

DOI: 10.7672/sgjs2026040074

通风条件下地下互通曲线隧道空气射流 特征试验研究*

张小毛¹, 闫鑫雨², 刘柱¹, 李登峰³

(1. 中交(广州)建设有限公司, 广东 广州 511400; 2. 广东省市政轨道交通精益
建造工程技术研究中心, 广东 广州 510220; 3. 中国十九冶集团有限公司, 四川 成都 610031)

[摘要] 以建宁西路互通曲线隧道为原型, 采用搭建通风模型试验台的方法进行通风模拟试验, 研究地下互通曲线隧道空气射流特征。研究结果表明: 在隧道中线位置, 当风机位于隧道入口 60cm 位置、不偏转时, 相比其他隧道曲率半径, 隧道为直线时的风速最大; 在隧道为直线条件下, 随着距风机出风口距离的增大, 在隧道中间区域的风速逐渐增大。风机偏转角度为 0° 和 12° 时, 相比风机出风口下游其他位置, 距风机出风口下游 0.6m 位置处的风速最大; 风机位于直线和曲线交界位置、风机偏转角度为 0°, 12° 时, 隧道凹侧的风速大于凸侧, 随着距风机出风口下游距离增大, 在隧道凹侧, 风速逐渐减小。在实际隧道通风工程中, 将风机安装在直线段可提高隧道内风速。

[关键词] 隧道; 通风; 空气射流; 试验

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0074-06

Experimental Study on Air Jet Characteristics of Underground Interconnected Curved Tunnels Under Ventilation Conditions

ZHANG Xiaomao¹, YAN Xinyu², LIU Zhu¹, LI Dengfeng³

(1. CCCC (Guangzhou) Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China;

2. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Lean Construction of Municipal Rail Transit, Guangzhou, Guangdong 510220, China;

3. China 19th Metallurgical Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Using the interchange curved tunnel on Jianning West Road as a prototype, ventilation simulation tests were conducted by setting up a ventilation model test bench to study the characteristics of air jets in underground interchange curved tunnels. The research results indicate that at the centerline of the tunnel, when the fan is located at a position 60cm from the tunnel entrance and is not deflected, the wind speed is the highest compared to other tunnel curvature radii when the tunnel is straight. Under the condition of a straight tunnel, as the distance from the fan outlet increases, the wind speed in the middle area of the tunnel gradually increases. When the fan deflection angle is 0° and 12°, the wind speed at a position 0.6m downstream of the fan outlet is the highest compared to other positions downstream of the fan outlet. When the fan is located at the junction of the straight and curved sections, and the fan deflection angles are 0° and 12° respectively, the wind speed on the concave side of the tunnel is significantly greater than that on the convex side. As the distance from the downstream of the fan outlet increases, the wind speed gradually decreases on the concave side of the tunnel. In actual tunnel ventilation projects, installing the fan at the straight section can increase the wind speed inside the tunnel.

Keywords: tunnels; ventilation; air jet; experiments

* 中施企协科技研发项目([2025]37号); 中国中冶重大研发项目(中冶科[2024]3号); 中交第二航务工程局科技课题(EHYF-2025-B-09-012)

[作者简介] 张小毛, 高级工程师, E-mail: 18520885169@139.com

[收稿日期] 2025-09-05

0 引言

在地下互通隧道工程中,当隧道曲率半径、坡度及分岔数量不同时,隧道内通风射流和烟气运动也不相同。为探求运营期间互通曲线隧道的通风场特征,邓阳等^[1]采用数值模拟对单向公路隧道局部抽烟设计与通风方案优化,认为在抽-压模式下,竖井抽风能有效抑制烟雾沿隧道横向扩散;周健民等^[2]采用数值模拟研究了纵向通风在超长隧道中的排烟效果,分析了以设计断面风速为 2.2m/s 时进行全隧道排烟期间的烟气流动规律;王勇等^[3]对压入式通风条件下高地温隧道降温效果进行了研究,研究表明:风速越高,隧道内温度越低,温度场越均匀,越能快速达到温度稳态;李克刚等^[4]依托某铁路隧道工程,对某特长铁路隧道斜井转正洞施工通风方式进行了研究,分析了空气风流的运移规律;肖晨^[5]对多工作面特长隧道施工通风环境参数监测进行了分析,分析表明:施工车辆及设备对纵向风流存在较大影响,断面纵向风速出现明显降低趋势。以上学者采用多种研究方法,客观分析了隧道斜井转正洞施工通风方式,但未对互通曲线隧道空气射流特征进行分析。

