

中文引用格式:司俊鸿,于跃洁,李林,等. 巷道分岔角和障碍物对矿工疏散效率的影响[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6):209-215.
英文引用格式:SI Junhong, YU Yuejie, LI Lin, et al. Influence of roadway bifurcation angle and obstacles on evacuation efficiency of miners[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 209-215.

巷道分岔角和障碍物对矿工疏散效率的影响^{*}

司俊鸿¹教授,于跃洁¹,李林²,范若婷¹

(1 华北科技学院 应急技术与管理学院,河北 廊坊 065201;

2 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1174

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(3142023021);河北省高等学校科研项目青年基金资助(QN2025274);廊坊市科学技术研究与发展计划项目(2024029027)。

【摘要】 为提升矿工应急疏散能力,针对水平巷道和倾斜巷道分别构建巷道分岔角(45°、60°、90°、135°、180°)仿真模型,并基于社会力理论,分析巷道分岔角随疏散时间的变化特性及主要作用力,建立巷道分岔角与疏散参数的关系模型,采用正交试验探究最佳分岔角下障碍物长度、宽度及位置对矿工疏散效率的影响。结果表明:巷道疏散过程可分为排队通行、竞争平衡及社会力作用后阶段3个阶段;疏散时间随着巷道分岔角度的增大而减少,符合三次多项式关系;确定最佳分岔角为135°;障碍物对疏散效率的影响顺序为障碍物宽度>障碍物长度>障碍物位置,障碍物宽度与疏散时间呈指数关系;将巷道分岔角、坡度和障碍物宽度作为静态影响系数,计算得出最佳分岔角下当障碍物宽度大于2 m时,巷道当量长度受障碍物宽度影响较大。

【关键词】 巷道分岔角; 障碍物; 疏散效率; 应急疏散; 社会力

Influence of roadway bifurcation angle and obstacles on evacuation efficiency of miners

SI Junhong¹, YU Yuejie¹, LI Lin², FAN Ruoting¹

(1 School of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science and Technology, Langfang Hebei 065201, China; 2 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: To improve the emergency evacuation ability of miners, simulation models of roadway bifurcation angles (45°, 60°, 90°, 135°, 180°) were constructed for horizontal roadway and inclined roadway, respectively. Based on social force theory, the changing characteristics and main forces of roadway bifurcation angles with evacuation time were analyzed, and a relationship model between roadway bifurcation angles and evacuation parameters was established. The orthogonal test was used to investigate the influence of the length, width and position of obstacles on the evacuation efficiency of miners. The results showed that the evacuation process of roadway could be divided into queue passage stage, competitive balance stage and social force effect stage, and the evacuation time decreased with the increase of roadway bifurcation angle, which followed with the cubic polynomial relationship. The optimum bifurcation angle was determined to be 135°. The order of the influence of obstacles on evacuation efficiency is the width of the obstacle > the length of the obstacle > the position of the obstacle, and the

width of the obstacle has an exponential relationship with the evacuation time. Taking the roadway bifurcation angle, slope and obstacle width as the static influence coefficients, the calculation shows that under the optimal bifurcation angle, the equivalent length of the roadway is significantly affected by the obstacle width when the obstacle width is greater than 2 m.

Keywords: roadway bifurcation angle; obstacle; evacuation efficiency; emergency evacuation; social forces

0 引言

煤矿井下建设工程量大、地质条件和巷道构造复杂^[1],存在火灾、瓦斯爆炸、煤尘爆炸等潜在事故风险,易造成群死群伤,其中,火灾事故的平均死亡人数最高^[2]。井工煤矿空间狭窄、封闭性高,其特殊的长高比结构使得烟气纵向蔓延速度显著快于竖直填充过程^[3]。分岔区域烟气容易聚集,能见度低^[4],成为制约疏散速度的关键因素^[5]。同时,煤矿生产依赖采煤机、刮板输送机、井下智能机器人^[6]、带式输送机等装备,紧急情况下这些装备可能阻碍疏散。因此,研究障碍物与分岔巷道结构对矿工应急疏散的影响具有重要意义。

目前,学者们的研究集中于障碍物的长度、形状^[7]、布局^[8]及距出口的距离^[9]等参数对疏散效率的影响。郭乘麟等^[10]研究了情绪阈值、可跨越障碍物的长度及位置等因素下,障碍物导致行人摔伤的可能性。安旭^[11]定量比较了无障碍物、正方形障碍物、横向和纵向障碍物 4 种工况下疏散人数的时序变化,探究了障碍物作用下出口的拱形分布差异。WANG Jinghong 等^[12]研究了 30°拐角处放置障碍物的尺寸和位置对疏散的影响。但是,还鲜有学者同时考虑巷道分岔角和障碍物 2 种因素对矿工应急疏散效率的研究。

