

DOI: 10.7672/sgjs2025070169

长距离顶管施工中管内环境保护技术研究*

高志惠¹, 罗利¹, 周吉日¹, 李彪²

(1. 中国五冶集团有限公司, 四川 成都 610065; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

[摘要] 为了探究传统顶管作业时, 压入式通风方式下有害气体的弥散规律, 采用发烟装置于顶管作业现场掌子面进行了烟气扩散试验, 分别对管内烟气弥散速度、管内及作业井内二氧化碳浓度场进行了测试与分析。试验结果表明: 传统压入式通风运行模式下烟气以 3.25m/s 的速度扩散, 烟雾以 1.3m/s 的速度在管道内形成弥散, 一旦发生电气火灾或燃气管线破裂事故人员难以有效撤离。研发了负压气封诱导式顶管作业环境保护系统, 采用理论分析、模型试验等方法研究了其实施关键控制参数。研究结果表明: 送风角度、送风速度以及出风口与掌子面距离对通风效果的影响依次降低, 新系统可将有害气体降低到 10% 以下, 对于有害气体泄漏事故 15min 内可将有害气体浓度降到安全值。

[关键词] 顶管; 有害气体; 弥散速度; 负压气封; 试验

[中图分类号] TU990.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0169-06

Research on Internal Environmental Protection Technology for Long Distance Pipe-jacking Construction

GAO Zhihui¹, LUO Li¹, ZHOU Jiri¹, LI Biao²

(1. China MCC5 Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: To explore the dispersion law of harmful gases under the pressure ventilation mode in the traditional pipe jacking operation, the smoke diffusion test was carried out on the tunnel face of the pipe jacking operation site by using the smoke generating device. The smoke diffusion velocity in the pipe and the carbon dioxide concentration field in the pipe and the working well were tested and analyzed, respectively. The test results indicate that under the traditional press-in ventilation operation mode, the smoke diffuses at a speed of 3.25m/s and the smoke diffuses in the pipeline at a speed of 1.3m/s. Once an electrical fire or gas pipeline rupture accident occurs, it is difficult for personnel to effectively evacuate. A negative pressure gas seal induced pipe jacking operation environment protection system was developed, and its key control parameters were studied by theoretical analysis and model testing. The results indicate that the influence of air supply angle, air supply speed, and the distance between air outlet and tunnel face on ventilation effect decreases in turn. The new system can reduce harmful gas to less than 10%, and for harmful gas leakage accidents, the concentration of harmful gas can be reduced to a safe value within 15minutes.

Keywords: pipe jacking; harmful gas; dispersion velocity; negative pressure air seal; tests

0 引言

受城市建成区或自然条件的限制, 顶管作业常面临长距离施工, 管内及竖井内作业时间延长, 导

致通过地下有害气体聚集区或钻爆市政管线的风险加大。

管内作业属于有限空间作业^[1], 需重点考虑通风以保障操作及巡检人员的健康和生命安全。隧道施工作业环境安全风险评估已成为项目常态^[2-3], 但现行规范或标准暂未明确顶管施工通风具体指标及其作业环境保护措施要求, 因此我国在

* 国家自然科学基金面上项目(42277461); 中国中冶重大研发项目(中冶科技[2023]5号-5)

[作者简介] 高志惠, 硕士, 高级工程师, E-mail: 314917724@qq.com

[通信作者] 罗利, 正高级工程师, E-mail: 16378544@qq.com

[收稿日期] 2024-09-15

长距离顶管施工通风与环境保障技术领域还有待完善,尤其有必要对长距离顶管施工通风技术进行深入研究。目前,顶管作业基本采用广泛应用于隧道施工的压入式强制性通风措施^[4-7],该方式将新鲜空气经通风设备导入管内及竖井内,用以稀释并置换有害气体。

