文章编号:1674-2974(2024)08-0231-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024218

海拔对隧道内列车火灾烟气蔓延特性影响

周丹[1,2,3†],盛紫琰[1,2,3],李金柱[1,2,3],陈光[1,2,3],张则栋[1,2,3],孟爽[1,2,3],陈涛[1,2,3]
(1. 中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室,湖南 长沙 410075;
2. 中南大学 轨道交通安全关键技术国际合作联合实验室,湖南 长沙 410075;
3. 中南大学 轨道交通列车安全保障技术国家地方联合工程研究中心,湖南 长沙 410075)

摘 要:为探究海拔高度对隧道内列车火灾烟气蔓延的影响,基于已被验证的数值模拟方法,结合三维非定常N-S方程和RNG k-ε湍流模型,采用滑移网格技术模拟了在隧道内匀速运行的列车发生火灾后减速并最终停在隧道内的整个运动过程,并利用动模型试验和缩尺隧道火灾试验数据验证了数值模拟方法的可靠性.结果表明:海拔高度对隧道内列车停车以后的火灾烟气蔓延影响明显;与低海拔隧道相比,同一时刻高海拔隧道拱顶同一位置处的烟气流速更快,烟气逆流至火源上游50 m处的时刻更早;车体周围温度分布也随着海拔高度的不断增加而呈现出逐渐上升的趋势.与0 m海拔隧道相比,5 000 m海拔隧道内烟气逆流至火源上游50 m的时刻提前了102 s,同时列车停车360 s时隧道拱顶处的温度峰值增加了216 K,增幅达到42.9%.

关键词:列车火灾;海拔高度;数值模拟;RNG k-ε湍流模型
中图分类号:X932 **文献标志码**:A

Influence of Altitude on Smoke Propagation Characteristics of Train Fire Accident in Tunnel

ZHOU Dan[1,2,3†], SHENG Ziyan[1,2,3], LI Jinzhu[1,2,3], CHEN Guang[1,2,3],
ZHANG Zedong[1,2,3], MENG Shuang[1,2,3], CHEN Tao[1,2,3]
(1. Key Laboratory of Traffic Safety on Track of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Joint International Research Laboratory of Key Technology for Rail Traffic Safety, Central South University, Changsha 410075, China;
3. National & Local Joint Engineering Research Center of Safety Technology for Rail Vehicle, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To investigate the influence of altitude on smoke propagation of train fire accident in tunnels, based on the validated numerical simulation method, the sliding grid technology was used to achieve the entire motion process of a train running at a uniform speed in a tunnel, decelerating after a fire accident and eventually stopping in the tunnel. The three-dimensional unsteady N-S equation and RNG k- ε turbulence model were adopted, and the reliability of the numerical simulation method was verified by the datas of the scaled train fire accident test in tunnel.

* **收稿日期**:2023-07-10
基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30744),Natural Science Foundation of Hunan Province(2022JJ30744)
作者简介:周丹(1980—),女,湖北武汉人,中南大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail: zd_lzj@126.com

The results indicate that the altitude has a significant impact on the smoke propagation after fired trains stop in the tunnel. Compared with low altitude tunnels at a time, the smoke propagation velocity at the same location as the tunnel vault is faster in high altitude tunnels, and the time when the smoke countercurrents to 50 m upstream of the fire source is earlier. The temperature distribution around the train also shows a rising trend with the increasing altitudes. Compared with the train fire accident in the tunnel at an altitude of 0 m, the time is 102 seconds earlier when the smoke in the tunnel at an altitude of 5 000 m countercurrents to 50 m upstream of the fire source. At the same time, the peak value of temperature at the tunnel vault is increased by 216 K, with an increase of 42.9% when the fired train stopped for 360 seconds.

Key words: train fire accident; altitude; numerical simulation; RNG $k-\varepsilon$ turbulence model

随着我国铁路隧道的快速发展,越来越多的铁路隧道无论是在海拔高度还是隧道长度等方面都创造了新的纪录.在铁路技术不断进步的同时,也不能忽略其带来的风险,对于我国隧线占比极高、超长隧道多的铁路线路,隧道里程相对较长,防灾救援是其安全运营的重点和难点[1].受隧道狭长结构的限制,火源处产生的烟气以及高温作用范围会沿着隧道迅速蔓延,乘客生命安全受到了威胁,救援的难度也加大了[2-3],因而有必要开展铁路隧道内列车火灾烟气蔓延特性影响研究.

目前国内外学者对于隧道内列车火灾烟气蔓延特性研究包括烟气温度分布、烟气逆流长度、临界通风速度等.Wang等人[4]对列车阻塞比对倾斜隧道内火灾临界通风速度进行了数值模拟研究,发现临界风速的减小率要小于列车阻塞比的减小率.张子洋[5]通过模拟隧道列车移动火灾,发现列车运行速度越高,列车活塞效应以及列车风越明显,同时火源处产生的高温烟气向下游蔓延扩散的距离越长.王哲[6]、Zhou等[7]通过建立不同坡度隧道内列车火灾场景,发现烟气热浮力沿坡度方向的分力也会成为烟气运动的驱动力,当列车发生火灾减速制动并在坡度隧道内停止时,隧道坡度越大,烟气的逆流时刻越晚,逆流速度越小.胡天恩[8]、周丹等[9]采用数值模拟软件研究了隧道曲线半径对列车火灾发生时烟气蔓延影响规律,发现在曲线半径为300 m的隧道中,上游距离火源中心50 m处隧道内外侧温差高达21 K,随着隧道曲线半径的增大,烟气与冷空气之间的分层稳定性逐渐下降.

上述研究均针对平原铁路隧道,而对于高原铁路隧道,受高海拔特殊环境的影响,隧道内火灾发生后的温度场分布、烟气蔓延规律、烟气浓度变化等必然与平原地区隧道存在差异,低压低氧环境会导致火源燃烧速率和最高温度发生改变、加快烟气下沉及烟气沿隧道纵向蔓延的速度;且高原地区相对恶劣的自然环境条件对人员逃生速度也会带来极大限制[10].张念等人[10-12]以关角铁路隧道为研究对象,通过现场试验的方法分析了高海拔隧道火灾燃烧特性以及烟气分布规律,研究发现在相同火源尺寸条件下,高海拔地区的火源燃烧热释放速率要比低海拔地区的热释放速率低.王明年等人[13]结合CFK公式,探究同一火灾烟气CO浓度下海拔高度对人体耐受时间的影响,研究发现随海拔高度增加,同一火灾烟气CO浓度下人体耐受时间逐渐缩短.刘夏临等人[14]采用FDS模拟了不同通风条件下海拔高度为2 850 m的隧道火灾发展过程,发现隧道内温度随着通风速度的增加而降低,隧道内可视度随着风速增加而增大.王峰等人[15]、白赟等人[16]采用试验及仿真模拟,对不同海拔高度下隧道内火灾烟气流动规律及烟气控制临界风速进行研究,结果表明隧道火灾临界风速随着海拔高度的增加而增大.Yuan等人[17]采用数值模拟方法对隧道内火灾发生时的温度分布以及烟雾浓度分布进行了研究,结果显示火源附近的高温区域会随着海拔高度的增大而增大.Liu等人[18-19]和王志伟等人[20]均采用数值模拟的方法对不同海拔高度下的隧道火灾进行模拟,都得出隧道内烟气运动速度会随着海拔的升高而升高的结论.

