

中文引用格式:荆德吉, 阚琦笙, 刘鸿威, 等. 运输巷仿真模型建立及多断面喷雾降尘技术[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 96-105.

英文引用格式:JING Deji, KAN Qisheng, LIU Hongwei, et al. Simulation model of transportation roadway and multi-section spray dust reduction technology[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 96-105.

运输巷仿真模型建立及多断面喷雾降尘技术*

荆德吉^{1,2,3}教授, 阚琦笙^{1,2,3}, 刘鸿威^{1,2,3}, 戴明颖^{**1,2,4}, 刘绍航^{1,2,3}, 刘阔^{1,2,3}

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 阜新 123000; 3 辽宁工程技术大学 鄂尔多斯研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010; 4 航天信息软件技术有限公司, 北京 100089)

中图分类号:X964

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1632

基金项目:国家自然科学基金资助(52204216); 国家自然科学基金面上项目资助(52474229); 国家自然科学基金青年基金资助(51704146)。

【摘要】 为了治理煤矿运输巷粉尘污染问题, 利用数值仿真软件, 按照1:1的比例建立棋盘井煤矿运输巷北大巷几何模型。首先, 基于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和粒子追踪模型, 展开运输巷风流-粉尘耦合特征研究, 并根据其特征提出同时治理转载点和运输巷的多断面喷雾降尘技术; 然后, 通过数值仿真与试验相结合的方法, 验证新型降尘技术的有效性; 最后, 在棋盘井煤矿运输巷北大巷开展现场应用, 验证该技术的实用性及高降尘特性。结果表明: 运输巷内风流分布受胶带运转速度及牵引力影响产生诱导风流, 整体平均风流速度约为0.6 m/s, 而粉尘粒子受巷道风流裹挟扩散, 粒径为25 μm 以下的粉尘悬浮在人行道处, 而粒径为25 μm 以上的粉尘沉积在胶带表面和巷道底板上; 新降尘技术可实现对转载点的完美覆盖, 且主巷道内形成1道超音速雾幕, 拦截并捕集转载点逃逸的粉尘。超音速喷雾的雾幕范围大, 抗风性强, 持续降尘效果显著。经棋盘井煤矿运输巷北大巷现场应用, 全尘和呼尘的最高降尘效率分别达到80.12%和83.15%, 验证了文中所提降尘技术的有效性。

【关键词】 运输巷; 转载点; 多断面; 喷雾降尘; 粉尘质量浓度

Simulation model of transportation roadway and multi-section spray dust reduction technology

JING Deji^{1,2,3}, KAN Qisheng^{1,2,3}, LIU Hongwei^{1,2,3}, DAI Mingying^{1,2,4},
LIU Shaohang^{1,2,3}, LIU Kuo^{1,2,3}

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermo-motive Disaster and Control of Ministry of Education, Fuxin Liaoning 123000, China; 3 Ordos Research Institute of Liaoning Technical University, Ordos Inner Mongolia 017010, China; 4 Aerospace Information Software Technology Co., Ltd., Beijing, 100089, China)

Abstract: In order to control the dust pollution problem of coal mine transportation roadway, the

* 文章编号:1003-3033(2025)09-0096-10 收稿日期:2025-04-25; 修稿日期:2025-07-08

** 通信作者:戴明颖(1985—),女,辽宁鞍山人,博士研究生,主要研究方向为职业卫生工程及职业健康管理等。E-mail:1900833116@qq.com。

geometric model of Qipanjing coal mine transportation north roadway was established according to the ratio of 1:1 by using numerical simulation software. Firstly, based on the standard k- ϵ turbulence model and particle tracking model, the airflow-dust coupling characteristics of the transportation roadway were studied, and a multi-section spray dust reduction technology for simultaneously controlling the transfer point and the transportation roadway was proposed according to its characteristics. Then, the effectiveness of the new dust reduction technology was verified by the combination of numerical simulation and experiment. Finally, the field application was carried out in the north roadway of the transport roadway in Qipanjing Coal Mine to verify the practicability and high dust reduction characteristics of the technology. The results show that the airflow distribution in the transportation roadway is affected by the running speed of the belt and the traction force to produce the induced airflow. The overall average airflow velocity is about 0.6 m/s, and the dust particles are dispersed by the airflow of the roadway. The dust with a particle size of less than 25 μm is suspended at the sidewalk, while the dust with a particle size of more than 25 μm is deposited on the surface of the belt and the floor of the roadway. The new dust reduction technology realizes the perfect coverage of the transfer point, and a supersonic fog curtain is formed in the main roadway to intercept and capture the dust that escaped from the transfer point. The test results show that the supersonic spray has a large range of fog curtain, strong wind resistance and significant continuous dust reduction effect. Through the field application of the north roadway of the transport roadway in Qipanjing Coal Mine, the highest dust reduction efficiency of total dust and respirable dust reached 80.12% and 83.15% respectively.

Keywords: transportation roadway; transfer point; multi-section; spray dust suppression; dust mass concentration

0 引言

随着全球经济的复苏,各行业对能源的需求也在不断提高,煤炭作为最基础的能源品类,仍然发挥着至关重要的作用^[1-3]。2023年,我国煤炭产量达到47.1亿t,创历史新高^[4]。随着煤炭产量的提高,煤矿机械化程度也在日益提升,井下工人接触粉尘的方式也更加多样化^[5-8]。2023年,全国职业病新增病例达到12 087例,其中,职业性尘肺病高达8 051例,占职业病病例的66.7%^[9]。运输巷作为井下重要巷道之一,其粉尘污染尤为严重,特别是转载点^[10],且运输巷内粉尘扩散范围较广,能接触到粉尘的工人也最多,严重影响工人的身体健康^[10-11]。

