刘丹丹,魏重宇,李德文,等. 基于气固两相流的粉尘质量浓度测量装置优化[J]. 煤炭学报,2016,41(7):1866-1870. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1335

Liu Dandan,Wei Chongyu,Li Dewen,et al. Structural optimization of dust concentration measuring device based on gas-solid two phase flow[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(7):1866-1870. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1335

基于气固两相流的粉尘质量浓度测量装置优化

刘丹丹[1],魏重宇[1],李德文[2,3],滕昱玲[4]

(1. 黑龙江科技大学 电气与控制工程学院,黑龙江 哈尔滨　150022;2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆　400037;3. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室,重庆　400039;4. 空军大连通信士官学校,辽宁 大连　116600)

摘　要: 针对传统光散射粉尘测量仪易受粉尘污染的问题,利用 Fluent 软件对粉尘采集通道内的气固两相流进行数值仿真,通过粉尘颗粒的运动轨迹找出污染光学结构的因素,并重新设计合理的通道结构。从仿真数据看出当气流途经测量口处时产生了低速涡流,在其长期低速冲蚀下,造成测量口处粒子的残留堆积;经过项目组对测量结构的改进,设计了 1 种不易被粉尘污染的装置。仿真实验结果表明,这种新型的设计能使气流高速通过测量通道,并在测量口处产生了高速湍动涡流,使粒子不易在测量口处残留,从而保证了测量的准确性和时效性。

关键词: 污染;光散射;粉尘测量;数值仿真;气固两相流

中图分类号: TD711.35　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-9993(2016)07-1866-05

Structural optimization of dust concentration measuring device based on gas-solid two phase flow

LIU Dan-dan[1],WEI Chong-yu[1],LI De-wen[2,3],TENG Yu-ling[4]

(1. *School of Electrical and Control Engineering,Heilongjiang University of Science and Technology,Harbin*　150022,*China*;2. *China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute,Chongqing*　400037,*China*;3. *State Key Lab. of Methane Disaster Monitoring & Emergency Technology,Chongqing*　400039,*China*;4. *Dalian Airforce Communication NCO Academy,Dalian*　116600,*China*)

Abstract: The traditional light scattering measuring device could be polluted easily by dust. This study simulates the gas-solid two phase flow using Fluent software,and thus designs a more rational structure based on the influencing factors which are found from the analysis of particle trajectories. The numerical simulation experimental data shows that the low-velocity vortex is due to scouring the measurement structure by gas for a long time,and becoming polluted. A new structure is designed,which cannot be polluted easily. The experimental results show that this new design makes gas pass the channel speedily and form a turbulent vortex,so dust cannot be detained in the measuring device. This can ensure the veracity and timeliness of the measuring device.

Key words: pollution;light scattering;dust measuring;numerical simulate;gas-solid two phase flow

随着矿山、冶金、玻璃制造、陶瓷、耐火材料等行业生产的大规模发展,粉尘的危害逐渐被人们认识,比如造成机械磨损,粉尘引起燃烧爆炸等[1-2]。尤其对于长期在煤矿从事采煤工作的工人,他们长期吸入游离二氧化硅含量较高的粉尘,这种情况容易导致患煤矽肺病,严重危害了身体健康,所以 1 种性能优良的粉尘质量浓度检测装置显得尤为重要[3-5]。

目前普遍使用的粉尘质量浓度传感器都是利用 MIE 光散射原理制作的,在粉尘经过测试电路时,其质量浓度大小与光散射的强度成线性关系,而与其他物理量无关[6]。国内外对粉尘质量浓度传感器研究较早,但普遍存在很多问题,例如测量光路极易被粉尘堵塞、测量结构容易被污染、抗干扰能力差等,这些问题都与测量结构的不合理设计息息相关[7-8]。

收稿日期: 2015-09-14　　**修回日期:** 2015-11-03　　**责任编辑:** 许书阁
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(U1261205);国家自然科学基金面上资助项目(51374099);重庆市自然科学基金资助项目(cstc2012jjA40023)
作者简介: 刘丹丹(1978—),女,吉林扶余人,副教授。E-mail:liudandan2003@126.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

