

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-083-06

考虑结伴行为的高海拔隧道紧急救援站疏散研究

宋磊¹ 刘小霞¹ 宋健¹ 毕海权² 王菁² 朱柏岭²

(1. 中车唐山机车车辆有限公司 唐山 064000;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 在实际疏散过程中人们会与自身有社会关系的人结伴同行, 这种社会行为导致人员试图保持紧密联系而造成疏散效率降低。另外, 高海拔环境下人员的运动能力受到限制, 疏散会更加困难, 有必要考虑人员结伴行为对紧急疏散的影响。研究采用 Pathfinder 软件建立了高海拔紧急救援站的人员疏散模型, 分析了人员运动能力受限和结伴行为对高海拔环境下安全疏散的影响。结果表明, 结伴行为使得最大疏散完成时间增加了 20.8s, 平均疏散完成时间增加了 8.9s, 增加率分别为 7.6% 和 6.8%, 结伴者的亲密度越高疏散时间越长。

【关键词】 pathfinder; 高海拔; 紧急救援站; 结伴行为
中图分类号 U298.6 文献标志码 A

Study on Evacuation of Emergency Rescue Station in High Altitude Tunnel Considering Group Behavior

Song Lei¹ Liu Xiaoxia¹ Song Jian¹ Bi Haiquan² Wang Jing² Zhu Bailing²

(1. CRRC Tangshan Co., Ltd, Tangshan, 064000;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In the actual evacuation process, people will accompany with people who have social relations with them. This social behavior leads to people trying to maintain close contact and resulting in reduced evacuation efficiency. In addition, the movement ability of people in high altitude environment is limited, and evacuation will be more difficult. It is necessary to consider the influence of people's companionship behavior on emergency evacuation. In this study, Pathfinder software was used to establish a personnel evacuation model for high-altitude emergency rescue stations, and the effects of limited mobility and group behavior on safe evacuation in high-altitude environments were analyzed. The results show that the group behavior increases the maximum evacuation completion time by 20.8s, the average evacuation completion time by 8.9s, and the increase rates are 7.6% and 6.8%, respectively. The higher the intimacy of the companion, the longer the evacuation time.

【Keywords】 Pathfinder; High altitude; Emergency rescue station; Group behavior

0 引言

高海拔地区的气候条件恶劣, 气温、气压相对平原更低, 氧气密度也低于平原地区, 低氧环境下对于人员的安全疏散更加不利。前人对人员运动能力在高海拔的受限程度已有研究, 崔鹏等人^[1]通过台阶试验得到了急上高原者相对最大摄氧量随海拔高度变化

的折减系数公式, 从而得到高海拔人员运动速度。李琦等人^[2]基于前人研究得到的最大摄氧量与海拔高度、人员速度与摄氧量之间的关系, 进而获得了高海拔人员速度折减系数。颜冠峰^[3]通过实验的方法得到了在拉萨的隧道内的人员运动速度的折减系数。上述研究为高海拔疏散提供了有效的理论支撑。

作者简介: 宋磊 (1984-), 女, 本科, 高级工程师, E-mail: songlei.ts@crccgc.com

通讯作者: 毕海权 (1974-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2025-05-26

随着轨道交通领域的发展,我国在建的高海拔特长铁路隧道包括长达 38km 的色季拉山隧道和 20.8km 的康定二号隧道等^[4],规范规定^[5]20km 及以上的隧道或隧道群应设置紧急救援站,因而研究高海拔紧急救援站疏散具有现实工程意义。在救援站疏散研究中,李琦等人^[2]研究了高海拔隧道紧急救援站结构(横通道间距、宽度)、人员恐慌心理对疏散的影响,发现海拔高度越高、紧急救援站横通道宽度越小、间距越大,则出口处聚集现象越严重,人员疏散率越低。刘屈瑶^[6]研究了着火车厢在隧道救援站内时的停靠方式,发现中部、前部、尾部三种不利停靠位置中,着火车厢尾部正对横通道时人员疏散用时最长。由于隧道救援站疏散比明线疏散的条件更差,综合考虑,本研究的疏散场景设置为双洞单线的铁路隧道救援站。

