

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019110401

水合物储层工程地质参数评价系统研发与功能验证

李彦龙^{1,2,3}, 陈强^{1,2}, 刘昌岭^{1,2}, 吴能友^{1,2}, 孙建业^{1,2}, 申志聪⁴, 张民生⁴, 胡高伟^{1,2}

1. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
2. 青岛海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074
4. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100

摘要: 海洋天然气水合物储层的工程力学参数对准确评价水合物开采过程中的工程地质风险至关重要。静力触探和十字板剪切技术结合能够获得储层原位纵向连续性良好的工程力学参数, 在天然气水合物开发工程-地质一体化探测与评价方面具有巨大潜力, 但目前鲜见该系列技术在水合物勘查及试采中的应用。为了摸清天然气水合物储层的静力触探参数、十字板剪切参数响应规律及影响因素, 进而为水合物储层工程地质特征现场评价提供依据, 自主研发了天然气水合物储层工程地质参数评价试验系统。该系统能够开展含水合物沉积物五桥静力触探测试(锥尖阻力、侧摩阻力、孔隙水压力、电阻率、摄像), 十字板剪切测试, 并与电阻率层析成像测试结合, 解释天然气水合物储层的工程地质参数响应机理。基于该系统分别针对砂土、粉砂质黏土沉积物(不含水合物)开展了功能验证性实验, 并与南海神狐海域粉砂质黏土层的现场实测数据进行比对, 结果证明试验数据重复性良好, 试验结果与现场实测数据有可比性, 系统可靠。该系统对于验证新型水合物开发工程-地质参数一体化探测技术提供了基础平台。

关键词: 水合物储层; 静力触探; 十字板剪切; 工程地质参数; 电阻率层析成像; 试验系统

中图分类号: P754.1

文献标识码: A

Development of engineering-geological parameters evaluation system for hydrate-bearing sediment and its functional verification

LI Yanlong^{1,2,3}, CHEN Qiang^{1,2}, LIU Changling^{1,2}, WU Nengyou^{1,2}, SUN Jianye^{1,2}, SHEN Zhicong⁴, ZHANG Minsheng⁴, HU Gaowei^{1,2}

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resource, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: Engineering-geological parameters are crucial for evaluation of geohazard potential in marine hydrate exploitation. The combination of piezocone penetration and vane shear test may help gain longitudinally continuous and reliable parameters for hydrate reservoir, which has great perspective in integrated engineering and geological field survey. However, application of these techniques to marine hydrate survey has remained vacant so far. To better understand the penetration or shearing behaviors and their influencing factors in hydrate-bearing sediment (HBS), we developed a novel engineering-geological parameters evaluation system, which may satisfy the need of five-bridge piezocone penetration test and vane shear test. The tip resistance, side frictional resistance, excess pore pressure, electrical resistance, and video along the penetration path could be obtained through five-bridge piezocone penetration test. The method of electrical resistivity tomography is firstly combined with piezocone penetration and vane shear technology in this system to explain the relationships between engineering geological parameters and hydrate saturation. The sandy sediment and clayey-silt sediment (free of hydrate) are involved to verify the functions of the system. The results show favorable fitness with the field-obtained data. Repeated experiments show high reproducibility of the data. This system proved the possibility of establishing quantitative evaluation models of engineering geological parameters in HBS, and also provided a basic platform for novel probing device test in the integrative engineering-and-geological hydrate survey.

资助项目: 国家自然科学基金项目“南海神狐海域水合物储层静力触探响应特征及其主控因素研究”(41976074); 山东省泰山学者特聘专家项目(ts201712079); 国家海洋地质专项(DD20190231); 国家重点研发计划“水合物试采、环境监测及综合评价应用示范”(2017YFC0307606)

作者简介: 李彦龙(1989—), 男, 博士生, 助理研究员, 主要从事天然气水合物开采理论与技术研究工作, E-mail: ylli@qnlm.ac

通讯作者: 陈强(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海域天然气水合物试采监测技术与试采基础理论方面的研究工作, E-mail: chenqiang_hds@126.com

收稿日期: 2019-11-04; **改回日期:** 2019-12-14. 蔡秋蓉编辑

Key words: hydrate-bearing sediment; piezocone penetration test; vane shear; engineering geological parameters; electrical resistivity tomography; experimental system

天然气水合物是一种资源潜力巨大的非常规能源,但受制于勘探开发成本、开采产能^[1-2]、工程地质风险^[3-5]等因素,目前天然气水合物勘探开发程度仍无法与页岩气、煤层气等其他非常规能源媲美,很难吸引企业资本的注入,距稳定、长效、安全的产业化开采还有很长的路要走^[6-7]。从海洋天然气水合物勘探开发的全链条考虑,降低天然气水合物勘探开发成本不仅需要新的、低成本技术的开发,更需要通过现有技术的集成与整合达到“一航次一趟钻多功能”的目的。比如,现有天然气水合物钻探随钻测井(LWD)技术实现了钻井与测井作业的集成^[8-9],有效提高了测井质量,更重要的是节约了单独钻井、单独测井带来的时间和经济成本。

