

# 软土地区地铁盾构区间地下浅层有害气体释放的实例分析

赵华, 陈俊辉, 陈克新, 蔡卫强, 岑仰润

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 杭州地铁4号线一期工程中医药大学站—滨盛路站区间位于钱塘江南侧, 在初勘及详勘调查中发现, 地基土中存在大量地下浅层有害气体, 有害气体主要成分有 $CH_4$ 、 $H_2S$ 、 $SO_2$ 、 $CO$ 等, 以甲烷( $CH_4$ )气体为主。本文通过工程实例查明并归纳总结了该地铁盾构区间内地下浅层有害气体生储气原理、储气层埋深、分布范围、气体压力分布以及释放时气压随时间变化规律等基本特性, 并介绍了一种利用勘探钻孔并结合交叉布孔原则的地下浅层有害气体释放方法, 在地铁盾构区间的地下浅层有害气体勘察和释放中, 具有适用性强(不受场地和地层条件限制)、操作方便、沼气释放效果好的特点。通过分析得知, 本区域的浅层有害气体主要分布在淤泥质粉质黏土夹粉砂层中, 属自闭型沼气含气层, 具有连通性差、贮气空间较小、富气性差异大、气压差异大的赋存特征。

**关键词:** 地下浅层有害气体; 有害气体赋存特征; 有害气体释放; 杭州地铁4号线; 特征分析

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0603-08

## A case study of harmful gas release in shallow underground layer of subway shield tunneling section in soft soil area

ZHAO Hua, CHEN Junhui, CHEN Kexin, CAI Weiqiang, CEN Yangrun

(Hangzhou Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

**Abstract:** The section of the first phase of Hangzhou Metro Line 4 from Zhejiang Chinese Medical University Station to Binsheng Road Station is located in the south of Qiantang River. A significant amount of harmful gases were discovered in shallow underground layer during preliminary and detailed geotechnical investigations. The main components of these harmful gases include  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ , and  $CO$ , with methane ( $CH_4$ ) being the dominant gas. Through this engineering case study, the mechanism of gas generation and storage, the depth of gas-bearing layers, distribution range, gas pressure distribution, and the variation pattern of gas pressure over time during release in this subway shield tunneling section were investigated and summarized. Additionally, a method for releasing shallow underground harmful gases were introduced, utilizing exploration drilling combined with the principle of cross hole layout. It has the characteristics of strong applicability (not limited by site and stratum conditions), convenient operation and good methane release effect in the exploration and release of harmful gases in the underground shallow layer of subway shield. The analysis revealed that the shallow harmful gases in this area are mainly distributed in muddy and silty clay interbedded with silty sand layer, belonging to the self-closed biogas gas-bearing layer, which has the characteristics of poor connectivity, small gas storage space, large difference in gas abundance and large difference in gas pressure.

**Key words:** shallow underground harmful gas; occurrence characteristics of harmful gas; release of harmful gas; Hangzhou Metro Line 4; characteristic analysis

## 0 引言

随着我国经济的迅速增长,位于杭州湾及沿海地区的杭州、宁波、温州等地的城市轨道交通基础设施建设步入了新的发展阶段。但是,在这些沿海和沿江地区,地下软土层中普遍存在着浅层有害气体。传统的地质勘察方法往往难以准确探测到这些气体在地基土中的具体分布,这可能在地铁建设或日后运营过程中引发安全事故和地质灾害。因此,对于沿海或沿江地区的地铁工程建设,必须加强对浅层有害气体的勘察与研究,详细分析这些气体的分布特征、储存规律以及对工程的潜在影响,并采取相应的工程措施来消除其对工程质量和施工安全的潜在威胁。

本文基于实际工程实例,结合现场有害气体勘察报告,查明了地下浅层有害气体的形成、赋存状态及分布范围,介绍了地下浅层有害气体的释放方法及原则,分析了地下浅层有害气体在释放过程中气压的变化规律,总结了该地铁盾构区间附近地下浅层有害气体的生储气特征,并提出了关于有害气体对地铁隧道施工危害的防治措施和建议。

目前地铁4号线一期已全线贯通,本项目的沼气释放案例可为今后同类地区地下浅层有害气体的特征分析和防治方案提供经验。

## 1 工程概况

地铁4号线一期工程位于杭州市滨江区,沿着东信大道展布,连接了中医药大学站和滨盛路站。

南起浦沿路与东信大道交叉口,北至江南大道。周围环境包括学校、厂区、农居点、酒店以及高层住宅楼(见图1)。



图1 中医药大学站—联庄站区间地理位置平面示意图

Fig. 1 Geographical location plan of Zhejiang Chinese Medical University Station to Lianzhuang Station

