

不同滤料固定颗粒床过滤性能对比

颜深^{1,2}, 孙国刚^{1,2*}, 詹敏述³, 姬忠礼²

[1. 中国石油大学(北京)化学工程学院, 北京 102249; 2. 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249;

3. 北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617]

摘要: 在固定床冷态实验装置上研究了平均粒径和稳态过滤压降相近、颗粒形状和表面状况不同的两种滤料(陶瓷球和石英砂)的过滤性能。结果表明, 两种滤料过滤性能变化规律基本一致。粉尘沉积量(σ_m)增加, 过滤效率先增大后减小, 过滤压降偏离稳态过滤压降程度(G)增大。 σ_m 相同时, 过滤效率和 G 均随过滤气速增大而减小, 但过滤后期高气速下 G 与低气速下接近。增大入口粉尘浓度, 总体过滤效率无明显改变, 粒径大于 $0.7\ \mu\text{m}$ 的粉尘过滤效率提高, G 更显著。两种滤料难过滤粉尘粒径均为 $0.35\sim 0.6\ \mu\text{m}$ 。因颗粒形状和表面状况不同, 两种滤料过滤性能存在差异, 其它条件相同时, 石英砂总体和分级过滤效率均高于陶瓷球, G 也较大; 增大入口粉尘浓度, 石英砂过滤效率随粉尘沉积量变化程度相对较小。

关键词: 过滤; 固定床; 颗粒物料; 过滤效率; 压降

中图分类号: TQ028.2; TQ051.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2018)03-0477-07

Comparison of Filtration Performance in Two Fixed Granular Beds with Different Granules

Shen YAN^{1,2}, Guogang SUN^{1,2*}, Minshu ZHAN³, Zhongli JI²

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

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

3. College of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: Similarities and differences of filtration performances of granules were investigated in two beds of ceramic balls and quartz sands. The results showed that the filtration performances of two kinds of granules with similar mean diameter and steady-state filtration pressure drop except for shape and surface condition were basically identical. The filtration efficiency increased at first and then decreased with increasing dust mass deposition (σ_m), while the deviation degree of pressure drop with steady-state pressure drop (correcting factor, G) presented an increasing trend. The filtration efficiency and G decreased with increasing superficial gas velocity for the same σ_m , but G at high superficial gas velocity would be close to G at low superficial gas velocity during the later period of filtration operation. Although there was no significant change in total filtration efficiency, the grade filtration efficiency of dust particles bigger than $0.7\ \mu\text{m}$ increased when inlet dust concentration increased. At the same time, G under the condition of higher inlet dust concentration was larger. The most penetrant dust particle size was in the range of $0.35\sim 0.6\ \mu\text{m}$ for these two kinds of granules. However, certain differences also existed in filtration performances of these two kinds of granules because of different shape and surface condition. Other conditions being equal, the total and grade filtration efficiency of quartz sands were higher than ceramic balls, and the G of quartz sands was also larger. In addition, the filtration efficiency of quartz sands varying with σ_m changed very little with increasing of inlet dust concentration.

Key words: filtration; fixed bed; granules; filtration efficiency; pressure drop

1 前言

颗粒床过滤器(颗粒床)利用物理和化学性质非常稳定的粒状物料组成颗粒层(滤料或过滤介质)实现含尘气体除尘, 具有兼顾效率与压降、经济性好和苛刻环境适

应性强等特点, 在固体燃料高效综合利用^[1-3]、清洁发电^[4]和余热利用^[5]等领域应用潜力巨大。滤料颗粒直接影响颗粒层内部通道的结构和表面特性, 会改变沉积粉尘在颗粒层内的分布, 最终影响颗粒床的过滤效率和操作压降。研究不同滤料颗粒床的性能变化规律对颗粒床

收稿日期: 2017-09-04, 修回日期: 2017-10-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(编号: 2014CB744304)

作者简介: 颜深(1994-), 男, 山东省枣庄市人, 硕士研究生, 化工过程机械专业; 孙国刚, 通讯联系人, E-mail: ggsunbj@163.com.

引用格式: 颜深, 孙国刚, 詹敏述, 等. 不同滤料固定颗粒床过滤性能对比. 过程工程学报, 2018, 18(3): 477-483.

Yan S, Sun G G, Zhan M S, et al. Comparison of Filtration Performance in Two Fixed Granular Beds with Different Granules (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 477-483, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217324.

的科学设计和正常运行具有重要意义。

研究者从滤料粒径和不同粒径滤料分层组合对颗粒床开展了研究,从深层过滤(粒径一般大于 0.5 mm)颗粒床^[6-10]到自带滤饼层(粒径 0.065~0.1 mm)的粉体颗粒床^[11,12],微细粉尘的过滤效率不断提高;从单层滤料颗粒床到多层滤料(上粗下细、上轻下重)颗粒床^[12-14],过滤效率稳定,颗粒层容尘量增大,过滤操作时间延长。

