

唐连波,陈世强.地铁过海区间隧道通风排烟多通风机组合优化[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(2):36-42.  
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.005

TANG L B, CHEN S Q. Optimizing Multi-fan Combination for Ventilation and Smoke Exhaust System of Undersea Subway Tunnel[J].  
Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(2): 36-42. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.005

# 地铁过海区间隧道通风排烟多通风机组合优化

唐连波<sup>1,2</sup>, 陈世强<sup>3\*</sup>

(1. 中国海洋大学 经济学院, 山东 青岛 266000; 2. 青岛地铁集团有限公司, 山东 青岛 266001;  
3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为解决长大隧道风量分配的问题,以通风机组合应用为切入点,依托青岛地铁8号线大洋站至青岛北站区间隧道,建立数值模型进行仿真计算,通过验证模型试验数据与数值仿真结果,得到隧道内部流场的分布特征,从速度-静压角度对比单抽与双压单抽2种风机组合工况下隧道通风系统的排烟效率与烟雾控制能力.结果表明:与单抽工况相比,双压单抽工况可以调节下游风机的压力大小和控制新鲜风流速度,降低排烟道的沿程阻力;隧道中X轴方向上的压力分布显示吊顶排烟口处存在等压线,双压单抽工况中污染气流从上游蔓延至下游所需要的压升高于单抽工况,而双压单抽工况下行车道下部的横向速度不足0.15 m/s,远低于单抽工况,说明双压单抽工况下的烟雾控制能力更强;在功率一定的情况下,双压单抽工况的有效出风率比单抽工况高20个百分点,因此,双压单抽工况的排烟效率要远高于单抽工况.所得结果验证了双压单抽风机组合应用的科学性,可为现场设计提供参考.

**关键词:**长大隧道;多通风机组合;内流流场;烟雾控制;排烟效率

**中图分类号:**U231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2025)02-0036-07

## Optimizing Multi-fan Combination for Ventilation and Smoke Exhaust System of Undersea Subway Tunnel

TANG Lianbo<sup>1,2</sup>, CHEN Shiqiang<sup>3</sup>

(1. School of Economics, Ocean University of China, Qingdao 266000, China; 2. Qingdao Metro Group Co., Ltd., Qingdao 266001, China;  
3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To address the airflow distribution in the long tunnel with large section, a combination of ventilation fans is utilized as the starting point. Relying on the tunnel section between Dayang Station and Qingdao North Station on Qingdao Metro Line 8, a numerical model is established to conduct simulation calculations. By cross-validating the experimental data with the numerical simulation results, the distribution characteristics of the flow field inside the tunnel are obtained. From the perspectives of velocity and pressure, a comparison is made between the smoke exhaust efficiency and smoke control capability of the tunnel ventilation system in two fan combination scenarios: the single exhaust fan and the combination of two forced fans with an exhaust fan. The research finds that in the single exhaust fan, excessively high fresh airflow velocity inhibites the ventilation capacity on the polluted side. In the combination of two combination of forced fans with an exhaust fan, the fresh

收稿日期:2024-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51864014);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ50232);交通运输部交通运输行业重点科技项目资助(2021-MS5-126)

\*通信作者, E-mail: shiqiangchen@hnust.edu.cn

air flow velocity could be controlled by adjusting the pressure of the downstream fan, thereby reducing the resistance along the smoke exhaust duct. The pressure distribution in the  $X$ -axis direction within the tunnel reveals the presence of equal pressure line at the ceiling smoke exhaust outlet. In the combination of two forced fans with an exhaust fan, the required pressure rise for the polluted airflow to propagate downstream is higher than that in the single fan. From the perspective of velocity, it can be observed that in the single fan, the transverse velocity at the lower part of the roadway reaches a minimum of around 0.5 m/s, whereas in the combination of two forced fans with an exhaust fan, the transverse velocity is less than 0.15 m/s, indicating a stronger smoke control capability in the dual-pressure single exhaust configuration. Through the comparison of exhaust effectiveness, it has been found that under the same power, the smoke exhaust efficiency in the combination of two forced fans with an exhaust fan is 20 percentage points higher than that in the single fan. The above conclusions have demonstrated the scientific validity of utilizing the combination of two forced fans with an exhaust fan, providing references for on-site design.

