

城市隧道电动车火灾应急疏散设计

高 荷, 刘 婷, 邢馨月, 李自翔, 李英帅*

南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月29日

摘 要

为了建立应对城市隧道电动车火灾的应急疏散策略, 通过文献研究、统计分析与数值模拟相结合的方法开展研究。首先, 以南京红山路城市隧道为实例, 利用Pyrosim和Pathfinder软件耦合模拟大型电动车火灾和人员疏散场景, 根据烟气、温度、CO浓度等指标的蔓延情况, 制定了基于模拟结果的人员疏散与车辆组织策略, 结果表明, 南京红山路隧道案例中, 纵向通风可使可用安全疏散时间(ASET)延长至300 s, 增设安全出口能将必需疏散时间(RSET)缩短40%以上, 安全指数(SI)均大于1; 其次, 整合人员与车辆的应急理论重点, 结合实例仿真结论, 构建四级事故分级响应机制; 最后针对不同等级事故设计差异化的应急疏散方案。研究为城市隧道电动车火灾分级疏散提供了量化方案, 凸显了实践导向的创新价值。

关键词

交通工程, 电动车隧道火灾, 应急疏散, 数值模拟, 分级响应

Design of Emergency Management Plan for Electric Vehicle Tunnel Fires

He Gao, Ting Liu, Xinyue Xing, Zixiang Li, Yingshuai Li*

College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu

Received: March 13, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

To establish emergency evacuation strategies for electric vehicle (EV) fires in urban tunnels, this study was conducted by integrating literature research, statistical analysis, and numerical simulation. First, taking Nanjing Hongshan Road Urban Tunnel as a case study, the coupled simulation of large-

*通讯作者。

scale EV fire and personnel evacuation scenarios was performed using Pyrosim and Pathfinder software. Based on the spread of key indicators such as smoke, temperature, and CO concentration, personnel evacuation and vehicle organization strategies were formulated according to the simulation results. The findings indicate that in the case of Nanjing Hongshan Road Tunnel, longitudinal ventilation can extend the Available Safe Egress Time (ASET) to 300 seconds, adding additional safety exits can reduce the Required Safe Egress Time (RSET) by more than 40%, and the Safety Index (SI) is consistently greater than 1. Second, by integrating the core theories of emergency response for both personnel and vehicles, combined with the conclusions from the case simulation, a four-level accident classification response mechanism was constructed. Finally, differentiated emergency evacuation plans were designed for accidents of different levels. This study provides a quantitative scheme for the classified evacuation of EV fires in urban tunnels and highlights the innovative value of practice orientation.

Keywords

Traffic Engineering, Electric Vehicle Tunnel Fire, Emergency Evacuation, Numerical Simulation, Graded Response

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在“双碳”战略背景下，受政策和市场双重推动，我国新能源汽车保有量迅速增长，截至2023年底已达2041万辆[1][2]。然而，锂离子电池在热失控条件下容易引发燃烧和爆炸，具有突发性强、热释放率高、复燃风险大等特点；在半封闭的城市隧道环境中，烟气与高温迅速蔓延，极易造成群体受困和严重次生事故[3][4]。与此同时，近年来城市隧道里程不断增加，占比已由2019年的0.378%上升至2023年的0.556% [5][6]，且普遍呈现车流量大、纵向狭长的特征。一旦发生火灾，传统疏散策略往往难以应对电动车火灾的特殊风险[7]。因此，研究电动车隧道火灾下的应急疏散问题具有重要现实意义。

现有研究多聚焦于电动车火灾机理、烟气蔓延规律及灭火技术。一些学者通过FDS与Pathfinder等软件模拟隧道火灾与人员疏散过程，并探索疏散路径与时间优化策略[8]-[15]。国外也在真实隧道中开展了电动车火灾实车试验，验证不同灭火与疏散措施的效果[10]。然而，针对城市隧道中电动车火灾的系统化应急疏散研究仍存在不足：(1) 人员疏散研究多基于静态路径，缺乏多工况仿真与人车一体化疏散策略[11]-[15]；(2) 现有应急预案缺乏针对热失控、爆炸等特征的差异化处置[16]；(3) 现有事故分级体系多基于一般道路事件，未充分考虑城市隧道结构及电动车火灾的特殊风险。

基于此，本文以南京红山路隧道为实例，结合文献分析、理论计算PyroSim-Pathfinder耦合仿真，对典型大型电动车火灾情景下的烟气蔓延与人员疏散过程进行模拟，定量分析通风和横通道设置的安全疏散效果，并构建适用于电动车隧道火灾的四级事故分级响应机制。研究旨在提出一套兼顾定量评估与实际可操作的城市隧道电动车火灾应急疏散设计方法，为城市隧道火灾防控与管理提供参考。

2. 理论基础与火灾分级标准

2.1. 人员疏散安全性评价

隧道火灾发生后，疏散安全性通常采用安全指数(SI)评估，其定义为可用安全疏散时间(ASET)与所需

安全疏散时间(RSET)的比值:

$$SI = \frac{ASET}{RSET} \quad (1)$$

其中, ASET 由火灾条件下温度、能见度与 CO 浓度达到临界值的时间确定; RSET 包含人员感知、反应和移动三个阶段时间。当 $SI > 1$ 时表明人员可基本完成疏散, $SI < 1$ 则存在滞留风险, 本研究以 SI 作为量化人员疏散效果的核心指标。

