

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.02.020

# 高瓦斯隧道施工通风方案设计及 瓦斯运移规律研究

熊华涛

(中铁十六局集团铁运工程有限公司, 河北 保定 074000)

**摘要:** 通风是防治隧道瓦斯浓度超限及爆炸事故的关键措施。以石黔高速公路七曜山隧道为背景, 阐述双洞高瓦斯隧道射流巷道式通风方案的设计方法, 基于 FLUENT 软件研究隧道内部风速与瓦斯浓度的分布规律。研究表明: 内燃机械尾气为七曜山隧道需风量的主控因素, 排风洞风筒在横通道弯折处的阻力达到总阻力的 21.7%, 应注意保持风筒圆顺度; 同一断面不同位置风速各不相同, 远离风筒的拱顶与拱壁相交处、横通道与正洞连接处等位置积聚; 隧道纵向瓦斯浓度在风筒出口附近呈两端高、中间低的分布特征, 建议施工人员尽量在风筒出口的后方附近驻足。

**关键词:** 高瓦斯隧道; 巷道式通风; FLUENT; 瓦斯浓度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)02—0113—07

## Ventilation Design and Gas Migration Analysis of the High-level Gas Tunnel

XIONG Huatao

(China Railway 16th Bureau Group Railway Engineering Co., Ltd., Baoding, Hebei 074000, China)

**Abstract:** Ventilation is the key measure to prevent the gas concentration exceeding the limit and explosion accident. The design method of gallery-used ventilation scheme for double-hole high-level gas tunnel was elaborated, in the Qiyaoshan Tunnel of the Shizhu - Qianzhong Expressway. Based on FLUENT software, the distribution law of wind speed and gas concentration in different spatial positions of tunnel was also analyzed. The results are as follows. Mechanical waste gas is the main control factor of the required ventilation quantity in Qiyaoshan Tunnel. The resistance of the air duct at the bend of the cross passage reaches 21.7% of the total resistance, hence attention should be paid to maintaining the roundness of the air duct. The wind speed in different positions of the same section is different. The gas is easy to accumulate in the central floor of the tunnel, the intersection of the vault and the arch wall far away from the air duct, and the joint between the cross passage and the main tunnel. The distribution characteristics of gas concentration near the outlet of air duct are high at both ends and low in the middle along the longitudinal direction of the tunnel. It is suggested that the construction personnel should stop at the rear of the air duct outlet when resting.

**Keywords:** high-level gas tunnel; gallery-used ventilation; Fluent; gas concentration

随着交通基础设施建设规模不断扩大,我国已成为世界上隧道建设规模最大、难度最高与数量最多的国家。由于越来越多的隧道穿越油气盆地、煤系地层等瓦斯积聚区山脉,瓦斯隧道随之增多<sup>[1-3]</sup>。隧道瓦斯会导致中毒、窒息、爆炸等灾难性后果,施工中瓦斯管理与控制十分关键<sup>[4]</sup>。通风是防止隧

道内部瓦斯浓度超限及瓦斯爆炸的基本措施。

根据风机类型及布置位置的不同,隧道通风方式分为压入式、抽出式、巷道式等<sup>[5-7]</sup>。《公路瓦斯隧道设计与施工技术规范》<sup>[8]</sup>(JTGT 3374—2020)规定非瓦斯和低瓦斯隧道宜采用压入式通风,而高瓦斯隧道宜采用巷道式通风。针对瓦斯隧道通风方

式的选用,赵军喜<sup>[9]</sup>结合三都隧道进口工区对比射流巷道式、主扇式及压入式三种通风方案运行效果,指出射流巷道式的通风效果与运行成本最优。杨立新<sup>[10]</sup>提出施工隧道射流通风量的计算方法,并结合算例优化射流风机及局部通风机的布设位置。彭帆<sup>[11]</sup>阐述长隧道运营通风量计算方法,并优化风机在不同情况下的运行模式。隧道内部瓦斯运移和排放效果是通风效果的关键评价对象。针对压入式通风方式下隧道内部瓦斯排放效果,王洪涛<sup>[12]</sup>采用 FLUENT 软件分析风筒布设位置对长大隧道施工通风效果的影响。Tomita 等<sup>[13]</sup>通过相似实验分析隧道单头掘进时掌子面的瓦斯涌出及扩散规律,并分析风筒位置对瓦斯的影响规律。在工程实际中,高瓦斯隧道不论隧道长短均应采用巷道式通风。在特长双洞高瓦斯隧道通风方案设计中,还会在巷道和出风隧道设置射流风机,通过轴流风机和射流风机组合来改善通风效果<sup>[14-15]</sup>。在射流风机辅助作用下,巷道式通风的风场及瓦斯运移特征会有所不同,相应地对人员驻足、内燃机械停放的位置等也应采取针对性的措施,以防增大瓦斯潜在危害,但是相关研究还相对较少。

