

研究论文

# 气固错流移动颗粒床过滤器除尘效率

赵建涛 黄戒介 吴晋沪 张建民 张永奇 王洋

(中国科学院山西煤炭化学研究所, 山西 太原 030001)

**摘 要** 研究了气固错流移动颗粒床过滤器除尘效率与表观过滤气速、颗粒层移动速度、过滤气体粉尘含量的关系, 并进一步探讨了粉尘在颗粒层内的沉积对除尘效果的影响。结果表明, 颗粒层内粉尘沉积量较低时, 沉积的粉尘有效地促进了颗粒层除尘效率的提高, 但随粉尘沉积量增大, 沉积粉尘的二次飞扬变得严重, 其促进效应逐渐减小。在考虑了沉积粉尘对除尘效率影响和颗粒层内粉尘沉积不均匀性的基础上, 基于捕集单元的收缩管模型, 建立了计算移动颗粒层除尘效率和床层内粉尘沉积分布的数学模型。模型计算结果和实验数据比较表明, 在操作气速  $0.1 \sim 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内, 计算值与实验结果吻合较好。据此对除尘效率和床层内粉尘沉积的变化趋势进行了模拟分析。

**关键词** 除尘效率 数学模型 错流移动颗粒床 除尘

**中图分类号** TQ 028.26

**文献标识码** A

**文章编号** 0438-1157 (2004) 05-0721-06

## COLLECTION EFFICIENCY OF CROSS-FLOW MOVING GRANULAR BED FILTER

ZHAO Jiantao, HUANG Jiejie, WU Jinhui, ZHANG Jianmin, ZHANG Yongqi and WANG Yang

(Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, Shanxi, China)

**Abstract** The effects of superficial gas velocity, filter media flow rate and dust content in gas on collection efficiency of the cross-flow moving granular bed filter were investigated experimentally and the effect of dust deposition in the granular bed was also discussed. The results showed that a lower superficial gas velocity and moving speed of pellets could improve collection efficiency. The deposition of dust in the granular bed could affect dust removal efficiency. Less dust deposit could improve the efficiency obviously, while such improvement could become insignificant due to reentrainment of the deposited particles. A mathematical model was established to simulate the effect of dust deposit on collecting efficiency and the non-uniform deposition of dust in the granular bed on the basis of the constricted-tube concept. The model test showed that the model prediction was in good agreement with the experimental data for operating gas velocity from  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Based on the model, the analysis on the relationship of collection efficiency with the length of the granular bed and the distribution of dust deposit was conducted.

**Keywords** collection efficiency, mathematical model, cross-flow moving granular bed, dust removal

### 引 言

高温气固分离技术在石油催化裂化、煤洁净燃

烧联合循环发电等化工、能源领域得到了广泛的应用。移动颗粒层深床过滤器具有抗高温、耐腐蚀的优点, 被认为是最具发展前途的高温净化技术之

2003-01-06 收到初稿, 2003-06-17 收到修改稿。

**联系人及第一作者:** 赵建涛, 男, 29岁, 博士研究生。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划项目  
(No. G1999022104, G1999022105)。

**Received date:** 2003-01-06.

**Corresponding author:** ZHAO Jiantao, PhD candidate.  
**E-mail:** zhaojt@sxicc.ac.cn

**Foundation item:** supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G1999022104, G1999022105).

一，特别是日本 KHL 公司提出利用具有脱硫活性的颗粒状脱硫剂作为颗粒层过滤介质，实现了脱硫除尘一体化操作，其基本原理在于脱硫剂颗粒既作为脱硫吸附剂又作为除尘的捕集体，使脱硫和除尘过程在一个操作单元完成，进一步拓展了颗粒床除尘器的应用功能<sup>[1~3]</sup>。目前，移动颗粒层过滤器高温除尘工艺过程仍处于实验研究阶段，其设计、操作还主要停留在经验的基础上。本文在实验的基础上，研究了移动颗粒层除尘效率与设计、操作参数的关系，着重探讨了颗粒层内沉积粉尘对除尘效率的影响，并建立了简单实用的数学模型，对错流移动颗粒层除尘效果进行预测。

