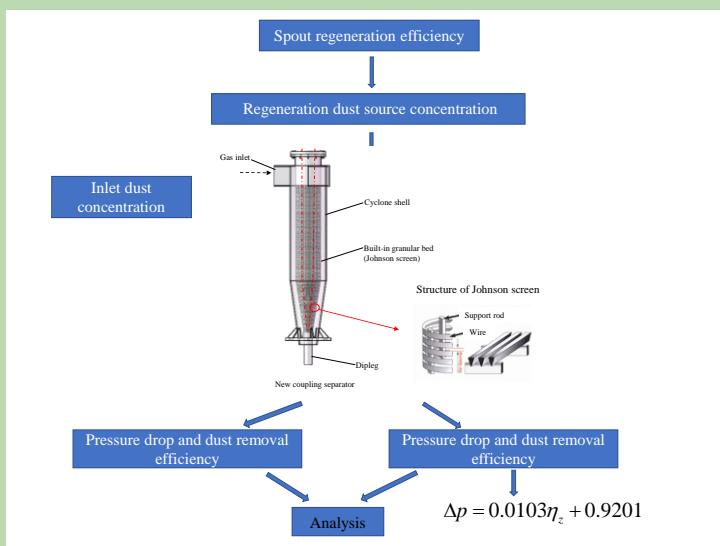


Influence of inlet dust concentration on characteristics of a new cyclone particle bed coupling separator

Jinzhuang FU, Ming CHANG, Yiping FAN*, Chunxi LU

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

Abstract: Nowadays, the production and combustion of fossil fuels make the emission of particulate pollutants increasing day by day. Researchers are actively developing new high efficiency dust removal separator to reduce the emission of pollutants. The studies on the separation technology of single cyclone separator and single particle bed filter are extensive but on the coupling separator of cyclone separator and particle bed are scarce. Therefore, the study of the cyclone particle bed coupling separator has broad application prospect. In order to investigate the influences of the inlet dust concentration on the pressure drop and the dust removal efficiency of a



new cyclone-granular bed coupling separator, a large scale cold model experiment was carried out. The results showed that with an increase of the inlet dust concentration, the pressure drop of the separator tends large and the speed of pressure drop increased rapidly when reaching an equilibrium state. The reason is that the inlet dust concentration increases, the dust in the built-in particle bed increases, the bed porosity decreases and the pressure drop increases. With the decrease of the inlet dust concentration, the separation efficiency of the separator increased. The dust content in the particle bed of the separator was also related to the regeneration efficiency. As the concentration of the regeneration dust source decreased, the time duration of the pressure drop reaching equilibrium became short. Furthermore, based on the experimental data, the empirical formula of separator pressure drop and regeneration dust source concentration was given. When the concentration of regeneration dust source reduced from 58.18% to 23.67%, the pressure drop reduced from 1.5 kPa to 1.2 kPa. With the decrease of the concentration of the regeneration dust source, the dust removal efficiency of the separator decreased slightly. The influence of inlet dust concentration and the regeneration dust source concentration on the pressure drop of separator coincided with each other, while the effect on the separator efficiency was different.

Key words: inlet dust concentration; new coupling separator; pressure drop; separation efficiency

收稿: 2020-10-16, 修回: 2020-12-10, 网络发表: 2021-01-14; Received: 2020-10-16, Revised: 2020-12-10, Published online: 2021-01-14

作者简介: 付金壮(1997-), 男, 安徽省宿州市人, 硕士研究生, 化工过程机械专业, E-mail: 13121198551@163.com; 范怡平, 通讯联系人, E-mail: fanyipin@yahoo.com.

引用格式: 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. 过程工程学报, 2021, 21(10): 1177-1186.

Fu J Z, Chang M, Fan Y P, et al. Influence of inlet dust concentration on characteristics of a new cyclone particle bed coupling separator (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(10): 1177-1186, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220339.

入口粉尘浓度对新型旋流-颗粒床耦合分离器特性的影响

付金壮, 常明, 范怡平*, 卢春喜

中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249

摘要: 通过大型冷模实验, 考察了入口粉尘浓度对某连续操作新型旋流-颗粒床耦合分离器压降和除尘效率的影响特性。结果表明, 入口粉尘浓度越大, 达到平衡时分离器的压降越大, 压降增速越快, 入口粉尘浓度为 59.13 g/m^3 时, 分离器平衡压降最大为 1.2 kPa ; 入口粉尘浓度越低, 分离器分离效率越高。分离器颗粒床层内捕集颗粒含尘量与再生效率有关, 再生尘源浓度越小, 分离器压降达到平衡越快。当再生尘源浓度由 58.18% 降至 23.67% , 装置压降由 1.5 kPa 降至 1.2 kPa ; 随着再生尘源浓度降低, 分离器除尘效率略微下降。入口粉尘浓度和再生尘源浓度对分离器压降影响的结果一致, 对分离器效率影响的结果不同。

关键词: 入口粉尘浓度; 新型耦合分离器; 压降; 分离效率

中图分类号: X701

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)10-1177-10

1 前言

目前, 各类化石燃料的生产和燃烧使工业废气和颗粒污染物的排放与日俱增, 研究人员积极研发新型高效除尘分离器以降低污染物的排放^[1]。旋风分离器是一种常见的气固分离设备, 具有结构简单、分离效率高、适用于含尘浓度高的工况等特点^[2]。Briggs^[3]最先发现旋风分离器压降随入口浓度增大而下降的规律。Muschelknautz^[4]通过实验验证了 Briggs 发现的规律, 且发现当入口浓度低于 1 kg/m^3 时, 压降随浓度增大而减小; 反之, 出现压降却随浓度增大而增大的现象。罗晓兰^[5]测定了入口浓度为 $0\sim 3 \text{ kg/m}^3$ 时, 旋风分离器压降随浓度增大而增大, 证实了 Muschelknautz 所观察到的现象, 并提出了“转折浓度”的概念。入口浓度不仅对旋风分离器压降有影响, 对分离效率也有影响。孙国刚等^[6]认为分离效率随入口浓度增大而提高。孔军^[7]的数值模拟结果表明, 固相颗粒入口浓度愈大, 旋风分离器分离效率愈高。陈建义等^[8]通过冷模实验优化旋风分离器高径比, 提出一种压降低、效率高的 PV-E 型旋风分离器。刘秀林等^[9]在基准 PV 型旋风分离器的基础上采用加长型筒体结构, 发现在分离效率不变的情况下可降低压降。目前高效 PV 型旋风分离器已经广泛应用于炼油厂 FCC 装置^[10,11]。

