风速对露天矿台阶爆破粉尘运移规律影响研究*

隋沛言[1],柯丽华[1],张光权[1],王其虎[1],黄兆云[2]

(1.武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;
2.湖北景深安全技术有限公司, 湖北 宜昌市 443000)

摘要:针对露天矿爆破粉尘治理成效不佳的问题,采用Fluent软件建立了露天矿台阶爆破流场几何模型,探究了不同风速条件下台阶爆破流场分布特征对爆破粉尘运移规律的影响,以确定水雾拦截技术的最佳爆破粉尘捕尘时间、水袋位置和水袋延迟激发时间。研究结果表明:风流在台阶处发生后台阶流动,形成高速湍流区和低速湍流区;随着风速增大,高速湍流区和低速湍流区的影响范围扩大,且贯通整个流场所需时间缩短,同时形成与台阶同高的结构涡流;风速一定时,在爆破冲击力、重力和稳定风流的综合影响下,爆破粉尘在短时间内发生显著的垂直向上与水平移动,随后其垂直向上移动受到制约,但其水平移动距离显著增加;当风速为2.4~4.4 m/s时,粉尘在爆破后4 s后的垂直移动和在爆破后6 s后的水平移动显著,爆破后第4 s的粉尘垂直移动距离约为30 m,爆破后第6 s的粉尘水平移动距离为22.6~23.5 m,因此,确定最佳捕尘时间为爆破后4~6 s,确定水袋的最佳位置为距离台阶坡底线15~24 m,水袋延迟激发时间为$\Delta t = T_f - T_s$。

关键词:露天矿;台阶爆破;粉尘运移规律;水雾拦截技术;数值模拟

中图分类号:TD714 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0143-07

Influence of Wind Speed on the Dust Migration Law of Bench Blasting in Open-Pit Mine

Sui Peiyan[1], *Ke Lihua*[1], *Zhang Guangquan*[1], *Wang Qihu*[1], *Huang Zhaoyun*[2]

(1.School of Resource and Environmental Engineering,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;
2.Hubei Jingshen Safety Technology Co., Ltd., Yichang, Hubei 443000, China)

Abstract: To address the issue of poor efficiency of dust control in open-pit blasting, a geometric model of the flow field for bench blasting in open-pit mine was established using Fluent software. The influence of flow field distribution characteristics under different wind speeds on the migration law of blasting dust was studied, aiming to determine the optimal dust capture time, water bag position, and delayed activation time for water mist dust suppression technology. The results indicate that the flow develops a back-step flow pattern at the bench, forming distinct zones of high-speed and low-speed turbulence. As wind speed increases, the influence range of the high-speed and low-speed turbulent zones expands, and the time required for the flow field to become fully developed decreases. Concurrently, a structural vortex with a height matching the bench is formed. When the wind speed is constant, the blasting dust has a significant upward vertical movement and obvious horizontal movement in a short period of time, subsequently, the vertical upward movement becomes constrained while the horizontal travel distance increases substantially under the comprehensive influences of blasting impact, gravity and stable airflow. Within the wind speed range of 2.4 m/s to 4.4 m/s, the dust demonstrates prominent vertical movement within the first 4 seconds of blast and significant horizontal movement after 6 seconds of detonation. The vertical movement distance of the dust at the 4th second after blasting is about 30 m, and the horizontal movement distance of the dust at the 6th second after blasting is 22.6-23.5 m. Consequently, the optimal dust capture time is determined to be 4-6 s after blasting, and the optimal position of the water bag is determined to be 15-24 m from the bottom line of the bench slope, and the delayed excitation time of the water bag is $\Delta t = T_f - T_s$.

Key words: Open-pit mine, Bench blasting, Migration patterns of dust, Water mist dust suppression technology, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2025-07-21
基金项目:湖北省技术创新计划项目(2024BCB102)
作者简介:隋沛言(2000—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要从事矿山粉尘方面的研究。E-mail:spy0022@163.com
通信作者:柯丽华(1974—),女,湖北鄂州人,博士,教授,主要研究方向为绿色矿山建设及系统优化。E-mail:kelihua@wust.edu.cn

0 引言

露天开采的主要工艺过程包括穿孔、爆破、采装、运输和排岩等作业。各作业环节产生的粉尘均会对作业人员身体健康、设备运行及周围环境产生不利影响[1-3]。其中,爆破作业产生的粉尘量大[4],具有瞬时性、浓度高、扩散快、污染影响范围广及聚集分布复杂不规则等特点,故粉尘治理难度大[5],传统治理方法效果不佳。爆破作业具有危险性,粉尘浓度测点通常布设在警戒范围之外,导致测量结果难以客观反映爆破区域内的粉尘运移规律。此外,风速变化是影响爆破粉尘运移的关键因素,直接关系到爆破粉尘治理方案的制定。因此,亟须探究风速变化对爆破区域内粉尘运移的影响,为制定爆破粉尘的有效治理方案提供决策依据。