海洋天然气水合物钻探测井航次的主要目的是获取钻探站位水合物储层的孔、渗、饱特征,为落实资源量、选定试采甜点做支撑^[10-11]。而储层的工程力学参数则是钻井设计、开采施工设计的基础保障,也是保障试采安全可控的必需数据^[12-13]。在目前天然气水合物勘查、试采没有完全一体化的情况下,钻探测井航次和工程地质调查航次是分别开展的。为此,笔者认为,寻找一种既能够获得储层水合物分布特征,又能连续测量储层工程力学参数的原位测试技术,将目前实际采用的水合物钻探航次和工程地质调查航次整合,是降低天然气水合物勘探开发成本的必然需求,也是促进海洋天然气水合物开发工程-地质一体化亟待解决的关键问题之一。

静力触探是一种被广泛使用的沉积物工程力学参数原位测试方法。它是把一定规格的锥形探头借助机械力匀速压入沉积物中,探头压入导致锥头周围的土体被挤压,由于外层土体的包裹,挤压土体的变形被限制,使其产生剪切和压缩变形,同时造成孔隙流体的挤压,对探头产生抗力,这种抗力反映在探头测量数据上即为锥尖阻力、侧摩阻力和超孔隙压力^[14-15]。静力触探数据与十字板^[16]、三轴压缩等技术手段相结合,就可以获得纵向连续性非常好的工程力学参数^[17-19]。目前,静力触探技术在探头功能、理论分析、模型试验、数值模拟、成果应用等方面都取得了长足的进展^[20]。特别是近年来基于扩展型静力触探探头搭载的声波传感器、电阻率传感器^[21]、视频传感器等,都可以在获取地层工程力学参数的同时,为储层中水合物赋存位置、水合物饱和度分布规律的预测提供重要的信息。

因此,尽管目前仍未见采用多功能静力触探技术进行海洋天然气水合物储层工程-地质一体化原位探测的先例,但其在该领域中的应用潜力值得期待。

为了实现天然气水合物工程-地质一体化探测目标,首先应该从基础理论、实验模拟的角度出发,研究天然气水合物储层的工程力学参数响应特征与水合物分布特征之间的定量关系及其耦合机理。鉴于此,青岛海洋地质研究所团队将多功能静力触探、十字板剪切与电阻率层析成像技术结合,自主研发了一套天然气水合物储层工程地质参数评价实验系统。本文重点介绍该实验系统的基本设计理念、工作原理、各模块的技术参数及其功能验证试验。

1 模拟实验系统的研发

1.1 主要功能与结构组成

天然气水合物储层工程地质参数评价实验系统的主要功能如下:①通过多功能静力触探探头在模拟水合物储层中的贯入,获取探头贯入过程中模拟储层的侧摩阻力、锥尖阻力、孔隙压力、电阻率等参数,取得贯入路径的摄像资料;②基于不同层位的十字板剪切数据,与静力触探参数对比分析,提供精细的天然气水合物储层工程地质参数纵向分布规律;③与二维电阻率层析成像系统配合,刻画模拟储层中水合物饱和度及其分布对静力触探参数、十字板剪切参数的影响,揭示水合物储层工程地质参数响应机理;④预留声波静力触探探头、袖珍贯入仪、球形探头及其他多功能静力触探探头扩展接口,为多手段的水合物储层工程地质参数评价提供基础实验平台。

基于以上功能设定,本系统的核心功能是天然气水合物储层静力触探测试和十字板剪切测试。首先需要在室内利用高压气源和低温强制控温模拟天然气水合物的成藏环境,从而在原位制备特定的天然气水合物模拟储层,然后开展静力触探测试或十字板测试。为此,本系统采用模块化设计,其构成主要包括水合物快速合成反应釜模块、温度控制模块、静力触探模块、十字板剪切模块、层析成像测试模块、数据采集与监控模块(图1,图2)。系统整体耐压30 MPa,适合烷烃、水介质实验,适应

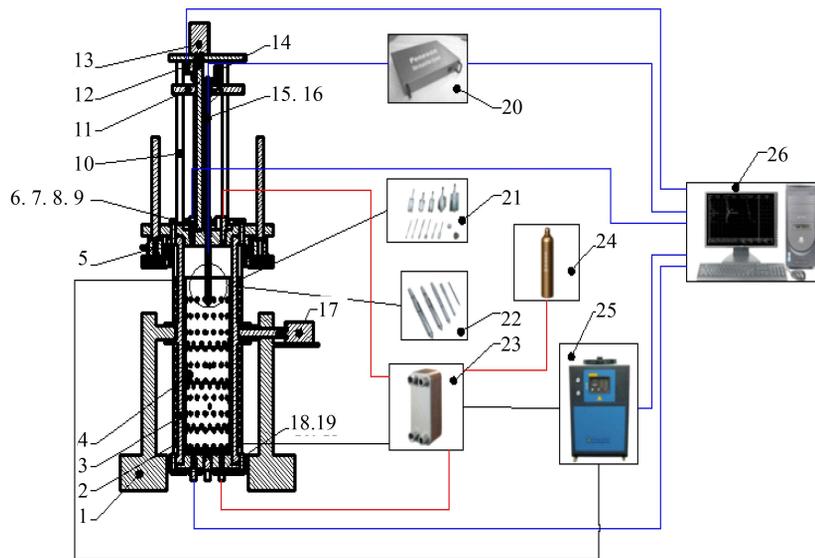


图1 天然气水合物工程地质参数评价系统示意图^[22-23]

