

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-308-10

不同海拔高度下隧道内救援站火灾烟气特性研究

宋思源 袁中原

(西南交通大学 成都 610031)

【摘要】 目前铁路隧道内救援站火灾烟气蔓延特性的研究主要集中在平原地区, 针对高海拔隧道救援站的研究成果较少。依托某典型双洞单线隧道加密横通道型的紧急救援站, 针对典型火灾场景 (20MW), 利用火灾动力学软件 PyroSim 建立了不同海拔高度下隧道内救援站的数值计算模型, 研究了隧道内救援站在 0m、3000m、3500m 和 4500m 时的烟气蔓延特性。结果表明在火灾初期, 海拔高度越高, 救援站烟气蔓延速度越快; 在火灾稳定期, 海拔高度越高, 烟气充满整个横通道的横通道个数越少; 火源位于事故隧道正中间时, 火源正对的横通道最早被烟气侵入, 其次最易被烟气侵入的是最远离火源的横通道。

【关键词】 救援站; 火灾烟气特性; 高海拔; 数值模拟

中图分类号 TU831.4 文献标志码 A

Study on Characteristics of Fire Smoke from Rescue Stations in Tunnels at Different Altitudes

Song Siyuan Yuan Zhongyuan

(Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 At present, the research on the fire smoke spread characteristics of rescue stations in railway tunnels mainly focuses on the plains, and there are fewer research results for rescue stations in high-altitude tunnels. In this paper, relying on the emergency rescue station of a typical double-bore single-line tunnel with encrypted cross channel type, the numerical calculation model of the rescue station in the tunnel at different altitudes was established for the typical fire scenario (20MW), and the smoke spreading characteristics of the rescue station in the tunnel at 0m, 3000m, 3500m and 4500m were investigated. The results show that in the early stage of the fire, the higher the altitude, the faster the smoke spreads from the rescue station; in the stable stage of the fire, the higher the altitude, the fewer the number of cross-channels where the smoke fills up the whole cross-channel; when the fire source is located in the middle of the accident tunnel, the cross-channel directly opposite the fire source is the earliest to be invaded by smoke, and the cross-channel furthest away from the source of the fire is the second most likely to be intruded by the smoke.

【Keywords】 Rescue station; Fire smoke characteristics; High altitude; Numerical simulation

0 引言

改革开放 40 年来, 中国隧道工程已取得长足进步, 特别是建成了一批特长、超深埋、超大断面、高海拔等重大隧道工程^[1]。据统计, 截至 2021 年底, 中国投入运营的特长铁路隧道 235 座, 总长约

3152km, 其中长度超 20km 的特长铁路隧道 11 座, 总长约 262km^[2]。由于隧道具有结构复杂、空间狭小、封闭性强等特点, 隧道内一旦发生火灾, 将造成极具危险性和破坏性的后果^[3-5]。为方便人员安全疏散和火灾救援工作的快速开展, 针对长度

作者简介: 宋思源 (1999.08-), 女, 硕士, E-mail: 2196216629@qq.com

通讯作者: 袁中原 (1983.08-), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2024-11-01

20km 及以上的隧道或隧道群,《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》TB 10020-2017^[6]明确规定应设置紧急救援站。

隧道内紧急救援站是指设置在隧道内,满足着火列车停靠、人员疏散及救援的站点。国内外大量学者对隧道内紧急救援站进行了详细的研究,其主要集中在横通道临界风速^[7,8]、烟气温度分布^[9-12]和烟气控制与人员疏散^[13-15]等方面。

上述研究仅针对平原地区,高海拔地区空气温度低、大气压力低、空气中含氧量低,空气浮力小,火灾燃烧不充分,烟气特性有别于平原地区,但高海拔地区救援站火灾烟气特性目前只有少量研究,其主要集中在烟气蔓延速率、温度分布、能见度^[16,17]和人员疏散^[18,19]等方面。

目前铁路隧道内救援站火灾烟气蔓延特性的研究主要集中在平原地区,针对高海拔救援站的研究成果较少,也缺乏其对应的火灾人员疏散与防灾救援标准与规范。因此,为进一步研究高海拔地区救援站火灾烟气特性如何有别于平原地区,本文建立了 0m、3000m、3500m 和 4500m 的救援站火灾数值计算模型,采用数值模拟的方法,研究了不同海拔高度下救援站火灾烟气温度和浓度的分布情况,以望明确海拔高度对救援站火灾烟气特性的影响规律。

1 隧道内救援站火灾数值计算模型

本文依托某典型双洞单线隧道加密横通道型的紧急救援站,建立了隧道内救援站火灾的数值计算模型,研究不同海拔高度下隧道内救援站发生火灾时的烟气蔓延特性。

1.1 几何模型

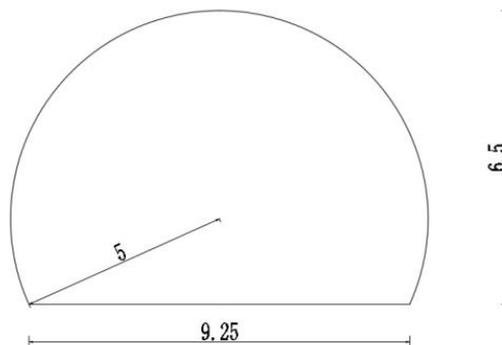
本文为方便救援站三维模型的建立,将隧道的断面建立为隧道火灾研究中常用的矩形,按照隧道水力直径相等和断面面积相等的原则将其等效为矩形隧道,即:

$$\bar{H} = \frac{4A_s}{P_s} \quad (1)$$

式中: \bar{H} 为隧道水力直径, m; A_s 为盾构隧道截面积, m^2 ; P_s 为盾构隧道湿周, m。

隧道内轮廓净空宽度为 9.25m、高度为 6.5m,如图 1 (a) 所示,隧道净空断面横截面积为 $54m^2$ 、

周长为 28m,则隧道水力直径为 7.7m,取矩形隧道与拱形隧道断面面积和隧道水力直径相等的原则,则矩形隧道三维模型宽度为 9m、高度为 6m,如图 1 (b) 所示。



