

层间非均质含天然气水合物沉积物力学性质数值模拟研究

叶瑞杰¹, 蒋宇静^{1,2}, 张瑞琪¹, 公彬¹, 张博文¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 长崎大学 研究生院工学研究科, 日本 长崎 852-8521)

摘要:为探究含天然气水合物夹层的砂岩储层的力学性质及剪切破坏机理,采用离散元法制备含天然气水合物夹层的砂岩储层试样,进行了一系列双轴剪切试验。研究表明:当天然气水合物夹层的饱和度低于 15%,且夹层厚度小于 1/5 时,砂岩储层整体强度降低;当水合物夹层的饱和度超过 35%,含水合物夹层厚度超过 1/2 时,水合物夹层才能增强整个试样的强度。含水合物夹层的失效形式与上覆层和下伏层的失效形式不同,含水合物夹层的破坏主要归因于水合物颗粒与周围颗粒的胶结作用的破坏。

关键词:天然气水合物;含水合物夹层;层间非均质;数值模拟;力学性质;失效模式

中图分类号:P744.4

文献标志码:A

Numerical simulation study on mechanical properties of interlayer heterogeneous natural gas hydrate sediments

YE Ruijie¹, JIANG Yujing^{1,2}, ZHANG Ruiqi¹, GONG Bin¹, ZHANG Bowen¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan)

Abstract: To investigate the mechanical properties and shear failure mechanisms of sandstone reservoirs with gas hydrate interlayers, we employed the discrete element method to prepare sandstone reservoir samples containing gas hydrate interlayers and conducted a series of biaxial shear tests. The results indicate that there is a reduction in the overall strength of the sandstone reservoir when the natural gas hydrate interlayer saturation is below 15% and the interlayer thickness is less than 1/5 and that the hydrate interlayer can strengthen the entire sample when the saturation of the hydrate interlayer surpasses 35% and the interlayer thickness exceeds 1/2. The failure mode of the hydrate-bearing interlayer differs from that of the overlying and underlying layers. The failure of the hydrate-bearing interlayer is primarily attributed to the breakdown of cementation between the hydrate particles and surrounding particles.

Key words: natural gas hydrates; hydrate containing interlayer; interlayer heterogeneity; numerical simulation; mechanical properties; failure mode

天然气水合物商业化开采是中国实现双碳目标的重要措施之一^[1-2]。我国已在南海进行了两轮天然气水合物试采工作^[3],第三轮试采也在紧锣密鼓地筹备中。天然气水合物的赋存地质条件复杂,不当开采可能

收稿日期:2023-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(520095077);山东省自然科学基金项目(2022HWYQ-078);山东省泰山学者青年专家计划项目(Tsqn202103074)

作者简介:叶瑞杰(2000—),男,山西长治人,硕士研究生,主要从事深海天然气水合物力学特性方面的研究。

公彬(1988—),男,山东泰安人,教授,博士,主要从事深海天然气水合物开采等方面的研究,本文通信作者。

E-mail:gongbin0412@gmail.com

引起海底滑坡、地震、气温升高等次生地质灾害^[4-5]。因此,了解天然气水合物储层的力学性质、剪切破坏机理以及与上覆层和下伏层之间的相互作用机制对解决储层出砂、海底斜坡失稳问题,实现天然气水合物商业化开采非常重要^[6]。自20世纪发现天然气水合物矿藏以来,科学家已取得了一些研究成果。Masui等^[7]在室内合成了两种含水合物沉积物,并进行了一系列剪切试验,发现天然气水合物的存在增强了沉积物的剪切强度,水合物饱和度对内聚力和弹性性能有显著影响。Hyodo等^[8]对人工合成的天然气水合物沉积物进行了一系列三轴压缩试验,结果表明,有效围压、天然气水合物的饱和度和密度等对天然气水合物沉积物的力学性质有显著影响。Miyazaki等^[9]对含天然气水合物的人工沉积物试样进行了排水三轴压缩试验,发现含水合物砂试样的强度和刚度随着天然气水合物饱和度的增加而增加;随着天然气水合物饱和度的增加,应力-应变曲线由应变硬化逐渐变成应变软化,含天然气水合物沉积物从塑性破坏变为脆性破坏。