目前德国、前苏联和英国等国研制的连续自动测尘仪,其加工工艺、机身质量以及功能方面都处于领先水平,但仪器性能稳定性不高,受到工作环境温度变化和电源电压波动的影响,再加上光学测量口易受污染,造成其精度不高,测量范围也有一定的局限性。本文以流体力学的气固两相流理论为基础,采用湍流模型和拉格朗日离散相模型对测量仪通气管道内的气固两相流动进行模拟仿真[9],得到了气固两相的压力和速度分布以及粉尘颗粒的运动轨迹。通过对仿真结果的数据分析,发现了该测量结构设计的不合理因素,对该测量仪的结构改进有很大的指导意义。

1　现有粉尘测量仪的主要结构及问题分析

光学传感器是由照明系统和散射光收集系统组成,其轴线与采样气流的轴线互相垂直,交点周围的一个小区域是测量系统的光敏感区,它是粉尘流过时得到照明并产生散射光的区域[10]。在照明光路上,沿着以激光器作光源发射的光束前进方向上,依次有光敏感区和光陷阱,光陷阱的作用是吸收发射到激光器对面管壁上的光束,以免因光束的折射造成测量误差[11]。在散射光收集光路上,与光路垂直的一侧设有光电探测器。样气通道垂直于两光轴构成的平面,其结构如图 1 所示。

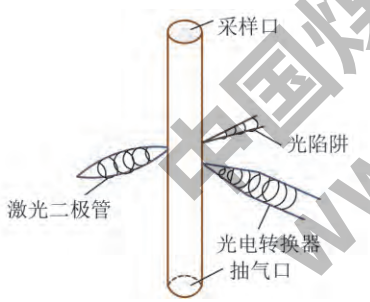


图 1　光学传感器结构

Fig. 1　Structure of optical sensor

图 1 中的粉尘区域是竖直圆形管道,光敏感区的测量光路极易被粉尘堵塞,造成整个传感器不能正常工作,使得其维护周期变短,维护成本增加[12]。现怀疑气固两相流在途经测量口处时在其内部产生了低速涡流,根据已有结论可知如果涡流流速很低,很难将沾染在测量口处的粒子“冲刷”掉[13]。现建立结构模型并通过计算仿真验证这一猜想。

2　实验几何模型的设计及边界、初始条件的确定

2.1　粉尘通道的几何模型及计算网络

本文研究的是某粉尘测量通道管径为 3 cm 的粉尘质量浓度测量仪,为了使实验结果更加直观,本次实验将模拟为 2D 平面模型,故将其通道结构简化为 2 个开口。对此计算模型进行网格划分,考虑到竖直管道为规则的空心圆柱形结构,所以适合采用四边形结构网络类型,每个网格面积为 1 mm^2,根据模型面积得知整个几何模型共 5 100 个网格(图 2)。



图 2　简化流场模型

Fig. 2　Simplified model of the flow field

2.2　模型的求解计算

实验用欧拉模型对通道内空气和粉尘两相流流场进行耦合数值模拟,通道中属于非完全湍流模型,故采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型计算其连续相数值。粉尘颗粒的粒径设置为 10 μm,颗粒密度为 2 800 kg/m^3,黏度为 0.047,比热为 1 230,除粒径外其余单位均为默认。又查表可得动力黏度 $\mu=1.864\times10^{-5}$ Pa·s,空气密度 $\rho=1.165$ kg/m^3,根据模型水力直径及模型单体入口尺寸计算通道入口水力直径[14]。粉尘的质量浓度设定为 5 mg/m^3。

用粉尘颗粒作为离散相材料,其颗粒的形状系数取值为 0.8。在管道入口建立粒径为 10 μm 速度为 2 m/s 的喷射源。设置管道入口和出口分别为速度进口和压力出口。求解计算: 首先计算出管道气相流场,以得到收敛的连续相流场,然后对粉尘颗粒喷射源进行耦合计算[15]。

颗粒在通道中将会受到气体曳力、惯性力以及升力的作用,其作用力平衡方程如下:

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t}=F_D(u-u_p)+\frac{g_i(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+F_s \qquad (1)$$

在求解连续相传递给离散相的动量数值时,需计算颗粒变化的动量[16]。其值用以下公式求解:

$$P=\sum\left[\frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p d_p^2}(u_p-u)+F\right]\dot{m}_p\Delta t N \qquad (2)$$

式中,u 为气流速度,m/s; u_p 为颗粒速度,m/s; $F_D(u-u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力,N; g_i 为流体微元上 i 方向的体力,N; μ 为气体动力黏度,Pa·s; ρ_p 为颗粒堆积密度,kg/m^3; ρ 为气体密度,kg/m^3; d_p 颗粒直径,m; F_s 为相间作用力,N; $\dot{m}_p$ 为颗粒质量流率,kg/s; Δt 为时间步长,s; F 为除曳力之外的其他相间作用力,N。

