



李彦筑,王杰,谢双.呼吸性粉尘虚拟冲击分离器数值模拟及实验验证[J].矿业安全与环保,2022,49(3):20-25.  
LI Yanzhu,WANG Jie,XIE Shuang. Numerical simulation and experimental verification of respirable dust virtual impact separator[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2022,49(3):20-25.  
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2022.03.004

扫码阅读下载

# 呼吸性粉尘虚拟冲击分离器数值模拟及实验验证

李彦筑<sup>1</sup>,王杰<sup>1</sup>,谢双<sup>2</sup>

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037; 2. 重庆科技学院 安全工程学院,重庆 401331)

**摘要:**针对呼吸性粉尘连续分离问题,对陶析式、惯性冲击式、旋风式分离方法进行了分析,利用流体动力学软件 Fluent 对虚拟冲击器内部流场进行数值模拟,建立了满足 BMRC 曲线分离标准的虚拟冲击器模型,并结合数值模拟结果对分离器结构尺寸进行修正优化。按照模型加工了分离器样件并进行了气溶胶实验验证,结果表明样件的分离效能与 BMRC 曲线标准差均小于 5%,满足行业标准要求。

**关键词:**呼吸性粉尘;虚拟冲击器;分离效能;BMRC 曲线;数值模拟;气溶胶实验

中图分类号:TD714

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2022)03-0020-06

## Numerical simulation and experimental verification of respirable dust virtual impact separator

LI Yanzhu<sup>1</sup>,WANG Jie<sup>1</sup>,XIE Shuang<sup>2</sup>

(1. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China;

2. College of Safety Engineering, Chongqing Institute of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:**In view of the continuous separation problem of respirable dust, the separation methods of ceramic, inertial impact and whirlwind were analyzed. The fluid dynamics software Fluent was used to conduct numerical simulation of the flow field inside the virtual impactor, the virtual impactor model meeting the BMRC curve separation standard was established, and the structure size of the separator was modified and optimized combined with the numerical simulation results. According to the model, the separator sample was processed and verified by aerosol experiment. The results show that the separation efficiency standard deviation between the sample and the BMRC curve is less than 5%, meeting the requirements of the industry standard.

**Keywords:**respirable dust;virtual impactor; separation efficiency; BMRC curve; numerical simulation; aerosol experiment

尘肺病是目前我国严重的职业病之一。根据国家卫生健康委员会统计,2020 年,全国共报告各类职业病新增病例共 17 064 例,其中职业性尘肺病占 14 367 例<sup>[1]</sup>,占比超过 80%。呼吸性粉尘是引发尘肺病的主要因素<sup>[2]</sup>。为降低尘肺病的发病率,减少呼吸性粉尘的危害,需要有效降低作业场所的粉尘浓度,加强对呼吸性粉尘质量浓度的连续准确监测。如何有效地把呼吸性粉尘按照规定的分离标准从总粉尘中分离出来,是实现呼吸性粉尘精确监测的关键<sup>[3]</sup>。笔者拟通过对呼吸性粉尘分离标准和分离技术的研究分析,设计出可以满足 BMRC 分离标准且

能实现呼吸性粉尘连续分离的分离器,并进行相关的实验测试与分析。

## 1 颗粒物的分离标准及技术

### 1.1 分离标准

呼吸性粉尘是指按照相关标准测定方法所采集的、可进入肺泡的粉尘粒子,其空气动力学直径均在 7.07  $\mu\text{m}$  以下,且当空气动力学直径为 5  $\mu\text{m}$  时采样效率为 50%<sup>[4]</sup>。目前,国际上针对呼吸性粉尘的分离标准常用的有 3 种:1952 年由英国医学研究委员会提出,1959 年在南非约翰内斯堡召开的国际尘肺会议上被广泛接受的 BMRC 标准曲线;1968 年美国工业卫生专家协会颁布的 ACGIH 标准曲线;20 世纪 90 年代欧盟新提出并沿用至今的 EN481 标准曲线<sup>[5-6]</sup>。分离标准定义了分离器在各粒径点的分离效能(分离效能指的是粒径与分离比例的关系

收稿日期:2022-04-01;2022-05-23 修订

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0805200)