2.2. 车辆疏散基础理论

在隧道事故中, 车辆疏散与交通恢复同样重要。一般遵循以下原则: ① 火源附近无横通道时, 人员应弃车逆火方向疏散; ② 事故上游车辆按“由近及远”依次经横通道撤离; ③ 已驶过横通道的车辆弃车步行至相邻隧道。这些基本原则为后续应急预案设计提供参考。

2.3. 电动车隧道火灾分级标准

现有事故分级多基于一般道路交通事件, 未能充分考虑城市隧道与电动车火灾的特殊性。本文结合公安部事故等级划分及锂电池火灾特征, 提出适用于城市隧道的四级分级标准, 如表 1 所示。

Table 1. Fire classification and applicable scenarios

表 1. 火灾分级及适用情景

级别	适用情景
I	① 火势猛烈, 多辆电动车起火; ② 火焰引发隧道结构受损, 甚至可能导致塌陷; ③ 有毒气体和浓烟充斥, 严重威胁隧道内人员生命安全, 可能造成大量人员伤亡; ④ 隧道交通完全瘫痪, 救援难度很大。
II	① 火势较大, 火焰有蔓延趋势, 可能引燃周边车辆和破坏隧道设施; ② 火灾产生有毒气体和烟雾对隧道内人员生命安全造成较大威胁, 有造成一定数量人员伤亡的风险; ③ 隧道部分区域交通中断, 救援工作面临较大困难。
III	① 单辆电动车起火, 火势处于可控状态, 未明显蔓延; ② 火灾产物对周边人员有一定威胁, 但范围有限, 暂无人员伤亡风险; ③ 隧道内部分车道交通受到影响, 救援工作相对容易开展。
IV	① 火势微弱, 仅电动车局部起火, 无蔓延趋势; ② 火灾产生的烟雾和热量较少, 对隧道内人员和交通基本无影响; ③ 可通过简单灭火设备扑灭, 无需大规模救援行动。

3. 数值模拟与工况设计

3.1. 模拟方法与研究对象

本文采用 Pyrosim 与 Pathfinder 耦合模拟方法: 前者用于建立隧道火灾烟气与温度场模型, 后者用于模拟人员疏散过程。二者结合可综合分析火灾环境变化与人员疏散行为。

研究对象为南京某城市快速路隧道。该隧道为双向分离式结构, 单向 3 车道, 总长 1.43 km, 通风高度 4.65 m (如图 1)。车行与人行横通道间距 80 m, 单车道设计通行能力为 1200 辆/h。车辆类型比例、小客车载客率等参数按照实测交通流量统计数据设定(见表 2), 作为人员疏散人数估算的基础。

Table 2. Proportion of vehicle types
表 2. 车型组成比例

车型	大型车	中型车	小型车
尺寸/(长 × 宽 × 高)	12.0 × 2.5 × 3.2	6.0 × 2.2 × 2.7	4.0 × 1.7 × 1.5
比例	2%	4%	94%
载客量/人	45	20	2
载客率	1	1	0.625

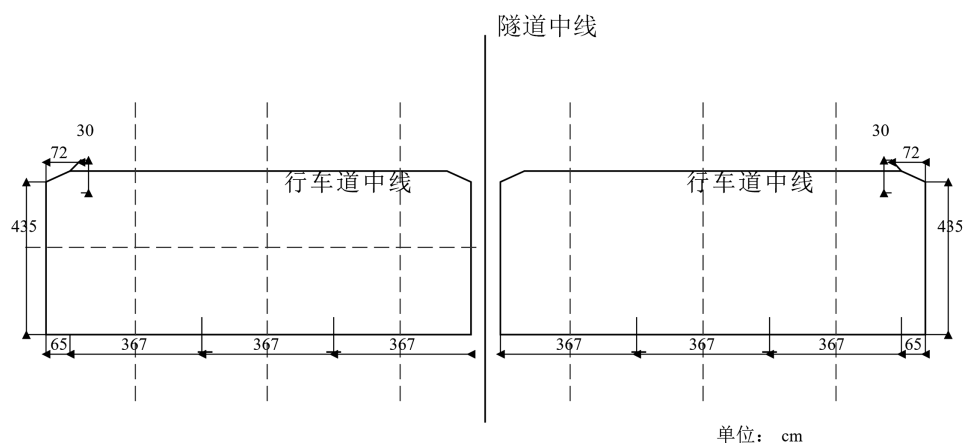


Figure 1. Cross-section of urban tunnel (unit: cm)
图 1. 城市隧道横截面(单位: 厘米)