**Keywords:** long tunnel with large section; multi-fan combination; inner flow field; smoke control; smoke exhaust efficiency

随着基建的需要和施工技术的不断发展,国内隧道建设出现长大化、复杂化的趋势<sup>[1]</sup>.选用合适的通风方式可以有效提升长大隧道排烟系统的排烟能力,很多学者针对隧道的通风方式与通风机应用进行了大量研究.

目前,隧道通风的方法主要有横向通风、半横向通风和纵向通风等<sup>[2]</sup>,受制于土建投资与通风要求,纵向通风在长大隧道中的应用较多.在烟雾与温度控制方面,ZHANG等<sup>[3]</sup>通过数值模拟,推导考虑火灾距离因素的烟雾层厚度预测模型;姜学鹏等<sup>[4-5]</sup>针对集中排烟模式,研究侧部重点排烟模式下的烟雾流动情况,并对临界风速进行计算;易欣等<sup>[6]</sup>通过模型试验,讨论不同纵向通风风速条件下隧道温度的分布特征;钟委等<sup>[7]</sup>分析障碍物的位置变化对烟雾流动的影响,并预测逆流热烟气的温度衰减.从排烟效率方面考虑,梁园等<sup>[8-9]</sup>对比分析不同排烟口尺寸条件下的排烟效果;董向阳等<sup>[10]</sup>结合试验与数值模拟,分析地铁隧道排烟口对局部阻力的影响,并推导基于上下游能量差的排烟口局部阻力表达式;陈方兴等<sup>[11]</sup>通过对地铁隧道排烟效果的研究,发现双压双抽组合更能满足现场排烟的要求.在排烟方案方面,朱培根等<sup>[12-14]</sup>利用计算流体动力学(CFD)模拟研究地铁隧道中不同火灾位置的通风效果,并比较通风方式之间的优劣;朱祝龙等<sup>[15]</sup>论证长大地铁隧道过海区间采用全吊顶排烟或者局部吊顶排烟方案的可行性;GUO等<sup>[16]</sup>对南京地铁10号线进行单洞单线结构和单洞双线结构的火灾模拟,发现单洞双线结构设计更有利于火灾时人员的安全疏散.

以上研究大多集中在隧道本身结构对烟雾特征及排烟效果的影响,但在工程中,通风机的组合优化能进一步优化通风系统的排烟效果.为满足长大隧道的排烟需求,串联式抽出风机的应用场景逐渐增加,抽出式通风机的工作原理是通过在排烟口形成负压对两侧行车道同时做功,新鲜风流与污染风流受到同效的压力作用,行车道中火灾侧与非火灾侧的风量分配不合理,过大的非火灾侧的新鲜风流速度将会抑制整个通风系统的排烟效率,且排烟口的布设位置不同,将导致距离排烟口较远的隧道下部的烟雾无法有效控制.

因此,依托青岛地铁8号线大洋站至青岛北站区间海底地铁隧道搭设模型,利用FLUENT软件进行数值模拟,验证试验模型数据与模拟结果,通过多风机组合应用解决单抽风机(Single Exhaust Fan, SEF)中的风量分配不合理和烟雾难以控制等问题.

## 1 计算模型与模拟方案

### 1.1 模型搭建

依托青岛地铁8号线大洋站至青岛北站区间隧道海底段的通风排烟系统,根据雷诺相似准则建立线性尺寸为1:15的模型,模型系统及其主要功能段位如图1所示.

