

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.24.013

考虑人员安全疏散的综合管廊防火分区设计长度研究

尚琳¹, 刘远¹, 何发龙², 徐广吉², 王长祥¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 天津城建大学 能源与安全工程学院, 天津 300384)

摘要: 现行《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)中关于综合管廊防火分区设计长度的规定,虽然保证了综合管廊消防安全性,但是限制了综合管廊施工安装及运行维护效率。实践经验表明,防火分区设计长度具有一定的拓延空间。从人员安全疏散角度,提出综合管廊疏散安全性准则,构建基于改进社会力模型综合管廊人员安全疏散仿真模型,分析火灾环境参数(如能见度和烟气刺激性等)对人员安全疏散时间的影响,总结出防火分区设计长度与疏散时间之间的关系。研究结果表明,在充分考虑烟气刺激性的影响下,防火分区设计长度值可拓展至437 m。

关键词: 综合管廊; 安全疏散; 防火分区; 设计长度; 疏散时间

中图分类号: TU990.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)24-0072-07

Study on the Utility Tunnel Fire Compartment Design Length Considering Safe Evacuation

SHANG Lin¹, LIU Yuan¹, HE Fa-long², XU Guang-ji², WANG Chang-xiang¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In the existing standard *Technical Code for Urban Utility Tunnel Engineering* (GB 50838-2015), the provisions on the design length of the utility tunnel fire compartment, although guarantee the utility tunnel fire safety, they restrict the construction, installation, operation and maintenance efficiency of the utility tunnel. Practical experience indicates that the fire compartment design length has a certain extension space. From the perspective of personnel safe evacuation, this paper puts forward utility tunnel evacuation safety standards, and builds a utility tunnel personnel safe evacuation simulation model based on the improved social force model, analyzes environmental parameters of fire, such as visibility and flue gas excitant, influence on the safe evacuation time, and summarizes the relationship between the fire compartment design length and the evacuation time. The results show that the fire compartment design length can be extended to 437 m under the influence of smoke irritation.

Key words: utility tunnel; safe evacuation; fire compartment; design length; evacuation time

1 研究背景

综合管廊是现代城市基础设施建设体系必不可少的重要组成部分,其开发与利用解决了传统直埋式管线的各种弊端,合理利用了城市地下空间,缓解了土地资源紧张的局面。但综合管廊内敷设着多种类型的管线,如电力电缆、燃气管线、热力管线,可燃物较多,这无疑增加了综合管廊实际运营过程中的火灾危险性。

目前,针对综合管廊消防安全性的研究主要集中在综合管廊电缆火灾危险性的分析。陶海军等^[1]建立了1:3.6小尺寸综合管廊模型,进行电缆火灾燃烧试验,对温度数据进行分析,研究综合管廊内电缆燃烧烟气温度特征。刘海静等^[2]通过建立全尺寸综合管廊模型和进行电缆燃烧试验,分析总结了起火方式、环境风速、电缆敷设数量等因素对温度场分布、CO产生量及产生速率等重要参数的影响规律。不同尺度的电缆燃烧特性试验研究,为深入理解电缆火灾发展规律提供了科学依据。数值计算作为一种有效的研究手段,为人们研究综合管廊提供了一种方法。王方舜^[3]运用CFD技术模拟分析了防火分区的间距对管廊火灾的影响,并得出防火分区间距为200 m时,空气是影响火势发展的主要因素;防火分区间距为800 m时,燃料是主要影响因素的结论。高明旭^[4]通过FDS技术进行了管廊电缆舱300、400 m长度作为电缆舱防火分区火灾安全性研究,结果表明,综合管廊电缆舱防火分区长度设为300 m时,在防火门关闭自然通风工况下发生火灾后人员的逃生面临着失能的危险,必须采取消防措施;防火分区为400 m时,不采取消防设施,现场人员面临失能的危险。

相比于综合管廊火灾危险性的研究,综合管廊人员安全疏散的研究则相对较少,尤其是考虑火灾条件下的人员疏散的研究。事实上,人员安全疏散的研究理论已经相对成熟,目前已发展出了侧重微观机理表达或者规则演化的多种仿真计算模型,均可很好地描述人员疏散过程。同时,也有一些可利用的数值分析软件进行分析研究。郭雄^[5]基于Pathfinder软件,分析得到综合管廊电缆舱室无交叉段的最佳防火分区长度与检修通道宽度。张颖等^[6]研究地铁区间隧道内列车中部发生火灾时人员疏散受烟气的影响,运用FDS软件模拟火灾烟气对乘客疏散的影响。研究结果表明,列车内部火灾