滤料颗粒一般应廉价易得,多采用较常见的石英砂、膨胀珍珠岩和火山岩等,颗粒形状不规则,表面粗糙。近年来,采用规整颗粒作为滤料的颗粒床^[15,16]因工业化竞争力较强,正逐渐受到关注,如利用制粒设备将工业废料制成均匀球团作为滤料,颗粒床排出的含尘滤料重新制成滤料或直接送至废料处理单元,省去了复杂的滤料再生设备,在减轻设备器壁磨损和颗粒层结块等方面具有一定优越性。对规整滤料颗粒床过滤性能的研究较少^[17-21],与非规整滤料颗粒床过滤性能的差异需进一步研究。本工作采用固定床冷态实验装置系统比较了平均粒径和稳态过滤压降相近、颗粒形状和表面状况不同的 2 种滤料的过滤性能,为颗粒床滤料的评价与选用提供参考。

2 实验

2.1 实验装置与测量仪器

冷态实验装置如图 1 所示,主要由颗粒床、气流控制系统、粉尘加料系统和检测系统等组成。固定床颗粒过滤器主体由内径 190 mm(外径 200 mm)×1000 mm 的有机玻璃筒体构成,气体分布板(孔径 3 mm,孔数 187,

开孔率 4.66%)位于颗粒床下部,正吹过滤时作为滤料支撑结构,反吹清灰时均匀布气,保证颗粒层处于良好的流化状态。气体分布板上铺设一层 60 目(250 μm)筛网防止滤料漏下。装置内设置 3 个入风口和 4 个阀门,通过入风口开闭和阀门切换分别实现正吹过滤和反吹清灰。离心风机负压吸风,螺旋加料器在颗粒层入口处加入粉料形成含尘气流,通过调节加料频率和入口风流量控制颗粒床入口粉尘质量浓度 C_{in} ,过滤气速 u (入口风流量)由转子流量计测量,厚度 L 的颗粒层稳态过滤压降 $(\Delta p/L)_0$ (过滤初始压降)或非稳态过滤压降 $(\Delta p/L)$ 为 U 型管压力计测量的压降减去相应气速下气体分布板压降,颗粒床出口粉尘浓度和粒径分布由 Promo3000H 气溶胶粒径谱仪(德国 Palas 公司)检测。

2.2 实验物料

用粉煤灰模拟待过滤粉尘,密度 1350 kg/m³,中位粒径 8.035 μm,粒度分布见表 1。选用表面光滑、粒度均一的陶瓷球和形状不规则、表面粗糙且具有一定粒度分布的石英砂作为滤料,2 种颗粒的基本物性参数见表 2。两种颗粒层在 $u=0.2\sim0.8$ m/s, $L=50\sim100$ mm 的条件下测得的 $(\Delta p/L)_0$ 见图 2,在平均粒径相近的情况下,两种颗粒的形状和表面状况虽存在差异,但 $(\Delta p/L)_0$ 近似相同。采用 Ergun 公式^[23]拟合实验数据,得到参数 $k_1=127$, $k_2=1.65$, 相关系数 $R^2=0.997$, Ergun 公式很好地预测了 2 种颗粒层的 $(\Delta p/L)_0$ 。

表 1 粉煤灰的粒度分布

Table 1 Particle size distribution of fly ash	
Size/μm	Volume fraction/%
0~1.00	0.62
1.00~3.92	11.47
3.92~6.04	17.37
6.04~8.06	20.85
8.06~10.00	21.55
10.00~12.41	14.87
12.41~14.33	7.86
>14.33	5.42

表 2 滤料颗粒的基本物性

Table 2 Major properties of granular materials		
Property	Ceramic ball	Quartz sand
Size range/mm	1	0.71~1.43
Content/wt%	100	47 (0.71~1 mm) 53 (1~1.43 mm)
Mean diameter/mm	1	1.01 ¹⁾
Shape coefficient	1	0.75 ^[22]
Density/(kg/m ³)	2736	2667
Porosity of bed ²⁾	0.45	0.50

Note: 1) Equivalent specific surface diameter, calculated with sieving method^[22]; 2) Porosity of granular bed after back flushing operation, $\varepsilon_0=1-\rho_b/\rho_s$ ^[22], where ρ_b is bulk density (kg/m³) and ρ_s is true density (kg/m³).

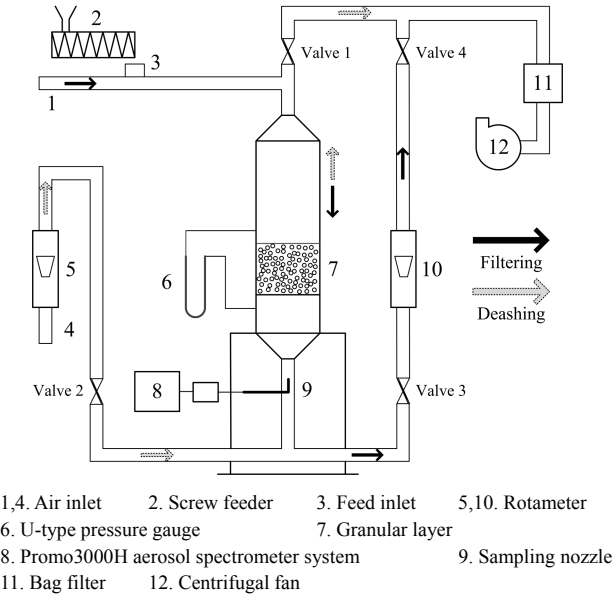


图 1 实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.3 实验过程与操作条件

本研究主要考察过滤气速和入口粉尘浓度对两种

滤料的过滤性能随其沉积量变化的影响. 共进行 10 组配尘实验, 操作条件兼顾颗粒床实际应用^[24]和装置的具体情况(表 3). $u=0.32$ 和 0.38 m/s 时, 操作时间均为 120 min, $u=0.49$ 和 0.63 m/s 时, 当 U 型管压降升至 1500~2000 Pa, 停止过滤操作.

