

# 超长公路隧道斜井及正洞通风方案优化研究

杨磐石<sup>1</sup>, 刘畅<sup>2</sup>, 罗刚<sup>2</sup>

(1. 中交二公局第三工程有限公司, 陕西 西安 710016; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为解决独头压入式通风不能满足超长隧道施工通风需求的难题。以秦岭天台山隧道为依托工程,通过三维非稳态  $k-\epsilon$  双方程模型进行数值模拟。对比分析独头压入式、风机接力式、风仓接力式 3 种通风方案的优劣,并通过现场实测数据验证了模拟结果的正确性,讨论不同通风方式的通风效率和经济效益。结果表明:① 风机接力式通风效率最佳,洞内排污能力好,风仓接力式次之,独头压入式最差;② 风机接力式的经济效益最佳,成本投入低,独头压入式次之,风仓接力式经济投入最高;③ 风机接力式的设备损耗及维修养护费用最低,独头压入式次之,风仓接力式由于设备投入大,维修养护费用最高。

**关键词:** 超长隧道; 双斜井; 独头压入式; 风机接力式; 风仓接力式

## 1 前言

长大隧道作为高速公路的控制性地下空间结构物,通风问题是影响其施工的一个重大难题。目前隧道施工中的常用通风方式是独头压入式,但这种通风方式随着掘进距离的增加,通风效果逐渐变差,养护维修费用逐渐增高,因此对于长大隧道施工通风方案的优化研究成为了工程中亟待解决的问题。

中国学者对特长隧道的施工通风优化进行了一定研究,韩现民<sup>[1]</sup>等提出了分隔斜井与正洞风管联合通风优化方案,解决了关角隧道长距离施工通风难题;翟志恒<sup>[2]</sup>以安琶特长隧道施工通风为实例,检验了射流巷道式通风的应用效果;罗燕平<sup>[3]</sup>等对金家庄特长螺旋隧道施工通风方案进行优化分析,提出了风仓式通风方案;张云龙<sup>[4]</sup>等提出了瓦斯特长隧道的风管最佳布置方案;张恒<sup>[5]</sup>等通过数值模拟和现场监测,优化了瓦斯隧道现场施工通风方案;王明年<sup>[6]</sup>等通过理论研究,确定了郑万线隧道机械化快速施工的通风时间;雷帅<sup>[7]</sup>等对南大梁高速公路华莹山隧道施工通风方案进行了优化研究;李明<sup>[8]</sup>等对雪山梁隧道独头压入式通风方案进行了验证;宋旭彪<sup>[9]</sup>通过实测数据证明了压出式空气幕通风技术的优越性;王帅帅<sup>[10]</sup>等以圭嘎拉隧道为研究对象,对比分析了独头压入式通风方案和巷道式通风方案;谭信荣<sup>[11]</sup>等基于洞内空气质量现场

测试数据分析结果,提出了隧道内干式除尘机与压入式通风、巷道式通风相结合的通风措施;李勇<sup>[12]</sup>等采用压入式、抽排混合式和大风机接力式通风技术,克服了长距离独头通风和多工作面通风的难题;古尊勇<sup>[13]</sup>等对高原地区特长隧道施工通风技术进行了补充和优化;王应权<sup>[14]</sup>采用理论分析与数值模拟,对长大铁路隧道施工通风方案进行了选择及改进。上述学者对于隧道施工通风方案的研究,大多针对单一的通风方式,而对于几种通风方案的对比研究较少,该在前人研究的基础上,结合工程实例,对独头压入式、风仓接力式、风机接力式 3 种通风方案的研究进行补充。

以秦岭天台山隧道为依托,采用 Gambit 进行建模,流体力学软件 Fluent 计算,分别从技术、经济、维修养护等方面对 3 种通风方案进行分析,确定隧道施工的最佳通风方式,为天台山超长隧道施工通风提供技术指导,亦可为其他同类工程参考。

## 2 工程概况

宝鸡至坪坎高速公路(G85)秦岭天台山隧道长 15.56 km,设计为双向六车道,其建设规模目前居世界第一,采用纵向集中送排式通风方式,设置 2 斜井 1 竖井。其中 1 号斜井工区,布置主副斜井各 1 个,承担了主洞 3 185 m 的施工任务,如图 1 所示。

