



塑烧滤筒除尘器脉冲喷吹清灰性能

王云端, 敬杰, 毛文浩, 李杨, 彭语嫣, 黄琬岚, 张明星[✉]

西南科技大学环境与资源学院固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 绵阳 621010

摘要 为了探究烧结管滤筒除尘器的清灰性能, 在自建的洁净脉冲喷吹实验平台上, 测得不同脉冲喷吹条件下, 塑烧滤筒的侧壁压力峰值。通过进一步的工业附粉实验, 监测除尘器的运行阻力和清灰后的粉尘残余量, 验证得出塑烧滤筒除尘器清灰参数最优组合。结果表明, 塑烧滤筒的最优清灰参数为: 喷吹压力 0.3 MPa, 喷吹孔径 10 mm, 喷吹高度 160 mm, 对应塑烧滤筒上、中、下 3 个测点的侧壁压力峰值分别为 5 032、5 230、5 877 Pa; 在最优清灰参数下对于磷酸铁锂粉体, 粉尘浓度为 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 当过滤风速从 $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 $1.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, 系统稳定运行阻力随之增大, 清灰效率随之减小; 粉尘浓度从 $25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 增大至 $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 清灰效率随之减小; 随着粉尘粒度 D_{50} 的增大, 清灰效率随之提高。实验结果对塑烧滤筒除尘器的工业使用推广具有工程技术指导作用。

关键词 塑烧滤筒; 脉冲喷吹; 清灰性能

随着我国粉末加工技术的迅速发展和对粉尘排放浓度要求的不断提升, 粉尘的回收和过滤标准也在不断提高, 这就要求除尘设备需要具备高捕获效率、高收集纯度、宽应用范围和低排放浓度等特点^[1-3]。滤筒以及滤袋式除尘器是目前最常用的粉尘治理设备^[4-5], 褶皱式滤筒是目前最常用的一种滤芯, 褶皱式滤筒由于其褶皱式的设计, 其单筒的过滤面积是相同规格滤袋过滤面积的 2.8 倍左右。虽然褶皱式滤筒除尘器相比传统布袋除尘器来说解决了占地面积大、过滤面积小^[6-9]等问题, 但由于其褶皱较深且密集^[10-11], 粉尘容易残留其中, 这时就需要经常对滤料进行拆洗。随着对滤料不断进行拆洗, 滤料表面就会逐渐变得粗糙, 甚至纤维脱落, 这便会导致粉体收集的纯度降低, 而烧结式滤筒除尘器刚好能解决这些问题^[12]。塑烧滤筒除尘器与传统滤袋式除尘器最大的区别在于滤料的结构和材质。塑烧滤筒是由聚四氟乙烯薄膜和聚乙烯基体组成, 它是由聚四氟乙烯经过高温高压烧结而成, 具有刚性的物理结构, 其聚四氟乙烯薄膜不仅应用于表面, 而且填充到滤芯的内部, 通过烧结而成的塑烧滤筒不仅使用寿命长, 不易损坏, 还具有高精度和高纯度回收粉体的优点。

目前国内外针对袋式除尘器最有效的清灰办法是使用脉冲喷吹清灰, 而影响脉冲喷吹清灰参数的因素主要有滤筒尺寸大小、脉冲喷吹压力、喷吹孔直径以及喷吹高度等, 影响脉冲喷吹清灰过滤参数的因素主要有粉尘浓度、过滤风速、粉尘种类、粉尘粒度大小等。在研究清灰参数对脉冲喷吹除尘器清灰性能的影响的文献中, YAN 等^[13]、HUMPHRIES 等^[14] 和王沁淘等^[15] 的研究得出, 在脉冲喷吹实验中, 最大的侧壁压力值能更好的反映清灰过程, 故将侧壁压力峰值的大小做为评价清灰效果的一种方式^[16-18], 刘鹏等^[19] 的研究通过对烧结板进行数值模拟, 得到喷吹压力、喷嘴直径、喷吹高度的最优组合值为 0.6 MPa、8 mm、66 mm。在众多研究过滤参数对除尘器清灰性能影响的文献中, 蔡龙等^[20] 研究得出塑烧板除尘器拥有更低的粉尘排放质量浓度; 黄梅等^[21] 研究得出塑烧板除尘器侧壁压力峰值最小的区域是中部; 在研究过滤参数对脉冲喷吹除尘器清灰性能影响的文献中, 张明星等^[22] 研究表明塑烧板除尘器在过滤黏附性粉尘时仍能保持稳定的运行阻力, 实现超低排放; 颜翠平等^[3] 研究得出脉冲压力、过滤风速、粉尘浓度等都能影响塑烧板除尘器的清灰性能。

收稿日期: 2023-10-07; 录用日期: 2024-01-11

基金项目: 浮法玻璃新技术国家重点实验室开发基金项目 (2018KF04)

第一作者: 王云端 (1997—), 男, 硕士研究生, 619056791@qq.com; [✉]通信作者: 张明星 (1981—), 男, 博士, 副研究员, zhangmingxing@swust.edu.cn

目前国内外对传统滤筒、滤袋除尘器清灰性能研究较多，塑烧滤筒作为一种新型滤芯，其清灰参数和过滤参数还未知。本研究针对塑烧滤筒进行洁净脉冲喷吹压力测试实验和在线脉冲喷吹清灰覆粉实验，探索研究脉冲喷吹压力、高度以及喷吹孔直径等因素对塑烧滤筒侧壁压力峰值的影响并通过对在线工业覆粉实验来验证其清灰参数和过滤参数对清灰效率的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置

图 1 为自行搭建的脉冲喷吹实验平台，主要由便携式数据采集仪 (USB-8512E 型)、脉冲仪 (SXC-8A1)、DMF-Z-25 直角型电磁脉冲阀、体积 40 m³ 气包、螺杆空压机 (UDI8A-7 型)、电荷放大器 (SY7709 型)、安装有 OSA 软件的电脑、3 支压电压力传感器 (QSY8115 型)、(6、8、10、12、14 mm 的 5 根不同喷吹孔径喷吹管) $\Phi 130 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 塑烧滤筒等组成。

在线脉冲喷吹覆粉实验平台 (如图 2 所示)，选用可容纳 2 只 $\Phi 130 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 塑烧滤筒除尘器。实验