该区间整体呈南北走向,起点的里程桩号为K4+576.107,终点的里程桩号为K5+921.802,总长约1345.7m。本区间为双线单圆盾构隧道,盾构直径为6.2m,采用盾构掘进施工方法,在K5+172.208处设置联络通道及排水泵站,中医药大学站—联庄站区间概况如表1所示。

根据详细勘察报告显示,在这个区域发现了有害气体(沼气),可能会对隧道施工和周围建筑物造成安全风险<sup>[1-2]</sup>。在施工前需要释放有害气体(沼气)<sup>[3]</sup>。

表1 中医药大学站—联庄站区间概况

Table 1 Overview of the section from Zhejiang Chinese Medical University Station to Lianzhuang Station

区间	里程	长度/m	结构形式	隧道顶板埋深及高程	施工形式
中医药大学站—联庄站	K4+576.107~ K5+921.802	1 345.7	圆形,双洞隧道,盾构直径为6.2m, 桩号K4+884.500设单边排水泵站,桩号 K5+172.208设联络通道及排水泵站	埋深为10.00~24.71m, 高程为-3.35~-18.45m	盾构

## 2 地质环境

拟建杭州地铁4号线一期工程中中医药大学站—滨盛路站区间属冲积平原地貌单元,场区内主要为市政道路,场区南端穿越新浦河,北端穿越永久河。

场地自然地面较平坦,微地貌起伏小,经实测各勘探点的高程为4.96~7.41m,高差约为2.5m,最低点位于下穿浙赣铁路涵洞处。勘察深度和范围内的土层组成、层厚、层顶埋深、层顶高程和分布情况见表2。

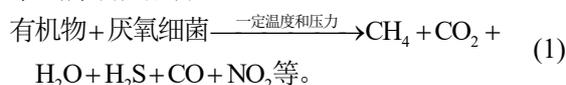
表2 地基土层划分表  
Table 2 Classification of the foundation soil layers

层号	土层名称	层厚/m	层顶埋深/m	层顶高程/m	分布情况
① <sub>1-1</sub>	杂填土	1.00~9.30	0.00	4.69~7.41	大面积分布
① <sub>2</sub>	素填土	1.00~2.80	0.00~2.00	4.70~6.78	部分分布
② <sub>1</sub>	砂质粉土	0.60~3.90	1.00~3.80	3.01~5.79	局部缺失
③ <sub>1</sub>	砂质粉土	1.00~3.00	1.50~6.60	0.18~3.77	部分分布
③ <sub>2</sub>	砂质粉土	1.60~9.80	2.30~8.00	-1.01~4.18	全场分布
③ <sub>3</sub>	粉砂夹砂质粉土	1.00~5.50	8.00~11.00	-4.91~-1.36	全场分布
③ <sub>5</sub>	砂质粉土夹粉砂	0.80~6.20	11.00~14.50	-8.01~-4.13	全场分布
③ <sub>6</sub>	粉砂	2.30~6.90	13.40~17.50	-11.09~-6.23	全场分布
③ <sub>7-1</sub>	粉砂夹淤泥质粉质黏土	0.90~3.20	17.80~21.00	-14.49~-11.14	部分分布
③ <sub>7-2</sub>	淤泥质粉质黏土夹粉砂	1.10~3.00	18.50~21.60	-15.25~-12.31	部分分布
③ <sub>美2</sub>	砂质粉土	1.30~3.70	3.30~12.10	-5.62~3.91	部分分布
⑥ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	1.70~5.80	19.70~23.70	-17.22~-13.76	全场分布
⑥ <sub>2</sub>	淤泥质粉质黏土夹粉砂	3.70~7.70	23.60~26.70	-20.81~-17.57	全场分布
⑧ <sub>1</sub>	粉质黏土	0.90~8.10	29.00~32.90	-26.16~-22.49	全场分布
⑨ <sub>1</sub>	粉质黏土	1.10~2.80	31.00~34.10	-27.62~-25.69	部分分布
⑨ <sub>2</sub>	含砂粉质黏土	0.70~3.00	33.80~36.10	-28.83~-27.37	局部分布
⑫ <sub>0</sub>	含黏性土粉砂	0.80~4.00	32.70~37.20	-30.54~-26.00	大面积分布
⑫ <sub>4</sub>	圆砾	0.20~27.80	35.40~40.80	-34.06~-28.97	全场分布
⑫ <sub>美</sub>	含砂粉质黏土	0.80~1.40	37.50~40.00	-33.26~-31.09	零星分布
⑫ <sub>2</sub>	强风化泥质粉砂岩	0.60~2.30	52.70~64.10	-57.75~-45.67	—
⑫ <sub>3</sub>	中风化泥质粉砂岩	—	53.70~65.10	-58.75~-46.67	—

