

基于流体力学相似理论的“互补式+排烟竖井” 组合通风模型试验研究

邓敏¹, 闵泉¹, 熊雅², 宋晓², 李勇², 任锐²

(1. 武汉中交交通工程有限责任公司, 湖北 武汉 430056; 2. 长安大学 公路学院)

摘要:为研究“互补式通风+排烟竖井”组合通风方式隧道内风速变化规律,采用物理试验研究手段,对初步拟定的隧道通风方案进行模拟研究。针对营尔岭隧道建立1:10的通风物理模型,观察隧道模型各区段内气体的流动状态。研究结果表明:竖井采取排风状态,打开上行隧道竖井阀门,增大竖井风机频率时,上行隧道送风段及其短道段风速保持稳定,排风段风速减小;下行隧道送风段内竖井到隧道出口段风速减小,竖井到右线横通道段风速保持稳定,短道段和下行隧道排风段风速增大;打开下行隧道竖井阀门,增大竖井风机频率时,上行隧道内的风速均保持增大;下行隧道排风段风速有缓慢增加趋势,但总体上各个区段的风速基本保持稳定。

关键词:公路隧道;互补式通风;排烟竖井;模型试验

1 引言

为了保证司乘人员在隧道内行车的安全性和舒适性,需要对隧道内空气质量进行控制,但高昂的土建成本、设备成本以及运营费用是制约隧道通风系统的主要因素,因此如何在经济节能的情况下满足隧道通风要求是公路隧道运营研究的重点。竖井送排组合的纵向通风方式是中国特长公路隧道的主流通风方式,但后期运营成本较高;互补式通风方式是一种新型通风方式,通过换气通道将两条隧道联系成整体通风网络,解决左右线隧道通风负荷不均匀现象,能够降低后期运营成本,但其适用程度有限,因此将竖井送排组合通风方式与互补式通风方式相结合,扩大互补式通风的适用范围,减小左右线隧道通风负荷差距,降低公路隧道运营成本,实现经济节能的目的。

蒋树屏基于浙江大溪岭—湖雾岭隧道提出了竖井送排式通风压力、风量、风速计算模式,验证了竖井送排式通风方式的可行性;方磊等和韩星等研究了竖井送排式通风方式竖井排风口、竖井数量及其间距对隧道通风的影响;蒋鹏飞等通过建立隧道大比例通风物理模型,主要研究了竖井送排组合情况时的通风井关键参数设置与隧道运营情况;另一方面,互补式通风方

式作为一种新型的通风方式,相关研究者一直致力于相关方面的研究,如王亚琼等通过1:10的物理试验模型研究大别山公路隧道互补式通风方案的可行性及换气风量对隧道通风的影响,得出了横通道换气风量变化对隧道内各段风速和风压的影响规律,之后基于隧道海拔和温度、隧道长度、交通量等相关因素提出了公路隧道互补式通风的适应性条件;夏丰勇、胡彦杰等通过理论推导、数值模拟等手段对互补式通风的应用场景及其适用性进行了分析;张京龙等通过数值模拟软件研究分析了横通道角度及横通道风机位置对互补式通风系统的影响;罗小荣就勐捧隧道采用平导式、静电除尘、互补式通风的适用条件、优势进行了分析比较;郭志杰就金门隧道进行通风方案比选研究,认为互补式、吸尘式通风能避免复杂地形条件下竖斜井的选址问题,但特长隧道需要额外添加专用排烟井。

该文依托荣乌高速公路(山东荣成市到内蒙古乌海市)营尔岭隧道工程,建立物理模型试验,分析隧道“双洞互补式+排风井”组合通风方式竖井排风对隧道通风效果的影响,论证该通风方式的可行性及可靠性。

