

# 米仓山公路隧道出口段施工通风方案设计

周健, 邹逸伦, 徐汪豪, 王宇皓, 陶力铭, 方勇\*

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:**近年来中国基础建设事业蓬勃发展,公路里程大幅增加,随之涌现出了一大批长大隧道。在隧道施工和运营中,通风设计是必不可少且非常重要的一个环节。该文以米仓山特长公路隧道为例,对米仓山隧道施工期间通风方案进行设计,并对长大隧道通风方式的选择、施工工区的划分、风量风阻的计算以及通风布置等方面进行了探讨和分析。结果表明:①长距离独头掘进隧道计算需风量时应考虑隧道内作业人员、爆破、内燃机械以及最低风速4个因素,并结合实际情况对某些参数的取值进行扩大;②在考虑射流风机克服隧道阻力的同时,还应增设局扇驱散局部聚集的粉尘及有害气体,如二衬施工处;③长距离独头掘进隧道应充分利用斜井、竖井进行通风,从而减小通风距离,达到理想的通风效果。

**关键词:**长大隧道;施工通风;独头掘进;硬岩;设备确定

## 1 引言

对于长大隧道通风方式的选择、通风方案的确定以及通风效果的分析和优化,一直以来都是隧道施工及运营期间研究的重点。在通风方式的选择上,国外因其生产的通风管漏风率很低,修建的长大隧道多数采用大直径风管匹配大功率风机的压入式通风;在中国,长大隧道通常修建斜井、竖井或平行导洞,采用压入式和巷道式相结合的通风方式。王小敏等以长度为8 168 m的华蓥山隧道为依托,通过对隧道工区划分、

风量及风阻的计算以及通风设备的选用,详细说明了公路瓦斯隧道压入式和射流巷道式相结合的施工通风方案;陈光明等通过对现有隧道竖井、斜井的调研,在施工和运营通风的整体思路,对斜井和竖井位置、设计和施工方法提出了建议;曾艳华、关宝树应用气体流动的能量方程,对公路隧道平行导洞通风模式进行计算,并在隧道实例计算的基础上提出增设射流风机以加强通风;朵生君等根据施工方法、掘进长度、断面大小及水文地质情况,对TBM施工的中天山隧道采用巷道式联合通风方案,并根据现场通风测试调整通风方案以适应现场施工。近年来,中国隧道建设进入西

段施工时,高程变化出现最大值。

## 参考文献:

- [1] 陈宝春,叶琳.我国混凝土拱桥现状调查与发展方向分析[J].中外公路,2008(2).
- [2] 陈淑红. 缆索吊装钢筋混凝土拱桥的施工技术研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2011.
- [3] 程飞,张琪峰,王景全.我国桥梁转体施工技术的发展现状与前景[J].铁道标准设计,2011(6).
- [4] 谢功元,吕剑锋,王守兵.小直径钢管混凝土劲性骨架法

施工拱桥方案研究[J].公路交通科技(应用技术版),2007(10).

- [5] 高玉峰,蒲黔辉,李晓斌,等.悬臂浇筑法在国外大跨度混凝土拱桥施工中的应用发展[J].世界桥梁,2008(1).
- [6] 李开心.考虑季节温差的主拱安装线形控制技术研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2012.
- [7] 孙国富,李术才,张波.大跨度钢管拱吊装中温度荷载效应分析及应用[J].山东大学学报(工学版),2010(4).
- [8] 李金志.大跨径钢管混凝土拱桥缆索吊装施工及影响因素研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2017.