1. 翻转支架; 2. 冷凝管及保温层; 3. 反应釜本体; 4. 内胆; 5. 开盖升降机; 6. 上盖各类传感器; 7. 上盖各类阀; 8. 水密插件; 9. 探杆动密封及旋转密封; 10. 导杆及反力支撑架; 11. 运动压块; 12. 深度编码器; 13. 贯入电机; 14. 扭转电机; 15. 探杆; 16. 探头电缆; 17. 釜体旋转电机; 18. 下盖各类传感器; 19. 下盖各类阀; 20. 数据采集仪; 21. 十字板探头; 22. 静力触探探头; 23. 板式换热器; 24. 甲烷气源; 25. 冷水机; 26. 计算机。

Fig.1 Flow chart of the engineering-geological parameters evaluation system for hydrate-bearing sediment^[22-23]



图2 天然气水合物工程地质参数评价系统实物照片

Fig.2 Photo of the engineering-geological parameters evaluation system for hydrate-bearing sediment

工作温度: $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 各子模块的主要技术参数

1.2.1 水合物快速合成反应釜模块

该模块主要功能是模拟海底沉积物温度、压力环境并生成天然气水合物, 实现与温度控制模块、静力触探模块、十字板剪切模块、电阻率层析成像模块之间的配合。主要包括反应釜本体、水合物模拟储层专用内胆、防水接插件和监控传感器等。反应釜本体内尺寸为 $\Phi 325\text{ mm}\times 1\ 400\text{ mm}$, 安全许用

耐压 30 MPa ; 水合物模拟储层专用内胆为尼龙材质, 主体尺寸 $\Phi 300\text{ mm}\times 1\ 200\text{ mm}$, 壁厚 10 mm 。

为了促进天然气水合物快速合成并实现与其他模块的配合, 水合物储层模拟专用内胆结构进行特殊设计, 主要包括以下特点: 壁面镶嵌通气孔, 通气孔安装不锈钢滤网覆盖, 内衬半透膜, 透气不透水; 内胆壁面嵌入温度传感器 2 层、电阻率层析成像测点 3 层; 内胆温度、电阻率测点通过耐压等级为 70 MPa 的防水接插件与反应釜上盖连接(图 3)。实验过程中, 内胆与反应釜本体之间的空隙充满烷

烃气体,当内胆内部的沉积物中生成水合物后,孔隙压力降低,外围气体穿透半透膜进入沉积物,进一步生成水合物。水合物生成过程中采用电阻率层析成像测点实时探测沉积物内部的电阻率场变化情况,进而反演沉积物中的水合物饱和度分布特征。

1.2.2 温度控制模块

该模块主要用于营造室内生成天然气水合物所需的低温环境。本模块通过水浴循环控制反应釜模块整体温度,通过冷媒换热介质对注入反应釜中的烷烃气体进行预冷却。通过双重控温来促进水合物的生成并维持系统温度恒定。该模块主要由釜外冷却系统和气体冷却系统等组成。温度控制区间 $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制精度 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.3 静力触探模块

该模块能够实现反应釜内部探头的匀速贯入,并获取贯入深度、锥尖阻力、侧摩阻力、孔隙水压力、电阻率和视频摄像。该模块主要由五桥静力触探探头、探头量测系统、贯入设备和辅助部件等组成。同时,该模块预留可扩展接口,以满足后期地震探头及其他多功能探头的扩展应用。贯入设备能够实现探头的匀速贯入($(20\pm 5)\text{mm/s}$),最大贯入

力 5 kN ,最大贯入深度 $1\ 000\text{ mm}$ 。

在静力触探探头选型及设计方面,常规 $15\text{、}10\text{ cm}^2$ 静力触探探头在扩充到四桥、五桥探头时技术门槛相对较小。但为了尽量消除边界效应,模型试验中模拟储层的边界必须足够大,这将大幅提升水合物模拟储层特别是泥质粉砂储层的制备难度。为此,本系统采用符合ISO Standard for CPT and CPTU国际标准的 5 cm^2 探头为核心,研发了专用五桥静力触探探头(图4),探头外径与内胆内径的比例约为 $1:24$ 。探头的具体规格为:锥尖阻力量程 $0\sim 50\text{ MPa}$,测试精度 0.1% ;侧摩阻力量程 $0\sim 1\text{ MPa}$,测试精度 1% ;孔隙水压力:量程 $0\sim 30\text{ MPa}$,测试精度 0.5% ;电阻率:量程 $0\sim 5\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,测试精度 1% ;视频录像: $\geq 30\text{ W}$ 像素;测试参数的量程允许 1.5 倍的过载。

