

含水合物沉积物三轴剪切试验与损伤统计分析¹⁾刘乐乐^{*,2)} 张旭辉[†] 刘昌岭^{*} 业渝光^{*}^{*}(国土资源部天然气水合物重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)[†](中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 天然气水合物开采诱发水合物分解, 削弱水合物地层强度, 可能导致地层滑动和生产平台倒塌等工程地质灾害, 对水合物开采安全性构成严重威胁. 深入理解含水合物沉积物力学性质并建立合理的本构关系模型是水合物开采安全性评价的前提条件. 在自主研发的含水合物沉积物力学性质测试实验装置上, 采用饱和水海砂沉积物气体扩散法制备了含水合物沉积物样品, 并开展了系列的排水三轴剪切试验, 通过时域反射技术实现了样品中水合物饱和度的实时在线测量; 基于复合材料的罗伊斯 (Reuss) 应力串联模型和沃伊特 (Voigt) 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, 结合损伤统计理论和摩尔-库伦破坏准则改进了含水合物沉积物的本构关系模型. 结果表明: 随着水合物饱和度的增加和有效围压的减小, 应力-应变曲线由应变硬化型变为应变软化型, 割线模量和峰值强度均随水合物饱和度与有效围压的增加而提高, 黏聚力受水合物饱和度影响明显, 而内摩擦角基本不变; 提出的等效弹性模量细观力学混合律模型与改进的本构关系模型均具有良好的适用性, 模型参数少且物理意义明确.

关键词 含水合物沉积物, 时域反射技术, 三轴剪切试验, 混合律模型, 统计损伤理论

中图分类号: TU411.7 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-15-400

TRIAXIAL SHEAR TESTS AND STATISTICAL ANALYSES OF DAMAGE FOR METHANE HYDRATE-BEARING SEDIMENTS¹⁾

Liu Lele^{*,2)} Zhang Xuhui[†] Liu Changling^{*} Ye Yuguang^{*}^{*}(The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)[†](Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Any perturbation to the thermodynamic equilibrium by exploitation may push out hydrate-bearing sediments (HBS) out of the stability zone, thus inducing hydrate dissociation, loss of cementation, which, in turn, can cause submarine landslides and loss of platform foundations during gas extraction operations. Therefore, a thorough understanding of mechanical properties of HBS is of great importance for stability analyses under different environmental conditions. A series of drained triaxial shear tests were carried out on a self-developed apparatus with the samples prepared by gas diffusion method, in which the time domain reflectometry technique was used in measurement of hydrate saturations in real time. A meso-mechanical and mixed model for the elastic modulus of HBS was proposed based on the classical series and parallel models, including the parameter of statistical force transfer paths between particles in HBS. A constitutive model of HBS was improved by coupling the statistical damage theory and the Mohr-Coulomb failure criterion. It is shown that the stress-strain curve changes from strain-hardening into strain-softening with the increase of hydrate saturation and

2015-11-03 收稿, 2016-01-14 录用, 2016-01-18 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (41376078, 11402131, 11272314).

2) 刘乐乐, 助理研究员, 主要研究方向: 天然气水合物开采涉及的力学问题研究. E-mail: liulele_leo@163.com

引用格式: 刘乐乐, 张旭辉, 刘昌岭, 业渝光. 含水合物沉积物力学性质三轴剪切试验与损伤统计分析. 力学学报, 2016, 48(3): 720-729

Liu Lele, Zhang Xuhui, Liu Changling, Ye Yuguang. Triaxial shear tests and statistical analyses of damage for methane hydrate-bearing sediments. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 720-729

the decrease of effective confining pressure; the secant modulus and the peak strength of HBS increase when the hydrate saturation and the effective confining pressure increase; the cohesion of HBS increases obviously with the increase of hydrate content, and the internal friction angle changed little with the increase of hydrate amount; the proposed mixed model for elastic modulus and the constitutive model of HBS are both reasonable and feasible.

Key words hydrate-bearing sediments, time domain Reflectometry, triaxial shear tests, mixed model, statistical damage theory

引 言

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变化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^[1]; 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^[2]. 对含水合物沉积物的工程力学特性进行深入研究并建立相关理论模型是水合物开采安全性评价的前提条件^[3].

目前, 国内外已报道的含水合物沉积物力学性质研究主要集中在三轴剪切试验方面. 温特斯等^[4]针对加拿大马更些冻土区的含水合物沉积物试样和室内合成的含水合物渥太华砂样品进行了三轴剪切试验, 重点分析了水合物含量和沉积物性质等因素对样品强度的影响; 兵藤等^[5]对人工制备的含水合物砂样品进行了三轴剪切实验, 探讨了温度、有效围压和初始孔隙比等因素对样品力学性质的影响; 松井等^[6]对取自日本南海海槽的含水合物沉积物试样和室内重塑含水合物砂样品进行了三轴剪切试验, 指出样品强度和割线模量均随水合物含量的增加而变大, 而泊松比变化不大; 兵藤等^[7]对室内合成的含水合物砂样品进行了三轴剪切试验, 探讨了加热分解与降压分解过程中样品力学性质的变化规律; 国内学者也开展了系列含水合物沉积物的三轴剪切试验, 进一步研究了水合物类型^[8]、水合物饱和度^[9-10]、温度^[11]和有效围压^[12]等因素对力学性质的影响关系. 然而, 现有的三轴剪切试验通常根据分解产气量^[4,8,10]、孔隙水含量^[7,9]和气体压力降低幅值^[10]等参数反演计算获得样品中水合物的含量, 往往存在一定误差且很难对水合物饱和度进行实时准确控制; 虽然直接挤压纯水合物与砂粒制样法^[5,11-12]可以准确控制水合物饱和度, 但是由该方法制备的样品与自然界的样品存在较大的差别. 时

域反射 (time domain reflectometry) 技术测量水合物饱和度和具有结果可靠和实时原位探测等优点^[13-14], 能够较好地解决上述不足.