综上所述,目前国内外学者针对低海拔隧道火灾开展了较多研究,对高海拔隧道火灾研究主要集中在没有列车的隧道火灾或列车静止在隧道内的火灾方面.对于高原铁路隧道内运动列车发生火灾后的烟气蔓延特性,现阶段相关研究较少.当高海拔隧道内列车发生火灾时,受空气稀薄、气温较低等条件

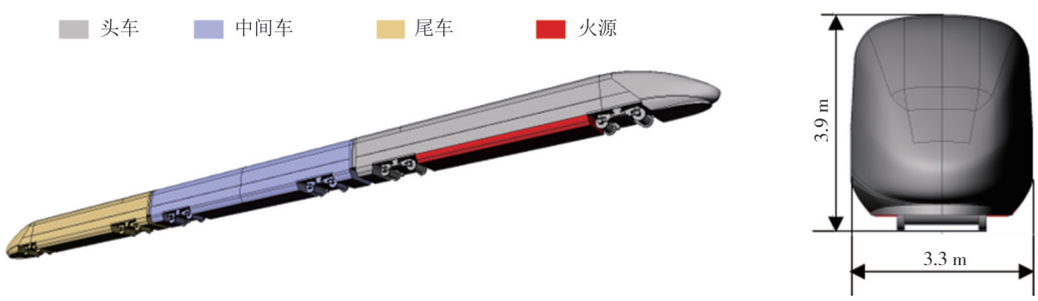
影响,隧道内的烟气流速、温度分布以及烟气浓度分布与低海拔隧道火灾存在很大的不同.随着我国越来越多的高原铁路隧道的建设与使用,研究高海拔铁路隧道列车发生火灾后烟气蔓延特性与低海拔情况下存在的差异,是一个需要尽快解决的问题.开展高原铁路隧道内列车火灾烟气蔓延特性的研究,对于列车火灾发生时减少人员伤亡和财产损失具有较大的实用价值和理论指导意义.

1　数值计算方法

1.1　几何模型

本研究以国内某型动车组列车为研究对象,该动车组列车能够适应高原、高寒、高紫外线和强风沙等环境条件.列车模型采用三车编组,其几何模型如图 1 所示.列车编组长、宽、高分别为 81.5 m、3.3 m、3.9 m,车身断面面积为 11.5 m^2.为了模拟列车对隧道内火灾烟气蔓延的真实影响,本研究所采用的列车几何模型保留了车体的转向架、设备舱以及风挡等复杂结构,尽可能减少所采用几何模型误差造成的不利影响,以接近隧道内列车火灾发生时的真实场景.根据列车火灾事故统计,电气设备故障已成为动车组列车火灾的主要原因之一[21],因此本文将火源位置设置在列车头车车厢设备舱.

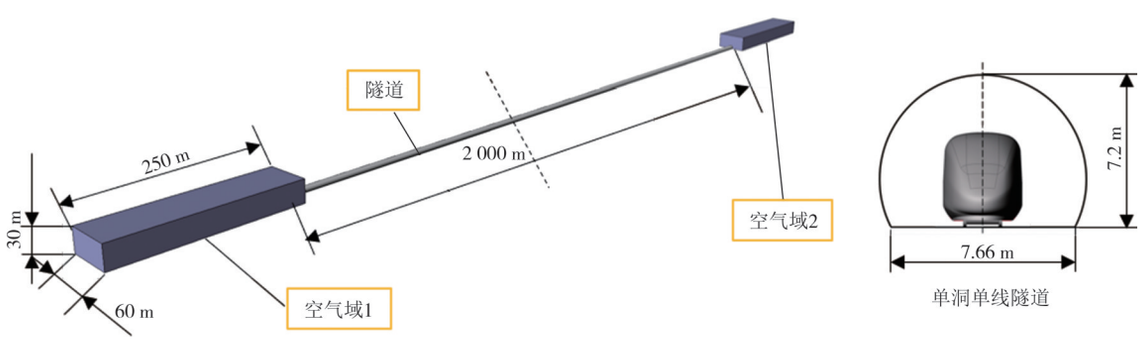
隧道模型如图 2 所示.通过调研国内在建高原铁路隧道相关情况,本研究确定线路设计时速为 200 km/h,根据《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016),针对我国设计行车速度为 200 km/h 的普速铁路隧道,其最小净空有效面积为 52 m^2[22].本文以某高原铁路 200 km/h 等级 TBM 施工隧道为研究对象,隧道断面主体结构为圆形,净空横断面有效面积为 52 m^2[23].在研究中将隧道线路设定为平直状态,忽略了实际隧道中可能存在的竖井、隧道坡度以及曲率等环境,同时对隧道结构进行了合理简化.



(a)三维视图　　(b)侧视图

图 1　列车几何模型

Fig.1　Train geometric model



(a)计算域视图　　(b)隧道主断面

图 2　隧道模型

Fig.2　Tunnel model

1.2　网格参数设置

本文研究内容涉及隧道内运动列车火灾,采用滑移网格技术模拟列车与隧道之间的相对运动,将包含列车与火源的滑移块作为滑移区域.为了考虑列车阻塞作用对烟气蔓延的影响,在对列车不同部件进行网格划分时,采用了自适应较强的四面体网格,以满足列车周围复杂区域的网格划分要求.同时,考虑到火源这一特殊区域,对其进行局部加密处理;在远离列车周围的滑移区域以及非滑移区域,采用类型为形状规整的六面体网格.按照以上网格划分方

案,本研究中整个计算域的网格总数约为950万.

1.3 边界条件设置

本文研究情景包含运动列车从隧道外驶入隧道,采用滑移网格技术模拟列车运动,图3展示了列车周围计算域网格的划分情况,计算域及边界条件设定如图4所示.考虑到实际火灾发生时列车与隧道表面对传热的影响,本研究在数值模拟中指定了各壁面的材料属性.其中列车壁面被设置为铝合金材料,其密度参数设置为7 850 kg/m^3,导热系数设置为3.00 W/(m·K),比热容参数设计为0.50 kJ/(kg·K);其余隧道等壁面均被指定为混凝土材料,其密度参数设置为2 200 kg/m^3,导热系数参数设置为1.55 W/(m·K),比热容参数设置为0.88 kJ/(kg·K).