(a) 拱形隧道断面示意图 (单位: m)



(b) 矩形隧道断面示意图 (单位: m)

图 1 隧道断面示意图

Fig.1 Schematic diagram of tunnel section

总长度为 600m 的救援站中有 9 个横通道,横通道尺寸为 $60m \times 6m \times 4.36m$ (长×宽×高),横通道间距为 66m。事故隧道与安全隧道的尺寸均为 $600m \times 9m \times 6m$ (长×宽×高)。根据《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》^[6] (TB 10020-2017) 中所规定救援站的横通道与隧道连接处应设置防护门,其尺寸不应小于 $1.7m \times 2m$ (宽×高)。由于本文需对横通道内烟气蔓延速度和烟气蔓延长度进行研究,防火门高度较低时横通道内火灾烟气不易观察,所以防火门尺寸均设为 $1.8m \times 4m$ (宽×高)。隧道采用复合结构,内壁为 A2 钢板衬底,外面覆盖了一层混凝土和耐火粘土,壁厚约为 0.5m。救援站平面示意图如图 2 所示。拱形隧道与矩形隧道救援站数值计算模型如图 3 与图 4 所示。

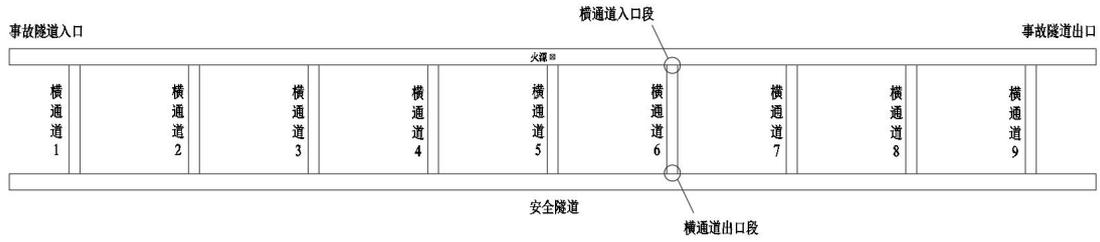


图 2 救援站平面示意图

Fig.2 Schematic layout of the rescue station

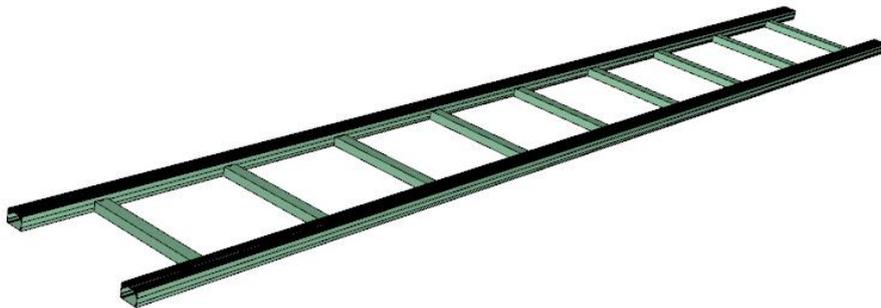


图 3 拱形隧道救援站数值计算模型

Fig.3 Numerical computational modeling of rescue station in arch tunnels

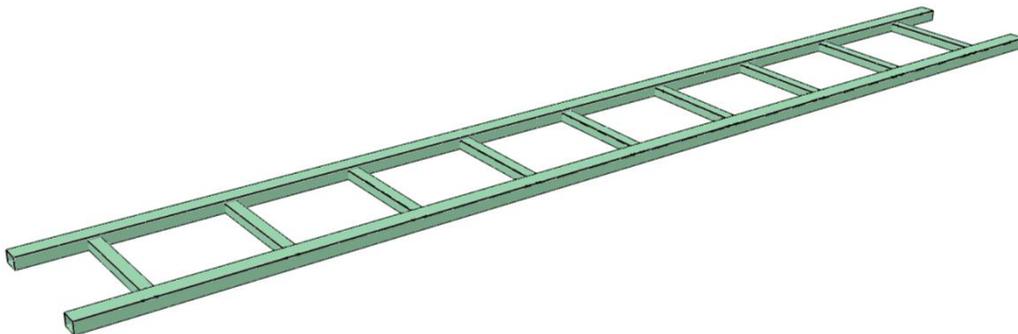


图 4 救援站数值计算模型

Fig.4 Rescue station numerical computing model

1.2 火源设定

数值模拟采用的火源燃料为正庚烷。火源设置在事故隧道正中间，位于隧道横向中轴线上，火源尺寸为 2.65m×2.65m×0.5m（长×宽×高）。《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》TB 10020-2017^[6]规定隧道设计火灾规模应按线路运行的列车类型确定，动车组可采用 15MW，普通旅客列车可采用 20MW。本文考虑最不利情况，数值模拟设置的火源热释放率为 20MW。