鉴于此,笔者拟基于社会力模型研究巷道分岔角下疏散过程变化及影响关系,确定最佳分岔角,结合正交试验法探究最佳分岔角下障碍物的长度、宽度和位置参数对疏散效率的影响,并计算最佳巷道分岔角下巷道初始当量长度,旨在确定最优逃生路径,以期提升矿工应急疏散能力。

1 巷道分岔角模型构建与验证

1.1 模型构建

使用 AnyLogic 软件的行人库模块构建巷道分岔角疏散流程,其底层逻辑为社会力模型^[13],具体如下:

1) 搭建巷道分岔角模型。坡度为主巷道延长

线与分支巷道空间轴线的夹角。巷道分岔角指顺着风流方向的巷道邻近内边界线之间的夹角,其模型见文献[14],运输巷道尺寸为 70 m×3.5 m×2.3 m (长×宽×高),工作面尺寸为 21 m×3.5 m×2.3 m (长×宽×高),分岔角为 90°。在此基础上,简化设计了 5 种巷道分岔角结构,分别为 45°、60°、90°、135°、180°,其中,180°为直巷,其余为分岔巷道。根据煤炭倾角分类方法^[15],选择 8°、25°、45°作为典型坡度建立倾斜巷道。巷道分岔角模型如图 1 所示。

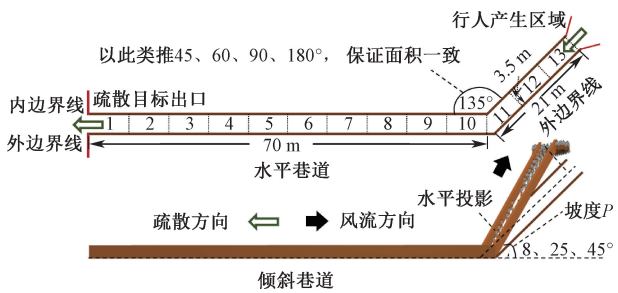


图 1 无障碍下巷道分岔角模型(工况 1)

Fig. 1 Barrier-free roadway bifurcation angle (case 1)

2) 模拟矿工疏散过程。火灾时期所有矿工从进风井撤离,利用软件的 PedSource、PedGoTo 和 PedSink 等模块,对矿工应急疏散过程进行仿真。

3) 数据统计与分析。使用数据统计模块或编写 Java 语言实时统计矿工数量、密度和疏散时间。

1.2 参数设置

井工煤矿工人均为男性,立姿时的最大肩宽为 398~510 mm^[16]。参考河南某矿实地调研资料^[17],矿工疏散速度的取值区间为[0.7, 0.9] m/s。假设矿井生产能力为(60 ~ 120)万 t/a^[18],将单班入井作业人数的阈值 180 设定为疏散人数。此外,煤矿井下的障碍物主要以设备、仪器等为主,其断面形状多为矩形。基于文献[14],视带式输送机为长方体障碍物,尺寸为 7 m×2 m×2 m (长×宽×高)。

1.3 模型验证

为验证模型可靠性,将图 1 所示的巷道区域分为 1~13 个面积相等的单元。期望速度分别为 [0.7, 0.9]、[1.3, 1.5] m/s 的条件下,135°巷道分

岔角的人群密度时序变化曲线,如图 2 所示。由图 2 可知:提高期望速度时,10 单元出现人群冲击波现象。文献[19]在相同巷道分岔角下,也得出高期望速度导致人群冲击波现象的结论。因此,该模型具有一定的可靠性。

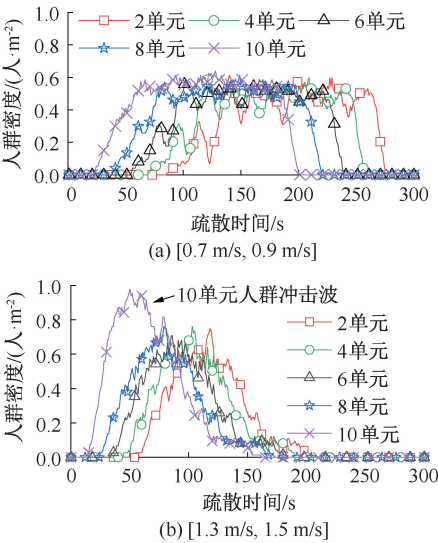


图 2 135°巷道分岔角度下人群密度时序变化
Fig. 2 Temporal variation of crowd density under roadway bifurcation angle of 135°