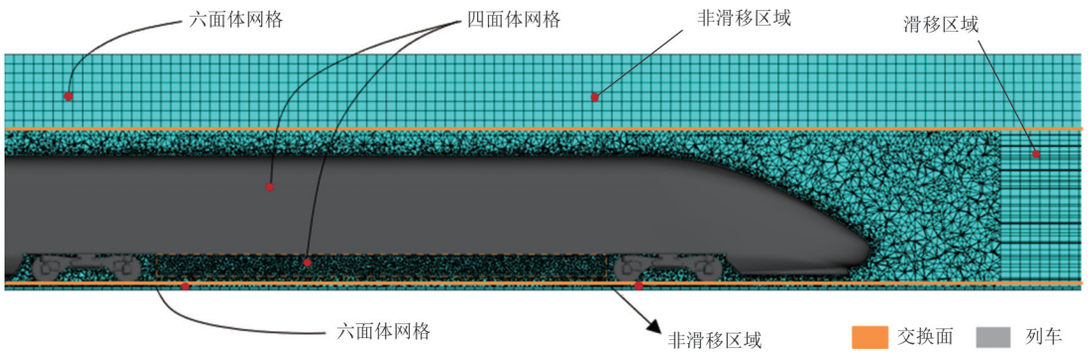


图3 列车周围计算域网格划分

Fig.3 Computational domain meshing around the train

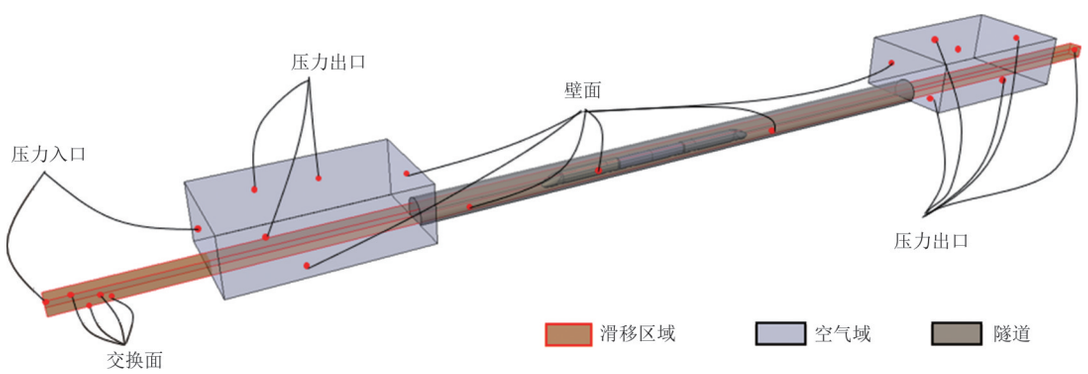


图4 计算域和边界条件

Fig.4 Calculation domain and boundary conditions

本研究建立了海拔高度分别0 m、1 000 m、2 000 m、3 000 m、4 000 m、5 000 m的隧道列车火灾环境,用以探究不同海拔高度下隧道内列车火灾烟气蔓延特性.在设置大气压相关参数时,考虑了环境大气压以及环境温度等参数的影响,环境大气压值会随着海拔高度的升高而呈现出非线性下降的趋势,因而本文采用美国采暖、制冷与空调工程师学会出版的手册中关于海拔高度与大气压力关系的计算公式:

$$p_h = 101.325\left(1 - \frac{h}{44\,329}\right)^{5.255\,876} \tag{1}$$

式中:p_h表示海拔高度为h处的大气压力值,kPa;h表示所处海拔高度,m.

考虑到同一时刻随着海拔高度的增加,环境温度也会随之降低,相关标准中关于海拔高度与环境温度关系的计算公式为[24]:

$$t_h = t_A - \frac{g_t \Delta h}{100} \tag{2}$$

式中:t_h表示海拔高度为h处的环境温度,K;t_A表示海平面处气象工作站处的环境温度,K;g_t表示所处高度处温度梯度,K/m;Δh表示所处海拔高度与海平面之间高度差,m.

根据以上标准,本文以海拔0 m时为基准,该条件下环境温度为298 K(25 ℃)、大气压力为101.325 kPa、空气密度为1.225 kg/m^3,其余海拔高度下环境参数设定见表1.

1.4 火灾场景构建

为了研究高海拔地区环境大气压低、气温低条件下铁路隧道内运动列车火灾烟气蔓延特性,本文

表 1　大气压力、环境温度与海拔高度的关系

Tab.1　The relationship between atmospheric pressure, ambient temperature and altitude

海拔高度/m	当地温度/K	大气压力/kPa	空气密度/(kg·m^{-3})
0	298	101.325	1.225
1 000	291.5	89.267	1.106
2 000	285	78.426	0.996
3 000	278.5	68.597	0.895
4 000	272	59.883	0.800
5 000	265.5	52.081	0.714

采用滑移网格技术,分析了以 44 m/s 速度在不同海拔高度隧道内匀速运行列车头车设备舱位置处突发火灾后减速至停车情景下隧道内的烟气蔓延特性.

由于本文重点分析的是海拔高度对隧道内列车运动火灾烟气蔓延规律的影响情况,为了排除火灾规模对烟气蔓延的影响,本文将不同海拔高度隧道内的列车火源功率均设置为 10 MW.

图 5 展示了隧道内运动列车火灾场景.列车以 44 m/s(约 158 km/h)的速度从明线区域匀速驶入隧道,在匀速运行 10 s 以后设备舱位置发生火灾,列车立即采取制动措施,以 1 m/s^2 的减速度制动并在经过 44 s 以后停车在隧道内.为了方便后文描述,规定以火源中心为原点位置,沿着隧道长度方向指向空气域 2,X 轴为正方向,即火源下游方向,反之为火源上游方向.

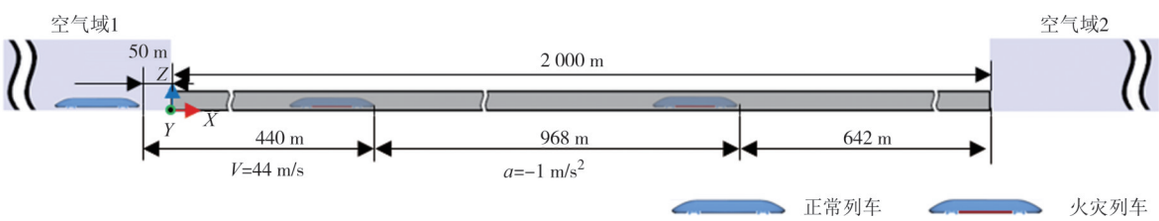


图 5　移动火源火灾场景

Fig.5　Mobile fire source fire scene

1.5　测点布置

由于隧道内狭长受限的空间环境特点,当火灾发生时,释放的大量高温烟气容易在隧道内发生聚集且迅速沿着长度方向传播.为了分析列车发生火灾后隧道拱顶位置处的烟气特征参数,在隧道内拱顶位置处沿长度方向布置了一系列测点,测点布置如图 6 所示.考虑到运动列车发生火灾减速停车以后隧道内高温区域以及烟气分布主要集中在火源周围,因此本研究在设置静止列车火灾和运动列车火灾时,均以火源中心位置为测点布置中心,共计测点 77 个.

