

文章编号: 1674—8247(2022)04—0075—07  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.012

## 高海拔铁路隧道紧急救援站火灾通风排烟参数优化

刘蕤源

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘 要:**现行《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》主要针对平原地区给出铁路隧道紧急救援站火灾通风排烟设计参数。然而,随着海拔高度升高,火灾燃烧及烟气扩散规律发生变化,需结合高海拔实际情况对铁路隧道紧急救援站通风排烟参数进行优化。本文采用火灾动力学模拟软件 FDS 建立单洞双线及双洞单线两种紧急救援站三维全尺寸模型,对比了不同海拔高度下不同排烟参数对烟气蔓延范围及吸穿效应的影响,分别给出了适用于高海拔铁路单洞双线和双洞单线隧道紧急救援站的通风排烟优化参数。研究表明:(1)现行规范中关于横通道防护门处风速及紧急救援站两端抑制烟气流动风速的要求,主要适用于双洞单线隧道紧急救援站,应用于单洞双线隧道将造成“吸穿”现象;(2)针对单洞双线隧道紧急救援站,制定了适用于各海拔的通风方案,并给出了涵盖横通道防护门处风速、紧急救援站两端抑制烟气流动风速等参数优化建议值;(3)针对双洞单线隧道紧急救援站,给出了不同海拔高度下排烟口尺寸、排烟风速等参数优化建议值。

**关键词:**高海拔;铁路隧道;通风排烟;参数优化;数值模拟

中图分类号:U453.5 文献标志码:A

75

## Optimization of Fire Ventilation and Smoke Exhaust Parameters in Emergency Rescue Stations of High-altitude Railway Tunnels

LIU Ruiyuan

(China Railway First Survey and Design Institute, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The current Code for Design on Evacuation Engineering for Disaster Prevention and Rescue of Railway Tunnel mainly gives the design parameters of fire ventilation and smoke exhaust of emergency rescue stations of railway tunnels in plain areas. However, with the increase in altitude, the law of combustion and smoke diffusion changes, so it is necessary to optimize the ventilation and smoke exhaust parameters of the emergency rescue stations of railway tunnels in combination with the actual situation at high altitudes. In this paper, the fire dynamics simulation software FDS is used to establish three-dimensional full-scale models of single-tube double-track and double-tube single-track emergency rescue stations. The impact of different smoke exhaust parameters on smoke spreading range and plug-holing effect at different altitudes is compared, and the ventilation and smoke exhaust optimization parameters suitable for single-tube double-track and double-tube single-track emergency rescue stations of high-altitude railways are given respectively. The results show that: (1) The requirements of the current specifications on the wind speed at the protective door of the cross passage and the wind speed at both ends of the emergency rescue station to suppress the flow of smoke are mainly

收稿日期:2022-05-20

作者简介:刘蕤源(1989-),男,工程师。

基金项目:中国铁建股份有限公司科技重大专题(2019-A04)

引文格式:刘蕤源. 高海拔铁路隧道紧急救援站火灾通风排烟参数优化[J]. 高速铁路技术,2022,13(4):75-81.

LIU Ruiyuan. Optimization of Fire Ventilation and Smoke Exhaust Parameters in Emergency Rescue Stations of High-altitude Railway Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):75-81.

applicable to the emergency rescue station of the double-tube single-track tunnel, which will cause “plug-holing” when applied to the single-tube double-track tunnel. (2) For the emergency rescue station of single-tube double-track tunnels, the ventilation scheme suitable for each altitude is formulated, and the recommended optimization values of parameters such as wind speed at the protective door of the cross passage and wind speed at both ends of the emergency rescue station to suppress the flow of smoke are given. (3) For the emergency rescue stations of double-tube single-track tunnels, the recommended parameters such as smoke vent size and smoke exhaust wind speed at different altitudes are given.

