

中文引用格式:陈大伟,庞世俊,郝艳红. 低真空隧道列车车厢内部火灾乘客疏散方案[J]. 中国安全科学学报,2024,34(3):186-191.

英文引用格式:CHEN Dawei,PANG Shijun,XI Yanhong. Study on evacuation of passengers from train compartment fires in low-vacuum tunnels[J]. China Safety Science Journal,2024,34(3):186-191.

低真空隧道列车车厢内部火灾乘客疏散方案*

陈大伟¹教授级高工,庞世俊¹,郝艳红²副教授
(1 中车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111;
2 北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

中图分类号:X932 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.03.1785

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFB1200600)。

【摘要】 为探究真空管道运输系统内列车火灾的人员疏散问题及烟气蔓延规律,运用火灾模拟软件(FDS)及人员仿真疏散软件 Pathfinder,以低真空隧道内由5节车厢构成的高速列车车厢火灾时乘客疏散为研究对象,综合比较10种疏散方案中疏散时间、烟气蔓延程度及CO体积分数,得到乘客最佳疏散方案,并设计救援车对接高速列车车门的辅助疏散方式。结果表明:当着火车厢的乘客疏散至相邻车厢时,乘客的最佳疏散方式为靠近门口的2排乘客与靠近火源的1排乘客同时离开,随后按照与火源的距离由近到远逐排撤离。若采用救援车辅助疏散,当火灾发生在车厢1、车厢2或车厢3时,救援车到达后完成全车乘客疏散的总用时分别为533、586和376 s;车厢1发生火灾时,门1的利用时间为200 s;车厢2发生火灾时,门1的利用时间为145 s;当车厢3发生火灾时,2个门的利用率较为均衡。因此,在实际疏散时,可以采用语音播报的形式引导乘客充分利用好2个车门,以节约疏散时间。

【关键词】 低真空隧道; 列车车厢; 列车火灾; 乘客疏散; 疏散方案;
火灾模拟软件(FDS)

Study on evacuation of passengers from train compartment fires in low-vacuum tunnels

CHEN Dawei¹, PANG Shijun¹, XI Yanhong²

(1 CRRC Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao Shandong 266111, China;

2 School of Civil Engineering and Construction, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to study the evacuation of passengers in a train fire in a vacuum tube transportation system and the smoke spreading law, The fire numerical simulation software FDS and the personnel simulation evacuation software Pathfinder were used to study the evacuation of passengers in case of fire in a high-speed train compartment consisting of 5 cars in a low-vacuum tunnel. Comprehensively comparing the evacuation time, the degree of smoke spread and the CO concentration in 10 evacuation schemes, the best evacuation method for passengers was obtained, and a rescue vehicle was designed to assist evacuation by docking the door of the high-speed train. The results show that: when the passengers in the fire compartment are evacuated to the neighboring compartments, the best evacuation method for the passengers is to leave the two rows of passengers close to the doorway and the rows of passengers close to the fire source at the same time, and then evacuate the passengers row by row by the distance from the fire source

from near to far. If the rescue vehicle is used to assist the rescue, when the fire occurs in compartment 1, compartment 2, or compartment 3, the total time to complete the evacuation of all passengers after the arrival of the rescue vehicle is 533, 586, and 376 s, respectively. When a fire occurs in compartment 1, the utilization time of door 1 is 200 s; when a fire occurs in compartment 2, the utilization time of door 1 is 145 s; when a fire occurs in compartment 3, the utilization rate of the two doors is more balanced. Therefore, during the actual evacuation, passengers can be guided to fully utilize the two doors in the form of voice announcements to save the evacuation time. The research results can provide a reliable reference basis for the emergency rescue of passengers in future low vacuum tunnel train fires.

