

# 烧结机尾电改袋除尘器脉冲喷吹数值模拟

宋孝红, 陈旺生\*, 李迁威, 李丹天, 李泽

武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081

**摘要** 在电改袋除尘器中,为更好地利用原静电除尘器的内部空间,可采用长袋及脉冲喷吹清灰方式。利用CFX软件对脉冲喷吹系统进行模拟优化,结果表明,通过在喷嘴侧壁开设20 mm小孔,可有效增大喷吹气体流量,且以开设2个或者3个为佳。在喷嘴侧壁开孔数量、喷吹压力、喷吹距离、喷吹孔直径和滤袋长度等因素中,喷吹压力和喷吹孔直径对清灰的影响较大,增大喷吹压力和喷吹孔直径均有利于改善清灰效果,喷嘴侧壁开孔数量对清灰的影响较喷吹压力和喷吹孔直径小,喷吹距离仅对滤袋上部清灰效果有影响,而滤袋长度主要影响滤袋中下部的清灰效果,且影响较小,选择长袋具有可行性。

**关键词** 静电除尘器;电改袋除尘器;脉冲喷吹清灰;数值模拟;峰值压力

中图分类号 X513 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)07-4217-06 DOI 10.12030/j.cjee.201606012

## Numerical simulation of pulse-jet cleaning of bag house transformed from ESP in sintering machine tail

SONG Xiaohong, CHEN Wangsheng\*, LI Qianwei, LI Dantian, LI Ze

School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

**Abstract** This paper presents the results of a study on the pulse jet cleaning of a baghouse transformed from an electrostatic precipitator (ESP) in a sintering machine tail. In order to make better use of the inner space of the ESP in the baghouse, a long filter bag and pulse-jet cleaning system was adopted. A numerical simulation of the time-average pressure in the injection pipe was performed using CFX software. The simulation result shows that there is negative pressure in the nozzle. Measures were taken to optimize the diameter of the holes set on the nozzle (now 20 mm), which resulted in effective increase in the gas flow of the pulse-jet. The best effect was observed when the number of holes was '2' or '3'. Also studied were the effects of difference in the number of holes in the nozzle, pulse-jet pressures, pulse-jet distances, the spray aperture diameter, and filter bag lengths; on the peak pressure of the bag filter. The results indicate that the pulse-jet pressure and the spray aperture diameter have significant effects, and that increasing the pulse-jet pressure and spray aperture diameter help to improve the cleaning efficiency. The number of nozzle holes has less effect than the pulse-jet pressure and diameter of the spray aperture. The pulse-jet-distance affects only the cleaning efficiency of the bag-filter top. The filter-bag length has the most effect on the cleaning efficiency of the bag-filter bottom, but this effect is small. Therefore, the use of long filter bags is feasible for use in baghouses transformed from ESPs.

**Key words** electrostatic precipitator; bag house transformed from ESP; numerical simulation; pulse-jet cleaning; peak pressure

目前,烧结机尾烟尘净化设备主要为静电除尘器<sup>[1]</sup>,但静电除尘器对细颗粒物的除尘效率较低<sup>[2]</sup>,很难满足新排放标准<sup>[3]</sup>的要求,所以亟需采取措施对现有静电除尘器进行改造,其中电改袋除尘器<sup>[4]</sup>为最有效的改造方案之一。

脉冲清灰技术作为电改袋除尘器的关键技术之一,具有清灰效率高、清灰能力强以及清灰均匀性好等

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA062501)