1.3 环境参数

为方便数据分析处理，数值模型中不同海拔高度下的环境温度均取 25℃，仅改变大气压力 P_0 来

研究不同海拔高度下救援站烟气蔓延情况。大气压力与海拔高度的关系可由式（2）表示：

$$P_0 = 101325e^{-\frac{h}{7924}} \quad (2)$$

式中： P_0 为大气压力，Pa； h 为海拔高度，m。

目前中国高海拔特长铁路隧道大多是处于 3000m~3500m^[17]，但由于近年来“一带一路”战略的实施，国内海拔高度处于 4500m 及以上的超高海拔隧道也相继建成，所以本文研究了海拔高度为 0m、3000m、3500m 和 4500m 时的救援站火灾烟气特性。不同海拔高度所对应的大气压力 P_0 如表 1 所示。

表 1 不同海拔高度对应的大气压力

Table 1 Atmospheric pressure at different altitudes

海拔高度/m	0	3000	3500	4500
大气压力/Pa	101325	69390	65146	57423

1.4 网格划分

网格尺寸对救援站火灾模拟结果有着重要影响。一般来讲, 网格越小, 计算结果精度越高, 但占用的计算机内存会增多, 计算时间也会变长。因此需要合理选择网格尺寸大小, FDS 手册^[20]对火灾计算网格进行了说明, 推荐采用 $0.06D^* \sim 0.25D^*$

表 2 不同海拔高度下的火源特征直径

Table 2 Characteristic diameters of fire sources at different altitudes

海拔高度/m	空气密度/(kg/m ³)	空气比热/(kJ/(kg·K))	空气温度/K	重力加速度/(m/s ²)	火源特征直径
0	1.226	1	298	9.81	3.14
3000	0.895	1	298	9.81	3.56
3500	0.850	1	298	9.81	3.64
4500	0.766	1	298	9.81	3.79

1.5 边界条件

依据车流方向, 确定车流驶入的隧道局部段外边界为隧道入口边界, 车流驶出的隧道局部段外边界为隧道出口边界。事故隧道与安全隧道的入、出口边界条件均为压力边界条件, 本文将事故隧道与安全隧道的入、出口的压力均设置为 0Pa。横通道内均不送风。

根据实际情况, 隧道壁面以及地面均设置为对流壁面边界。

2 数值计算方法的验证

PyroSim 数值模拟结果可靠性需要得到试验

之间的网格尺寸, 其中 D^* 为火源特征直径, 定义如式 (3) 所示:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (3)$$

式中: D^* 为火源特征直径; Q 为火灾热释放速率, kW; ρ_0 为空气密度, kg/m³。

本文救援站火灾总热释放速率 Q 为 20MW, 经计算得不同海拔高度下的火源特征直径 D^* 结果如表 2 所示, 取网格尺寸约为 $0.1D^*$, 为方便模拟计算, 最终取网格尺寸为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ (长×宽×高)。

证, 由于本研究没有进行相关试验, 所以本文选取赵鹏^[21]两组试验结果进行验证。

验证一, 模型隧道长、宽、高分别为 14m、0.25m、0.25m, 排烟道的长度和宽度与隧道相同, 其高度为 0.12m。排烟风口间距为 4.4m, 排烟风口长度为 0.1m, 为了更好的排烟效果, 风口的宽度为 0.25m, 与模型隧道的宽度相同, 排烟量为 16.5m³/h。模型试验采用高度为 2cm 的正方形甲醇油池火来模拟火源, 油盘尺寸为 9.5cm×9.5cm, 火灾热释放速率 2.54kW, 建立的数值计算模型如图 5 所示, 数值模拟与模型试验对比结果如图 6 所示。