**Key words:** high altitude; railway tunnel; ventilation and smoke exhaust; parameter optimization; numerical simulation

进入21世纪以来,中国铁路隧道建设逐渐向海拔更高、长度更长的方向发展<sup>[1]</sup>。随着海拔高度增高,隧道内环境逐渐呈现“低温、低压、低氧”三低的气候特征,受该气候条件影响,同等火灾规模下,隧道内烟气蔓延速度更快、长度更长<sup>[2-3]</sup>,这对高海拔铁路隧道通风排烟设计提出了更高的要求。我国TB 10020-2017《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》<sup>[4]</sup>中紧急救援站通风排烟设计参数主要适用于平原地区,为此结合高海拔铁路隧道环境特点对紧急救援站通风排烟设计参数进行优化十分重要。

目前,国内外学者通过现场试验、理论分析、数值模拟等方法对高海拔铁路隧道通风排烟参数及火灾烟气扩散规律开展了研究。蒋尧<sup>[5]</sup>基于防护门处风速对紧急救援站火灾烟气蔓延的影响,对某双洞单线特长铁路隧道紧急救援站火灾通风排烟设计提出了建议;纪慧琢<sup>[6]</sup>依托关角隧道工程,对高海拔铁路隧道风机布置方案进行了优化;Yan<sup>[7-9]</sup>等针对不同海拔高度下隧道温度分布规律及烟气流动特性开展了大量研究,并推导了自然通风下竖井内烟气流速;张念<sup>[10-11]</sup>等以关角隧道为依托,给出了高海拔铁路隧道内温度分布及烟气扩散规律;陈昕<sup>[12]</sup>等采用数值模拟的方法,对考虑自然风情况下高海拔铁路隧道紧急救援站及横通道内烟气扩散规律进行了研究。

上述研究大多针对高海拔铁路隧道烟气扩散规律,而在此基础上提炼的高海拔铁路隧道通风排烟设计参数相对较少,不便于工程实践应用。基于此,本文以某线隧道工程为依托,分别建立单洞双线和双洞单线铁路隧道紧急救援站全尺寸模型,借助FDS火灾动力学模拟软件对不同海拔高度、不同通风排烟参数下紧急救援站内烟气扩散规律进行研究,提出适用于高海拔铁路隧道紧急救援站的横通道防护门处风速、紧急救援站两端抑制烟气流动风速、排烟风速、排烟口尺寸等设计参数。研究结论可为高海拔铁路隧道通风排烟设计提供参考。

## 1 紧急救援站火灾通风排烟控制标准

铁路隧道内列车发生火灾后需在紧急救援站定点救援,因此可将着火列车停靠的紧急救援站通风排烟影响范围分为3个区域:火灾隧道、疏散横通道和排烟道。

### (1) 火灾隧道

在火灾隧道内,为保证人员安全疏散需实现:

- ①将烟气控制在紧急救援站范围内并及时排出;
- ②火灾烟气威胁人员安全时可用安全疏散时间大于必需安全疏散时间。

### (2) 疏散横通道

在列车发生火灾时需控制烟气不侵入横通道,如图1所示。

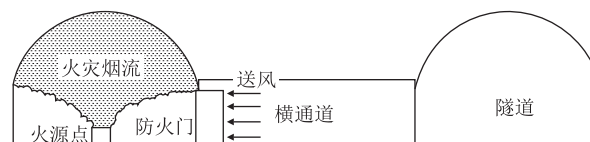


图1 防止烟气侵入疏散横通道示意图

### (3) 排烟道

在火灾工况下,排烟系统应保证烟气正常排出,同时需防止带出大量新鲜空气,形成“吸穿”现象,造成排烟效率低下,高温烟气向下游逃逸,如图2所示。

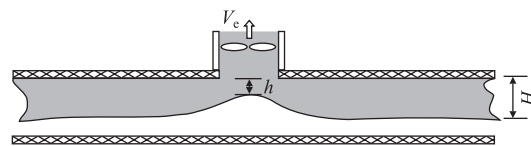


图2 “吸穿”现象示意图

图2中 $h=0$ 时表示排烟口下方已不存在烟气,即出现“吸穿”现象。

综合铁路隧道紧急救援站着火列车三区段通风排烟所需实现的效果,提出紧急救援站通风排烟控制标

准,如表1所示。

表1 火灾场景紧急救援站通风控制基准表

概述	类型	基准
列车起火 停靠在紧急救援站	火灾隧道	烟流范围控制在紧急救援站范围内
		人员必需安全疏散时间 < 可用安全疏散时间
	疏散横通道	保证烟气不侵入疏散横通道
	排烟道	排烟速率保持较低值,防止烟道出现“吸穿”现象