颗粒床除尘器被广泛应用于气固分离。固定式颗粒床除尘器除尘效率变化较大, 过滤效果较差^[12]。杜鑫等^[13]研究发现固定式颗粒床过滤器在短时间达到“饱和”状态后会产生较大的压降, 需要间歇进行滤料再生, 无法连续运行。而移动床可以实现连续化生产, 单向辉

等^[14]发现移动式颗粒床除尘器具有较高的除尘效率, 通过加百叶窗可以实现滤饼的持续更新。当粉尘比沉积率较小时, 滤饼容易破碎, 导致床层空隙率不断变化, 因而压降波动较大^[15]。赵建涛等^[16]发现移动床除尘过程中粉尘沉积对操作压降也有影响。移动床的压降反映床层中的含尘量, 床层含尘量与颗粒停留时间也有关系, El-Hedok 等^[17]发现颗粒停留时间在某一临界停留时间以下, 移动床过滤器可以达到稳定且高效的状态; 但超过临界颗粒停留时间, 过滤效率将急剧下降。因此单一的颗粒床过滤器已经不能满足实际生产的需求^[18]。

王苗等^[19]研究旋风-颗粒床过滤器两级联合除尘效率的最优操作条件时, 发现滤料厚度对总除尘效率影响最大, 但旋风分离器和固定式颗粒床是串联分级作用。高思鸿等^[20]提出了一种新型气体旋流耦合设备, 将旋风分离器和颗粒床过滤器结合, 利用旋风分离器对 $10 \mu\text{m}$ 以上颗粒物的离心分离作用, 先脱除一部分粉尘, 对含尘气体进行预处理, 降低移动床的除尘负荷; 移动床中的捕集颗粒则对小粒度粉尘进行二次拦截“过滤”, 通过惯性碰撞、直接截留和 Brownian 扩散等分离机理捕集 $10 \mu\text{m}$ 以下颗粒物, 进一步提高气固分离的效果^[21]。

本工作针对上述旋风分离器-内置颗粒床一体的新型耦合分离器, 考察入口含尘浓度对分离器压降和效率的影响。为实现连续操作, 并考虑到实际工业中内置颗粒床的捕集颗粒可能成本较高, 实验中采用提升管-喷动床系统作为捕集颗粒的再生装置, 分离用过的捕集颗粒和粉尘, 含尘捕集颗粒的再生对系统能否正常运行有着重要影响。

2 实验

2.1 材料

采用硅微粉(D_{50} , $\sim 13\text{ }\mu\text{m}$)作为实验中的粉尘颗粒。粉尘颗粒的粒径分布和中值粒径由LS-909激光粒度分析仪(珠海欧美克仪器有限公司)测定,粒度分布见图1。

颗粒床捕集颗粒采用由UOP公司生产的13X-APG空分专用分子筛吸附剂产品,平均粒径为2.07 mm,堆积密度为666 kg/m³,其他物性数据见表1。实验所用气体为常温常压状态下的空气。

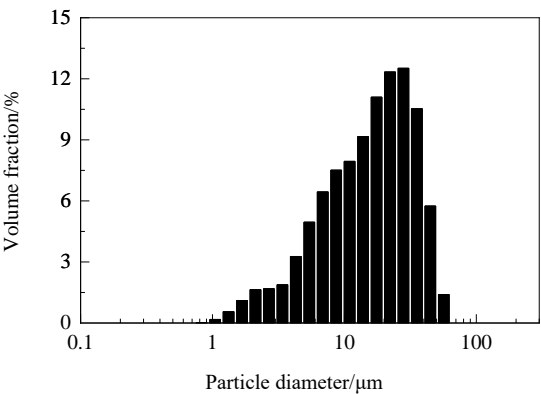


图1 硅微粉粒度分布
Fig.1 Size distribution of silica powder

2.2 新型气体旋流吸附耦合设备

实验装置系统主要分为耦合分离器设备、加尘系统 和提升管-喷动再生系统。实验流程如图2所示。

表1 捕集颗粒物性参数
Table 1 Physical properties of collected granules

Material	Material density/ (kg/m ³)	Particle density/ (kg/m ³)	Bulk density/ (kg/m ³)	Screening			Void fraction
				>2.6	<1.70	d_p	
13X-APG	1819	1049	666	0.4%	0.17%	2.07 mm	0.37

实验设备的主体部分是颗粒床-旋流耦合分离器(The CCGB-F/A system)。主要包括旋风壳体(Cyclone shell)和内置颗粒床(Built-in granular bed)两部分。颗粒床-旋流耦合分离器结构布置如图3(a)所示,内置颗粒床约翰逊网结构如图3(b)所示。旋风壳体主要基于PV型旋风分离器的设计原则进行设计,采用加长型的筒体结构来提高气体处理能力。内置颗粒床直筒段和锥段是由两层约翰逊网卷制而成的套筒式夹层结构,夹层内填充捕集颗粒,与旋风壳体同轴平行布置,形成颗粒床过滤器。

加尘系统主要进行加尘操作,通过控制器给螺旋加料器设定恒定加尘速率,螺旋加料器垂直立于入口管道上。引风机使装置内为负压,降低装置对气密性要求,使加尘操作稳定进行。

提升管-喷动再生系统内,捕集颗粒带出速度 u_t 可由 $\log R_{et}-\log F_c$ 计算^[22],其中费多罗夫准数 F_c 可由式(1)计算:

$$F_c = \sqrt[3]{4A_r/3} \tag{1}$$

式中, A_r 为阿基米德准数,由式(2)计算:

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

带出速度的雷诺数 R_{et} 由式(3)计算:

$$R_{et} = \frac{u_t d_p}{v_g} \tag{3}$$

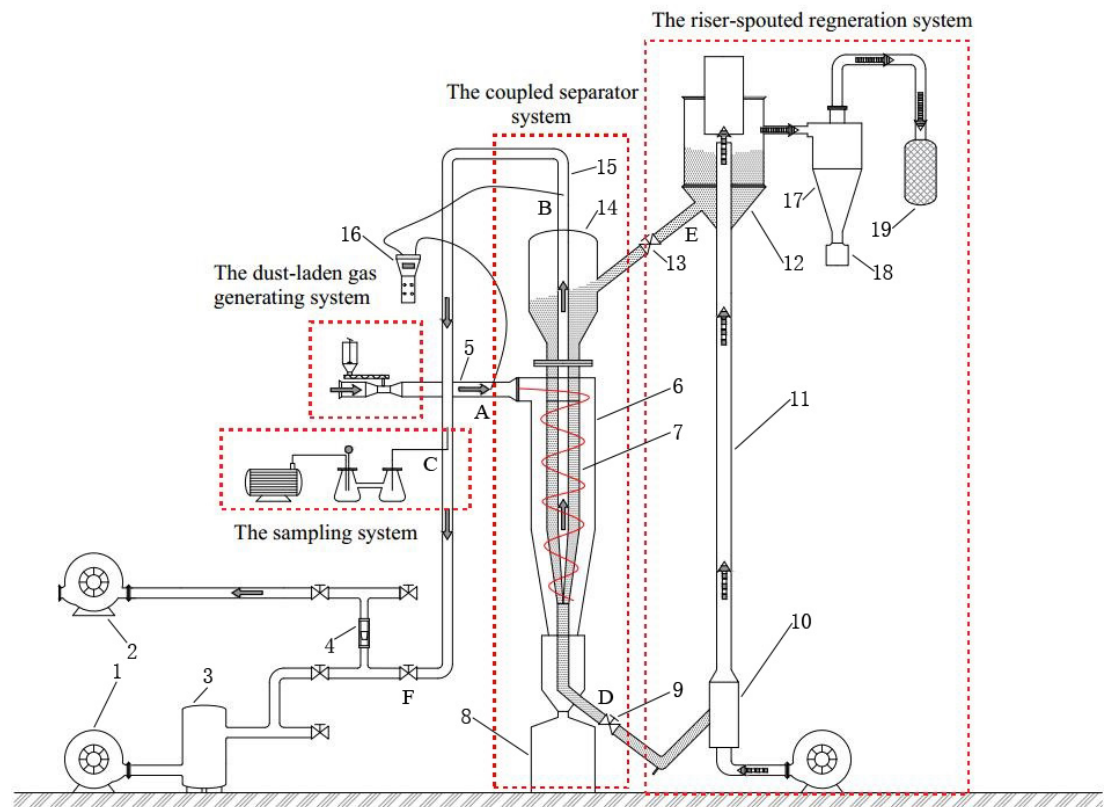
式中, d_p 为颗粒直径(m), ρ_s 为颗粒密度(kg/m³), ρ_g 为气体密度(kg/m³), g 为重力加速度(m/s²), v_g 为气体黏度(m²/s)。

代入有关参数可得捕集颗粒的带出速度 $u_t=15.9\text{ m/s}$,粉尘的带出速度 $u'_t=0.052\text{ m/s}$ 。沉降风速与沉降管直径有关,由沉降管直径 $D_c=150\text{ mm}$ 可计算沉降速度 $u_c=2.48\text{ m/s}$ 。沉降速度 u_c 远大于粉尘的带出速度 u'_t 而远小于颗粒的带出速度 u_t ,因而粉尘被气体带出,捕集颗粒下落到喷动再生器底部,完成捕集颗粒的再生循环,其结构如图4所示。

提升管底部通过鼓风机产生松动风和提升风,将床层底部待生的捕集颗粒和粉尘提升至喷动再生器中。捕集颗粒和粉尘在喷泉区内分离,捕集颗粒通过重力沉降进入料仓,料仓内再生的捕集颗粒经过再生斜管重新回到颗粒床层。因捕集颗粒无法完全再生,表面会黏附粉尘,仍有少量粉尘经再生斜管回流进颗粒床层中,因此再生尘源作为粉尘从第二入口进入颗粒床层,其浓度也会影响分离器的压降和效率。被分离的粉尘受重力沉降作用不明显,当环状区内气流的环境速度高于粉尘的带出速度时,粉尘经再生出口管随气流进入附加的旋风分离器中。

2.3 实验流程

自然状态下的空气经引风机作用通过入口管进入CCGB-F/A装置,吸入的空气和螺旋加料器加入的粉尘在文丘里喉管处混合形成实验所需浓度的含尘气体,含尘气体沿蜗壳式入口切向进入旋风壳体,一部分气体在



1. Air blower 2. Vacuum blower 3. Surging tank 4. Induced-air rotameter 5. Inlet duct 6. Cyclone shell 7. Built-in granular bed
8. Dust collecting tank I 9. Dead collectors valve 10. Gas distributor 11. Riser 12. Spouted regenerator 13. Regenerated collectors valve
14. Feeder hopper 15. Outlet duct (core tube) 16. Differential pressure gauge 17. Cyclone separator 18. Dust collecting tank II 19. Filter bag
A/B/C/D/E. Sampling point F. Gas circuit switching control valve

图2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus

旋流空间内沿轴向旋流向向下运动,另一部分进入颗粒床第二环形空间,通过环形空间的清洁气体进出口管。

内置颗粒床可通过装置下部的待生阀切换为固定床和移动床状态,当待生阀打开时,粉尘随捕集颗粒经提升管进入喷动再生器。因粒径不同,捕集颗粒沉降到喷动再生器底部的料仓中,经再生斜阀形成循环;粉尘颗粒被喷动床环隙气流带出,经小旋风分离器被灰斗和滤袋收集。

由于连续加尘,内置颗粒床约翰逊网的外表面会随着粉尘的堆积,形成一层网面滤饼,装置压降略有增高,

滤饼可有效过滤粉尘。为防止滤饼过厚导致除尘效率降低,装置设计配备反吹系统,每次实验完毕后,对装置进行多次反吹,使约翰逊网网线缝隙的堆积粉尘颗粒以及网面滤饼脱落,保证每次实验起始状态基本一致。表2所示为实验操作条件。

2.4 测量方法

分离器压降由AZ82062型高精度数显压差计(中国台湾衡欣公司)进行测量。如图2所示,压差计测量口1位于旋风分离器天圆地方入口A处,测量口2位于分离器出口管B处,测量结果为分离器进出口静压差。

