而滤料下料速度增大,过滤效率减小。粉尘粒径达 10 μm 后,过滤效率基本可维持在 98%。在优化的过滤条件下(过滤层厚度为 300 mm,滤料下料速度为 0.002 m/s,过滤时间为 10 min),最佳过滤效率可达 98.1%。试验结果不仅实现了对常温下移动颗粒层过滤性能的预测,也为粉煤热解含尘煤气颗粒床热态除尘装置的设计提供了依据。

关键词:移动式颗粒床;冷态试验;过滤效率;气固分离

中图分类号:TQ536.9

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)04-0090-07

Cold model experiments on gas-solid separation performance of granules moving bed

FAN Yingjie^{1,2}, LIU Jinqian², MA Chen¹, GUO Wei¹, YANG Bolun¹, WU Zhiqiang¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Energy Chemical Process Intensification, School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: Pyrolysis as the first step of coal quality conversion technology can achieve efficient utilization of coal under mild conditions, in which the purification of dust-containing pyrolysis gas is one of the key problems to be solved in the large-scale application of this technology. The granular bed filtration technology has the advantages of high filtration efficiency and low filter material cost. In order to investigate the filtration effectiveness of the granules moving bed for dust removal from pulverized coal pyrolysis gas, wheat was selected as the filter medium for the cold test, and silica gel powder was used as the experimental dust. The influence of various operating conditions on the filtration efficiency and dust removal efficiency were investigated on a self-designed cold test platform. The results show that the order of influencing factors of filtration efficiency following: apparent speed of wind > thickness of filtration layer > blanking speed of filter material; the filtration efficiency decreases with the increase of apparent wind speed and increases with the rise in filter layer thickness. When the thickness of the filter layer increases to more than 200 mm, the filter efficiency changes is small; while, the blanking speed of the filter material increases, the filter efficiency decreases. After the dust particle size reaches to 10 μm, the filtration efficiency can basically be maintained at 98%. Under optimized filtration conditions: the thickness of the filter layer is 300 mm, the feeding speed of the filter material is 0.002 m/s, the filtration time is 10 min, the best filtration efficiency can reach to 98.1%. The experimental results not only realize the prediction of the filtration performance of the granules moving bed at room temperature, but also provide a reference basis for designing the hot state dust removal device for pulverized coal pyrolysis.

Key words: granules moving bed; cold model experiment; filtering efficiency; gas-solid separation

收稿日期: 2021-03-29; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CE21032901

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600400)

作者简介: 樊英杰(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,从事煤炭分质转化方面工作。E-mail: fanyingjie@aliyun.com。

通讯作者: 吴志强,副教授,博士生导师,从事煤炭分质转化与清洁利用方面工作。E-mail: zhiqiang-wu@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 樊英杰,刘今乾,马琛,等.移动式颗粒床气固分离性能冷态试验[J].洁净煤技术,2021,27(4):90-96.

FAN Yingjie, LIU Jinqian, MA Chen, et al. Cold model experiments on gas-solid separation performance of granules moving bed[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 90-96.



移动阅读

0 引言

“富煤、少油、缺气”的能源结构特点决定了煤炭在我国将长期处于能源消费的主导地位,为此,煤炭资源的分级高效利用是确保我国能源安全的重要途径之一^[1]。采用热解技术进行煤炭分质转化可在较低温度下实现煤炭资源的高效分质利用,但热解产物包括各种粉尘颗粒,因此需要进行粉尘脱除。含尘含油高温热解气净化是粉煤热解技术工业化过程中需要迫切解决的问题^[2]。针对高温热解气的净化,国内外学者提出了旋风分离^[3]、电除尘^[4]、颗粒床除尘^[5]等处理方式,其中颗粒床技术具有过滤介质对气体和灰尘性质不敏感、可选择性较多等优势,引起广泛关注。虽然相关企业已对颗粒床除尘技术进行积极布局,但总体上该技术尚处于初期研究阶段^[6-7]。