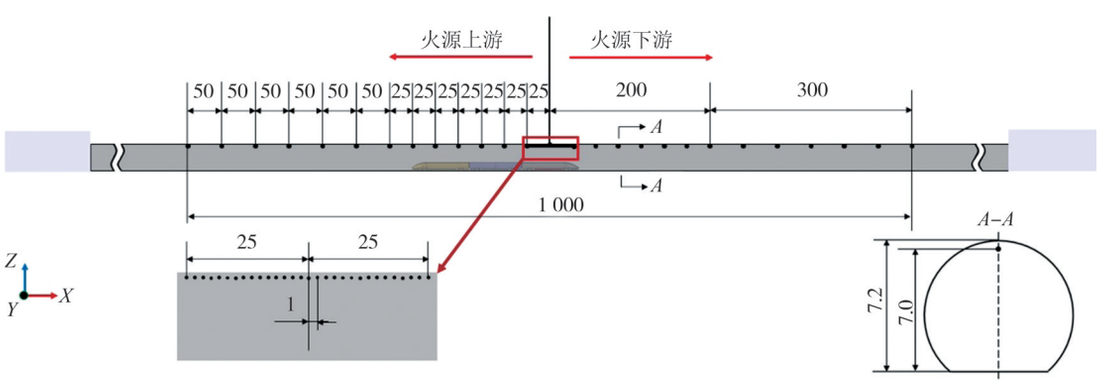


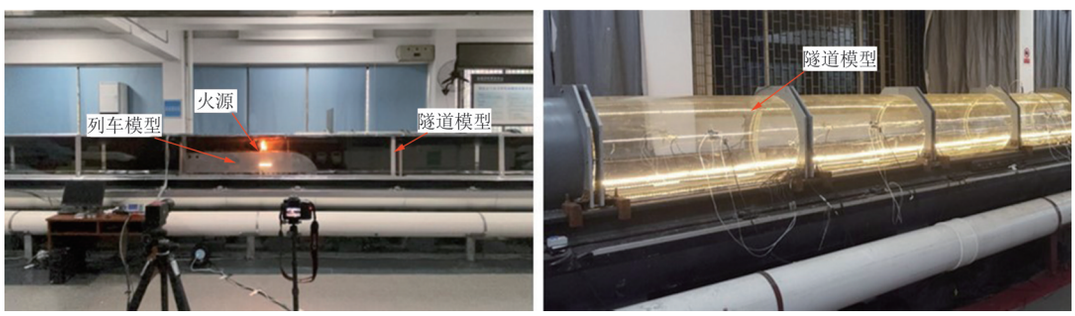
图 6　测点布置示意图(单位:m)

Fig.6　Schematic diagram of measurement point layout(unit:m)

2　数值验证

为了验证数值模拟方法的可靠性,本文采用两个试验来进行验证.其中,试验一是已开展的隧道内静止列车火灾试验,试验二是 Wang 等[25]已开展的列车火灾动模型试验.试验一、试验二的火灾场景如图 7 所示,试验一中采用的隧道模型为长 15 m,宽、高均为 0.6 m 的断面形状为方形的隧道结构,所用车模型为长 2 m、宽 0.3 m、高 0.3 m 的单节列车模型.火源大小为 0.1 m×0.1 m,设置于车顶受电弓安装座位置处.试验中初始环境温度为 283 K,火源功率为

12.1 kW.试验二中列车与隧道均采用1∶10缩尺寸模型,列车的尺寸为长7.10 m、宽0.30 m、高0.38 m,隧道和列车的横断面积分别为0.22 m^2和0.095 m^2,试验中模型列车以60 km/h的行驶速度穿过隧道.

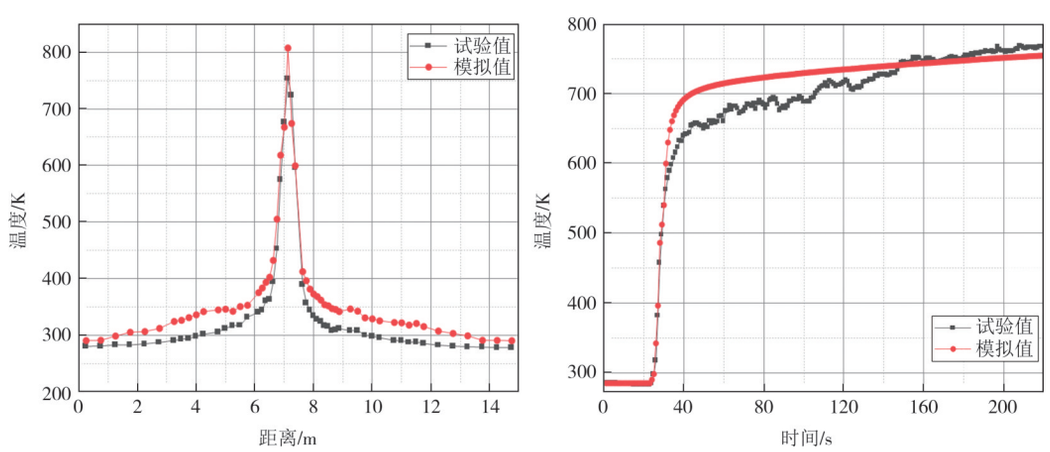


(a)试验一 (b)实验二

图7 隧道火灾试验示意图

Fig.7 Schematic diagram of tunnel fire accident test

图8展示了试验一与数值模拟结果中所选取测点温度对比情况:火源中心上方处所选取测点的温度时程曲线和215 s时刻隧道拱顶位置处沿纵向方向的温度分布;图9展示了试验二与数值模拟结果中所选取测点的气流流速对比情况.从两图中可以看出数值模拟结果与试验结果之间吻合度较好.因此,认为采用该数值模拟方法可继续开展后续研究.



(a)纵向温度分布 (b)温升时程曲线

图8 静止火灾烟气温升数值模拟方法验证

Fig.8 Verification of numerical simulation method of static fire accident smoke temperature rise

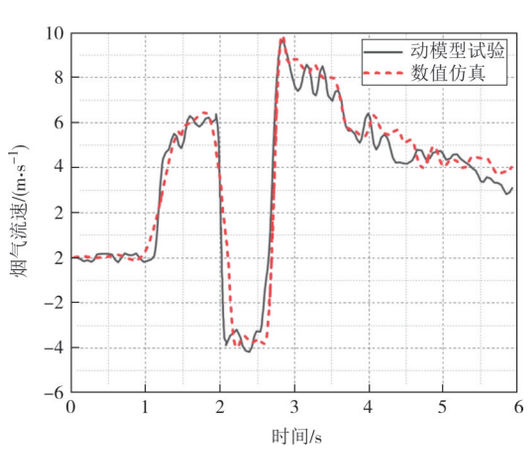


图9 运动火灾烟气流速数值模拟方法验证

Fig.9 Numerical simulation method verification of smoke velocity in motion fire accident

为验证网格无关性,采用3套不同密度的网格验证试验二所选取的测点位置的气流速度(表2),u代表测点的纵向流速,V为列车车速,$(u/V)_{max}$代表测点无量纲流速的最大值.由表2可知,粗糙网格方案结果与动模型试验结果之间的误差大于5%,而中等网格和精细网格方案结果与动模型试验结果之间的误差均在5%以内.故可以认为中等网格方案和精细网格方案满足数值模拟中网格无关性的要求.为了节省计算资源和减少计算时间,本研究决定采用中等网格划分方案对后续问题进行研究.

