

开口散射器对滤筒除尘脉冲清灰效果的影响

胥海伦*, 周苗苗, 张情, 刘东, 李岚溪

西南科技大学土木工程与建筑学院, 绵阳 621010

摘要 为了提高滤筒在脉冲喷吹清灰中侧壁压力均匀性, 实现滤筒上下部相同的清灰效果, 通过采用自行设计的上部开口锥形散射器和环向开口锥形散射器, 利用数值模拟方法对滤筒除尘器的脉冲喷吹清灰流场进行了预测分析。结果表明, 采用上部开口的散射器相比于未采用前的清灰方法, 能够使滤筒的上下部侧壁压力分布更均匀; 但是随着散射器上部开口的增大, 诱导气量增加, 滤筒侧壁压力分布反而趋向不均匀化; 在文中所研究的尺寸范围内, 散射器上部开口直径为 $\phi 22.5$ mm 时, 滤筒上下部的清灰效果较好。

关键词 散射器; 脉冲清灰; 侧壁压力; 清灰效果

中图分类号 X964 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)08-4647-06 DOI 10.12030/j.cjee.201611187

Influence of opening diffuser on pulse-jet dust-cleaning efficiency of cartridge filters

XU Hailun*, ZHOU Miaomiao, ZHANG Qing, LIU Dong, LI Lanxi

School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract Self-designed conical diffuser with hole or ring opening was used in pulse-jet dust cleaning system in order to uniformize the static peak pressure on side surface of filter cartridge during cleaning. It leads to good cleaning efficiency in top part of cartridge same as in bottom part. Analyses dust cleaning flow field with method of numerical simulation, it turns out that the surface dust cleaning uniformity along axis of filter cartridge in using conical diffuser with hole is better than without hole. As the hole increases bigger and induced air more, however, the static pressure tends to be nonuniform from top to bottom of filter cartridge. It is found that within the size range in this study, the cleaning uniformity is the best when the diameter of hole reached 22.5 mm.

Key words diffuser; pulse jet cleaning; wall pressure; dust-cleaning effect

近年来因工业发展所带来的环境污染问题日益突出。国家和地方对烟尘排放标准进行修订提高后, 对除尘设备的要求也更高。滤筒除尘器因具有结构紧凑、体积小、安装方便、同体积除尘器阻力不大以及除尘效率高达 99.6% 以上等优点, 被大量应用于水泥、钢铁、电力、食品、冶金和化工等工业领域^[1]。滤筒除尘器的清灰方式主要有机械振动清灰、高压气流反吹风清灰、脉冲喷吹清灰等方式, 其中脉冲喷吹清灰是应用最广泛的清灰方式。目前, 由于沿滤筒长度方向上脉冲清灰的不均匀, 造成滤筒上部清灰失效, 增大了滤筒清灰阻力; 下部清灰强度过大, 易损坏滤筒, 缩短滤筒的使用寿命, 所以脉冲清灰效果的好坏直接影响着除尘器的除尘效率、使用寿命和运行阻力。

国内外学者对除尘器脉冲清灰进行了诸多研究。脉冲喷吹压力、喷吹时间(脉冲宽度)、喷吹距离、滤袋直径、滤袋长度、滤袋数目、喷嘴直径和脉冲阀喷吹量、气流均布板、滤筒褶皱数、滤料孔隙等对清灰效果都有一定的影响^[2-9], 将侧壁压力峰值的大小作为脉冲喷吹清灰效果好坏的重要评价指标^[10-11]。为了改善滤筒清灰效果, 张亚蕊等^[12]通过对新型滤筒进行数值模拟, 得出增加椎体结构, 可以使滤筒侧壁压力均匀分布; 张情等^[13]采用诱导喷嘴可使气流更稳定地进入滤筒内部, 确保滤筒侧壁清灰压力的均匀性, 提高

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572269, 51306156); 西南科技大学研究生创新基金资助项目(17ycx097)

