

天然气水合物岩心样品带压参数测试系统与实验研究

鲁浩然, 卢春华*, 黄柳松, 谭畴江, 乔梦迪

中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074

* 通信作者, lchct@163.com

收稿日期: 2023-04-29; 修回日期: 2023-10-09

国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项“天然气水合物勘查开发技术联合研究”(2018YFE0208200)资助

摘要 天然气水合物被认为极有可能成为未来最有远景的新型接替能源, 引起世界各国的广泛关注。天然气水合物性能参数带压测试分析, 对解释赋存于地层中的水合物生长机理与预测水合物分解过程中地层物理力学性质变化等极为重要, 更是构建上述复杂情况下水合物赋存地层行为预测模型的关键所在, 对评估储层内天然气水合物赋存方式和资源量都具有重要意义。通过地震或者测井所得数据对水合物岩心各项参数进行估算往往与实际值存在较大误差, 且在现有技术条件下又很难进行原位地层参数测试, 所以通过钻井获取水合物地层岩心再对其物理化学及力学性质进行测试与分析是最为可靠的方法。欧盟、美国、德国等少数发达国家和地区已成功研制出水合物保真岩心样品后处理和现场测试分析装置并在生产现场应用, 中国目前与深部海洋天然气水合物保压取样钻具对接的岩心现场测试分析和后处理技术仍不成熟, 现场测试多数依靠国外相关检测装置和检测方法。本文介绍了一种天然气水合物保压岩心样品现场参数测试分析系统的工作原理、关键技术及相关实验研究。该系统主要由岩心抓捕和切割单元, 取样器保压单元, 岩心样品参数测试单元, 岩心样品存储单元、温度和压力维持单元等组成, 论文详细介绍了各单元的结构和工作原理。为了验证参数测试系统的工作性能及不同压力环境对参数测试的影响, 制备了 3 种不同组分的模拟岩心, 在不同压力下进行了纵波波速、电阻率和剪切强度测试。研究表明: 该天然气水合物岩心样品带压参数测试系统能够在 30 MPa 的高压下稳定可靠工作; 压力对岩心样品电阻率的影响不大; 对波速测试有影响, 压力越大, 纵波波速度越大; 压力对岩心剪切强度的影响也比较大。

关键词 天然气水合物; 保压; 岩心样品; 参数测试; 实验研究

中图分类号: P634.43; TE921.3

Testing system and experimental study on pressure parameters of natural gas hydrate core samples

LU Haoran, LU Chunhua, HUANG Liusong, TAN Choujiang, QIAO Mengdi

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Received: 2023-04-29; Revised: 2023-10-09

引用格式: 鲁浩然, 卢春华, 黄柳松, 谭畴江, 乔梦迪. 天然气水合物岩心样品带压参数测试系统与实验研究. 石油科学通报, 2025, 10(01): 156-168

LU Haoran, LU Chunhua, HUANG Liusong, TAN Choujiang, QIAO Mengdi. Testing system and experimental study on pressure parameters of natural gas hydrate core samples. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(01): 156-168. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.02.001

Abstract Natural gas hydrates are considered highly likely to become the most promising new alternative energy source in the future, attracting widespread attention from countries around the world. The analysis of performance parameters of natural gas hydrates through pressure testing is extremely important for explaining the growth mechanism of hydrates existing in the formation and predicting changes in the physical and mechanical properties of the formation during hydrate decomposition. It is also the key to constructing a prediction model for the occurrence behavior of gas hydrates in the complex situations mentioned above, which is of great significance for evaluating the occurrence mode and resource quantity of natural gas hydrates in the reservoir. Estimating various parameters of hydrate cores using seismic or logging data often results in significant errors from actual values, and it is difficult to conduct in-situ formation parameter testing under existing technical conditions. So obtaining hydrate formation cores through drilling and testing their physical, chemical, and mechanical properties is the most reliable method. A few developed countries and regions, such as the European Union, the United States, and Germany, have successfully developed post-processing and on-site testing analysis devices for hydrate fidelity core samples and applied them in production sites. Currently, China's on-site testing analysis and post-processing technology for core samples connected to deep marine natural gas hydrate pressure sampling drilling tools is still immature, and most on-site testing relies on relevant foreign detection devices and methods. This article introduces the working principle, key technologies, and related experimental research of a field parameter testing and analysis system for natural gas hydrate pressure retaining core samples. The system is mainly composed of core capture and cutting units, sampler pressure maintaining units, core sample parameter testing units, core sample storage units, temperature and pressure maintaining units, etc. The structure and working principle of each unit are introduced in detail. In order to verify the working performance of the parameter testing system and the influence of different pressure environments on the parameter testing, the system tested the longitudinal wave velocity, resistivity and shear strength of three different hydrate simulation cores under different pressures. Research has shown that the pressure parameter testing system for natural gas hydrate core samples can work stably and reliably at a high pressure of 30 MPa. The influence of pressure on resistivity testing of hydrate core samples is not significant. Pressure has an impact on the wave velocity testing of hydrate core samples, and the higher the pressure, the greater the longitudinal wave velocity. The pressure has a great influence on test of core shear strength.

Keywords natural gas hydrate; pressure maintaining; core samples; parameter testing; experimental research

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.02.001

0 引言

天然气水合物被认为极有可能成为未来最有远景的新型接替能源,引起世界各国的广泛关注。目前这种潜在新能源的勘探与开发仍面临诸多挑战,例如,水合物钻探及开采会影响海底地层中水合物稳定性,进而改变井壁周围水合物所赋存地层的物理力学性质,可能引起附近海底及海底以下地层中地质和生态环境的动态变化,甚至诱发海底滑坡及大陆边缘坍塌等复杂情况。因此,准确地掌握水合物地层孔隙度、地层中水合物饱和度以及物理力学性质等参数显得尤为重要。但通过地震或者测井所得数据对所需各项参数进行估算往往与实际值存在较大误差,且在现有技术条件下又很难进行原位地层参数测试,所以通过钻井获取水合物地层岩心再对其物理化学及力学性质进行测试与分析是最为可靠的方法^[1]。

对海洋天然气水合物参数测试研究逐渐由实验室内对人工合成水合物岩心样品或重塑自然水合物岩心样品的测试分析发展为对深部海洋水合物保压岩心样品的现场综合测试分析研究^[2-3]。欧盟、美国、德国

等少数发达国家和地区已成功研制出水合物保真岩心样品后处理和现场测试分析装置并在生产现场应用^[1]。欧盟研发的保压岩心分析与转移系统(PCATS),实现了在保压情况下对取心装置内岩心的转移、切割、储存等处理流程,并且在性能测量方面提供了与之配套的测量装置: X射线CT、保压岩心多传感记录仪(MSCL-P)和PCATS三轴仪等,有效地获取了含天然气水合物岩心的密度、纵波速度、孔隙结构、力学特性等诸多物性参数。美国佐治亚理工大学自主研发的压力岩心测试分析系统(IPTC)可以实现纵波与横波速度、电导率和不排水抗剪强度等物性测量。英国Geotek公司开发的压力岩心在线检测及转移系统(PCATS),可以实现对保真岩心的P波波速、X射线CT成像和伽马密度的测量,并具有切割装置,可以对目标岩心进行切割保存。中国目前与深部海洋天然气水合物保压取样钻具对接的岩心现场测试分析和后处理技术仍不成熟,现场测试多数依靠国外相关检测装置和检测方法,急需研发具有自主知识产权的水合物保压岩心样品现场参数测试系统^[2]。本文详细阐述了课题组开发的与球阀式天然气水合物保压取心钻具对

