

## 高速铁路隧道内快速除尘流场特性研究

朱宝林<sup>1</sup> 褚文景<sup>1</sup> 黄橙橙<sup>2</sup> 张晋<sup>2\*</sup>

1 中铁上海工程局集团有限公司, 上海 200000

2 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066000

**[摘要]**隧道爆破除尘采用鼓风机抽出方式存在着除尘效果不佳、噪音大以及环境污染严重等问题。基于以上问题,借助台车处换气气源高压气体,设计涡轮风扇与导风管结合吹风除尘方案,加速隧道内部气流循环。对隧道内气流进行流场分析,比较在不同吹风距离下隧道内速度场、压力场、空气流动轨迹和空气流量分布情况,得到了较好气流循环方案,为隧道爆破后快速除尘提供方案。

**[关键词]**快速除尘; 空气流动; 有限元仿真; 长大隧道

DOI: 10.33142/ec.v5i3.5493

中图分类号: U459.1

文献标识码: A

## Study on the Characteristics of the Flow Field for Rapid Dust Removal in High-speed Railway Tunnels

ZHU Baolin<sup>1</sup>, CHU Wenjing<sup>1</sup>, HUANG Chengcheng<sup>2</sup>, ZHANG Jin<sup>2\*</sup>

1 Shanghai Civil Engineering Group Co., Ltd. of CREC, Shanghai, 200000, China

2 School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

**Abstract:** Tunnel blasting and dust removal using blowers have problems such as poor dust removal, high noise and serious environmental pollution. Based on the above problems, with the help of the high-pressure gas from the air venting source at the trolley, a blowing and dust removal scheme combining a turbo fan and a duct is designed to accelerate the air circulation inside the tunnel. The flow field analysis of the air flow in the tunnel is carried out, and the velocity field, pressure field, air flow trajectory and air flow distribution in the tunnel are compared under different blowing distances, and a better air circulation scheme is obtained, which provides a scheme for rapid dust removal after tunnel blasting.

**Keywords:** rapid dust removal; air flow; finite element simulation; long tunnel

### 引言

如今,我国工程领域发展迅猛,长大隧道数量急剧增加,随着环保意识增强,隧道爆破后产生大量粉尘以及有害气体如何快速去除,决定着施工安全以及进度。

近年来,许多学者在相关领域展开了研究,熊胜等人<sup>[1]</sup>将物理与化学方法相结合,提高了除尘效率,降低了成本;亓守臣<sup>[2]</sup>根据长大隧道特征,在爆破过程中,不同时期采用不同除尘措施,降低隧道内粉尘浓度;徐世强等人<sup>[3]</sup>运用仿真软件,模拟负离子除尘系统与其主要影响因素之间关系;秦磊和吴俊杰<sup>[4]</sup>运用新型隧道喷雾装置,提高了除尘效率;张崇栋<sup>[5]</sup>总结出了铁路隧道除尘技术以及标准;韩星和张旭<sup>[6]</sup>针对静电除尘在隧道通风中使用条件开展研究;康壮苏等人<sup>[7]</sup>对喷雾除尘系统在隧道中运用开展分析,得到通风和喷雾优化参数;王明山<sup>[8]</sup>提出运用负离子技术于隧道除尘中,并展开仿真模拟,得到粉尘直径、工作电压等对除尘效率影响;曹年欢等人<sup>[9]</sup>为了更好清除隧道壁粉尘,对除尘喷嘴的结构进行优化,使的喷射距离更长;李亚等人<sup>[10]</sup>针对施工过程中出现的放缆不畅,卷缆装置损坏等问题,设计了一种卷缆系统,实现无人化自动卷

