

董 林, 廖华林, 李彦龙, 等. 天然气水合物沉积物力学性质测试与评价[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 34-43.

天然气水合物沉积物力学性质测试与评价

董 林^{1,2,3}, 廖华林^{1,3}, 李彦龙^{2,4*}, 刘昌岭^{2,4}

(1 非常规油气开发教育部重点实验室, 中国石油大学(华东), 青岛 266580; 2 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; 3 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580; 4 青岛海洋科学与技术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)

摘 要: 储层力学参数的评价及预测是天然气水合物安全高效开发的关键。笔者从力学试验、本构模型以及离散元数值模拟等方面介绍了含水合物沉积物力学性质测试及数值计算研究新进展, 分析总结了力学参数评价及预测的主要方法及其特点, 探究了目前含水合物储层力学性质测试及评价研究存在的问题及其主要原因。为了更好的解决相关工程技术问题, 笔者建议通过结合室内试验与数值模拟的方法对水合物储层力学特性及破坏机制进行分析, 针对不同工况条件及储层特征建立更加准确的力学参数计算模型。

关键词: 天然气水合物; 力学特性; 试验技术; 强度参数; 本构模型

中图分类号: P744; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.090

0 引言

天然气水合物沉积物具有胶结差、强度低的特性^[1]。在水合物开采过程中, 由于温压场改变使得水合物发生分解, 引起储层强度及应力状态的改变, 导致储层出砂^[2]、井壁坍塌^[3]、地层沉降^[4]以及滑坡^[5]等工程问题, 严重制约天然气水合物资源的安全高效开发^[6-7]。因此, 准确评价和预测天然气水合物储层的力学参数(抗剪强度、弹性模量、内聚力、内摩擦角、泊松比等), 揭示水合物储层的强度及其在开采过程中的变形规律, 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。

国内外研究人员在天然气水合物储层力学

参数室内试验、本构模型及数值模拟等方法进行了深入的研究^[8-10]。目前主要的实验测试手段是对人工合成试样或保压岩心进行室内三轴剪切试验及直剪试验, 其中低温高压条件下三轴剪切试验是应用最广泛的方式^[11-13]。通过室内试验研究可知, 含水合物沉积物的强度随水合物饱和度的增大而增大, 水合物分解会导致沉积物强度降低^[14]; 并且沉积物的力学特性受到水合物分布特征的影响^[15]。对于含水合物沉积物强度参数的评价及预测则主要集中于建立本构模型来实现的, 包括邓肯-张模型、临界状态模型、亚塑性模型、UH 模型以及损伤模型等, 进一步结合数值模拟可以对水合物储层的力学响应特征进行预测^[16]。

本文总结了近 5 年天然气水合物沉积物力学性质测试试验及计算模型相关研究新进展, 分析了含水合物沉积物力学性质测试方法、本构模型以及离散元模拟等的特点。进一步分析了目前含水合物沉积物力学参数评价及预测方面存在的问题, 特别是水合物沉积物剪切过程破坏机制、水合物非均匀分布对沉积物力学性质的影响以及本构模型的选择和应用等方面, 为天然气水合物储层力学参数测试及预测的进一步研究提出了建议。

收稿日期: 2020-06-13

资助项目: 国家自然科学基金(41976074, 41876051); 泰山学者特聘专家项目(ts201712079); 国家天然气水合物 127 专项(DD20189330)

作者简介: 董 林(1992—), 男, 在读博士, 主要从事天然气水合物沉积物力学特性研究工作. E-mail: donglinupc@163.com

* 通讯作者: 李彦龙(1989—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事海域天然气水合物试采基础理论与技术方面的研究工作. E-mail: ylli@qnlm.ac

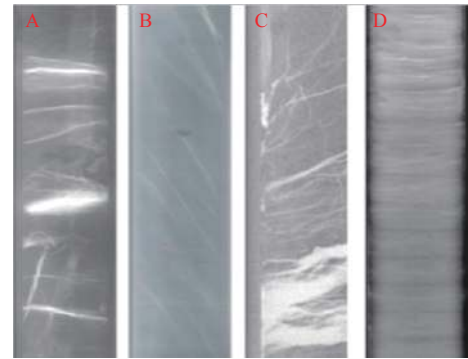
1 含水合物沉积物力学试验研究进展

1.1 三轴剪切试验

低温高压条件下三轴剪切试验是获取含水合物沉积物的力学参数最有效的途径之一^[17]。目前国内外研究人员对含水合物沉积物力学特性进行了大量研究,在试样制备方法、饱和度测试技术、试验温压条件控制、剪切速率控制等方面取得了很大进步,并且对沉积物的力学参数、变形特性进行了深入分析^[12,18]。研究表明:含水合物沉积物的力学性质受到水合物饱和度、有效围压、温度、剪切速率、制样方法、粒度分布、试样尺寸等因素的影响^[12],水合物饱和度的增加使得沉积物的强度和刚度参数明显增大^[8]。