本文以石黔高速公路七曜山隧道为背景,对双洞高瓦斯隧道通风设计及效果评价方法展开研究。首先,介绍七曜山隧道设计与施工概况,以及瓦斯溢出情况。然后,阐述隧道风量、风阻的计算方法,及射流巷道式通风设计与风机选型方法。最后,基于 FLUENT 软件对通风实施效果进行模拟,明确风场分布与瓦斯运移的基本规律,探究瓦斯容易积聚的位置,以期为类似工程案例提供参考。

## 1 七曜山隧道

### 1.1 七曜山隧道简介

七曜山隧道是重庆石柱至黔江高速公路的重点控制性工程,左洞起讫里程 K16 + 368—K21 + 764,右洞起讫里程 YK16 + 386—YK21 + 786,属于特长型隧道。隧道衬砌为三心圆曲边墙结构,如图 1 所示,拱高 7.05 m、上半圆半径 5.45 m,周长 31.17 m,净空面积 64.28 m<sup>2</sup>。采用新奥法原理进行施工设计,最大开挖断面面积为 69.22 m<sup>2</sup>,初期支护以喷、锚、网为主,二次衬砌为模筑混凝土。中铁十六局集团施工总承包指挥部三分部承担七曜山隧道出口端施工任务,施工段落为左洞 Y19 + 030—Y21 + 761,右洞 YK19 + 050—YK21 + 786。

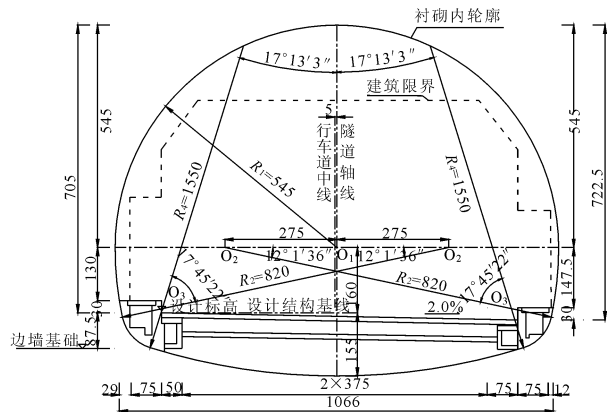


图 1 隧道主洞衬砌内轮廓设计图(单位:cm)

### 1.2 瓦斯溢出情况

七曜山隧道出口端原设计不穿越煤层,勘察也未发现瓦斯迹象,故出口段无瓦斯相关设计。2019年4月2日,七曜山隧道出口端左洞 K20 + 432 掌子面瓦斯等有毒有害气体溢出,经检测掌子面拱顶可燃气体浓度 16%、H<sub>2</sub>S 浓度 0.6 ppm,氨气 0.7 ppm,后续监测洞内瓦斯浓度在 0.1% ~ 0.6% 之间。2019年8月1日,隧道出口端左洞 K20 + 323 处洞内瓦斯浓度出现异常,拱顶瓦斯浓度超过光干涉式甲烷测定器量程,掌子面瓦斯、有害气体突出,造成起火燃烧。根据《石黔高速七曜山隧道出口段施工溢出气体成分检测及来源分析和等级划分报告》,隧道左洞瓦斯气体的绝对涌出量为 1.70 m<sup>3</sup>/min ~ 2.16 m<sup>3</sup>/min,隧道右洞瓦斯气体的绝对涌出量为 1.59 m<sup>3</sup>/min ~ 1.82 m<sup>3</sup>/min,根据《公路瓦斯隧道技术规范》<sup>[16]</sup> (DB51/T 2243—2016) 要求,界定为高瓦斯隧道。建设单位、设计单位与业主单位共同决策剩余未开挖段按照高瓦斯隧道施工,故应进行专门的通风设计与施工管理。

## 2 隧道通风量计算及方案设计

### 2.1 掌子面需风量计算

风量、风压是隧道通风系统设计的关键指标<sup>[17]</sup>。需风量根据瓦斯涌出量、规程允许风速时风量需求、作业人数、稀释爆破排烟和洞内内燃机械废气等因素对应的需风量分别进行计算,为保证安全,隧道施工需风量的选取应以最大值为准。