目前,国内外学者针对运输巷粉尘防治问题展开了大量研究。荆德吉等^[12]通过数值仿真的方法探究运输巷道粉尘运移特征,发现落料管两侧粉尘具有较大动能,而胶带上方粉尘速度相对较小。WANG Chengyan等^[13]为了解释带式输送机粉尘扩散特征,将粉尘的拉格朗日平均速度改写成一般表达式,并在二维、三维的胶带模型中进行验证,发现当移动速度为5 m/s、冯卡门常数为0.418 7和经验

常数为9.793时,理论预测与模拟得到拉格朗日平均速度剖面拟合良好。马明星等^[14]基于旋流卷吸理论,提出多径向旋流卷吸除尘技术,并通过数值仿真和试验测试确定了最佳控尘参数,结果表明:该技术的最佳进风风速为8 m/s,转载点整体降尘效率高达95%。虽然此类降尘措施效果显著,但由于胶运转载点无法完全封闭^[15],还是会有部分粉尘逃逸,且此类降尘装置的结构相对复杂,多数煤矿均采用喷雾降尘的方法。张天等^[16]提出了新型喷雾降尘技术,并通过数值仿真和试验的方法,探究其降尘效果,发现新技术在最低气动压力为0.2 MPa时,形成负压汲水虹吸的效果,且水雾粒径具有较高动能,水雾粒径普遍在10 μm 以下。目前,针对运输巷转载点的通风除尘技术设备较大,还容易导致二次污染;而喷雾降尘技术往往只针对转载点进行控制,仍会有粉尘扩散至人行道区域,控尘效果较差。

因此,为解决煤矿运输巷道粉尘污染严重的问题,采用数值模拟的方法开展运输巷粉尘运移特征研究,并基于此提出同时治理转载点和运输巷的多断面喷雾降尘技术,通过数值模拟和喷雾试验开展多断面喷雾降尘技术研究,并于内蒙古鄂尔多斯棋盘井煤矿运输北大巷进行现场应用测试,验证该降

尘技术的有效性,以期煤矿运输巷的粉尘治理提供参考。

1 运输巷仿真模型建立及结果分析

1.1 湍流及粒子追踪模型

由于巷道内的风流运动属于不可压缩且雷诺数较大的湍流运动,因此,在保证计算精度和时间的前提下,选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行风流场的仿真计算,其控制方程如下^[17-19]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla k = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

生成项:

$$P_k = \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u \quad (3)$$

湍流黏度:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; k 为湍流动能, J ; t 为时间, s ; u 为流体速度, m/s ; μ 为分子动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_T 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P_k 为湍动能生成项, W/m^3 ; ε 为湍动能耗散率, m^2/s^3 ; 试验常数为 $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 。

粒子追踪模型是基于牛顿第二定律构建的颗粒运动方程,可以定义多种颗粒属性及释放方式,最终计算出粒子的运移轨迹。巷道内颗粒物受升力和重力影响,因此,还需在模型中添加升力和重力。同时,巷道内的粉尘流属于稀疏颗粒流,还需添加曳力模型,其运动方程如下^[20-22]:

$$\frac{d}{dt}(m_p v) = \sum F \quad (5)$$

曳力方程如下:

$$F_D = \frac{1}{\tau_p} m_p (u - v) \quad (6)$$

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_D Re_r} \quad (7)$$

$$Re_r = \frac{\rho |u - v| d_p}{\mu} \quad (8)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_r} (1 + 0.15 Re_r^{0.687}) \quad (9)$$

式中: m_p 为粒子质量, kg ; v 为粒子运动速度, m/s ; $\sum F$ 为粒子受到力之和, N ; F_D 为曳力, N ; τ_p 为粒子的弛豫时间, s ; ρ_p 为粒子密度, kg/m^3 ; d_p 为粒子直径, μm ; C_D 为曳力系数; Re_r 为雷诺数。

1.2 运输巷几何模型构建

以棋盘井运输北大巷转载点为参考,建立等比例几何模型,如图1所示。该模型由运输主巷和运输联巷组成,主巷道内为下部胶带,联巷内为上部胶带;超音速雾幕装置分别设置在转载点和主巷36 m处。巷道断面为宽4.8 m,高4 m的矩形,其中,联巷长34 m,且高于主巷1.5 m,主巷长50 m;运输胶带高1.5 m,宽2.2 m;转载点喷雾装置长2.5 m,布置4个超音速喷嘴,主巷喷雾装置长4.5 m,布置6个超音速喷嘴,且均距地面高3 m。主巷道进风方向为X轴正方向,且下部胶带运输方向与其方向相反;而联巷进风方向为Y轴负方向,且上部胶带运输方向与其相同。

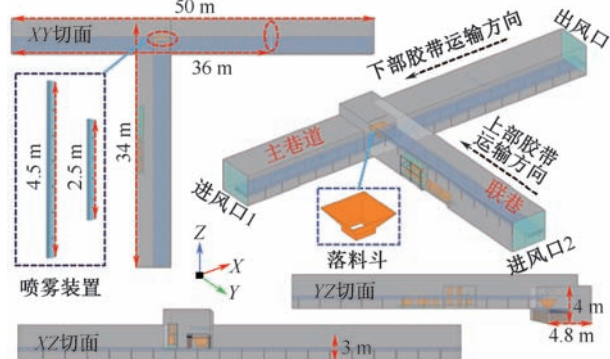


图1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

1.3 运输巷模型网格划分及独立性验证

通过仿真软件的内置网格功能进行网格划分,得到粗、中和细3种不同网格划分结果,如图2所示,其网格数量分别为501 446、811 048和1 477 187。从图2中可以看出,粗、中网格下巷道侧壁的网格质量低于0.5,质量较差。反观,细网格质量基本在保持在0.7以上。进一步统计细网格,得到其单元质量分布,可以看出在单元质量在0.7~0.8范围内的单元计数最多,平均单元质量达到0.664 6。

由于巷道的粉尘主要受风流影响,因此,选择巷道内的风速进行网格独立性验证。截取主巷道中心呼吸带高度(1.7 m)的速度分布情况,与实际巷道风速对比,见表1。随着网格质量的提高,模拟巷道内的风速越接近实际值。因此,采用细网格进行数值仿真时,结果更加精确。