3.2. 火灾场景设置

模拟设定一辆大型电动客车在隧道中部高峰时段因碰撞起火, 火势较大并造成交通阻塞, 车辆无法继续通行, 如图 2 所示。火源采用 t^2 火模型, 最大热释放速率为 20 MW, 该参数参考了已有新能源汽车/客车火灾相关研究中常用的火灾规模取值, 并结合大型电动客车动力电池热失控后持续放热的特征进行设定。为更贴近电池火灾发展过程, 本文采用“增长-峰值维持”的热释放率演化形式进行简化表征。在距离地面 2 m 高度布设监测切片, 监测烟气、温度、能见度及 CO 浓度变化。通风工况参考《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02—2014), 风速设置为 3 m/s, 送风方向与行车方向一致。模型网格划分综合考虑了火源区域计算精度与整体计算效率, 其中火源附近区域适当加密。对不同网格尺寸进行了对比分析后发现, 关键输出参数变化较小, 说明所采用网格能够满足本文模拟精度要求。

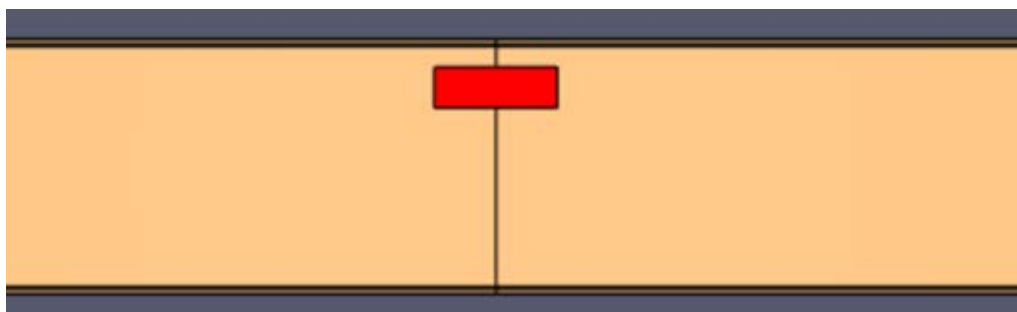


Figure 2. Fire scenario setting
图 2. 火灾情景设置

3.3. 工况设计

为分析不同疏散与控制措施效果，设计四种典型工况，见表 3。

Table 3. Characteristics of evacuees
表 3. 人员组成特征

工况	通风	横通道	说明
一	无纵向通风	无新增	基础情景，无疏散或控烟措施
二	有纵向通风(3 m/s)	无新增	考察纵向通风效果
三	无纵向通风	新增一处	考察横通道增设效果
四	有纵向通风(3 m/s)	新增一处	通风与增设横通道的联合效果

3.4. 输出指标与评价方法

仿真输出包括以下关键指标：

(1) 火灾环境指标：烟气蔓延速度、温度分布、能见度、CO 浓度变化，以及电动车火灾可能伴生的 HF 等毒性气体风险。

(2) 人员疏散指标：RSET、人员滞留率与疏散完成率。

(3) 综合评价：采用安全指数 SI 评估各工况下的疏散安全性。

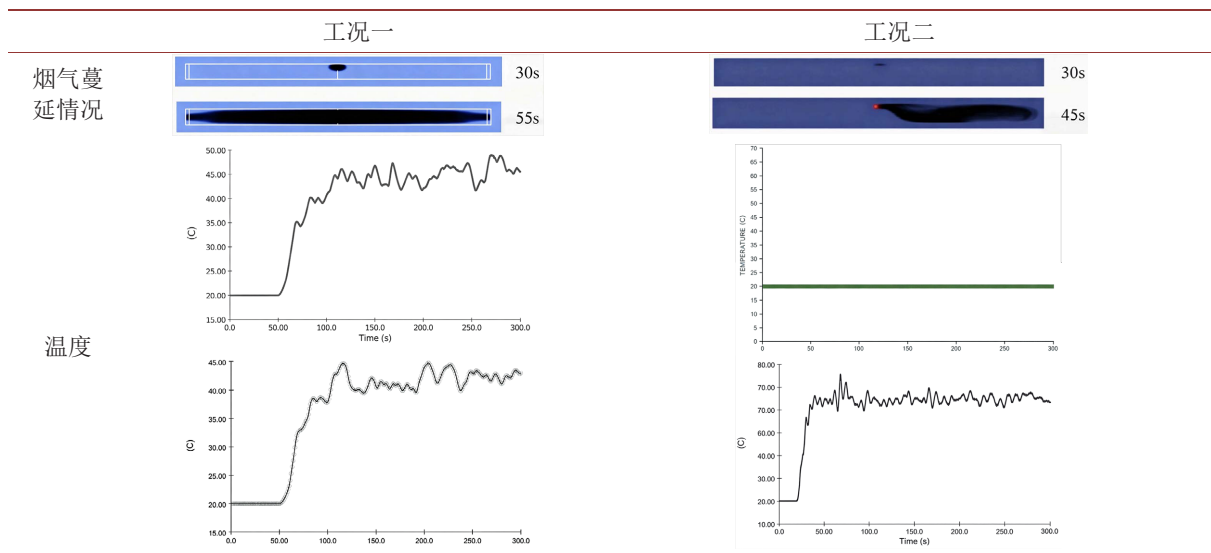
受限于本文模型设置，HF 未作为独立组分进行数值求解，但在结果分析与预案设计中将其作为电动车火灾特殊风险予以考虑。通过比较四类工况的 ASET、RSET 与 SI 值，可以定量评价通风与横通道设置对疏散安全的提升作用，并为应急预案设计提供依据。