接的天然气水合物保压岩心样品现场参数测试分析系统的工作原理、关键技术及相关实验研究。

1 天然气水合物带压岩心样品现场参数测试系统结构和工作原理

天然气水合物保压岩心样品现场参数测试系统主要由岩心抓捕和切割单元、取样器保压单元、岩心样品参数测试单元、岩心样品存储单元及温度维持单元、压力维持单元等组成,如图1所示。取样器保压单元为模拟的水合物保压取心钻具,包括快速接头、球阀、岩心衬管等零件。取样器保压单元通过快速接头与岩心抓捕和切割单元对接,随后在取样器保压单元和岩心抓捕和切割单元的球阀之间加注盐水,直至压力与取样器保压单元和岩心抓捕和切割单元内部的压力一致,开启球阀,抓捕器将保压取心钻具内的岩心衬管及岩心拖入岩心抓捕和切割单元。

1.1 岩心抓捕和切割单元

岩心抓捕和切割单元的作用是在维持温度和压力的条件下把水合物岩心样品从保压取心钻具中拖入岩心抓捕和切割单元,对岩心样品进行切割分段,之后

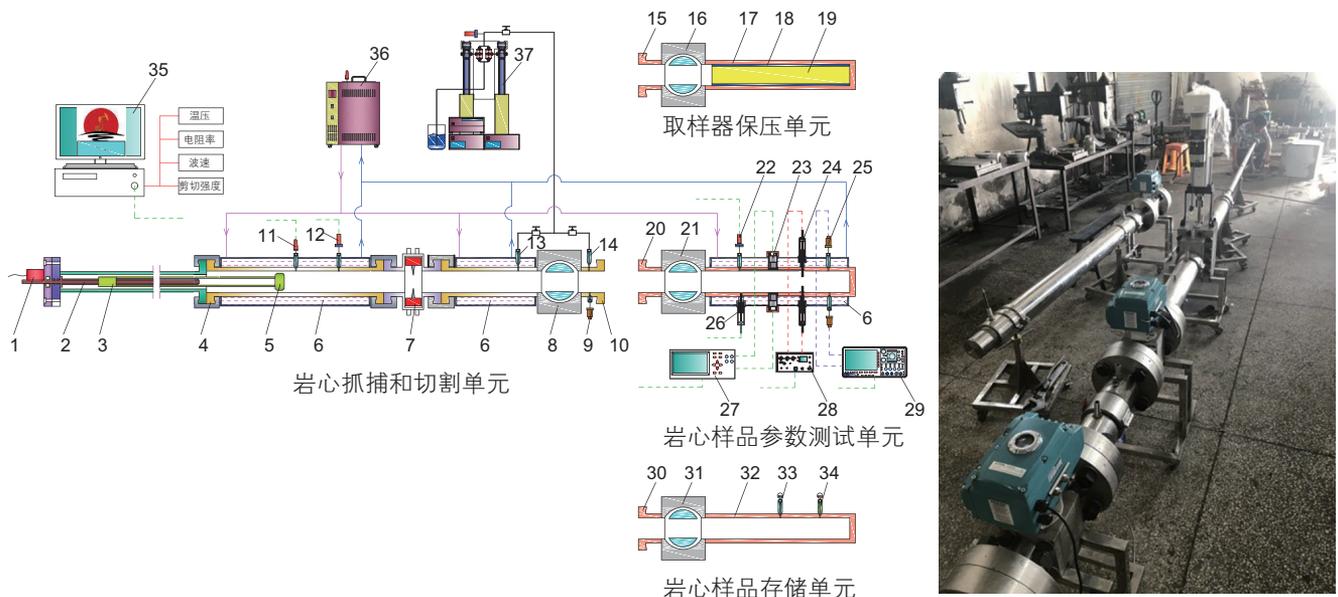
分别送入参数测试单元和岩心样品存储单元。

抓捕头的初始状态下的结构原理与实物如图2所示。在推杆的带动下(如图1所示),抓捕头进入保压钻具的岩心内管,碰到岩心衬管后,芯轴压缩套在其外面的弹簧并挤出探针,探针刺入岩心衬管的倒沟槽,此时“L”型挂钩与挂盘配合锁定位置,如图3所示。此后,推杆回拖带动岩心衬管及衬管内的岩心样品进入切割单元。

岩心切割装置的外观及内部如图4所示。切割装置的侧刀机构位于与外管总成中心轴线相垂直的方向,侧刀采用的是2205双相合金,采用高频淬火工艺增加其硬度,在电动推杆的驱动下切割岩心和岩心衬管;监视机构位于外管总成的管壁处和侧刀上方,用于观测切割器内部情况,从而实现可视化操作、精准定位和快速切割。

1.2 温度维持单元

为了维持天然气水合物岩心样品参数测试系统的低温,英国Geotec公司生产的PCATS岩心样品分析系统、美国佐治亚理工大学自主开发的ITPC压力岩心分析系统均采用降低整体实验环境温度(实验人员也处于低温环境)来确保水合物岩心样品处于低温状态,



1-步进电机;2-螺杆;3-“C”型管;4-快速接头;5-抓捕器;6-水夹套;7-切割器;8-球阀;9-安全阀;10-快速接头;11-温度传感器;12-压力传感器;13-压力追踪口;14-压力追踪口;15-快速接头;16-球阀;17-岩心内管;18-岩心衬管;19-岩心;20-快速接头;21-球阀;22-温度传感器;23-声波探头;24-电阻率探头;25-强度探头;26-压力传感器;27-波速测量仪;28-电阻率测量仪;29-切剪强度仪;30-快速接头;31-球阀;32-存储筒;33-温度监测显示仪;34-压力监测显示仪;35-数据采集处理器;36-恒温循环水浴;37-双缸恒速恒压泵

图1 天然气水合物保压岩心样品现场参数测试系统结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the field parameter test system for gas hydrate pressure holding core samples