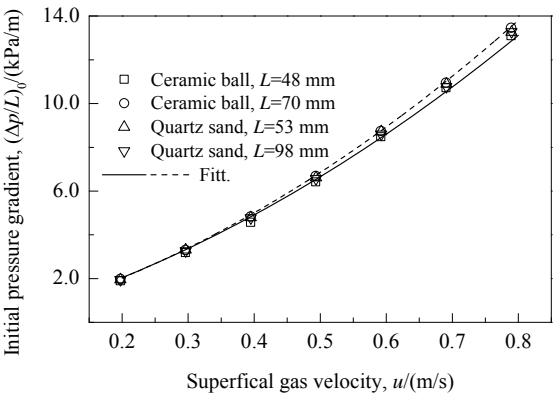


图 2 颗粒层稳态过滤初始压降
Fig.2 Steady-state initial pressure drop of granular layer

表 3 实验操作条件
Table 3 Experimental conditions

Exp.	Superficial gas velocity, $u/(m/s)$	Granular material	Inlet dust concentration, $C_{in}/(g/m^3)$	Filtration time, t/min	Thickness of granular layer, L/mm
1	0.32	Ceramic ball	5	120	53
2	0.38			120	
3	0.49			70	
4	0.63			50	
5	0.38			60	
6	0.32	Quartz sand	5	120	
7	0.38			120	
8	0.49			70	
9	0.63			50	
10	0.38		10	60	

配尘过滤时, 关闭进气口 4、阀 1 和 2, 打开进气口 1、加料口 3 和阀 3, 调节阀 4 开度, 由转子流量计 10 确定 u ; 调节螺旋加料器 2 的加料频率, 同时启动加料器与气溶胶粒径谱仪, 开始过滤. 颗粒层出口处含尘气体经除尘器 11 进一步过滤后排入大气. 间隔约 5 min 记录 Δp , 间隔 10~20 min 拍摄颗粒层照片, 以便观察沉积粉尘在颗粒层内的分布. 随颗粒层内沉积粉尘增多, 阀 4 开度逐渐增大, 保证 u 维持在预设值附近. 过滤结束后, 颗粒层反吹清灰, 再进行下次配尘实验. 清灰时, 关闭进气口 1、加料口 3、阀 3 和 4, 打开进气口 4、阀 1 和 2, 反吹气体流化颗粒层 7, 夹带颗粒层捕集粉尘的气体经除尘器 11 过滤后排入大气. 清灰前后颗粒层的 $(\Delta p/L)_0$ 相对误差不应超过 10%(u 一致情况下), 否则应继续清灰.

2.4 数据分析方法

过滤效率是衡量颗粒层除尘性能的重要指标之一.

某时间段内颗粒层总体过滤效率 E 和分级过滤效率 E_i 分别用式(1)和(2)计算:

$$E=1-C_{out}/C_{in}, \tag{1}$$

$$E_i=1-C_{out,i}/C_{in,i}, \tag{2}$$

式中, $C_{in,i}$, $C_{out,i}$ 分别为颗粒床入口和出口处粒径为 d_i 的粉尘浓度, 进出口总浓度 $C_{in}=\sum C_{in,i}$, $C_{out}=\sum C_{out,i}$.

过滤过程中, 颗粒层内的粉尘沉积情况影响过滤效率, 操作压降也会发生变化, 引入校正因子 G 表征颗粒层过滤压降偏离稳态过滤压降的程度^[25]:

$$G=(\Delta p/L)/(\Delta p/L)_0. \tag{3}$$

用沉积量反映颗粒层内的粉尘沉积程度^[25], 考虑颗粒层整体质量平衡, 过滤 t 时刻的颗粒层粉尘沉积量 σ_m 计算如下:

$$\sigma_m=S\int_0^t u(C_{in}-C_{out})dt=S\int_0^t uC_mEdt, \tag{4}$$

式中, S 为颗粒床截面积(m^2).

3 结果与讨论

3.1 过滤风速和入口粉尘浓度对过滤效率的影响

3.1.1 过滤风速的影响

不同风速下两种颗粒层的过滤效率随粉尘沉积量的变化如图 3 所示. 由图可知, σ_m 相同时, 两种颗粒层的过滤效率均随风速增大而减小. 风速较低时, 在惯性碰撞和扩散作用下粉尘很快被捕集, 主要存留于颗粒层上部^[26]; 增大风速, 粉尘动能增加, 部分粉尘可穿过滤料颗粒间的曲折通道深入颗粒层内部, σ_m 相同时, 高风速下沉积粉尘散布于更大范围的颗粒层中, 颗粒层内部空隙较大, 不利于后续粉尘过滤. 4 种风速下, 随 σ_m 增加, 两种颗粒层的过滤效率均先增大后减小, 与赵建涛等^[7]的研究结果一致, 且低风速下趋势更明显. $u=0.32$ 和 0.38 m/s 时, 随粉尘在颗粒层上部沉积, 直接拦截效应增强, 同时部分从上部滤料脱落的沉积粉尘还可在下部滤料中被截获, 过滤效率逐渐增大; 粉尘持续沉积, 颗粒层内部空隙减小, 在速度不断升高的过流气体的冲刷下, 沉积粉尘脱落(二次扬尘)^[6,7,12,14], 导致操作后期过滤效率降低. 风速增大至 0.49 和 0.63 m/s 时, 沉积粉尘在颗粒层内的分布较分散, 沉积粉尘的二次扬尘现象更严重, 沉积粉尘对过滤的促进作用维持时间很短, 随后过滤效率随 σ_m 增加逐渐减小.