收稿日期: 2016-11-24; **录用日期:** 2016-12-23

第一作者: 胥海伦(1969—), 男, 副教授, 研究方向: 工业除尘和超细粉碎。E-mail: 553839370@qq.com

* 通信作者

滤筒除尘效率。

对于气流诱导结构在滤筒除尘脉冲清灰效果的相关研究中,开口散射器能够对脉冲气流进行很好的组织诱导,有效改善滤筒侧壁压力均匀性,实现滤筒上下部相同的清灰效果,在此基础上运用数值模拟方法对开口散射器下的脉冲喷吹滤筒除尘器清灰流场进行研究,分析了上部开口、环向开口两种锥形气流散射器形式下,气流流场分布、诱导气量和滤筒侧壁压力分布,进而揭示开口散射器对脉冲清灰效果的影响规律。

1 数值模拟

1.1 几何模型和网格划分

脉冲喷吹气流在滤筒内的流场非常复杂,为便于建立计算模型,对滤筒除尘器内外流场做了简化,几何模型($\phi 1\,000\text{ mm}\times 1\,500\text{ mm}$)如图 1 所示,包括喷嘴、散射器、引流区和滤筒内外。

滤筒尺寸:外径 325 mm,内径 215 mm,长度 $L=1\,000\text{ mm}$ 。喷嘴直径 $\phi 22\text{ mm}$,喷嘴进口距滤筒顶部距离 $S=200\text{ mm}$ 。

上部开口锥形散射器和环向开口锥形散射器如图 2 所示,散射器高度 $H=60\text{ mm}$,宽度 $D=90\text{ mm}$,开口深度为 h ,开口角度为 73.74° ,开口直径分别为 15、22.5 和 30 mm。

几何模型采用结构化和非结构化混合网格。因喷嘴、散射器和滤筒的流场分布状况是本研究分析的重点,为保证模型有较好的网格质量,提高计算的精度,对喷嘴、散射器和滤筒的网格进行局部加密,具体网格划分如图 3 所示。

1.2 数学模型

由于建立的模型其几何结构具有轴对称性,脉冲清灰过程采用二维轴对称不可压缩、稳态流动模型,将脉冲气体视为理想气体,不考虑温度和滤筒壁面对清灰流场的影响。流场采用压力速度耦合的 SIMPLE 算法、标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型,遵循质量、动量和能量守恒定律^[14]。控制方程为:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial_j} + \rho g_i + F_i \tag{2}$$

式中: p 为静压,Pa; ρ 为气体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; F_i 为包含了其他模型时的相关源项,如多孔介质和自定义源项; τ 为应力张量。

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \tag{3}$$

耗散率 ε 方程:

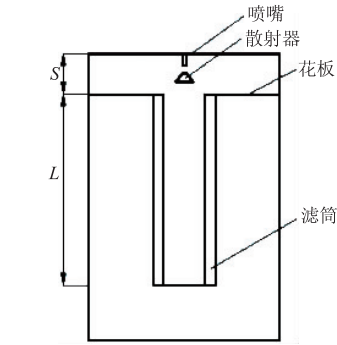


图 1 几何模型
Fig. 1 Geometric model

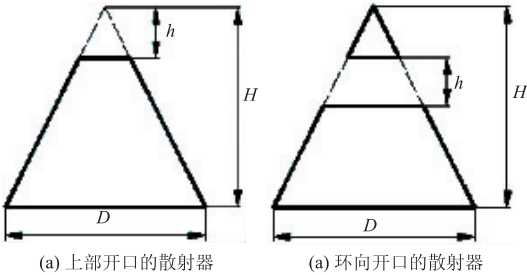


图 2 散射器结构图
Fig. 2 Structure of diffuser

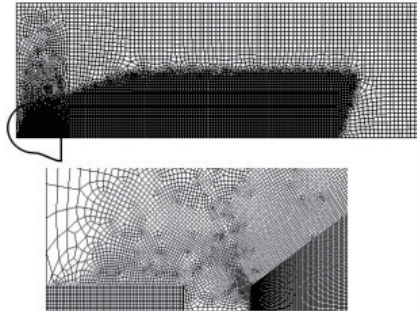


图 3 网格划分示意图
Fig. 3 Mesh diagram

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: S_k 和 S_ε 是用户自己定义的源项; G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$; σ_k 和 σ_ε 分别是与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.3 模型的边界条件和初始条件