当前,常采用注水预湿、喷洒抑尘剂、喷雾除尘、通风除尘及水雾拦截降尘等方法治理爆破粉尘。其中,水雾拦截技术日益受到关注。为合理确定水雾拦截的相关参数并提高降尘效果,通常采用现场测量方法和数值模拟方法研究爆破粉尘运移规律。管仁生等[6]根据现场影像资料分析了爆破粉尘扩散特征,并通过现场试验与采样点浓度测量,探究了炸药系数对水雾覆盖面积、持续时间及抛洒高度的影响,优化确定炸药系数为 0.4～0.6 g/L 时,水雾降尘率可达 84%以上。刘坚等[7]基于粉尘污染扩散理论,利用粉尘采样器测量爆区下风向典型测点的粉尘浓度和沉降量,采用函数拟合建立了炸药量、水封高度与爆破粉尘排放量的关系,验证了水封爆破降尘的有效性,为爆破降尘和优选爆破参数提供了依据。郝成磊等[8]利用高速摄影资料分析爆破粉尘动态扩散状态,通过现场试验方法优化确定了多排水袋靠近临空面坡底的水平距离及起爆时间,结合高速摄影与采样点粉尘浓度测量值的变化,分析了缅甸莱比塘矿山大规模露天爆破的降尘效果,水雾降尘方式使粉尘浓度降低了 43.0%～49.5%,炮烟体积降低了 50%以上。郭尧[9]考虑了爆破粉尘扩散的模糊性和随机性,引入高斯扩散模型,采用 MATLAB 和 Fluent 软件模拟爆破粉尘扩散规律,分析了爆破粉尘扩散影响范围,进而确定了水袋位置、水袋长度与水袋炸高等参数,粉尘浓度降低了 27.2%。郭尧等[10]采用数值模拟方法,研究了路堑深孔爆破粉尘动态扩散特性,考虑了不同粒径粉尘的时空分布、沉降距离及最大垂直运移距离等,确定了水雾高度为 14 m、水雾产生时间不迟于主爆区起爆时间 1.5 s。葛少成等[11]针对露天矿爆破水泡泥降尘效果不佳的问题,采用数值模拟方法研究了爆破粉尘运动轨迹、粉尘浓度的时空分布状态和爆破后的水泡泥水雾迹线,优化确定水炮泥与固体炮泥的最佳填塞等效长度比,除尘效率达 64%以上。马超等[12]采用 Fluent 软件模拟爆破粉尘动态运移和爆炸水雾场的动态发展,通过分析粉尘运移、水平距离与水雾场形态及影响范围的相互关系,确定了水袋的最佳位置和水袋激发延时,粉尘浓度可降低 40.9%以上。杨年华等[13]设计了爆破水雾降尘模型,对影响水袋爆炸成雾的因素进行了分析,确定了炸药量、水袋位置等相关参数,为爆破水雾降尘提供了理论依据。综上,现有研究多借助高速摄影或数值模拟方法探究爆破粉尘运移规律,侧重分析炸药系数、炸药量、水封高度、水袋位置及起爆时间等参数对水雾降尘效果的影响,并制定了水雾降尘技术方案。然而,上述研究忽略了风速变化对粉尘运移规律的影响研究,缺乏对风流流场分布特征及粉尘运移影响的研究,尚未依据风流流场特征考虑水雾运移影响及水袋布置参考,亦未针对爆破粉尘运移动态与水雾场形成发展状态建立优化水雾拦截技术参数的基本思路,导致爆破粉尘降尘效果未能达到最佳。

为此,本研究采用 Fluent 软件建立露天矿台阶爆破流场几何模型,探究不同风速条件下流场分布特征与爆破粉尘运移规律,通过分析风流流场分布特征对粉尘运移的影响,研究爆破粉尘垂直移动距离和沿下风向水平移动距离分别随风速和时间变化的特点,考虑爆破粉尘运移动态和水雾场形成发展状态的相互关联,建立优化爆破粉尘水雾拦截方案关键参数的基本思路。研究可为确定水雾拦截方案中的最佳爆破粉尘捕尘时间、最佳的水袋位置和水袋延迟激发时间提供重要的决策依据。