Keywords: low-vacuum tunnel; train carriages; train fire; passenger evacuation; evacuation plan; fire dynamics simulator (FDS)

0 引言

随着城市建设的不断发展,现代社会对列车时速的要求越来越高。列车在低真空隧道内行驶时,受到的空气阻力影响较小,可以在较低的功耗下高速运行。KEMPER H^[1]提出,列车在真空管道内行驶的速度可达到 1 000 km/h。GODDARD R^[2-3]认为,列车在真空管道中行驶时速度可达 1 600 km/h。美国麻省理工学院的学者认为列车在 1 kPa 的真空管道内行驶时,速度可达到 22 500 km/h^[4]。因此,真空管道运输系统成为各国积极探索试验的对象^[5-6]。低真空管道内气压低,不适宜人类生存,且密封好,难以被外界破坏,因此,高速列车在低真空隧道中发生火灾时,怎样对乘客实施有效的疏散救援,成为亟需解决的问题。

目前,国内外对常压情况下烟气蔓延特性及人员疏散问题的研究已取得较大进展^[7-9],关于真空管道运输系统的研究也在逐步完善,如张继业^[10]和李庆领^[11]等均研究了真空管道运输模式下的气动阻力、气动生热及热压耦合等问题。但是,关于真空管道运输系统内列车火灾的烟气蔓延及人员疏散的研究还较为鲜见。

因此,文中拟参考国内外现有研究成果,运用火灾模拟软件(Fire Dynamics Simulator, FDS)及人员仿真疏散软件 pathfinder,将真空隧道内列车车厢火灾时的火灾烟气蔓延、CO 体积分数与乘客疏散相结合,探寻乘客疏散的最佳方式;并设计救援车,计算不同车厢着火后的疏散时间,以为未来低真空隧道列车火灾救援提供可靠的参考依据。

1 低真空隧道列车火灾数值仿真

1.1 FDS 列车模型

采用 FDS 对低真空隧道列车车厢内火灾进行

仿真计算,其模型如图 1 所示。列车主体由 5 节车厢构成,火源设置在中间列车的中部,火源表面与列车地面平齐,单节车厢长 18 m,高 2.23 m,宽 3.4 m。2 节车厢连接部分长度为 6 m。每节车厢左右两侧分别设置 3 个座位,共 17 排,相邻座位间的距离为 0.6 m,列车过道宽度为 0.6 m。车厢左右两侧分别设有行李架,行李架距离地面高度为 1.7 m,车厢左右两端设有防火门,防火门高 1.9 m,宽 0.8 m。

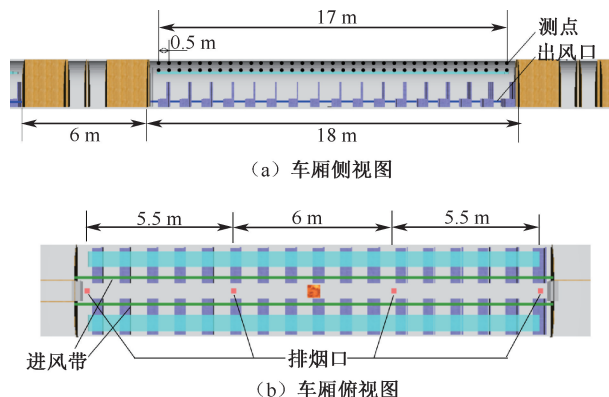


图 1 FDS 火灾模拟图

Fig. 1 FDS fire simulation diagram

由于高速列车处于低真空隧道内,所以设置车厢通风为内部空气循环。在车厢两侧壁底部设置出风带,宽 0.1 m,速度为 0.15 m/s,在靠近车厢纵向中线的顶棚下方设置进风带,宽 0.1 m,速度为 0.15 m/s。为控制火灾发生时车厢内烟气的蔓延,在车厢顶棚下方沿纵向中线以 5.5、6、5.5 m 的间距对称布置 4 个排烟口,大小为 0.2 m×0.2 m(图 1b)。发生火灾时,为了尽可能地疏散烟气,为乘客提供更多的逃生时间,着火车厢提高进风出风功率至 0.3 m/s,并打开排烟口,以 10 m/s 的速度排出烟气,减少烟气的聚集。

分别在距地面 1.8 和 2.2 m 高度处沿列车长度方向每隔 0.5 m 布置多个测点,以监测烟气的演化

特性。高速列车车厢内人员组成复杂且可燃物众多,瑞典地铁火灾研究计划“METRO”项目通过对瑞典地铁乘客行李调研测试得出,普通乘客携带单件行李燃烧时火源功率不超过 0.3 MW^[12];史聪灵等^[13]计算得出恐怖分子携带 6.9 L 汽油下火源功率约为 1.4 MW。参考文献[12-13],文中采用的火源功率范围为 0.3~1.5 MW,即 0.3~0.7 MW(间隔 0.1 MW)、0.9~1.5 MW(间隔 0.2 MW),共 9 个工况。

