

T/CAOE

中国海洋工程团体标准

T/CAOE 80—2024

含水合物沉积物中泥砂迁移试验方法

Test method for sand and silt migration in hydrate-bearing sediment

2024 - 12 - 03 发布

2024 - 12 - 03 实施

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般规定	2
5 试验设备	2
5.1 设备构成	2
5.2 高压反应釜	2
5.3 流体供给模块	2
5.4 温度控制模块	3
5.5 压力控制模块	3
5.6 测试模块	3
5.7 数据采集模块	3
6 试验过程	3
6.1 试样制备	3
6.2 泥砂迁移测试	4
7 数据采集与处理	4
附 录 A （资料性） 含水合物沉积物中泥砂迁移试验基础信息记录表格式	6
附 录 B （资料性） 含水合物沉积物中泥砂迁移试验记录表格式	7

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国海洋工程咨询协会提出并归口。

本文件起草单位：青岛海洋地质研究所，崂山国家实验室，中国地质大学（武汉），中国石油大学（华东），自然资源部第一海洋研究所，中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院，中国石油集团工程技术研究有限公司、中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司石油工程技术研究院。

本文件主要起草人：李彦龙、吴能友、蔡民辉、王宏斌、胡高伟、郝锡萃、董长银、宁伏龙、邓君宇、王磊、王振豪、孙嘉鑫、孙建业、左家强、万义钊。

本文件为首次发布。

引 言

出砂是指天然气水合物开采过程中地层泥砂颗粒从原始地层骨架上剥落,并随流体在地层中迁移至生产井井筒,并对开采产生不利影响的工程现象。已有试采结果表明,出砂是实现天然气水合物安全、高效、稳定开采的重大工程挑战。发展标准化的室内试验技术,加强天然气水合物开采过程中储层泥砂迁移行为表征并揭示出砂机理,对天然气水合物开采安全设计具有重要意义。

目前,国内外学者借鉴常规油气储层中的泥砂迁移试验思路,初步探讨了含天然气水合物沉积物中的泥砂迁移规律。然而,受天然气水合物分解及其伴生的多场耦合作用影响,天然气水合物储层中的泥砂迁移机理与常规油气储层迥异。常规油气储层泥砂迁移试验方法不能直接用于天然气水合物储层。并且,目前国内外不同研究团队采用的试验方法、测试参数、仪器装备各异,研究结果横向可比性差,建立的出砂预测模型通用性差,亟待构建统一的含天然气水合物沉积物泥砂迁移试验方法。

本文件旨在解决含天然气水合物沉积物中泥砂迁移、产出行为测试技术流程不统一、不规范的问题。同时,考虑到天然气水合物与其他类型的水合物物理性质类似,其赋存沉积物介质中的泥砂迁移试验方法具有可类比性。为增强标准普适性,本文件采用“含水合物沉积物”进行表述。本文件主要包括试验设备、试验过程、数据采集与处理。

含水合物沉积物中泥砂迁移试验方法

1 范围

本文件规定了含水合物沉积物中泥砂迁移试验的试验设备、试验过程、数据采集与处理方法。本文件适用于人工合成的砂质、泥质含水合物沉积物样品。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 21650.3-2011 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度
- GB/T 32708-2016 实验室仪器及设备安全规范：反应釜
- GB/T 41949-2022 颗粒激光粒度分析仪技术要求
- GB/T 50123-2019 土工试验方法标准
- JB/T 4732-1995 钢制压力容器——分析设计标准
- T/CAOE 23-2020 天然气水合物实验测试技术规范
- T/CAOE 52-2023 含水合物沉积物三轴剪切试验方法

3 术语和定义

GB/T 32708-2016、T/CAOE 23-2020、T/CAOE 52-2023界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