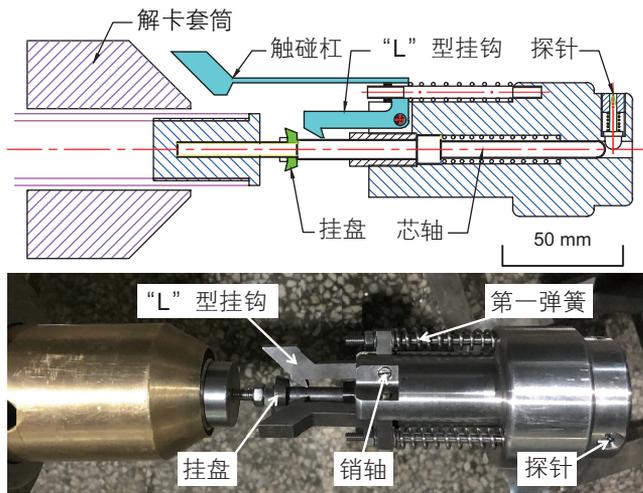


图2 抓捕头初始状态结构原理与实物图
Fig. 2 The structure principle and physical picture of the initial state of the capture head

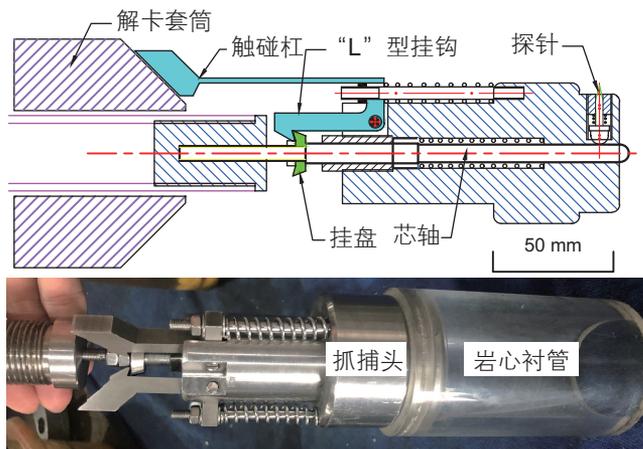


图3 抓捕头抓取状态结构原理与实物图
Fig. 3 The structural principle and physical map of the grasping state of the capture head

这种方法成本很高且在海洋水合物钻探现场不方便实现^[4-5]。

为此，课题组研发了一种采用控温水浴循环系统来实时调控天然气水合物岩心样品的温度的方法，其工作原理如图5所示。控温水浴循环系统主要由控温水浴、循环管线、水夹套、隔温层、循环介质(拟采用与海水浓度相近的盐水)和温度传感器等组成。水夹套包围在岩心抓捕切割单元(主体单元)外面，通过循环管线与控温水浴连接，循环管线和水夹套外面包裹有保温层。循环介质在控温水浴、循环管线和水夹套组成的闭环系统中循环，控温水浴可以实时自动调节循环介质的温度和循环流量，循环介质在岩心抓捕切割单元外面的水夹套内不断流动与岩心抓捕切割单元内部发生热量交换达到调节和控制岩心抓捕切割单元内部温度的目的。温度传感器用于实时监测岩心

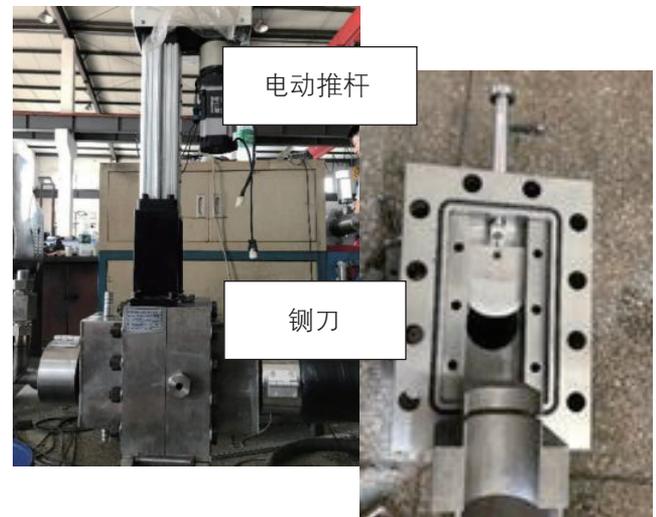


图4 切割器外观和内视图
Fig. 4 The cutter exterior and interior view

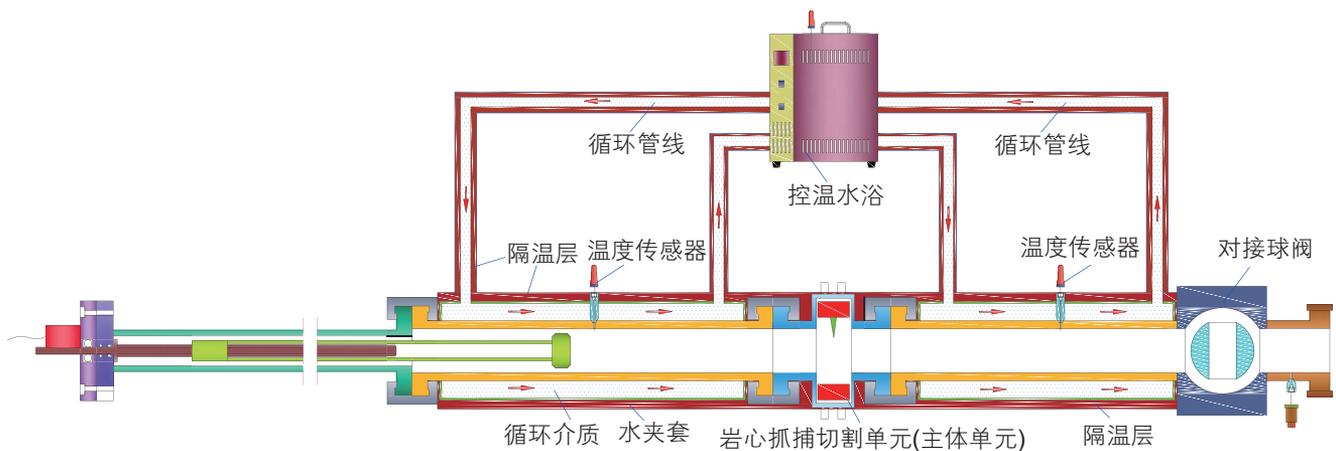


图5 水合物岩心样品现场参数测试系统温度控制原理图
Fig. 5 The temperature control schematic of the field parameter test system for hydrate core samples

抓捕切割单元内部的温度,当岩心抓捕切割单元内部的温度与系统设定的温度(水合物岩心样品地层温度)发生偏差时,控温水浴实时自动调节循环介质的温度和循环流量,确保岩心抓捕切割单元内部的温度仅在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 内波动。

1.3 压力维持单元

岩心样品带压参数测试系统最大难点之一就是压力平衡与维持,保压取样钻具获取水合物岩心样品后,有特定的压力,在与后处理装置对接的时候,先要测量取样钻具内的压力,再调节后处理装置内的压力与之平衡,之后才能连通取样钻具和后处理装置的压力腔。天然气水合物岩心样品在转移和切割过程中,温度和压力不可避免地会发生小幅度的波动,后处理系统腔体内的压力是实时变化的,这就要求转移过程要实时监测和控制各腔体的压力,并且建立一套自适应压力平衡系统。目前,液压系统实现保压回路主要有以下3种方式:(1)单向阀保压回路。(2)蓄能器保压回路。(3)高压泵溢流保压回路。单向阀有良好的密封性能,但是随着锥阀的磨损会导致泄漏增加,从而保压能力降低。蓄能器保压回路的保压时间是取决于蓄能器容积与泄漏程度。变量系相对于定量系,可以调整输出流量,因此在此类液压回路中,变量泵的输出流量小,系统的功率损失也较小^[12-14]。

