

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.06.009

【工程应用】

# 多功能孔压静力触探在大型水域工程含浅层气特殊地层勘察中的应用

郭鹏鹏<sup>1,2</sup>, 王勇<sup>1\*</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 余颂<sup>3</sup>, 张国超<sup>3</sup>, 张军杰<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004;

3. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050)

**摘要:** 含浅层气地层是我国长江中下游地区工程建设中常会遇到的一种不良地质。针对水域工程含浅层气地层勘探难度大、精度低等难题, 以北沿江高铁崇太长江隧道遭遇含浅层气地质为研究背景, 介绍了多功能孔压静力触探在水域含浅层气地层勘察中的应用; 通过与钻探成果的对比分析, 验证了静探方法的效果, 获取了崇太长江隧道隧址沿线浅层气的分布情况与赋存特征。结果表明: 多功能孔压静力触探能够有效获取含浅层气地质的信息, 是一种经济、高效的水域含浅层气特殊地质勘探手段; 采用辅助多功能参数对静力触探结果进行检验校正, 可以实现含气层的精细化识别。本研究为大型水域工程的特殊地层勘探提供了技术支撑, 亦可为类似工程提供借鉴。

**关键词:** 孔压静力触探; 浅层气; 水下隧道; 工程勘探; 不良地质; 含气地层

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0595-08

## Application of multifunctional piezocone penetration test in the exploration of special strata with shallow gas in large water area engineering

GUO Pengpeng<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>1\*</sup>, KONG Lingwei<sup>1</sup>, YU Song<sup>3</sup>, ZHANG Guochao<sup>3</sup>, ZHANG Junjie<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan 430071, Hubei, China; 2. College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

3. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, Hubei, China)

**Abstract:** The shallow gas-bearing stratum is an unfavorable geology often encountered in engineering construction in the middle and lower reaches of the Yangtze River in China. In view of the difficulty and low precision of shallow gas-bearing stratum exploration in water area engineering, this study, taking the shallow gas-bearing stratum encountered in the Chongtai Yangtze River Tunnel of Beiyanjiang High Speed Railway as an engineering background, introduced the application of multifunctional piezocone penetration test and verified the effectiveness of this detection method. Then, the distribution and occurrence characteristics of shallow gas along the tunnel were obtained by means of comparison with the drilling results. The results show that the multifunctional piezocone penetration test is an economical and efficient method for exploring the unique shallow gas-bearing strata in water-based projects, which can obtain the information of gas-bearing strata effectively. The fine identification of gas-bearing strata can be achieved by using multifunctional parameters to check and correct the static detection results. This technique provides technical support for the investigation of special stratum in large water area engineering, and can also provide reference for similar projects.

**Key words:** piezocone penetration test (CPTU); shallow gas; submerged tunnel; engineering investigation; unfavorable geology; gas-bearing stratum

收稿日期: 2023-07-03

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项 (52127815)。

作者简介: 郭鹏鹏 (1996—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事浅层气地质与工程灾害防治研究。E-mail: guopp1120@163.com。

\*通信作者: 王勇 (1977—), 男, 河南周口人, 博士, 研究员, 主要从事特殊岩土学与灾害防治研究。E-mail: wang831yong@163.com。

## 0 引言

浅层气在我国长江中下游沿江、沿海地区第四系地层中具有较广泛的分布,埋深一般小于 100 m,成分主要为  $\text{CH}_4$ <sup>[1-2]</sup>,通常情况下,含浅层气地层被认为是一种不良地质。随着我国地下空间开发程度的不断加大,含浅层气地层对工程建设的影响愈发受到人们的重视<sup>[3]</sup>。浅层气的喷发和燃烧不仅影响工程进展,还威胁工程建设和运营的安全<sup>[4]</sup>。因此,含浅层气地质区域内的工程建设前,利用高效的勘探方法获取浅层气的分布和赋存特征,对工程的设计和施工安全都至关重要。