2 高海拔铁路隧道紧急救援站模型

本次高海拔铁路隧道紧急救援站火灾通风排烟数值模拟分别考虑单洞双线和双洞单线两种隧道型式。参考某线隧道工程紧急救援站实际尺寸构建三维模型,如图3所示。隧道纵坡取该隧道最大坡度,为30‰;紧急救援站长550 m,为防止烟气扩散出紧急救援站,沿上、下坡方向预留100 m,模型总长750 m;紧急救援站内横通道尺寸为4.5 m×4 m(宽×高),横通道间距为50 m,横通道防护门尺寸为2 m×2 m(宽×高);单洞双线隧道紧急救援站内平导尺寸为5 m×6.2 m(宽×高),紧急救援站内设有5个排烟口。依据《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》,将火灾规模设为20 MW,横通道防护门处风速暂定为2 m/s,紧急救援站两端抑制烟气流动风速暂定为1.2 m/s,排烟口风速暂定为3 m/s。

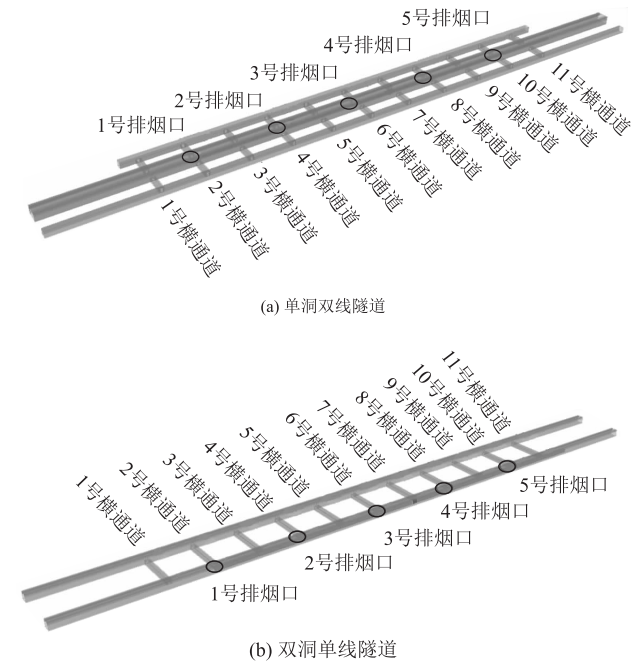


图3 隧道紧急救援站通风排烟模型示意图

在数值模拟过程中,需在兼顾计算精度及所消耗的计算资源的基础上,选取合适的网格尺寸。利用FDS进行模拟计算时多采用火源特征直径计算公式,如式(1)所示。当网络尺寸为特征直径的1/4~1/16时<sup>[13]</sup>,可认为计算结果较为合理。经计算,本次数值模拟网格尺寸为0.3 m。

D\* = (Q / (rho\_infinity \* C\_p \* T\_infinity \* sqrt(g)))^(2/3) (1)

式中:Q——火灾热释放速率(kW);  
rho\_infinity ——空气密度(kg/m³);  
C\_p ——空气比热容[kJ/(kg·K)];  
T\_infinity ——环境温度(K);  
g——重力加速度(m/s²)。

3 单洞双线铁路隧道紧急救援站火灾通风排烟参数优化

3.1 规范参数适用性

由于各海拔高度下烟气扩散规律基本一致,此处仅以海拔3 000 m为例分析。依据《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》计算得到排烟口面积为26.24 m²,约为半径3 m圆形的面积。

海拔3 000 m时单洞双线隧道紧急救援站内纵向烟气扩散规律如图4所示。

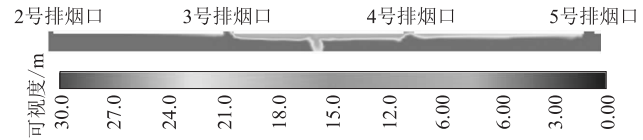


图4 海拔3 000 m时单洞双线隧道紧急救援站纵向烟气扩散云图

由图4可知,依据规范设计通风排烟参数时,火灾烟气被控制在紧急救援站范围内,主要位于2~5号排烟口之间,烟气集中在隧道拱顶处,未降至人眼特征高度处,不影响人员正常疏散。烟气主要由3号和4号排烟口排出,均出现明显“吸穿”现象。