隧道施工通风分为两阶段,第一阶段采用独头压



图 1 秦岭天台山隧道示意图

入式通风,如图 2 所示,但随着隧道的掘进,洞内通风效果降低,空气环境变差,污染物浓度增加,因此需要对通风方案进行优化,拟比选的第二阶段施工通

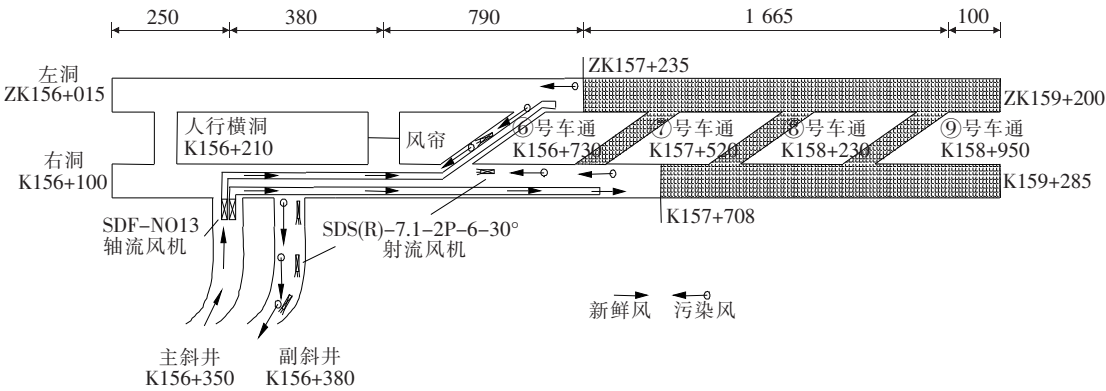


图 2 第一阶段施工通风方案(单位:m)

表 1 风机参数

位置	类型及型号	台数/台	功率/kW	风机直径/m	风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
K156+350	SDF-NO13	2	$2 \times 132$	1.3	27
K156+660	SDF-NO12.5	2	$2 \times 110$	12.5	26
K156+380	SDS(R)-7.1-2P-6-30°	3	$2 \times 37$	0.7	40
K157+520	SDS(R)-7.1-2P-6-30°	2	$2 \times 37$	0.7	40

3.2 边界条件

根据隧道实际情况,主斜井风流进口定义为压力式进口(Pressure-inlet),副斜井风流出口定义为压力式出口(Pressure-outlet),相对大气压强进行设置,数值为 0 Pa;射流风机和风管进出口均设置为速度进口(Velocity-inlet),数值参照表 1,以正负号区分流进和流出;隧道壁面、风管周壁定义为固壁边界条件(Wall),摩擦系数分别设置为 0.015<sup>[15]</sup>和 0.009。

3.3 计算结果验证

为了验证数值模拟结果的准确性,将现场实测风

风方案如图 3 所示。各型号风机参数如表 1 所列。

3 通风数值模拟

3.1 数值模型与计算方法

隧道及车行横通道的断面尺寸如图 4 所示;利用 Gambit 建立隧道网格模型,其中网格节点 483.3 万个,单元 2 588.7 万个,类型为四面体 Tet 网格,平均尺寸为 1 m,局部区域网格加密至 0.5 m,隧道局部区域网格建模如图 5 所示。此次计算采用有限体积法对控制方程进行离散;湍流模型采用三维非稳态  $k-\epsilon$  双方程紊流模型;压力-速度耦合计算方法采用 SIMPLE 算法。

速与数值模拟风速进行对比。首先根据现场掘进尺寸建模,提取出现场实测对应位置的断面风速,因为在隧洞内除了风管出口风速变化较大外,其余位置风速几乎没有变化,因此只提取掌子面前方 900 m 范围的风速进行对比,结果如图 6 所示。

由于现场实测情况的复杂性,导致图中风速对比存在偏差,测量仪器操作不当,风管漏风以及风速测量仪器读数不稳等问题是导致以上偏差的直接原因,但实测风速与模拟风速数值接近,可以认为数值模拟结果接近现场实测情况,数值模拟数据是可靠的。