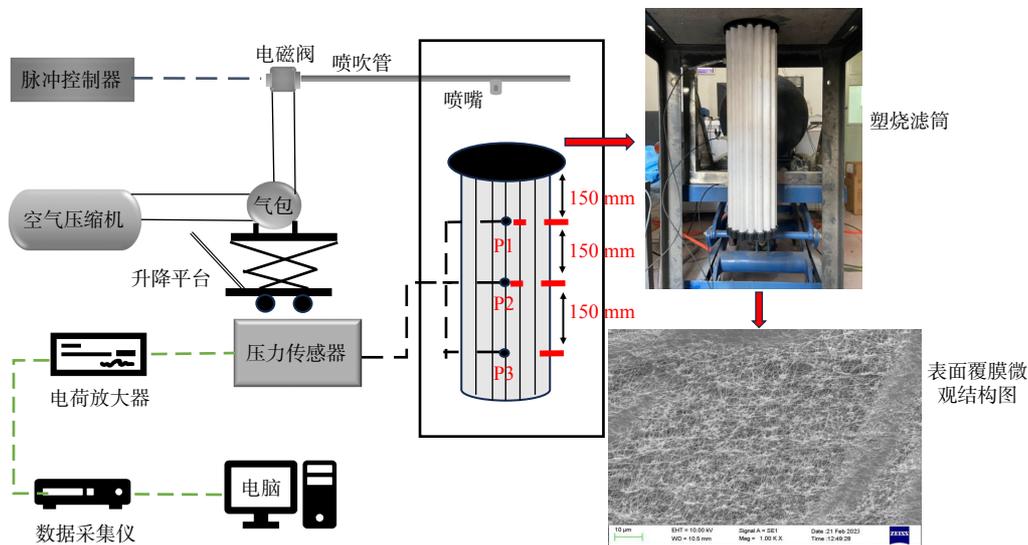


图 1 洁净脉冲喷吹实验平台

Fig. 1 Clean pulse-jet blowing experimental platform

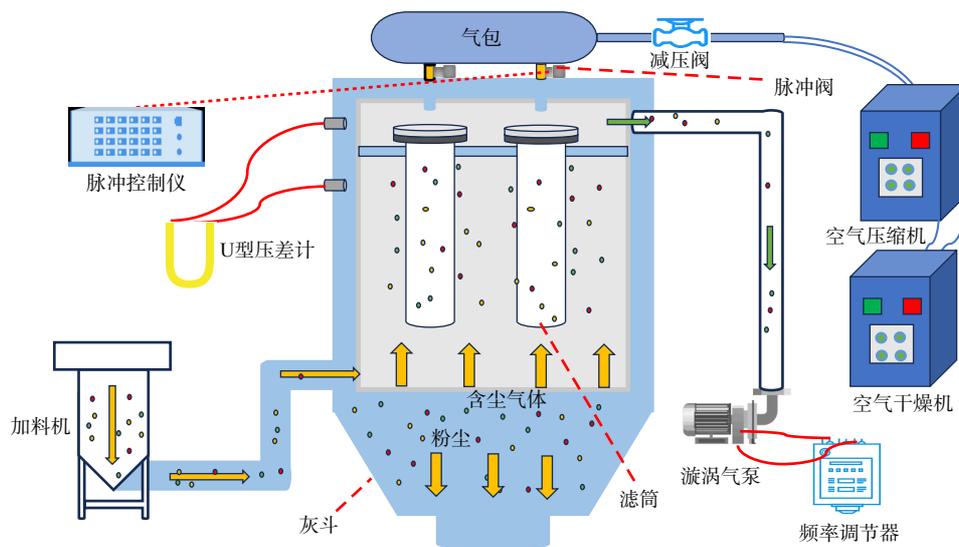


图 2 在线脉冲喷吹清灰实验平台

Fig. 2 Online pulse-jet cleaning experimental platform

平台由脉冲喷吹系统和过滤系统组成, 脉冲喷吹系统中包含空气压缩机(型号 GA22PA13, 公称容积流量 $2.94 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, 最大工作压力 1.3 MPa, 驱动电动机功率 22 KW, 输入比功率 $8.8 \text{ KW}/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$), 空气干燥机(型号 F75, 压力露点 $3 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$, 额定工作力 0.7 MPa, 最高工作压力 1.3 MPa), 脉冲控制仪(型号 SXC-8A1), 脉冲阀(DMF-Z-25), 减压阀(型号 BR4000), 喷嘴(直通喷嘴, 喷嘴孔径 6 mm); 过滤系统中含有: 2 个塑烧滤筒滤料, 除尘器箱体, XFC-4000 型旋涡气泵, 额定功率为 4 KW, 最大流量 $420 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 引风机, 引风机频率调节器(VFC3610-1K50-3P4)和下料仓。

1.2 实验方法

在脉冲实验平台上通过改变喷吹高度、压力、孔径等参数, 同时用压力传感器获取 $\Phi 130 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 塑烧滤筒的侧壁压力, 通过电荷放大器和数据采集仪获取每个传感器所得的电压值, 系统会自动通过使用公式将电压值转换为压力值。为了获得更精确的实验数据, 每一组参数下的实验重复 5 次, 分别获得 3 个测量点侧壁压力峰值的平均值作为实验研究数据。用侧壁压力峰值的大小作为评价清灰强度的参考指标, 可以得到最佳的喷吹高度、压力与孔径 3 者之间的关系。洁净式脉冲喷吹实验所选用的操作参数设计为: ①喷吹压力为 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa; ②喷吹距离为 100、120、140、160、180、200、220 mm; ③喷吹孔径为 6、8、10、12、14 mm。

进行在线脉冲覆粉实验时, 选取锂电子电池正极材料磷酸铁锂超细粉体, 实验过程中从开机到加料时间 1 h 的过程中, 每 5 min 记录 1 次除尘器运行阻力, 每组实验结束后将滤筒附着粉尘抖落称重并记录。在线脉冲覆粉实验设计参数方案为: ①喷吹压力为 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa, 脉冲宽度 80 ms, 脉冲间隔 120 s; ②过滤风速为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$; ③粉尘浓度为 25、50、75、100 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; ④磷酸铁锂粉体 D_{50} 为 0.95、3.97、13.21 μm 。