在上述疏散研究中均没有考虑人员的结伴行为,而在实际疏散逃生时人员往往结伴而行,因为同伴的陪伴与安慰有利于降低行人的恐慌程度^[7]。

但这也同时为疏散带来了挑战,当结伴的一部分成员因遇到障碍物等状况而掉队时,结伴群体内的其他成员会产生等待现象^[8],因此结伴行为更不利于疏散。例如李盈^[9]考虑了结伴行为后发现与个体疏散相比,结伴疏散时间更长。

上述不利条件的叠加对疏散造成了更大的挑战,研究结伴行为对高海拔隧道紧急救援站疏散的影响意义显著。其结果可以用于疏散策略指导、软件设置及实际救援站疏散参考。

1 疏散模型

1.1 几何模型

1.1.1 车辆几何模型

某动车组列车模型如图 1 所示,为 8 编组。其中 MH05 车厢为着火车厢,人员在停车前疏散到相邻车厢^[10]。车窗宽度和车侧门宽度分别设置为 1.45m 和 1m。头(尾)车厢一侧有 6(7)扇窗、1 扇门,其余非着火车厢一侧 8~9 扇窗、2 扇门。

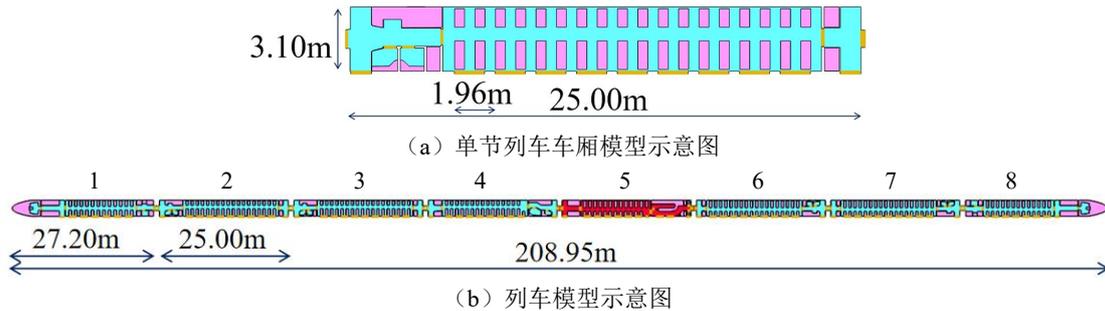


图 1 列车模型

Fig.1 Train model

1.1.2 隧道紧急救援站几何模型

规范规定^[5]当铁路为客货共线时,救援站长度可取 550m,站台宽度不宜小于 2.3m,横通道之间的间距不宜大于 60m,其断面净空尺寸不宜小于 4.5m×4.0m(宽×高),横通道与隧道连接处应设防护门,防护门净空尺寸不应小于 1.7m×2.0m(宽×高),该规范中某隧道横通道的长度选取 25m。综合考虑该规范和相关文献^[11,12],本研究选取救援站结构参数如表 1 所示,模型如图 2 所示。

表 1 救援站主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of rescue station

结构名称	参数名称		数值	
横通道	间距/m	宽度/m	50	4.5
	长度/m	数量/条	25	11
站台	长度/m	宽度/m	550	2.3
防护门	宽度/m		1.7	

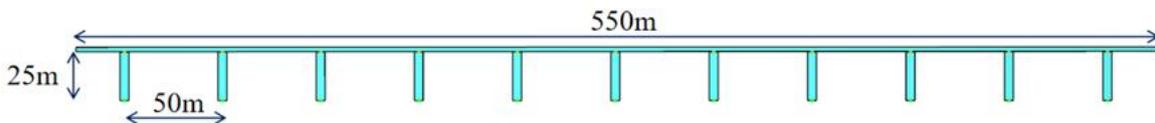


图 2 紧急救援站模型

Fig.2 Emergency rescue station model

1.1.3 含列车的隧道紧急救援站几何模型

考虑中部着火车厢 MH05 车的尾部刚好堵住出口 6 防护门的情况较为不利^[6], 建立含列车的隧道紧急救援站几何模型如图 3 所示, 通常认为人员不能跨越站台 MH05 车厢火区, 分别远离着火车厢

向两方疏散, 最终人员穿过横通道抵达另一侧隧道。另外, 根据调研 50.28% 的乘客会选择砸开窗户从紧急出口离开^[13], 并且人员一般可以在 30s 以内击碎车窗玻璃^[14]。故考虑设置车窗在第 30s 全部打开且人员均可用于逃生。