表2 实验条件

Table 2 Experimental condition

Total air flow rate/(m ³ /h)	Main air flow rate/(m ³ /h)	Conveying air flow rate/(m ³ /h)	Inlet concentration/(g/m ³)	Initial pressure drop/kPa
98	88	10	5.95	0.75
98	88	10	17.57	0.75
98	88	10	30.35	0.75
98	88	10	59.13	0.75

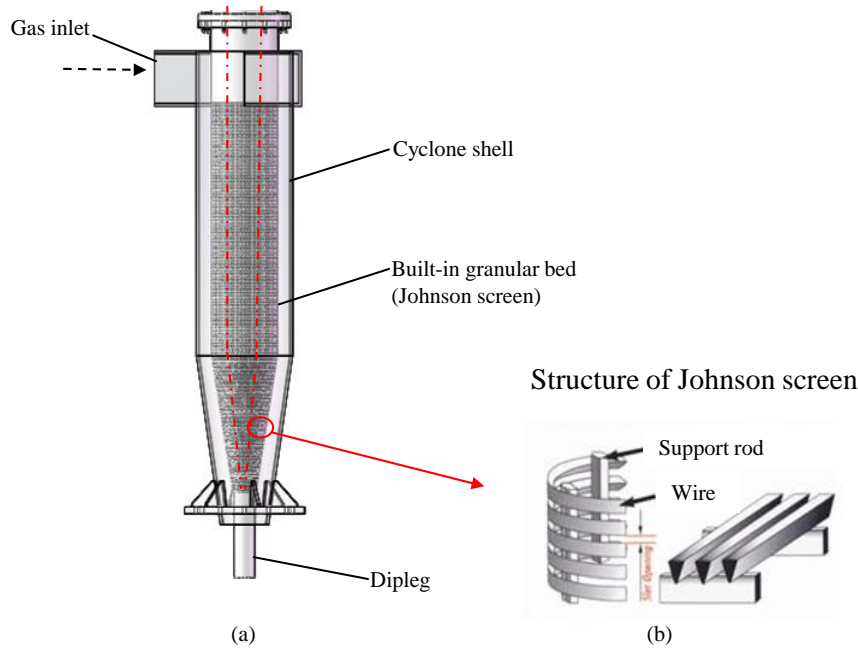


图3 颗粒床-旋流耦合分离器结构示意图
Fig.3 Experimental schematic diagram of CCGB-F/A system

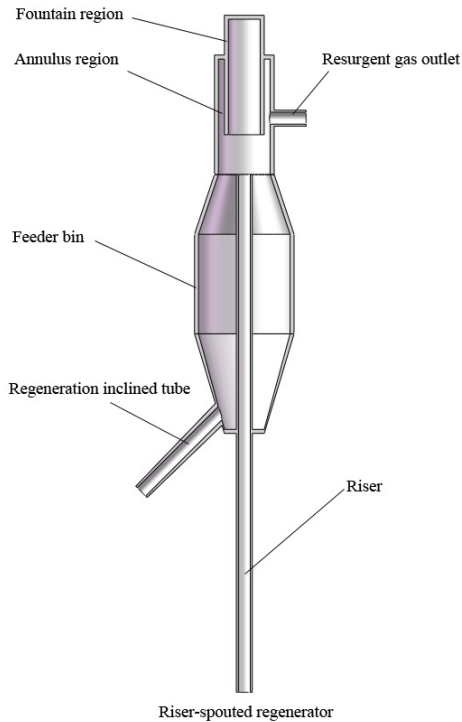


图4 提升管-喷动再生系统结构图
Fig.4 Structure diagram of riser-spouted regenerator system

分离器分离效率由进出口管含尘浓度变化来计算, 分离效率 η 为出口气体含尘浓度 C_{out} 和入口气体含尘浓度 C_{in} 的函数。

$$\eta = \left[1 - (C_{out}/C_{in}) \right] \times 100\% \quad (4)$$

式中, η 为分离器分离效率(%), C_{out} 为出口气体含尘浓度 (g/m^3), C_{in} 为入口气体含尘浓度 (g/m^3)。

入口气体含尘浓度 C_{in} 由加料器进行调节控制, 出口气体含尘浓度 C_{out} 为

$$C_{out} = m_d / (Q_s t_s) \quad (5)$$

式中, m_d 为滤筒捕集到的粉尘质量 (g), Q_s 为采样气量 (m^3/h), t_s 为采样时间 (s)。

通过等速采样法对出口气体采样, 如图2中采样系统 (Sampling system) 所示, 在出口管 C 处进行采样。采样系统中滤筒捕集到的粉尘质量为 m_d 。采样气量 Q_s 由式(6)和(7)计算。

$$u_s = 4Q / \pi D_s^2 \quad (6)$$

式中, u_s 为采样点横截面平均气速 (m/s), Q 为分离器入口气量 (m^3/h), D_s 为采样点管道内径 (mm)。

$$Q_s = \pi D_p^2 u_s / 4 \quad (7)$$

式中, D_p 为采样探头内径 (mm)。

喷动再生效率由待生斜管和再生斜管粉尘含量计算, 如图2所示, 待生斜管取样点在待生阀上方 D 点, 再生斜管取样点在再生阀上方 E 点, 取样后通过筛网筛分出粉尘, 并称重其在待生斜管百分含量 C_d 和再生斜管百分含量 C_z 。再生效率 η_z 为

$$\eta_z = \left[1 - (C_z/C_d) \right] \times 100\% \quad (8)$$

3 结果与讨论

3.1 变入口粉尘浓度对新型耦合分离器性能的影响

分离器的两大性能指标分别是压降和分离效率。再生尘源浓度会影响分离器的性能,实验中通过固定提升管气体流量固定再生尘源浓度后,再分析入口粉尘浓度对分离器性能的影响。

3.1.1 入口粉尘浓度对其压降的影响

当提升管气体流量为 $98 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,不同入口粉尘浓度(5.95, 17.57, 30.35 和 59.13 g/m^3)下,新型耦合分离器的压降随时间变化如图5所示。装置运行初期,新型耦合分离器的压降为快速增长期;运行一段时间后,分离器压降经过缓慢过渡期,最后到达平衡期。分离器压降在快速增长期的增速约是缓慢过渡期的3倍,这是因为在初始状态下,含尘气体通过扩散作用进入内置颗粒床,分离器压降迅速升高;一段时间后,内置颗粒床粉尘持有量接近饱和,压降缓慢增长;内置颗粒床达到饱和状态后,压降达到平衡。