表 2　不同网格方案验证结果误差比对

Tab.2　Error comparison of verification results for different mesh schemes

网格	网格总数/10^6	烟气流速峰值	
		$(u/V)_{max}$	误差/%
动模型试验	—	0.551	—
粗糙网格	6.0	0.508	−7.80
中等网格	8.5	0.535	−2.90
精细网格	11.8	0.539	−2.18

3　结果与分析

3.1　海拔高度对隧道内烟气流速影响分析

图 10 展示了列车发生火灾减速停车后 180 s 时刻车体周围烟气纵向流速分布.从图中可以看出,当停车 180 s 时,由于列车周围活塞风风速明显衰减,隧道内烟气自身热浮力和静压力主导烟气运动,不同海拔高度隧道内拱顶位置处都已经出现烟气逆流现象.随着海拔高度逐渐增加,列车周围烟气流速及隧道拱顶位置处火源上游方向的烟气逆流长度均在逐渐增加.当海拔高度为 0 m 时,烟气刚刚逆流至尾车位置,而当海拔高度不断增加到 5 000 m 时,整个尾车上方都已被烟气笼罩.由此得出,列车停车以后海拔越高,隧道拱顶位置烟气逆流越早,同时同一时刻向上游方向的逆流长度越大.

列车停车以后,随着时间的不断增加,火灾影响范围会进一步增大.图 11 展示了列车发生火灾减速停车后 360 s 时刻车体周围烟气流速分布.从图中可以看出,火源上游烟气纵向流速随着海拔高度的增加呈现出逐渐增大的趋势.这是由于随着海拔高度的不断增加,隧道内大气压以及空气密度均会不断下降,高温烟气在热浮力作用下上浮至隧道拱顶位置以后,又在静压力作用下向着火源上游方向蔓延.海拔越高空气密度越低,空气对烟气的摩擦力就会越小;同时海拔越高,隧道内能够与高温烟气进行热量交换的冷空气总量越少,隧道拱顶处的烟气温度就越高,其自身密度就越低,导致烟气沿上游方向的静压力越大.在以上因素的综合作用下,当火源位置处释放相同热量以及高温烟气时,随着海拔高度的不断增加,烟气向火源上游方向的蔓延速度不断增大.同时从图 11 中还可看出,随着海拔高度的逐渐增加,火源上游区域的烟气热分层现象也越来越明显.

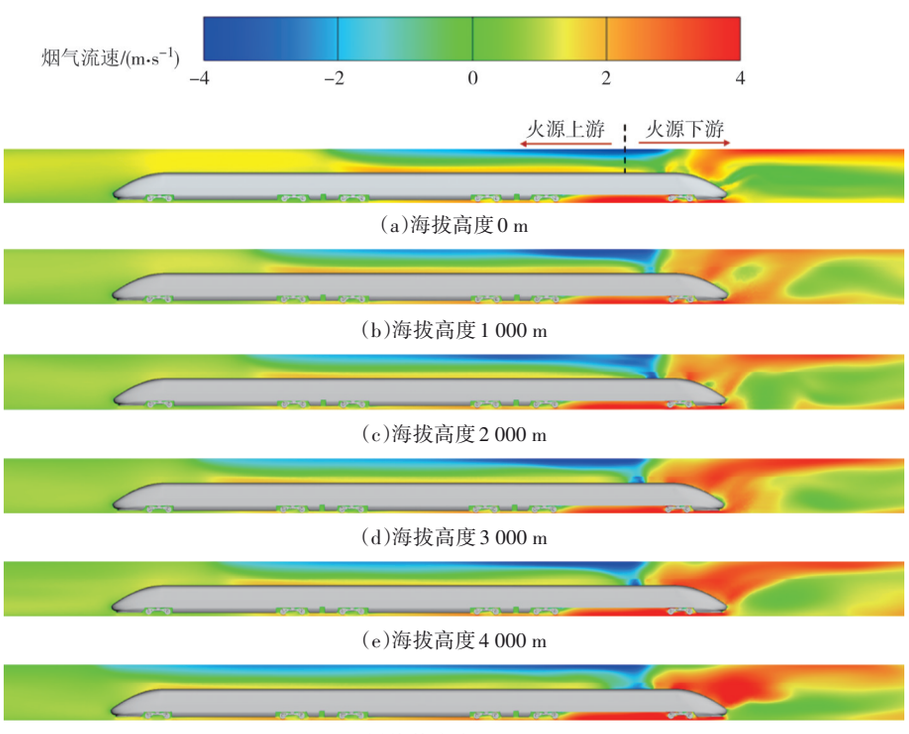


图 10　列车停车后 180 s 时刻车体周围烟气流速分布

Fig.10　Smoke velocity distribution around the train body 180 s after the train stops

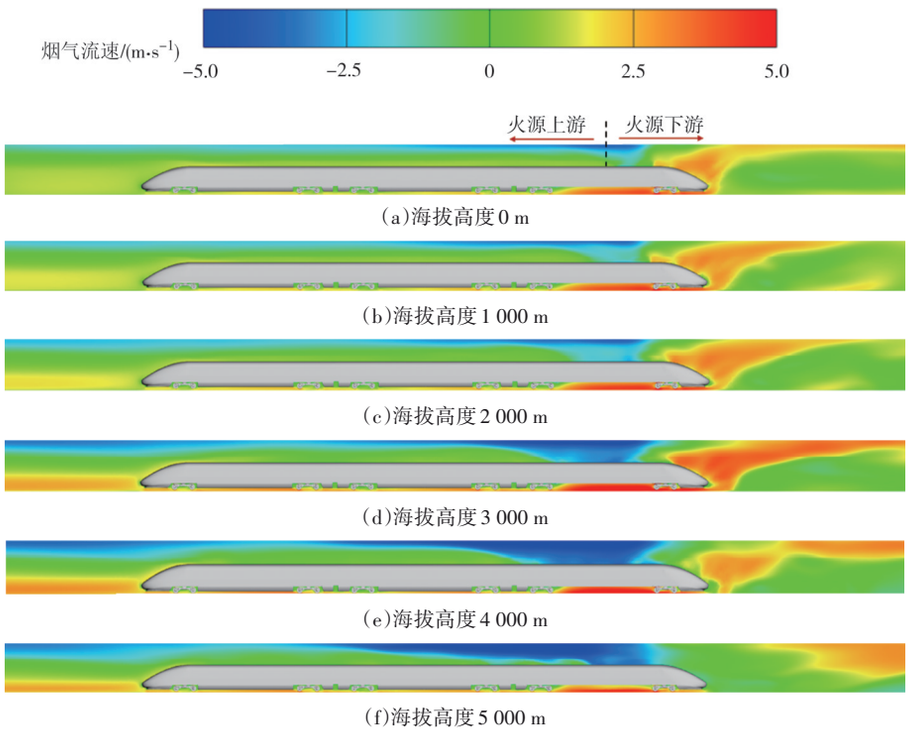


图 11 列车停车后 360 s 时刻车体周围烟气流速分布

Fig.11 Smoke velocity distribution around the train body 360 s after the train stops

而在图 11 中的火源下游列车头车附近区域,烟气流速随着海拔的升高呈现出先增加后下降的趋势.这是由于当海拔高度增加到 5 000 m 时,过低的空气密度导致隧道内冷空气过少,当火源位置处释放相同热量以及高温烟气时,在前期活塞风不断作用下运动至列车头车前方的高温烟气使得头车前方区域的温度明显上升,且温度变化梯度不大,因此烟气控制体所受静压力明显下降,导致烟气沿火源下游方向蔓延的合力很小,烟气在此区域内主要依靠浓度差进行蔓延,所以列车头车前方区域的烟气蔓延速度较低.在距离火源中心更远位置处,随着温度明显下降,此处烟气在自身静压力作用下又将快速向着火源下游方向蔓延.