1.4 障碍物设计

障碍物导致矿工在巷道中的有效通行空间减小,疏散时的流动形态改变。因此,文中采用具有疏散优势的水平巷道分岔角,并利用控制变量法探究障碍物的位置、长度、宽度 3 个因素对矿工疏散效率的影响。工况 1(图 1)无障碍物。工况 2—工况 4 如图 3 所示,其中,工况 2 在(70, 0)和(70, 1.5)处分别放置一个矩形障碍物,参照点为矩形障碍物右下点,即当纵坐标 $Y = 0$ 或 1.5 时,横坐标 $X = 70 - 7x$ ($0 \leq x \leq 4$, x 为移动的单元数)。将障碍物固定于(70, 0)坐标处,工况 3 改变障碍物长度范围为 7~70 m,以 7 m 为梯度逐步增加,工况 4 设置障碍物宽度为 0.5~2.5 m,以 0.5 m 为梯度逐步增加。每组工况模拟 3 次,其均值为最终结果。

2 巷道分岔角和障碍物对矿工疏散效率的影响

2.1 巷道分岔角对疏散效率的影响

2.1.1 巷道疏散过程

不同巷道分岔角下疏散时间的变化曲线如图 4 所示。疏散时间均随着巷道分岔角度增大而减小。

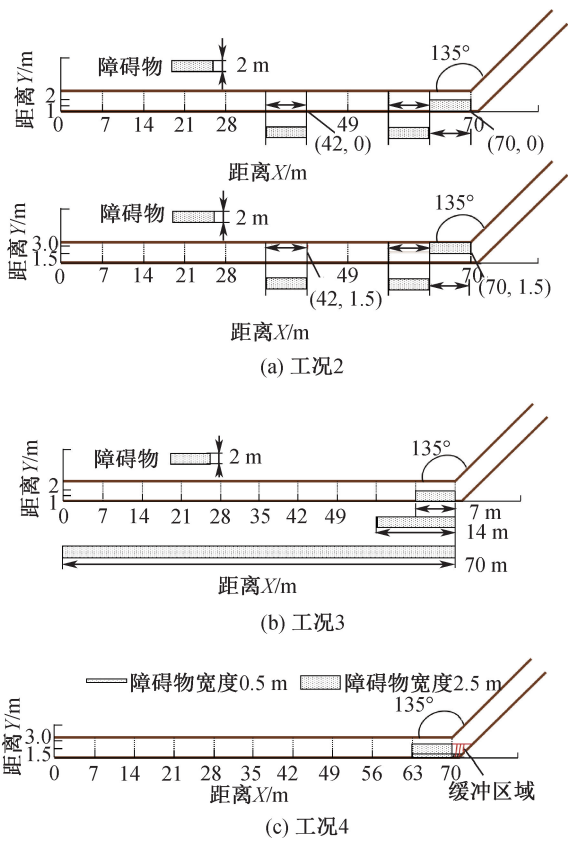


图 3 障碍物工况
Fig. 3 Obstacle conditions

疏散人数时序变化曲线可分为排队通行阶段、竞争平衡阶段和社会力作用后阶段 3 个阶段。

由图 4a 可知:在水平巷道中,当疏散时间相同时,180°巷道分岔角的疏散人数最多,其次为 135°,45°巷道分岔角的疏散人数最少,故在分岔巷道中 135°巷道分岔角下疏散效率最高。当疏散时间为 157~207 s 时,分岔角 90°和 135°条件下,竞争平衡阶段基本表现出相同的疏散能力,疏散人数为 33~84 人,持续时间为 50 s。疏散完成 84 人后,巷道内剩余 96 人,此时巷道处于拥堵状态,矿工与矿工、矿工与巷道壁之间的相互作用力影响疏散能力。135°巷道分岔区域的矿工受力如图 4a 所示,以分岔附近某一矿工为例,基于社会力模型,矿工受自驱力 F_d 、周围矿工的力 F_{ab} 和巷道壁施加的力 F_{aw} 影响,合力 F_s 决定了矿工最终的运动方向。社会力作用下拥堵主要发生在街角区域^[19]。因此,社会力作用后阶段是社会力主导作用后结果导致。