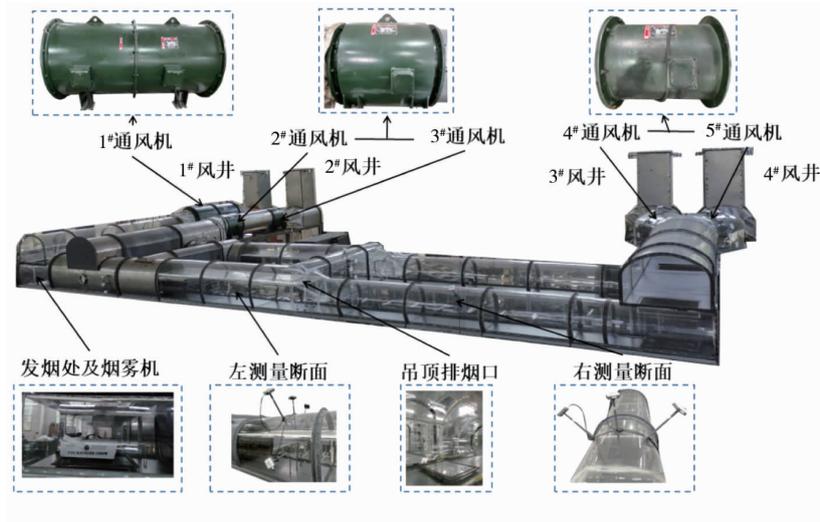


图 1 模型系统及其主要功能段位

模型隧道由以矿山法开挖的左侧隧道和以盾构法开挖的右侧隧道组成,在其对接位置设置吊顶排烟口,发烟装置设置在隧道左侧,左侧污染气流与右侧新鲜风流在吊顶排烟口下方进行汇流,从 2#风井排出。由于传感器设置数量等限制条件,无法通过试验获得较为详细的流场数据,因此,利用 SolidWorks 根据通风排烟试验平台建立 1 : 1 模型,并根据实际流域对模型进行简化,简化模型如图 2。

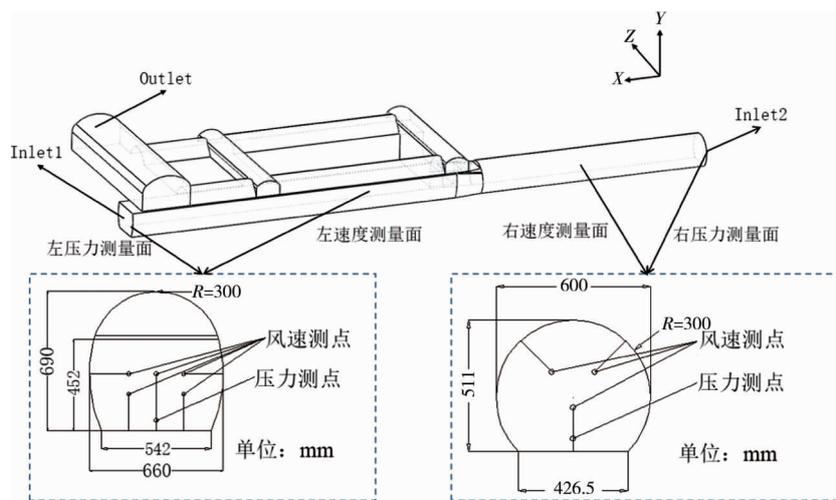


图 2 简化模型

### 1.2 网格划分与无关性验证

使用 Mesh 软件对模型进行网格划分,将单元格尺寸分别设置为 0.15, 0.10, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05 m,以便进行网格无关性验证,并分别对吊顶排烟口等区域进行局部细化,以保证单元格的质量。

取出风口断面的速度对网格无关性进行验证,在 FLUENT 里使用 6 种不同网格大小的模型对 1#通风机在 10 Hz 时的工况进行计算,得到的结果如表 1 所示。

表 1 网格无关性验证

网格大小/m	入口速度/(m/s)	网格大小/m	入口速度/(m/s)
0.15	2.920	0.07	2.891
0.10	2.876	0.06	2.893
0.08	2.894	0.05	2.891