如图5所示,入口粉尘浓度为 5.95 g/m^3 时,分离器平衡期的压降最小为 0.9 kPa ;入口粉尘浓度为 59.13 g/m^3 时,分离器平衡压降最大为 1.2 kPa 。入口粉尘浓度增大,平衡时分离器的压降也随之增加;且入口粉尘浓度越大,快速增长期的压降随时间变化越快,而缓慢过渡期和平衡期压降随时间变化几乎一致。这是因为入口粉尘浓度越大,内置颗粒床在平衡状态时床层内粉尘持有量越多,床层空隙率变小,气流阻力变大,压降变大。

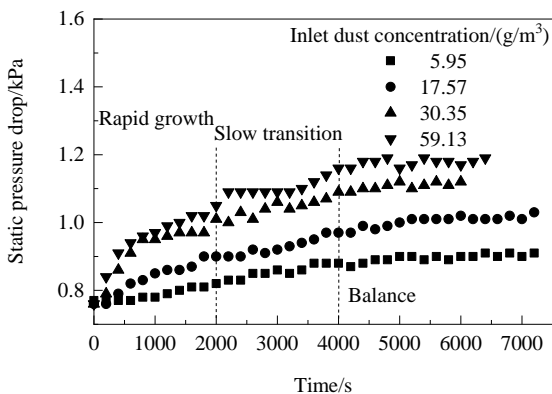


图5 入口粉尘浓度对分离器压降的影响

Fig.5 Effect of inlet dust concentration on static pressure drop of separator

3.1.2 入口粉尘浓度对其分离效率的影响

相同条件下,在不同入口粉尘浓度(5.95, 17.57, 30.35 和 59.13 g/m^3)下,多次测量分离器进出口含尘浓度,计算得到的新型耦合分离器的分离效率如图6所示。由图可见,在5.95, 17.57, 59.13 g/m^3 的不同入口浓

度下,当入口粉尘浓度较低时,分离器分离效率较高;随着粉尘浓度的增加,初始状态下,分离效率明显降低,随着时间的增加,分离效率之间差距逐渐变小,当达到平衡状态时,随着入口粉尘浓度的增加,分离效率略微降低;而在 30.35 g/m^3 时分离器分离效率较高,不符合这一特性。李晓曼等^[23]研究入口含尘浓度对旋风分离器分离效率的影响时发现,入口浓度增加一方面使旋风分离器分离能力下降,但另一方面使颗粒之间的团聚作用增大,惯性分离能力增大,分离效率增加;刘书贤等^[24]研究错流颗粒床过滤器除尘效率时发现,由于粉尘比沉积率的影响,随入口粉尘浓度增大,颗粒过滤器的除尘效率先增大后降低。所以入口粉尘浓度在 30.35 g/m^3 时,可能是因为颗粒团聚作用增加和较高的颗粒床除尘效率使分离效率提高;在 17.57 g/m^3 时,颗粒团聚作用较弱,颗粒过滤器除尘效率增加不明显,分离效率下降;在 59.13 g/m^3 时,入口浓度增加幅度大于颗粒团聚作用,受粉尘比沉积率的影响,颗粒过滤器除尘效率下降,所以分离效率下降。

入口粉尘浓度在 5.95 g/m^3 时,分离效率达99%以上;入口粉尘浓度在 17.57 g/m^3 时,平衡期分离效率达98%;当粉尘浓度增加到 59.13 g/m^3 时,起始状态分离效率较低,接近92%,随时间增加,分离效率逐渐增加,实验装置运行一段时间平稳后,分离器分离效率可达98%;入口粉尘浓度在 30.35 g/m^3 时,分离效率达99%以上。

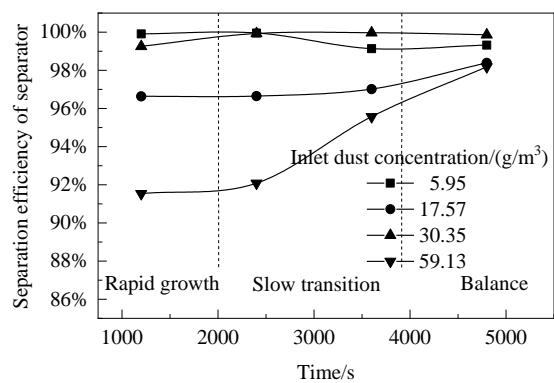


图6 入口粉尘浓度对分离器分离效率的影响

Fig.6 Effect of inlet dust concentration on separation efficiency of separator

新型耦合分离器通过旋风壳体和内置颗粒床同时作用进行除尘,在入口粉尘浓度较低时,新型耦合分离器在低负荷下运行,所以分离效率较高;随着粉尘浓度的增加,分离器压降增加,床层内含尘量增加,空隙率变小,颗粒床捕集粉尘能力变强,但粉尘浓度增加的幅度

大于颗粒床增加的捕集粉尘的能力,所以高入口浓度下分离器效率略微下降。

随入口粉尘浓度增加,在压降快速增长期,各入口粉尘浓度下的分离效率相对稳定。在压降缓慢过渡期,低入口粉尘浓度下,分离器分离效率仍然较高;而在高入口粉尘浓度下,分离器效率逐渐提高,且压降增幅越大,入口粉尘浓度越大,分离效率提高幅度越大,这是因为入口粉尘浓度高,床层内含尘量逐渐增加,达到平衡期相对较慢,分离器达到良好运行状态较慢。在压降平衡期,分离器分离效率达到最大。

3.2 变再生尘源浓度对新型耦合分离器性能的影响

新型耦合分离器内的粉尘来自两方面:(1) 入口管道加入的粉尘;(2) 被捕集颗粒吸附后,经提升管-喷动再生系统后未被分离,经再生斜管再次进入分离器的粉尘,称为再生尘源。由于再生尘源浓度与喷动再生效率有关,实验中通过改变提升管气体流量来调节喷动再生效率。

3.2.1 提升管气体流量对再生效率的影响

某些工艺(如烟气的吸附脱硫-除尘耦合工艺)中,捕集颗粒造价高,为降低成本,捕集颗粒需要循环再生。定入口粉尘浓度下,提升管气体流量对再生效率的影响如图7所示。由图可知,再生效率随提升管气体流量增大而增加。提升管气体流量在70~85 m³/h内升高时,再生效率随提升管气体流量变化较缓慢;在85~100 m³/h内增加时,再生效率随提升管气体流量快速增加,约为70~85 m³/h内增加时的5倍;在100~115 m³/h内增加时,再生效率增加变缓,逐渐接近90%。