由于顶管作业的断面尺寸远小于隧道断面,压入式强制性通风方式在工程实践中面临诸多问题,如:在极其有限的顶管系统内部空间中须布置众多的设施设备,通风效率不高;在工作井吊装管节时需中断顶管系统内部通风,存在安全隐患等。同时,长距离顶管作业相对于隧道施工还存在有害气体散发源更加集中于掌子面以及长距离顶管作业的长径比极小导致稀释有害气体能力减弱、阻力系数大^[8]等区别。同样狭窄且密闭的地铁隧道空间、电缆隧道,通风模式、甚至通风时间都会对隧道内烟气、温度的分布具有极大影响^[9-12],因此针对长距离顶管作业的空间严重受限、通风效果不明的情况,有必要对有效保障顶管系统内空气质量进行深入研究。

1 压入式通风条件下顶管系统内空气弥散现场试验

2023 年 5 月于某项目进行了压入式通风条件下顶管施工作业现场试验与实测,该项目管道为直径 2.5m 的钢筋混凝土管,已顶进长度为 65m;项目压入式送风机额定风量为 440m³/min(折合断面风速 1.5m/s)。

1.1 发烟定性试验

采用消防专用发烟装置设置于掌子面附近用以模拟有害气体侵入机头,观察烟气在顶管系统中的流动规律,记录烟气扩散速率。发烟试验结果如图 1 所示。

压入式送风条件下发烟试验结果表明:①散发于掌子面的烟气可以通过顶管系统进入工作井,并在工作井内形成弥散;②烟气在顶管内产生了明显的分层现象,证明压入式送风方式通风效率不高,难以将有害气体掺混排除,导致大量新鲜风流的浪费;③本试验用烟雾装置烟雾轻于空气,因此试验中烟雾聚集于顶管系统顶部。

通过本试验进一步验证了顶管作业的狭小有限空间作业中一旦掌子面钻爆市政管线或掌子面电缆短路燃烧,有害气体将以极快的速度弥漫整个顶管系统及工作井(本试验中烟气以 3.25m/s 的速度扩散,烟雾以 1.3m/s 的速度在管道内逸散完全),人员难以有效撤离。这也解释了如全椒经济开发区丰乐大道以西路段污水管网事故中,人员发



图 1 发烟试验
Fig. 1 Smoke test

现危险后仍不能有效撤离的原因。

1.2 发烟条件下二氧化碳浓度场测试

为准确反映沿程有害气体浓度和分散度分布,利用发烟试验产生的二氧化碳模拟掌子面涌入有害气体的情况,本次测定以顶管中线为中心,在沿程一共布置 7 个采样断面,分别距掌子面 5,15,25,35,45,55,65m(以掌子面为坐标原点);采样点距离地面高度为 1.5m,其高度为现场施工人员呼吸带的位置。同时在工作井楼梯距井底 1.5,3.0,4.5m 处设置测点,本次有害气体测试对象为二氧化碳浓度。

各测点二氧化碳浓度值如表 1,2 所示。

表 1 顶管系统中各测点二氧化碳浓度值							
Table 1 CO ₂ concentration values at each measuring point in the pipe jacking system							
测点	1	2	3	4	5	6	7
浓度/×10 ⁻⁶	1 160	986	924	897	863	754	697

表 2 工作井中各测点二氧化碳浓度值			
Table 2 CO ₂ concentration values at various measuring points in the working well			
测点	1	2	3
浓度/×10 ⁻⁶	763	891	815

根据沿程有害气体浓度测试结果:在掌子面附近二氧化碳浓度最大,距离掌子面越远二氧化碳浓度呈下降趋势,但工作井中的有害气体浓度依然很

高;根据相邻测点间的浓度变化可知(见图2),有害气体在测点1与2之间积聚较多(约170ppm),其次为测点5与6之间,约110ppm。因此,压入式送风模式下,工作及检修人员在掌子面附近作业,以及刚进入顶管作业区时应尤其注意个人防护。

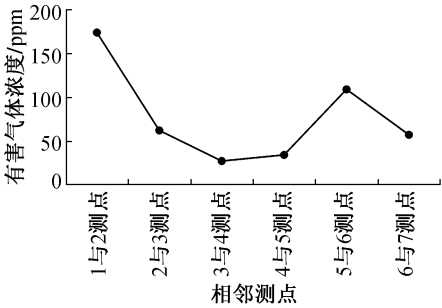


图2 相邻测点浓度差值

Fig. 2 Concentration difference between adjacent measuring points

1.3 压入式通风条件下有害气体运动规律分析

根据以上试验研究发现,压入式通风条件下流向掌子面的空气受到掌子面的阻碍作用而产生回流,并在掌子面附近一定范围内与向掌子面流动的气体相互影响,使得流场变得紊乱且复杂。涡流区的存在使得携带有害气体的流体在涡流区内循环积聚,改变了顶管内的流场,故而送风侧、出风侧有害气体集聚效应明显。

