

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-397-09

某特长铁路隧道通风计算及模拟研究

惠豫川

(中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430063)

【摘要】 根据某隧道工程通风特点, 确定通风方案为无帘幕洞口风道吹入式纵向通风方式, 在理论计算的基础上, 运用 CFD 数值模拟方法讨论了三通段附近风道开口形式和开口位置对隧道流场及风量分配效果的影响, 研究结果表明: 宽度约 1.7m 的窄长形式开口更有利于减小通风阻力、提高通风效果; 并在确定窄长形式开口的情况下发现, 开口距离风道出口越近, 风量分配系数越大, 综合建议隧道 A 和隧道 B 的风道开口位置距风道出口的距离分别为 2.5m 和 5.0m。

【关键词】 隧道通风; 理论计算; CFD 数值模拟; 开口形式; 开口位置

中图分类号 U25 文献标志码 A

Calculation and Simulation Research on Ventilation of a Super Long Railway Tunnel

Hui Yuchuan

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan, 430063)

【Abstract】 According to the ventilation characteristics of a tunnel project, the ventilation scheme is determined to be the portal air duct blow-in ventilation without curtain opening. On the basis of theoretical calculations, the CFD numerical simulation method is used to discuss the influence of the opening form and opening position of the air duct near the tee section on the tunnel flow field and air volume distribution effect. The results show that: The narrow and long opening with a width of about 1.7m was more conducive to reducing the ventilation resistance and improving the ventilation effect; And in the case of determining the narrow and long form of opening, it was found that the closer the opening was to the outlet of the air duct, the greater the air volume distribution coefficient. It was comprehensively suggested that the distances between the openings of the air duct of tunnel A and tunnel B and the outlet of the air duct should be 2.5m and 5.0m respectively.

【Keywords】 Tunnel ventilation; Theoretical calculation; CFD numerical simulation; Opening form; Opening position

0 引言

近年来, 我国的铁路建设高速发展, 长大隧道日益增多, 风险意识也在逐步提升^[1,2]。运营期间列车在隧道内一旦发生火灾或出现故障停车, 会给隧道内被困人员疏散和外部救援工作带来极大困难。当前, 业内学者针对铁路隧道运营与防灾通风进行了一些研究。陈虎成^[3]等基于 CFD 软件对立交隧道分岔部通风特点展开了数值模拟研究, 发现“Y”形分岔部在不同通风情况下的通风效果较“卜”形相对较好, 而风压对两种分岔部的影响趋

势则相对一致。赵东平^[4]等以某铁路隧道内紧急救援站工程为依托, 采用 SES 程序建立了防灾通风计算模型, 分析结果表明, 将风机布置于救援站前后两端的正洞内是较优的通风方案。黄丽娟^[5]以某铁路隧道避难所为研究对象, 分析了主隧道通风风速、避难所防烟风速等对烟气蔓延及控制效果的影响。舒东利^[2]等对特长高瓦斯隧道的 4 种运营通风方案进行了比选, 从通风效果及方案投资和运营费用等角度推荐采用斜井排出式纵向通风方案。

以上多是以风机布置在主隧道内的通风方式

为研究对象,而近年来,随着高铁速度的不断提升,对隧道运营的安全性提出了更高的要求,风道吹入式送风避免了将风机直接暴露在隧道内,降低了隧道运营风险。本文借鉴上述研究方法,结合某特长铁路隧道工程,并根据通风改造工程实际特点,拟采用无帘幕洞口风道吹入式纵向通风方式,将隧道通风理论计算与 CFD 数值模拟相结合,通过分析吹入式通风特点,对该通风方式在本工程中的应用效果进行研究,以确定较优参数,以期为洞口风道吹入式通风方式在特长铁路隧道内的应用提供技术指导。

1 通风系统概况

本工程为 2 条隧道组成的隧道群,其通风系统

改造涉及一号隧道和二号隧道两条主干线,均为单孔拱形结构和单洞双线形式,结合现有条件,拟采用无帘幕洞口风道吹入式纵向通风方式。

两条隧道均属特长铁路隧道,其中一号隧道全长 10081m,通风端长度为 7765m,短路端长度为 2316m,风道整体与隧道平行,中间通过 57m 长的斜井与隧道连接,二者中线相交为 40 度;二号隧道全长 6026m,通风端长度为 5025m,短路端长度为 1001m,风道中线与隧道中线夹角为 44 度。两条隧道的标准横断面面积和水力直径都相同,分别为 99.7m² 和 10.5m; 风道形状及尺寸也近似相同,横断面面积及水力直径分别为 27.8m² 和 5.5m。两条隧道的通风设计情况如图 1 所示。