在隧道通风工程中,多数学者对通风条件下隧道的烟气运动特征进行分析,高运超等^[6]研究了纵向通风对矿山隧道火灾烟气控制的影响,研究表明:当通风速度在 1~2m/s 范围内时,对竖井自然通风矿山隧道火灾的防烟效果有积极影响;张宇金^[7]对纵向通风作用下公路隧道火灾烟气运输规律进行研究,得出当隧道上游入口处的纵向风压由限制风速所需风压增大至临界风速所需风压后,逆流层逐渐消失;曹峰等^[8]采用数值模拟分析了特长隧道群全纵向排烟及分段式排烟的烟雾运动规律,提出采用全纵向射流风机+辅助排烟通道的分段排烟方案;宋英华等^[9]对纵向通风下卜型分岔隧道火灾烟气流动特性进行了研究,研究表明:随通风风速增大,隧道内向主隧道下游运动的热烟气比例增加,进入支隧道的烟气减少。以上学者研究了纵向通风对矿山隧道火灾烟气控制的影响,分析了特长公路隧道群的通风方式。然而,以上学者未系统考虑不同隧道风率半径下地下互通曲线隧道的空气射流特征。基于此,本文以过江互通隧道为原型,通过搭建通风模型试验台进行通风试验,对通风条件下地下互通曲线隧道的空气射流特征进行研究,分析了不同隧道曲率半径和角度对隧道射流流场的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验台搭建

本次试验以南京建宁西路过江互通隧道为原型,搭建隧道通风模型试验台,隧道模型是原型的 1/30。根据隧道原型,搭建的试验台分为主隧道和 A1, A2, B1 和 B2 匝道, A1 和 A2 匝道相连,为分流隧道, B1 和 B2 匝道相连,为合流隧道。A1, A2 匝道和 B1, B2 匝道连接部分为独立匝道。主隧道模型由直线段和曲线段组成,直线段和曲线段长 3.2m,隧道截面宽 37cm、高 27cm。A1, A2 匝道分别长 17.82, 6.12m,最大曲率半径均为 4.35m。B1, B2 匝道分别长 21.87, 6.26m,最大曲率半径分别为 4.5, 4m。互通隧道通风模型如图 1 所示。

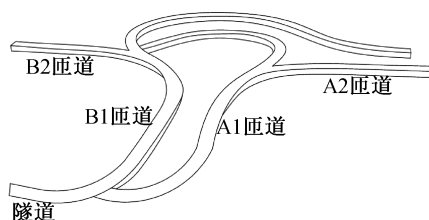


图 1 互通隧道通风模型

Fig. 1 Ventilation model for interchange tunnel

1.2 试验方法

搭建试验台过程中,在隧道入口 60cm 及隧道直线和曲线交界处各设置 2 个射流风机,相邻风机横向间距为 12.8cm,风机距隧道顶板 6cm,出风口直径均为 4.2cm。风量测速设备主要为高精度热线式风速仪,量程范围为 0~20m/s,测量精度为 ± 0.2 m/s,在风速测量中,每隔 1s 采集 1 次,根据原型隧道风速设计,设置模型隧道风速为 5.8m/s。