$u=0.38$ m/s 时沉积粉尘在两种颗粒层中的位置变化见图 4. 由图可知, 在 σ_m 近似相同时, 与陶瓷球相比, 石英砂颗粒层已沉积粉尘和未沉积粉尘的界线距颗粒层顶部更近, 且层次分明. 这是因为石英砂表面粗糙、

比表面积大, 粉尘与滤料颗粒表面发生作用的可能性较大^[12]. 形状不规则的石英砂有一定的粒度分布, 使颗粒层内部通道的弯曲度大^[27], 提高了捕集来流气体夹带粉尘能力, 也可及时截获脱落的沉积粉尘. σ_m 相同时, 在更集中分布和密实填充的沉积粉尘的协同作用下, 石英砂颗粒层的过滤效率提高. 因此 4 种气速下, σ_m 相同时

陶瓷球颗粒层的过滤效率小于石英砂颗粒层. 因粉尘沉积, 过滤中后期两种颗粒层顶部均有粉尘层形成, 但不能认为此时已进入滤饼过滤状态, 这是因为粉尘层表面多孔, 并未完全覆盖颗粒层并独自发挥过滤粉尘的作用. 本研究过滤气速较大, 不满足滤饼的形成条件^[28], 均属于深层过滤.

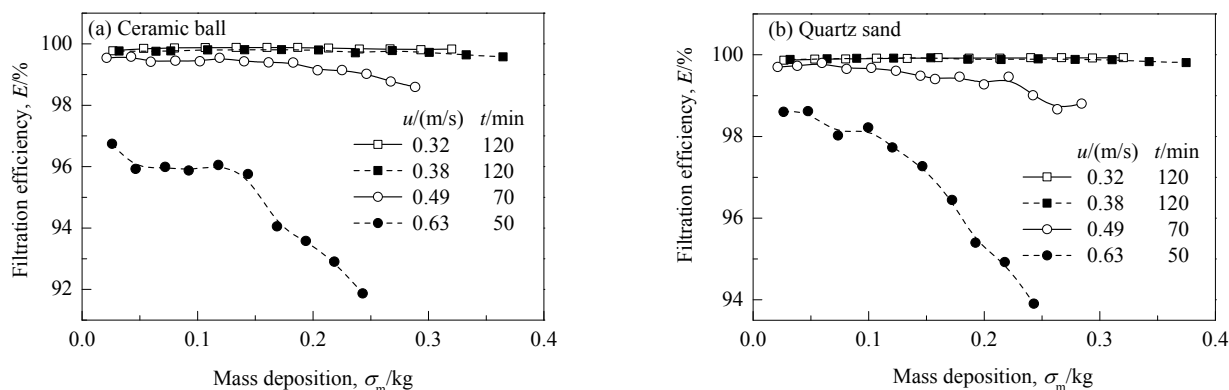


图 3 入口浓度 5 g/m^3 时不同气速(u)下粉尘沉积量对过滤效率的影响

Fig.3 Effect of dust deposition on filtration efficiency at different superficial gas velocities (u) with $C_{in}=5 \text{ g/m}^3$

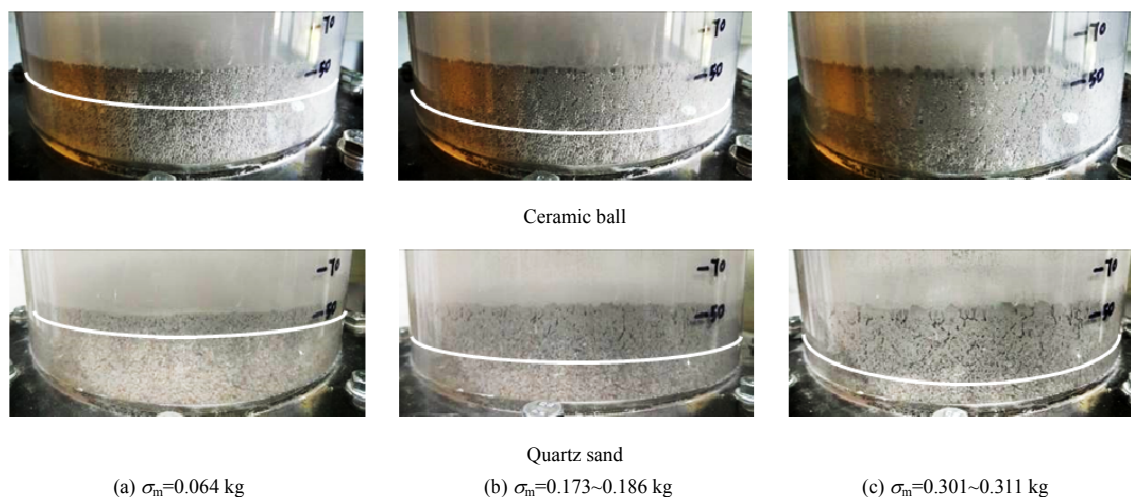


图 4 气速 0.38 m/s 、过滤时间 120 min 时过滤操作中粉尘沉积位置

Fig.4 Position of deposited dust in granular layer with $u=0.38 \text{ m/s}$ and $t=120 \text{ min}$