1.2 Pathfinder 疏散仿真设计

高速列车在低真空隧道内发生火灾时,着火车厢内的乘客首先疏散至相邻车厢,当乘客完全撤离着火车厢后关闭着火车厢和相邻车厢之间的防火门。通过 Pathfinder 软件模拟列车发生火灾后的人员疏散,得出人员安全撤离所需要的时间,进而确定防火门关闭的时间。

由于低真空隧道列车尚处于试验阶段,其乘客数据尚未产生,故对于低真空隧道列车的人员组成,参考李修柏等^[14]通过问卷调查得出的高速列车乘客组成比例,设置人员组成比例为成年男性 57.71%,成年女性 32.80%,老年人 4.66%,小孩 4.84%。按照列车满载情况考虑乘车人数,5 节车厢共 388 人。列车中人员行走速度受到年龄,性别以及火灾环境的影响,参考《地铁安全疏散规范》(GB/T 33668—2017),设置中青年男士、中青年女士、老人及儿童的行走速度分别为 1.25、1.05、0.76、0.76 m/s。列车乘客肩宽参考《中国成年人尺寸》(GB 10000—88),成年男性为 48.6 cm,成年女性为 45.5 cm,老年男性为 48.6 cm,老年女性为 45.5 cm,未成年人为 34.5 cm。

2 乘客疏散至相邻车厢的方案

2.1 不同疏散方案的疏散时间

为得到最佳的乘客疏散方案,最大限度保障乘客的人身安全,设计 10 个疏散方案,见表 1,表中时间为乘客全部疏散至相邻车厢所用的时间。由表 1 可知:方案 2、方案 4 与方案 8 的疏散时间分别为 133.4、135.2 与 132 s,其余工况的疏散时间均在 110 s 以内,故淘汰方案 2、方案 4 和方案 8。疏散方案中,防火门关闭时间主要由着火车厢人员完全疏散至相邻车厢的时间决定,由于其他方案的疏散时间均在 110 s 以内,所以将防火门关闭时间均设置为 110 s,以满足人员疏散需求。

表 1 疏散方案

Tab. 1 Evacuation plan

方案	疏散方案	疏散时间/s
1	乘客自由向两侧疏散,不进行人为干预	100
2	将乘客分为 3 个部分,每部分 3 排,依次按照靠近火源的距离分批撤离,离火源越近的部分撤离越早	133.4
3	将乘客分为 3 个部分,每部分 3 排,其中靠近门口与靠近火源的 2 个部分同时离开,随后中间部分撤离	99.4
4	乘客按距火源的距离,由近到远,逐排离开	135.2
5	首先靠近门口 1 排的人员与靠近火源 1 排的乘客同时离开,随后分别按照距门的距离与距火源的距离,逐排离开,直到乘客全部撤离	104.2
6	首先靠近门口 2 排的乘客与靠近火源 1 排的乘客同时离开,随后分别按照距门的距离与距火源的距离,逐排离开,直到乘客全部撤离	95.2
7	首先靠近门口 3 排的乘客与靠近火源 1 排的乘客同时离开,随后分别按照距门的距离与距火源的距离,逐排离开,直到乘客全部撤离	94.4
8	靠近门口的 1 排的乘客与靠近火源 1 排的乘客同时离开,随后按照离火源的距离,由近到远,逐排撤离	132
9	靠近门口的 2 排的乘客与靠近火源 1 排的乘客同时离开,随后按照离火源的距离,由近到远,逐排撤离	108.4
10	靠近门口的 3 排的乘客与靠近火源 1 排的乘客同时离开,随后按照离火源的距离,由近到远,逐排撤离	103.3

2.2 考虑烟气蔓延的最佳疏散方案

采用 FDS 对不同火源功率下的火灾烟气进行仿真。110 s 时,部分火源功率下车厢内部的烟气蔓延情况如图 2 所示。由图 2 可知:随着火源功率的增大,蔓延区域不断增大,相邻车厢内堆积的烟气也越多。由于车厢内的烟气蔓延范围随火源功率的增大而增大,故选取最不利火源功率即 1.5 MW 下的烟气蔓延状况评估表 1 中各疏散方案。