烟气对人员的主要危害指标为温度,疏散平台处火灾烟气对人员的主要危害指标为可见度。

虽然可通过疏散模型和软件获取疏散时间,但对于火灾条件下人员疏散的研究,尤其是火场环境参数和人员疏散运动的耦合机制的研究则存在一定难度。国内外专家和学者为了获取更为贴近火场情况的人员疏散特征参数,也开展了一些近似的试验设计和研究,这一研究主要集中在烟气的能见度和刺激性对于人员安全疏散的影响。Frantzieh^[7]和Fridolf等^[8]也开展了火灾烟气对于人员运动速度影响的研究,结果表明移动速度和能见度之间存在一定的关系,即能见度越低疏散速度越慢,而且在充满烟气的隧道中人会沿着墙壁移动而不会注意到对侧的出口。Seike等^[9-10]开展了全尺寸隧道充满烟气环境下的人员疏散试验研究,结果表明,在正常条件下人员行走速度的最大值、平均值和最小值基本为定值,与烟气的减光系数并无直接关系,且正常条件下的人员行走速度最大值约为1.8 m/s,平均值约为1.4 m/s,最小值约为1 m/s。谢玮等^[11]开展了不同能见度环境下个体疏散试验,研究了能见度对人员疏散速度及路径选择的影响。研究结果表明:在正常能见度条件下,人员的平均疏散速度为 (2.37 ± 0.23) m/s,个体间疏散速度差异明显,随着能见度降低,人员的平均疏散速度呈现均匀下降趋势,个体疏散速度最终均趋近于 (0.36 ± 0.10) m/s。需要注意的是,以上的研究主要集中在火灾烟气对于能见度的影响,并未对火灾烟气的毒性及刺激性进行充分考虑。Jin等^[12]开展了20 m长度走廊环境中,烟气刺激性和非刺激性对人员疏散速度的影响研究,结果表明,在非刺激条件下,能见度对于人员的移动速度的影响较为缓和,同时发现烟气减光系数和人员的移动速度成反比的关系;但在刺激性烟气的影响下,在烟气见光系数为0.3~0.5 m^{-1} 范围内,人员移动速度急剧下降,这是由于烟气刺激往往使得人们难以睁开眼睛行走,同时刺激性烟气也会影响到人的呼吸系统,从而加深人员在此环境中的恐惧感。上述火灾烟气对人员疏散的影响研究,为讨论火场环境参数和人员疏散运动的耦合机制提供了重要数据支撑。现行《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)中第5.4.1条规定综合管廊的每个舱室应设人员出入口、逃生口、吊装口、进风口、排风口、管线分支口等;敷设电力电缆的

舱室,逃生口间距不宜大于200 m。

综合现有研究成果,管廊是长线型构筑物,人流量少,功能单一,按民用建筑划分防火分区并不合理,且造价偏高;若将整个管廊带作为一个防火分区处理,区间太长,不利于消防,也不满足当前防火规范的要求。此外,目前针对管廊的消防安全研究主要侧重于材料燃烧性能,如电缆燃烧特性、火灾的发展规模等,并未系统性地研究综合管廊的消防安全性,尤其是火灾条件下人员安全疏散问题,事实上针对这些参数开展系统性的火灾危险性研究,对于工程实践有着更为重要的指导意义。笔者从人员安全疏散角度,考虑了火灾产生的烟气对人员疏散的影响,为综合管廊防火分区设计长度的设置提供依据,提高综合管廊的安全可靠性、适用性和经济性。

2 综合管廊火灾安全性判断准则

火灾工程学中定义的人员安全疏散是建筑物内的所有人员在火灾烟气没有达到危害人的生命状态之前所进行的安全撤离活动。火灾发生过程中,人在建筑物中的位置、对建筑物的熟悉程度、建筑物结构设计、火灾发生发展进程及群体的行为动作等都会对每个个体的疏散和行为产生影响。瑞典建筑法规(SBC)和新西兰建筑规范(NZBC)的可接受标准见表1。在考虑火灾环境参数对人的影响时一般选取距地面1.5 m高度处的环境参数进行讨论。