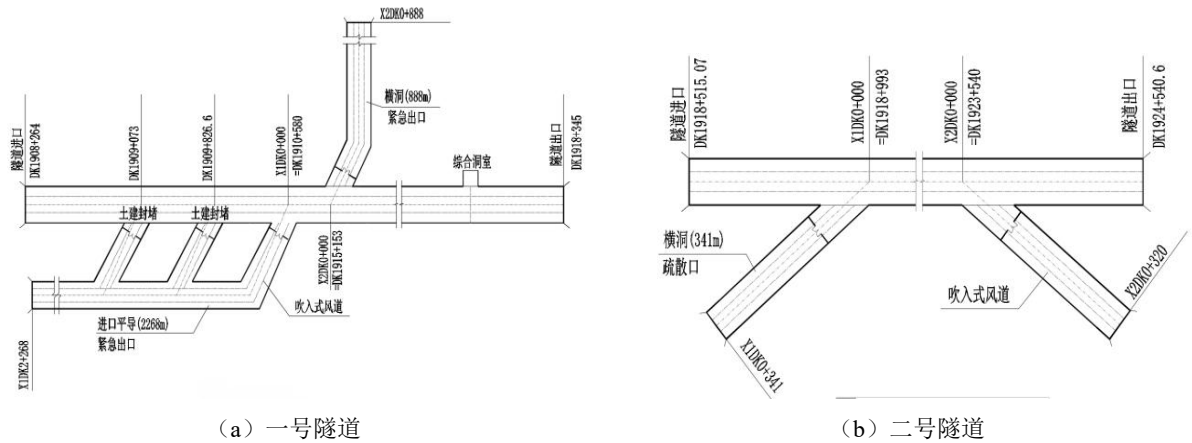


图 1 一号、二号隧道洞口吹入式通风方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of blowing ventilation scheme at the entrances of Tunnel No.1 and Tunnel No.2

2 洞口风道吹入式通风理论计算

根据规范[6]规定:隧道口紧急救援站两端隧道内通风风速不应小于 1.5m/s~2m/s,风向由洞内吹向明线段。设计计算中取隧道通风风速 v_e 为 1.8m/s,以此为基础进行风道送风量及全压计算,

并完成风机设备选型。

2.1 风量计算及风机初选

参照规范[7]相关公式计算得到不同风道口 F_0 下的一号隧道和二号隧道的风量分配系数 R 和轴流风机风量 Q_g 值,分别如表 1、2 所示。

表 1 一号隧道通风量计算

Table1 Calculation of Ventilation Volume for Tunnel No.1

序号	隧道通风风速 v_e /(m/s)	风道口面积 F_0 /m ²	风道口风速 v_0 /(m/s)	风量分配系数 R	风机供风量 Q_g /(m ³ /s)
1	1.8	28	16.2	0.42	453
2	1.8	25	17.5	0.43	437
3	1.8	20	20.2	0.47	403
4	1.8	15	24.1	0.52	361
5	1.8	10	30.3	0.62	303

表 2 二号隧道通风量计算

Table 2 Calculation of ventilation volume for Tunnel No.2

序号	隧道通风风速 v_e /(m/s)	风道口面积 F_0 /m ²	风道口风速 v_0 /(m/s)	风量分配系数 R	风机供风量 Q_g /(m ³ /s)
1	1.8	28	14.5	0.47	405
2	1.8	25	15.5	0.49	387
3	1.8	20	17.7	0.54	353
4	1.8	15	20.8	0.61	311
5	1.8	10	25.8	0.73	258