受纵向烟气扩散长度影响,紧急救援站内仅有5~10号横通道位于烟气范围内,因此仅截取上述位置横向烟气扩散规律云图进行分析,如图5所示。

由图5可知,在横通道防火门处设置2 m/s风速可保证火灾烟气不侵入5~10号横通道,其中烟气扩散范围最大的为8号横通道所处位置。

由以上分析可知,依据《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》选取的通风排烟参数可使高海拔下单洞双线铁路隧道紧急救援站烟气扩散得到有效控制,

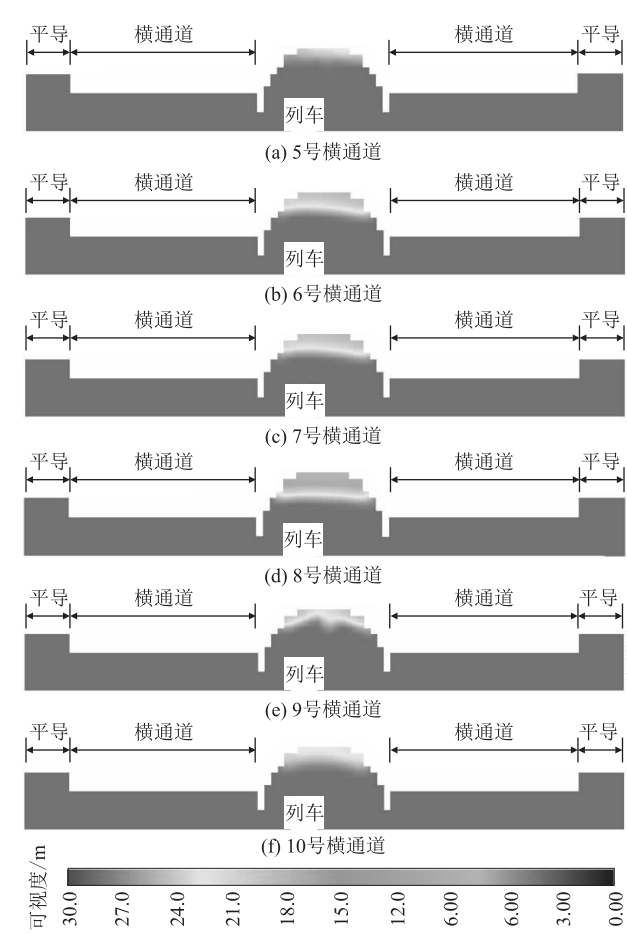


图5 海拔3 000 m时单洞双线隧道紧急救援站横向烟气扩散云图

但仍存在“吸穿”现象。在不改变规范规定排烟量的基础上,可采用增加排烟口尺寸或降低排烟风速的方式提高排烟效率。

以海拔3 000 m为例,将排烟口面积扩大为 $31.488\text{ m}^2$ ,半径约为3.3 m,降低排烟风速至 $2.5\text{ m/s}$ ,其纵向烟气扩散规律如图6所示。

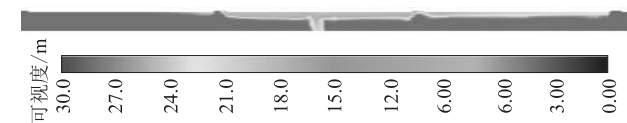


图6 增大断面对排烟效果影响图

由图6可知,在不改变排烟量的基础上增加排烟口面积对减轻“吸穿”现象的效果并不明显。因此,需通过降低紧急救援站两端抑制烟气流动风速或横通道防火门处风速以减低排烟量,进而改善“吸穿”效应。

3.2 紧急救援站两端抑制烟气流动风速优化结果

考虑到坡度对单洞双线隧道紧急救援站内烟气非对称扩散的影响,分别对紧急救援站上坡侧和下坡侧

抑制烟气流动的风速进行优化调整,具体计算工况如表2所示。

表2 工况设置表

工况	海拔高度/m	上坡侧抑制风速/(m/s)	下坡侧抑制风速/(m/s)	横通道防护门处风速/(m/s)
1	3 000	1.2	1.2	2
2			0.6	
3			0.3	
4			0	
5		1	0.3	
6	4 000	1.2	1.2	
7			0.6	
8			0.3	
9			0	
10		1	0.3	
11	5 000	1.2	1.2	
12			0.6	
13			0.3	
14			0	
15		1	0.3	