2 工程概况

营尔岭隧道是荣乌高速公路中河北徐水至涞源段

全线最长的隧道,左线全长 5 656 m,右线全长 5 677.3 m。隧道最大埋深约 482 m,平均海拔 1 000 m,设计行车速度 100 km/h,为分离式双洞单向三车道隧道,隧道两洞中轴线相距 34 m。其中左线下坡隧道长度 5 656 m,坡度-2.15%;右线上坡隧道长度 5 677.3 m,坡度+2.15%,隧道横断面积 99.47 m²。预测近期交通量为 29 063 pcu/d,远期交通量为 60 296 pcu/d。通过计算得到设计需风量:左线近期最大需风量为 468.84 m³/s,远期最大需风量为 571.36 m³/s;右线近期最大需风量为 767.23 m³/s,远期最大需风量为 1 152.94 m³/s。

由此可以看出:营尔岭隧道运营所需需风量左、右线近期和远期差异较大,隧道运营近期右线需风量是左线需风量的 1.64 倍,远期甚至达到了 2.02 倍,若单纯采用射流风机纵向通风方式将会大大增加运营成本,而且隧道内纵向通风风速甚至会超过规范要求限值,因此采用双洞互补式通风方式,同时辅以竖井用于

火灾状况下的烟雾排放。

3 物理模型试验建立

(1) 模型试验原理

公路隧道通风物理模型与隧道原型应满足相似理论,这是进行物理模型试验的理论基础。对两个流动系统力学相似应满足几何相似、运动相似和动力相似条件。在模型试验中,假定隧道内空气为不可压缩的连续介质,且为定常流,空气在流动过程中假定为等温流动,能量保持守恒状态。

(2) 模型尺寸与试验平台

营尔岭隧道全长约 5.6 km,此物理模型包含主隧道 2 条、互补横道 1 个和竖井 1 个,对模型挠度、试验场地以及技术可行性等因素进行综合考虑,模型比例尺最终确定为 1:10,原型与模型的主要几何尺寸如表 1 所示。

表 1 营尔岭隧道原型与模型主要几何尺寸

名称	隧道一般断面				隧道换气断面			
	断面高度/m	断面宽度/m	断面面积/m ²	当量直径/m	断面高度/m	断面宽度/m	断面面积/m ²	当量直径/m
原型	9.830	10.910	99.470	9.720	9.830	5.000	44.900	6.530
模型	0.983	1.090	9.950	0.972	0.983	0.500	4.490	0.653

为缩短隧道模型长度,运用等效摩阻原理使用阻力格栅来替代相应长度的模型,风流通过阻力格栅时产生局部损失,而隧道没有添加阻力格栅的区段风流流动稳定,对试验时的所有影响因素综合考虑,确定在每条隧道内各添加 14 个阻力格栅,模型长度等效缩短为 77 m,每一个阻力格栅等效(560-77)/14=34.5 m。隧道模型总体布置如图 1 所示。

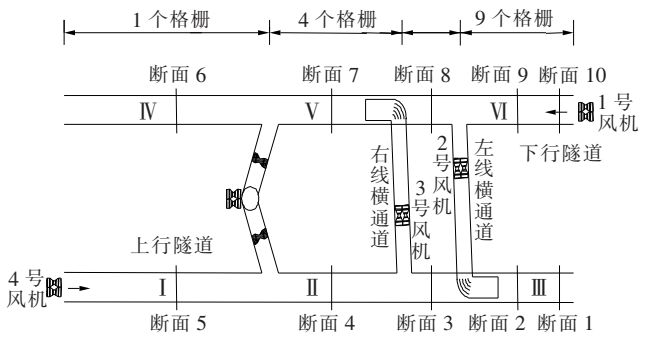


图 1 隧道模型总体布置图

4 研究结果与分析

试验时保持 1 号和 4 号风机打开后不变化,以模拟隧道自然通风形成的自然通风力,分别调节 2、3 和 5 号轴流风机,轴流风机频率变化均为:20、25、30、35、40、45 Hz。如此进行组合变化,分 5 种工况进行试验,第 1 类是竖井排风同时打开 1 号竖井阀门,第 2 类是竖井排风同时打开 2 号竖井阀门。