### 3 有害气体的形成与分布特征

#### 3.1 有害气体的形成

杭州钱江地区包括杭嘉湖平原和萧绍平原。除了粉性土外,第四纪的多次海进海退事件还在该地区沉积了多层含有机质的淤泥质黏土和(粉土)砂岩。这些富含有机质的淤泥质黏土经过厌氧细菌分解发酵,产生气态物质,见式(1)。这些有害气体不易散播至大气层,而会在周围地下层孔隙中移动并聚集,在(粉土)砂岩中形成浅层气藏。这些浅层有害气体主要是甲烷,含量通常超过90%,同时还含有少量氮气、二氧化碳,但几乎不含有硫化氢等有毒或腐蚀性成分。



#### 3.2 有害气体的赋存状态及分布

据详勘报告,本区间的生气层为③<sub>7-1</sub>粉砂夹淤泥

质粉质黏土、③<sub>7-2</sub>淤泥质粉质黏土夹粉砂、⑥<sub>1</sub>淤泥质粉质黏土、⑥<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土夹粉砂、⑧<sub>1</sub>粉质黏土。储气层为⑥<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土夹粉砂。储气层埋深为18.00~30.50 m,气压实测值为0.001 5~0.18 MPa,修正气压值为0.051 5~0.38 MPa,最大流量为0.82~12.8 m<sup>3</sup>/h。

在地下浅层探测到了有害气体,主要表现为蜂窝状囊状体和透镜体<sup>[4]</sup>。各位置周边的地层气压、储量以及连接的气层范围存在显著不同,并且这些有害气体在地下隧道的纵向分布并非均匀<sup>[5]</sup>。探测气压分布图(摘自详勘报告)见图2。

#### 3.3 有害气体的特性

根据之前的研究和当地实践<sup>[6]</sup>,地下有害气体主要包含甲烷(CH<sub>4</sub>),占大约90%~94%。其次是氮气(N<sub>2</sub>),占3%~5%,以及二氧化碳(CO<sub>2</sub>)占1%~2%。此外还存在少量一氧化碳(CO),而其他烷类物质则较为稀缺。

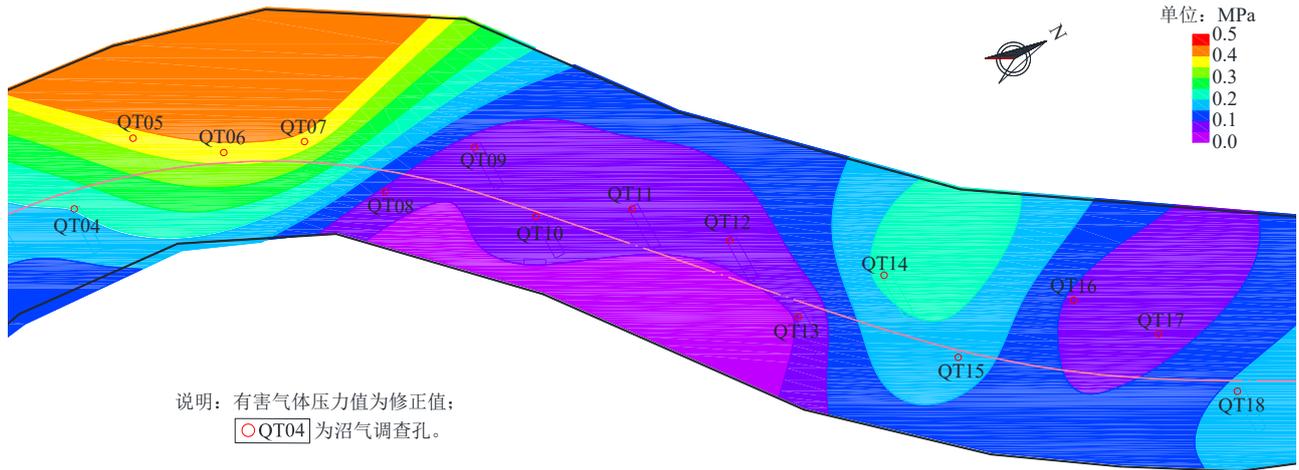


图 2 探测气压分布图 (摘自详勘报告)