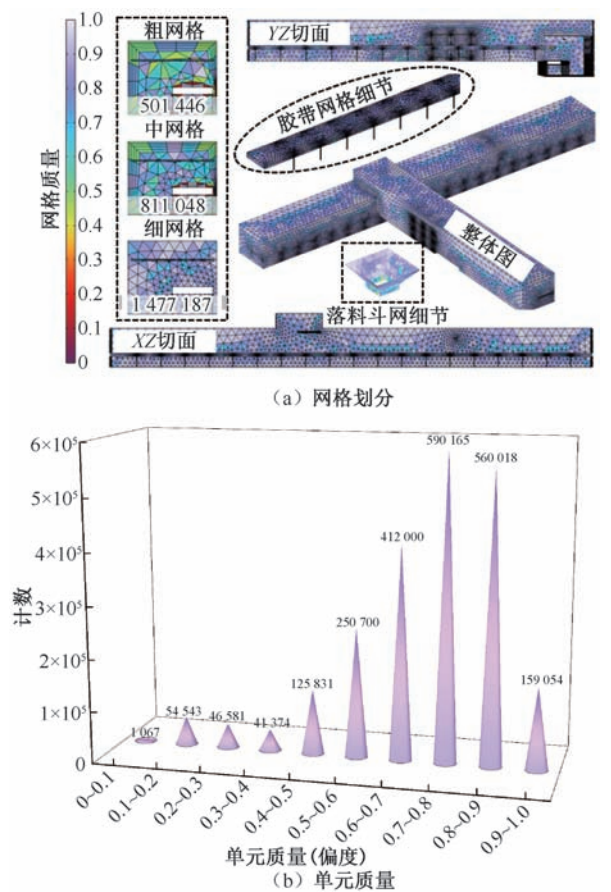


图 2 网格划分
Fig. 2 Grid division

表 1 模拟速度与实际速度对比

Table 1 Comparison of simulated speed and actual speed					
$u/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	X 轴距离/ m				
	5	15	25	35	45
粗网格	1.25	1.08	1.15	1.21	0.64
中网格	1.21	1.02	1.12	1.19	0.57
细网格	1.10	0.85	0.97	0.97	0.56
实际	0.98	0.82	0.87	0.85	0.49

1.4 运输巷风流及粉尘参数设置

根据现场实际测量结果,进行边界条件的参数设置,具体边界条件设置见表 2。

1.5 粉尘运移特性结果分析

通过仿真模拟得到未喷雾状态下风流分布及粉尘粒子分布,其中风流分布如图 3 所示,巷道整体平均风流速度保持在 0.6 m/s 左右。但由于主运巷道内胶带运行速度较大,在胶带表面附近形成 1 m/s 的诱导风流,且方向与进风方向相反。由此也导致了进风风流向巷道顶板方向偏转,且其速度先增大后减小;当其流动到联巷处,受联巷进风影响,速度再次增大,并向主运巷道内的人行道区域偏移。

表 2 边界条件设置

Table 2 Boundary condition settings		
项目	参数	设置
$k-\varepsilon$ 湍流模型	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.25
	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.79×10^{-5}
	扩散系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2.00×10^{-5}
	主巷入口速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.30
	联巷入口速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.25
	主巷出口压力/ Pa	0
	胶带速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.5
	粗糙度参数	0.26
粒子追踪模型	$\rho_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.63×10^{-3}
	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4.0
	平均粒子质量/ kg	5×10^{-12}
	粒子质量标准差/ kg	1×10^{-11}
	曳力	Stokes
	升力	Saffman
	相互作用力	Coulomb

由于联巷进风方向与胶带运输方向相同,一定程度上加快了进风风流速度,当风流在进入主巷道时,与主巷进风风流汇聚,速度增大。同时,由于主巷道与联巷交汇处的转载点采取了半封闭式的落料斗结构,在胶带机头的诱导风流作用下,落料斗内形成平均风流速度约为 0.9 m/s 的涡流区域。

进一步分析运输巷道横断面及纵向空间的速度分布。由 YZ 速度切面可知:转载点后方风流速度明显低于前方风流速度。受胶带运行所产生的诱导风流影响,当其运移到落料口时,在落料口两侧形成小范围的涡流高速区。整体来看,胶带运行所产的诱导风流只能影响胶带上方 0.1 m 范围内的风流,并不会对巷道内的风流产生较大影响。由 ZX 速度切面可知:受诱导风流影响,在胶带机头附近形成小范围的高速区,且速度达到 1 m/s;从 $Y=0.8 \text{ m}$ 到 $Y=3.2 \text{ m}$ 可以看出,机头诱导风流主要影响区域为转载点及主巷人行道区域。由 XY 速度切面可知:在主巷与联巷交汇处风流速度出现明显变化,联巷后方风流速度在 0.8 m/s 以下;而前方人行道区域风流速度增加到 1 m/s 左右。同时可以看出,胶带运行产生的诱导气流只在 $Z=1.5 \text{ m}$ 和 $Z=3.0 \text{ m}$ 处,也就是下部胶带和上部胶带表面,形成较高速度区,其他位置风流速度均保持在 0.5 m/s 以下的。因此,不会对巷道内的风流产生较大影响。

粉尘粒子运移轨迹如图 4 所示,运输巷道内粉尘粒子粒径在 4.56~43.96 μm 之间。 $t=5 \text{ s}$ 时,受胶带机头诱导风流影响,大部分粉尘粒子进入落料斗内,并逐渐沉降在胶带表面;还有部分粒径在