提升管气体流量较小时,喷动再生器内环隙速度较小,而环隙速度要高于粉尘的带出速度时,粉尘才会被带出。部分粉尘黏结成小块,对环隙速度要求更大;因气量较小,捕集颗粒在提升管内净化不完全,颗粒表面会黏附粉尘,导致再生效率降低。提升管气体流量继续增至85 m³/h时,喷动再生器内环隙速度明显大于粉尘带出速度,大部分粉尘被分离并收集,再生效率迅速从40%提升至80%。继续增大气量,受再生条件限制,再生效率增速变缓,少许粉尘随捕集颗粒循环进入内置颗粒床,与颗粒重新捕集的粉尘经提升管再次在喷动再生器中由环隙速度带出,所以粉尘无法完全带出,且气量大时能耗较高,综合再生效率与能耗,装置总提升管气体流量在98 m³/h时较适宜。

捕集颗粒循环再生后,新型耦合分离器的另一粉尘入口为再生斜管,喷动再生效率越高,再生尘源浓度越低。

3.2.2 再生尘源浓度对其压降的影响

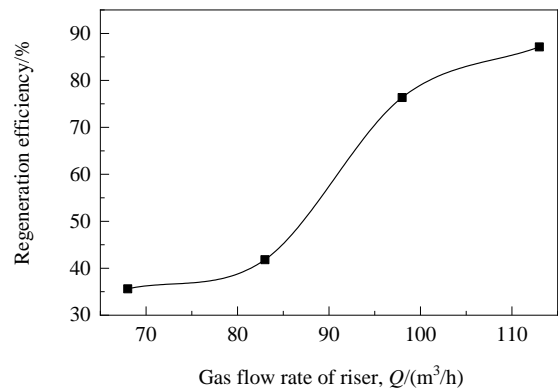


图7 提升管气体流量对再生效率的影响

Fig.7 Influence of gas flow rate of riser on regeneration efficiency

通过控制阀调节提升管-喷动再生系统的提升管气体流量,当入口粉尘浓度为17.57 g/m³时,不同提升管气体流量(68, 83, 98和113 m³/h)下,即不同再生尘源浓度(64.40%, 58.18%, 23.67%和12.87%)下,多次测量新型耦合分离器的压降,实验结果如图8所示。因循环后再生斜管内的粉尘浓度无法测量,由未被分离的粉尘含量代替再生尘源浓度。

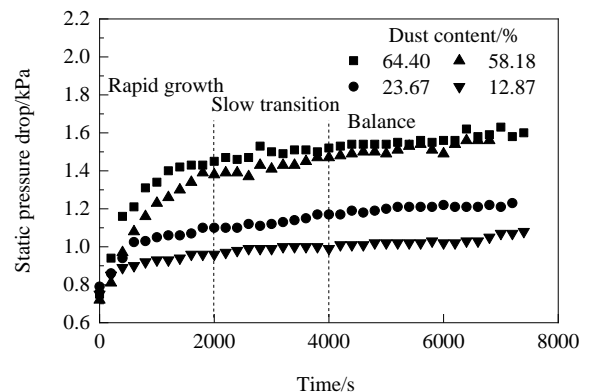


图8 再生尘源浓度对分离器压降的影响

Fig.8 Influence of regeneration dust source concentration on static pressure drop of separator

装置运行初期,压降随时间增加,且再生尘源浓度越高,分离器压降随时间增加越快;随着提升管气体流量增加,再生尘源浓度降低,分离器平衡时的压降越低;装置运行一段时间后,压降趋于平稳。分离器压降增加过程主要分为快速增长期、缓慢过渡期和平衡期三部分。

装置运行后,含尘气体开始加入,粉尘会在内置颗粒床约翰逊网的外表面形成一层粉尘滤饼。随着粉尘加入,粉尘逐渐吸附在整个颗粒床层,分离器含尘量增加,导致分离器压降增加。含尘捕集颗粒经提升管在喷

动再生器中再生后,再生后的捕集颗粒循环进入颗粒床层,一段时间后,进入颗粒床的粉尘和喷动再生器分离的粉尘处于相对平衡状态,床层内含尘量相对平衡,因而分离器压降趋于平衡。

再生尘源浓度越小,分离器压降平衡越快,这与不同入口粉尘浓度对分离器压降影响实验结果一致。提升管气体流量在 $68 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,再生效率为 35.60%,喷动再生器内分离的粉尘较少,再生尘源浓度较高,床层内含尘量较高,床层孔隙率较小,所以装置压降最大。提升管气体流量从 $83 \text{ m}^3/\text{h}$ 提升至 $98 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,再生尘源浓度由 58.18% 降低到 23.67%,装置压降由 1.5 kPa 降至 1.2 kPa。提升管气体流量为 $113 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,再生尘源浓度最低,分离器压降最低。再生尘源浓度的降低,循环的捕集颗粒中含有的未分离的粉尘较少,因而内置颗粒床内粉尘浓度较低,床层孔隙率大,因此粉尘浓度变小导致的压降增量较少,分离器压降较低。

在装置运行到 6000 s 时,分离器压降均保持稳定,6000 s 时 4 种气量下再生尘源浓度与分离器压降的关系最准确,如图 9 所示。

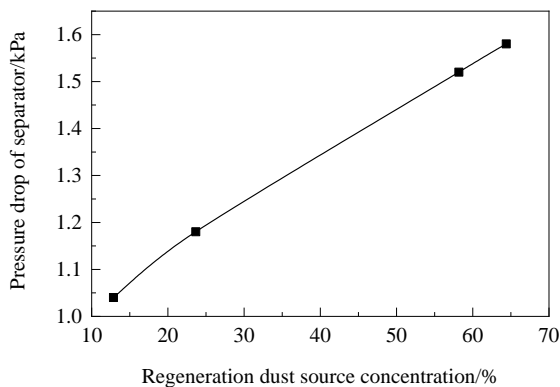


图9 再生尘源浓度与分离器压降的关系

Fig.9 Relationship between regeneration dust source concentration and pressure drop of separator