不同气速下两种颗粒层的分级过滤效率见图 5. 由图可知, 气速增大, 两种颗粒层的分级效率逐渐下降, 同一气速下, 石英砂颗粒层的分级效率大于陶瓷球颗粒层, 不同气速下两种滤料的分级效率变化规律与图 3 总体过滤效率的变化规律一致. 分级效率随粉尘粒径增大先降低后升高, 出现了难过滤粉尘, 在移动颗粒床和固定颗粒床中也得到了类似规律^[6,11,12,14,18]. 过滤机理大尘粒受惯性碰撞效应主导, 小尘粒受扩散效应主导, 分级效率出现最低值是扩散效应减弱而惯性碰撞效应还不强的结果. 气速从 0.32 m/s 升至 0.38 m/s , 两种颗粒层难过滤粉尘的粒径稍有减小, 这是气速增大引起惯性碰

撞效应增强的结果. 但气速增大并不会持续弥补尘粒径减小对惯性碰撞效应的减弱作用, 随气速增大, 难过滤粉尘粒径未继续减小.

3.1.2 入口粉尘浓度的影响

不同入口浓度下两种颗粒层的过滤效率随粉尘沉积量的变化见图 6. 由图可知, 增大入口浓度会适当提高过滤前期的效率, 但不利于后期粉尘过滤. 入口浓度增大后, 粉尘被捕获的概率增大^[9], 单位时间内有更多粉尘在颗粒层上部沉积, 颗粒层空隙迅速减小, 过滤效率增大, 伴随着上部滤料间隙阻塞速度加快, 更多粉尘被拦截沉积; 过滤后期, σ_m 相同时, 高入口浓度下沉积

粉尘分布较集中, 颗粒层内部空隙趋于被填满, 空隙随流速增大引起的二次扬尘更明显, 导致过滤效率较低。在颗粒层上下游压差作用下, 与陶瓷球相比, 沉积粉尘较难在石英砂颗粒层内滑移以让出气流通