按照表 1 中的疏散方案,利用 pathfinder 软件模拟乘客疏散,得到乘客疏散至车厢不同位置时的时间,如图 3 所示;再由 FDS 结果得到乘客到达各个位置(图 2e)时刻的 CO 体积分数,如图 4 所示。

由图 4 可知:所有位置的 CO 体积分数均小于 500×10^{-4} ,翁庙成^[15]研究建筑火灾烟气 CO 体积分数得出,当 CO 体积分数为 400×10^{-4} 时,成年人在

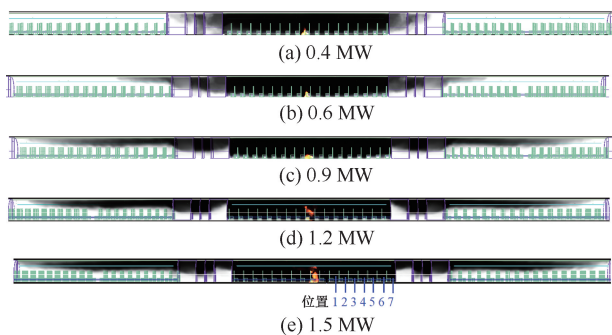


图2 各火源功率下 110 s 时的烟气蔓延

Fig. 2 Smoke spread at 110 s for each fire source power

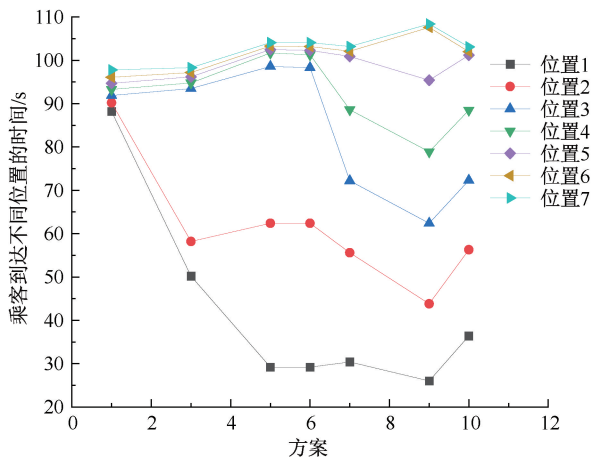


图3 不同方案下乘客到达典型位置的时间

Fig. 3 Time for passengers to arrive at typical locations for different scenarios

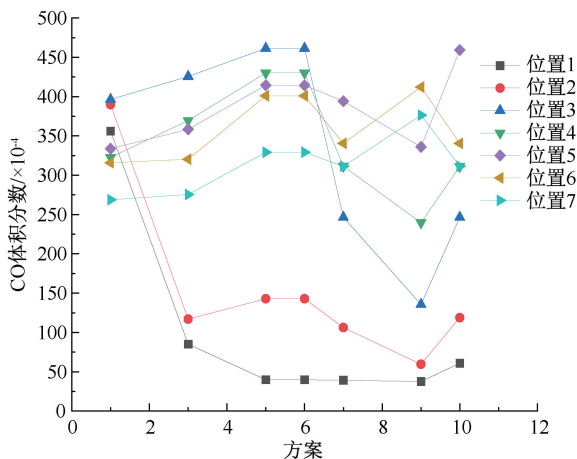


图4 不同方案下乘客到达典型位置时的体积分数浓度

Fig. 4 CO Concentration at typical passenger arrival position for different scenarios

1~2 h 内会出现头痛情况,3 h 后将威胁生命;当 CO 体积分数为 800×10^{-4} 时,45 min 内会头痛、眼花、恶心。综上可知:所有疏散方式均可以在短期内保障人员生命安全,但考虑到长时间处于高浓度烟气下,人体上呼吸道会受到损害,因此,通过对比各位置处

烟气浓度选出最优疏散方式。

由图4可知:各疏散方案中,最后一人离开位置1时,方案1的CO体积分数达到 356×10^{-4} ,超过其他方案3倍,故淘汰方案1;当最后一人离开位置3时,只有方案7、9和10的CO体积分数较低,而对比其余位置,方案9更为安全,故方案9为最佳方案。即当车厢内着火后,向相邻车厢疏散过程中的最佳疏散方式为:靠近门口的2排乘客与靠近火源1排的乘客同时离开,随后按照离火源的距离,由近到远逐排撤离。

