



Main operating parameters of the spouting regenerator for the collecting particles of the moving bed filter

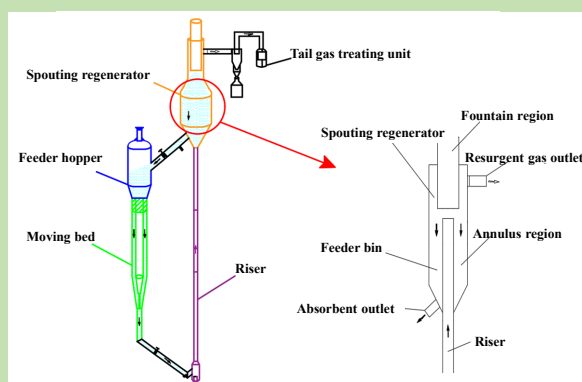
Ming CHANG, Sihong GAO, Yiping FAN*, Chunxi LU

State Key Laboratory of Heavy oil, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract: The combustion of fossil fuel inevitably results in serious environmental pollutions such as discharging flue gas containing SO_2 , NO_2 and CO_2 . Thus, efficient flue gas purification techniques, especially for the high-temperature gas purification process, are required to protect the environment as well as the downstream units. The moving bed filter is undoubtedly one of the most effective ways to high-temperature dedust. The collecting particles in moving bed filter are usually anticipated to be used recycling, thereby an effective regenerating method for the collecting particles is particularly needed. In this work, the spouting regenerating for the collecting particles of the moving bed filter was investigated.

Therefore, it was necessary to determine the main operating parameters of the spouting regenerator for the collecting particles of the moving bed filter. The experimental research on the regenerating efficiency of the regenerator with the collecting particles containing dust was carried in a large plexiglass cold model experimental setup. The dust-collecting particles mixture was sampled both in the spent collector inclining tube and regenerating inclining tube under different operating conditions. These effects of the operating parameters including the dust/collecting particle ratio, the gas velocity and the circulating particle flux on the regenerating efficiency were investigated, respectively. Besides, the abrasion of collecting particles in the spouting bed was measured. On the other hand, the particle size variation during the regenerating process was also analyzed. By measuring the particle size distribution and the mass frequency of the sampled mixture, the corresponding regenerating efficiency under different operating conditions was obtained. It was found that, the dust/collecting particle ratio, the gas velocity and the circulation flux were all the key operating parameters for regenerating. Increasing the dust/collecting particle ratio and the gas velocity were beneficial to the regenerating efficiency, while increasing the circulating particles flux resulted in an opposite effect. Moreover, the spouting regenerator can achieve the high separation efficiency under the condition of high lifting gas flow velocity. If the gas velocity was too high, the collecting particles would also be brought away with the dust and sequentially, the magnitude of the collecting particles decreased. The spouting regenerating process inevitably led to the collecting particles abrasion and thus a suitable gas velocity was quite vital for the whole regenerating system. Based on the experimental results, the recommended gas velocity was generally 1.1~1.3 times that of the collecting particles.

Key words: moving bed; collecting particle; spouted regeneration; dust/collecting particle ratio; gas velocity of the riser; circulating particle flux; abrasion



收稿: 2019-03-05, 修回: 2019-04-10, 网络发表: 2019-05-05, Received: 2019-03-05, Revised: 2019-04-10, Published online: 2019-05-05

基金项目: 石油化工联合基金资助项目(编号: U1862202)

作者简介: 常明(1996-), 男, 河南省南阳市人, 博士研究生, 化学工程与技术专业, Tel: 13261163602, E-mail: changming0223@163.com; 范怡平, 通讯联系人, Tel: 13521656390, E-mail: fanyipin@yahoo.com.

引用格式: 常明, 高思鸿, 范怡平, 等. 移动床除尘器捕集颗粒喷动再生的主要操作因素. 过程工程学报, 2019, 19(6): 1153-1159.

Chang M, Gao S H, Fan Y P, et al. Main operating parameters of the spouting regenerator for the collecting particles of the moving bed filter (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(6): 1153-1159, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219146.