由图 4b 可知:在倾斜巷道中,竞争平衡阶段的持续时间随着巷道坡度的增大而增加。当坡度为 8°时,60 和 135°巷道分岔角出现竞争平衡阶段,持续时间为 35 s;当坡度为 25°时,45、60°出现竞争平

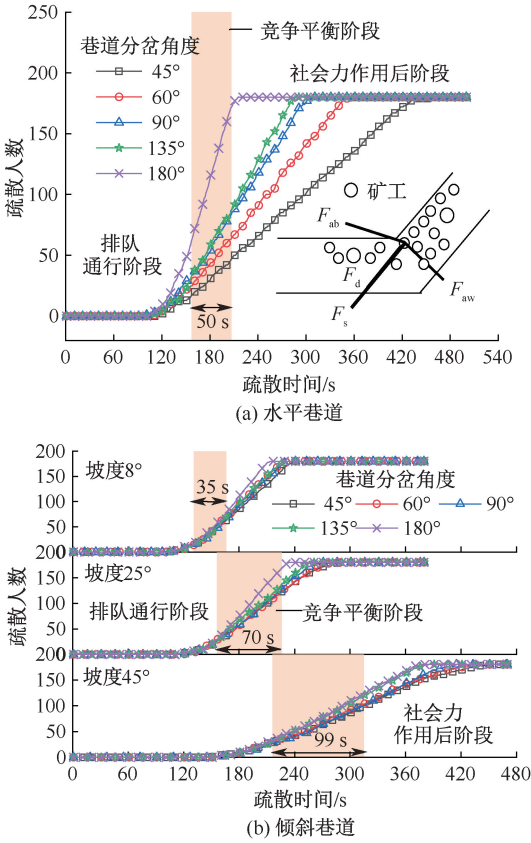


图4 不同巷道分岔角下疏散时间的变化曲线
Fig. 4 Variation curves of evacuation time under different roadway bifurcation angles

衡阶段,持续时间为70 s;当坡度为45°时,45、60、90°出现竞争平衡阶段,持续时间为99 s。随着坡度的增加,135°分岔角与其他分岔角的分离程度增大,135°分岔角条件下的疏散效率较高。因此,建议矿工优先选择135°巷道分岔角逃生。

2.1.2 巷道分岔角与疏散参数的关系模型

巷道分岔角与疏散时间的关系曲线如图5所示。其中, T_p 为坡度为 p 时矿工通过巷道的疏散时间, R^2 为决定系数,坡度8°与25°的拟合曲线多项式的同类项系数均相近,视为8~25°坡度范围内巷道分岔角对疏散效率的影响程度接近。

将拟合曲线中对应项系数的均值作为系数,建立数学关系见下式:

$$T_{pi} = \begin{cases} 974.78 - 17.34\theta + 0.14\theta^2 - 4 \times 10^{-4}\theta^3 & p = 0 \\ 308.37 - 1.47\theta + 0.015\theta^2 - 4 \times 10^{-5}\theta^3 & 0 < p \leq 25 \\ 484.64 - 0.67\theta - 0.003\theta^2 + 2 \times 10^{-5}\theta^3 & p > 25 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_{pi} 为坡度为 p 时,矿工通过第 i 条巷道的疏散时间,s; θ 为巷道分岔角,(°); p 为坡度,(°)。

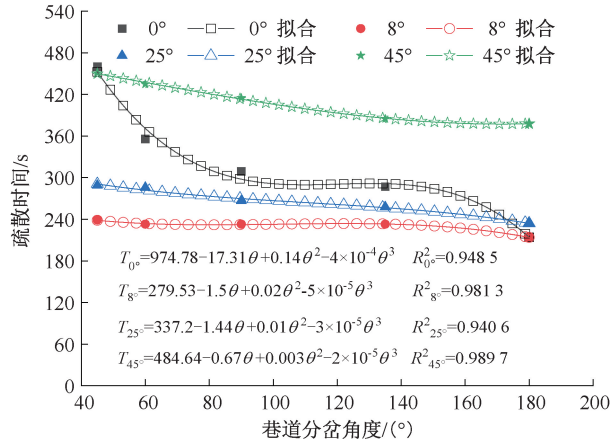


图5 巷道分岔角与疏散时间的关系曲线
Fig. 5 Relationship curve between roadway bifurcation angle and evacuation time