由于实际储层中水合物的合成受到沉积方式和环境的影响,天然气水合物表现出结核状、脉状、裂隙状、块状、层状分布以及各种复杂非均质特征^[15,19],如图 1 所示。水合物在沉积物中的赋存形式不同,其对沉积物的作用也就不同。多数天然气水合物藏是通过浊积成藏的方式形成,水合物分布在纵向上表现出层状分布特征,即不同子层间饱和度呈现各向异性,而子层内部表现为各向同性^[20]。水合物层状分布条件下,不同子层内部水合物对沉积物颗粒的胶结作用存在差异,造成沉积物整体的强度和变形特性发生了改变,并且破坏机制更加复杂^[21]。当水合物在沉积物中以脉状、块状和裂隙状存在时,水合物形状和水合物-沉积物界面性质(如胶结特性及胶结破坏模式等)会显著影响沉积物整体的力学特性:沉积物的强度和刚度以及局部剪切变形特性具有明显的非均质性,其破坏机制相交于水合物均匀分布条件下更加复杂^[15,22];水合物形态以及水合物晶体的破坏形式也会导致沉积物的强度发生改变^[23]。由于受到制样方法和试验装置的限制,室内试验难以模拟实际非均质储层中水合物复杂的赋存特征,因而仅通过传统三轴剪切试验研究水合物非均匀分布条件下沉积物的力学特性及破坏机制存在很大困难。

多级加载三轴剪切试验可以通过对单一试样进行不同围压条件下测试获得试样的力学参数。多级加载条件下含水合物沉积物的峰值强度、弹性



(A: Ullung Basin, B: Offshore India, C: South China Sea, D: Nankai Trough)

图 1 储层中水合物分布特征(据文献[15])

Fig.1 Distribution pattern of gas hydrate in reservoirs (after reference [15])

模量及内聚力等参数的变化趋势与单级加载三轴剪切试验结果基本一致,因而多级加载三轴测试能够适用于沉积物的强度参数的分析^[24],如图 2 所示。与单级加载三轴试验相比,多级加载三轴剪切试验有其独特的优势:多级加载试验获得一组强度指标仅需要一个试样,在有效提高试样的利用率同时,能够减少试样差异造成的测试误差^[25]。天然气水合物储层现场保压取心困难,费用高,造成保压岩心强度指标获取难度大^[26]。因此,多级加载三轴剪切试验在水合物保压岩心测试方面具有广阔的应用前景。

此外,将三轴测试试验与孔压静力触探测试相结合,能够更好预测天然气水合物储层上覆层抗剪强度,提高现场原位测试的准确性^[27]。孔压静力触探测试能够实时测量探头在水合物储层中特定位置的锥尖阻力、侧摩阻力及孔隙压力等参数,但是仅仅依靠经验确定锥头系数会造成计算得出的不排水抗剪强度与水合物储层实际值差异较大^[28-29]。因此,将水合物沉积物三轴剪切试验与孔压静力触探测试相结合,通过三轴试验结果辅助确定锥头系数,能够更加高效的求解水合物储层上覆层不排水抗剪强度。

1.2 直剪试验

直接剪切试验是测定含水合物沉积物的抗剪强度的一种常用方法。直剪试验过程中先在试样上加载垂向应力,然后沿着特定的剪切面对试样进行剪切。目前,研究人员通过直剪试验对含水合物砂沉积物及黏土沉积物进行了测试^[11,30],结果表明

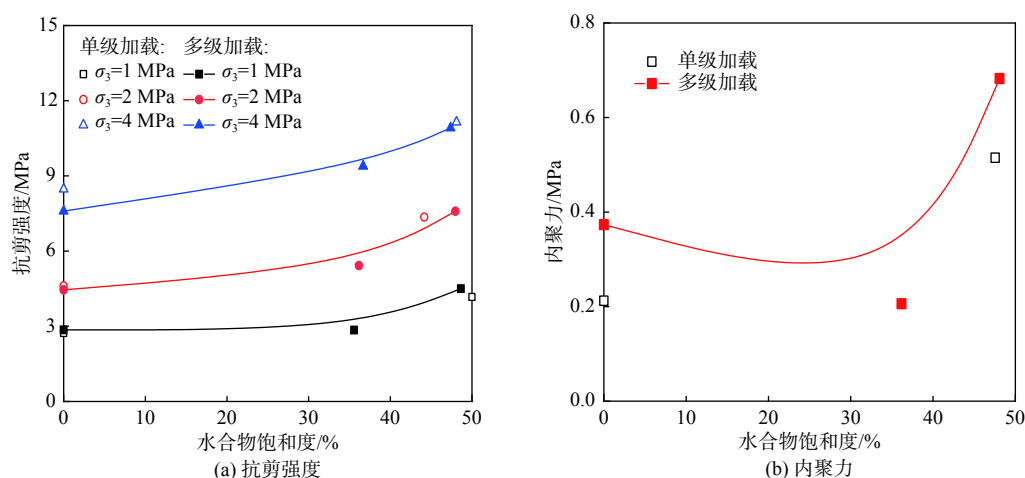


图2 单级和多级加载条件下含水合物沉积物力学参数对比 (据文献 [25])

