



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2407489

引用格式:刘卫华,王峰,周吉日,等.燃气管道泄漏致顶管施工瓦斯扩散机理与通风控制[J].科学技术与工程,2025,25(22):9514-9522.

Liu Weihua, Wang Feng, Zhou Jiri, et al. Investigation on gas diffusion mechanism and risk control in jacking construction caused by gas pipeline leakage[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(22): 9514-9522.

# 燃气管道泄漏致顶管施工瓦斯扩散机理与通风控制

刘卫华<sup>1</sup>, 王峰<sup>2,3\*</sup>, 周吉日<sup>1</sup>, 周浩<sup>2,3</sup>, 罗利<sup>1</sup>, 张洋语<sup>2,3</sup>

(1. 中国五冶集团有限公司, 成都 610063; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;  
3. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

**摘要** 城市顶管覆土浅,周边管线分布密集且临近顶管。顶管施工过程中由于各种因素可能导致燃气管线的断裂和燃气泄漏,致使以瓦斯为主的燃气在土体中不断扩散并进入顶管内,给顶管安全施工带来了潜在的极大危害。以毛家湾污水处理厂进厂干管项目为背景,采用理论分析、数值计算等方法对瓦斯在土体和顶管中的扩散机理以及施工通风技术开展深入研究。研究表明:随着时间的增长,瓦斯在土体中的扩散通量先增大后趋于稳定;顶管离泄漏孔越远,掌子面瓦斯涌出量越低,瓦斯扩散至顶管所需时间越长;顶管内掌子面附近风管对侧瓦斯浓度相对较高,瓦斯容易聚集;随着风管送风量的增加,掌子面附近产生了较强的空气流动,掌子面附近瓦斯浓度不断降低,但瓦斯浓度降低速率有所减小,在风管送风量为 131 m<sup>3</sup>/min 时,顶管内最高瓦斯浓度为 4.57%,已低于瓦斯爆炸下限;随着风管风口至掌子面距离的增加,顶管内最高瓦斯浓度先减小后增大,在风管风口距离掌子面 4 m 时,顶管内最高瓦斯浓度达到最小值为 4.41%。基于此,本文提出了较为合理的顶管施工通风参数。

**关键词** 顶管; 燃气泄漏; 瓦斯; 理论分析; 数值计算

**中图分类号** TU992; **文献标志码** A

## Investigation on Gas Diffusion Mechanism and Risk Control in Jacking Construction Caused by Gas Pipeline Leakage

LIU Wei-hua<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2,3\*</sup>, ZHOU Ji-ri<sup>1</sup>, ZHOU Hao<sup>2,3</sup>, LUO Li<sup>1</sup>, ZHANG Yang-yu<sup>2,3</sup>

(1. China MCC5 Group Ltd., Chengdu 610063, China;  
2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**[Abstract]** The soil covering of urban pipe jacking is shallow, and the surrounding pipelines are densely distributed and close to pipe jacking. In the process of pipe jacking construction, various factors may lead to gas pipeline fracture and gas leakage, resulting in gas, mainly gas, spreading in the soil and entering the pipe jacking, which brings potential great harm to the safety of pipe jacking construction. Based on the main-pipeline project of Maojiawan sewage treatment plant, the diffusion mechanism of gas in soil and pipe jacking and the construction ventilation technology were studied by theoretical analysis and numerical calculation. The results show as follows. With the increase of time, the diffusion flux of gas in soil first increases and then becomes stable. The farther away the pipe jacking is from the leakage hole, the lower the gas emission amount on the face, and the longer the time required for gas diffusion to the pipe jacking. The gas concentration on the opposite side of the air duct near the face of the pipe jacking is relatively high, and the gas is easy to gather. With the increase of air supply volume in the air duct, strong air flow is generated near the face, and the gas concentration near the face continues to decrease, but the rate of gas concentration reduction decreases. When the air supply volume in the air duct is 131 m<sup>3</sup>/min, the highest gas concentration in the pipe jacking is 4.57%, which is lower than the lower limit of gas explosion. With the increase of the distance between the air duct tuyere and the face, the maximum gas concentration in the pipe jacking first decreases and then increases. When the distance between the air duct tuyere and the face is 4 m, the maximum gas concentration in the pipe jacking reaches the minimum value of 4.41%. Based on this, a more reasonable ventilation parameter for pipe jacking construction is proposed.

收稿日期: 2024-10-10; 修订日期: 2025-05-14

基金项目: 中国中冶重大研发项目(中冶科技[2023]5号-5)

第一作者: 刘卫华(1979—),男,汉族,湖南洞口人,博士,正高级工程师。研究方向:地质岩土及隧道施工技术。E-mail:39682576@qq.com。

\*通信作者: 王峰(1982—),男,汉族,江西吉安人,博士,教授。研究方向:隧道及地下工程。E-mail:wf1982625@163.com。

[Keywords] pipe jacking; gas leakage; gas; theoretical analysis; numerical calculation

顶管近年来广泛应用于城市地下管线,但因顶管上覆土较浅,周边管线分布密集,顶管在施工过程中可能会因各种因素导致临近的燃气管道泄漏甚至断裂,致使大量以瓦斯为主的燃气在土体中扩散并进入顶管内部,会给顶管施工带来极大的安全隐患,一旦造成瓦斯爆炸,其后果十分严重<sup>[1-2]</sup>。