1 几何模型构建

1.1 几何模型构建及网格划分

为分析风速对爆破粉尘运移的影响,采用 Space Claim 软件构建露天矿台阶流场三维几何模型,如图 1 所示。根据矿山基本信息对台阶流场进行适当简化,设台阶流场计算域长、宽、高分别为 100 m、200 m 和 50 m;台阶高度 12 m,坡面角为 60°。将模型左侧设为风流入口,风从流场左侧吹入。台阶爆破区域长 100 m、宽 15 m,台阶上部平

盘爆区及台阶坡面设为粉尘颗粒速度入口,粉尘从爆破区域射入流场,入射方向分别垂直台阶上部平盘和台阶坡面。以爆区横向中轴线与台阶坡底线的交点为原点,建立 $OXYZ$ 三维坐标系,其中 X 轴为沿风流方向,Y 轴为沿台阶坡底线,Z 轴垂直于水平面。

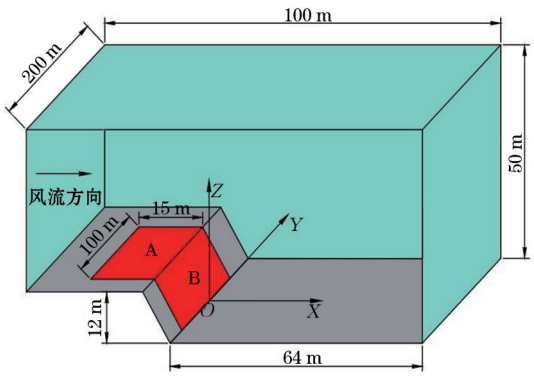


图 1 流场几何模型

Fig.1 Geometric model of flow field

为精细解析台阶附近及重点研究区域的风流流场分布特征对爆破粉尘运移的影响,对上述几何模型进行网格划分。通过对流场边界层及研究区域实施局部加密处理,可精准捕捉边界层内的速度梯度与湍流脉动等细节信息。经检验,网格单元质量为0.94,表明网格质量较好,满足模拟计算的精度要求。

1.2 边界条件设置

结合露天矿现场风速实测数据及季节风出现频次,该矿山所处地区季节风主要为 2～3 级,风速为 1.6～5.4 m/s。选取二级风和三级风的中值,确定流场入口风速为 2.4 m/s、3.4 m/s 及 4.4 m/s。

为更好地模拟爆破产生的高雷诺数瞬态流场,有效表征粉尘运动与湍流脉动的相互作用,同时兼顾计算效率并充分反映爆破粉尘的复杂流场特性,采用 RNG k-ε 湍流模型求解爆破粉尘运移规律。参照相关文献资料,确定模拟研究所需的求解器类型、基本参量和粉尘颗粒粒径等参数(见表 1)。

表 1 数值模拟参数设置

Table 1 Numerical simulation parameter setting

求解器类型	湍流模型	剪切壁面	壁面函数	收敛标准	离散格式	湍流扩散模型	风流速度入口/(m/s)
压力基求解器	RNG k-ε 模型	无滑移	EWF	1×10^{-6}	二阶迎风式	随机轨道模型	2.4,3.4,4.4
湍流强度/%	湍流黏度比	颗粒速度入口/(m/s)	直径分布	质量流率/(kg/s)	颗粒粒径/μm		分散系数/(m/s)
5	10	5	Rosin-Rammler	4	1(最小)、10(平均)、100(最大)		9.8

2 风速对露天矿台阶风流流场分布特征影响

为探究不同风速条件下露天矿台阶爆破粉尘的运移规律,需要分析台阶风流流场分布特征。在风速分别为 2.4 m/s、3.4 m/s、4.4 m/s 的条件下,对流场进行模拟,分析风流流场随风速变化和时间变化的动态演化特征,分别绘制不同风速下流场中心 $Y=0$ 界面处(爆破区域中心处)第 1 秒、上下两侧风流即将分离时和风流刚抵达研究区域右边界时的风速云图和风流分布矢量图,如图 2 至图 3 所示。

由图 2 和图 3 可知,风流以一定速度进入流场,流经台阶时因横断面突然增大而产生分离,形成速度不同的上、下两侧风流,形成自由剪切层[14]。在持续稳定风流作用下,上侧风流沿风流方向加速运动,于台阶上部平盘某一高度以上形成高速湍流区,如图 2 中红色区域(颜色标识见电子版,后同)。自由剪切层随风流向前发展,形成封闭回流区,区内存在几乎与台阶同高的顺时针旋转结构涡流,如图 3 所示。下侧风流受封闭回流区影响,自台阶坡面及角部开始,沿 X 轴一定范围内形成高度沿程逐渐递增的低速湍流区,如图 2 中深蓝色区域。上、下两侧风流分别流经高速湍流区和低速湍流区之后汇聚,流速逐渐趋于平稳。