对于脉冲喷吹气流的模拟, 喷嘴上部进口压力为 0.5 MPa。采用压力出口边界条件。箱体壁面、喷嘴边壁、散射器、花板与滤筒上下底边为固体壁面。中心采用轴对称边界条件, 模型内有流体通过的其他面均设置为内部边界。滤筒区域设置为多孔介质模型, 其中多孔介质压力降和阻力系数计算关系式^[15]如下:

$$\Delta p = -\frac{\mu \Delta n}{\alpha} u - \frac{1}{2} \rho \Delta n C_2 u^2 \quad (5)$$

内部阻力:

$$C_2 = \frac{2a_2}{\rho \Delta n} \quad (6)$$

粘性阻力:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{a_1}{\mu \Delta n} \quad (7)$$

式中: Δp 为压力, Pa; μ 为层流粘度, Pa · s; a 为渗透系数, ρ 为流体密度, kg · m⁻³; C_2 为惯性损失系数, u 为法向速度, m · s⁻¹; Δn 为介质厚度, m; a_1 、 a_2 为拟合系数。

2 计算结果与分析

在稳态数值模拟中, 喷吹压力和喷吹距离一定, 分析了滤筒内部流场分布、流场分布均匀性以及滤筒侧壁压力分布。

2.1 散射器不同开口形式下的流场分布

图 4 为气流散射器不同开口形式下的速度分布云图。无散射器时如图 4(a) 所示, 脉冲气流形成速度相对较大的射流, 垂直向下运动直接作用于滤筒底部, 长期使用易造成滤筒下部的破损。有气流散射器时如图 4(b) ~ (e) 所示, 由于散射器的分流作用, 部分气流经散射器开口垂直向下运动进入滤筒, 作用于滤筒下部。部分气流受到散射器的导流作用, 卷吸诱导引流区的气流沿着散射器壁面向下散射, 在脱离散射器壁面后气流发生偏转进入滤筒进行清灰。

散射器上部开口 $\phi 15$ mm 时, 沿着散射器壁面导流的气流部分碰撞到花板, 未进入滤筒。而散射器上部开口 $\phi 22.5$ mm 和 $\phi 30$ mm 时, 经散射器上部开口进入的气流和经散射器导流的气流均进入了滤筒。但是上部开口 $\phi 30$ mm 散射器, 经开口垂直向下运动进入滤筒的流量明显多于开口 $\phi 22.5$ mm 散射器, 使得流体进入滤筒上部垂直向下的速度大于开口 $\phi 22.5$ mm 散射器时垂直向下运动的速度, 使更多的流体作用于滤筒的底部。

散射器环向开口时, 由于散射器顶部的导流作用, 对引流区气流的诱导作用增强, 但垂直向下运动的气流明显减少, 气流都主要集中在滤筒上部, 对滤筒下部的清灰效果明显不足。图 4 也反映出在脉冲清灰中选择散射器开口形式的重要性, 下文针对散射器上部开口的形式做具体研究。

2.2 散射器不同开口形式下的流场分布均匀性

表 1 为不同散射器开口形式下的质量流量。由表 1 可知, 喷嘴出口的气体质量流量一定, 随着散射器上部开口增大, 进入散射器和滤筒的流体增多, 诱导气量增加。散射器上部开口直径 $\phi 15$ mm 时, 滤筒进口的气体质量流量少于无散射器状态的质量流量。这是由于散射器开口小, 进入散射器开口流量少, 气流在散射器内速度衰减快, 无法形成有效的负压, 卷吸全部经散射器导流的脉冲气流进入滤筒, 使得部分脉冲气流在滤筒外消耗了能量。散射器上部开口直径 $\phi 22.5$ mm 和 $\phi 30$ mm 时, 不但脉冲气流全部进入滤

