



第 18卷第7期 2024年7月 Vol. 18, No.7 Jul. 2024

(www) http://www.cjee.ac.cn

E-mail: cjee@rcees.ac.cn

es.ac.cn 💮 🐨 (010) 62941074

DOI 10.12030/j.cjee.202310076 中图分类号 X513 文献标识码 A

# 进气动能耗散对脉冲式布袋除尘器灰尘沉降及布袋寿命的影响

李鹏龙<sup>1</sup>,郑镭<sup>1,</sup>Ⅰ,韩炬<sup>1</sup>,范云明<sup>2</sup>,郑玮熙<sup>1</sup>,陆广军<sup>2</sup>

1. 华北理工大学机械工程学院, 唐山 063210; 2. 唐山盾石建筑工程有限责任公司, 唐山 064000

**摘 要**为了提高脉冲式布袋除尘器灰尘颗粒的沉降效率及布袋的使用寿命,基于动能耗散的设计思路对进气道结构 进行改进。利用数值模拟手段,研究改进前后进气动能耗散对布袋除尘器内部流场的影响,并采用 DPM 方法评价灰尘 颗粒在布袋除尘器中的运动状态及沉降效率。结果表明:改进后的布袋除尘器流场更加稳定,灰斗底部的最大气流速 度由原来的 19.2 m·s<sup>-1</sup> 降至 9.6 m·s<sup>-1</sup>,中箱体底部的最大气流速度由原来的 24.4 m·s<sup>-1</sup> 降至 9.3 m·s<sup>-1</sup>;改进前后设备阻 力无显著差异;通过对不同粒径的灰尘颗粒沉降率比较发现,改进后的布袋除尘器对于 100、150、200、250 和 300 µm 灰尘颗粒的沉降率分别提高了 11.4%、38.9%、59.6%、69.0% 和 71.6%。这表明耗散箱结构能够通过合理消耗进气动能 降低设备关键区域的气体动能,从而减少了二次扬尘的产生和含尘气体对布袋的冲刷。上述数值模拟结果可为脉冲式 布袋除尘器的流场设计提供理论依据。

关键词 脉冲式布袋除尘器;数值模拟;动能耗散;布袋寿命;沉降效率

脉冲式布袋除尘器具有广泛的适应性、节能环保以及操作维护方便等优点,可实现对细颗粒物的高效处 理,除尘效率高达 99% 以上<sup>[1-2]</sup>。其广泛应用于工业生产中的烟尘、粉尘、细颗粒物等的处理,特别适用于 冶金、化工、水泥、石油化工、电力等行业,可有效减少大气污染和对劳动者的健康威胁<sup>[3-4]</sup>。随着环境污染 和空气质量问题的日益突出,对工业废气的处理和排放标准要求越来越高。我国烟气污染物处理技术逐渐向 一体化脱除方向发展<sup>[5]</sup>。布袋除尘技术也在逐渐由单一的除尘向以布袋除尘器为反应主体的多种污染物协同 处理方向转变<sup>[6]</sup>,但其较贵的催化滤袋和相对不足的使用寿命阻碍了此类先进技术的推广应用。而布袋除尘 器流场特性对除尘效率和布袋的使用寿命有着重要影响<sup>[7]</sup>。

目前,国内外学者对布袋除尘器流场进行了广泛的研究。陆勇祥等<sup>[8]</sup>通过气固两相流数值模拟发现,环 形布袋布置方式和水平导流板的组合能很好地改善布袋除尘器内部流场均匀性,降低含尘气体对布袋底部的 冲击。高广德等<sup>[9]</sup>对脉冲式布袋除尘器内的流场进行了模拟分析,指出在布袋除尘器内增设导流板和分布板 能提升内部流场均匀性,从而增强含尘气体分离性能和减少布袋磨损。LIMA 和 HUEBNER<sup>[10]</sup>针对布袋过早 破损等问题,采用数值模拟对布袋除尘器进行分析,发现是由于内部流场分布不均所造成的。通过加大气流 进入灰斗的角度和面积,以及改变原有挡板的角度,有效的提高了流场均匀性。杨征<sup>[11]</sup>利用数值模拟对脉冲 式布袋除尘器内的流场进行优化,通过延长布袋长度、调整进风方式为上部进风和增设吸风罩裙边,提升了 除尘效率。ROCHA 等<sup>[12]</sup>通过 CFD 模拟研究了进气口数量对布袋除尘内部流场的影响,指出相较于传统单 进风口,三重进风口能使布袋除尘内部气流分布更均匀,降低气流流速,并减少布袋除尘的运行压力损失。 FU 和 ZHAO<sup>[13]</sup>通过实验与 CFD 模拟表明脉冲式布袋除尘器内流场分布不均匀是由射流引起的,并且射流 会造成布袋之间气流速度过大,容易造成布袋损坏,影响除尘器除尘效率。LI 等<sup>[14]</sup>研究了进风口位置和进 风面积对脉冲式折褶滤袋除尘器性能的影响,结果表明,除尘器的进风口靠近灰斗底部容易造成二次扬尘产 生,增加设备运行阻力。当进风口气流速度较大时,进风口面积越小,动压越大。LV 等<sup>[15]</sup>通过 CFD 模拟

收稿日期: 2023-10-15; 录用日期: 2024-01-11

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2019209153);唐山市应用基础研究资助项目(22130219G)

**第一作者:** 李鹏龙 (2000—),男,硕士研究生, lpllive@stu.ncst.edu.cn **⊠通信作者:** 郑镭 (1982—),男,博士,讲师, zhenglei1@163.com

发现布袋的长径比越小,内部流场越均匀,阻力越小,布袋的使用寿命越长。许馨月等<sup>[16]</sup>通过数值模拟研究 了滤袋长度对除尘器流场的影响,表明滤袋长度越短,气流分布越不均,越易产生涡旋,从而不利于粉尘的 沉降。