道, 使石英砂颗粒层在两种入口浓度下的效率差异更小, 即石英砂颗粒层对实验范围内的入口浓度变化相对不敏感。

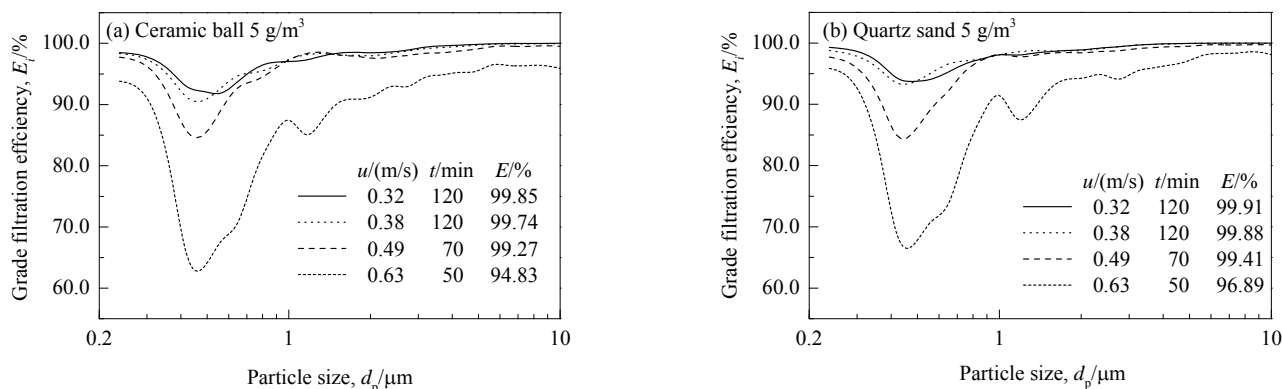


图5 过滤气速(u)对分级过滤效率的影响

Fig.5 Effect of superficial gas velocity (u) on grade filtration efficiency

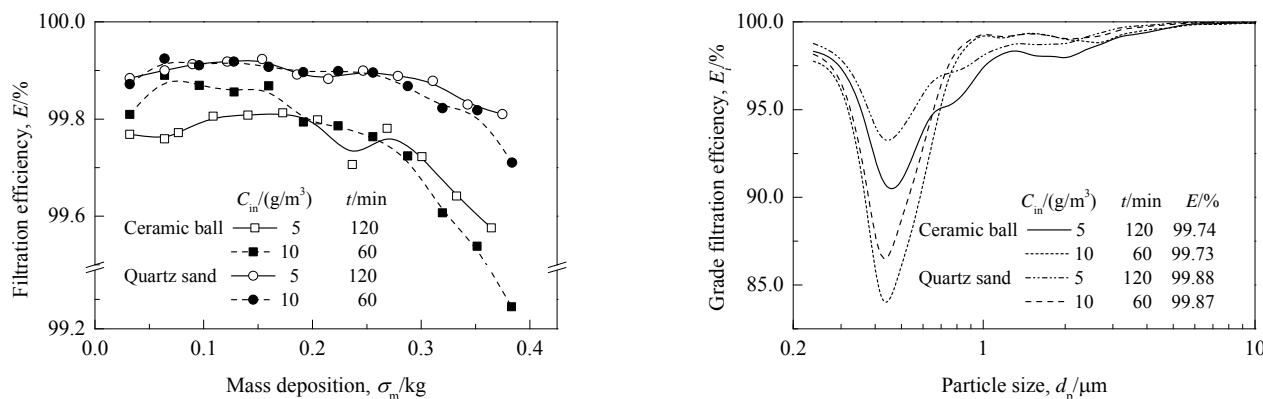


图6 不同入口浓度(C_{in})下粉尘沉积量对过滤效率影响

Fig.6 Effect of dust deposition on filtration efficiency at different inlet dust concentrations (C_{in})

不同入口浓度下两种颗粒层的分级过滤效率见图7。由图可知, 入口浓度增大, 加强了沉积粉尘的协同过滤作用, 适当减小了难过滤粉尘的粒径, 也提高了颗粒层对粒径大于 $0.7 \mu\text{m}$ 粉尘的过滤效率; 但高入口浓度下, 二次扬尘较严重, 脱落的小粒径粉尘因较好的气流跟随性不易被再次捕获, 使颗粒层对粒径小于 $0.7 \mu\text{m}$ 粉尘的过滤效率降低, 但总过滤效率 E 无明显改变。结合图5和7可知, 两种颗粒层的难过滤粉尘粒径均为 $0.35 \sim 0.6 \mu\text{m}$, 表明滤料颗粒平均直径相近时, 滤料颗粒的形状和表面状况对难过滤粉尘粒径影响不大。

3.2 过滤气速和入口粉尘浓度对过滤压降偏离稳态值程度的影响

3.2.1 过滤气速的影响

不同气速下两种颗粒层过滤压降偏离初稳态的程度 G 随 σ_m 的变化见图8。由图可知, 随 σ_m 增加, 两种颗

粒层的 G 逐渐增大。增大气速, 沉积粉尘在颗粒层内的分布从集中趋于均匀, 这解释了过滤开始后的一段时期内, σ_m 相同时 G 随气速增大而减小。颜深等^[21]的研究表明, 高气速($u=0.4, 0.6 \text{ m/s}$)下过滤后期 G 增加较平缓, 本研究中当 σ_m 增至一定值后, $u=0.49$ 和 0.63 m/s 时 G 曲线的斜率开始增大, 与 $u=0.32$ 和 0.38 m/s 时的 G 曲线接近并相交, 主要原因是本研究的颗粒层厚度相对较小, 颗粒层上下游压差不大, 颗粒层内未产生明显的固定通道^[18], 过滤后期颗粒层大部分区域被沉积粉尘占据, σ_m 相同时, 高、低气速下颗粒层内部空隙无明显区别, 但高速气流流经颗粒层产生的压降增幅更大, 导致高气速下的 G 逐渐接近甚至大于低气速下的 G 。

除气速外, 滤料颗粒的形状和表面状况也会影响沉积粉尘沿颗粒层轴向的不均匀分布程度。较好的表面接触特性和一定范围的粒度分布使沉积粉尘在石英砂颗

图7 入口粉尘浓度(C_{in})对分级过滤效率影响

Fig.7 Effect of inlet dust concentration (C_{in}) on grade filtration efficiency

粒层内的分布较集中,同一风速下石英砂颗粒层的 G 大于陶瓷球颗粒层,导致在石英砂颗粒层内粉尘沉积量不

大时($\sigma_m \approx 0.15 \text{ kg}$),在 $u=0.49$ 和 0.63 m/s 条件下 G 曲线与 $u=0.32$ 和 0.38 m/s 条件下的 G 曲线相交。

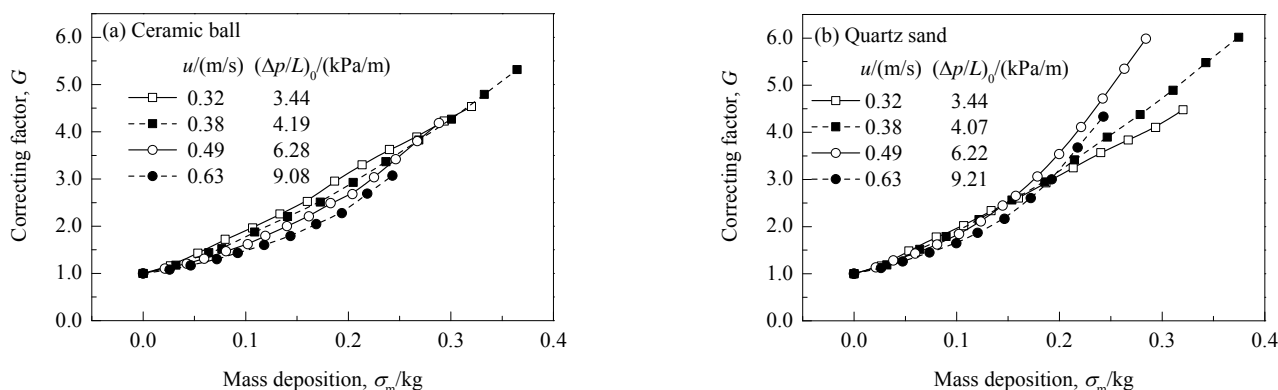


图 8 不同过滤风速(u)下粉尘沉积对校正因子(G)的影响

Fig.8 Effect of dust deposition on correcting factor (G) at different superficial gas velocities (u)