Fig.2 Mechanical parameters of hydrate sediments under single-stage and multi-stage loading (after reference [25])

直剪试验条件下含水合物沉积物的抗剪强度和残余强度随着水合物饱和度的增加而明显增大^[30]。直剪试验能够实现对水合物沉积物剪切破坏过程中力学参数的描述,但是其变形模量为侧向压缩模量,并且剪切过程中试样受到垂向压力影响较大,沉积物的应力状态与实际储层应力状态存在一定的差距^[11]。相较于三轴剪切试验,直剪试验装置简单,操作方便,更加省时省力,并且在描述大变形条件下含水合物沉积物的变形破坏规律方面适用性更强^[31]。

1.3 CT-三轴剪切试验

深入理解水合物与沉积物在剪切过程中的相互作用微观机理对于含水合物沉积物的力学行为及破坏机制的研究非常重要。CT-三轴剪切试验将微观可视化与宏观力学测试相结合,能够实现可控条件下含水合物沉积物的力学测试及孔隙尺度微观观测。Seol等^[32]详细介绍了含水合物沉积物的孔隙尺度微观观测-三轴剪切综合试验系统及操作流程,并对含水合物沉积物变形过程中宏观力学特性及微观结构变化规律进行了分析。Yoneda等^[33-34]对含水合物沉积物人工试样及保压岩心进行了宏观分析,并结合应力-应变关系曲线对试样剪切带的形成及破坏机制进行研究。结合孔隙尺度的实时观测,CT-三轴剪切试验在含水合物沉积物宏-微观联合分析及破坏机制方面起到了重要作用。

水合物在沉积物颗粒间的主要存在形式有胶结、孔隙填充和沉积物骨架3种^[35]。不同存在形式

下,水合物与沉积物颗粒间的相互作用明显不同,造成剪切过程中沉积物颗粒的相对运动特征存在很大差异^[11,36]。剪切过程中,水合物-沉积物颗粒之间胶结会发生损伤、破坏,同时沉积物颗粒发生旋转、滑移等相对运动,使得沉积物的微观结构发生变化^[10]。因而,水合物在沉积物中的形态及水合物-沉积物颗粒界面性质对于水合物沉积物在剪切过程中的破坏机制影响显著。

由于实现三轴剪切功能及提高X射线穿透性的需要,造成试样尺寸不能过大并且安装试样的反应釜需要由特殊材料制成^[37]。试样尺寸的限制使得微观观测精度很难达到试样中沉积物颗粒-水合物胶结部分的损伤、断裂情况的观测要求^[32]。此外,由于实现三轴剪切功能决定了试样尺度不能太小,使得微观观测精度受到限制,导致剪切过程中水合物-沉积物颗粒界面特性变化规律难以通过CT-三轴剪切试验来确定。因而,在CT-三轴联合测试分析的基础上,需要进一步关注水合物胶结部分破坏规律及水合物-沉积物颗粒界面性质的影响,从而增强对水合物破坏过程中微观结果变化特性的理解。

1.4 离散元模拟试验

为了深入分析水合物存在影响沉积物力学性质的微观机制,研究人员对水合物沉积物三轴试验进行离散元(PFC)模拟^[9]。通过定义颗粒间的胶结特征,离散元软件PFC能够从颗粒尺度对沉积物剪切变形过程中的应力场及变形场进行分析。Jung等^[38]通过PFC软件模拟了含水合物沉积物力学行

为并探究了不同因素对其应力-应变关系的影响规律。周博等^[39]基于广义虎克定律建立弱化方程, 对不同水合物饱和度及围压条件下沉积物的力学行为进行了分析。蒋明镜等^[40-41]通过定义离散元颗粒的胶结性质, 分析了不同开采工况条件下含水合物沉积物的力学性质, 探究了剪切过程中沉积物的宏观力学性质与微观结构的关系。

PFC 能够定义颗粒的数量、形状、级配以及颗粒间胶结方式, 在获取试样应力-应变关系及变形特性的同时, 还能够对剪切过程中试样的应力状态、微裂隙的发育及沉积物颗粒的相对运动进行分析, 是对室内测试试验很好的补充和扩展^[42]。但是, PFC 对于颗粒性质、水合物赋存状态及胶结性质进行了简化, 与实际水合物在沉积物中赋存模式及胶结特性存在明显差异^[43]。因此, 需要结合水合物沉积物三轴剪切试验及微观观测试验深入分析水合物在沉积物中赋存形态及水合物胶结特征, 通过更好地离散元模拟中颗粒性质及颗粒间胶结性质使得模型更加接近实际情况, 从而提高模拟结果的准确性。

2 本构及强度参数快速评价方法

2.1 水合物沉积物本构模型

含水合物沉积物的应力-应变关系是储层强度参数及变形特性评价的基础。在进行含水合物沉积物室内试验研究的同时, 建立含水合物沉积物本构模型能够更好的描述及预测沉积物在不同工况条件下的力学特性。

