

张建伟,朱祝龙,王川,等.青岛地铁1号线长大地铁区间隧道通风模型研制与实验[J].湖南科技大学学报(自然科学版), 2021,36(4): 40-46. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.006

ZHANG J W, ZHU Z L, WANG C, et al. Experiments and Ventilation Model Scaled to a Long Length and Large Area Interval Tunnel of the Qingdao Metro Line 1[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(4): 40-46. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.006

青岛地铁1号线长大地铁区间 隧道通风模型研制与实验

张建伟¹,朱祝龙^{2*},王川¹,孙山尊¹

(1.青岛地铁集团有限公司,山东 青岛 266000;2.中铁第六勘察设计院集团有限公司 隧道设计分公司,天津 300133)

摘要:为了验证长距离大断面隧道通风系统的可靠性,自主设计了地铁区间隧道通风模型实验系统.该实验系统源自青岛市地铁1号线瓦屋庄站至贵州路站区间隧道,其中,胶州湾下海域段的长度为3.49 km.在长大地铁区间隧道通风排烟实验模型的基础上,进行了2种不同通风机组合及其变频调节实验,完成了通风排烟实验及其数据测定.结果表明:与压入式通风机相比,联合抽出式通风机更有利于排烟,并能形成压抽混合通风机组合及其通风系统.所得结论丰富了长大过海地铁区间隧道通风排烟理论.

关键词:地铁区间;隧道通风;空气流动;模型;实验

中图分类号:U231+.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)04-0040-07

Experiments and Ventilation Model Scaled to a Long Length and Large Area Interval Tunnel of the Qingdao Metro Line 1

ZHANG Jianwei¹, ZHU Zhulong², WANG Chuan¹, SUN Shanzun¹

(1. Qingdao-metro Group Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. Tunnel Design Branch, China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300133, China)

Abstract: In order to verify the reliability of the ventilation system of long-distance and large cross-section tunnel, the ventilation model experiment system of metro section tunnel was designed independently. The experimental system was originated from the tunnel between Wawuzhuang station and Guizhou Road Station of Qingdao Metro Line 1, in which the length of the under sea area of Jiaozhou Bay was 3.49 km. On the experimental model of ventilation and smoke extraction in long and large metro tunnel, two different fan combinations and their frequency adjustment were carried out, and the ventilation and smoke extraction experiment and data measurement were completed. The results show that, compared with the pressed in type, the combined extraction type fan is more conducive to smoke exhaust, forming a pressure extraction mixed fan combination and its ventilation system. The conclusion enriches the theory of ventilation and smoke extraction of long and large cross sea metro tunnel.

Keywords: metro interval; tunnel ventilation; air flowing; model; experiment

收稿日期:2021-04-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51864014)

*通信作者,E-mail:50609846@qq.com

伴随着地下空间的开发利用,方便快捷的地下交通工具相继出现.地下交通工具在给人们的生活带来便捷的同时,也使通风安全技术领域面临更多的挑战.绝大多数地铁车站及其区间属于特殊形式的隧道工程,具有相对封闭、受限的空间和狭长形状.这类狭长受限地下空间的内部发生通风灾变时,必须借助机械通风力,实现合理有效的污染物控制、组织和排除,制造提供乘客安全逃生的地下空间环境,确保司乘人员的生命安全.

围绕上述难题中的隧道内部空气流动机制机理,国内外学者采用数值模拟、工程类比和模型实验等手段开展相关研究.与数值模拟和工程类比相比,模型实验具有可靠性高、重复性高和直观性强的优点,是非常重要的研究手段,也是突破现有理论难题的重要途径.应用量纲分析手段,姜学鹏^[1]推导出了横通道临界风速与隧道纵向风速、火灾热释放率、横通道防火门的高度及宽度、横通道与隧道之间夹角的无量纲函数关系式;Xu等^[2]通过FDS软件模拟隧道真实环境,研究气流对烟气扩散及温度的影响;王洪德等^[3]利用Fluent软件模拟隧道火灾,得出不同通风方式会影响烟气蔓延范围、温度及有毒物质分布;翟毅^[4]总结归纳了不同工况下的隧道通风排烟运行模式,为地铁隧道火灾人员的疏散提供参考依据;何明星等^[5]建立了公路隧道实验模型,进行隧道火灾模型实验,以数值模拟手段得出了顶棚最高温度公式;蒋军成等^[6]采用数值模拟方法对地铁隧道电缆阴燃进行研究,得出最佳送风风速以确保人员疏散的安全;Li等^[7]通过分析隧道壁面的粗糙度、风速、隧道尺寸以及空气与隧道壁面温差4因素对热压的影响,提出了一种计算倾斜地下隧道热压力的简化方法来研究地铁长大区间隧道的火灾烟控模式;李建^[8]设置了7种通风机启动方案,获得了不同通风机启动方案情况下的排烟效果.