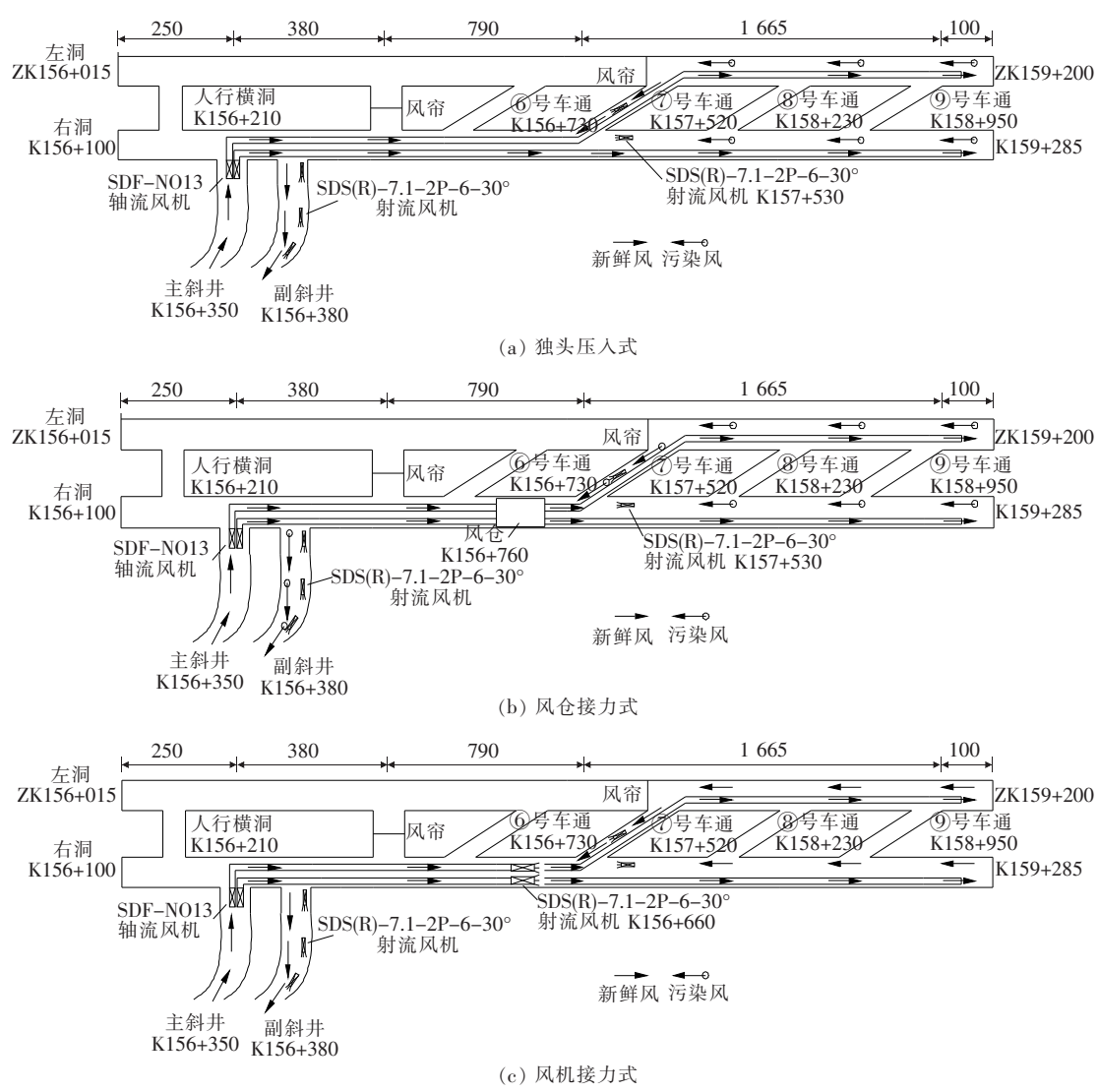


图3 第二阶段3种通风方案(单位:m)

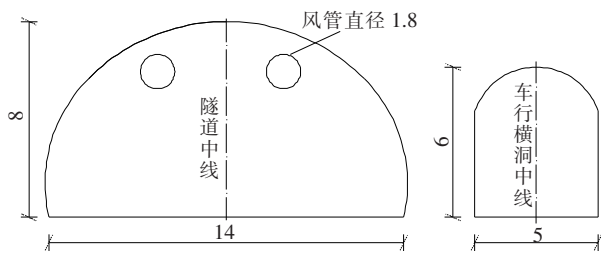


图4 隧道断面图(单位:m)