由表 1 和表 2 可知，在隧道通风风速为 1.8m/s 的情况下，隧道风量分配系数 R 随风道口面积 F_0 的减小呈逐渐增加的规律。按照函数走向及拟合优

度最佳原则，拟合建立二者间的函数关系，如图 2 所示。

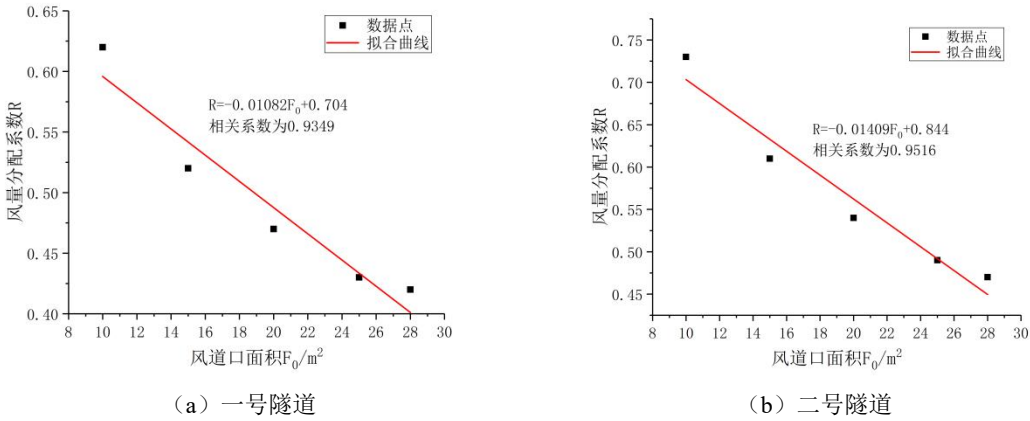


图 2 R - F_0 回归分析

Fig.2 R - F_0 regression analysis

从图 2 中可以看出，一号隧道和二号隧道的风量分配系数 R 与风道口面积 F_0 之间呈较好的线性相关关系。结合工程实际情况，从降低风机、电力设备投资及运行费用并提高通风效率的角度出发，初步确定一号隧道和二号隧道的风机供风量 Q_g 分别为 300m³/s 和 260m³/s，风道口面积 F_0 均为 10m²。根据计算结果，一号隧道初选 2 台型号为 DTF-28 8P/315 的轴流风机，单台风机供风量 150m³/s，全压 1350Pa，风机直径 2.8m，出口连接有消音器（单台风机出口面积为 16m²），预留风机房面积为 49.5m²；二号隧道初选 2 台型号为 DTF-28 8P/110 的轴流风机，单台风机供风量为 130m³/s，风机全压为 650Pa，风机直径为 2.8m，风机出口连接有消音器（单台风机出口面积为 16m²），预留风机房面积为 40.5m²。

2.2 全压计算及风机选型校核

风机全压计算仍采用规范[7]中公式，计算过程中涉及的各种局部阻力系数参照《铁路工程设计技

术手册·隧道》（1999 年版）进行选取，计算得到一号隧道和二号隧道通风所需风机全压分别为 1176.13Pa 和 565.87Pa。

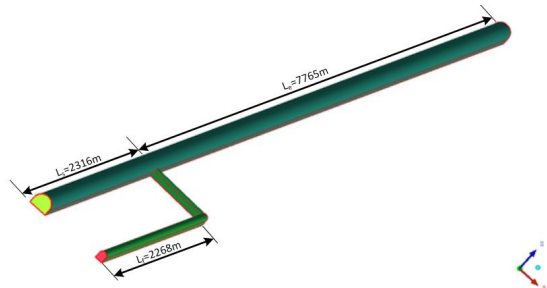
由计算结果可知，一号隧道初选轴流风机的单台全压为 1350Pa，大于理论计算值 1176.13Pa，满足实际需要；同理，二号隧道初选轴流风机的单台全压为 650Pa，大于理论计算值 565.87Pa，满足需求。根据理论计算，一号隧道和二号隧道均采用两台轴流风机，布置于风机初段风机房内，型号分别为 DTF-28 8P/315 和 DTF-28 8P/110。

3 CFD 通风模拟

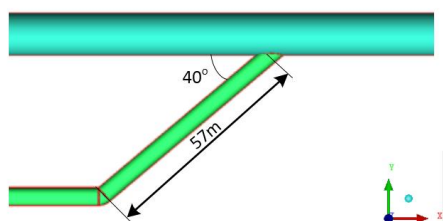
在理论计算的基础上，运用计算流体力学（CFD）技术分别建立两条隧道的计算模型，以分析隧道流场的空间分布情况及变化规律，并对三通段附近风道开口形式及开口位置展开研究，以优化设计，提高通风效率。

3.1 物理模型建立

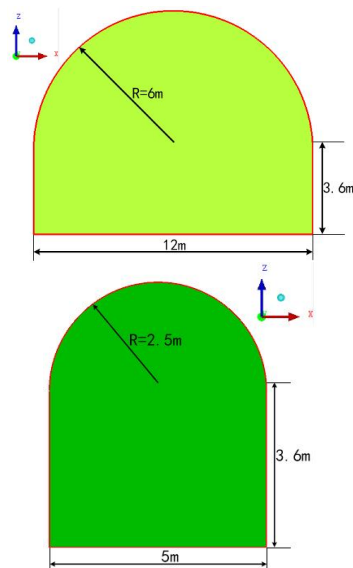
分别建立一号隧道和二号隧道的全尺寸物理模型，模型忽略隧道坡度的变化，其 X、Y、Z 方向分别为实际隧道的宽度、长度和高度方向，一号隧道和二号隧道模型及尺寸如图 3、4 所示。