受到掌子面阻碍并产生回流的过程中,新鲜空气已与有害气体混合,携带有害气体弥散于整个顶管作业范围直至弥漫于工作井,因此传统压入式通风方式难以应对掌子面涌入大量有害气体情况下的应急通风需求。在实际施工过程中,应尽可能地通过改变通风设备的布置以提高通风效率。

2 负压气封诱导式顶管施工通风系统

针对顶管作业过程中有害气体的散发源集中于掌子面、机头部位散热量大、气流上升稳定的特点,提出了机头部位负压气封、诱导式捕集的通风方式保障顶管作业环境。系统主要由紊流送风装置和排风装置组成。紊流送风装置设置于距掘进头一定距离处,且位于工具管内,紊流送风装置形成与掘进头呈一定角度的空气幕气封结构,气流在空气幕与掘进头之间反弹回旋并形成空气紊流旋涡,以使毒害气体充分搅拌和混掺并形成稳定的上升气流。排风装置设置于工具管内,其中排风装置的第一风口位于掘进头和紊流送风装置之间,收集并接收毒害气体;第二风口位于地面以上,将毒害气体排出施工区域。紊流送风装置用于形成空气幕的气封结构,通过空气幕的气封,将通过前端掘

进头侵入工具管的有毒有害气体有效抑制在该区域内,防止有毒有害气体进一步逸散。

负压气封诱导式顶管施工通风系统构造如图3所示。

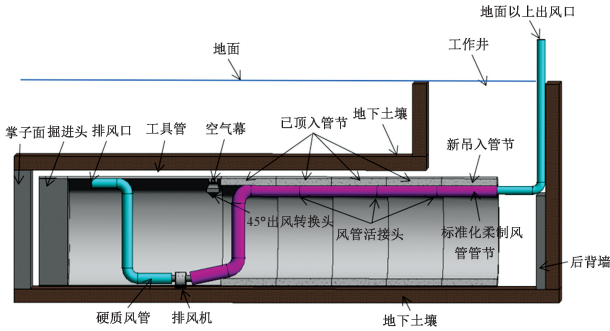


图3 负压气封诱导式顶管施工通风系统

Fig. 3 Ventilation system for induced pipe jacking construction with negative pressure gas sealing

负压气封诱导式顶管施工通风系统中紊流送风装置按流体力学中射流原理进行计算,如图4所示,保证气流可到达工具管底部且产生气流反弹回旋。由于影响诱导空气量的因素很多,为了得到简化数学模型需简化部分非主要因素:将空气视为黏性不可压缩流体;送风口空气的温度与管内环境温度相同;某一时间间隔内顶管系统内各点的速度及方向不变。

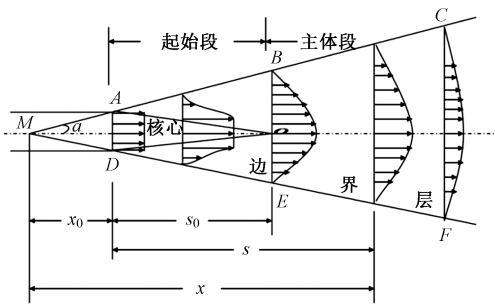


图4 诱导式射流原理

Fig. 4 Principle of induced jet

射流诱导式通风的扩散角计算公式如下:

$$\tan \alpha = \frac{KX}{\chi} = K = \phi a \tag{1}$$

式中: K 为常数; ϕ 为喷嘴形状系数; a 为紊流系数,由试验决定; χ 是表示射流流动结构的特征系数。根据喷嘴的几何特征可求得断面射流半径以及沿射程的变化规律如下:

$$\frac{R}{r_0} = \frac{x_0 + s}{x_0} = 1 + \frac{s}{r_0 / \tan \alpha} = 1 + 3.4a \frac{s}{r_0} = 3.4 \left(\frac{as}{r_0} + 0.294 \right) \tag{2}$$

$$R=r_0+3.4as\tag{3}$$
$$\frac{R}{r_0}=\frac{x_0/r_0+s/r_0}{x_0/r_0}=\frac{\bar{x}_0+\bar{s}}{1/\tan\alpha}=3.4a(\bar{x}_0+\bar{s})=3.4a\bar{x}\tag{4}$$

$$\frac{D}{d_0}=6.8\left(\frac{as}{d_0}+0.147\right)\tag{5}$$

式中: R 为射流半径(m); $\bar{x}$ 为射程(m); x_0 为喷口内的长度(m); s 为过渡段长度(m); $\bar{s}$ 为无因次距离; r_0 为喷口的半径(m); D 及 d_0 为直径(m);其他参数的物理意义详见参考文献[10]。

用半经验公式表示射流各横截面上的无因次速度分布如下:

$$\frac{r}{r_m}=\left[1-\left(\frac{y}{R}\right)^{1.5}\right]^2\tag{6}$$

$$\frac{y}{R}=\eta\tag{7}$$

$$\frac{v}{v_m}=\left[1-\eta^{1.5}\right]^2\tag{8}$$

式中: v_m 为射流轴心速度(m/s); v 为 y 点上的速度(m/s); y 为横截面上任一点至轴心的距离(m); y/R 为无因次距离。

针对上述公式进行分析,发现诱导式空气幕的安装倾角、安装距掌子面距离及出风速度 3 个因素对通风效果的影响最大且影响程度存在差异。

3 负压气封诱导式顶管施工通风系统主控参数的优化

采用正交试验法研究紊流送风装置的安装倾角、安装距掌子面距离及出风速度 3 个因素对通风效果的影响,分别用 x,y,z 表示;其余因素,如有害气体溢出速度、温度、湿度等因素均视为固定不变,且不对试验产生额外影响。设计 1 个水平数为 3 的正交试验,研究的因素各水平取值如表 3 所示。

表 3 正交试验因素水平

Table 3 Orthogonal test factor level table

水平	出风速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	安装距掌子 面距离/m	安装 倾角/($^{\circ}$)
1	4	0.2	30
2	8	0.4	40
3	16	0.6	50

研究因素 x,y,z 对顶管施工通风过程中通风效果的影响程度,选用正交表 L9(34) 进行试验设计。

采用缩小比例试验的方式进行,主要由 1/5 的亚克力顶管系统模型、发烟装置、负压诱导式通风系统、数据采集系统构成。试验步骤为:①调整无极调速诱导式空气幕及排风机的不同转速,通过风速仪记录下模型内的速度等参数;②观察烟雾的扩

散状态,待烟雾扩散状态稳定后,利用数据采集系统对模型各断面的烟雾浓度进行测定;③重复以上步骤,进行不同诱导式空气幕安装位置及诱导式空气幕送风角度工况下的试验,如图 5 所示。

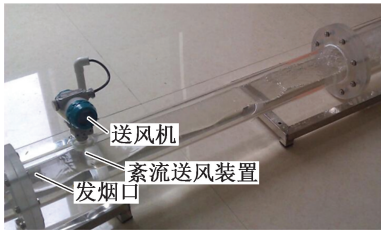


图 5 亚克力顶管系统试验模型

Fig. 5 Experimental model of acrylic pipe jacking system

通过对距掌子面距离、射流角度和断面平均风速的控制,保证工具管内形成全空间的空气紊流漩涡,将各种相对分子质量的有毒有害气体进行充分搅拌、掺混,形成稳定的上升气流,降低有毒有害气体的收集难度。

3.1 送风口风速主控参数分析

风速对空气幕是一个极为重要的参数,在很大程度上决定了隔断气流的效果,对于民用建筑及商业建筑其出口风速一般推荐采用 4~9m/s。模型试验将诱导式空气幕布置在距工作面 0.5m 位置,空气幕布的倾角 40°,出风速度分别设置为 4,8,16m/s 3 种工况,有害气体浓度的监测点按压入式通风中监测点布置的 1/5 取值,绘制出不同诱导式空气幕送风速度时工作面有害气体浓度随通风时间的变化曲线,7 个监测点的有害气体浓度如图 6 所示。