探头量测系统主要由静力触探探头、深度编码器、数据采集仪组成。辅助部件由真空饱和仪、高强度探杆、探头电缆、拉线编码器电缆组成。

1.2.4 十字板剪切模块

该模块主要由量测系统、贯入设备、扭转系统和辅助部件等组成,其主要功能是测量含水合物沉积物十字板剪切强度、土体灵敏度等参数,与静力

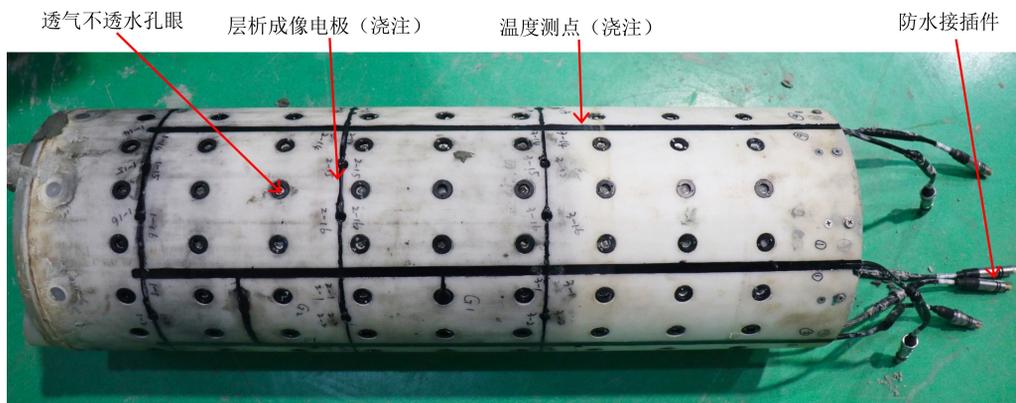


图3 模拟水合物储层专用内胆及其测点布局

Fig.3 The sediment container and layout of measuring points

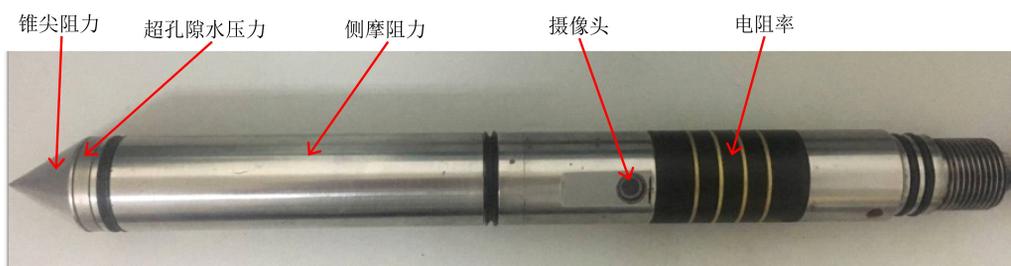


图4 五桥静力触探探头

Fig.4 Five-bridges piezocone penetration probe

触探子系统对应的探测数据对比,从而获取准确的储层工程力学参数。十字板头采用两种规格的电测十字板($H=50.8\text{ mm}$, $D=25.4\text{ mm}$; $H=25.4\text{ mm}$, $D=25.4\text{ mm}$),符合D 4648-00标准,满足耐压30 MPa需求,最大剪切扭矩 $M=15.4\text{ N}\cdot\text{m}$,最大抗剪强度260 kPa,测试精度1%。能够连续多次测量沉积物试样纵向十字板剪切参数,与静力触探模块接口通用,满足相互调换使用需求。扭转系统采用电机驱动,能够实现多圈连续扭转,系统输出扭转力矩16 N·m,扭转角度的测试精度为 1° ,剪切过程中保证剪切扭转探杆与反应釜端盖的扭转密封。

1.2.5 电阻率层析成像测试模块

电阻率层析成像测试模块的主要作用是:对沉积物中水合物空间分布信息“未探先知”^[24],进而为静力触探、十字板剪切数据在水合物储层中的响应机理分析提供依据。电阻率层析成像测试模块主要包括层析成像测量电极、高压穿越电缆、ITS采集与数据解码仪、快速成像软件构成。

其中,电阻率层析成像测量电极为嵌入到水合物模拟储层专用内胆上的金属电极。本系统共设计3个测量位面,每个测量位面包含16个电极,测量电极通过浇注到水合物模拟储层专用内胆上的高压电缆与反应釜模块上端盖连接,并通过防水接

插件与ITS p2+测量系统连接。层析成像系统采用四点法测量,利用线性反投影算法快速显示内胆中3个测量位面上的电导率场分布,由此推断水合物分布规律^[25-26]。

1.2.6 数据采集与监控模块

该模块主要用于水合物样品生成过程的温度、压力数据的采集和监控;静力触探过程中的锥尖阻力、侧摩阻力、孔隙压力、电阻率值和视频摄像资料的采集及自动化处理;十字板剪切过程中扭剪力等参数的自动采集与处理等功能。该模块主要由数据采集仪、温度传感器、压力传感器、压力表及相应的数据采集软件等组成。数据可导出、能够实时采集、能够在软件界面实时显示。

2 功能验证实验

2.1 静力触探贯入功能验证

采用砂土沉积物测试系统的静力触探贯入功能,将不饱和砂土分层填装到内胆中,打气压至5 MPa静置12 h,开展贯入测试,设定贯入速度2 cm/s,累计贯入4轮次(图5)。其中第一轮(No.1)测试结束后,回收贯入探杆,进行重复贯入测试(No.2)。然