基于经典岩土力学本构理论, 研究人员建立各种含水合物沉积介质本构模型来描述沉积物的力学特征, 主要包括弹塑性力学模型^[44]、邓肯-张模型^[45]、临界状态模型^[46]、亚塑性模型、改进 UH 模型以及损伤模型^[47-48]等。在各种模型中, 邓肯-张模型和临界状态模型应用较多。

Miyazaki 等^[45]和 Yan 等^[49]考虑了水合物饱和度对沉积物抗剪强度及初始弹性模量的影响, 使邓肯-张模型能够更好的描述含水合物沉积物的力学特性; Song 等^[50]将水合物分解时间和温度参数引入计算模型, 进一步建立了能够描述水合物分解过程中沉积物应力-应变关系的模型, 扩展了其应用范围。邓肯-张模型的改进提高了模型的适用范围和

精度, 能够更好的适用于含水合物沉积物力学行为的描述。

研究人员^[46, 51-52]在考塑性变形特征及水合物胶结作用的基础上建立了修正临界状态模型, 该模型能够描述沉积物应变软化现象及沉积物的塑性应变规律。目前, 对该模型的改进主要有 2 个方面: 一是增加其对于沉积物非均质性的表征, 扩展其应用范围; 二是提高其强度和变形参数计算的准确性, 使其能够更好的应用于水合物储层数值模拟研究。Zhou 等^[20]考虑水合物在储层中纵向非均匀分布特征, 通过拟合各向异性模型的力学参数建立了临界状态模型, 能够描述水合物非均匀分布条件下沉积物强度和变形特性。Sun 等^[51]引入加载面理论和硬化理论改进了临界状态模型, 并与数值模拟相结合, 能够描述水合物分解过程中储层的饱和度场、温度场、压力场、应力场及应变场的变化规律。刘林等^[53]基于临界状态土力学, 考虑水合物含量和赋存形式的影响, 建立了含水合物沉积物弹塑性模型(UH 模型), 该模型能够描述不同水合物赋存形式、不同水合物含量下沉积物的力学特性。此外, 基于亚塑性理论^[54-55], Zhang 等^[56]考虑水合物合成之后临界孔隙比和有效孔隙度的改变, 提出改进亚塑性模型用以描述水合物沉积物力学特性。

不同本构模型由于假设条件的限制, 适用范围存在差异: 弹塑性模型与邓肯-张模型在描述沉积物的应变软化及塑性变形等方面受到了限制; 邓肯-张模型和损伤模型则很难同时分析饱和度、围压及温度等因素的影响; 而临界状态模型中有些参数是基于假设引入的, 难以通过试验测试确定; 亚塑性模型虽然能够对水合物沉积物的应力-应变关系进行预测, 但是很难与流体作用及传热过程进行耦合。虽然研究人员通过引入模型参数, 修改流动准则和硬化规律, 不断提高模型的适用性, 但是本构模型仍然存在改进的空间^[8-9]: 邓肯-张模型只能预测应变硬化型的应力-应变关系, 而临界状态模型在描述塑性应变过程中精确性仍待提高。

2.2 水合物沉积物力学参数预测模型

(1) 抗剪强度

目前的通用做法是基于破坏准则建立强度预测模型, 并通过室内试验数据进行修正。含水合物沉积物抗剪强度预测主要通过摩尔-库伦准则、德鲁克-

普拉格准则及雷德-邓肯准则等强度准则进行^[10, 57]。

基于摩尔-库伦准则的强度计算方法是预测含水合物沉积物抗剪强度最常用的方法之一。沉积物黏聚力和内摩擦角可以视作饱和度的函数^[45]。以摩尔-库伦强度准则为基础^[57]，考虑水合物饱和度的影响，含水合物沉积物的抗剪强度表达式为：

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2 \cdot \cos[\varphi(S_h)]}{1 - \sin[\varphi(S_h)]} \cdot c(S_h) + \frac{2 \cdot \sin[\varphi(S_h)]}{1 - \sin[\varphi(S_h)]} \cdot \sigma_3 \quad (1)$$

式中： $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为含水合物沉积物抗剪强度；

S_h 为水合物饱和度；

c 和 φ 分别为含水合物沉积物总的内聚力和内摩擦角，与水合物饱和度相关；

σ_3 为有效围压。

考虑水合物饱和度对抗剪强度的影响，含水合物沉积物的强度可通过德鲁克-普拉格准则进行计算^[57]，如式(2)~(4)所示。

$$\sqrt{J_2} = K_f(S_h) + \beta(S_h) \cdot I_1 \quad (2)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \quad (4)$$