(a) 全尺寸物理模型



(b) 三通段局部放大图（俯视）



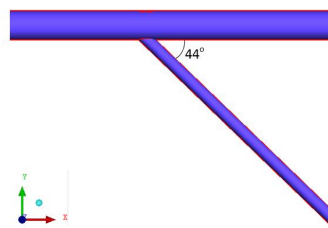
(c) 隧道主洞横断面（左） 风道横断面（右）

图 3 一号隧道物理模型及尺寸

Fig.3 Physical model and dimensions of Tunnel No.1



(a) 全尺寸物理模型



(b) 三通段局部放大图（俯视）

图 4 二号隧道物理模型及尺寸

Fig.4 Physical model and dimensions of Tunnel No.2

其中，二号隧道主洞及其风道的形状和尺寸均与一号隧道相同，如图 3（c）所示。

3.2 参数设定

考虑到隧道狭长半封闭的结构特点，若各个区域都采用同一尺寸的网格，必将导致最终网格数量过多，影响计算速度；但若对模型计算域统一采用较大尺寸的网格，由于模型出入口、三通段等区域流体流动复杂，最终结果可能误差较大，无法准确预测隧道流场的真实分布规律。同时，考虑到四面体非结构网格对复杂计算域适应性强的特点，将整个计算域划分为非结构网格。因此，网格划分时，利用 ICEM CFD 的边界网格加密功能对模型出入口及壁面进行网格加密、利用密度盒对三通段及风道转弯处进行网格局部加密，其他区域采用尺寸较大的网格，不同尺寸的网格在空间上相互耦合。

由于本隧道通风工程仿真模拟目的主要在于探究三通段附近风道开口形式及开口位置对隧道流场分布情况及风量分配的影响，以优化工程设计，不涉及热量传递及其它问题的研究，因此只进行“冷态”Fluent 模拟。湍流模型选用 $k-\varepsilon$ 模型，壁面采用标准壁面函数，湍流强度、湍流粘度比、湍动能、湍流耗散率等均用默认值。采用 Simple 算法求解雷诺平均的 N-S 方程，固体壁面采用无滑移壁面方程。压力方程选择标准格式离散，湍流动能方程、耗散率方程、能量方程采用一阶迎风格式离散，动量方程采用二阶迎风格式离散，所有残差数值均保持默认。

根据隧道通风特点及气体流动特性，将隧道及风道内部所有空间划分为 1 个计算域，气流自风道入口引入，从风道口进入隧道，并从隧道端部排出。风道入口设置为速度入口边界，数值按照理论计算值（即设计值）设定；隧道短路端出口设置为压力出口边界条件，表压为 0Pa；隧道通风考虑自然反风（即由隧道通风端吹向隧道短路端）的影响，设

置隧道通风端出口为压力入口，压力数值通过式（1）计算：

$$P_n = \left(1.5 + \frac{\lambda L_T}{d} \right) \frac{\rho}{2} v_n^2 \tag{1}$$

式中： P_n 为自然风压，Pa； λ 为隧道及风道沿程阻力系数，取 0.019； L_T 为隧道长度，m； d 为隧道断面当量直径，m； ρ 为空气密度，取 1.2kg/m³； v_n 为隧道内自然风速，考虑为 2m/s。

计算得到一号、二号隧道由 2m/s 的自然风速所形成的隧道通风端出口自然风压大小分别为 45.28Pa 和 29.77Pa，具体边界条件设置如表 3 所示。

表 3 隧道边界条件设置详情

Table 3 Details of tunnel boundary condition setting			
边界名称	边界类型	边界数值	
		一号隧道	二号隧道
风道入口	速度入口	10.80m/s	9.36m/s
隧道短路端出口	压力出口	0Pa	0Pa
隧道通风端出口	压力入口	45.28Pa	29.77Pa

3.3 模型验证

采用王志毅^[8]等的改进型诱导器送风室内温度场实测数据对 CFD 模型的可靠性进行验证。图 5 为模拟值与实测值的结果比较，从图中可以看出，模拟值与实测值之间呈现不同程度的偏差，但整体变化趋势大致相同，且各数据点的偏差均不超过 10%，可以验证计算模型的可靠性。

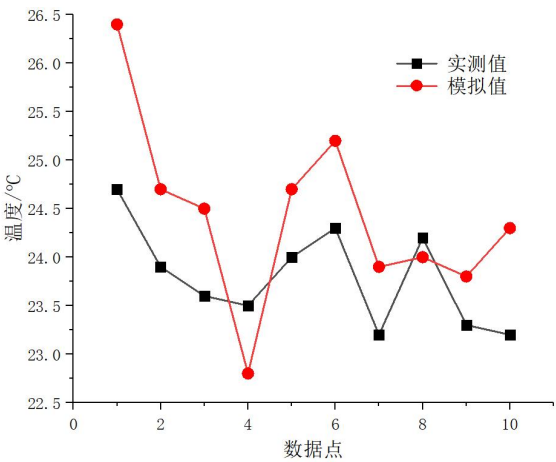


图 5 CFD 模型验证

Fig.5 Validation of CFD models

3.4 结果分析

3.4.1 三通段附近风道开口形式

理论计算初步确定一号隧道和二号隧道的风道口面积均为 10m²，因而需要对风道出口流通断面进行收缩处理，理论计算无法考虑断面收缩形式，需要通过计算机模拟确定。这里以一号隧道为例，断面收缩示意图如图 6 所示。