3 乘客疏散至救援车辆的方案

若车厢内部火灾严重,导致列车失去动力被迫停在隧道内部,乘客疏散至相邻车厢亦不能保证安全,需要实施通过救援车辆辅助疏散的方案。当列车随机停在隧道内时,总控台给就近的紧急救援站发出信息,派出救援列车与事故列车进行对接,乘客乘坐救援列车抵达紧急救援站,实现安全疏散。根据《客车装载质量计算方法》^[16],按II级客车确定每位乘员的随身行李质量为3 kg,每位站立乘客所需面积为 0.15 m^2 。考虑到可能存在乘客受伤晕倒的紧急情况,车上需配备急救工具等,适当增加人均面积至 0.28 m^2 。结合列车长度及着火列车总人数,设计长50 m、宽2.5 m的救援列车来辅助疏散,如图5所示。

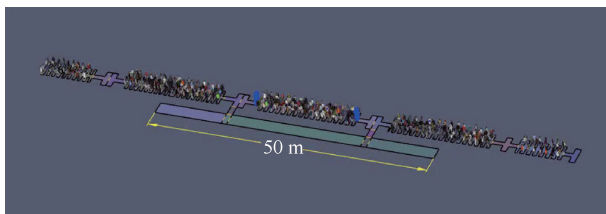


图5 救援车辅助疏散

Fig. 5 Rescue vehicle assisted evacuation

假设高速列车车厢内发生火灾时,在救援车到来之前,人员先疏散到其他车厢或走廊,等待救援,待救援车对接完成后组织全车乘客一起疏散。救援车车门和高速列车车门对接时,尽量对接在着火车厢的一侧,如当中间车厢(车厢2、3和4)发生火灾时,救援车直接停在着火车厢的一侧,救援车门直接和着火车厢两端的门相连接;但当端部车厢(车厢1和车厢5)发生火灾时,因端部车厢布局较宽敞且人数较少,因此设置救援车停在相邻车厢的一侧。因此,当车厢1、2着火时,救援车与车厢2对接;车厢3着火时,救援车与车厢3对接;车厢4、5着火时,救援车与车厢4对接。救援车停车位置和火灾发生

位置的关系如图 6 所示。

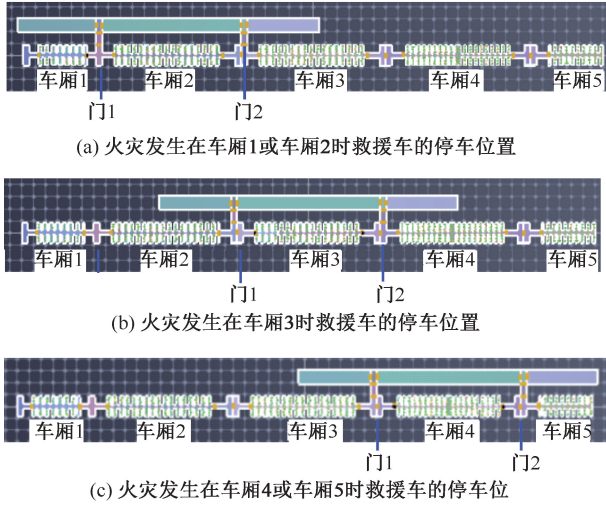


图 6 救援车停车位置和火灾发生位置的关系
Fig. 6 Relationship between the parking position of the rescue vehicle and the location of the fire

通过 pathfinder 仿真得出,火灾发生在车厢 1 时,救援车到达后用 533 s 完成全车人员的疏散;火灾发生在车厢 2 时,救援车到达后用 586 s 完成全车人员的疏散。虽然救援车的位置一致,但是,火灾发生位置不同导致疏散时间不同。火灾发生在车厢 1 时,乘客首先疏散至车厢 2 和 2 节车厢的连接

处,救援车门 1 承担车厢连接处和部分车厢内的乘客疏散;而火灾发生在车厢 2 内时,乘客首先疏散至车厢 1 和车厢 3,当救援车到达之后,车厢 1 内的乘客由救援车门 1 疏散至救援车,而车厢 3、车厢 4 和车厢 5 的乘客总人数增多,且距离车门相对较远,主要由门 2 疏散至救援车,救援车门 2 承担的客流量较大,因此,需要的总时间比火灾发生在车厢 1 时要多。