以通风机匹配为主线,围绕活塞风井、活塞风道、列车阻塞阻力、通风方式和射流通风机优化等,学者们分析了不同结构、不同工况、不同组合方式对通风机匹配、系统效率和运行节能的影响^[9-14].在模型实验研究方面,刘科麟^[15]进行了几何比为1:50的模型试验,研究了列车在隧道中行驶时引起的救援站风流速度场变化,并部分量化了影响风流速度场的因素;Zhou等^[16]构建了模型比例为1:20的铁路隧道而开展实验,并结合数值模拟,确定了横向通道的临界速度与火源位置和放热率之间的依赖关系;安健等^[17]针对地铁长区间隧道中着火列车停在中间竖井处的火灾情况,搭建1:10的隧道模型开展实验,找到了最节能的排烟模式.在模型实验研究中,针对长大地铁区间隧道通风安全方面的较大比例实验平台及其实验研究仍处于报道鲜见或者流场测定不全面的现状,亟待开展此方面的工作,以期完善长大隧道通风理论及其节能方法.

基于此,依托青岛市地铁1号线瓦屋庄站至贵州路站长大区间隧道的工程实际,阐述长大地铁区间通风实验模型系统的设计研究、开发和制作,确定模型长度、比例尺和配置动力源搭建实验系统,实施通风机变频调节,开展多工况实验,实测数据,量化变频频率数值与通风机组合、通风机功率消耗、隧道内行车道风速演变之间的关系,验证系统的有效性,丰富长大地铁区间隧道的通风安全、节能高效和参数匹配之间的流体动力学理论.

1 工程概况与原型

1.1 地铁区间隧道

青岛市地铁1号线瓦屋庄站至贵州路站区间,起自黄岛区的瓦屋庄站,沿既有胶州湾隧道东侧,向北下穿胶州湾湾口海域后,接入青岛主城区的贵州路站.该区间隧道全长约8.1 km,其中,海域段长度约3.49 km,主隧道段横断面的宽度和高度依次为10.200和13.005 m,属于长距离大断面地铁区间隧道.长大地铁区间隧道工程如图1所示.

1.2 隧道区间通风

为满足正常运营通风及防灾通风的相关要求^[18],本区间隧道通风系统共设置3处区间风井.其中,1[#]风井设置2台设计风量为80 m³/s的可逆转轴流通风机,2[#]风井设置3台设计风量为60 m³/s的可逆转轴流通风机,3[#]风井设置2台设计风量为80 m³/s的可逆转轴流通风机和1台设计风量为60 m³/s的可逆转轴流通风机.2[#]风井和3[#]风井各设置1台设计风量为60 m³/s的可逆转轴流通风机与海域段吊顶排烟道相

接,其中,该吊顶专用排烟道的面积为 10 m².



图1 长大地铁区间隧道工程

2 模型实验系统及其参数

2.1 相似比例及其确定

为了提高模型实验的准确度和结果的可靠性,并兼顾青岛地铁1号线瓦屋庄站到贵州路站区间的隧道通风特性和相似条件的要求,在模型实验系统的设计中,遵循了以下原则确定比例数:

- 1) 根据实际隧道的基本特征和有压均匀流动的基本条件,决定模型实验规模.
- 2) 根据等效增压效应,近似处理地下通风机房中的轴流通风机、隧道内的射流通风机、汽车的活塞作用以及自然风力,采用轴流通风机变频调节实现动力相似.
- 3) 模型试验运动相似,就是使速度比尺为 1 : 1,这样就可通过控制运动的相似而实现动力的相似,结合雷诺准则、尼古拉兹粗糙区自模理论、模型材料、设备能力和测试方法,确定模型的线性比尺为 1 : 10,面积比尺为 1 : 100,压力比尺为 1 : 1.

搭建完成的模型实验系统如图2所示,隧道模型截面尺寸如图3所示.隧道模型全长 20 m,选用有机玻璃板作为隧道通风模型的维护结构材料.