作者简介:李彦筑(1995—),女,四川南充人,硕士研究生,研究方向为粉尘防治技术。E-mail:lyz147725@163.com。

系<sup>[7]</sup>)。各分离标准对应的分离效能曲线如图 1 所示。

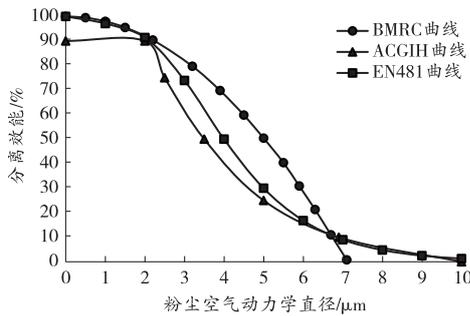


图 1 不同分离效能曲线对比

我国煤炭行业自 1995 年引进 BMRC 曲线以后一直沿用至今。在 MT 394—1995《呼吸性粉尘测量仪采样效能测定方法》中规定我国呼吸性粉尘监测仪的采样效能以 BMRC 曲线为标准,且在每个粒径点的分离效能误差不大于 5%。

### 1.2 分离技术

目前,国内外主要用于呼吸性粉尘分离的技术有 3 种:陶析式、冲击式、旋风式<sup>[8]</sup>。

1) 陶析式分离器主要依靠重力的沉降作用,选用水平板作为分离器。当含尘气流通过分离器时,大颗粒粉尘受重力作用沉降到水平板上,而较小的颗粒(如呼吸性粉尘)沉降速度很慢,会随气流通过狭缝,实现分离。

2) 惯性冲击式分离器由喷射孔和冲击板组成。含尘气流在喷射孔处被加速,大颗粒粉尘因惯性较大而逃脱气流,直接撞向冲击板并被涂有黏性物质的冲击板捕获<sup>[9]</sup>;粒径小的粉尘则由气流带动绕过冲击板,通过分离器,实现分离。

3) 旋风分离器由进气口、直筒、锥形筒、排气口和集灰斗组成。含尘气流从入口进入旋风筒后,受内壁约束做圆周运动。大颗粒粉尘受到的离心力较大,与内壁碰撞损失较多动能,然后沿内壁下落至集灰斗;小粒径粉尘则随气流继续流动,在旋流作用下排出排气口,达到分离目的<sup>[10]</sup>。

通过分析,在实现呼吸性粉尘的连续分离方面,以上 3 种技术都存在着局限性:陶析式分离器由于水平板很短且板间距很小,短时间内水平板会被大颗粒粉尘填满,长时间使用还会产生二次扬尘,使待检的含呼吸性粉尘的气流被污染;惯性冲击式分离器冲击板上的黏性物质需定期更换涂抹和清理,否则在高浓度的环境里或持续使用的情况下,板面会被粉尘填满;旋风式分离器与另外两种分离器相比,可使用时间较长,但在实现连续分离方面仍有困难,其集灰口仍需清洁维护,且对各结构尺寸配合要求较高,各因素对分离效能的影响尚在研究中<sup>[11-12]</sup>。

为解决粉尘连续分离的问题,在分析传统惯性

冲击分离技术原理的基础上,提出了没有冲击板的“虚拟冲击分离”概念<sup>[13]</sup>。从 20 世纪 60 年代起,国外就已经开始对虚拟冲击器展开了系统的理论研究,并逐渐将虚拟冲击器投入实际应用中<sup>[14]</sup>。而国内在虚拟冲击器方面取得的研究成果较少,目前多应用于固定污染源监测和气溶胶分离等方面<sup>[15-16]</sup>。因此,开展可实现连续分离呼吸性粉尘的虚拟冲击器研究具有重要的理论和应用意义。

## 2 基于虚拟冲击分离的模型建立与仿真

### 2.1 虚拟冲击原理

虚拟冲击的原理与传统的惯性冲击相似,都是利用颗粒物粒径不同而产生的惯性不同来进行分级的。虚拟冲击分离技术主要是用收集腔代替了传统的冲击板,含尘气流在通过喷嘴之后会进入腔体而不是直接冲向固体板,所要采集的粒子还保留在采样气体中。相比传统冲击式,其优势在于解决了粒子破碎、反弹等问题<sup>[17-18]</sup>。