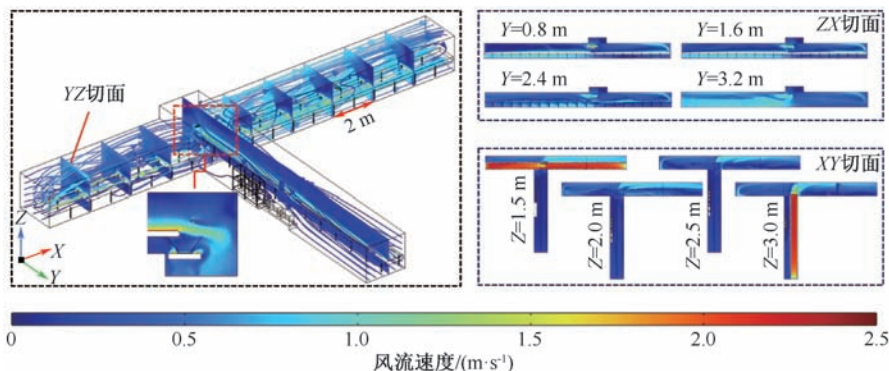


图3 风流分布

Fig. 3 Airflow distribution

25 μm 以下的粉尘粒子受进风风流影响有向主巷人行道区域扩散的趋势。 $t=10\text{ s}$ 时,落料斗内粒径在 35 μm 以上的粉尘粒子受自身重力和机头诱导风流影响而向下沉积,并受到下部运输巷道所产生的诱导风流影响而向巷道后方扩散;而粒径在 25 μm 以下的粉尘粒子进一步向人行道内扩散,且扩散范围达到 7 m; $t=15\text{ s}$ 时,粉尘粒子持续受到进风风流的驱动,更多的粉尘粒子扩散到胶带上方,且有少量粒径较大的粉尘粒子沉降在胶带表面,人行道内也聚集了大量粒径在 25 μm 以下的粉尘粒子,此时扩散范围达到 11 m; $t=20\text{ s}$ 时,人行道处粉尘粒子扩散范围达到 17 m,沉降在胶带表面的粉尘粒子,受到胶带运行所产的诱导气流影响,沿胶带运行方向扩散,而粒径较小的粉尘粒子则在胶带上方悬浮。

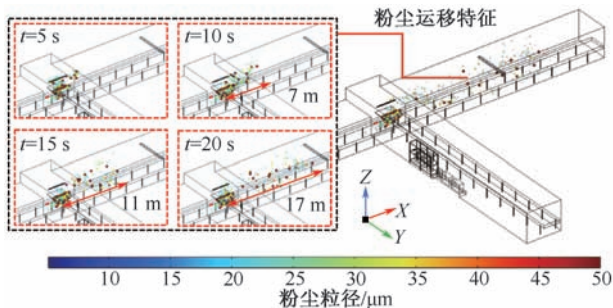


图4 粉尘粒子运移轨迹

Fig. 4 Dust particle migration trajectory

1.6 多断面喷雾仿真结果分析

基于上述模拟分析所得出的粉尘运移特性,有针对性地提出多断面喷雾降尘技术。通过仿真模拟,得到喷雾状态下风流分布及水雾粒子分布特征。

喷雾状态下巷道风流分布如图 5 所示,由图 5 可以看出,在喷雾区域内风流变化明显,这是因为喷雾装置入口速度高达 20.1 m/s,但从喷嘴喷出的瞬

间速度骤然降低到 0.5 m/s 左右。转载点雾幕风流大部分进入落料斗内部,受落料斗内壁阻碍形成涡流。而主巷道内的进风风流与雾幕风流相遇时,在附壁效应下发生偏转,当撞击到下部胶带时,沿胶带运输方向再次发生偏转,且由于胶带的运行速度高于风流速度,这部分风流沿胶带运输方向先增大后减小。进一步分析不同截面下的速度分布,喷雾状态下 YZ 速度切面分布与未喷雾状态下大致相同,仅在雾幕区域出现明显区别。其中,转载点速度切面显示,由喷嘴喷出射流的速度分布呈锥状,且内部速度高于边缘速度。受机头诱导风流影响向下偏转,进入落料斗内部。主巷内的全断面喷雾速度分布显示,胶带上方喷雾受胶带运行影响发生偏移,而人行道区域喷雾受进风风流影响发生偏移。由 ZX 速度切面可知:雾幕区速度较高且分布均匀,由于胶带运行速度较大且方向与进风风流相反,导致喷雾射流在撞击到胶带时向巷道顶板偏转且速度先增大后减小;从 $Y=0.8\text{ m}$ 到 $Y=3.2\text{ m}$ 可以看出,转载点处雾幕区速度逐渐减小更接近巷道内的整体风流速度,而主巷道的喷雾装置对附近风流的影响较为明显。由 XY 速度切面可知:喷雾射流撞击胶带时,胶带表面形成小范围的低速区,且中心速度较低达到 0.2 m/s,外围速度较高达到 1.5 m/s,这是由于喷雾射流是沿竖直喷出,而胶带自身存在水平方向的速度,从而产生卸力作用所导致的。

水雾粒子分布如图 6 所示, $t=5\text{ s}$ 时,在转载点处,由于喷嘴出口速度较高,在喷雾装置附近基本没有水雾粒子,而水雾粒子脱离喷嘴后速度骤然降低至 4 m/s,之后下降趋势逐渐减缓,并以 0.5 m/s 的速度在落料斗内聚集,且少部分水雾粒子受进风风流影响向人行道区域扩散,扩散范围较小。而主巷内,胶带正上方的喷嘴所产生的水雾粒子以 4 m/s