4 结果分析

4.1 掌子面附近风速计算

掌子面前方 100 m 作为开挖和二衬施工的主要场所,其空气质量直接影响隧道施工进度以及施工人员的身体健康。隧道常常通过改变掌子面的风速,加

快污染空气排出,以此来提高通风效果。掌子面附近通风效果对比如图 7 所示。

由图 7 可知:掌子面前方 50 m 范围内,风机接力式通风方式的风速最大,空气置换速度快,掌子面污染物浓度低,通风效果最佳。独头压入式通风左洞由于通风距离过长,考虑到管壁摩擦带来的沿程损失,导致掌子面风速较小。到 50 m 之后,3 种通风方式的风速变化趋势相当,但仍可以看出风机接力式的通风效果较好。左右洞的风速变化云图如图 8、9 所示。

4.2 隧道全程风速分析

参照 JTG F60—2009《公路隧道施工技术规范》<sup>[16]</sup>,隧道全断面开挖时,风速不应小于 0.15 m/s,导洞内风速不应低于 0.25 m/s,但均不应大于 6 m/s。左右洞隧道全程风速如图 10 所示。

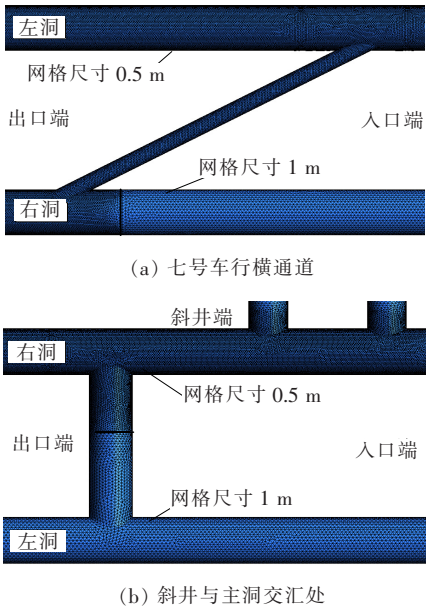


图 5 有限元模型图

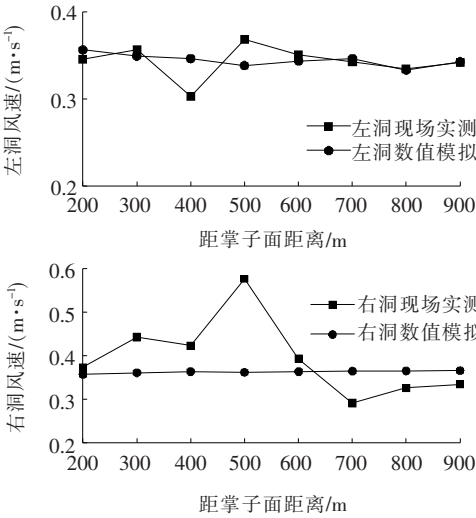


图 6 数值模拟与现场实测风速对比

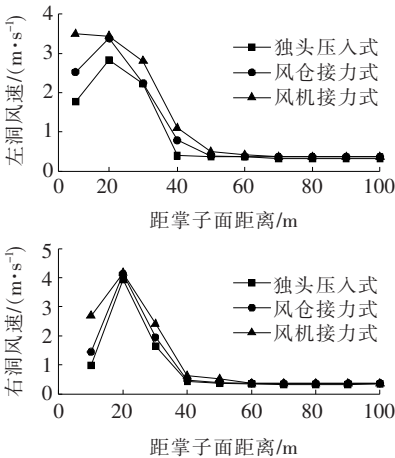


图 7 左右洞掌子面前方风速对比图

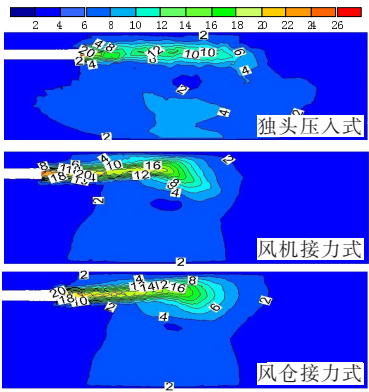


图 8 右洞风速云图(单位:  $\text{m}/\text{s}$ )

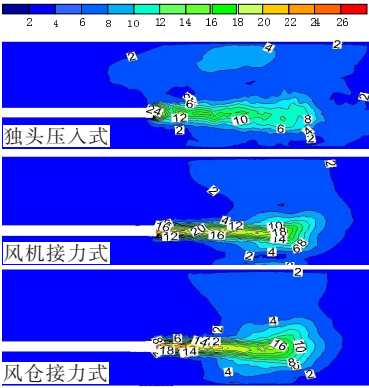


图 9 左洞风速云图(单位:  $\text{m}/\text{s}$ )