4. 仿真结果与分析

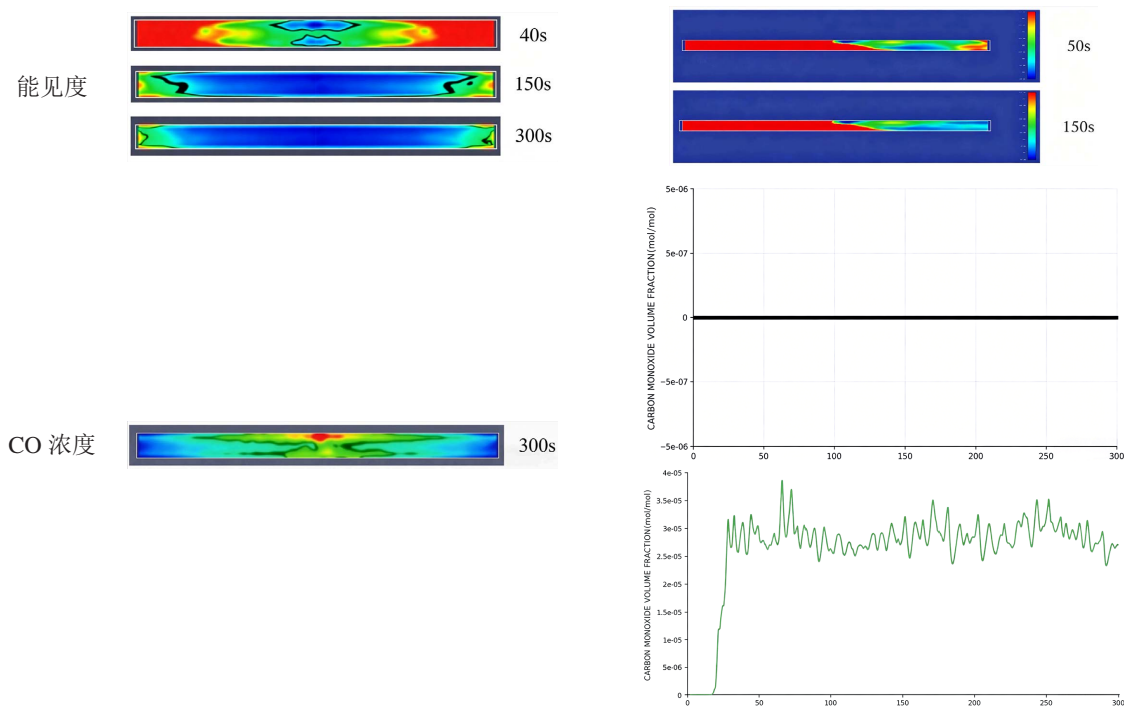
4.1. 火灾环境特征

仿真结果表明，火灾发生后烟气和高温在隧道内迅速扩散。

Table 4. Simulation result chart for working condition 1, 2
表 4. 工况一、二仿真结果图表



续表



如表 4 所示, ① 工况一: 无纵向通风、无新增出口时, 结合温度、能见度、有毒气体浓度特征可得, 约 150 s 内烟气充满隧道, 温度在火源附近快速升高, ASET 仅约 150 s, 人员疏散环境极为不利; ② 工况二: 有纵向通风(3 m/s)时, 机械通风延缓了烟气扩散速度, 火源区温度上升速率减缓, ASET 延长至约 300 s。

4.2. 人员疏散结果

将 Pyrosim 中模型参数导入到 Pathfinder 软件中, 使两者实现耦合。结合交通流量与车型构成, 隧道单洞约需疏散人数为 230 人。考虑到不同人员在火灾中的感知与响应存在差异, 本文未采用完全固定值, 将人员预动作时间按一定随机分布进行设置, 其中察觉时间和响应时间围绕典型取值波动, 以提高疏散模拟的现实性。仿真结果显示:

(1) 工况一: 无纵向通风

疏散总时长约 162 s, RSET = 202 s; 由于 ASET = 150 s, $SI = 0.74 < 1$, 人员难以在安全时间内完成撤离。不同时间点的人员疏散情况见图 3。



Figure 3. Personnel evacuation situation in condition 1
图 3. 工况一人员疏散情况

(2) 工况二：有纵向通风(3 m/s)

全部人员在 142 s 内撤离，RSET = 182 s，ASET = 300 s，SI = 1.65 > 1，疏散可行。不同时刻的人员疏散情况见下图 4。

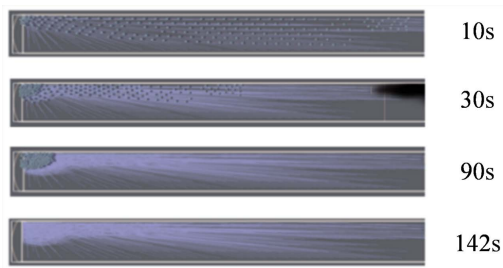


Figure 4. Personnel evacuation in condition two
图 4. 工况二人员疏散情况

(3) 工况三

新增出口使全员疏散时间降至 79 s，RSET = 119 s，SI = 1.26 > 1。此工况下无通风，同时增加一处安全出口，不同时间点的人员疏散情况见下图 5。