#### 2.1.1 瓦斯涌出稀释需风量

根据《铁路瓦斯隧道技术规范》<sup>[18]</sup> (TB 10120—2019)、《公路隧道施工技术规范》<sup>[19]</sup> (JTG F60—2009) 规定,隧道内部各处的瓦斯浓度应稀释到 0.5% 以下。

$$Q = \frac{q}{C_a - C_0} K \quad (1)$$

式中: $q$  为瓦斯涌出量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $C_a$  和  $C_0$  分别为允许瓦斯浓度和新风瓦斯浓度, %;  $K$  为不均衡系数, 一般取 1.5 ~ 2.0。

对于七曜山隧道, 左洞和右洞瓦斯涌出量保守取为  $5.0 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $Q = 1\ 600 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 2.1.2 规定风速需风量

瓦斯隧道规定风速对应的需风量计算方法为:

$$60V_1 S \leq Q \leq 60V_h S \quad (2)$$

式中: $V_1$  和  $V_h$  分别为最低和最高风速, 瓦斯工区一般分别取  $0.5 \text{ m/s}$  和  $6 \text{ m/s}$ <sup>[19]</sup>;  $S$  为隧道断面积。

七曜山隧道仰拱填充断面初期支护内净空面积  $77.51 \text{ m}^2$ ,  $Q = 2\ 325.3 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 2.1.3 最大作业人数需风量

隧道内最大作业人数的需风量计算方法为:

$$Q = aKN \quad (3)$$

式中: $a$  为单人每分钟供风量, 取为  $4 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{人})$ ;  $N$  为洞内同时工作的最多人数, 按照《重庆市公路水运工程安全生产强制性要求》(渝交委路[2015]81号), 瓦斯隧道单工作面同时作业人员不得超过 29 人。普通区段配置最多人员为 80;  $K$  为备用系数, 取值范围 1.1 ~ 1.25, 取 1.2。

非瓦斯段:  $Q = 384 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

瓦斯段:  $Q = 139.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 2.1.4 爆破排烟需风量

隧道掌子面爆破对应的需风量计算公式为:

$$Q = \frac{2.25}{t} \sqrt[3]{\frac{A(SL_0)^2 Kb}{P^2}} \quad (4)$$

式中: $t$  为爆破后通风时间, 取  $30 \text{ min}$ ;  $A$  为一次爆破所需炸药用量,  $\text{kg}$ ;  $L_0$  为炮烟抛掷长度或通风排烟的临界长度,  $\text{m}$ ;  $S$  为隧道开挖断面积, 七曜山隧道高瓦斯区 IV 级围岩, 采用全断面开挖;  $K$  为淋水系数, 取 0.6;  $b$  为每公斤炸药产生的 CO 当量, 取  $40 \text{ L/kg}$ ;  $P$  为巷道计算长度范围内漏风系数。

$A$  的计算公式为:

$$A = Slc \quad (5)$$

式中: $l$  为循环进尺;  $c$  为单位炸药用量, 取值为  $1.0 \text{ g/m}^3$ 。

七曜山隧道循环进尺  $2.0 \text{ m}$ , 隧道开挖断面积为  $69.22 \text{ m}^2$ ,  $A$  的计算结果为  $138.44 \text{ kg}$ 。

$L_0$  的计算公式为:

$$L_0 = \frac{12.5Ab\beta}{SP^2} \quad (6)$$

式中: $\beta$  为紊流扩散系数, 本文取 0.5。

七曜山隧道通风筒直径  $1.8 \text{ m}$ , 依据《风筒漏风率和风阻的测定方法》<sup>[20]</sup> (GB/T 15335—2019) 计算百米漏风率为 1.0%。那么漏风系数  $P$  为:

$$P = \frac{1}{(1 - P_{100})^{\frac{L}{100}}} = 1.12 \quad (7)$$

由此爆破排烟需风量为  $Q = 947.52 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 2.1.5 施工机械尾气稀释需风量

稀释内燃机械废气的需风量计算方法为:

$$Q = b \sum_{i=1}^n N_i \eta_i \quad (8)$$

式中: $b$  为机械单位功率需风量,  $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$ ;  $n$  为施工机械总数;  $N$  为机械功率,  $\text{kW}$ ;  $\eta$  为综合效率系数。

七曜山隧道施工机械设备中, 装载机、挖掘机、和运渣车等为内燃机械, 相关参数如表 1 所示。

表 1 施工机械功效统计

名称	功率/kW	效率系数	数量/台	备注
装载机	162	0.65	1	
挖掘机	110	0.65	1	每 1 km 1 台
自卸汽车	250	0.65	3	

计算结果为  $Q = 2\ 657.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

根据上述各因素需风量计算结果, 隧道内施工需风量最大值为稀释内燃机废气需风量  $2\ 657.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 。因此, 对于高瓦斯隧道, 在掘进长度较大的情况下, 瓦斯涌出量不是所需风量的控制因素, 机械废气为需风量控制因素。

