

含水合物沉积物等效弹性模量混合律模型^{*}

刘乐乐^{1,2}, 张旭辉³, 刘昌岭^{1,2}, 张剑^{1,2}, 业渝光^{1,2}

(1. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 国土资源部天然气水合物重点实验室, 山东 青岛 266071;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 水合物开采安全性评价亟需合理的含水合物沉积物本构关系模型, 而等效弹性模量的准确预测是建立合理本构关系模型的重要前提条件。本文基于复合材料经典的应力串联和应变并联模型提出了含水合物沉积物等效弹性模量的细观力学混合律模型, 与三轴压缩试验结果对比验证了该模型的适用性。研究表明: 等效弹性模量细观力学混合律模型的模型参数少, 且物理意义明确, 其预测结果与试验数据符合良好; 含水合物沉积物的割线模量随水合物饱和度与有效围压的增加而变大。

关键词: 含水合物沉积物; 割线模量; 混合律模型; 水合物饱和度; 有效围压

中图分类号: TE132.2 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2015)增 2-0425-04

A Meso-mechanical Mixed-Model for Equivalent Modulus of Elasticity of Hydrate Bearing Sediment

Liu Lele^{1,2}, Zhang Xuhui³, Liu Changling^{1,2}, Zhang Jian^{1,2}, Ye Yuguang^{1,2}

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071, P.R. China; 2. Key Laboratory of Natural Gas Hydrate, Ministry of Land Resources, Qingdao, Shandong 266071, P.R. China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P.R. China)

Abstract: Predicting the elastic modulus of hydrate-bearing sediment (HBS) lays a foundation for proposing constitutive models of HBS which is of great significance to the safety assessment of natural gas production/extraction from hydrates. In this work, a mixed model for the elastic modulus of HBS is presented based on the classical series and parallel models of composite material, and the applicability of the model is checked through the comparison between triaxial shear tests and theoretical results. It is shown that the mixed model has simple parameters of explicit physical meanings, and the reasonability and feasibility of the model are verified; the secant modulus of HBS increases with the presence of gas hydrates and increases with increasing the effective confining pressure.

Key words: Hydrate-bearing sediments; secant modulus; mixed model; hydrate saturation; effective confining pressure

1 引言

天然气水合物(简称水合物)是指天然气和水在较低的温度和较高的压力条件下形成的笼型结

晶化合物,具有储量大、分布广和能量密度高等特点,被认为是 21 世纪最为重要的替代能源之一^[1],引起了国内外的广泛关注。自然界中的水合物地层特别是海域水合物地层通常处于欠固结状态且

* 收稿日期: 2015-07-15(修改稿)

作者简介: 刘乐乐(1986-)男,河南鹤壁人,博士,主要从事天然气水合物开采涉及力学问题的研究工作。

E-mail: liulele_leo@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41376078)

存在一定的坡度。水合物开采钻井引起的钻具摩擦生热和钻井液盐分影响等因素均会引起水合物的分解,削弱水合物地层强度,对井壁稳定性十分不利^[2];开采过程中的水合物分解会引起地层强度大幅度降低,可能导致地层变形、滑动、生产平台下陷倒塌等工程地质灾害,对水合物开采安全性构成严重威胁^[3]。水合物开采安全性评价亟需合理的含水合物沉积物本构关系模型,而等效弹性模量的准确预测是建立合理本构关系模型的重要前提条件。

目前,国内外学者对含水合物沉积物力学性质逐渐形成系列共识^[4,5],针对含水合物沉积物本构关系模型的研究也相继展开。Sultan 等^[6]基于常规土体的 Cam-Clay 模型提出一个考虑水合物饱和度影响的含水合物沉积物本构关系模型,能够模拟其骨架结构破坏及软化现象,但是该模型的参数较多,且其预测的应力-应变曲线仅仅在变化趋势上与试验结果相同;Miyazaki 等^[7]基于常规土体的 Duncan-Chang 模型提出一个考虑水合物含量和有效围压共同影响的含水合物沉积物本构关系模型,其预测的应力-应变曲线与试验结果符合良好;基于常规土体的 Mohr-Coulomb 破坏准则和广义虎克定律, Pinkert 等^[8]将含水合物沉积物视为沉积物骨架和水合物的组合体而提出一个考虑水合物饱和度和有效围压共同影响的本构关系模型,其预测的应力-应变曲线与试验结果符合良好,最后指出 Toyoura 砂、7 号和 8 号 silica 砂的模型参数取值基本相同,十分有利于该本构关系模型的推广应用;吴二林等^[9,10]基于复合材料的混合律理论和常规土体的统计损伤理论提出一个考虑水合物饱和度和有效围压共同影响的含水合物沉积物本构关系模型,证明了混合律理论和统计损伤理论在描述含水合物沉积物力学性质方面的可行性与合理性,但是该模型采用的 Voigt 模型在实际情况中往往不能精确描述符合材料的等效割线模量^[11],并且其采用的 Drucker-Prager 破坏准则较为保守,使其岩土微元强度确定的合理性受到限制^[12]。