式中： I_1 为第一应力不变量；

J_2 为第二应力偏量不变量；

K_f 和 β 为与水合物饱和度相关的模型参数，可

通过拟合试验数据确定。

考虑水合物饱和度及有效围压的影响，雷德-邓肯准则可以用于含水合物沉积物抗剪强度的计算，如式(5)~(7)所示。雷德-邓肯准则在预测强度的过程中需要先建立雷德-邓肯数的预测模型，在雷德-邓肯数的基础上预测含水合物沉积物的抗剪强度，计算过程相对复杂^[10, 57]。

$$I_1^3 / I_3 = K_{LD}(S_h, \sigma_3) \quad (5)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (6)$$

$$I_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \quad (7)$$

式中： I_1 和 I_3 分别为第一、第三应力不变量；

K_{LD} 为雷德-邓肯数，与水合物饱和度及有效围压相关。

笔者在之前的研究中详细分析了不同破坏准则对于含水合物砂沉积物(石英砂)的适用性^[10]，结果如图3所示。进一步结合前人研究成果发现：摩尔-库伦准则和德鲁克-普拉格准则均适用于含水合物砂质及黏土质沉积物抗剪强度的预测^[10, 57]；而雷德-邓肯准则仅可应用于含水合物砂沉积物抗剪强度预测，不能应用于含水合物黏土沉积物，其适用范围具有一定的局限性^[57]。此外，摩尔-库伦准则还可以用于描述水合物分解过程中沉积物的抗剪强度变化情况，其适用范围更广^[58]。

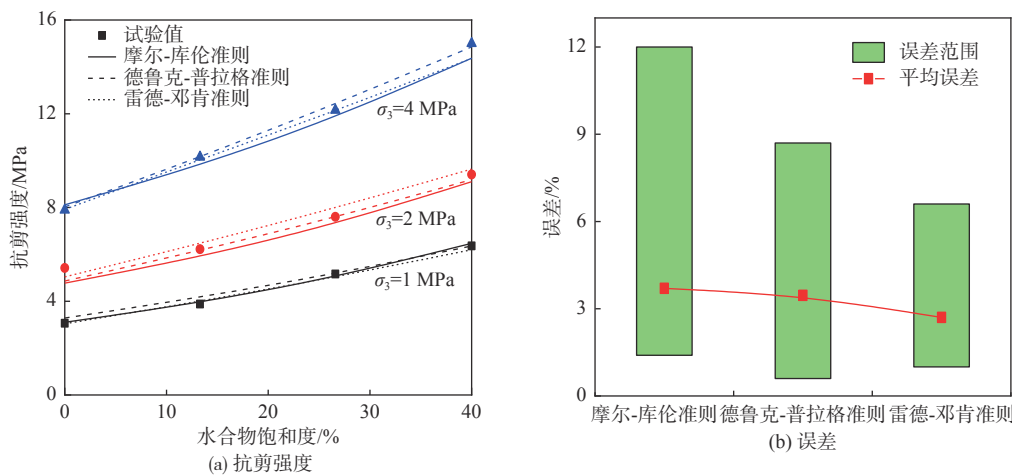


图3 不同破坏准则条件下抗剪强度计算(据文献[10])

Fig.3 Comparison of failure strength under different conditions (after reference [10])

(2) 剪切模量

对于含水合物沉积物的剪切模量计算主要通过引入水合物饱和度及有效围压的影响建立经验

公式得到的。含水合物沉积物应力-应变曲线某特定点的剪切模量可以通过建立其与水合物饱和度和有效围压的关系，通过拟合试验数据得到^[8]。而

含水合物沉积物任意一点的剪切模量则相对比较复杂。要计算应力-应变曲线上任意一点的剪切模量需要首先计算在轴向应变为零时的初始剪切模量^[45, 49-50]。

对于含水合物沉积物的初始剪切模量计算方法主要有 2 种: 一种方法是假设初始剪切模量为

有效围压的 n 次方, 并且考虑水合物饱和度的影响^[45, 49]; 另一种方法是基于试验结果建立经验模型来计算初始剪切模量, 模型可以描述水合物分解过程中剪切模量的变化情况^[50], 目前文献中常见的初始剪切模量表达式如表 1 所示。

表 1 初始弹性模量的计算方法

Table 1 Calculation methods of initial elastic modulus

参考文献	模型	参数
Miyazaki等(2012)	$E_i = e_{i0} (1 + \gamma \cdot S_h^\delta) \sigma_3^n$	e_{i0}, γ, δ 为模型参数, σ_3 为有效围压, S_h 为水合物饱和度
Song等(2016)	$E_i = \frac{1}{A_1 + A_2 \cdot t + A_3 \cdot t^2}$	A_1, A_2, A_3 为温度的函数, t 为分解时间
Yan等(2018)	$E_i = K \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$	P_a 和 σ_3 为标准大气压和有效围压, K 和 n 为水合物饱和度的函数

在求得初始弹性模量基础上, 应力-应变曲线上任意一点的弹性模量可通过式(8)计算^[45, 49]。

$$E_t = \left(1 - R_f \frac{q}{q_f} \right)^2 \cdot E_i \quad (8)$$

式中: q_f 为抗剪强度;