缆;李洪波等人<sup>[11]</sup>设计了一种超大直径的盾构管片的液压系统和电控系统,对以后管片拼装设备具有指导意义;陶建峰<sup>[12]</sup>对液压系统在隧道掘进中设计,振动和可靠性进行总结,具有一定借鉴意义;王先锋等人<sup>[13]</sup>通过对负载传感器进行分析优化,使得隧道施工专用车辆上液压系统比传统液压系统能量损失更小,稳定性更好;张磊等人<sup>[14]</sup>通过对液压系统的深入研究,确保国产化隧道挖掘装载机性能指标不低于原样机,蔡冰、郑智剑和金伟等人<sup>[15-17]</sup>分别对一种高减压比组合式减压阀的流场特征进行分析,采用数值模拟方法研究液压滑阀内的高压空化流动特性,以及对旋转阀内部流体流动情况进行仿真,为相应仿真提供参考。

综上所述,现阶段隧道除尘都是采用喷雾装置与吸尘装置相结合的方法,存在耗水量大,除尘速度慢等问题。

本文采用高速气流带动隧道内粉尘流动,形成内部气流循环,建立通风管道与爆破面不同距离下三维流场模型,得到在不同条件下隧道内空气流动情况。

### 1 隧道除尘原理及模型

#### 1.1 除尘原理

隧道除尘原理如图 1 所示,除尘台车示意图如图 2

所示,当高压风管内高压气体通入涡轮风扇后,会形成大流量、低速流动气体,经过软风管引导,吹向掌子面,气流受掌子面作用反向流动,在隧道内形成循环气流。气流带动爆破粉尘在隧道上方流动,当含尘气体流动到除尘台车除尘窗口处时,除尘窗口安装喷淋除尘设备开始工作,实现快速除尘目。同时,随着工程的进行,不需要单独的增长高压风管的长度,从而加快工程进度。

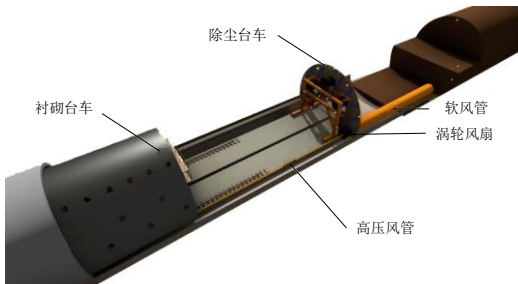


图1 隧道模型

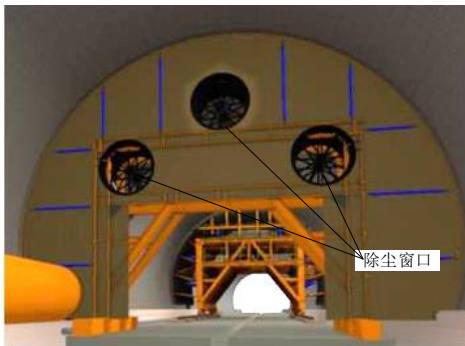


图2 除尘台车示意图

### 1.2 隧道模型

建立隧道三维流场模型,将进风口设置为速度入口,出口设置为压力出口如图3所示,分析软风管出风口与掌子面不同距离情况下,隧道内流场分布情况,得到最佳空气流动工况。对隧道三维进行网格划分,其网格数约为49万,节点数约为1万个。

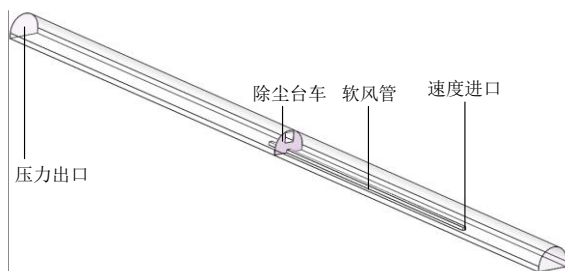


图3 进出口设置

### 1.3 数学模型

流体流动遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒,本模型属于单向流动,当以20m/s速度向隧道内通气时,由公