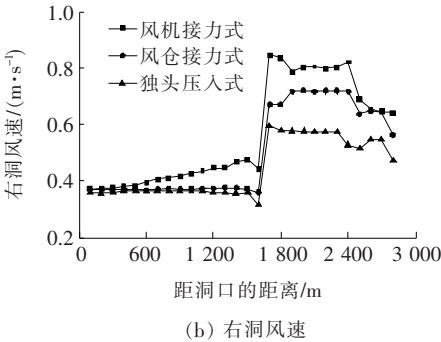
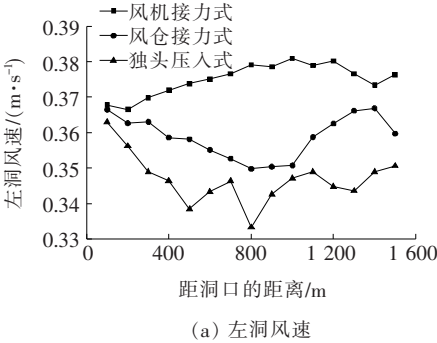


图 10 左右洞隧道全程风速图

由图 10 可得:左右洞全程风速均大于规范要求最低风速。风机接力式通风方式的全程平均风速较大,



风仓接力式次之,独头压入式最低。在七号横通道回风口处,左洞污染风通过横通道进入右洞,导致右洞风量增加,风速加大,且趋势明显,经过回风口,风机接力式通风方式的风速较大,污染物排放较好,排污效果最佳。

4.3 局部风速分析

七号车行横通道作为左洞与右洞的连接,是左洞污染物到右洞的主要通道,为加快隧道内空气的流动,在车行横通道内和主洞内均放置了一台 37 kW 的射流风机。因此,流经此处断面的平均风速增大,且增长速度较大,隧道通风量为左洞和右洞之和,经过回风口之后,速度迅速降低,恢复到之前的水平(图 11、12)。

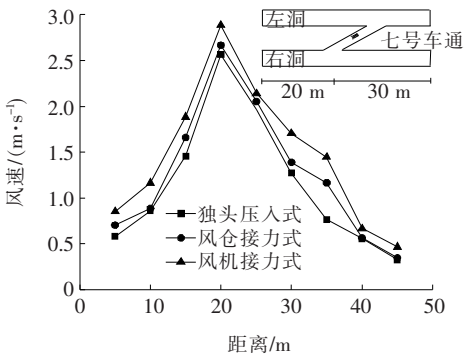


图 11 右洞与七号车通交汇点风速图

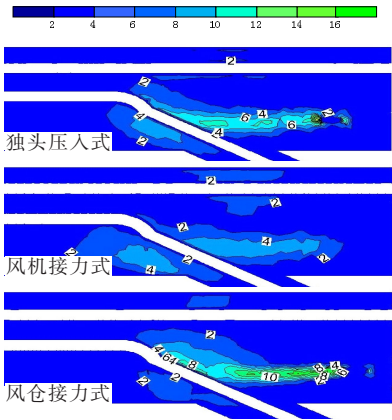


图 12 七号车通局部风速云图(单位:m/s)

由图 11、12 可以看出:风机接力式通风方式的通风效果较好。

在右洞与斜井交汇处,自然风流从主斜井进入主洞,遭遇副斜井回流污风的影响,风速显著降低,后经副斜井内射流风机的增压作用,风速增加,风机接力式增加后的风速最大,因此效果最佳(图 13)。

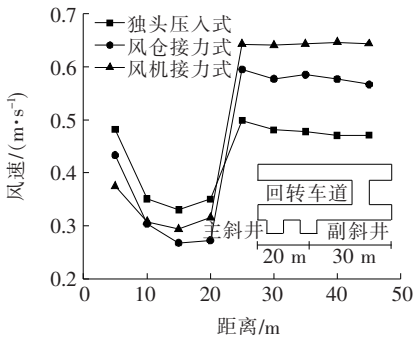


图 13 右洞与斜井交汇处风速图

综上所述,对于该隧道的施工通风方式,风机接力式通风方式的通风效果最佳,隧道全长的风速都达到较高水平。

5 经济性对比

通风方式的经济性对比主要考虑一次性固定设备投入和后期养护维修费用,其中一次性投入主要包括风机和风管购买费用和其他材料,其他材料主要指铁皮、钢架等;维修养护费用包括电费和维修费用。