现阶段,对布袋除尘器流场的研究主要集中在气流均布、进气位置、布袋尺寸与位置等方面,而从动能 耗散角度进行结构设计的思路和从仿真角度进行沉降效率评价的方法相对较少。本研究综合考虑布袋除尘器 流场特性与除尘性能、设备阻力、布袋寿命之间的关系,分析进气动能对布袋除尘器布袋寿命、除尘效率等 性能的影响,从动能角度出发,进行布袋除尘器的进气结构设计与分析,探究动能耗散对布袋除尘器流场的 影响,并采用 DPM 的方法评价颗粒在布袋除尘器中的运动及沉降状态,以期获得布袋除尘器除尘性能提升 和布袋使用寿命的延长。从而为布袋除尘器流场的设计提供理论思路。

# 1 理论分析与数值模拟

# 1.1 进气动能与耗散分析

对于脉冲式布袋除尘器,在实际生产应用中,往往前期除尘效果可以达标,工作一段时间后除尘效果变差,这一般是由于布袋磨损或布袋纤维受到损伤所致。如图 1 所示,为进气动能对脉冲式布袋除尘器设备性能的影响。由于设备处理量确定,即出入口气体流量确定的情况下,较高的进气动能会体现为局部风速较高。首先,中箱体布袋区域较高的气体流速容易导致布袋受冲刷严重,造成布袋磨损加剧及布袋纤维受损,容易产生漏气现象和降低布袋过滤性能,从而影响除尘效率<sup>[17]</sup>;其次,灰斗区域较高的气体流速容易导致落灰困难、布袋积灰快以及二次扬尘的产生<sup>[18]</sup>。当布袋局部积灰明显时,使得设备阻力快速增加,导致布袋纤维容易受损,同时积灰较少的布袋气流速度升高,影响过滤性能,并导致无效喷吹次数的增加。当布袋整体积灰明显时,在根据压强设置喷吹频率的条件下,会导致设备喷吹次数增多,而喷吹次数越多布袋纤维受损越快<sup>[19]</sup>,从而除尘效率降低;在根据时间间隔设置喷吹频率的情况下,会导致设备阻力增大,而较大的布袋内外压差会导致除尘设备能耗的明显增加,并且损伤布袋纤维,降低了布袋寿命及除尘效率<sup>[20]</sup>。上述情况均对布袋除尘器设备性能指标有影响,并且直接关系到环保、维护和能耗的问题上。



图1 进气动能对脉冲式布袋除尘器设备性能的影响

Fig. 1 Impact of intake kinetic energy dissipation on the performance of pulse-jet bag filter

由于布袋阻力受过滤气体流速影响明显,气体通过布袋前后存在明显的动能差异,即虽然气体到达布袋 表面时具有高的气体动能,存在明显的气流分布不均匀特性,且存在大量无效流动,但气体通过布袋后无效 降困难和已沉降至灰斗底部的灰尘颗粒二次扬尘,也是由于不必要的气体动能消耗造成的。这些现象的外在表现是流场气流均布差,而内在原因是较高的进气动能在不合理的区域进行的动能耗散。在脉冲式布袋除尘器结构设计过程中,若能在合理区域实现进气动能的耗散,则可以从根本上改善气流不均匀造成的不良影响。

## 1.2 数学模型

在脉冲式布袋除尘器中动能耗散主要是湍流耗散和涡流耗散。在湍流中,由于湍流的不规则性和随机 性,湍流运动导致了湍流动能的粘性耗散,并在湍流结构的各个尺度上逐渐被转化为微观的摩擦热。而高动 能的流场在不同尺度上形成复杂的涡旋结构,这些涡旋由于流体粘性的存在,使得涡旋内部的速度差异逐渐 减小,最终动能以热的形式被耗散。

根据湍动能公式如式(1)所示。

$$k = \frac{3}{2}(vI)^2\tag{1}$$

式中: *k*为湍动能, m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>; *v*为平均速度, m·s<sup>-1</sup>; *I*为湍流强度。 根据湍流强度公式如式 (2) 所示。

$$I = 0.16Re^{-\frac{1}{8}}$$
(2)

式中: Re为雷诺数。

根据运动粘度公式如式(3)所示。

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{3}$$

式中: ν为运动粘度, m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>; μ为动力粘度, Pa·s; ρ为密度, kg·m<sup>-3</sup>。 其中雷诺数公式如式 (4) 所示<sup>[21]</sup>。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{k^2}{v\varepsilon} \tag{4}$$

式中: *L*为湍流尺度 (*L*越小, 湍流强度越大), m; *ε*为湍流耗散率。 将式 (1)、(2)、(3) 代入式 (4) 可得湍流耗散率公式, 如式 (5) 所示。

$$\varepsilon = \frac{9 \times 0.16^4 \sqrt{\mu v^5}}{4 \sqrt{\rho L^3}} \tag{5}$$

湍流耗散率是描述流体运动中动能转化的重要参数,它表示单位时间内单位体积流体的动能被转化为内能的速率。由此可得出单位时间内湍流动能耗散*E*<sub>1</sub>的关系式,如公式(6)所示。

$$E_1 = \iiint \varepsilon \mathrm{d}V = \iiint \frac{9 \times 0.16^4 \sqrt{\mu v^5}}{4 \sqrt{\rho L^3}} \mathrm{d}V$$
(6)