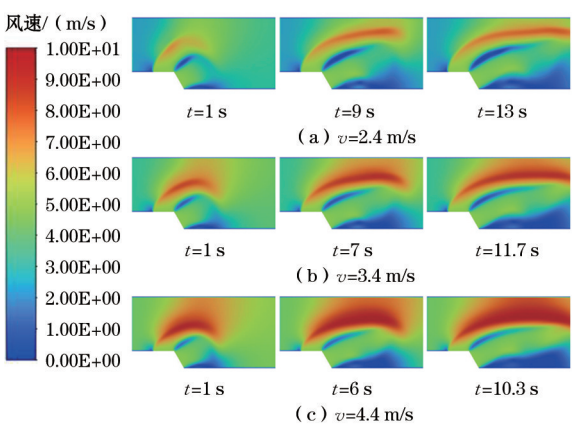


图 2 风速云图

Fig.2 Wind speed cloud diagrams

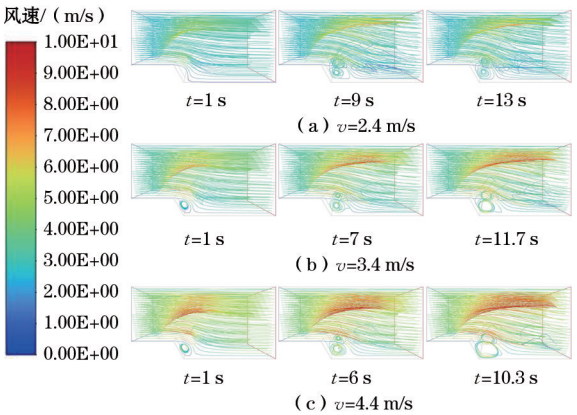


图 3 风流矢量图

Fig.3 Wind flow vector diagrams

随着风速增大及时间延长,高速湍流区的长度和高度均增大,低速湍流区沿流向的长度与高度亦逐步增加,两区影响范围相应扩大。随风速增大,高速与低速湍流区贯通整个研究区所需的时间越短。当风速分别为 2.4 m/s、3.4 m/s 及 4.4 m/s 时,风流自爆破后分别于第 13 s、11.7 s 及 10.3 s 流出研究区域。结构涡流的影响范围为台阶下坡底线处直径为 12 m 的圆形区域范围。

3 露天矿台阶爆破粉尘运移规律

为分析风流场对爆破粉尘运移的影响,考虑爆破粉尘扩散特点,模拟了在 2.4 m/s、3.4 m/s 及 4.4 m/s 的 3 种风速条件下,露天矿台阶爆破粉尘在不同时刻的空间分布状态,以探究风速对爆破粉尘运移的影响。

3.1 风速一定时爆破粉尘运移规律

风速一定时,露天矿台阶爆破粉尘运移呈现特定规律。以 3.4 m/s 风速为例,粉尘从喷出至沿下风向水平移动至研究区域的动态变化过程如图 4 所示。

由图 4 可知,当风速为 3.4 m/s 时,爆破粉尘运移呈现以下规律:爆破发生后,A 区与 B 区粉尘颗粒分别垂直台阶上部平盘和台阶坡面的射入流场,并在爆破冲击力和稳定风流的共同作用下,同时发生垂直向上与沿下风向水平移动;爆破发生后的第 4 s,大部分粉尘在低速湍流区内运移,A 区粉尘在爆炸冲击力的作用下快速上升至高速湍流区内,并在稳定风流作用下发生水平位移,但其水平位置相对于 B 区粉尘存在一定滞后;在爆破发生后的第 4 s 至第 11.7 s,受高速与低速湍流区影响,粉尘云团快速上升,上方少量粉尘云进入高速湍流区内,如爆破后第 7 s 时,高速湍流区高度为 22.1～40.8 m,粉尘分布高度为 0～36.6 m,在稳定风流的持续影响下沿下风向加速水平移动,下方大部分粉尘云团在低速湍流区内产生相对缓慢的水平移动;爆破后的第 7 s 时,上、下两部分粉尘云团的相对水平距离为 0。随后,在稳定风流、高速湍流区、低速湍流区的共同作用下,上方小部分粉尘云团超前下方大部分粉尘云团的水平移动距离加大,并在第 11.7 s 时运移到达研究区域边界处。