本文采用双缸恒速恒压泵来对装置进行充压和平衡单元之间的压力,平衡系统原理图如图6所示。双缸恒速恒压泵为立式双缸双伺服电机形式,自动控制,有恒压、恒流量两个模式,最大流速为40 mL/min,内部设计有可编程逻辑控制器(PLC),控制自成一体,不依赖其他计算机就可以实现控制,但配置有通讯口,

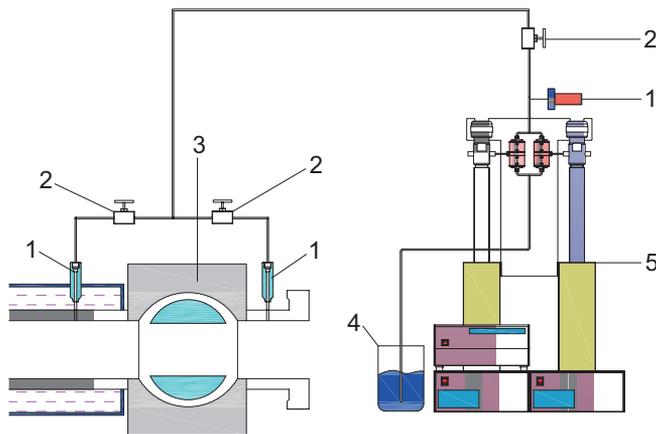
可与计算机网采集泵相关数据,也可由计算机通过软件控制泵的工作并在软件上实时显示压力、流量等参数曲线^[6-10]。各功能单元都有高压接头,由三通管路接入恒压泵中,通过高压阀门开闭的配合,恒压泵里的传感器可以监测密封球阀两侧的压力,当平衡两侧单元内的压力后,即可打开球阀,进行下一步实验操作^[11]。

1.4 岩心参数测试单元

水合物开采过程中,由于温压场改变使得水合物发生分解,这将引起储层强度及应力状态的改变,导致储层出砂、井壁坍塌、地层沉降以及滑坡等工程问题,严重制约天然气水合物资源的安全高效开发。因此,准确测试天然气水合物的性能参数,可以有效促进天然气水合物开采过程中工程问题的评价及控制,为天然气水合物的安全高效开采提供保障^[14-15]。课题组对水合物岩心样品的波速、电阻率与剪切强度3个参数的测试机理进行研究。

水合物岩心样品参数测试单元整体成空心圆柱状,总长1.7 m,包括快速接头、球阀、温度传感器、压力传感器、声波探头、电阻率探头、强度探头、波速测量仪、电阻率测量仪、剪切强度仪。温度传感器和压力传感器分别用于监测岩心样品参数测试单元内部的温度和压力;声波探头对称分布,用于测量水合物岩心样品的纵波波速;电阻率探头前后分布,用于测量水合物岩心样品的电阻率;强度探头和剪切强度仪用于测量水合物岩心样品的剪切强度,如图7所示。

为了在保压环境下旋转岩心衬管,以确保声波探头、电阻率探头和切剪强度探头对准相应的测点,课题组设计了一种岩心衬管旋转定位装置,如图8所示。



1-高压接头; 2-高压阀门; 3-高压密封球阀; 4-水缸; 5-双缸电动打压泵

图6 压力平衡系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the pressure balance system

该岩心衬管旋转定位装置包括法兰连接机构、夹紧旋转机构和监控组件。法兰连接机构包括两侧的连接法兰盘和特制螺栓和螺帽，连接法兰盘与天然气水合物压力岩心筒焊接，两侧的法兰盘通过螺栓紧固，中间装有密封圈；在两侧的连接法兰盘之间为夹紧旋转机构，通过螺栓连接在法兰盘的中间，可以环向旋转，内部含有固定探针。固定探针通过螺纹旋进法兰盘内，可以夹紧岩心压力筒内部的岩心衬管，然后旋转手柄，通过监控组件可以看到测试孔与岩心衬管上的测试点位置是否对齐。

声波、电阻率和剪切强度参数测试探头安装在岩心压力筒的外侧四组接管上，主要实现的功能是带压测试，即在岩心带压转移至参数测试单元之前，检测探头要在岩心压力筒的外侧，当岩心到达检测的位置时，探头要从外侧刺入水合物岩心内部，进行参数检测。

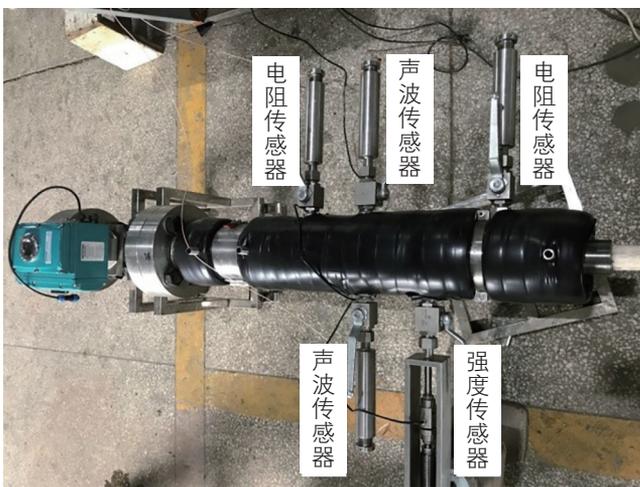


图 7 岩心参数测试单元实物图
Fig. 7 Physical diagram of the core parameter test unit

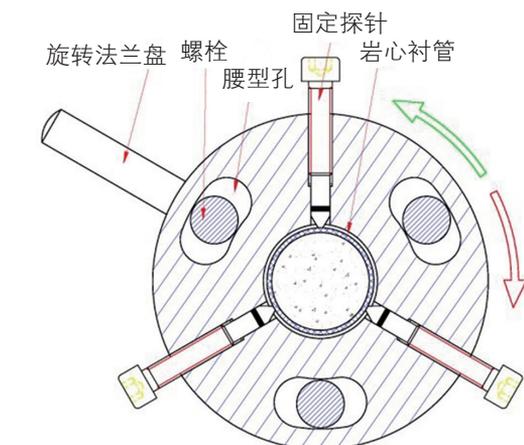
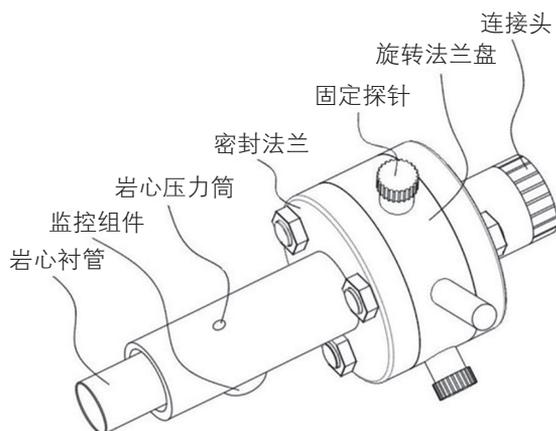