式中: E1为湍流动能耗散, J; V为体积, m<sup>3</sup>。

涡度是一个矢量,即速度场的旋度,如式(7)所示。

$$\Omega = \nabla \vec{v} \tag{7}$$

式中: Ω为涡度, s<sup>-1</sup>; v是速度矢量, m·s<sup>-1</sup>。 单位时间内涡流动能耗散*E*<sub>2</sub>的关系式<sup>[22]</sup>, 如式 (8) 所示。

$$E_2 = \iiint \mu |\Omega|^2 \mathrm{d}V = \oiint \mu |\nabla \vec{v}|^2 \mathrm{d}V \tag{8}$$

式中: *E*<sub>2</sub>为涡流动能耗散, J; μ为动力粘度, Pa·s; V为体积, m<sup>3</sup>。 由式 (6) 和式 (8) 可得出在单位时间内总的动能耗散*E*, 如式 (9) 所示。

$$E = E_1 + E_2 = \iiint \frac{9 \times 0.16^4 \sqrt{\mu v^5}}{4 \sqrt{\rho L^3}} \, \mathrm{d}V + \iiint \mu \left| \nabla \vec{v} \right|^2 \mathrm{d}V \tag{9}$$

通过公式 (9) 可知,在特定的流场环境下,流体的密度与动力粘度一定,动能耗散的多少与湍流速度、 涡流速度、耗散体积成正相关;而与湍流尺度成负相关,当湍流尺度越小时,湍流强度越大,动能耗散 越多。

因此对于脉冲式布袋除尘器合理的流场应具备以下特征:1)避免在灰斗和布袋区域内进行动能的大量的 耗散(产生原因气体动能过高);2)灰斗区域低流速,特别是灰斗底部附近;3)布袋区域流速低且分布均匀。

#### 1.3 物理模型

为了符合数学模型获得的流场特性需求,在设计脉冲式布袋除尘器时应尽可能避免湍流和涡流对重点区域的影响,而气体动能以湍流和涡流的形式在进气道区域耗散并不会对灰斗底部和布袋区域造成过多的影响,因此,本研究中设计了耗散箱的结构,力求在进气道区域最大化地实现气体动能耗散,相应地减少灰斗底部及布袋区域的气体动能,进而实现合理的动能耗散规划。

参照脉冲式布袋除尘器实物,利用 SolidWorks 对布袋除尘进行简化仿真模型的建立,所建模型如 图 2 所示。若按实际布袋数量进行多孔阶跃界面 的设置对仿真时间影响极大,为了提高运算效率, 在确保仿真结果准确的情况下对布袋进行简化处 理,将原始规格为 Φ130 mm×3 060 mm,数量为 1 280 条,简化为 Φ580 mm×3 060 mm,数量为 62 条,简化原则为花板开孔面积占比与真实模型 一致。其中,中箱体尺寸为 12 150 mm×2 970 mm× 3 060 mm;进气道和出气道是由尺寸为 12 150 mm× 830 mm×3 060mm 长方体用隔板从斜对角分隔而 成;灰斗高为 3 283 mm,排灰口长宽为 8 700 mm× 400 mm;上箱体尺寸为 12 150 mm×3 800 mm× 375 mm;进出气口截面为 830 mm×830 mm。为 后续分析方便选取如图 3 所示的截面与监测点。

本研究主要针对进气道进行改进,在进气道 前增加一个耗散箱结构,并在进气道内添加一定数 量大小的弧形导流板和"V"形挡板。如图 4 所示的 2 种不同的进气道模型,图 4(a)为原始进气道模 型,图 4(b)为改进后的进气道模型。

# 1.4 网格无关性验证

在确保网格质量最好的情况下,通过 Mesh 对 脉冲式布袋除尘器仿真模型进行分块分区域使用不 同的网格划分方法,采用结构化与非结构化的形式 对其进行网格划分,并且大多区域为六面体网格, 如图 5 所示。

(a) 原始进气道模型



图 2 脉冲式布袋除尘器几何模型





图 3 截面与监测点选取示意图





Fig. 4 Intake duct geometry model

第18卷

网格无关性验证是指在模型划分不同数量网格下,对数值模拟结果的准确性进行评估。即采用网格逐步加密方法对不同数量的网格模型进行模拟,比较所得结果的差异,确定最少网格模型下的收敛解。若在不同数量网格下得到的计算结果趋近于某一值,则认为该模型的结果具有网格无关性。对脉冲式布袋除尘器模型分别选取 592 150、693 284、764 604、903 491、1033 302 和1540 698 个网格进行模拟仿真。在布袋除尘器内选取 15 个监测点,如图 3 所示。并统计每个监测点的速度 值,结果如图 6(a) 所示。通过对不同数量网格模





型下的 15 个监测点速度求相对误差,并对这些监测点的速度相对误差求均值,得到速度相对误差平均值与 网格模型数量的关系,如图 6(b) 所示。当网格数量为 903 491 个时,速度相对误差平均值为 3.75%,结果的 准确性较高,说明此时已通过无关验证,因此选用 903 491 个网格对模型进行划分。





#### 1.5 边界条件的设置

多孔阶跃模型是多孔介质模型的一维简化模型,是将多孔介质视为由多种均匀分布且不同的材料组成的 分层结构,可用于模拟具有已知压降速度特性的薄膜介质,相对多孔介质模型来说更容易收敛。主要是把薄 膜介质的压力改变视为附加的内部损失项和 Darcy 定律的结合<sup>[23]</sup>,压降方程如式 (10) 所示。

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v + \frac{1}{2}C_2\rho v^2\right)\Delta m \tag{10}$$