R_f 为破坏比, 为抗剪强度与偏应力的渐进值的比;

E_i 为初始弹性模量。

(3) 内聚力和内摩擦角

含水合物沉积物的内聚力和内摩擦角一般通过试验数据建立经验公式计算。随着水合物饱和度增加, 内聚力明显增大。研究人员多通过线性拟合建立内聚力的计算模型, 如公式(9)所示。而内摩擦随饱和度的变化没有明显的规律性, 在计算过程中多取为定值^[8], 如(10)所示。此外, 在一定范围内, 含水合物沉积物的内聚力和内摩擦角也可以基于多项式、指数及分段线性假设建立计算模型^[11]。

$$C = a \cdot S_h + b \quad (9)$$

式中: C 为内聚力;

S_h 为水合物饱和度;

a 和 b 为模型参数, 通过数据拟合获得。

$$\varphi = \text{constant} \quad (10)$$

式中: φ 为内摩擦角;

constant 表示定值。

图 4 为含水合物沉积物内聚力预测结果。由图可知, 内聚力的线性计算模型能够比较准确的预测内聚力随水合物饱和度的变化情况, 并且该模型能够适用于不同类型的含水合物沉积物内聚力的预测。

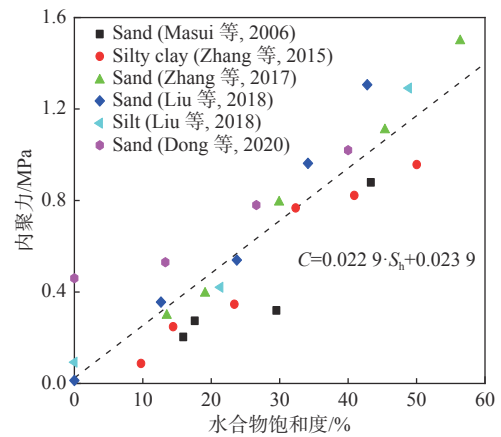


图 4 含水合物沉积物内聚力的预测
Fig.4 Prediction of cohesion of hydrate-bearing sediments

上述含水合物沉积物强度参数的计算模型一般是基于试验结果建立的, 形式比较简, 模型参数较少, 能够满足一定条件下水合物开采过程中储层强度参数的预测及数值模拟相关参数的计算要求。但是, 模型多是通过室内测试数据拟合建立的经验或者半经验模型, 受到测试方法及试验设备的限制, 模型通用性差。模型所包含的变量数量较少, 只能反应少量因素的影响, 试验测试外的因素很难包含进去, 造成其适用范围受到一定的限制。因此, 针对不同的含水合物沉积物类型及计算需求, 需要发展不同力学参数预测模型。

3 含水合物沉积物力学性质研究存在的主要问题

(1) 水合物在沉积物中的形态和分布特征对于

沉积物的力学性质影响显著。水合物非均匀分布条件下储层中沉积物颗粒的排布方式和联结特性与水合物均匀分布条件下明显不同,导致沉积物力学特性也存在差异^[15,21]。对于非均质储层,其水合物分布特征和物理性质与人工试样差距较大:水合物层状分布试样需要准确控制水合物分布,水合物呈脉状、块状和裂隙状分布的试样则需要确定稳定可重复制样的方法。因此,通过室内人工制样模拟实际非均质储层特征仍是目前亟待解决的难题。

(2)由于水合物-沉积物相互作用的复杂性以及微观观测技术的限制,在理论分析和实验研究等方面均存在较大困难,导致剪切过程中含水合物沉积物破坏机制难以客观揭示。对于含水合物沉积物破坏机制的进一步研究,目前存在2点需要关注:①剪切过程中水合物-沉积物颗粒接触界面在载荷作用下演化特征分析;②剪切过程中微观结构变化规律。因而,在CT-三轴剪切联合测试的基础上,还需要提高对水合物分布形态及水合物-沉积物颗粒胶结性质等方面的认识水平。

(3)含水合物沉积物的不同强度模型的适用性评价及对比分析不够深入,模型选用缺乏有效的指导依据。不同力学参数计算模型都是基于特定假设或者简化建立的,适用范围各不相同,并且不同工况下计算结果的准确性也存在差异。虽然目前研究人员对不同强度计算模型进行了对比分析,并初步探究了其应用范围,但是缺乏明确的模型选择方法,进而影响了储层力学响应特征的预测。因而,建立模型优选方法,针对不同工况条件确定合适的计算模型,对于储层力学参数预测及数值计算中力学参数模型的选用是非常重要的。

4 结论与建议

含水合物沉积物力学特性的评价及预测是实现水合物安全开采的关键。本文对含水合物沉积物力学特性测试及评价进行了调研,系统总结了目前含水合物沉积物力学参数测试方法的特点和存在问题以及力学参数的预测方法的适用性及准确性。