图 8 岩心衬管旋转定位装置及剖面图
Fig. 8 Rotary positioning device and section view of core liner

测。其关键技术是要在高压动态密封的条件下、设计能够耐高压的小尺寸传感器，且岩心测试点要通过岩心衬管旋转定位装置对准相应的探头。参数测试探头结构原理如图 9 所示。该结构设计重点在导向螺杆上，旋转套管在旋进过程中需要克服内部的压力阻力和密封圈的摩擦阻力，如果螺杆上螺纹升角的角度太大，达不到旋转的自锁条件，那么在各种阻力的阻碍下，检测探头无法旋进岩心样品内，因此，应先计算保护杆所受的阻力，再设计导向螺杆的具体结构^[14-15]。

设计的保护杆的外径为 15 mm，在内部 30 MPa 压力条件下，保护杆端面所受的压力阻力为：

$$F_1 = pg \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (1)$$

式中： p 为压力筒内部的工作压力，MPa； d 为保护杆前端的外径，mm。

密封圈在此处的工况为安装在活塞杆上的动态密封圈，在自由状态下，密封圈的截面呈圆形，直径为 d_0 ，此时外径为 D ，装入密封槽后在保护杆的挤压下，密封圈产生了压缩，压缩率为 e ，可根据自由状态下和受挤压状态下的截面高度来进行压缩率的计算。密封圈一侧为高压环境，一侧为大气压环境，压差的作用使密封圈的阻力更大，所以密封圈的阻力分为密封圈在预压缩的状态下的初始摩擦力和在压力作用下产生的摩擦阻力增量两部分，根据徐辅仁的分析计算^[17]，密封圈在压力条件下对保护杆的摩擦阻力为：

$$F_2 = \frac{f\pi Dd}{1-\mu^2} [\text{close}=0.2\pi eE + \mu(1+\mu)p] \quad (2)$$

式中： f 为摩擦系数，经查阅橡胶材料与钢之间的摩擦系数为 0.45； μ 为橡胶材料的泊松比，为 0.47； E 为橡胶材料的弹性模量，0.0078 GPa； e 为密封圈的压缩

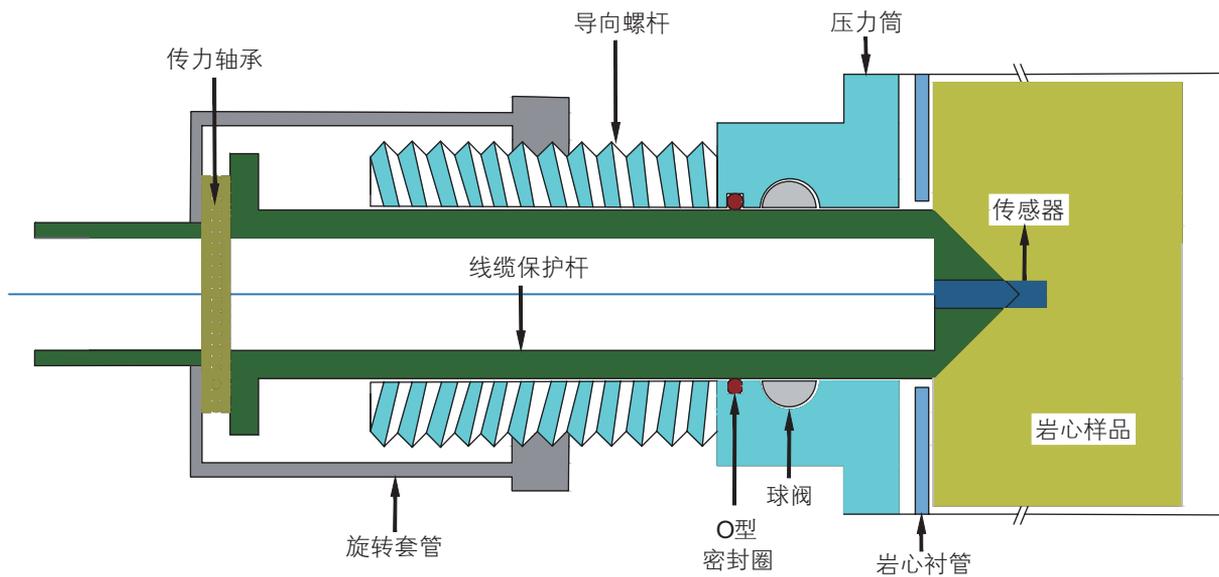


图9 参数测试探头结构原理图

Fig. 9 Schematic diagram of the structure of the parametric test probe

率； D 为密封圈在自由状态下的外径，mm； d 为密封圈的线径，mm； p 为密封圈的工作环境压力。

在导向螺杆内部安装的密封圈型号为 $\phi 15\text{ mm} \times 2.65\text{ mm}$ ，根据机械设计手册查得的密封圈槽的数据，深度为 $h=2.30\text{ mm}$ ， a 为密封圈自由状态， b 为压缩状态，因此计算得密封圈得压缩率为：

$$e = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100\% = \frac{d - h}{d} \times 100\% \quad (3)$$

经计算，在内压 30 MPa 的压力下，保护杆移动所受到的总阻力为前端的压力阻力和外侧与密封圈的摩擦阻力，摩擦阻力为总共为 7386 N 。

2 天然气水合物岩心样品带压参数测试实验研究

2.1 水合物模拟岩心的制作

为了验证天然气水合物岩心样品带压参数测试系统的工作性能，制作了3种水合物模拟岩心用于参数测试。

(1) 冰心

天然气水合物是烃类气体分子与水在高压低温环境下形成的，因为其外表似冰，可以燃烧，俗称可燃冰。天然气水合物在常温常压下会发生分解， 1 m^3 的天然气水合物在常温常压下可释放出 164 m^3 的天然气和 0.8 m^3 的水，采用冰块作为模拟岩心接近水合物物性参数。课题组使用自来水制作岩心，在满足参数检测的岩心长度下，使用冰柜冷冻 12 h ，然后进行

实验，其制作的岩心如图10所示。

(2) A-1型煤粘合剂

使用A-1型煤粘合剂作为胶结材料制作的岩心，具有很高的冷、热机械强度和热稳定性，相对于聚乙烯醇，硬度要大，孔隙较小，没有较大的气泡存在，放置一段时间后粘性较强，形状稳定，拉开后可见粘结细丝，在流水作用下不容易被冲蚀，适合做参数检测的岩心，如图11所示。