由图 9 可知,分离器压降与未再生粉尘浓度成正比,可通过曲线拟合得出分离器压降与再生尘源浓度的关系式:

$$\Delta p = 0.0103\eta_z + 0.9201 \quad (9)$$

式中, Δp 为分离器压降(kPa)。

关系式经验证与实验结果相符,可通过关系式根据喷动再生器的再生能力更准确的预测分离器压降,保证装置在高效、低能耗下运行。

3.2.3 再生尘源浓度对其分离效率的影响

不同再生尘源浓度下,多次测量新型耦合分离器的分离效率,实验结果如图 10 所示。由图可知,随时间增

加,分离器分离效率先增加后平稳;分离初始时期,分离器分离效率差别较大,运行平稳后,分离器分离效率差别较小。

在装置运行初期,再生尘源浓度较高时,分离器除尘效率很快稳定接近 98%。再生尘源浓度越低,床层内含尘量越低,空隙率较大,对粉尘过滤能力较弱,因而分离器起始状态分离效率较低,装置加尘运行一段时间后分离器除尘效率稳定。但随着提升管气体流量的提高,稳定时分离器除尘效率略微下降;因为提升管气体流量增加,再生效率提高,再生尘源浓度变小,床层空隙率变大,对粉尘过滤能力变弱,内置颗粒床分离效率下降,所以分离器总的分离效率略微下降。此结果与王苗等^[19]研究结果中旋风分离器和颗粒床两级除尘总效率随气体流量增加略有减小一致。

此结果与不同入口粉尘浓度对分离器分离效率的影响实验结果不同,因为入口粉尘是旋风分离器和内置颗粒床同时分离,入口粉尘浓度较小时,分离效率较高;而再生尘源只受内置颗粒床的作用,再生尘源浓度较小时,床层空隙率大,分离效率较低。

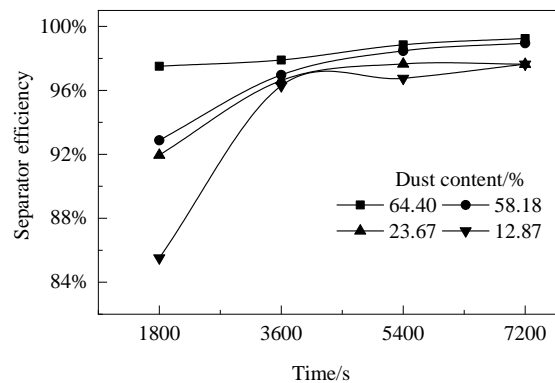


图10 再生尘源浓度对分离器效率的影响

Fig.10 Effect of regeneration dust source concentration on separator efficiency

3.3 入口粉尘浓度和再生尘源浓度对比分析

在分离器压降平衡期,压降并不是保持恒定不变,一段时间后压降略微提高,而入口粉尘浓度和再生尘源浓度对分离器压降均有影响。分别固定入口粉尘浓度为 $17.57 \text{ g}/\text{m}^3$ 和再生尘源浓度为 23.67%,分离器压降平衡期局部放大图如图 11 所示。由图可知,当入口粉尘浓度和再生尘源浓度不同时,分离器压降在平衡期均略有升高;这是因为粉尘的扩散效应,随时间的增加,粉尘在床层中充分扩散,床层中粉尘量略微增加,因而长时间运行后压降有小幅提高。

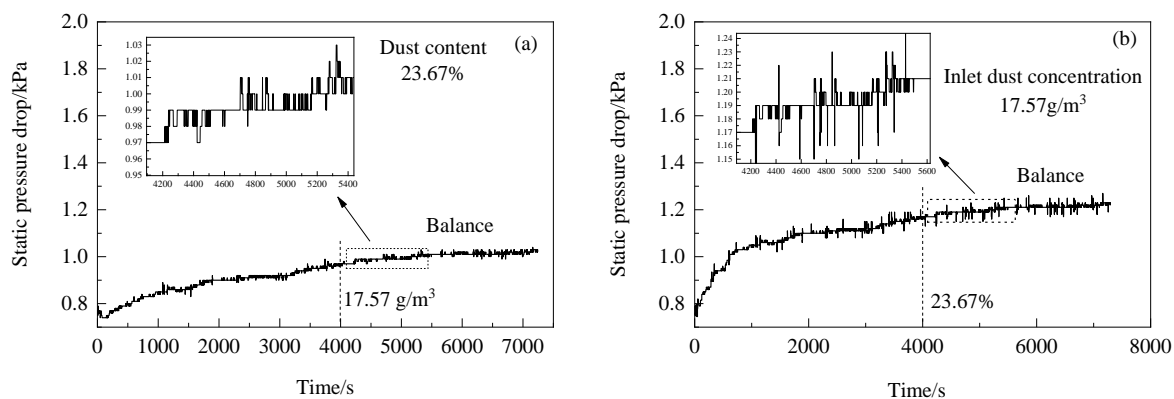


图 11 压降平衡期局部放大图

Fig.11 Partial enlarged drawing of static pressure drop in balance period

如图 11 所示,为考察入口粉尘浓度和再生尘源浓度对分离器压降的对比影响,需保证图例纵坐标一致,且平衡期放大位置一致。相同时间内,如图 11(a)所示,入口含尘浓度不断变化、再生尘源浓度在 23.67% 时,当入口含尘浓度变化到 17.57 g/m^3 ,压降平衡期增加 0.04 kPa 。如图 11(b)所示,入口含尘浓度在 17.57 g/m^3 、再生尘源浓度不断变化时,当再生尘源浓度变化到 23.67%,压降平衡期增加 0.04 kPa 。新型耦合分离器平稳运行后,入口含尘浓度的改变与再生尘源浓度的改变对分离器压降影响相同,说明分离器在压降平衡期,粉尘扩散作用相同,床层空隙率略有减小,流动阻力变大,分离器压降随扩散作用增加效果相同。

新型耦合分离器的压降主要受入口粉尘浓度和再生尘源浓度影响。当入口粉尘浓度升高,导致分离器压降变大时,可以提高再生效率,降低再生尘源浓度,减弱因入口粉尘浓度增大而导致分离器压降增加的作用,达到平衡分离器压降的目的。当入口粉尘浓度较低,对再生尘源要求不高时,可以降低能耗、高再生尘源浓度运行。该结果可为工业生产调节新型耦合分离器压降提供参考。