由于不同海拔高度下紧急救援站两端风速变化对烟气流动的抑制效果相近,本处仅以海拔3 000 m为例分析紧急救援站两端抑制烟气流动风速优化过程。

(1) 下坡侧抑制风速优化结果

结合自由扩散模拟结果,由于沿下坡方向烟气扩散距离较短,且为一固定值,故紧急救援站两端采用非对称风速抑制烟气流动。单洞双线紧急救援站纵向烟气扩散规律如图7所示。

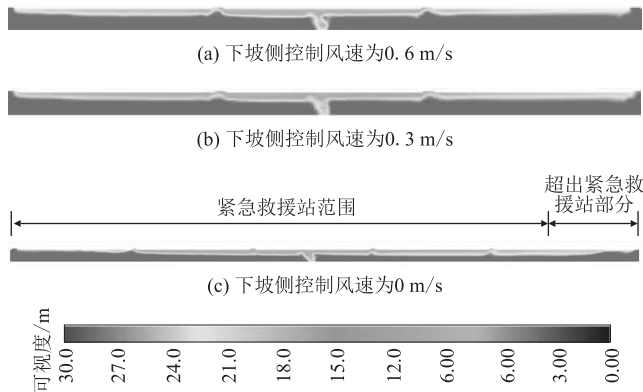


图7 海拔3 000 m不同下坡侧抑制风速时紧急救援站图

由图7可知,下坡侧控制风速降低,紧急救援站内纵向烟气扩散仍集中在拱顶部位,并未下沉至人眼高度处,未对人员正常疏散产生影响。随着下坡侧控制风速逐渐降低,2~5号排烟口“吸穿”现象得到明显缓解。然而,当下坡侧控制风速减小为0时,烟气纵向扩



散长度大幅增加,尤其以沿上坡方向最为严重,烟气已蔓延出紧急救援站外,因此确定下坡侧控制风速不能为0。

由上文可知,横向烟气扩散范围最大出现在8号横通道,因此选取该位置对海拔3000m时在不同下坡侧抑制风速下横向烟气扩散规律进行分析,如图8所示。

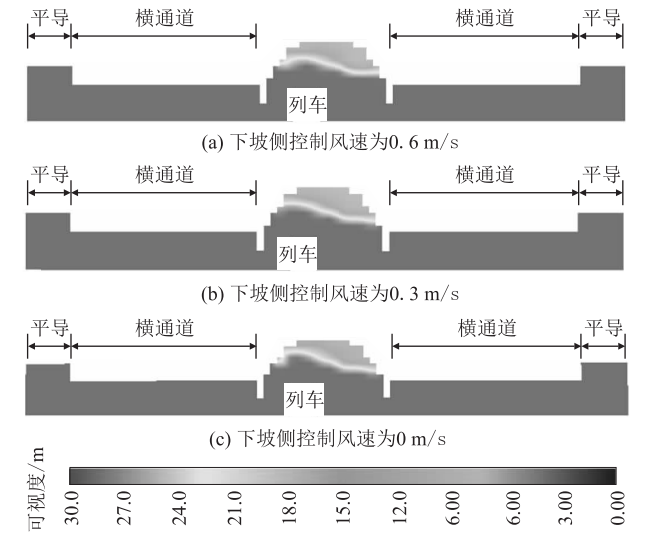


图8 海拔3000m不同下坡侧抑制风速时8#横通道位置处横向烟气扩散云图

由图8可知,不同下坡侧控制风速均可保证烟气不侵入横通道。

综上所述,结合海拔3000m不同下坡侧抑制风速时单洞双线隧道紧急救援站内纵向及横向烟气扩散规律可知,下坡侧抑制风速可按0.3m/s进行设计。

(2)上坡侧抑制风速优化结果  
海拔3000m,下坡侧控制风速为0.3m/s时,将上坡侧控制风速由1.2m/s降低至1m/s,紧急救援站纵向、8号横通道位置处横向烟气扩散模拟结果如图9、图10所示。