虚拟冲击分离技术所对应的分离器被称为虚拟冲击器,其组成部分有喷气孔、收集腔、“主流”及“弱流”通道。喷气孔的直径  $D_1$  很小,含尘气流在通过时被加速。喷出的气流一分为二:一部分气体(约占总气体的 90%)发生 90° 的变向,进入下一级,这部分气流被称为“主流”;剩下的一部分则直接冲进收集腔,这部分气流被称为“弱流”<sup>[19]</sup>。小粒径粒子的惯性较小,随着气流向“主流”流动;大粒径粒子则会由于惯性随着较弱的气流进入收集腔,排向外界。虚拟冲击器分离原理如图 2 所示。

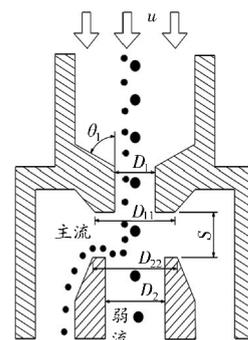


图 2 虚拟冲击器分离原理图

### 2.2 虚拟冲击器的设计及仿真

1) 虚拟冲击器结构。虚拟冲击器的主要结构参数分别有喷气孔角度  $\theta_1$ 、喷气孔直径  $D_1$ 、喷气孔与收口之间的距离  $S$ 、收集腔直径  $D_2$ ,以及喷气孔与收集腔的同轴度  $\delta$ 。由文献研究可知,当喷气孔角度  $\theta_1$  为 45°、收集腔直径  $D_2$  约为  $D_1$  的 1.3~1.4 倍时粒子损失量最少;收集腔与喷气孔的距离  $S$  约为  $D_1$  的 1.2~1.8 倍,以及要求同轴度  $\delta$  需不大于 0.05 mm。

采样流量依照 MT 394—1995 标准确定;结合 Stokes 公式和切割粒径计算得到结构尺寸。在此基础上,建立虚拟冲击器的三维模型,并将其划为 5 个部分:入口段、加速段、分流域、主流及弱流出口。虚拟冲击器各区域划分情况如图 3 所示。

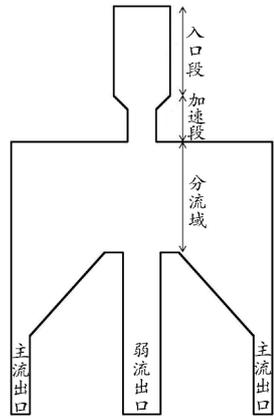


图 3 虚拟冲击器区域划分

2) 网格划分及计算方法。建立虚拟冲击器三维模型,然后使用 ICEM 对模型进行网格划分前处理;再采用 CFD 软件 Fluent 对虚拟冲击器内部的气固两相流进行数值求解。求解器选择 SIMPLE 方式,对流相采用 QUICK 格式,扩散项则采用 Least-Squares Cell Based(基于单元体的最小二乘法插值)。

3) 网格无关性验证。从理论上讲,网格布置越密,得到的计算结果也越精确,但同时计算量也越大,计算机造成的舍入误差也会增大。因此,需要选择合适的网格数以提高仿真的精确度<sup>[20]</sup>。选用喷气孔气流速度来验证不同网格数对计算结果精度的影响,验证结果如表 1 所示。

表 1 网格无关性验证

网格数量	182 636	394 457	529 965	589 118	781 208
喷气孔气流速度/(m·s <sup>-1</sup> )	9.232	9.864	10.286	10.437	10.515

由表 1 可知,当网格数达到 50 万以后,喷气孔气流速度变化较小。为节省计算时间,最后设定网格数为 589 118。网格划分情况如图 4 所示。

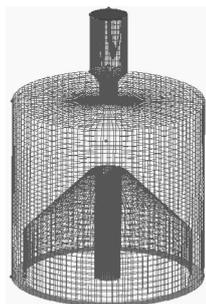


图 4 网格划分情况

4) 边界条件。虚拟冲击器入口采用速度入口(velocity inlet),主流出口与弱流出口均采用自由出口(out flow),其中主流出口流量权重为 0.9,对离散相设置为捕捉(trap);弱流出口流量权重为 0.1,对离散相设置为逃逸(escape)。壁面设为 wall,设置为无滑移边界条件,与离散相的作用设为反弹(reflect)。