2.3　模拟结果及分析

图 3 为粉尘速度分布,流束从上部入口以 2 m/s

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

的速度高速通过测量通道，流经中部光学测量口处时，有流束进入测量口，但速率相比粉尘通道内部较低，只有 0.3 m/s，在下部测量通道内，流束仍然高速通过。图 4 为管壁处粒子轨迹分布，通过观察测量口处的粒子轨迹，发现气载粒子在测量口内部产生了不明显的涡流，由轨迹图判断测量口内部产生的涡流流速很低。根据实验得到的两相流动速率云图以及粒子轨迹，可以得出以下结论：由于光学测量装置的特殊结构，管道内气固两相流动在其测量通道处产生了低速涡流，使得所抽取样气在流经所述测量通道的过程中，其中的部分粉尘会进入到光发射器和粉尘传感器与粉尘测量通道相联通的通道内，同时会有部分粉尘沉降到粉尘测量通道内，在样气的长期冲蚀下，会逐渐导致通道堵塞，影响测量精度，甚至造成测量装置不能正常工作。

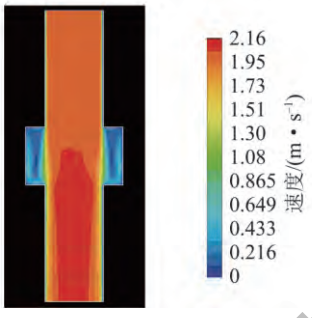


图 3 粉尘速度分布云图

Fig. 3 Velocity nephogram of the dust

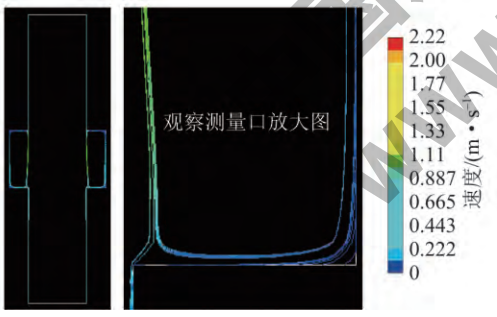


图 4 管壁粒子轨迹分布

Fig. 4 Distribution of the particle trajectories beside the wall

3 不易堵塞通道的粉尘质量浓度测量装置

3.1 设计理念与设备工作原理

受到传统测量仪易受污染的启示，项目组设计了 1 种新型的测量装置，这种装置不易产生堵塞，能够使装置长期高精度的工作(图 5)[17]。

此结构的优势在于：粉尘测量通道为水平直通式通道，抽气探头和抽气风扇对应设于所述通道的两端，粉尘测量通道沿气流方向依次具有收缩段、喉道段和扩散段(3 段结构长度相等，喉道段管径是其余

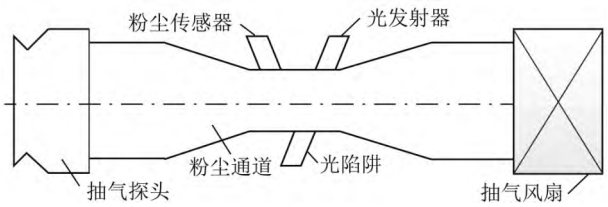


图 5 新型测量仪结构原理

Fig. 5 Structure of the new measuring instrument

两段管径的 1/2)，所述光发射器和粉尘传感器设置于喉道段，其中光发射器和粉尘传感器均处于喉道段上部，并均与喉道管成一定角度，喉道段下部设有通过管道与粉尘测量通道连通的光陷阱。

考虑到喉道段上部测量口的倾斜程度也会影响到实验的精度(倾斜角度是指测量口与竖直方向的夹角)，实验对测量口在不同倾斜角度下分别进行模拟，以 5°为差角从 5°到 75°依次递增(倾斜角度过大会影响光学测量装置正常工作)，得出了各自情况下测量口内流束的速度，如图 6 所示。可以看出，测量口在倾斜 45°角时气固两相流的流速最大。下文将以测量口在倾斜 45°的情况下具体分析模拟结果。