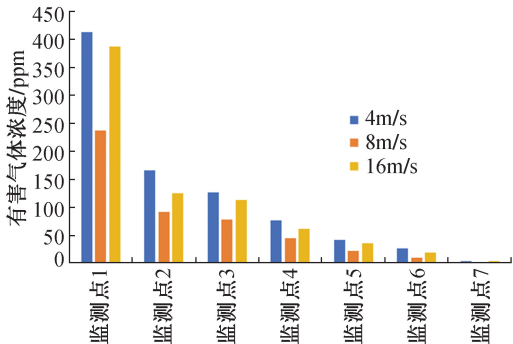


图 6 送风口风速主控参数下有害气体浓度

Fig. 6 Concentration of harmful gas under the parameter of airflow velocity

诱导式空气幕的主要作用为隔断气流两侧区域,因此其送风速度至关重要。根据静压及速度梯度可将风流流场分为稳定的上、下游区及变化剧烈的回流区。空气幕出口风速降低,有效压力随之降低,会使漏风量进一步增加;空气幕出口风速增大,引射作用增强,会导致气流卷吸作用明显,不利于

有害气体的分离。因此,在设置诱导式空气幕时其隔断能力应与所需隔断压差匹配,本试验中建议取值为 8m/s。

3.2 距离掌子面距离主控参数分析

将诱导式空气幕呈 40°角布置在工具管的顶部,出风速度 8m/s,并将距掌子面的水平距离分别设置为 0.2,0.4,0.6m 共 3 种工况,绘制出风口距离掌子面不同水平距离时工作面有害气体浓度随通风时间的变化曲线,掌子面持续散发有害气体情况下 7 个监测点的有害气体浓度如图 7 所示。

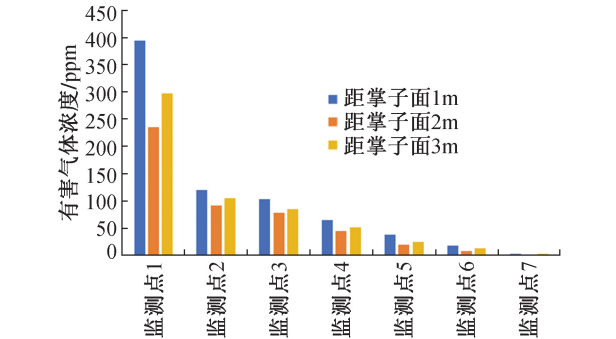


图 7 距离掌子面距离下有有害气体浓度分布

Fig. 7 Concentration of harmful gas at a distance from the palm face

当诱导式空气幕距离工作面过近时,会导致高速风流直接作用在有害气体散发源,使得工作面附近的污染物更加紊乱;反之过远则会导致风流达不到工作面附近,通风作用效果不明显。故诱导式空气幕距离掌子面的水平距离对通风效果也有着较大的影响。

3.3 布置角度主控参数分析

将诱导式空气幕布置在距工作面 0.4m 位置,出风速度 8m/s,并将诱导式空气幕的倾角分别设置为 30°,40°,50° 3 种工况,绘制出不同诱导式空气幕布置倾角时工作面有害气体浓度随通风时间的变化曲线,掌子面持续散发有害气体情况下 7 个监测点的有害气体浓度如图 8 所示。

根据风机全压和射流角度与压差、风量之间的关系,结合上述模拟得到的数据可计算出空气幕在不同风机全压和不同射流角度下所产生的隔断压差在 28.6~69.5Pa。诱导式空气幕风机全压为定值时,随着空气幕射流角度的增大,隔断压差与阻风率呈现先增大后减小的变化趋势,漏风量呈现先减小后增大的变化趋势,随着空气幕射流角度的增大,气幕汇合逐渐形成完整风幕,但当空气幕射流角度继续增大时,受到来自顶管系统横向压力的作用,空气幕不能有效阻隔风流;当射流角度过小或