### 2.3 模拟结果与分析

通过数值模拟可以求解虚拟冲击器的内部流场参数,得到虚拟冲击器内部速度、压力参数(动压和静压)的分布特性,截面选取位置如图 5 所示。

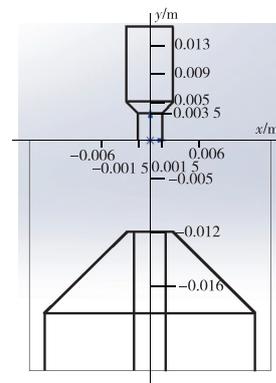
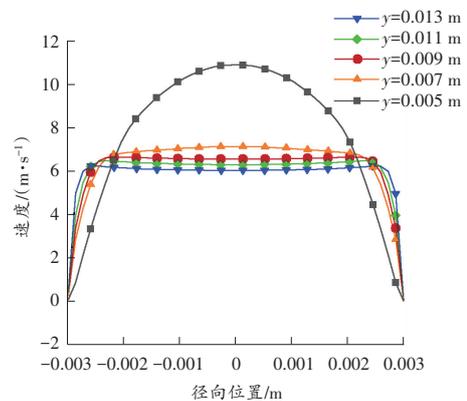
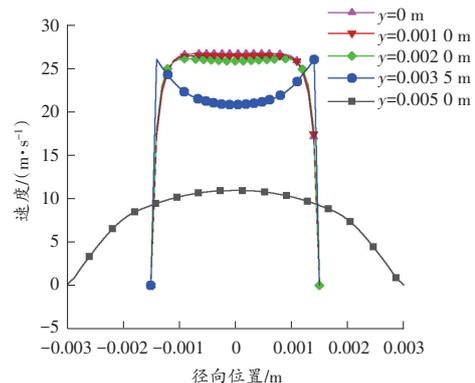


图 5 数值模拟横截面选取位置

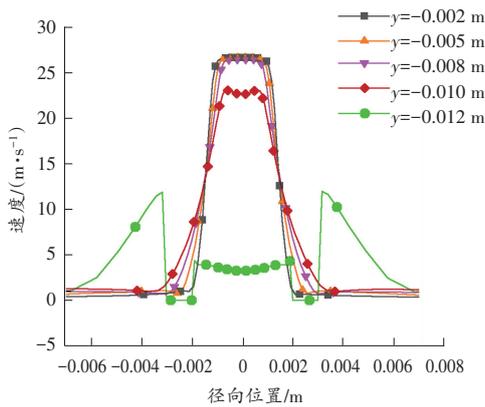
虚拟冲击器各部分速度场分布情况如图 6 所示。



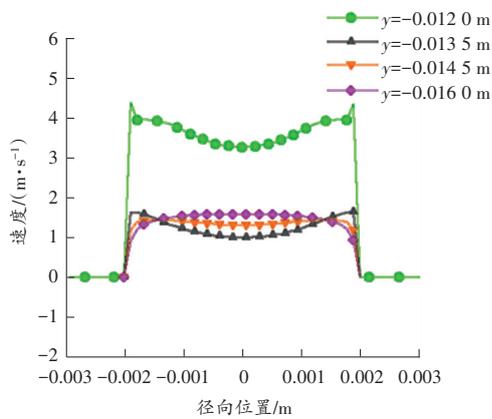
(a) 入口段



(b) 加速段



(c) 分流域



(d) 弱流出口

图6 虚拟冲击器入口段、加速段、分流域、弱流出口不同横截面径向速度分布

由图6可以看出:入口段中,速度沿轴向从上往下逐渐增大,而在同一横截面上,径向速度几乎保持不变;加速段中,锥形段的速度沿轴向增量较大,而相比之下圆柱段的增量变小;分流域中,速度沿轴向逐渐变小,同一横截面的径向速度向四周减小,但其中在靠近收集腔的截面上,速度则是从轴心沿径向逐渐升高至局部最大值,然后骤降至很小,再陡升到一个最大值,最后开始缓慢减小至平缓;弱流出口中,速度沿轴向逐渐减小,直至趋向扁平化,而径向速度则沿径向逐渐减小。