近年来,越来越多的工程遭遇到浅层气特殊地质<sup>[5]</sup>,一系列用于浅层气地质勘测的技术被提出,主要包括:微生物勘探、土壤气氦分析、浅层横波地震勘探和静力触探(Cone Penetration Test,简称 CPT)等<sup>[6]</sup>。微生物勘探和土壤气氦分析可以判断浅层生物气藏的分布范围,但易受外部环境影响,而浅层横波地震勘探方法识别精度低且勘探成本较高,相比于上述方法,静力触探技术具有操作简单、精度高、经济、高效等优点,因而在含浅层气地层的勘探中具有更强的优势<sup>[7]</sup>。20世纪90年代初,因我国油气资源普查的需要,CPT技术最早被油气行业引入到浅层气资源的地质勘探中。如:为调查江浙沿海平原广泛分布的浅层气资源,蒋维三等<sup>[8]</sup>基于CPT技术开发并研制出随钻中途测试技术,可以直接观察地层中的含气位置,同时量测气体的压力和流量;李粮纲等<sup>[9]</sup>改进静力触探仪,利用外包滤网过滤气藏中的砂粒,使气体进入CPT探头,实现对浅层气的探查和采样。近年来,浅层气对工程建设的危害性逐步凸显,一些学者开始研究将CPT技术用于含浅层气地质灾害的勘察中。如:陶灵法等<sup>[10]</sup>采用活塞式探头进行小气量浅层气的探测,过程中采取打压吹气的手段防堵,在含气的淤泥质土层中取得较好的效果;中国科学院武汉岩土力学研究所的郭爱国等<sup>[11]</sup>基于孔压静力触探(Piezocene Penetration Test,简称CPTU)开展了含浅层气地层中气体释放前后的对比试验,提出砂层中超孔隙水压力非负,可作为判定地层含气的主要特征;汪晔欢等<sup>[12]</sup>进一步提出了“双控”指标,采用多功能孔压静力触探技术实现了含浅层气地层的精细识别,有效提高了对多层位含气地层的辨识精度。由于含浅层气地质多分布在海陆交互环境中,对工程危害性较大的浅层气主要储集于砂质

沉积地层中,且多为海陆交互作用下沉积的淤泥、淤泥质黏土与粉砂、细砂薄层的交互层,其赋存特征和分布层位交错且多层。工程实践中需要发展经济、便捷且识别精度高的勘探技术,以满足重要工程对此类特殊地层的精细化勘察需要。

本文以崇太长江隧道遭遇含浅层气地质为工程背景,介绍多功能孔压静力触探技术在水域含浅层气地质勘察中的应用;通过与钻探结果的对比,检验方法的有效性,获取崇太长江隧道隧址沿线浅层气的赋存情况及分布特征。本研究为水下隧道工程的设计和安全施工提供技术支撑,亦可为类似工程提供借鉴。

## 1 崇太长江隧道工程概况

崇太长江隧道是国家“八纵八横”高速铁路网中北沿江高铁的重要组成部分,位于长江下游靠近入海口,始于长江南岸的江苏省太仓市,下穿长江主航道交汇处、浮桥作业区后,在上海市崇明岛出地面,隧道工程穿越长江位置如图1所示。崇太长江隧道总长度为14.2 km,盾构段长约13.2 km,洞径约15.2 m,设计最高时速为350 km,是我国目前建设标准最高、掘进距离最长、规模最大的穿江高铁隧道。

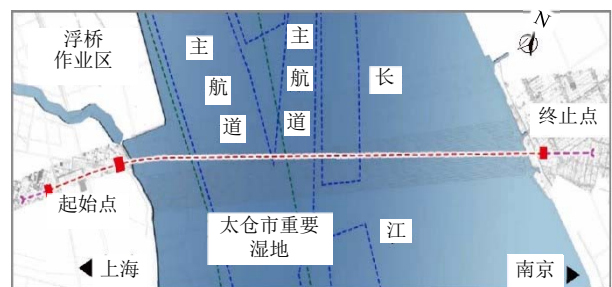


图1 北沿江高铁崇太长江隧道位置图

Fig. 1 Location of the Chongtai Yangtze River Tunnel of Beiyangjiang High Speed Railway

含浅层气地质是长江三角洲区域地下空间开发过程中面临的灾害性问题之一<sup>[13-14]</sup>。崇太长江隧道初勘过程中遭遇到浅层气,有超过30%的钻孔出现不同程度的冒泡、气体燃烧、甲烷浓度显示或喷砂现象,多为间歇性喷浆(一般持续数分钟至数小时),现场遭遇浅层气喷发和燃烧情况如图2所示。由图2可看出,勘探过程中浅层气出现燃烧现象,部分孔位携带大量泥砂喷发。根据现场浅层气的喷发特征,推断隧址沿线浅层气的连通性较差,且储量不大,并无开采意义,但对崇太长江隧道的勘探工作造成了极大阻碍,威胁后续高铁工程建设和运营安全。