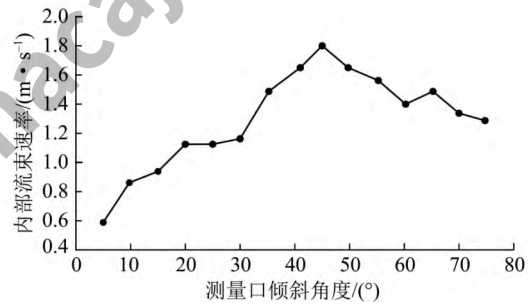


图 6 不同倾斜角度下测量口内部流束的速率

Fig. 6 Velocity of the flow in the measure port at different angles

由于粉尘测量通道的特殊设计结构，使气流在喉道段产生了文丘里效应[18]，气流流束增加，流速急剧增大，再加上抽气风扇的作用，使被测粉尘混合气体高速流过测量通道，并在测量口处产生湍流涡流，使进入测量口处的粒子被高流速“卷走”，并直接高速排出测量通道外，以至于粉尘不易在通道内产生沉降和堆积，在长期连续使用的过程中不会发生因堵塞现象而影响正常的测量。

3.2 对新型装置的粉尘通道进行模拟仿真

在此模拟中，除了模型结构的建立和网格划分之外，数学模型以及各种参数均取本文第 1 次模拟的数据，边界条件以及计算方法均参考本文首次模拟。

3.3 模拟结果及分析

图 7 为粉尘速度分布云图，气体以 2 m/s 的速度从左侧喉道段进入测量通道，在气固两相流束到达喉

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

道段时,速率达到 7.5 m/s,而光学测量结构的 3 个开口中的流速达到 1.8 m/s,是实验一传统测量仪测量开口中流速的 9 倍。图 8 为通道壁面处粒子轨迹。

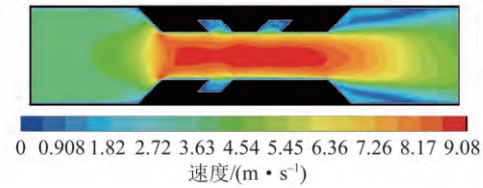


图 7　粉尘速度分布云图

Fig. 7　Velocity nephogram of the dust

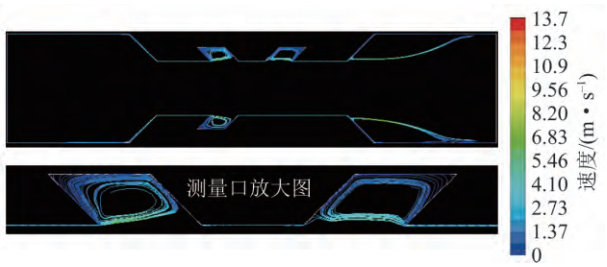


图 8　壁面粒子轨迹

Fig. 8　Distribution of the particle trajectories beside the wall

由图 7,8 中可观测到,气固两相流束经过收缩段到达喉道段时速率急剧增大,形成强流束,其流经喉道段中部光学测量口处时,在测量口内部产生了很强的涡流,而流经测量口内部管壁的粒子在高速气流的载动下,被直接高速排出测量口外。实验证明,这种新型的结构设计是切实有效的。

3.4　测试结果及分析

根据前述数值仿真分析,按优化后的气路结构研制出光散射机理粉尘质量浓度传感器,在粉尘质量浓度不同的环境中进行实验,实验装置如图 9 所示,系统主要由空压机、定量发尘器、风硐、静电除尘器、风机、风速测定仪及电脑控制平台。该实验系统的工作原理为: 空压机将压缩的空气送给定量发尘器,发尘器将粉尘喷向风硐,同时在风机的作用下将空气吸入风硐,风硐中形成稳定的气固两相流,通过电脑平台调节风机的频率改变风硐中的风速,改变发尘器的发尘口,调节风硐中的粉尘质量浓度。研制的粉尘质量浓度传感器通过在较高质量浓度(50 ~ 400 mg/m^3) 范围的长时间测试,传感器光学窗口污染改善明显。

为了定量分析优化后气路结构的抗粉尘污染程度,依据呼吸性粉尘测量仪采样效能测定方法(MT394) 对传统和改进后测量装置的进气口先后置于采样系统效能测试系统尘室中,排气口连接安装有采样滤膜的连接头,设定环境相对湿度小于 80% RH,温度为(20 ± 5) ℃,气溶胶发生器扩散气流为 1.5 L/min,供气压力小于 0.2 MPa,尘室内稀释气流