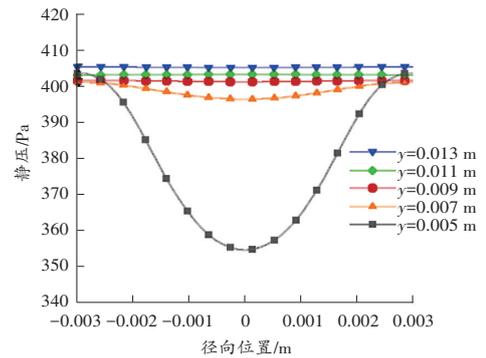
动压的表达式如下:

$$\Delta p = \rho v^2 / 2 \quad (1)$$

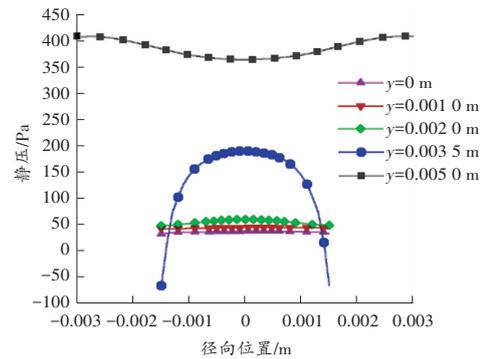
式中: $\Delta p$  为动压, Pa;  $\rho$  为气流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v$  为气流速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

式(1)中,由于冲击器内的气流速度远不及音速,故  $\rho$  近似不变,所以动压与速度呈正相关关系。因此,动压在各横截面上的径向分布与上述速度分布的趋势基本一致。

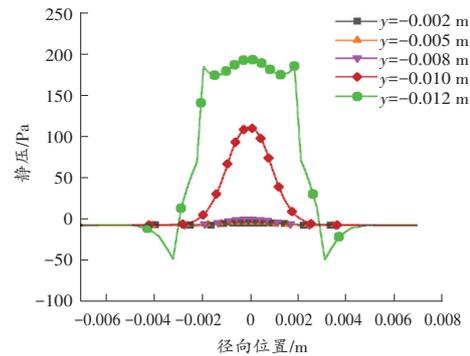
虚拟冲击器各部分的静压分布情况如图7所示。



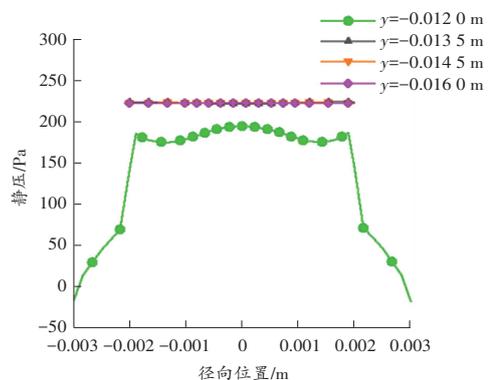
(a) 入口段



(b) 加速段



(c) 分流域



(d) 弱流出口

图7 虚拟冲击器入口段、加速段、分流域、弱流出口不同横截面径向静压分布

由图7可以看出:入口段的静压沿着轴向减小,除了截面末端的静压从中心沿径向增大后趋于稳定以外,其他位置同一截面数值变化都很少;加速段的

锥形段,静压沿轴向逐渐减小,沿径向近似不变,圆柱段部分的静压沿轴向、径向均减小;分流域中,静压沿轴向增大,但在距离收集腔近处的静压则是由轴心最大值沿径向先减小再增大,又陡降至最低值,再缓慢增大,最后趋于稳定;弱流出口不同横截面静压值几乎不变,随深度增大,静压值逐渐减小,并趋于恒定。

在明确了虚拟冲击器内部流动参数的分布情况,完成气相场求解的基础上,进一步对多个模型进行求解和优化,最终得到满足 BMRC 曲线分离标准的虚拟冲击器,其结构参数见表 2。