移动床除尘器捕集颗粒喷动再生的主要操作因素

常 明, 高思鸿, 范怡平*, 卢春喜

中国石油大学(北京)重质油国家重点实验, 北京 102249

摘 要:通过对喷动再生操作前后的捕集颗粒进行采样, 考察粉尘/捕集颗粒比、提升管气速、颗粒循环量等操作因素对再生效果的影响。结果表明, 粉尘/捕集颗粒比、提升管气速、颗粒循环量为影响喷动再生效果的主要操作因素, 随粉尘/捕集颗粒比增大、提升管气速增大、颗粒循环量减小, 粒级效率增大; 喷动再生器在提升管气速较高时, 再生效率较高, 但若提升管气速过高, 捕集颗粒同样会随灰尘一起被带出; 喷动再生过程不可避免地造成捕集颗粒的磨损, 合适的提升管气速对整个喷动再生系统至关重要, 一般为捕集颗粒带出速度的 1.1~1.3 倍。

关键词:移动床; 捕集颗粒; 喷动再生; 粉尘/捕集颗粒比; 提升管气速; 颗粒循环量; 磨损

中图分类号: TQ 028.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)06-1153-07

1 前 言

颗粒床除尘器具有耐高温、耐腐蚀、运行阻力低、除尘效率高的优点, 是具有发展前途的除尘技术之一, 主要包括固定床和移动床两大类, 固定床需要颗粒床的反吹再生过程, 影响装置的持续运行, 而移动床可实现连续运行。

颗粒移动床中的床料都是在循环状态下进行工作的, 高效的再生系统对于整个除尘系统尤为重要。当该类工作面上的颗粒在拦截、捕集尘粒, 移离工作面后, 须设法使捕集颗粒与混杂其中的尘粒快速、高效、连续地分离, 使再生后干净的捕集颗粒重新移动到工作面上进行下一轮除尘, 否则会使该类除尘器压降大幅增加, 除尘效率锐减^[1]。因此, 捕集颗粒的高效再生是保证整个除尘系统正常工作的重要环节。

捕集颗粒再生系统实质上是固(颗粒)-固(粉尘)分离系统, 通常采用机械分离或流体分离。最常用的机械分离方式是筛分, 但由于受物料成分的复杂性、颗粒的不均匀性及物料湿度等因素的影响, 使振动筛的工艺效率受到一定制约, 其处理能力不能满足工艺生产要求^[2]。流体分离可分为液体(水力)分离和气体分离两种。水力分离能达到一定效果, 但应用困难较大, 如设备与管道腐蚀、污水处理等难题^[3]。此外, 颗粒床除尘器需将含尘捕集颗粒从装置中暂时带离至其它再生装置中进行处理, 导致捕集颗粒无法快速循环再利用。气体分离的喷动再生效果相对较好, 结构简单且无移动部件和分布板等, 所用颗粒均较大, 无明显的颗粒夹带, 所以一般不需附加旋风分离器, 只需在床面上方留下足够空间, 仅通过调节提升管气速即可达到很好的分离效果^[4]。由于颗粒移动床对除尘器床层空隙率要求相对不高, 喷动再生操作可有效降低能耗和空间。

移动床除尘器床料喷动再生过程依靠喷动床实现。喷动床^[5]是 50 年代中期发展起来的一种处理粗大窄筛分颗粒的流态化技术。喷动床中颗粒的有规律搅动由稳定的轴向射流所致, 比大部分流化床中随机而复杂的颗粒流动形态更规则^[6-8]。捕集颗粒喷动再生利用沉降气速远大于粉尘带出速度而远小于捕集颗粒带出速度的原理进行再生^[9]。捕集颗粒在移动床中捕获粉尘后进入提升管, 由鼓风机提升至喷动再生装置, 经清灰后回到移动床工作。由于沉降气体的速度远大于粉尘的带出速度, 因此粉尘会随输送风一起排出喷动床被收集^[10-12]。因此仅利用提升管内输送风即可实现捕集颗粒的再生和循环。

Ye 等^[13]和徐建等^[14]均从喷动床基本结构探究喷动效果, 并未考虑如何控制操作条件达到更好的喷动再生效果。因此为更全面地了解喷动床再生效果, 本实验通过改变粉尘/捕集颗粒比、提升管气速、颗粒循环量等操作参数, 通过对再生前后的捕集颗粒进行采样, 着重从粒度分布及粒级效率角度, 深入研究各操作参数对喷动再生效果的影响规律及喷动过程中捕集颗粒的磨损现象。

2 实 验

2.1 移动床除尘器捕集颗粒喷动再生装置

移动床除尘器捕集颗粒喷动再生实验在一套大型冷模实验装置上进行, 主要包括移动床、提升管+喷动再生器两部分, 如图 1 所示。装置总高 $H_T=7561$ mm, 主要结构尺寸见表 1。其中, 移动床用 304 不锈钢材质, 提升管+喷动再生器用有机玻璃进行建造, 以便观察内部流动状态。

粉尘颗粒从加尘口 11 加入, 与料斗 13 中的预填捕集颗粒混合。含尘颗粒在重力作用下沿颗粒床 14 向下

移动，经待生斜管 15 进入预提升段 4。预提升段 4 中的气体由鼓风机 1 加压后经流量计 3 测量，输入预提升段 4 底部入口。待生斜管 15 中的含尘颗粒与预提升段 4 中的输送风混合后，沿提升管 5 向上流动。提升管 5 上部出口处连接有喷动再生器 9，捕集颗粒与粉尘在其中实