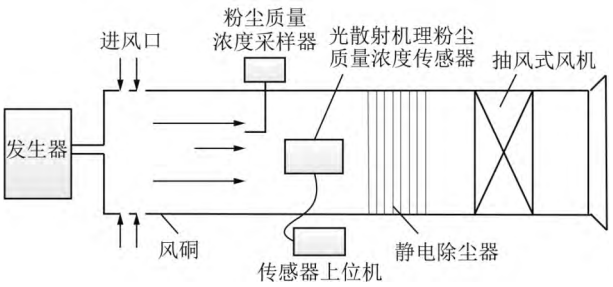


图 9　实验系统示意

Fig. 9　System of the experiment

流量 50 ~ 80 L/min,每次采样时间不少于 240 min。采样后用定量酒精将测量气路结构和连接头进行冲洗、浸泡,使用分光光度计测定冲洗溶液的浓度,进而计算测量气路结构在该粒径下的沉积比率(测量气路结构上的沉积量与总量的比值) 。传统和改进后的测量气路结构的沉积比率见表 1。

表 1　气路结构改进前后沉积比率测试值对应值偏差

Table 1　Deviation of the deposition ratio between after changing the gas path structure

空气动力学直径/μm	改进前测试平均值/‰	改进后测试平均值/‰	沉积比率差值/%	沉积比率减少幅度/%
3.9	0.35	0.29	0.006	17.14
5.0	0.48	0.38	0.010	20.83
7.1	1.32	0.87	0.045	34.09
10.0	3.39	1.26	0.213	62.83
30.0	5.41	1.77	0.364	67.28
50.0	6.05	1.89	0.416	68.76
70.0	6.68	1.92	0.476	71.25
90.0	8.24	2.34	0.590	71.60

可以看出气路结构上的沉积量改变明显: 空气动力学直径 7.1 μm 的测试粒子气路结构改进前后沉积比率减少了 0.045%,随着测试粒子空气动力学直径的增加,气路结构改进前后沉积比率减少差值增加明显,减少幅度从 34.09% 增加至 71.60%。测试粒子空气动力学直径减少至 5.0 μm 时,减少幅度从 20.83% 至 17.14%。从而表明,改进后传感器光学窗口抗污染能力改善明显,尤其其对空气动力学直径为 5.0 μm 以上的粉尘微粒。

目前该传感器已在部分阳泉矿区工作面应用试验,其抗污染能力大大增强。

4　结　　论

(1) 首先分析了传统粉尘测量装置存在的易被污染的问题,通过研究其测量通道的结构原理,提出了造成此问题发生的主要原因,即测量口在长期被气

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

体粉尘流束产生的低速涡流冲蚀下，极易被粉尘污染，导致测量通道逐渐被粉尘堵塞。

(2) 实验建立了测量通道的结构模型，用 Fluent 软件进行模拟仿真，发现气流在测量通道内产生了低速涡流，结合粉尘在测量通道的粒子轨迹证实了结论一。

(3) 在传统测量装置的基础上，项目组经过对其改进，设计了 1 种全新的不易被堵塞的粉尘质量浓度测量装置，此装置创新性的将粉尘通道设计为收缩段、喉道段和扩散段相结合的方式，使得气流在经过安装了光学结构的喉道段时能够高速通过，并使进入测量口的气流产生湍流涡流，以至于粉尘不易在通道内产生沉降和堆积。

(4) 实验通过对新型的测量结构进行仿真验证以及矿区现场风硐测试，确定此新型设计切实有效。随着测试粒子空气动力学直径的增加，气路结构改进前后沉积比率减少差值增加明显，减少幅度从 34.09% 增加至 71.60%。但 5 μm 以下粒径的减少幅度相对不高，下一步，结合管壁材质的粗糙度影响进行 5 μm 以下粒径的污染问题研究。

参考文献:

[1] Wang Ao, Song Qiang, Tu Gongming, et al. Influence of flue gas cleaning system on characteristics of PM2.5 emission from coal-fired power plants [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(1): 4-12.

[2] Steven J Schatzel, Brian W Stewart. A provenance study of mineral matter in coal from Appalachian Basin coal mining regions and implications regarding the respirable health of underground coal workers: A geochemical and Nd isotope investigation [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 94: 123-136.

[3] 孙广京，朱斯陶，姜福兴，等. 深井特厚煤层工作面强烈动压区安全开采技术 [J]. 煤炭学报，2015，40(S1)：12-18.
Sun Guangjing, Zhu Sitao, Jiang Fuxing, et al. Safe mining technology at strong dynamic pressure area in deep extra-thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 12-18.