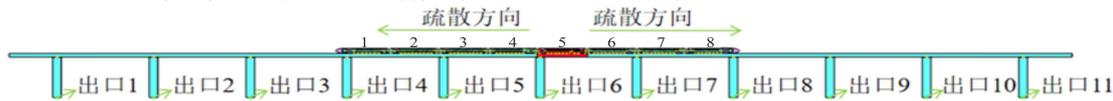


图 3 含列车的隧道紧急救援站模型

Fig.3 Tunnel emergency rescue station model with train

1.2 人员特征

1.2.1 人员运动速度

根据前人研究成果对人员运动速度进行修正。其中崔鹏等人^[1]得到了海拔高度为 4000m 时人员的运动速度, 经换算后得出的折减系数为 0.61。而 4000m 的海拔高度足以造成显著影响, 经文献统计得到高海拔 4000m 左右的速度折减系数如表 2 所示; 规范^[5]中推荐平坦地面无烟情况下人员运动速度如表 3 中第二列所示, 根据表 2 中的速度折减系数的平均值对表 3 第二列进行修正后的人员运动速度如表 3 第三列所示。

表 2 人员运动速度折减系数^[1-3,15]

Table 2 Personnel movement speed reduction coefficient^[1-3,15]

人员类别	折减系数 1	折减系数 2	折减系数 3	折减系数 4	平均值
成年人 (男)		0.783	0.748		0.726
成年人 (女)		0.77	0.759		0.726
老年人 (男)	0.61	0.772	0.748	0.764	0.724
老年人 (女)		0.772	0.759		0.726
儿童 (男)		0.749	0.748		0.718
儿童 (女)		0.749	0.759		0.721

表 3 人员运动速度/(m·s⁻¹)

Table 3 Personnel movement speed /(m·s⁻¹)

人员类别	规范中的步行速度	修正后的人员步行速度
成年人 (男)	1.20	0.87
成年人 (女)	1.00	0.73
老年人 (男)	0.72	0.52
老年人 (女)		0.52
儿童 (男)	0.8	0.57
儿童 (女)		0.58

1.2.2 疏散人数

规范^[5]规定疏散计算时人数应按照超员 20% 来确定, 该车 8 辆编组下的总人数为 613 人, 超员 20% 为 736 人, 最终确定列车内人员分布如表 4 所示。

表 4 各节车厢人数分布/人

Table 4 The number distribution of each carriage /person

车厢	人数	车厢	人数	总人数
TC01 车	58	MH05 车	—	736
M02 车	108	TP06 车	146	
TP03 车	108	M07 车	108	
MH04 车	130	TC08 车	78	

1.2.3 人员体型

根据 2024 年实施的新规 GB/T 10000-2023《中国成年人人体尺寸》^[16]以及 GB/T 26158-2010《中国未成年人人体尺寸》^[17], 以第 50 百分位数统计的人体数据的均值作为数值模拟的输入条件^[18], 其中未成年人人体尺寸规范严格按照年龄分段统计, 本研究选取其中间年龄段, 以 11~12 岁的数据作为儿童的参数, 各类型人员肩最大宽尺寸和人员身高尺寸参数如表 5 所示。

表 5 各类型人员体型输入条件

Table 5 Body shape input conditions of various types of personnel

人员类型	肩最大宽/cm	身高/m
成年人 (男)	44.9	1.69
成年人 (女)	40.9	1.57
老年人 (男)	44.9	1.69
老年人 (女)	40.9	1.57
儿童 (男)	36.2	1.47
儿童 (女)	35.8	1.49

1.2.4 人员组成

参考李修柏^[13]的研究,本研究选取人员组成的输入参数如表 6 所示。

表 6 高速列车标准车厢不同人员组成/%

Table 6 High-speed train standard compartment of different personnel composition /%

成年人 (男)	成年人 (女)	老年人 (男)	老年人 (女)	儿童 (男)	儿童 (女)
58.24	32.8	2.06	2.06	2.42	2.42

2 结伴行为

2.1 结伴行为在 Pathfinder 软件中的实现

结伴行为在软件中的实现是将人员划分成不同的组。Pathfinder 用户手册^[19]指出,分组移动由两个概念控制:连接状态和组领导者,如果组处于“断开连接”状态,成员将走向领导者,而如果一个组处于“连接”状态,则成员会朝着由其行为决定的目标移动。其控制参数主要有四个,如表 7 所示。