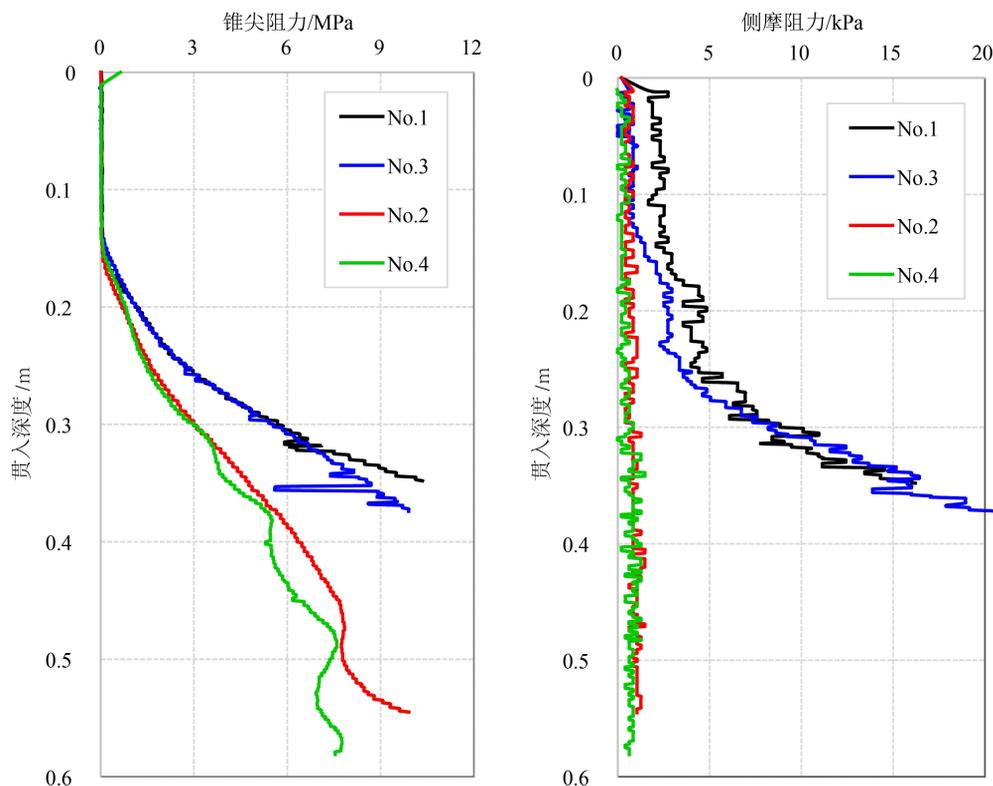


图5 砂土沉积物静力触探结果

Fig.5 Piezocone penetration test results of sandy sediment

后将砂土从内胆中取出, 重新装样、静置, 重复上述贯入过程(No.3, No.4)。贯入实验证明, 系统的贯入速度可以稳定维持在 (20 ± 5) mm/s, 能够与现场工程地质调查使用的贯入速率保持一致^[27-28]。No.1、No.3 贯入测得的锥尖阻力、侧摩阻力接近, 测量稳定性良好。由于 No.2、No.4 贯入实验未进行重新装样和静置, 导致沉积物中存在贯入后的空洞, 因此, No.2、No.4 贯入实验锥尖阻力严重下降, 侧摩阻力基本消失。

以南海神狐表层沉积物为介质, 在常压下测试粉砂质黏土的静力触探特征, 并与南海神狐海域天然气水合物试采现场工程地质调查测试的表层土样参数或实际测井数据进行对比(图 6)。其中锥尖阻力和侧摩阻力由现场工程静力触探调查获取^[29], 电阻率数据为据文献 [30] 中 W18 站位的测井资料获取。由图可知, 本系统针对南海粉砂质黏土的测试数据与现场实测数据处于同一量级, 具有可比性。室内获取的侧摩阻力和锥尖阻力与现场实测数据非常接近。电阻率数据与现场数据处于同一量级, 但差异较大的原因可能是实际工程地质调查使用的是三桥静力触探(锥尖阻力、侧摩阻力、孔隙水压力), 未获取表层沉积物的电阻率数据, 而测井数据为深度 17.5 mbsf 以深的的数据, 其压实程度、孔隙水特征等与表层沉积物差异较大。

2.2 十字板扭剪功能验证

十字板剪切功能验证实验的主要目的是验证

扭转机构的稳定性。为此, 静力触探结束后直接更换十字板探头测试粉砂质黏土沉积物的扭剪曲线。每贯入 5 cm 进行一次扭转剪切, 设置扭转速度为 0.2 %/s, 实际观察到扭转速度为 0.167~0.30 %/s, 测试结果如图 7 所示。

根据图 7 的测试结果判断, 反应釜内上层的黏土强度约为 4 kPa, 中层强度略高, 约为 7 kPa, 均处于未固结软黏土的合理强度范围内。下层沉积物数据波动很大, 且趋势并不明显, 主要原因是静力触探测试结束后未重新装样, 从沉积物上部直接填眼压实, 导致下层土体空洞未消失, 孔隙水在重力作用下在沉积物下部聚集, 这一点与静力触探测试 No.2、No.4 中摄像头观察到的现象一致: 上层土体呈现非饱和半密实状态, 下层土过饱和, 呈现似流动状态。

2.3 电阻率层析成像测试功能验证

精确刻画沉积物体系中天然气水合物的空间分布特征是建立准确的储层工程力学参数-水合物饱和度关系模型的先决条件。ITS 电阻率层析成像技术在二维水合物分布规律探测与快速成像方面的应用已在文献 [31] 中进行了详述。将该技术应用到解释工程地质参数评价系统中, 我们测试了粉砂质黏土沉积物在均匀压实状态、探头贯入后、探头回收后的沉积物界面电导率场分布(图 8), 图 8b 中高电导率区域代表金属探头贯入沉积物后的状态, 图 8c 中低电导率区域代表探头回收后在沉

