

文章编号: 1671-6612 (2024) 04-498-07

深埋输水管道检修期污染物浓度分布特性研究

欧盛贤¹ 毕海权¹ 冯凌巍¹ 周远龙¹ 陈钿湖² 何常新²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 630031;

2. 广东粤海珠三角供水有限公司 广州 511466)

【摘要】 地下深埋长距离输水管道内壁存在大量的藻类、壳菜类附着型水生生物, 当停水检修时, 这些藻类、壳菜会脱水死亡从而产生大量有害气体, 给管道检修人员安全带来危害。研究输水管道内污染物浓度分布特性对于优化施工期通风设计、提高检修作业人员的安全性具有重要意义。基于实际输水管道结构及通风系统设计参数, 建立了工作井机械送风工况下输水管道通风计算模型, 基于流体圆管内紊流流动时速度分布规律和边界层理论并结合数值计算方法, 研究了污染物浓度与风速、送风距离之间的关系。研究表明: 污染物浓度与送风速度间存在较强的关联性, 污染物浓度 c 与断面风速 v 的关系为: $c \propto v^{-1}$ 、与送风距离 x 的关系为: $c \propto x$, 当断面风速由 0.15m/s 增加到 0.30m/s 时, 同一段面污染物浓度可减少 50%。通过增加断面风速或减小送风距离, 可有效降低管道内污染物浓度, 从而避免污染物在输水管道内堆积。

【关键词】 输水管道; 污染物扩散; 拟合函数; 数值模拟

中图分类号 TV554+.9/X169 文献标志码 A

Study on the Distribution Characteristics of Pollutants Concentrations during Maintenance Period of Underground Water Conveyance Tunnel

Ou Shengxian¹ Bi Haiquan¹ Feng Lingwei¹ Zhou Yuanlong¹ Chen Dianhu² He Changxin²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 630031;

2. Guangdong GDH Pearl River Delta Water Supply Co., Ltd, Guangzhou, 511466)

【Abstract】 In underground long-distance water conveyance tunnels, there is a significant accumulation of algae and *Limnoperna fortunei*, which are sessile aquatic organisms, on the inner walls. When water flow is halted for maintenance, these organisms dehydrate and die, releasing large quantities of harmful gases and posing a risk to the safety of maintenance workers. Investigating the distribution characteristics of pollutants within these tunnels is crucial for optimizing ventilation design during construction and enhancing the safety of maintenance workers. This paper establishes a ventilation calculation model for water conveyance tunnels under the condition of mechanical ventilation in working wells. The model is based on the actual tunnel structure and the design parameters of the ventilation system. The relationship between pollutant concentration, wind speed, and ventilation distance was investigated using the theory of turbulent flow in cylindrical pipes, boundary layer theory, and numerical calculation methods. The results show a strong correlation between pollutant concentration and ventilation speed. The relationship between concentration of pollutants c and section wind speed v is: $c \propto v^{-1}$, the relationship between concentration of pollutants c and ventilation distance x is: $c \propto x$, when the section wind speed increases from 0.15 m/s to 0.30 m/s, the concentration of

基金项目: 珠江三角洲水资源配置工程地下深埋长距离输水管道检修期通风系统性能研究项目 (CD88-JS04-2023-0060)

作者简介: 欧盛贤 (1999.05-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: osx_ted@163.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2023-12-27

pollutants in the same section can be reduced by 50%. By increasing the cross-sectional wind speed or reducing the ventilation distance, the concentration of pollutants in the tunnel can be effectively reduced, thereby preventing the accumulation of pollutants in the water conveyance tunnel.

【Keywords】 Water conveyance tunnel; Contaminant diffusion; Fitting function; Numerical simulation