除尘效率是颗粒床除尘器最重要的操作指标。Tien<sup>[4]</sup>对固定颗粒床除尘过程进行了比较系统的研究，提出除尘效率和颗粒层内粉尘平均比沉积率有关，并建立了半经验半理论的数学模型，描述除尘过程中除尘效率和压降的变化。Show<sup>[5]</sup>和吴晋沪<sup>[6]</sup>发展了 Tien 等提出的固定床模型，并应用到移动床除尘效率计算过程中，得到了较好的结果，但其模型假设颗粒层内粉尘沉积均匀，因此在颗粒层厚度变化较大、气体尘含量较高的情况下难以普遍适用。在实际过程中，粉尘在颗粒层内的沉积沿床深方向变化很大，而且粉尘沉积是造成除尘效率和操作压降变化的重要因素。本文利用收缩管模型，在实验研究的基础上，考虑粉尘分布的不均匀性，建立了数学模型，并与实验结果进行比较。

### 1 实验设备及流程

移动颗粒床除尘实验在室温 18℃ 和 250℃ 下进行，实验装置如图 1 所示。整套装置主要包括粉尘发生系统、颗粒床过滤系统、测试和数据采集系统。粉尘发生器由螺旋进料器、φ145 mm 的流化床和旋风分离器组成。螺旋进料器以一定的转速向流化床中加入焦粉，经空气流化，粒径较小的焦粉粒子被气体带出。为更好模拟高温气体净化过程，经旋风分离器进一步除去气流夹带的粒径较大粒子后，进入颗粒床过滤器。颗粒床过滤系统由上下料斗、颗粒床过滤器、下料绞龙组成。颗粒床过滤器尺寸为 100 mm × 100 mm × 350 mm，两侧为水平 60° 倾斜角的百叶窗挡板，起到夹持滤料和布气的作用。绞龙以一定速度转动时，滤料向下移动，控制绞龙的转速可以获得不同移动速度的颗粒床层。

气体进、出口粉尘含量的测定采用等速取样法。床层压降测量采用差压变送器，并通过计算机数据采集系统显示储存。实验起始阶段，由于颗粒层内粉尘的沉积，床层压降逐步升高。床层压降趋于平稳后，认为实验达到稳定状态，测量气体的粉尘含量，并计算除尘效率。

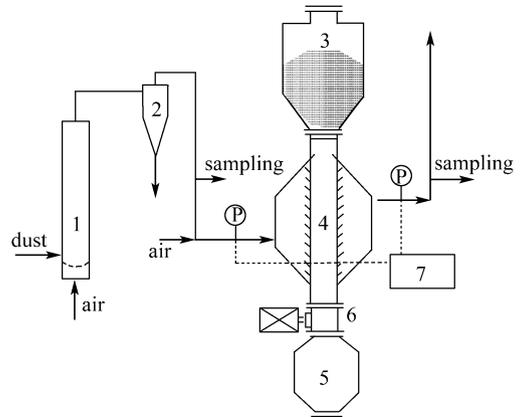


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup  
 1—fluidized-bed; 2—cyclone;  
 3—feeding hopper; 4—granular bed;  
 5—discharging hopper; 6—star discharge;  
 7—differential pressure transducer

本实验采用粒径 1~2.5 mm 的石英砂和氧化铁高温脱硫剂颗粒为过滤介质，采用气化炉焦粉模拟过滤粉尘。鉴于人们对粒径 5 μm 以下粉尘脱除效率的关心，粉尘平均粒径控制在 5 μm 以下。详细的物料特性列于表 1，含尘气体中粉尘的粒径分布见图 2。

Table 1 Characteristics of filtering media and dust

Materials	$d$ /mm	$\rho_s$ /g · cm <sup>-3</sup>	$\rho_p$ /g · cm <sup>-3</sup>	$\epsilon$	$\phi$
sand	1.63	2.52	1.51	0.401	0.66
sorbent	1.54	1.715	0.98	0.428	0.63
dust particulate	$3.35 \times 10^{-3}$	1.2	0.756	—	—