式(1)可知,其雷诺数为 $1.56 \times 10^7$ ,内部气体流动形式为紊流,隧道内部流动复杂,所以采用Standard k-ε模型进行计算仿真;质量守恒方程数学表达式可表达为(2)式:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left( \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

引入笛卡尔坐标系下向量算子∇定义:

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (3)$$

将式(3)带入(2)可以写成:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (4)$$

式中, ρ—密度

t—时间

V—速度矢量

u—速度 x 坐标轴方向上分量

v—速度 y 坐标轴方向上分量

w—速度在 z 坐标轴方向上分量

动量守恒方程微分表达式表述如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + S_i \quad (5)$$

式中,  $u_i$ —i 方向平均速度;

$u_j$ —j 方向平均速度;

$j = 1, 2, 3$ —瞬时压力;

$\mu$ —动力黏度;

$-\rho u_i u_j$ —雷诺应力项;

$S_i$ —源项代表那些不能包括到方程中非稳态项;

Standard k-ε 湍流模型可以写成湍流动能 k 与湍流耗散率 ε 方程<sup>[18-21]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_j}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_j}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} C_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (7)$$

湍动能 k:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (8)$$

湍流耗散率 ε:

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u_i \partial u_j}{\partial x_i \partial x_j} \quad (9)$$

湍流粘度  $\mu_t$ :

$$u_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

- 式中,  $C_u$ —常数为 0.09;  
 $C_{1\varepsilon}$ —经验常数为 1.44;  
 $C_{2\varepsilon}$ —经验常数为 1.92;  
 $C_\mu$ —经验常数为 0.09;  
 $\sigma_k$ —经验常数为 1.0;  
 $\sigma_\varepsilon$ —经验常数为 1.3;

## 2 隧道除尘模拟仿真

### 2.1 仿真计算参数

选取软风管出风口与掌子面距离分别为 50m, 40m, 30m 和 20m 工况建立流场仿真模型。选用空气作为介质进行计算, 环境温度设置为 20℃。

将进气口设置为速度入口, 速度设定为 20m/s; 将出口设置为压力出口, 两者之间压差设置为 0Pa。

### 2.2 仿真结果分析

不同距离下迹线图如图 4 所示, 当距离为 50m 和 20m 时, 在隧道内部会形成局部涡流现象, 不利于隧道内空气流动, 当软风管出风口与掌子面距离为 40m 和 30m 时, 可以从迹线图中得知, 两者不会形成局部涡流, 具有较为良好空气流动性。

当软风管出风口与掌子面距离为 40m 时, 除尘台车底部的气流迅速向除尘窗口聚集, 如区域 1 所示。

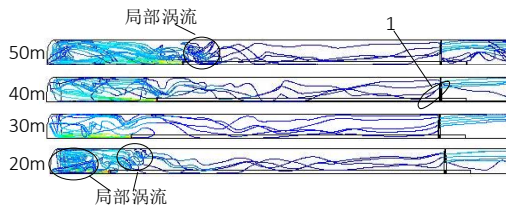


图 4 不同距离下隧道流场迹线图

不同距离下软风管与掌子面间速度云图如图 5 所示, 当距离为 50m、30m 和 20m 时, 掌子面处会形成一低流速区, 低流速区域周围气体快速流动, 导致低速区内气体流动效果差, 从而影响到掌子面处空气流动效果, 造成隧道内空气流动性差。

由于低速气流占据整体流场大部分空间, 为了提升隧道内空气流动速度场辨识度, 将速度显示调整至 0-4m/s, 由软风管道上方速度云图可知, 此处气流流动速度较小, 会形成气流盲区, 粉尘不能快速排出。