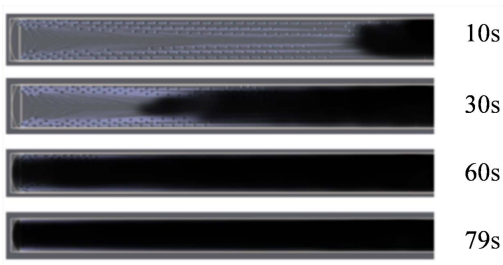


Figure 5. Personnel evacuation (79 s)
图 5. 人员疏散情况(79 s)

(4) 工况四

此工况下为最优情景，疏散时间仅 72 s，RSET = 112 s，SI = 2.68 > 1，安全裕度显著提升。不同时间点的人员疏散情况如下图 6。

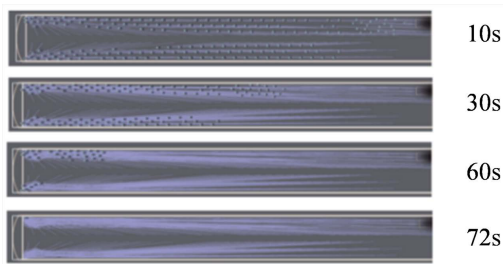


Figure 6. Personnel evacuation (72 s)
图 6. 人员疏散情况(72 s)

4.3. 综合对比与讨论

四种工况对比如表 5 所示。

Table 5. Comparison of four working conditions
表 5. 各工况主要疏散指标对比表

		可用疏散时间 (ASET)	必需疏散时间 (RSET)	安全指数 (SI)
工况一	无纵向通风	150	202	0.74
工况二	有纵向通风	300	182	1.65
工况三	无纵向通风, 增加一处安全出口	150	119	1.26
工况四	有纵向通风, 增加一处安全出口	300	112	2.68

根据表中数据, 可得到以下结论:

(1) 通风系统至关重要。纵向通风可显著延长 ASET, 将危险环境推迟约 150 s, 为疏散提供了关键缓冲时间。

(2) 安全出口数量影响效率。增设横通道能显著缩短疏散距离, 使 RSET 减少约 40%, 在无通风情境下亦能显著提升安全性。

(3) 措施组合最优。通风与横通道结合可同时延长 ASET、缩短 RSET, SI 提升至 2.68, 显著高于单一措施。

(4) 单一措施存在局限。若仅依赖原有设计(工况 1), 安全指数不足 1, 表明现行隧道设计难以应对电动车火灾风险。

结果验证了优化隧道通风系统与增设安全出口的必要性, 并为后续构建分级响应预案提供定量依据。

5. 四级应急响应预案设计

5.1. 分级响应处置方案

与传统燃油车火灾相比, 电动车火灾具有热失控持续放热、可能释放 HF 等有毒气体、存在电池喷射爆炸及复燃风险等特点。因此, 本文在应急预案设计中除考虑常规控烟、人员疏散和交通管制外, 还进一步补充了针对爆炸防护、持续冷却和复燃监测的处置要求。

基于上述内容, 设置 2×2 车道横通道疏散模式隧道的四级响应具体方案如下表 6 所示, 明确不同等级事故的隧道管控、人车疏散及消防救援措施。

Table 6. Emergency response plans for 2×2 lane tunnel with transverse passage evacuation mode
表 6. 2×2 车道横通道疏散模式隧道四级响应机制应急处置方案表

响应等级	适用情况	隧道管控	隧道内部人、车疏散	消防救援组织
1级预案	隧道危险事故 内部情况危急 (如严重火情等)	① 封闭全入口, 电子屏示“火灾禁入”, 隧道广播循环播撤离提醒; ② 交通电台更新路况引导绕行, 监控记录火情并报应急小组; ③ 指挥已通过车辆就近驶入支路/辅道, 来车方向 1 km 处设拦截岗, 路网分流降外部干扰	① 开启全部逃生通道及应急照明, 依火源规划最优逃生路线; ② 扩音引导被困人员撤离, 组织受火车辆有序倒车退出; ③ 开启车行横通道实现车辆转移, 要求近火区车辆驾驶员立即弃车; ④ 专人维持撤离秩序	① 消防车从事故上游进入隧道, 配合洞内消防设施对火源周边降温; ② 消防人员利用车内钥匙移车以减少可燃物, 救援人员核实伤亡并开展救援