4.1 竖井排风同时打开左线(1 号)竖井阀门试验结果分析

当火灾发生时,打开 1 号竖井阀门,竖井采取排风状态,使火灾烟气尽快从右线横通道进入下行隧道,然后从下行隧道出口处排出;当火灾发生位置处于 V、VI 区段时,打开 1 号竖井阀门,竖井采取排风状态,使火灾烟气尽快从竖井排出。

以隧道的行车方向为参考,开启射流风机增压,开启 1 号和 2 号换气通道,两条换气通道将上坡隧道排

风段与下坡隧道送风段相连通,将上坡隧道送风段与下坡隧道排风段相连,形成双 U 形通风段。试验工程中,固定 2 号风机和 3 号风机频率,调整 5 号风机频率

分别为 20、25、30、35、40、45 Hz。

工况 1:2 号风机频率为 20 Hz,3 号风机频率为 20 Hz,5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 2)。

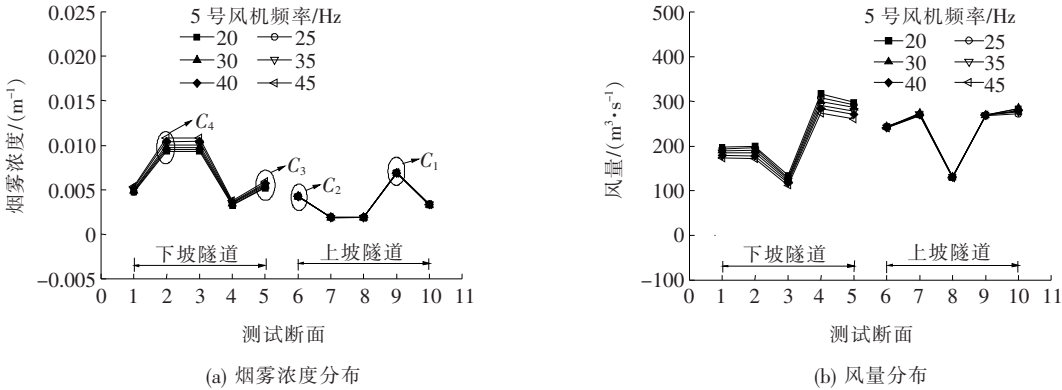


图 2 工况 1 试验结果(2 号、3 号风机频率均为 20 Hz)

由图 2 可以看出:当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 0.1%,上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 1.1%;下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 14.6%,下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增

加 16.3%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 0.1%,送风段通风量减小 0.4%,下坡隧道排风段减小 12.6%,送风段减小 14%。

工况 2:2 号风机频率为 20 Hz,3 号风机频率为 25 Hz,5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 3)。

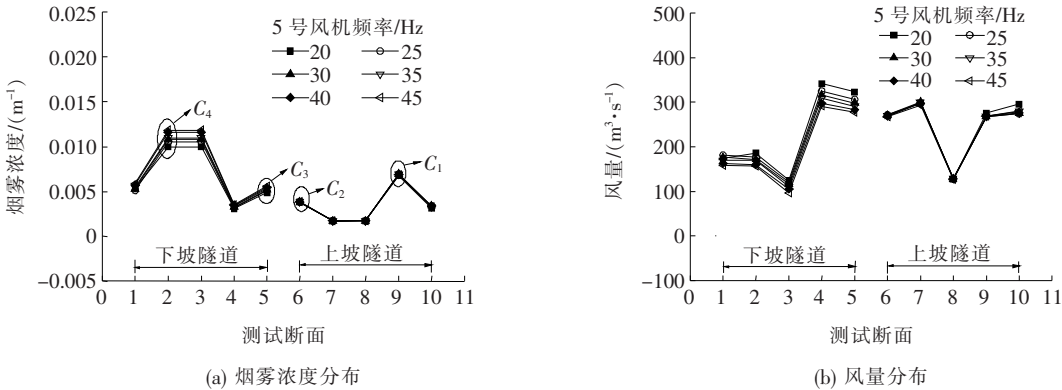


图 3 工况 2 试验结果(2 号、3 号风机频率分别为 20、25 Hz)