室内试验受限于观察水合物沉积物试样内部结构的困难,难以从微观尺度解释其破坏机制。离散元法^[10]是一种数值方法,专注于研究颗粒介质运动规律,不仅能够模拟岩土材料的宏观力学特性,还能够提供材料内部丰富的微观信息。蒋明镜等^[11]提出一种天然气水合物沉积物的离散元数值试样成样方法,进行了一系列离散元数值试验并对剪切带形成机理进行了分析,研究结果显示,胶结型水合物增强了沉积物的强度,应力-应变曲线呈现应变软化特征。You等^[12]采用离散元模拟进行了双轴压缩试验,发现形成许多与水合物相关的微力链,水合物的存在增强了含天然气水合物沉积物的强度。Brugada等^[13]对天然气水合物土壤进行一系列三轴压缩试验的离散元数值模拟,分析了天然气水合物饱和度对应力-应变关系、体积响应以及摩擦角等宏观地质力学性质的影响。公彬等^[14-15]对不同赋存状态的含水合物沉积物进行一系列排水三轴压缩数值模拟试验,分析了赋存状态混合型含水合物沉积物的变形机制,同时考虑水合物饱和度和围压及加载速率对含水合物沉积物强度的影响。Xu等^[16]建立了考虑颗粒破碎的离散元模型,并进行一系列三轴试验,发现随着天然气水合物饱和、轴向应变和有效应力的增加,试样的力链网络更密集,力链上的力更均匀,从而提高了试样的强度。

众多学者对天然气水合物的力学性质和储层稳定性进行了广泛研究,为理解其力学性质以及实现大规模安全高效开采提供了理论支持。然而,这些研究主要集中在水合物储层的环境下,未考虑储层与上覆层和下伏层之间的相互影响。本研究基于非均质层间水合物沉积物,开展了一系列离散元数值模拟研究。主要关注天然气水合物饱和度和含天然气水合物夹层厚度对层间非均质天然气水合物沉积物力学行为的影响,以及其可能的失效模式。

1 数值试验

基于现有的地质调查^[17]含天然气水合物沉积物夹层的砂岩储层涵盖了上覆层和下伏层,其概念储层模型如图1所示。

1.1 模型建立

采用二维颗粒流数值模拟(particle flow code in two dimensions, PFC^{2D})进行离散元数值模拟,试样制备步骤为:①生成 Toyoura 砂试样。随机生成符合所需的 Toyoura 砂颗粒级配的颗粒;②参照 Cao 等^[18]的研究,生成特定夹层厚度和特定水合物饱和度的水合物颗粒。在固定的范围内随机生成水合物颗粒,范围由夹层厚度确定,颗粒数目由水合物饱和度确定;③设置接触模型;④各向施加 1 MPa 围压固结试样。

含水合物沉积物的骨架由 Toyoura 砂和天然气水合物两种材料组成, Toyoura 砂颗粒级配如图2所示。基于 Waite 等^[19]的试验研究,将 Toyoura 砂颗粒的粒径设为 0.1~0.45 mm,密度为 2 650 kg/m³;水合物颗粒粒径为

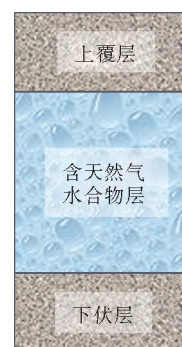


图1 含天然气水合物夹层的概念储层模型

Fig. 1 Conceptual reservoir model with natural gas hydrate interlayer

0.02 mm, 密度为 900 g/m³。水合物沉积物模型的底边长为 8 mm, 高度为 16 mm。图 3 展示了部分模型 (饱和度均为 45%), PFC^{2D} 中使用圆形颗粒来代表这两种材料, 其中黄色颗粒表示 Toyoura 砂, 蓝色颗粒表示水合物颗粒。