表 7 分组移动行为控制参数^[19]

Table 7 Packet mobility behavior control parameters^[19]

序号	参数名称	注释
1	跟随领导者	若未指定领导者,则最接近目标的组成员将成为领导者
2	最大距离	数值越小则群组的凝聚力越强,否则群组表现越松散
3	减速时间	
4	在群组成员之间强制保持社交距离	默认不在群组内强制执行社交距离其成员将与不在其群组中的成员保持社交距离

2.2 结伴工况的设置

2.2.1 结伴人员数量

本研究主要分析 2 人、3 人结伴的情况。人员结伴数量工况如表 8 所示,分别列出了结伴人数比例和软件中的实际组数,其中单人出行的实际组数等于其人数。关于人数比例,工况一参考张睿^[20]对京沪线高铁和民航旅客出行调研,3 人及以上按 3 人考虑;工况二参考陶俊臣等人^[21]城市轨道交通枢纽人员结伴情况的研究,同时假设参与结伴的均为 2 人;工况三考虑极端工况,人员数量和分布的限制使得人员少量落单,尽量保证 3 人结伴;工况

四为不考虑结伴的情况。

表 8 人员结伴数量工况设置

Table 8 The setting of the number of personnel companions working conditions

工况	人数比/%	2 人	3 人	单人	总组数
工况一	人数比/%	23.9	26.3	49.8	518
	实际组数/个	88	65	365	
工况二	人数比/%	22.0	0	78.0	655
	实际组数/个	81	0	574	
工况三	人数比/%	0	100	0	248
	实际组数/个	0	244	4	
工况四	人数比/%	0	0	100	736
	实际组数/个	0	0	736	

2.2.2 结伴者的社会关系亲密度

实际应当考虑结伴群组存在亲密程度的差异,如表 7 所述,软件中的最大距离以及减速时间和人员的凝聚力(亲密度)有关,Pathfinder 2023 默认的最大距离、减速时间为 2m、3s,表示断开 2m 后出现等待行为,而领先者会用 3s 来降低速度。杨静^[22]、E T Hall^[23]对公共空间中的 4 种人际距离进行了划分,该人际距离不等同于软件中的最大距离,但也可作为工况设置提供参考。另外还简要研究了减速时间对疏散的影响。

研究结伴者的社会关系亲密度的工况设置如表 9 所示,其中工况 6 考虑不利情况。另外,计算还需作出以下假设:(1)结伴数量按照表 8 的工况一;(2)同一个工况所有群组的亲密程度相同;(3)本文所有计算均不特别指定领导者,且组成群组的人员随机。

表 9 结伴者社会关系亲密度工况设置

Table 9 The setting of social relationship intimacy condition of companions

工况	最大距离/m	减速时间/s
工况 1	0.5	3.0
工况 2 (默认)	2.0	3.0
工况 3	5.0	3.0
工况 4	2.0	1.0
工况 5	2.0	5.0
工况 6	0.5	1.0

3 计算结果及分析

3.1 结伴人员数量的影响

3.1.1 疏散时间

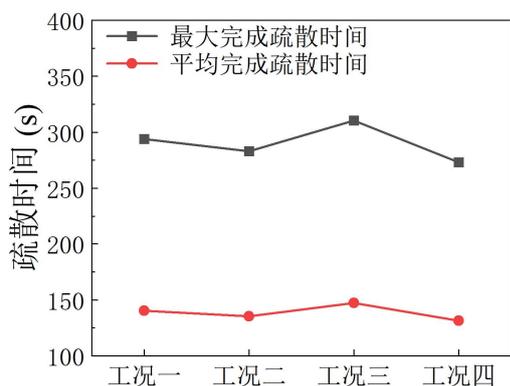


图 4 结伴人员数量与疏散时间

Fig.4 Number of companions and evacuation time

图 4 所示为不同人员结伴数量情况下高海拔紧急救援站疏散的时间。其中工况一的最大、平均完成疏散时间分别为 293.8s、140.3s; 工况二最大、平均完成疏散时间分别为 283.2s、135.4s; 工况三最大、平均完成疏散时间分别为 310.5s、147.4s;