## 2.2 掌子面通风量计算

### 2.2.1 海拔影响

考虑海拔影响的需风量修正计算方法为:

$$Q_a = 760 \frac{Q}{P_a} \quad (9)$$

式中: $Q_a$  为考虑海拔影响进行修改后的需风量;  $Q$  为正常条件下计算的需风量, 即以上计算中的最大值为  $2\ 657.2 \text{ m}^3/\text{min}$ ;  $P_a$  为高海拔地区大气压力 (七曜山隧道取海拔  $1\ 000 \text{ m}$ )。

$$Q_a = 2\ 996 \text{ m}^3/\text{min}。$$

### 2.2.2 掌子面通风量计算

根据计算, 隧道掌子面的需风量为  $2\ 996 \text{ m}^3/\text{min}$ , 七曜山隧道左洞最大施工距离为  $1\ 133 \text{ m}$ , 右洞为  $1\ 060 \text{ m}$ 。考虑到施工后期瓦斯涌出量增加、风筒转弯及破损漏风等因素, 对需风量进行修正。

$$Q_b = Q_a (1 + \eta L/100) \quad (10)$$

式中: $\eta$  为风筒  $100 \text{ m}$  漏风率, 取 0.01;  $L$  为风筒长度。

左洞需风量为:

$$Q_b = 3\,335.45 \text{ m}^3/\text{min};$$

右洞需风量为:

$$Q_b = 3\,280.4 \text{ m}^3/\text{min}.$$

根据巷道式通风原理,左、右洞掌子面的风量全部来自自主风流,因此七曜山隧道通风主循环风量为  $Q_b \geq 6\,615.85 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 2.3 隧道通风阻力及风机风阻计算

风机选型时不仅要参照隧道最大需风量,同时应根据各工区通风方式计算风筒阻力大小,主要核算巷道式通风主循环风阻和风筒阻力。

#### 2.3.1 巷道式通风主循环风阻

巷道式通风主循环的风阻主要来源于风流和隧道之间的摩擦,主循环的路线是:进风洞—横洞—出风洞,总长度为 2 510 m。

沿程阻力的计算方法为:

$$h_a = 6.5g(\alpha LQ_b^2/d^5) \quad (11)$$

式中: $g$  为重力加速度; $L$  为通风长度,m; $\alpha$  为通风摩擦阻力系数,取 0.025<sup>[11]</sup>;  $Q_b$  为主循环风量, $\text{m}^3/\text{s}$ ,取  $110.26 \text{ m}^3/\text{s}$ ; $d$  为断面直径,m,取 9.05 m,

解得: $h_a = 793.12 \text{ Pa}$ 。

局部阻力的计算方法为:

$$h_j = \frac{\zeta Q_b^2 \gamma}{2S^2} \quad (12)$$

式中: $\zeta$  为局部阻力系数,一般取 0.6; $\gamma$  为空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $S$  为风带面积, $\text{m}^2$ 。

$h_j = 1.06 \text{ Pa}$

综上所述,计算得到主循环风阻力为  $h_a + h_j = 794.18 \text{ Pa}$ 。

#### 2.3.2 风筒阻力计算

主循环风流形成后,新鲜风流布置在进风洞内的主通风机通过风筒输送至隧道掌子面。主通风机(轴流风机)全部布置在七曜山隧道左洞内。主通风机送风距离为 1 133 m(左洞),右洞 1 060 m。风筒阻力包括沿程阻力和局部阻力。

(1) 左洞风筒阻力。风筒沿程阻力采用式(11)计算,风筒长度 1 133 m,摩阻系数 0.000 13,风量  $55.59 \text{ m}^3/\text{s}$ ,风筒直径 1.8 m。由此,左洞风筒沿程阻力为 1 520.33 Pa。

风筒局部阻力采用式(12)计算,局部阻力系数 0.6;左洞风量  $55.59 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由此,左洞风筒的局部阻力为 172.03 Pa。其他局部阻力按局部阻力 5% 取值,因此左洞风筒总阻力为 1 700.96 Pa。

(2) 右洞风筒阻力。类似地,右洞风筒沿程阻

力为 1 375.68 Pa,局部阻力为 166.38 Pa。由于采用巷道式通风,隧道右洞风筒经过两次弯折,弯折处阻力计算方法为:

$$h_w = \sum \xi \gamma Q^2 / (2S^2) \quad (13)$$

式中: $\sum$  为风筒转弯次数; $\xi$  为风筒接头局部阻力系数,取 0.52; $Q$  为右洞通风量。

风筒弯折处的风阻计算结果为 428.89 Pa。

由此,右洞风筒阻力为 1 979.27 Pa。风筒弯折处风阻占到总风阻的 21.7%,因此应注意保持弯折处的圆顺。综上所述,七曜山隧道单洞最大需风量为  $3\,335.45 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $55.59 \text{ m}^3/\text{s}$ ),最大风压为 1 979.27 Pa。