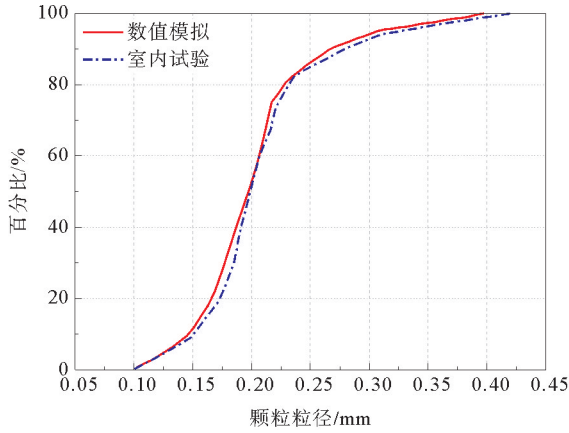


图 2 Toyoura 砂颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle grading curve of Toyoura sand

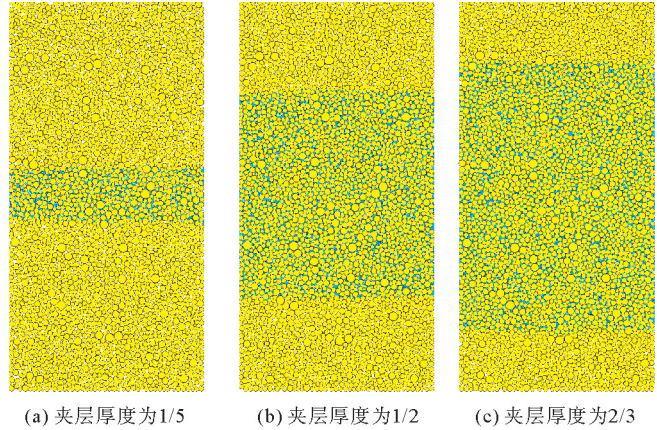


图 3 含天然气水合物夹层砂岩储层模型图

Fig. 3 Model diagram of sandstone reservoir containing natural gas hydrate interlayer

1.2 接触模型

在 PFC^{2D} 中, 采用接触模型来表征颗粒之间的相互作用关系。接触模型的选择决定着试样的宏观力学性质。基于周世琛等^[20]的研究, 为了实现天然气水合物的胶结作用并使试样更接近真实情况, 将水合物颗粒与骨架颗粒、水合物颗粒之间的接触设置为线性平行胶结接触模型, 而骨架颗粒之间采用滚动阻力线性接触模型。颗粒与墙之间的接触设置为线性接触模型。

1.3 参数标定

PFC^{2D} 中模型的微观参数标定主要采用试错法, 标定的参数如表 1 所示。数值模拟中需要对参数进行验证, 以确保模型的准确性。图 4 显示了本研究数值模拟得到的应力-应变曲线与 Masui 等^[7]进行的相似条件的室内试验得到的结果进行比较, 可以看出数值模拟结果与试验结果相似, 从而验证了本研究数值模拟试验的可行性, 保证了模拟结果的准确性。

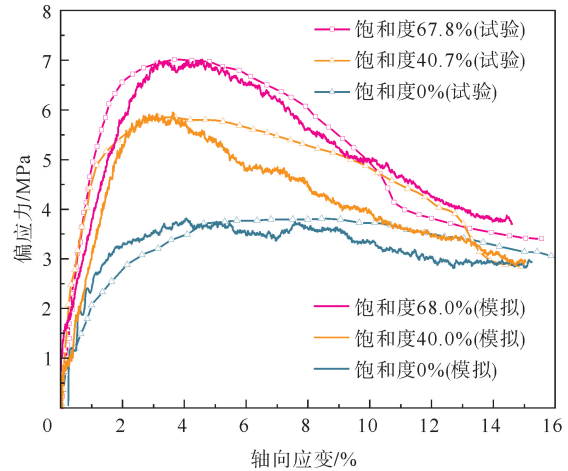


图 4 参数校核结果

Fig. 4 Parameter verification results

表 1 接触模型参数表

Table 1 Contact model parameters table

材料	接触类型	有效模量/MPa	法向-切向刚度比	摩擦系数	滚动摩擦系数	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
Toyouura 砂-Toyouura 砂	rrlinear	100	1	0.75	0.6	—	—
Toyouura 砂-水合物	linearpbond	100	1	0.15	—	5	3
水合物-水合物	linearpbond	100	1	0.15	—	5	3
颗粒-墙体	linear	200	1	0.50	—	—	—