随着低温高压三轴剪切试验技术的不断发展, 国内外学者对含水合物沉积物力学性质的认识逐渐深入^[15-16], 针对含水合物沉积物本构关系模型的研究也相继展开. 苏丹等^[17]基于剑桥模型提出了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. 宫崎等^[18]基于邓肯-张模型提出了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. 基于摩尔-库伦破坏准则和广义虎克定律, 平克特等^[19]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, 最后指出丰浦 (Toyoura) 砂和另外两种硅砂的模型参数取值基本相同, 有利于该本构关系模型的推广应用. 吴二林等^[20-21]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, 但是该模型采用的沃伊特模型在实际情况中往往不能精确描述复合材料的等效割线模量^[22], 并且其采用的德鲁克-普拉格 (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^[23].

本文将采用饱和样品利用气体扩散法制备含水合物沉积物, 通过时域反射技术实时监测并控制水合物含量, 利用三轴剪切试验获得系列应力-应变曲线; 基于改进的等效割线模量混合律模型与损伤统计理论, 结合摩尔-库破坏准则, 提出较为合理的含水合物沉积物本构关系模型, 为水合物开采安全性

评价提供本构模型依据。

1 试验设备与方法

1.1 试验设备与材料

以南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 TSZ-2 型三轴剪切仪为基础, 增加温度控制、流体供给和时域反射测量等模块, 经系统改造后形成一套具备水合物含量实时测量能力的含水合物沉积物力学性质测试装置 (图 1)。为了尽可能降低时域反射探针对于含水合物沉积物力学性质的影响, 该装置采用柔性纯铜丝替代常规刚性探针。主要技术参数: 含水合物沉积物样品直径为 39.1 mm, 高为 120 mm; 通过压力室内蒸馏水传递加载围压, 其上限为 10 MPa; 轴向荷载施加上限为 30 kN; 温度控制范围 $-10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$; 压力室内布置精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的 T 型热电偶温度探头以测量土样温度变化, 测量范围 $-10^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$; 压力传感器由上海天沐公司生产, 测量范围 $0 \sim 10 \text{ MPa}$, 精度为 $\pm 0.1\% \text{FS}$; 柔性纯铜丝探针长度为 11 cm, 直径为 0.2 mm; 用于时域反射波形采集的时域反射仪 (型号: TDR100) 由美国坎贝尔科技 (Campbell Scientific) 公司生产。

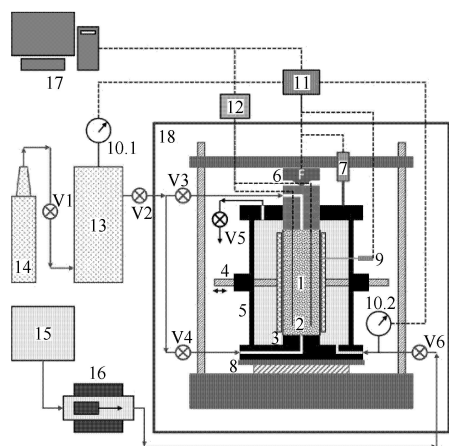


图 1 含水合物沉积物力学性质测试实验装置结构示意图

Fig. 1 Sketch of the triaxial shear test apparatus for mechanical properties of HBS

图中, 1 为含水合物沉积物, 2 为时域反射探针, 3 为橡胶筒, 4 为不锈钢半开模, 5 为压力室, 6 为压力传感器, 7 为位移传感器, 8 为可移动底座, 9 为温度探头, 10.1 和 10.2 为压力表, 11 为数据采集模块, 12 为时域反射仪, 13 为气室, 14 为甲烷气瓶, 15 为水箱, 16 为围压泵, 17 为工控机, 18 为恒温空气浴, V1, V2, V3, V4, V5 和 V6 为阀门。

本文试验所用材料主要包括: 取自青岛海滩的天然海砂筛分制成的粒径为 $0.18 \text{ mm} \sim 0.25 \text{ mm}$ 的细砂, 主要成分为石英, 样品干密度为 1.53 g/cm^3 , 孔隙度为 38%, 砂颗粒的相对密度为 2.47; 纯度为 99.9% 的甲烷气体, 由青岛瑞丰气体有限公司生产; 自行配置的十二烷基硫酸钠水溶液, 质量浓度为 0.03%, 用于促进甲烷水合物的快速合成^[24]。

1.2 试验方法与步骤

时域反射技术最初用于电缆探伤, 后来被赖特等^[25]推广应用于含水合物沉积物的含水量测量, 通过含水量变化确定水合物饱和度。饱和状态的含水合物沉积物中水合物饱和度 S_h 可按下式计算

$$S_h = \frac{\phi - \theta}{\phi} \quad (1)$$

其中, ϕ 为孔隙度 (%), 定义为孔隙水和水合物体积与样品总体积的比值; θ 为孔隙水含量 (%), 定义为孔隙水体积与样品总体积的比值。赖特等^[25]给出了水合物合成与分解过程中石英砂沉积物的孔隙水含量计算所用的经验公式

$$\theta = -11.968 + 4.506K - 0.146K^2 + 2.14 \times 10^{-3}K^3 \quad (2)$$

其中, K 为介电常数, 由下式计算

$$K = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (3)$$

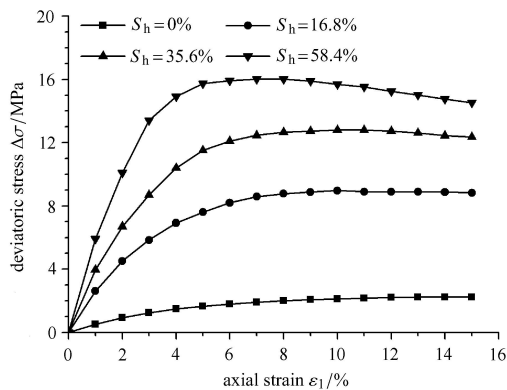
其中, c 为电磁波在真空中的传播速度 (m/s); L 为探针长度 (m); t 为电磁波从起点传播至终点再反射至起点的时间 (s), 可由 TDR 波形确定, 具体方法参见文献^[26]。