由表 1 可知:当网格大小为 0.05 m 时,与网格大小为 0.06 m 时相比,入口速度的变化仅为 0.002 m/s,基本可以忽略,考虑计算资源与精度的要求,将网格尺寸确定为 0.05 m,此时的网格数为 738 217。

### 1.3 试验方案与边界条件设置

根据文献[17]可知:在应用串联通风机时,近风井端通风机的功率大于远风井端时的排烟效果较好,基于此,选用该组合为单抽通风机的试验工况.为了尽量减少变量,选定2#通风机的频率为10 Hz,3#通风机的频率为14 Hz为双压单抽(Two Forced Fans with Single Exhaust Fan, TFF)工况中抽出式通风机的固定频率.

在此基础上,将左右压入式通风机的频率作为主要变量,其中,以功率较大的左侧1#通风机为主通风机,右侧4#,5#通风机为辅助通风机,提供抑制烟雾不流入下游的压力,将1#通风机的频率4~22 Hz设置为试验区间,以2 Hz为间隔进行试验,共测得10组数据,具体的试验方案如表2所示.

表2 试验方案

单位:Hz

组号	单抽工况			双压单抽工况			
	2#通风机频率	3#通风机频率	1#通风机频率	2#通风机频率	3#通风机频率	4#通风机频率	5#通风机频率
1	5	10	4	10	14	5	4
2	10	15	6	10	14	17	8
3	15	20	8	10	14	23	12
4	20	25	10	10	14	25	15
5	25	30	12	10	14	31	19
6	30	35	14	10	14	34	22
7	35	40	16	10	14	38	24
8	40	45	18	10	14	43	28
9	45	50	20	10	14	45	32
10	—	—	22	10	14	49	35

根据实际的试验情况,将模型左行车道设置为压力入口,右行车道设置为速度入口,出风口设置为速度出口,其中,左行车道风流入口设为Inlet1,右行车道入口设为Inlet2,出风口设置为Outlet,如图2所示.

### 1.4 仿真模型验证

选取右侧的入口静压值作为参考值,得到单抽与双压单抽工况的试验结果与数值仿真结果如图3所示.

由图3可知:多通风机组合中,误差最大的为1#通风机频率为4 Hz时的方案,该方案的误差率(分子为试验值与数值仿真数值之间差值的绝对值,分母为试验值,二者比值乘以100%,即为误差率)为15.5%,其他方案的误差率控制在10%以内.单抽工况中的最低误差率为0.50%,最高误差率为7.7%.总体误差率在10%以内,基本可以认为数值仿真结果是可信的.所得结果验证了模型与计算方法的可靠性.

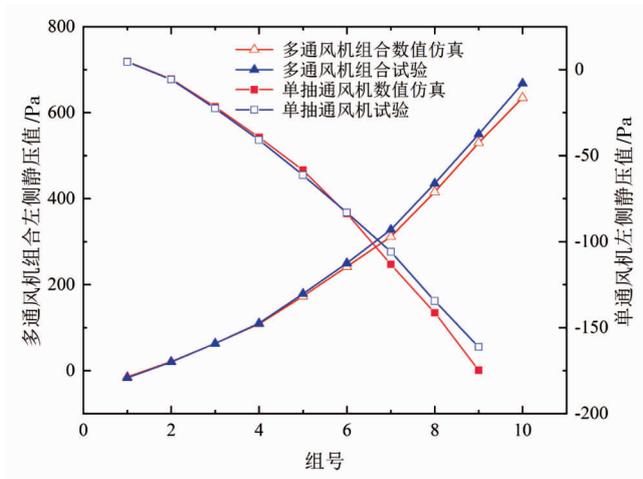


图3 数值仿真与试验静压对比

## 2 结果与讨论

### 2.1 流线与汇流区确定

为研究单通风机与多通风机组合通风排烟效果的优劣,首先需探明隧道内部的流场情况.取左侧风速较为接近的2种工况即SEF工况的第5组2#25 Hz+3#30 Hz(“2#25 Hz”指2#通风机及其运行的频率值为25 Hz,“3#30 Hz”指3#通风机及其运行的频率值为30 Hz,“+”指二者组合起来联合运行,参考表2)与TFF工况的第9组1#20 Hz为例,此时TFF工况左侧的风速为2.90 m/s,SEF工况通风机左侧的风速为2.55 m/s,隧道内部流线如图4所示.