现分离。沉降管中捕集颗粒下落，而粉尘由于粒径较小，被输送风夹带排出喷动再生器 9，经接管通往旋风分离器 8 将再生尾气进行净化，以达到排入大气的要求。再生后的捕集颗粒从喷动再生器 9 底部导管离开，经再生斜管 10 进入料斗 13，实现整个循环再生过程。

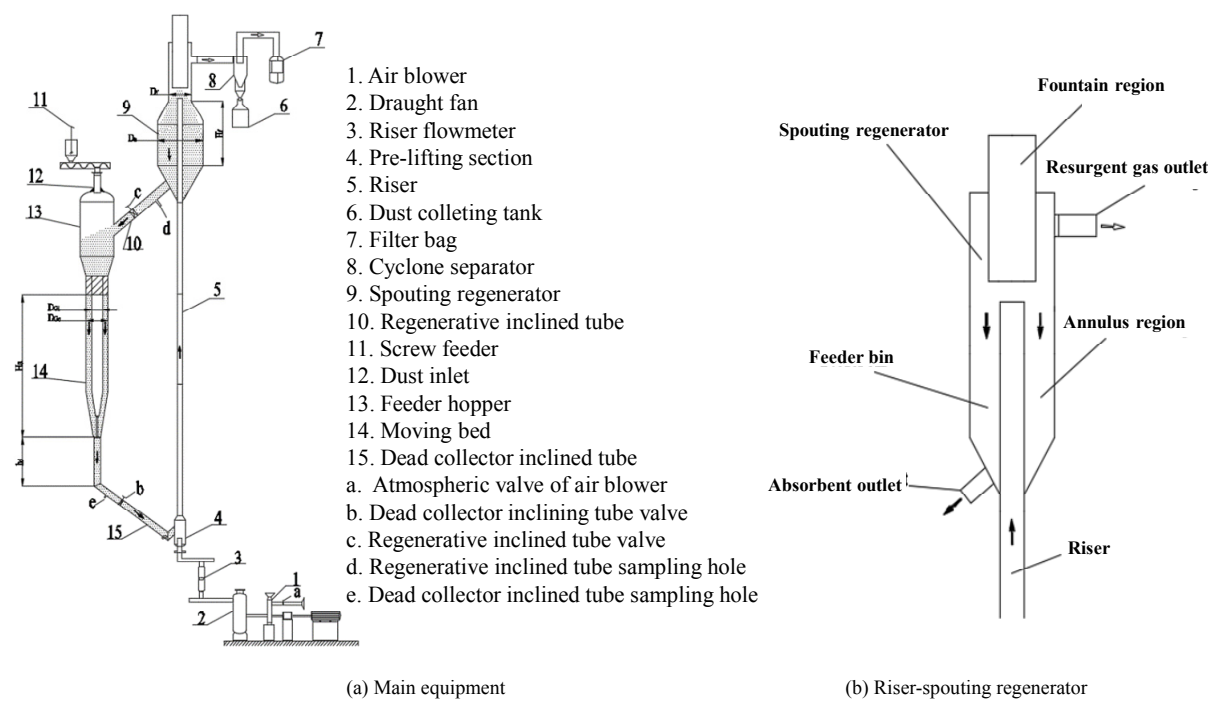


图 1 实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

表 1 主要结构尺寸		
Table 1 The main geometrical dimensions		
Parameter		Dimensions/ mm
Granular bed	Height of bed, h_a	2940
	Inner diameter of bed, D_{Gi}	128
	Outer diameter of bed, D_{Go}	238
	Height of dipleg, h_d	827
	Inner diameter of riser, D_r	52
Riser-spouting regenerator	Inner diameter of annulus region, D_a	230
	Inner diameter of fountain region, D_f	150
	Height of fountain region, H_f	800
	Inner diameter of regenerating gas outlets, D_{rs}	52
	Height of cylinder, H_c	600
Feeder hopper	Inner diameter of cylinder, D_c	360

实验气体为常温常压下的空气，提升管气速 $v=8.89\sim20.66\text{ m/s}$ 。

2.2 实验材料

为更接近工业除尘工况，本实验选择催化裂化(FCC)催化剂颗粒作为粉尘^[15]，中位粒径为 $45\text{ }\mu\text{m}$ 。FCC 催化剂属于 A 类颗粒，充气性能较好、粘性较小。在粉尘和捕集颗粒的预混合实验中，未发现粘附现象，因此