因此,本文基于复合材料的应力串联和应变并联模型提出了含水合物沉积物等效弹性模量的微观力学混合律模型,通过三轴压缩试验结果验证了该模型的适用性。

2 含水合物沉积物等效弹性模量混合律模型建立

将含水合物沉积物考虑为一种复合材料,由沉积物骨架(海砂)、水合物和孔隙流体(水或气)组成。将沉积物骨架和孔隙流体视为复合材料的基相,假设其为均匀连续体,把水合物视为复合材料的夹杂相,假设其与基相之间完全黏结;假设基相、夹杂相以及复合材料总体均为各向同性材料。

含水合物沉积物的复合材料模型如图 1 所示。图中,Reuss 应力串联模型的等效弹性模量 E_r 可由下式确定:

$$E_r = \left(\frac{n_A}{E_A} + \frac{n_B}{E_B} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中: n_A 和 n_B 分别表示基相和夹杂相的体积分数; E_A 和 E_B 分别表示基相和夹杂相的弹性模量。Voigt 应变串联模型的等效弹性模量 E_v 可由下式确定:

$$E_v = n_A E_A + n_B E_B \quad (2)$$

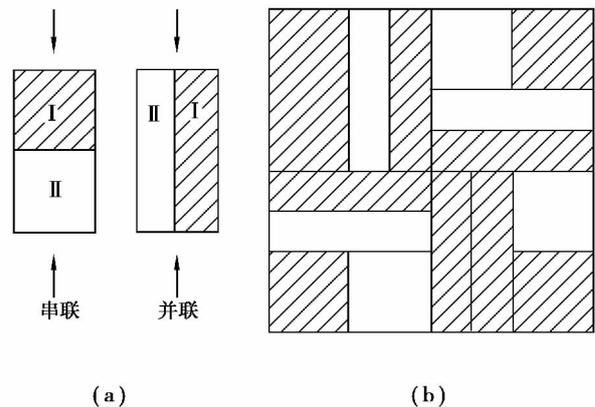


图 1 含水合物沉积物复合材料模型示意图

Fig.1 Diagram of the composite-material model for hydrate-bearing sands

Reuss 应力串联模型与 Voigt 应变并联模型 (a); 各向同性复合材料模型 (b), I 表示复合材料基相; II 表示复合材料夹杂相独立使用 Reuss 模型或者 Voigt 模型预测复合材料等效弹性模量存在较大误差^[11]; 两者算术平均模型^[13]的物理意义不明确,无法反应复合材料的微观情况。本文首先将 Reuss 模型和 Voigt 模型组成各向异性的应力串联单元和应变并联单元,然后将两个各向异性应力串联单元和两个各向异性应变并联单元组成各向同性的复合材料模型。各向异性的应力串联单元的等效弹性模量可由下式确定:

$$E_R = \left(\frac{f_v}{E_v} + \frac{f_r}{E_r} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中: f_v 和 f_r 分别表示该单元中 Voigt 模型和 Reuss 模型对应的力链数量与力链总数的比值, 满足下式:

$$f_v + f_r = 1 \quad \text{and} \quad f_v f_r \geq 0 \quad (4)$$

各向异性的应变并联单元的等效弹性模量可由下式确定:

$$E_V = f_v^* E_v + f_r^* E_r \quad (5)$$

式中: f_v^* 和 f_r^* 分别表示该单元中 Voigt 模型和 Reuss 模型对应的力链数量与力链总数的比值, 满足下式:

$$f_v^* + f_r^* = 1 \quad \text{and} \quad (6)$$

根据均匀性和各向同性假设, 考虑到基相和夹杂相之间的串并联力链模式随方向的改变而改变, 可以获得如下关系:

$$f_v = f_r^* \quad \text{and} \quad (7)$$

各向同性含水合物沉积物复合材料的等效弹性模量可由下式确定:

$$E = \left(\frac{1}{2} \left(\frac{f_v}{E_v} + \frac{f_r}{E_r} \right) + \frac{1}{2} \frac{1}{f_v E_r + f_r E_v} \right)^{-1} \quad (8)$$