试验前,从隧道入口开始,沿隧道纵向每隔 0.6m 设置 1 个测速截面,共设置 11 个截面,在每个截面上横向布置 9 个测点,靠近隧道两侧的 3 个测点,其相邻测点间距为 4.5cm,位于隧道中间的 5 个测点,其相邻测点间距为 3.5cm,纵向布置 5 排测点。具体测点分布如图 2 所示。

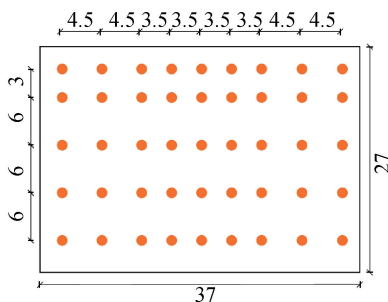


图 2 测点分布(单位:cm)

Fig. 2 Distribution of measuring points (unit: cm)

2 试验工况设置

为研究不同隧道曲率半径对曲线隧道空气射流的流场特征,对主隧道设置了4种不同的隧道曲率半径,分别为直线、3.8、4.8、8.8m;设置2种不同的风机偏转角度,分别为 0° 和 12° ,以此分析隧道的风速分布特征。

3 不同隧道曲率半径对隧道射流流场的影响

3.1 风机位于入口60cm位置时

在风机位于隧道入口60cm位置、偏转角度为 0° 条件下,不同隧道曲率半径,风机出口下游不同位置的风速变化如图3所示。

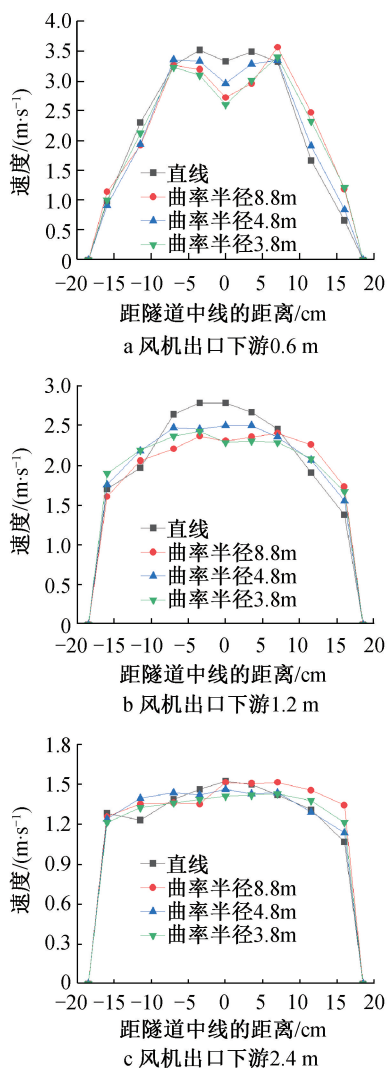


图3 不同隧道曲率下风机出口下游风速变化

Fig. 3 Wind speed variation downstream of fan outlet under different tunnel curvatures

在风机出口下游0.6m位置,风机风速表现为双股射流形态,从隧道左右壁面至隧道中线位置,风速均呈先快速增大再逐渐减小趋势。当隧道为直线时,在距中线-3.5cm和3.5cm区域,风速最大。随着隧道中线距离的减小,风速逐渐减小。在

距隧道中线0~7cm区域,风速出现明显差异。在距隧道中线>7cm区域,不同隧道曲率半径下的风速相差不大。

在风机出口下游1.2m位置,风机的射流气体表现为单股射流形态,随着距隧道中线距离的减小,风速逐渐增大。在距隧道中线-6~6cm区域,除隧道为直线外,其他隧道曲率半径的下风速均处于平稳状态。

在风机出口下游2.4m位置,射流气体发展完全,不同隧道曲率半径下的风速变化不大。当隧道曲率半径分别为直线、3.8、4.8和8.8m时,在隧道中线位置,风速变化范围在1.41~1.52m/s内,变化幅度小,随着射流气体持续向下游流动,最终风速将趋于平稳。