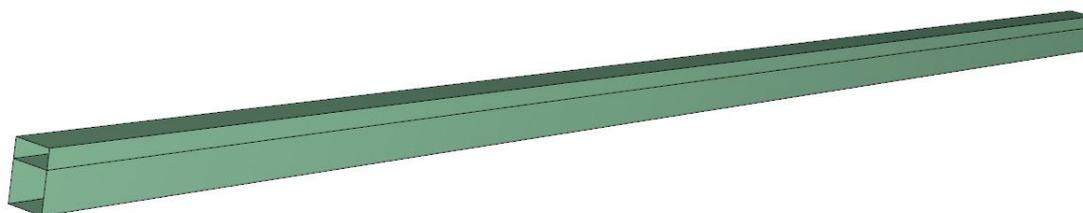


图 5 验证一计算模型

Fig.5 Computational modeling for validation I

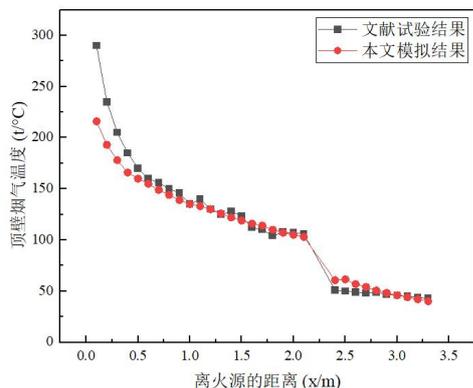


图 6 数值模拟与模型试验对比图

Fig.6 Comparison of numerical simulation and model test

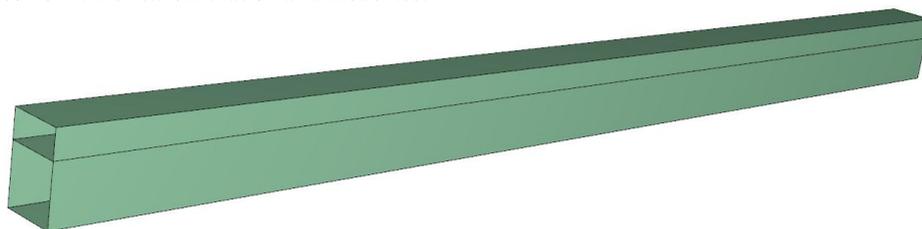


图 7 验证二计算模型

Fig.7 Computational modeling for validation II

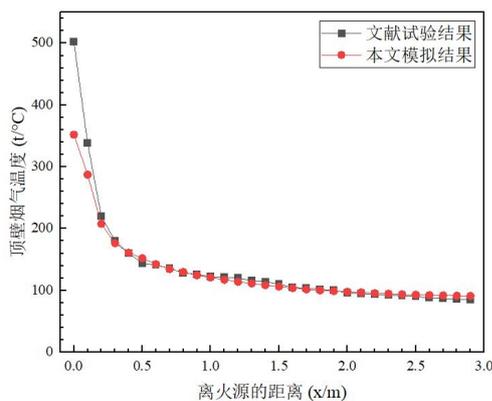


图 8 数值模拟与模型试验对比图

Fig.8 Comparison of numerical simulation and model test

从图 6 与图 8 可看出, 平均相对误差分别为 6.83%和 4.34%, 模拟值与试验值误差较小, 因此 PyroSim 用于隧道火灾烟气扩散研究具有可行性。

3 安全评价指标

3.1 隧道顶壁下方烟气温度

NFPA130^[22]、NFPA502^[23]及美国消防手册^[24]均指出, 当人员承受的辐射热量低于 2.5kW/m²时逃生人员可耐受 30 分钟, 当人员承受的辐射热量大于 2.5kW/m²时忍受极限时间急剧下降, 并指出辐射热量 2.5kW/m²对应于烟气温度 200℃。

验证二, 模型隧道长、宽、高分别为 12m、0.5m、0.5m, 排烟道的长度和宽度与隧道相同, 其高度为 0.24m。排烟风口间距为 6m, 排烟风口长度为 0.1m, 风口的宽度为 0.5m, 与模型隧道的宽度相同, 排烟量为 83.8m³/h。模型试验采用高度为 2cm 的正方形正庚烷油池火来模拟火源, 油盘尺寸为 8.5cm×8.5cm, 火灾热释放速率为 7.5kW。建立的数值计算模型如图 7 所示, 数值模拟与模型试验对比结果如图 8 所示。

PIARC^[25]同样认为在火源附近, 辐射是由火本身以及热烟产生的, 指出人员几分钟内能够忍受的最大辐射热在 2~2.5kW/m² 范围内。此外, 《中国消防手册》^[26]将上部烟气层的温度限值定为 180℃, 认为高于 180℃时, 它对人体的辐射危害就会达到极限程度。

因此, 上述手册均以热辐射限制对人员头部以上烟气温度做出规定, 烟气位于人员头部以上时, 主要以热辐射的形式对逃生人员造成影响, 对于人员几分钟内能够忍受的最大辐射热的取值在 2~2.5 kW/m² 范围内, 对于隧道这种大空间, 对应于烟气温度 180~200℃, 因此将隧道顶壁下方烟气温度限值取为 180℃。

3.2 人员高度处温度

《中国消防手册》^[26]将安全判据指标定为: 在人员高度 2m 处, 人员疏散时间为 30min, 烟气温度限值为 60℃。NFPA502^[23]和 NFPA130^[22]指出呼吸道的热灼伤可能发生在吸入超过 60℃的饱和水蒸气的空气时。《澳大利亚消防工程指南》^[27]中也规定: 2m 以下空间内的烟气温度不超过 60℃。

综上, 对于人员高度处烟气温度的取值, 目前国际上各规范规定的限值在 60~80℃, 综合安全考虑, 取人员高度为 1.8m, 人员高度处温度限值取 60℃。

3.3 CO 浓度

PIARC^[25]指出 $LC_{50}CO_{30}$ 的参考值为 3000ppm, 即表示 50% 的人在 30min 后死亡的 CO 浓度为 3000ppm。《中国消防手册》^[26]给出不同浓度下一氧化碳对人的影响程度, 并空气中一氧化碳含量为 0.05% 时, 即 500ppm 时 1h 对人体影响不大, 当含量达到 0.2% 时, 达到危险的程度。NFPA502^[23]规定火灾初期 6min 内 CO 浓度不得高于 1150ppm, 15min 内不得高于 450ppm, 30min 内不得高于 225ppm, 长期暴露不得高于 50ppm。

因此, 综合安全考虑, 针对火灾较为不利的情况, 根据上述规范本文将 CO 浓度限值取为 225ppm。

3.4 能见度

PIARC^[25]规定, 为保障安全疏散和消防作业, 最低能见度必须在 7-15m 之间。《中国消防手册》^[26]指出能见度降到 3m 以下逃离火灾现场将变得十分困难, 并且能见度的限值与逃生人员对建筑物的熟悉程度有关, 并指出其安全标准取值通常为 10m。