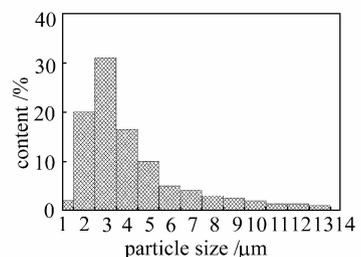


Fig. 2 Distribution of dust particle size

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 操作参数对除尘效率的影响

颗粒层除尘效率与过滤风速、颗粒层移动速度、过滤气体的粉尘含量以及物料特性有关. 本实验中, 结合工业实际应用以及防止出现空穴、贴壁等不正常操作现象, 表观过滤风速选择  $0.1 \sim 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 由除尘机理可知, 随操作风速增大, Stokes 数增大, 促进了惯性碰撞效应, 但同时 Reynolds 数增大, 颗粒的碰撞反弹效应增大, 更重要的是风速增大促进捕集粉尘的二次飞扬, 造成颗粒层捕集效率下降. 图 3 是单位时间内进入床层粉尘量一定的条件下, 表观过滤风速对除尘效率的影响. 可见, 操作风速的增大显著降低了除尘效率.

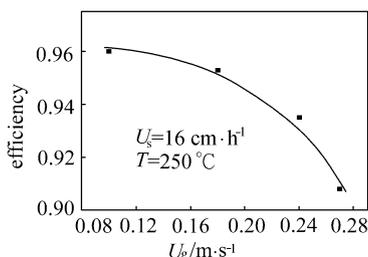


Fig. 3 Effect of superficial gas velocity on dust removal efficiency

颗粒层移动速度是影响移动颗粒床除尘效率的另一个重要因素. 如图 4 所示, 颗粒层移动速度增加, 造成除尘效率明显下降. 以石英砂为滤料时, 颗粒层移动速度从  $8 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$  增加到  $32 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 除尘效率从 0.94 下降到 0.85; 而以脱硫剂颗粒为滤料时, 除尘效率下降更加显著, 同等条件下, 除尘效率从 0.93 下降到了 0.78. 根据 Tien 对颗粒层除尘过程的研究结果, 沉积粉尘可以显著提高颗粒层的过滤效果. 过滤气体粉尘含量不变时, 颗粒层移动速度的增加降低了颗粒层内的粉尘沉积量, 从而导致了除尘效率的下降. 从另一方面讲, 由于颗粒分布的不均匀性, 颗粒移动速度增加造成颗粒间的错动, 加重了捕集粉尘在颗粒间的迁移和再次扬起, 从而导致了除尘效率的降低. 对两种滤料的比较 (见表 1) 可以看出, 以脱硫剂颗粒为滤料时, 床层孔隙率较大. 较大的床层孔隙率不仅不利于粉尘的捕集, 而且促进了沉积粉尘的二次飞扬. 因此, 同样操作条件下, 脱硫剂床层的除尘效率较低, 而且随颗粒层移动速度增加, 除尘效率降低更加显著.

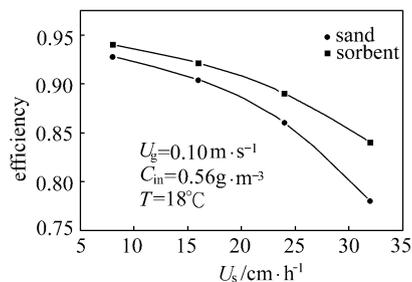


Fig. 4 Effect of pellets moving speed on dust removal efficiency

图 5 表示过滤气体粉尘含量对除尘效率的影响. 从图中可以看出, 随着气体中粉尘含量的提高, 尽管净化气体中粉尘含量增大, 但除尘效率明显提高. 如前所述, 沉积粉尘可在一定程度上提高颗粒层除尘效果. 因此, 其原因可归结为, 随过滤气体中粉尘含量的提高, 颗粒层内粉尘的沉积量增大, 提高了颗粒层的除尘效率.