收稿日期:2016-06-01;录用日期:2016-08-11

第一作者:宋孝红(1989—),男,硕士研究生,研究方向:大气污染防治。E-mail:1060663936@qq.com

\*通信作者,E-mail:chenwangsheng@wust.edu.cn

优势<sup>[5]</sup>,并广泛应用于工业生产中。关于脉冲喷吹清灰的机理一般有压力理论和加速度理论两种解释<sup>[6]</sup>,压力理论认为滤袋内外压力不同引起粉尘的脱落,而加速度理论认为喷吹气流使滤袋产生了“鼓、瘪、鼓”的变形,进而使得粉尘层发生变形,破裂脱落。SIMON 等<sup>[7]</sup>通过实验研究了小型袋式除尘器脉冲喷吹过程不同因素对喷吹过程的影响。SUH<sup>[8]</sup>通过中试实验研究了不同过滤速度、喷吹压力、脉冲宽度、喷吹距离和喷嘴直径等变量下初始压降和粉尘层压降的变化规律。LO 等<sup>[9]</sup>对褶皱型滤袋的清灰过程进行了数值模拟和实验研究,获得不同褶皱比率下的清灰效果。万凯迪等<sup>[10]</sup>采用 CFD 方法,以单条滤袋为研究对象,建立二维轴对称模型,模拟了不同影响因素下滤袋壁面的峰值压力和反向加速度的变化规律,进而说明各因素对清灰效果的影响。ZHOU 等<sup>[11]</sup>模拟了喷吹管内气流的均匀性,认为喷嘴直径相等时,沿喷吹管内气流流动方向,各喷嘴喷吹流量逐渐增大,喷吹不均匀。ANDERSEN 等<sup>[12]</sup>分别通过实验和 CFD 方法研究脉冲喷吹过程,证明模拟结果和实验结果具有较好的吻合性。

本文采用 CFX 软件首先对脉冲喷吹过程中单根喷吹管内压力场的分布进行数值模拟,再根据模拟结果提出喷嘴优化措施,然后以单条滤袋为研究对象,模拟各因素对脉冲喷吹清灰的影响,进而为烧结机尾电改袋除尘器清灰系统的优化设计提供依据。

## 1 模拟模型及模拟条件

### 1.1 几何模型

电改袋除尘器结构及喷嘴结构如图 1 所示,其中脉冲喷吹系统由气包,喷吹管及喷嘴等结构组成。为了简化计算,本文分别选取单根喷吹管及净气室空间,和单个滤袋及外部空间为计算域进行数值模拟分析。其中,选择单根喷吹管及净气室计算时,喷吹管规格为  $\phi 110 \text{ mm} \times 3 \text{ 520 mm}$ ,单条喷吹管上布置 15 个喷嘴,喷嘴间距为 230 mm,沿气流方向将喷嘴依次编号为 1~15,喷嘴结构形式如图 1(b)所示。计算时取喷嘴直径为 40 mm,喷吹孔直径为 20 mm,喷嘴长度为 45 mm,喷嘴出口与袋口的距离为 200 mm,袋口直径为  $\phi 160 \text{ mm}$ 。而选取单条滤袋及外部空间为计算域时,喷吹距离(喷嘴出口与袋口之间的距离)为 X;滤袋直径为  $\phi 160 \text{ mm}$ ,滤袋长度为 L,滤袋厚度为 2 mm;喷嘴长度为 45 mm,喷嘴直径为 40 mm,喷吹孔直径为 D。

### 1.2 数学模型

为了简便计算,模拟计算时假设喷吹气体为可压流体理想气体,做非稳态流动,喷吹时间为 0.2 s,由于喷吹时间很短,忽略气体与净气室、袋室、滤袋等壁面之间的热交换,紊流模型采用标准  $k-\varepsilon$  模型,其紊动能  $k$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

紊流能量耗损率  $\varepsilon$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中:  $k$  为紊动能,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $\varepsilon$  为紊动能耗损率,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ ;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\mu$  为运动粘性系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\mu_t$  为紊流粘度;  $G_k$  为由于速度梯度引起的应力生成项;其余符号为经验常数,一般采用 Launder 和 Spalding 推荐值:  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $\sigma_k = 1.0$ 。

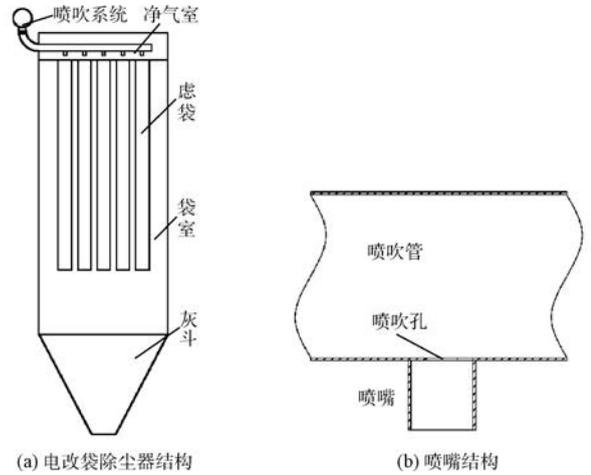


图 1 电改袋除尘器及喷嘴结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of bag house transformed from ESP and nozzle