表1 瑞典建筑法规和新西兰建筑规范标准

Tab.1 Swedish building code and New Zealand building code

项目	瑞典 BBRAD 3	新西兰 NZBC—C/VM2
烟气层高度/m	烟气层高度 $> 1.6 + (\text{吊顶高度}) \times 0.1$	—
能见度/m	能见度 > 10 (面积 $> 100 \text{ m}^2$) 能见度 > 5 (面积 $< 100 \text{ m}^2$)	能见度 > 10 (面积 $> 100 \text{ m}^2$) 能见度 > 5 (面积 $< 100 \text{ m}^2$)
热辐射/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	辐射 < 2.5 或 短期辐射 < 10	出口辐射暴露的要求
温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度 < 80	FED 热力学指定标准
CO 浓度/ 10^{-6}	$< 2\ 000$	FED _{CO} 指定标准
CO ₂ 浓度/%	< 5	—
氧气含量/%	> 15	—
烟气毒性指数	—	FED _{CO} < 0.3 ; FED _{热环境} < 0.3

判定人员是否能够顺利安全疏散,主要通过比较可用安全疏散时间(ASET)和必需安全疏散时间(RSET)。可用安全疏散时间(ASET)往往是规范给定的安全限制。现行《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)中并未对此作出明确规定。目前,我国《地铁设计规范》(GB 50157—2013)中规定,人员疏散的所需安全疏散时间应该 $\leq 6 \text{ min}$;而美国 NFPA 130—2003 则规定人员疏散的所需安全疏散时间应该 $\leq 4 \text{ min}$ 。人员疏散的所需安全疏散时间(RSET)包括火灾探测时间 t_d 、报警时间 t_a 、疏散准备时间 t_p 、疏散行动时间 t_m ,表达式如下:

$$t_{\text{RSET}} = t_d + t_a + t_p + t_m \quad (1)$$

对于长距离的人员疏散运动,疏散行动时间 t_m 受疏散过程中的环境参数影响较大,如烟气能见度和刺激性等,图1给出了火灾条件下的人员安全疏散判定准则,图1中给出了计算区域内某一切片上的环境参数的时空变化关系,通过图1可获取不同时间人员所处位置的环境参数,火灾发展过程中切片上的环境参数随时间变化。人员的疏散可分为发现火灾后的立即逃生和等待报警后再逃生两部分,这主要取决于人员与火灾发生点的相对位置,人员在向出口运动的过程中,环境参数,如烟气,也会向四周扩散,人员受参数的影响程度取决于该人员所处位置的环境参数取值。若人员在可用安全疏散时间(ASET)内到达出口,则疏散成功,即要求 $\text{RSET} < \text{ASET}$,疏散过程中的环境参数会导致人员的RSET值增加,对于火灾烟气来说主要是环境能见度和烟气刺激性的影响。

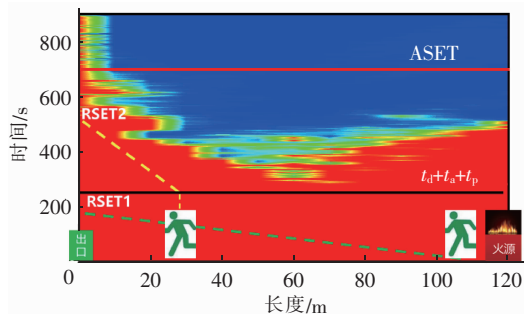


图1 火灾条件下的人员安全疏散判定准则

Fig.1 Criteria for safe evacuation under fire conditions

3 综合管廊火灾条件下人员安全疏散仿真

3.1 综合管廊人员安全疏散模型

社会力模型^[13]作为一种运动微观机制表达的模型,可很好解释人员疏散过程中的物理机制,也被

广泛应用于人员安全疏散仿真中,社会力模型的计算公式如下:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{\text{will}} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (2)$$