### 2.4 通风方案设计

综合考虑七曜山隧道断面型式、长度、机械设备、出渣方式等因素,采用压入式+抽出式的巷道混合射流通风方式,如图 2 所示。具体方案为:

(1) 在 K20+580 处设置 4 台轴流风机向左右洞内输送风量,K20+520 横通道和右洞安装射流风机加速向洞内抽排污浊气流。

(2) 为防止二衬台车附近、衬砌断面变化处、横通道处瓦斯聚集,增加空气流速,特在二衬台车安装 2 台 11 kW 局部通风机、开挖台车安装 2 台 2.2 kW 局部通风机,6#车行横通道口安装 2 台 30 kW 射流风机。

(3) K21+270 车行横通道靠近左线设置栅栏,防止作业人员入内,在该横通处安装瓦斯监测探头。

(4) 在正线洞口处安装抽出式风机,使左、右线形成一定的风压差,形成巷道式通风系统。

施工过程中,通风机随着掘进深度的增大而向前移动,除污风排烟横通道外,其余横通道全部设置风门临时密闭,防止风流互窜,造成洞内循环风。实际施工时根据掌子面瓦斯涌出量确定是否需增设局部射流风机稀释瓦斯浓度。

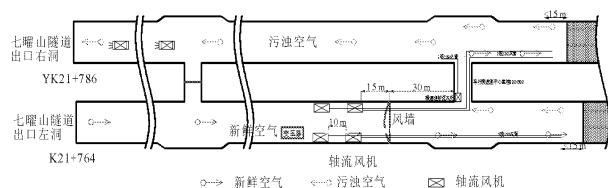


图 2 七曜山隧道通风设计方案

参考风机性能参数,隧道主通风机选用 SDDY-No14#型多级变速风机,并对风机进行防爆改装,其性能参数均满足计算要求,如表 2 所示。

表 2 SDDY-No14#通风机主要参数表

风量 /( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	风压 /Pa	功率 /kW	转速 /( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )
1417 ~ 4000	1500 ~ 6500	$2 \times 160$	1450

表 3 七曜山隧道边界条件参数表

参数名称	选用参数
掌子面	流体源项
隧道拱顶、侧壁、底板	壁面 (wall)
通风筒口	速度入口 (velocity inlet)
隧道进口	自由出流 (outflow)

### 3 基于 FLUENT 的隧道通风效果模拟

#### 3.1 计算模型

以七曜山隧道实际尺寸为参考,利用 Solid-Works 建模工具,在笛卡尔坐标系下建立总长度为 160 m 的一段空间,隧道掘进方向为 Z 轴负方向,模型两端分别对应掌子面和风墙位置。简化后隧道通风几何模型如图 3(a)所示。然后,采用 Gambit 软件对隧道模型进行网格划分,根据不同区域的结构需要,网格最大尺寸为 200 mm。网格模型包括 389 437 个节点,932 443 个单元,如图 3(b)所示。

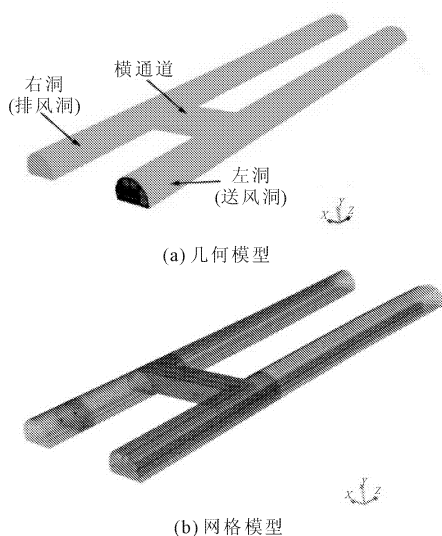


图 3 七曜山隧道计算模型

模型的计算条件包括:气流视为不可压缩流体,气体流动选用标准  $K-\varepsilon$  湍流模型和标准壁面函数求解。开启组分运输模型, inlet diffusion 组分包括甲烷、硫化氢、氮气和氧气等成分。Pressure 压力差值方式采用 Standard 格式,压力差分方式为二阶差分方式,动量差分方式为二阶迎风。采用 SIMPLEC 算法进行解算以加速模拟收敛速度。