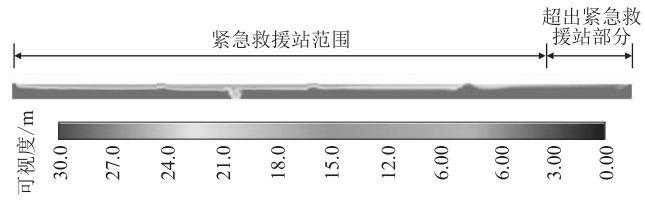


图9 海拔3000m上坡侧、下坡侧控制风速分别为1m/s、0.3m/s时紧急救援站纵向烟气扩散规律图

由图9、图10可知,将上坡侧控制风速减小至1m/s时烟气未蔓延至横通道,“吸穿”现象也得到明显缓解。然而,考虑到火灾烟气不能被控制在紧急救

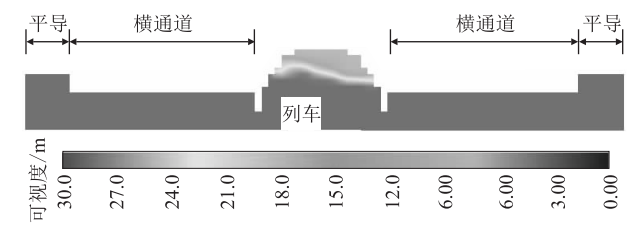


图10 海拔3000m上坡侧、下坡侧控制风速分别为1m/s、0.3m/s时8号横通道位置处横向烟气扩散规律图

援站内,且沿上坡方向烟气扩散距离大幅增加,因此,将不同海拔高度下单洞双线隧道紧急救援站上坡侧控制风速确定为不得小于1.2m/s。

同理,对不同海拔高度的紧急救援站两端火灾通风排烟参数进行分析,可以确定不同海拔高度下,紧急救援站两端抑制烟气流动风速变化对单洞双线隧道紧急救援站内纵向及横向烟气扩散规律影响相近。因此,建议各海拔高度下上坡侧、下坡侧控制风速均分别按1.2m/s、0.3m/s进行设计。

3.3 横通道防护门处风速优化结果

紧急救援站横通道防护门处风速优化研究具体情况如表3所示。

表3 工况设置表				
工况	海拔高度/m	上坡侧抑制风速/(m/s)	下坡侧抑制风速/(m/s)	横通道防护门处风速/(m/s)
1	3000	1.2	1	1
2	4100			
3	5000			

注:不考虑两端抑制烟气流动风速的影响

不同海拔高度下,将横通道防护门处风速由2m/s减弱至1m/s,单洞双线隧道紧急救援站内纵向烟气扩散规律如图11所示,紧急救援站内横向烟气均未侵入横通道。

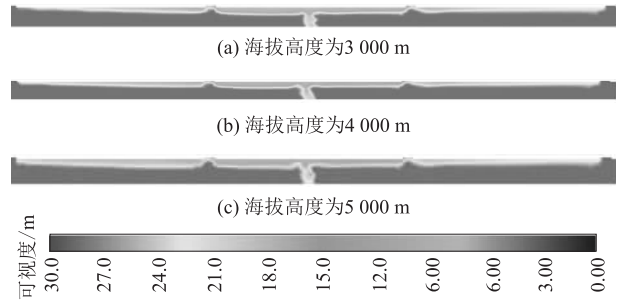


图11 不同海拔高度下降低横通道防护门处风速时紧急救援站纵向烟气扩散规律图

由图11可知,烟气被控制在2~5号排烟口间,“吸穿”现象达到临界条件,即证明不同海拔高度下单洞双线隧道紧急救援站均可将防护门处风速调整

至1 m/s。

基于紧急救援站两端抑制烟气流动风速和横通道防护门处风速优化结果,提出不同海拔高度下均适用的单洞双线隧道紧急救援站火灾通风排烟方案,如表4所示。

表4 火灾通风排烟方案及具体参数表

方案	排烟口面积/m <sup>2</sup>	排烟口半径/m	排烟风速/(m/s)	隧道两侧风速/(m/s)	横通道防护门处风速/(m/s)
方案一	≥22.72	≥2.7	3	1.2/1.2	1
方案二	≥19.04	≥2.5	3	0.3/1.2	2

4 双洞单线铁路隧道紧急救援站火灾通风排烟参数优化

4.1 规范参数适用性

由于各海拔高度下烟气扩散规律基本一致,此处仅以海拔3 000 m进行分析。依据《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》计算得到排烟口面积为17.33 m<sup>2</sup>,约为半径2.4 m圆形面积。