图2 现场遭遇浅层气喷发和燃烧情况

Fig. 2 Shallow gas eruption and combustion on site

## 2 基于多功能孔压静力触探的水域含浅层气地层勘探

根据崇太长江隧道工程的初勘结果,初步判定了隧址区浅层气的水平分布位置,依据浅层气显示的强烈程度,对隧址沿线进行区段划分。利用多功能孔压静力触探技术结合水域钻探,开展隧址区含浅层气地质的专项勘察工作。

### 2.1 崇太长江隧道沿线测点布置

根据初勘过程中隧址沿线浅层气的显示情况和长江航道的管理要求,本研究在越江隧道沿线布

设 15 个原位测点,沿隧道轴线布设的测点位置如图 3 所示。由图 3 可看出,其中 10 个静探测点位于隧道穿江水域区段,2 个静探测点位于陆域隧道进、出口区段,在前期勘探过程中浅层气显示强烈的区域,增设 3 个钻孔探测点。

崇太长江隧道隧址沿线静探和钻探孔位沿隧址走向布置,具体信息如下:在里程 DK50+350.00~DK52+117.67 内布置 2 个静探孔位(DJT01、DJT02,孔深 60 m),里程 DK54+444.61~DK54+806.01 内布置 1 个静探孔位(DJT03,孔深 60 m),里程 DK55+376.66~DK55+941.15 内布置 1 个静探孔位(DJT04,孔深 60 m),在里程 DK56+354.85 隧道轴线的垂直横断面上,布设 3 个静探孔位(DJT05、DJT06、DJT07,孔间距 30 m,孔深 65 m),同时增设 3 个全岩心钻探孔位(DZT01、DZT02、DZT03,孔深 100 m),里程 DK55+941.15~DK60+500.00 内布置 3 个静探孔位(DJT08、DJT09、DJT10,孔深 65~70 m),在长江南支两岸的隧道竖井处分别布置 2 个静探孔位(DJT11、DJT12,孔深 60 m),其中在孔位 DJT02 与 DJT03 之间预留出长江主航道的位置,隧址沿线共布置 12 个静探孔位和 3 个钻探孔位。



图3 隧址沿线多功能孔压静力触探和钻探点位布置

Fig. 3 Layout of multifunctional piezocone penetration test and drilling holes along the tunnel

利用多功能孔压静力触探对隧址沿线待测点位进行探测,同时开展浓度和电阻率探测等试验工作。基于中国科学院武汉岩土力学研究所提出的浅层气多参数触探识别方法(Resistivity Piezocone Penetration Test, RCPTU)<sup>[12]</sup>,结合本次静力触探与钻探成果,查明隧址沿线各孔位沿深度方向浅层气的赋存地层分布。

### 2.2 水域勘探装备及安装

长江入海口水域潮大、流急,而普通勘探船抗风、抗流能力差,在水面上遇到较强风、浪、涌时,海上钻探平台容易发生晃动、倾斜,直接影响现场探测质量,严重时可能破坏勘探设备。因此,本研究使用水域傍船组合式钢桁架作业平台,适合水域



环境下的勘探工作，具有成本低、现场安拆便捷、稳固安全、不受潮汐和水流影响等优点。

水域傍船组合式钢桁架作业平台为水域勘探的反压力装置提供作业平台，可以在水深小于 20 m 的跨江、跨海工程中开展原位勘探作业。其工作原理如下：主要通过钻探船舶辅助，利用船舶自带的吊装设备，以插桩的方式将桁架式勘探平台固定在河床上；通过改变组合式钢桁架单元的拼装节数完成高度调节，开展不同深度水域的原位浅层气地质勘探工作。

水域傍船组合式钢桁架作业平台如图 4 所示，由图 4 可看出，其主要包括一级悬挑平台、钢桁架底座、钢桁架、二级勘探平台。利用该作业平台开展水域含浅层气地质勘探的具体流程如下<sup>[15]</sup>：

使用 GPS 定出探孔位置后，采用“米”字型抛锚定位方法，通过调节“米”字锚调整船舶位置，使船舶精确定至待测点位；一级悬挑平台如图 4 中的 (a) 所示，是由槽钢、角钢组装成的“凹”形悬挑结构；如图 4 中的 (b) 所示，将钢桁架底座吊至一级悬挑平台上预留的“凹”字形缺口处，对组合式钢桁架进行组装，完成后将其下放至海床，在自重压力作用下使脚桩插入江底；再将二级勘探平台吊装至组合式钢桁架顶部，根据水位升降或潮汐的变化，调整勘探平台与悬挑平台的高度，直至满足勘探需求，如图 4 中的 (c) 所示即为完成调整后的状态；水域傍船组合式钢桁架作业平台组装完成后，即可在二级勘探平台上开展水域含浅层气地层的静力触探测试。