由图 3 可以看出,当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 增加 2.3%,上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 0.9%;下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 14.7%,下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增加 7.4%。

(2) 上坡隧道排风段通风量减小 2.3%,送风段通风量减小 2.1%,下坡隧道排风段减小 14.2%,送风段减小 15.5%。

30 Hz,5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 4)。

由图 4 可以看出,当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 0.2%,上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 0.7%;下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 17.7%,下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增加 8.2%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 0.2%,送风段通风量减小 3.6%,下坡隧道排风段减小 14.3%,送风段减小 7.2%。

工况 3:2 号风机频率为 20 Hz,3 号风机频率为

工况 4:2 号风机频率为 20 Hz,3 号风机频率为 35 Hz,5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 5)。

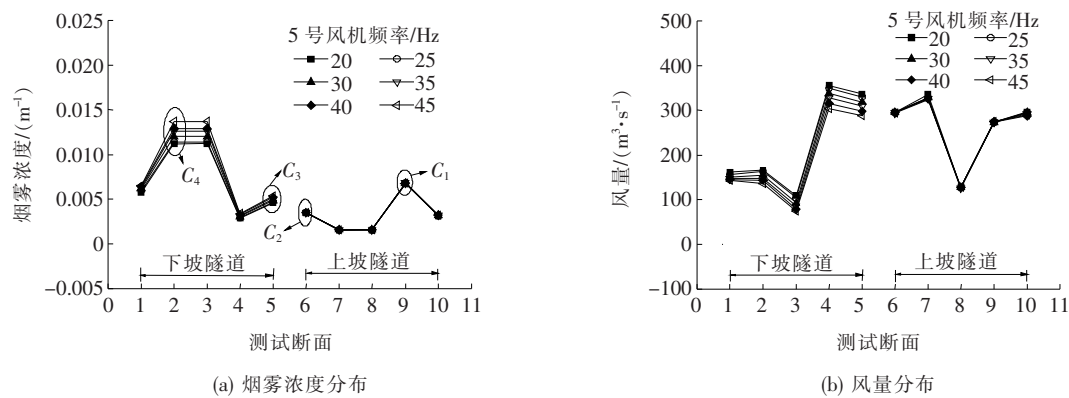


图 4 工况 3 试验结果(2 号、3 号风机频率分别为 20、30 Hz)

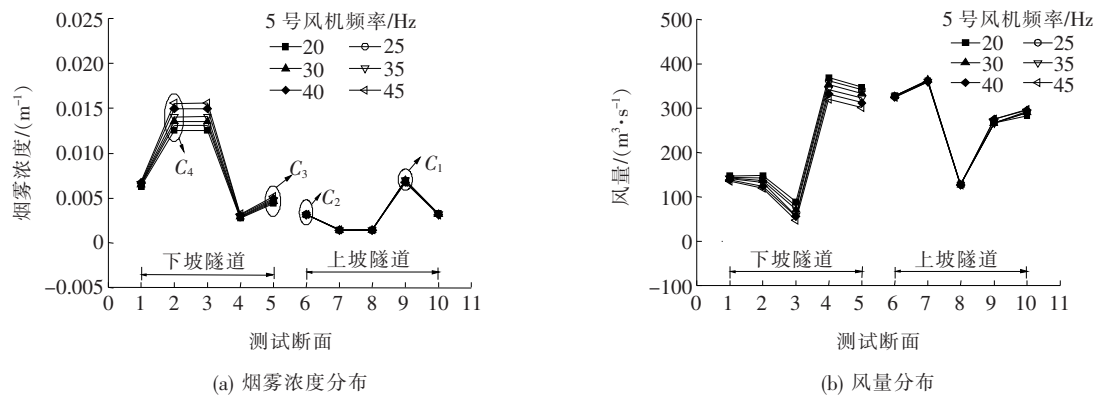


图 5 工况 4 试验结果(2 号、3 号风机频率分别为 20、35 Hz)