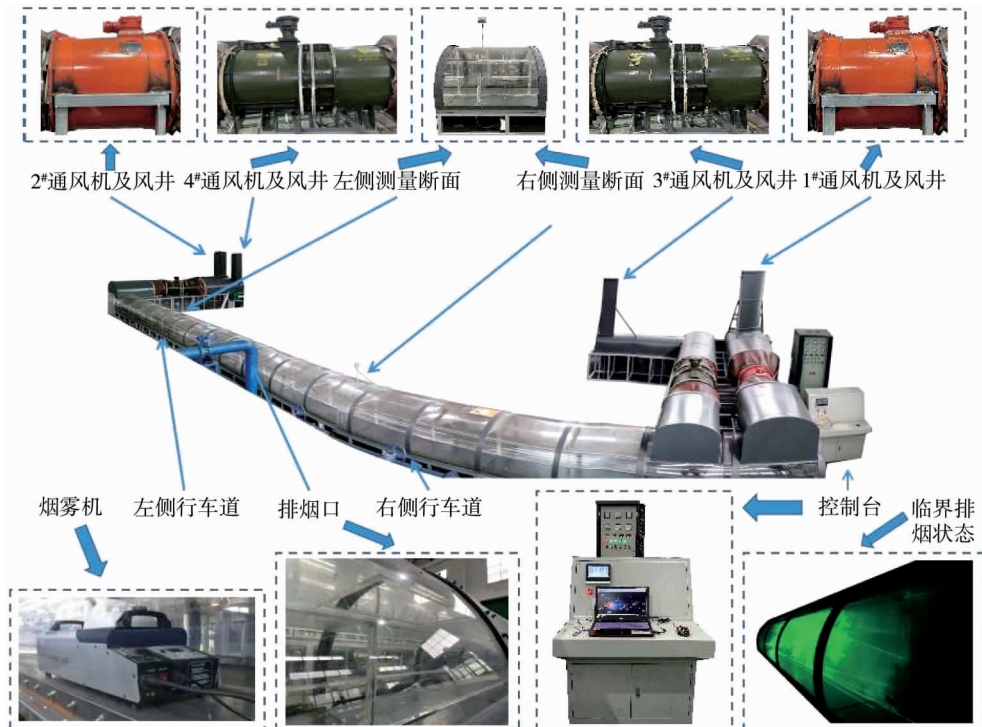


图2 模型实验系统

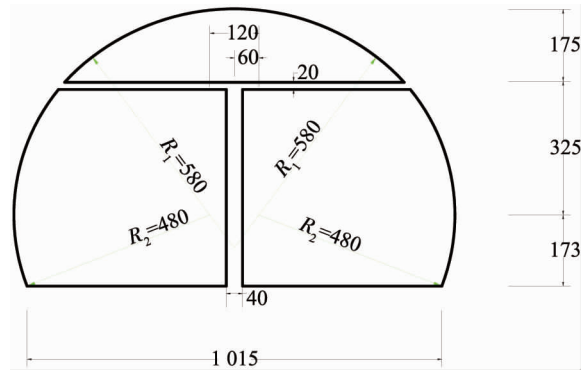


图3 隧道模型截面尺寸(单位:mm)

2.2 系统概况与主要参数

地铁长大区间隧道的通风模型实验系统主要由模型主体、动力装置、传感变送和数据线缆构成。

2.2.1 动力系统

实验系统共使用了4台防爆式通风机,其中,额定功率为5.5 kW的抽出式轴流局部通风机2台,额定功率为11 kW的压入式轴流局部通风机2台.压入式轴流通风机布置于模型入口端,直接与行车道相连,作为隧道风流流动的动力源.抽出式轴流通风机与排烟道相连,能排出排烟道内的烟气。

2.2.2 流动路线

通过“1#通风机及风井”和“2#通风机及风井”的干净空气流,流入右侧行车道与左侧行车道.其中,在左侧行车道释放烟气,进而形成烟气流;该烟气流与来自右侧行车道的气流相汇于吊顶排烟口周边,形成二次烟气流;该二次烟气流流经吊顶排烟口而转折流入右边排烟道和(或)左边排烟道;最终,通过“3#通风机及风井”(直连右边排烟道)和“4#通风机及风井”(直连左边排烟道),上述二次烟气流排至隧道外。