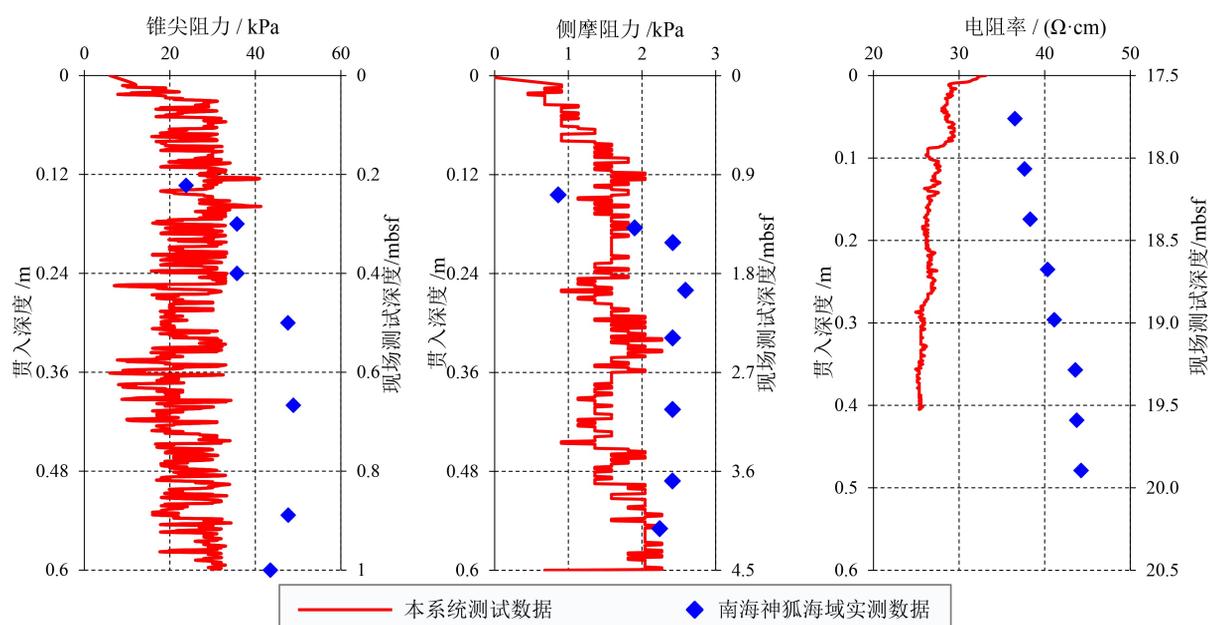


图 6 南海粉砂质黏土静力触探功能测试结果

Fig.6 Piezocone penetration test results for clayey-silt sediment from the Shenhu area of South China Sea

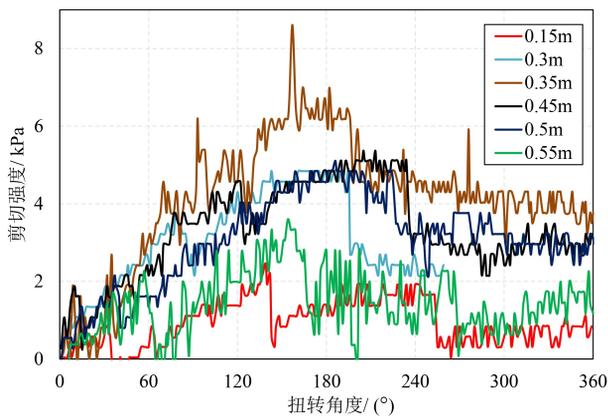


图7 不同深度处十字板剪切强度

Fig.7 Vane shear curves at different penetrating depths

积物中形成的空洞。由图可知,电阻率层析成像能够在厘米级尺度反应系统内部的变化,为天然气水合物储层工程力学参数响应机理提供依据。

由于水合物模拟储层制备周期长、制样难度较大,因此,以上功能验证实验均为不含天然气水合物沉积物的测试结果。总体而言,系统的贯入速率、扭剪速率基本能够维持与现场工程地质调查采用的施工参数一致,电阻率层析成像也能够与系统实现较好的配合。上述实验都是在高压条件下测试的,因此,测量的压力环境与水合物模拟储层一致,在后续针对天然气水合物模拟储层进行实验的过程中,主要瓶颈是快速制备含水合物模拟储层。