在实验中可忽略其表面粘性的影响。用 LS-909 激光粒度分析仪(珠海欧美克仪器有限公司)测量该粉尘的粒度分布及中位粒径，该粉尘的粒度分布如图 2 所示。

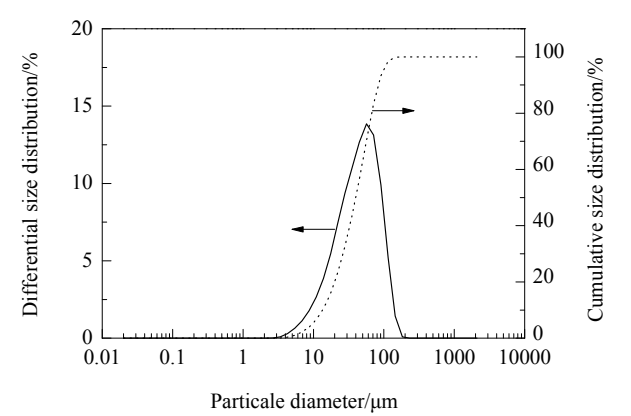


图 2 FCC 催化剂粒径分布
Fig.2 Particle size distribution of the FCC catalysts

实验中移动床除尘器中捕集颗粒用 13X-APG (8×12 目)空分专用分子筛吸附剂产品(UOP 公司)^[16]。颗粒物性数据见表 2。

表 2 13X-APG (8×12 目)分子筛吸附剂物性参数
Table 2 Physical parameters of 13X-APG (8×12 mesh) molecular sieve adsorbent

Granule	Material density, $\rho_m/(kg/m^3)$	Absorbent particle density, $\rho_p/(kg/m^3)$	Bulk density, $\rho_b/(kg/m^3)$	Screen fraction/%		Average size, d/mm	Granule voidage, ε
				>2.60	<1.70		
13X-APG	1819	1049	666	0.4	0.17	2.07	0.37

2 个采样孔分别设置在待生斜管(待生阀上部 100 mm 处)和再生斜管(再生阀上部 100 mm 处)上。通过 2 个采样孔对其中含尘捕集颗粒进行采样,用高 200 mm、内径 15 mm 的玻璃试管收集。由于 FCC 催化剂与捕集颗粒粒径分布差异较大,故可认为样品中粒径小于 250 μm 的颗粒即为粉尘。首先对样品进行粗筛,分别测定各粒径范围内颗粒重量,对粒径小于 250 μm 的颗粒进行测量得其粒度分布及中位粒径。提升管气量 $Q(m^3/h)$ 由 LZB-25 型玻璃转子流量计(余姚工业自动化仪表厂)进行计量。

2.3 实验方法

为保证捕集颗粒中的粉尘含量精确且均匀,实验中直接从移动床料斗顶部的加尘口加尘,与料斗中捕集颗粒混合。螺旋送料器的料斗中装满的粉尘保持不变,以固定速度搅拌粉尘,从而确保粉尘具有稳定的空隙率。

通过调节螺旋送料器转速控制加尘速率。螺旋送料器速度曲线如图 3 所示。因此捕集颗粒中的粉尘/捕集颗粒比 R 用加尘速率 v_i 和捕集颗粒循环量 $w(kg/s)$ (由容积法^[16]测定)的比值表示:

$$R = \frac{v_i}{w} \tag{1}$$

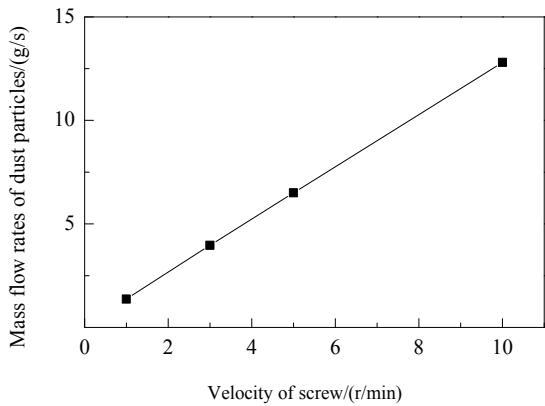


图 3 螺旋送料器加尘速率标定曲线(FCC 催化剂)
Fig.3 The rating curve of screw feeder (FCC catalysts)