收稿日期:2019-05-09(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0802205);国家自然科学基金资助项目(编号:51578460);四川省科技计划重点研发项目(编号:2017SZ0043)

作者简介:周健,男,硕士研究生。

\*通信作者:方勇,男,教授。

部山区,隧道独头掘进距离越来越大,对隧道通风的要求也越来越高。李勇等以金瓜山铁路隧道为研究对象,对独头掘进超过 5.5 km 的进口段采用压入式、抽排混合式和大风室接力式的综合通风方式,改善了洞内的空气质量;王平安对高海拔区的大梁铁路隧道独头多巷道通风技术进行研究,介绍了隧道设计原则、风量风压计算方法和通风管理技术等。

以上文献对隧道通风方式的选择、施工区段的划分以及通风方案的分析等方面进行了探讨,但是对于长距离独头掘进的公路隧道,对其施工期间通风方面的研究并不多,并且不同隧道所处地区地质、水文、区域构造等情况不同,因此有必要对长距离独头掘进的公路隧道进行因地制宜的设计。该文以巴陕高速公路米仓山隧道为背景,在考虑其长距离独头掘进的前提

下对隧道通风工区进行划分,并通过对通风参数调研对隧道风量、风阻及设备选型进行计算,最终得到适合长距离独头掘进公路隧道的通风方案。

## 2 工程概况

米仓山公路隧道全长 13 833 m,其中,四川境内的出口段左线起止桩号 ZK45+800~ZK53+532,长 7 732 m,右线起止桩号 K45+800~K53+526,长 7 726 m,独头掘进距离是中国在建公路隧道之最。隧道主洞净宽 10.25 m,净高 5.0 m,采用双线分离式布置,左、右线间距 40 m。隧道进口段围岩以脆硬的石英闪长岩、白云岩为主,最大埋深约 1 000 m,隧址区纵断面如图 1 所示。

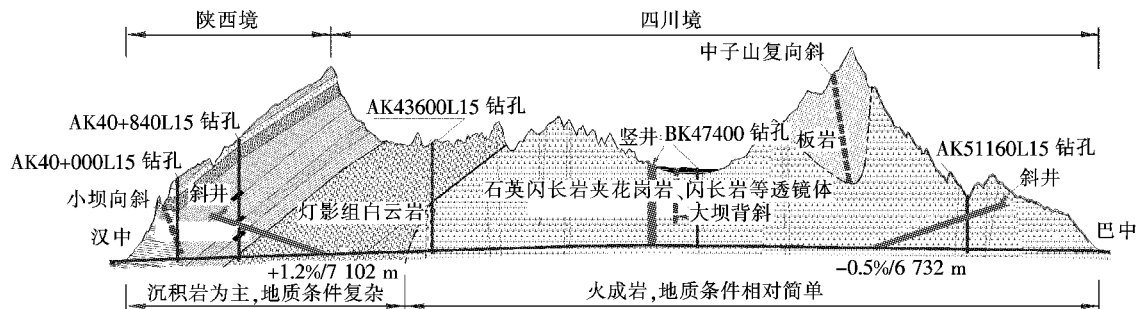


图 1 米仓山隧道出口段纵断面图

## 3 通风方式选择及工区划分

为了保证长距离独头掘进的通风效果,如图 2 所示,在隧道左、右线距洞口 3 440 m 处分别设置长

1 582、1 580 m 的斜井,最大纵坡约为 15%,斜井净宽 7.9 m,净高 5.95 m,断面积 19.7 m<sup>2</sup>;在左线距洞口 6 616 m 处设置施工期排风竖井,竖井埋深 435.76 m,直径 9.0 m,断面积 63.61 m<sup>2</sup>;隧道进口段包括 2 个洞内联系道,8 个人行横通道,11 个车行横通道。