### 1.3 模拟条件

边界条件和初始条件是求解流体微分方程的必要条件,文中数值模拟计算的主要条件如表 1 所示。其中,以单条滤袋及其外部空间计算时,滤袋设为多孔介质,模拟选用 PPS 滤料<sup>[13]</sup>(厚度 2 mm,体孔隙率 0.8,渗透率  $2.26 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ,经验损失系数为  $4.39 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ )。

表 1 数值模拟边界条件及初始条件

Table 1 Boundary condition and initial condition of simulation

计算域	边界条件			初始条件
	进口	出口	壁面	
单根喷吹管及净气室空间	气包入口,全压条件,设为 0.2 MPa	袋口,平均静压条件,设为 -2 000 Pa;净气室出口,开放式边界条件,设为 -2 000 Pa	固体壁面包括净气室壁面、喷嘴外壁,花板,滤袋底面,其边界采用无滑移壁面条件	初始压力为 -2 000 Pa;初始速度为:笛卡尔坐标系下速度分量均为 $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。
单条滤袋及其外部空间	喷吹孔,全压边界,设为 P	袋室壁面,平均静压条件,设为 -2 000 Pa;净气室出口,开放式边界条件,设为 -2 000 Pa		

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 单根喷吹管数值模拟结果

通过数值模拟得到喷吹管内 2 s 内的时均压力场分布,结果如图 2 所示。由图 2(a)可知,喷吹管内,沿气流流动方向,时均静压不断增大,喷吹管前端最小为 0.150 MPa,末端最大为 0.199 MPa,这是由于在喷吹过程中,流体速度不断减小,动压随之也不断减小,并不断转化为静压。由图 2(b)可知,在喷嘴内靠近喷吹气流入口端,存在一个负压区域,最高负压为 -28.85 kPa,这是因为在喷吹管内,气流速度方向是轴向的,并以一个径向速度流入到喷嘴内,速度合成后与径向有一个夹角,即喷吹气流以一定的偏角经喷吹孔进入喷嘴内,使得喷嘴内一侧的气流速度远远高于另一侧的气流速度,高速气流对低速气流有卷吸作用,在卷吸作用下,形成负压。

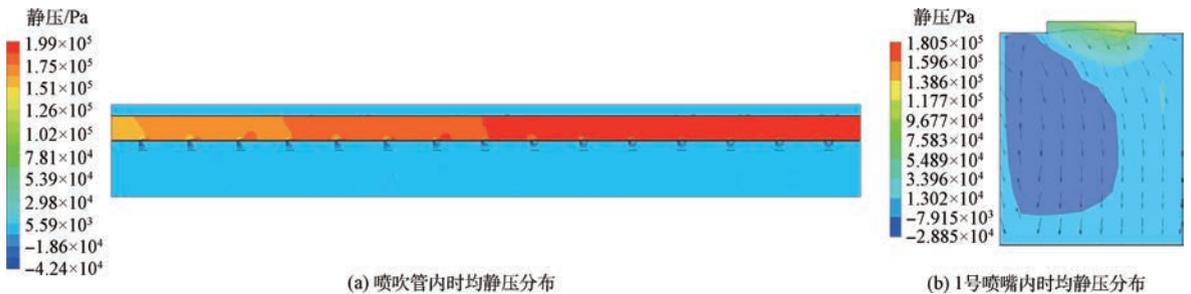


图 2 计算域时均静压分布

Fig. 2 Time-average pressure

### 2.2 喷嘴的优化分析

根据上述模拟结果可知,喷嘴内存在一个较高的负压区,若采取在喷嘴侧壁开设小孔的方法可减小喷嘴内负压区的大小,同时可诱导更多的空气从小孔进入喷吹气流中,增大诱导空气量,进而提高清灰的效果。在上述模拟条件下,分别模拟了如下开孔条件下的喷吹过程(开孔位置如图 3 所示),结果如图 4 所示:

1) 1 个孔: 开设 1 个直径为 20 mm 孔,开孔位置

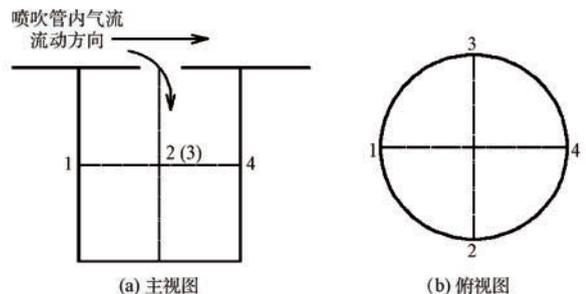


图 3 喷嘴侧壁开孔位置示意图

Fig. 3 Hole's location on nozzle

为 1;

2) 2 个孔: 开设 2 个直径为 20 mm 孔, 开孔位置为 2、3;

3) 3 个孔: 开设 3 个直径为 20 mm 孔, 开孔位置为 1、2、3;

4) 4 个孔: 开设 4 个直径为 20 mm 孔, 开孔位置为 1、2、3、4。

图 4 为不同开孔条件下, 进入各袋口的喷吹气体流量。由图 4 可知, 在喷嘴侧壁合理开孔可提高进入袋口的喷吹气体流量。与不开孔相比, 当开设 1、2 和 3 个孔时, 进入各袋口的平均喷吹气体流量分别增加 0.171、0.202 和 0.204  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 当开孔数量从 2 个增至 3 个后, 进入各袋口的平均喷吹气体流量增加幅度很小, 仅为 0.002  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而当开设 4 个孔时, 进入各袋口的平均喷吹气体流量比开设 1、2 和 3 个孔时要小, 这是由于在位置 4 的孔位于喷嘴内的正压区, 开孔并没有将净气室内的空气引诱到喷吹气流中, 反而由于小孔的作用, 使得部分喷吹气体从小孔流向净气室, 减少了喷吹气体流量。综上可知, 在喷嘴侧壁合理地开孔, 可有效提高进入袋口的喷吹气体流量, 且以开设 2 个或者 3 个为佳。

### 2.3 单条滤袋数值模拟结果

数值模拟喷嘴侧壁不同开孔数量  $N$  (孔径为 20 mm), 不同喷吹压力  $P$ , 不同喷吹距离 (喷嘴出口至袋口的距离)  $X$ , 不同喷吹孔直径  $D$ , 不同袋长  $L$  条件下滤袋壁面峰值压力变化情况 (峰值压力是指脉冲冲灰时, 在滤袋内壁面产生的最大静压值)。

#### 2.3.1 喷嘴侧壁开孔数量对峰值压力的影响

模拟  $P = 0.35 \text{ MPa}$ ,  $X = 200 \text{ mm}$ ,  $D = 20 \text{ mm}$ ,  $L = 7 \text{ m}$  保持不变, 喷嘴侧壁开孔数量  $N$  分别为 0、1、2 和 3 个的不同工况下峰值压力变化, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 从袋口开始, 峰值压力呈现先迅速增大, 后急骤下降, 最后趋平的过程, 在滤袋底略有增大的趋势。距袋口 4 m 以内, 随着喷嘴侧壁开孔数量的增多, 峰值压力逐渐增大, 距袋口 0.25 m 时, 各测点峰值压力达到最大, 其中, 与不开孔相比, 开有 1、2 和 3 个孔时, 各测点平均峰值压力分别增大 0.12、0.42 和 0.65 kPa。距袋口 4 m 以外, 峰值压力基本不随开孔数量的增多而变化。所以, 在喷嘴侧壁开设小孔有利于提高距袋口 4 m 以内滤袋壁面的清灰效果, 以本模拟为例, 开设 2 个或者 3 个小孔为最佳。