图 4 水域傍船组合式钢桁架作业平台

Fig. 4 Combined steel truss working platform for offshore investigation

### 2.3 多功能孔压静力触探浅层气探测应用

孔压静力触探 (CPTU) 是一种原位测试技术，

利用贯入装置将带有若干功能传感器的圆锥型探头匀速垂直地压入地层中，可以连续、高效地获取待测地层的多种物理力学参数。目前，随着技术的不断革新，越来越多的新型传感器被安装在 CPTU 探头上，使得 CPTU 测试技术更加多功能化，以满足不同需求的勘察作业<sup>[16]</sup>。本次利用多功能孔压静力触探技术结合水域傍船组合式钢桁架作业平台，开展水域工程含浅层气地质的勘探工作。

#### (1) 量测系统组成

本研究采用自主研发的多功能孔压静力触探探头<sup>[17-18]</sup>，探头与数据采集仪、计算机等组成的量测系统如图 5 所示。由图 5 可知，探头结构主要包括量测传感器、隔离器件和内部电路系统，其中量测传感器内置于触探探头内，能够量测锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力，同时还可获取电阻率和气体浓度等数据。

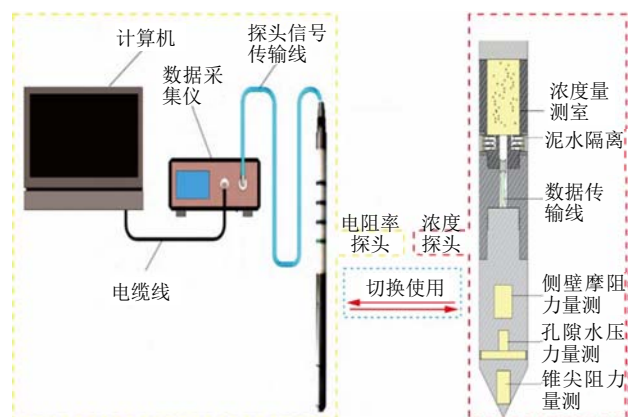


图 5 多功能孔压静力触探量测系统示意图

Fig. 5 Structure diagram of multifunctional piezocone penetration test

#### (2) 现场探测应用

首先采用标定仪对触探探头内部的传感器进行校验和标定，确定传感器的参考零点、标定系数、滞后误差等参数；然后使用真空饱和仪对触探探头的孔隙水压力传导舱进行真空除气，并用导压液体填充饱和，对饱和后的探头加装安全膜密封；将装好探头的静力触探贯入机安装固定在水域傍船组合式钢桁架作业平台，并保持垂直，连接探头、探杆、电缆线、数据采集仪和计算机；完成所有部件的安装后，启动静力触探贯入机，以  $(2 \pm 0.5)$  cm/s 的速度将探头静压至待测位置地层中，数据采集仪可以自动记录保存地层信息；当探头贯入仪超载或采集仪记录异常，需立即停止贯入作业；获取地层信息后，对静力触探贯入设备进行拆除回收，完成待测点位的勘察任务。

### 3 勘探结果与分析

#### 3.1 多功能孔压静力触探、钻探结果与对比分析

根据初勘资料,隧址沿线钻孔浅层气喷发特征如表1所示。具有喷发性的浅层气多位于淤泥质粉质黏土层,且浅层气喷发强度差异性较大。从浅层气喷发强度和孔口浓度显示来看,喷发强度越高,气体浓度越大,出现浅层气喷发强烈位置的孔口甲烷浓度最大值均超过10000 ppm。本研究同时采用静力触探和全岩芯取样钻孔分析,根据ROBERTSON土分类方法<sup>[19]</sup>、 $Q_c-F_r$ 分类方法( $Q_c$ 为归一化锥尖阻力,