表 2 模型结构参数

$\theta_1$	$D_2/D_1$	$S/D_1$	$D_{22}/D_1$	弱流比
45°	1.33	4.0	2.0	0.1

表 3 虚拟冲击器分离效能实验数据

空气动力学 直径/ $\mu\text{m}$	BMRC 曲线 标准值/%	各次实验分离效能/%					各次实验误差/%					平均误 差/%
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
2.2	90	95.29	90.04	96.28	94.01	93.62	5.29	0.04	6.28	4.01	3.62	3.85
3.9	70	66.67	68.42	66.22	73.17	71.57	3.33	1.58	3.78	3.17	1.57	2.69
5.0	50	47.51	47.83	45.67	47.83	48.10	2.49	2.17	4.33	2.17	1.90	2.61
5.9	30	34.26	32.08	30.00	31.29	28.70	4.26	2.08	0	1.29	1.30	1.79
7.1	0	3.53	3.49	4.50	2.82	1.27	3.53	3.49	4.50	2.82	1.27	3.12

根据式(2)计算虚拟分离器分离效能与 BMRC 曲线的标准差:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\eta'_i - \eta_i)^2} \quad (2)$$

式中: $\delta$  为标准差; $n$  为实验粒子规格数, $n \geq 5$ ; $\eta'_i$  为虚拟冲击器对应各粒径处的分离效能实验值,%; $\eta_i$  为各粒径对应 BMRC 曲线的分离效能标准值,%。

实验结果表明:粒径为 2.2  $\mu\text{m}$  时平均误差为 3.85%;粒径为 3.9  $\mu\text{m}$  时平均误差为 2.69%;粒径为 5.0  $\mu\text{m}$  时平均误差为 2.61%;粒径为 5.9  $\mu\text{m}$  时平均误差为 1.79%;粒径为 7.1  $\mu\text{m}$  时平均误差为 3.12%。综上分析,5 个实验点的标准差  $\delta = 2.89\%$ , 小于 5%,满足 MT 394—1995 标准规定的误差限值,符合要求。

#### 4 结语

1) 虚拟冲击分离技术具有连续分离的特点,是实现呼吸性粉尘连续分离的关键。虚拟冲击器的内部流场分布情况:速度分布方面,入口与加速段沿着气流流动方向逐渐增大,而在分离域和弱流出口逐

### 3 实验验证

根据仿真分析得到的结构参数加工制作模型样件。根据 MT 394—1995《呼吸性粉尘测量仪采样效能测定方法》要求,分别对虚拟冲击器 5 个粒径点进行了 5 次实验。实验过程中保证室内相对湿度小于 85%,环境温度约为  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,扩散罩气流流量控制在 1 L/min,干燥筒气流流量为 10 L/min,采样时间设置为 30 min。采样结束后,用定量乙醇在试管中分别浸泡滤膜和未采样白滤膜 4 h,同时用乙醇清洗通道;最后用可见光分光光度计测量得出各个浸泡溶液的浓度值,进而计算出虚拟冲击器在各粒径下的分离效能。测试结果与 BMRC 曲线对比及误差见表 3。

渐减小;动压的分布与速度的分布趋势基本一致;静压分布方面,入口与加速段沿气流流动方向逐渐减小,分流域、弱流出口处则沿着流动方向逐渐增大。

2) 实验结果表明,虚拟冲击器的分离效能与 BMRC 曲线分离标准的最大误差为 3.85%,最小误差为 1.79%,其中当粒径为 2.2  $\mu\text{m}$  与 7.1  $\mu\text{m}$  时,误差相对较大,分别为 3.85%、3.12%,但都仍满足 MT 394—1995 的要求,均小于 5%。

#### 参考文献:

- [1] 国家卫生健康委员会. 2020 年我国卫生健康事业发展统计公报[EB/OL]. <http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s10743/202107/af8a9c98453c4d9593e07895ae0493c8.shtml>, 2021/07/13.
- [2] 袁亮. 煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-7.
- [3] 李德文, 隋金君, 刘国庆, 等. 中国煤矿粉尘危害防治技术现状及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 1-7.
- [4] 王杰, 郑林江. 煤矿粉尘职业危害监测技术及其发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 119-125.