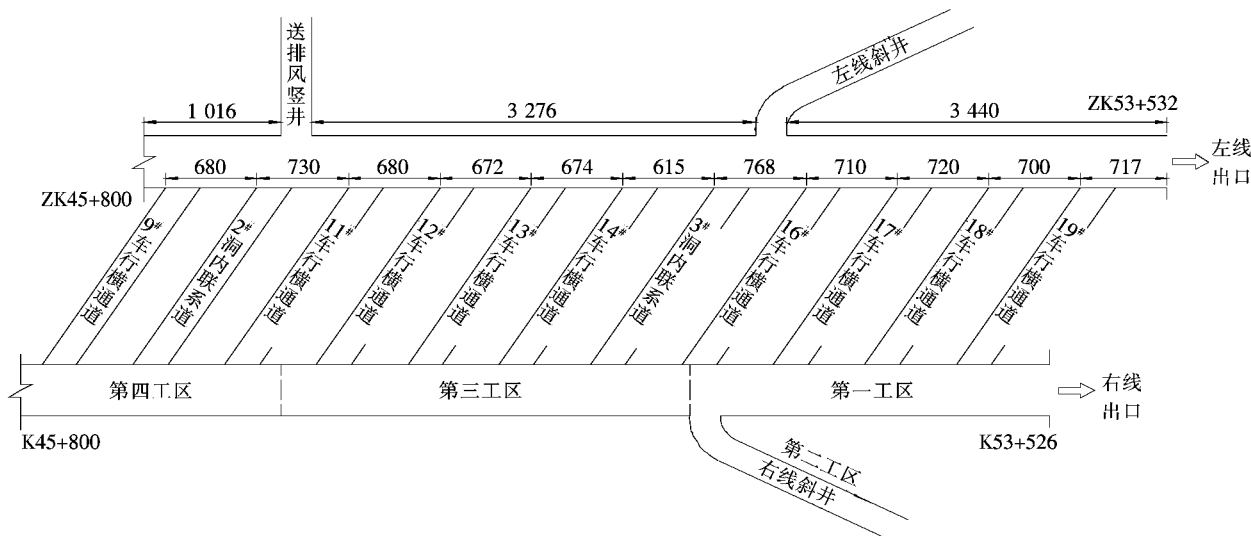


图 2 米仓山隧道出口段平面示意图(单位:m)

考虑到米仓山隧道施工期间通风距离长、需风量大、通风效率不佳等因素,以及通风技术和通风设备都有了一定发展的现状下,在第 1 个车行横通道贯通前采用管道独头压入式通风,巷道式通风在具有横通道连通的平行双洞施工条件下采用,平行双洞施工能形成右线进新鲜风、左线排出污风的通风系统,为尽量实现污风和新鲜风的完全分离,要求运输车辆均从左线进出,从而保证轴流风机始终处在新鲜风区。

结合隧道出口段斜井、竖井的位置,以及隧址区的地层岩性、地形、施工设备等具体因素,如图 2 所示,将米仓山隧道出口段划分为 4 个工区:① 隧道进口至斜井间,在 19# 车行横通道贯通前采用压入式通风,之后采用巷道式通风;② 斜井工区;③ 斜井至竖井间;④ 竖井处至进口段终点。工区划分具体信息如表 1 所示。

## 4 隧道风量计算

### 4.1 隧道需风量的确定

在非瓦斯隧道中,需风量的计算主要是考虑隧道内作业人员、爆破、内燃机械以及最低风速 4 个因素,并取最大值作为需风量标准。由于米仓山隧道独头掘进长度达 7 726 m,计算参数的选取应区别于一般隧道,具体如下文所述。

表 1 米仓山隧道工区划分

区段	通风方式	左线起止点	右线起止点	通风距离/m
一	压入式+巷道式	ZK53+532~ ZK50+092	K53+526~ K50+086	3 440
二	巷道式	XZK0+000~ XZK1+582	XK0+000~ XK1+580	1 582
三	巷道式	ZK50+092~ ZK46+816	K50+086~ K46+810	3 276
四	巷道式	ZK46+816~ ZK45+800	K46+810~ K45+800	1 016

#### (1) 作业人员呼吸需风量

$$Q_A = q \cdot n \cdot k \quad (1)$$

式中: $q$  为单个作业人员需风量,中国隧道施工中取  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ ;  $n$  为隧道内最多作业人员数量,一般取 80 人,该文斜井取 80 人,主洞取 100 人;  $k$  为备用系数,取 1.5。