0 引言

地下深埋长距离输水管道工程通常沿线布置多座工作井,如图1所示。运行期关闭工作井内风管与输水管的连通阀门,形成密闭有压输水管道,检修期检修人员由进人孔进入输水管道进行检修作业。由于排水检修将导致输水管道壁面附着的大量淡水壳菜脱水死亡并产生大量有害气体^[1],因此,必须通过工作井内的机械通风系统对输水管道进行通风,以降低输水管道内有害气体浓度。研究分析输水管道内污染物分布特性对于输水管道检修通风系统设计和保障检修人员生命安全具有重要意义。国内外学者在公路隧道、地铁隧道、建筑室内等场所对污染物分布规律进行了大量研究。Tao等^[2]研究分析了风速、隧道长度和交通状况等因素对污染物扩散的影响,并揭示了环境风速变化对污染物浓度的影响。李杰等^[3]和李孟柯等^[4]通过建立计算流体力学模型,探讨了隧道内污染物的窜流特性、地铁站台污染物的分布规律。同时,有学者针对机动车排放的CO浓度分布规律,提出了预测模型,并通过实测验证了其准确性^[5]。杨清海^[6]对巷道采掘面固定源散发的颗粒污染物特性、车辆移动源污染物散发特性、诱导通风存在的污染物传播问题进行了研究分析,并提出了相应的控制技术。

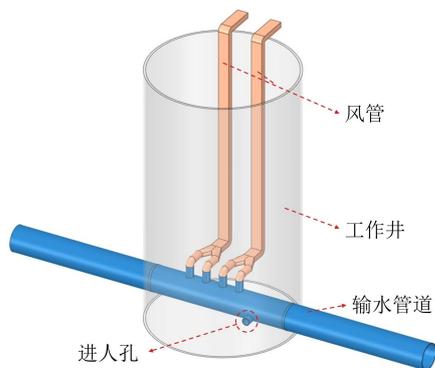


图1 输水管道工作井示意图

Fig.1 Schematic diagram of water conveyance tunnel working well

现有研究表明气态污染物的扩散规律主要受风速和湍流扩散的影响,而受污染物密度和分子扩散的影响较小,由研究现状可知,对于地下深埋长距离输水管道检修期污染物分布特性的研究较少。因此,本文基于实际输水管道结构及通风系统设计参数,以工作井机械送风为例,对比研究了速度场和污染物场的分布关系、断面风速和送风距离对污染物浓度分布的影响规律。基于流体圆管内紊流流动时速度分布规律和边界层理论并结合数值计算方法,研究了污染物浓度与风速、送风距离之间的关系。

1 数学模型

1.1 控制方程

在输水管道通风计算中,断面风速远小于音速,空气的体积和密度变化均不大,输水管道通风气流可视为粘性、不可压缩湍流流体。使用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[7]来模拟管道内的空气流动,其通用控制方程为^[8]:

$$\text{div}(\rho U \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; ϕ 为通用标量; U 为流体速度, m/s ; Γ 为有效扩散系数; S 表示源项。

1.2 组分运输模型

在本研究中,计算域内存在空气与污染物气体两种组分,组分间存在混合和运输。稳态求解的污染物组分运输方程如下:

$$\text{div}(\rho U c_s) = \text{div}[D_s \text{grad}(\rho c_s)] + S_s \quad (2)$$

式中: c_s 为污染物传播组分 S 的体积浓度, ppm; ρ 为传播组分 S 的密度, kg/m^3 ; U 为传播组分 S 的流体速度, m/s ; D_s 为污染物传播组分 S 的扩散系数; S_s 为系统内单位体积单位时间污染物传播组分 S 的产生量, $\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

2 计算模型

2.1 数值模型

为研究污染物分布特性,以国内某地下深埋长距离输水管道为研究对象,按照实际管道断面尺

寸, 建立输水管道模型。如图 2 所示, 管道断面为内径 4.8m 的盾构隧洞, 送风口为四个直径 1.4m 的圆形风口, 距离最右侧送风口 3.2m 处有一直径为 1.4m 的进入孔, 管道壁面内侧为淡水壳菜附着体积, 考虑到污染物的充分扩散, 固定管道计算长度为工作井前后各 500m, 计算模型全长 1000m。