海拔3 000 m时双洞单线隧道紧急救援站内纵向烟气扩散规律如图12所示。

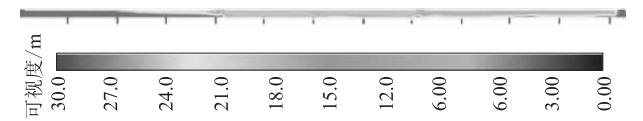


图12 海拔3 000 m时双洞单线隧道紧急救援站纵向烟气扩散云图

由图12可知,依据规范设计通风排烟参数时,火灾烟气被控制在紧急救援站范围内,主要位于2~5号排烟口之间;烟气集中在隧道拱顶处,未降至人眼特征高度处,不影响人员正常疏散。烟气主要由3号和4号排烟口排出,均出现明显“吸穿”现象。

受纵向烟气扩散长度影响,紧急救援站内仅有5~9号横通道位于烟气范围内,因此仅截取上述位置横向烟气扩散规律云图进行分析,如图13所示。

由图13可知,在横通道防火门处设置2 m/s风速可保证火灾烟气不侵入5~9号横通道,其中烟气扩散范围最大的为7号横通道所处位置。

由以上分析可知,依据规范选取的通风排烟参数可使高海拔下双洞单线铁路隧道紧急救援站烟气扩散得到有效控制,且不存在“吸穿”现象。然而,考虑到烟层较厚,可采用减小排烟口尺寸或增加排烟风速的方式进一步提高排烟效率。

4.2 排烟口尺寸及排烟风速优化结果

通过反复试算,在保证排烟量不变的基础上,海

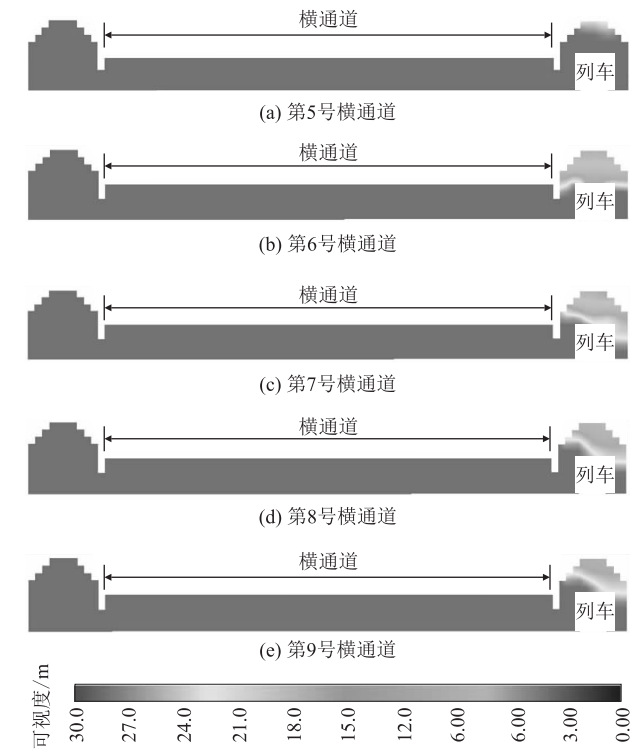


图13 海拔3 000 m时双洞单线隧道紧急救援站横向烟气扩散云图

拔3 000 m时,排烟口面积减小至14.86 m<sup>2</sup>、排烟风速为3.5 m/s时,排烟口附近烟气出现凹陷现象,即到达“吸穿”现象临界状态。因此确定海拔3 000 m时,排烟口面积不小于14.86 m<sup>2</sup>,排烟风速不大于3.5 m/s。

同理,对不同海拔高度隧道排烟口尺寸及排烟风速均试算,可确定不同海拔高度下双洞单线隧道紧急救援站排烟口尺寸及排烟风速建议值,如表5所示。

表5 火灾通风排烟优化参数表

海拔高度/m	排烟口面积/m <sup>2</sup>	排烟口半径/m	排烟风速/(m/s)
3 000	≥14.86	≥2.2	≤3.5
4 000	≥11.55	≥1.9	≤4.5
5 000	≥11.55	≥1.9	≤4.5