式中:  $\Delta p$ 为压力损失, Pa;  $\mu$ 为流体动力粘性系数, Pa·s;  $\alpha$ 为渗透率, m<sup>2</sup>; v为垂直于过滤介质表面的速度 分量, m·s<sup>-1</sup>;  $C_2$ 为压力跃变系数;  $\rho$ 为流体密度, kg·m<sup>-3</sup>;  $\Delta m$ 为多孔介质厚度, m。

布袋为多孔介质,因此采用多孔阶跃模型来定义布袋边界条件。由于压力损失主要为粘性损失,可忽略 第二项内部阻力<sup>[24]</sup>。该结论与布袋阻力经验公式一致<sup>[25]</sup>,如式 (11) 所示。

$$\Delta P = k \frac{16\mu vL}{d^2 (2 - \ln Re)} \tag{11}$$

式中:  $\Delta P$ 为布袋阻力, Pa;  $\mu$ 为流体动力粘性系数, Pa·s; v为气体速度, m·s<sup>-1</sup>; *L*为滤料厚度, m; *d*为纤维直径, m; *Re*为雷诺数; *k*为压降系数。

因此通过设定渗透率 $\alpha$ 和多孔介质厚度 $\Delta m$ 参数来实现布袋边界条件设定。空气动力粘性系数为 1.79×10<sup>-5</sup> Pa·s,多孔介质厚度 0.002 m,渗透率为 2.148×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>。

1949

离散相 (DPM) 是一种用于模拟颗粒物运动的模型,它是基于拉格朗日方法,通过追踪大量离散颗粒的运动来模拟颗粒物在流场中的行为。颗粒运动方程为是根据牛顿第二定律在拉格朗日坐标下得出<sup>[26]</sup>,颗粒作用力平衡方程如式 (12)~式 (13) 所示。

$$m_{p}\frac{d\overline{u_{p}}}{dt} = \overrightarrow{F_{D}} + \overrightarrow{F_{p}} + \overrightarrow{F_{VM}} + \overrightarrow{F_{G}} + \overrightarrow{F_{M}} + \overrightarrow{F_{C}} + \overrightarrow{F_{O}} \quad (12)$$

$$I_P \frac{d\omega_P'}{dt} = \overrightarrow{T_{RD}} + \overrightarrow{T_C}$$
(13)

式中:  $\vec{u_p}$ 为颗粒流速, m·s<sup>-1</sup>;  $\vec{F_c}$ 为碰撞作用力, N;  $\vec{F_p}$ 为曳力, N;  $\vec{F_g}$ 为重力, N;  $\vec{F_p}$ 为马格努 斯升力, N;  $\vec{F_o}$ 为其它外力, N;  $\vec{F_p}$ 为压力梯度 力, N;  $\vec{F_{VM}}$ 为虚质量力, N;  $I_P$ 为颗粒转动惯 量, kg·m<sup>2</sup>;  $m_p$ 为颗粒质量, kg;  $\vec{T_c}$ 为颗粒碰撞产 生的力矩, N·m;  $\vec{T_{RD}}$ 颗粒旋转产生的力矩, N·m。

DPM 适用于颗粒相体积分数小于 10%,不考虑颗粒本身的体积,也不考虑颗粒之间的作用力, 但考虑流体与颗粒间的作用力<sup>[27]</sup>,颗粒主要受气流 曳力和重力的影响<sup>[28]</sup>。对于脉冲式布袋除尘器来说 含尘气体颗粒体积分数远小于 10%,因此可采用 DPM 进行模拟。

利用 Fluent 对脉冲式布袋除尘器进行模拟仿 真,将布袋除尘器内部视为常温常压下不可压缩气 体,按照最大处理风量为 70 000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>进行,其 模拟相关仿真参数设置如表 1 所示。

# 2 模拟结果与分析

### 2.1 流场特征

如图 7 和图 8 所示,分别为原始脉冲式布袋除尘器与改进后的脉冲式布袋除尘器的迹线图和速度矢量图。



表 1 相关仿真参数设置 Table 1 Related simulation parameters setting

参数类型	参数名称 参数设置与取值				
	求解器	基于压力			
	时间	瞬态			
	重力加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	9.8			
求解参数	粘性模型	标准k-epsilon模型			
	求解方法	SIMPLE算法			
	初始化	标准初始化			
	仿真时长/s	30			
入口边界	速度入口/(m·s <sup>-1</sup> )	28.23			
出口边界	压力出口	抑制回流			
	渗透率/m <sup>2</sup>	2.148×10 <sup>-12</sup>			
布袋边界	多孔介质厚度/m	0.002			
	离散相边界	捕获			
	颗粒类型	惰性			
DPM模型	注入类型	入口表面			
DIME	粒径大小/µm	25、50、75、100、150、 200、250、300			



对于原始布袋除尘器,人口气流以射流形式冲击到隔板上;之后继续以射流形式沿着隔板平行运动,冲 击到灰斗侧壁。此时大量高速气流在射流通道中运动,气体流速较大,动能消耗较低,含尘气体仍具有较高 的动能。高速气流在灰斗侧壁的阻碍下转向,一部分高速气流流向中箱体中的布袋区域,受到布袋的阻碍后 动能逐步消耗,此时布袋底部及中箱体侧壁均存在明显的高速气流,大量气体动能作用于布袋表面,导致布 袋的磨损及纤维的损伤,从而影响布袋的使用寿命;另一部分气体在灰斗侧壁的引导下向下流入灰斗中及灰 斗底部,在灰斗中形成了大的漩涡,并且气流速度较高,导致布袋区域灰尘沉降困难以及灰斗底部灰尘的二 次扬尘。