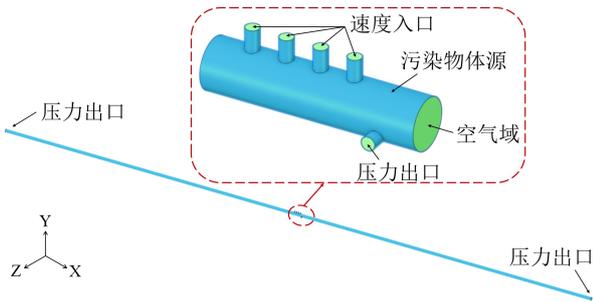


图 2 输水管道几何模型

Fig.2 Geometric model of water conveyance tunnel

2.2 边界条件

计算模型中将风管送风口的边界条件设置为速度入口, 管道两段出口的边界条件设置为压力出口。污染源设定在输水管道壁面, 现有研究表明淡水壳菜在输水管道壁面附着厚度可达 5cm^[9], 淡水壳菜腐败有害气体释放速率测定试验结果表明^[1], 淡水壳菜腐败释放的有害气体主要成分为 NH₃, 淡水壳菜最大释放速率为 2.147×10⁻³mg/(m³·s)。因此在本研究中将污染物释放源设置为体污染源, 材料属性为 NH₃, 占比为 100%, 其释放速率设定为 2.147×10⁻³mg/(m³·s)。数值计算时, 采用 SIMPLE 算法, 所有变量均采用二阶迎风的离散格式。

针对检修期通风系统, 为研究断面风速对污染物分布特性的研究, 采用六种不同的送风方案进行数值研究, 如表 1 所示。

表 1 通风方案参数

Table 1 Ventilation plan parameters

通风方案	管道断面风速/ (m/s)	送风口风速/ (m/s)
1	0.15	0.44
2	0.30	0.88
3	0.45	1.32
4	0.60	1.76
5	0.75	2.20
6	0.90	2.64

2.3 测点布置

为研究污染物浓度随送风距离的变化规律, 沿

管道水平方向每隔 10m 布置一个监测平面。由于风速在管道断面上分布的不均匀性以及输水管道污染物释放特点, 导致同一断面上的污染物浓度分布也是不均匀的。因此, 必须在同一断面上布置多个测点, 并重点关注与检修作业人员呼吸平面相近的区域。对于圆形盾构隧洞^[10], 应在同一断面设置两个彼此垂直的测点, 并将管道断面分成一定数量的等面积同心环, 在同一管道断面上布置 10 个测点, 如图 3 所示, 测点坐标如表 2 所示。同心环上各测点距中心的距离计算式为:

$$R_i = R_0 \sqrt{\frac{2i-1}{2n}} \quad (3)$$

式中: R_i 表示风管中心到第 i 点的距离, mm; R_0 表示风管半径, mm; i 表示从风管中心管起的同心环序号; n 表示风管断面上划分的同心环数量。

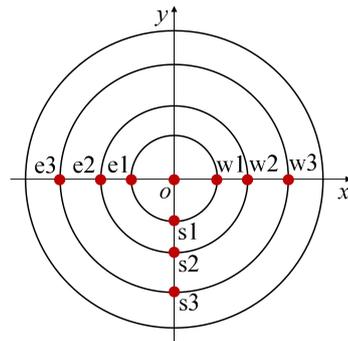


图 3 管道断面测点布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of tunnel section measuring point layout

表 2 管道断面测点坐标

Table 2 Tunnel section measuring point coordinates

测点坐标 (m)		
e1	e2	e3
(-0.7,0)	(-1.2,0)	(-1.85,0)
w1	w2	w3
(0.7,0)	(1.2,0)	(1.85,0)
s1	s2	s3
(0,-0.7)	(0,-1.2)	(0,-1.85)

2.4 网格尺寸分析

采用 Fluent Meshing 软件中的多面体网格技术对计算区域进行网格划分, 污染物体源与空气域的交界面设置为共享拓扑面。为了分析网格尺寸对计算结果的影响, 分别使用最大尺寸为 0.15m、0.20m

和 0.25m 的网格尺寸, 体网格数量分别约为 1402 万、829 万和 468 万。选取距离送风口 150m 处管道中心线上的污染物浓度作为检验标准, 计算结果如图 4 所示。当网格数量由 829 万增加到 1402 万时, 计算结果没有出现明显的差异, 因此使用 0.20m 的网格尺寸可节省计算资源且满足计算的精度要求, 后续的数值模拟中均使用该网格尺寸, 图 5 为输水管道水平断面网格图。