此外,为计算捕集颗粒的喷动再生效率,引入粒级效率的概念。在待生斜管取样中,含尘颗粒中小于 250 μm 的粉尘占全部样品颗粒的质量频率为 f_d ,再生斜管取样中粉尘所占的质量频率为 f_z ,将粒径小于 250 μm 粉尘的分离效率称为粒级效率 $\eta(\%)$ ^[17]:

$$\eta = 1 - \frac{C_z f_z}{C_d f_d} \tag{2}$$

式中, C_d 为待生斜管样品粉尘/捕集颗粒比(g/kg), C_z 为再生斜管样品粉尘/捕集颗粒比(g/kg)。

3 结果与讨论

3.1 粉尘/捕集颗粒比

在提升管气速为 12.81 m/s、捕集颗粒循环量为 0.10 kg/s 条件下,考察不同吸附剂粉尘/捕集颗粒比下,待生斜管和再生斜管中粉尘残留量变化及粒级效率,结果如图 4 所示。可以看出,随粉尘/捕集颗粒比的升高,粒级效率先显著升高后稍有降低,再生斜管中的粉尘残留量均小于待生斜管中的粉尘残留量。实际上,随粉尘/捕集颗粒比的增大,粉尘不断增多给颗粒分离带来双重影响。一方面,在卢春喜^[18]的分类方法中,FCC 催化剂属于 A 类颗粒,凝聚性小、充气性能好、流化特性较好,因此粉尘的加入减弱了吸附剂颗粒在提升管和喷动再生器中的磨损。虽然捕集颗粒中加入的粉尘增多,但粉尘很难出现因团聚而变大的现象,故在喷动再生中分离良好,粉尘/捕集颗粒比为 30 g/kg 时的粒级效率比 20 g/kg 时的粒级效率显著升高。另一方面,在相同捕集颗粒循环量下,粉尘/捕集颗粒比增加即捕集颗粒中的粉尘含量升高,而提升管中的气速保持不变,捕集颗粒和粉尘在提升管出口,无法完全分离,导致部分粉尘被夹带到喷动床床层中,无法分离^[19]。这也是粉尘/捕集颗粒比由 30 g/kg 增大到 40 g/kg 时粒级效率略降低的原因。

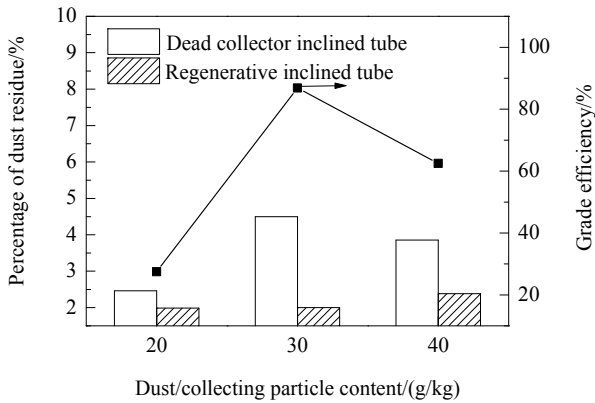


图 4 粉尘残留量和粒级效率随粉尘/捕集颗粒比的变化
Fig.4 Changes of percentage of dust residue and grade efficiency with different dust/collecting particle contents

3.2 颗粒循环量

在提升管气速为 12.81 m/s、粉尘/捕集颗粒比 30 g/kg 条件下, 测量了不同捕集颗粒循环量($w=0.10, 0.15, 0.24$ kg/s)下的粉尘残留量和粒级效率, 结果如图 5 所示。可以看出, 在提升管气速和粉尘/捕集颗粒比保持不变时, 随颗粒循环量增大, 粒级效率降低, 喷动再生效率下降。主要有两方面原因: 一方面, 在实验范围内, 提高颗粒循环量, 提升管下部加速段的颗粒加速所需时间较长, 速度相对较慢, 与文献^[20]结论一致, 尤其是颗粒循环量过大时, 提升管底部颗粒速度的变化更显著, 这也是导致提升管出口处分离效果下降的原因; 另一方面, 因提升管出口颗粒浓度大, 气流无法充分分散, 使大量粉尘随颗粒流主体沉降, 增强了对粉尘的夹带能力, 使部分粉尘被带回移动床。可认为在较高吸附剂颗粒循环量下, 喷动再生效果不佳, 适当提高提升管气速, 可有效增强分离效果。

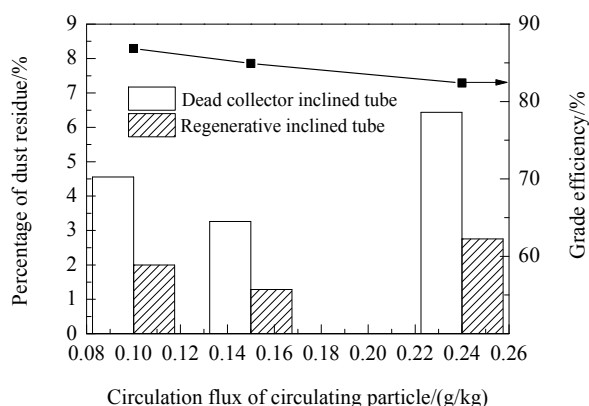


图5 粉尘残留量和粒级效率随捕集颗粒循环量的变化

Fig.5 Changes of percentage of dust residue and grade efficiency with different circulation fluxes of collecting particle