为了进一步阐明海拔高度对隧道内气流流速的影响,图 12 分别揭示了列车停车后 180 s 和 360 s 时刻隧道拱顶下方烟气纵向流速分布曲线.从图中可以看出,在火源上游区域,对于未受火灾烟气逆流影响的区域,气流纵向流速随着海拔高度的增加呈现出逐渐减小的趋势;而在烟气逆流区域,烟气纵向流速则随着海拔增加而逐渐增加.这是因为对于烟气

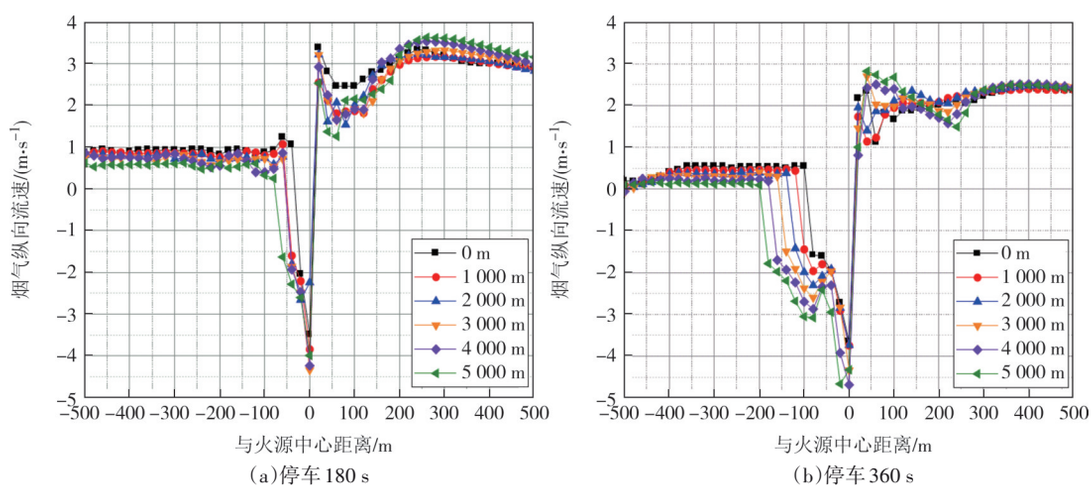


图 12 不同海拔高度隧道内列车停车后隧道拱顶位置烟气纵向流速分布

Fig.12 Longitudinal flow velocity distribution of smoke at tunnel vault position after train parking in tunnel at different altitudes

未逆流区域,隧道内气流流速主要是受列车活塞风的影响.随着海拔高度逐渐增加,空气密度逐渐下降,单位体积的空气惯性减小,列车停车以后隧道内活塞风衰减更快,因此相同时刻未受火灾烟气影响区域气流流速随着海拔的增高而减小.而在烟气逆流区域,烟气流速主要取决于自身静压力以及活塞风动压力作用,在海拔越高的区域活塞风速度以及密度下降使得动压力更小,烟气分子所受摩擦力也随着周围空气密度的下降而逐渐减小,因此高海拔隧道内烟气分子所受合力更大,其逆流速度也将更大.在列车停车后360 s时,当海拔高度从0 m上升到5 000 m时,烟气逆流流速峰值从3.65 m/s增加至4.68 m/s,增加幅度达28.2%.

在火源下游区域,烟气分子所受静压力与活塞风动压力方向是一致的.列车停车以后,隧道内的活塞风在自身惯性作用下向前运动过程中受到隧道壁面、列车表面的摩擦力作用以及空气自身黏性作用,其流速会逐渐下降.当时间从180 s增加到360 s时,随着隧道内的活塞风不断衰减,裹挟在其中的烟气流速也进一步降低.虽然海拔升高会使烟气分子所受静压力与摩擦力之间的合力增大,但在活塞风动压力的耦合作用下,火源下游烟气分子沿纵向蔓延速度与海拔高度之间的关系尚不是很清楚.

表3列举了不同海拔高度隧道内列车火灾发生后烟气沿隧道拱顶位置处逆流至火源上游50 m位置时刻.从表中可以看出,高原铁路隧道内的烟气逆流至上游50 m处的时刻要早于平原隧道.当海拔高度为0 m时,火灾烟气蔓延至上游50 m处的时刻为296 s,而海拔高度为3 000 m和5 000 m的隧道内该时刻分别提前至226 s和194 s,相比海拔为0 m时分别提前了60 s和102 s.

表3　不同海拔高度隧道内拱顶处烟气逆流至上游50 m时刻

Tab.3　The smoke at the vault of the tunnel at different altitudes flows upstream to 50 m upstream

海拔高度/m	逆流至上游50 m时刻/s
0	296
1 000	255
2 000	245
3 000	226
4 000	213
5 000	194

3.2　海拔高度对隧道内温度分布影响分析

图13和图14分别展示了不同海拔高度隧道内列车停车后180 s时刻和360 s时刻车体周围温度分布.从图中可以看出,列车停车以后由于活塞风作用,火源处释放的高温烟气与热量大部分被运输至火源下游区域,车身周围温度峰值均出现在头车前

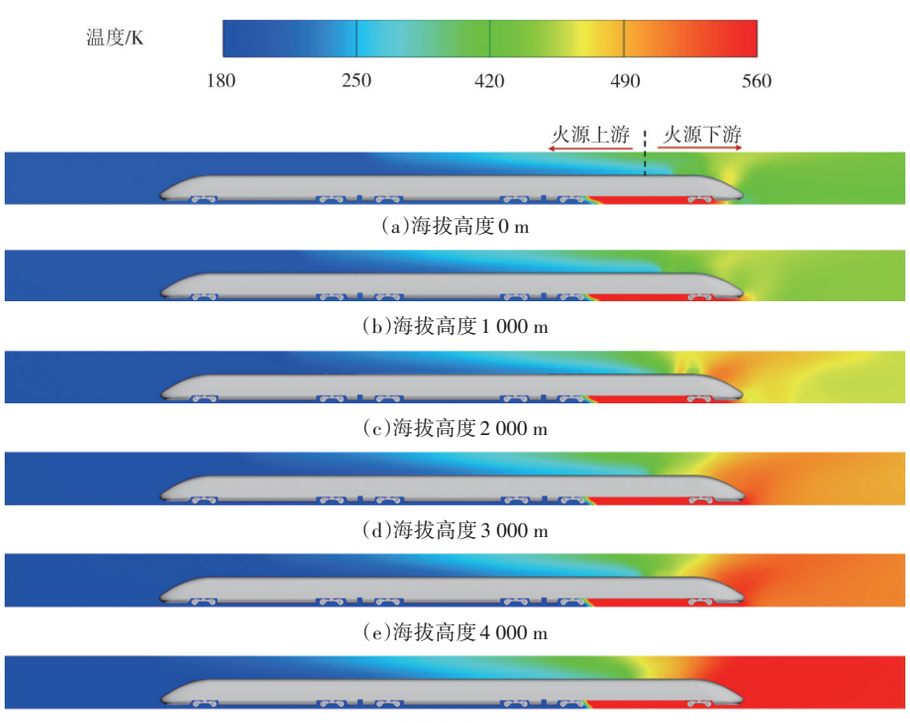


图13　不同海拔高度隧道内列车停车后180 s时刻车体周围温度分布

Fig.13　Temperature distribution around the train body at different altitudes after the train stops in the tunnel at 180 s