工况四最大、平均完成疏散时间分别为 273s、131.4s。

结伴人员比例工况三>工况一>工况二>工况四, 计算结果呈现出很好的规律性: 工况三的疏散时间最长, 而工况四最短。表明参与结伴的人员比例越大, 疏散效率越低。对比工况一、四, 发现考虑结伴行为后的最大、平均完成疏散时间分别增加了 20.8s、8.9s, 增加了 7.6%和 6.8%, 表明结伴行为对相关工况最大完成疏散时间的影响显著。

3.1.2 人员密度

图 5 所示为人员结伴和不结伴情况下的人员密度。其中被着火车厢堵塞位置的相邻的防护门处是人员最易拥堵的位置, 结伴行为的作用使得人员更容易集中, 局部密度比不结伴的工况更大, 因此加剧了堵塞的情形, 疏散效率降低。例如, 站台宽度有限, 在 80 s、160 s 时, 由于结伴行为加剧了堵塞, 困在站台的人员较多。最后阶段 240 s 时, 结伴工况的横通道内的人员密度更大, 并且在防护门处仍存在人员拥堵, 显然此时剩余人数相对不结伴工况更多。

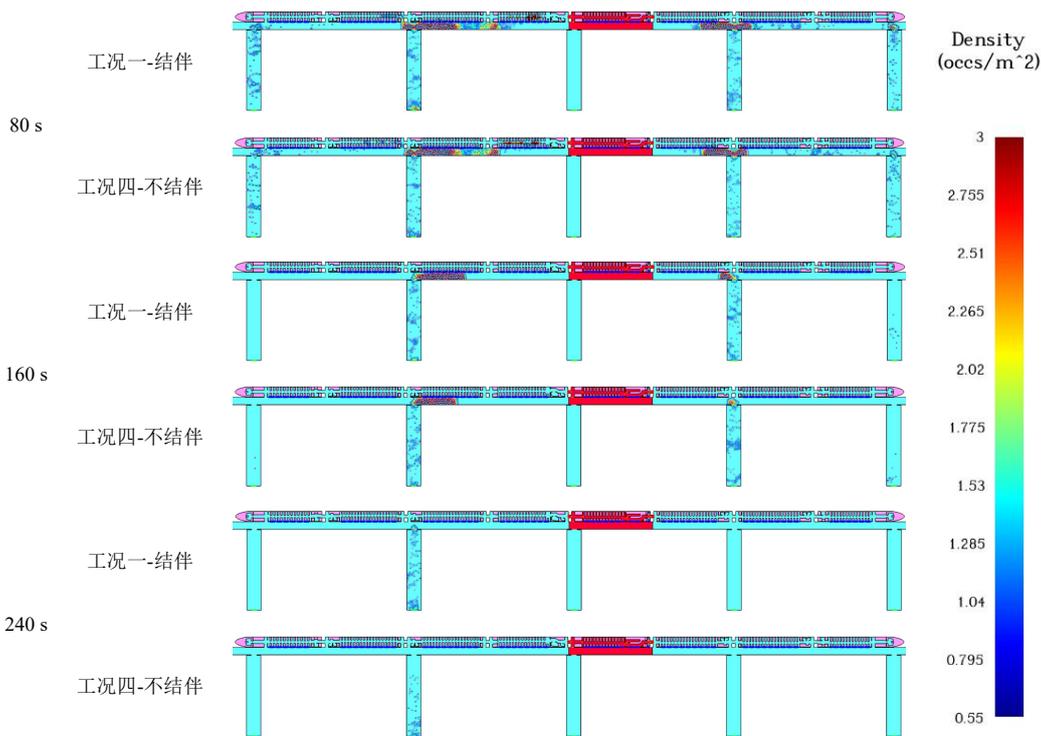


图 5 人员密度分布

Fig.5 Personnel density distribution

3.2 结伴者的社会关系亲密度的影响

图 6 所示为结伴者的不同社会关系亲密度对

高海拔紧急救援站疏散时间的影响。工况 1 最大、平均完成疏散时间分别为 316.1s、149.6s; 工况 2

是默认设置,与 3.1.1 节工况一相同;工况 3 最大、平均完成疏散时间分别为 291.7s、138.1s;工况 4 最大、平均完成疏散时间分别为 298.3s、140.7s;工况 5 最大、平均完成疏散时间分别为 278.4s、138.2s;工况 6 最大、平均完成疏散时间分别为 321.5s、150.6s。