2 结果与讨论

2.1 喷吹压力和侧壁压力峰值的关系

实验采用 4 种喷吹压力 (0.1、0.2、0.3、0.4 MPa)。众多学者研究得出, 喷吹压力越大, 脉冲阀的气体流量和压力就越大, 从而到达喷吹孔的气体压力也会随之增大, 最终将会表现在滤芯侧壁上的压力值增大^[23]。前人研究得出, 侧壁压力峰值越大, 其清灰效果就越好, 但是侧壁压力峰值过大会导致清灰过度, 导致损坏滤芯^[23-24]。通过扫描电镜可得知塑烧滤筒是由 PE 基板加上表面 PTFE 覆膜涂层烧结而成, 烧结而成的塑烧滤筒有刚性的结构, 正是由于这种刚性的物理结构使得塑烧滤筒在各喷吹组合下的侧壁压力峰值都比普通滤筒、滤袋的侧壁压力峰值大。为了探索研究得出塑烧滤筒各测点的峰值压力与喷吹压力之间的关系, 在不同喷吹压力 (0.1、0.2、0.3、0.4 MPa)、相同喷吹高度 160 mm 下选取喷嘴孔径为 10 mm, 将得到的每个测量点的侧壁压力峰值进行分析讨论。如图 3 所示, 在喷吹压力为 0.3 MPa、喷嘴孔径为 10 mm 时, 侧壁压力峰值的波动范围为 2 500~3 500 Pa; 在 0.2 MPa 喷吹压力条件下, 侧壁压力峰值波动范围为 3 500~4 500 Pa; 在 0.3 MPa 喷吹压力条件下, 侧壁压力峰值波动范围为 5 000~6 000 Pa; 在 0.4 MPa 喷吹压力条件下, 侧壁压力峰值波动范围为 5 000~7 000 Pa; 由图 3 可知每个测点的压力峰值都在随着脉冲喷吹压力的增大而增大, 根据钱云楼^[25]的研究得知该原因是随着喷吹压力的增加, 喷嘴出口处的压力也将随之增加, 这将导致诱导周围更多的气流进入滤芯内, 这时诱导气流与主气流相结合, 将会形成大量的气流, 使得滤筒侧壁上压力增加。因此, 当脉冲喷吹压力增加时, 滤筒侧壁压力峰值也随之呈现递增的趋势。

2.2 喷吹高度和侧壁压力峰值分布关系

研究中使用了 4 种不同的喷吹压力 (0.1~0.4 MPa)。在 0.1 和 0.2 MPa 的喷吹压力条件下, 侧

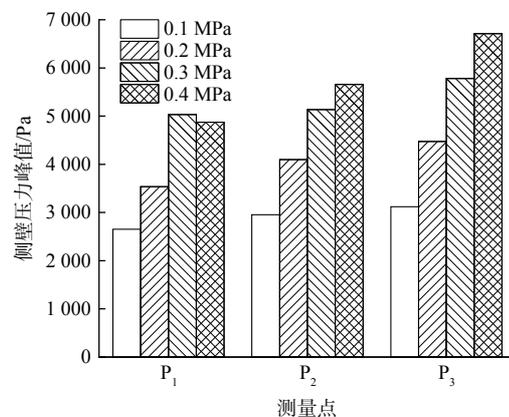


图 3 不同脉冲压力下各测点侧壁压力峰值

Fig. 3 The peak value of side wall pressure at each measuring point under different pulse pressures

壁压力峰值较低，较低的侧壁压力峰值对应的清灰效果较差，而在喷吹压力为 0.4 MPa 条件下，有大量侧壁压力峰值超过 8 000 Pa 的测点，长期处于这么大的侧壁压力峰值条件下极易损坏滤筒，而 0.3 MPa 喷吹压力条件下的侧壁压力峰值分布均匀，故选择喷吹压力为 0.3 MPa 条件下的喷吹结果进行分析 (如图 4)。如图 4(a)、(b) 所示，在喷吹压力为 0.3 MPa、喷吹孔径为 6、8 mm 的条件下，上中下 3 个测点的压力峰值都随着喷吹高度的递增呈现先增后减再逐渐平缓的趋势，上中下 3 个测点的侧壁压力峰值达到最大峰值时，喷吹高度为 180 mm，其中上部侧壁压力峰值最小，下部侧壁压力峰值为 3 个测点中最大的点。在喷吹孔径为 6 mm 时，侧壁压力峰值在 1 200~3 200 Pa 范围之间波动。在喷吹孔径为 8 mm 时，其波动范围为 1 800~