Fig. 2 Distribution map of detected gas pressure (extracted from detailed survey report)

甲烷（俗称沼气）是最简单的有机化合物，是没有颜色、没有气味的气体，微溶于水，溶于醇、乙醚<sup>[7]</sup>。适当比例的甲烷和空气的混合物遇热源和明火有燃烧爆炸的危险，其爆炸的上限浓度为 15%（甲烷体积/总体积），下限浓度为 5.3%。甲烷在低浓度下对人体基本无毒，但当浓度过高时，会导致空气中的氧气含量明显下降，造成人体缺氧甚至窒息。当空气中甲烷浓度达到 25%~30%时，可能引起头痛、头晕、乏力、注意力不集中、呼吸和心跳加速以及共济失调等症状，如果不能及时脱离该环境，甚至可能导致人体窒息死亡。

### 4 有害气体的释放

#### 4.1 释放孔布孔原则及释放孔类型

本地区的天然储气层主要存在于淤泥质土层中的粉砂及粉土夹层内，属于自封闭型沼气。产气层和储气层相互交错，由于淤泥质土的黏性特性，形成了自然的封闭效应。因此，该储气层的特点包括连通性较差、储气空间较小、气体丰度差异大，并且气压差异明显<sup>[8]</sup>。有少量孔可能会存在喷溢现象，危害较大<sup>[9]</sup>。

释放孔布孔原则为交叉布孔，分布于盾构两侧，少量分布于两盾构中间。孔间距根据详勘报告中气压分布图的不同情况而定，对于气压小于 0.2 MPa 的区域，孔间距为 2 530 m；对于气压大于 0.2 MPa 的区域，孔间距为 2 025 m。孔的深度通常在 32~35 m 左右，以便揭露含气层。

释放孔与盾构的距离一般大于 5 m，局部受场地条件的限制控制在 3 m 左右，基本满足设计及规范要求。同时考虑到本区域有害气体的分布特点，依据现场释放时气量、气压情况适当增补加密释放孔。

释放孔根据实际探测的压力进行沼气释放，终孔时沼气压力一般控制在小于 0.05 MPa。考虑到有害气体分布的不均匀性，对于释放期间未检测到有害气体的情况，我院将采用空压机进行贯气处理，同时将设备停滞一定时间，确保将释放孔周边的有害气体排出。

在杭州地区，有害气体（沼气）的探测及释放主要运用在地铁上<sup>[10-11]</sup>，释放孔一般采用小口径和大口径两种，小口径释放孔一般采用改装的静探设备成孔，大口径一般采用勘察钻机成孔。前者一般用于小气量地段，放气速度慢，可近控性强，成本低；后者用于大气量地段，放气速度快且相对较彻底，但成本较高。对于小于 0.2 MPa 的地段，钻孔和静探释放孔比例为 1：2 左右；对于大于 0.2 MPa 的地段，钻孔和静探释放孔比例为 1：1 左右。本工程共有 27 个静探释放孔和 21 个钻孔释放孔。

#### 4.2 释放工作流程

我院沼气释放施工工艺流程示意图如图 3 所示：

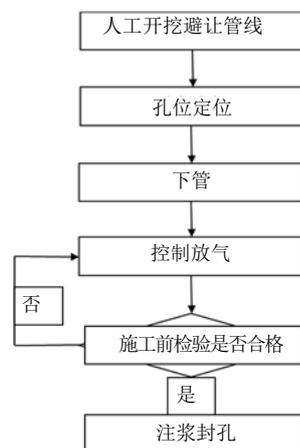


图 3 沼气释放施工工艺流程示意图

Fig. 3 Flowchart of the construction process of biogas release

### 4.3 释放控制原则

- (1) 点位放样准确至关重要, 严格控制释放孔的垂直度, 释放孔位置避免侵入隧道断面;
- (2) 应尽量完全释放有害气体 (如沼气), 原则上直到不能检测到压力为止;
- (3) 应在盾构穿越前彻底完成有害气体 (如沼