#### 2.3.2 喷吹压力对峰值压力的影响

模拟  $N = 2$ ,  $X = 200 \text{ mm}$ ,  $D = 20 \text{ mm}$ ,  $L = 7 \text{ m}$  保持不变, 喷吹压力  $P$  分别为 0.25、0.30、0.35、0.40 和 0.45 MPa 的不同工况下峰值压力变化, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 距袋口 0 ~ 0.25 m 时, 峰值压力迅速增大, 在距离袋口 0.25 m 处达到最大, 距袋口 0.25 ~ 4 m 时, 峰值压力逐渐减小, 距袋口 4 ~ 6 m

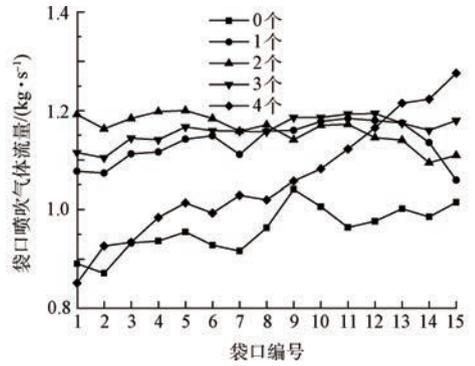


图 4 袋口的喷吹气体流量分布

Fig. 4 Gas flow of pulse-jet into filter bag inlet

增加幅度很小, 仅为 0.002  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而当开设 4 个孔时, 进入各袋口的平均喷吹气体流量比开设 1、2 和 3 个孔时要小, 这是由于在位置 4 的孔位于喷嘴内的正压区, 开孔并没有将净气室内的空气引诱到喷吹气流中, 反而由于小孔的作用, 使得部分喷吹气体从小孔流向净气室, 减少了喷吹气体流量。综上可知, 在喷嘴侧壁合理地开孔, 可有效提高进入袋口的喷吹气体流量, 且以开设 2 个或者 3 个为佳。

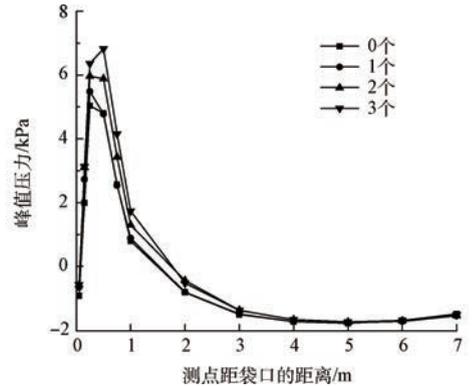


图 5 喷嘴侧壁开孔数量对峰值压力的影响

Fig. 5 Effect of hole numbers on nozzle on peak pressure

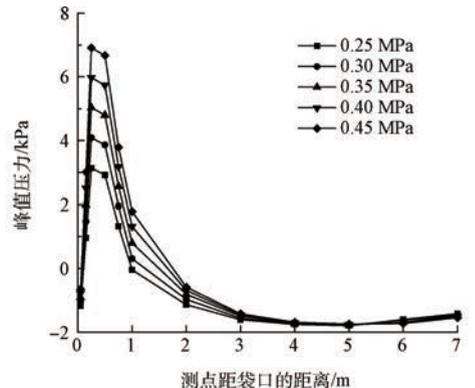


图 6 喷吹压力对峰值压力的影响

Fig. 6 Effect of pulse-jet pressure on peak pressure

时,峰值压力基本保持不变,距袋口 6~7 m 时,峰值压力略有增大的趋势,这是由于受到滤袋底部壁面的阻挡作用,喷吹气流反向运动,产生回流的结果。

由图 6 可知,距袋口 4 m 内,随着喷吹压力的增大,各测点峰值压力逐渐增大,喷吹压力每增大 0.05 MPa,各测点峰值压力平均增大 0.31 kPa。距袋口 4 m 以外,各测点峰值压力随喷吹压力的增大变化较小。说明喷吹压力大小,主要影响距袋口 0~4 m 范围内的清灰效果,且喷吹压力越大,清灰效果越好。

另外,电改袋除尘器运行时,一定流量的烟气从除尘器入口进入除尘器,并从出口流出,整个流场为一个稳定的流场,而脉冲喷吹过程仅有 0.2 s,相对于整个流场而言,时间极其短暂。因此,脉冲喷吹对除尘器整体流场几乎没有影响,同样的喷吹压力大小,对整个流场影响较小。