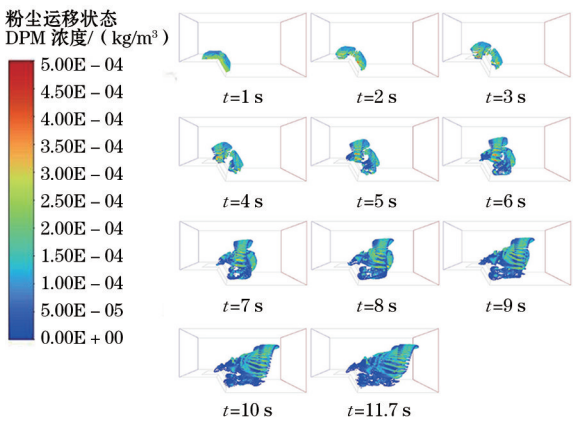


图 4 v=3.4 m/s 条件下不同时刻粉尘运移状态特征

Fig.4 Characteristics of dust migration status at different times (v=3.4 m/s)

综上,露天矿台阶爆破粉尘在风速一定时的运移规律如下:风速一定时,爆破粉尘在爆破冲击力作用下快速垂直上升,并在稳定风流影响下沿着下风向水平移动;风速为 3.4 m/s 时,在爆破第 4 s 后,爆破粉尘进入高速湍流区,上方小部分粉尘云团比在低速湍流区的下方大部分粉尘云团水平移动快。

3.2 风速变化对爆破粉尘运移的影响

基于露天矿台阶爆破粉尘在风速一定时的运移规律,分析风速变化对爆破粉尘运移的影响。研究风速分别为 2.4 m/s、3.4 m/s、4.4 m/s 的条件下,粉尘在不同扩散时间的时空分布状态。考虑爆破粉尘在高速湍流区和低速湍流区内运移的相对位置变化情况,图 5 展示爆破后第 1 s、上方小部分粉尘云团与下方大部分粉尘云团之间的相对水平距离为 0、粉尘运移至研究区域边界处三个特征时刻的粉尘分布状态。

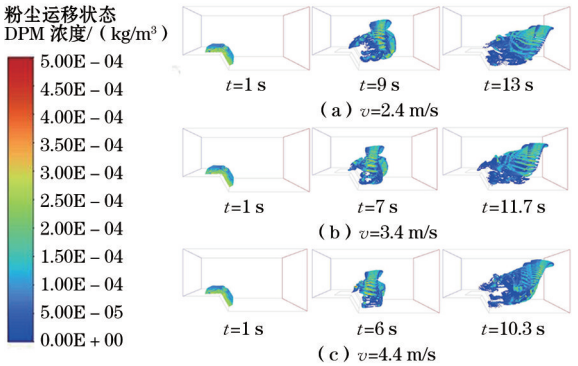


图 5　露天矿台阶爆破粉尘模拟结果

Fig.5　Simulation results of dust generated by bench blasting in open-pit mine

从图 5 可以看出，当风速为 2.4 m/s、3.4 m/s、4.4 m/s 时，由 A 区进入的粉尘在爆破后就进入高速湍流区，并分别在第 9 s、第 7 s 及第 6 s 时，上方小部分粉尘云团与下方大部分粉尘云团之间的相对水平距离为 0；随后，上方粉尘云团分别在第 13 s、第 11.7 s 及第 10.3 s 时，运移到达研究区域边界处。

为确定爆破粉尘的最佳捕尘时间、水袋最佳位置和水袋最佳起爆时间等参数，需研究爆破粉尘水平移动和垂直移动的规律。本研究定义爆破粉尘水平移动距离 L 为粉尘云团在下风向外边界线距台阶坡底面的距离；爆破粉尘垂直移动距离 H 为爆破粉尘云团上边界距离台阶下部平盘的距离。爆破粉尘移动距离随时间变化的规律如图 6 所示。

从图 6 中可以看出，爆破后第 1 s，风速对爆破粉尘水平移动距离 L 和粉尘垂直移动距离 H 几乎没有影响，粉尘云团的垂直与水平移动距离分别为 16 m 和 4 m。这主要是受爆炸冲击力的影响，粉尘云团在垂直方向上的移动速度大于其在水平方向上的移动速度；爆破后第 4 s，风速对爆破粉尘垂直移动距离影响微小，3 种风速条件下，粉尘在爆破后第 4 s 的垂直移动距离均为 30 m 左右；爆破后第 4 s 后，风速增大对粉尘的垂直上升具有明显的限制作用。当风速为 4.4 m/s 时，粉尘在爆破后第 8 s 达到最大垂直移动距离 35 m；当风速为 2.4 m/s 时，粉尘在爆破后第 11.7 s 达到最大垂直移动距离 40 m。爆破后第 6 s，风速对爆破粉尘水平移动距离的影响极小，3 种风速条件下，爆破粉尘在爆破后第 6 s 的水平移动距离为 22.6～23.5 m；爆破后第 6 s 后，风速越大，粉尘沿着下风向水平移动的距离增大，当风速为 4.4 m/s 时，粉尘在爆破后第 10.3 s 达到研究区域边界处；当风速为 2.4 m/s 时，粉尘在爆破后第 13 s 达到研究区域边界处。