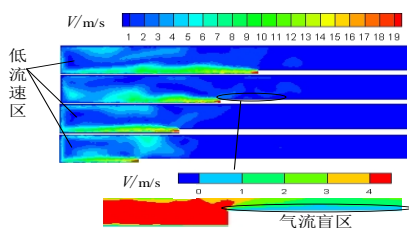


图 5 不同距离下掌子面处速度云图

不同距离下软风管与掌子面间压力云图如图 6 所示, 当气体从软风管流出后, 会在隧道内部形成相对高压区, 快速向掌子面扩散, 到达掌子面后, 压力向隧道上方扩散, 从而实现气体流动。在 20m, 30m 和 50m 情况下, 隧道上部高压气体迅速向隧道中间发散, 从而阻碍了掌子面处的气体向除尘台车流去, 影响隧道内部的空气流动。

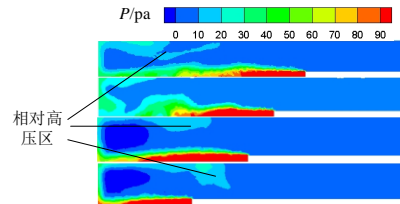


图 6 不同距离下压力云图

在通风管与掌子面距离为 40m 工况下, 出口处流量为 36m<sup>3</sup>/s, 隧道内部空间体积为 4586.5m<sup>3</sup>, 可达到每隔 127s 隧道内气体循环一次, 从而达到快速除尘目。

### 3 隧道除尘模拟试验

经过以上分析得出, 当软风管与掌子面距离 40m 时, 隧道内部具有良好流动性, 对此模型进行试验验证。

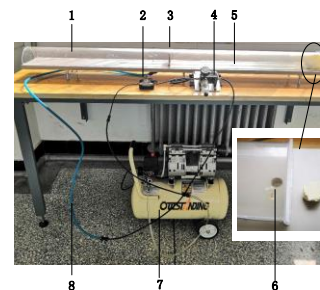
由于隧道长宽比较大, 对其进行模拟试验需运用相似计算, 为了保证测试模型能够体现实际流动工况, 采用在几何尺寸缩小基础上, 保证系统流量相似, 来约束模型尺寸和边界条件。试验将模型缩小 100 倍, 即  $C_L=100$ , 根据流量相似原理, 考虑其几何相似和运动相似, 如公式(11)所示:

$$\frac{C_L}{C_V} = C \quad (11)$$

- 式中,  $C_L$ —特征长度比值  
 $C_V$ —空气流动速度比值  
 $C$ —相似指标。

为了提高模拟实验精确性, 将相似指标  $C=1$ , 则  $C_V=100$ 。原模型中速度为 12m/s, 在模拟试验中模型速度应为 0.12m/s。

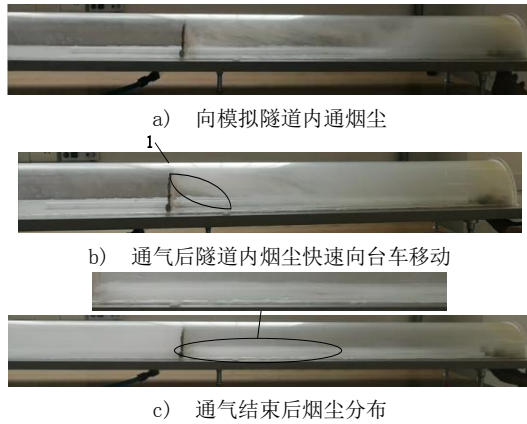
根据以上计算, 搭建实验平台如图 7 所示, 先对模拟隧道通入烟尘, 用烟尘模拟隧道内部粉尘, 然后空气压机工作输入稳定流速气体, 如图 11 所示



1. 模拟隧道 2. 节流阀 3. 模拟除尘台车 4. 气动三联(过滤器、减压阀和油雾器) 5. 通风管道 6. 进烟口 7. 空气压机 8. 通风管道

图 7 模拟实验平台




**图8 模拟实验**

根据模拟试验可知,向模拟隧道内通入气流后,在底部的烟尘运动到台车处时,向上方除尘窗口聚集,如图8(b)区域1所示。

停止通入气流,发现气流盲区处烟尘没能随着内部气流流动至除尘台车处,如图8(c)所示,与仿真结果类似,证明了仿真正确性。

通过图8(c)可知,采用高速气流可以将隧道内部粉尘快速吹出,从而达到快速除尘目。

#### 4 结论

综上所述,得出以下结论:

(1) 采用高速气流向掌子面吹风方法,可以实现隧道内空气大量流动,从而实现快速除尘。

(2) 软风管出口与掌子面距离为40m时,隧道内部空气流动效果最佳。

(3) 向隧道内部通入高速气流后,会在通风管道附近形成一气流盲区,此部分粉尘不能由除尘台车上方通风管排出。

#### [参考文献]

[1]熊胜,杨猛虎,伍毅敏,等.隧道自主除尘系统设计与应用[J].施工技术,2020,49(9):67-70.

[2]亓守臣.长大隧道施工期粉尘控制技术[J].建筑技术开发,2019,46(12):120-121.

[3]徐世强,王明山,李杰,等.施工隧道负离子除尘效率主要影响因素[J].西南交通大学学报,2020,55(1):210-217.

[4]秦磊,吴俊杰.一种隧道用喷雾养护装置研究应用[J].现代制造技术与装备,2018(12):46-47.

[5]张崇栋.铁路隧道除尘技术及标准研究与应用[J].现代隧道技术,2016,53(5):1-5.

[6]韩星,张旭.静电除尘装置在公路隧道通风中使用条件研究[J].公路交通技术,2007(1):124-126.

[7]康壮苏,杨胜强,孙燕,等.隧道施工通风喷雾除尘系统分析[J].工业安全与环保,2007(2):22-24.

[8]王明山.施工期隧道负离子技术除尘效率影响因素数值模拟及试验研究[D].西安:长安大学,2018.

[9]曹年欢,王国志,谭元文.基于拟水平正交实验法的隧道除尘喷嘴设计[J].液压与气动,2020(7):138-143.

[10]李亚,孙延飞,魏成刚.隧道悬臂掘进机卷缆系统的优化设计[J].液压与气动,2019(9):88-92.

[11]李宏波,周建军,张兵,等.超大直径盾构管片拼装机液压和电控系统设计[J].液压与气动,2016(11):36-41.

[12]陶建峰,刘成良.全断面岩石隧道掘进机液压技术研究现状[J].液压与气动,2015(6):5-12.

[13]王先锋,陈利东,田晋跃,等.负荷传感转向系统在隧道施工专用搬运车辆上的应用[J].液压与气动,2011(9):59-62.

[14]张磊,史小辉,许明恒,等.隧道挖掘装载机液压系统关键技术研究[J].液压与气动,2011(5):10-12.

[15]蔡冰.一种组合式空气减压阀流动特性数值研究[J].液压与气动,2020(11):134-139.

[16]郑智剑,王洋定,沈玉梅.液压滑阀高压空化流动特性的数值研究[J].液压与气动,2020(5):75-79.

[17]金伟,史俊强.基于Fluent旋转阀阀口流场分析[J].液压与气动,2020(5):162-166.

[18]王广地,周晓军,高波.水下悬浮隧道管段结构流阻特性分析[J].西南交通大学学报,2007(6):715-719.

[19]骆建军.隧道入口侧风条件下高速铁路隧道内流场特性[J].西南交通大学学报,2017,52(4):746-754.

[20]李艳.高温静电除尘过程数值模拟研究[D].杭州:浙江大学,2015.

[21]龙正伟,冯壮波,姚强.静电除尘器数值模拟[J].化工学报,2012,63(11):3393-3401.

作者简介:朱宝林(1988.12-)男,毕业于华东交通大学,所学专业为测绘工程专业。目前就职于中铁上海工程局集团有限公司,目前担任中铁上海工程局杭温铁路站前3标一分部总工程师。