若已知巷道长度、宽度、矿工疏散时间等参数,依据运动学基本原理,建立矿工实际疏散速度与巷道分岔角关系见下式:

$$v_i = \frac{l_{pi}}{T_{pi}} = \begin{cases} \frac{l_{pi}}{974.78 - 17.34\theta + 0.14\theta^2 - 4 \times 10^{-4}\theta^3} & p = 0 \\ \frac{l_{pi}}{308.37 - 1.47\theta + 0.015\theta^2 - 4 \times 10^{-5}\theta^3} & 0 < p \leq 25 \\ \frac{l_{pi}}{484.64 - 0.67\theta - 0.003\theta^2 + 2 \times 10^{-5}\theta^3} & p > 25 \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_i 为矿工在 i 条疏散通道的平均疏散速度,m/s; l_{pi} 为坡度为 p 时,第 i 条疏散通道的长度,m。

2.2 最佳分岔角下障碍物对疏散效率的影响

2.2.1 障碍物位置对疏散效率的影响

不同障碍物位置下,疏散人数随疏散时间的变化如图6所示。

由图6可知:在相同疏散人数下,障碍物位置横坐标 X 的变化与疏散时间之间呈非线性关系。当 X 取42或49 m, Y 取0或1.5 m时,障碍物距离分岔区域最远。此时,矿工需经过长距离运动才能与障碍物相遇,在矿工接近障碍物过程中,二者相互作用力逐渐增大。由于障碍物的存在,有效通行空间减小,矿工之间的距离减小,排斥力加剧,运动轨迹曲折无序,又因矿工在分岔后区域的拥堵状态下受到社会力作用,需要更长时间完成疏散。当 X 取70 m, Y 取0或1.5 m时,障碍物位于分岔区域,因拥堵会受到社会力影响。然而,障碍物坐标为(70, 0)

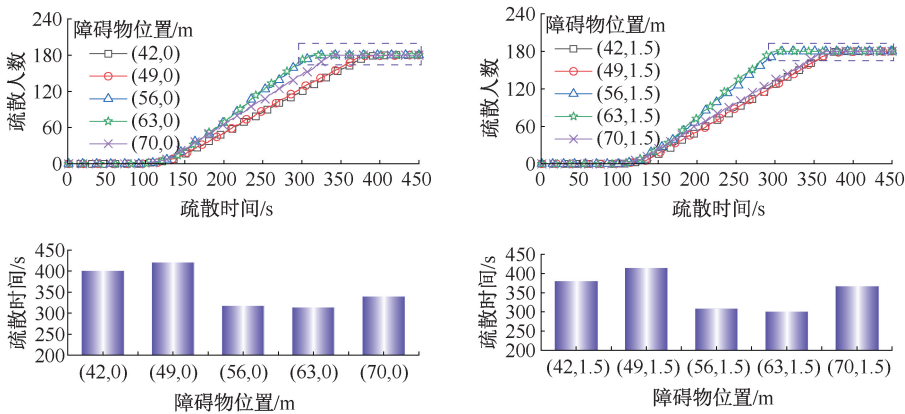


图 6 不同障碍物位置下疏散人数随疏散时间的变化

Fig. 6 Variations of the number of evacuees with evacuation time at different obstacle locations

时,分岔区域外边界处存在缓冲区域,矿工之间的排斥力减小,相同时间下通行人数较(42, 0)、(49, 0)位置多;当障碍物坐标为(70, 1.5)时,障碍物在分岔区域内边界处阻碍矿工通行,矿工运动方向发生改变,导致疏散时间与(42, 1.5)、(49, 1.5)相接近。当 X 取56或63 m, Y 取0、1.5 m时,矿工需要在较短时间内完成“无序—有序—无序”的状态转变,社会力方向变化较其他位置小,疏散效率高。因此,横坐标 X 取值从70 m降低至42 m时,障碍物与分岔区域的距离增大,疏散时间呈先减小后增大的趋势。疏散效率相对较高时对应的障碍物坐标为(56, 1.5)、(63, 1.5)、(56, 0)、(63, 1.5)。