目前,中外许多学者在关于隧道内瓦斯的分布规律以及通风技术的优化方面进行了大量的研究。张雪金等<sup>[3]</sup>研究了隧道内瓦斯的分布规律,并探究了瓦斯涌出量、风管通风量以及风管位置对瓦斯分布的影响。杨永斌等<sup>[4]</sup>研究了隧道内通风流场和瓦斯浓度场的分布规律,并探究了不同风筒送风速度、风筒直径、风筒风口距掌子面距离对瓦斯分布的影响,并提出了双风筒通风技术方案。王阅章<sup>[5]</sup>基于正交试验研究了掌子面与二次衬砌间距、风筒直径、风筒出风口与掌子面距离对隧道内瓦斯浓度的影响,并提出了最优的施工通风方案。周洋等<sup>[6]</sup>研究了风管直径、风管悬挂位置、风管出口距工作面距离、风管贴壁程度对隧道内瓦斯分布的影响,并提出了风管的最佳组合方式。刘春等<sup>[7]</sup>研究了不同风筒出风口至工作面距离下,隧道内风流场变化情况和瓦斯浓度的变化规律,并提出了大断面瓦斯隧道最佳风筒出风口位置。张恒等<sup>[8]</sup>研究了隧道横通道处射流风机的布置、轴流风管与掌子面距离、风管放置高度、射流风机放置高度对隧道内瓦斯浓度以及瓦斯分布规律的影响,并提出了最优的风机布置位置。方勇等<sup>[9]</sup>研究了压入式施工通风下风管道口与工作面距离及风管附壁程度对施工通风效果的影响。李伟林<sup>[10]</sup>研究了隧道内瓦斯时空运移规律,并探讨了风管布设位置、风管出风口至掌子面距离以及隧道施工工法对瓦斯浓度的影响。王海桥等<sup>[11]</sup>通过理论分析和数值模拟,得到了独头巷道射流通风有效射程,并提出射流有效射程与风筒出口直径和出口速度密切相关。

综上所述,目前对于大断面的隧道穿越瓦斯地层的施工通风研究较为充分,但对于顶管的施工通风以及燃气管道泄露致使瓦斯在顶管内扩散的研究极其缺乏。现首先基于现有的燃气管道泄露和扩散模型<sup>[12-13]</sup>,采用理论分析深入研究瓦斯在土体中的扩散规律,然后采用数值模拟深入探讨风管风口至掌子面距离、风管送风量对顶管内瓦斯分布的影响,最后提出较为合理的施工通风参数,为顶管施工通风安全提供指导作用。

## 1 燃气管道的泄漏与扩散模型

### 1.1 燃气管道的泄漏与扩散模型

#### 1.1.1 燃气管道的泄漏

考虑到燃气管道断裂泄漏量最大,危害性更强,故本文基于燃气管道断裂泄漏进行研究。其中,燃气按理想气体考虑,燃气管道断裂泄漏模型的泄漏孔处燃气的泄漏量<sup>[12]</sup>为

$$q = A_{or} \sqrt{\frac{n}{n+1} \frac{[P_1^{(n+1)/n} - P_0^{(n+1)/n}] P_1^{(n-1)/n}}{RT_1 \left( \frac{\lambda L}{2D_1} + \frac{1}{n} \ln \frac{P_1}{P_0} \right)}} \quad (1)$$

式(1)中: $q$ 为燃气泄漏量,kg/s; $D_1$ 为燃气管道直径,m; $P_0$ 为环境大气压,Pa; $R$ 为气体常数,这里取518 J/(kg·K); $A_{or}$ 为泄漏孔口面积,m<sup>2</sup>; $P_1$ 为燃气管道起点处的绝对压力,Pa; $T_1$ 为燃气管道起点处的开尔文温度,K; $\lambda$ 为摩擦阻力系数; $L$ 为泄漏孔与燃气管道起点的距离,m; $n$ 为多变指数,本文 $n$ 取1。

#### 1.1.2 燃气在土体中的扩散

前人基于菲克第一定律和菲克第二定律采用无量纲分析法,得到了燃气在土体中的扩散浓度<sup>[13]</sup>,即

$$c(r,t) = \frac{q}{4\pi Dr} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{r}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

式(2)中: $q$ 为泄漏孔燃气泄漏量,kg/s; $c$ 为扩散浓度,kg/m<sup>3</sup>; $D$ 为土体中的扩散系数,m<sup>2</sup>/s; $t$ 为泄漏时间,s; $r$ 为至泄漏孔距离,m;erf为高斯误差函数。

因燃气在土体中的扩散可以用菲克第一定律来描述,其方程为

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial z} \quad (3)$$

式(3)中: $J$ 为燃气的质量扩散通量,kg/(m<sup>2</sup>·s)。

将式(2)代入式(3),即可得到距离燃气管道泄漏孔 $r$ 处的气体质量扩散通量为

$$J(r,t) = \frac{q}{16\pi Dt} \left[ \frac{2e^{-\eta^2}}{\sqrt{\pi}\eta} + \frac{1 - \operatorname{erf}(\eta)}{\eta^2} \right] \quad (4)$$

### 1.2 瓦斯在土体中的扩散规律

假设某燃气管道发生管道全截面断裂,其管径 $D_1$ 为160 mm,燃气管道起点压强 $P_1$ 为1.6 MPa,环境大气压 $P_0$ 为101 325 Pa,起点气温 $T_1$ 为300 K,管道摩擦阻力系数为0.02,泄漏孔与燃气管道起点的距离 $L$ 为100 m,因燃气管道中瓦斯含量较高,基本都在95%以上,故将燃气按纯瓦斯考虑,土体中的

扩散系数  $D$  为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

图1为距离泄漏孔1 m处瓦斯的质量扩散通量随时间的变化曲线。由图1可以看出,在燃气管道泄漏初期,瓦斯扩散到距离泄漏孔1 m处需要一定时间,该处的瓦斯质量扩散通量为0;随着泄漏的持续进行,瓦斯逐渐填充土体中的孔隙,瓦斯的质量扩散通量迅速增长;瓦斯扩散一定时间后,瓦斯的质量扩散通量增长速度减缓,最后趋于稳定。当泄露时间趋于无穷大即瓦斯扩散达到稳态,瓦斯的质量扩散通量  $J = q/4\pi r^2$ ,因泄漏孔泄漏量为定值,故瓦斯扩散达到稳态时,瓦斯的质量扩散通量只与至泄漏孔的距离有关。