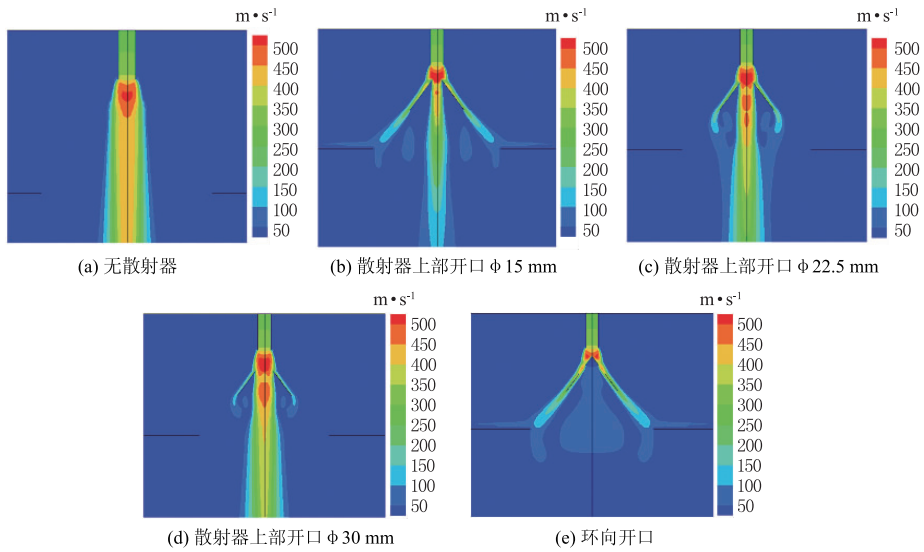


图 4 散射器不同开口形式下的流场速度云图
Fig.4 Velocity contour of flow field under different openings diffuser

筒,而且诱导了引流区的流体进入滤筒,诱导气量分别是无散射器时的 3.8 倍和 8.5 倍。

表 2 为不同散射器下流场各测点的压力,表 3 为不同散射器下流场各测点的速度。表 2~表 3 中测点 1 在散射器底部中心,测点 2 在滤筒顶部中心,测点 3~5 在滤筒侧壁距滤筒顶部 100、500 和 900 mm 处,测点 3'、4'和 5'在滤筒中心距滤筒顶部 100、500 和 900 mm 处,具体的测点位置见图 5。

由表 2 可知,对比上部开口直径为 22.5 mm 散射器、30 mm 散射器和无散射器 3 种情况,在点 1 处,有开口的散射器的流体流速大于无散射器流体速度,而在 2 点处,有开口的散射器的流体流速小于无散射器流体速度。这是由于点 1 处,进入散射器开口的流体,受到散射器壁面的限制,限制了外界流体对其的混合量,减少了气流速度的衰减,使得其速度高于无散射器的速度。而点 2 处,由于从散射器流出的速度高,没有了散射器壁面的限制,相对于无散射器的状态,会卷吸更多的流体,从而使其速度小于无散射器流体速度。

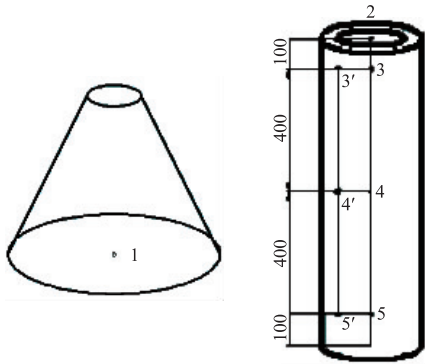


图 5 测点位置
Fig.5 Measure position

表 1 不同散射器下不同断面的气体质量流量
Table 1 Gas mass flow rates in different sections under different diffusers

开口形式	喷嘴出口 $Q_1/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	散射器进口 $Q_2/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	滤筒进口 $Q_3/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	诱导气量 $Q_4/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	Q_2/Q_3
无散射器	1.051 8	0	1.077 6	0.025 8	/
散射器上部开口 $\phi 15\text{ mm}$	1.051 8	0.226 4	0.986 0	-0.065 8	0.230
散射器上部开口 $\phi 22.5\text{ mm}$	1.051 8	0.585 6	1.151 7	0.099 9	0.508
散射器上部开口 $\phi 30\text{ mm}$	1.051 8	0.941 2	1.271 9	0.220 1	0.740

由表 2 和表 3 可知,随着脉冲气流沿滤筒向下运动,气流动压不断转化为静压,流速逐渐减小,静压逐渐增大。滤筒上部由于气流速度高,还会对滤筒内部的气流进行诱导,使得滤筒内部压力呈现负压状态。