续表

II级预案	发生重大火灾	与I级预案一致	<p>① 启动紧急逃生横向通道并开启应急照明,明确最优撤离路径与行进方向;</p> <p>② 核心危险区人员弃车留钥匙,由专人引导沿疏散通道撤离;</p> <p>③ 控制区非核心人员驾车快速通过隧道,确保出口清空,全程维持秩序防踩踏</p>	与I级预案一致
III级预案	一般火灾事故火势较小,仅影响单车道通行,重点在火情控制,无需人员疏散	与I级预案一致	<p>车辆疏散策略与II级预案保持一致(核心区域人员弃车留钥匙,控制区域人员驾车快速通过)</p>	<p>① 消防及救援车辆经右洞内上游车道接近事故点,对火源周边降温;</p> <p>② 救援人员核实伤情并开展救援,派遣专项车辆分层救治,伤员经车行横通道转移</p>
IV级预案	火势轻微或初期,影响范围小	与I级预案一致	<p>① 立即在事故区域设置隔离设施,保障安全消防作业空间;</p> <p>② 开启车道引导指示灯,指挥下游车辆有序驶离隧道</p>	<p>① 消防及救援车辆由右侧隧道上行车道驶入事故现场,避免交通干扰;</p> <p>② 配合隧道固定消防设施对火源周边降温,快速核实人员伤情并开展医疗救助及伤情稳定处理</p>

5.2. 配套疏散与救援路径设计

为实现上述方案,需结合路径图明确车辆疏散(如图7)及救援路线(如图8)。图中,L1:左洞上游;L2:左洞中游;L3:左洞下游;R1:右洞上游;R2:右洞中游;R3:右洞下游;蓝色为车流线路,红色为救援线路,红色圆点为隔离桩。具体如下。

5.2.1. 不同等级车辆疏散路径

(1) I级预案

路径设计:火源上游车辆在隔离桩引导下,通过车行横通道转移至对向隧道,实现跨洞疏散;火源下游车辆在车道引导指示灯指引下,快速驶离隧道出口,避免滞留;靠近火源车辆立即弃车,司乘人员通过人行横通道撤离,车辆钥匙留存车内以备后续转移。

设计依据:利用横通道分隔减少火势蔓延风险。

(2) II级预案

路径设计:核心危险区车辆(火源周边50m内)同I级预案,通过车行横通道跨洞转移;控制区车辆(非核心区)无需跨洞,直接驾车快速通过隧道

出口驶离,确保出口畅通;