2 试验结果及分析

图 5 展示了 3 种不同天然气水合物饱和度情况下,不同含天然气水合物夹层厚度试样的应力-应变曲线。在相同天然气水合物饱和度下,随着含天然气水合物夹层厚度的增加,峰值应力逐渐提高,峰前斜率也随之增大。天然气水合物饱和度为 15% 时,含天然气水合物夹层厚度对峰值应力的影响较小;而在天然气水合物饱和度为 55% 时,含天然气水合物夹层厚度对峰值应力的影响显著。随着含天然气水合物夹层厚度的增加,试样的强度和刚度也随之提高,而且天然气水合物饱和度越高,含天然气水合物夹层厚度对试样的影响越大。含天然气水合物夹层的存在使试样从应变硬化转变为应变软化。

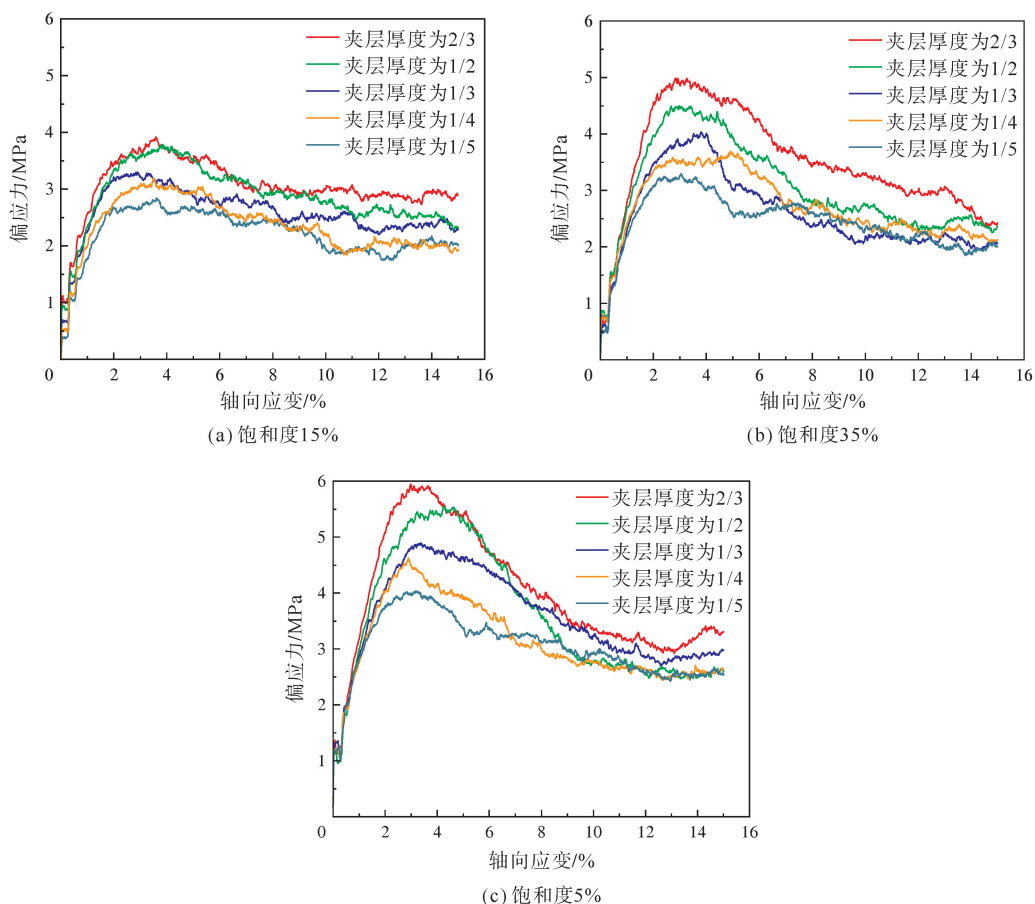


图 5 饱和度 15%、35%、55% 时不同夹层厚度试样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of samples with different interlayer thicknesses at saturation of 15%, 35%, and 55%