七曜山隧道边界条件如表 3 所示。其中,风流沿垂直于风筒口方向均匀进入隧道,湍流强度比值为 5%,水力直径为  $1.8 \text{ m}^{[11]}$ 。隧道内掌子面、拱顶、侧壁以及风筒视为无滑移边界条件,设定为 wall 单元,采用标准壁面函数法求解。

依据瓦斯的实际涌出量来确定瓦斯源项  $S$  的值,计算方法为:

$$S = \rho Q / Vt \quad (16)$$

式中: $\rho$  为瓦斯的密度, $0.716 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $V$  表示瓦斯涌出源的体积,视与掌子面距离 100 mm 的空气中为实际污染源源项; $t$  为时间。

七曜山隧道出口端左洞瓦斯绝对涌出量  $Q$  为  $1.70 \text{ m}^3/\text{min} \sim 2.16 \text{ m}^3/\text{min}$ 、右洞瓦斯绝对涌出量为  $1.59 \text{ m}^3/\text{min} \sim 1.82 \text{ m}^3/\text{min}$ ,计算时取最大值,计算结果分别为  $0.004 01 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$  和  $0.003 34 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

#### 3.2 风场分布规律

##### 3.2.1 总体分布规律

图 4 为隧道纵向水平面的风速分布图 ( $Y = 3.5 \text{ m}$ )。可以看出,隧道内空气的流动模式受到轴流风机和射流风机的共同控制。首先,风墙外的新鲜空气通过压入式轴流风机从左洞(送风洞)的风筒口处进入隧道,左洞和右洞的风筒分别将空气压送至掌子面。风筒射流由于掌子面的回弹作用,风流质点开始自风筒所在位置向外发散,风速逐渐减小,并逐渐形成回流,风流从远离风筒的隧道一侧返回,在横通道射流风机卷吸作用下再次改变流动方向,形成涡流区,并与从右洞掌子面处吹来的风流混合后从隧道右洞出口排出。掌子面和横通道之间的风场明显地分布着冲击射流区、回流区、涡流区,表现出有限空间内受限附壁射流的流场特性。

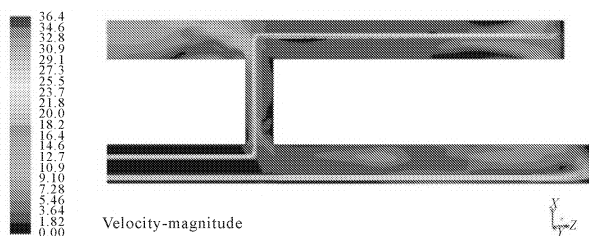
图 4 隧道内风流速度分布图(截面  $Y = 3.5 \text{ m}$ )

图 5 为隧洞中心位置风速的纵向分布情况。可以看出,当  $Z > 45 \text{ m}$  时,左、右洞内的风速处于波动

状态,距离风筒出口处较近的位置风速较大,随着与风筒出口距离的增加,风速逐渐降低。原因在于气体在运移过程中受到壁面摩擦的影响,并且存在正向风流与回流综合形成的涡流区域。 $Z < 45\text{ m}$ 时,左、右洞的纵向风流方向相反,左洞风流在风墙的阻挡作用和横通道射流风机的抽吸作用下以约  $2\text{ m/s}$  速度向洞内流动;右洞(排风洞)掌子面污染空气与从横通道而来的左洞污染空气混合后在出口射流风机的作用下以约  $6.0\text{ m/s}$  的速度向洞外排出,风速符合通风技术要求。

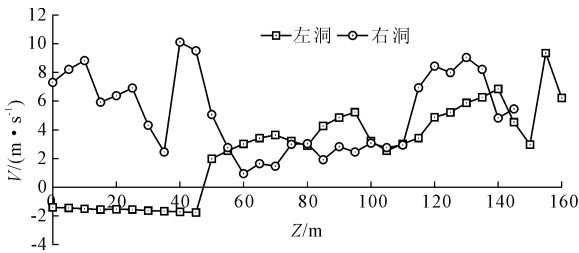


图 5 隧道左洞和右洞的风速变化曲线

### 3.2.2 掌子面风速分布

掌子面是瓦斯涌出的主要区域,通风条件直接影响瓦斯排放效果。图 6 为左洞距离掌子面  $0.5\text{ m}$  处的风速分布图。可以看出,隧道截面具有明显的风流分区现象,远离风筒一侧的风速小于风筒出口处射流区风速。隧道内部风筒异侧下隅角为风速最小区域,不利于隧洞内瓦斯的稀释和排除,因此该区域容易形成瓦斯积聚,应注意采取防范措施。