$F_r$ 为归一化摩阻比)对静力触探原始数据进行处理,结合我国标准《岩土工程勘察规范(2009年版)》(GB 50021-2001)<sup>[20]</sup>,进行相应转换<sup>[21]</sup>,完成隧址沿线的地层划分和土类识别。多功能孔压静力触探测试与钻孔岩芯结果对比分析(以静力触探孔DJT07和钻探孔DZT03为例)如图6所示。由图6可知,获取的地层信息由上至下依次为:(1)0~9.0 m为粉细砂层;(2)9.0~27.6 m为淤泥质粉质黏土层(间夹粉砂薄层);(3)27.6~36.8 m为粉土层(间夹粉砂、黏土薄层);(4)36.8~52.3 m为细砂层(间夹黏土);(5)52.3~60.6 m为细砂层;(6)60.6~65.0 m为粗砂层。

表1 隧址沿线钻孔浅层气喷发特征  
Table 1 Eruption characteristics of shallow gas along the tunnel line

隧道里程	喷发时孔深/m	喷发强度	孔口甲烷浓度/ppm	对应土质
DK50+721.11~DK50+820.86	19.00	可见	9 950	淤泥质粉质黏土
DK51+087.39~DK51+153.03	20.50	井喷	>10 000	淤泥质粉质黏土
DK55+286.36~DK55+353.03	17.00	微弱	1 981	粉土顶部
DK55+720.74~DK55+787.85	22.30	井喷	>10 000	淤泥质粉质黏土
DK55+787.86~DK55+954.48	21.50	明显	>10 000	淤泥质粉质黏土
DK56+021.29~DK56+287.42	25.80	明显	>10 000	淤泥质粉质黏土
DK56+287.42~DK56+354.05	29.20	井喷	>10 000	粉土顶部
DK56+421.31~DK56+587.53	31.50	井喷	>10 000	砂层顶部
DK59+287.38~DK59+453.53	36.70	可见	9 965	淤泥质粉质黏土
DK59+853.26~DK59+953.38	30.20	较明显	>10 000	淤泥质粉质黏土

依据多功能孔压静力触探的“双控”指标和辅助电阻率参数分析含浅层气层的层位<sup>[12]</sup>,由图6多功能孔压静力触探识别的超孔压结果看出,在淤泥质粉质黏土层的粉砂夹层中出现超孔隙水压力为正在的特征,对应层位分别是10.8~11.0 m、11.7~11.8 m、13.0~13.1 m、17.0~17.2 m、18.2~18.3 m、20.3~20.4 m、21.1~21.2 m、21.9~22.0 m、22.8~23.0 m,可初步判断以上深度位置为疑似含气层。由图6中电阻率-深度曲线可看出,该定测站位地层的电阻率普遍低于20  $\Omega \cdot m$ ,其中12.8~12.9 m、17.0~17.2 m、18.2~18.3 m深度范围的粉砂薄夹层电阻率分别达500  $\Omega \cdot m$ 、251  $\Omega \cdot m$ 、500  $\Omega \cdot m$ ,均出现较大突变,故确认对应深度为含浅层气层位,而其余层位电阻率不存在较明显异常,排除其含有喷发性浅层气的可能。为进一步检验多功能孔压静力触探在水域含

浅层气地层探测的可靠性,在定测孔位旁边0.5 m位置开展浓度探头的静力触探试验,触探结果见图6中的试气结果。由图6可知,在上述确认为含浅层气的层位均出现气体浓度显示,得出该测点具有工程危害性的浅层气主要分布在淤泥质粉质黏土内的粉砂薄夹层。取定测站位14~20 m深度全岩芯钻孔土样剖面,如图7所示。由图7可知,黏土层与粉砂、细砂薄交互,呈现“千层饼状结构”,提取图7中黄色虚线框标注的18.2~18.3 m深度全岩芯钻孔土样详细剖面,如图8所示,深色淤泥质黏土层中夹有的灰色粉砂薄层是隧址区浅层气的主要赋存空间。全岩芯钻探剖面结果再次验证了多功能孔压静力触探识别水域含浅层气地层的精确性,说明多功能孔压静力触探技术可以便捷、精细化地识别出“千层饼状”浅层气多层位赋存地层<sup>[22]</sup>。