设备维修养护费用的影响因素主要有通风效率、工期、设备数量等,由于独头压入式通风效果差,风机工作时间长,设备耗损率大,维修养护费用较高,耗电量也高;风机接力式恰恰相反,良好的通风效果能够缩短施工通风时间,减少设备损耗和用电量,提高施工效率,缩短工期。3 种方案经济性对比如表 2 所示。

风仓接力式所需设备较多,给隧道施工通风带来的增益不大,且风仓的安装施工过程繁琐,设备维修养

表 2 通风方案经济性对比

通风方案	固定设备投入/万元			维修养护/万元		总计/ 万元
	风机费用	风管费用	其他材料	电费	维修	
独头压入式	24.65	21.6	无	218.8	40.0	305.05
风机接力式	36.05	21.6	无	185.4	12.0	255.05
风仓接力式	36.05	21.6	15.3	216.4	16.2	305.55

护费用较高;独头压入式固定设备投入较少,安装简单,但风机工作时长,电费和维修费用较高;风机接力式通风效果最佳,能有效提高隧道施工效率,减少设备维修养护投入,是经济性最好的通风方式。

## 6 结论

(1) 通过通风效果的对比,风机接力式的通风效果最好,洞内风速大,排污能力强,能够较好地调节洞内空气环境,提高空气质量,风仓接力式居中,独头压入式最差。

(2) 通风效果的提升能够良好地改善隧道洞内环境,并能加快隧道施工进度,以此来减少整个施工过程的成本投入。风机接力式的成本投入最少,风仓接力式和独头压入式相差不大。

(3) 风仓在安装过程中,需要耗费大量的钢材,且后期设备损耗快,维修及养护费用高;独头压入式的通风距离长,设备负荷大,风机损耗快,风管和风机维修频繁;风机接力式缩短了通风距离,减少了设备负荷,维修养护费用较前两种通风方式低。

### 参考文献:

- [1] 韩现民,孙明磊,朱永全.隔板与风管联合通风技术在特长高原隧道施工中的应用[J].现代隧道技术,2016,53(5):208—215.
- [2] 翟志恒.安琶特长隧道施工通风技术[J].隧道建设,2015,35(S2):127—130.
- [3] 罗燕平,韩景科,文展,等.金家庄特长螺旋隧道施工通风方案优化分析[J].隧道建设(中英文),2019,39(A1):385—391.
- [4] 张云龙,郭春,徐建峰,等.风管布置方式对瓦斯隧道施工通风效果影响研究[J].西南公路,2016(4):46—50.
- [5] 张恒,吴瑾,陈寿根,等.风机布置方式对高瓦斯隧道施工通风效果的影响[J].安全与环境学报,2018,18(5):1 834—1 841.
- [6] 王明年,邓涛,于丽.基于大断面高铁隧道的施工通风时间理论预测方法研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(8):1 279—1 285.
- [7] 雷帅,方勇,刘静,等.南大梁高速公路华蓥山隧道施工通风优化研究[J].现代隧道技术,2019,56(2):194—200.
- [8] 李明,幸垚,刘农.雪山梁高原特长隧道施工通风关键技术三维数值模拟[J].公路,2017,62(11):284—289.
- [9] 宋旭彪.压出式空气幕通风技术在隧道施工中的应用[J].现代隧道技术,2013,50(2):173—180.
- [10] 王帅帅,许前顺,郭春.圭嘎拉超长高海拔公路隧道进出口工区施工通风方案研究[J].现代隧道技术,2018,55(z2):337—342.
- [11] 谭信荣,陈寿根,张恒.基于洞内空气质量测试的长大隧道施工通风优化[J].现代隧道技术,2012,49(6):152—157.
- [12] 李勇,王玉锁,杨超,等.向莆铁路金瓜山特长隧道施工通风技术研究[J].铁道建筑,2013(11):73—75.
- [13] 古尊勇,幸垚,邓禹,等.雪山梁隧道施工通风关键技术三维数值模拟研究[J].公路交通技术,2017,33(3):98—104.
- [14] 王应权.长大铁路隧道施工通风方案选择及优化[J].地下空间与工程学报,2015,11(S1):359—366.
- [15] 张恒,林放,孙建春,等.基于典型壁面粗糙模型的隧道施工通风效果 CFD 分析[J].中国铁道科学,2016,37(5):58—65.
- [16] JTG F60—2009 公路隧道施工技术规范[S].