图2为不同泄漏时间瓦斯的质量扩散通量随距离的变化曲线。由图2可知,随着至泄漏孔距离的增加,瓦斯的质量扩散通量急剧下降,距离泄漏孔越远,瓦斯到达该处所需的时间也越长。因在顶管施工时,瓦斯主要通过顶管掌子面进入顶管,顶管离燃气管道泄漏孔越远,瓦斯扩散至顶管所需时间越长,顶管掌子面处瓦斯的质量扩散通量越小,掌子面瓦斯涌出量越小。

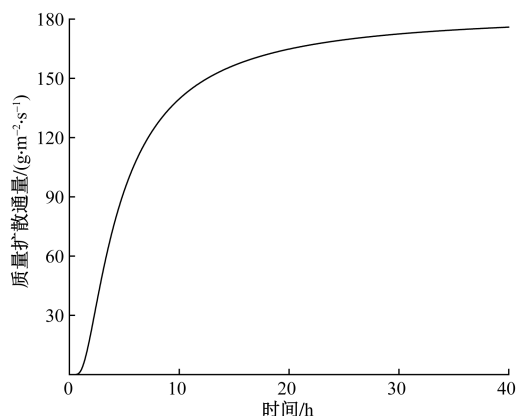


图1 瓦斯质量扩散通量随时间的变化曲线

Fig. 1 Variation curve of gas mass diffusion flux with time

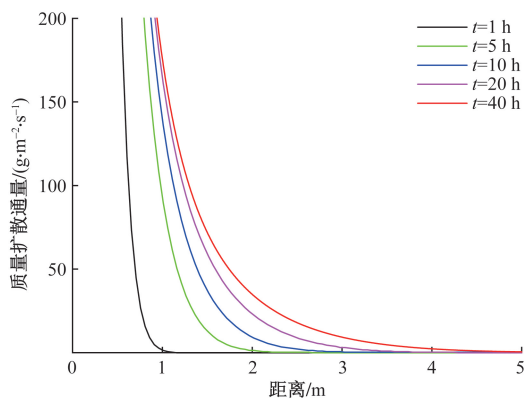


图2 瓦斯质量扩散通量随距离的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of gas mass diffusion flux with distance

## 2 数值模型

### 2.1 模型建立

以毛家湾污水处理厂进厂干管项目为背景,其顶管埋深为6.13~17.27 m。因顶管穿越居民区,居民区燃气管道颇多,顶管最浅埋深段穿越燃气管道的剖面图如图3所示,其中燃气管道埋深为2 m,管径为160 mm,燃气管道至顶管距离为3.97 m。施工段地层为杂填土。

采用Fluent软件对顶管内瓦斯扩散进行计算,基于施工现场建立模型,施工现场如图4所示,其中顶管管径为2 m,风管位于拱脚,风管风口距离掌子面3 m,风管管径为0.3 m,建立长100 m的顶管模型。顶管模型如图5所示。

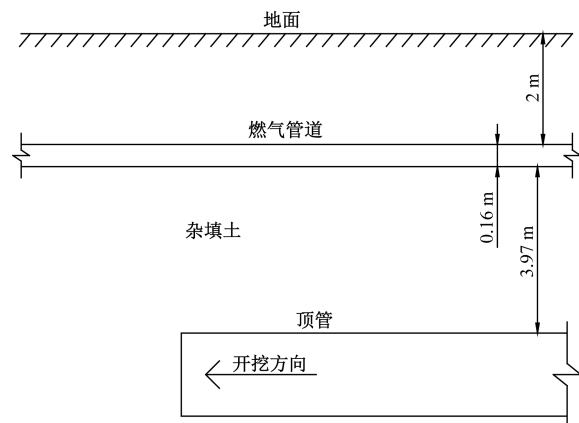


图3 顶管施工段剖面图

Fig. 3 Section view of pipe jacking section



图4 施工现场

Fig. 4 Construction site

### 2.2 计算参数及边界条件

为模拟顶管内瓦斯与空气的扩散,本文研究采用组分运输模型,湍流模型采用标准  $k-\varepsilon$  方程模型。顶管壁面采用绝热无滑移的壁面边界,粗糙高度设

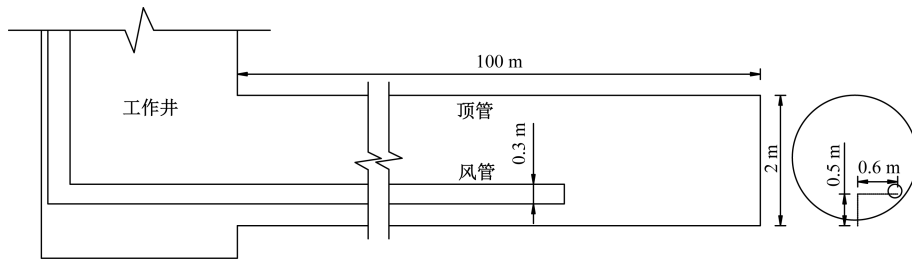


图5 顶管模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of pipe jacking mode

置为0.08 m,粗糙常数设置为0.5<sup>[14]</sup>;顶管入口采用压力出口边界;风管出风口采用速度入口边界;掌子面采用速度入口边界,根据第1节计算得到掌子面瓦斯最大涌出量为3.05 m<sup>3</sup>/min(即瓦斯涌出速度为0.016 2 m/s)。