2.2.2 障碍物长度对疏散效率的影响

不同障碍物长度下,疏散人数随疏散时间的变化如图7所示。由图7可知:障碍物长度在7~21 m、28~35 m、42~70 m范围内时,对应的疏散时间均较为接近,且疏散时间随着障碍物长度的增加呈先增大后减小再稳定波动的趋势。障碍物长度影响疏散效率的关键阈值是约21 m。当障碍物长度较短时,矿工相对均匀地分布于巷道内,可在较短时间内完成“无序—有序—无序”的状态转变,所受社会力作用小,疏散时间短。然而,当障碍物长度增长时,矿工主要集中在巷道内远离障碍物一侧,与巷道墙壁和障碍物间的相互作用力增大,可供通行区域相对狭窄,因此疏散时间大幅增加。随着障碍物长度进一步增长,矿工在分岔区域完成“无序—有序”的过渡后,长期处于有序排队形式向目标出口撤离。同时,矿工之间的相互作用力方向基本一致,所受作用力相对减小,因此,疏散时间呈先减小后稳定的趋势。疏散效率相对较高时对应的障碍物长度为7、14、21、56 m。

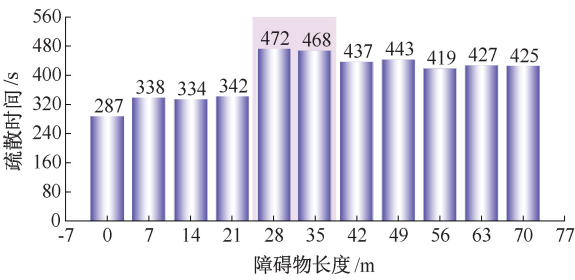


图 7 不同障碍物长度下疏散人数随疏散时间的变化

Fig. 7 Variations of number of evacuees with evacuation time at different obstacle lengths

2.2.3 障碍物宽度对疏散效率的影响

不同障碍物宽度下,疏散人数随疏散时间的变化如图8所示。

由图8可知:疏散时间随着障碍物宽度的增加而增加,二者呈指数关系。障碍物位于分岔区域时,其宽度的增加相当于巷道阻塞效应的增强,导致分岔前区域可供并行通行的能力减弱,而分岔后区域处于拥堵状态,增加了矿工之间相互碰撞的概率,所受排斥力增大,社会力作用增强。缓冲区域如图3c所示,障碍物宽度增大时,缓冲区域面积相应增大,因此,疏散时间随着缓冲区域面积的增加也呈增加的趋势。缓冲区域属于分岔后区域,由于巷道阻塞,分岔前区域可通行能力低,导致缓冲区域在人群拥挤时无法缓解疏散压力。疏散效率相对较高时对应的障碍物宽度为0.5、1、1.5、2 m。

2.2.4 障碍物参数优选

根据2.2.1—2.2.3节所述,障碍物的位置 A 、长度 B 、宽度 C 等3个因素影响矿工的疏散过程。为提高疏散效率,设置3因素4水平的正交试验优选障碍物参数,其中1—4水平的障碍物位置分别设置为 $A_1=(56, 1.5)$ 、 $A_2=(63, 1.5)$ 、 $A_3=(56, 0)$ 、

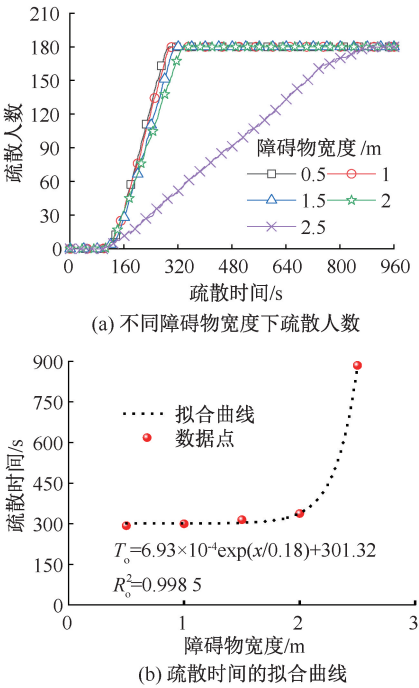


图 8 障碍物宽度与疏散时间的变化

Fig. 8 Variations of the number of evacuees with evacuation time at different obstacle widths

$A_4 = (63, 0)$, 障碍物长度分别设置为 $B_1 = 7\text{ m}$ 、 $B_2 = 14\text{ m}$ 、 $B_3 = 21\text{ m}$ 、 $B_4 = 56\text{ m}$, 障碍物宽度分别设置为 $C_1 = 0.5\text{ m}$ 、 $C_2 = 1\text{ m}$ 、 $C_3 = 1.5\text{ m}$ 、 $C_4 = 2\text{ m}$ 。通过正交试验计算得出, 3 个因素的主次顺序为 $C > B > A$, 即障碍物宽度对疏散时间的影响最显著, 其次为障碍物长度, 障碍物位置影响最小。其中, 135° 水平巷道模型中障碍物放置最优参数组合为 $A_3B_2C_1$ 。