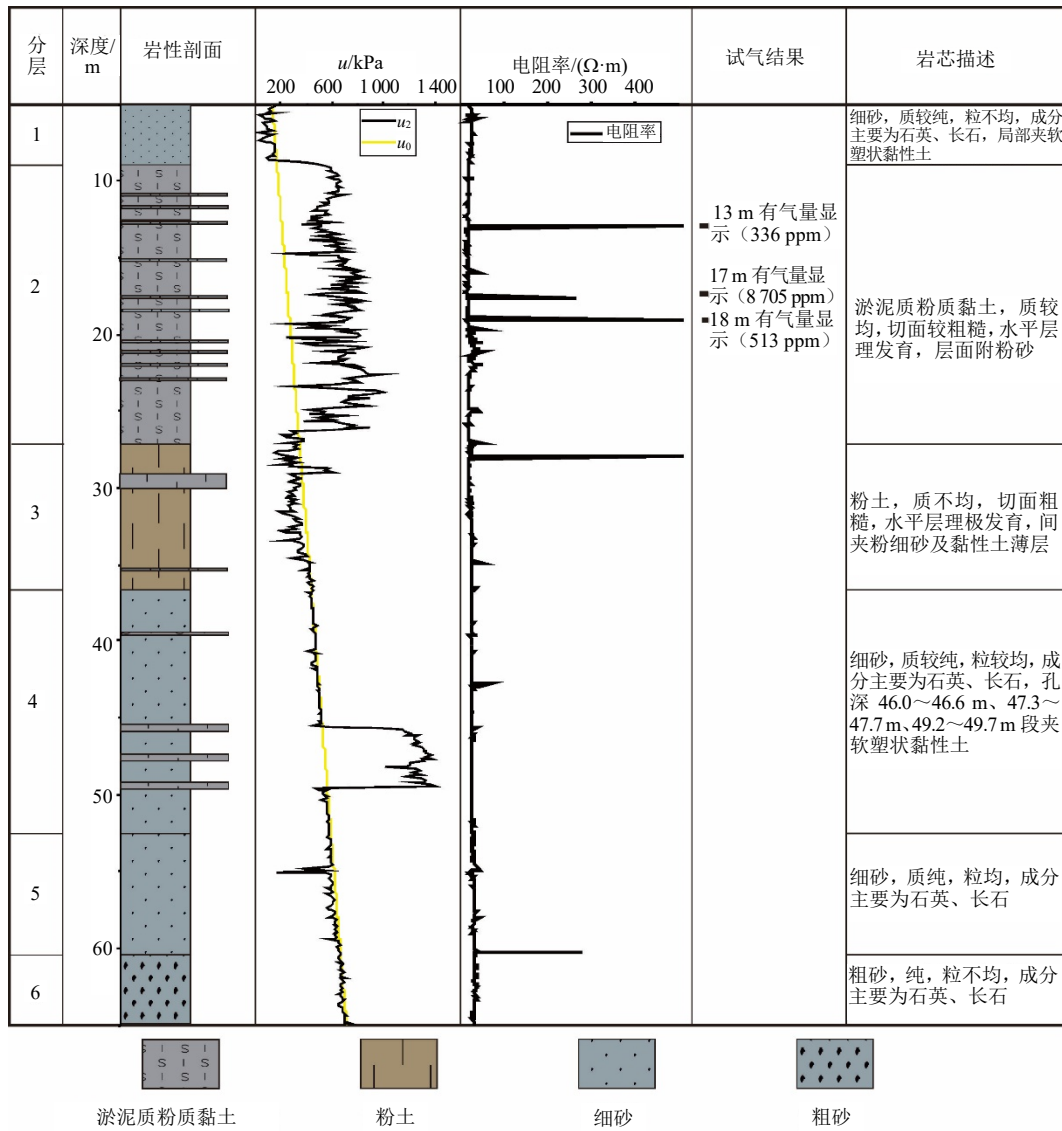


图6 多功能孔压静力触探测试与钻孔岩芯结果对比分析  
Fig. 6 Comparative analysis of CPTU and drill core results

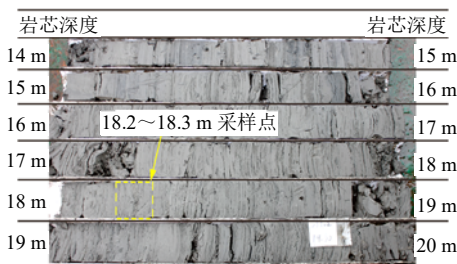


图7 14~20 m 全岩芯钻孔土样剖面

Fig. 7 Soil sample profile from 14 m to 20 m of a full drilled core

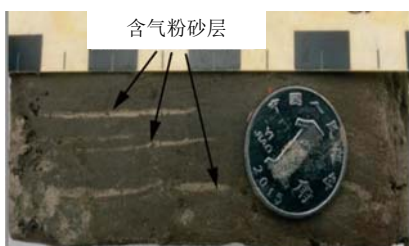


图8 18.2~18.3 m 全岩芯钻孔土样详细剖面

Fig. 8 Detailed profile of soil sample from 18.2 m to 18.3 m of the full drilled core

