

Study on Fire Escape of Small Radius Curve Urban Tunnel

Bufan Wang*, Xinpeng Gu

Chongqing Jiaotong University, chongqing, 400074, China

Abstract: In order to determine the personnel escape situation of a small radius curve urban tunnel in the event of fire, the article relies on the small radius curve tunnel of a certain city in Chongqing as the project, and analyzes and explores different fire sizes under different ventilation conditions through FDS and Pathfinder software. Radius curve The time of personnel escape during tunnel fires and the location of casualties. Studies have shown that fires occur under the conditions of congestion in urban tunnels. When the wind speed of the tunnel section is 0m/s, as long as the fire escapes within 30s after the fire occurs, the trapped persons located upstream and downstream of the fire source can successfully escape. When the wind speed is 1m/s, the fire source size is 20mw. After the fire occurs for 30s, it will start to escape. It is located in the range of 20m~30m downstream of the fire source. A small number of people trapped in the bus cannot escape successfully.

Keywords: Urban tunnel; Small radius curve; Tunnel fire; Congestion escape

小半径曲线城市隧道火灾逃生研究

王不凡*, 古鑫鹏

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

摘要: 为确定小半径曲线城市隧道在发生火灾时人员逃生情况, 文章以重庆某城市小半径曲线隧道为工程依托, 通过 FDS 和 Pathfinder 软件对不同火灾大小在不同通风条件下进行分析探究, 得到了在小半径曲线隧道火灾时的人员逃生时间和人员易伤亡的位置。研究表明: 在城市隧道内发生拥堵时的条件下发生火灾, 隧道断面风速为 0m/s 时, 只要在火灾发生后 30s 以内开始逃生, 位于火源上下游的被困人员均可成功逃生。当风速为 1m/s 时, 火源大小为 20mw, 火灾发生 30s 后开始逃生, 位于火源下游 20m~30m 范围, 少部分被困于公交车内的人员不能成功逃生。

关键词: 城市隧道; 小半径曲线; 隧道火灾; 拥堵逃生

1 引言

随着城市规模的不断扩大和人口密度的增加, 公众对快捷出行的需求也越来越高, 城市隧道能够有效地突破山体和水体对交通的阻隔, 完善城区路网结构 [1]。为避开城市中重要建筑, 克服城市道路间不同高程的困境, 城市隧道多修建为曲线隧道, 且半径越来越小。因城市隧道多位于城市繁华路段的交通主干道上, 车流量巨大, 一旦发生突发事件, 其风险后果的严重程度远大于高速公路隧道 [2]。目前, 对于城市隧道火灾逃生的研究还比较缺乏, 特别是小半径曲线城市道路隧道火灾逃生。徐永 [3] 依据国内外的隧道疏散模拟试验对公路隧道火灾逃生距离进行了研究, 它的局限性在于没有考虑逃生人员在车辆内部和隧道内停留车辆间相互拥挤造成的时间损失。夏永旭 [4] 以修正

后克拉尼公式为判别条件, 给出了公路隧道火灾时人员安全距离。这种方法得出的安全距离并不能城市隧道中完全适用, 一是城市隧道中车辆类型比例和人员组成与公路隧道不同, 二是两者的道路线性也有所不同, 这对人员逃生可能会有一定的影响。对于小半径隧道火灾研究则更少, 赵威风 [5] 对小半径隧道火灾烟气扩散进行了研究, 得出曲率半径的存在使热烟气积累, 限制热烟气的传播和卷吸, 会从多方面综合影响烟气扩散的结论。伍灿 [6] 对小半径隧道火灾进行了通风模拟研究, 给出了曲线隧道火灾事故紧急通风情况下的最小纵向通风风速。本文以夏永旭提出的修正后的克拉尼公式和卫巍 [7] 提出的 FED (co) 修正公式为双重判别条件, 以重庆某城市小半径隧道为工程依托, 分别用 FDS 和 Pathfinder 软件建立人员逃生模型。为尽量保证模拟的准确性, 文中隧道、车辆、逃