### 3 顶管施工瓦斯扩散规律与通风控制技术

#### 3.1 送风量对瓦斯扩散规律的影响分析

根据规范要求<sup>[15]</sup>,通过计算得到顶管内最小需风量为47 m<sup>3</sup>/min。本文研究分别对风管风口风速为11、16、21、26、31 m/s(风管送风量 $Q=47、68、89、110、131$  m<sup>3</sup>/min)5种工况进行数值模拟,研究风管送风量对顶管内瓦斯分布的影响。

为研究顶管内瓦斯纵向的扩散规律,在顶管内设置测线,监测测点瓦斯浓度沿程变化情况,断面测点布置如图6所示。

##### 3.1.1 瓦斯浓度变化分析

图7为距离掌子面10 m范围内,不同工况各测点瓦斯浓度沿程变化曲线。由图7可以看出,测点1瓦斯浓度沿程逐渐减小最后趋于稳定;测点2瓦斯浓度沿程先减小后增大最后趋于稳定;测点3瓦斯浓度沿程先增大后趋于稳定,且随着风管送风量的增加,各测点瓦斯浓度均显著降低。进一步分析其数值可发现,测点1、测点2、测点3瓦斯浓度分别

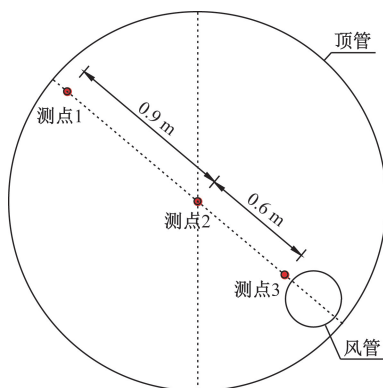
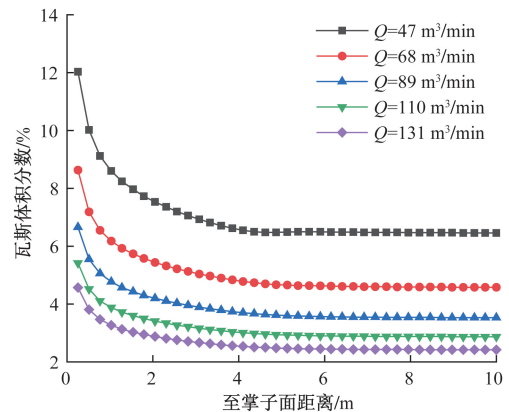
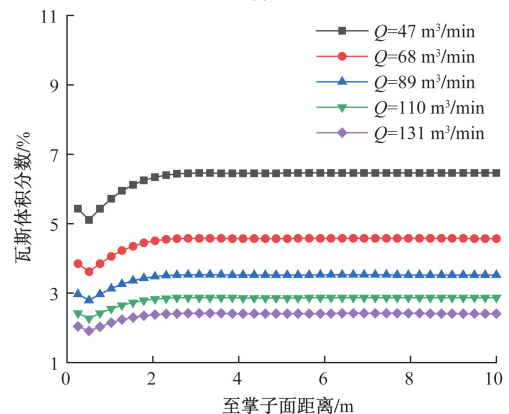


图6 测点布置示意图

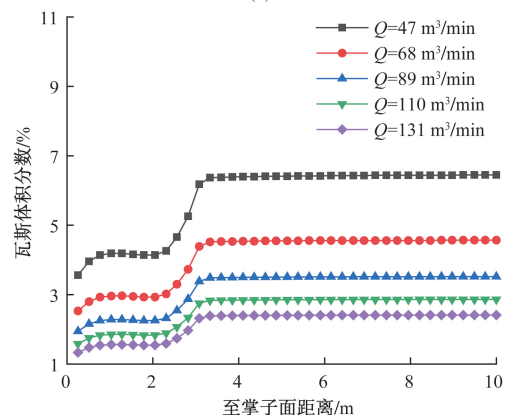
Fig. 6 Schematic diagram of measuring point layout



(a) 测点1



(b) 测点2



(c) 测点3

图7 不同工况测点瓦斯沿程变化曲线

Fig. 7 Gas variation curves at different measuring points under different working conditions

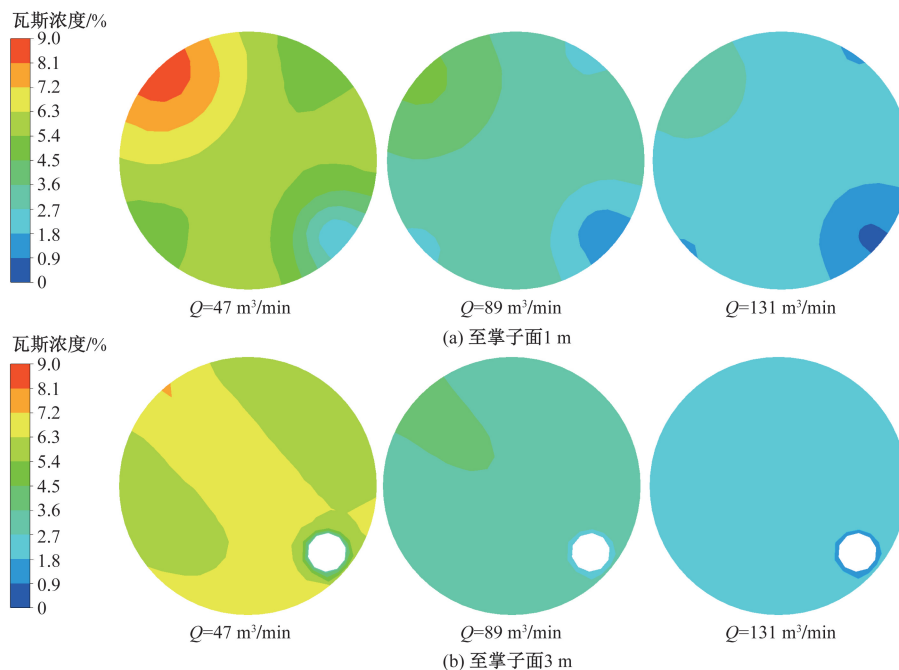


图8 不同工况典型断面瓦斯分布云图

Fig. 8 Gas distribution cloud map of typical sections under different working conditions