### 3.2 过江隧道隧址沿线的浅层气赋存特征

根据揭露的地层信息来看, 隧址区浅层气在水平方向上分布极为不均, 对工程构成威胁的喷发性浅层气主要位于崇太长江隧道两端的进出洞口和靠近崇明岛的长江浅滩水域位置。基于多功能孔压静力触探对水下含气地层进行精细化识别<sup>[12]</sup>, 利用电阻率和浓度探头的参数检验校正初判结果, 得出隧址区浅层气的赋存特征。对工程危害大的喷发性浅层气主要分布在江底深度 10~40 m 范围的淤泥质粉质黏土和淤泥质黏土层中, 其内部有较多的粉土、粉砂夹层, 厚度较薄, 普遍小于 20 cm, 是浅层气的主要富集储层; 隧道越江段深度大于 40 m 的地层范围分布有较厚的粉砂、细砂和中粗砂层, 虽然具有良好的浅层气储集条件, 但静力触探识别结果未出现浅层气赋存特征显示, 且钻孔过程中该砂层也未发现浅层气喷发现象, 表明本区域地层的产

气量小,砂层中无大量的游离态浅层气体赋存。

隧址区的淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土层中含有丰富的泥质沉积物,为浅层气的形成和聚集提供有利的物质条件,其内部间夹的薄粉土和粉细砂层为浅层气提供了良好的储存空间。淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土层既是浅层气的生气层,又是封盖层,同时也是主要的储集层,属于自生、自储、自盖且未经长距离运移的气体<sup>[22]</sup>。

## 4 结 论

本文针对崇太长江隧道越江段分布的含浅层气地层,采用钻探和多功能孔压静力触探技术相结合的方法,探测了隧址沿线水下地层中浅层气的赋存层位,检验了多功能孔压静力触探的实施效果,获得了隧道沿线浅层气的地质赋存特征,主要结论如下:

(1) 依据多功能孔压静力触探技术结合水域钻探作业平台,可以高效、精细化地获取含浅层气地层的信息,该技术具备复杂水域条件下较强的抗干扰能力和环境适应性,是一项适用的、值得推广的水域含浅层气特殊地层勘察方法。

(2) 辅助电阻率、浓度等多功能参数,进一步检验静力触探初判的含气层位置,两者互相印证,能够提高多功能孔压静力触探技术探测的准确性。

(3) 钻探资料与静探成果吻合,静力触探得出的含气层位置即为全岩芯剖面揭露的粉砂夹层,再次证明该方法在水域含浅层气地质勘探中良好的应用效果,获取的隧址沿线浅层气赋存特征为崇太长江隧道工程的设计和安全施工提供了技术支撑。

## 参考文献

- [1] WANG Y, KONG L W, WANG Y L, et al. Deformation analysis of shallow gas-bearing ground from controlled gas release in Hangzhou Bay of China[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(1): 04017122.
- [2] SILLS G C, GONZALEZ R. Consolidation of naturally gassy soft soil[J]. *Géotechnique*, 2001, 51(7): 629-639.
- [3] 王勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 浅层气地层对地铁隧道稳定性影响模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3423-3429.  
WANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Model test research on influences of shallow gas stratum on stability of metro tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3423-3429.
- [4] 郭爱国, 孔令伟, 沈林冲, 等. 地铁建设中浅层气危害防治对策研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(3): 769-775.  
GUO Aiguo, KONG Lingwei, SHEN Linchong, et al. Study of disaster countermeasures of shallow gas in metro construction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 769-775.
- [5] 王勇, 孔令伟, 郭爱国. 有控放气措施下含浅层气地层的一维变形分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊 1): 241-246.  
WANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Analysis of one-dimensional deformation of shallow gassy stratum caused by controlling gas release[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 241-246.
- [6] LI Y L, LIN C M. Exploration methods for late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(11): 1741-1759.
- [7] 林春明, 李广月, 李艳丽, 等. 杭州湾地区晚第四纪浅层生物气藏勘探方法研究[J]. *石油物探*, 2006, 45(2): 202-208, 4.  
LIN Chunming, LI Guangyue, LI Yanli, et al. The exploration method of late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in Hangzhou Bay area[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(2): 202-208, 4.
- [8] 蒋维三, 叶舟, 郑华平, 等. 杭州湾地区第四系浅层天然气的特征及勘探方法[J]. *天然气工业*, 1997, 17(3): 20-23, 2.  
JIANG Weisan, YE Zhou, ZHENG Huaping, et al. Quaternary shallow gas characteristics in Hangzhou Bay and the exploration method[J]. *Natural Gas Industry*, 1997, 17(3): 20-23, 2.
- [9] 李粮纲, 赵永刚, 余雷. 采用密闭取心和改装静力触探仪勘察第四系有害气体[J]. *煤田地质与勘探*, 2009, 37(5): 72-76.  
LI Lianggang, ZHAO Yonggang, YU Lei. Exploration for Quaternary shallow biogenic gas by sealed core drilling and modified CPT[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2009, 37(5): 72-76.
- [10] 陶灵法, 潘永坚, 蔡国成. 沿海平原海相沉积土中浅层气的探查[J]. *铁道勘察*, 2014, 40(4): 47-50.  
TAO Lingfa, PAN Yongjian, CAI Guocheng. The exploration of shallow gas in marine sedimentary soil of the coastal plain[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2014, 40(4): 47-50.