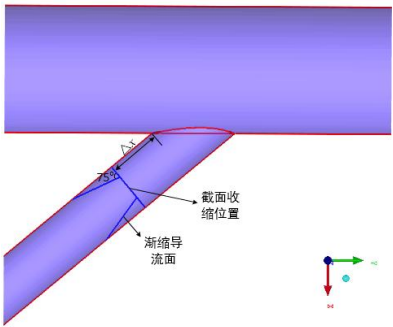


图 6 一号隧道风道断面收缩示意

Fig.6 Schematic diagram of the contraction of the air duct section in Tunnel No.1

需要注意的是， Δx 指风道开口位置与风道出口之间的距离，考虑到通风改造工程实际情况，暂取 $\Delta x=5\text{m}$ ，断面收缩位置迎风方向设渐缩导流面，以最大限度减小通风阻力，导流面与收缩断面夹角为 75°。在保证风道开口面积为 10m² 的前提下，设计两种形式的开口，如图 7 所示。

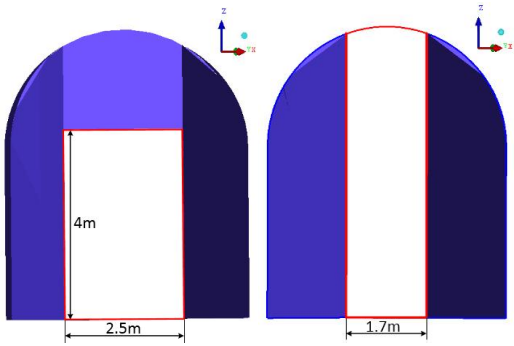
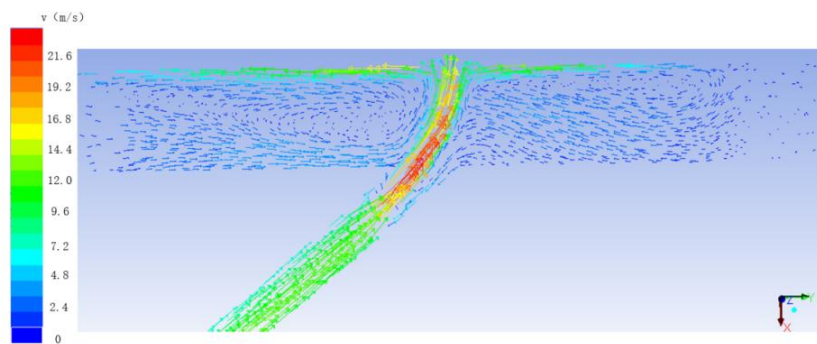


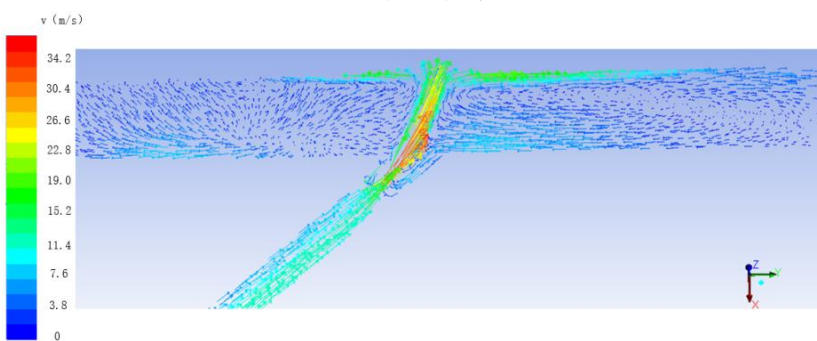
图 7 断面开口形式 A（左）、B（右）

Fig.7 Sectional opening form A (left) B (right)

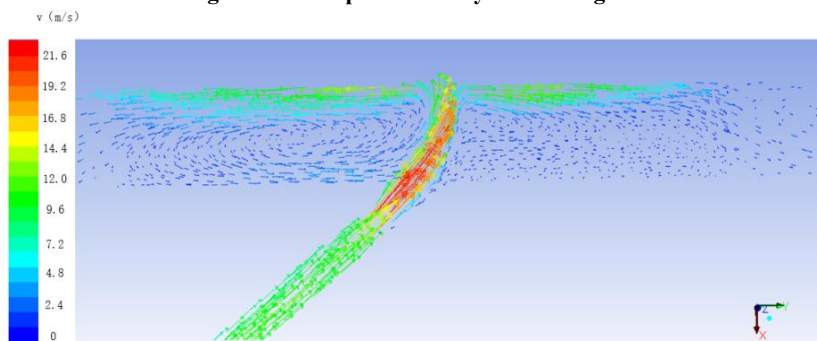
根据前述思想进行断面处理，计算完成后，可获得设计条件下的三通段附近水平面上的流场分布情况，图 8 和图 9 分别为截取的 $Z=2.0\text{m}$ 和 $Z=5.0\text{m}$ 平面上两种风道开口形式的速度矢量图。