2.2.3 测试系统

测试系统主要由进口压力传感变送器、高精度速度传感变送器、线缆和数据采集记录等子部分组成。

3 实验数据与讨论

3.1 通风机组合与变频数值

为研究通风机运行参数对行车道风速的影响,进行2种通风组合排烟实验,分别为组合1与组合2.排烟状态如图4所示。

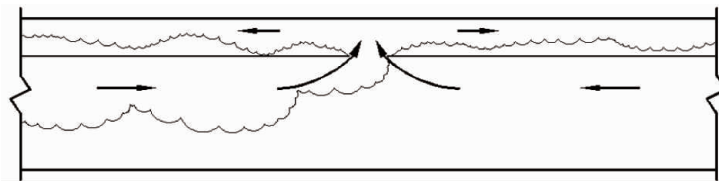


图4 排烟状态

组合1启动1#,2#通风机,组合2启动1#,2#,3#与4#通风机.组合内部通风机之间的运行参数确定的依据为临界排烟状态,具体为在排烟口左侧行车道即2#通风机端释放冷烟后,启动1#,2#通风机后观察烟雾在排烟口下方的状态,左右气流对向流动,如图4所示.若气流正好能将烟气排入排烟口而不向排烟口右侧下游行车道蔓延,则称其为临界排烟状态.通过不断调试1#,2#通风机的频率值发现:当1#通风机频率值为6.4 Hz,2#通风机频率值为7.8 Hz时实现临界排烟状态,则将其确定为组合1的第1组工况.组合1每完成1组实验就将2#通风机的频率值调高1 Hz,1#通风机则观察烟气状态调整,直至其达到临界排烟状态。

对于组合2而言,将1#,2#,3#,4#通风机的频率值分别调整为6.4, 7.8, 6.4, 6.4 Hz时能实现临界排烟状态,则将其设为组合2的第1组工况.每完成1组实验后将3#,4#通风机的频率值上调1 Hz即可.观察隧

道内的烟气流动状态,并同步采集实测数据,继而分析4台通风机的运行参数,得到通风机变频调节频率值统计数据如表1和表2所示.

表1 组合1通风机频率数值统计

组数	1 [#] 通风机频率/Hz	2 [#] 通风机频率/Hz	组数	1 [#] 通风机频率/Hz	2 [#] 通风机频率/Hz
1	6.4	7.8	7	10.8	13.8
2	6.9	8.8	8	12.1	14.8
3	7.5	9.8	9	12.4	15.8
4	8.5	10.8	10	13.0	16.8
5	9.1	11.8	11	14.0	17.8
6	10.1	12.8			

表2 组合2通风机频率数值统计

组数	3 [#] 通风机频率/Hz	4 [#] 通风机频率/Hz	组数	3 [#] 通风机频率/Hz	4 [#] 通风机频率/Hz
1	6.4	6.4	7	12.4	12.4
2	7.4	7.4	8	13.4	13.4
3	8.4	8.4	9	14.4	14.4
4	9.4	9.4	10	15.4	15.4
5	10.4	10.4	11	16.4	16.4
6	11.4	11.4			

根据表1和表2的实测数据可以得出:(1)影响临界排烟状态的主要动力源是1[#],2[#]通风机;(2)在临界排烟状态下,维持1[#],2[#]通风机的运行参数不变,等比例增加3[#],4[#]通风机的变频频率数值,不改变临界排烟状态;(3)增加3[#],4[#]通风机的变频频率数值,应当会影响隧道的风速分布,甚至会影响通风机的功率消耗.

3.2 通风机功率消耗

组合1中所对应2台通风机随着频率值变化,其通风机的功率对比如图5所示.组合2在临界排烟状态下,逐步增加3[#],4[#]通风机的频率值,组合2中的4台通风机所对应的功率消耗变化如图6所示.