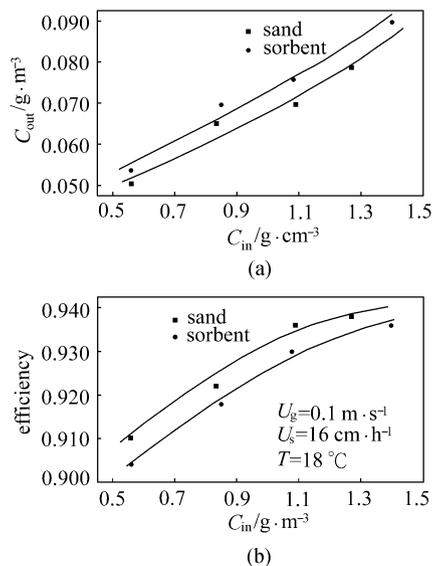


Fig. 5 Effect of dust concentration on dust removal efficiency

### 2.2 沉积粉尘对除尘效率的影响

相对于净床过程, 除尘过程中由于粉尘在颗粒层中的沉积, 颗粒层除尘效率的变化非常复杂, 目前对其研究还处于实验探索阶段. 究其原因, 首先是颗粒层内粉尘沉积状态不明确, 粉尘沉积状态和物料性质有关, 且随空间和时间变化; 其次是粉尘的沉积会造成过滤气体在颗粒层内的流动状态的变化; 更重要的是颗粒内沉积的粉尘一方面可以起到捕集体的作用, 另一方面可能再次扬起, 造成颗粒层除尘效率变化.

为了探讨颗粒层内粉尘的沉积对除尘效率的影响,图6列出了不同实验条件下,除尘效率和颗粒层内粉尘平均比沉积率的关系.从图中可以看出,颗粒层内粉尘比沉积率小于0.01时,颗粒层的除尘效率随着粉尘比沉积率的增加而显著增大,但当比沉积率大于0.01时,沉积粉尘对提高除尘效率的作用逐渐减弱,直至基本消失.这是因为沉积粉尘一方面可以作为新的捕集体,参与对气体中夹带的粉尘的捕集,提高除尘效率;另一方面也可能被气流再次夹带扬起,降低除尘效果.颗粒层内粉尘沉积量较低时,沉积粉尘作为捕集体的作用占主导地位,提高了颗粒层的除尘效率.但随着颗粒层内粉尘沉积量的提高,气体对沉积粉尘再次夹带扬起的作用增强,沉积粉尘对除尘效果的促进作用减弱.因此,颗粒层内适量的粉尘沉积是保证颗粒层过滤器高效率操作的重要条件.

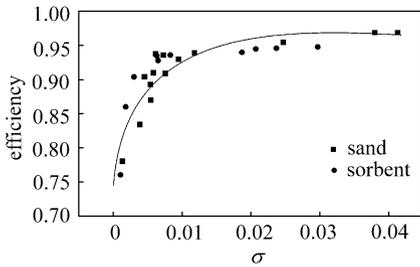


Fig. 6 Relationship of dust removal efficiency to specific deposit

### 3 数学模型的建立和理论分析

颗粒层除尘过程主要依靠含尘气体绕流颗粒捕集体时产生的惯性碰撞、拦截、扩散、重力沉降等作用.对粒径  $1 \mu\text{m}$  以上的粉尘,惯性碰撞和拦截作用占主导地位.气体在颗粒层中的流动非常复杂,在流体力学的基础上,描述颗粒层除尘过程的机理模型主要包括颗粒球状模型、毛细管模型和收缩管模型.从理论上讲,收缩管模型最符合气体通过颗粒层的流体力学特征.根据收缩管模型,假设过滤床层由一系列捕集单元组成(图7),每个捕集单元的长度为

$$l = \left( \frac{\pi}{6} \frac{1}{1-\epsilon} \right)^{\frac{1}{3}} d_g \quad (1)$$

设每个捕集单元的除尘效率  $\eta_i$ , 则颗粒层的过滤效率  $E$  为

$$E = 1 - \prod_i (1 - \eta_i) \quad (2)$$

颗粒层内,取微元长度  $\Delta x$ , 则经过一个微元

长度后,过滤气体中粉尘含量变化  $\Delta c$  为

$$\Delta c = c E_x \quad (3)$$

取气体流动方向为  $x$  轴,根据微分原理,建立微分方程,可得

$$dc = \frac{c \ln(1 - \eta_i) \left( \frac{\pi}{6} \frac{1}{1-\epsilon} \right)^{-\frac{1}{3}}}{d_g} dx \quad (4)$$

由式(4)可以计算出净化后气体粉尘含量以及除尘效率与颗粒层厚度的关系.