《澳大利亚消防工程指南》^[27]也指出对于大空间, 规定在 2m 以下的空间内烟气能见度应大于 10m。

综上, 上述大部分规范以 10m 作为能见度限值, 隧道属于大空间, 因此按规范将人员高度处能见度限值取为 10m。

4 结果与讨论

4.1 矩形隧道与拱形隧道对比

海拔高度为 0m 时矩形隧道与拱形隧道的顶壁下方烟气温度对比如图 9 所示, 人员高度烟气温度对比如图 10 所示, 人员高度 CO 浓度对比如图 11 所示。

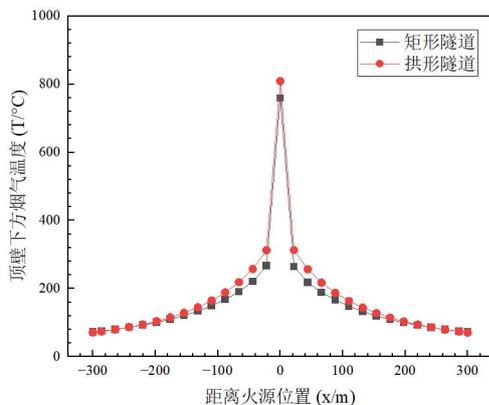


图 9 顶壁下方烟气温度对比

Fig.9 Flue gas temperature comparison below the top wall

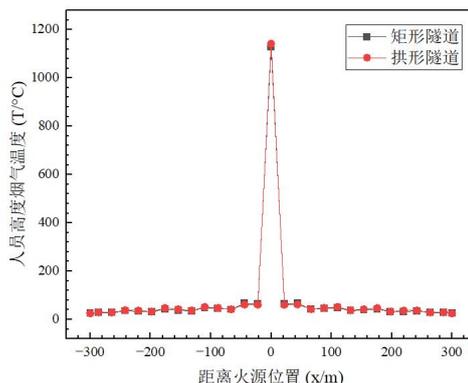


图 10 人员高度烟气温度对比

Fig.10 Flue gas temperature comparison at personnel height

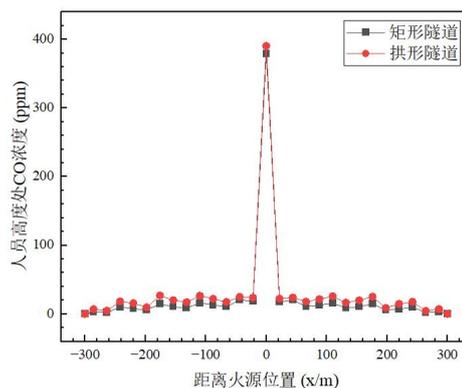


图 11 人员高度处 CO 浓度对比

Fig.11 Comparison of CO concentration at personnel height

结合图 9~图 11 可见, 矩形隧道与拱形隧道内顶壁下方烟气温度、人员高度烟气温度和人员高度处 CO 浓度差别不大, 救援站的烟气蔓延情况基本一致, 因此可用矩形隧道代替拱形隧道进行数值模拟。

4.2 救援站火灾烟气蔓延规律

火灾发生 100s 左右时, 救援站烟气蔓延情况如图 12 所示, 烟气扩散区域为黑色。从图中可以看出, 火灾初期时, 海拔高度为 3000m、3500m 和 4500m 时隧道内火灾烟气比 0m 时蔓延的更快, 3000m、3500m 和 4500m 时横通道内烟气蔓延情况也比 0 米时更为明显。海拔高度为 0m、3000m、3500m 和 4500m 的救援站内侵入横通道的烟气最大长度分别为 25m、33m、33m、34m, 都出现在横通道 5 内, 其对应的烟气蔓延速度分别为 0.25m/s、0.33m/s、0.33m/s、0.34m/s, 海拔高度为 3000m、3500m 和 4500m 的横通道 5 的烟气蔓延速度分别比 0m 时的快 32%、32%和 36%。

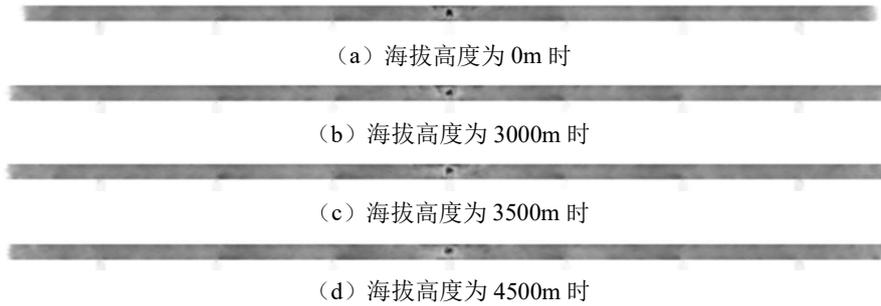


图 12 火灾初期救援站烟气蔓延情况

Fig.12 Smoke spread from the rescue station in the early stages of the fire

火灾发生 900s 左右时，救援站烟气蔓延情况如图 13 所示。从图中可以看出，火灾稳定期时，海拔高度越高，充满火灾烟气的横通道个数越少，海拔高度为 0m、3000m、3500m 和 4500m 的救援站内整个横通道充满烟气的横通道个数分别为 9、7、7 和 5。不同海拔高度下横通道均被烟气充满的是横通道 1、2、5、8、9，横通道 3、4、6、7 内烟气侵入长度均随海拔高度的增加而逐渐缩短。