综上所述,当隧道曲率半径不同时,在风机出口下游0.6m位置,风机风速表现为双股射流形态,这是由于在射流初始阶段,双股射流独立存在,气流从出风口喷出后形成自由射流,此时射流的扩散范围尚未覆盖风机间距,每台风机的射流仅会卷吸其周围少量静止空气,2股相邻射流的扩散区域未重叠,因此呈现双股独立射流形态,风速从壁面到中线呈先增后减趋势,其中射流核心区风速最大。在射流发展阶段(风机出口1.2m位置),随着射流向下游流动,射流的卷吸作用持续增强,射流会不断裹挟周围更多的静止空气进入射流区域,导致射流的横向扩散范围逐渐扩大,当流动至1.2m处时,射流内部的动量交换达到整体平衡,原本独立的双股射流合并为单股连续射流,此时风速分布转变为随距中线距离减小而逐渐增大。在风机出口2.4m位置,射流已充分卷吸隧道内的空气,射流区域覆盖整个隧道断面,速度梯度大幅减小,同时曲线隧道的二次流效应也因气流沿程流动而逐渐减弱,最终趋于平稳。在隧道中线位置,相比其他隧道曲率半径,隧道为直线时的风速最大,曲率半径为3.8m时的最大风速值最小。

3.2 风机位于直线和曲线交界位置时

在风机位于直线和曲线交界位置、偏转角度为 0° 条件下,风机出口下游0.6和2.4m位置的风速变化如表1,2所示。

由表1可知,在风机出口下游0.6m位置,从隧道两侧壁面至隧道中线,随着距隧道中线距离的减小,不同隧道曲率半径下的风速呈先增大再减小趋势,最大风速位于-7cm和7cm位置,且隧道凹侧风速高于凸侧。在隧道中线位置,不同隧道曲率半径下的风速逐渐减小。当气流从直线段进入曲线段

表 1 风机出口下游 0.6m 位置风速变化

Table 1 Wind speed variation at 0.6m downstream of fan outlet

距隧道中线 距离/cm	不同隧道曲率半径下风速/($m \cdot s^{-1}$)			
	直线	曲率半径 3.8m	曲率半径 4.8m	曲率半径 8.8m
-16.0	0.97	1.65	1.41	1.70
-11.5	2.16	2.72	2.28	2.53
-7.0	3.47	3.22	3.26	3.15
-3.5	3.28	2.98	2.99	2.90
0	2.69	2.61	2.92	2.65
3.5	3.14	3.04	2.82	2.70
7.0	3.59	2.77	3.02	2.96
11.5	2.72	1.44	1.98	2.36
16.0	1.52	0.73	1.07	1.38

表 2 风机出口下游 2.4m 位置风速变化

Table 2 Wind speed variation at 2.4m downstream of the fan outlet

距隧道中线 距离/cm	不同隧道曲率半径下风速/($m \cdot s^{-1}$)			
	直线	曲率半径 3.8m	曲率半径 4.8m	曲率半径 8.8m
-16.0	1.14	1.75	1.64	1.61
-11.5	1.17	1.37	1.55	1.57
-7.0	1.23	0.89	1.08	1.31
-3.5	1.35	0.43	0.76	1.18
0	1.31	0.38	0.65	1.05
3.5	1.40	0.45	0.67	0.87
7.0	1.40	0.55	0.57	0.70
11.5	1.58	0.67	0.58	0.53
16.0	1.47	0.79	0.54	0.51

时,由于运动轨迹受离心力影响,气流需克服隧道壁面的约束继续运动,导致流场内部产生压力差。在隧道凹侧,气流受离心力挤压,壁面附近压力升高,气流流速被迫加快,在隧道凸侧,气流受离心力作用,壁面附近压力降低,气流流速减缓。最终形成凹侧风速高于凸侧的分布特征,且曲率半径越小,离心力越强,凹侧与凸侧的风速差异越显著。