王苗等^[8]对影响旋风-颗粒床过滤器两级除尘性能的过滤介质尺寸、厚度以及氮气流量等因素进行了探索,发现影响除尘性能的关键因素为表观气速,其次为过滤介质粒径,氮气流量影响有限,滤料粒径0.38~0.83 mm时,颗粒床过滤器平均除尘效率97.18%。付金壮等^[9]比较了入口粉尘浓度和再生尘源浓度对旋流-颗粒床耦合分离器性能的影响,指出二者对床层的压降影响显著,而入口粉尘浓度对整体的除尘效率影响有限,入口浓度在5.95~59.13 g/m³时,试验稳定后分离效率可达98%。吕涵等^[10]使用冷模气固顺流式移动床过滤器,通过改变表观气速、颗粒循环强度、粉尘的比沉积率等参数研究其对床层压降和除尘效率的影响,表观气速为0.126 m/s、比沉积率 σ 为0.000 735时,过滤器的操作压降可达相对稳定状态,此时除尘效果最优,捕集效率达97%以上。王助良等^[11]研究指出,影响颗粒床过滤器除尘效率的关键因素是沉积粉尘,通过分析孔隙率在颗粒层过滤过程中的变化可得到气流含尘质量浓度、灰尘沉积密度等在颗粒层内的变化规律以及除尘效率的关联式。Chen等^[12-13]对移动颗粒床过滤器进气系统的设计和测试程序进行研究,包括气体流量、进气系统几何形状、流量校正插件在滤床上的位置等参数对过滤系统性能的影响,并分析了进气系统和滤床中气体的动力学模型与流动性。

通过数值模拟方式探究移动床过滤性能,可在一定程度上降低试验成本,赵建涛等^[14]采用二维错流数学模型研究了移动颗粒床过滤器除尘过程的气体流动规律、粉尘沉积特点以及气体含尘浓度变化过程,并通过高温煤气除尘试验对模型进行验证,表

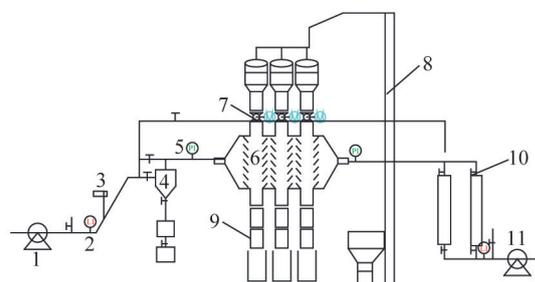
明表观过滤气速0.1~0.3 m/s时,除尘过程的操作压降和除尘效率的模型计算值和试验结果基本吻合,但更高气速下,由于颗粒层内出现空穴、贴壁等非正常流动现象,模型计算误差较大,超出模型适用范围。刘鹏等^[15]建立了除尘器的气固两相流场的数学模型,研究了双层滤料颗粒床高温除尘器中挡板气流通道宽度、挡板层数与高度变化对除尘效果的影响。陶初炯等^[16]通过改变大型颗粒床除尘器过滤介质与壳体温度以及预热时长,对含尘热解煤气除粉前的预热过程进行模拟分析,研究结果为该技术的应用提供一定的数据基础。

为满足粉煤热解含尘气体高效净化技术工业化应用的要求,需进一步明晰粉煤热解高温烟气净化的移动式颗粒床操作压降、除尘效率等工艺设计指标和操作参数之间的关联规律,但目前该研究较少,需通过以下3个方面进行深入研究:①保证滤料的循环稳定,设备的稳定性及高温的结焦问题;②进气过程造成局部二次夹带,需优化颗粒床内部结构;③移动式颗粒层过滤因素的整合,得到滤料循环、过滤厚度及进气速度最优解。本文针对粉煤热解含尘气特点,设计和搭建了移动床颗粒层过滤除尘冷态试验平台,通过正交试验设计,综合研究了各因素对颗粒层过滤效率和系统压力降的影响规律,分析除尘效率和床层压降与颗粒床特性、操作条件之间的内在关系,在试验结果和理论计算的基础上提出颗粒层过滤性能的改进措施,获得颗粒床除尘装置高效稳定的除尘工艺参数,为粉煤热解含尘煤气颗粒床热态除尘装置的设计以及工艺操作优化提供依据。