4 结 论

基于冷模实验装置,对新型耦合分离器特性进行研究,考察了不同入口粉尘浓度和再生尘源浓度对分离器压降和分离效率的影响,得到如下结论:

(1) 入口粉尘浓度越大,平衡时分离器的压降越大。分离器压降增加过程分为快速增长期、缓慢过渡期和平衡期三部分;且入口粉尘浓度越大,快速增长段的压降随时间变化越快。

(2) 入口粉尘浓度较低时,分离器分离效率较高;随粉尘浓度增加,分离效率略微降低。在压降平衡期,分

离器分离效率达到最大,且平衡期压降相对较高时,分离器分离效率相对较低。

(3) 分离器压降与再生尘源浓度成正比,曲线拟合得出分离器压降与再生尘源浓度关系式为 $\Delta p = 0.0103\eta_z + 0.9201$ 。

(4) 再生尘源浓度越小,装置压降平衡越快,这与不同入口粉尘浓度对分离器压降影响实验结果一致。再生尘源浓度降低,分离器除尘效率略有下降。

参考文献

- [1] Mojtahedi W, Abbasian J. H_2S removal from coal gas at elevated temperature and pressure in fluidized bed with zinc titanate sorbents (I): cyclic tests [J]. Energy & Fuels, 1995, 9(5): 458–460.
- [2] 党敏辉, 郑化安, 张生军, 等. FLUENT 在旋风分离器气固分离中的应用进展 [J]. 山东化工, 2017, 46(12): 82–83, 85. Dang M H, Zheng H A, Zhang S J, et al. The application of FLUENT in gas-solid cyclone separator [J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(12): 82–83, 85.
- [3] Briggs L W. Effect of dust concentration on cyclone performance [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1946, 42: 511–526.
- [4] Muschelknautz E. Auslegung von zyklonabscheidern in der technischen praxis [J]. Staub Reinhalt Luft, 1970, 30(5): 187–195.
- [5] 罗晓兰. 固粒相浓度对旋风分离器性能影响的实验研究 [J]. 工程热物学报, 1992, 13(3): 282–285. Luo X L. Experimental study on the effect of solid phase concentration on the performance of cyclone separator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1992, 13(3): 282–285.
- [6] 孙国刚, 汪云瑛, 时铭显. PV 型旋风分离器冷态性能实验及其计算 [J]. 石油炼制与化工, 1989, (4): 18–26. Sun G G, Wang Y Y, Shi M X. Cold performance test and calculation of PV cyclone separator [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 1989, (4): 18–26.
- [7] 孔军. 旋风分离器分离效率数值模拟研究 [J]. 河南化工, 2016, 33(1): 27–30. Kong J. Study on numerical simulation of separation efficiency in cyclone separator [J]. Henan Chemical Industry, 2016, 33(1): 27–30.
- [8] 陈建义, 罗晓兰, 时铭显. PV-E 型旋风分离器性能实验研究 [J].

- 流体机械, 2004, 32(3): 1-4.
- Chen J Y, Luo X L, Shi M X. Experiment research on performance of model PV-E cyclone separator [J]. Fluid Machinery, 2004, 32(3): 1-4.
- [9] 刘秀林, 陈建义, 姜淑凤, 等. 旋风分离器结构优化实验研究 [J]. 现代化工, 2019, 39(12): 205-209.
- Liu X L, Chen J Y, Jiang S F, et al. Experimental study on optimization of structure of cyclone separator [J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(12): 205-209.
- [10] Gueudré L, Chapon F, Mirodatos C, et al. Optimizing the bio-gasoline quantity and quality in fluid catalytic cracking co-refining [J]. Fuel, 2017, 192: 60-70.
- [11] Wu F, Wu D. Attrition resistances and mechanisms of three types of FCC catalysts [J]. Powder Technology, 2017, 305: 289-296.
- [12] 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, 27(4): 332-336.
- Wang Z L, Yan X S, Zhong Q, et al. Analysis on filter property of particle layer in new fixed bed [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science), 2006, 27(4): 332-336.
- [13] 杜鑫, 黄茂丽, 齐彬彬, 等. 粉煤热解含尘干馏气两级净化实验研究 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2911-2917.
- Du X, Huang M L, Qi B B, et al. Experimental study on the two-stage purification of retorting gas in the process of pulverized coal pyrolysis [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2911-2917.
- [14] 单向辉, 刘柏谦, 谭培来, 等. 移动颗粒床除尘器的除尘性能 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1698-1706.
- Shan X H, Liu B Q, Tan P L, et al. Dust removal performance of moving granular bed filter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(3): 1698-1706.
- [15] 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.
- Lü H, Fan Y P, Zhao Y F, 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.
- [16] 赵建涛, 黄戒介, 张建民, 等. 气固错流移动颗粒床过滤器压降特性研究 [J]. 高校化学工程学报, 2003, 17(2): 216-220.
- Zhao J T, Huang J J, Zhang J M, et al. Pressure drop of cross-flow moving granular bed for dust removal [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2003, 17(2): 216-220.
- [17] El-Hedok I A, Whitmer L, Brown R C. The influence of granular flow rate on the performance of a moving bed granular filter [J]. Powder Technology, 2011, 214(1): 69-76.
- [18] Du X, Li Y, Qi B B. Experimental research of coal dust removal system at high temperature [J]. Chemical Engineering Transactions, 2017, 16: 1021-1026.
- [19] 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 M, Du X, Wang Y. Analysis and optimization on two-stage dust removal of cyclone separator-granular bed filter [J]. Chemical Engineering, 2020, 48(4): 55-59.
- [20] 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/adsorber [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2018, 69(5): 1873-1883.
- [21] 颜深, 孙国刚, 孙占朋, 等. 颗粒床过滤除尘技术研究进展 [J]. 化工进展, 2017, 36(9): 3152-3163.
- Yan S, Sun G G, Sun Z P, et al. Advances in research on granular bed filter for dust removal [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(9): 3152-3163.
- [22] 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.
- [23] 李晓曼, 宋健斐, 孙国刚, 等. 入口含尘浓度变化对不同排气管结构PV型旋风分离器分离效率的影响 [J]. 石油炼制与化工, 2015, 46(10): 28-33.
- Li X M, Song J F, Sun G G, et al. Study of effect of feed dust concentration on separation efficiency of PV type cyclone with different exit tubes [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2015, 46(10): 28-33.
- [24] 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(z2): 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(z2): 542-547.