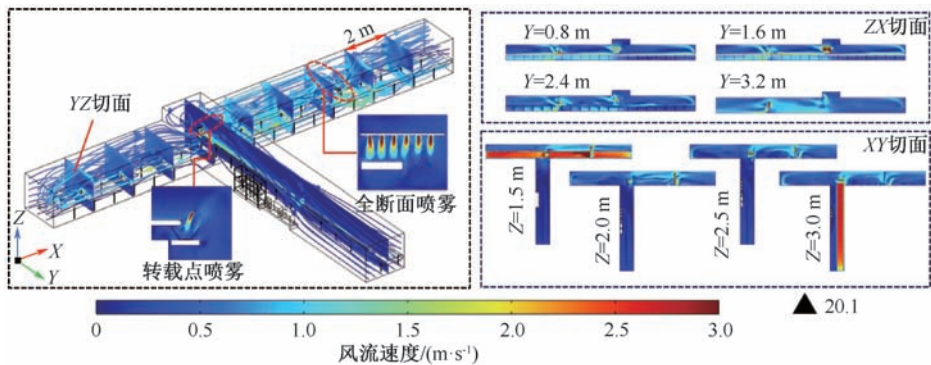


图 5 喷雾状态下风流分布

Fig. 5 Airflow distribution under spray condition

的速度运移到胶带表面,少部分水雾粒子在接触瞬间向巷道顶板偏移,而大部分水雾粒子沿胶带运输方向移动。人行道上方喷嘴垂直喷出水雾粒子受进风风流影响向前方偏移。此时,主巷内的全断面喷雾扩散范围达到 12 m。 $t=10$ s 时,水雾粒子进一步扩散,转载点处更多的水雾粒子进入人行道区域;主巷内,沿胶带运行方向的那部分水雾粒子继续向联

巷处扩散,而向前扩散的水雾粒子扩散范围进一步扩大达到 17 m。 $t=15$ s 时,转载点机头处基本被水雾粒子覆盖,主巷内的水雾粒子已扩散到巷道末端,扩散距离达到 24 m。 $t=20$ s 以后水雾粒子基本饱和,对转载点处实现了完美覆盖,且主巷内的全断面雾幕成功覆盖整个断面,可以有效拦截并捕集人行道区域和胶带上方粉尘。

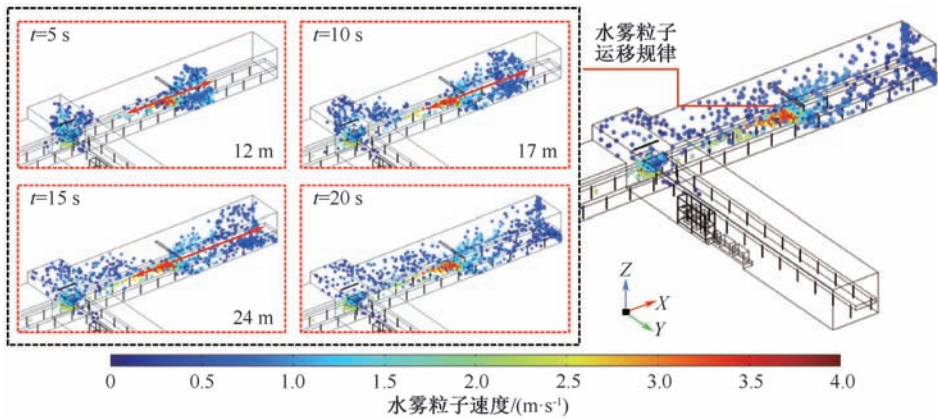


图 6 水雾粒子运移轨迹

Fig. 6 Migration trajectory of water mist particles

2 喷雾特性试验研究

2.1 喷雾特性测试试验平台

基于上述数值仿真的分析,针对超音速雾化喷嘴的抗风性能及降尘效果进行试验研究,试验平台如图 7 所示。超音速雾幕抗风性试验平台共分成 3 个部分:第 1 部分是由喷雾支架及 6 个超音速雾化喷嘴组成,并通过高压储气罐及供水箱为其提供水源及动力;在走廊内悬挂喷雾支架,以模拟胶运巷道的真实情况。喷雾支架长 2.5 m,距地面高 3.5 m;第 2 部分为变频风机,通过调整风机频率,使走廊内形成不同速度的干扰风流;第 3 部分为数据

收集,对比不同干扰风流下超音速雾幕状态。而降尘试验平台分为 3 个阶段:第 1 阶段为发尘阶段,利用空气压缩机为发尘装置提供动力,在防尘箱内形成稳定尘源;第 2 阶段为控尘阶段,利用储气罐及供水箱为超音速雾幕提供水源及动力,以形成稳定雾幕;第 3 阶段为数据收集阶段,利用粉尘采样器进行粉尘采样,得到其降尘效果。

2.2 喷雾抗风性能试验分析

调整风机频率为 58、101 和 201 Hz,对应的风速分别为 0.2、0.6 和 1.0 m/s。在走廊内测试无干扰风流及 3 种干扰风速下超音速雾幕状态,测试结果如图 8 所示。无干扰风流下,雾幕可以完

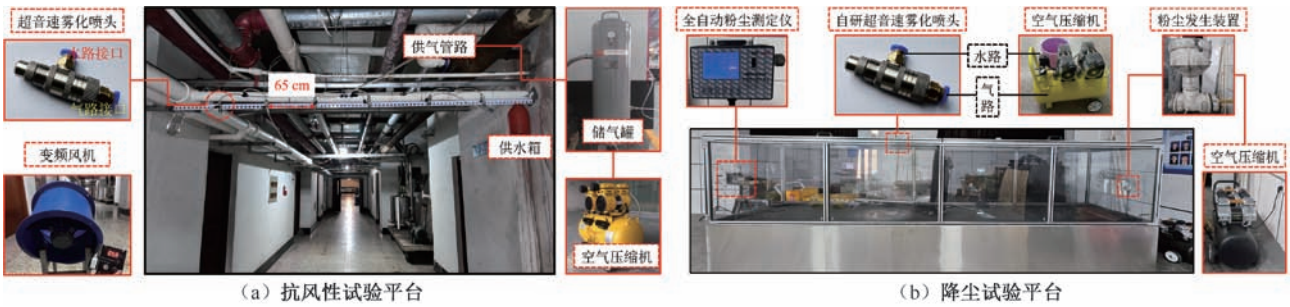


图7 试验平台
Fig. 7 Test platform

全覆盖整个断面,有效射程达到 3.2 m;当速度达到 0.2 m/s 时,雾幕向干扰风流方向发生轻微偏移,且垂直射程缩短到 3 m,粉尘难以在雾幕偏移处逃逸;当速度达到 0.6 m/s 时,雾幕偏移加剧,但仍能对喷雾装置下方 2.7 m 范围内进行有效的覆盖;当速度增加道 1.0 m/s 时,雾幕偏移更加明显,但雾幕上半部分分布均匀。随着干扰风速的增