泥砂迁移通道 sand and silt migration channel

泥砂颗粒从沉积物骨架剥落后，在流体冲刷携带作用下形成的、有特定几何形态的气-水-砂混相输运高速通道。

3.2

类蚯蚓洞 wormhole-like channel

沉积物内部由于骨架颗粒连续剥落和迁移形成的宽度较小、迂曲度较高、形状类似于土壤中蚯蚓运动痕迹的泥砂迁移通道。

3.3

裂缝状通道 fracture-like channel

在拉伸或剪切破坏作用下，由沉积物内部微裂隙演化而来的深度较大、迂曲度较低、沟壑状的泥砂迁移通道。

3.4

液化通道 fluidized channel

在流体长期浸泡和流动侵蚀作用下，由于沉积物内部轻质组分悬浮迁移而形成的、深度较浅的轻微凹陷。

3.5

模拟生产井 physical modelling wellbore

在泥砂迁移试验中，人工设置的用于气、水、砂产出的敞开通道。

3.6

局部垮塌 local collapse

泥砂迁移诱发的模拟生产井周围含水合物沉积物小范围失稳坍塌现象。

3.7

连续垮塌 continuous collapse

由多个局部垮塌相互连通而形成的、围绕模拟生产井的大面积失稳坍塌现象。

4 一般规定

- 4.1 含水合物沉积物中泥砂迁移试验应采用定性测试和定量测试相结合的手段展开。
- 4.2 定性测试测试内容可包括泥砂迁移通道类型及其演化动态，宜采用超景深显微镜。
- 4.3 定量测试测试内容可包括产出泥砂的粒径、速率和泥砂产出通道的几何尺寸，宜采用激光粒度仪、电子天平和超景深显微镜。
- 4.4 泥砂迁移试验应同步采集含水合物沉积物中的温度、压力。

5 试验设备

5.1 设备构成

含水合物沉积物中泥砂迁移试验设备由高压反应釜、流体供给模块、温度控制模块、压力控制模块、测试模块和数据采集模块等构成。

5.2 高压反应釜

高压反应釜的结构示意图如图1所示，其构成与技术要求如下：

- 1) 高压反应釜宜为圆柱形，应包括上壳体、下壳体、模拟生产井、固相分离部件；
- 2) 上壳体与下壳体宜采用紧固螺栓连接、胶圈密封；
- 3) 模拟生产井与下壳体间应固定连接，模拟生产井出口宜设置在下壳体中央；
- 4) 模拟生产井外部应与固相分离装置相连；
- 5) 固相分离部件的最小颗粒截留粒径宜不大于 $10\ \mu\text{m}$ ；
- 6) 高压反应釜耐压应不低于 $15.0\ \text{MPa}$ ，高压反应釜内部腔体的直径与高度比宜不小于 10，高压反应釜内径与模拟生产井外径比宜不小于 20；
- 7) 上壳体应设置耐压可视窗，可视窗应覆盖整个含水合物沉积物上表面，可视窗宜选用蓝宝石；
- 8) 高压反应釜内应设置温度传感器、压力传感器；
- 9) 温度传感器的测量精度宜不低于 $\pm 0.5\ ^\circ\text{C}$ ；压力传感器的量程应不低于 $15.0\ \text{MPa}$ ，测量精度宜不低于 $\pm 0.1\% \text{F.S.}$ ；
- 10) 高压反应釜侧壁应设置流体入口，流体入口与含水合物沉积物间宜设置导流槽，流体入口应与流体供给模块连接；
- 11) 模拟生产井可安装防砂筛网或填充砾石层，在模拟生产井外围的含水合物沉积物中可预制特定几何尺寸的人工裂缝；
- 12) 高压反应釜内部可设置对含水合物沉积物施加纵向应力的夹层。

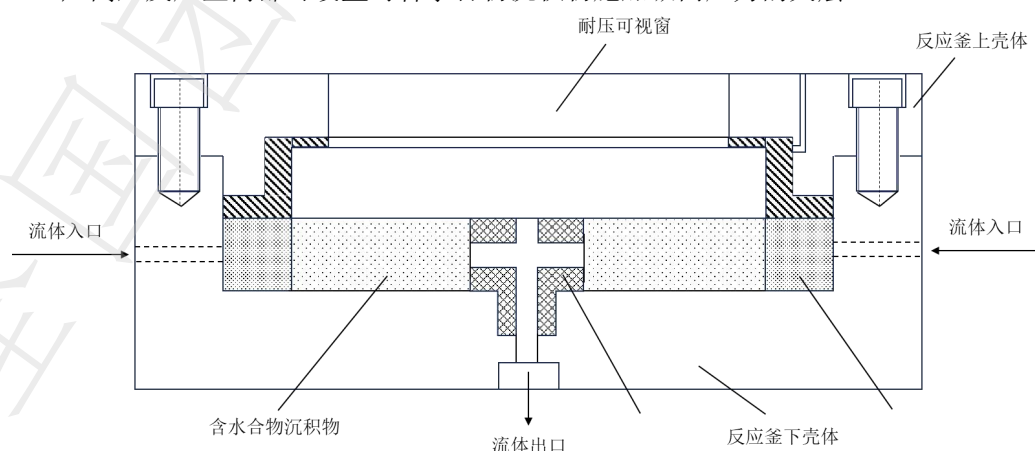


图 1 水合物专用反应釜结构示意图

5.3 流体供给模块

流体供给模块的构成与技术要求如下：

- 1) 流体供给模块应包括供液泵、高压气瓶和搅拌容器；
- 2) 供液泵、高压气瓶与搅拌容器之间应采用耐压管线连接；
- 3) 供液泵宜采用平流泵，平流泵工作压力宜不小于 10 MPa，最大注入流量宜不小于 20.0 mL/min，流量控制精度宜不低于 $\pm 1\%$ F.S.；
- 4) 高压气瓶与搅拌容器之间宜设置单相阀、气体流量控制器。