设计依据:非核心区车辆可直接驶离,减少跨洞转移造成的拥堵,提升疏散效率。

(3) III级预案

路径设计:与II级预案一致,车辆按“由近及远”原则疏散—近火源车辆经最近车行横通道转移,其

他车辆沿原车道有序驶离，无需全员跨洞转移。

设计依据：火势范围有限，仅需局部疏散即可控制风险，避免过度干预影响交通。

(4) IV级预案

路径设计：无需跨洞转移，仅需开启车道引导指示灯，指挥火源下游车辆沿原车道有序驶离隧道；上游车辆正常通行，不中断交通。

设计依据：火灾影响极小，以“最小干扰”为原则，优先保障隧道通行效率。

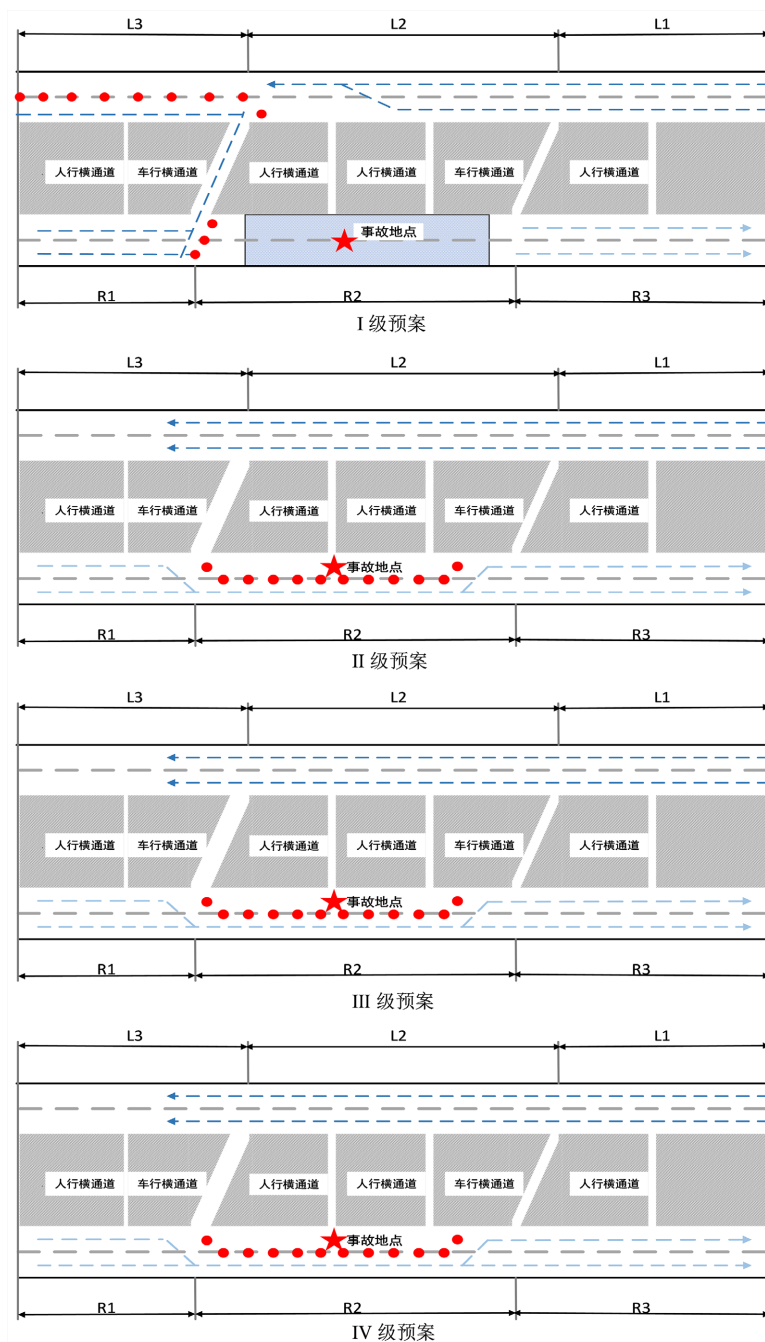


Figure 7. Vehicle evacuation paths under different levels
图 7. 不同等级下车辆疏散路径图

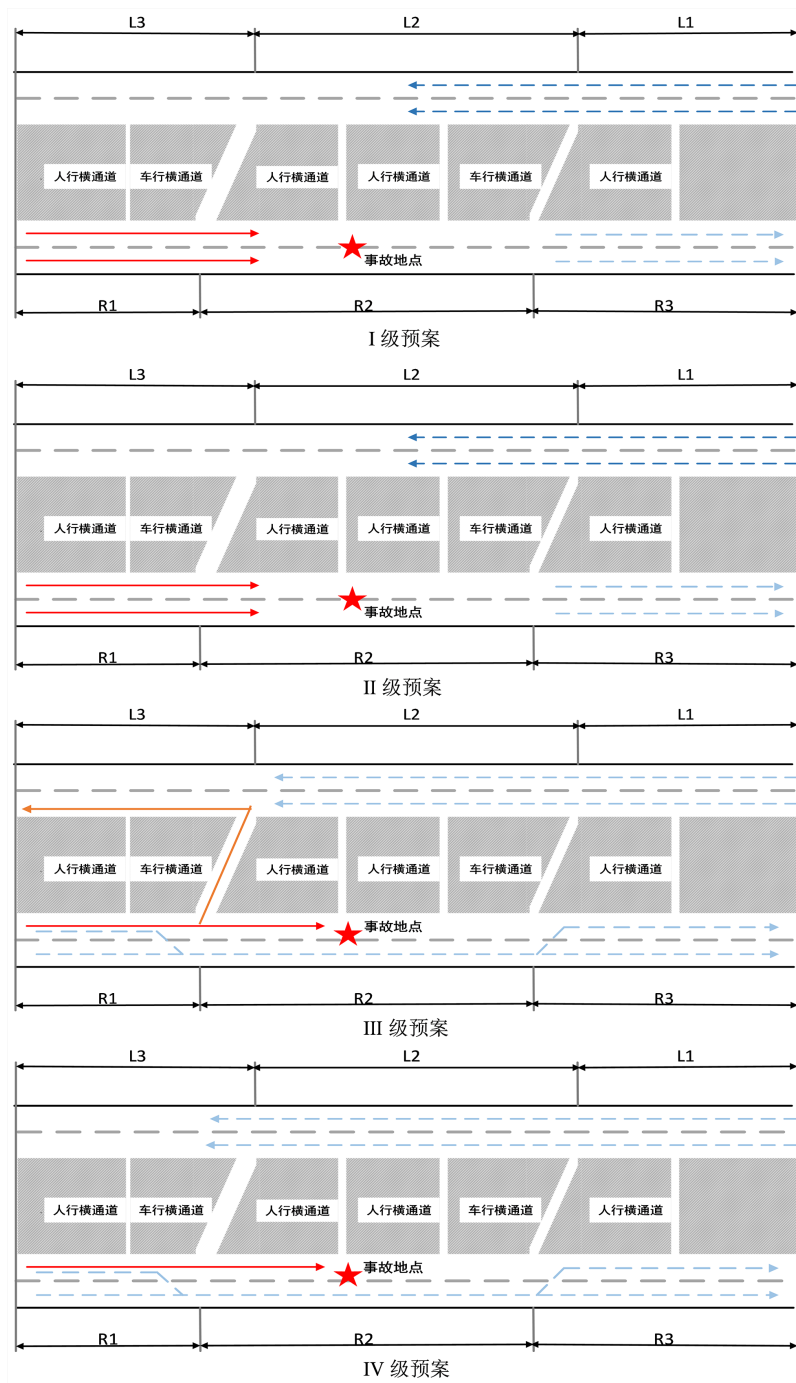


Figure 8. Rescue vehicle paths under different levels
图 8. 不同等级下救援车辆路径图

5.2.2. 不同等级救援车辆路径

(1) I级预案

路径设计：消防、医疗救援车辆从事故上游逆向驶入对向隧道，通过车行横通道接近火源；救援车辆走专用救援通道(红色线路)，与疏散车流(蓝色线路)物理隔离，避免交叉冲突；消防车抵达后优先对火源周边降温，医疗车在横通道处设立临时救治点。