1 试验

1.1 工艺流程

颗粒床除尘系统由含尘气体发生器、旋风除尘器、颗粒床、布袋除尘器、滤料循环再生装置和仪表控制等组成,如图1所示。除尘操作步骤为:风机运行产生动力风将含尘气体引入旋风除尘器,含尘气体经旋风除尘器预除尘后流经颗粒床层,大部分粉尘通过与颗粒层的碰撞、吸附、拦截作用而从气体中去除^[17]。称取适量粉尘加入料斗,根据下料量将粉尘螺旋给料机调至所需转数。根据选定的过滤颗粒下料速度,确定合适提升机滤料提升速度、旋转下料机频率,并对空滤袋进行称重并记录。将风机1与风机2频率调至所需数值后运行,同时打开粉尘螺旋给料机与提升机,观察风压并记录。试验结束后依次关闭粉尘螺旋给料机、提升机,旋转下料机,拆除滤袋称重取样,并对灰尘料斗内灰尘进行称重。



1—风机1; 2—流量计; 3—螺旋给料机; 4—旋风分离器;
5—压力显示器; 6—移动床主体; 7—旋转下料器; 8—提升机;
9—料筒; 10—布袋过滤器; 11—风机2

图1 颗粒床冷态试验装置

Fig.1 Cold experimental device of granular bed

1.2 滤料与尘样

过滤介质的特性对过滤式除尘过程非常重要,其成本通常占整个系统投资的10%~15%。过滤介质的材质、质量和有效运行时间会对除尘器效率、运行阻力以及设备养护周期等有重要影响。优质过滤介质应具有耐磨、耐腐、价廉、易得等特点,且介质对高温气体的耐热性能也很重要。本文以冷态试验为主,经综合分析各类过滤介质颗粒尺寸、成本、是否易得等,选择小麦作为颗粒床冷态试验滤料,其粒径为3.5~6.0 mm,孔隙率为0.39,堆积密度为0.75 kg/m³,真密度为1.23 kg/m³。

模型粉尘物需与实际粉煤热解粉尘具有尽可能相近的物理性质,且需具有分布均一的尺寸和稳定的材质,保证颗粒可长时间储存在工作环境中。基于此,选择硅胶作为试验粉尘,其15 μm以下颗粒占3.76%,中位粒径颗粒为66.10 μm。

1.3 关键参数计算

过滤效率指过滤层过滤气流粉尘的效果,是权衡除尘器成效的基础指标。具体定量表达指在试验气流流经过滤器的过程中,除尘器捕获的粉尘量占进入设备粉尘量的比例,可由设备的进出口气体浓度变化计算得出。

$$\eta = \frac{(C_1 - C_2)}{C_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, η 为过滤效率,%; C_1 、 C_2 分别为进、出口气体含尘浓度,g/m³。

$$C_1 = 60m/Q_1, \quad (2)$$

式中, m 为单位时间螺旋下料机的下料量,g/min; Q_1 为颗粒层截面的风量,m³/h,可通过运行风机对螺旋下料机进行标定得到。

$$u_f = Q_1/S, \quad (3)$$

式中, u_f 为表观过滤风速,m/s; S 为颗粒层截面面积,m²。

过滤器进、出气口气流的全压差即为过滤的总压降。通过研究除尘器过滤过程中的压降,可获得改进除尘器结构、减少设备运行阻力的指导性思路。鉴于本文的试验设备具有相同的进、出气口管道段面积,故只需测量颗粒层进、出气口侧管道上测压点间的静压降即可。

$$\Delta P = P_2 - P_1, \quad (4)$$

其中, ΔP 为过滤层总压力损失,Pa; P_2 为颗粒层出气口侧流体静压值; P_1 为颗粒层进气口侧流体静压值。在颗粒床层进气连接管、出气管以及颗粒床层内部各安装一个静压环,使变径、弯头等局部阻力可基本忽略。4个压力测试点数据分别通过压力传感器传送到仪表盘,通过计算得出压差,即过滤压力损失值。