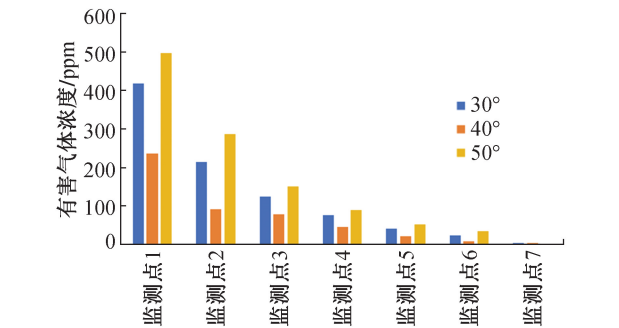


图 8 布置角度下有有害气体浓度

Fig. 8 Concentration of harmful gas at installation angle

风机全压过大时会发生引射风流现象,此时空气幕将下游空气引射到上游,不再拦截风流。综合分析,由空气幕射出空气的角度过大会出现气流摆动的现象,过小又可能出现引射现象,模拟中建议对侧送式空气幕送风角度 α 取值 40°。

3.4 3 个因素耦合分析

针对所研究的 3 种施工情况,极差分析得到各因素水平下有害气体浓度平均值极差值如表 4 所示。

表 4 有害气体浓度平均值极差值

Table 4 Average range values of harmful gas concentrations

参数	出风速度/(m·s ⁻¹)	安装距掌子面距离/m	安装倾角/(°)
K_{j1}	142.6	140.3	164.7
K_{j2}	127.3	128.7	128.4
K_{j3}	120.6	119.3	116.7
K_{j4}	120.1	123.7	112.8
$\bar{K}_{j1}$	32.7	31.6	36.1
$\bar{K}_{j2}$	28.3	29.2	28.8
$\bar{K}_{j3}$	26.8	25.5	24.9
$\bar{K}_{j4}$	26.3	26.9	24.4
R_j	6.4	6.1	11.7

极差 R_j 为 j 因素下断面有害气体浓度的最大与最小值的差值。可以通过 R_j 判断各因素对试验的影响程度。在仅有上掌子面散发有害气体的情况下,3 个因素对通风效果的影响程度从大到小依次为:送风角度、送风速度、出风口与掌子面距离。

诱导式空气幕距离掌子面的水平距离为 0.4m 时、倾角 40°、送风速度 8m/s 时,监测点 1,2,3 的有害气体浓度随通风时间的变化如图 9 所示。

诱导式空气幕距离掌子面的水平距离为 2m 时(对应试验值 0.4m)、倾角 40°、送风速度 8m/s 时的通风效果最好,有害浓度下降得最快。对于有害气体短时间散发的情况,在通风 15min 时,各监测点处有害气

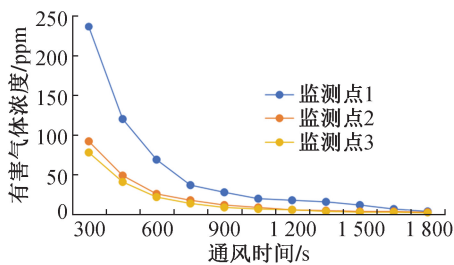


图 9 监测点的有害气体浓度随通风时间的变化

Fig. 9 The variation of harmful gas concentration at monitoring points with ventilation time

体浓度就可降为 30ppm 以下,均可达到安全浓度。

4 结语

通过现场试验、理论分析、模型试验揭示了长距离顶管压入式通风条件下施工过程中管内有害气体的时空分布特性,提出了一套大口径负压气封诱导式顶管施工方法及其主控参数的优化方案。

1)通过现场发烟试验,揭示了传统压入式通风模式下有害气体侵入顶管系统时有害气体浓度随距离掌子面距离呈下降趋势的规律,同时工作井中的有害气体浓度依然很高。得到传统压入式通风模式下有毒有害气体逸散速度极快(现场试验揭示以 3.25m/s 的速度扩散,以 1.3m/s 的速度烟雾在管道内逸散完全)人员难以有效撤离的结论。