式中 f_{will} ——自驱动力,也称意愿力

f_{ij} ——行人间作用力,反映了行人受其周边其他行人的影响

f_{iw} ——行人与运动边界间的作用力,反映了行人受其周边墙体或者障碍物等运动边界的影响

式(2)右端的各项计算表达可参见文献[13],这里不再赘述。

值得注意的是,考虑管廊运营过程中的实际情况,综合管廊内人员的数量通常较少,且往往都是具有专业素养的工作人员,因此,在社会力模型中人员排斥力的影响要弱于人员之间的黏性力,后者通常用来表示人员之间相熟或互救的行为,因此,计算过程中还需考虑组群黏性力的影响。组群黏性力可通过下式计算:

$$f_{if} = E_i \exp[(r_{if} - d_{if})/F_i] n_{if} \quad (3)$$

则改进后的社会力模型计算公式为:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{\text{will}} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} + f_{if} \quad (4)$$

基于改进的社会力模型开发综合管廊人员疏散模拟系统,模拟在不同工况下人员的疏散,进而得出不同工况下的人员所需安全疏散时间。

3.2 不同防火分区长度条件下的疏散仿真

仿真计算中疏散区间长度和出口数量如表2所示,考虑最不利原则,人员的位置就是最不利位置,为火源位置附近的人员处在相邻出口之间距离的中点处。人员疏散行动时间与人员距离出口的距离有关,人员距离出口的最远距离为相邻安全出口间距的一半。

表2 安全出口间距设置

Tab.2 Setting of the distance between safe exits

出口数量/个	安全出口间距/m				
	疏散区间长度 = 200 m	疏散区间长度 = 250 m	疏散区间长度 = 300 m	疏散区间长度 = 350 m	疏散区间长度 = 400 m
2	100	125	150	175	200
4	50	62.5	75	87.5	100
6	33.33	41.67	50	58.33	66.67
8	25	31.25	37.5	43.75	50

正常条件下疏散行动时间与安全出口间距的仿真结果见图2,仿真计算中人员的期望速度取值为1.19 m/s。从图2中能够明显看出,在正常条件(人员疏散时的速度不受能见度的影响)下,随着相邻安全出口间距的增加,人员疏散行动时间也在增加,且相邻安全出口间距的增加与人员疏散行动时间呈线性关系。

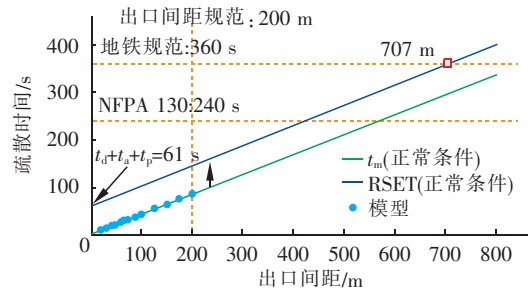


图2 正常条件下疏散行动时间与安全出口间距的关系

Fig.2 Relationship between evacuation action time and the distance between safe exits under normal condition

更进一步对计算结果拟合,可得疏散行动时间和疏散区间长度的关系式如下:

$$t_m = \frac{l}{2v} + 1.94 \quad (5)$$

式中 t_m ——疏散行动时间,s

l ——相邻安全出口间距,m

v ——人员疏散速度,m/s

根据文献可知,人员的疏散速度与环境参数有关,如环境能见度和烟气毒性等,因此,当人员疏散的速度受环境参数影响时,有:

$$t_m = \frac{l}{f(v)} + 1.94 \quad (6)$$

式中 $f(v)$ ——运动速度,关于环境参数的函数,m/s

根据前述研究结果可知,在采用感烟探测时,火灾探测时间 $t_d = 21$ s,报警时间 t_a 取 10 s,考虑到处于综合管廊内的人员均是接受过训练的工作人员,对于周边环境较为熟悉,《SFPE 消防工程师手册》中描述在此种环境下,人员的作用时间取值小于 1 min,因此人员的作用时间 t_p 取 30 s。根据结果显示,在没有其他因素干扰时,以我国地铁设计规范要求的可用疏散时间作为标准限定,可得正常疏散条件下最大的疏散出口间距可达到 707 m,若按照最极端的情况考虑,防火分区内以两端防火门作为疏散逃生口,则防火分区的设计长度值为 707 m。