由图 5 可以看出,当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 3.3%,上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 0.9%;下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 16.6%,下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增

加 9.8%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 3.4%,送风段通风量减小 1%,下坡隧道排风段减小 13.3%,送风段减小 19.2%。

工况 5:2 号风机频率为 20 Hz,3 号风机频率为 40 Hz,5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 6)。

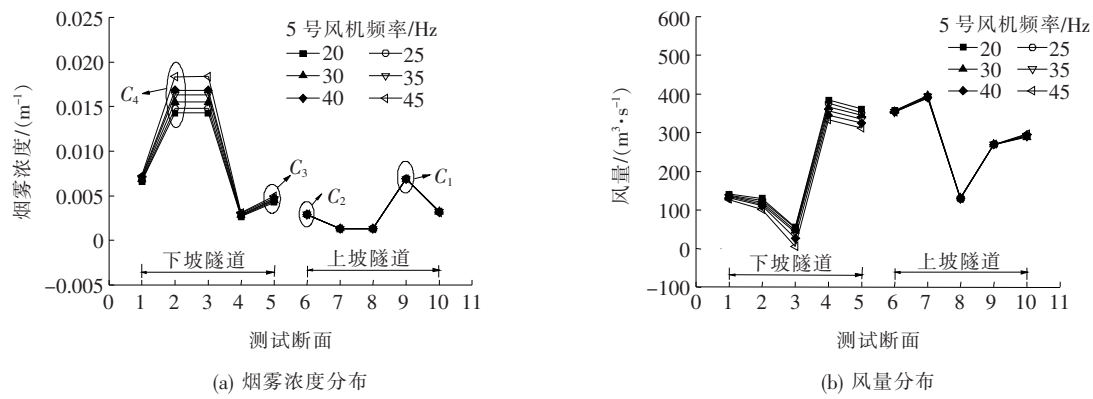


图 6 工况 5 试验结果(2 号、3 号风机频率分别为 20、40 Hz)

由图 6 可以看出,当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 0.3%, 上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 1%; 下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 15.9%, 下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增加 28.3%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 0.3%, 送风段通风量减小 0.9%, 下坡隧道排风段减小 13.4%, 送风段减小 8.1%。

综合工况 1~5, 打开上行隧道竖井阀门, 竖井采取排风状态, 保持横通道风机频率不变, 增大竖井风机频率时, 上行隧道送风段及其短道段风速保持稳定, 排风段风速减小; 下行隧道送风段内竖井到隧道出口段风速减小, 竖井到右线横通道段风速保持稳定, 短道段和下行隧道排风段风速增大, 此工况利于调节下行隧

道排风段污染物浓度。

4.2 竖井排风同时打开右线(2号)竖井阀门试验结果分析

当火灾发生位置处于 I 区段时, 打开 2 号竖井阀门, 竖井采取排风状态, 使火灾烟气尽快从竖井排出。

以隧道的行车方向为参考, 开启射流风机增压, 开启 1 号和 2 号换气通道, 两条换气通道将上坡隧道排风段与下坡隧道送风段相连通, 将上坡隧道送风段与下坡隧道排风段相连, 形成双 U 形通风段。试验工程中, 固定 2 号风机和 3 号风机频率, 调整 5 号风机频率分别为 20、25、30、35、40、45 Hz 等, 同样分为 5 种工况进行讨论。

工况 1: 2 号风机频率为 20 Hz, 3 号风机频率为 20 Hz, 5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 7)。