表 2 不同散射器下流场各测点的速度

Table 2 Velocity of measuring points in flow field of different diffusers

测点	速度 $u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			
	散射器上部开口			无散射器
	$\phi 15\text{ mm}$	$\phi 22.5\text{ mm}$	$\phi 30\text{ mm}$	
1	428.0	451.4	483.6	445.7
2	281.1	392.0	407.3	437.7
3	157.9	336.3	375.8	425.5
4	50.7	132.4	156.3	179.6
5	8.8	25.1	29.6	38.4

但是随散射器上部开口的增大,散射器进口质量流量与滤筒进口质量流量之比 Q_2/Q_3 增加(见表 1),说明散射器开口越大,散射器进口质量流量在滤筒进口质量流量中占的比重越大,导致进入滤筒的速度也较大,从而沿滤筒长度方向上的速度梯度增大,均匀性减小。因此,为实现脉冲气流的均匀分布,需要对经散射器分流的气体量进行控制。

2.3 散射器不同开口形式下的滤筒侧壁压力分布

表 4 为不同散射器下不同测点处速度和压力的均值方差。由表 4 可知,随着散射器开口的增大,气流速度均值增大,速度方差也在增大。散射器上部开口直径为 30 mm 时,速度方差大于没有散射器时的速度方差,这说明随着散射器开口增大,气流分布的均匀性减弱,这将直接影响滤筒侧壁压力分布的均匀性。

表 4 不同散射器下不同测点处速度和压力的均值方差

Table 4 Mean variance of velocity and pressure at different measuring points under different diffusers

开口形式	速度均值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	速度方差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2$	压力均值/Pa	压力方差/ $(\text{Pa})^2$
无散射器	305.4	34 681.5	744.7	5 497 439.5
散射器上部开口直径为 15 mm	185.3	29 525.3	113.4	68 646.8
散射器上部开口直径为 22.5 mm	267.4	32 765.7	454.5	1 702 447.4
散射器上部开口直径为 30 mm	290.5	36 071.1	595.7	3 273 413.9

图 6 为散射器不同开口形式时滤筒侧壁压力随滤筒长度方向的变化。由图 6 和表 4 可知,无散射器时,滤筒上部的侧壁压力为 -1 115 Pa,滤筒下部侧壁压力为 3 958 Pa,压力均值为 744.7 Pa,上下部侧壁压力分布极不均匀,易造成滤筒上部清灰失效,增大了滤筒清灰阻力;下部清灰强度过大,易损坏滤筒,缩短滤筒的使用寿命。

散射器上部开口 $\phi 15\text{ mm}$ 时,滤筒上部的侧壁压力为 79 Pa,滤筒下部的侧壁压力仅为 465 Pa,压力均值为 113.4 Pa,侧壁压力虽分布均匀,但压力太小不能满足清灰压力需求^[10],说明此种结构能改善滤筒侧壁压力的均匀性,但由于开口太小,喷吹气流大都未进入滤筒。

散射器上部开口 $\phi 22.5\text{ mm}$ 时,滤筒上部的侧壁压力为 -1 085 Pa,滤筒下部的侧壁压力为 2 221 Pa,压力均值为 454.5 Pa。散射器上部开口 $\phi 30\text{ mm}$ 时,滤筒上部侧壁压力为 -891 Pa,下部的侧壁压力为 3 038 Pa,压力均值为 595.7 Pa。随散射器开口的增大,进入散射器内的流体流量和流速增大,既保证了流体向下发展作用于滤筒底部,同时又卷吸诱导了部分流

表 3 不同散射器下流场各测点的压力

Table 3 Pressure of measuring points in flow field of different diffusers

测点	压力 P/Pa			
	散射器上部开口			无散射器
	$\phi 15\text{ mm}$	$\phi 22.5\text{ mm}$	$\phi 30\text{ mm}$	
1	-330.2	-2 053.2	-17 342.5	-1 740.9
2	79.0	-2 294.9	-2 054.2	-1 115.5
3'	-60.0	-425.9	-642.3	-884.0
4'	-14.6	-164.2	-242.6	-313.9
5'	414.8	1 953.5	2 672.1	3 432.0