### 2.3.3 喷吹距离对峰值压力的影响

模拟  $N = 2$ ,  $P = 0.35$  MPa,  $D = 20$  mm,  $L = 7$  m 保持不变,喷吹距离  $X$  分别为 150、200、250、300 和 350 mm 的不同工况下峰值压力变化,结果如图 7 所示。由图 7 可知,距袋口 0.25 m 内,随着喷吹距离的增大,峰值压力急剧增大,距袋口 0.25~2 m 内,随着喷吹距离的增大,各测点峰值压力逐渐减小,但是减小的幅度很小,喷吹距离每增加 50 mm,各测点峰值压力平均减小 0.11 kPa,距袋口 2 m 以外,各测点峰值压力基本不随喷吹距离的增大而变化。故喷吹距离只影响距袋口 2 m 内的清灰效果,而且影响较小,对 2 m 外的滤袋壁面基本没有影响。

### 2.3.4 喷吹孔直径对峰值压力的影响

模拟  $N = 2$ ,  $P = 0.35$  MPa,  $X = 200$  mm,  $L = 7$  m 保持不变,喷吹孔直径  $D$  分别为 12、14、16、18 和 20 mm 的不同工况下峰值压力变化,结果如图 8 所示。由图 8 可知,距袋口 4 m 内,随着喷吹孔直径的增大,各测点峰值压力逐渐增大,与喷吹孔直径为 12 mm 比较,当喷吹孔直径为 14、16、18 和 20 mm 时,各测点峰值压力分别平均增大 0.53、0.70、1.61 和 2.64 kPa,距袋口 4 m 以外,各测点峰值压力随喷吹孔直径的变化较小。这是由于喷吹孔直径的增大有利于提高喷吹气体流量,使得进入滤袋气体流量增大,速度也相应地增大,同时有更多的动能转化为静压,进而改善滤袋的清灰效果。但是,这种影响只限于距滤袋 4 m 以内的范围,在实际工程设计中,喷吹孔直径过大,意味着消耗的压缩空气量越大,运行成本越高。因此,选择喷吹孔直径时,应综合考虑运行成本和清灰效果。

### 2.3.5 滤袋长度对峰值压力的影响

模拟  $N = 2$ ,  $P = 0.35$  MPa,  $X = 200$  mm,  $D = 20$  mm 保持不变,滤袋长度  $L$  分别为 4、5、6、7 和 8 m 的不同工况下峰值压力变化,结果如图 9 所示。由图 9 可知,距袋口 2 m 内,各测点峰值压力基本不随滤袋长度的增加而变化,距袋口 2 m 外,各测点峰值压力