3.2.2 入口粉尘浓度的影响

不同入口浓度下两种颗粒层 G 随 σ_m 的变化见图 9。由图可知,增大入口浓度后,颗粒层空隙阻塞速度加快, σ_m 相同时,两种入口浓度下颗粒层的 G 存在差异;在颗粒层上部已沉积粉尘的协同作用下,更多的粉尘被拦截,滤料颗粒间隙进一步减小,过滤压降偏离稳态的程度进一步增大,解释了图 9 中两条 G 曲线的差异程度随 σ_m 增大而增大。

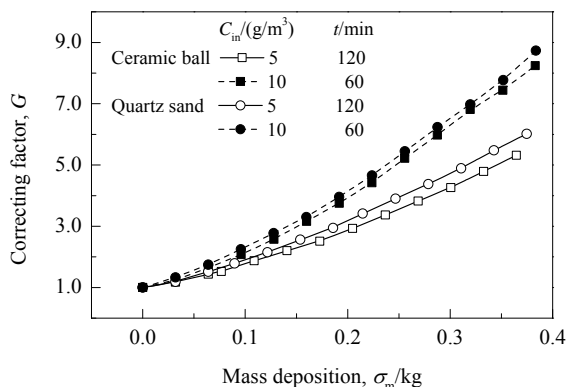


图 9 不同入口粉尘浓度(C_{in})下粉尘沉积对校正因子(G)影响

Fig.9 Effect of dust deposition on correcting factor (G) at different inlet dust concentrations (C_{in})

4 结 论

在固定床冷态实验装置上研究了平均粒径和稳态过滤压降相近、颗粒形状和表面状况不同的陶瓷球和石英砂滤料的过滤性能,得到如下结论:

(1) 实验范围内两种滤料的过滤性能变化规律基本一致。随粉尘沉积量增加,过滤效率先增大后减小,过滤压降偏离稳态过滤压降的程度(G)逐渐增大。粉尘沉积量相同时,过滤效率和 G 均随过滤风速增大而减小,

粉尘沉积至一定程度后,高气速($u=0.49$ 和 0.63 m/s)下 G 会逐渐接近甚至大于低风速($u=0.32$ 和 0.38 m/s)下的 G 。增大入口粉尘浓度($C_{in}=10 \text{ g/m}^3$),前期的过滤效率适当提高,但不利于后期过滤,总过滤效率无明显改变,但大粒径(大于 $0.7 \mu\text{m}$)粉尘的过滤效率提高。相同粉尘沉积量下,高入口浓度下的 G 明显大于低入口浓度的 G 。两种滤料的难过滤粉尘粒径均在 $0.35\sim 0.6 \mu\text{m}$ 。

(2) 两种滤料因颗粒形状和表面状况不同过滤性能存在差异。相同条件下,石英砂的总体和分级过滤效率均高于陶瓷球,但石英砂的 G 较大,特别是高气速条件下,石英砂的 G 在粉尘沉积量不大时尤为显著。增大入口浓度,石英砂过滤效率随粉尘沉积量变化而变化的程度较小。

参考文献:

- [1] 战金辉,赖登国,许光文. 油页岩: 固体石油 [J]. 科学世界, 2016, (12): 68-73.
Zhan J H, Lai D G, Xu G W. Oil Shale: Solid Petroleum [J]. Science World, 2016, (12): 68-73.
- [2] 詹敏述. 油页岩与固体热载体颗粒混合及热解气高温除尘技术研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2015: 102-123.
Zhan M S. Research on the Mixing of Oil Shale and Solid Heat Carriers and High Temperature Pyrolysis Gas Dust Removal Technology [D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2015: 102-123.
- [3] 中国科学院过程工程研究所能源转化课题组. 中国科学院过程工程研究所煤炭低温热解油尘分离技术获得突破性进展 [EB/OL]. http://www.ipe.cas.cn/xwdt/kyjz/201504/t20150410_4334971.html, 2015-04-10/2017-09-01.
Energy Conversion Research Group, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences Made a Great Breakthrough in the Separation Technology of Oil and Dust in the Process of Low-temperature Pyrolysis of Coal [EB/OL]. http://www.ipe.cas.cn/xwdt/kyjz/201504/t20150410_4334971.html,