图 6 展示了 3 种不同天然气水合物饱和度情况下,不同含天然气水合物夹层厚度试样的体积应变曲线。由图 6 可知,随着轴向应变的增大,试样的体积先减小随后开始增大。说明试样先剪缩后剪胀,且随着含天然气水合物夹层厚度的增加,试样的剪缩性减低,剪胀性增强。

图 7 展示了 3 种不同含天然气水合物夹层厚度情况下,不同天然气水合物饱和度试样的应力-应变曲线。在含天然气水合物夹层厚度相同时,随着天然气水合物饱和度的增加,峰值应力逐渐提高,峰前斜率也随之增大。含天然气水合物夹层厚度为 1/5 时,天然气水合物饱和度对峰值应力的影响较小;含天然气水合物夹层厚度为 2/3 时,天然气水合物饱和度对峰值应力的影响显著。试样的强度和刚度随着天然气水合物饱和度的增加而提高,而且当含天然气水合物夹层的厚度较薄时,天然气水合物饱和度对试样的影响较小。

结合图 5 和图 7 分析,当天然气水合物饱和度超过 35%、含天然气水合物夹层的厚度超过 1/2 时,具有

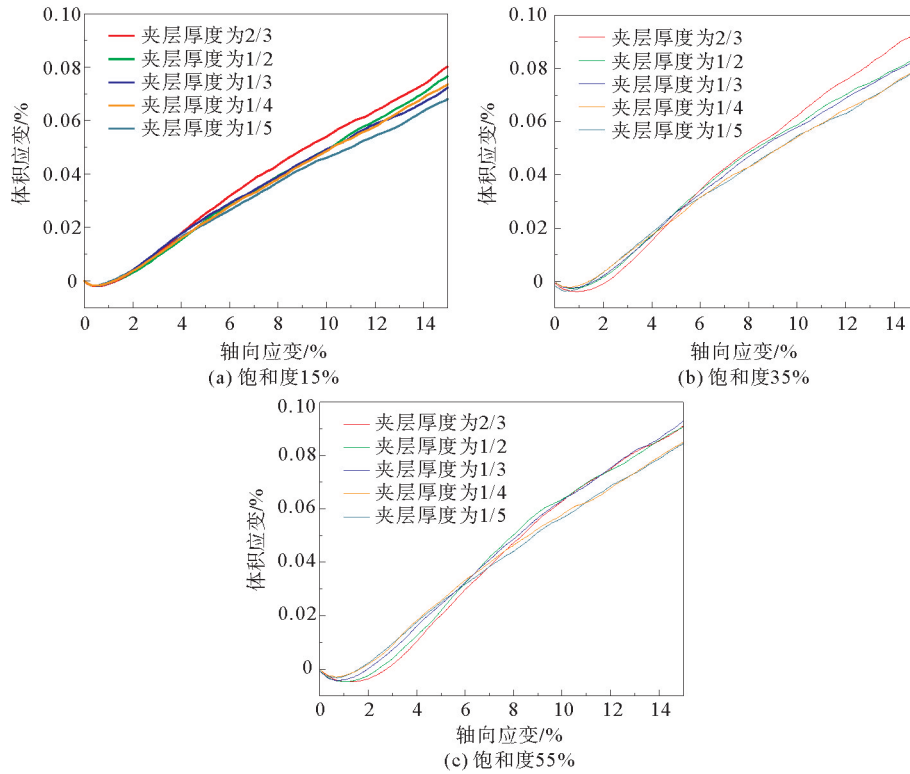


图6 饱和度15%、35%、55%时不同夹层厚度试样的体积应变曲线

Fig. 6 Volumetric strain curves of samples with different interlayer thicknesses at saturation of 15%, 35%, and 55%