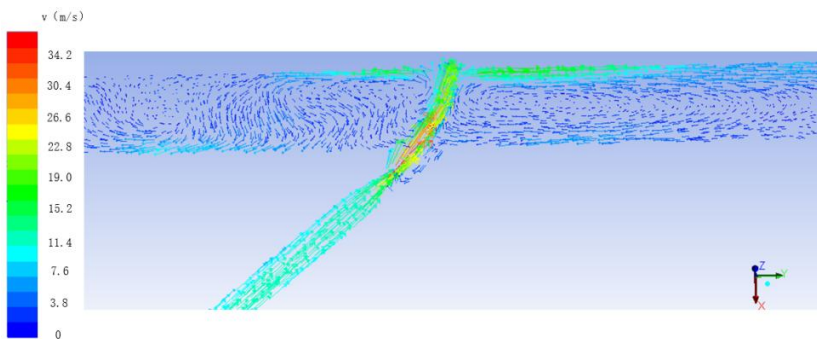
(a) 开口形式 A



(b) 开口形式 B

图 8 $Z=2.0\text{m}$ 平面速度矢量图Fig.8 $Z=2.0\text{m}$ plane velocity vector diagram

(a) 开口形式 A



(b) 开口形式 B

图 9 $Z=5.0\text{m}$ 平面速度矢量图Fig.9 $Z=5.0\text{m}$ plane velocity vector diagram

从图 8 和图 9 中可以看出,风道断面收缩处风速得到显著提高,其射流效果等效于喷口,射流向前高速喷出,撞击隧道壁面后向两侧扩散,并在扩散过程中由于紊动作用会不断卷吸周围速度相对较小的流体,从而形成漩涡;射流继续向隧道两个方向扩散,并产生横向脉动与隧道气流进行动量和能量交换,随着气流的发展,隧道断面速度逐渐均匀。相比于 A 开口, B 开口由于宽高比更小(开口窄长)且顶部敞开,所形成的射流在发展到风道口时虽有分散但不明显,撞击在隧道壁面时动量更大,受自然风阻的影响较小,表现为隧道通风端风速与隧道端路端风速相差不大; A 开口宽高比较大,且顶部封闭,气流在经过 A 开口时受到的阻力更大,由图 8 (b) 可知,其形成的射流在到达风道口时已有分散趋势,导致撞击隧道壁面时的动量减小,因此受自然风阻的影响更大,表现为隧道通风端风速明显小于隧道短路端风速。

表 4 为模拟计算得到的一号隧道三通段附近风道两种开口形式所对应的风量分配系数 R ,分别为 0.37 和 0.49,从而印证了上述分析。因此从通风效果来看, B 开口形式明显优于 A 开口形式,后

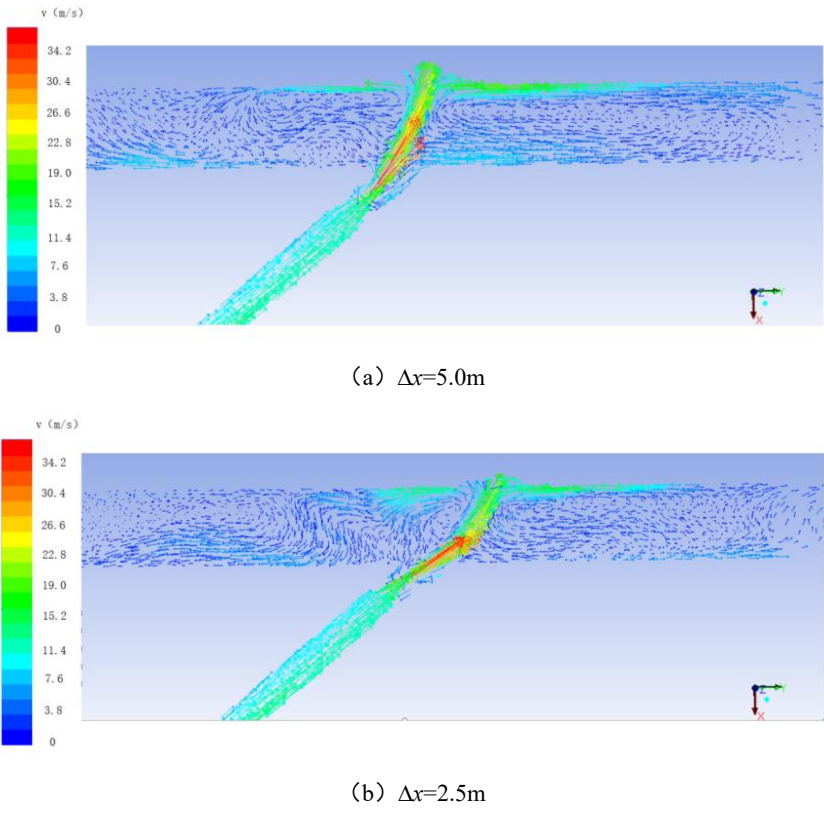
文将以开口形式 B 作为研究分析开口位置(即 Δx 大小)的基础。

表 4 一号隧道两种开口所对应的风量分配系数

Table 4 The airflow distribution coefficients corresponding to the two types of openings in Tunnel No.1	
开口形式	风量分配系数 R
A	0.37
B	0.49