#### (2) 爆破排烟需风量

$$Q_{\text{爆破}} = \frac{0.456}{t} \sqrt[3]{\frac{Gb(AL)^2}{P^2C}} \quad (2)$$

式中: $t$  为通风时间,取 30 min;  $G$  为同时爆破炸药量(kg),正洞取 160 kg,斜井取 50 kg;  $b$  为每公斤炸药产生的 CO 当量,取 40 L/kg;  $A$  为隧道最大开挖断面面积( $\text{m}^2$ ),正洞为  $65.2 \text{ m}^2$ ,斜井为  $19.7 \text{ m}^2$ ;  $L$  为通风距离(m);  $P$  为风管始末端风量之比,取 1.2;  $C$  为通风要求达到的 CO 浓度,取 0.008%。

排烟安全距离  $L_s$  为:

$$L_s = \frac{0.1Gb}{CA} \quad (3)$$

通风长度的确定要对二衬步距(二衬台车与掌子面间的距离)与排烟安全距离进行比较,米仓山隧道进口端主要为Ⅲ级围岩,二衬步距取 120 m。当  $L_s \geq 120 \text{ m}$ ,通风长度取 120 m;当  $L_s < 120 \text{ m}$ ,通风长度取为排烟安全距离。

#### (3) 按稀释和排出掌子面附近内燃机废气计算

掌子面附近按 1 台功率为 125 kW 的挖掘机、1 台功率为 160 kW 装载机和 1 台功率为 215 kW 的运渣车计,总功率为 500 kW。

$$q_{\text{内}} = N \cdot q \cdot k \quad (4)$$

式中: $N$  为内燃机总功率(kW);  $q$  为内燃机械单位功率供风量,按中国标准取  $4.5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$ ;  $k$  为功率系数,取 0.63。

#### (4) 按最低风速计算风量

$$Q_v = v \cdot A \quad (5)$$

式中: $v$  为允许最低风速(m/s)。

由于隧道独头掘进距离长,围岩普遍为中硬岩、硬岩,爆破后会产生大量粉尘,考虑到风速小于  $0.5 \text{ m/s}$  时,粉尘会逆风扩散,因此取最低风速为  $0.5 \text{ m/s}$ 。

### 4.2 风机供风量的确定

风机供风量由式(6)、(7)计算:

$$Q_{\text{风机}} = \frac{Q_{\text{max}}}{k_1} \quad (6)$$

$$k_1 = 1 - \eta_{100} \frac{L_f}{100} \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{max}}$  为最大需风量( $\text{m}^3/\text{min}$ );  $\eta_{100}$  为 100 m 平均漏风率,取 1%;  $L_f$  为风管最大长度(m);  $k_1$  为有效风量率。

由于主洞每贯通一个车行横通道,风机就会进行一次移动,根据图 1 可知,车行横通道最大间距为 768 m,而横通道长度为 46 m,因此,风管最大长度为两者之和,即 814 m;斜井风管最大长度为 1 597 m。

综上所述,米仓山风量计算结果如表 2 所示。

表 2 米仓山隧道风量计算结果

计算需风量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )			最小风速/(m·s <sup>-1</sup> )		最大需风量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )		风机供风量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	
作业人员	爆破	内燃机械	正洞	斜井	正洞	斜井	正洞	斜井
450	228.6	1 417.5	1 956	591	1 956	1 417.5	2 129.3	1 543.1

5 施工通风方案及设备配置

5.1 风管阻力

选用  $\phi 1\ 500$  mm 拉链软风管,风管阻力由式(8)计算:

$$H_{\text{风管阻力}}=(R_{\text{摩擦}}+R_{\text{局部}})Q_{\text{风机}}\cdot Q_2 \tag{8}$$

式中: $H_{\text{风管阻力}}$ 为最大风管阻力(Pa); $R_{\text{摩擦}}$ 为风流沿管路流动时的摩擦风阻(kg/m<sup>7</sup>); $R_{\text{局部}}$ 为管路风流的局部风阻(kg/m<sup>7</sup>); $Q_2$ 为风管出口风量,即 $Q_{\text{max}}$ (m<sup>3</sup>/s)。