结合图 12 可见，火源正对的横通道最早被火灾烟气侵入。其次最易被烟气侵入的是最远离火源的横通道，横通道 4 和横通道 6 内火灾烟气蔓延长度最短，这说明越相对靠近火源的横通道反而越不容易被烟气侵入，这是因为事故隧道内距离火源较远的火灾烟气更好地受到周围空气冷却而沉降，烟气浮升力小，热压低，火灾烟气则更容易进入横通道。

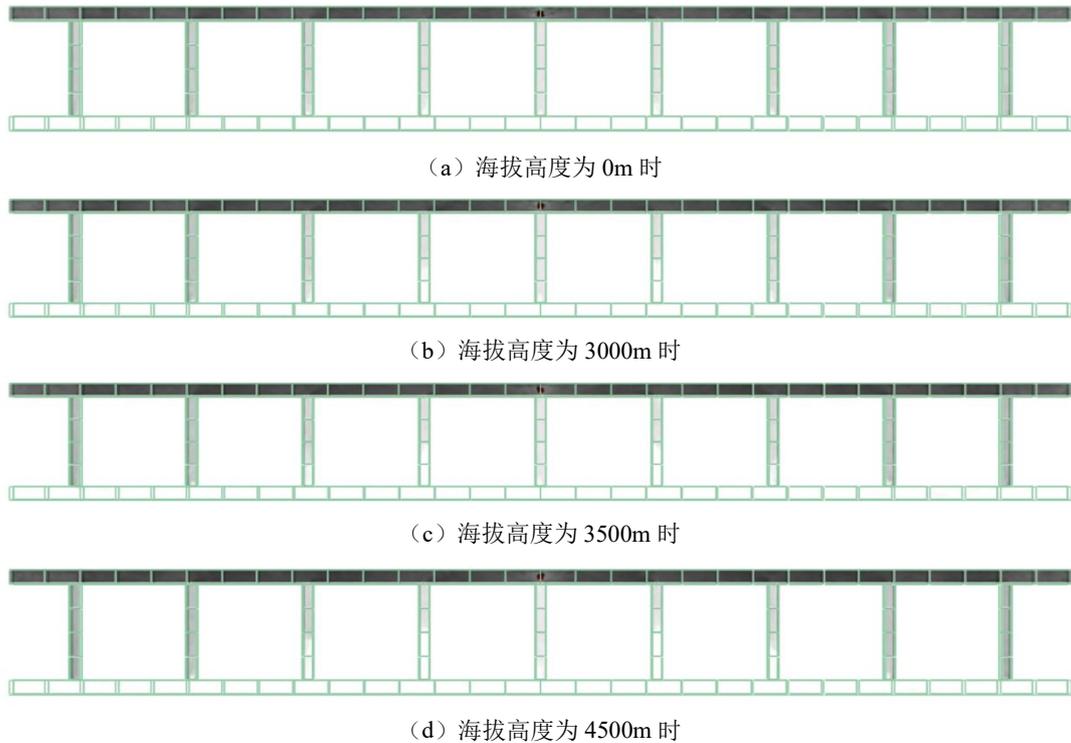


图 13 火灾稳定期救援站烟气蔓延情况

Fig.13 Smoke spread from the rescue station during fire stabilization period

4.3 烟气温度和浓度分布规律

4.3.1 顶壁下方烟气温度

顶壁下方烟气温度变化如图 14 所示。从图中可以看出，海拔高度越高，火源附近的事隧隧道顶

壁下方烟气温度越高，0m、3000m、3500m 和 4500m 的救援站事故隧道顶壁下方最高温度分别为 758℃、832℃、836℃和 845℃。图 14 标明了顶壁下方极限温度状态，从图中可看出，不同海拔的事