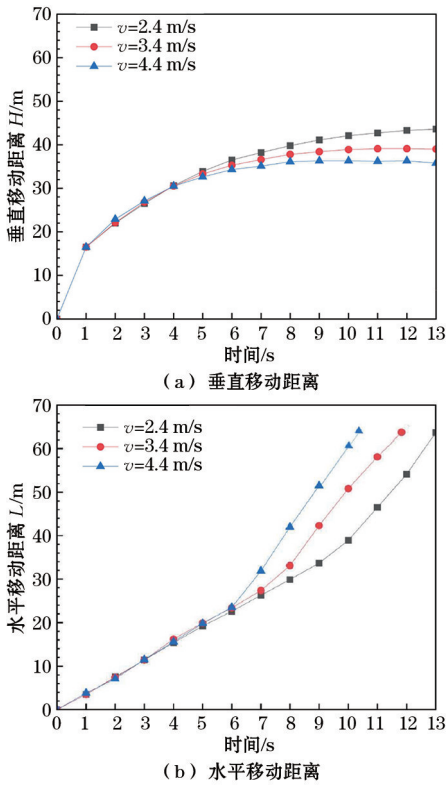


图 6　粉尘垂直移动距离和水平移动距离随时间变化曲线

Fig.6　Time dependent curves of vertical and horizontal movement distances of dust

可见，风速变化对露天矿台阶爆破粉尘的扩散与运移具有阶段性影响。在垂直方向上，爆破后 4 s 内，风速对粉尘垂直移动距离影响微小；爆破后 4 s 后，风速越大，粉尘的垂直移动距离减小。在水平方向上，爆破后 6 s 内，风速对粉尘水平移动距离影响微小；爆破后 6 s 后，风速越大，粉尘水平移动距离越大。

4　露天矿爆破粉尘拦截技术参数优化思路

基于文献[15]至[19]的研究，本文采用水雾拦截方式治理爆破粉尘，为进一步提高露天台阶爆破粉尘治理效果，必须优化确定爆破粉尘的最佳捕尘时间、水袋最佳位置和水袋最佳起爆时间等参数。

结合某露天矿台阶爆破粉尘运移规律的研究结果，提出优化露天矿爆破粉尘拦截技术参数的 4 条基本思路。

（1）根据爆破粉尘运移规律，当风速在 2.4～4.4 m/s 范围内变化时，爆破粉尘在爆破后 4 s 内迅

速扩散,且各风速条件下粉尘垂直移动距离相差不大;爆破后 6 s 时,粉尘水平移动距离处于 22.6～23.5 m 之间,而在爆破后 6 s 后其水平移动距离显著增大。因此,确定最佳捕尘时间为爆破后第 4 s 至第 6 s。

(2) 为提高拦截效果,减少露天矿台阶流场中台阶高度(台阶高度为 12 m)结构涡流对捕尘效果的不利干扰,故将水袋布置在台阶坡底线 12 m 以外。考虑最佳捕尘时间为爆破后第 4 s 至第 6 s,风速为 2.4～4.4 m/s 时,爆破后第 4 s 至第 6 s 粉尘的水平移动距离为 15.4～23.5 m(见表 2)。据此,确定水袋最佳位置为距离台阶坡底线 15～24 m 之间。

(3) 为提高爆破粉尘拦截效果,考虑到最佳捕尘时间为爆破后第 4 s 至第 6 s,当风速为 2.4～4.4 m/s 时,粉尘在爆破后第 4 s 至第 6 s 的垂直移动距离为 30.5～36.5 m(见表 2)。确定水雾场高度应达到粉尘高度的 1.1 倍,即确定水雾场高度应该达到 33.55～40.15 m。

(4) 为确定水袋最佳延迟起爆时间,应研究水雾场形成的时空变化特征。确定水雾达到最大高度的时间为 T_s,粉尘扩散高度达到 $0.9H_{max}$ 时的时间为 T_f,则水袋最佳延迟起爆时间为 $\Delta t = T_f - T_s$。