当火灾发生在车厢 3 时,人员首先向相邻的两侧车厢疏散,当救援车到达后,用时 376 s 完成全车人员的疏散,由于门 1 和门 2 疏散的乘客数量较为平均,2 个门的利用率均较高,疏散时间缩短。车厢 1 和 5 对称,2 和 4 对称,结果基本一致,故不再讨论。

对救援车的 2 个门进行流量监测,结果如图 7 所示。由图 7 可知:当车厢 1 发生火灾时,由于火灾发生位置相对于整列车车厢较偏,救援车 2 个门的人员流率呈现不均匀的分布,门 1 在车门开启后 200 s 时就不再被使用,门 2 则需要一直开启到最后。因此,在实际疏散时,可以语音播报的形式引导乘客充分利用好救援车的 2 个门,以节约疏散时间。当车厢 2 发生火灾时,门 1 仅供少量乘客疏散,在门开启后 145 s 时便不再被使用,而门 2 则需要承担将近 4 个车厢人员的疏散。当车厢 3 发生火灾时,

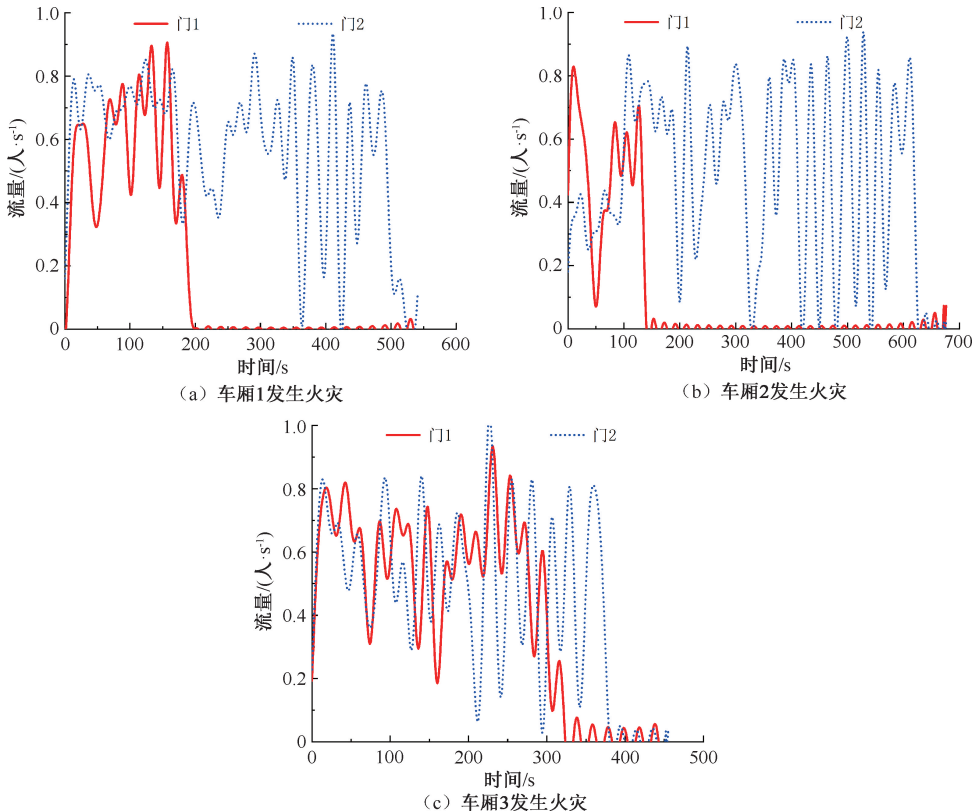


图 7 不同车厢发生火灾时救援车入口门流量

Fig. 7 Flow of entrance doors of rescue vehicles in case of fire in different compartments