- [11] 郭爱国, 孔令伟, 陈建斌, 等. 孔压静力触探用于含浅层生物气砂土工程特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1539-1543.  
GUO Aiguo, KONG Lingwei, CHEN Jianbin, et al. On engineering characteristics of shallow biogenetic gassy sand by piezocone test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1539-1543.
- [12] 汪晔欢, 王勇, 孔令伟, 等. 基于原位多功能孔压静力触探的含浅层气地层识别与应用[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3474-3483.  
WANG Yehuan, WANG Yong, KONG Lingwei, et al. Identification of shallow gas-bearing strata based on in situ multi-function piezocone penetration test and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3474-3483.
- [13] 林春明, 张霞, 徐振宇, 等. 长江三角洲晚第四纪地层沉积特征与生物气成藏条件分析[J]. 地球科学进展, 2015, 30(5): 589-601.  
LIN Chunming, ZHANG Xia, XU Zhenyu, et al. Sedimentary characteristics and accumulation conditions of shallow-biogenic gas for the late Quaternary sediments in the Changjiang River delta area[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(5): 589-601.
- [14] 李从先, 范代读, 张家强. 长江三角洲地区晚第四纪地层及潜在环境问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 1-7.  
LI Congxian, FAN Daidu, ZHANG Jiaqiang. Late Quaternary stratigraphical framework and potential environmental problems in the Yangtze Delta area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(3): 1-7.
- [15] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 一种水域 CPTU 测试系统及测试方法: CN202210465376.4[P]. 2024-01-23.  
China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd. A water CPTU test system and test method: CN202210465376.4[P]. 2024-01-23.
- [16] 刘松玉, 蔡国军, 童立元. 现代多功能 CPTU 技术理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
LIU Songyu, CAI Guojun, TONG Liyuan. Theory and Engineering Application of Modern Multifunctional CPTU Technology[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [17] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 一种浅层含气地层的便携式原位气体含量量测装置及方法: CN201911061626.2[P]. 2023-09-15.  
Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences. A portable in-situ gas content measurement device and method for shallow gas-bearing strata: CN201911061626.2[P]. 2023-09-15.
- [18] 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 一种浅层气地层原位气体浓度量测装置: CN202222603265.3[P]. 2023-01-24.  
Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd. An in-situ gas concentration measurement device for shallow gas formation: CN202222603265.3[P]. 2023-01-24.
- [19] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 151-158.
- [20] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范(2009年版): GB 50021-2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Investigation of Geotechnical Engineering (2009 Edition): GB 50021 - 2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [21] 刘松玉, 蔡国军, 邹海峰. 基于 CPTU 的中国实用土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1765-1776.  
LIU Songyu, CAI Guojun, ZOU Haifeng. Practical soil classification methods in China based on piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1765-1776.
- [22] 王勇, 周江羽, 陈成, 等. 新建沪渝蓉高铁崇太长江隧道水下浅层气地质赋存与防治对策研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2021.  
WANG Yong, ZHOU Jiangyu, CHEN Cheng, et al. Research report of geological occurrence and prevention countermeasures of underwater shallow gas in Chongtai Yangtze River tunnel of the new Shanghai-Chongqing-Chengdu high-speed railway[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2021.