计算得主洞最大风管阻力为 1 984.1 Pa,斜井最大风管阻力为 1 753.3 Pa。

5.2 隧道阻力及射流风机计算

(1) 隧道主洞通风阻力

$$\Delta p_{r1}=(\zeta_e+\lambda_r\cdot\frac{L}{D_r})\cdot\frac{\rho}{2}\cdot v_r^2 \tag{9}$$

式中: $\Delta p_{r1}$ 为隧道回风巷通风阻力(Pa); $\zeta_e$ 为隧道入口局部损失系数,取 0.6; $\lambda_r$ 为隧道壁面摩擦阻损失系数,取 0.02; $D_r$ 为隧道当量直径,即 $4A/U$ , $U$ 为隧道周长(m); $L$ 为隧道回风巷长度(m); $\rho$ 为风流密度,取 1.2 kg/m<sup>3</sup>; $v_r$ 为隧道中的风速(m/s)。

(2) 横通道的通风阻力

$$\Delta p_{r2}=(\zeta_{\text{进}}+\zeta_{\text{出}}+\lambda_r\cdot\frac{L}{D})\cdot\frac{\rho}{2}\cdot v^2 \tag{10}$$

式中: $\Delta p_{r2}$ 为横通道通风阻力(Pa); $\zeta_{\text{进}}$ 为横通道入口局部损失系数,取 0.6; $\zeta_{\text{出}}$ 为横通道出口局部损失系数,取 1.0; $D$ 为横通道当量直径,即 $4A_1/U_1$ , $U_1$ 为隧道周长(m); $v$ 为横通道风速(m/s)。

4 个工区隧道阻力计算结果及射流风机台数如表 3 所示,考虑到隧道内二衬施工处存在粉尘及有害气体,

因此,应在计算风机台数的基础上增设局扇作为实际风机台数。

5.3 设备选型

(1) 轴流风机选型

轴流风机应提供的压力  $H$  应满足式(11):

$$H=H_{\text{风管阻力}}+\frac{\rho}{2}v_2^2 \tag{11}$$

式中: $v_2$ 为风管出口风速(m/s); $\rho$ 为空气密度(kg/m<sup>3</sup>)。

计算得主洞风机全压力为 2 240 Pa,斜井风机全压力为 4 214 Pa。

主洞、斜井轴流风机应提供压力分别为 2 134.1、1 903.3 Pa,为满足施工通风需要,轴流风机型号为 SDF(C)NO. 12.5,风量 2 113~4 116 m<sup>3</sup>/min,风压为 1 078~6 860 Pa,功率为 220 kW,各工区左右线需各配置 1 台轴流风机,并备用另外 1 台。

(2) 射流风机

选用  $\phi 1\ 120$  mm 射流风机:型号为 SDS-112T-4PD5,风机出口风量为 2 004 m<sup>3</sup>/min,风机出口风速为 33.9 m/s,使用功率为 37 kW。

5.4 施工通风方案

为适应长距离独头掘进隧道的通风要求,并且充分利用竖井、斜井进行通风,米仓山隧道施工通风方案会随着隧道掘进而发生变化,以达到更好的通风效果。在隧道内,轴流风机在压入式通风、巷道式通风时分别位于洞外、贯通横通道后方 30 m 处,作用是将新鲜空气通过风管送入掌子面,其中风管距掌子面 15 m;射流风机的作用有两个:① 处在循环通路中起到升压来引射风流的作用;② 在二衬施工前方 20 m 处作为局扇增加局部区域风速来降温或驱散粉尘及有害气体。由于轴流风机和局扇位置都相对固定,下面主要对每个工区通风方式及射流风机的布置进行说明。

5.4.1 第一、二工区

(1) 压入式通风

在第一工区主洞 19# 车行横通道贯通前及第二工区,均采用风管压入式通风。这期间,由于斜井工区的风机配置、通风方式与主洞相同,因此文中只对主洞通风方案进行阐述。如图 3 所示,新鲜空气由洞外通过风管送到掌子面附近,并沿隧道排出污染气体,射流风