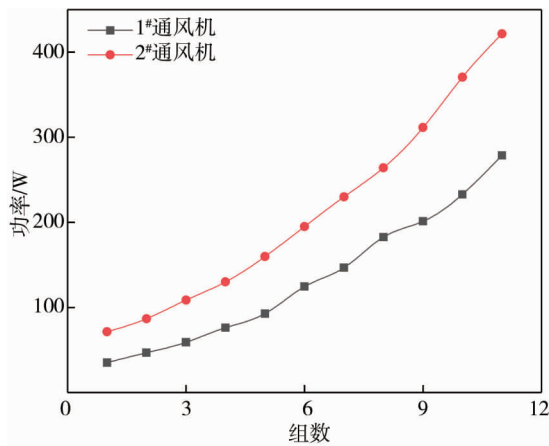


图5 组合1通风机功率对比

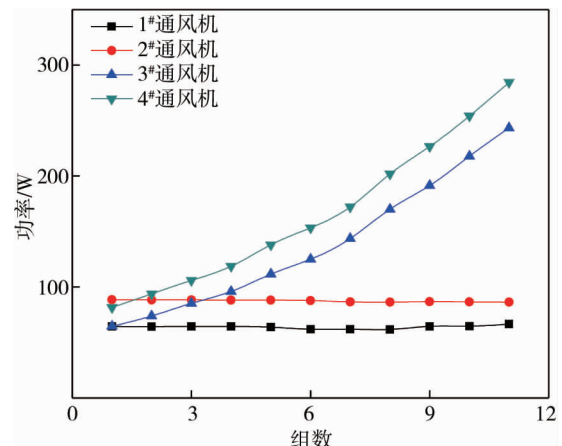


图6 组合2通风机功率对比

1[#]通风机的频率值是基于实验现象中的烟雾状态调整的,因此数值规律性不显著.由图5可知:其功率值的增长幅度有变化,当1[#]通风机频率值的增长幅度变大时,2[#]通风机功率值的增长幅度则减小;当1[#]通风机频率值的增长幅度减小时,2[#]通风机功率值的增长幅度则增大.而2[#]通风机的频率值保持每组实验增大1 Hz,所以并不应出现增长幅度忽大忽小的现象,因此,可以确定1[#]通风机的状态会对2[#]通风机的功率值造成影响.

由图6可知:虽然1[#],2[#]通风机的频率数值维持不变,但是,这2台通风机的功率消耗却受到3[#],4[#]通

风机输入的变频频率数值的影响,产生一些小幅度的波动.此外,虽然3[#],4[#]通风机的输入频率数值保持了同步增长,但是,二者的功率消耗却没有保持完全同步的变化,进一步注意到,随着输入频率数值的增加,二者的差值呈现逐渐增大的趋势,这表明4台通风机之间的运行仍存在互相扰动.

3.3 行车道断面风速

在临界排烟状态下,组合1、组合2通风机的联合运行所形成隧道内部行车道断面风速及其随组合参数的变化如图7和图8所示.

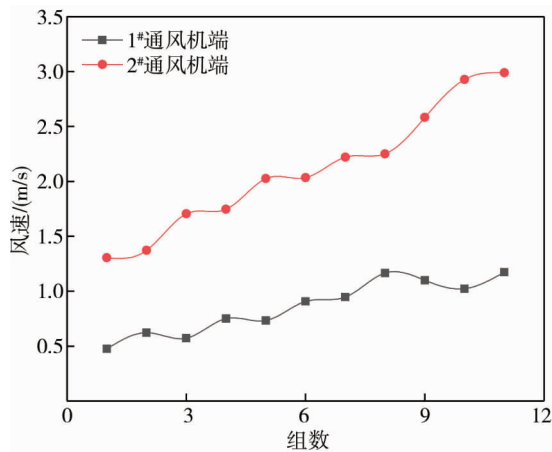


图7 组合1行车道断面风速变化

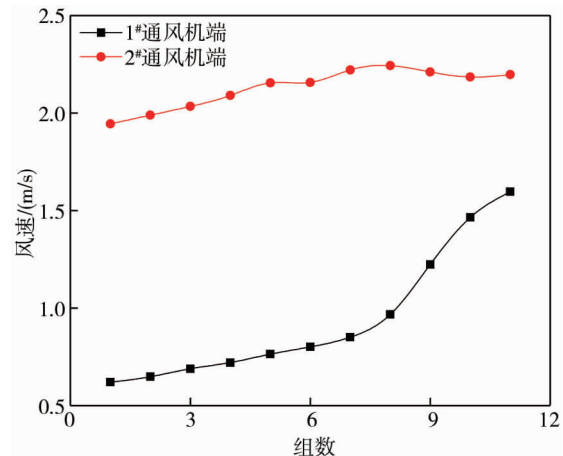


图8 组合2行车道断面风速变化

由图7可知:排烟口两端的风速均呈增长趋势,但其曲线保持一定的波动幅度.此过程正如两股气流在排烟口下方进行“推拉”,1[#]通风机端的增长幅度大,则2[#]通风机端的增长幅度小,甚至出现风速负增长.这也正对应图5中1[#],2[#]通风机的功率变化,说明通风机的功率受到通风排烟系统中阻力变化的影响.