由表 2 可知,在风机出口下游 2.4m 位置,当隧道为直线时,隧道凸侧的风速大于凹侧,最大风速位于距隧道中线 11.5cm 位置。当隧道曲率半径为 3.8~8.8m 时,隧道凹侧的风速大于凸侧,最大风速位于距隧道中线 -16cm 位置,且曲率半径越大,风速越小。在距隧道中线 16cm 位置,相比其他隧道曲率半径隧道,隧道为直线时的风速最大,隧道曲率半径为 3.8m 时风速最小。因此,在隧道凹侧区域,曲率半径越大,风速越小,在隧道凸侧区域,曲率半径越大,风速越大。

4 射流风机偏转角度对隧道射流流场的影响

4.1 风机位于入口 60cm 位置时

在风机位于隧道入口 60cm 位置、隧道为直线条件下,风机出口下游不同位置的风速变化如图 4 所示。

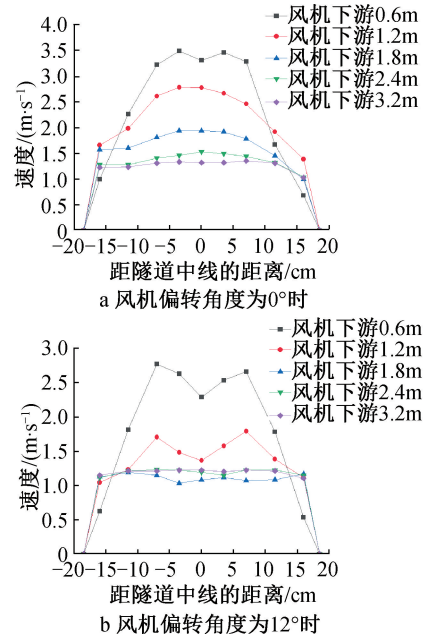


图 4 隧道为直线时不同风机偏转角度下风速变化

Fig. 4 Wind speed variation at different fan deflection angles when the tunnel is straight

当风机偏转角度为 0° 时,风机出口下游各位置的风速均以隧道中线呈对称分布,在距风机出风口下游 0.6m 位置,风机风速表现为双股射流形态,最大风速位于距隧道中线 -3.5cm 和 3.5cm 位置。在距风机出风口下游 $\geq 1.2m$ 位置,风机风速表现为单股射流形态,最大风速位于距隧道中线 -3.5~3.5cm 范围内,随着距风机出风口距离的增大,距隧道中线区域的最大风速逐渐减小,其中距风机出风口下游 1.2m 位置,风速最大,距风机出风口下游 3.2m 位置,最大风速值最小。因此,在隧道为直线条件下,随着距风机出风口距离的增大,在隧道中间区域,风速逐渐增大。

当风机偏转角度为 12° 时,风机出口下游各位置的风速变化与风机偏转角度为 0° 时基本一致。当距风机出风口下游 $< 1.2m$ 时,风机风速表现为双股射流形态,最大风速位于距隧道中线 -7cm 和 7cm 位置。当距风机出风口下游 $\geq 1.8m$ 时,风机风速表现为单股射流形态。在距风机出风口下游 1.8m 和 3.2m 位置,风速几乎相同。根据以上分析,在隧道为直线条件下,当风机偏转角度为 0° 和 12° 时,距风机出风口下游 0.6m 位置的风速最大。当风机偏转角度为 0° ,距风机出风口下游 3.2m 位置,风速最小,当风机偏转角度为 12° 时,在距风机出风口下游 1.8m 和 3.2m 位置,风速几乎相同。距风机出风口下游 0.6m 位置,射流仍处于初始段末尾,此时射流核心区未被明显掺混,气流速度基本接近风机出口