气) 的释放工作;

- (4) 安全性至关重要, 需重视防火和防喷措施, 确保人员、设备和道路安全;
- (5) 有害气体释放速率应适当, 避免对地层产生显著影响, 实现均衡放气。

沼气释放装置示意图如图 4 所示。

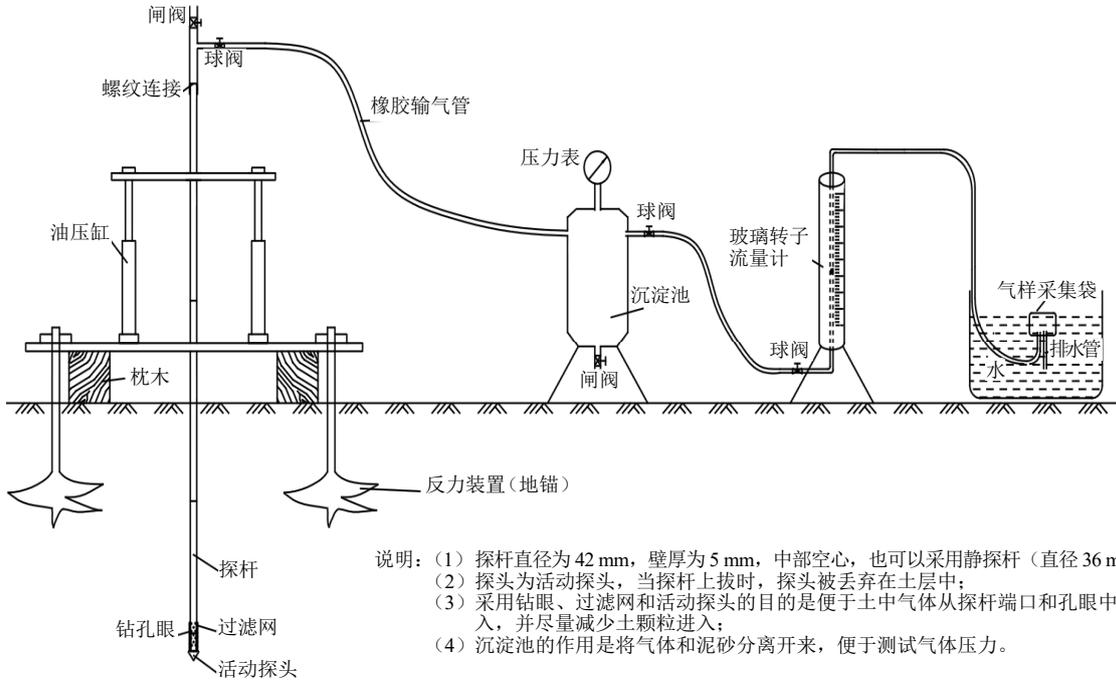


图 4 沼气释放装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the biogas release device

### 4.4 气体压力的测定

使用静压设备将带有通气口的探杆压入土层到预定深度后, 接上三通设备 (见图 5)。关闭阀门 1, 打开阀门 2, 并逐渐上拔探杆, 待喷气口开始均匀喷出气体时, 再关闭阀门 2, 打开阀门 1。气体首先经过沉淀池沉淀泥砂, 然后由压力表得知压力值大小。

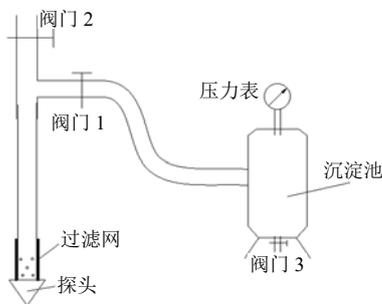


图 5 气压测试示意图

Fig. 5 Schematic diagram of air pressure test

由于气体需克服土壤阻力才能流出, 因此导致了气压的损失, 所以由直接测定法得到的压力值通常低于真实气压值。随着喷出的水和泥砂一同排

出, 最终达到平衡状态, 这时探杆内会保留一定高度的水头压力  $P_2$  (参见图 6), 而地下气体的真实压力  $P_1$  应该等于上部沉淀池腔内气体压力  $P_3$  再加上  $P_2$ 。由于每个孔的  $P_2$  值各不相同且无法测定, 因此只能估算修正。根据非饱和土体理论, 对于实测气压小于等于 0.05 MPa 的数值, 需要进行 0.05 MPa 的修正; 对于实测气压为 0.05~0.15 MPa 的数值, 需要进行 0.10 MPa 的修正; 而对于实测气压大于 0.15 MPa 的数值, 则需要进行 0.20 MPa 的修正 (喷出气压越大, 气压损失也越严重)。