表 3 各工区射流风机计算结果

工区	隧道最大通风长度/m	风机升压力/Pa	阻力损失/Pa	理论风机数/台	实际风机数/台
一	5 806	9	37.06	5	7
二	1 582	9	9.50	1	2
三	8 890	9	53.26	6	8
四	5 102	9	33.36	4	6

机位于二衬台车后 100 m 处。

## (2) 巷道式通风

在 19# 车行横通道贯通后,第一工区采用巷道式通风,并且随着下一个车行横通道的贯通,轴流风机位置也随着前移。如图 4 所示,新鲜空气由右线洞外引入,污染气体经左线排出洞外,运输车辆由左线进出。1 台射流风机位于 16# 车行横通道内,2 台射流风机位

于右线轴流风机后方 50、150 m 处,2 台射流风机位于左线车行横通道后方 50、150 m 处。

## 5.4.2 第三工区

主洞通过斜井位置时,斜井已经贯通,此后隧道通风进入第三工区,采用巷道式通风。如图 5 所示,在此阶段,新鲜空气主要由右线斜井引入,污染气体主要经左线斜井排出,运输车辆仍由左线进出。1 台射流风

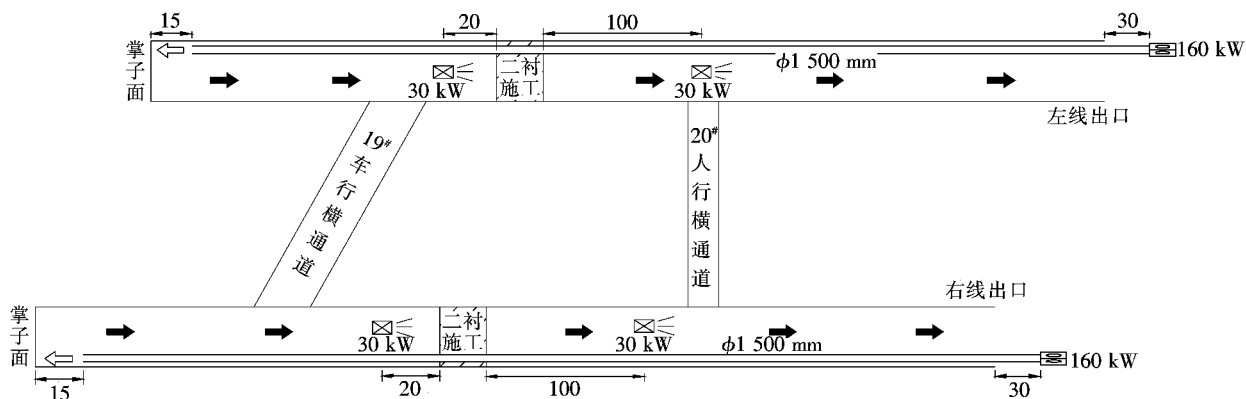


图 3 第一工区压入式通风方案(单位:m)