1.4 试验工况设计

在选定过滤粉尘及颗粒层填充料的基础上,错流移动式颗粒床的除尘效率主要受过滤层厚度 h 、表观过滤风速 u_f 、滤料下落速度 u_1 (单位时间滤料在过滤床层下落的长度)控制。其中表观过滤风速主要受风机1风量 Q_1 (风量 Q_1 由风机1频率 f 确定)的影响,故选取滤层厚度 h 、滤料下落速度 u_1 、风机1频率 f 作为正交试验的三因素,通过L9(3³)三水平正交法设计试验。过滤截面为0.50 m×0.15 m,假设截面风速相等,通过计算可得表观过滤风速范围为0.29~0.41 m/s。表1为过滤效率正交试验因素水平,表2为具体工况。

表1 正交试验因素水平

Table 1 Factor level table of orthogonal experiment

| 水平 | 因素A | 因素B | 因素C |
|----|-----------------------|------------------------|--|
| | 滤层厚度 h/mm | 风机1频率 f/Hz | 滤料下落速度 $u_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |
| 1 | 100 | 35 | 0.002 |
| 2 | 200 | 40 | 0.005 |
| 3 | 300 | 45 | 0.008 |

表2 过滤效率正交试验设计方案

Table 2 Design scheme of orthogonal test for filtration efficiency

| 试验号 | 因素A | 因素B | 因素C |
|-----|--------|-------|----------|
| 1 | 1(100) | 1(35) | 1(0.002) |
| 2 | 1(100) | 2(40) | 2(0.005) |
| 3 | 1(100) | 3(45) | 3(0.008) |
| 4 | 2(200) | 1(35) | 2(0.005) |
| 5 | 2(200) | 2(40) | 3(0.008) |
| 6 | 2(200) | 3(45) | 1(0.002) |
| 7 | 3(300) | 1(35) | 3(0.008) |
| 8 | 3(300) | 2(40) | 1(0.002) |
| 9 | 3(300) | 3(45) | 2(0.005) |

注:风机2频率为40 Hz,过滤时间均为10 min,入口粉尘浓度均为4.4 g/m³。试验结果均为试验平均值。

2 试验结果与分析

2.1 过滤效率

表3、4分别为不同工况颗粒床的过滤效率,可知对过滤效率影响最大的参数是表观过滤风速,同时风量 Q_1 变化也将导致过滤效率产生相应的波动,滤层厚度与滤料下落速度引起的过滤效率波动程度相近。通过过滤效率方差分析可得出,表观风速为过滤效率的最主要影响因素,过滤层厚度其次,最后为滤料下落速度。最优水平为A3B1C1,即滤层厚度为300 mm,风机1频率为35 Hz,滤料下落速度为

0.002 m/s。

表3 过滤效率分析

Table 3 Analysis of filtration efficiency

| 项目 | 因素 A | 因素 B | 因素 C |
|----------|--------|-------|-------|
| 均值 k_1 | 95.60 | 97.30 | 96.90 |
| 均值 k_2 | 96.77 | 96.53 | 96.57 |
| 均值 k_3 | 96.80 | 95.33 | 95.70 |
| 极差 R | 1.20 | 1.97 | 1.20 |
| 因素主次 | B>A=C | | |
| 最优方案 | A3B1C1 | | |

表4 过滤效率正交试验方差分析

Table 4 Analysis of variance in orthogonal experiment of filtration efficiency

| 因素 | 平方和 | 自由度 | F 比 | F 临界值 |
|----|-------|-----|-------|------------------------|
| A | 2.802 | 2 | 0.820 | $F_{0.05}(2,8) = 4.46$ |
| B | 5.896 | 2 | 1.725 | $F_{0.1}(2,8) = 3.11$ |
| C | 2.302 | 2 | 0.674 | |
| 误差 | 13.67 | 8 | | |