生人员均按照实际尺寸 1:1 进行建模，以此来研究小半径城市隧道在火灾发生时的人员逃生疏散情况。

2 火源设置及逃生判定条件

2.1 小半径曲线隧道火源点选取

以重庆某小半径曲线城市隧道为例，综合考虑该隧道的线性、曲率半径及在隧道拥堵情况下隧道内发生不同程度的火灾大小，当隧道断面风速为 0m/s 和 1m/s 时，火源大小分别为 5MW、10MW 和 20MW，以此为研究情景模拟隧道内被困人员逃生情况，隧道火源点位置如下图所示。

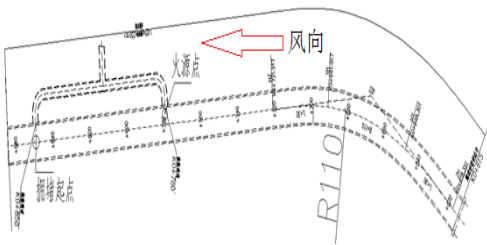


Figure 1. Schematic diagram of tunnel fire source
图 1. 隧道火源点示意图

2.2 隧道火源和探测的设置

隧道内火灾大小可以按照不同的车辆类型进行设置，以 Ingason[8]和法国 CETU[9]的隧道火灾事故火源设置方法为标准，结合我国城市运营隧道中行驶车辆类型可得到如表 1 所示火灾事故火源类型表。

Table 1. Urban tunnel fire accident type table
表 1. 城市隧道火灾事故类型表

火源类型	产生热量 (MW)	火灾规模	最大热释放时间 t
普通小型车	5	小型	163.1s
小货车	10	中小型	230.7s
大货车或普通客车	20	中型	326.3s

CO 和烟气生成数据来源[美]James G Quintiere 著，杜建科、王平、高亚萍译《火灾学基础》，设定火源燃烧类型为极快速火[10]，利用 $HRR=at^2$ 计算不同火源大小的最大热释放时间。温度和 CO 探测器位于隧道中心线上，距离地面高度 1.8m，以火源为起点，在上游和下游每间隔 10m 布置。

2.3 人员逃生判定条件

火灾发生后，人员疏散时间[11]一般由三部分组成，分别是报警探测时间、人员准备疏散时间和人员撤离时间。在隧道火灾发生时，报警探测时间和人员准备疏散的时间为隧道内发生拥堵的时间，即当着火的车驾驶员发现自己的车辆着火时，报警探测时间和人员准备疏散的时间已经过去了，我们主要考虑的是车辆着火后的人员撤离时间。根据法国 CETU 指南，火灾发生时的人员在能见度 20m 以上的逃生速度为 1m/s，在能见度 5m~20m 的条件下逃生速度为 0.5m/s，能见度低于 5m 时的逃生速度为 0.3m/s。本文采用温度[4]和 CO[7]双重判断条件。

$$t = \frac{3.28 \times 10^8}{T^{3.61}} \quad (1)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (t_i + t_{i+1}) \quad (2)$$

式中：t—高温环境下极限忍受时间 (min)；T—空气温度 (°C)

通过式 (1.1) 和 (1.2) 可计算出火灾发生后，在温度影响下距着火车辆前后每间隔 10m 处的极限逃生时间。

$$FED = 3 \sum_{i_1}^{i_2} \frac{[CO] \Delta t}{35000} / 60\% \quad (3)$$

式中：[CO]—CO 浓度；FED 值为判别标准：当值为 0.3 时，表示因 CO 浓度过高导致人体失能的极限值。

通过式 (1.3) 可计算出在 CO 影响下距着火车辆前后每间隔 10m 处的极限逃生时间，最后比较温度和 CO 影响下的极限逃生时间。为保守估算，以二者极限逃生时间较小为最终判别标准。

3 构建有限元数值模型

3.1 火灾模型建立

本文研究小半径曲线城市隧道在火源规模分别是 5MW、10MW、20MW 在风速为 0m/s 和 1m/s 共计 6 种火灾工况下的情况，即分别对应小汽车着火、小货车着火和公交车着火。以实际尺寸比例 1:1 用 FDS 建立模型长度为 300m，宽 14.2m，高 7.2m，最小曲线半径为 110m 的小半径曲线城市隧道。火源位置如图 1 所示，火源类型及其燃烧参数如表 1 所示。隧道内大气温度设置为 20 °C 压强为 101.3kPa，氧气浓度为 21%，隧道壁面粗糙度为 0.022m[12]，浮生加速度