加,雾幕偏移越明显。由于巷道内粒径较小的粉尘受风流影响较大,呈曲线向上移动,而粒径较大的粉尘受自身重力的影响向下沉淀且偏移的距离较短。因此,即使当干扰风速增加到 1.0 m/s 时,雾幕仍能保持较好的控尘效果。且在 6 枚超音速雾化喷头布置下,消气量和耗水分别达到 25.2 m³/h 和 559.8 mL/min。

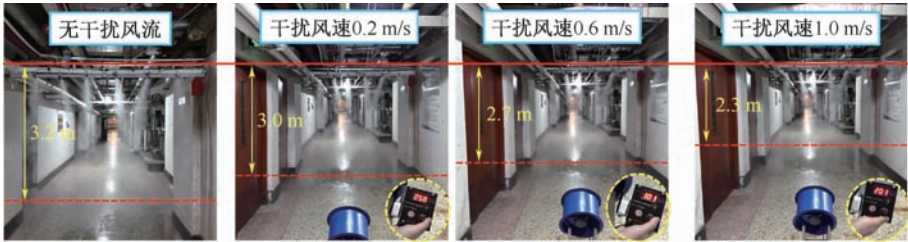


图8 抗风性试验结果
Fig. 8 Wind resistance test results

2.3 喷雾降尘试验分析

喷雾降尘试验在防尘箱内进行,试验所使用煤样为经粉碎、过筛处理后得到的 150 μm 以下的煤粉。将粉尘发生装置的产尘速率调至 160 g/min,从发尘开始每 30 s 记录 1 次,分别记录超音速喷雾及自然降尘状态下的粉尘分布情况,如图 9 所示,由图 9 可以看出,自然降尘状态下,煤尘受自身重力逐渐沉降,因此,自上而下呈现出由浅至深的分层现象。超音速喷雾状态下,煤尘经过超音速雾幕水雾粒子的捕集沉降,逐渐被沉降到防尘箱底部。

测试粉尘质量浓度时,采用粉尘采样-烘干-称量的方法,得到各时间点下的粉尘质量浓度,并绘制出粉尘质量浓度变化曲线,如图 10 所示。自然降尘状态下,仅依靠煤尘自身重力沉降,降尘效率较低。随着时间的延续,全尘及呼尘质量浓度呈现小幅递减趋势。在发尘结束后的 120 s 内全尘及呼尘质量浓度由最初的 512.12 和 50.94 mg/m³ 降低到 319.72 和 33.46 mg/m³。而超音速雾幕状态下,全

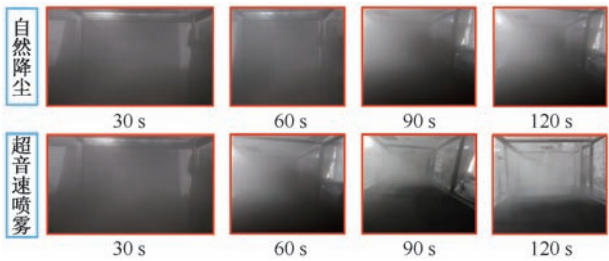


图9 降尘试验结果
Fig. 9 Dust suppression test results

尘及呼尘质量浓度均呈递减趋势,且最初的 30 s 内降尘效率的增长最快,这是由于喷雾装置开启时出口速度较大之后速度衰减较快所导致。在发尘结束开启喷雾的 120 s 内全尘和呼尘质量浓度由最初的 498.34 和 42.31 mg/m³ 降低到 75.19 和 8.23 mg/m³,降尘效率分别为 84.91%和 80.55%。