因素主次顺序为 B>A>C

各因素、水平的过滤效率变化如图2所示,可知随着过滤层厚度增大,过滤效率逐渐增加,达到一定厚度后过滤效率变化不明显;表观过滤风速和滤料下落速度变大时,过滤效率降低,原因在于随表观风速加大,更多粉尘被气流携带走,导致过滤效率降低。增大滤料下落速度后,滤料运动的不均匀性增加,导致滤料间的空隙加大,粉尘更易穿过床层,导致颗粒床过滤效率降低^[8,10]。

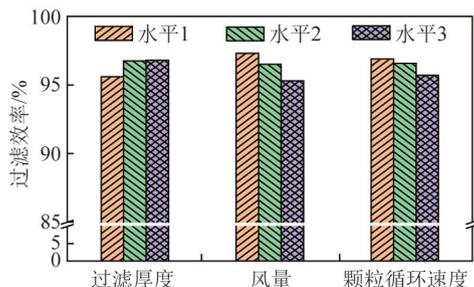


图2 各因素、水平的过滤效率变化

Fig.2 Filtration efficiency of three factors and three levels

2.2 最优条件下的过滤效率

正交试验得到的最优条件下的过滤效率可达98.1%,采用激光粒度仪测定试验前后气体中的粉尘粒径(表5、图3)。过滤后的粉尘粒径范围比过滤前更宽,多1.4~3.3 μm 及208.9~831.7 μm 粒径段,前者占比0.91%,大于208 μm 粒径段占比为0.049%。

通过计算可以得到的分段过滤效率见表6,其中0~5 μm 的过滤效率较低,为90.03%。分段过滤

表5 过滤前后粉尘粒径情况

Table 5 Particle size of dust before and after filtration

| 项目 | $d_{0.1}/\mu\text{m}$ | $d_{0.5}/\mu\text{m}$ | $d_{0.9}/\mu\text{m}$ |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 过滤前粉尘 | 31.85 | 66.10 | 118.88 |
| 过滤后粉尘 | 22.17 | 76.33 | 155.97 |

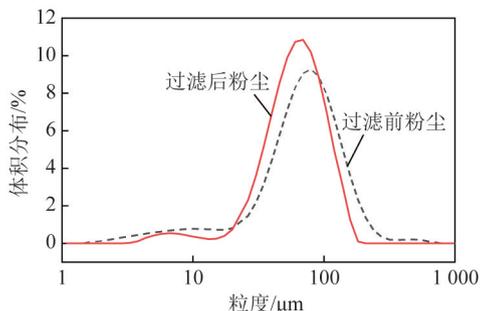


图3 过滤前后粉尘粒径分布

Fig.3 Particle size distributions of dust before and after filtration
效率随粒径增大而提高,大于15 μm 粒径的过滤效率基本在98%以上。对不同粒径范围的过滤效率进行计算可知,过滤分级效率在粉尘小粒径段变化明显,3.80 μm 以下的过滤效率只有19%(图4),3.80~10.0 μm 粒径段的过滤效率升至96%,粒径大于10 μm 后,过滤效率基本在98%以上。过滤效率随粒径变化的原因可归结为不同粒径的过滤机理差异:粒径较小时,主要是扩散沉积、静电吸附机理等起主导作用,故随着粒径减小,分级过滤效率逐渐增大;粒径达到一定值后,过滤效率的主要影响因素是惯性碰撞和直接拦截,分级过滤效率随粒径的增加而增大^[3,12]。

表6 最佳操作条件下冷态试验分段过滤效率

Table 6 Sectional filtration efficiency of cold test under optimal operating conditions

| 粒径/ μm | 过滤前 | | 过滤后 | | 过滤效率/% |
|-------------------|---------|------------|---------|------------|--------|
| | 粉尘总质量/g | 粒径段内粉尘质量/g | 粉尘总质量/g | 粒径段内粉尘质量/g | |
| 0~5 | | 0.311 8 | | 0.031 1 | 90.03 |
| 5~10 | | 1.685 0 | | 0.046 2 | 97.26 |
| 10~15 | | 0.597 2 | | 0.031 5 | 94.73 |
| 5~15 | 69 | 2.282 0 | 1.37 | 0.077 7 | 96.60 |
| 15~38 | | 9.501 0 | | 0.138 0 | 98.55 |
| 38~74 | | 32.361 0 | | 0.474 4 | 98.53 |
| 74~210 | | 24.544 0 | | 0.599 8 | 97.56 |
| >210 | | 0 | | 0.049 0 | — |