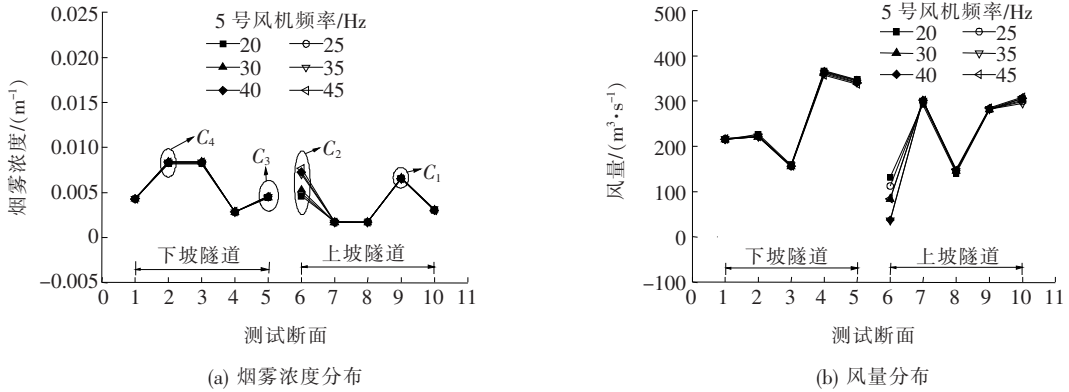


图 7 工况 1 试验结果(2 号、3 号风机频率均为 20 Hz)

由图 7 可以看出, 当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 1.3%, 上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 11.1%; 下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 3.3%, 下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增

加 2.2%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 1.3%, 送风段通风量增加 3.2%, 下坡隧道排风段减小 3%, 送风段减小 2.1%。

工况 2: 2 号风机频率为 20 Hz, 3 号风机频率为 25 Hz, 5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 8)。

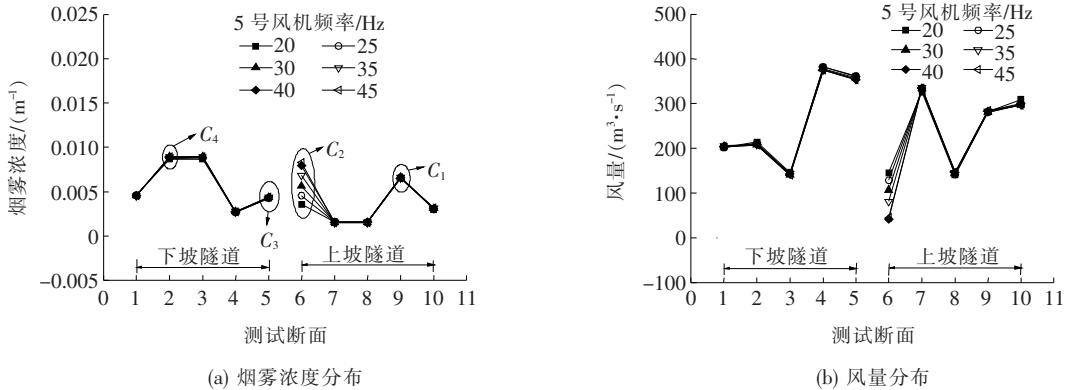


图 8 工况 2 试验结果(2 号、3 号风机频率分别为 20、25 Hz)

由图 8 可以看出,当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 0.7%,上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 114.8%;下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 2.6%,下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增

加 3%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 0.7%,送风段通风量增加 2.7%,下坡隧道排风段减小 1.9%,送风段减小 2.9%。

工况 3:2 号风机频率为 20 Hz,3 号风机频率为 30 Hz,5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 9)。