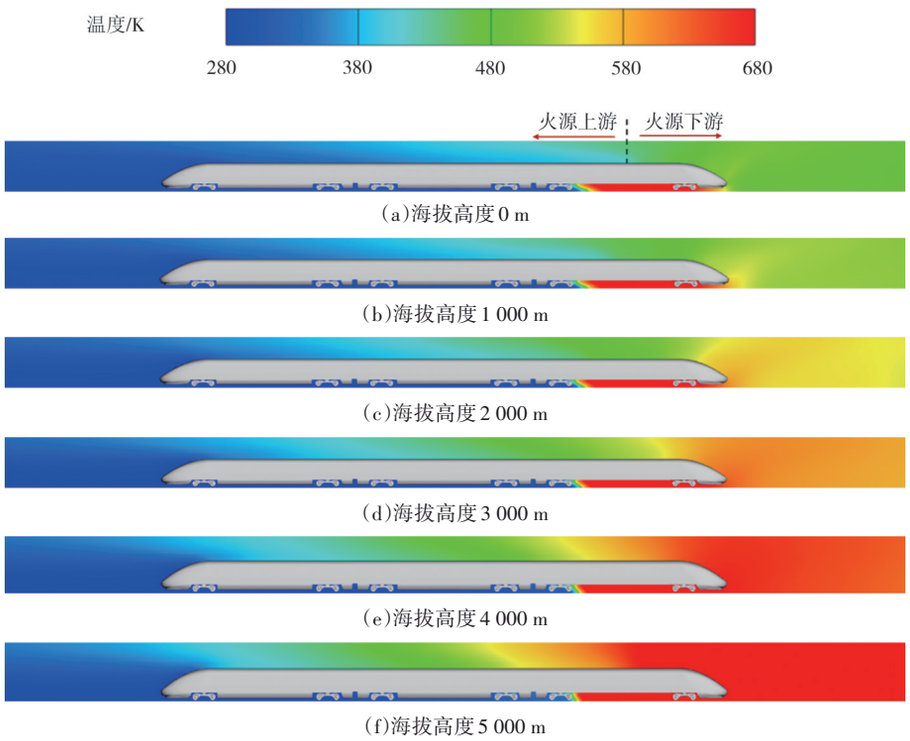


图 14 不同海拔高度隧道内列车停车后 360 s 时刻车体周围温度分布

Fig.14 Temperature distribution around the train body at different altitudes after the train stops in the tunnel at 360 s

方区域.同时由于火势不断发展以及活塞风不断衰减,列车停车时间越久,同一海拔高度隧道内车身周围温度越高,火灾对上游区域影响范围越广泛.

比较图 13 和图 14 中信息可以发现,在海拔高度从 0 m 增加到 5 000 m 过程中,同一时刻车体周围温度分布均呈现出逐渐增加的趋势.以列车停车后 360 s 为例,当海拔高度为 0 m 时,头车前方区域的最高温度大概在 480 K 左右,当海拔增加到 3 000 m 时,该区域温度逐渐上升至 580 K 左右,而当海拔进一步上升至 5 000 m 时,该区域温度已增加至 680 K 以上.由于海拔高度越高,隧道内的空气越稀薄,冷空气的总量越少,当火源处释放出相同的热量时,能够与高温烟气进行传递的总热量也就越少.

图 15 进一步展示了不同海拔高度隧道内列车停车后 180 s 和 360 s 时刻隧道拱顶下方温度沿纵向分布曲线.从图中可以看出,在火灾影响范围内,同一时刻隧道拱顶下方处烟气温度峰值随海拔高度的增加而增加.在列车停车后 180 s 时,海拔高度为 0 m 和 5 000 m 的隧道内拱顶下方位置处的温度峰值分别为 453 K 和 571 K,增长了 118 K,增幅达到

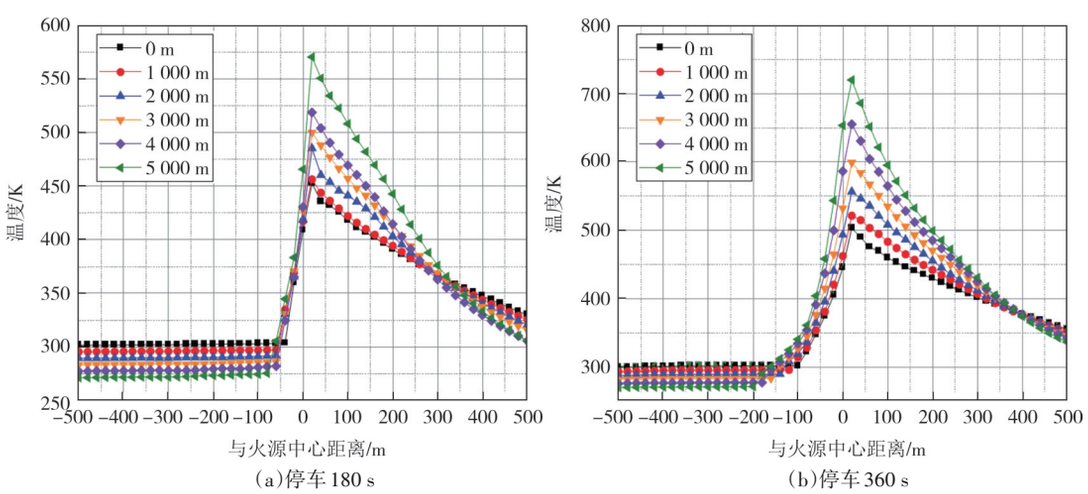


图 15 不同海拔高度隧道内列车停车后隧道拱顶下方温度沿纵向分布

Fig.15 Longitudinal temperature distribution under the tunnel vault after the train stops in the tunnel at different altitudes

26.0%.随着火灾的不断发展,在列车停车后 360 s 时,温度峰值差异进一步加大,5 000 m 海拔高度与 0 m 海拔高度相比,隧道内拱顶下方位置处的温度峰值增长了 216 K,增幅达到 42.9%.这表明海拔越低,隧道内的冷空气总量越多,通过吸收更多火源处所释放的热量来抑制隧道内的温升.当火灾发生后列车减速停在隧道内时,从温度分布角度来看,火源下游区域对乘客的威胁要大于火源上游区域;同时随着海拔高度的不断增加,火源中心处温度峰值也在不断增加,即发生相同规模火灾时,高原铁路隧道内温度分布对乘客的威胁要大于平原铁路隧道.