3.4.2 三通段附近风道开口位置

分别设定 $\Delta x=5.0\text{m}$ 、 2.5m 及 0m ,以研究三通段附近风道开口位置对隧道流场及通风效果的影响,图 10、图 11 分别为截取的一号隧道、二号隧道三通段附近 $Z=3.0\text{m}$ 高度平面上不同 Δx 值时的速度矢量图。从图中可以看出,随着 Δx 的减小,气流从风道截面收缩处到达风道口发展的程度越小,前已述及,由此受到自然风阻的影响越小,表现为高速射流中心与隧道侧壁的夹角越小,通风效果越好。 $\Delta x=0$ 即风道断面在风道口收缩时,从图 10 (c) 和图 11 (c) 中可以看出,高速射流喷出后形成附壁射流,并向隧道通风端发展,此时气流受到自然风阻的影响最小,通风效果最好。



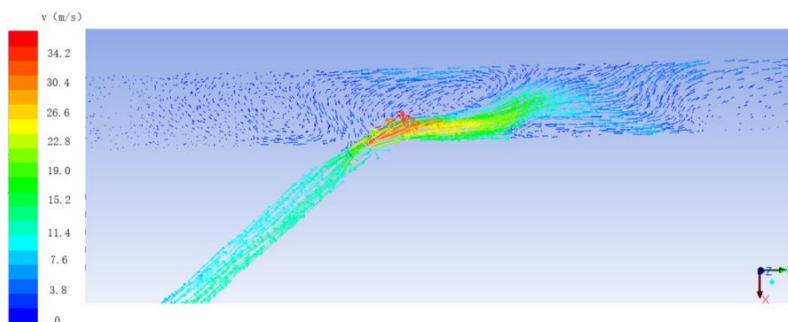
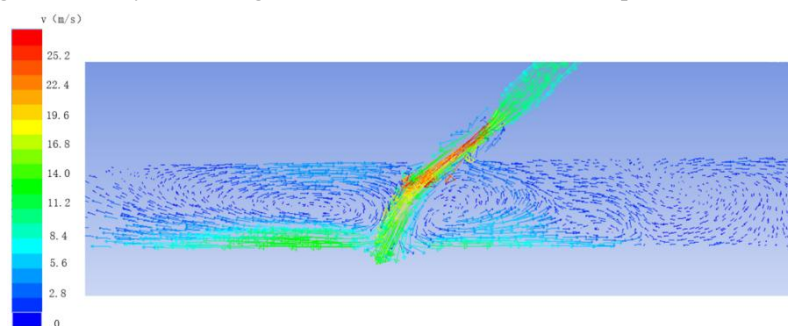
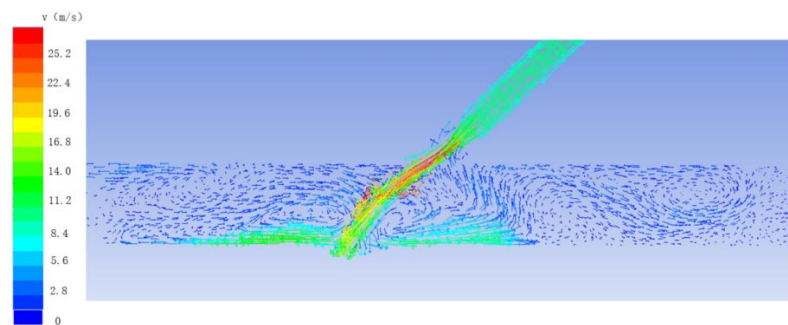
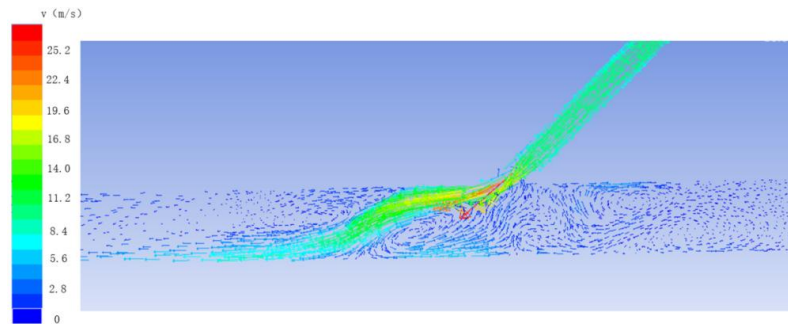
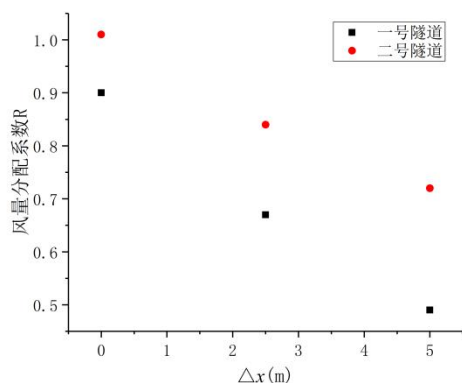
(c) $\Delta x=0$ 图 10 一号隧道 $Z=3.0\text{m}$ 平面上不同 Δx 时的速度矢量图Fig.10 Velocity vector diagram at different Δx on the $Z=3.0\text{m}$ plane of Tunnel No.1(a) $\Delta x=5.0\text{m}$ (b) $\Delta x=2.5\text{m}$ (c) $\Delta x=0$ 图 11 二号隧道 $Z=3.0\text{m}$ 平面上不同 Δx 时的速度矢量图Fig.11 Velocity vector diagram at different Δx on the $Z=3.0\text{m}$ plane of Tunnel No.2