在距离掌子面 4.62、3.08、3.59 m 时基本达到稳定,相同送风量下各测点稳定段瓦斯浓度较为接近,说明瓦斯在风管风口后端才趋于稳定,且稳定段瓦斯分布较为均匀。

为探究风管送风量对顶管横断面瓦斯分布的影响,图 8 给出了不同风管送风量掌子面附近以及风管风口所在断面的瓦斯分布云图。由图 8 可知,掌子面附近风管侧瓦斯浓度较低,风管对侧瓦斯浓度较高,瓦斯容易聚集,随着风管送风量的增加,掌子面附近瓦斯浓度显著减小;在风管风口附近瓦斯分布接近均匀,随着风管送风量的增加,断面瓦斯浓度显著减小,且瓦斯分布越来越均匀。

因瓦斯爆炸下限为 5%,为防止顶管发生瓦斯爆炸,图 9 给出了顶管最高瓦斯浓度随风管送风量的变化曲线。由图可知,随着风管送风量的增加,顶管内最高瓦斯浓度显著降低,但降低速率逐渐减缓,在风管送风量为 131 m<sup>3</sup>/min 时,顶管内最高瓦斯浓度为 4.57%,已低于瓦斯爆炸下限。

### 3.1.2 流场变化分析

图 10 为不同风管送风量顶管纵断面的风流矢量图。由图 10 可知,向掌子面移动的新鲜空气经掌子面阻挡形成的回流风携带瓦斯先在顶管上侧聚集,并沿顶管上侧壁移动,这导致出现了如图 7 中位于掌子面附近上侧的测点 1 瓦斯浓度较高的现象。回流风移动至风管风口附近后分为两个路径扩散,小部分回流风向掌子面扩散,形成涡流区,导致位于涡流区的瓦斯不易排出;另一部分继续

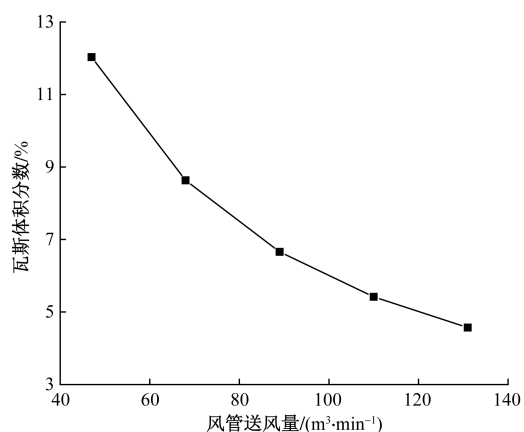


图9 最高瓦斯浓度随风管送风量的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of the maximum gas concentration with the air supply volume of the air duct

向顶管进口扩散,且风流分布逐渐趋于均匀。随着风管送风量的增加,顶管掌子面附近聚集在顶管上侧的回流风风速不断增加,有效地降低了此区域的瓦斯浓度。

为进一步研究风管送风量对顶管掌子面附近区域瓦斯分布的影响,图 11 为不同风管送风量下,距离掌子面 1 m 横断面的风流矢量图。由图 11 可知,在掌子面附近横断面上,位于风管对侧的区域出现面积较大的对称涡流区,这导致出现了如图 8(a)中位于掌子面附近风管对侧的瓦斯浓度较高的现象。随着风管送风量的增加,掌子面附近风流风速不断提高,有效地降低了掌子面附近的瓦斯浓度。

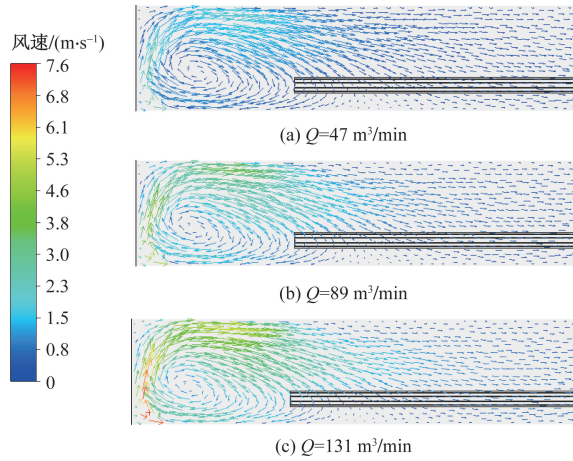


图 10 不同工况顶管纵断面风流矢量图

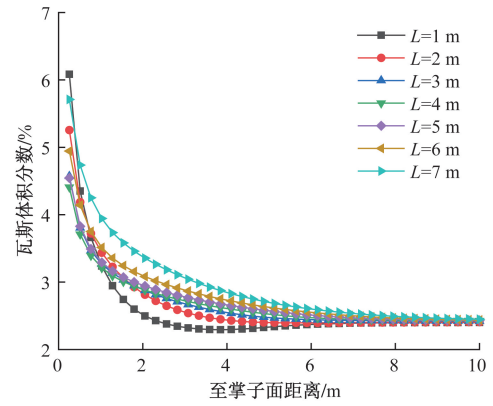
Fig. 10 Air flow vector diagram of pipejacking profile under different working conditions