根据拉格朗日极值法确定等效弹性模量的上限和下限制, 具体步骤如下:

$$f(f_v, f_r) = \frac{1}{E} + \beta(f_v + f_r - 1) = \frac{1}{2} \left(\frac{f_v}{E_v} + \frac{f_r}{E_r} \right) + \frac{1}{2} \frac{1}{f_v E_r + f_r E_v} + \beta(f_v + f_r - 1) \quad (9)$$

把函数 $f(f_v, f_r)$ 分别对 f_v 和 f_r 求导, 有:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(f_v, f_r)}{\partial f_v} = \frac{1}{2E_v} - \frac{1}{2} \frac{E_r}{(f_v E_r + f_r E_v)^2} + \beta = 0 \\ \frac{\partial f(f_v, f_r)}{\partial f_r} = \frac{1}{2E_r} - \frac{1}{2} \frac{E_v}{(f_v E_r + f_r E_v)^2} + \beta = 0 \end{cases} \quad (10)$$

结合式(4)和式(10), 可以确定含水合物沉积物符合材料的等效弹性模型 E 分别在 $\frac{f_v}{f_r} = \sqrt{\frac{E_v}{E_r}}$ 和 $f_v f_r = 0$ 时取上限值 $\sqrt{E_v E_r}$ 和下限值 $\sqrt{\frac{2E_v E_r}{E_v + E_r}}$ 。

3 三轴压缩试验及混合律模型适用性验证

在自主改造的含水合物沉积物力学性质测试装置^[14]上, 采用饱和海砂沉积物气体扩散法和气

体过量法制备两种类型的含水合物沉积物, 并对其进行了三轴压缩试验。对于由饱和海砂沉积物气体扩散法制备的含水合物沉积物试样(试样 1), 把沉积物骨架和孔隙水等效为复合材料的基相, 而对于由气体过量法制备的含水合物沉积物试样(试样 2), 把沉积物骨架和孔隙气体等效为复合材料的基相。试验所用天然海砂的粒径为 0.18~0.25 mm 相对密度为 2.47, 干密度为 1.53 g·cm⁻³。

3.1 采用试样 1 进行三轴压缩试验的主要步骤

(1) 焊接两根 TDR 探针;

(2) 安装橡胶筒, 拧紧不锈钢半开模, 翻转压力室后将海砂分五次装填入橡胶筒内, 同时也将 SDS 水溶液分五次加入海砂至其饱和, 此过程中不断震动以增加海砂的密实性;

(3) 安装压力室底座, 连接管路;

(4) 施加 1.0 MPa 围压后加入甲烷气体冲洗管路, 排除杂异气体;

(5) 逐级施加围压并注入甲烷气体, 始终保持孔隙压力至少小于围压 0.5 MPa, 常温放置 12 h 促进甲烷气体溶解于孔隙水;

(6) 启动恒温空气浴降温以合成水合物, 目标温度设定为 1.0 °C;

(7) 待孔隙压力变化不大时水合物合成结束, 拧开不锈钢半开模, 调整有效围压为设定值, 以 0.8 mm·min⁻¹ 的剪切速率进行不排水三轴压缩试验。

3.2 采用试样 2 进行三轴压缩试验的主要步骤

(1) 焊接两根 TDR 探针;

(2) 安装橡胶筒, 拧紧不锈钢半开模, 翻转压力室后将设定含水量的海砂分五次装填入橡胶筒内, 分层压实;

(3) 安装压力室底座, 连接管路;

(4) 施加 1.0 MPa 围压后加入甲烷气体冲洗管路, 排除杂异气体;

(5) 逐级施加围压并注入甲烷气体, 始终保持孔隙压力至少小于围压 0.5 MPa;

(6) 启动恒温空气浴降温以合成水合物, 目标温度设定为 1.0 °C;

(7) 待孔隙压力变化不大时水合物合成结束, 拧开不锈钢半开模, 调整有效围压为设定值, 以 0.9 mm·min⁻¹ 的剪切速率进行不排水三轴压缩试验。

不同有效围压下试样 1 的割线模量随水合物饱和度变化曲线如图 2 所示。有效围压 2 MPa 下试样 2 的割线模量随水合物饱和度变化曲线如图 3 所示。图中的割线模量定义为 1% 应变对应的割