改进后的布袋除尘器很好地改善了上述问题,人口气流在耗散箱内被分成上下两股,并分别形成了顺时 针和逆时针涡旋。根据公式(9)可知,该高速涡旋可以提前通过涡流和湍流的耗散实现进气动能的消耗,使 得含尘气体进入进气道后的动能降低。耗散箱流出的含尘气体经弧形导流板和"V"形挡板引导后,在进气道 实现进一步均匀扩散,而分散气流与周围气体之间形成明显速度梯度,并产生大量低速涡流和湍流,进一步 实现了气体动能消耗。当气流到达灰斗中及灰斗底部时,气体动能明显降低,无效气体流动减少。虽然在灰 斗中形成了三个小的漩涡,但它们的速度相对较低,对灰尘颗粒的沉降和二次扬尘的产生影响较小。



如图 9 所示,为原始脉冲式布袋除尘器和改进后的脉冲式布袋除尘器全压云图。原始布袋除尘器全压较

高的区域主要集中在进气道、灰斗左侧和中箱体左侧,改进后的布袋除尘器全压较高的地方主要集中在耗散箱中,高全压区均为高气体流速区域。对于改进前后的布袋除尘器,当进气动能一定时,原始布袋除尘器入口全压为2342Pa,改进后的布袋除尘器入口全压为2390Pa,改进后的布袋除尘器比原始布袋除尘器全压高了48Pa,其差值仅为2%。

布袋除尘器出入口全压压差即为设备压力损失,如式 (14) 所示,该参数与布袋除尘器内含尘气体所获得 的气体动能有关。

$$E = PV \tag{14}$$

式中: E为气体动能, J; P为全压, Pa; V气体体积, m<sup>3</sup>。

气体通过布袋后,在上箱体和出气道的流场中,原始布袋除尘器和改进后的布袋除尘器没有本质差异。 根据公式(11)可知,对于改进前后的布袋除尘器, µ、L、d、Re、k参数一样,布袋阻力与气流速度v成正 相关,当气体流速在垂直布袋表面方向上具有较高分量时,布袋的阻力较大;反之,布袋的阻力较小。布袋 阻力大的区域的气流向布袋阻力小的区域流动,最终实现气流以相对均匀的气速穿过布袋,通过布袋后气体 速度均匀性明显提高。

由于改进前后布袋除尘器进口流量相同,且过滤界面特性相同,由式 (11) 可得出式 (15) 的关系式,改进前后气流通过布袋的速度与布袋的压力损失成正比。因为改进前后气流通过布袋时损失的 $\Delta p_1$ 、 $\Delta p_2$ 压力范围在-100~100 Pa之间,远小于通过布袋时的理论平均压力损失 p=1 000 Pa,所以  $\frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{p + \Delta p_2}$ 的值趋于很小。因此认为改进前后的布袋除尘器在气流通过布袋后的速度基本相同。并且上箱体和出气道的结构也相同,气流通过布袋后的流场也就基本一致,因此认为残余的气体动能是相同的。

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{p + \Delta p_1}{p + \Delta p_2} = 1 - \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{p + \Delta p_2}$$
(15)

式中: $v_1$ 、 $v_2$ 为改进前后气流通过布袋的速度,m·s<sup>-1</sup>;p为通过布袋时的理论平均压力损失,Pa; $\Delta p_1$ 、 $\Delta p_2$ 为改进前后气流通过布袋时的压力损失与理论压力损失差值,Pa。

对于改进前后的布袋除尘器,气体进口流量一致,说明进入布袋除尘器的含尘气体从引风机所获得的气体动能*E*<sub>z</sub>一致。为了更好地了解进气动能的消耗过程,将*E*<sub>z</sub>分为不同区域进气动能消耗和残余气体动能之和,即:进入进气道阶段消耗的动能*E*<sub>1</sub>、在灰斗和中箱体及布袋表面消耗的动能*E*<sub>2</sub>、通过布袋时消耗的动能 *E*<sub>3</sub>和残余气体的动能*E*<sub>4</sub>,为此可得进入布袋除尘器的动能*E*<sub>z</sub>的关系式,如式 (16) 所示。

$$E_z = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \tag{16}$$

改进前后的布袋除尘器 $E_z$ 、 $E_3$ 和 $E_4$ 一致,则 $E_1 + E_2$ 为定值,当 $E_1$ 消耗较少时,在灰斗和中箱体及布袋 表面的气体动能消耗 $E_2$ 大幅度增加,从而导致布袋使用寿的降低、落灰困难和二次扬尘的产生。而对于改进 后的布袋除尘器,由于耗散箱的存在, $E_1$ 的消耗更大,相应地 $E_2$ 动能消耗降低,使得上述问题得到改善。

# 2.2 关键区域速度场

如图 10 所示,为原始脉冲式布袋除尘器和改进后的脉冲式布袋除尘器在距灰斗底部上方相同位置所截 取的速度云图,所选取的位置如图 3 的截面 9 所示。可以看出原始布袋除尘器灰斗底部局部区域最高风速达 到了 19.2 m·s<sup>-1</sup>,这是由于大量高速气流沿着进气道隔板直接冲到了灰斗中所造成的;其余大部分区域在 9

m·s<sup>-1</sup>左右。而改进后的布袋除尘器灰斗底部最高 风速为 9.6 m·s<sup>-1</sup>,并且风速相对均匀。由此可 见,布袋除尘器增加耗散箱结构后,在灰斗底部气 体动能明显降低,更有利于灰尘颗粒的沉降和减少 二次扬尘的产生。

如图 11 所示,为原始脉冲式布袋除尘器和改进后的脉冲式布袋除尘器在靠近中箱体底部上方相同位置所截取的速度的云图,所选取的位置如图3的截面 8 所示。原始布袋除尘器中箱体上方