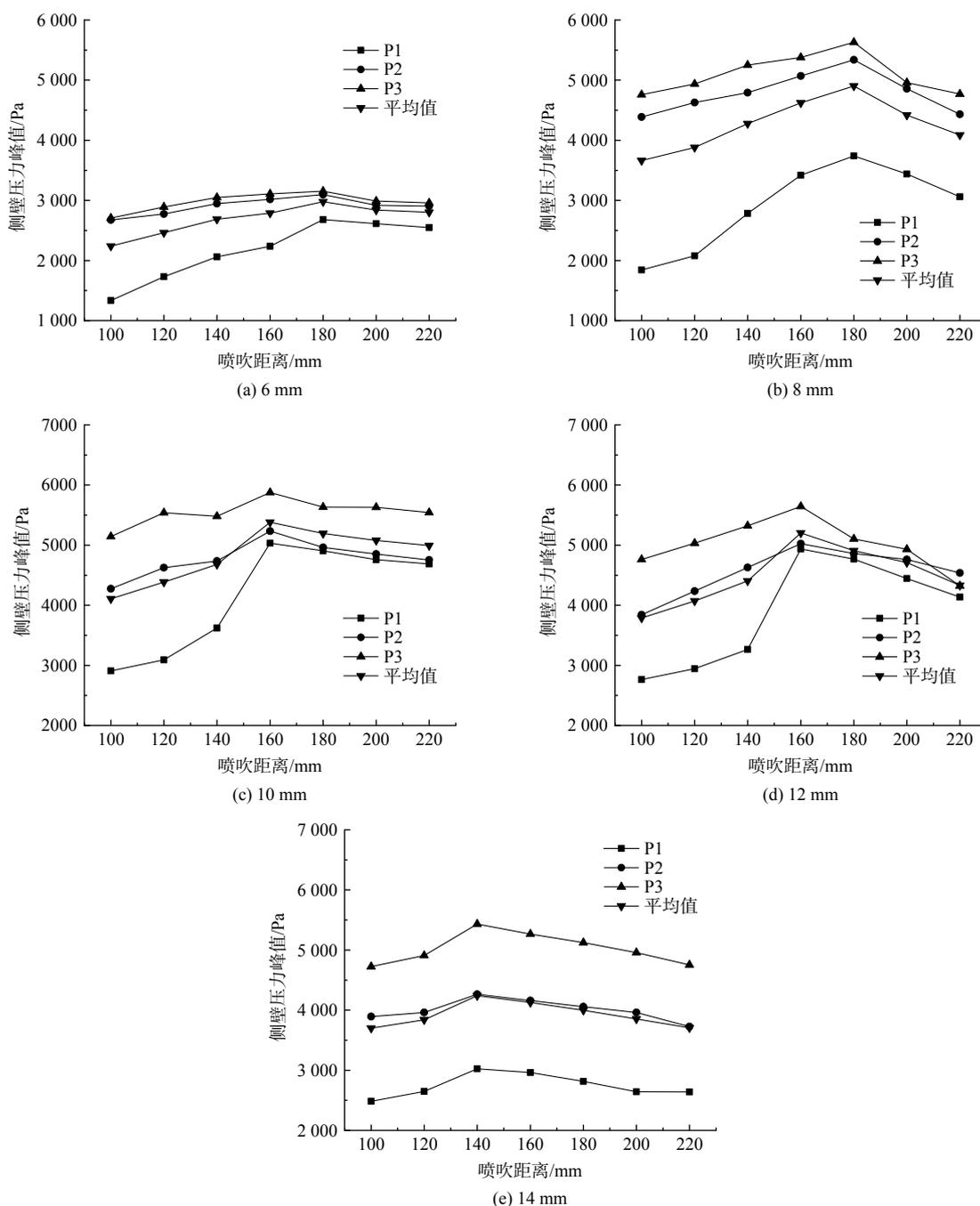


图 4 0.3 MPa 喷吹压力、不同喷吹孔径、不同喷吹高度下侧壁压力峰值

Fig. 4 0.3 MPa pulse-jet pressure, various blowing hole diameters, and peak sidewall pressure at different blowing heights

5 500 Pa。如图 4(c)、(d) 所示，在喷吹压力 0.3 MPa、喷吹孔径 10、12 mm 的条件下，上部、中部、下部 3 个部位测点的侧壁压力峰值都随着喷吹高度的增加呈现先增后减的趋势，3 个测点的侧壁压力峰值此时都达到最大值，达到最大值时喷吹距离为 160 mm，其中上部侧壁压力峰值最小，下部侧壁压力峰值为 3 个测点中最大的测点。在喷吹孔径为 10 mm 时，其侧壁压力峰值波动范围在 2 900~6 000 Pa 之间，在喷吹孔径为 12 mm 条件下，其侧壁压力峰值波动范围为 2 700~6 000 Pa。如图 4(e) 所示，在喷吹压力为 0.3 MPa、喷吹孔径为 14 mm 条件下，其侧壁压力峰值随着喷吹高度的增加呈先增后减的趋势，在喷吹高度为 140 mm 时，上中下 3 个测点部位的侧壁压力峰值都达到最大峰值，在喷吹距离为 100~220 mm 的条件下其侧壁压力峰值波动范围为 2 500~6 000 Pa。

由图 4 可以得出，随着喷吹孔径从 6~14 mm 的增大，最大侧壁压力峰值依旧位于滤筒的下部。3 个部位测点的侧壁压力峰值都呈现一样的规律，都为 P3>P2>P1，即下部>中部>上部，这说明塑烧滤筒清灰困难的区域和传统滤筒一样发生在上部。由气体射流理论可知，随着喷吹高度的增加，由电磁脉冲阀控制的高速压缩气流会引起周围空气的吸入，从而产生更强的冲击力，使得滤筒的侧壁压力达到最大值，当喷射高度超过一定值并继续增加时，高速喷射的气流在运动过程中会因周围空气的卷入而衰减。同时，由于气流到达滤芯底部的距离较长，当气流到达滤芯底部时，能量会严重耗散。这时气流的影响减弱，因此在脉冲喷吹实验中存在一个最佳的喷吹高度。

在脉冲喷吹压力为 0.3 MPa 时，不同的喷吹孔径有着不同的最佳喷吹高度。由图 4 可以得出在喷吹孔径为 6、8、10、12、14 mm、0.3 MPa 喷吹压力时，最优喷吹高度分别为 180、180、160、160、140 mm。

2.3 喷吹孔径和侧壁压力峰值的关系

在相同的喷吹参数下，喷吹孔直径的大小决定了喷嘴出口处的喷射速度。喷射孔直径越大，射流速度在出口处就会越小，从动压转换到塑烧滤筒上的静压就会越大，从而导致侧壁压力峰值增大。然而，喷嘴直径过大的话也会导致喷嘴出口处的动力损失，从而将导致侧壁压力峰值减小。从前人的研究中可以得出侧壁压力峰值的大小代表清灰的强度^[16]，滤筒各个测量点的相对标准方差是评价脉冲气流在滤筒内部均匀性的方法^[14]，而除尘器的清灰效果是由清灰的均匀性和清灰强度共同体现的。图 5 展示了在最优喷吹高度、喷吹压力下 5 个不同喷吹孔径下塑烧滤筒侧壁压力峰值的分布情况。从图中可以得出，随着喷吹孔径从 6-14 mm 递增，侧壁压力峰值也随之呈现先增后减的趋势，当喷吹孔径为 10 mm 时，P1 和 P3 测得的侧壁压力峰值的最大值是所有喷吹管中最大的，P2 (中部) 测点中侧壁压力峰值最大的点的喷吹孔径是 8 mm，10 mm 喷吹孔径次之，其两者侧壁压力峰值相差仅为 103 Pa。从表 1 可以得出滤筒各喷吹孔径在最优喷吹距离以及喷吹压力为 0.3 MPa 下 3 个测点的相对标准方差为 0.070~0.232，从中可以得出塑烧滤筒在不同喷吹孔径最优喷吹距离下的清灰均匀性相差较大。虽然 8、14 mm 的喷吹孔径的侧壁压力峰值都超过 3 000 Pa 能达到清灰要求，但其相对标准方差为 0.169、0.232，表明其清灰均匀性差。由表 1 可以看出，喷吹孔径 6、10、12 mm 的相对标准方差差距并不大，最大差值为 0.008 左