线模量。可以看出 相同有效围压下试样 1 的割线模量随着水合物饱和度的增加而增大; 相同水合物饱和度下试样 1 的割线模量随着有效围压的增大

而增加; 试样 2 的割线模量随着水合物饱和度的增加而增大。

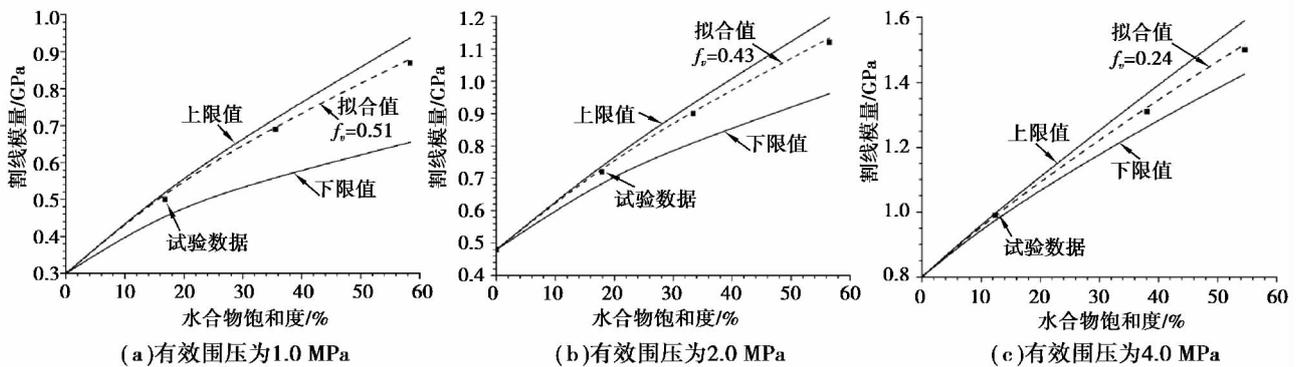


图 2 不同有效围压下试样 1 割线模量随水合物饱和度变化曲线

Fig.2 Relationships between secant modulus and hydrate saturation of hydrate-bearing sands 1 with different effective confining pressures

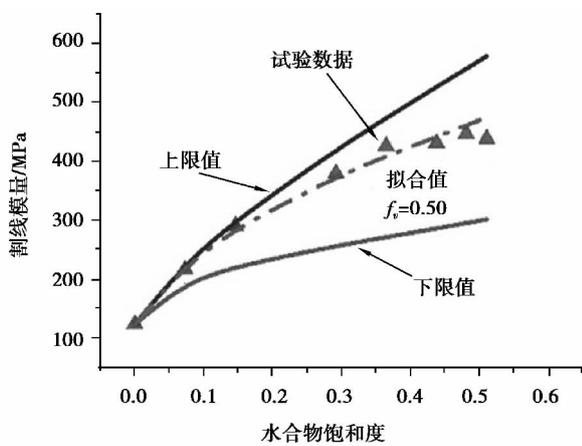


图 3 有效围压 2 MPa 下试样 2 割线模量随水合物饱和度变化曲线

Fig.3 Relationships between secant modulus and hydrate saturation of hydrate-bearing sands 2 under effective confining pressure of 2 MPa

通过水合物饱和度为零的试样三轴压缩试验确定基相的弹性模量,水合物的弹性模量取 9.0 GPa^[1];基相和水合物的泊松比分别取 0.2 和 0.219^[10]。试样 1 和试样 2 的割线模量模型预测值与试验数据的对比情况分别如图 2 和图 3 所示。可以看出,试样 1 和试样 2 割线模量的试验数据全部分布于模型预测的等效弹性模量上限值与下限值之间,并且该模型能够较好地预测两种类型试样的割线模量在不同有效围压下随水合物饱和度而变化的过程,模型具有良好的适用性,为含水合物沉积物本构关系模型的建立奠定了基础。

4 结 论

基于复合材料经典的应力串联和应变并联模

型提出了一个含水合物沉积物等效弹性模量细观力学混合律模型,主要结论如下:

(1) 由饱和海砂沉积物气体扩散法制备的含水合物沉积物割线模量随着水合物饱和度和有效围压的增加而变大,由气体过量法制备的含水合物沉积物割线模量随着水合物饱和度的变大而增加;

(2) 提出的含水合物沉积物等效弹性模量混合律模型能够较好地预测不同有效围压下等效弹性模量随水合物饱和度变化的过程,其模型参数物理意义明确,一定程度上反应了含水合物沉积物的细观结构,为含水合物沉积物本构关系模型的建立奠定基础。

参考文献(References)

[1] Sloan E D, Koh C A. Clathrate Hydrates of Natural Gases [M]. USA: CRC Press, 2008.

[2] Bouriak S, Vanmste M, Saoutkine A. Inferred gas hydrates and clay diapers near the Storregga slide on the southern edge of the V? ring Plateau, offshore Norway [J]. Marine Geology, 2000, 163: 125-148.

[3] Winters W J, Waite W F, Mason D H, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56: 127-135.