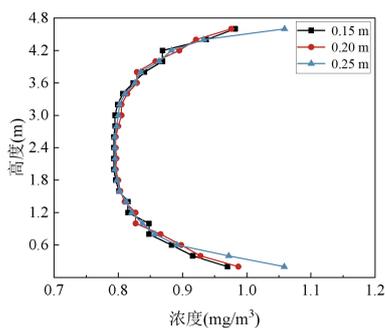


图 4 计算结果对比

Fig.4 Comparison of calculation results

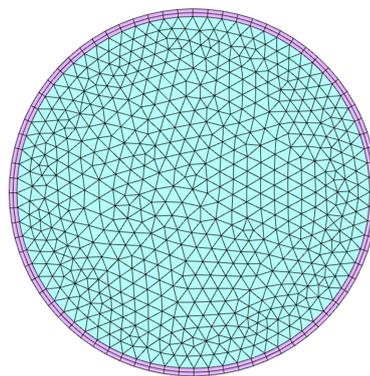


图 5 计算网格

Fig.5 Computational grid

3 计算结果

3.1 速度场与污染物分布

输水管道断面风速直接影响着输水管道壁面释放污染物浓度的分布, 计算结果对比分析了输水管道断面风速与污染物浓度之间的关系。

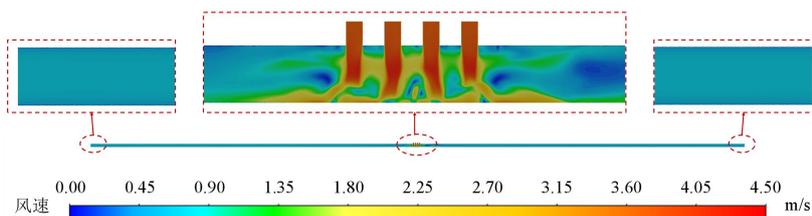


图 6 管道水平方向速度流场

Fig.6 Tunnel horizontal direction velocity flow field

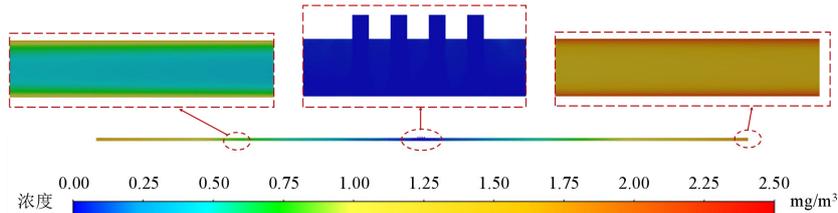


图 7 管道水平方向污染物浓度分布

Fig.7 Distribution of pollutant concentration in the horizontal direction of the tunnel

在计算域内, 沿输水管道垂直方向做一个垂直界面作为输水管道水平方向上的参考面。图 6 为通风方案 4 中输水管道水平方向上的速度场分布。从图 6 中可知, 在送风口区域, 由于多个三通结构的影响, 存在较大的紊流流动, 随着气流向管道两段推进, 管道内断面平均流速逐渐趋于稳定。图 7 为通风方案 4 中输水管道水平方向上的污染物浓度分布。从图 7 中可知, 在靠近送风口的的位置, 受到新鲜空气的稀释作用, 污染物浓度相对较低, 随着

气流向管道两段推进, 存在污染物浓度堆积现象, 距离风口位置越远, 污染物浓度越高。

选取送风口左侧区域作为研究区域, 以送风口作为原点, 图 8 所示为研究区域内, o 测点和 s1、s2、s3 测点处风速沿管道水平方向的变化规律。从图 8 中可知, 在风口位置, 风速波动较大, 在距离送风口位置 100m 后, 各测点的风速趋于稳定。图 9 所示为研究区域内, o 测点和 s1、s2、s3 测点处污染物浓度沿管道水平方向的变化规律。从图 9 中

可知, 污染物浓度沿着送风方向逐渐递增, 在距离风口 0~100m 处, 污染物浓度增速较小, 在距离送风口位置 100m 后, 污染物浓度增速趋于稳定, 表明污染物浓度与送风距离呈正相关。