5 结论

本文采用数值模拟的方法,结合现有规范,对高海拔单洞双线及双洞单线铁路隧道的紧急救援站通风排烟参数进行了优化研究,得到主要结论如下:

(1)现行规范中关于横通道防护门处风速及紧急救援站两端抑制烟气流动风速的要求,主要适用于双洞单线隧道紧急救援站,应用于单洞双线隧道紧急救援站时会造成排烟量过大,引发“吸穿”现象。

(2)针对单洞双线隧道紧急救援站,从优化紧急救援站两端抑制烟气流动风速及降低横通道防护门处风速两个角度,分别制定了适用于不同海拔高度下的两种通风排烟方案,并给出了紧急救援站两端抑制烟气流动风速、横通道防护门风速、排烟口面积、排烟风速等参数的建议值。

(3)针对双洞单线隧道紧急救援站,仍可采用减小排烟口尺寸、增加排烟风速等方式进一步提高排烟效率,同时提出了不同海拔高度下排烟口面积、排烟风速等参数优化建议值。

参考文献:

[1] 田四明,王伟,杨昌宇,等. 中国铁路隧道40年发展与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1903–1930.  
TIAN Siming, WANG Wei, YANG Changyu, et al. Development and Prospect of Railway Tunnels in China in Recent 40 Years[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1903–1930.

[2] 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 Zhiwei, MA Weibin, HAN Zili, et al. Characteristics of Fire Smoke Spread in High Altitude Railway Tunnel Rescue Station[J]. Railway Engineering, 2021, 61(12): 133–137.

[3] 王明年,崔鹏,郭晓晗,等. 高海拔大纵坡铁路隧道火灾特性数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 1–8.  
WANG Mingnian, CUI Peng, GUO Xiaohan, et al. Numerical Simulation of Fire Characteristics of Railway Tunnels with High-Altitude and Large Longitudinal Slope [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S2): 1–8.

[4] TB 10020–2017 铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范[S].  
TB 10020–2017 Code for Design Rescue Engineering for Disaster Prevention and Evacuation of Railway Tunnel[S].

[5] 蒋尧,周远龙,胡炜,等. 防护门处风速对铁路隧道紧急救援站火灾烟气的影响[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 49–54.  
JIANG Yao, ZHOU Yuanlong, HU Wei, et al. Influence of Wind Speed at Screen Door on Fire Smoke of Railway Tunnel Emergency

Rescue Station[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 49–54.

[6] 纪慧琢. 高海拔特长隧道火灾烟气流动特性的数值模拟分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.  
JI Huizhuo. The Simulation and Analysis of Fire Smoke of Extra Long Tunnel in High Altitude Region [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

[7] YAN Guanfeng, WANG Mingnian, YU Li, et al. Effects of Ambient Pressure on Smoke Movement Patterns in Vertical Shafts in Tunnel Fires with Natural Ventilation Systems [J]. Building Simulation, 2020, 13(4): 931–941.

[8] YAN Guanfeng, WANG Mingnian, YU Li, et al. Effects of Ambient Pressure on the Critical Velocity and Back-Layering Length in Longitudinal Ventilated Tunnel Fire[J]. Indoor and Built Environment, 2020, 29(7): 1017–1027.

[9] YAN Guanfeng, WANG Mingnian, YU Li, et al. Study of Smoke Movement Characteristics in Tunnel Fires in High-Altitude Areas[J]. Fire and Materials, 2020, 44(1): 65–75.

[10] 张念,谭忠盛,毛军,等. 高海拔铁路隧道火灾燃烧特性试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(12): 52–57.  
ZHANG Nian, TAN Zhongsheng, MAO Jun, et al. Experimental Study on Combustion Characteristics of Fire in High-Altitude Railway Tunnels[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(12): 52–57.

[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 Nian, TAN Zhongsheng. 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.

[12] 陈昕,郭晓晗,周振宇,等. 高海拔铁路隧道横通道火灾烟气扩散规律数值模拟[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1): 506–512.  
CHEN Xin, GUO Xiaohan, ZHOU Zhenyu, et al. Numerical Simulation of Fire Smoke Diffusion Law in Cross Passage of High-Altitude Railway Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(S1): 506–512.

[13] MCGRATTAN K B, HOSTIKKA S, FLOYD J E. Fire Dynamics Simulator (Version 5): User's Guide[M]. U. S. Government Printing Office, 2005.