值得注意的是,此时并未考虑环境参数变化导致的人员疏散速度提升带来的影响。

3.3 火灾条件下的综合管廊疏散仿真

为进一步讨论火灾条件下的综合管廊人员安全疏散,基于FDS(Fire Dynamic Simulator)构建了综合管廊火灾仿真模型,如图3所示。该综合管廊断面为圆形,截面积为 12.9 m^2 ,电缆分别放置在电缆舱墙壁两侧的电缆架上,分层布置。基于对舱火灾载荷的调查分析,仿真计算中,最大火源功率设置为 2 MW ,燃烧模型采用多步反应模型,燃烧材料设置为电缆。通过火灾模型可计算获取烟气层高度、能见度、温度、CO毒性、CO₂毒性、氧气含量等参数。图4给出了 200 m 防火分区条件下能见度和CO的计算结果,分析可知,烟气层高度、温度、CO毒性、CO₂毒性、氧气含量对人员疏散影响很小,能见度对人员疏散影响大。

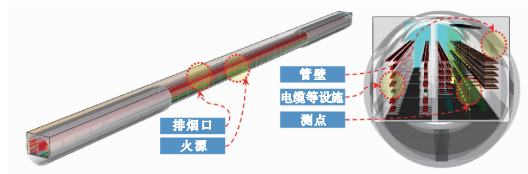


图3 综合管廊火灾模型

Fig. 3 Fire model of utility tunnel

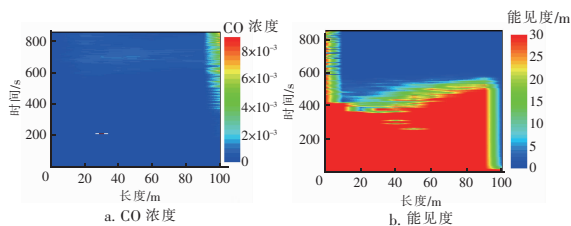


图4 综合管廊火灾CO浓度和能见度

Fig. 4 CO concentration diagram and visibility map of utility tunnel fire

200 m 防火分区长度下疏散时间与能见度的变化关系见图5。考虑两种最不利情况,一是人员在距离出口最远处,但此时人员位于火源附近,另一种是,人员距离出口和火源位置均较远(P2),如以人的能见度限制距离 20 m 设置,则人员无法观察到初期火灾,需要报警系统提供紧急情况信息。当人员在火源位置附近时(P1),人员能够很快感知到火灾的发生,可立即开始疏散逃生。当人员距离火源位置较远时(P2),人员不能够很快感知到火灾的发生,需要等到火灾探测报警时才开始疏散,即此时人

员所需疏散时间包括火灾探测时间 t_d 以及报警时间 t_a 。利用上述关系,选取紧急情况人员疏散速度最大值(3.5 m/s)和最小值(1.19 m/s),可获取P1位置人员的运动时间最大值为 44 s ,最小值为 14 s ,P2位置人员的疏散时间最大值为 87 s ,最小值为 70 s 。在此种情况下,人员疏散过程中,能见度能够一直保持在 30 m 左右,此时能见度对人员疏散速度没有太大影响,且人员能够在可用安全疏散时间内进行疏散。但需要注意的是,随着火灾的发展,在 250 s 左右时部分区域的能见度已经出现降低,且到达 400 s 时疏散区域内的能见度急速降低至 5 m 以下。数据计算表明,综合管廊的可用安全疏散时间约为 400 s ,这与《地铁设计规范》(GB 50157—2013)中的规定十分接近,从安全性的角度可将综合管廊的可用安全疏散时间(ASET)取为 360 s 。

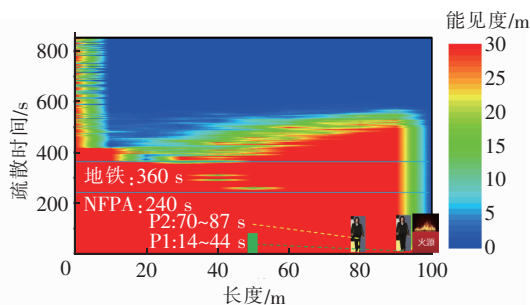


图5 能见度对人员疏散的影响

Fig. 5 Influence of visibility on personnel evacuation

4 综合管廊防火分区设计长度讨论

通过以上研究可知,火灾烟气对疏散过程中人员运行速度有较大影响,以烟气的减光系数 C_s 作为参数可获得火灾烟气影响下的人员安全疏散速度。在Seike试验基础上,可进行烟气影响条件下的减光系数和人员运动速度关系拟合,结果见图6。