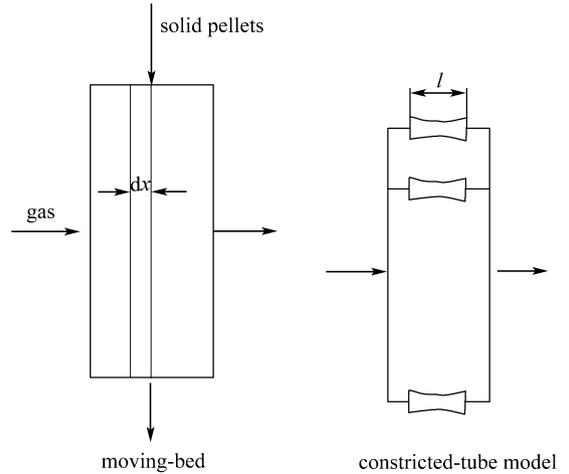


Fig. 7 Schematic representation of moving-bed and constricted-tube model

在初始状态,颗粒层中没有粉尘沉积,各捕集单元的捕集效率  $\eta_0$  相同,可以求得颗粒层的初始状态下的除尘效率.除尘过程中,由于粉尘在颗粒层内的沉积,会造成单元捕集效率  $\eta_i$  的变化.一般情况下,  $\eta_i$  可表示为初始单元捕集效率  $\eta_0$  和比沉积率  $\sigma$  的函数. Takahashi<sup>[7]</sup> 对固定床颗粒层除尘过程的研究表明

$$\eta_i = (1 + \alpha_1 \sigma^{\alpha_2}) \eta_0 \quad (5a)$$

式中 比沉积率  $\sigma$  表示单位颗粒层体积内粉尘沉积的体积,用来描述颗粒层内粉尘的沉积程度;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为经验的模型参数,表示沉积粉尘对单元捕集体除尘效率的影响,可表示为  $N_{St}$ 、 $N_{Re}$  的函数.但 Takahashi 提出的方程式,当用于过滤介质颗粒粒径大于  $1 \text{ mm}$  的颗粒层除尘过程时,会造成较大的偏差.究其原因,作者认为式(5a)没有考虑过滤介质颗粒变化较大时,颗粒层孔隙率相应也有较大的变化.实际除尘过程中,粉尘主要沉积在颗粒层孔隙中,颗粒层孔隙率是决定粉尘沉积对颗粒层除尘效率影响大小的一个重要因素.因此,在式(5a)的基础上,作者引入了颗粒层参数孔隙率  $\epsilon$  来描述颗粒层内粉尘沉积程度

$$\eta_p = [1 + \alpha_1 \left(\frac{\sigma}{\epsilon}\right)^{\alpha_2}] \eta_0 \quad (5b)$$

移动颗粒床除尘过程是稳态操作过程，在颗粒层高度不太大的情况下，可假设沿床高方向粉尘沉积均匀，仅考虑沿床深方向粉尘沉积的不均匀性，在一个微元长度  $\Delta x$  内进行物料衡算，粉尘的比沉积率可表示为

$$\sigma = \frac{\frac{1}{\rho_p} \Delta c U_g H}{U_s \Delta x} \quad (6)$$

关于收缩管模型中颗粒层单个捕集单元的除尘效率  $\eta_0$ ，Tien 等人曾进行了详细的研究，考虑惯性碰撞和拦截作用，得出了不同条件下  $\eta_0$  与量纲 1 特征参数  $N_{St}$ 、 $N_R$ 、 $N_{Re}$  的关系

$$\eta_0 = B \left[ 100 N_{St}^2 + 0.19 \left( 4 - \frac{4 N_R}{d_c^*} + \frac{N_R^2}{d_c^{*2}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{N_R^{1.014}}{d_c^*} \right] \quad (7a)$$

$N_R < 0.002, N_{St} < 0.01$

$$\eta_0 = B \left[ N_{St} + 0.48 \left( 4 - \frac{4 N_R}{d_c^*} + \frac{N_R^2}{d_c^{*2}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{N_R^{1.014}}{d_c^*} \right] \quad (7b)$$

$N_R > 0.002, N_{St} < 0.01$

$$\eta_0 = \gamma B \left[ N_{St} + 0.48 \left( 4 - \frac{4 N_R}{d_c^*} + \frac{N_R^2}{d_c^{*2}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{N_R^{1.014}}{d_c^*} \right] \quad (7c)$$