由图8可知:随着3[#],4[#]通风机频率的上调,排烟口两端行车道风速都在持续增长,但是,第7组及其之后,在2[#]通风机端的隧道行车道上,断面平均风速开始下降,同时,在1[#]通风机端,断面平均风速的上升趋势剧增.2[#]通风机端行车道断面风速下降后,1[#]通风机端风速剧增的动力学致因主要有(1)3[#],4[#]通风机的联合作用,克服了行车道中的通风阻力;(2)联合作用增强了从1[#]通风机及风井的空气吸入,流经行车道,再经排烟道,最终排至隧道外环境;(3)上述联合等效于降低了1[#]通风机及风井的阻力,降低了1[#]通风机的功率消耗,解释了图6中的1[#]通风机的功率消耗随着组数增加而略微降低的原因.

对比组合1与组合2排烟口两端风速的变化可知:调整1[#],2[#]通风机是增大行车道风速最直接的方式,原因为1[#],2[#]通风机的额定功率大,且直接与行车道相连,但开启3[#],4[#]抽出式通风机后,1[#]通风机端的风速提升明显,有利于阻挡烟气向排烟口右侧蔓延,且组合2将烟气吸入排烟口使得其气流组织更有序,而不是简单的气流碰撞阻挡烟气后流入排烟口.

4 结论

1) 围绕青岛地铁1号线瓦屋庄站与贵州路站之间的隧道通风安全可靠进行验证,研制了长大地铁区间隧道通风模型实验系统.

2) 通过实验实测,界定了临界排烟状态,量化了通风机之间的参数组合,组合参数既影响本机的功率消耗,也会影响烟源上游端和烟源下游端的断面风速.

3) 对比2种通风机组合,联合开启抽出式通风机构成的压抽组合通风系统的排烟可靠性更高,人员疏散的安全裕度更大.

参考文献:

- [2] Xu Z S, 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*, 2017,49:155-161.
- [3] 王洪德,林琳,赵轶.地铁隧道火灾事故通风方式数值模拟[J].*辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2010,29(2):177-181.
- [4] 翟毅.地铁隧道通风排烟系统构成及火灾工况运行模式[J].*建筑科学*, 2010,26(11):36-38.
- [5] 何明星,张宏涛.不同排烟方式隧道火灾烟气分布规律研究[J].*现代隧道技术*, 2018,55(s2):627-632.
- [6] 吴凡,蒋军成,周汝,等.地铁隧道电缆阴燃时优化通风的数值模拟[J].*工业安全与环保*, 2017,43(1):51-55.
- [7] Li A, Gao X, Ren T. Study on thermal pressure in a sloping underground tunnel under natural ventilation[J]. *Energy and Buildings*, 2017,147:200-209.
- [8] 李建.地铁长大区间隧道火灾风机启动方案数值模拟研究[J].*中国安全生产科学技术*, 2017,13(9):139-143.
- [9] 冯腾.地铁隧道通风排烟风机匹配问题的研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [10] Meng N, Liu X M, Li X, et al. Effect of blockage ratio on backlayering length of thermal smoke flow in a longitudinally ventilated tunnel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018,132:1-7.
- [11] 陈超,严乐,潘嵩,等.基于活塞效应的地铁隧道风井设置优化方法[J].*中国铁道科学*, 2015,36(6):70-77.
- [12] Huang Y, Li C, Kim C. A numerical analysis of the ventilation performance for different ventilation strategies in a subway tunnel[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2012,24(2):193-201.
- [13] Juraeva M, Ryu K J, Jeong S, et al. Effect of guide vanes on recovering uniform flow in a ventilation duct in an existing twin-track subway tunnel[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015,29(1):251-258.
- [14] Betta V, Cascetta F, Musto M, et al. Numerical study of the optimization of the pitch angle of an alternative jet fan in a longitudinal tunnel ventilation system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009,24(2):164-172.
- [15] 刘科麟.考虑活塞风作用下铁路隧道救援站火灾烟气控制试验研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [16] Zhou Y, Bi H, Wang H, et al. Critical velocity in the transverse passages of a railway tunnel rescue station with semi-transverse ventilation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019,92:103064.
- [17] 安健,朱常琳.地铁长大区间隧道排烟模式节能性分析[J].*四川建筑科学研究*, 2015,41(3):192-196.
- [18] 中国铁路经济规划研究院.铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范:TB 10020—2017[S].2017.