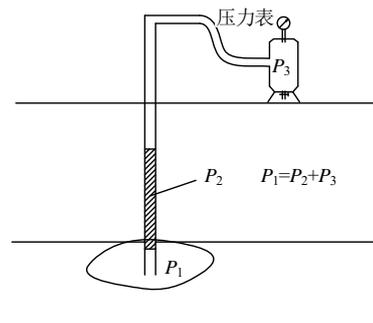


图 6 气压实际值示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the actual gas pressure value

在本区间的勘察过程中,当发现气体后,分别对各个勘探孔的峰值压力值进行记录,各勘探孔气压实测峰值及修正值如表3所示。

表3 各勘探孔气压实测峰值及修正值

孔号	实测值	修正值	孔号	实测值	修正值
QT01	0.040	0.090	QT13	0.002	0.052
QT02	0.080	0.180	QT14	0.120	0.220
QT03	0.090	0.190	QT15	0.080	0.180
QT04	0.100	0.200	QT16	0.040	0.090
QT05	0.180	0.380	QT17	0.030	0.080
QT06	0.180	0.380	QT18	0.060	0.160
QT07	0.180	0.380	QT19	0.082	0.182
QT08	0.038	0.088	QT20	0.090	0.190
QT09	0.030	0.080	QT21	0.100	0.200
QT10	0.030	0.080	QT22	0.130	0.230
QT11	0.025	0.075	QT23	0.110	0.210
QT12	0.020	0.070			

综合分析压力测试结果可以得出,本区间普遍赋存有害气体,其中的QT05—QT07有害气体压力相对较大,中心峰值实测压力为0.180 MPa,修正压力为0.380 MPa。气体压力分布可详见探测气压分布图(图2)。结合图2,施工单位在区间施工前进行有害气体的排放工作,并进行施工方案论证,

同时在施工过程中进行动态监测工作,以保证本区间工程的顺利施工。

#### 4.5 气体流量的测定

##### (1) 现场测试

开始时将橡胶管连接LZB-15型玻璃转子流量计和沉淀池,打开所有阀门后,利用节流阀控制气流速度,当浮子固定不动时记录流量计读数。

##### (2) 流量计算

$$\text{实际流量 } Q_s = Q_N \sqrt{\frac{\rho_N P_N T_s Z_s}{\rho_{SN} P_s T_N Z_{SN}}} \quad (2)$$

式中:  $P_N$ 、 $T_N$ 、 $\rho_N$  分别为空气在标准状态下的绝对压力、绝对温度和密度;  $P_s$ 、 $T_s$ 、 $\rho_{SN}$  分别为被测气体在测量时的绝对压力、绝对温度和密度;  $Q_N$  为流量计读数;  $Z_{SN}$  为被测气体在标准状态下的压缩系数;  $Z_s$  为被测气体在  $P_s$ 、 $T_s$  时的压缩系数。

以QT07号勘探孔为例,实测流量计读数流量为12.2 m<sup>3</sup>/h,流量计入口处实测温度为15 °C,绝对压力  $P_s=0.38$  MPa,则实际流量计算如下所示。其余各勘探孔流量实际值及实测值见表4。

$$Q_{s07} = 12.2 \times \sqrt{\frac{1.2046 \times 1 \times (273.15 + 15) \times 0.9734}{0.6625 \times 3.8 \times (273.15 + 20) \times 0.9977}} = 8.67 \text{ m}^3/\text{h}.$$

表4 各勘探孔流量实际值及实测值

Table 4 Actual and measured flow values of each exploration hole

孔号	实际值	实测值	孔号	实际值	实测值
QT01	1.74	1.25	QT13	0.00	0.00
QT02	2.84	2.89	QT14	5.61	6.30
QT03	2.85	2.98	QT15	2.66	2.70
QT04	4.67	5.00	QT16	1.73	1.24
QT05	8.26	12.20	QT17	1.23	0.83
QT06	8.26	12.20	QT18	1.98	1.90
QT07	8.67	12.80	QT19	2.84	2.90
QT08	1.21	0.86	QT20	3.26	3.40
QT09	1.21	0.82	QT21	4.76	5.10
QT10	1.23	0.83	QT22	5.05	5.80
QT11	1.43	0.94	QT23	5.01	5.50
QT12	1.66	1.05			