目前含水合物沉积物的力学参数可通过多种测试方法获得,其中CT-三轴剪切试验是结合宏微观角度分析沉积物破坏机制的有效手段。针对不

同实际工程问题特点,需要在含水合物沉积物室内力学性质测试的基础上,进一步深入对于水合物沉积物破坏机制、储层非均质性、剪切过程中微观结构变化规律等关键问题的探究。

含水合物沉积物本构模型与物理模拟试验相结合能够更好促进水合物储层力学参数预测,也是数值模拟研究的基础。在建立更加准确高效计算模型的基础上,还应针对不同储层特性及工况特征,建立计算模型的优选方法。

此外,将室内试验与离散元方法相结合,综合物理试验与数值模拟结果深入分析含水合物沉积物变形特性及破坏机制,是深入理解水合物沉积物力学特性的有效途径。

参考文献:

- [1] Waite W F, Santamarina J C, Cortes D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments[J]. *Reviews of Geophysics*, 2009, 47(4): 1-38.
- [2] Li Y L, Ning F L, Wu N Y, et al. Protocol for sand control screen design of production wells for clayey silt hydrate reservoirs: A case study[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(5): 1438-1449.
- [3] Sun J, Ning F L, Lei H W, et al. Wellbore stability analysis during drilling through marine gas hydrate-bearing sediments in Shenhu area: A case study[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 170: 345-367.
- [4] 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.
- [5] Jiang M J, Shen Z F, Wu D. CFD-DEM simulation of submarine landslide triggered by seismic loading in methane hydrate rich zone[J]. *Landslides*, 2018, 15(11): 2227-2241.
- [6] 鲁晓兵, 张旭辉, 王淑云. 天然气水合物开采相关的安全性研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(3): 7-37.
- [7] Lu N, Hou J, Liu Y G, et al. Stage analysis and production evaluation for class III gas hydrate deposit by depressurization[J]. *Energy*, 2018, 165: 501-511.
- [8] Lijith K P, Malagar B R C, Singh D N. A comprehensive review on the geomechanical properties of gas hydrate bearing sediments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 104: 270-285.
- [9] 张峰, 刘丽华, 吴能友, 等. 含天然气水合物沉积介质力学本构关系及数值模拟研究现状[J]. *新能源进展*, 2017, 5(6): 443-449.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 水合物沉积物三轴试验存在的关键问题分析[J]. *新能源进展*, 2016, 4(4): 279-285.
- [13] Hyodo M, Wu Y, Nakashima K, et al. Influence of fines content on the mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(10): 7511-7524.
- [14] Sultaniya A, Priest J A, Clayton C R I. Impact of formation and dissociation conditions on stiffness of a hydrate-bearing sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(7): 988-998.
- [15] Lei L, Santamarina J C. Physical properties of fine-grained sediments with segregated hydrate lenses[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 109: 899-911.
- [16] 张 峰, 刘丽华, 吴能友, 等. 细砂质含水合物沉积介质的非线性弹性力学模型[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 193-198.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Rees E V L, Priest J A, Clayton C R I. The structure of methane gas hydrate bearing sediments from the Krishna-Godavari Basin as seen from Micro-CT scanning[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(7): 1283-1293.
- [20] Zhou M L, Soga K, Yamamoto K. Upscaled anisotropic methane hydrate critical state model for turbidite hydrate-bearing sediments at East Nankai Trough[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123: 1-22.
- [21] 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.
- [22] Madhusudhan B N, Clayton C R I, Priest J A. The effects of hydrate on the strength and stiffness of some Sands[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(1): 65-75.
- [23] Smith W E, Priest J A, Hayley J L H. Influence of vertical cylindrical tetrahydrofuran hydrate veins on fine-grained soil behaviour[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(12): 1691-1701.
- [24] Choi J, Dai S, Lin J, et al. Multistage triaxial tests on laboratory-formed methane hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(5): 3347-3357.
- [25] Gong B, Jiang Y J, Chen L J. Feasibility investigation of the mechanical behavior of methane hydrate-bearing specimens using the multiple failure method[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 69: 102915.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 季福东, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 海底沉积物工程力学性质原位测量方法[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(3): 191-200.
- [29] 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.
- [30] Liu Z C, Dai S, Ning F L, et al. Strength estimation for hydrate-bearing sediments from direct shear tests of hydrate-bearing sand and silt[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(2): 715-723.
- [31] 余 凯, 姚 鑫, 张永双, 等. 基于面积和应力修正的直剪试验数据分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 118-124.
- [32] Seol Y, Lei L, Choi J H, et al. Integration of triaxial testing and pore-scale visualization of methane hydrate bearing sediments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(12): 124504.
- [33] Yoneda J, Jin Y, Katagiri J, et al. Strengthening mechanism of cemented hydrate-bearing sand at microscales[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(14): 7442-7450.
- [34] Yoneda J, Masui A, Konno Y, et al. Mechanical behavior of hydrate-bearing pressure-core sediments visualized under triaxial compression[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 451-459.
- [35] Sánchez M, Gai X, Santamarina J C. A constitutive mechanical model for gas hydrate bearing sediments incorporating inelastic mechanisms[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 84: 28-46.
- [36] Yang L, Falenty A, Chaouachi M, et al. Synchrotron X-ray computed microtomography study on gas hydrate decomposition in a sedimentary matrix[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17(9): 3717-3732.
- [37] Yoneda J, Masui A, Tenma N, et al. Triaxial testing system for pressure core analysis using image processing technique[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(11): 114503.
- [38] Jung J, Santamarina J C, Soga K. Stress-strain response of hydrate-bearing sands: Numerical study using discrete element method simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B4): 1-12.
- [39] 周 博, 王宏乾, 王 辉, 等. 可燃冰沉积物宏细观力学特性真三轴试验离散元模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(1): 131-140.
- [40] 蒋明镜, 肖 俞, 朱方园. 深海能源土宏观力学性质离散元数值模拟分析[J]. *岩土工程学报*, 2013(1): 157-163.