3.3 提升管气速

粉尘/捕集颗粒比 30 g/kg、捕集颗粒循环量为 0.15 kg/s 条件下, 不同提升管气速下待生斜管和再生斜管中的粉尘残留量和粒级效率如图 6 所示。可以看出, 随提升管气速增加, 粉尘残留量在待生斜管和再生斜管中的差值基本呈增大趋势, 表明含尘捕集颗粒中的粉尘被有效分离。

捕集颗粒带出速度 u_t 可由 $\log R_{et} - \log F_e$ 计算^[9], 其中费多罗夫准数 F_e 可由下式计算:

$$F_e = \sqrt[3]{4A_r / 3} \quad (3)$$

式中, A_r 为阿基米德准数, 由下式计算:

$$A_r = \frac{d_p^3 (\rho_s - \rho_g) g}{v_g^2 \rho_g} \quad (4)$$

带出速度时的雷诺数 R_{et} :

$$R_{et} = \frac{u_t d_p}{v_g} \quad (5)$$

式中, d_p 为颗粒直径(m), ρ_s 为颗粒密度(kg/m³), ρ_g 为气体密度(kg/m³), g 为重力加速度(m/s²), v_g 为气体粘度(m²/s)。带入有关参数得捕集颗粒的带出速度 $u_t=15.9$ m/s, 粉尘的带出速度 $u'_t=0.052$ m/s。

提升管气速为 8.89~16.74 m/s 时, 粒级效率增加不明显; 提升管气速为 16.74~20.66 m/s 时, 粒级效率显著增加; 提升管气速为 20.66 m/s 时, 粒级效率已接近 90%, 符合吸附剂再生的基本要求, 即提升管气速为捕集颗粒带出速度的 1.3 倍即可。为保证沉降管内捕集颗粒与粉尘完全分离, 可使沉降气速 u_c 远小于 u_t 且大于 u'_t , 由沉降管直径 $D_c=150$ mm 可得沉降速度为 $u_c=2.48$ m/s。

综上所述, 喷动再生器在提升管气速较高时, 分离效率较高; 但提升管气速过高, 提升管出口气速大于捕集颗粒的带出速度时, 捕集颗粒同样会随灰尘一起被带出喷动再生器, 损失捕集颗粒^[21]。此外, 捕集颗粒的再生效率并非有极高的要求, 适当的粉尘残留有助于降低移动床孔隙率, 更有利于气体除尘。

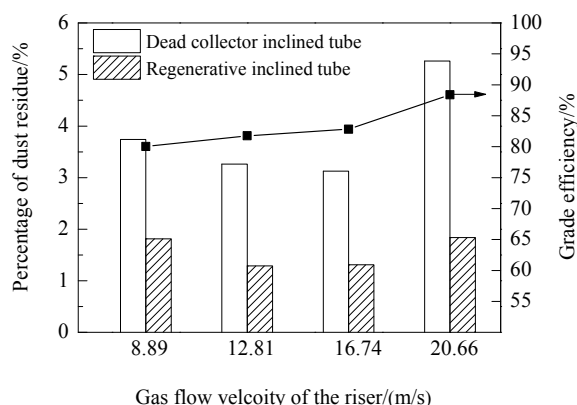


图6 粉尘残留量和粒级效率随提升管气速的变化

Fig.6 Changes of percentage of dust residue and grade efficiency with different gas flow velocities of the riser

3.4 磨损

随提升管气速增加, 移动床捕集颗粒易出现磨损, 这也是限制粒级效率的主要因素之一。捕集颗粒的磨损主要出现在提升管及喷动再生器内。通过提升管及喷动再生器管道时, 由于 2 种颗粒粒径差距较大, 在输送风的作用下产生速度差, 从而造成磨损^[22-24]。此外, 由于喷动床中, 喷泉区与循环区并未被完全隔离开, 导致流

动相颗粒群与静止相颗粒群产生逆流接触,经过多次循环后,颗粒粒径减小^[25]。当受损捕集颗粒的带出速度小于输送风速度时,就会随粉尘一起离开,造成不必要的损失。

不同提升管气速下,再生斜管和待生斜管的粒径分布见表 3。可以看出,由于灰尘等小颗粒的排出,大于 550 μm 的颗粒在喷动再生后所占比例明显升高,且随提升管气速增大,所占比例明显变大。此外,粒径小于 250 μm 的颗粒在喷动再生后所占比例有所升高,由于大部分小颗粒灰尘已排除,只有一种结果就是受损捕集颗粒上掉落的小碎片无法随灰尘一起排出而留下。虽然受损颗粒粒径变小,使移动床空隙率变小,对设备捕集效率