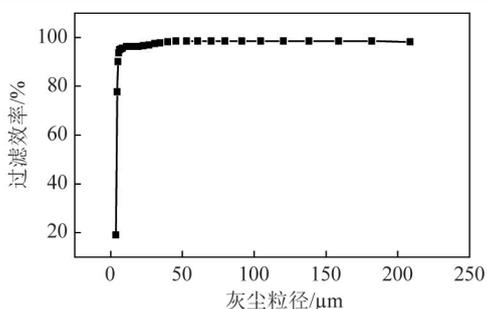


图4 分级过滤效率曲线

Fig.4 Graded filtration efficiency curve

2.3 粉尘浓度对过滤效率的影响

在最优试验条件下(风机1频率为35 Hz,风机2频率为40 Hz,滤层厚度300 mm,滤料下落速率0.002 m/s),过滤时间10 min,粉尘螺旋下料机转速分别为600、800、1 039、1 200、1 400 r/min。粉尘浓度对过滤效率的影响见表7。粉尘浓度较小时,过滤效率随粉尘浓度的增加而增大,达到一定值后,过滤效率随粉尘浓度的增大而减小。主要是因为粉尘浓度增大时,主要影响因素有滤料碰撞拦截和二次扬尘,前者起到主导作用时,过滤效率随粉尘浓度的增加而增大;后者起主导作用时,过滤效率随粉尘浓度的增大呈减小趋势。粉尘下料转速为1 039 r/min

表7 过滤效率与粉尘浓度的关系

Table 7 Relationship between filtration efficiency and dust concentration

| 螺旋转数/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) | 粉尘下料量/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$) | 粉尘浓度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) | 过滤效率/% |
|---|--|---|--------|
| 600 | 3.8 | 2.85 | 96.57 |
| 800 | 5.2 | 3.90 | 96.96 |
| 1 039 | 6.9 | 5.18 | 98.10 |
| 1 200 | 7.7 | 5.78 | 97.10 |
| 1 400 | 8.6 | 6.45 | 97.30 |

时,基本达到过滤效率最大值,为98.1%,这与文献[2]的固定床、移动床颗粒过滤技术的过滤效率相近,过滤效果较好。

2.4 过滤效率表达式回归分析

在20℃、空气黏度 $\mu=1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 、空气密度 $\rho=1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、粉尘浓度 $C=4.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、滤料平均粒径 $d_p=4.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ 条件下,过滤效率的计算公式为

$$\eta = 1 - \exp(b_0 h b_1 u_f b_2 u_1 b_3), \quad (5)$$

对各物理量的量纲无因次化简得

$$\eta = 1 - \exp\left[b_0 \left(\frac{h}{d_p}\right) b_1 \left(\frac{\rho d_p u_f}{\mu}\right) b_2 \left(\frac{u_1}{u_f}\right) b_3\right], \quad (6)$$

两次取对数后得

$$\begin{aligned} \ln[\ln(1 - \eta)] &= \ln b_0 + b_1 \ln\left(\frac{h}{d_p}\right) + \\ & b_2 \ln\left(\frac{\rho d_p u_f}{\mu}\right) + b_3 \ln\left(\frac{u_1}{u_f}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

代入数值,简化计算可得

$$\begin{aligned} \eta_1 &= b_0 + b_1 \ln\left(\frac{h}{0.0045}\right) + b_2 \ln\left(\frac{1.225 \times 0.0045 u_f}{1.7894 \times 10^{-5}}\right) + \\ & b_3 \ln\left(\frac{u_1}{u_f}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