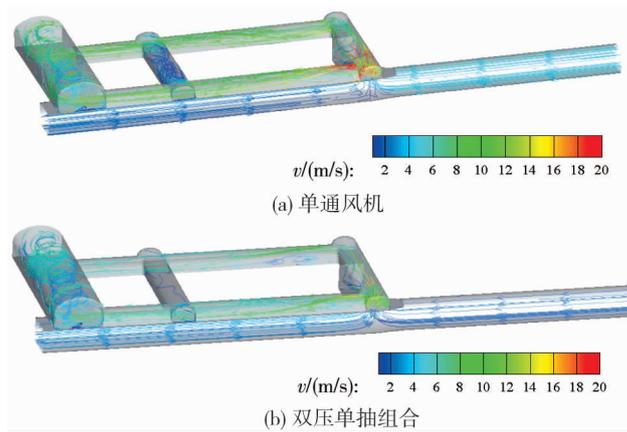


图4 内部流线分布

可以发现,在2种工况下,风流从左右行车道进入系统,在吊顶排烟口下面汇聚,形成一定的汇流区域,并在压力的作用下冲入排烟道,分别从远近两端排烟道流入排烟风井中。

由图4可知:SEF工况下,左侧行车道的风速低于右侧,而在TFF组合工况下则恰好相反.试验中的发烟装置位于左侧,考虑系统整体的排烟效率,应使左侧行车道的风速较大,右侧风速应尽量小,从而降低排烟道中的沿程阻力损失.在SEF工况中,右侧风速明显要高于左侧,此种风量分配不利于左侧行车道中污染气体的排烟。

流线能较为完整地显示整个隧道内的速度分布情况,但难以描述复杂区域内的流场情况,如吊顶排烟口与空气汇流区域,因此,仍需从压力与速度2个方面对隧道的排烟和控烟能力进行量化分析。

## 2.2 吊顶排烟口周边静压

在已知的流线分布基础上研究内部流场,重点集中在吊顶排烟口下方烟气与新鲜风流的汇流区域,因此,首先对不同情况下吊顶排烟口处的压力分布进行研究.取系统出风量较为接近的工况,即TFF工况中的第8组1<sup>#</sup>18 Hz与单抽工况中的第3组2<sup>#</sup>15 Hz+3<sup>#</sup>20 Hz为例,此时SEF工况的出风量为1.225 m<sup>3</sup>/s,而TFF工况的出风量为1.190 m<sup>3</sup>/s,风量差值为0.035 m<sup>3</sup>/s.以单抽工况的出风量为基准,差值比例不超过3%,得到静压强云图如图5所示。

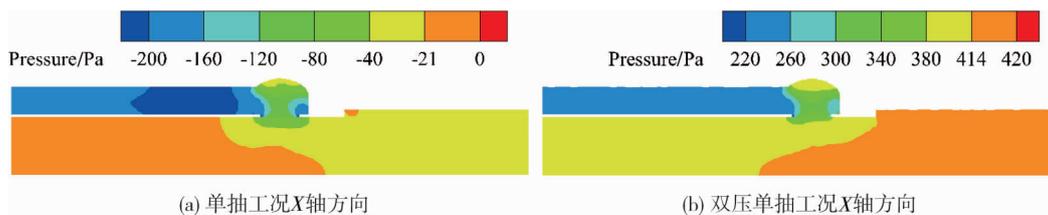


图5 静压强云图

由图5可知:左右两侧行车道的静压变化较小,主要的压力变化集中于吊顶排烟口下方,以吊顶排烟口为中心出现低压强局域,同时出现压强等值线.对2种工况的等值线进行分析发现:SEF工况中,吊顶排烟口处隧道上方的压强与右侧行车道一致,下方压强与左侧行车道一致,左侧压强高于右侧,而TFF工况则相反,等值线上方的静压强与左侧行车道接近,下方的静压强与右侧行车道一致,左侧压强低于右侧。