5.4 温度控制模块

温度控制模块的构成与技术要求如下：

- 1) 温度控制可选用水浴控温或气浴控温；
- 2) 温度控制模块的温度控制范围宜为 $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，控温精度宜不低于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.5 压力控制模块

压力控制模块的构成与技术要求如下：

- 1) 压力控制模块应包括入口压力控制部件、出口压力控制部件；
- 2) 压力控制精度宜不低于 $\pm 0.1\text{ MPa}$ ；
- 3) 入口压力控制部件应集成在流体供给模块中；
- 4) 出口压力控制部件可选用背压阀，亦可选用活塞容器与平流泵组合；
- 5) 压力控制模块还可包括纵向应力控制部件，纵向应力控制部件宜选用活塞容器与平流泵组合。

5.6 测试模块

测试模块的构成与技术要求如下：

- 1) 测试模块应包含超景深显微镜、激光粒度仪、电子天平；
- 2) 超景深显微镜的物镜应设置在可视窗正上方；
- 3) 超景深显微镜的最大工作距离宜不小于 60 mm，最大可视范围宜不小于 130 cm²；
- 4) 超景深显微镜宜配置可视窗低温吹扫部件；
- 5) 激光粒度仪的粒径测试范围宜为 1~500 μm ，重复性误差宜不大于 $\pm 0.5\%$ ；
- 6) 电子天平测量精度宜不小于 $\pm 0.1\text{ mg}$ 。

5.7 数据采集模块

数据采集模块的构成与技术要求如下：

- 1) 数据采集系统应包含数据采集卡、图形工作站；
- 2) 数据采集卡应与温度传感器、压力传感器、气体流量控制器、供液泵、电子天平连接；
- 3) 数据采集卡采样通道数宜不小于 8 个，单通道采样频率宜不小于 60 KHz；
- 4) 图形工作站应与超景深显微镜相连，图像采集频率宜不小于 0.0167 Hz。

6 试验过程

6.1 试样制备

6.1.1 按照 GB/T 41949-2022 确定沉积物粒度，按照 GB/T 21650.3-2011 的规定确定沉积物平均孔隙度，按照 T/CAOE 52-2023 的规定确定沉积物中的水合物饱和度及其对应的水-砂质量比，试验基础信息记录表可参考附录 A 表 A.1；

6.1.2 根据选定的水-砂质量比，将去离子水与沉积物均匀混合，密闭静置，静置周期宜不小于 12 小时；

6.1.3 在模拟生产井中，可设置砾石层或筛网，砾石尺寸初选值宜为沉积物粒度中值的 5~6 倍，筛网孔径初选值宜为沉积物粒度中值的 1.5~2.0 倍；

6.1.4 在模拟生产井底部可设置多孔板，多孔板孔径宜为砾石尺寸的 0.5~0.9 倍；

- 6.1.5 将经密闭静置的水、砂混合物均匀填入高压反应釜；
- 6.1.6 如需模拟水合物开采井周的人工造缝工况，则应在水、砂混合物中设置特定几何尺寸的人工裂缝，人工裂缝内宜填充与步骤 6.1.3 中尺寸相同的砾石；砾石与沉积物宜具有较大的色差；
- 6.1.7 密封高压反应釜，并按照 JB/T 4732-1995 中的相关要求检查高压反应釜气密性；
- 6.1.8 采用流体供给模块向高压反应釜内通入气体，采用温度控制模块控制高压反应釜温度，使高压反应釜内的压力、温度处于水合物相平衡边界以内；可同步对水、砂混合物施加纵向应力；
- 6.1.9 维持步骤 6.1.8 的压力、温度条件，并持续记录高压反应釜内的压力、温度，当恒定温度下高压反应釜内的压力大于水合物相平衡压力且维持稳定 10 小时以上，水合物合成完毕；
- 6.1.10 采用流体供给模块向高压反应釜内注入气饱和水，气饱和水温度应与高压反应釜内温度相同，气饱和水的注入流速宜选取供液泵的最小注入速率。当模拟生产井出口有连续稳定的水产出时，含水合物沉积物试样制备完成。