$N_R > 0.002, N_{St} \geq 0.01$

式中  $d_c^*$  是收缩管直径与过滤介质颗粒粒径之比，是表示颗粒层结构的特征参数； $B$  是 Reynolds 数次修正参数，其值为

$$B = 7 - 6 \exp(-0.0065 N_{Re}) \quad (7d)$$

$\gamma$  是考虑粉尘粒子碰撞反弹的黏附概率参数，其关联式为

$$\gamma = 0.00318 N_{St}^{-1.248} \quad (7e)$$

联立式 (5)~式 (7) 可计算出除尘过程中单元捕集体的捕集效率  $\eta_i$ ，求解微分方程 (4) 可计算颗粒层的除尘效率。

Takahashi 曾给出了适用于固定颗粒层除尘过程的模型参数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的计算关联式。尽管移动颗粒层除尘过程在一定程度上可以看作固定床过程的一个定态，但由于颗粒层的移动，使颗粒层内沉积粉尘的二次飞扬变得严重，导致沉积粉尘对除尘效率的促进作用减小，因此，必须对模型参数重新拟合。在实验数据的基础上，利用数学优化方法，计算出了模型参数的值。在实验条件范围内， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的值分别为 15.04 和 0.53。图 8 列出了不同实验

条件下实验结果和模型计算值的比较，可以看出该模型计算值和实验值的偏差不大。图 9 是模型计算数据和王中礼<sup>[8]</sup>实验数据的比较。可以看出，风速低于  $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时计算值与实验值差别不大，但风速再增大时，计算结果与实验值差别很大。这是由于高气速条件下，颗粒层内出现贴壁、空穴，影响了颗粒的正常流动，造成除尘效率明显降低。模型中没有考虑因风速增大造成的颗粒非正常流动现象，造成实验值和预测值的巨大偏差。

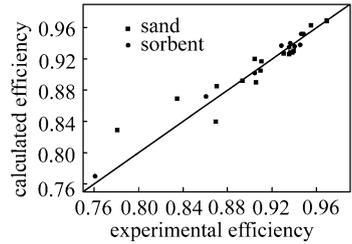


Fig. 8 Comparison of experimental dust removal efficiency with calculated values

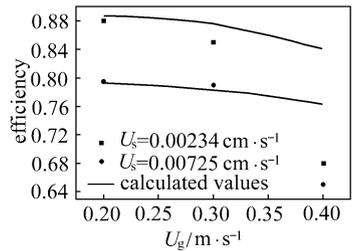


Fig. 9 Comparison of calculated values with experimental data<sup>[8]</sup>

图 10 是根据模型计算的颗粒层内粉尘的沉积量。可见，颗粒层内粉尘的沉积量沿着气流方向急速减小，颗粒层移动速度的增加降低了颗粒层内粉尘的沉积量，这与 Ishikawa<sup>[1]</sup>的实验结果呈相同的趋势。图 11 是根据模型计算的颗粒层厚度对除尘效率的影响。增加颗粒层厚度可以提高粉尘的脱除效率，但当颗粒层增加到一定厚度后，其提高除尘效率的效果减弱。从计算可以看出，要保证对微细粉尘较高的除尘效率，颗粒层厚度应达到 30 cm 以上。

## 4 结 论

(1) 移动颗粒床的除尘效率与表观过滤风速、颗粒移动速度、气体粉尘含量有关，较低的过滤风速和颗粒移动速度有利于提高颗粒层除尘效率。

(2) 分析了颗粒层内沉积的粉尘对颗粒层除尘效率的影响。结果表明，比沉积率较低时，沉积粉

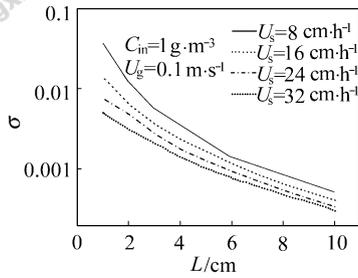


Fig. 10 Deposit in granular bed

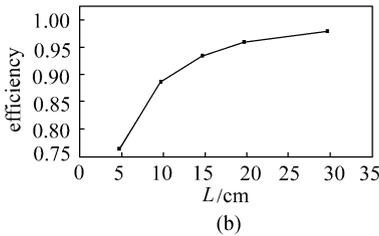
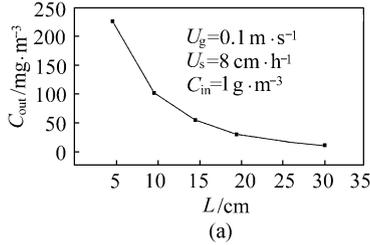


Fig. 11 Length of granular bed vs dust removal efficiency

尘对除尘效率的促进作用非常明显, 但达到一定程度后, 其对除尘效率的促进作用基本消失. 其原因在于, 随着颗粒层内粉尘比沉积率的进一步增大, 沉积粉尘的二次飞扬变得严重.