2.3 最佳分岔角下巷道初始当量长度的计算

巷道初始当量长度是确定实际井下巷道最优逃生路径的关键参数, 受巷道分岔角、坡度和障碍物等巷道静态环境的影响, 根据巷道静态条件影响系数计算方法^[20]得出坡度影响系数 η_{pi} 和局部障碍物宽度影响系数 η_{oi} , 二者加权到第 i 条巷道长度中, 得到巷道初始当量长度 L_i 与巷道静态影响系数的关系, 见下式:

$$L_i = (1 + \eta_{pi} + \eta_{oi})l_{0i} = (3 - \frac{l_{pi}T_{0i}}{l_{0i}T_{pi}} - \frac{T_{ni}}{T_{oi}})l_{0i} \quad (3)$$

式中: T_{ni} 为第 i 条无障碍物巷道的平均疏散时间, s; T_{oi} 为第 i 条障碍物巷道的平均疏散时间, s。

根据式(2)和图 8b 疏散时间的拟合曲线, 计算巷道静态参数 η_{pi} 和 η_{oi} 得出: 当障碍物宽度为 0.5 m 时, η_{oi} 为 0.332 , 当障碍物宽度为 1 m 时, η_{oi} 为 0.333 , 以此类推, 直至障碍物宽度达到 2.5 m ; 当坡度 $0^\circ < p < 25^\circ$ 时, η_{pi} 为 0.221 , 当坡度 $p > 25^\circ$ 时, η_{pi} 为 0.429 , 此时得到最佳分岔角下的初始当量长度计算结果, 见表 1。计算结果可用于构建最优逃生路径巷道网络图, 从而确定逃生路线。

表 1 初始当量长度计算结果

Table 1 Calculation result of initial equivalent length					
序号	$\eta_{pi} = 0.221$		序号	$\eta_{pi} = 0.429$	
	η_{oi}	L_i/m		η_{oi}	L_i/m
1	0.332	32.609	6	0.332	36.981
2	0.333	32.617	7	0.333	36.989
3	0.339	32.741	8	0.339	37.114
4	0.421	34.479	9	0.421	38.851
5	0.808	42.597	10	0.808	46.969

由表 1 可知: 当障碍物宽度大于 2 m 时, 巷道当量长度受障碍物宽度影响较大。

3 结 论

1) 水平巷道和倾斜巷道条件下, 疏散时间随着巷道分岔角度的增大而减少, 巷道分岔角、疏散时间和疏散速度呈三次多项式关系, 疏散过程均可分为排队通行、竞争平衡以及社会力作用后阶段 3 个阶段。其中, 倾斜巷道的竞争平衡阶段的持续时间随坡度的增加而增加。

2) 在最佳分岔角, 不同的障碍物长度和位置条件下, 矿工疏散均需完成“无序—有序”的状态切换。障碍物位置距离分岔区域较远时, 社会力作用二次叠加, 导致疏散效率降低。疏散时间随障碍物宽度的增加呈增长趋势, 缓冲区域在人群拥挤时无法缓解疏散压力。

3) 障碍物宽度对疏散效率的影响最显著, 障碍物位置的影响最小。障碍物宽度与疏散时间呈指数关系。当障碍物宽度大于 2 m 时, 巷道当量长度受障碍物宽度影响较大。未来将进一步考虑障碍物位于巷道顶板下方、巷道能见度以及巷道断面形状等因素对矿工应急疏散效率的影响。

参 考 文 献

[1] 许娜, 梁燕翔, 王亮, 等. 基于知识图谱的煤矿建设安全领域知识管理研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 28-35.