流速,仅因少量卷吸导致轻微衰减,因此在不同偏转角度下,0.6m处都是全下游范围内风速最大的位置。当偏转角度为 0° 时,距风机出风口下游 $>1.2\text{m}$ 位置,射流完成双股至单股合并,并进入主体段,此时卷吸的静止空气量大幅增加,射流动量持续分散,速度随距离呈线性衰减,最终在最远测点处达到最小值。当偏转角度为 12° 时,射流的初始动能需另外分配一部分用于改变传播方向,导致射流在前期($<1.8\text{m}$)的掺混剧烈,能量损耗增大。当到达 1.8m 时,射流已完成合并,并进入稳定的主体段,此时掺混带来的速度衰减速率显著减缓,因此 $1.8\sim 3.2\text{m}$,风速几乎无变化。

在风机位于隧道入口 60cm 位置、隧道曲率半径为 4.8m 条件下,当风机偏转角度为 0° 、 12° 时,风机出口下游不同位置的风速变化,如图5所示。

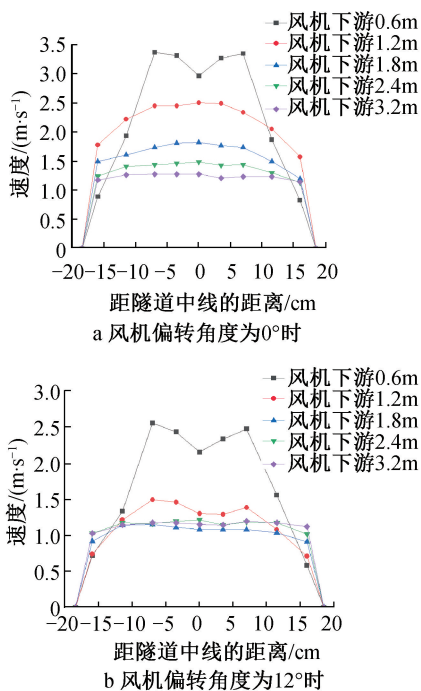


图5 隧道曲率半径为 4.8m 时不同风机偏转角度下风速变化

Fig. 5 Wind speed variation at different fan deflection angles when the curvature radius of the tunnel is 4.8m

在隧道曲率半径为 4.8m 条件下,当风机偏转角度为 0° 和 12° 时,在距风机出风口下游 0.6m 位置,风速最大,相比风机偏转角度为 0° 时,最大风速分别明显减小。当风机偏转角度为 0° 时,相比其他位置,在距风机出风口下游 3.2m 位置,最大风速值最小,且距风机出风口越远,风速越小。当风机偏转角度为 12° 时,在距风机出风口下游 $>1.8\text{m}$ 区域,各位置风速变化趋势小,基本处于稳定状态。由于风机偏转角度为 0° 时,风机出风口方向与隧道轴线

一致,射流能量主要沿隧道长度方向扩散,卷吸和摩擦损失相对平缓,能量衰减持续到 3.2m 处。风机偏转角度为 12° 时,射流刚出口(0.6m 处)就因方向偏移,与周围空气的摩擦、碰撞比 0° 时更剧烈,导致最大风速明显减小。随着射流持续前进,射流能量快速损耗,在下游 $>1.8\text{m}$ 处就达到卷吸损失和能量补充的平衡状态,在此阶段,风速基本稳定。

4.2 风机位于直线和曲线交界位置时

在风机位于直线和曲线交界位置、隧道曲率半径为 4.8m 条件下,当风机偏转角度为 0° 和 12° 时,风机出口下游不同位置的风速变化如表3、4所示。

表3 风机偏转角度为 0° 时的风速变化

Table 3 Wind speed variation when the wind turbine deflection angle is 0°

距隧道中线 距离/cm	风机出口下游位置/m				
	0.6	1.2	1.8	2.4	3.2
-16.0	1.41	2.27	1.98	1.66	1.33
-11.5	2.29	2.36	1.82	1.54	1.33
-7.0	3.24	2.31	1.66	1.13	0.99
-3.5	2.98	2.36	1.38	0.74	0.86
0	2.91	2.20	1.07	0.66	0.79
3.5	2.82	1.90	0.66	0.68	0.79
7.0	2.99	1.60	0.38	0.57	0.74
11.5	1.98	1.04	0.33	0.56	0.68
16.0	1.10	0.78	0.27	0.51	0.64