表 5 为一号、二号隧道三通段附近风道不同 Δx 与 R 之间的关系表示在图中, 如图 12 所示。值所对应的风量分配系数 R , 为便于比较, 将 Δx

表 5 Δx 与 R 对应关系Table 5 The correspondence between Δx and R

$\Delta x/m$	一号隧道	二号隧道
5.00	0.49	0.72
2.50	0.67	0.84
0	0.90	1.01

图 12 Δx 与 R 对应关系Fig.12 The correspondence between Δx and R

从表 5 和图 12 中可以看出,对同一隧道而言,随着 Δx 的减小,风量分配系数 R 呈增大趋势,即 Δx 越小,隧道通风端风速越大、通风效果越好;对比一号、二号隧道可以发现,同一 Δx 下,二号隧道的风量分配系数明显大于一号隧道,即二号隧道的通风效果更好,这是由两条隧道的结构特点决定的。考虑到该隧道通风改造工程实际特点及施工可行性,根据模拟结果,在保证隧道通风端风速不低于 1.8m/s 的前提下,可分别设计一号隧道和二号隧道的 Δx 值为 2.5m 和 5.0m 。

4 结论与建议

采用理论计算与 CFD 数值模拟相结合的方法,对一号隧道和二号隧道的洞口吹入式通风改造方案进行了分析,主要得出以下几个方面的结论:

(1) 在考虑 2.0m/s 的自然反风(由隧道通风端吹向隧道短路端)并保证有 1.8m/s 有效风速的情况下,通过风机需风量理论计算,初步确定了两条隧道的轴流风机参数及型号:在一号隧道和二号隧道的风道预留风机房内各安装 2 台型号为 DTF-28 8P/315 和 DTF-28 8P/110 的轴流风机,单台风机供风量分别为 $150\text{m}^3/\text{h}$ 和 $130\text{m}^3/\text{h}$,风机全

压分别为 1350Pa 和 650Pa 。风机需求全压的计算结果验证了所选风机的合理性,同时,理论计算确定了风道口的开口面积为 10m^2 。

(2) 在理论计算的基础上,采用 CFD 数值模拟方法讨论了三通段附近风道开口形式对隧道流场及风量分配效果的影响,结果表明,宽度为 1.7m 时的窄长形式开口更有利于减小通风阻力、提高通风效果。

(3) 基于窄长形式的开口,研究发现,开口位置距离风道出口越近,风量分配系数越大,从通风改造工程实际特点、施工可行性及保证通风效果、提高通风效率的角度出发,建议一号隧道和二号隧道的风道开口位置距离风道出口的距离分别为 2.5m 和 5.0m 。

(4) 通过分析吹入式通风特点,对该通风方式在本工程中的应用效果进行了较为详细的研究,研究结论可为洞口风道吹入式通风方式在特长铁路隧道内的应用提供数据支撑和技术支持。但受限于模拟条件,缺少实测数据对模拟结论进行验证,且工况设置较为单一,具体结论的可推广性尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 颜志伟.武广客运专线大瑶山隧道群防灾救援疏散设计研究[J].铁道工程学报,2011,28(8):7-12.
- [2] 舒东利,杨建民,谢文强,等.保安营特长高瓦斯隧道运营通风方案研究[J].现代隧道技术,2019,56(S2):96-105.
- [3] 陈虎成,刘磊,秦勇,等.立交隧道分岔部基于 CFD 模型的通风模拟研究[J].公路,2016,61(3):233-236.
- [4] 赵东平,蒋尧.某铁路隧道内紧急救援站防灾通风方案及影响因素研究[J].隧道建设,2017,37(8):952-957.
- [5] 黄丽娟.铁路隧道避难所防烟风速研究[J].暖通空调,2019,49(5):15-18.
- [6] TB 10020-2017,铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [7] TB 10068-2010,铁路隧道运营通风设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2010.
- [8] 王志毅,罗晨娴,王高远,等.改进型诱导器系统室内气流组织模拟与实验研究[J].低温与超导,2017,45(1):57-64.