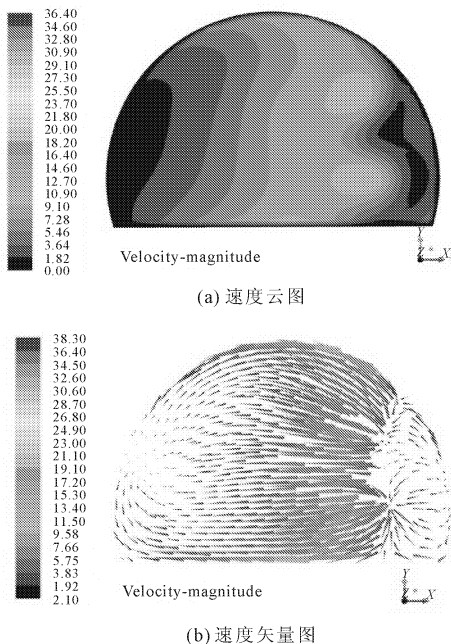


图 6 七曜山隧道左洞掌子面风速分布

### 3.3 瓦斯运移规律

#### 3.3.1 掌子面瓦斯分布

左洞风筒出风口截面瓦斯浓度随时间的变化规律如图 7 所示。

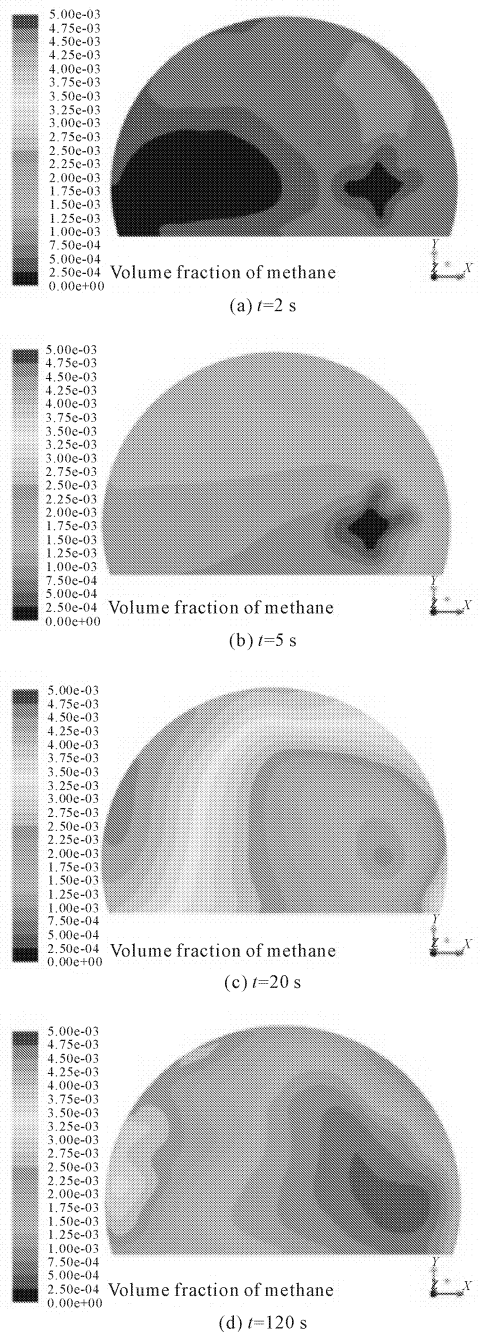


图 7 左洞风筒出风口截面瓦斯浓度云图

由图 7 可以看出,在风筒风流未达到掌子面前,随着瓦斯持续地涌出,隧道掌子面瓦斯浓度增大,由于瓦斯密度低于空气,存在浮生现象。随着新鲜空气的压入,掌子面瓦斯气体随空气向隧道出口流动,在短时间内产生浓度上升趋势。由图 7(c) 可见,掌子面附近瓦斯分布不均匀,瓦斯浓度在风筒出风口

处最小,并以此为中心点呈放射状向外分布且逐渐增大,浓度最大处在距离风筒最远处的掌子面近壁处。通风 120 s 时,掌子面附近瓦斯浓度基本稳定,浓度保持在 0.5% 以下。

掌子面瓦斯浓度具有明显的分层现象,进风侧和隧道中部的瓦斯浓度比回风侧的值要小。由于涡流滞后的作用,在隧道回风侧整个靠近壁面的部位瓦斯浓度较大,墙顶、拱脚及墙脚处较为明显。因此,回风侧中下方位置产生瓦斯灾害的可能性最大,应注意该位置的瓦斯检测与局部通风。