与左侧区域的布袋周围风速较高,最高风速达到 24.4 m·s<sup>-1</sup>,对布袋的冲刷尤为严重,使得此处的 布袋纤维容易损伤及破损加快,这也是除尘效率降 低的原因。改进后的布袋除尘器中箱体中布袋周围 的最高风速仅为 9.3 m·s<sup>-1</sup>,并且中箱体中的风速 分布相对均匀。由此可见,布袋除尘器增加耗散箱 结构后,在中箱体底部气体动能明显降低,大幅度 减轻对布袋的冲刷及损伤,从而提高了布袋的使用 寿命,延长维护保养周期。

分别在原始脉冲式布袋除尘器和改进后的脉冲式布袋除尘器主体纵向上从出口端向进口端依次等间距截取 7 个截面,所截取的截面 1 至截面 7 如图 3 所示。改进前后的脉冲式布袋除尘器各截面上的最大速度值如图 12 所示。

如图 13 所示, (a)~(g) 为原始布袋除尘器上截 取的速度云图。在灰斗左上角、右上角、右侧及灰 斗底部均有高速区存在。其中,灰斗左上角高速区 是由于流入的气体大部分从进气道末端流向灰斗 中,对截面 1 前的布袋区域造成严重影响,会导 致布袋提前破损,对截面 2 到截面 7 的局部区域 上的布袋也会造成一定影响;灰斗右上角高速区是 由于高速气流沿着灰斗右侧壁流动并向布袋区域扩 散,导致局部布袋寿命降低;灰斗底部高速区域会





Fig. 13 Velocity contour map of the longitudinal section of the original pulse-jet bag filter

造成落灰困难和二次扬尘的产生。同时截面 1 中,灰斗区域存在大面积高速区域,速度为 12.4~21.8 m·s<sup>-1</sup>,这也在灰斗中产生高速漩涡的原因。

如图 14 所示, (a)~(g) 为改进后的布袋除尘器上截取的速度云图。虽然在截面 5 和截面 7 存在气体流速 相对较高的区域,但都集中在灰斗左侧区域,并不会对布袋区域和落灰造成显著影响。灰斗底部区域的速度 低于 9.6 m·s<sup>-1</sup>,与原始布袋除尘器相比,气体流速明显降低,减少了进气动能在布袋区域与灰斗区域的消 耗,提高了布袋的使用寿命及灰尘的沉降效率并减少了二次扬尘的产生。



Fig. 14 Velocity contour map of the longitudinal section of the modified pulse-jet bag filter

# 2.3 不同粒径灰尘颗粒的分布

为了解不同进气道结构条件下的动能耗散对灰尘颗粒沉降效率的影响,采用 DPM 法进行颗粒运动分析,同时注入粒径为 25、50、75、100、150、200、250 和 300 μm 的颗粒来模拟实际含尘气体的运动情况,颗粒注入时间 0.1 s,仿真运算时间为 30 s。如表 2 所示为颗粒在不同区域分布占比。改进前后的布袋除 尘器在中箱体区域各种粒径颗粒数量占比均小于 2.5%,说明绝大部分颗粒完成了沉降或被布袋捕获,即 30 s 仿真运算时间为有效时长。

对于 75 μm 以下的颗粒,有耗散箱结构的布袋除尘器在灰斗里颗粒数量占比高于原始布袋除尘器,体现 出一定优势。由于颗粒在空气中主要受到曳力和重力等的影响,在粒径较小时,颗粒受重力影响较小,而受 空气运动影响显著,因而两者均仅有极少的颗粒沉降在灰斗里,这些颗粒只能通过被布袋捕获团聚成团后, 再经喷吹清灰落入灰斗中。对于 100 μm 以上的颗粒,原始布袋除尘器中布袋捕获占比明显高于改进后的布 袋除尘器,造成上述现象的主要原因是由于进气动能在灰斗中消耗,产生了湍流和涡流,不利于落灰并易造 成二次扬尘的产生,从而导致了布袋捕获颗粒数量的增加,在实际操作过程中,必须提高喷吹频率以保障操 作压力,而过多的喷吹次数会导致布袋纤维受损,降低布袋寿命;改进后的布袋除尘器中 100~300 μm 的颗 粒沉降效率远大于原始布袋除尘器,尤其是大颗粒沉降在灰斗里的占比达到了 90% 以上,仅有极少数被布袋 捕获,这说明进气动能在进气道前大量消耗,气体流入灰斗后无效流动减少,动能降低,提高了灰尘颗粒的

Table 2 Distribution ratio of particles in different zones within the bag filter dust collector before and after the modification										
颗粒粒径/µm	原始布袋除尘器				改进后的布袋除尘器					
	灰斗底部/%	灰斗中/%	布袋捕获/%	中箱体里/%	灰斗底部/%	灰斗中/%	布袋捕获/%	中箱体里/%		
25	0.01	0.2	99.7	0.06	0.02	0.4	99.5	0.1		
50	0.02	0.2	99.6	0.1	0.06	0.6	99.2	0.2		
75	0.4	1.4	97.8	0.5	0.3	3.0	96.2	0.5		
100	4.8	0.5	94.1	0.5	5.4	11.3	82.9	0.4		
150	9.4	0.9	89.7	0.03	13.1	36.1	48.6	2.3		
200	10.9	2.8	86.1	0.1	30.9	42.4	25.5	1.2		
250	13.8	6.4	79.8	0.05	40.3	48.9	10.5	0.2		
300	14.2	12.5	73.1	0.2	42.6	55.7	1.7	0.1		