表 2 最佳捕尘时期内的爆破粉尘垂直移动和水平移动距离

Table 2 Vertical and horizontal movement distances of blasting dust during the optimal dust capture period

风速/(m/s)	时间/s	H/m	L/m
2.4	4	30.6	15.4
	5	33.9	19.2
	6	36.5	22.6
3.4	4	30.5	16.2
	5	33.3	19.9
	6	35.3	23.4
4.4	4	30.5	15.6
	5	32.6	19.8
	6	34.3	23.5

5 结论

(1) 采用 Fluent 软件建立了露天矿台阶爆破流场几何模型,探究了不同风速条件下台阶爆破流场分布特征。风流在台阶处发生后台阶流动,形成高速湍流区和低速湍流区。随着风速增大,高速湍流区和低速湍流区的影响范围扩大,贯通整个流场所需时间缩短,同时形成与台阶同高的结构涡流。

(2) 基于台阶爆破流场分布特征分析,探明了不同风速条件下的露天矿爆破粉尘运移规律。风速一定时,受爆破冲击力、重力及稳定风流的综合影响,爆破粉尘在短时间内发生显著的垂直向上与水平移动;随后,粉尘垂直向上移动受到制约,但水平移动距离显著增加。当风速在 2.4～4.4 m/s 范围内变化时,粉尘在爆破后第 4 s 的垂直移动和在爆破后第 6 s 后的水平移动显著。爆破后第 4 s 时,粉尘的垂直移动距离约为 30 m,爆破后第 6 s 时,粉尘的水平移动距离为 22.6～23.5 m。

(3) 基于不同风速下粉尘运移规律的研究,建立了爆破粉尘水雾拦截方案关键参数的制定思路:在风速为 2.4～4.4 m/s 时,考虑爆破粉尘垂直移动距离和沿下风向水平移动距离的变化规律,确定最佳捕尘时间为爆破后 4～6 s;考虑台阶后流动对流场分布的影响和结构涡流的影响,确定水袋最佳位置为距离台阶坡底线 15～24 m 之间;此外,明确了水袋最佳延迟激发时间确定的工作思路,应基于最佳捕尘时间分析、水雾形态和粉尘时空分布的动态耦合分析,确定水袋延迟激发时间为 $\Delta t = T_f - T_s$。

参考文献(References):

[1] 郭敬中,金龙哲,赵启峰,等.基于在线监测系统的金属矿山采场爆破粉尘浓度分布规律研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(4):114-119.
Guo Jingzhong, Jin Longzhe, Zhao Qifeng, et al. Study on laws of concentration distribution of blasting dust in stope of metal mine based on on-line monitoring system[J]. Journal of Safety Science and Technology,2020,16(4):114-119.

[2] 王燕兵,冯乐珍.中国煤炭企业尘肺病现状和防治对策[J].洁净煤技术,2024,30(增刊 2):412-416.
Wang Yanbing, Feng Lezhen. Current situation and prevention countermeasures of pneumoconiosis in Chinese coal enterprises[J]. Clean Coal Technology,2024,30(Suppl. 2):412-416.

[3] 黄宜生,胡胜勇,邵和,等.综掘工作面分级除尘系统及其应用[J].中国安全科学学报,2019,29(9):150-154.
Huang Yisheng, Hu Shengyong, Shao He, et al. Research and application of grading dust suppression system on comprehensive heading faces [J]. China Safety Science Journal,2019,29(9):150-154.

[4] 赵永岗,王德胜,秦鹏渊,等.露天矿爆破(烟)粉尘的爆炸水雾降尘技术研究[J].金属矿山,2022(10):204-208.
Zhao Yonggang, Wang Desheng, Qin Pengyuan, et al. Study on dust reduction technology of blasting smoke and dust by explosion water mist in open-pit mine[J]. Metal Mine,2022(10):204-208.

[5] 李胜林,梁书锋,李晨,等.露天矿山深孔台阶爆破技术的现状与发展趋势[J].矿业科学学报,2021,6(5):598-605.
Li Shenglin, Liang Shufeng, Li Chen, et al. Current status and development trend of deep hole bench blasting technology in open-pit mines[J]. Journal of Mining Science and Technology,2021,6(5):598-605.

[6] 管仁生,孟海利,薛里,等.爆破粉尘捕捉吸附技术试验研究[J].铁道建筑,2017(1):68-71.
Guan Rensheng, Meng Haili, Xue Li, et al. Experimental study on adsorption technology to collect blasting dust[J]. Railway Engineering,2017(1):68-71.