压强差的存在将影响速度的变化趋势,对图5的压强差特征进行分析可知:在SEF工况中,右侧静压并不能起到抑制左侧污染气流的作用,而在TFF工况下,右侧静压稍高于左侧,污染气流在越过等值线后,X轴(图1中左压力测量面至右压力测量面的方向为X轴,该轴的0点为矿山法段与盾构法段对接处的横向排烟口,即图4中汇流区的几何中心位置)方向的速度将在压强差的作用下降低。

考虑到人员逃生时的呼吸高度大概在1.5 m处,换算成模型中为0.1 m,取行车道中线上0.1 m处静压强的变化进行分析,得到的静压变化对比结果如图6所示。

由图6可知:SEF工况下,系统整体显示为负压,并且呈现出左大右小的分布特征,考虑造成此特征的

原因是右侧行车道被 SEF 抽走更多气流,造成更低的负压;TFF 工况中,系统整体呈正压显示,呈现右大左小的分布特征,并在接近吊顶排烟口时都有静压强突增的情况出现.值得注意的是,SEF 工况下的静压升不到 1 Pa,而 TFF 工况下的静压升接近 3 Pa,在这种静压强分布的情况下,SEF 工况中的左侧污染气流将更易冲入下游,而 TFF 工况中较大的压强差将有益于控制污染气流.

### 2.3 速度分布与有效出风率

从静压强的角度可以分析速度变化的趋势,更具体地说,系统的排烟效果更取决于污染侧的排风量大小.类似地,取两者行车道中线上 0.1 m 处,所得的速度变化如图 7 所示.

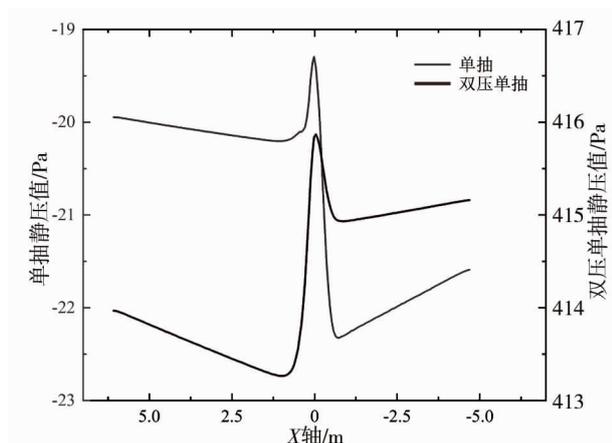


图 6 静压变化对比

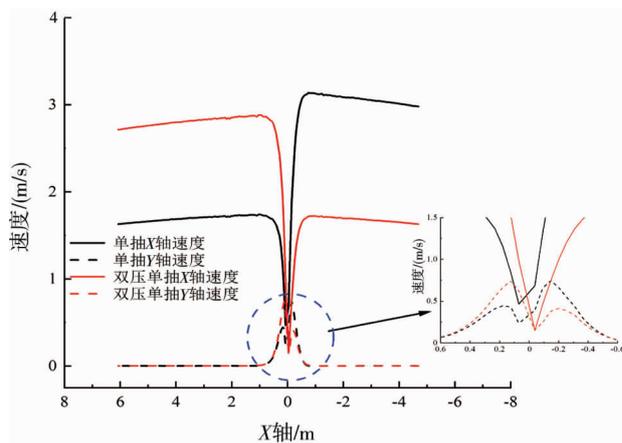


图 7 速度变化

气流滞止是流体动力学中的一种气体流动模型,流动气体的动能全部转化为静压能.从隧道排烟口下方的排烟状态可观察到气流滞止现象.在绝能等熵的情况下,靠近气流滞止区域的过程中,X 轴方向的风速逐渐衰减为 0 m/s,减小的动能转化成气流等效压力,从而阻挡左侧烟气蔓延至排烟口右侧的行车道内,此过程为高效排烟的关键.