为 0.98kg/m³，火源燃烧时间设置为 20min，火灾模型如图 2 所示。

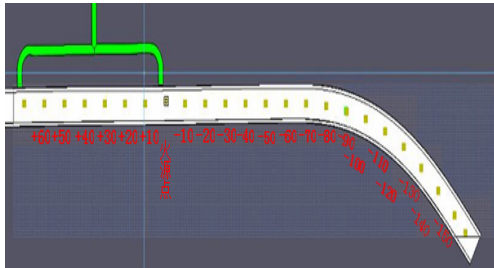


Figure 2. Schematic diagram of tunnel fire model
图 2. 隧道火灾模型示意图

3.2 人员逃生模型建立

通过调查重庆石黄隧道行驶车辆类型，本文以该隧道车辆类型比例为参考，在小半径隧道发生拥堵时，在隧道中部位置发生火灾时的人员逃生情况，利用 Pathfinder 进行人员逃生模拟。假设小汽车载有 2 人，货车载有 1 人，公交车载有 18 人。隧道出口位置发生拥堵，当隧道内充满车辆时，隧道内拥堵车队中部发生火灾。此时隧道内小汽车共计 60 辆，公交车共计 7 辆，小型货车共计 8 辆。根据文献[13-15]调研及《中国成年人人体尺寸(GB/T 10000-1988)》和《中国未成年人人体尺寸(GB/T 26158-2010)》为参考，确定人员组成比例、肩宽及移动速度如表 2 所示。

Table 2. Staff composition and movement speed
表 2. 人员组成及移动速度

人员	比例	肩宽 (cm)	移动速度 (m/s)	人数
小孩	8%	40.0	0.92	21
老人	15%	40.5	0.85	38
中青年男性	42%	41.5	1.1	107
中青年女性	35%	41.0	0.95	88

按照上述内容利用 Pathfinder 软件进行建模，如图 3 和图 4 所示。

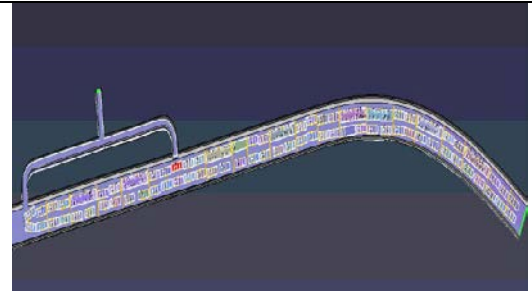


Figure 3. Personnel escape model
图 3. 人员逃生模型

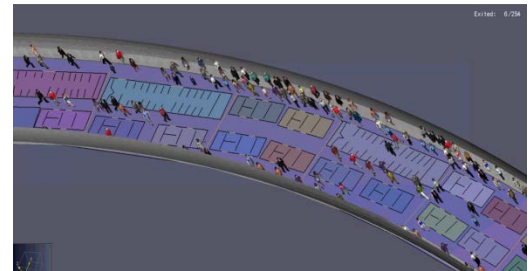


Figure 4. Simulation of escape of escape personnel in small radius tunnel
图 4. 逃生人员在小半径隧道中的逃生情况模拟

4 小半径隧道人员逃生分析

4.1 不同火源大小下的不同位置极限忍受时间

通过软件模拟获得在不同位置上的 CO、温度数据，以公式 (1.2) 和 (1.3) 对该位置的上数据进行计算，最后得出表 3 和表 4 中逃生人员的极限忍受时间。

Table 3. Limit endurance schedule for different positions when the section wind speed is 0m/s (unit: s)

表 3. 断面风速为 0m/s 时不同位置的极限忍受时间表 (单位: s)

火源大小、位置	5MW	10MW	20MW
+ 60	256	221	182
+ 50	231	195	159
+ 40	201	162	132
+ 30	173	143	123
+ 20	151	121	101
+ 10	122	103	82
火源点	82	68	52
-10	119	98	76
-20	145	125	102
-30	161	145	129