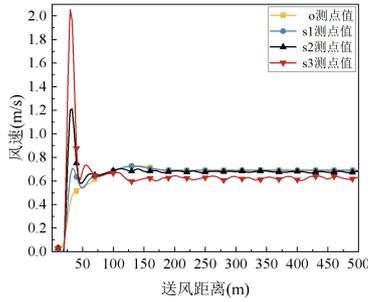


图 8 测点风速随送风距离变化规律

Fig.8 Changes of wind speed at measuring points with air supply distance

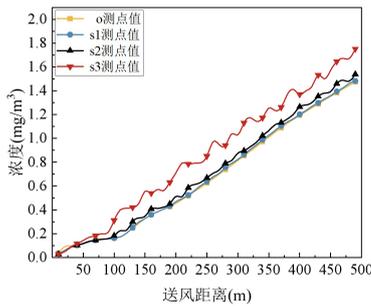


图 9 测点浓度随送风距离变化规律

Fig.9 The concentration of measuring points changes with the air supply distance

在计算域内, 沿输水管道水平方向取一个垂直界面作为输水管道垂直方向上的参考面。图 10 为通风方案 4 中, 距离送风口左侧 500m 处输水管道垂直断面上的污染物浓度及风速分布云图, 从图 10 中可知, 在同一断面处, 距离管道壁面越近, 污染物浓度越大, 风速越小。

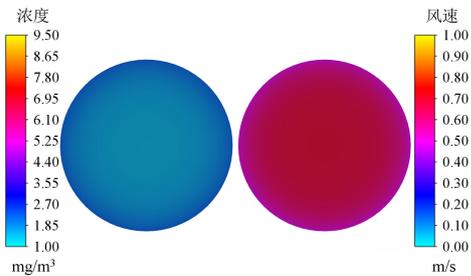


图 10 同一断面处风速、污染物浓度分布

Fig.10 Distribution of wind speed and pollutant concentration at the same section

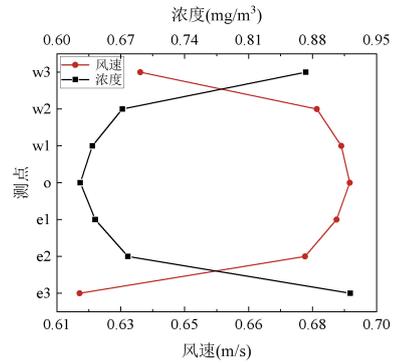


图 11 同一断面处风速、污染物浓度变化规律

Fig.11 Change patterns of wind speed and pollutant concentration at the same section

图 11 所示为通风方案 4 中, 距离送风口左侧 500 m 处输水管道垂直断面上, o 测点、w1、w2、w3 测点和 e1、e2、e3 测点处风速和污染物浓度变化规律。从图 11 中可知, 距离管道壁面越近, 风速越小, 污染物浓度变化趋势与速度变化趋势呈中心对称关系, 距离管道壁面越近, 污染物浓度越大。同一断面处的速度变化趋势满足流体圆管内紊流流动时的速度分布规律^[11], 靠近壁面处受管壁影响, 在流体粘性作用下流速急剧下降, 在远离管壁处到圆管中心处流体流速分布比较均匀, 而污染物浓度变化与速度变化存在较强的关联性。

3.2 污染物浓度与风速、送风距离关系

输水管道送风口的送风速度直接影响了输水管道断面风速大小和风压分布, 对管道壁面释放污染物的扩散特性具有较大影响。计算结果对比分析了不同管道断面风速下污染物在管道垂直方向上和水平方向上的扩散特性。

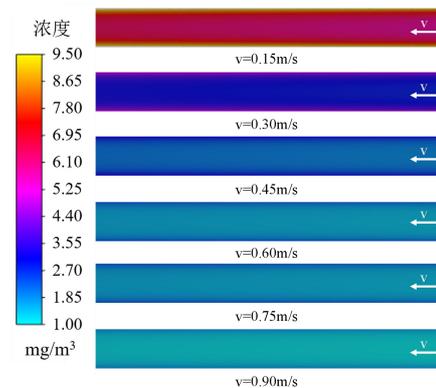


图 12 不同断面风速下污染物浓度分布

Fig.12 Distribution of pollutant concentration under different cross-section wind speeds