- XU Na, LIANG Yanxiang, WANG Liang, et al. Research on knowledge management in coal mine construction safety field based on knowledge graph[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(5):28-35.
- [2] 付恩三, 白润才, 刘光伟, 等. “十三五”期间我国煤矿事故特征及演变趋势分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12):88-94.
- FU Ensan, BAI Runcai, LIU Guangwei, et al. Analysis on characteristics and evolution trend of coal mine accidents in our country during "13th five-year" plan period[J]. China Safety Science Journal, 2022,32(12):88-94.
- [3] 胡隆华, 彭伟, 杨瑞新. 隧道火灾动力学与防治技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2014:76-92,214-217.
- [4] 丁翠. 通风风速对分岔巷道内火灾烟气分布的影响数值研究[J]. 煤矿安全, 2025,56(1):93-99.
- DING Cui. Numerical research on the influence of ventilation velocity on fire smoke distribution in bifurcated roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2025,56(1):93-99.
- [5] 刘笑笑, 汪云甲, 毕京学, 等. 矿井火灾逃生路径规划及其三维仿真研究[J]. 中国安全科学学报, 2017,27(10):26-31.
- LIU Xiaoxiao, WANG Yunjia, BI Jingxue, et al. Study on route planning and 3D simulation of escape from mine fire[J]. China Safety Science Journal, 2017,27(10):26-31.
- [6] 罗文. 国能神东煤炭集团重大科技创新成果与实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2):1-43.
- LUO Wen. Major scientific and technological innovation achievements and practices of CHN Shendong Coal Group[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2):1-43.
- [7] 刘顺利. 考虑瓶颈效应和恐慌情绪传播的人群疏散社会力模型及其仿真研究[D]. 桂林:广西师范大学,2021.
- LIU Shunli. Simulating crowd evacuation in the social force model with consideration of bottleneck effect and panic emotion propagation[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2021.
- [8] 刘华, 金文庭. 基于社会心理模型的不同障碍物人员疏散仿真[J]. 安全与环境学报, 2022,22(3):1 442-1 449.
- LIU Hua, JIN Wenting. Simulation of the evacuation of different obstacles based on a social psychological model[J]. Journal of Safety and Environment, 2022,22(3):1 442-1 449.
- [9] 吕惠, 刘向元, 王英龙, 等. 人群疏散出口障碍物对疏散效率的影响规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020,16(1):141-145.
- LYU Hui, LIU Xiangyuan, WANG Yinglong, et al. Study on influence laws of obstacle in evacuation exit on evacuation efficiency[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020,16(1):141-145.
- [10] 郭乘麟, 霍非舟, 李宇飞, 等. 考虑恐慌情绪感染下行人绊倒行为的疏散模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2023,19(6):173-179.
- GUO Chenglin, HUO Feizhou, LI Yufei, et al. Evacuation model considering tripping behavior of pedestrian under panic emotional infection[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023,19(6):173-179.
- [11] 安旭. 障碍物对出口处行人疏散效率的影响研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2024.
- AN Xu. Study on the influence of obstacles on pedestrian evacuation efficiency at exit [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2024.
- [12] WANG Jinghong, LI Jiachen, LI Jia, et al. Performance optimization of the obstacle to corner bottleneck under emergency evacuation[J]. Journal of Building Engineering, 2022,45: DOI: 10.1016/J. JOBE. 2021. 103658.
- [13] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000,407:487-490.
- [14] LI Lin, SI Junhong, LI Zongxiang. Characteristics of the spatial and temporal evolution of the environmental parameters for belt fire in underground coal mine roadway[J]. Case Studies in Thermal Engineering,2023,49: DOI: 10.1016/J. CSITE. 2023. 103346.
- [15] 孟宪臣, 郭军杰, 黄南山. 采煤概论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010:11-25.
- [16] GB/T 10000—2023, 中国成年人人体尺寸[S].
- GB/T 10000—2023, Human dimensions of Chinese adults[S].
- [17] 郭海湘, 卢仪帆, 李旭泽, 等. 基于社会力模型的煤矿井下分区域应急疏散优化研究[J]. 安全与环境工程, 2023,30(5):121-132, 165.
- GUO Haixiang, LU Yifan, LI Xuze, et al. Study on the optimization of emergency evacuation in underground coal mine sub-region based on social force model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023,30(5):121-132, 165.
- [18] 国家矿山安全监察局. 煤矿单班入井(坑)作业人数限员规定[Z]. 2023-09-28.
- [19] LU Hongcheng, LI Jintao, SUN Sisi, et al. Study on the propagation characteristics of shockwave in dense crowd in corner passage [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 113: DOI: 10.1016/J. IJDRR. 2024. 104826.
- [20] 周越, 朱希安, 王占刚. Dijkstra 算法在矿井水灾动态避灾路径中的改进与应用[J]. 煤炭工程, 2019,51(3):18-22.
- ZHOU Yue, ZHU Xi'an, WANG Zhangang. Improvement and application in Dijkstra algorithm in dynamic route selection of mine flood [J]. Coal Engineering, 2019,51(3):18-22.



作者简介: 司俊鸿 (1985—),男,陕西西安人,博士,教授,主要从事应急处置与救援技术、矿井通风与火灾防治方面的研究。E-mail: sijunhong@163.com。