#### 4.6 有害气体压力随时间的衰竭特性

由于QT05—QT07孔内有害气体压力较为明显,因此勘察过程中,以QT07勘探孔为例,每间

隔1h记录一次压力值。现将各时间段的压力值绘制成图,如图7所示,以便深入了解有害气体压力随时间的变化规律,并查明其衰竭特性。

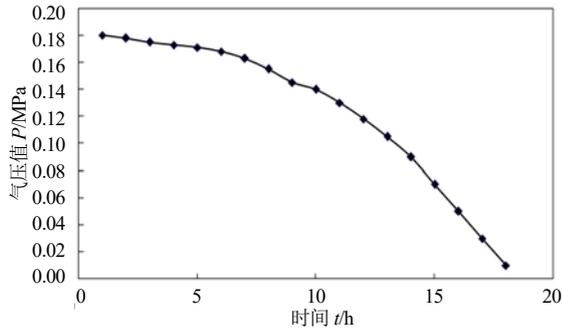


图7 QT07 气体压力随时间的衰竭规律

Fig. 7 Pattern of QT07 pressure decays over time

在排放有害气体的过程中, 气体压力并非按线性方式随时间下降, 而是呈现出类似多元曲线关系。初始阶段, 压力下降较为缓慢, 衰减速率较低, 约占峰值压力的 20%; 后续阶段, 压力迅速下降, 衰减速率明显加快, 约占峰值压力的 80%左右。当压力值显著下降至峰值压力的 10%左右时, 经过一段时间, 气体可能再次产出聚集, 使气压有所回升。

## 5 建议

经过对地下浅层有害气体的钻探调查, 发现中医药大学站—滨盛路站区间整个区域都受到了有害气体的影响, 给地铁区间施工带来了很大的风险。因此, 建议施工时应做好以下措施:

### (1) 提前有控放气

建议施工单位对有害气体压力较高的区域重点关注, 并采取有序释放地下有害气体的措施。

### (2) 加强监测、改善通风条件

成立专业的监测人员团队, 对隧道内已有的有害气体浓度进行实时监测, 在必要时使用自动报警系统, 并在盾构机前端安装先进的有害气体探测设备。另外, 应当确保隧道内通风功能完善, 以保持空气的流通。

### (3) 释放时采用错位交叉往返布孔放气措施

放气施工能使地下浅层有害气体压力显著降低, 经过一段时间, 气体可能再次产出聚集, 使气压有所回升, 因此, 地下浅层有害气体的释放是一个长期反复的过程, 释放施工时采用错位交叉往返布孔放气措施, 能有效地保证持续性放气, 降低压力。

### (4) 施工安全规则

a) 所有进入工作区域的人员, 当正在进行地下有害气体的探测及释放工作时, 必须接受有害气体危害和消防安全的相关培训;

b) 在有害气体探测及释放期间, 严禁在工作区域以及附近点燃火源、吸烟或堆放易燃物, 并禁止

携带火种或其他易燃物品进入隧道;

c) 所有可能引发火灾和爆炸的电器设备应安装防爆装置, 并定期进行专业的机电设备检查和维护;

d) 严格遵守规范及操作要求的情况下方可进行隧道内的电焊、气割等作业;

e) 工作场所内必须备有充足的电气及常规灭火设备。

## 6 结论

通过对中医药大学站—滨盛路站区间有害气体的调查, 得出以下结论:

(1) 本区域的浅层有害气体主要分布在⑥<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土夹粉砂层中, 属自闭型沼气, 气源层与含气层相互交错, 由于淤泥质黏性土的本身自封闭作用, 使其赋存特点表现出含气层连通性差、贮气空间较小、富气性差异大、气压差异大的特点。

(2) QT05—QT07 均喷出泥浆气体混合物, 其余勘探孔均喷出纯气体, 其中 QT13 和 QT16 排出微量气体。因此, 本区域的浅层有害气体中每个放气孔所处气囊具有明显的独立性, 相互影响很小, 在不同的点位上, 即使相隔距离很近, 其气量也存在着明显的差异。