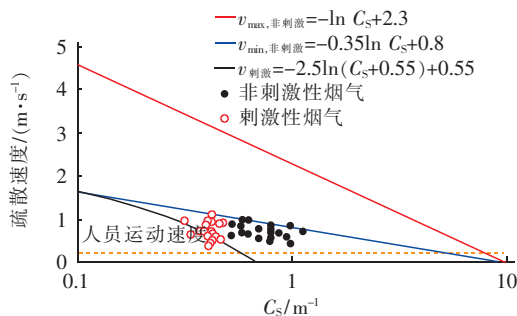


图6 减光系数和人员运动速度关系拟合

Fig. 6 Fitting of the relationship between the extinction coefficient and the speed of personnel movement

可获取非刺激性烟气条件下的人员运动速度最小值,计算公式如下:

$$v_{\min} = -0.35 \ln C_s + 0.8$$

$$0.1 \text{ m}^{-1} < C_s < 5.6 \text{ m}^{-1} \quad (7)$$

需要注意的是,以上研究主要集中在火灾烟气对于能见度的影响,并未对火灾烟气的毒性及刺激性进行充分考虑。Jin 等^[12]开展了 20 m 长度走廊刺激性和非刺激性烟气条件下的人员速度研究。根据 Jin 的研究结果可知,能见度和减光系数呈反比例关系,但在刺激性烟气环境下的关系需要通过经验拟合,能见度(V)和减光系数关系式如下:

$$V = \begin{cases} 6/C_s & \text{无刺激性烟气} \\ -67(C_s - 0.595) & \text{刺激性烟气} \end{cases} \quad (8)$$

实际上,在开展仿真模拟计算时,可获取火灾场景的能见度,综合以上研究成果,可以获得人员运动速度和能见度之间的关系:

$$v_{\text{Non}}^{\max} = -\ln(6/V) + 2.3 \quad (9)$$

$$v_{\text{Non}}^{\min} = -0.35 \ln(6/V) + 0.8 \quad (10)$$

若考虑烟气的刺激性,则人员运动速度表达可参考速度最小值计算公式选取。

$$v_{\text{irr}} = -0.35 \ln(6/V) + 0.6 \quad (11)$$

如前所述,火灾环境下的人员安全疏散将会受到环境参数的影响,如能见度和烟气的刺激性,但同样在火灾条件下的紧急状态也会刺激人员加快运动速度逃往疏散出口,紧急条件下的人员行走最大速度取 3.5 m/s。这里需要注意的是,3.5 m/s 的运动速度是针对普通人的速度上限,但对于熟悉环境的职业人员,这一速度可能要更大,具体数值则需要更多的试验数据支撑。图 7 给出了仿真结果,可见,紧急条件下的人员运动时间同样符合式(6)的关系。

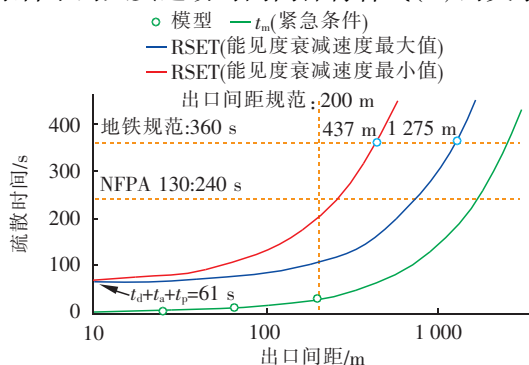


图7 火灾条件下疏散行动时间与安全出口间距的关系

Fig. 7 Relationship between evacuation action time and the distance between safe exits under fire condition

为进一步研究紧急条件下人员疏散时间和出口间距的关系,采用紧急条件下的能见度衰减最大速度和最小速度关系式进行分析。图 7 给出了紧急条件下人员安全疏散与出口间距之间的关系,其中假设能见度降低至 5 m。从图 7 可知,若采用能见度衰减后的最大速度进行分析,疏散出口间距可达到 1 275 m,但若采用衰减后速度最小值进行分析,疏散出口间距减小为 437 m。若以防火分区内不设置逃生出口,而以两端的防火门作为出口,则防火分区的设计长度最小值为 437 m。

5 结论

从人员安全疏散角度,考虑了火灾烟气对人员疏散的影响,分析讨论了综合管廊疏散防火分区设计长度与人员安全疏散时间之间的关系。研究结果表明:

① 基于改进的社会力模型,构建了综合管廊人员安全疏散仿真模型,通过计算仿真获得了疏散运动时间和防火分区设计长度的关系。

② 基于 FDS 对综合管廊电力舱火灾模拟结果分析可知,在发生火灾时能见度下降的速率较快,对人员在疏散过程中影响较大,通过对相关试验数据的拟合获得了烟气能见度对于人员安全疏散速度的影响。

③ 考虑人员安全疏散及火灾烟气对于人员疏散速度的影响,当疏散速度最大值为 3.5 m/s 时,综合管廊防火分区长度的最小值为 437 m,最大值为 1 275 m。

参考文献:

- [1] 陶海军,朱国庆,赵永昌,等. 综合管廊电缆燃烧烟气温度实验研究[J]. 消防科学与技术,2017,36(6): 745-748.
Tao Haijun, Zhu Guoqing, Zhao Yongchang, et al. Experimental study on fire smoke temperature of urban utility tunnel cable[J]. Fire Science and Technology, 2017,36(6): 745-748(in Chinese).
- [2] 刘海静,王磊,相坤,等. 综合管廊电力舱电缆燃烧温度及烟气分布试验研究[J]. 消防技术与产品信息,2018,31(12): 5-12.
Liu Haijing, Wang Lei, Xiang Kun, et al. Experimental study on cable combustion temperature and flue gas distribution in power cabin of utility tunnel[J]. Fire Technique and Product Information, 2018,31(12): 5-

- 12(in Chinese).
- [3] 王方舜. 城市综合管廊电缆火灾 CFD 数值模拟研究[J]. 武警学院学报,2017,33(8):14-18.
Wang Fangshun. Effect of utility tunnel fire compartment on the timing of smoke exhaust & servicemen evacuation in cable fires [J]. Journal of the Armed Police Academy,2017,33(8):14-18(in Chinese).
- [4] 高明旭. 某综合管廊电缆舱火灾安全性研究[D]. 北京:北方工业大学,2018.
Gao Mingxu. Research on Fire Safety of Cable Cabin in a Utility Tunnel[D]. Beijing:North China University of Technology,2018(in Chinese).
- [5] 郭雄. 城市综合管廊电缆舱室火灾特性及人员疏散研究[D]. 成都:西南交通大学,2019(in Chinese).
Guo Xiong. Study on Fire Characteristics and Evacuation of Cable Cabins in Urban Utility Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2019(in Chinese).
- [6] 张颖,张彪,侯佳丽. 地铁区间列车中部火灾人员疏散受烟气影响分析[J]. 现代城市轨道交通,2020(2):65-68.
Zhang Ying,Zhang Biao,Hou Jiali. Analysis on impact of fire smoke on personnel evacuation in the middle of metro train[J]. Modern Urban Transit,2020(2):65-68(in Chinese).
- [7] Frantzich H, Nilsson D. Evacuation in Dense Smoke: Behaviour and Movement [R]. Sweden: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University,2003.
- [8] Fridolf K, Andrée K, Nilsson D, *et al.* The impact of smoke on walking speed[J]. Fire Mater,2014,38(7):744-759.
- [9] Seike M, Kawabata N, Hasegawa M. Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel[J]. Tunn Undergr Space Technol,2016,53:61-67.
- [10] Seike M, Kawabata N, Hasegawa M. Evacuation speed in full-scale darkened tunnel filled with smoke [J]. Fire Saf J,2017. DOI:10.1016/j.firesaf.2017.04.034.
- [11] 谢玮,张玉春. 能见度对个体疏散速度及路径选择的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(7):62-67.
Xie Wei,Zhang Yuchun. Experimental study on impact of visibility on individual evacuation speed and path selection[J]. Journal of Safety Science and Technology,2017,13(7):62-67(in Chinese).
- [12] Jin T, Yamada T. Irritating effects of fire smoke on visibility[J]. Fire Sci Technol,1985,5:79-90.
- [13] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature,2000,407(6803):487-490.



作者简介:尚琳(1981-),女,天津人,本科,高级工程师,主要从事管廊、结构、岩土设计工作。

E-mail:shanglin03@cemi.com.cn

收稿日期:2020-06-08

绿水青山就是金山银山