6.2 泥砂迁移测试

6.2.1 水合物未分解沉积物中的泥砂迁移测试

- 6.2.1.1 维持高压反应釜内的温度不变，选择恒压模式或恒速模式向高压反应釜内注入气饱和水；
- 6.2.1.2 若选择恒速模式，则设定向高压反应釜内注入气饱和水的速率，注入速率初选值宜为供液泵最小注入速率的 2~5 倍；
- 6.2.1.3 若选择恒压模式，则设定向高压反应釜内注入气饱和水的压力，注入压力初选值宜大于含水合物沉积物试样制备完成时高压反应釜内压力 0.5 MPa；
- 6.2.1.4 与步骤 6.2.1.2 或步骤 6.2.1.3 同步，设定模拟生产井出口压力值，模拟生产井出口压力值应大于水合物相平衡压力；
- 6.2.1.5 持续向高压反应釜内注入气饱和水并维持模拟生产井出口压力值恒定，直至测试结束。

6.2.2 水合物未分解沉积物中的泥砂迁移测试

- 6.2.2.1 根据实验设计要求选择降压或增温方式使高压反应釜内的水合物发生分解；
- 6.2.2.2 若选择降压方式，则维持高压反应釜内的温度不变，设定模拟生产井出口压力，并维持恒定直至测试结束，模拟生产井出口压力值应小于水合物相平衡压力；
- 6.2.2.3 若选择增温方式，则采用温度控制模块对高压反应釜进行加热至设定温度，并维持恒定直至测试结束，设定温度值应大于水合物相平衡温度。

7 数据采集与处理

- 7.1 与步骤 6.2.1 或 6.2.2 同步，采用数据采集模块采集数据和图像，试验记录表可参考附录 B 表 B.1；
- 7.2 与步骤 7.1 同步，在模拟生产井出口收集固液产出物并进行固液分离，固液产出物收集频率宜不低于 5 次/小时；对固相颗粒进行烘干处理，并进行分批次称重，并进行其粒度分布、质量的测量；
- 7.3 泥砂迁移测试结束后，可对高压反应釜内的沉积物进行取样和粒度分布测试，取样点宜沿模拟生产井对称分布；
- 7.4 对步骤 7.1 获取的超景深显微图像进行二值化处理，选用的二值化方法宜为自适应阈值法；
- 7.5 判定泥砂迁移试验过程中的泥砂迁移通道类型，可根据几何尺寸将泥砂迁移通道划分为类蚯蚓洞、裂缝状通道、液化通道三类；
- 7.6 判定泥砂迁移试验过程中含水合物沉积物的失稳类型，可根据失稳范围将含水合物沉积物的失稳模式划分为局部垮塌和连续垮塌两类；
- 7.7 对应于步骤 6.2.1，整理试验过程中获取的流量、压力数据，并应用式（1）计算泥砂迁移试验过程中试样的渗透率：

$$k = \frac{10^{-2} q \mu [\ln(R_e/R_w)]}{2\pi h (P_e - P_w)} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- k ——渗透率， m^2 ；
- q ——模拟生产井出口流量， m^3/s ；

- μ ——气饱和水的粘度, Pa·s;
 R_e ——模拟沉积物充填半径, m;
 R_w ——模拟生产井半径, m;
 h ——试样厚度, m;
 P_e ——供液泵出口压力, Pa;
 P_w ——模拟生产井出口压力, Pa。

全国团体标准信息平台

附录 A

(资料性)

含水合物沉积物中泥砂迁移试验基础信息记录表格式

表A.1给出了含水合物沉积物中泥砂迁移试验基础信息记录表格式。

图 A.1 含水合物沉积物中泥砂迁移试验基础信息记录表

试验编号:

水合物沉积物 试样信息	样品编号	沉积物类型	平均孔隙度	粒度中值/ μm	水-砂质量比	模拟水合物饱和度	计算水合物饱和度
模拟生产井信息	<input type="checkbox"/> 裸眼完井 <input type="checkbox"/> 砾石充填	模拟生产井直径/cm		砾石粒度中值/ μm		砾石粒度范围/ μm	
备注							
试验人:		校核人:			试验日期:		

附录 B

(资料性)

含水合物沉积物中泥砂迁移试验记录表格式

表B.1给出了含水合物沉积物中泥砂迁移试验信息记录表格式。

表 B. 1 含水合物沉积物中泥砂迁移试验记录表

试验编号:

水合物生成阶段					
生成时间/min	反应釜内温度/°C	围压压力/MPa	孔隙压力/MPa	有效压力/MPa	显微图像编号
备注					
模拟降压阶段					
驱替时间/min	反应釜内温度/°C	有效压力/MPa	入口压力/MPa	出口压力/MPa	显微图像编号
备注					
试验人:	校核人:		试验日期:		