试验的具体步骤如下: (1) 焊接两根时域反射探针; (2) 安装橡胶筒, 拧紧不锈钢半开模, 翻转压力室后将海砂分 5 次装填入橡胶筒内, 同时将十二烷基硫酸钠水溶液分 5 次加入海砂直到饱和, 该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 以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, 调整有效围压至设定值, 以 0.8 mm/min 的剪切速率进行排水三轴剪切试验, 同时记录应力、应变和孔隙压力数据。

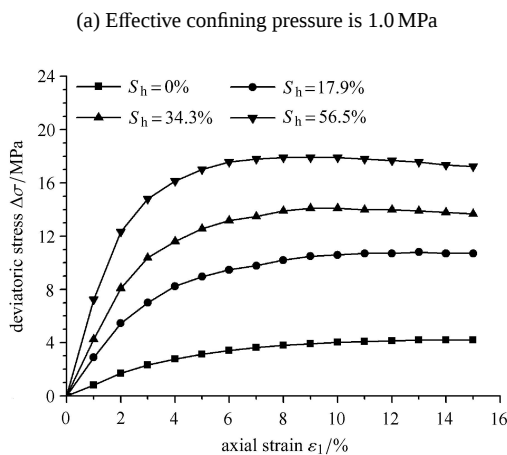
2 试验结果与讨论

2.1 应力-应变曲线

不同有效围压下水合物沉积物应力-应变关系曲线如图 2 所示. 可以看出: 水合物饱和度较低时, 应力-应变曲线没有明显的峰值点; 随着水合物饱和度的增加, 应力-应变曲线逐渐具有明显的峰值点; 有效围压越小, 水合物含量较高的沉积物的应力-应变曲线峰值点越明显. 水合物在沉积物中含量较高时, 将与土颗粒骨架一起作为持力体存在^[27], 三轴剪切过程中, 除了发生土颗粒旋转滑移, 水合物还会发生损伤和破碎, 而水合物与冰一样脆性较强, 导致应力-应变曲线出现应变软化现象. 水合物饱和度越高, 这种应变软化现象越明显. 有效围压较低时, 土颗粒以及水合物颗粒之间的结合由于限制减小而更容易发生损伤与破坏, 应变软化现象更容易出现. 因此, 含水合物沉积物在三轴剪切试验过程中是否出现应变软化现象由水合物饱和度和有效围压共同决定.

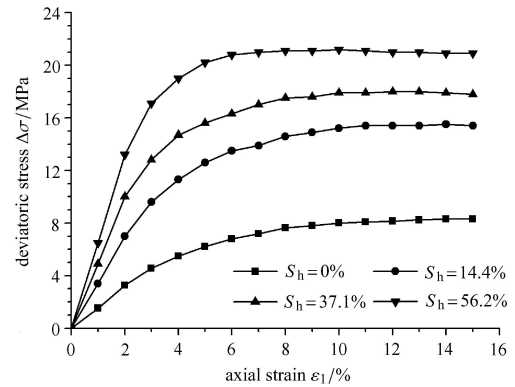


(a) 有效围压为 1.0 MPa



(b) 有效围压为 2.0 MPa

(b) Effective confining pressure is 2.0 MPa



(c) 有效围压为 4.0 MPa

(c) Effective confining pressure is 4.0 MPa

图 2 不同有效围压下水合物沉积物应力-应变关系曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of hydrate-bearing sands with different effective confining pressures

2.2 割线模量

割线模量反应了含水合物沉积物的平均刚度特性. 不同有效围压下水合物沉积物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, 相同有效围压下水合物沉积物的割线模量随着水合物饱和度的增加而增大. 水合物随其含量的增加以胶结的形式逐渐填充于土颗粒之间的孔隙, 土颗粒之间的胶结作用逐步加强, 含水合物沉积物的整体刚度有所增加, 表现为割线模量有所增大. 相同水合物饱和度下水合物沉积物的割线模量随着有效围压的增大而单调增加. 有效围压既能够起到约束含水合物沉积物的作用, 割线模量随围压增加而增加;

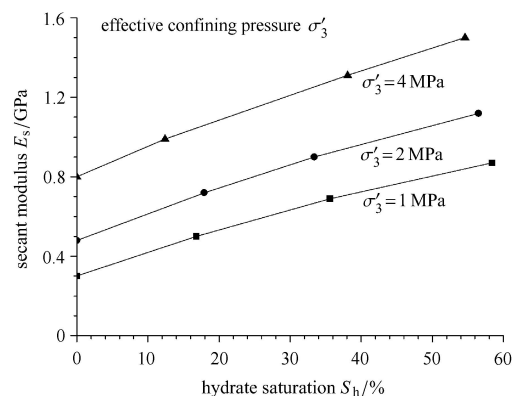


图 3 不同有效围压下水合物沉积物割线模量随水合物饱和度变化曲线

Fig. 3 Relationships between secant modulus and hydrate saturation of hydrate-bearing sands with different effective confining pressures

有效围压增大将会引起土颗粒之间形成的胶结遭到破坏,导致含水合物沉积物的整体刚度降低,割线模量随围压增加而有所降低.割线模量随着有效围压的增大而单调增加说明了有效围压的约束作用在试验过程中始终处于主导地位.

2.3 峰值强度与强度指标

不同水合物饱和度下含水合物沉积物峰值强度(对于应力-应变曲线无明显峰值的情况,以15%应变对应的应力值作为强度值)与有效围压关系如图4所示.可以看出,相同有效围压下含水合物沉积物峰值强度随水合物饱和度的增加而变大;相同水合物饱和度下含水合物沉积物峰值强度随有效围压的变大而增加.