[7] 刘坚,李泽华,白和强,等.露天矿爆破粉尘排放量影响因素分析及试验研究[J].爆破,2017,34(4):169-174.
Liu Jian, Li Zehua, Bai Heqiang, et al. Research on influence factors of blasting dust emission of open-pit mine [J]. Blasting,2017,34(4):169-174.

[8] 郝成磊,李宏伟,俞正洪,等.露天台阶爆破水雾降尘技术及效果评价[J].爆破器材,2018,47(1):59-64.
Hao Chenglei, Li Hongwei, Yu Zhenghong, et al. Dust suppression technology by blasting spray and its effect in open beach blasting[J]. Explosive Materials,2018,47(1):59-64.

[9] 郭尧.基于高斯扩散模型的爆破粉尘可量化可视化研究[J].铁道学报,2022,44(1):153-159.
Guo Yao. Study on quantifiable visualization of blasting dust based on gaussian diffusion model[J]. Journal of the China Railway Society,2022,44(1):153-159.

[10] 郭尧,孟海利.路堑深孔爆破粉尘动态扩散数值模拟研究[J].铁道工程学报,2022,39(7):86-93+101.
Guo Yao, Meng Haili. Numerical simulation research on the dust dynamic diffusion of cutting deep hole blasting[J]. Journal of the China Railway Society,2022,39(7):86-93+101.

[11] 葛少成,黄志辉,荆德吉,等.露天矿爆破扬尘规律及水炮泥配比优化[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(3):225-231.
Ge Shaocheng, Huang Zhihui, Jing Deji, et al. Blasting-dust diffusion rule and water stemming ratio optimization for open-pit mine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2017,36(3):225-231.

[12] 马超,王德胜,郭宾,等.露天台阶爆破粉尘的爆炸水雾场拦截降尘技术研究[J].金属矿山,2022(7):158-163.
Ma Chao, Wang Desheng, Guo Bin, et al. Study on the technology of intercepting and reducing dust by explosion water mist field in open bench blasting[J]. Metal Mine,2022(7):158-163.

[13] 杨年华,郭尧,白和强,等.利用爆炸水雾抑制露天爆破粉尘的试验研究[J].爆破,2021,38(3):130-135.
Yang Nianhua, Guo Yao, Bai Heqiang, et al. Experimental study on dust suppression by explosion water mist in open bench blasting[J]. Blasting,2021,38(3):130-135.

[14] 蒋玉文,柯丽华,张光权,等.风速对低凹露天矿装载扬尘扩散和质量浓度影响研究[J].矿业研究与开发,2025,45(1):186-193.
Jiang Yuwen, Ke Lihua, Zhang Guangquan, et al. Influence of wind speed on dust diffusion and mass concentration in low-concave open-pit mines [J]. Mining Research and Development,2025,45(1):186-193.

[15] 杨海涛,仪海豹.水力降低爆破尘毒试验研究[J].金属矿山,2016(8):148-151.
Yang Haitao, Yi Haibao. Experimental research of lowering blasting dust and toxic gases by hydraulic action[J]. Metal Mine,2016(8):148-151.

[16] 杨帅,任锐,薛育阳,等.细水雾除尘装置去除呼吸性粉尘作用效果研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(增刊1):494-500.
Yang Shuai, Ren Rui, Xue Yuyang, et al. Effect of water mist dust removal device in removing respirable dust[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(Suppl.1):494-500.

[17] 郭尧,刘殿书.露天深孔爆破自由面前水袋爆炸降尘关键参数研究[J].矿业科学学报,2021,6(6):703-710.
Guo Yao, Liu Dianshu. Study on key parameters of water bag dust removal in open air deep hole blasting[J]. Journal of Mining Science and Technology,2021,6(6):703-710.

[18] 李文军,张晓华,柯升,等.露天石灰石矿山爆破降尘技术应用研究[J].工程爆破,2018,24(5):72-77.
Li Wenjun, Zhang Xiaohua, Ke Sheng, et al. Application research of blasting dust reduction technology in open-pit limestone mine[J]. Engineering Blasting,2018,24(5):72-77.

[19] 曹勇,周永利,刘智超,等.哈尔乌素露天煤矿水封爆破降尘试验及效果分析[J].煤炭工程,2020,52(增刊2):33-37.
Cao Yong, Zhou Yongli, Liu Zhichao, et al. Dust reduction effect of water infusion blasting in Haerwusu open-pit coal mine[J]. Coal Engineering,2020,52(Suppl.2):33-37.