(3) 细砂+钠基膨润土+环氧树脂+聚酰胺树脂

根据相关文献资料，砂土和胶结剂的质量比为砂土：钠基膨润土：环氧树脂+聚酰胺树脂=25:10:1，按照比例先将砂土搅拌均匀，在容器中将配比好的环氧树脂和聚酰胺树脂混合均匀，随后加入到砂土中，不断搅拌，在搅拌的过程中连续加入钠基膨润土，直至搅拌均匀，如图12所示。最后装入衬管中，放置



图10 冰心

Fig. 10 Ice core



图 11 A-1 型煤粘合剂岩心

Fig. 11 Briquette binder core



图 12 环氧树脂胶结剂岩心材料配比

Fig. 12 Proportion of epoxy resin cement core material

(从左依次为砂土混合物、钠基膨润土、环氧树脂、聚酰胺树脂)

2 h 后进行实验。粘结时间越长岩心的硬度越大，所以需要控制粘结时间，不能让岩心硬度太大，也不能太小，具体的粘结时间与岩心硬度之间的关系还需进一步实验讨论。图 13 为环氧树脂胶结剂岩心凝固后的岩心状态。

制备了以上 3 种岩心加上软土岩心总共 4 种作为岩心后处理试验的模拟岩心。通过测试上述 4 种模拟岩心的硬度和致密度由大到小依次为环氧树脂岩心，冰心，A-1 型煤粘合剂岩心和软土岩心，其物理性质均接近天然气水合物，每一种岩心都具有相应的特点，可以从多方面试验不同物理性质的岩心在后处理装置的处理情况，对于完善参数测试装置和分析检测方法具有重要意义^[17]。



图 13 环氧树脂岩心

Fig. 13 Epoxy resin core

2.2 水合物模拟岩心带压参数测试实验

2.2.1 声波测试

超声波在各种材料中的传播速度与测试环境温度，物体形状，所受的压力，磁力等都有关系。实验过程是先检验特质声波探头的功能性，能够准确测出已知材料的纵波速度，然后在常压下对各种岩心进行纵波速度的测试，最后在压力条件下对岩心进行测试，对比常压下的测试结果。

对制作的模拟岩心进行常温下的声波测试，岩心与岩心衬管正常放入参数检测单元，通过旋转定位装置对准测试孔后进行声波测试，示波器显示测试结果如图 14 所示，测试所用岩样和测试结果如表 1 所示。

通过实验结果可以看出，岩心越致密纵波速度越大，并且岩心孔隙度对测试结果也有较大影响，较松散的软土岩心对声波衰减较大，很难测试到首波到达的时间。不同的岩心经声波测试，示波器得到波形比较明显，首波出现的现象也很明显，容易测得声波在样品内传播的时间，实验结果表明声波探头发射和接收功能运行可靠，测试结果也比较符合实际。不同岩心在不同压力条件下的声波测试结果见表 2~4。

2.2.2 电阻率测试

直流电阻测试仪可以直接测得两个探头之间的试

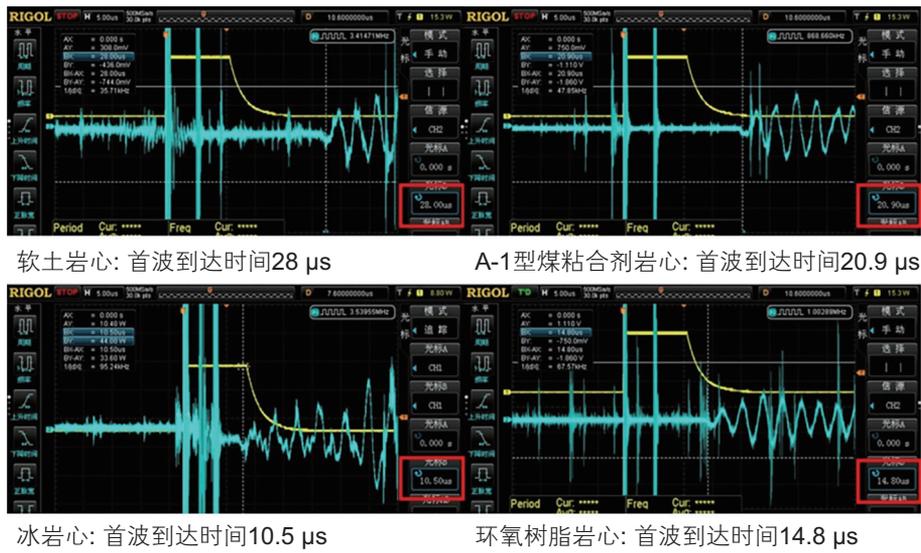


图 14 常压下不同岩心测试结果

Fig. 14 Test results of different cores under atmospheric pressure

表 1 常压下岩心声波测试记录表

Table 1 Core acoustic test records under atmospheric pressure

岩心类别	岩心直径/mm	测试首波到达时间/us	延迟时间/us	纵波速度/m·s ⁻¹
软土岩心	34	28	1.2	1268
A-1 型煤粘合剂岩心	34	20.9	1.2	1726
冰	34	10.5	1.2	3656
环氧树脂岩心	34	14.8	1.2	2500

表 2 冰岩心在不同压力下的声波速度

Table 2 Acoustic velocity of ice cores under different pressures

内部压力/MPa	岩心直径/mm	首波到达时间/us	延迟时间/us	纵波速度/m·s ⁻¹
5	34	10.3	1.2	3736
15	34	10.1	1.2	3820
20	34	9.9	1.2	3908
30	34	9.6	1.2	4048

表 3 A-1 型煤粘合剂岩心在不同压力下的声波速度

Table 3 Acoustic velocity of briquette binder core under different pressures

内部压力/MPa	岩心直径/mm	首波到达时间/us	延迟时间/us	纵波速度/m·s ⁻¹
5	34	20.9	1.2	1726
15	34	20.2	1.2	1790
20	34	19.8	1.2	1828
30	34	18.8	1.2	1932

表 4 环氧树脂岩心在不同压力下的声波速度

Table 1 Acoustic velocity of epoxy resin cores under different pressures

内部压力/MPa	岩心直径/mm	首波到达时间/us	延迟时间/us	纵波速度/m·s ⁻¹
5	34	14.1	1.2	2636
15	34	13.4	1.2	2787
20	34	12.6	1.2	2982
30	34	11.5	1.2	3300

样电阻，根据材料在一定温度下材料的电阻定律，在已知当前电阻的情况下，根据试样尺寸即可算出材料电阻率。为了测试电阻测试仪的数据结果准确度，选用 249 Ω 标准电阻进行测试，测试结果如图 15 所示，数据结果比较准确，可以进行后续实验。对制备的 4 种岩心样品均进行了电阻率测试，样品存放在衬管里，通过探头的旋进使探头刺入样品中，待测试仪数据稳定，得到测试电阻，通过样品尺寸进行电阻率的计算。电阻率测试结果如表 5~7 所示。