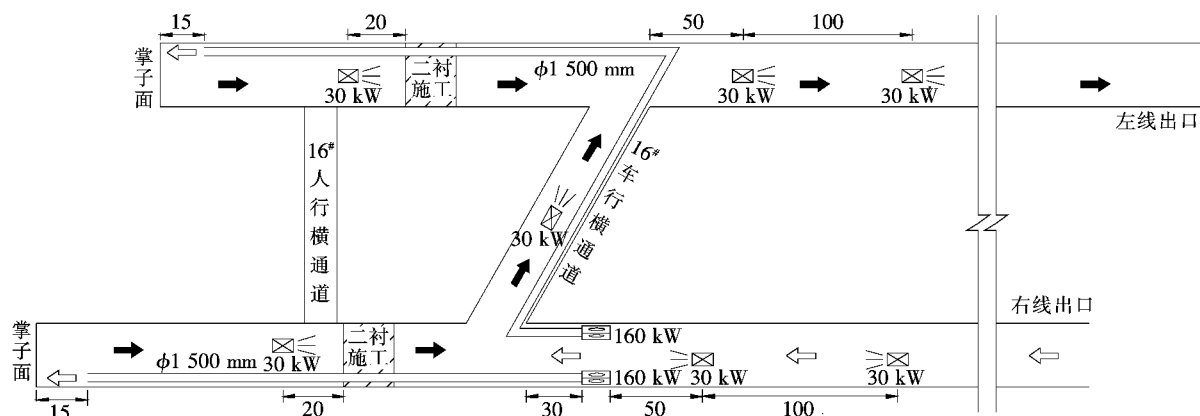


图 4 第一工区巷道式通风方案(单位:m)

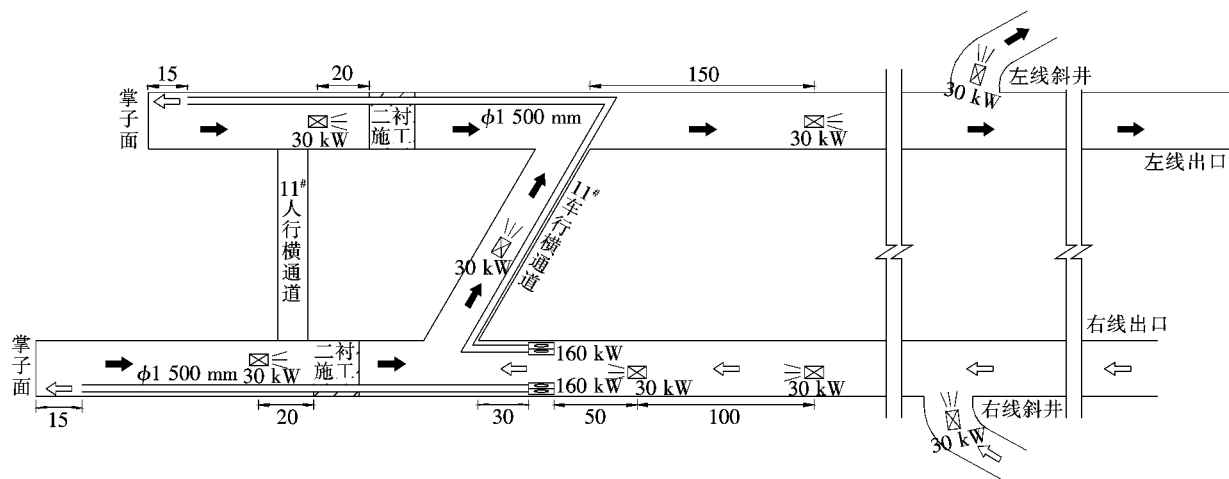


图 5 第三工区通风方案(单位:m)

机位于 11# 车行横通道内, 3 台射流风机分别位于右线轴流风机后方 50、150 m 及右线斜井口处, 2 台射流风机分别位于左线车行横通道后方 150 m 及左线斜井口处。

#### 5.4.3 第四工区

主洞通过竖井位置时, 竖井已经贯通, 此后隧道通

风进入第四工区, 采用巷道式通风。如图 6 所示, 在此阶段, 新鲜空气主要由右线斜井引入, 污染气体主要经左线竖井排出, 运输车辆仍由左线进出。1 台射流风机位于 2# 洞内联系道内, 1 台射流风机位于右线轴流风机后方 150 m 处, 2 台射流风机分别位于左线竖井口及其后 100 m 处。