### 3.2 风管风口至掌子面距离对瓦斯扩散规律的影响

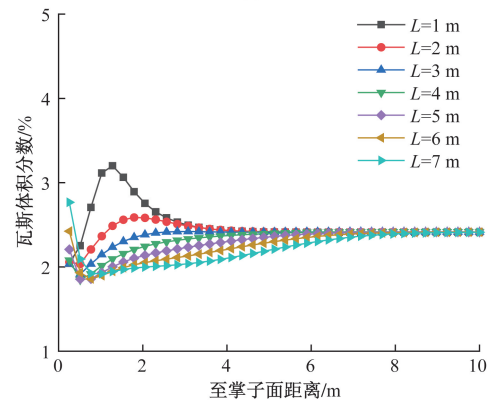
因压入式施工通风时风管风口至掌子面的距离要满足  $L = (4 \sim 5)\sqrt{S}$ , 其中  $S$  为顶管断面面积, 本文  $S = 3.14 \text{ m}^2$ , 本文设定  $L = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \text{ m}$  7 种工况, 在风管送风量  $Q = 131 \text{ m}^3/\text{min}$  时, 研究风管风口至掌子面的距离对顶管内瓦斯分布的影响<sup>[6]</sup>。

#### 3.2.1 瓦斯浓度变化分析

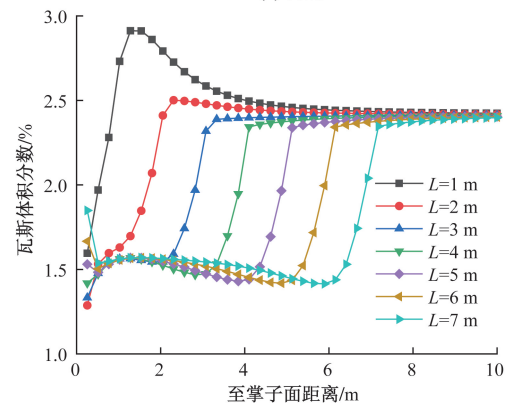
图 12 为距离掌子面 10 m 范围内, 不同工况各测点瓦斯浓度沿程变化曲线。由图 12 可以看出, 风管风口至掌子面的距离不同, 测点 2、测点 3 瓦斯浓度沿程变化规律有所不同, 在风管风口至掌子面的距离  $L = 1 \sim 2 \text{ m}$  时, 测点 2 瓦斯浓度沿程先增大后减小最后趋于稳定, 而在  $L = 2 \sim 7 \text{ m}$  时, 测点 2 瓦斯浓度沿程先减小后增大最后趋于稳定; 在  $L = 1 \sim 2 \text{ m}$  时, 测点 3 瓦斯浓度沿程先增大后减小最后趋于稳定, 在  $L = 3 \sim 4 \text{ m}$  时, 测点 3 瓦斯浓度沿程先增大后趋于稳定, 在  $L = 5 \sim 7 \text{ m}$  时, 测点 3 瓦斯浓度沿程先减小后增大最后趋于稳定。进一步分析其数值可发现, 在  $L = 1, 2 \text{ m}$  时, 测点 2、测点 3 瓦斯浓度在风管风口附近出现最大值, 随着风管风口至掌子面



(a) 测点1



(b) 测点2



(c) 测点3

图 12 不同工况测点瓦斯沿程变化曲线

Fig. 12 Gas variation curve at different measuring points under different working condition

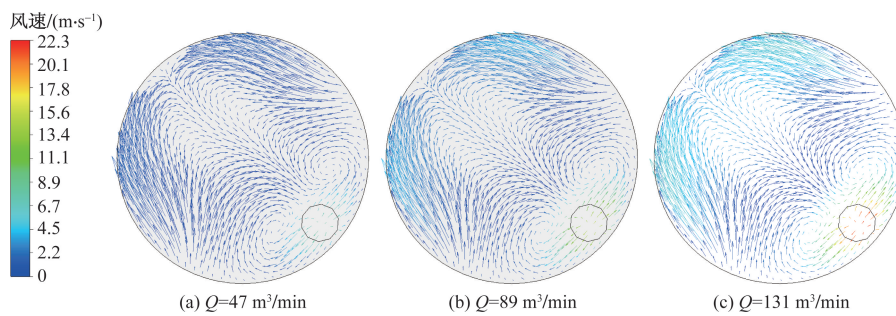


图 11 不同工况距掌子面 1 m 横断面风流矢量图

Fig. 11 Cross section air flow vector diagram 1 m away from palm surface under different working conditions