(3) 本区域的地下浅层有害气体含气层顶板的埋深为 18~23 m, 含气层底板的埋深为 27.0~30.5 m。北部区域有害气体压力相对较大, 中心峰值实测压力为 0.180 MPa, 修正压力为 0.380 MPa。

(4) 在有害气体的排放过程中, 气体压力的变化并非简单线性下降, 而更趋向于多元曲线关系。排放初期, 压力下降较为缓慢, 衰减速率较低, 此阶段约占初始峰值压力的 20%; 而后续阶段, 压力迅速下降, 衰减速率显著加快, 约占峰值压力的 80%左右。

(5) 事实证明, 在地铁沼气勘察和沼气释放中采用钻孔放气施工具有适用性强(不受场地和地层条件限制)、操作方便、沼气释放效果好的特点。

## 参考文献

- [1] 杨纬卿. 有害气体对地铁隧道区间的影响及处理措施[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(2): 766, 764.  
YANG Weiqing. Effect of harmful gas on subway tunnel section and treatment measures[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2016(2): 766, 764.
- [2] 唐佳骏. 浅谈城市轨道交通地铁施工安全管理[J]. 中

- 国科技投资, 2019(12): 74.
- TANG Jiajun. Discussion on subway construction safety management of urban rail transit[J]. China Venture Capital, 2019(12): 74.
- [3] 徐国庆, 岳丰田, 王弘琦, 等. 杭州地铁1号线穿越钱塘江地层沼气释放技术探讨[J]. 隧道建设, 2013, 33(3): 247-251.
- XU Guoqing, YUE Fengtian, WANG Hongqi, et al. Technology for methane releasing in shield tunneling through Qiantang River formation: case study on line 1 of Hangzhou metro[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(3): 247-251.
- [4] 朱春雷, 周顺华. 杭州地铁1号线盾构隧道施工的风险与对策[J]. 施工技术, 2014, 43(7): 94-97.
- ZHU Chunlei, ZHOU Shunhua. Risks and corresponding measures during tunnel shielding of Hangzhou subway line one[J]. Construction Technology, 2014, 43(7): 94-97.
- [5] 茅奇辉, 蔡守志, 薛美芸. 杭州地铁1号线彭建区间地下有害气体排放试验研究[J]. 西部探矿工程, 2017, 29(3): 177-180.
- MAO Qihui, CAI Shouzhi, XUE Meiyun. Experimental study on underground harmful gas emission in Pengjian section of Hangzhou Metro Line 1[J]. West-China Exploration Engineering, 2017, 29(3): 177-180.
- [6] 陈广峰, 陈惠芳, 洪敏, 等. 浅议杭州地铁隧道有害气体的危害及防治对策[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(5): 82-86.
- CHEN Guangfeng, CHEN Huifang, HONG Min, et al. Discussion on the harm of harmful gases of Hangzhou tunnel and its countermeasures[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(5): 82-86.
- [7] 杨超, 蒋飞军, 张良平, 等. 昆明地铁5号线有害气体勘察与治理措施研究[J]. 江西煤炭科技, 2021(4): 170-174.
- YANG Chao, JIANG Feijun, ZHANG Liangping, et al. Research on harmful gas survey and treatment measures of Kunming metro line 5[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2021(4): 170-174.
- [8] 葛刚. 盾构隧道穿越软土地层沼气有控释放[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(17): 126-128.
- GE Gang. Controlled release of biogas from shield tunnel crossing soft soil layer[J]. Building Technology Development, 2021, 48(17): 126-128.
- [9] 占立浩. 浅层淤泥质土沼气释放技术研讨[J]. 中华建设, 2021(1): 121-122.
- ZHAN Lihao. Research on methane release technology of shallow silt soil[J]. China Construction, 2021(1): 121-122.
- [10] 南快飞. 浅谈地下有害气体排放技术在城市地铁施工中的应用[J]. 商品与质量(理论研究), 2015(2): 119-121.
- NAN Kuafei. Application of underground harmful gas emission technology in urban subway construction[J]. Product and Quality (Theoretical Research), 2015(2): 119-121.
- [11] 马笑遇. 某越江隧道穿越区沼气对施工的影响及监控措施[J]. 浙江建筑, 2010, 27(1): 38-41.
- MA Xiaoyu. The impact of marsh gas in the crossing section of under river tunnel on construction and the counter measures of supervision and control[J]. Zhejiang Construction, 2010, 27(1): 38-41.