2)3 个因素对通风效果的影响程度从大到小依次为:送风角度、送风速度、出风口与掌子面距离。负压气封诱导式顶管施工通风系统可将进入工作井的有害气体降低到 10% 以下;对于有害气体泄漏事故,负压气封诱导式顶管施工通风 15min 内可将有害气体浓度降到安全值,且该系统可实现整个顶管作业过程不中断通风。

参考文献:

[1] 笪跃武,沈海军,袁君,等. 大口径供水顶管漏点抢修及应急保障措施 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(24): 140-144.
DA Y W, SHEN H J, YUAN J, et al. Emergency repair and safeguard measures of leakage points in large diameter water supply jacking pipe [J]. China water & wastewater, 2020, 36 (24):140-144.

[2] 吴波,黄惟,陈辉浩,等. 基于熵权-可拓理论的瓦斯隧道施工安全风险评估[J]. 中国科技论文,2022,17(1): 99-104.
WU B, HUANG W, CHEN H H, et al. Risk assessment of gas tunnel construction based on entropy method and extension theory [J]. China sciencepaper, 2022,17(1): 99-104.

[3] 张富鹏,雷胜友,杨瑞,等. 超小净距分岔式隧道施工方法数值模拟研究[J]. 中国科技论文,2019,14(2):157-163,209.

ZHANG F P, LEI S Y, YANG R, et al. Numerical simulation of the construction of forked tunnels with super small spacing [J]. China sciencepaper, 2019,14(2): 157-163,209.

[4] 邓章铁,杨圣虎,吏细歌,等. 超深长距离顶管对接施工关键技术研究与应用[J]. 中国给水排水,2023,39(2):125-132.
DENG Z T, YANG S H, LI X G, et al. Research and application of key technology for super deep and long distance pipe jacking butt joint construction [J]. China water & wastewater,2023, 39 (2): 125-132.

[5] 苏江川. 地铁停车线段大断面顶管工法的论证与实践[J]. 都市轨道交通,2023,36(4): 54-62.
SU J C. Large-section pipe-jacking for subway parking line: demonstration and application [J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 54-62.

[6] 王植林,罗宏伟,汪勇. 浅滩型湖床长距离取水工程设计与施工关键技术[J]. 中国给水排水,2023,39(12):68-74.
WANG Z L, LUO H W, WANG Y. Design and key construction technology of long-distance water intake project in shallow lake bed [J]. China water & wastewater, 2023, 39(12): 68-74.

[7] 孙庆,冯文强,王志云,等. 大东湖核心区污水传输支隧工程顶管施工关键技术研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021,41(7):1218-1224.
SUN Q, FENG W Q, WANG Z Y, et al. Key construction techniques for pipe jacking in branches of sewage tunnels in Dadong Lake core area [J]. Tunnel construction, 2021, 41 (7):1218-1224.

[8] 张研,张锡文,郝鹏飞. 长径比对气动管道流量特性的影响 [J]. 液压与气动,2005,29(10):21-24.
ZHANG Y, ZHANG X W, HAO P F. The influence of length diameter ratio of a pneumatic pipe on flow rate characteristics [J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2005,29(10):21-24.

[9] 侯昱晟,李炎锋,王奕然,等. 地铁区间列车火灾烟气特性及控制策略的数值模拟[J]. 中国科技论文,2016,11(7):772-775,780.
HOU Y S, LI Y F, WANG Y R, et al. Numerical simulation of the smoke propagation mechanism and fire control methods for subway tunnel [J]. China sciencepaper, 2016,11(7): 772-775,780.

[10] 王爽. 长距离电缆隧道通风系统模拟研究及优化[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2020.
WANG S. Disturbance mechanism and control of large diameter pipe jacking in soft soil [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2020.

[11] WANG Y F, YANG F P. Research on the maximum smoke temperature around the vault of a tunnel on fire[J]. China safety science journal, 2007, 17 (10): 39-44.

[12] HU L H, Fong N K, YANG L Z, et al. Modeling fire induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: fire dynamics simulator comparisons with measured data [J]. Journal of hazardous materials, 2007, 140: 293-298.