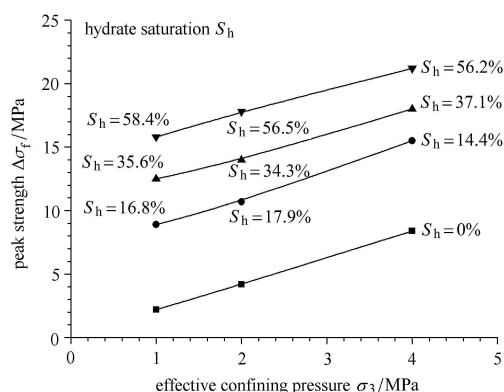


图4 不同水合物饱和度下含水合物沉积物破坏强度与有效围压关系

Fig. 4 Relationships between strength and effective confining pressure

不同水合物饱和度下含水合物沉积物的强度指标(黏聚力 c 和内摩擦角 φ) 如图5所示.可以看出,内摩擦角 φ 相差并不明显,即水合物饱和度对含水合物沉积物的内摩擦角 φ 影响不大,而含水合物沉积物的黏聚力 c 随着水合物饱和度的增加而明显变大.因此,水合物对含水合物沉积物强度的贡献主要体现在增加砂颗粒间的胶结能力,进而引起黏聚力 c 的明显增加,而对内摩擦角 φ 的影响较小.相关研究^[28]表明,在渥太华砂样中采用气体扩散法制备含水合物沉积物,其内摩擦角 φ 在水合物饱和度小于60%时基本保持在 32° 上下不变,而在水合物饱和度大于60%时有所降低;黏聚力 c 随着水合物饱和度的增加而明显增大.松井等^[29]、宫崎等^[30]和刘芳等^[31]均发现了类似的实验现象.本文中水合物饱和度始终小于60%,内摩擦角 φ 随着水合物饱和度的增加基本保持在 32° 上下不变,而黏聚力 c 随着水

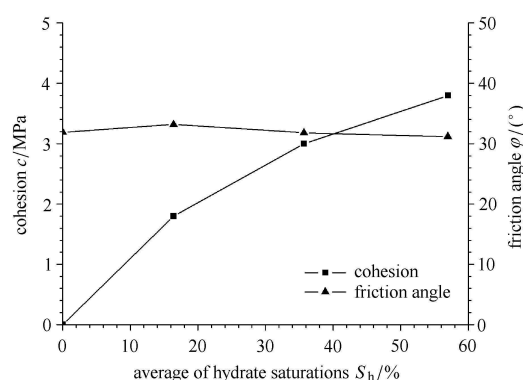


图5 不同水合物饱和度下含水合物沉积物强度指标

Fig. 5 Strength parameters of hydrate-bearing sands with different hydrate saturations

合物饱和度的增加而明显增大,说明了试验结果的可靠性.

3 损伤统计分析

3.1 等效弹性模量及泊松比确定

含水合物沉积物是一种多相介质,弹性常数由所有组成相的性质决定.在本节将借鉴复合材料的相关理论,建立等效弹性模量和泊松比与各组分参数之间的关系.分析中将做如下假设:含水合物沉积物为一种复合材料,由沉积物骨架(海砂)、水合物和孔隙水组成;饱和海砂沉积物(海砂颗粒和孔隙水)为复合材料的基相并为均匀连续体;水合物为复合材料的夹杂相并与基相之间完全黏结;基相、夹杂相以及复合材料总体均为各向同性材料.

由于独立使用罗伊斯模型或者沃伊特模型预测复合材料等效弹性模量存在较大误差^[22];两者算术平均模型^[32]的物理意义不明确,无法反应复合材料的微观情况.本文首先将罗伊斯模型和沃伊特模型组成各向异性的串并联单元,然后再将两个串联单元和两个并联单元组成各向同性的复合材料模型.

假设含水合物沉积物的结构可以用图6所示的复合材料模型表述,A表示复合材料基相(海砂颗粒和孔隙水),B表示复合材料夹杂相(水合物).这个模型的特点是各向同性的复合材料模型由2个串联单元和2个并联单元组成,而每个串联单元或并联单元均由若干个罗伊斯应力串联模型和若干个沃伊特应变并联模型组成^[33],其中,罗伊斯应力串联模型的等效弹性模量 E_r 可由下式确定

$$E_r = \left(\frac{n_A}{E_A} + \frac{n_B}{E_B} \right)^{-1} \quad (4)$$

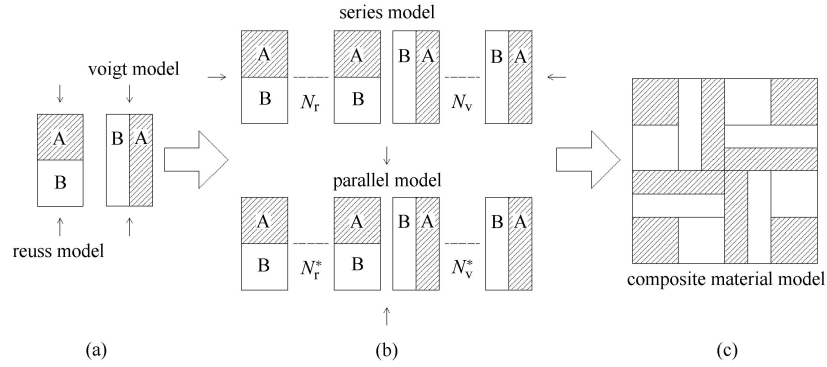


图 6 含水合物沉积物复合材料模型示意图

Fig. 6 Diagram of the composite-material model for hydrate-bearing sands

式中, n_A 和 n_B 分别表示基相和夹杂相的体积分数, 取值分别为 $1 - \phi_{S_h}$ 和 ϕ_{S_h} ; E_A 表示基相的弹性模量, 根据饱和水纯砂样品的应力-应变曲线确定, E_B 表示夹杂相的弹性模量, 取值为纯水合物的弹性模量. 沃伊特应变并联模型的等效弹性模量 E_v 可由下式确定

$$E_v = n_A E_A + n_B E_B \quad (5)$$

串联单元的等效弹性模量 E_R 满足下式

$$\frac{F}{E_R A} (N_r l + N_v l) = N_r \frac{F}{E_r A} l + N_v \frac{F}{E_v A} l \quad (6)$$