综上所述,超音速喷雾的雾幕范围大,抗风性强,持续降尘效果显著,特别是针对粒径较小的呼吸性粉尘也能起到显著效果。

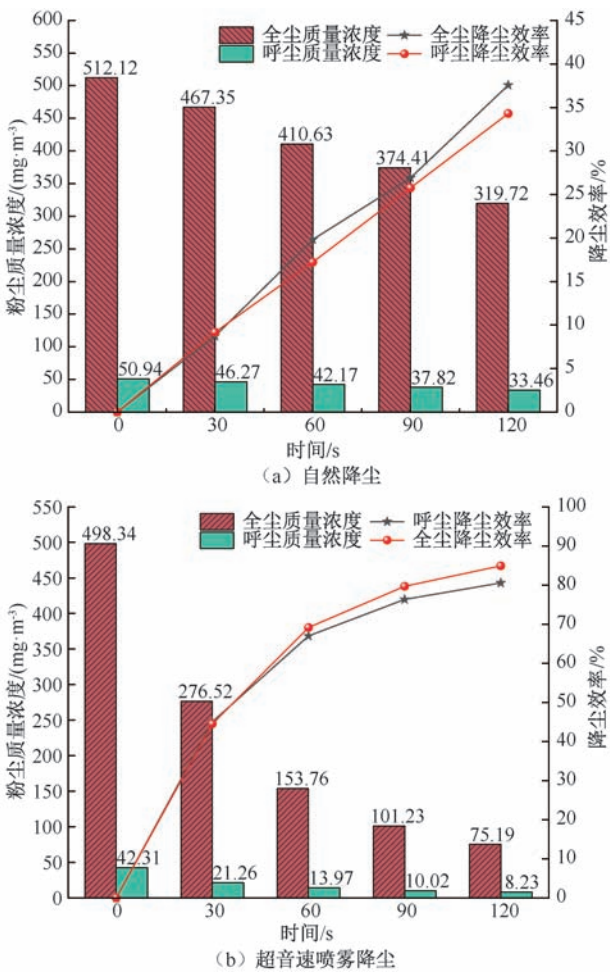


图 10 不同时刻下降尘效率

Fig. 10 Dust removal efficiency at different times

3 多断面喷雾降尘技术现场应用

为进一步验证多断面喷雾降尘的实用性,在棋盘井煤矿运输北大巷进行现场试验。经测量,棋盘井煤矿运输北大巷平均风速为 0.3 m/s,且巷道内呼吸性粉尘始终保持悬浮的状态难以沉降。根据现场粉尘污染的实际情况,合理布置多断面降尘系统,如图 11 所示。转载点喷雾装置由 4 枚超音速喷头组成且正对联巷胶带,并通过万向底座固定以达到调整喷嘴角度的目的。当有煤流经过时,触控传感器接收信号开启喷雾装置,此外,当粉尘质量浓度超限时也会开启喷雾装置。而全断面喷雾装置由 6 个超音速喷头构成,垂直于巷道底板高 3.5 m,通过红外传感器以控制装置的启停。

为测试多断面喷雾降尘技术的降尘效果,在人行道处呼吸带高度布置 5 个采样点,具体测点布置如图 12 所示,A 和 B 点为转载点雾幕前后 2 m 位置,C 点为联巷前 7 m 位置,D 和 E 为全断面雾幕前

后 2 m 位置。采用最精确的粉尘采样-烘干-称量的方法,选择 AKFC-92A 型粉尘采样器对各测点进行采样,采样流量为 2 L/min,时间设定为 20 min,计算采样平均值^[23]。



图 11 多断面喷雾装置布置

Fig. 11 Arrangement of multi-section spray device

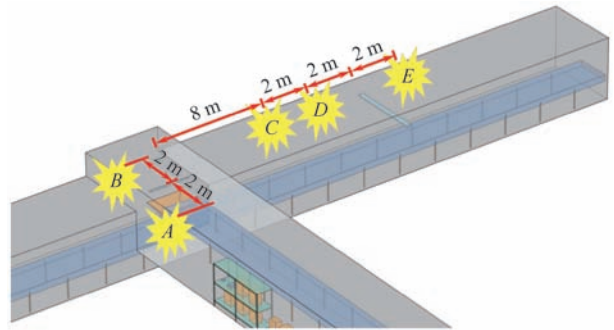


图 12 测点布置

Fig. 12 Arrangement of measuring points

应用前后各测点全尘、呼尘质量浓度及降尘效率见表 3。转载点和主巷道内的全尘质量浓度由之前最高的 70.83 和 58.16 mg/m³ 分别降低至 14.23 和 12.65 mg/m³;而呼尘质量浓度由 26.18 和 20.37 mg/m³ 降低至 5.17 和 4.86 mg/m³;全尘和呼尘最高降尘效率分别为 80.12% 和 83.15%。对比各点的降尘情况可知:喷雾装置产生的雾幕有效的将巷道分成 2 个区域,雾幕后方粉尘粒子难以穿透雾幕,

表 3 降尘效果
Table 3 Dust reduction effect

测点 位置	开启前粉尘质量浓度/(mg·m ⁻³)		开启后粉尘质量浓度/(mg·m ⁻³)		降尘效率/%	
	全尘	呼尘	全尘	呼尘	全尘	呼尘
A	64.29	24.43	15.01	6.95	76.65	71.55
B	70.83	26.18	14.23	5.17	79.91	80.25
C	58.16	20.37	12.65	4.86	78.24	76.14
D	49.58	19.52	10.81	4.15	78.19	78.73
E	43.71	18.05	8.69	3.04	80.12	83.15

因此雾幕前方降尘效率高于后方。

通过在棋盘井煤矿运输北大巷进行现场试验,进一步证明了多断面喷雾降尘技术的实用性和高降尘性,可有效改善煤矿运输巷道的作业环境。

4 结 论

1) 胶运巷道内平均风流速度在 0.6 m/s 左右,且胶带运行所产生的诱导风流速度约为 1 m/s,仅能影响胶带上方 0.1 m 范围内的风流。同时,转载点落料斗内也形成了 0.9 m/s 的涡流区。巷道内风流驱动粉尘粒子运动,自产尘开始 20 s 后,扩散范围达到 17 m,且机头处聚集粉尘最多,粒径较小的粉尘受进风风流影响悬浮于人行道区域,而粒径较大的粉尘粒子则向巷道底板及胶带表面沉积。

2) 多断面超音速雾幕开启状态下,巷道内风流发生改变,喷雾射流最高为 18.8 m/s,脱离喷嘴骤

然降低到 4 m/s 左右,且持续降低。开启喷雾 20 s 后,水雾粒子基本饱和,对转载点处实现了全覆盖。同时,主巷内的全断面雾幕成功覆盖整个断面,可以有效拦截并捕集人行道区域和胶带上方粉尘。

3) 抗风性试验显示,随着干扰风流速度的增加,超音速雾幕偏移越多,而胶运巷道中风流普遍为 0.6 m/s,在此状态下,雾幕的垂直有效射程仍到达 2.7 m;降尘试验显示,在超音速雾幕水雾粒子的捕集沉降作用下,粉尘逐渐被沉降到防尘箱底部,全尘和呼尘降尘效率分别到达 84.91%和 80.55%。

4) 棋盘井煤矿胶运北大巷现场应用显示,转载点全尘和呼尘最高降尘效率分别为 79.91%和 80.25%,主巷道断面雾幕处最高降尘效率分别 80.12%和 83.15%,且雾幕前方降尘效率高于后方。进一步验证了该技术的有效性。

参 考 文 献

[1] NIE Wen, LIU Fei, PENG Huitian, et al. Optimization of wind-and-water coordinated dust reduction device for coal mine return air-way based on CFD technology[J]. Powder Technology, 2024, 444: DOI:10. 1016/j. powtec. 2024. 119932.