- [41] 蒋明镜, 刘俊, 申志福. 裹覆型能源土力学特性真三轴试验离散元数值分析[J]. 中国科学(物理学力学天文学), 2019, 49(3): 153-164.
- [42] 蒋明镜, 彭镒, 申志福, 等. 深海能源土剪切带形成机理离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1624-1630.
- [43] Li C F, Liu C L, Hu G W, et al. Investigation on the multiparameter of hydrate-bearing sands using nano-focus X-ray computed tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(3): 2286-2296.
- [44] Klar A, Soga K, Ng M Y A. Coupled deformation-flow analysis for methane hydrate extraction[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(10): 765-776.
- [45] Miyazaki K, Tenma N, Aoki K, et al. A nonlinear elastic model for triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment samples[J]. *Energies*, 2012, 5(10): 4057-4075.
- [46] Uchida S, Soga K, Yamamoto K. Critical state soil constitutive model for methane hydrate soil[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117: B03209.
- [47] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐. 含水合物沉积物损伤统计本构模型及其参数确定方法[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1273-1279.
- [48] 杨期君, 赵春风. 含气水合物沉积物弹塑性损伤本构模型探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 991-997.
- [49] Yan C L, Cheng Y F, Li M L, et al. Mechanical experiments and constitutive model of natural gas hydrate reservoirs[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(31): 19810-19818.
- [50] Song Y C, Zhu Y M, Liu W G, et al. The effects of methane hydrate dissociation at different temperatures on the stability of porous sediments[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 147: 77-86.
- [51] Sun X, Wang L, Luo H, et al. Numerical modeling for the mechanical behavior of marine gas hydrate-bearing sediments during hydrate production by depressurization[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 177: 971-982.
- [52] Sultan N, Garziglia S. Geomechanical constitutive modelling of gas-hydrate-bearing sediments[C]//Edinburgh, Scotland, United Kingdom: Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011), 2011.
- [53] 刘林, 姚仰平, 张旭辉, 等. 含水合物沉积物的弹塑性本构模型[J]. 力学学报, 2020, 52(2): 556-566.
- [54] Wu W, Bauer E, Kolymbas D. Hypoplastic constitutive model with critical state for granular materials[J]. *Mechanics of Materials*, 1996, 23(1): 45-69.
- [55] Wei W, Bauer E. A simple hypoplastic constitutive model for sand[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 1994, 18(12): 833-862.
- [56] Zhang X H, Lin J, Lu X B, et al. A hypoplastic model for gas hydrate-bearing sandy sediments[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2018, 42(7): 931-942.
- [57] Zhang X H, Lu X B, Shi Y H, et al. Study on the mechanical properties of hydrate-bearing silty clay[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 72-80.
- [58] Song Y C, Zhu Y M, Liu W G, et al. Experimental research on the mechanical properties of methane hydrate-bearing sediments during hydrate dissociation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 70-78.

MEASUREMENT AND ASSESSMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF HYDRATE-BEARING SEDIMENTS

DONG Lin^{1,2,3}, LIAO Hualin^{1,3}, LI Yanlong^{2,4*}, LIU Changling^{2,4}

(1 Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Development, Ministry of Education, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2 Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 3 School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 4 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Right estimation and prediction of mechanical properties of reservoirs are the keys to natural gas hydrate development in an economic, safe, and efficient manner. In this paper, recent advances in measurement and numerical calculation of mechanical properties of hydrate-bearing sediments are summarized respectively from the viewpoints of testing, modeling, and discrete element numerical simulation, etc. The primary methods for evaluating and predicting the mechanical parameters and their characteristics are analyzed. The existing problems and causes in the measurement and estimation of mechanical characteristics are discussed in depth. In order to solve the concerned geological problems, the mechanical behaviors and failure mechanism should be investigated by combining the experimental measurement and numerical simulation in the future, and a more accurate calculation model needs to be established for obtaining more accurate mechanical parameters under specific operating conditions and reservoir characteristics.

Key words: natural gas hydrate; mechanical properties; testing techniques; strength parameters; constitutive model