式中, F 表示外力; l 和 A 分别表示单个力链在外力作用线上的长度和横截面的面积, 简化后有

$$E_R = \left(\frac{N_v / (N_r + N_v)}{E_v} + \frac{N_r / (N_r + N_v)}{E_r} \right)^{-1} \quad (7)$$

令

$$f_v = \frac{N_v}{N_r + N_v}, \quad f_r = \frac{N_r}{N_r + N_v} \quad (8)$$

则式 (7) 简化为

$$E_R = \left(\frac{f_v}{E_v} + \frac{f_r}{E_r} \right)^{-1} \quad (9)$$

显然, f_v 和 f_r 分别表示串联单元中沃伊特模型和罗伊斯模型对应的力链数量与该串联单元中力链总数的比值, 均为统计意义上的平均值^[33], 与土体本身细观结构、水合物与骨架作用方式有关, 是复合材料的固有属性^[34], 需要通过大量试验数据的统计分析获得, 两者满足下式

$$\left. \begin{aligned} f_v + f_r &= 1 \\ f_v f_r &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

相似地, 并联单元的等效弹性模量可由下式确定

$$E_v = f_v^* E_v + f_r^* E_r \quad (11)$$

式中, f_v^* 和 f_r^* 分别表示该单元中沃伊特模型和罗伊斯模型对应的力链数量与力链总数的比值, 满足下式

$$\left. \begin{aligned} f_v^* + f_r^* &= 1 \\ f_v^* f_r^* &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

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

$$\left. \begin{aligned} f_v &= f_r^* \\ f_r &= f_v^* \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

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

$$E = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{f_v}{E_v} + \frac{f_r}{E_r} \right) + \frac{1}{2} \frac{1}{f_v E_r + f_r E_v} \right]^{-1} \quad (14)$$

根据拉格朗日极值法, 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 $\sqrt{\frac{2E_v E_r}{E_v + E_r}}$.

类似地, 各向同性含水合物沉积物符合材料的泊松比 ν 可由相同方法估算, 即

$$\nu = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{f_v}{\nu_v} + \frac{f_r}{\nu_r} \right) + \frac{1}{2} \frac{1}{f_v \nu_r + f_r \nu_v} \right]^{-1} \quad (15)$$

3.2 损伤统计本构关系

假设含水合物沉积物的三轴应力-应变关系服从广义虎克定律, 即有

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\Delta \sigma + (1 - 2\nu) \sigma_3] \quad (16)$$

式中, ε_1 表示轴向应变; $\Delta\sigma$ 表示轴向偏差应力; σ_3 表示有效围压. 轴向偏差应力 $\Delta\sigma$ 可以表示为

$$\Delta\sigma = E\varepsilon_1 - (1 - 2\nu)\sigma_3 \quad (17)$$

根据勒梅特 (Lemaitre) 等效应变假设^[35] 和损伤力学理论, 用损伤之后的等效应力来代替无损伤材料本构关系中的名义应力^[36], 即可得到考虑的含水合物沉积物的本构关系, 即

$$\Delta\sigma = E(1 - D)\varepsilon_1 - (1 - 2\nu)\sigma_3 \quad (18)$$

式中, D 为损伤变量, 定义为发生损伤的微元数量与微元总数的比值.

3.3 损伤变量及模型参数确定

假设含水合物沉积物在三轴剪切过程中的损伤是一个连续过程, 各微元强度在概率统计上服从威布尔 (Weibull) 分布规律^[37], 损伤变量 D 可由下式确定

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (19)$$

式中, F 为微元强度随机分布的分布变量; m 和 F_0 为威布尔分布的参数.

摩尔-库伦准则是基于大量试验数据而建立的, 能够较准确的反应岩土材料的承载力. 基于摩尔-库伦准则, 含水合物沉积物微元强度威布尔分布的分布变量 F 具有如下形式^[23]

$$F = \frac{E\varepsilon_1 [\Delta\sigma - (\Delta\sigma + 2\sigma_3)\sin\varphi]}{\Delta\sigma + (1 - 2\nu)\sigma_3} \quad (20)$$

威布尔分布的参数 m 和 F_0 可由含水合物沉积物应力-应变曲线在峰值点处满足的几何条件确定^[21,38], 具体步骤如下所述.

当轴向应变 ε_1 等于峰值应变 ε_f 时, 轴向偏应力 $\Delta\sigma$ 等于峰值应力 $\Delta\sigma_f$, 并且 $\Delta\sigma$ 对 ε_1 的一阶导数为 0, 即

$$\Delta\sigma_f = E\varepsilon_f \exp\left[-\left(\frac{F_f}{F_0}\right)^m\right] - (1 - 2\nu)\sigma_3 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Delta\sigma_f}{\partial\varepsilon_1}\bigg|_{\varepsilon_1=\varepsilon_f} &= E \exp\left[-\left(\frac{F_f}{F_0}\right)^m\right] \cdot \\ &\left[1 - E\varepsilon_f \frac{mF_f^{m-1}}{F_0^m} \frac{\Delta\sigma_f - (\Delta\sigma_f + 2\sigma_3)\sin\varphi}{\Delta\sigma_f + (1 - 2\nu)\sigma_3}\right] = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

联立上述两式求解, 有

$$m = \frac{-F_f}{E\varepsilon_f \ln\left[\frac{\Delta\sigma_f + (1 - 2\nu)\sigma_3}{E\varepsilon_f}\right]} \quad (23)$$

$$F_0 = \left[\frac{-F_f^m}{\ln\left(\frac{\Delta\sigma_f + (1 - 2\nu)\sigma_3}{E\varepsilon_f}\right)}\right]^{\frac{1}{m}} \quad (24)$$