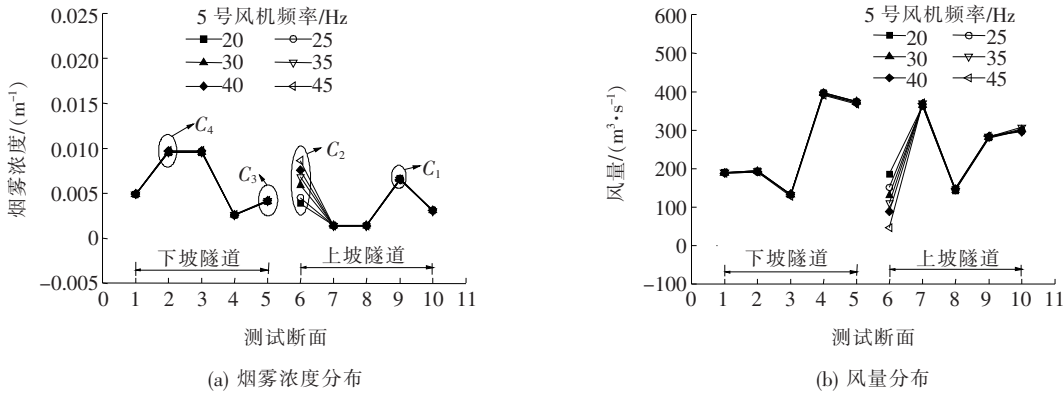


图 9 工况 3 试验结果(2 号、3 号风机频率分别为 20、30 Hz)

由图 9 可以看出,当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 1.7%,上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 83.1%;下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 2.2%,下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增

加 1.8%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 1.8%,送风段通风量增加 2.2%,下坡隧道排风段减小 1.7%,送风段减小 1.7%。

工况 4:2 号风机频率为 20 Hz,3 号风机频率为 35 Hz,5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 10)。

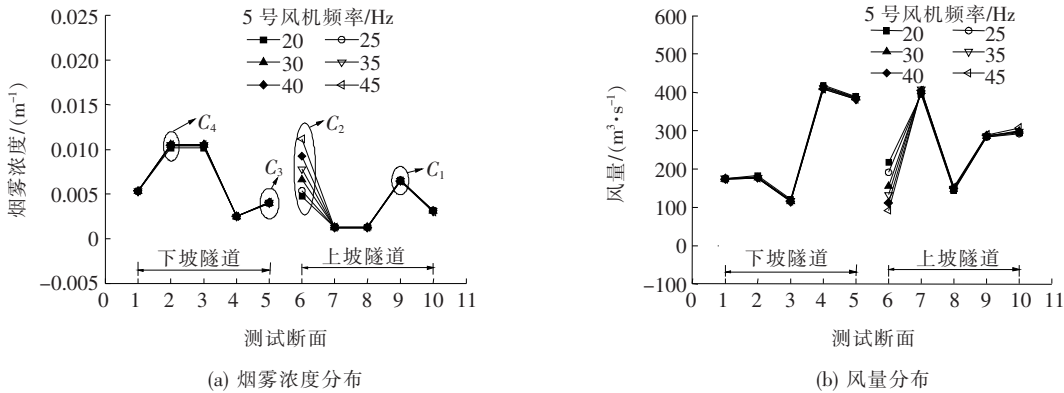


图 10 工况 4 试验结果(2 号、3 号风机频率分别为 20、35 Hz)

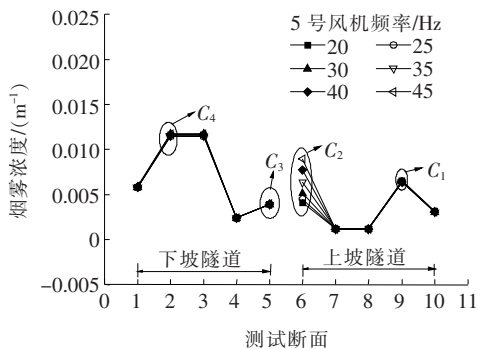
由图 10 可以看出,当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 1.7%,上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 135.6%;下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 1.6%,下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增

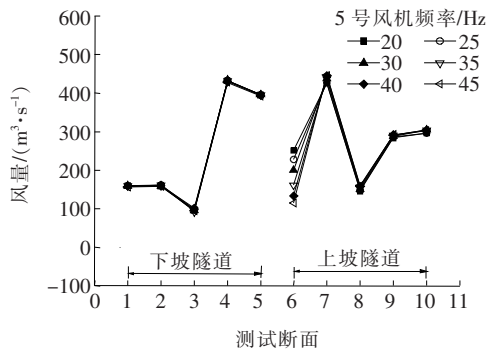
加 3.2%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 1.8%,送风段通风量增加 2.7%,下坡隧道排风段减小 1.8%,送风段减小 3.1%。