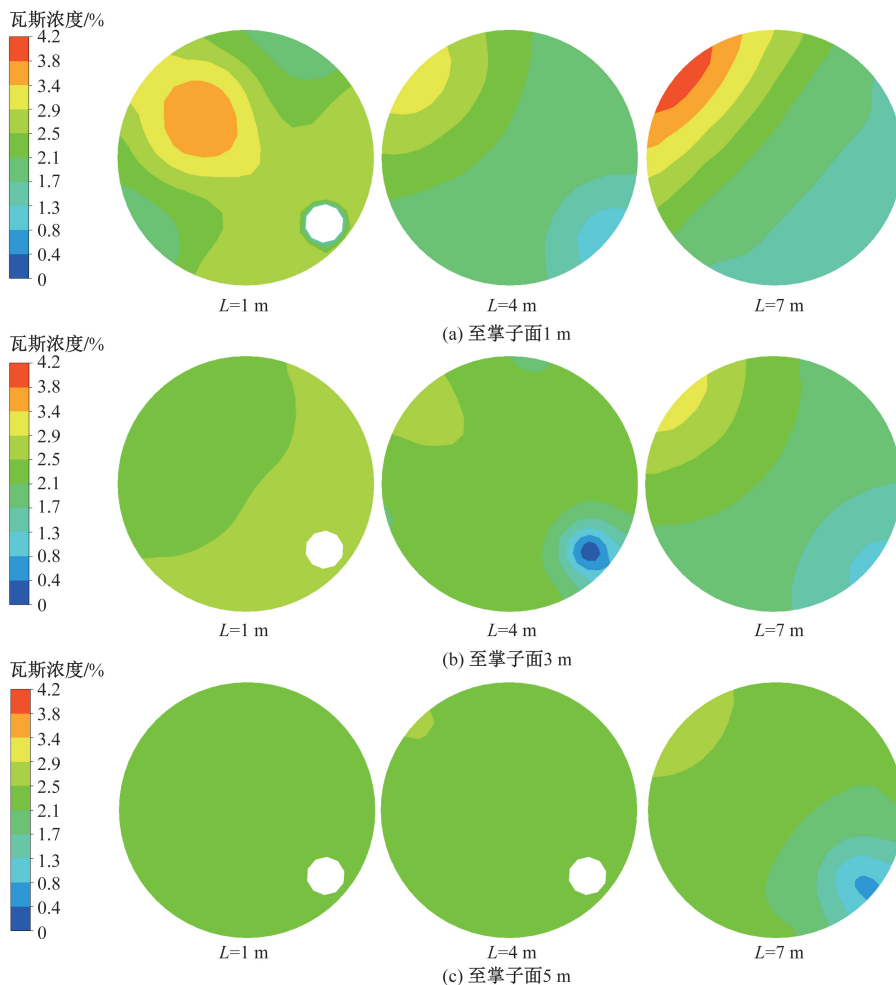


图 13 不同工况典型断面瓦斯分布云图

Fig. 13 Gas distribution cloud map of typical sections under different working conditions

距离的增加,该值逐渐减小( $L = 7\text{ m}$  时测点 2 瓦斯浓度在掌子面附近最大),在  $L = 1\text{ m}$  时最高瓦斯浓度值分别为 3.20%、2.91%,而在  $L = 2\text{ m}$  时最高瓦斯浓度分别减小至 2.59%、2.50%,分别是  $L = 1\text{ m}$  时最高瓦斯浓度的 0.81、0.86 倍。

为探究风管风口至顶管掌子面对顶管横断面瓦斯分布的影响,图 13 给出了距离掌子面 1、3、5 m 横断面的瓦斯分布云图。由图 13 可知,随着风管风口至掌子面的增加,掌子面附近断面瓦斯分布规律基本相同,但在  $L = 1\text{ m}$  时,在风管风口后方断面出现了风管侧瓦斯浓度较高的现象,而在其他工况下,风管风口后方断面瓦斯接近于均匀分布。

为探究风管风口至掌子面的最佳距离,图 14 给出了顶管测点最高瓦斯浓度随风管风口至掌子面距离的变化曲线。由图 14 可知,随着风管风口至掌子面距离的增加,顶管内测点最高瓦斯浓度先减小后增大,在  $L = 4\text{ m}$  时顶管内最高瓦斯浓度出现最小值为 4.41%,结合上述对风管风口至掌子面的距离对顶管内瓦斯分布的研究结果,本文建议顶管施工

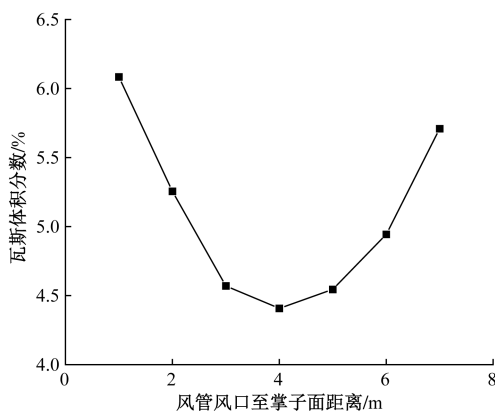


图 14 最高瓦斯浓度随风管风口至掌子面距离的变化曲线  
Fig. 14 Variation curve of maximum gas concentration with the distance from air duct tuyere to palm surface

时风管风口至掌子面的距离为 4 m。

### 3.2.2 流场变化分析

图 15 为不同风管风口至章子面的距离顶管纵断面的风流矢量图。由图 15 可知,在风管风口至掌子面的距离  $L = 1\text{ m}$  时,由于风管风口涌出风流的射

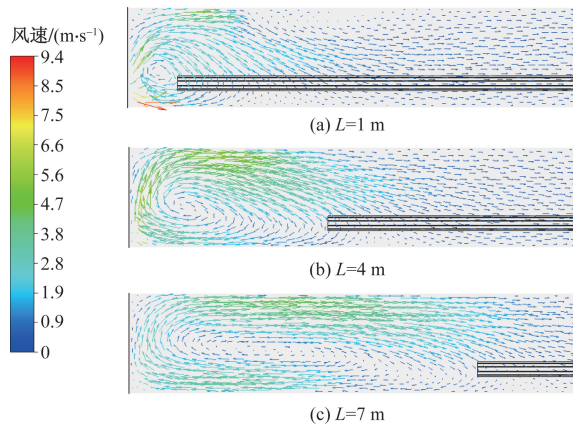


图 15 不同工况顶管纵断面风流矢量图

Fig. 15 Air flow vector diagram of pipe jacking profile under different working conditions

流距离较短,射流没有得到充分发展,经掌子面阻挡形成的回流风携带大量瓦斯不在贴附顶管上侧移动,而是在掌子面上侧聚集后向风管壁面移动,导致出现了如图 12 中  $L=1\text{ m}$  时位于顶管中心和风管附近的测点瓦斯浓度沿程陡增后又骤降和图 13(b) 中风管风口后方断面出现风管侧瓦斯浓度相对较高的现象。随着风管风口至掌子面距离的增大,射流得到了充分的发展,有效地限制了掌子面附近瓦斯在风管对侧聚集,当风管风口至掌子面距离到达一定限值后,射流已经得到充分发展,随着风管风口至掌子面距离的继续增大,掌子面附近风速不断减小,导致出现如图 14 中顶管内最高瓦斯浓度逐渐升高的现象。