表 2 改进前后布袋除尘器内颗粒在不同区域分布占比

沉降能力,同时也提高了被布袋捕获团聚后清灰下 来的灰尘颗粒沉降能力。由此可见合理地消耗进气 动能有利于灰尘颗粒的沉降和延长布袋的使用 寿命。

此外,为了更好地通过仿真结果表征改进前 后的布袋除尘器性能差异,对改进后的布袋除尘器 进气速度提高 30% 和原始布袋除尘器进气速度降 低 25% 与正常进气速度原始布袋除尘器和正常进 气速度改进后的布袋除尘器在布袋区域对不同颗粒 捕获数量占各总输入量的比值进行对比分析,结果 如图 15 所示。

对于 25~75 µm 的颗粒, 气速提高 30% 的改 进后布袋除尘器与正常进气速的原始布袋除尘器相 比,气速提高 30% 的改进后布袋除尘器的布袋对





小颗粒捕获占比要稍高于正常气速的原始布袋除尘器,这也是由于粒径较小时,颗粒受空气运动影响显著, 只能被布袋捕获团聚成团后,通过喷吹落下并沉降到灰斗里;对于 100~300 µm 的颗粒,正常进气速的原始 布袋除尘器的布袋对颗粒捕获占比远大于气速提高 30% 的改进后布袋除尘器。由此可见,改进后的布袋除尘 器即使提高进气速度,布袋对颗粒的捕获占比也少于正常进气速度的原始布袋除尘器,这说明耗散箱结构可 以提前消耗进气动能、并且对灰尘颗粒沉降是有利的。

正常气速的改进后布袋除尘器与气速降低 25% 的原始布袋除尘器相比,对于 25~75 µm 的颗粒,气速降 低 25% 的原始布袋除尘器的布袋对颗粒的捕获占比要略少, 而对于 100~300 µm 的颗粒, 正常气速的改进后 布袋除尘器的布袋对颗粒的捕获占比明显降低。虽然原始布袋除尘器降低进气速度减少了较小颗粒被布袋捕 获的占比,但对于较大颗粒来说,正常气速的改进后布袋除尘器被布袋捕获的颗粒占比要更少。改进后的布 袋除尘器不仅可以提高大颗粒沉降效率,也提高了清灰落下的团聚颗粒沉降效率,相比而言,改进后的布袋 除尘器具有更明显优势。

综上所述,相对于原始布袋除尘器,改进后的布袋除尘器即使在提高进气速度 30% 的情况下,在大粒 径灰尘颗粒上仍然具有明显的沉降优势;反之,原始布袋除尘器即使降低进气速度 25% 也不能达到同等水平 的颗粒沉降率。由于颗粒具有团聚特性,小颗粒被布袋捕获后可团聚为大颗粒,会获得更好的沉降能力,与 降低原始布袋除尘器进气速度相比,改进后的布袋除尘器对颗粒的沉降效果会更好,能减少二次扬尘的产 牛,也提高了清灰下来的团聚颗粒沉降效率,减少了布袋喷吹清灰频率,从而减少因喷吹次数过多造成的布 袋损坏。

1) 脉冲式布袋除尘器除尘效果变差的主要原因是布袋受损所致,造成布袋使用寿命降低的主要原因是布袋区域与灰斗区域流速过高,过高的气流速度会引起湍流和涡流的产生,造成了动能在中箱体和灰斗中的消耗,均为不必要的气体动能消耗,从而导致了二次扬尘的产生和加快布袋的破损。

2) 通过数学模型分析得出,动能耗散量的多少与湍流速度、涡流速度、耗散体积成正相关;而与湍流尺 度成负相关,当湍流尺度越小时,湍流强度越大,动能耗散越多。在进气道前添加一个耗散箱可以提前消耗 进气动能,使得流入进气道的气体动能降低,减少了气体动能在灰斗和中箱体中的消耗,从而减少了二次扬 尘的产生和提高了布袋使用寿命。

3) 改进后的脉冲式布袋除尘器, 灰斗底部最大气流速度由原来 19.2 m·s<sup>-1</sup> 降至 9.6 m·s<sup>-1</sup>, 减少了二次扬 尘的产生;中箱体底部最高气流速度由原来 24.4 m·s<sup>-1</sup> 降至 9.3 m·s<sup>-1</sup>, 减少了气流对布袋的冲刷,提高了布 袋的使用寿命;全压相比原始布袋除尘器无明显上升;对于 25、50 和 75 μm 灰尘颗粒的沉降比例提高不太 明显,但对于 100、150、200、250 和 300 μm 的灰尘颗粒沉降至灰斗里分别提高了 11.4%、38.9%、 59.6%、69.0% 和 71.6%。总体而言,提高了灰尘颗粒沉降效率,也提高了喷吹清灰下来的团聚颗粒的沉降 效率,可有效减少布袋喷吹清灰频率,从而也减少了因喷吹次数过多造成的布袋损坏。