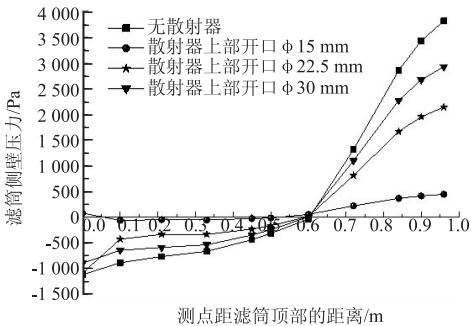


图 6 不同结构时随滤筒长度方向的侧壁压力分布
Fig.6 Distribution of lateral wall pressure along with length of filter tube in different structures

体,使滤筒侧壁压力分布达到均匀。散射器上部开口直径为 22.5 和 30 mm 时,压力能满足清灰压力需求,但由于开口增大时滤筒侧壁压力方差也在增大,滤筒侧壁压力分布趋向不均匀化。在达到清灰压力下应选取能使滤筒侧壁压力分布最均匀的散射器。

3 结论

1)在喷吹压力、喷吹距离一定时,相比于无散射器喷吹,有散射器的分流作用滤筒的侧壁压力分布更均匀。

2)开口散射器,降低了冲击气流的流量和流速,同时又卷吸诱导了部分流体,既降低了滤筒下部侧壁压力又增大了滤筒上部侧壁压力,从而使滤筒侧壁压力分布达到均匀。随着散射器开口增大,气流诱导量增大,但滤筒侧壁压力分布由均匀趋向不均匀化。

3)要实现滤筒上下部相同的清灰效果,可以通过改变散射器尺寸大小、角度和散射器距滤筒顶部的距离等进行进一步的研究。

参考文献

- [1] JB/T 10341-2014,滤筒除尘器[S]. 上海:机械工业出版社,2014
- [2] 蒋存刚,李纪锦,李勇,等. 影响脉冲袋式除尘器清灰效果的因素探讨[J]. 橡胶工业,2007,54(1):49-51
- [3] 姜洋,谭志洪,刘丽冰,等. 响应面法优化袋式除尘器脉冲清灰性能[J]. 环境工程学报,2014,8(7):2969-2974
- [4] 唐奇,李珊红,李彩亭,等. 滤袋数目对翼形上进风袋式除尘器内流场影响的数值模拟研究[J]. 环境工程学报,2014,8(8):3349-3354
- [5] 林龙沅,陈海焱,姜艳艳,等. 超音速喷嘴对脉冲喷吹滤筒除尘器清灰效果影响的研究[J]. 暖通空调,2010,40(9):122-126
- [6] 周奇杰,陈海焱,张明星,等. 脉冲阀喷吹量对滤筒除尘器清灰性能的影响[J]. 暖通空调,2011,41(6):100-105
- [7] 潘伶,杨燕珍. 袋式除尘器内部流场的数值模拟研究[J]. 环境工程学报,2012,6(8):2750-2754
- [8] 颜翠平,张明星,吕娟,等. 脉冲喷吹大风量滤筒除尘器的清灰变化过程研究[J]. 环境工程学报,2016,10(2):829-834
- [9] WOO S K,LEE K S,HAN I S,et al. Role of porosity in dust cleaning of silicon carbide ceramic filters[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan,2001,109(9):742-747
- [10] HUMPHRIES W,MADDEN J J. Fabric filtration for coal-fired boilers:Dust dislodgement in pulse jet filters. Filtration & Separation,1983,20(1):40-44
- [11] 杨迪,陈海焱,李怀玉,等. 脉冲喷吹滤筒除尘器清灰效果实验研究[J]. 暖通空调,2008,38(4):112-115
- [12] 张亚蕊,韩云龙,钱付平,等. 新型滤筒除尘器性能的数值模拟[J]. 过程工程学报,2016,16(1):48-54
- [13] 张情,陈海焱,巨敏,等. 诱导喷嘴改进滤筒脉冲清灰效果的实验研究[J]. 环境工程,2012,30(1):62-65
- [14] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004
- [15] 朱红钧. FLUENT 15.0 流场分析实战指南[M]. 北京:人民邮电出版社,2015