图 12 所示为通风方案 1~通风方案 6 中管道壁面释放污染物在管道水平方向上的扩散规律, 管道断面风速越大, 单位时间内送入管道的新鲜空气越多, 污染物累积浓度越小。观察云图可知, 污染物浓度分布与管道内流动边界层理论相似^[12], 流动边界层沿流动方向边界层增厚, 并逐渐向管道中心扩展, 理论公式为:

$$\frac{\delta_0}{x_0} = \frac{5}{\sqrt{Re_x}} \quad (4)$$

式中: δ_0 表示边界层; x_0 表示距管道出口的长度; Re_x 表示距管道出口; x_0 处的雷诺数。

在计算域内, 选取送风口左侧区域作为研究区域, 以送风口作为原点, 沿管道水平方向, 每隔 10m 创建一个垂直的监测断面。

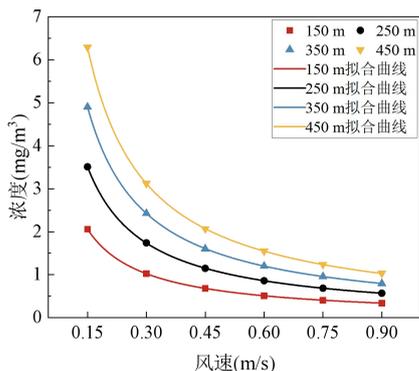


图 13 污染物浓度随断面风速变化规律

Fig.13 Changes in pollutant concentration with cross-section wind speed

图 13 所示为距离风口 150m、250m、350m 和 450m 处污染物浓度与断面风速之间的关系, 由图可知, 同一断面处, 污染物浓度与断面风速呈非线性关系。

由公式 (4) 可知, 同一断面处, 边界层与断面风速的关系为: $\delta_0 \propto v^{-0.5}$, 为非线性关系, 故采用幂函数对污染物浓度与断面风速之间的关系进行拟合, 拟合关系式如表 3 所示, 可见, 同一送风距离处, 污染物浓度与断面风速的关系为: $c \propto v^{-1}$, 随着断面风速的增加, 污染物浓度变化率越小, 当断面风速由 0.15m/s 增加到 0.30m/s 时, 同一段面污染物浓度可减少 50%, 而当断面风速由 0.75m/s 增加到 0.90m/s 时, 同一段面污染物浓度仅减少 16.9%, 故在进行通风系统设计时应考虑风速变化率对污染物浓度变化率的影响强度。

表 3 不同送风距离下拟合关系式

Table 3 Fitting relationship formula under different air supply distances

送风距离	拟合曲线	R^2
150 m	$c = 0.308v^{-1}$	1
250 m	$c = 0.524v^{-1}$	0.999
350 m	$c = 0.732v^{-1}$	0.999
450 m	$c = 0.940v^{-1}$	0.999

注: c 表示污染物浓度, mg/m^3 ; v 表示断面风速, m/s 。

图 14 所示为管道断面风速 0.15m/s、0.30m/s、0.45m/s、0.60m/s、0.75m/s 和 0.90m/s 时污染物浓度沿送风距离的变化规律, 从图 13 中可知, 同一断面风速下, 污染物浓度与送风距离呈线性关系。由公式 (4) 可知, 同一断面风速下, 边界层与断面风速的关系为: $\delta_0 \propto x_0$, 为线性关系, 故采用一次函数对污染物浓度与送风距离之间的关系进行拟合, 拟合关系式如表 4 所示, 可见, 同一断面风速下, 污染物浓度与送风距离的关系为: $c \propto x$ 。

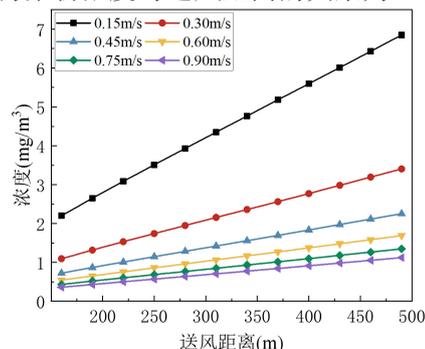


图 14 污染物浓度随送风距离变化规律

Fig.14 Changes in pollutant concentration with air supply distance

表 4 不同断面风速下拟合关系式

Table 4 Fitting relationship equations under different cross-section wind speeds

通风方案	拟合曲线	R^2
1	$c = 13.99 \times 10^{-3}x$	0.999
2	$c = 6.94 \times 10^{-3}x$	0.999
3	$c = 4.59 \times 10^{-3}x$	0.999
4	$c = 3.43 \times 10^{-3}x$	0.999
5	$c = 2.74 \times 10^{-3}x$	0.999
6	$c = 2.28 \times 10^{-3}x$	0.999