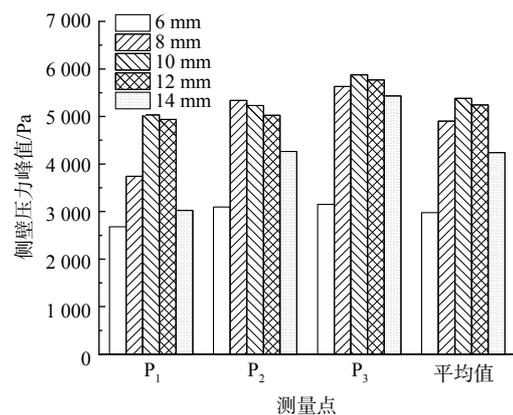


图 5 0.3 MPa 喷吹压力、不同喷吹孔径下最佳喷吹高度各测点侧壁压力峰值

Fig. 5 0.3 MPa pulse-jet pressure, the peak value of side wall pressure at each measuring point under different injection diameters

表 1 最优清灰参数下的相对标准方差

Table 1 Relative standard variance under optimal cleaning performance

编号	喷吹孔径/mm	最优喷吹距离/mm	侧壁压力峰值/Pa				标准方差	相对标准方差
			P1	P2	P3	平均值		
1	6	180	2 680	3 098	3 152	2 976	210	0.070
2	8	180	3 740	5 399	5 630	4 903	830	0.169
3	10	160	5 032	5 430	6 077	5 513	360	0.078
4	12	160	4 937	5 026	5 769	5 244	373	0.071
5	14	140	3 024	4 265	5 432	4 240	983	0.232

右,但是综合考虑清灰效果来说 10 mm 喷吹孔径的侧壁压力峰值是最大的,其相对标准方差又较小,故其清灰效果也是最好的。综合考虑清灰效果和清灰均匀性来说,10 mm 喷吹孔径为塑烧滤筒的最优喷吹孔径。

2.4 喷吹压力对清灰效率的影响

为探索不同喷吹压力对塑烧滤筒除尘器清灰效率的影响,实验所选择过滤风速为定值 $0.8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,喷吹距离为 160 mm,喷吹孔径为 10 mm,粉尘浓度 $50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,喷吹压力为变量。在线脉冲清灰实验平台上使用加料机均匀添加磷酸铁锂物料 1 h 且不开脉冲喷吹时,系统压差变化如图 6 所示。由图 6 可得出在向除尘系统均匀加料时,系统压差的波动范围为 700~1 400 Pa,系统压差随着加料时间呈现正比增长趋势,均匀加料 1 h 后,关机,取出滤筒,在均匀加料 1 h 后,滤筒上附着了一层 0.5 cm 厚度左右的粉尘,均匀扫下两只滤筒粉尘后,用电子秤称得其粉尘重量为 262 g,其附着粉尘量如图 7 所示。在同样的条件下,在加料同时打开脉冲喷吹且在不同喷吹压力下的除尘器系统压差变化如图 6 所示,4 个不同脉冲喷吹压力下系统压差波动范围为 700~1 000 Pa。均匀加料 1 h 后,不同脉冲压力下滤筒的粉尘残余量如图 7 所示,在 0.1~0.4 MPa 四种不同喷吹压力下,粉尘残余量分别为 75.9、57、28、27 g,由此可以计算得出在 0.1 MPa 喷吹压力下,能除去滤筒上附着的 71%(质量分数)粉尘,在此喷吹压力条件下滤筒的平均侧壁压力峰值为 2 908 Pa,在 0.2 MPa 喷吹压力下,能除去滤筒上附着的 78%(质量分数)粉尘,这时滤筒的平均侧壁压力峰值为 4 036 Pa,在 0.3 MPa 喷吹压力下,能除去滤筒上附着的 89.3% 粉尘,这时滤筒平均侧壁压力峰值为 5 315 Pa,在 0.4 MPa 喷吹压力下,能除去滤筒上附着的 89.7% 粉尘,此时滤筒的平均侧壁压力峰值为 5 747 Pa。由图 8 分析得知在 0.3 MPa、0.4 MPa 喷吹压力条件下去除粉尘残余量的效果差不多,差距仅约 0.4%,结合滤筒的侧壁压力峰值可知,0.3 MPa 喷吹压力下其下部侧壁压力峰值为 5 779 Pa,0.4 MPa 喷吹压力下其下部侧壁压力峰值为 6 711 Pa,两者差距约 1 000 Pa,长期在 0.4 MPa 喷吹压力条件下可能会造成滤筒下部破裂、损坏从而导致清灰效果下降。故与上一节 2.3 在 0.3 MPa 喷吹压力条件下、10 mm 喷吹孔径、160 mm 喷吹距离下情况相符合,该条件为脉冲喷吹塑烧滤筒除尘器的最优清灰参数。

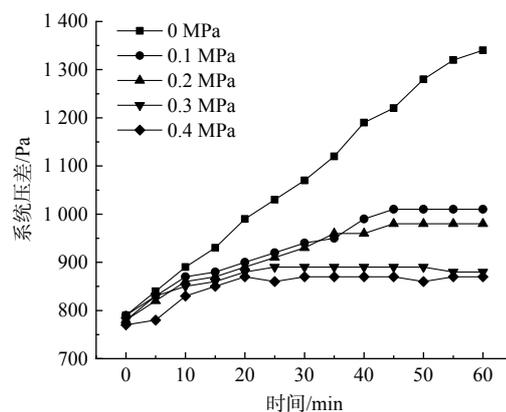


图 6 不同喷吹压力下系统压差变化

Fig. 6 Different pressure changes in the system under different blowing pressures



图 7 有无脉冲压力滤筒附粉情况对比图

Fig. 7 comparison chart of powder attachment with and without pulse-jet pressure filter cartridges