工况 5:2 号风机频率为 20 Hz,3 号风机频率为 40 Hz,5 号风机频率从 20~45 Hz 变化(图 11)。



(a) 烟雾浓度分布



(b) 风量分布

图 11 工况 5 试验结果(2 号、3 号风机频率分别为 20、40 Hz)

由图 11 可以看出,当 5 号风机频率从 20 Hz 变化到 45 Hz 时:

(1) 上坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_1 减小 2.5%,上坡隧道的送风段污染物浓度最大值 C_2 增加 117.5%;下坡隧道的排风段污染物浓度最大值 C_3 增加 1%,下坡隧道送风段污染物浓度最大值 C_4 增加 0.7%。

(2) 上坡隧道排风段通风量增加 2.6%,送风段通风量增加 4.8%,下坡隧道排风段减小 0.6%,送风段减小 0.8%。

综合分析工况 1~5,打开下行隧道竖井阀门,竖井采取排风状态,保持横通道风机频率不变,增大竖井风机频率时,上行隧道内各个区段风速均减小;下行隧道内各个区段风速基本保持稳定,有缓慢减小的趋势。

5 结论

以流体力学相似理论为基础,建立了营尔岭隧道组合通风物理模型试验系统,通过组合通风物理模型试验结果分析,得到以下结论:

(1) 打开上行隧道竖井阀门,竖井采取排风状态,保持横通道风机频率不变,增大竖井风机频率时,上行隧道送风段及其短道段风速保持稳定,排风段风速减小;下行隧道送风段内竖井到隧道出口段风速减小,竖井到右线横通道段风速保持稳定,短道段和下行隧道排风段风速增大,此工况利于调节下行隧道排风段污染物浓度。

(2) 打开下行隧道竖井阀门,竖井采取排风状态,保持横通道风机频率不变,增大竖井风机频率时,上行隧道内各个区段风速均减小;下行隧道内各个区段风

速基本保持稳定,有缓慢减小的趋势。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015(5).
- [2] 洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设, 2015(2).
- [3] 蒋树屏. 公路隧道竖井送排通风模式及工程应用[J]. 世界隧道, 1998(4).
- [4] 方磊, 谢永利, 李宁军. 公路隧道竖井送排式通风排风口角度优化模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2005(5).
- [5] 韩星, 张旭. 公路隧道纵向送排式通风竖井数量及其间距研究[J]. 现代隧道技术, 2006(3).
- [6] 蒋鹏飞, 万剑平, 喻波, 等. 雪峰山隧道通风模型实验设计研究[J]. 中南公路工程, 2006(1).
- [7] 王亚琼, 夏丰勇, 谢永利, 等. 特长公路隧道双洞互补式通风物理模型试验[J]. 中国公路学报, 2014(6).
- [8] 王亚琼, 蒋学猛, 武义凯, 等. 公路隧道双洞互补式通风适用性分析[J]. 现代隧道技术, 2015(3).
- [9] 夏丰勇. 特长公路隧道双洞互补式通风数值模拟研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.
- [10] 夏丰勇, 王亚琼, 谢永利. 公路隧道双洞互补式通风的设计方法与试验[J]. 公路交通科技, 2015(3).
- [11] 胡彦杰, 邓敏, 杨涛. 双洞互补式通风在大别山隧道中的应用研究[J]. 交通科技, 2011(2).
- [12] 武金明, 张京龙, 孙三祥, 等. 双洞互补式隧道通风横通道风机位置的确定[J]. 现代交通技术, 2012(2).
- [13] 张京龙, 孙三祥, 李含. 公路隧道双洞互补式通风系统横通道角度研究[J]. 公路交通技术, 2012(2).
- [14] 罗小荣, 任光远. 勤捧特长公路隧道通风方案[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(11).
- [15] 郭志杰, 何际军, 张灿程, 等. 金门特长公路隧道通风方案比选研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019(8).