试样的电阻率参考值根据样品组成材料和各项物性参数来选择，参考值来源于相关文献资料。

2.2.3 强度测试

通过拉力荷载传感器对岩样进行净锥尖阻力测试，在探头没有任何阻力的情况下，将探头刺入岩样中，直观得到传感器前端荷载数据，得到的检测数据如表 8~10 所示。其中摩擦阻力与内部压力均通过理论计算获得，传感器总荷载为实际测量结果，然后计算出净锥尖阻力，最后通过相应的经验系数计算得到抗剪强度值。

2.3 实验结果与分析

根据 3 种岩心在不同压力环境下测得的声波纵波



图 15 电阻测试仪校核

Fig. 15 The check test of resistance

表 5 冰岩心在不同压力下的电阻率

Table 5 Resistivity of ice cores under different pressures

内部压力 /MPa	电阻 /kΩ	长度 /mm	岩心截面直径 /mm	电阻率 /Ω·m	相关参考值
5	18.1	600	34	27.24	冰：20~2000
15	18.5	600	34	27.99	
20	18.8	600	34	28.44	
30	19.3	600	34	29.20	

表 6 A-1 型煤粘合剂岩心在不同压力下的电阻率

Table 6 Resistivity of briquette binder cores under different pressures

内部压力 /MPa	电阻 /kΩ	长度 /mm	岩心截面直径 /mm	电阻率 /Ω·m	相关参考值
5	14.2	600	34	21.49	泥炭：10~30
15	14.3	600	34	21.64	
20	14.5	600	34	21.94	
30	14.8	600	34	22.40	

表 7 环氧树脂岩心在不同压力下的电阻率

Table 7 Resistivity of epoxy resin cores under different pressures

内部压力 /MPa	电阻 /kΩ	长度 /mm	岩心截面直径 /mm	电阻率 /Ω·m	相关参考值
5	30.5	600	34	46.15	砂质粘土：30~300
15	31.2	600	34	47.21	
20	32.5	600	34	49.18	
30	33.0	600	34	49.94	

速度、电阻率和剪切强度数据，制得 3 种岩心在不同压力下声波速度、电阻率与剪切强度的折线图，如图 16~18 所示。

从图 16 中可以看出，压力对样品声波有一定影响，压力越大，声波速度也越大。这可能是因为压力介质是水，高压条件下对声波的传播更有帮助，使声波衰减减小。另外，压力对岩心的致密度也有一定的

影响，岩心越硬越致密，压力对纵波速度的影响也越大。实验数据结果表明(图 17)，在 0~30 MPa 的压力范围内，压力对电阻率的测量值影响不大。充压介质本次使用的均是淡水，在实际现场环境中与岩心并存的是海水，其导电性更好。本次试验通过控制变量法验证了电阻率测试探头的测量精度与可靠性。另一方面，在压力作用下，岩矿石的电阻率与变形之间有一

表 8 冰岩心在不同压力下的剪切强度

Table 8 Shear strength of ice cores under different pressures

内部压力/MPa	摩擦阻力/N	内部压力阻力/N	传感器总荷载/N	净锥尖阻力/N	直接快剪经验系数	抗剪强度/kPa
5	400.35	883.58	8654.7	7370.77	0.05	368.54
15	1074.77	2650.73	11 386.0	7661.00	0.05	383.05
20	1411.98	3534.30	16 252.0	1136.00	0.05	565.30
30	2086.39	5301.45	21885.0	9767.00	0.05	738.35

表 9 A-1 型煤粘合剂岩心在不同压力下的剪切强度

Table 9 Shear strength of briquette binder core under different pressures

内部压力/MPa	摩擦阻力/N	内部压力阻力/N	传感器总荷载/N	净锥尖阻力/N	直接快剪经验系数	抗剪强度/kPa
5	400.35	883.58	1294.5	10.57	0.05	0.53
15	1074.77	2650.73	3736.3	10.80	0.05	0.54
20	1411.98	3534.30	4957.4	11.12	0.05	0.56
30	2086.39	5301.45	7133.6	15.76	0.05	0.79

表 10 环氧树脂岩心在不同压力下的剪切强度

Table 10 The shear strength of epoxy resin cores under different pressures

内部压力/MPa	摩擦阻力/N	内部压力阻力/N	传感器总荷载/N	净锥尖阻力/N	直接快剪经验系数	抗剪强度/kPa
5	400.35	883.58	4561.5	3277.6	0.05	163.88
15	1074.77	2650.73	7817.6	4092.1	0.05	204.60
20	1411.98	3534.30	10 472.0	5526.0	0.05	276.34
30	2086.39	5301.45	14 488.0	7370.0	0.05	368.54

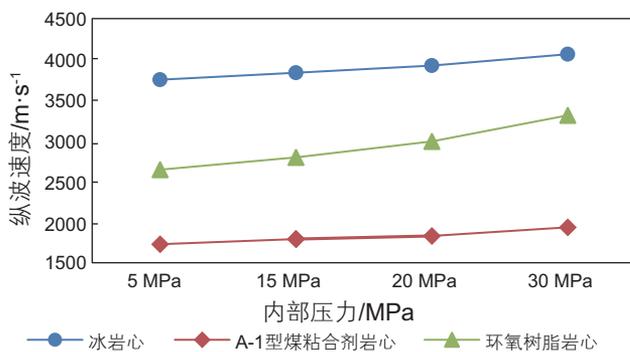


图 16 3 种岩心纵波速度随压力变化折线图

Fig. 16 Line diagram of P-wave velocity versus pressure for three kinds cores

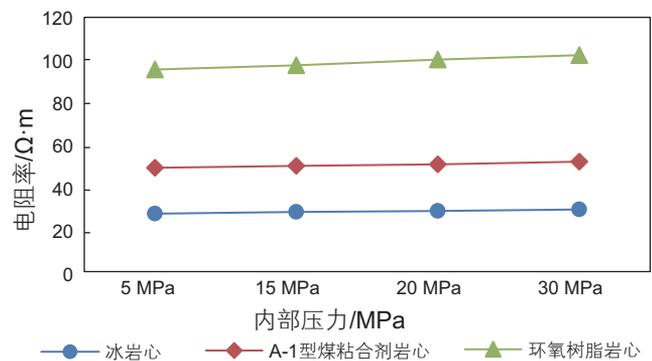


图 17 3 种岩心电阻率随压力变化折线图

Fig. 17 Line diagram of resistivity changes versus pressure of three kinds cores

定的关系,但岩心压力筒内压力增大的情况,属于围压变化,岩心发生变形的情况无法得知,电阻率与岩心变形之间没有直接对应的关系,出现电阻率变化的复杂关系可能与岩心在压力升高过程中,岩心本身裂隙的产生与发展,自由电子释放与吸收直接相关^[16-18]。通过试验数据与折线图(图 18)可以看出,压力对岩心