(3) 在分析了沉积粉尘对除尘效率影响的基础上, 基于捕集单元的收缩管模型, 建立了计算移动颗粒层除尘效率和床层内粉尘沉积分布的数学模型, 并利用数学优化方法计算了模型参数. 模型计算结果和实验数据比较表明, 在操作气速  $0.1 \sim 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内, 计算值与实验结果吻合较好. 据此对除尘效率和床层厚度的关系以及床层内粉尘沉积的变化趋势进行了模拟分析. 计算结果表明, 要保证对微细粉尘较高的除尘效率, 颗粒层厚度应达到 30 cm 以上.

### 符 号 说 明

- $C_{in}$ ——颗粒床入口气体粉尘含量,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
- $C_{out}$ ——颗粒床出口气体粉尘含量,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
- $C_s$ ——Cunningham 摩擦系数
- $d_c^*$ ——收缩管模型的量纲 1 收缩直径

$d_g$ ——滤料颗粒平均粒径, m

$d_p$ ——过滤粉尘粒径, m

$E$ ——移动颗粒层除尘效率

$H$ ——颗粒移动床高度, m

$l$ ——捕集单元长度

$N_R$ ——拦截参数 ( $N_R = d_p/d_g$ )

$N_{Re}$ ——流体 Reynolds 数 ( $N_{Re} = d_g u_g \rho / \mu$ )

$N_{St}$ ——Stokes 数 ( $N_{St} = d_p^2 U_g \rho_p C_s / 9 \mu d_g$ )

$U_g$ ——表观过滤气速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$U_s$ ——颗粒层移动的速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$\alpha_1, \alpha_2$ ——模型参数

$\gamma$ ——黏附概率

$\epsilon$ ——床层孔隙率

$\eta$ ——捕集单元除尘效率

$\mu$ ——气体黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$

$\rho$ ——气体密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$\rho_p$ ——粉尘密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$\sigma$ ——比沉积率

$\phi$ ——颗粒球形度

### References

- 1 Ishikawa K, Kamei K, Shindo K. Development of a Simultaneous Sulfur and Dust Removal Process for IGCC Power Generation System. In: Schmidt E, eds. 3rd International Gas Cleaning at High Temperature. Karlsruhe: Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, 1996. 317—327
- 2 Ji Zhongli (姬忠礼), Ding Fuxin (丁富新), Meng Xiangbo (孟祥波), Shi Mingxian (时铭显). Instantaneous Velocity Outside Filtration Element in Ceramic Filter. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2000, **51** (2): 165—168
- 3 Zhao Jiantao (赵建涛), Huang Jiejie (黄戒介), Wu Jinhu (吴晋沪), Wang Yang (王洋). Pressure Drop of Cross-flowing Moving Granular Bed for Dust Removal. *J. Chem. Eng. of Chinese Univ.* (高校化学工程学报), 2003, **17** (2): 216—220
- 4 Chi Tien. Final Performance Report on Particle Deposition in Granular Media. DOE/ER/13930-2DE 93011612, 1992
- 5 Shaw G D. The Application of Moving Granular Panel Filter to Flue Gas Cleaning. In: Clift R, Ghadiri M, eds. Gas Cleaning at High Temperatures. Germany: The Institution of Chemical Engineers, 1986. 401—420
- 6 Wu Jinhu (吴晋沪). Study on Moving Granular Bed for High Temperature Gas Cleaning; [dissertation] (学位论文). Taiyuan: Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 1998
- 7 Takahashi T, Walata S A, Chi Tien. Transient Behavior of Granular Filtration of Aerosols—Effect of Aerosol Deposition on Filter Performance. *AIChE J.*, 1986, **32** (4): 684—690
- 8 Wang Zhongli (王中礼). Study on Moving Bed Granular Filter. *Engineering Chemistry & Metallurgy* (化工冶金), 1984, **5** (1): 1—11