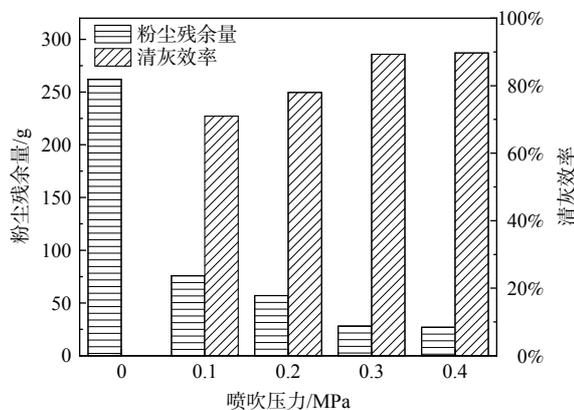


图 8 粉尘残余量及清灰效率

Fig. 8 Dust residue and cleaning efficiency

2.5 过滤风速对清灰效率的影响

在研究过滤风速对除尘器清灰效率的影响时, 喷吹孔径为 10 mm, 喷吹距离为 160 mm, 喷吹压力为 0.3 MPa, 粉尘浓度为 $50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 过滤风速为变量。如图 9 所示, 在过滤风速逐渐增大的情况下, 除尘器系统压差到达稳定的时间越来越长, 在 $0.6\sim 1.4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 过滤风速下, 系统运行 1 h 内系统压差波动范围为 $700\sim 1400 \text{ Pa}$ 。在 $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 过滤风速条件下, 除尘器运行 15 min 时系统压差达到 800 Pa, 基本达到稳定。如图 10 所示, 在未打开脉冲喷吹条件下, 其粉尘残余量为 247 g, 在打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 25 g。故打开脉冲喷吹系统后能除去滤筒上附着的 89.8% 磷酸铁锂粉体。在 $0.8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 过滤风速条件下, 除尘器运行 20 min 时系统压差达到 880 Pa, 基本达到稳定。在未打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 262 g。在打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 28 g, 因此, 打开脉冲喷吹系统后能除去滤筒上附着的 89.3% 的磷酸铁锂粉体。在 $1.0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 过滤风速条件下, 除尘器运行 30 min 时系统压差达到 1 090 Pa, 基本达到稳定。在未打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 280 g; 在打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 42 g。在此条件下打开脉冲喷吹系统后能除去滤筒上附着的 85% 磷酸铁锂粉体。在 $1.2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 过滤风速条件下, 除尘器运行 30 min 时系统压差达到 1 230 Pa, 基本达到稳定。在未打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 299 g; 在打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 56 g, 在此条件下打开脉冲喷吹系统后能除去滤筒上附着的 84.3% (质量分数) 磷酸铁锂粉体。在 $1.4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 过滤风速条件下, 除尘器运行 35 min 时系统压差达到 1 230 Pa, 基本达到稳定。在未打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 313 g, 在打开脉冲喷吹条件下, 粉尘残余量为 47 g。在此条件下打开脉冲喷吹系统后能除去滤筒上附着的 82.1% 磷酸铁锂粉体。图 11 为不同过滤风速下粉尘附着情况。由图 9、图 10 可得出, 在过滤风速增大的条件下, 除尘系统的清灰效率随之逐渐减小。

2.6 粉尘浓度对清灰效率的影响

在研究粉尘浓度对除尘器清灰效率的影响时, 喷吹孔径为 10 mm, 喷吹距离为 160 mm, 过滤风速为 $0.8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, 喷吹压力为 0.3 MPa, 粉尘浓度为变量。由图 12、图 13 可得出在向除尘系统均匀加料时, 在不同过滤风速下系统压差的波动范围为 $750\sim 950 \text{ Pa}$, 粉尘附着情况图如图 14 所示, 在过滤风速为 $0.8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, 粉尘浓度 $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时系统压差在 15 min 达到稳定, 稳定时系统压差 860 Pa, 清灰效率为 91.6%。在粉尘浓度为 $50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 系统压差在 20 min 达到稳定, 稳定时系统压差 890 Pa, 清灰效率

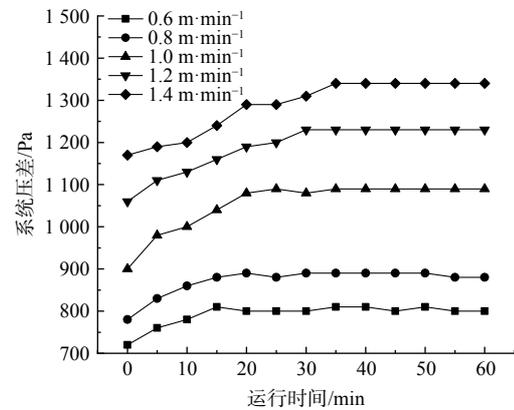


图 9 不同过滤风速下系统压差图

Fig. 9 Pressure difference of dust collector system

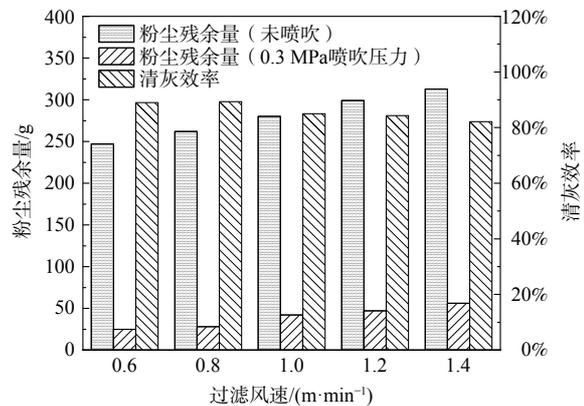


图 10 不同过滤风速下清灰效率

Fig. 10 Ash removal efficiency at various under different filtration wind speed filtration wind speeds