- 2015-04-10/2017-09-01.
- [4] Smid J, Peng C Y, Lee H T, et al. Hot Gas Granular Moving Bed Filters for Advanced Power Systems [J]. *Filtr. Sep.*, 2004, 41(10): 32-35.
- [5] 于春令, 杨国华, 王兴云. 双层滤料颗粒床高温除尘技术及其在冶金炉窑中的应用 [J]. *环境工程*, 2009, 27(2): 15-17, 21.
Yu C L, Yang G H, Wang X Y. Dual-layer Granular Bed Filter for Hot Gas Cleanup and Its Application in Metallurgical Furnaces [J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27(2): 15-17, 21.
- [6] 许世森. 移动颗粒层过滤高温除尘过程结构和参数优化实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 1999, 19(5): 13-17.
Xu S S. Research on Optimizing Structure and Parameters of the Moving Granular Bed Filter for High Temperature Dust Removal in IGCC and PFBC Systems [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 1999, 19(5): 13-17.
- [7] 赵建涛, 黄戒介, 吴晋沪, 等. 气固错流移动颗粒床过滤器除尘效率 [J]. *化工学报*, 2004, 55(5): 721-726.
Zhao J T, Huang J J, Wu J H, et al. Collection Efficiency of Cross-flow Moving Granular Bed Filter [J]. *CIESC Journal*, 2004, 55(5): 721-726.
- [8] Macias-Machin A, Socorro M, Verona J M, et al. New Granular Material for Hot Gas Filtration: Use of the "Lapilli" [J]. *Chem. Eng. Process.*, 2006, 45(9): 719-727.
- [9] 付海明, 李阳. 颗粒层非稳态过滤捕集效率的研究 [J]. *环境工程学报*, 2009, 3(9): 1625-1629.
Fu H M, Li Y. Study on Collecting Efficiency of Granular Bed Filter in Non-stationary [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(9): 1625-1629.
- [10] Sulaymon A H, Mustafa Y A. Aerosol Filtration Using Quartz Sand Filter [J]. *Am. J. Environ. Sci.*, 2012, 8(4): 385-395.
- [11] 黄三, 杨国华, 杜卡帅, 等. 新型粉体颗粒床过滤 $PM_{2.5}$ 烟尘粒子的实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(1): 117-121.
Huang S, Yang G H, Du K S, et al. Experimental Study of Filtration of $PM_{2.5}$ by a New Powder Bed Filter [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2013, 42(1): 117-121.
- [12] Shi K Y, Yang G H, Huang S, et al. Study on Filtering Characteristics of Aerosol Particulates in a Powder-grain Dual-layer Granular Bed [J]. *Powder Technol.*, 2015, 272: 54-63.
- [13] Yang G H, Zhou J H. Experimental Study on a New Dual-layer Granular Bed Filter for Removing Particulates [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 17(2): 201-204.
- [14] Tian S R, Yang G H, Li Z, et al. Cascade Filtration Properties of a Dual-layer Granular Bed Filter [J]. *Powder Technol.*, 2016, 301: 545-556.
- [15] Smid J, Hsiau S S, Peng C Y, et al. Hot Gas Cleanup: New Designs for Moving Bed Filters [J]. *Filtr. Sep.*, 2005, 42(10): 36-39.
- [16] 许世森, 李春虎, 郜时旺. 煤气净化技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 307-308.
Xu S S, Li C H, Gao S W. Coal Gas Purification Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 307-308.
- [17] Brown R C, Shi H, Colver G, et al. Similitude Study of a Moving Bed Granular Filter [J]. *Powder Technol.*, 2003, 138(2/3): 201-210.
- [18] Kuo Y M, Huang S H, Lin W Y, et al. Filtration and Loading Characteristics of Granular Bed filters [J]. *J. Aerosol Sci.*, 2010, 41(2): 223-229.
- [19] Bemer D, Subra I, Morele Y, et al. Experimental Study of Granular Bed Filtration of Ultrafine Particles Emitted by a Thermal Spraying Process [J]. *J. Aerosol Sci.*, 2013, 63: 25-37.
- [20] 刘书贤, 黄峰, 茆亮, 等. 颗粒过滤器除尘效率的实验研究与数学建模 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(增刊 2): 542-547.
Liu S X, Huang F, Chang L, et al. Mathematical Modeling and Experimental Study on Dust Removal Efficiency of Granular Filtration Bed [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 542-547.
- [21] 颜深, 孙国刚, 詹敏述, 等. 固定床颗粒层过滤性能分析及预测 [J]. *化工学报*, 2017, 68(10): 3841-3850.
Yan S, Sun G G, Zhan M S, et al. Analysis and Prediction of Fixed Granular Bed Filtration Performances [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(10): 3841-3850.
- [22] 吴占松, 马润田, 汪展文. 流态化技术基础及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 48-52.
Wu Z S, Ma R T, Wang Z W. Fluidization Technology Foundation and Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 48-52.
- [23] Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns [J]. *Chem. Eng. Progress*, 1952, 48(2): 89-94.
- [24] 向晓东. 现代除尘理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 159-161.
Xiang X D. Modern Aerosol Particle Collection Theory and Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 159-161.
- [25] Tien C, Ramarao B V. Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols, 2nd Ed. [M]. Oxford: Elsevier Science, 2007: 25, 47.
- [26] 岑可法, 倪明江, 严建华, 等. 气固分离理论及技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999: 494.
Cen K F, Ni M J, Yan J H, et al. Gas-Solid Separation Theory and Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1999: 494.
- [27] 白皓, 齐道辉, 钱文涛, 等. 微米级气溶胶粒子在滤层中的收集效率研究 [J]. *过程工程学报*, 2009, 9(增刊 1): 31-35.
Bai H, Qi D H, Qian W T, et al. Study on Filtrating Efficiency of Micron Aerosol Particles by Granular Bed Filter [J]. *Chin. J. Process Eng.*, 2009, 9(S1): 31-35.
- [28] 黄三. 自带粉体层滤膜的多层滤料颗粒床过滤特性研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2012: 12-13.
Huang S. Study on Characteristics of the Multi-layer Granular Bed with Powder Membrane [D]. Ningbo: Ningbo University, 2012: 12-13.