-40	189	163	141
-50	223	195	179
-60	245	223	196
-70	278	246	219
-80	301	285	251
-90	332	312	284
-100	365	336	315
-110	391	359	329
-120	428	386	358
-130	452	415	399
-140	481	449	412
-150	523	482	438

Table 4. Limit endurance schedule for different positions at a section wind speed of 1 m/s (unit: s)

表 4. 断面风速为 1m/s 时不同位置的极限忍受时间表 (单位: s)

火源大小 位置	5MW	10MW	20MW
+ 60	229	158	162
+ 50	203	139	113
+ 40	185	116	96
+ 30	151	95	85
+ 20	122	81	67
+ 10	89	62	54
火源点	56	43	36
-10	123	109	98
-20	152	132	113
-30	185	165	146
-40	229	189	172
-50	254	223	198
-60	289	249	213
-70	331	288	265
-80	376	321	298
-90	412	359	336
-100	442	396	375
-110	478	423	399
-120	506	465	435
-130	536	501	486

-140	562	531	502
-150	523	482	438

4.2 人员疏散分析

火灾发生后, 通过 Pathfinder 计算人员在不同位置的运动时间, 得出在不同火灾情景下的人员逃生情况, 如表 5 所示。

Table 5. The time when the last escaped person left (unit: s)

表 5. 最后一名逃生人员离开的时间 (单位: s)

火源大小、 位置	火灾发生后 10s 开始逃生	火灾发生后 30s 开始逃生
+ 60	117.3	137.3
+ 50	106.3	126.3
+ 40	92.8	112.8
+ 30	69.2	89.2
+ 20	49.3	69.3
+ 10	89	62
火源点	10	30
-10	32.3	52.3
-20	60.2	80.2
-30	69.4	89.4
-40	83.5	103.5
-50	99.6	119.6
-60	112.8	132.8
-70	126.4	146.4
-80	142.3	162.3
-90	160.2	180.2
-100	175.7	195.7
-110	191.4	211.4
-120	205.3	225.3
-130	223.5	243.5
-140	237.9	257.9
-150	247.5	267.5

4.3 人员逃生分析

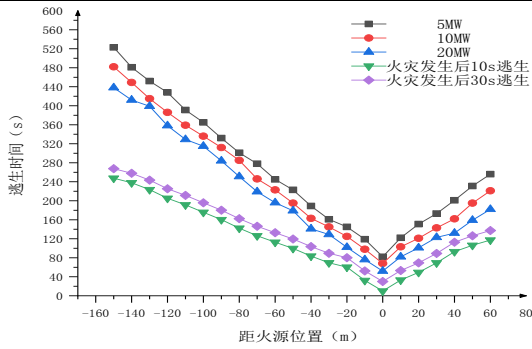


Figure 5. Person escape map when the section wind speed is 0m/s

图 5. 断面风速为 0m/s 时人员逃生图

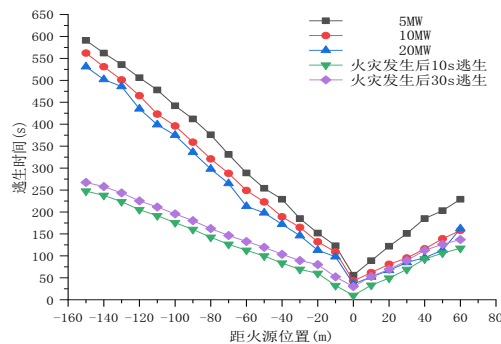


Figure 6. Person escape map when the section wind speed is 1m/s

图 6. 断面风速为 1m/s 时人员逃生图

分别将表 3 和表 4 与表 5 进行数据整合得到图 5 和图 6。从上两图可以看出，当风速为 0m/s 时，火灾发生后（从逃生人员发现烟气开始计算）10s 逃生和 30s 逃生，位于火源上下游的被困人员均可顺利逃生。当隧道内风速为 1m/s 时，10s 后开始逃生，隧道内被困人员均可逃生成功，当 30s 后才逃生，位于火源上游位置的人员可以顺利逃生，但位于火源下游的被困人员，在火灾热量在 20MW 条件下，火源下游 20m~30m 的范围内，有人员死亡，通过软件模拟可知有四人在此处死亡，死亡人员均是在公交车内的乘客，因逃生时公交车车内过于拥挤而不能及时离开车辆，成功逃生。