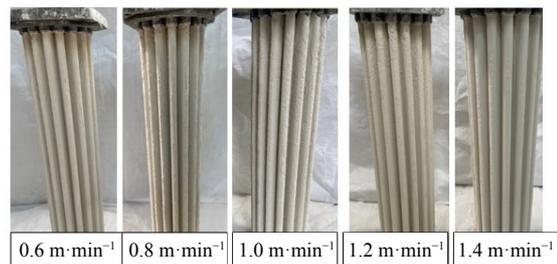


图 11 不同过滤风速下粉尘黏附情况

Fig. 11 Dust adhesion at varying filtration wind speeds

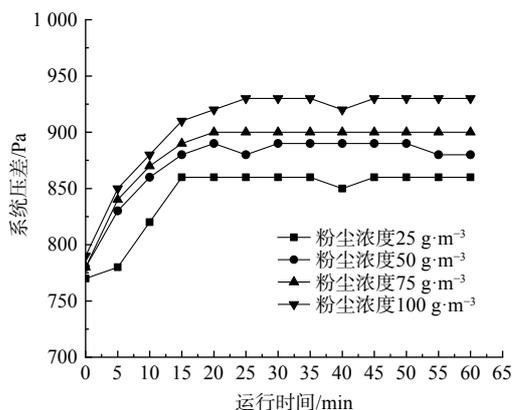


图 12 不同粉尘浓度下系统压差
Fig. 12 System pressure difference under different dust

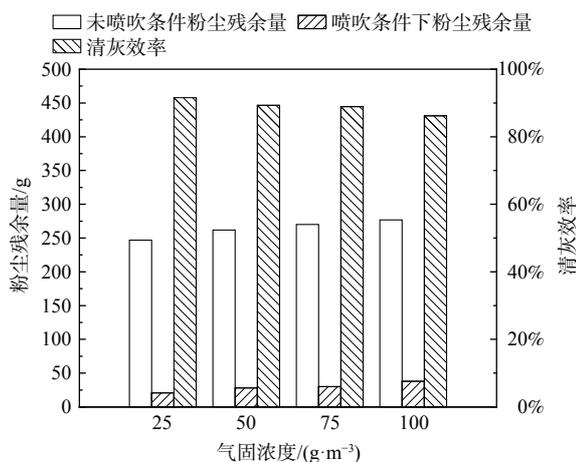


图 13 不同粉尘浓度下清灰效率
Fig. 13 Ash removal efficiency under varying gas-solid concentrations concentration

89.3%。在粉尘浓度为 75 g·m⁻³ 时，系统运行了 20 min 后系统压差达到稳定，稳定时的系统压差 900 Pa，清灰效率 88.9%。在过滤风速为 100 g·m⁻³ 时，系统运行了 30 min 左右时系统压差达到稳定，稳定时系统压差为 930 Pa，清灰效率为 86.2%。由此可得出，随着粉尘浓度的增大，系统稳定运行压差逐渐增大，系统清灰效率逐渐减小。

2.7 粉体粒度对清灰效率的影响

图 15 为加料不同粒度的磷酸铁锂系统压差变化图；图 16 为加料不同粒度磷酸铁锂的清灰效率图；图 17 为不同粒度条件下粉尘附着滤筒表面图。由图 15 看出，在同样的清灰和过滤参数条件下，除尘器运行阻力变化范围为 750~1 000 Pa，随着粉尘粒度的增大，除尘器运行阻力呈现减小趋势。由图 16 可以得出，在粉体粒度 $D_{50}=0.95 \mu\text{m}$ 时，清灰效率为 70.3%， $D_{50}=3.97 \mu\text{m}$ 时，清灰效率为 89.3%， $D_{50}=13.21 \mu\text{m}$ ，清灰效率为 93.6%。由图 17 可以得出，随着粉尘粒度的增大，粉尘残余量随之呈现减小趋势，滤筒表面附着的粉尘明显减少。由此可得出，在随着粉尘粒度减小的条件下，除尘系统的稳定运行阻力随之增大，粉尘



图 14 不同粉尘浓度下粉尘黏附情况

Fig. 14 Dust adhesion at various gas-solid concentrations

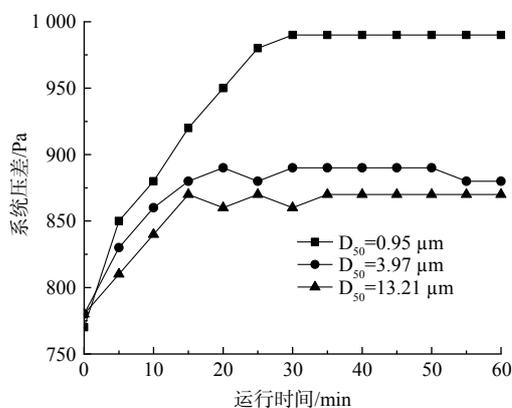


图 15 不同粉尘粒度下系统运行压差
Fig. 15 System operating pressure difference under different dust

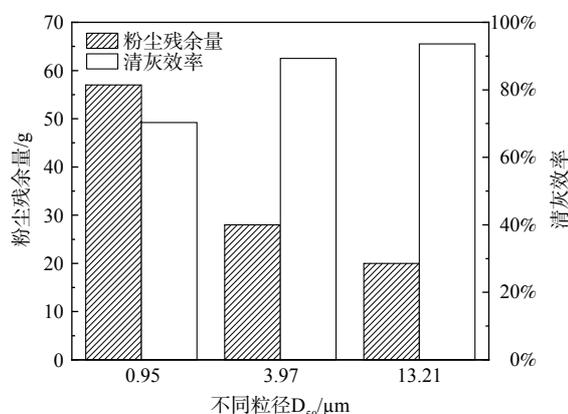


图 16 不同粉尘粒度下清灰效率
Fig. 16 Cleaning efficiency under different dust size particle size

残余量随之增大,清灰效率随之呈减小趋势。

3 结论

1) 对于塑烧滤筒的脉冲喷吹实验来说,随着喷吹压力从 0.1 MPa 增加到 0.4 MPa,侧壁压力峰值也呈现递增的趋势,综合考虑清灰压力的大小,滤筒的使用寿命等条件,将 0.3 MPa 的喷吹压力作为清灰压力效果更佳。

2) 通过对脉冲喷吹塑烧滤筒在相同喷吹压力 0.3 MPa,不同喷吹孔径、喷吹高度等参数下的侧壁压力峰值的分析,当喷吹孔径从 6 mm 增加到 8、10、12、14 mm 时,滤筒侧壁压力呈现先增后减的趋势。经过研究发现,不同喷吹孔径的最佳喷吹距离从 180 mm 开始,随着喷吹孔径的增加,最优喷吹距离逐渐减小,直至达到 140 mm。

3) 根据在线脉冲喷吹清灰试验结果可得出,在最优喷吹清灰参数条件下,粉尘浓度为 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,随着过滤风速从 $0.6 \sim 1.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的增大,系统运行 1 h 内压差波动范围为 700~1 400 Pa,清灰效率随着过滤风速的增大而变小,其变化范围为 89.8~82.1%。在过滤风速为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,随着粉尘浓度从 $25 \sim 100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的增大,系统运行 1 h 内压差波动范围为 750~950 Pa,清灰效率随着粉尘浓度的增大而变小,其变化范围为 91.6%~86.2%。随着粉尘粒度 D_{50} 的增大,系统的运行 1 h 内压差波动范围为 750~1 000 Pa,清灰效率随着粉尘中位径 D_{50} 的增大而增大,清灰效率的变化范围为 70.3%~93.6%。