的提高有利,但会导致床层压降升高^[26];而捕集颗粒的损失会造成料仓中料位持续降低直至整个循环无法维持。捕集颗粒的破碎情况可以从图 7 明显看出,经过喷动再生后,中位粒径随之增大,尤其是提升管气速为 20.66 m/s 时比 16.74 m/s 时的中位粒径升高显著。由于 FCC 催化剂颗粒凝聚性小,所以可排除粉尘颗粒团聚等影响因素,因此中位粒径增大最有可能是由于捕集颗粒的破碎导致的。

综上所述,喷动再生过程不可避免地导致捕集颗粒的磨损,且高气速造成的磨损更严重,适当地提升管气速对整个颗粒移动床除尘系统至关重要,一般为捕集颗粒带出速度的 1.1~1.3 倍。

表 3 再生斜管和待生斜管中不同提升管气速下的粒径分布

Table 3 Particle size distribution at different gas velocities in dead collector inclined tube and regenerative inclined tube							
Gas velocity/(m/s)	Particle size distribution/%						Sampling location
	>2360 μm	1700~2360 μm	830~1700 μm	550~830 μm	250~550 μm	<250 μm	
8.89	0.37	75.29	12.61	0.30	0.03	11.40	Dead collector inclined tube
	0.34	80.27	13.48	3.91	0.15	1.85	Regenerative inclined tube
12.81	0.17	73.51	14.79	0.37	0.02	11.14	Dead collector inclined tube
	0.22	82.18	12.58	3.54	0.17	1.31	Regenerative inclined tube
16.74	0.23	72.23	15.74	0.46	0.15	11.19	Dead collector inclined tube
	0.24	79.40	14.84	3.91	0.30	1.31	Regenerative inclined tube
20.66	0.25	75.68	11.51	0.40	0.43	11.73	Dead collector inclined tube
	0.20	78.81	11.99	6.45	0.80	1.75	Regenerative inclined tube

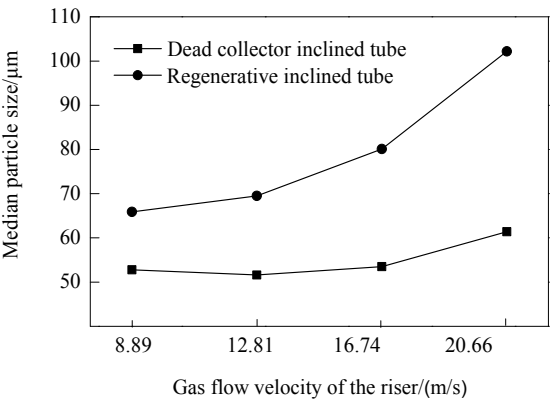


图 7 中位粒径随提升管气速的变化

Fig.7 Change of median particle size with gas flow velocities of the riser

4 结 论

通过以催化裂化(FCC)催化剂为粉尘、分子筛吸附剂为实验介质,针对颗粒移动床捕集颗粒喷动再生效果进行研究,得到以下结论:

- (1) 粉尘/捕集颗粒比 R 、提升管气速 v 、颗粒循环量 w 为影响再生效果的主要操作因素。随 R 增大、 v 增大、 w 减小,粒级效率均增大。
- (2) 喷动再生器在提升管气速较高时,分离效率较高;但如果提升管气速过高,沉降气速大于捕集颗粒的

带出速度,捕集颗粒会随灰尘一起被带出喷动再生器,造成颗粒的损失。此外,捕集颗粒的再生效率并非有极高的要求,适当的粉尘残留有助于降低移动床孔隙率,有利于气体除尘。

(3) 喷动再生过程不可避免地导致捕集颗粒的磨损,且高气速造成的磨损更严重,影响整个系统的循环,因此合适的提升管气速对整个颗粒移动床除尘系统至关重要,一般为捕集颗粒带出速度的 1.1~1.3 倍。

参考文献

[1] 张凯利,张继英.移动床颗粒层颗粒再生系统的试验研究[J].劳动保护,2000,(5):28-29.
Zhang K L, Zhang J Y. Experimental study on particle regeneration system of moving bed granular layer dust collector [J]. Labour Protection, 2000, (5): 28-29.

[2] 沈祥智.浅析振动筛效率的影响因素[J].现代矿业,2007,23(5):86.
Shen X Z. Analysis of the influencing factors of vibrating screen [J]. Modern Mining, 2007, 23(5): 86.

[3] 李健,褚良银.液液分离水力旋流器研究进展[J].化工装备技术,1998,(5):43-48.
Li J, Chu L Y. Research on liquid-liquid separation hydrocyclone [J]. Chemical Equipment Technology, 1998, (5): 43-48.