注: c 表示污染物浓度, mg/m^3 ; x 表示送风距离, m 。

基于污染物浓度和断面风速、污染物浓度和送风距离的关系分析,拟合浓度与送风距离和风速的关系式为:

$$c = 2.15 \times 10^{-3} x v^{-1} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.999$$

式中: c 表示污染物浓度, mg/m^3 ; x 表示送风距离, m ; v 表示断面风速, m/s 。

拟合曲面如图 15 所示。由图可知,为降低管道内污染物浓度,应增加输水管道断面风速或尽量缩短送风距离。

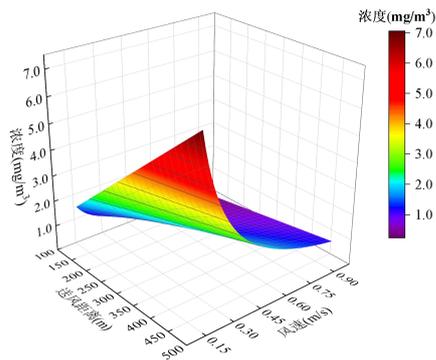


图 15 管道污染物浓度拟合曲面

Fig.15 Tunnel pollutant concentration fitting surface

4 结论

本研究基于实际输水管道结构及通风系统设计参数,建立了工作井机械送风工况下输水管道通风计算模型,通过数值计算对比分析了污染物浓度分布特性与风速、送风距离的关系。主要结论如下:

(1) 同一断面处污染物浓度变化与速度变化存在较强的关联性,靠近壁面处受管壁影响,在流体粘性作用下流速急剧下降,污染物浓度急剧上升,在远离管壁处到圆管中心处流体流速分布与污染物浓度分布比较均匀。

(2) 输水管道内污染物浓度分布规律与与管道内流动边界层理论相似,浓度分布主要受到断面风速以及送风距离的影响,在同一断面处,污染物浓度与断面风速的关系为 $z \propto y^{-1}$ 。通过增加断面风速,可有效降低管道内污染物浓度。

(3) 在同一断面风速下,污染物浓度与送风距离的关系为 $z \propto x$ 。通过减小送风距离,有利于降低管道内污染物浓度堆积现象。

本文的研究内容主要针对的是工作井机械送风方式,得出的结论可以为长距离输水管道检修期

通风系统设计提供参考。但值得指出的是,除了上述研究内容外,例如工作井机械排风、输水管道管径等也将对管道内污染物分布特性产生一定的影响。对于上述各项影响因素将会在后续工作中予以考虑。

参考文献:

- [1] Liu C, Wang X, Tong D, et al. Impact of various multishaft combined ventilation modes on the removal of harmful gases released from mussel decay in a long-distance water conveyance tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022,128:104633.
- [2] Tao Y, Dong J, Pan X, et al. Investigation of the channelling effect on pollutants dispersion between adjacent roadway tunnels[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017,14:2733-2744.
- [3] 李杰,刘振撼,彭俊钦,等.基于 CFD 技术的毗邻隧道污染物窜流特性研究[J].*地下空间与工程学报*,2021,17(S1):474-484.
- [4] 李孟柯,毕海权,李田,等.疫情条件下地铁站台污染物分布规律研究[J].*制冷与空调*,2022,36(5):721-725,745.
- [5] 陈超,聂鹤翔,李琼,等.基于通风条件多点进出城市地下道路 CO 污染物浓度分布特性预测模型[J].*中国公路学报*,2022,35(5):161-169.
- [6] 杨清海.典型地下通道空间的环境空气污染物散发传播特性及控制技术研究[D].上海:东华大学,2021.
- [7] Chen Q. Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations[J]. *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals*, 1995,28(3):353-369.
- [8] 李人宪.有限体积法基础[M].第 2 版.北京:国防工业出版社,2008.
- [9] 郑航桅,潘志权.淡水壳菜防治涂料对输水管涵糙率的影响及效益评价[J].*中国给水排水*,2021,37(24):87-92.
- [10] 孙一坚.工业通风[M].第 4 版.北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [11] 陈卓如.工程流体力学[M].第 3 版.北京:高等教育出版社,2013.
- [12] Gerhart A L, Hochstein J I, Gerhart P M. Munson, Young and Okiishi's fundamentals of fluid mechanics [M]. John Wiley & Sons, 2020.