#### 参考文献

- CASTRO B J C D, SARTIM R, GUERRA V G, et al. Hybrid air filters: A review of the main equipment configurations and results[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 144: 193-207.
- [2] XIA S, DUAN L, WANG J, et al. Effect of the surface treatment process of filter bags on the performance of hybrid electrostatic precipitators and bag filters[J]. Atmosphere, 2022, 13(8): 1294.
- [3] WU X, YANG Y, GONG Y, et al. Advances in air pollution control for key industries in China during the 13th five-year plan[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 123: 446-459.
- [4] LIU M, WANG N, SHAN Y, et al. Design of bag filter for micro pulverizer [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1570(1): 012035.
- [5] 侯海瑞.催化滤袋在垃圾焚烧烟气多污染物去除中的应用[J].化工装备技术, 2022, 43(5): 11-14.
- [6] 张子丰. 布袋除尘及脱硫技术应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [7] 张珈旗, 董忠红. 基于流场特性数值模拟的袋式除尘器关键结构设计研究综述[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2530-2540.
- [8] 陆勇祥,蔡杰,王运军,等.基于两相流的布袋除尘器结构优化[J].南京师范大学学报(工程技术版), 2017, 17(1): 42-47.
- [9] 高广德, 何璐璐, 张泽虎. 脉冲袋式除尘器内流场均匀性研究[J]. 煤矿机械, 2009, 30(12): 40-42.
- [10] LIMA W F, HUEBNER R. Optimization of air distribution in a baghouse filter using computational fluid dynamics [J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2019, 9(4): 4452-4456.
- [11] 杨征. 首秦炼铁厂布袋除尘系统优化改造研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [12] ROCHA S M S, MARQUES F B, PEREIRA F R, et al. Applications of CFD techniques in the design of fabric filters[J]. Chemical Engineering Transactions, 2014, 39: 1369-1374.
- [13] FU H M, ZHAO Y J. Experimental study on flow field characteristic of bag filter [J]. Advanced Materials Research, 2012, 508: 254-258.
- [14] LI S, WANG L, WEN G, et al. Influence of air inlet and cleaning chamber on the performance of mining cartridge filter[J]. Advanced Powder Technology, 2022, 33(11): 103796.
- [15] LV Y, YANG J, WANG J. CFD simulation of a bag filter for a 200MW power plant [J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2020, 16(6): 1191-1202.
- [16] 许馨月,林秀丽,柳静献.数值模拟滤袋长度对除尘器流场及粉尘沉降的影响[J].环境工程学报,2022,16(9):2939-2948.
- [17] 鲁果, 屈荷叶, 吴伟, 等. 超低排放布袋除尘器的研究应用[J]. 中国环保产业, 2021(3): 48-50.
- [18] 李枭鸣. 高温除尘脱硝一体化技术的开发及应用研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(12): 101-105.
- [19] 孙海宁. 烧结烟气半干法脱硫运行优化[J]. 天津冶金, 2016(4): 71-73.
- [20] 刘会来. 布袋除尘器布袋压差高及破损分析与处理措施[J]. 设备管理与维修, 2022(20): 65-67.
- [21] 罗惕乾. 流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 205-221.
- [22] LIU C, WANG L, WANG J, et al. Investigation of energy loss mechanisms in cyclone separators [J]. Chemical Engineering & Technology, 2005, 28(10): 1182-1190.
- [23] 张智雄, 李彩亭, 李珊红, 等. 侧进气卧式滤筒除尘器结构改进的数值模拟[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3581-3588.
- [24] 刘栋栋, 叶兴联, 李立锋, 等. 电袋复合除尘器气流分布的数值模拟和优化[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2897-2902.
- [25] 柳静献, 侯明真, 常德强. 膜破损对袋除尘覆膜滤料过滤性能的影响[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 405-413.
- [26] 张彧铭, 王晓静. 基于 CFD-DPM 模型研究絮状颗粒团在倒料管道内的流动特性[J]. 化工机械, 2023, 50(1): 59-66.
- [27] 范军领, 何昊, 张攀, 等. 局部磨损对 a 型旋风分离器内流场及分离性能的影响[J]. 化工进展, 2022, 41(8): 4025-4034.
- [28] 于永杰. 基于气固两相流的立磨整机流场及分级筛选性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

(责任编辑:金曙光)

1957

# Effect of intake kinetic energy dissipation on dust sedimentation and bag life of pulse-jet bag filter

LI Penglong<sup>1</sup>, ZHENG Lei<sup>1,\*</sup>, HAN Ju<sup>1</sup>, FAN Yunming<sup>2</sup>, ZHENG Weixi<sup>1</sup>, LU Guangjun<sup>2</sup>

College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;
 Tangshan Dunshi Construction Engineering Co., Ltd., Tangshan 064000, China

\*Corresponding author, E-mail: zhenglei1@163.com

**Abstract** In order to improve the settling efficiency of dust particles and the service life of the bags in pulse-jet bag filter, the intake duct structure was optimized based on the concept of kinetic energy dissipation. The impact of intake kinetic energy dissipation on the internal flow field of the pulse-jet bag filter was studied by using numerical simulation methods. The Discrete Phase Model was employed to evaluate the motion states and settling efficiency of dust particles in the bag filter. The results indicated that the flow field of the modified pulse-jet bag filter was more stable. The maximum airflow velocity at the bottom of the hopper decreased from the original 19.2 m·s<sup>-1</sup> to 9.6 m·s<sup>-1</sup>, and the maximum airflow velocity at the bottom of the middle casing decreased from the original 24.4 m·s<sup>-1</sup> to 9.3 m·s<sup>-1</sup>. There was no significant difference in equipment resistance before and after the modification. Comparisons of the settling rates of dust particles with diameters of 100, 150, 200, 250 and 300 µm increased by 11.4%, 38.9%, 59.6%, 69.0% and 71.6%, respectively, after the modification. The results indicated that the dissipation box structure, by reasonably consuming the kinetic energy of the intake air, reduced the gas kinetic energy in critical areas of the device. Thereby, it can inhibit the dust which is blown up repeatedly and weaken the impact of dusty gases on the bags. The numerical simulation results can provide theoretical basis for the flow field design of pulse-jet bag filter.

**Keywords** pulse-jet bag filter; numerical simulation; kinetic energy dissipation; bag life; settling efficiency