2个门的利用率较为均衡。

4 结 论

1) 当着火车厢的乘客疏散至相邻车厢时,靠近门口的2排乘客与靠近火源的1排乘客应同时离开,随后按照离火源的距离,由近到远逐排撤离。

2) 当采用外接救援车辅助乘客疏散时,火灾发生在车厢1、车厢2或车厢3时,救援车到达后完成全车乘客疏散用时分别为533、586和376 s。

3) 在疏散救援时,不同车门的疏散利用率存在差异,当车厢1发生火灾时,救援车门1在车门开启后200 s时就不再被使用,门2则需要一直开启到最后;当车厢2发生火灾时,门1仅供少量乘客疏散,在门开启后145 s时便不再被使用,而门2则需要承担将近4个车厢人员的疏散;当车厢3发生火灾时,4个门的利用率较为均衡。因此,在实际疏散时,可以语音播报的形式引导乘客充分利用好救援车的2个门,以节约疏散时间。

参 考 文 献

- [1] KEMPER H. The invention of a hovertrack with wheelless vehicles which hover along iron rails using magnetic fields: Germany, DE1934K130005D[P]. 1934-08-11.
- [2] GODDARD H R. Apparatus for vacuum tubetransportation;US,2488287[P]. 1945-10-06.
- [3] GODDARD H R. Vacuum tube transportation system;US,2511979[P]. 1950-06-20.
- [4] 郝瀛. 中国铁路建设概论[M]. 北京:中国铁道出版社,1998: 294-295.
- [5] 邓自刚,张勇,王博,等. 真空管道运输系统发展现状及展望[J]. 西南交通大学学报,2019,54(5):1 063-1 072. DENG Zigang, ZHANG Yong, WANG Bo, et al. Present situation and prospect of evacuated tube transportation system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 1 063-1 072.
- [6] DENG Zigang, ZHANG Weihua, ZHENG Jun, et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(6):1-8.
- [7] 吕伟,秦霜霜,穆治国,等. CRH380AL型高铁列车应急疏散及影响因素模拟研究[J]. 中国安全科学学报,2020,30(8):164-170. LYU Wei, QIN Shuangshuang, MU Zhiguo, et al. Simulation study on evacuation of CRH380AL high-speed train and its influencing factors[J]. China Safety Science Journal, 2020,30(8):164-170.
- [8] 徐志胜,孔杰,游温娇等. 单洞双线铁路隧道火灾人员疏散安全性分析[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(1):181-186.
- [9] 吴桂庆. 基于Pathfinder的地铁车站行人疏散仿真研究[J]. 交通科技与经济,2014,16(3): 80-83.
- [10] 刘加利,张继业,张卫华. 真空管道高速列车气动特性分析[J]. 机械工程学报,2013,49(22):137-143. LIU Jiali, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Analysis of aerodynamic characteristics of high-speed trains in the evacuated tube [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(22):137-143.
- [11] 贾文广. 真空管道交通系统热动力学特性研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2013. JIA Wenguang. The characteristic investigation of evacuated tube transport system on thermodynamics[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2013.
- [12] KUMM M. Carried fire load in mass transport systems: a study of occurrence, allocation and fire behavior of bags and luggage in metro and commuter trains in Stockholm[M]. Västerås: School of Sustainable Development of Society and Technology, Mälardalen University, 2010:94.
- [13] 史聪灵,钟茂华,罗燕萍,等. 地铁车厢汽油火灾的模拟计算与分析[J]. 中国安全科学学报,2006,16(10): 32-36. SHI Congling, ZHONG Maohua, LUO Yanping, et al. Simulating calculation and analysis of gasoline arson fires in metro compartment [J]. China Safety Science Journal,2006, 16(10):32-36.
- [14] 李修柏. 特长高速铁路隧道火灾人员疏散研究[D]. 长沙:中南大学,2013. LI Xiubai. Research of personnel fire evacuation in extra-long tunnel of high speed railway[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [15] 翁庙成. 建筑火灾烟气中CO/CO₂的浓度分布及毒性研究[D]. 重庆:重庆大学,2013. WENG Miaocheng. Studies on the concentration distribution and the toxicity effect of carbon monoxide and carbon dioxide in building fire smoke[D]. Chongqing: Chongqing University,2013.
- [16] GB/T 12428—2005,客车装载质量计算方法[S]. GB/T 12428—2005, Laden mass calculating method for buses[S].

作者简介: 陈大伟 (1982—),男,山东济南人,博士,教授级高级工程师,主要从事高速列车防灾减灾方面的工作。E-mail: chendawei@cqsf.com。