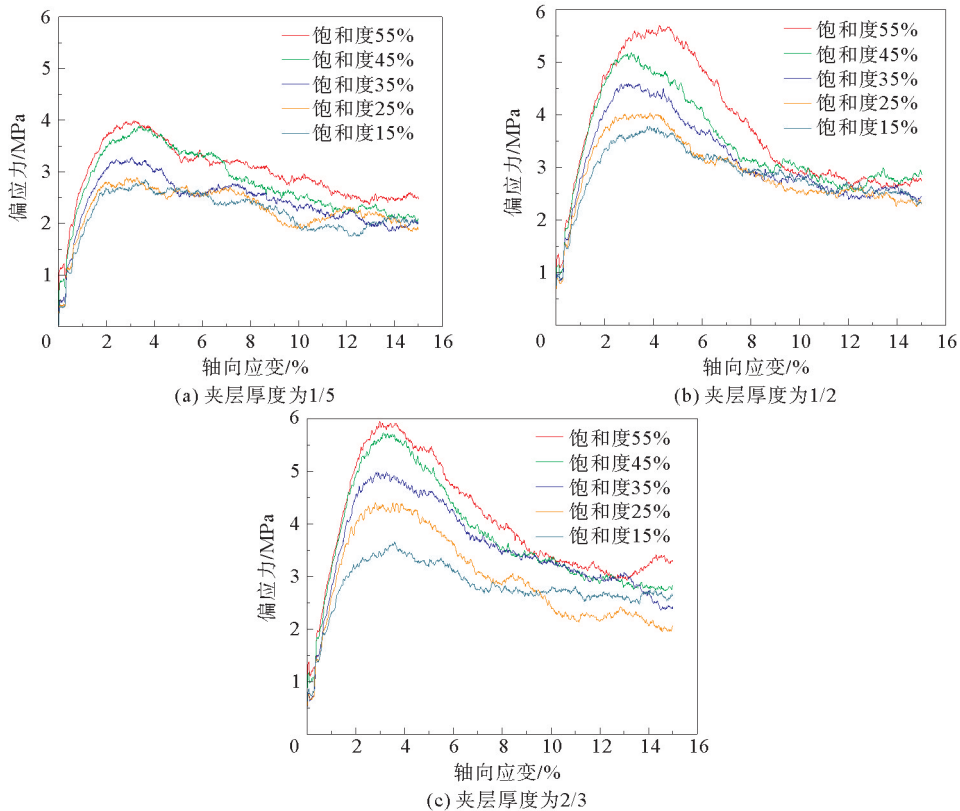


图7 夹层厚度为1/5、1/2、2/3时不同饱和度试样的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of samples with different saturation at interlayer thicknesses of 1/5, 1/2, and 2/3

含天然气水合物夹层的试样强度才大于整个砂岩储层的强度;相反,当天然气水合物饱和度低于 15%、含天然气水合物夹层的厚度小于 1/5 时,具有含天然气水合物夹层的试样的强度小于整个砂岩储层的强度。即较小的天然气水合物夹层饱和度和较薄的含天然气水合物夹层厚度会降低整个砂岩储层的强度。

图 8 展示了 3 种不同天然气水合物夹层厚度的情况下,不同天然气水合物饱和度的试样的体积应变曲线。由图 8 可知,随着轴向应变的增大,试样的体积先减小,随后开始增大。说明试样先剪缩后剪胀,且随着天然气水合物饱和度的增加,试样的剪缩性减低,剪胀性增强。结合图 6 分析可得,含天然气水合物夹层厚度越厚、天然气水合物饱和度越大,剪胀越明显。