4 结 论

本研究采用 FLUENT 滑移网格的方法,模拟了隧道内正常行驶列车突发火灾后减速至停车在隧道内的整个运动过程,分析了海拔高度对列车火灾发生后隧道内烟气流速以及温度分布的影响,得出的主要结论如下.

1) 当列车停车一段时间后,隧道内烟气逆流长度随着海拔高度的增加而逐渐增加.并且海拔越高,隧道内烟气逆流至火源上游 50 m 处的时间越早,5 000 m 海拔隧道内烟气逆流至火源上游 50 m 处的时间相比 0 m 海拔隧道提前了 102 s.

2) 列车停车以后,由于活塞风作用,距离火源相同长度处的下游温度总是比上游高;随着海拔高度逐渐增加,同一时刻车体周围的温度分布呈现出不断增加的趋势;在列车停车后 360 s 时,5 000 m 海拔隧道内拱顶位置处的温度峰值相比 0 m 海拔隧道升高了 216 K,增幅达到 42.9%.

本文在探究海拔高度对隧道内列车运动火灾场景下的烟气流速及温度分布的影响时,重点分析的是列车火灾发生后隧道内烟气的流速和温度,对于车厢内部的烟气蔓延情况未做深究.因此,在后续研究中可以进一步探讨海拔高度对隧道内列车车厢内部火灾烟气蔓延特性的影响情况.

参考文献

[1] 马召辉. 高海拔特长铁路隧道烟气蔓延规律与控制方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院集团有限公司, 2020:1-5.
MA Z H. Study on the law and control method of smoke spread in high altitude and extra long railway tunnel[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limted, 2020:1-5. (in Chinese)

[2] SEIKE M, KAWABATA N, HASEGAWA M, et al. The retarding effect of fixed barriers on smoke propagation in tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 100-113.

[3] 徐志胜, 王悦琳, 赵家明, 等. 市域快线列车内不同位置火灾对隧道温度场分布的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3476-3487.
XU Z S, WANG Y L, ZHAO J M, et al. Influence of fire at different positions in metropolitan rapid rail transit vehicle on temperature field distribution of tunnels[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3476-3487. (in Chinese)

[4] WANG H T, GAO H H. Study of blockage effects of metro train on critical velocity in sloping subway tunnel fires with longitudinal ventilation[J]. Energies, 2022, 15(15): 5762.

[5] 张子洋. 特长隧道内高速列车移动火灾烟气蔓延规律研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2021.
ZHANG Z Y. Research on smoke spreading regularity of high-speed train moving fire in extra-long tunnel[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2021. (in Chinese)

[6] 王哲. 坡度对地铁隧道内列车火灾烟气蔓延特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2020.
WANG Z. Research on the smoke movement characteristics of subway train fire in inclined tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2020. (in Chinese)

[7] ZHOU D, HU T E, WANG Z, et al. Influence of tunnel slope on movement characteristics of thermal smoke in a moving subway train fire[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: 101472.

[8] 胡天恩. 曲线隧道内地铁列车火灾烟气蔓延特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
HU T E. Research on smoke movement characteristics of subway train fire in curved tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2022. (in Chinese)

[9] 周丹, 唐子童, 胡天恩, 等. 隧道半径对地铁列车火灾烟气蔓延特性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3918-3927.
ZHOU D, TANG Z T, HU T E, et al. Research on effect of tunnel radius on smoke movement characteristics in subway trains fire[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(10): 3918-3927. (in Chinese)

[10] 张念. 高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性与安全疏散研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
ZHANG N. Research on combustion characteristics and safety evacuation of high-altitude super-long railway tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

[11] 张念, 谭忠盛. 高海拔特长铁路隧道火灾烟气分布特性数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(6): 52-57.
ZHANG N, TAN Z S. Numerical simulation study on smoke distribution of fire in high-altitude super-long railway tunnels[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(6): 52-57. (in Chinese)

[12] 张念, 谭忠盛, 毛军. 高海拔对火灾燃烧特性影响的试验研

究[J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(5): 545-548.
ZHANG N, TAN Z S, MAO J. Study on the impact of high-altitude on combustion characteristics of fire [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(5): 545-548. (in Chinese)

[13] 王明年,郭晓晗,倪光斌,等. 高海拔铁路隧道火灾烟气CO浓度控制标准讨论[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 40-45.
WANG M N, GUO X H, NI G B, et al. A discussion on the control standards for smoke CO concentration during fires in high-altitude railway tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 40-45. (in Chinese)

[14] 刘夏临, 张翾, 李雪峰, 等. 超长高海拔公路隧道火灾烟流扩散及温度分布规律[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13958-13964.
LIU X L, ZHANG X, LI X F, et al. Laws of smoke diffusion and temperature distribution in super-long high-altitude highway tunnel on fire [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 13958-13964. (in Chinese)

[15] 王峰, 张路华, 袁松, 等. 高海拔公路隧道火灾烟气控制临界风速研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(5): 153-160.
WANG F, ZHANG L H, YUAN S, et al. Critical velocity of fire smoke control in high-altitude highway tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5): 153-160. (in Chinese)

[16] 白赟, 袁松. 高海拔公路隧道火灾烟气流动特性研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(增刊1): 520-527.
BAI Y, YUAN S. Study on smoke flow characteristics of high altitude highway tunnel fire [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(Sup.1): 520-527. (in Chinese)

[17] YUAN D, WANG Y, ZHANG Y, et al. The impact of altitude effect on tunnel fire characteristics [J]. Bulgarian Chemical Communications, 2015, 47: 239-242.

[18] LIU B, MAO J, XI Y H, et al. Effects of altitude on smoke movement velocity and longitudinal temperature distribution in tunnel fires [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 112: 103850.

[19] LIU B, MAO J, XI Y H, et al. Effect of altitude on vertical temperature distribution and longitudinal smoke layer thickness in long tunnel fires [J]. Fire and Materials, 2023, 47(1): 16-27.

[20] 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.
WANG Z W, MA W B, HAN Z L, et al. Characteristics of fire smoke spread in high altitude railway tunnel rescue station [J]. Railway Engineering, 2021, 61(12): 133-137. (in Chinese)

[21] 秦宁然, 戴忠. 动车组设备舱火灾防控措施探讨[J]. 消防技术与产品信息, 2018, 31(5): 16-19.
QIN N R, DAI Z. Discussion on fire prevention and control measures of EMU equipment cabin [J]. Fire Technique and Products Information, 2018, 31(5): 16-19. (in Chinese)

[22] 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Code for design of railway tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)

[23] 刘长利. 高海拔超长铁路隧道TBM施工断面优化的探讨[J]. 铁道建筑, 2020, 60(3): 28-33.
LIU C L. Discussion on the cross section optimization of high-altitude extra-long railway tunnel driven using TBM [J]. Railway Engineering, 2020, 60(3): 28-33. (in Chinese)

[24] LIU C, ZHONG M H, TIAN X L, et al. Experimental and numerical study on fire-induced smoke temperature in connected area of metro tunnel under natural ventilation [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 138: 84-97.

[25] WANG Z, ZHOU D, KRAJNOVIC S, et al. Moving model test of the smoke movement characteristics of an on-fire subway train running through a tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 96: 103211.