[2] CAO Yong, XIAO Yang, WANG Zhenping et al. Recent progress and perspectives on coal dust sources, transport, hazards, and controls in underground mines[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 187: 159-194.

[3] 王静东. 煤矿粉尘危害及防控治理技术研究进展[J]. 煤化工, 2024, 52(4): 53-56,72.

WANG Jingdong. Research progress on coal mine dust hazard and its prevention and control technology [J]. Coal Chemical Industry, 2024, 52 (4): 53-56,72.

[4] 中国煤炭协会. 2023 煤炭行业发展年度报告[R], 2024.

[5] 姚吉荣. 煤矿粉尘防治措施探究[J]. 能源与节能, 2024(5): 145-147.

YAO Jirong. Exploration of coal mine dust prevention and control measures[J]. Energy and Energy Conservation, 2024(5): 145-147.

[6] HOU Jun, LI Shihang, HU Shuda, et al. Research and application of self-powered induction spray dust removal system for long-distance belt conveying in underground coal mines[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 176: 131-139.

[7] CHENG Yu, YU Haiming, XIE Sen, et al. Study on the coal dust deposition fraction and site in the upper respiratory tract under different particle sizes and labor intensities[J]. Science of the Total Environment, 2023, 868: DOI:10. 1016/j. scitotenv. 2023. 161617.

[8] QIN Na, YU Haiming, WANG Peibei, et al. Study on multiple influence mechanism of airflow-dust-gas coupling diffusion under large vortex flow technology[J]. Building and Environment, 2024, 257: DOI:10. 1016/j. buildenv. 2024. 111538.

[9] 徐婧.《2023 年我国卫生健康事业发展统计公报》发布[J]. 中医药管理杂志, 2024, 32 (17): 19.

[10] 陈玉涛. 煤矿胶带运输巷道综合降尘技术[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44 (4): 796-804.

- CHEN Yutao. Comprehensive dust reduction technology of coal mine belt transport tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(4): 796-804.
- [11] 薛文涛,侯茂森,霍中刚,等. 带式输送机转载点气水喷雾降尘效果试验研究[J]. 煤矿安全,2022,53(7):14-19.
- XUE Wentao, HOU Maosen, HUO Zhonggang, et al. Study on dust removing effect of air-water spraying nozzle at transfer point of belt conveyer[J]. Safety in Coal Mines, 2021,31(11):93-99.
- [12] 荆德吉,魏德宁,马明星,等. 胶带运输巷粉尘运移及气动喷雾降尘技术[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 93-99.
- JING Deji, WEI Dening, MA Mingxing, et al. Study on dust movement in belt transportation roadway and pneumatic spray dust control technology[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 93-99.
- [13] WANG Chengyan, FANG Le. An analytical scaling law model framework for short-time dust emission from belt conveyor[J]. Advanced Powder Technology, 2024, 35(10): DOI:10.1016/j.apt.2024.104613.
- [14] 马明星,荆德吉,张天,等. 煤矿胶带转载点多径向旋流卷吸除尘技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4261-4268.
- MA Mingxing, JING Deji, ZHANG Tian, et al. Multi-radial cyclone suction dust removal technology at coal mine belt transfer points[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4261-4268.
- [15] 刘鸿威. 三道沟煤矿胶带转载点粉尘运移及气动雾幕控尘技术研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2023.
- LIU Hongwei. Research on dust transport and pneumatic fog screen dust control technology at the tape transfer point of sandaogou coal mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [16] 张天,荆德吉,葛少成,等. 超音速汲水虹吸气动雾化降尘技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3912-3921.
- ZHANG Tian, JING Deji, GE Shaocheng, et al. Supersonic siphon suction water aerodynamic atomization in dust removal[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12):3912-3921.
- [17] REN Shaishuai, JING Deji, GE Shaocheng, et al. Research and development of vortex suction dedusting device based on multi-factor horizontal response surface method[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 442: DOI:10.1016/j.jclepro.2024.140916.
- [18] 蒋卓. 三道沟煤矿综采工作面喷雾联合负压卷吸控尘技术研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2023.
- JIANG Zhuo. Study on dust control technology of spray combined negative pressure entrainment in fully mechanized face of sandaogou coal mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [19] JING Deji, MA Jichuang, DONG Zhe, et al. Research on factors affecting the spread of dust pollution in conveyor belt workshop and research on wet dust reduction technology[J]. PloS One, 2024, 19(2): DOI:10.1371/journal.pone.0299328.
- [20] 佟林全,徐洋,王雪涛,等. 煤矿井下输煤转载点煤尘污染规律的 CFD-DEM 数值研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 188-192,200.
- TONG Linquan, XU Yang, WANG Xuetao, et al. CFD-DEM numerical study on coal dust pollution law of coal transfer point in underground coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 188-192,200.
- [21] 陈向军,叶向阳,李毅博,等. 综采工作面呼吸性粉尘空间分布特征及运移规律[J]. 煤矿安全, 2025, 56(1): 62-71.
- CHEN Xiangjun, YE Xiangyang, LI Yibo, et al. Spatial distribution and migration law of respirable dust in fully mechanized mining face [J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(1): 62-71.
- [22] 田卫,马睿浩,关小杰,等. 旧工业建筑再生施工粉尘运移特性数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(1): 231-238.
- TIAN Wei, MA Ruihao, GUAN Xiaojie, et al. Numerical simulation of dust suppression characteristics in regeneration of old industrial buildings[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1): 231-238.
- [23] 张天,穆新升,陶爽,等. 新型超音速气动雾化喷嘴雾化特性及降尘性能[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 239-246.
- ZHANG Tian, MU Xinsheng, TAO Shuang, et al. Research on atomization characteristics and dust reduction performance of new supersonic pneumatic atomization nozzles[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 239-246.



作者简介: 荆德吉 (1984—),男,辽宁抚顺人,博士,教授,博士生导师,主要从事矿井通风与粉尘防治理论及技术研究。E-mail: jingdeji@lntu.edu.cn。