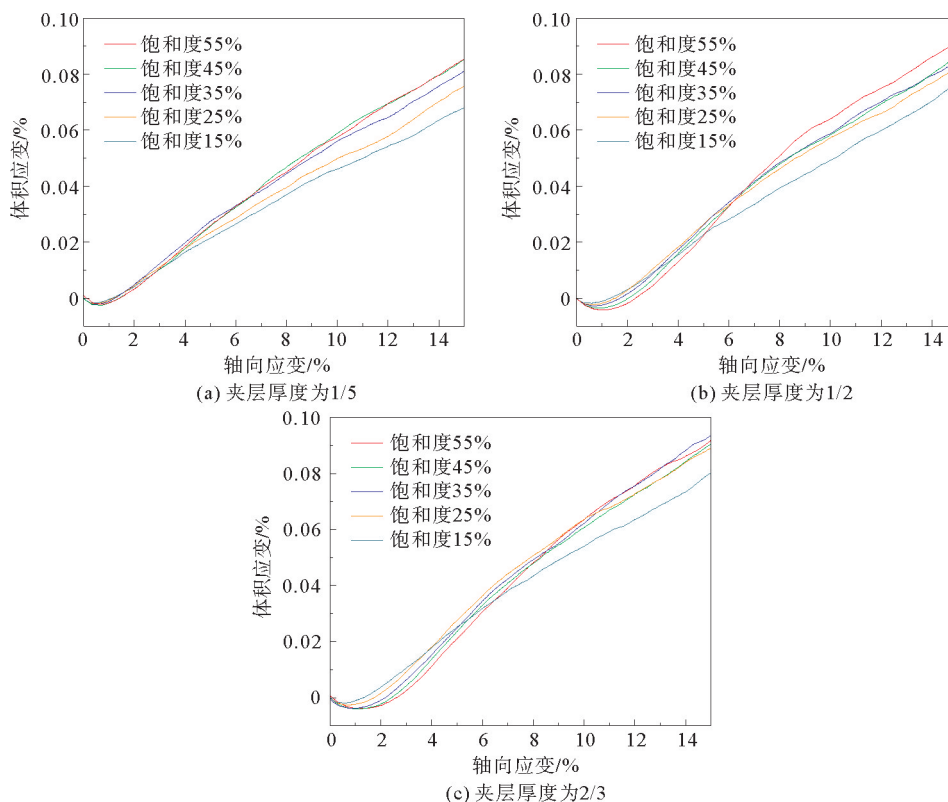


图 8 夹层厚度为 1/5、1/2、2/3 时不同饱和度试样的体积应变曲线

Fig. 8 Volumetric strain curves of samples with different saturation at interlayer thicknesses of 1/5, 1/2, and 2/3

图 9 展示了含天然气水合物夹层厚度为 1/2 时,不同天然气水合物饱和度试样失效后的断裂面(上),以及对应裂纹的分布(下),图中蓝色颗粒为水合物,黄色颗粒为砂土,蓝色为剪切裂纹,洋红色为拉伸裂纹。天然气水合物饱和度越高,产生的裂纹数量越多,形成的断裂面越清晰,失效颗粒的位移越小。失效试样最终形成两个明显的断裂面,两个断裂面与加载方向的夹角均为 45°,相交形成 X 形,夹角约为 90°。图中裂纹的分布显示剪切裂纹在断裂面上大量产生,剪切裂纹对试件的损伤和失效更为敏感,表明试样最终因 X 形剪切破坏而失稳。从剪切带的形成可以看出,含天然气水合物夹层的破坏主要是由于水合物与砂土之间的胶结作用失效导致的。

图 10 展示了天然气水合物饱和度为 45% 时,含天然气水合物不同夹层厚度的试样失效模式。在相同天然气水合物饱和度的情况下,含天然气水合物夹层的厚度越厚、裂纹的数量越多,形成的断裂面越清晰,而失效颗粒的位移越小。这种失效模式与图 9 所示的规律基本一致。进一步分析表明,含天然气水合物夹层的失效形式明显不同于上覆层和下伏层的失效形式。