故隧道中符合火灾顶壁烟气温度安全标准的范围基本一致。

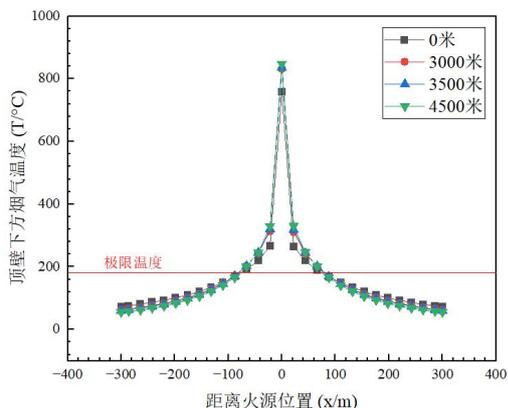


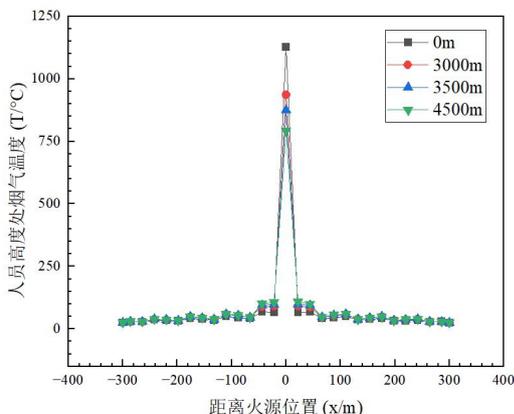
图 14 顶壁下方烟气温度变化

Fig.14 Flue gas temperature change below the top wall

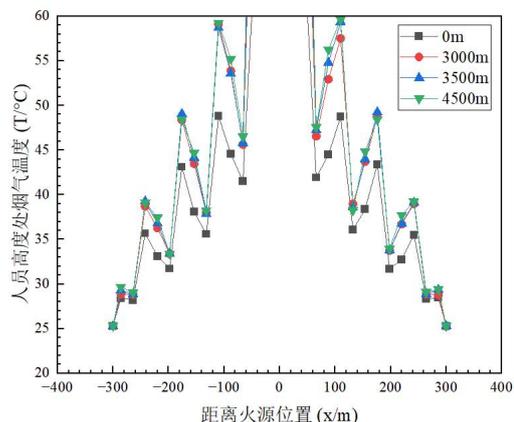
4.3.2 人员高度处烟气温度

人员高度处烟气温度变化如图 15 所示。从图中可以看出, 海拔高度越高, 火源附近的事故隧道人员高度处烟气温度越低, 0m、3000m、3500m 和 4500m 的救援站事故隧道人员高度处最高温度分别为 1128℃、936℃、874℃和 792℃。图 15 (b) 给出了极限温度状态附近的人员高度处烟气温度变化情况, 从图中可看出, 海拔高度越高, 事故隧道中符合火灾人员高度处温度安全标准的范围就越小, 人员安全疏散和火灾救援的难度越大。

此外, 图 15 (b) 中人员高度处烟气温度变化存在不光滑的现象, 烟气温度下降速率较快的地方有 8 处, 这 8 处分别对应隧道内火灾烟气分流进入横通道 1、2、3、4、6、7、8、9 的情况, 这说明烟气分流处的烟气浓度较低导致隧道人员高度温度较周围更低。



(a) 总体变化情况



(b) 局部变化情况

图 15 人员高度处烟气温度变化

Fig.15 Flue gas temperature change at personnel height

4.3.3 CO 浓度

人员高度处 CO 浓度变化如图 16 所示。从图中可以看出, 海拔高度越高, 火源附近的事故隧道人员高度处 CO 浓度越低, 0m、3000m、3500m 和 4500m 的救援站事故隧道人员高度处最高 CO 浓度分别为 379ppm、227ppm、190ppm 和 149ppm。图 16 标明了人员高度处极限 CO 浓度状态, 从图中可看出, 只有海拔高度为 0m 时事故隧道内火源附近的人员高度处 CO 浓度明显高于极限状态值, 海拔高度为 3000m 时隧道火源附近的人员高度 CO 浓度略微高于极限状态值, 其他海拔的 CO 浓度均处于极限值以下。

此外, 图 16 中人员高度处 CO 浓度变化存在不光滑的现象, CO 浓度下降速率较快的地方有 8 处, 这 8 处分别对应隧道内火灾烟气分流进入横通道 1、2、3、4、6、7、8、9 的情况, 这说明烟气分流处的烟气浓度较低导致隧道人员高度 CO 浓度较周围更低。

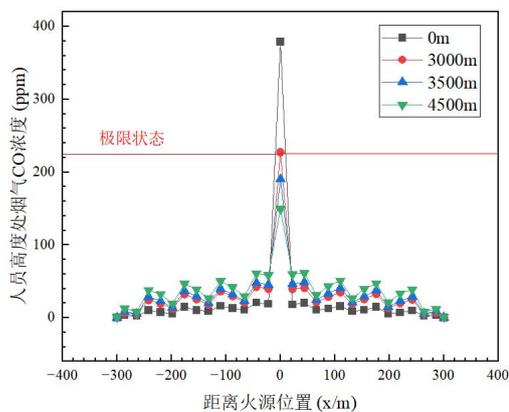


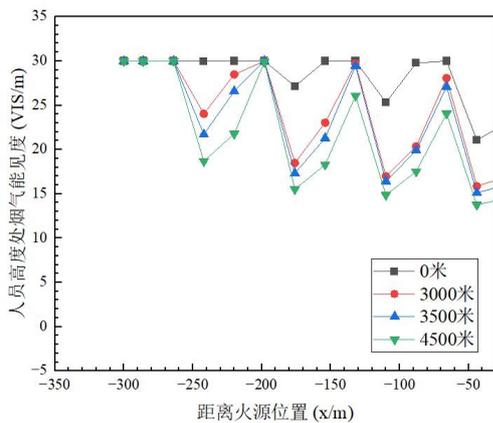
图 16 人员高度处烟气 CO 浓度变化

Fig.16 Change in flue gas CO concentration at personnel height

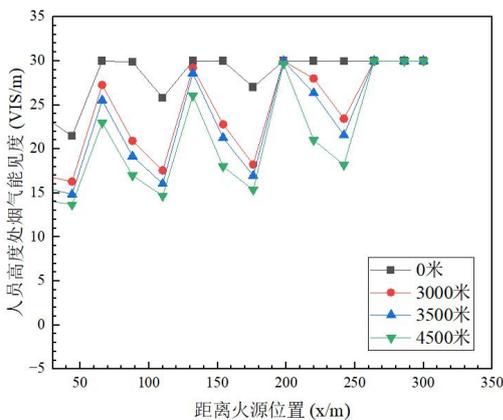
4.3.4 烟气能见度

火源 30m 范围外的人员高度处烟气能见度变化如图 17 所示。从图中可以看出，海拔高度越高，事故隧道人员高度处烟气能见度越低。海拔高度为 0m、3000m、3500m 和 4500m 时人员高度处能见度均处于极限值以上。

此外，图 17 中人员高度处烟气能见度变化存在不光滑的现象，能见度上升速率较快的地方有 8 处，这 8 处分别对应隧道内火灾烟气分流进入横通道 1、2、3、4、6、7、8、9 的情况，这说明烟气分流处的烟气浓度较低导致隧道人员高度能见度较周围更高。