由图 7 可知:在左右两侧行车道中,X, Y 轴 2 个方向的速度较为平稳,接近吊顶排烟口后,速度突降,Y 轴方向的速度逐渐上升,并在接近 X 轴的 0 点时,2 个方向的速度同时出现最小值.这种现象说明在未接近排烟口时,行车道中 X 轴方向的速度起主要作用,而在接近排烟口时,2 股气流 X 轴方向的速度相互抵消,并且将一部分速度转换为向上的 Y 轴速度,将气流推入排烟口中,产生 1 个低风速区,在此风速区内,2 个方向的速度都小于 0.5 m/s,且 TFF 工况下 X 轴方向的速度仅为 0.15 m/s,与 SEF 工况的速度相比,更接近 0 m/s.因此,TFF 工况阻挡左侧烟气蔓延至排烟口右侧行车道内的能力更强.

对 2 种工况进行对比,发现在系统出风量总体接近时,TFF 工况的左侧风速要明显大于 SEF 工况,并且在污染气流侧有更大的 Y 轴速度,意味着在这种情况下,TFF 工况的排烟速度更快.值得注意的是,SEF 工况 X 轴的速度并未完全降至 0 m/s,最小处仍有近 0.5 m/s 的风速,而 TFF 工况 X 轴的速度小于 0.15 m/s,说明 SEF 工况中吊顶排烟口的底部仍有一部分气流冲入下游,而 TFF 则要少得多,TFF 工况控制烟雾的能力要强于 SEF 工况.

参考文献[18],将左侧污染气流与总出风量的比值作为整个系统的出风率,计算公式为

$$\eta = \frac{Q_e}{Q_{\text{总}}}$$

式中: $\eta$  为有效出风率,%; $Q_e$  为有效出风量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_{\text{总}}$  为总出风量, $\text{m}^3/\text{s}$ .

2 种工况下有效出风率的结果对比如图 8 所示.由图 8 可知:SEF 工况的有效出风率十分稳定,基本维持在 37%~40%,而 TFF 工况的有效出风率的大小依赖于两边通风机功率的匹配程度,如在 1#8 Hz 即功率为 2.01 kW 时,因为通风机的功率匹配不当,有效出风率远低于其他频率,除 8 Hz 外的其余有效出风率均在 57%以上,且在功率逐渐上升后,出风率逐渐稳定至 60%以上,有效出风率比 SEF 工况高 20 个百分点,整体上远超市单抽工况.

从图8所得结论,进一步分析图7可知:TFF工况下两侧 $X$ 方向速度的最小值在排烟口下游,而SEF工况下 $X$ 方向速度的最小值偏向排烟口上游,且TFF工况下排烟口的上游速度大于下游,也就是上游风量大于下游风量,起火端隧道的风量更大,且占排烟口排风量的份额也大于未起火端隧道的风量;SEF工况下两侧的速度分布规律与TFF工况基本相反.因此,在总风量一定的情况下,TFF工况排出 $\text{CO}_2$ 的体积流量大于单抽工况,表明TFF的排烟效率大于单抽工况.

以上说明,在功率一定的情况下,采用TFF工况能排出更多的污染气流.相比单一通风机的额定功率,多个通风机组合作用的要求更低,但是,多个通风机之间的功率配合有一定的要求.