[4] 谭聪，蒋仲安，王明，等. 综放工作面多尘源粉尘扩散规律的相似实验 [J]. 煤炭学报，2015，40(1)：122-127.
Tan Cong, Jiang Zhongan, Wang Ming, et al. Similarity experiment on multi-source dust diffusion law in fully mechanized caving face [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 122-127.

[5] 聂百胜，李详春，杨洋，等. 工作面采煤期间 PM2.5 粉尘的分布规律 [J]. 煤炭学报，2013，38(1)：33-37.
Nie Baisheng, Li Xiangchun, Yang Yang, et al. Distribution of PM2.5 dust mining operation in coal workface [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 33-37.

[6] Aboozar Nasrollahi, Soheil Sharifi, Dawood Baraho. Liposomal suspension of DSPC/cholesterol with polyethylene glycol: A study by light and X-ray scatterering [J]. Physics and Chemistry of Liquids, 2015, 53(2): 221-229.

[7] Chen Shiqiang, Wang Haiqiao, Li Yiqun, et al. Theoretical and numerical analysis of coal dust separated by centrifugal force for working and heading faces [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 338-345.

[8] 王智超，吴占松，杨英霞，等. 粉尘质量浓度测试方法的实验研究 [J]. 清华大学学报，2013，53(3)：366-370.
Wang Zhichao, Wu Zhansong, Yang Yingxia, et al. Experimental study of test method for dust mass concentration [J]. Tsinghua Science and Technology, 2013, 53(3): 366-370.

[9] 陈举师，蒋仲安，杨斌，等. 破碎硐室粉尘浓度空间分布规律的数值模拟 [J]. 煤炭学报，2012，37(11)：1865-1870.
Chen Jushi, Jiang Zhongan, Yang Bin, et al. Numerical simulation of spatial dust concentration distribution regularities in crushing chamber [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1865-1870.

[10] Alexis Bimis, Dimitris Karalekas. Experimental evaluation of hardening strains in a bioceramic material using an embedded optical sensor [J]. Meccanica, 2015, 50(2): 541-547.

[11] 周骏，孙永堂，孙铁囤，等. 非晶硅光伏电池表面高效光陷阱结构设计 [J]. 物理学报，2011，60(8)：0888021-0888026.
Zhou Jun, Sun Yongtang, Sun Tietun, et al. Design of a highly efficient light-trapping structure for amorphous silicon solar cell [J]. Chinese Journal of Physics, 2011, 60(8): 0888021-0888026.

[12] 张文阁，高思田，宋小平，等. 细颗粒物 PM2.5 浓度测量及计量技术 [J]. 中国粉体技术，2013，19(6)：69-72.
Zhang Wenge, Gao Sitian, Song Xiaoping, et al. Concentration measurement and metrical technology of fine particulate matter PM2.5 [J]. China Powder Science and Technology, 2013, 19(6): 69-72.

[13] 李小川，陈明军，刘颀，等. 通风输送过程高浓度粉尘沉积特性 [J]. 粉末冶金材料科学与工程，2015，20(3)：470-477.
Li Xiaochuan, Chen Mingjun, Liu Qi, et al. Deposition characteristic of high concentration dust in ventilation conveyer process [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2015, 20(3): 470-477.

[14] 蒋仲安，陈举师，王晶晶，等. 胶带输送巷道粉尘运动规律的数值模拟 [J]. 煤炭学报，2012，37(4)：659-663.
Jiang Zhongan, Chen Jushi, Wang Jingjing, et al. Numerical simulation of dust movement regularities in belt conveyer roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 659-663.

[15] Alexxandros Makridis, John Chick. Validation of a CFD model of wind turbine wakes with terrain effects [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2013, 123(10): 723-726.

[16] 李建昌，李宏宇，韩宇，等. 真空喷射射流流场的 Fluent 模拟分析 [J]. 东北大学学报(自然科学版)，2012，33(3)：422-425.
Li Jianchang, Li Hongyu, Han Yu, et al. Numerical simulation of the vacuum spray jet flow based on fluent analysis [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(3): 422-425.

[17] 中煤科工集团重庆研究院有限公司. 一种易维护光学式粉尘浓度检测装置 [P]. 中国专利：204044034，2014-12-24.

[18] 胡克吉. 气力输送系统文丘里供料器的研究 [D]. 青岛：青岛科技大学，2013.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net