表4 风机偏转角度为 12° 时的风速变化

Table 4 Wind speed variation when the wind turbine deflection angle is 12°

距隧道中 线距离/cm	风机出口下游位置/m				
	0.6	1.2	1.8	2.4	3.2
-16.0	0.84	1.56	1.63	1.31	1.28
-11.5	1.92	1.49	1.53	1.42	1.41
-7.0	2.41	1.09	1.28	1.40	1.32
-3.5	2.04	0.97	1.19	1.27	1.24
0	1.74	1.08	0.99	1.14	1.10
3.5	1.92	1.07	0.80	0.99	1.03
7.0	2.23	1.05	0.75	0.91	0.93
11.5	1.85	0.51	0.63	0.82	0.84
16.0	0.65	0.22	0.61	0.69	0.70

由表3可知,在隧道曲率半径为 4.8m 条件下,当风机偏转角度为 0° 时,在距风机出风口下游 0.6m 位置,从隧道凹侧至凸侧,风速呈先增大再减小趋势,且隧道凹侧的风速明显大于凸侧。当风机出风口下游距离 $>1.2\text{m}$ 时,最大风速位于距隧道中线距离 -16cm 区域,其中在风机出风口下游 1.2m 位置风速最大,在风机出风口下游 3.2m 位置最大风速值最小。在距隧道中线距离 -16cm 区域的风速明显大于距隧道中线距离 16cm 区域,随着距风机出风口下游距离增大,在隧道凹侧,风速逐渐减小。

由表4可知,隧道曲率径为4.8m条件下,当风机偏转角度为 12° 时,风机出口下游各位置风速的变化趋势与风机偏转角度为 0° 时基本一致。当距风机出风口下游距离 $>1.2\text{m}$ 时,最大风速位于距隧道中线 -16cm 位置,明显大于距隧道中线 16cm 位置风速。相比其他区域,在距风机出风口下游 3.2m 区域的最大风速值最小,因此,当距风机出风口下游距离 $>1.2\text{m}$ 时,从隧道凹侧至凸侧,风速逐渐减小。风机的通风效果本质依赖于射流的轴向动量,当风机偏转 12° 时,射流的主方向不再完全贴合隧道轴线,而是产生1个侧向分量,该侧向分量无法有效推动空气沿隧道下游流动,反而会与隧道壁面碰撞,产生额外的冲击损失和涡流损耗,最终沿隧道下游方向的有效动量显著 $<0^\circ$ 偏转时,导致 12° 度偏转时风速减小。

5 工程建议

在实际隧道通风工程中,为减少污染物聚集,可选用大功率的风机和排风设备,在隧道入口和出口设置风机。当隧道为长大隧道时,应选择合适的距离分段设置风机,风机应尽量设置在隧道直线区域。

当风机布设在隧道直线与曲线交界区域时,隧道中的空气射流呈不对称分布,因此,将风机安装在直线段可提高隧道内风速,若风机安装在弯曲段,将风机出口向下偏移一定角度,可使射流在隧道内快速稳定。

6 结语

1)在隧道曲率半径不同条件下,当风机位于隧道入口 60cm 位置、偏转角度为 0° 时,在隧道中线位置,隧道为直线时,相比其他隧道曲率半径,风速最大;当风机位于直线和曲线交界位置、偏转角度为 0° 时,隧道为直线时,最大风速位于 -7cm 和 7cm 位置,相比其他隧道曲率半径,风速最大,且隧道凹侧风速高于凸侧。