3.4 本构关系验证与分析

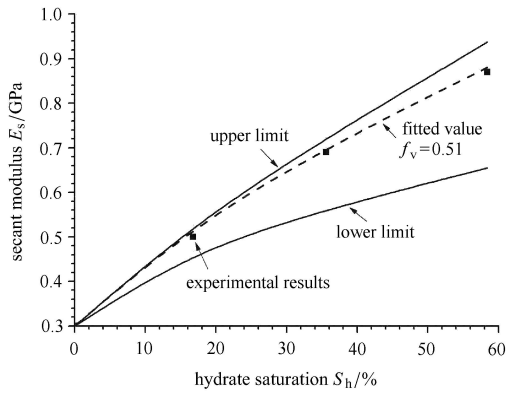
用上述建立的本构关系预测不同有效围压条件下三轴剪切试验的应力-应变曲线的参数如表 1 所示. 其中, 基相的体积分数 n_A 和夹杂相的体积分数 n_B 的取值分别为 $1 - \phi S_h$ 和 ϕS_h , 孔隙率 ϕ 的取值为 0.38; 基相的弹性模量 E_A 的取值为水合物含量为零时沉积物的割线模量; 沃伊特应变并联模型对应的力链比例 f_v 根据割线模量试验数据拟合获得, 如图 7 所示; 威布尔分布参数 m 和 F_0 分别由式 (23) 和式 (24) 计算获得. 根据已经报道的试验数据, 纯水合物的弹性模量为 9.0 GPa^[39], 取其为夹杂相的弹性模量 E_B ; 水合物含量为零时沉积物和纯水合物的泊松比取值分别为 0.2 和 0.219^[21].

表 1 本构关系预测不同有效围压条件下应力-应变曲线所用参数

Table 1 Parameters for prediction of experimental stress-strain curves by constitutive model under different effective

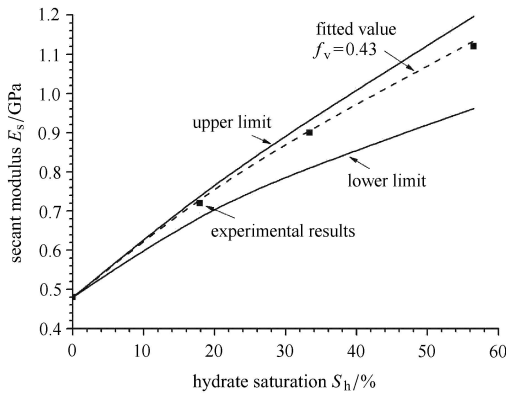
confining pressure							
σ_3/MPa	$S_h/\%$	n_A	n_B	E_A/GPa	f_v	m	F_0/MPa
1	0	1	0	0.3	0.51	0.360	0.09
	16.8	0.936	0.064			0.513	6.60
	35.6	0.865	0.135			0.582	11.55
	58.4	0.778	0.222			0.686	17.12
2	0	1	0	0.48	0.43	0.440	1.65
	17.9	0.932	0.068			0.518	8.42
	34.3	0.870	0.130			0.568	12.88
	56.5	0.785	0.215			0.632	18.61
4	0	1	0	0.8	0.24	0.478	3.80
	14.4	0.945	0.055			0.553	12.01
	37.1	0.859	0.141			0.540	14.25
	56.2	0.786	0.214			0.586	19.05

在不同有效围压下, 含水合物沉积物割线模量的模型预测值与试验数据的对比情况如图 7 所示, 含水合物沉积物应力-应变曲线的模型预测值与试验数据的对比情况如图 8 所示. 从图 7 可以看出,



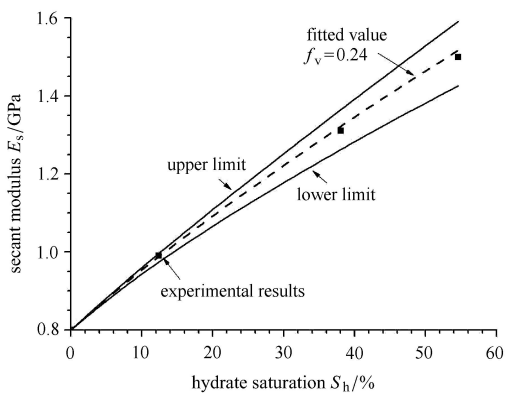
(a) 有效围压为 1.0 MPa

(a) Effective confining pressure is 1.0 MPa



(b) 有效围压为 2.0 MPa

(b) Effective confining pressure is 2.0 MPa

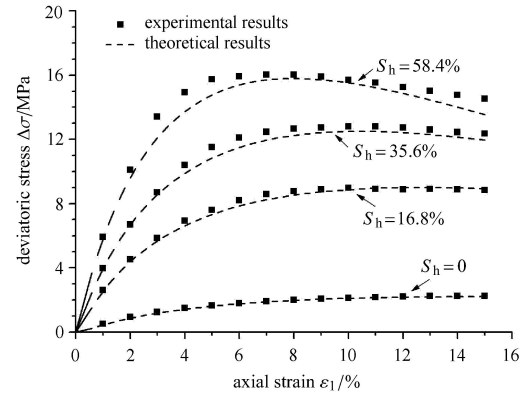


(c) 有效围压为 4.0 MPa

(c) Effective confining pressure is 4.0 MPa

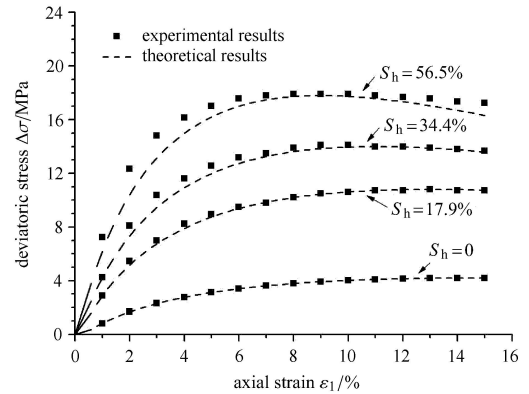
图 7 不同有效围压下含水合物沉积物割线模量试验结果与混合律模型预测曲线的对比

Fig.7 Comparison of experimental results and predicting curves by the mixed model of secant modulus of hydrate-bearing sands with different effective confining pressures