[4] 祝京旭,洪江.喷动床发展与现状[J].化学反应工程与工艺,1997,(2):207-230.
Zhu J X, Hong J. Development and current status of spouted beds [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 1997, (2):

- 207–230.
- [5] Kishan B M, Epstein N. Spouted beds [M]. America: Academic Press, 1974: 287–299.
- [6] Fayed M E, Lambert O. Handbook of powder science and technology [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1984: 509–536.
- [7] 金涌. 流态化工程原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 402–478.
- Jin Y. Fluidization project principe [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996: 402–478.
- [8] Cook H H, Bridgwater J. Segregation in spouted beds [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2010, 56(5): 636–638.
- [9] 张克, 党武京. 颗粒移动床除尘系统喷动再生器的研究 [J]. 环境保护, 1994, (6): 6–9.
- Zhang K, Dang W J. Research on spouted regenerator of granule moving bed dust removal system [J]. Environmental Protection, 1994, (6): 6–9.
- [10] 童景山, 张克. 流态化干燥技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 11.
- Tong J S, Zhang K. Fluidized drying technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985: 11.
- [11] Benkrid A, Caram H S. Solid flow in the annular region of a spouted bed [J]. AIChE Journal, 1989, 35: 1328–1336.
- [12] Berquin Y F. Method and apparatus for granulating melted solid and hardenable fluid products: US 3231413 [P]. 1966–1–22.
- [13] Ye B, Lim C J, Grace J R. Hydrodynamics of spouted and spout-fluidized beds at high temperature [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1992, 70(5): 840–847.
- [14] 徐建, 鲍晓军, 王诗凝, 等. 细颗粒喷动床的流体力学特性 [J]. 化工学报, 2003, 54(5): 590–595.
- Xu J, Bao X J, Wang S N, et al. Hydrodynamics, attrition and entrainment of fine particle spouting [J]. CIESC Journal, 2003, 54(5): 590–595.
- [15] 高思鸿, 张丹丹, 范怡平, 等. 气体干法净化旋流吸附耦合设备压降特性 [J]. 化工学报, 2018, 69(5): 1873–1883.
- Gao S H, Zhang D D, Fan Y P, et al. Pressure drop characteristics of dry gas purification process in a coupled apparatus of cyclone and granular bed filter/absorber [J]. CIESC Journal, 2018, 69(5): 1873–1883.
- [16] Gao S H, Zhang D D, Fan Y P, et al. A novel gas–solids separator scheme of coupling cyclone with circulating granular bed filter (C-CGBF) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019: 362: 403–411.
- [17] 孔春林, 黄卫星, 潘永亮, 等. 提升管气固两相流中颗粒速度的实验研究 [J]. 四川大学学报, 2002, 34(3): 41–45.
- Kong C L, Huang W X, Pan Y L, et al. Experimental investigation on particle velocities for gas-solid two phase flow in a CFB riser [J]. Journal of Sichuan University, 2002, 34(3): 41–45.
- [18] 卢春喜. 催化裂化流态化技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2002: 5–10.
- Lu C X. Catalytic cracking fluidization technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2002: 5–10.
- [19] Chandnani P P. Gas spouting of fine particles [D]. Canada: University of British Columbia, 1984: 121–140.
- [20] Hartge E U, Ratschow L, Wischnewski R, et al. CFD-simulation of a circulating fluidized bed riser [J]. Particuology, 2009, 7(4): 283–296.
- [21] He Y L, Lim C J, Grace J R. Spouted bed and spout-fluid bed behavior in a column of diameter 0.91 m [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1992, 70(5): 848–857.
- [22] Chen J, Shi W L, Zhao J, et al. Cold-state spout-fluidizing characteristics of high-carbon ferromanganese powders [J]. International Journal of Minerals Metallurgy & Materials, 2011, 18(6): 741–747.
- [23] Moradi S, Yeganeh A, Salimi M. CFD-modeling of effects of draft tubes on operating condition in spouted beds [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(4): 1851–1859.
- [24] Bao X J, He K A, Liu Y S, Shen F. Insight into distillation/absorption columns and FCC risers using gamma scanning technique [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 1995, 3: 171–179.
- [25] Mathur K B, Gishler P E. A Technique for contacting gases with coarse solid particles [J]. AIChE Journal, 1955, 1: 57–164.
- [26] 颜深, 孙国刚, 詹敏述, 等. 不同滤料固定颗粒床过滤性能对比 [J]. 过程工程学报, 2018, 18(3): 477–483.
- Yan S, Sun G Q, Zhan M S, et al. Comparison of filtration performance in two fixed granular beds with different granules [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(3): 477–483.