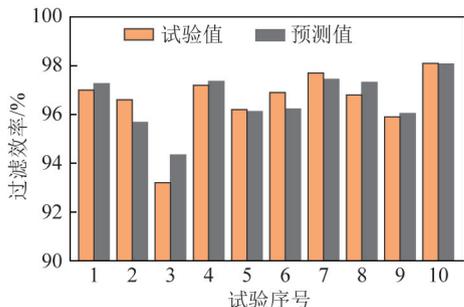
多元回归分析后可得出过滤效率的多元非线性回归方程为

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 3.152 + 0.084 \ln\left(\frac{h}{0.0045}\right) + \\ & 0.531 \ln\left(\frac{1.225 \times 0.0045 u_f}{1.7894 \times 10^{-5}}\right) + 0.053 \ln\left(\frac{u_1}{u_f}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $0.1 \text{ m} \leq h \leq 0.3 \text{ m}$, $0.29 \text{ m/s} \leq u_f \leq 0.41 \text{ m/s}$, $0.002 \text{ m/s} \leq u_1 \leq 0.008 \text{ m/s}$ 。

正交试验测量值与回归公式计算值的对比如图

5所示,可以看出,过滤风速最低、过滤层的滤料厚度为300 mm、滤料循环速度为0.002 m/s,过滤时间为10 min,初始粉尘浓度为4.4 g/m³时,试验过滤效率为98.1%,回归公式计算值为98.07%,两者基本相符。



注:1~9为表2正交试验,10为由正交试验所得最优条件试验。

图5 过滤效率试验值与预测值比较

Fig.5 Filtration efficiency comparison of test and predicted values

3 结 论

1)通过结合正交试验极差分析与方差分析,得到冷态试验中表观风速为过滤效率最主要的影响因素,其次是过滤层厚度和滤料下落速度。过滤效率随表观风速和滤料下落速度的增大而减小,随着过滤层厚度的增加而增大。过滤层厚度增至200 mm以上时,过滤效率变化较小。

2)最优过滤条件为过滤风速最低、滤料厚度为300 mm、滤料下落速度为0.002 m/s,过滤时间为10 min,此时过滤效率为98.1%。过滤分级效率在粉尘小粒径段变化明显,粒径3.80 μm以下的过滤效率仅19%;粒径大于10 μm后过滤效率基本在98%以上。移动式颗粒床冷态过滤试验中床层压力变化不大,整个试验过程近似稳定。

3)利用回归分析得到过滤效率与过滤层厚度、滤料移动速度、表观过滤速度的关联方程,为颗粒床设计以及移动颗粒层过滤性能的预测提供依据。

参考文献(References):

[1] 刘壮,田宜水,胡二峰,等.低阶煤热解影响因素及其工艺技术研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(1):50-59.
LIU Zhuang, TIAN Yishui, HU Erfeng, et al. Research progress on influencing factors and technology of low-rank coal pyrolysis [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 50-59.

[2] 杨帅强,都林,李松庚,等.含尘含油高温热解煤气除尘技术研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(1):193-201.
YANG Shuaiqiang, DOU Lin, LI Songgeng, et al. Advances in high temperature coal pyrolysis gas for dust removal [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 193-201.

[3] HUARD Martin, BRIENS Cedric, BERRUTI Franco, et al. A review of

rapid gas-solid separation techniques [J]. Nephron Clinical Practice, 2010, 8(1): 1185-1197.

[4] ZHENG Chenghang, LIU Xintao, XU Xi, et al. Experimental study on electrostatic removal of high-carbon particle in high temperature coal pyrolysis gas [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3): 2959-2965.

[5] CHEN Junlin, LI Xunfeng, HUAI Xiulan, et al. Experiment study on collection and heat transfer characteristics of hot gas with coagulative particles flowing through a fixed granular bed with embedded heat exchange tubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 114919.

[6] 茹毅,朱丽云,王振波,等.粗煤气除尘工艺与设备研究及应用进展[J/OL].洁净煤技术,https://kns.cnki.net/KXReader/Detail?TIMESTAMP=637612661711982422&DBCOD=CAPJ&TABLEName=CAPJLAST&FileName=JJMS20200929001&RESULT=1&SIGN=YR9pMkPoOHJ0mIuDDC7lGaeLQ8A%3d.
RU Yi, ZHU Liyun, WANG Zhenbo, et al. Research and application progress of coarse gas dust removal technology and equipment [J]. Clean Coal Technology, https://kns.cnki.net/KXReader/Detail?TIMESTAMP=637612661711982422&DBCOD=CAPJ&TABLEName=CAPJLAST&FileName=JJMS20200929001&RESULT=1&SIGN=YR9pMkPoOHJ0mIuDDC7lGaeLQ8A%3d.