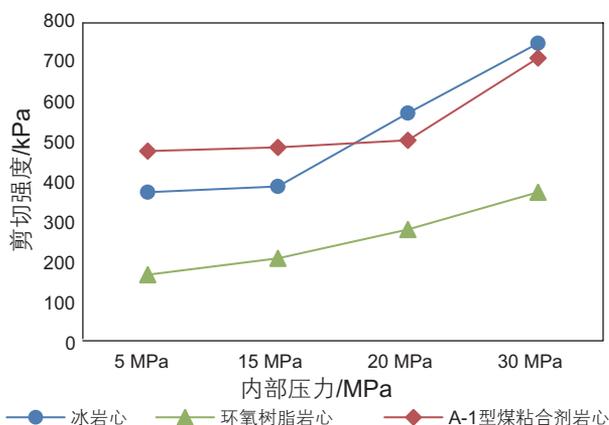


图 18 3 种岩心剪切强度随压力变化折线图

Fig. 18 Three kinds of core shear strength change line graphs with pressure

剪切强度的影响还是比较大的,一方面是在测量的过程中,探头克服的阻力变化规律不均,理论计算结果只能提供一个参考值,而在实际测量过程中变化还是比较大的,所以对于 A-1 型煤粘合剂岩心这一类的软土岩心,很大程度上会使测量结果不准确^[19-20]。另外两种试验的模拟岩心,随着测试压力的升高,剪切强度也在增大,这与岩心的围压变化有关系,剪切强度随着围压增大而增大。

3 结论

(1)研发的天然气水合物岩心样品带压参数测试系统操作简便,可准确控制温度和压力,在低温和 30 MPa 的高压环境下能够准确测试模拟水合物岩心样品的波速、电阻率和剪切强度。

(2)实验结果表明,压力对电阻率影响不大,但对波速和岩心剪切强度有一定的影响。后续将进一步研究压力对岩心波速和剪切强度影响的内在规律,通过系数修正等方法使系统测试的水合物岩心波速和剪切强度更加准确。

参考文献

- [1] 黎永发. 深海沉积物取样器及其球阀关键技术的研究[D]. 浙江大学, 2016. [LI Y F. Research on the key technology of deep-sea sediment sampler and ball valves[D]. Zhejiang University, 2016.]
- [2] PRIEST J A, HAYLEY J L, SMITH W E, et al. PCATS triaxial testing: Geomechanical properties of sediments from pressure cores recovered from the Bay of Bengal during expedition NGHP-02[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 108: 424-438.
- [3] WU D, PENG J, SUN M, et al. Experimental study on a pressure-coring technology based on a freeze-core valve for marine hydrate-bearing sediment sampling[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 135-142.
- [4] YAMAMOTO K. Overview and introduction: Pressure core-sampling and analyses in the 2012-2013 MH21 offshore test of gas production from methane hydrates in the eastern Nankai Trough[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 296-309.
- [5] 张凌, 蒋国盛, 宁伏龙, 等. 国外天然气水合物岩心处理分析技术综述[J]. *地质科技情报*, 2009, 28(1): 123-126. [ZHANG L, JIANG G S, NING F L, et al. Summary of foreign natural gas hydrate core processing and analysis techniques[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(1): 123-126.]
- [6] 刘协鲁, 阮海龙, 赵义, 等. 海域天然气水合物保温保压取样钻具研究与应用进展[J]. *钻探工程*, 2021, 48(07): 33-39. [LIU X L, RUAN H L, ZHAO Y, et al. Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for marine natural gas hydrate[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(07): 33-39.]
- [7] 陈家旺, 张永雷, 孙瑜霞, 等. 天然气水合物保压转移装置的压力维持系统[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(2): 23-27. [CHENG J W, ZHANG Y L, SUN Y X, et al. Study on the pressure maintaining system of the pressure core transfer device for natural gas hydrate[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2017, 36(2): 23-27.]
- [8] CHONG Z R, YANG S H B, BABU P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges [J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1633-1652.
- [9] 裴学良, 任红, 吴仲华, 等. 天然气水合物岩心带压转移装置研制与现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(03): 49-52. [PEI X L, REN H, WU Z H, et al. [Research and field test of a pressure-stabilizing transfer device for natural gas hydrate samples[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(03): 49-52.]
- [10] SANTAMARINA J C, DAI S, TERZARIOL M, et al. Hydro-bio-geomechanical properties of hydrate-bearing sediments from Nankai Trough[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 434-450.

- [11] 王韧,张凌,孙慧翠,等.海洋天然气水合物岩心处理关键技术进展[J].地质科技情报,2017,36(02):249-257. [WANG R, ZHANG L, SUN H C, et al. Progress in key technologies for handling natural gas hydrate cores from ocean sediments[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(02): 249-257.]
- [12] KATO A, KONNO Y, YONEDA J, et al. Evaluation of failure modes and undrained shear strength by cone penetrometer for Natural Gas hydrate-bearing pressure-core sediment samples recovered from the Krishna-Godavari Basin, offshore India[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 108: 502-511.
- [13] 任红.天然气水合物样品现场后处理技术难点分析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(06):143-144. [REN H. Analysis of technical difficulties in field post-processing of natural gas hydrate samples[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(06): 143-144.]
- [14] 赵义,刘协鲁,刘海龙,等.天然气水合物保压岩心分析及转移系统设计[J].地质装备,2018,19(01):22-24. [ZHAO Y, LIU X L, LIU H L, et al. Core analysis and transfer system design of gas hydrate[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2018, 19(01): 22-24.]
- [15] 肖波,盛堰,刘方兰.天然气水合物样品保压转移及处理技术系统设计[J].海洋地质前沿,2013,29(10):65-68. [XIAO B, SHEN Y, LIU F L. A technology system for pressure keeping transport and treatment of gas hydrate samples[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(10): 65-68.]
- [16] ZHU H, CHEN J, REN Z, et al. A new technique for high-fidelity cutting technology for hydrate samples[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2022, 23(1): 40-54.
- [17] 贺行良,刘昌岭,王江涛,等.天然气水合物气体组成分析的样品前处理技术[J].岩矿测试,2013,32(02):284-289. [HE X L, LIU C L, WANG J T, et al. Sample pre-treatment technologies for gas composition analysis of natural gas hydrates[J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(02): 284-289.]
- [18] 李星泊.天然气水合物岩心船载检测系统与样品分析方法研究[D].大连理工大学,2020. [LI X B. Study on the on-board detection system and analysis methodology for natural gas hydrate core samples[D]. Dalian University of Technology, 2020.]
- [19] 周伟华.天然气水合物岩心样品检测分析技术研究[D].大连理工大学,2018. [ZHOU W H. Study on detection and analysis technology of natural gas hydrate-bearing core samples[D]. Dalian University of Technology, 2018.]
- [20] 王慧杰.球阀启闭动态特性的数值模拟和实验研究[D].浙江理工大学,2015. [WANG H J. The dynamic characteristics of simulation and experimental study on opening and closing process of ball valve[D]. Zhejiang Sci-Tech University, 2015.]

(编辑 马桂霞)

第一作者: 鲁浩然(1984年—),博士研究生,主要研究方向为钻探工具与设备、智能钻探,283395463@qq.com。

通讯作者: 卢春华(1976年—),博士,教授,主要研究方向为钻探工具与设备、非常规能源勘探开发、智能钻探, lchct@163.com。