### 3.3.2 隧道内瓦斯总体分布规律

图 8 为通风时间 60 s 时隧道内部瓦斯浓度分布图( $Y=3.5\text{ m}$ )。可以看出,左洞瓦斯随着风流通通过横通道与从右洞掌子面而来的瓦斯汇合后向隧道口方向排出。掌子面前 10 m 内的存在射流区、回流区及涡流区,从而导致瓦斯体积分数具有明显差异,涡流区的存在使小范围内瓦斯体积分数变化梯度增大。瓦斯向外运移过程中,风筒出口附近浓度较低,之后由于涡流区等因素的影响又有所增大。瓦斯浓度在风筒出口附近呈现两端高、中间低的分布特征。因此并不是距离掌子面距离越远时,瓦斯风险最低。在施工过程中,风筒出口 3m 范围内瓦斯浓度不容易超限,可以作为施工人员的驻足位置。

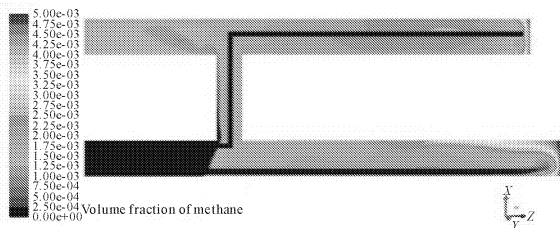


图 8 隧道内瓦斯浓度分布图( $Y=3.5\text{ m}$ )

### 3.3.3 横通道瓦斯分布

横通道与正洞连接处的瓦斯分布如图 9 所示。可以看出,横通道处的射流风机将左洞瓦斯卷吸引射至右洞,横通道附近瓦斯浓度由 0.2% 逐渐减小到 0.1%。由于风流的射流和回流作用形成的涡流会影响瓦斯的扩散路径,使得瓦斯扩散轨迹具有明显的弧度。在巷道式通风过程中,横通道与正洞连接处易形成涡流区,导致瓦斯局部聚集,应注意防范。

## 4 结 论

(1) 当高瓦斯隧道的掘进长度较大时,内燃机械对应的需风量往往大于瓦斯涌出量所对应的需风量,成为隧道需风量的主要控制因素。七曜山隧道

排风洞风筒在横通道弯折处的风阻会占到总风阻的 21.7%,应注意保持风筒圆顺性。

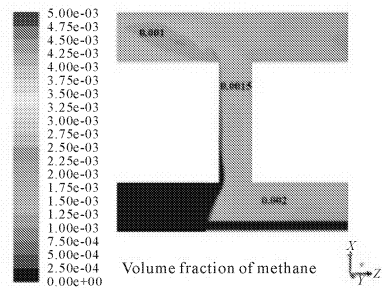


图 9 横通道与正洞连接处瓦斯浓度分布( $Y=3.5\text{ m}$ )

(2) 同一断面不同位置的瓦斯浓度和风速大小各不相同。掌子面和横通道之间的风场表现出有限空间内受限附壁射流的流场特性,远离风筒的拱顶与拱壁相交处、横通道与正洞连接处等位置积聚,应注意防范。风筒出口附近瓦斯浓度呈两端高、中间低的分布规律,建议施工人员尽量在风筒出口的后方附近驻足。

### 参考文献:

- [1] 雷升祥. 瓦斯隧道施工技术与管理[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [2] 王明慧,张忠爱,刘 盛,等. 渝黔铁路瓦斯突出隧道安全施工管理实践[J]. 铁道标准设计,2018,62(1): 99-103.
- [3] 李 宁,杨 卿. 西部水利与土木工程中的岩土工程问题[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):1-8.
- [4] 高 杨,杨昌宇,郑 伟. 铁路瓦斯隧道分类分级标准探讨[J]. 隧道建设,2017,37(11):1366-1372.
- [5] 王国顺. 长大低瓦斯隧道施工通风技术探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(3):36-39.
- [6] 熊建明. 公路瓦斯隧道施工期间安全管理与预警技术研究[D]. 北京:中国矿业大学,2016.
- [7] 张 闯. 公路隧道页岩段瓦斯涌出规律及其治理措施研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [8] 公路瓦斯隧道设计与施工技术规范:JTGT 3374—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.
- [9] 赵军喜. 平行导坑超前多作业面平行施工通风节能技术研究[J]. 隧道建设,2013,33(4):272-276.
- [10] 杨立新. 隧道施工通风中射流风机位置对风量的影响[J]. 铁道工程学报,2004(4):93-97.
- [11] 彭 帆. 公路长隧道通风计算分析[J]. 公路工程,2008(3):88-90.
- [12] 王洪涛. 长大隧洞施工高强度通风技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.