### 3 结论

- 1) TFF工况的静压强分布可有效抵抗烟雾向下蔓延,而SEF工况则无法通过静压抑制烟雾流动.
- 2) 在行车道中下游,SEF工况下 $X$ 轴方向的速度为 $0.5\text{ m/s}$ 左右,TFF工况 $X$ 轴方向的速度小于 $0.15\text{ m/s}$ ,更接近 $0\text{ m/s}$ .因此,双压单抽通风机组合阻挡左侧烟气蔓延至排烟口右侧行车道内的能力更强.
- 3) 在功率接近的情况下,TFF工况的有效出风率比SEF工况高20个百分点,出风效率远高于SEF,说明双压单抽通风机组合能有效解决行车道分配不合理这一问题.

### 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J].中国公路学报,2022,35(4):1-40.
- [2] 杨超,王志伟.公路隧道通风技术现状及发展趋势[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):819-824.
- [3] ZHANG S G, HE K, YAO Y Z, et al. Investigation on the critical shaft height of plug-holing in the natural ventilated tunnel fire[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 132: 517-533.
- [4] 姜学鹏,李超,谢智云.侧部集中排烟口布置对烟气层吸穿影响研究[J].安全与环境学报,2021,21(4):1506-1515.
- [5] 姜学鹏,陈欣格,郭昆.侧部点式排烟隧道火灾临界风速研究[J].中国安全科学学报,2021,31(3):105-111.
- [6] 易欣,范晶,马砺,等.纵向通风对地铁区间隧道火灾温度特性影响[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(12):3163-3170.
- [7] 钟委,韩宁,孙超鹏.障碍物对隧道火灾中竖井自然排烟效果的影响[J].中国安全生产科学技术,2021,17(1):48-53.
- [8] 梁园,许蔚昆.隧道侧向排烟口尺寸对排烟效果的影响研究[J].工业安全与环保,2021,47(6):40-44.
- [9] JI J, HAN J Y, FAN C G, et al. Influence of cross-sectional area and aspect ratio of shaft on natural ventilation in urban road tunnel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 420-431.
- [10] 董向阳,陈世强,唐文哲,等.地铁隧道排烟口无量纲结构参数与局部阻力研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(11):148-154.
- [11] 陈方兴,王海桥,陈世强,等.风机组合对地铁区间隧道通风吊顶排烟口性能影响的试验研究[J].现代隧道技术,2020,57(5):218-225.
- [12] 朱培根,孔维同,李晓响,等.城市隧道竖井送排式通风优化[J].流体机械,2016,44(10):73-79.
- [13] 刘彦君.地铁通风系统火灾研究与疏导措施[D].北京:北京工业大学,2003.
- [14] 刘立争,毛军.地铁区间隧道火灾排烟通风模式分析[J].工程建设与设计,2005(11):5-7.
- [15] 朱祝龙,田峰,陈洋,等.地铁长大过海区间隧道通风排烟方案[J].都市轨道交通,2017,30(1):94-97.
- [16] GUO X X, PAN X H, WANG Z L, et al. Numerical simulation of fire smoke in extra-long river-crossing subway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 82-98.
- [17] 雷震霖,陈世强,董向阳,等.长大区间隧道抽出式串联通风机排烟能力实验研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(3):115-120.
- [18] 胡大伟,姜学鹏.侧部排烟隧道低位排烟口优化设计[J].安全与环境工程,2023,30(6):130-137.

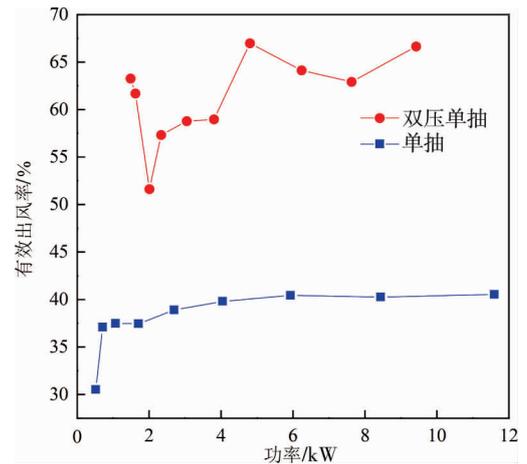


图8 有效出风率的结果对比