(a) 火源上游能见度变化情况



(b) 火源下游能见度变化情况

图 17 人员高度处烟气能见度变化

Fig.17 Change in smoke visibility at personnel height

5 结论

本文以某典型双洞单线隧道加密横通道型的紧急救援站为研究对象，针对典型火灾场景

(20MW)，利用火灾动力学软件 PyroSim 建立了隧道内救援站的数值计算模型，研究了不同海拔高度下救援站火灾烟气蔓延特性，为高海拔地区救援站火灾人员疏散与防灾救援提供一定参考，并得到如下结论：

(1) 在火灾初期，海拔高度越高，救援站烟气蔓延速度越快，海拔高度为 3000m、3500m 和 4500m 的横通道 5 的烟气蔓延速度分别比 0m 时的快 32%、32%和 36%。在火灾稳定期，海拔高度越高，烟气充满整个横通道的横通道个数越少，海拔高度为 0m、3000m、3500m 和 4500m 的救援站内整个横通道充满烟气的横通道个数分别为 9、7、7 和 5。

(2) 火源位于事故隧道正中间时，火源正对的横通道最早被烟气侵入。其次最易被烟气侵入的是最远离火源的横通道，这是因为事故隧道内距离火源较远的火灾烟气更好地受到周围空气冷却而沉降，烟气浮升力小，热压低，火灾烟气则更容易进入横通道。

(3) 对于人员高度处烟气温度而言，海拔高度越高，符合其火灾安全标准的范围就越小，人员安全疏散和火灾救援的难度越大。

6 不足与展望

本文针对高海拔地区救援站火灾烟气特性进行研究，但由于作者水平与研究条件的限制，本文仍存在一些不足之处，有待进一步完善，对于本文研究结论提出以下几点展望：

(1) 本文未对救援站火灾时人员疏散进行研究，下一步可利用 Pathfinder 软件从火源位置、人员密度等方面进行人员疏散模拟研究。

(2) 由于条件所限，文章缺乏试验数据支撑，其研究成果在实际工程中还需要进一步验证。

参考文献：

[1] 严金秀.中国隧道工程技术发展 40 年[J].隧道建设(中英文),2019,39(4):537-544.
 [2] 《中国公路学报》编辑部.中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J].中国公路学报,2022,35(4):1-40.
 [3] 王少飞,林志,余顺.公路隧道火灾事故特性及危害[J].消防科学与技术,2011,30(4):337-340.
 [4] Li Z Y. Editorial: Tunnel fire safety[J]. Fire Safety

- Journal, 2018:9785-9786.
- [5] Morgan J Hurley, Daniel Gottuk, John R Hall, et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. Springer New York, 2016.
- [6] 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.
- [7] 李颖臻.含救援站特长隧道火灾特性及烟气控制研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [8] 王方超,张铎,陈长坤,等.横通道通风对隧道火灾烟气蔓延影响的数值模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(3):108-114.
- [9] 谭锐.特长铁路隧道救援站火灾温度场特性研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [10] 沈浩.特长铁路隧道内救援站火灾烟气流动特性及控制方法[D].成都:西南交通大学,2013.
- [11] 陶亮亮,曾艳华,彭俊钦,等.火源位置对铁路隧道救援站内拱顶温度纵向分布的影响[J].中国铁道科学,2022,43(1):101-109.
- [12] Yuanlong Z, Honglin W, Haiquan B. Influence of the train running on the fire smoke spread characteristics in the rescue station[J]. International Journal of Ventilation, 2023,22(1):40-55.
- [13] Xu S Z, You W, Kong J, et al. A study of fire smoke spreading and control in emergency rescue stations of extra-long railway tunnels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017,49155-161.
- [14] 黄超.平安隧道救援站排烟模式与人员疏散研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [15] Chen Z, Dong C, Zhao S, et al. Fire evacuation of train emergency rescue station in an extra-long railway tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2024,152105954-105954.
- [16] 赵鹏,马伟斌,王志伟,等.铁路隧道紧急救援站火灾烟气运动特性研究[J].现代隧道技术,2019,56(S2):112-117.
- [17] 王志伟,马伟斌,韩自力,等.高海拔铁路隧道救援站火灾的烟气蔓延特性[J].铁道建筑,2021,61(12):133-137.
- [18] 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.
- [19] Zhang, Nian, Tan, et al. Research on the technology of disaster prevention and rescue in high-altitude super-long railway tunnel[J]. KSCE journal of civil engineering, 2015,19(3):756-764.
- [20] McGrattan K, Hostikka S, Floyd J, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 6): User's Guide[J]. Nist Special Publication 1019, 2024.
- [21] 赵鹏.点式排烟模式下地铁隧道火灾烟气特性与控制方法研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [22] NFPA. NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems[M]. Quincy, MA: NFPA, 2020.
- [23] NFPA. NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways[M]. Quincy, MA: NFPA, 2020.
- [24] Morgan J Hurley, Daniel Gottuk, John R Hall, et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. Springer New York, 2016.
- [25] PIARC. Fire and smoke control in road tunnels. PIARC Technical Committee C5 Road Tunnel. 1999.
- [26] 中华人民共和国公安部消防局.中国消防手册 第13卷 消防法制[M].上海:上海科学技术出版社,2010.
- [27] ABCB. Australian Fire Engineering Guidelines[M]. Australian Building Codes Board, 2021.