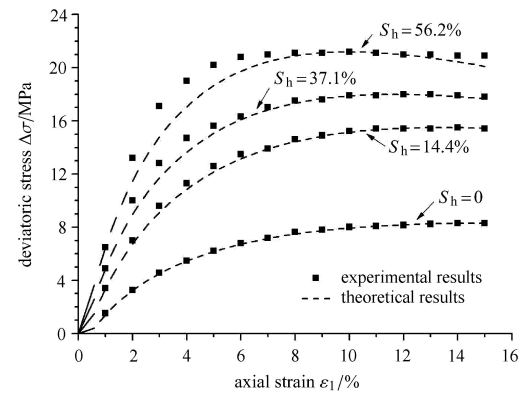
(a) 有效围压为 1.0 MPa

(a) Effective confining pressure is 1.0 MPa



(b) 有效围压为 2.0 MPa

(b) Effective confining pressure is 2.0 MPa



(c) 有效围压为 4.0 MPa

(c) Effective confining pressure is 4.0 MPa

图 8 不同有效围压下含水合物沉积物应力-应变试验数据与本构关系模型预测结果的对比

Fig.8 Comparison of experimental and theoretical stress-strain curves of hydrate-bearing sands with different effective confining pressures

含水合物沉积物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不同有效围压下含水合物沉积物割线模量随水合物饱和度而变化的过程. 从图8可以看出, 含水合物沉积物应力-应变曲线的模型预测结果与试验数据在水合物饱和度较低时符合良好, 而在水合物饱和度较高时存在一定差别, 但是仍然能够较好地反映含水合物沉积物应力-应变发展过程, 即剪切初期为弹性变形, 随后为硬化屈服, 达到峰值应变之后发生不同程度软化. 综上所述, 本文模型能够反应含水合物沉积物中水合物与沉积物骨架解胶结以及固体水合物颗粒破损等损伤效应, 较好地预测了含水合物沉积物割线模量和应力-应变曲线的变化情况, 特别适用于描述含水合物沉积物的应变软化行为, 具有良好的适用性.

4 结 论

本文开展了含水合物沉积物样品制备与排水三轴剪切试验, 实时测量了水合物饱和度; 提出了一个等效弹性模量细观力学混合律模型, 改进了含水合物沉积物的损伤统计本构关系模型. 主要结论如下:

(1) 随着水合物饱和度的增加和有效围压的降低, 应力-应变曲线由应变硬化型逐渐变为应变软化型, 割线模量和峰值强度均随着水合物饱和度和有效围压的增加而变大, 水合物含量对粘聚力的影响明显, 而对内摩擦角的影响较小;

(2) 提出的细观力学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的变化规律, 一定程度上反应了含水合物沉积物的细观结构;

(3) 基于细观力学混合律和损伤统计理论改进的本构关系模型能够反映水合物饱和度增加引起的应变软化现象, 具有良好的适用性.

致谢 作者得到了青岛海洋地质研究所孙建业博士在时域反射技术测量水合物饱和度方面给予的无私帮助, 在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- Bouriak S, Vanmste M, Saoutkine A. Inferred gas hydrates and clay diapers near the Storregga slide on the southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway. *Marine Geology*, 2000, 163: 125-148
- Winters WJ, Waite WF, Mason DH, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56: 127-135
- 石要红, 张旭辉, 鲁晓兵等. 南海水合物粘土沉积物力学特性试验模拟研究. *力学学报*, 2015, 47(3): 521-528 (Shi Yaohong, Zhang Xuhui, Lu Xiaobing, et al. Exmental study on the static mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay in the South China Sea. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(3): 521-528 (in Chinese))
- Winters WJ, Pecher IA, Waite WF, et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate. *American Mineralogist*, 2004, 89: 1221-1227
- Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture. *Soils and Foundations*, 2005, 45(1): 75-85
- Masui A, Miyazaki K, Haneda H, et al. Mechanical properties of natural gas hydrate bearing sediments retrieved from Eastern Nankai Trough. In: *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, USA, 2008
- Hyodo M, Yoneda J, Yoshimoto N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed. *Soils and Foundations*, 2013, 53(2): 299-314
- 张旭辉, 王淑云, 李清平等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3069-3074 (Zhang Xuhui, Wang Shuyun, Li Qingping, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3069-3074 (in Chinese))
- 魏厚振, 颜荣涛, 陈盼等. 不同水合物含量含二氧化碳水合物砂三轴试验研究. *岩土力学*, 2011, 32(S2): 198-203 (Wei Houzhen, Yan Rongtao, Chen Pan, et al. Deformation and failure behavior of carbon dioxide hydrate-bearing sands with different hydrate contents under triaxial shear tests. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S2): 198-203 (in Chinese))
- 颜荣涛, 韦昌富, 魏厚振等. 水合物形成对含水合物砂土强度影响. *岩土工程学报*, 2012, 34(7): 1234-1240 (Yan Rongtao, Wei Changfu, Wei Houzhen, et al. Effect of hydrate formation on mechanical strength of hydrate-bearing sand. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(7): 1234-1240 (in Chinese))
- 李洋辉, 宋永臣, 刘卫国等. 温度和应变速率对水合物沉积物强度影响试验研究. *天然气勘探与开发*, 2012, 35(1): 50-53
- 李洋辉, 宋永臣, 于锋等. 围压对含水合物沉积物力学特性的影响. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 637-640 (Li Yanghui, Song Yongchen, Yu Feng, et al. Effect of confining pressure on mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(5): 637-640 (in Chinese))
- 业渝光, 张剑, 胡高伟等. 天然气水合物超声和时域反射联合探测技术. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(5): 101-107 (Ye Yuguang, Zhang Jian, Hu Gaowei, et al. Combined detection technique for ultrasonic and time domain reflectometry in gas hydrate. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(5): 101-107 (in Chinese))
- 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. *实验力学*, 2013, 28(6): 747-754 (Sun Zhongming, Zhang Jian, Liu Changling, et al. On the determination of methane hydrate saturation and mechanical properties of sediments containing methane hydrate. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(6): 747-754 (in Chinese))
- Waite WF, Santamarina JC, Cortes DD, et al. Physical properties