设计依据：上游区域受烟气影响小，逆向进入可缩短救援距离。

(2) II级预案

路径设计：与I级预案一致，但救援范围缩小至火源周边 30 m 内，无需全隧道覆盖；

设计依据：减少救援车辆数量，避免资源浪费，保留核心灭火与急救力量。

(3) III级预案

路径设计：消防与救援车辆通过右洞上游常规车道(R1)进入，经车行横通道抵达火源点；救援车辆沿右侧车道行驶，不占用左侧疏散车道，伤员通过车行横通道转移至救援车(橙色线路)。

设计依据：火势可控，常规车道通行即可满足救援需求，减少对正常交通的干扰。

(4) IV级预案

路径设计：消防及救援车辆从右侧隧道上行车道(R1)驶入，直接抵达事故点；车辆沿最右侧车道行驶，避免干扰其他车道车流，利用隧道固定消防设施(如水喷雾)配合灭火。

设计依据：火灾影响范围小，无需专用救援通道，优先保障交通连续。

5.3. 预案动态调整

电动车隧道火灾的发展具有不确定性和阶段性。响应过程中应根据温度、烟气浓度、火势蔓延范围和人员受困情况等实时监测指标，动态调整响应等级。当风险因子超过预设阈值时，升级响应；反之可适时降级，确保响应强度与实际风险相匹配。此外，可结合仿真输出的温度、烟气扩散范围、CO 浓度及安全指数 SI，对响应等级的启动与升级进行辅助判定，其中 $SI \leq 1$ 时应作为提升响应等级的重要依据。

6. 结论

本文基于文献分析、理论计算与数值仿真相结合的方法，以南京红山路城市隧道为例，研究了电动车火灾场景下的人员疏散与应急响应机制，主要结论如下：

(1) 结合公安部事故等级划分及电动车热失控特性，提出了适用于城市隧道的I-IV级火灾分级标准，为应急响应提供了分类依据。

(2) PyroSim-Pathfinder 耦合仿真结果表明，纵向通风可将 ASET 延长至约 300 s；增设横通道可使 RSET 缩短 40%以上，两者结合可将 SI 提升至 2.68，实现最优疏散效果。

(3) 提出四级分级响应体系，明确各等级的隧道管控、人车疏散和消防救援策略，并通过表格与路径图实现清晰化表达。

(4) 本研究聚焦电动车隧道火灾防控，与燃油车隧道火灾(燃烧稳定、蔓延缓慢，防控以明火与局部高温处置为核心)存在显著特征差异，研究结果为城市隧道电动车火灾的风险评估与应急处置提供了量化、可操作的技术参考，对提升城市隧道的综合防灾与应急能力具有实际指导价值。

基金项目

南京工业大学青年教师科研启动基金(3827400205)。

参考文献

- [1] 苏利阳. 我国新能源汽车发展政策实施评估及启示[J]. 环境保护, 2021, 49(22): 41-47.
- [2] 李小松, 于鹏程, 胡伟超, 等. 数字孪生模型构建关键技术概述及在道路交通管理中的应用[J]. 道路交通管理, 2024(3): 36-39.
- [3] 阮艺亮, 王佳. 我国新能源汽车起火事故分析与对策[J]. 汽车文摘, 2019(5): 39-43.
- [4] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J. and Chen, C. (2012) Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of

- Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources*, **208**, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>
- [5] 刘宏. 大型地下互通式立交通风防灾技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 2023 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. 2024-06-14. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html, 2024-12-29.
- [7] 边彦军. 城市隧道火灾消防对策初探[J]. 当代化工研究, 2022(3): 177-179.
- [8] 陈祉颖. 空气幕作用下隧道火灾烟气控制模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- [9] 李炎锋, 杜甜美, 刘爽, 等. 城市交通隧道电动车火灾安全研究进展[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(9): 1195-1203.
- [10] Sturm, P., Fössleitner, P., Fruhwirt, D., Schirmer, A., Reinwald, B., Kühbacher, M., *et al.* (2020) Brandversuch mit e-fahrzeugen in tunnelanlagen. *BHM Berg-Und Hüttenmännische Monatshefte*, **165**, 651-657. <https://doi.org/10.1007/s00501-020-01054-2>
- [11] 金润国, 毛龙, 乐增. FDS 与 Pathfinder 在建筑火灾与人员疏散中的应用[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(8): 44-45+50.
- [12] 杨高尚, 彭立敏, 彭建国, 等. 从人员疏散的角度研究公路隧道的横通道间距[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 44-49.
- [13] 谢宝超, 徐志胜. 客运专线隧道火灾疏散研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(8): 102-108.
- [14] 李削云, 马险峰, 王俊淞. 公路隧道火灾逃生疏散研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(5): 66-71.
- [15] 闫自海. 城市公路隧道火灾规模确定方法研究[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会. 2016 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十九届年会论文集. 杭州: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 2016: 182-187.
- [16] 黄江, 金建泉, 赵梁, 等. 锂离子电池火灾灭火剂及灭火策略研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(11): 2121-2132.