相较于工况 3 中 5m 最大距离的设置,工况 2 中 2m 和工况 1 中 0.5m 的最大距离使最大完成疏散时间分别延后了 2.1s 和 24.4s,增加了 0.7%和 8.4%;平均完成疏散时间分别延后了 2.2s 和 11.5s,增加了 1.6%和 8.3%。说明最大距离参数数值越小其对疏散时间的影响越灵敏。相较于工况 5 中 5s 减速时间的设置,工况 2 中 3s 和工况 4 中 1s 的减速时间使最大完成疏散时间分别延后了 15.4s 和 19.9s,增加了 5.5%和 7.1%;平均完成疏散时间分别延后了 2.1s 和 2.5s,增加了 1.5%和 1.8%。说明改变减速时间参数对疏散时间的影响相对较小。另外,对比工况 6 和工况 2,前者最大、平均完成疏散时间分别延后了 27.7s 和 10.3s,增加了 9.4%、7.3%,表明需要对高结伴亲密度的影响引起重视。

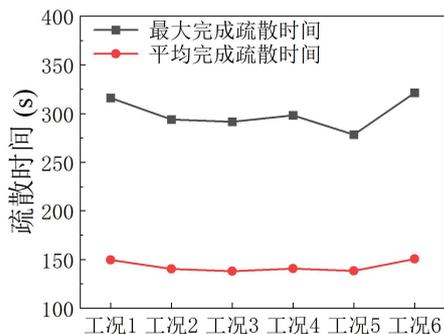


图 6 结伴者社会关系亲密性与疏散时间

Fig.6 Social relationship intimacy and evacuation time of companions

4 结论

本研究参考规范、文献以及实际车辆资料建立了考虑结伴行为的高海拔紧急救援站 Pathfinder 疏散模型,主要研究结论如下:

(1) 高海拔紧急救援站疏散中,考虑结伴行为后的相关工况最大完成疏散时间增加了 20.8s,平均完成疏散时间增加了 8.9s,分别增加了 7.6%和 6.8%。

(2) 人员最易拥堵的是着火车厢所堵塞位置

的相邻防护门处,结伴行为使人员更容易集中,局部密度比不结伴的工况更大。在宽度有限的站台上,结伴使人员堵塞明显加剧,降低了整体疏散效率。

(3) 结伴中社会关系亲密度越高,疏散时间越长,需要引起重视。其作用参数(最大距离和减速时间)对疏散时间的影响明显。

根据结果,建议疏散过程中人员尽可能单独行动,结伴情况下应尽量避免自身等待行为造成疏散路径的拥堵。另外,本文在研究过程中作出了一定的简化,结伴人数按照最大 3 人进行考虑,同一工况所有群组人员亲密程度相同。而在真实的疏散环境中,结伴关系往往更加复杂,群组的亲密程度存在差异性,未来可作进一步研究。

参考文献:

- [1] 崔鹏,王明年,于丽,等.急上高原人员疏散速度修正的台阶试验研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(6): 117-122.
- [2] 李琦,廖雪伶,杨畅,等.高海拔隧道紧急救援站人员疏散特征及规律研究[J].地下空间与工程学报,2023, 19(1):282-290.
- [3] 颜冠峰.高海拔公路隧道火灾烟流控制技术与人员运动能力衰减规律研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [4] 田四明,王伟,巩江峰.中国铁路隧道发展与展望(含截至 2020 年底中国铁路隧道统计数据)[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):308-325.
- [5] TB 10020-2017,铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2017
- [6] 刘屈瑶.高海拔铁路隧道火灾燃烧特性及救援关键技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2023.
- [7] 霍非舟,范丹丹,刘昶,等.考虑结伴行为与情绪感染的人员疏散模型[J].中国安全科学学报,2023,33(11): 126-132.
- [8] 韩雁喆.考虑结伴行为的地铁车站站台行人疏散建模与仿真研究[D].北京:北京交通大学,2020.
- [9] 李盈.考虑环境熟悉度与结伴行为的人员疏散模型研究[D].武汉:武汉理工大学,2022.
- [10] 李鑫,毕海权,秦萍,等.基于移动载荷引燃的高速列车火灾人员安全疏散研究[J].制冷与空调,2019,33(3): 337-342.