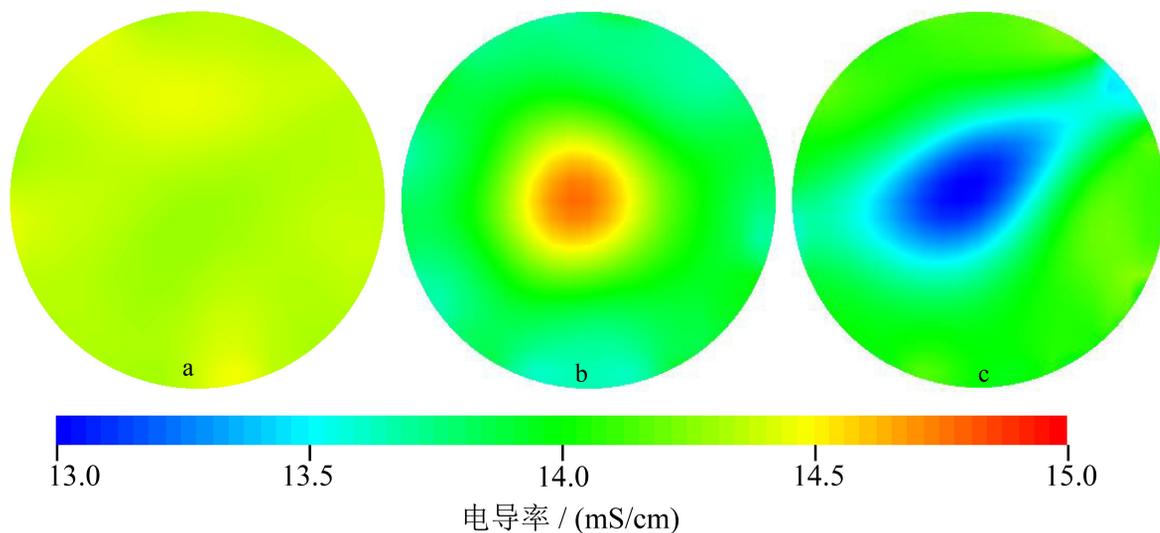


图8 不同状态下的典型电阻率层析成像结果

a. 探头贯入前沉积物处于均匀状态, b. 静力触探探头贯入后沉积物中心位置出现高电导率区域, c. 静力触探探头回收后留下空洞。

Fig.8 Electrical resistivity tomography results under different conditions

a. before penetration, b. during penetration, c. after the cone was removed from the sediment.

3 结论与展望

多功能静力触探结合十字板技术,能够在获取储层工程力学参数的同时获取储层的孔、渗、饱信息,是降低天然气水合物勘探开发成本、实现工程-地质一体化探测进程中非常有前景的一项技术。为了探索天然气水合物储层的工程力学参数响应特征及其响应机理,将多功能静力触探技术、十字板剪切技术与电阻率层析成像技术结合,自主研发了一套天然气水合物储层工程地质参数评价试验系统。该系统由水合物快速合成反应釜模块、温度控制模块、静力触探模块、十字板剪切模块、层析成像测试模块、数据采集与监控模块等构成。针对

不含水合物的砂土沉积物和南海粉砂质黏土沉积物开展了静力触探功能测试及十字板剪切测试,测试结果证明系统的贯入速度可以稳定维持在 (20 ± 5) mm/s,与现场工程地质调查使用的贯入速率保持一致,十字板扭转速度为 $0.167\sim 0.30$ °/s,符合工程勘查要求。多次测量数据稳定性良好,与现场实测数据有可比性。目前系统已经经过多轮调试测试,完成功能验证并正在开展针对泥质粉砂含水合物沉积物的测试。

该系统不仅能够为静力触探、十字板剪切在水合物储层中响应机理的探索提供支撑,还可作为一套水合物开发工程-地质一体化新技术和新装备的综合试验平台,为新技术、新探头的功能验证和机理分析提供支撑。该技术的发展应该从两方面进

行攻关:其一从基础理论与技术体系的角度,重点关注多功能探头贯入条件下天然气水合物储层的响应机理、主控因素。其二从现场装备和工程应用的角度,以现有多功能静力触探技术为核心,创新集成新型的天然气水合物工程-地质一体化探测探头。

参考文献 (References)

- [1] Li Y L, Wan Y Z, Chen Q, et al. Large borehole with multi-lateral branches: A novel solution for exploitation of clayey silt hydrate [J]. *China Geology*, 2019, 2(3): 333-341.
- [2] Li X S, Xu C G, Zhang Y, et al. Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review [J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 286-322.
- [3] 万义钊, 吴能友, 胡高伟, 等. 南海神狐海域天然气水合物降压开采过程中储层的稳定性[J]. *天然气工业*, 2018, 38(4): 117-128. [WAN Yizhao, WU Nengyou, HU Gaowei, et al. Reservoir stability in the process of natural gas hydrate production by depressurization in the Shenhu area of the South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(4): 117-128.]
- [4] Li Y L, Wu N Y, Ning F L, et al. A sand-production control system for gas production from clayey silt hydrate reservoirs [J]. *China Geology*, 2019, 2: 121-132.
- [5] 李彦龙, 胡高伟, 刘昌岭, 等. 天然气水合物开采井防砂充填层砾石尺寸设计方法[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(6): 961-966. [LI Yanlong, HU Gaowei, LIU Changling, et al. Gravel sizing method for sand control packing in hydrate production test wells [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(6): 961-966.]
- [6] 吴能友, 黄丽, 胡高伟, 等. 海域天然气水合物开采的地质控制因素和科学挑战[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 1-11. [WU Nengyou, HUANG Li, HU Gaowei, et al. Geological controlling factors and scientific challenges for offshore gas hydrate exploitation [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 1-11.]
- [7] 刘昌岭, 李彦龙, 孙建业, 等. 天然气水合物试采: 从实验模拟到场地实施[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 12-26. [LIU Changling, LI Yanlong, SUN Jianye, et al. Gas hydrate production test: from experimental simulation to field practice [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 12-26.]
- [8] Hsiung K H, Saito S, Kanamatsu T, et al. Regional stratigraphic framework and gas hydrate occurrence offshore eastern India: Core-log-seismic integration of National Gas Hydrate Program Expedition 02(NGHP-02) Area-B drill sites [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2019, 108: 206-215.
- [9] Zhang Z J, Wright C S. Quantitative interpretations and assessments of a fractured gas hydrate reservoir using three-dimensional seismic and LWD data in Kutei basin, East Kalimantan, offshore Indonesia [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2017, 84: 257-273.
- [10] Mery Ş. Evaluation of drilling parameters in gas hydrate exploration wells [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 172: 855-877.
- [11] 张炜, 邵明娟, 姜重昕, 等. 世界天然气水合物钻探历程与试采进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(5): 1-13. [ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, JIANG Chongxin, et al. World progress of drilling and production test of natural gas hydrate [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 1-13.]
- [12] Cheng W, Ning F L, Sun J X, et al. A porothermoelastic wellbore stability model for riserless drilling through gas hydrate-bearing sediments in the Shenhu area of the South China Sea [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 72: 103036.
- [13] Li Y L, Liu C L, Liu L L, et al. Experimental study on evolution behaviors of triaxial-shearing parameters for hydrate-bearing intermediate fine sediment [J]. *Advances in Geo-energy Research*, 2018, 2(1): 43-52.
- [14] Miller G A, Tan N K, Collins R W, et al. Cone penetration testing in unsaturated soils [J]. *Transportation Geotechnics*, 2018, 17: 85-99.
- [15] Bol W, Önalp A, Özocak A, et al. Estimation of the undrained shear strength of Adapazari fine grained soils by cone penetration test [J]. *Engineering Geology*, 2019, 261: 105277.
- [16] Liu Z C, Wei H Z, Peng L, et al. An easy and efficient way to evaluate mechanical properties of gas hydrate-bearing sediments: The direct shear test [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 149: 56-64.
- [17] Dong L, Li Y L, Liao H L, et al. Strength estimation for hydrate-bearing sediments based on triaxial shearing tests [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 184: 106478.
- [18] Dong L, Li Y L, Liu C L, et al. Mechanical properties of methane hydrate-bearing interlayered sediments [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(6): 1344-1350.
- [19] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 含甲烷水合物松散沉积物的力学特性[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(3): 105-113. [LI Yanlong, LIU Changling, LIU Lele, et al. Mechanical properties of methane hydrate-bearing unconsolidated sediments [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2017, 41(3): 105-113.]
- [20] Sultan N, Voisset M, Marsset T, et al. Detection of free gas and gas hydrate based on 3D seismic data and cone penetration testing: An example from the Nigerian Continental Slope [J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1-4): 235-255.
- [21] Pérez-Corona M, García J A, Taller G, et al. The cone penetration test and 2D imaging resistivity as tools to simulate the distribution of hydrocarbons in soil [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2016, 91: 87-92.
- [22] 李彦龙, 刘昌岭, 陈强, 等. 水合物沉积物不排水抗剪强度连续测量装置及方法: 中国, 108776071A[P]. 2018-11-09. [LI Yanlong, LIU Changling, CHEN Qiang, et al. Continuous shearing test apparatus and method for hydrate bearing sediment: CN, 108776071A[P]. 2018-11-09.]
- [23] 陈强, 刘昌岭, 李彦龙, 等. 含水合物沉积物工程静探参数模拟装置及方法: 中国, 208125729U[P]. 2018-11-20. [CHEN Qiang, LIU Changling, LI Yanlong, et al. Piezocone penetration parameters test apparatus and method for hydrate bearing sediment, CN, 208125729U[P]. 2018-11-20.]