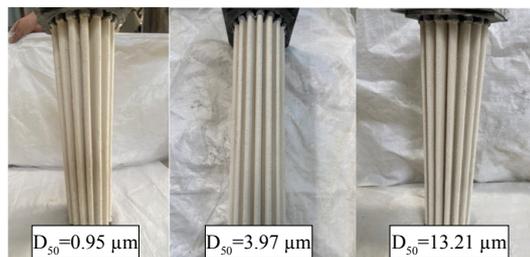


图 17 不同粒度下粉尘黏附情况

Fig. 17 Adhesion of dust at different granularities

参考文献

- [1] CHEN S, GONG Y. Numerical study of the effects of cartridge shape on the reverse pulsed flow cleaning of pleated cartridge filters[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2019, 233(2): 371-383.
- [2] LI S H, SONG S, WANG F, et al. Effects of cleaning mode on the performances of pulse-jet cartridge filter under varying particle sizes[J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(9): 1835-1841.
- [3] 颜翠平, 黄梅, 马小辉, 等. 塑烧板除尘器过滤与清灰性能研究[J]. *金属矿山*, 2022(2): 201-208.
- [4] 李国珍. 国内外滤尘设备清灰技术的发展和变革[J]. *通风除尘*, 1984(4): 37-41.
- [5] 王海舰. 布袋除尘器脉冲清灰工艺的优化研究[J]. *科技视界*, 2020(2): 32-33.
- [6] 张梅梅. 滤筒褶皱数对脉冲滤筒除尘器性能影响的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- [7] 张殿印, 王纯. 脉冲袋式除尘器手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 38-100.
- [8] ZHANG Q, LIU D, CHENG H Y, et al. Effect of nozzle type on pulse-jet cleaning performance of ceramic filter tube[J]. *Advanced Powder Technology*, 2023, 34(10): 104180.
- [9] LI S H, CHENG H, HU S D, et al. Study on the influence of built-in open-hole dust cleaner on the cleaning performance of cartridge filter[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 173: 786-799.
- [10] 张一帜, 陈海焱, 覃金珠. 滤筒除尘器及应用现状[J]. *能源与环境*, 2009(5): 47-49+52.
- [11] YAN C P, ZHANG M X, LIN L Y, et al. An analysis of a reverse pulse cleaning process using high-flow pleated fabric filter cartridges[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018(113): 264-274.
- [12] 杜文青. 高效烧结板除尘器设计研究[J]. *能源与环保*, 2018, 40(10): 174-179.
- [13] YAN C P, LIU G J, CHEN H Y. Effect of in-duced airflow on the surface static pressure of pleated fabric cartridges during pulse jet cleaning[J]. *Powder Technology*, 2013(249): 424-430.
- [14] HUMPHRIES W, MADDEN J. Fabric filtration for coal-fired boilers: nature of fabric failures in pulse-jet filters[J]. *Filtration & Separation*, 1983, 20(1): 40-42.
- [15] 王沁淘, 张明星, 赖小林, 等. 高温滤袋的有效清灰强度[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(3): 1318-1322.
- [16] 吕娟, 颜翠平, 袁彩云, 等. 喷吹压力与喷吹距离对长滤袋清灰效果的研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(3): 285-288.
- [17] 巨敏, 陈海焱, 张明星, 等. 标准规格滤筒除尘器运行阻力及脉冲清灰实验研究[J]. *暖通空调*, 2013, 43(5): 123-127.
- [18] YUAN N, REN L, WANG B, et al. Experimental study on the effects of diversion device on pulse-jet cleaning of horizontal filter cartridge[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 145: 247-254.
- [19] 刘鹏, 戴石良. 烧结板除尘器脉冲清灰气流的数值模拟[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2016, 30(2): 111-116+122.
- [20] 蔡龙. 宝钢人才开发院实验室双滤室脉冲除尘设备的研究[J]. *低碳世界*, 2017(31): 302-303.
- [21] 黄梅. 脉冲喷吹塑烧板除尘器的清灰性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [22] 张明星, 黄梅, 李杨, 等. 塑烧板与滤筒除尘器收集黏附性粉体性能对比[J]. *中国粉体技术*, 2022, 28(6): 107-113.
- [23] 秦文茜, 张明星, 康彦, 等. 脉冲喷吹金属滤袋的压力分布影响因素分析[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(2): 465-472.

[24] 杨燕霞, 张明星, 秦文茜, 等. 脉冲喷吹内置锥形滤筒的清灰性能[J]. 中国粉体技术, 2019, 25(1): 76-80.

[25] 钱云楼. 脉冲喷吹工况参数对滤筒除尘器清灰性能的影响[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.

(责任编辑: 金曙光)

Pulse-jet cleaning performance of sintered filter cartridge dust collector

WANG Yunduan, JING Jie, MAO Wenhao, LI Yang, PENG Yuyan, HUANG Wanlan, ZHANG Mingxing*

Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycling, Ministry of Education, School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology Mianyang 621010, China

*Corresponding author, E-mail: zhangmingxing@swust.edu.cn

Abstract To examine the dust cleaning performance of a sintered filter cartridge, the peak value of the side wall pressure of the sintered filter cartridge was measured on a self-constructed clean pulse-jet blowing test platform. The resistance of the dust collector during operation and the amount of dust after dust removal were observed in additional experiments, which led to the identification of the optimal combination of dust removal parameters. The results indicated the optimal parameters for ash removal were as follows: the injection pressure was 0.3 MPa, the injection diameter was 10 mm, and the injection height was 160 mm. The peak lateral pressure values at the three measuring points on the upper, middle, and lower parts of the sintered filter cartridge were 5 032, 5 230, and 5 877 Pa, respectively. Under the optimal cleaning parameters for lithium iron phosphate powder, when the dust concentration was $50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, increasing the filtration wind speed from $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ to $1.4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ results in an increase in the stable operation resistance of the system and a decrease in cleaning efficiency. The dust concentration increased from $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ to $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, and as a result, cleaning efficiency decreased. As the D_{50} size of dust particles increased, the cleaning efficiency improved. The experimental results can provide engineering guidance for the industrial application and widespread use of sintered filter cartridge dust collectors.

Keywords sintered filter cartridge; pulse-jet; dust cleaning performance