## 4 结论

(1) 随着时间的增长,瓦斯在土体中的质量扩散通量先增加后趋于稳定,顶管距离燃气管道泄漏孔越远,瓦斯扩散至顶管所需时间越长,顶管掌子面处瓦斯的质量扩散通量越小,掌子面瓦斯涌出量越小。

(2) 顶管掌子面附近风管对侧瓦斯浓度相对较高,瓦斯容易聚集,随着至掌子面距离的增加,瓦斯趋于均匀分布。

(3) 随着风管送风量的增加,顶管内瓦斯浓度显著降低,但顶管内最高瓦斯浓度降低速率有所减小,在风管送风量为  $131\text{ m}^3/\text{min}$  时,顶管内最大瓦斯浓度为  $4.57\%$  已低于瓦斯爆炸下限,为减小施工成本,保证顶管内不会发生瓦斯爆炸,建议风管送风口为  $131\text{ m}^3/\text{min}$ 。

(4) 随着风管风口至掌子面距离的增加,风管风口涌出的射流逐渐得到充分的发展,有效地降低了顶管内最高瓦斯浓度,当风管风口至掌子面距离

为  $4\text{ m}$  时,最高瓦斯浓度达到最小值为  $4.41\%$ ,随着风管风口至掌子面距离的继续增大,掌子面附近风速逐渐减小,顶管内最高瓦斯浓度逐渐增加。建议风管出风口至掌子面距离为  $4\text{ m}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] 万宇, 齐金平, 张儒, 等. 基于信息增益优化支持向量机模型的煤矿瓦斯爆炸风险预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3544-3549.  
Wan Yu, Qi Jinping, Zhang Ru, et al. Risk prediction of coal mine gas explosion based on information gain-support vector machine (IG-SVM) model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3544-3549.
- [2] 李志鹏, 韩龙强, 崔柔杰, 等. 瓦斯爆炸隧道内冲击波特征及衬砌损伤机制数值研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(12): 1948-1956.  
Li Zhipeng, Han Longqiang, Cui Roujie, et al. Explosive shock wave characteristics of gas in tunnel and numerical study of lining damage mechanism[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(12): 1948-1956.
- [3] 张雪金, 方勇, 彭佩, 等. 隧道施工开挖面瓦斯涌出及扩散规律研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 119-126.  
Zhang Xuejin, Fang Yong, Peng Pei, et al. Study on regularity of gas emission and diffusion at tunnel face during tunnel construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(2): 119-126.
- [4] 杨永斌, 王轶君, 王庆, 等. 考虑双风管通风隧道瓦斯运移规律数值计算及试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(2): 169-178.  
Yang Yongbin, Wang Yijun, Wang Qing, et al. Numerical calculation and experimental study on gas migration law in tunnel with double duct ventilation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(2): 169-178.
- [5] 王阅章. 基于正交试验的瓦斯隧道施工通风方案优化研究[J]. 公路, 2021, 66(12): 395-403.  
Wang Yuezhang. Research on ventilation optimization of gas tunnel construction based on orthogonal test[J]. Highway, 2021, 66(12): 395-403.
- [6] 周洋, 赵宇, 张志强, 等. 隧道通风管道布置参数对瓦斯运移特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12718-12726.  
Zhou Yang, Zhao Yu, Zhang Zhiqiang, et al. Influence of duct layout parameters of tunnel ventilation on gas migration characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12718-12726.
- [7] 刘春, 杜俊生, 郭臣业, 等. 大断面瓦斯隧道风管布置对瓦斯浓度的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 114-121.  
Liu Chun, Du Junsheng, Guo Chenye, et al. Influence of air duct arrangement on gas concentration in the large-section gas tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2019, 56(5): 114-121.
- [8] 张恒, 吴瑾, 陈寿根, 等. 风机布置方式对高瓦斯隧道施工通风效果的影响[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1834-1841.  
Zhang Heng, Wu Jin, Chen Shougen, et al. Impact of the fan ar-

- rangement mode on the construction ventilation effect along the highly intensive gas tunnel [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(5): 1834-1841.
- [9] 方勇, 彭佩, 赵子成, 等. 风管出口位置对隧道施工通风效果影响的研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(2): 468-473.  
Fang Yong, Peng Pei, Zhao Zicheng, et al. Numerical simulation of the effect of outlet position of air duct on the construction ventilation of the tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(2): 468-473.
- [10] 李伟林. 施工隧道瓦斯运移扩散规律及其浓度动态预测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2024.  
Li Weilin. Study on gas migration and diffusion law and concentration dynamic prediction in construction tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2024.
- [11] 王海桥, 陈世强, 李轶群. 独头巷道受限贴附射流有效射程的理论研究与数值计算[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(11): 41-45.  
Wang Haiqiao, Chen Shiqiang, Li Yiqun. Theoretical research and numerical calculation of effective range for restrained wall-attached jet flow in heading face[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(11): 41-45.
- [12] 沈莹. 埋地低压天然气管道泄漏扩散数值模拟分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.  
Shen Ying. Numerical simulation analysis of leakage and diffusion of buried low pressure natural gas pipeline[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [13] 张鹏, 程淑娟. 埋地天然气管道小微孔泄漏规律研究[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(2): 52-58.  
Zhang Peng, Cheng Shujuan. Study on small micropore leakage in buried gas pipeline[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(2): 52-58.
- [14] 张恒, 孙建春, 向芬, 等. 隧道施工通风壁面粗糙度评定方法及其工程应用[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(1): 217-225.  
Zhang Heng, Sun Jianchun, Xiang Fen, et al. Assessment method to deal with the wall face roughness in the tunnel construction and its application[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(1): 217-225.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范: JTG/T3660—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specifications for construction of highway tunnel: JTG/T3660—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.