2)在隧道为直线条件下,当风机偏转角度为 0° 和 12° 时,相比风机出风口下游其他位置,距风机出风口下游 0.6m 位置,风速最大。当风机偏转角度为 0° ,距风机出风口下游 3.2m 位置,风速最小,当风机偏转角度为 12° 时,在距风机出风口下游 1.8m 和 3.2m 位置,风速几乎相同。

3)在风机位于直线和曲线交界位置、风机偏转角度分别为 0° , 12° 时,当隧道曲率径为 4.8m 时,在距风机出风口下游 0.6m 位置,从隧道凹侧至凸侧,风速呈先增大再减小趋势。随着距风机出风口下游距离增大,从隧道凹侧,风速逐渐减小。

参考文献:

- [1] 邓阳阳,翟若岱,刘占宁,等.基于PyroSim的单向公路隧道局部抽烟设计与通风方案优化[J].科技与创新,2024(20):27-32.
DENG Y Y,ZHAI R D,LIU Z N,et al. Local smoking design and ventilation scheme optimization of one-way highway tunnel based on PyroSim [J]. Science and technology & innovation, 2024 (20):27-32.
- [2] 周健民,成瑾,钟珂,等.纵向通风在超长隧道中排烟效果的研究[J].洁净与空调技术,2024(3):6-11.
ZHOU J M,CHENG J,ZHONG K,et al. Study on the smoke exhaust effect of longitudinal ventilation in ultra-long tunnels [J]. Contamination control & air-conditioning technology,2024(3):6-11.
- [3] 王勇,贺龙鹏,张嘉轩,等.压入式通风条件下高地温隧道降温效果研究[J].施工技术(中英文),2024,53(16):55-61.
WANG Y,HE L P,ZHANG J X,et al. Study on cooling effect of high ground temperature tunnel under forced ventilation [J]. Construction technology,2024,53(16):55-61.
- [4] 李克刚,周高青,满永平.某特长铁路隧道斜井转正洞施工通风方式研究[J].施工技术(中英文),2024,53(3):110-116,122.
LI K G,ZHOU G Q,MAN Y P. Research on ventilation methods for the construction of a special long railway tunnel with an oblique shaft turning into a main tunnel [J]. Construction technology,2024,53(3):110-116,122.
- [5] 肖晨.多工作面特长隧道施工通风环境参数监测分析[J].施工技术(中英文),2023,52(23):43-49.
XIAO C. Monitoring analysis of ventilation environment parameters for Multi-working face extra-long tunnel construction [J]. Construction technology,2023,52(23):43-49.
- [6] 高运超,鲍乾,李宏伟,等.纵向通风对矿山隧道火灾烟气控制影响的模拟研究[J].当代化工研究,2024(18):57-59.
GAO Y C,BAO Q,LI H W,et al. Simulation study on effects of longitudinal ventilation on fire smoke control in mine tunnels[J]. Modern chemical research,2024(18):57-59.
- [7] 张宇金.纵向通风作用下公路隧道火灾烟气运输规律研究[J].四川职业技术学院学报,2024,34(4):149-153.
ZHANG Y J. Research on the transport law of fire smoke in highway tunnels under vertical ventilation [J]. Journal of Sichuan vocational and technical college,2024,34(4):149-153.
- [8] 曹峰,王海林,刘羿辰,等.特长公路隧道群火灾烟气特性及通风方式研究[J].公路交通技术,2024,40(4):84-93,102.
CAO F,WANG H L,LIU Y C,et al. Study on fire smoke characteristics and ventilation mode of extra-long highway tunnel group [J]. Technology of highway and transport,2024,40(4):84-93,102.
- [9] 宋英华,夏小雨,雷鹏,等.纵向通风下卜型分岔隧道火灾烟气流动特性的数值模拟分析[J].中国安全生产科学技术,2023,19(12):46-51.
SONG Y H,XIA X Y,LEI P,et al. Numerical simulation analysis on smoke movement characteristics in Bu-type bifurcated tunnel fire under longitudinal ventilation [J]. Journal of safety science and technology,2023,19(12):46-51.