5 结语

1) 本文通过模拟城市小半径隧道人员疏散行为发现，小半径隧道的线性对隧道内被困人员影响不大，对火灾烟气扩散有一定程度影响。被困人员在车辆中消耗时间较长，特别是在公交车内，此外被困人员在离开车辆开始逃生的途径中，因车辆与车辆间距

离较小，逃生人员快速不能穿过车辆间隙，这进一步加大逃生难度，从而影响人员逃生。针对以上两点问题，本文提出以下建议：（1）如果隧道内一旦发生较长时间的拥堵，公交车上的被困人员应离开公交车，在公交车外部等待，好第一时间发现险情并逃生。（2）隧道内严禁跟车过近，特别是在隧道内发生拥堵时，保持合适的车辆间距，这对被困人员逃生是有十分有利的。

2) 同时根据数值模拟结果发现，当事故车辆发生起火，车内人员应第一时间逃离，并在逃离途中告知后面被困人员，以免后面人员因信息延迟，导致人员伤亡。建议城市隧道管理部门加强隧道信息传播手段，及时告知隧道内的事故信息，如增加隧道广播、隧道安全提示板。

3) 本文依据不同年龄、不同性别的人员在隧道逃生时的不同运动速度，用 Pathfinder 软件中进行了更加真实的数据建模，按照 1: 1 的实际车辆尺寸和人员肩宽，考虑了人员逃生时在车辆和隧道内相互拥挤的状态，完善了人员逃生时间的计算方法，进一步真实模拟实际人员逃生行为。同时加强了对城市小半径隧道火灾时的人员逃生研究，为城市隧道运营管理提出了参考意见。

References

- [1] 黄宏伟. 城市隧道与地下工程的发展与展望. 地下空间, 2001, 21 (24), 311-313.
- [2] 王云. 城市交通隧道安全评价体系及方法研究. 西南交通大学, 2005, 2-5.
- [3] 徐永, 廖少明, 李伟平, 门燕青. 公路隧道火灾逃生距离及逃生风险分析. 土木工程学报, 2012, 45 (12), 156-158.
- [4] 夏永旭, 周勇狄, 王永东. 公路隧道火灾时的人员逃生研究. 土木工程学报, 2009, 42 (8), 116-118.
- [5] 赵威风, 吕思嘉, 徐浩祯. 小曲率半径隧道火灾烟气运动特征. 消防科学与技术, 2019, 38 (1), 77-79.
- [6] 伍灿, 何佳, 倪天晓. 小半径曲线隧道火灾通风数值模拟研究. 消防科学与技术, 2014, 33 (1), 37-40.
- [7] 卫巍. 长大公路隧道火灾烟气数值模拟及逃生研究. 长安大学, 2008, 28.
- [8] Ingason, H. Design Fires in Tunnels. Safe and Reliable Tunnels, Innovative Euro-pean Achievements, Second International Symposium, Lausanne, 2006, 1-11.
- [9] Thompson P, Nilsson D, Boyce K, et al. Evacuation models are running out of time. Fire Safety Journal, 2015(78), 251-261.
- [10] 董志旺. 不同火灾增长速率下的隧道火灾数值模拟. 华北科技学院学报, 2013, 10 (4), 29-31.
- [11] 王星, 师江涛, 柴伦磊, 韩兴博, 胡强. 考虑人员逃生公路隧道火灾控制风速研究. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (1), 278-280.
- [12] 周永狄. 长大公路隧道火灾数值模拟及逃生研究. 长安大学, 2006, 28-30.
- [13] Hall R.C. Ventilation during Road Tunnel Emergencies. TRL,

-
- 2006.
- [14] Louise C. Speitel. Toxicity Assessment of Combustion Gases and Development of a Survival Model, NTIS, 1995.
- [15] 林志, 陈文, 陈思. 公路隧道典型火灾场景风险评估研究. 现代隧道技术 (增刊 2), 2018, 11(38), 619-622.