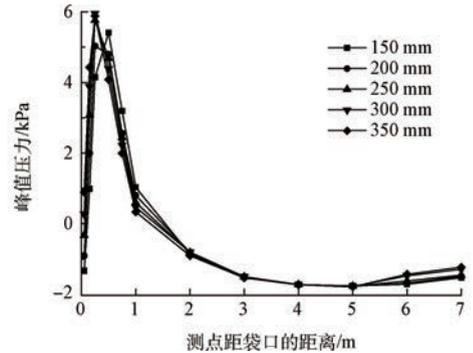


图 7 喷吹距离对峰值压力的影响

Fig. 7 Effect of pulse-jet distance on peak pressure

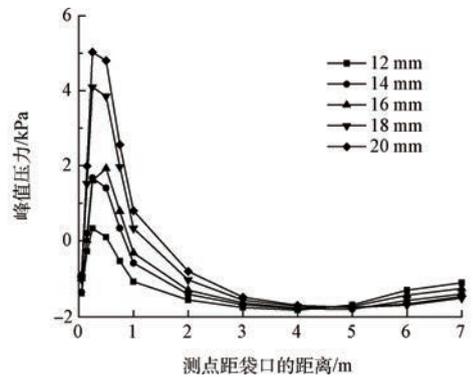


图 8 喷吹孔直径对峰值压力的影响

Fig. 8 Effect of apertures of spraying diameter on peak pressure

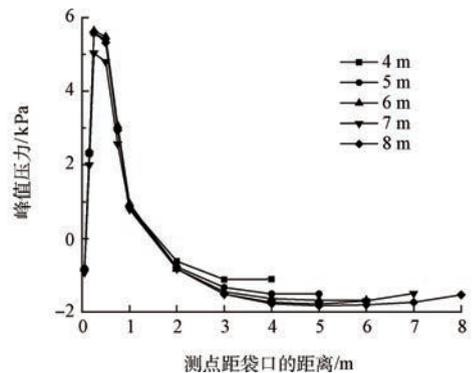


图 9 滤袋长度对峰值压力的影响

Fig. 9 Effect of filter bag length on peak pressure

随滤袋长度的增加而减小,说明滤袋长度只影响距袋口 2 m 以外壁面的清灰效果,而对距袋口 2 m 内的壁面的清灰基本无影响。当滤袋长度从 4 m 增加到 8 m,滤袋底部的峰值压力从  $-1.095$  kPa 降低至  $-1.524$  kPa,降低幅度较大,但是滤袋底部内外的压差仍然有  $0.5$  kPa 左右,当滤袋内外压差为  $0.5$  kPa,粉尘负荷在  $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  以上时,清灰效率在  $75\%$  以上<sup>[14]</sup>,清灰效果良好,而 ELLENBECKER 等<sup>[15]</sup>的研究表明滤袋底部的粉尘负荷高于滤袋中上部,一般在  $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  以上。因此,在工程实践中,选择长袋是可行的。

### 3 结论

1) 喷嘴内存在负压区域,最高可达  $-28.85$  kPa;在喷嘴侧壁开设  $20$  mm 的小孔,可有效增大喷吹气体流量,且以开设 2 个或者 3 个为佳。

2) 喷嘴侧壁开孔数量、喷吹压力、喷吹距离、喷吹孔直径和滤袋长度等因素中,喷吹压力和喷吹孔直径对清灰的影响较大,增大喷吹压力和喷吹孔直径均有利于改善清灰,喷嘴侧壁开孔数量对清灰的影响较小,喷吹压力和喷吹孔直径小,喷吹距离只对滤袋上部清灰效果有影响,且影响较小,而滤袋长度主要影响滤袋中下部的清灰效果。

### 参考文献

- [1] 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2003
- [2] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. GB28662—2012 钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012
- [3] 刘小鑫,陈旺生,梅丹,等. 烧结机尾除尘系统磨损研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 121-124
- [4] 宋孝红,陈旺生,汤静芳. 烧结机尾“电改袋”除尘器数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(1): 14-17
- [5] 马鑫. 袋式除尘器脉冲喷吹清灰机理研究[D]. 沈阳:东北大学, 2009
- [6] 颜翠平. 脉冲喷吹褶皱式滤筒的清灰效果及机理研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014
- [7] SIMON X, CHAZELET S, THOMAS D, et al. Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings [J]. Powder Technology, 2007, 172(2): 67-81
- [8] SUH J M, LIM Y I, ZHU J. Influence of pulsing-air injection distance on pressure drop in a coke dust bagfilter[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2010, 28(2): 613-619
- [9] LO L M, HU S C, CHEN D R, et al. Numerical study of pleated fabric cartridges during pulse-jet cleaning[J]. Powder Technology, 2010, 198(1): 75-81
- [10] 万凯迪,王智化,胡利华,等. 袋式除尘器脉冲喷吹清灰过程的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3970-3976
- [11] ZHOU R, SHEN H, ZHAO M. Simulation studies on protector of pulse-jet cleaning filter bag[J]. Energy Procedia, 2012, 16: 426-431
- [12] ANDERSEN B O, NIELSEN N F, WALTHER J H. Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters [J]. Powder Technology, 2016, 291: 284-298
- [13] 中国环保产业协会袋式除尘委员会. 袋式除尘器滤料及配件手册[M]. 沈阳:东北大学出版社, 1997
- [14] 杜柳柳,沈恒根,娄可宾. Research progress on the dust cleaning of bag filter[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(5): 25-29
- [15] ELLENBECKER M J, LEITH D. Dust deposit profiles in a high velocity pulse-jet fabric filter[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1979, 29(12): 1236-1241