- [5] BS EN481 - 1993, Workplace atmospheres - Size fraction definitions for measurement of airborne particles[S].
- [6] ISO/TR 7708 - 1993, Air quality - Particle size fraction definitions for health-related sampling[S].
- [7] 周涯泉. 呼吸性粉尘分离效能测试方法误差分析[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(6): 61-64.
- [8] 张朝晖. 大气微细粉尘污染综合防治对策[J]. 科技风, 2020(3): 137.
- [9] 孙茂文. 新型惯性冲击器设计与性能分析[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(6): 101-103.
- [10] 邹修敏. 旋风分离器内随机运动颗粒的受力及结构设计分析[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(4): 77-80.
- [11] 苏伟, 武晶晶, 于建奇, 等. 旋风分离器的气相流场的性能分析及数值模拟[J]. 信息技术, 2017, 10(3): 161-163.
- [12] 黄鹏升. 基于响应曲面法的旋风分离器排气管优化研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(8): 169-173.
- [13] 姚宇平, 刘含笑, 朱少平. 燃煤电厂低浓度烟尘及PM2.5测试方法探讨[C]//燃煤电厂“超低排放”新技术交流研讨会论文集, 2014.
- [14] 马骏, 杨屹, 商洁. 某型虚拟冲击器的设计及数值模拟[J]. 辐射防护, 2021, 41(4): 359-364.
- [15] 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 等. 双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源PM10和PM2.5排放测量[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2003-2007.
- [16] 张佩, 赵永凯, 杨巍, 等. 亚微米粒子虚拟冲击器的研制[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 238-243.
- [17] 惠立锋. 燃煤电厂超低排放PM10/PM2.5实验室采样对比分析[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 190-196.
- [18] 常倩云, 杨正大, 郑成航, 等. 高湿烟气中超低浓度细颗粒物测试方法研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2450-2459.
- [19] 谢双. 基于虚拟冲击原理的呼吸性粉尘分离技术和分离器研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2019.
- [20] 温俊生, 施红辉, 徐胜利, 等. 头型对回转体垂直入水时空泡面闭合影响的数值模拟[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 573-579.
- (责任编辑: 陈玉涛)



(上接第19页)

- [4] 张智慧, 潘一山. 深部巷道破坏分区破裂规律三维相似材料实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2780-2786.
- [5] 单仁亮, 李兆龙, 鲍永生, 等. 大断面厚顶煤回采巷道锚杆索协同支护技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(1): 70-75.
- [6] 于洋, 朱琪, 王襄禹, 等. 大断面下山煤巷围岩稳定性控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 1-5.
- [7] 马新世, 弓培林, 李超. 深部大断面巷道围岩注浆加固技术研究与应用[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(3): 62-67.
- [8] 郭金刚, 王伟光, 何富连, 等. 大断面综放沿空巷道基本顶破断结构与围岩稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 446-454.
- [9] 肖丹, 赵恩彪. 大断面巷道软弱厚煤层顶板稳定性控制与对策研究[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(6): 31-35.
- [10] 孙永富, 张伟, 史晨昊, 等. 大断面回采巷道支护参数优化设计[J]. 煤炭技术, 2016, 35(5): 36-39.
- [11] 左建平, 孙运江, 王金涛, 等. 大断面破碎巷道全空间桁架锚索协同支护研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 1-6.
- [12] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000(3): 342-345.
- [13] 王襄禹, 张宏伟, 李国栋. 弱胶结富水顶板巷道围岩控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 88-92.
- [14] 康红普, 冯志强. 煤矿巷道围岩注浆加固技术的现状与发展趋势[J]. 煤矿开采, 2013, 18(3): 1-7.
- [15] 李磊. 大断面托顶煤巷道灾变机制与控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [16] 鹿利恒. 恒源煤矿深井大断面硐室围岩稳定性控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [17] 谭云亮, 范德源, 刘学生, 等. 煤矿超大断面硐室判别方法及其工程特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 23-31.
- [18] 何富连, 张广超. 深部高水平构造应力巷道围岩稳定性分析及控制[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 466-476.
- [19] 郭平, 沈大富. 深部巷道支护方案优化设计及数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 87-91.
- [20] 贾住平, 侯俊, 郑禄琛. 深部构造地应力对巷道稳定性影响研究[J]. 黄金, 2018, 39(11): 35-39.
- (责任编辑: 李 琴)