- of hydrate-bearing sediments. *Reviews of Geophysics*, 2009, 47(4): RG4003
- 16 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. 岩土力学, 2014, 35(4): 991-997 (Yang Qijun, Zhao Chunfeng. A constitutive model coupling elastoplasticity and damage for methane hydrate-bearing sediments. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4): 991-997 (in Chinese))
- 17 Sultan N, Garziglia S. Geomechanical constitutive modeling of gas-hydrate-bearing sediments. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates*, Edinburgh, England, 2011.
- 18 Miyazaki K, Aoki K, Tenma N. A nonlinear elastic constitutive model for artificial methane-hydrate-bearing sediment. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates*, Edinburgh, England, 2011
- 19 Pinkert S, Grozic J L H. Prediction of the mechanical response of hydrate-bearing sands. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 2014, 119: 4695-4707
- 20 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. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3045-3050 (Wu Erlin, Wei Houzhen, Yan Rongtao, et al. Constitutive model for gas hydrate-bearing sediments considering damage. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S1): 3045-3050 (in Chinese))
- 21 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. 岩土力学, 2013, 34(1): 60-65 (Wu Erlin, Wei Changfu, Wei Houzhen, et al. A statistical damage constitutive model of hydrate-bearing sediments. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 60-65 (in Chinese))
- 22 田云德, 秦世伦. 符合材料等效弹性模量的改进混合律方法. 西南交通大学学报, 2005, 40(6): 783-787 (Tian Yunde, Qin Shilun. Improved mixed-model method of valid elastic modulus of composites. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2005, 40(6): 783-787 (in Chinese))
- 23 曹文贵, 张升. 基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究. 湖南大学学报 (自然科学版), 2005, 32(1): 43-47 (Cao Wengui, Zhang Sheng. Study on the statistical analysis of rock damage based on Mohr-Coulomb criterion. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2005, 32(1): 43-47 (in Chinese))
- 24 涂运中, 蒋国盛, 张凌等. SDS 和 THF 对甲烷水合物合成影响的实验研究. 现代地质, 2008, 22(3): 485-488 (Tu Yunzhong, Jiang Guosheng, Zhang Ling, et al. The study on effects of SDS and THF on methane hydrate formation. *Geoscience*, 2008, 22(3): 485-488 (in Chinese))
- 25 Wright JF, Nixon FM, Dallimore SR, et al. A method for direct measurement of gas hydrate amounts based on the bulk dielectric properties of laboratory test media. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Gas Hydrates*, Yokohama, Japan, 2002
- 26 胡高伟, 业渝光, 刁少波等. 时域反射技术测量海洋沉积物含水量的研究. 现代地质, 2010, 24(3): 622-626 (Hu Gaowei, Ye Yuguang, Diao Shaobo, et al. Research of time domain reflectometry in measuring water content of marine sediments. *Geoscience*, 2010, 24(3): 622-626 (in Chinese))
- 27 胡高伟, 李承峰, 业渝光等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1675-1682 (Hu Gaowei, Li Chengfeng, Ye Yuguang, et al. Observation of gas hydrate distribution in sediment pore space. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 1675-1682 (in Chinese))
- 28 Ghiassian H, Grozic J L H. Strength behavior of methane hydrate bearing sand in undrained triaxial testing. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 310-319
- 29 Masui A, Haneda H, Gata Y O, et al. Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments. In: *Proceedings of the 15th ISOPE*, Seoul, Korea, 2005: 364-369
- 30 Miyazaki K, Masui A, Yamaguchi T, et al. Investigation of deformation mechanism for methane hydrate sediment based upon mechanical properties in unloading and reloading process under triaxial compression. In: *Proceedings of the 8th ISOPE-OMS*, Chennai, India, 2009: 102-106
- 31 刘芳, 寇晓勇, 蒋明镜等. 含水合物沉积物强度特性的三轴试验研究. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1565-1572 (Liu Fang, Kou Xiaoyong, Jiang Mingjing, et al. Triaxial shear strength of synthetic hydrate-bearing sediments. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1565-1572 (in Chinese))
- 32 Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1965, 13(4): 213-222
- 33 Zhang XH, Liu LL, Zhou JB, et al. A model for the elastic modulus of hydrate-bearing sediments. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2015, 25(4): 314-319
- 34 田云德, 秦世伦. 复合材料等效弹性模量的改进混合律方法. 西南交通大学学报, 2005, 40(6): 783-787 (Tian Yunde, Qin Shilun. Improved mixed-model method of valid elastic modulus of composites. *Journal of Southwest Jiao Tong University*, 2005, 40(6): 783-787 (in Chinese))
- 35 Lemaitre J. How to use damage mechanics. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233-245
- 36 李广信. 高等土力学. 北京: 清华大学出版社, 2004 (Li Guangxin. *Advanced Soil Mechanics*. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese))
- 37 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 628-633 (Cao Wengui, Fang Zulie, Tang Xuejun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 628-633 (in Chinese))
- 38 宁建国, 王慧, 朱志武等. 基于细观力学方法的冻土本构模型研究. 北京理工大学学报, 2005, 25(10): 847-851 (Ning Jianguo, Wang Hui, Zhu Zhiwu, et al. Investigation of the constitutive model of frozen soil based on mesomechanics. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(10): 847-851 (in Chinese))
- 39 Sloan ED, Koh CA. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. USA: CRC Press, 2008