[7] 王苗,王毅.粉煤热解含尘干馏气除尘技术研究现状[J].化工管理,2020(6):127-128.
WANG Miao, WANG Yi. Research status of dust removal technology of pulverized coal pyrolysis [J]. Chemical Enterprise Management, 2020(6): 127-128.

[8] 王苗,杜鑫,王毅.旋风-颗粒床过滤器两级除尘的分析与优化[J].化学工程,2020,48(4):55-59.
WANG Miao, DU Xin, WANG Yi. Analysis and optimization on two-stage dust removal of cyclone separator-granular bed filter [J]. Chemical Engineering, 2020, 48(4): 55-59.

[9] 付金壮,常明,范怡平,等.入口粉尘浓度对新型旋流-颗粒床耦合分离器特性的影响[J/OL].过程工程学报,http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4541.TQ.20210113.1157.002.html.
FU Jinzhuang, CHANG Ming, FAN Yiping, et al. Influence of inlet dust concentration on characteristics of a new cyclone particle bed coupling separator [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4541.TQ.20210113.1157.002.html.

[10] 吕涵,范怡平,赵亚飞,等.气固顺流式移动床过滤器的除尘性能[J].高校化学工程学报,2020,34(2):544-551.
LYU Han, FAN Yiping, ZHAO Yafei, et al. Dust removal performance of axial flow granular moving bed filters [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2020, 34(2): 544-551.

[11] 王助良,颜学升,钟秦,等.新型固定床颗粒层过滤规律的分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2006,2(4):332-336.
WANG Zhuliang, YAN Xuesheng, ZHONG Zhong, et al. Analysis on filter property of particle layer in new fixed bed [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(4): 332-336.

- [12] CHEN Yi-Shun, HSIAU Shu-San, SYU Jhan-Ruei, et al. Clean coal technology on hot gas clean-up process with a moving granular bed filter[J]. *Fuel*, 2019, 248: 136-142.
- [13] CHEN Yi-Shun, HSIAU Shu-San, HSU Chia-Jen, et al. Influence of operational parameters on the performance of gas clean-up technology with a moving granular bed filter[J]. *Energy*, 2017, 139: 842-852.
- [14] 赵建涛, 黄戒介, 吴晋沪, 等. 错流移动颗粒床高温除尘模拟和操作特征分析[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 26(14): 18-23.
ZHAO Jiantao, HUANG Jiejie, WU Jinhu, et al. Modeling and operating characteristic analysis of the moving granular bed for hot gas cleanup[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 26(14): 18-23.
- [15] 刘鹏, 杨国华, 朱永锋, 等. 双层滤料颗粒床高温除尘器灰斗气固两相流场模拟分析[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(3): 754-760.
LIU Peng, YANG Guohua, ZHU Yongfeng, et al. Simulation analysis of gas-solid two-phase flow field in ash hopper of high temperature dual-layer granular bed filter[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(3): 754-760.
- [16] 陶初炯, 杨国华, 朱永锋, 等. 双层滤料颗粒床除尘器预热过程的仿真研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2020, 33(3): 40-44.
TAO Chujiang, YANG Guohua, ZHU Yongfeng, et al. Simulation study on preheating process of granular bed precipitator with double filter materials[J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2020, 33(3): 40-44.
- [17] 刘今乾, 郑化安, 张生军, 等. 移动颗粒床除尘冷态装置设计[J]. *山东化工*, 2017, 46(4): 116-117.
LIU Jinqian, ZHENG Hua'an, ZHANG Shengjun, et al. Design of cold state moving granular bed filter for gas-cleaning up[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2017, 46(4): 116-117.