- [24] 刘昌岭, 李彦龙, 刘乐乐, 等. 天然气水合物钻采一体化模拟实验系统及降压法开采初步实验[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 165-172. [LIU Changling, LI Yanlong, LIU Lele, et al. An integrated experimental system for gas hydrate drilling and production and a preliminary experiment of the depressurization method [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 165-172.]
- [25] 李彦龙, 吴能友, 陈强, 等. 海底泥底辟外围水合物同心带状成藏过程的可视化再现[C]//中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集. 2019. [LI Yanlong, WU Nengyou, CHEN Qiang, et al. Visual reproduction of hydrate distribution around mud diapirs[C]//Abstract for the 17th annual conference of Mineral and rock Geochemical Society of China, 2019.]
- [26] 孙海亮, 李彦龙, 刘昌岭, 等. 电阻层析成像技术及其在水合物开采模拟实验中的应用[J]. 计量学报, 2019, 40(3): 455-461. [SUN Hailiang, LI Yanlong, LIU Changling, et al. Electrical resistance tomography and the application in the simulation experiment of hydrate mining [J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(3): 455-461.]
- [27] 胡高伟, 李彦龙, 吴能友, 等. 神狐海域W18/19站位天然气水合物上覆层不排水抗剪强度预测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 151-158. [HU Gaowei, LI Yanlong, WU Nengyou, et al. Undrained shear strength estimation of the cover layer of hydrate at Site W18/19 of Shenhu area [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5): 151-158.]
- [28] 李彦龙, 陈强, 胡高伟, 等. 神狐海域W18/19区块水合物上覆层水平渗透系数分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 157-163. [LI Yanlong, CHEN Qiang, HU Gaowei, et al. Distribution of horizontal permeability coefficient of the cover layer of HBS at Site W18/19 of Shenhu area [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(2): 157-163.]
- [29] Li Y L, Hu G W, Wu N Y, et al. Undrained shear strength evaluation for hydrate-bearing sediment overlying strata in the Shenhu area, northern South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(3): 114-123.
- [30] 靳佳澎, 王秀娟, 陈端新, 等. 基于测井与地震多属性分析神狐海域天然气水合物分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 122-130. [JIN Jiapeng, WANG Xiujuan, CHEN Duanxin, et al. Distribution of gas hydrate in Shenhu area: identified with well log and seismic multi-attributes [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5): 122-130.]
- [31] 李彦龙, 孙海亮, 孟庆国, 等. 沉积物中天然气水合物生成过程的二维电阻层析成像观测[J]. 天然气工业, 2019, 39(10): 132-138. [LI Yanlong, SUN Hailiang, MENG Qingguo, et al. 2-D electrical resistivity tomography assessment of hydrate formation in sandy sediments [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(10): 132-138.]