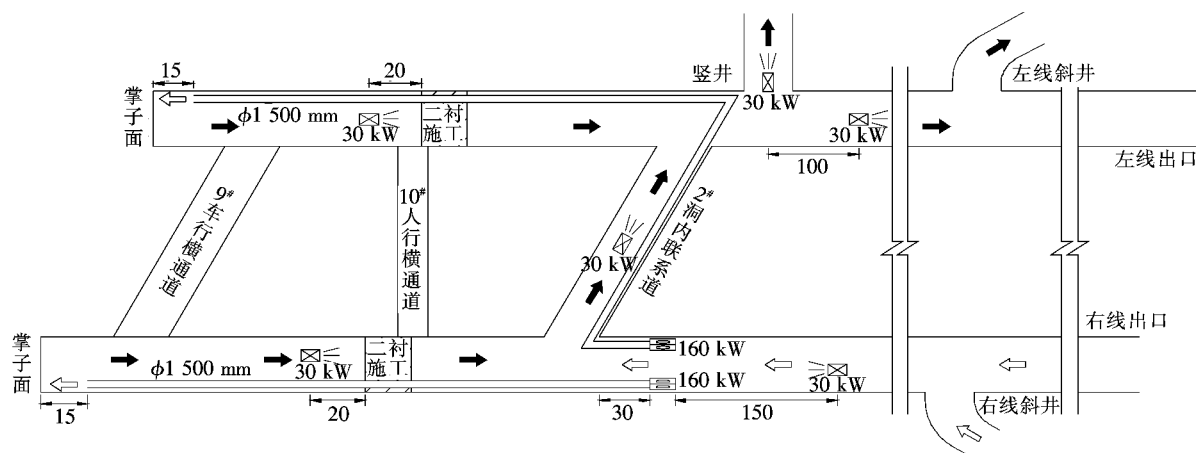


图 6 第四工区通风方案(单位:m)

## 6 结论

该文以独头掘进距离长达 7 732 m 的米仓山隧道出口段为背景, 对其施工期间通风方案进行了设计, 并在通风方式的选择、施工区段的划分、风量风阻的计算以及通风布置等方面进行了探讨和分析。得出以下结论:

(1) 米仓山隧道出口段施工通风各工区区段配置 2 台轴流风机, 型号为 SDF(C)NO. 12. 5, 功率为 220 kW, 并选用  $\phi 1\ 500$  mm 软风管; 配置  $\phi 1\ 120$  mm 射流风机, 型号为 SDS-112T-4PD5, 功率为 37 kW。

(2) 在长距离独头掘进隧道施工通风需风量的计算中, 应考虑隧道内作业人员、爆破、内燃机械及最低风速等因素, 且在硬岩隧道最低风速应取 0.5 m/s。

(3) 射流风机的台数根据隧道阻力计算, 考虑到二衬施工处存在粉尘及有害气体聚集情况, 因此, 应在计算风机台数的基础上增设局扇作为实际风机台数。

(4) 长距离独头掘进隧道应充分考虑利用斜井、竖井送排风, 以减小通风距离, 达到理想的通风效果。

#### 参考文献:

- [1] 方勇, 彭佩, 赵子成, 等. 风管出口位置对隧道施工通风效果影响的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014(2).
- [2] 彭佩, 方勇, 周超月, 等. 隧道施工压入式通风效果分析及参数优化研究[J]. 铁道标准设计, 2014(7).
- [3] 范建国, 方勇, 雷帅, 等. 双车道公路隧道射流风机布置方式研究[J]. 现代隧道技术, 2017(2).
- [4] 方勇, 兰宇, 曾艳华, 等. 三车道公路隧道射流风机设置位置研究[J]. 现代隧道技术, 2009(2).
- [5] JTG/T D70/2-02-2014 公路隧道通风设计细则[S].
- [6] 王小敏, 方勇. 南大梁高速公路华蓥山特长隧道施工通风方案[J]. 现代隧道技术, 2013(4).
- [7] 陈光明, 韦薇, 胡益华. 特长公路隧道斜井、竖井设计技术与经验[J]. 隧道建设, 2015(4).
- [8] 曾艳华, 关宝树. 平行导坑通风计算的研究[J]. 中国公路学报, 2002(3).
- [9] 朵生君. 中天山隧道 TBM 长距离施工通风方案研究[J]. 隧道建设, 2013(5).
- [10] 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).
- [11] 王平安. 高原长隧道独头多巷道通风技术[J]. 铁道建筑技术, 2015(9).
- [12] 杨立新, 洪开新, 刘招伟, 等. 现代隧道施工通风技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.