[4] WAITE W F, SANTAMARINA J C, CORTES D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments [J]. Reviews of Geophysics, 2009, 47(4): RG4003.

[5] 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.

(下转第 442 页)

4 结 论

根据三种配方水泥石试样和水泥石~土复合试样的室内试验,可以得到以下结论:

(1) 三种配方水泥石试样的直剪试验和三轴试验结果表明, SNA_{201} 水泥石添加剂具有显著的增强作用,新配方水泥石相比于普通配方可以获得更高的强度,约提高 40%,增强配方则要提高约 60%。

(2) 在相同配比的条件下,新配方能节约更多的水泥,可见在实际工程中完全可用新配方水泥石来替代普通配方的水泥石,以达到降低工程造价的目的。对于一般工程,采用新配方即可达到经济和适用的效果,而对某些特殊的工程,当需要水泥石强度较高时,则可采用增强配方,以大幅度提高水泥石的强度。

(3) 对于水泥石~土复合试样,增强配方试样的试验结果是其强度高于普通配方试样。然而新配方试样在较高应力水平下的试验结果略差于普通试验,但不影响其在一般情况下的应用,在前文中笔者作了两种可能性分析,但不能确定是何种原因造成,因此还需作进一步的试验和研究。

(4) 对于水泥石试样,增强配方试样的试验结果好于新配方试样,二者均明显好于普通试样,证明了其应用价值。

参考文献(References)

[1] 张登良. 加固土原理[M]. 北京: 人民交通出版

社,1990.

- [2] 高亚成,郑建青. 水泥石的室内试验研究[J]. 河海大学学报,1999,27(5):103-106.
- [3] G G Moses, S N Rao, P N Rao. Undrained strength behavior of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading [J]. Ocean Engineering, 2003, 30(14): 1765-1789.
- [4] 颜恩锋,孙友宏,许振华,等. 深层水泥石搅拌桩在基坑支护中的应用[J]. 岩土力学,2003,24(1): 90-93.
- [5] 李琦,赵有明. 水泥石受力性能试验研究[J]. 中国铁道科学,2005,26(4): 82-84.
- [6] 梁仁旺,张明,白晓红. 水泥石的力学性能试验研究[J]. 岩土力学,2001,22(2): 211-213.
- [7] 李建军,梁仁旺. 水泥石抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(2): 473-477.
- [8] 童小东,龚晓南,蒋永生. 水泥石的弹塑性损伤试验研究[J]. 土木工程学报,2002,35(4): 82-85.
- [9] 钱晓倩,程功. 水泥搅拌桩增强节材新配方研究[J]. 浙江建筑,1992(6): 25-28.
- [10] 叶观宝,陈望春,徐超,等. 水泥石添加剂的室内试验[J]. 中国公路学报,2006,19(5): 12-17.
- [11] 汤怡新,刘汉龙,朱伟. 水泥固化土工程特性研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(5): 549-554.
- [12] 童小东,徐敏,戴国亮,等. 某添加剂在水泥石搅拌法中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版) 2007, 37(2): 169-173.
- [13] 王东阳,陈淑贤. 流态混凝土高效减水剂 CAN 与水泥适应性[J]. 长安大学学报(自然科学版) 2005, 25(2): 26-29.

(上接第 428 页)

- [6] Sultan N, Garziglia S. Geomechanical constitutive modeling of gas-hydrate-bearing sediments [A]// Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates [C]. Edinburgh [s. n.], 2011.
- [7] Miyazaki K, Aoki K, Tenma N. A nonlinear elastic constitutive model for artificial methane-hydrate-bearing sediment [A]// Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates [C]. Edinburgh [s. n.], 2011.
- [8] Pinkert S, Grozic J L H. Prediction of the mechanical response of hydrate-bearing sands [J]. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 2014, 119: 4695-4707.
- [9] 吴二林,魏厚振,颜荣涛,等. 考虑损伤的含天然气水合物沉积物本构模型[J]. 岩石力学与工程学报,

2012, 31(增 1): 3045-3050.

- [10] 吴二林,韦昌富,魏厚振,等. 含天然气水合物沉积物损伤统计本构模型[J]. 岩土力学,2013,34(1): 60-65.
- [11] 田云德,秦世伦. 符合材料等效弹性模量的改进混合律方法[J]. 西南交通大学学报,2005,40(6): 783-787.
- [12] 曹文贵,张升. 基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 43-47.
- [13] Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1965, 13(4): 213-222.
- [14] 孙中明,张剑,刘昌岭,等. 沉积物中甲烷水合物饱和度测定及其力学特性研究[J]. 实验力学,2013, 28(6): 747-754.