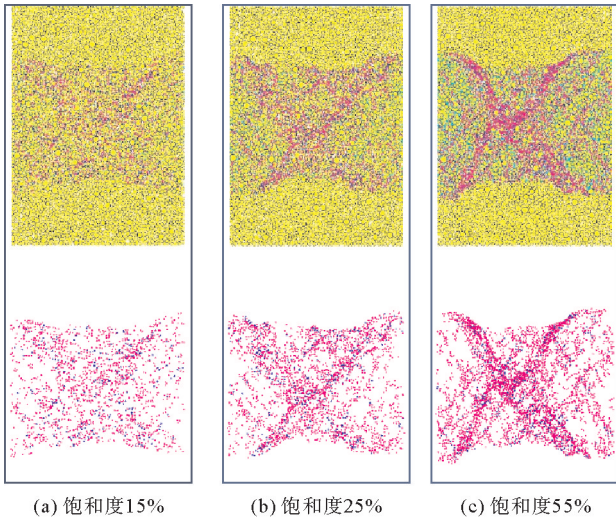


图9 夹层厚度为1/2时不同饱和度的试样失效模式

Fig. 9 Failure modes of samples with different saturation when the interlayer thickness is 1/2

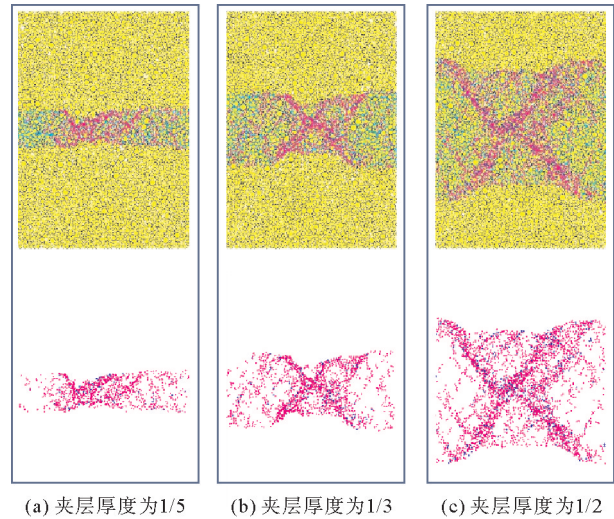


图10 饱和度为45%时不同夹层厚度的试样失效模式

Fig. 10 Failure modes of samples with different interlayer thicknesses when the saturation is 45%

3 结论

1) 采用离散元模拟建立了具有不同天然气水合物夹层厚度的试样,随着含天然气水合物夹层厚度和天然气水合物饱和度的增加,试样的强度也随之增加。含天然气水合物夹层厚度和水合物饱和度的提高增强了试样的剪胀性。

2) 当天然气水合物饱和度低于15%、含天然气水合物夹层的厚度小于1/5时,具有含天然气水合物夹层的试样强度低于整个砂岩储层的强度;而当天然气水合物饱和度超过35%、含水合物夹层的厚度超过1/2时,天然气水合物夹层才能增强整个试样的强度。因此,在考虑整个砂岩储层的强度时,必须考虑天然气水合物饱和度和含天然气水合物夹层的厚度。

3) 含天然气水合物夹层的失效形式与上覆层和下伏层的失效形式不同。

下一步的工作应考虑温度、围压、水合物夹层角度对整个砂岩储层强度的影响,并深入研究层间非均质含天然气水合物沉积物的渗流问题。

参考文献:

[1] 魏纳,白睿玲,周守为,等. 碳达峰目标下中国深海天然气水合物开发战略[J]. 天然气工业,2022,42(2):156-165.
WEI Na,BAI Ruiling,ZHOU Shouwei,et al. China's deepwater gas hydrate development strategies under the goal of carbon peak[J]. Natural Gas Industry,2022,42(2):156-165.

[2] GUO X S,FAN N,LIU Y H,et al. Deep seabed mining:Frontiers in engineering geology and environment[J/OL]. International Journal of Coal Science & Technology,2023,10(1). DOI:10.1007/s40789-023-00580-x.

[3] MEN Y T,SONG Z,SUN Y,et al. Novel concepts of mechanical technology for gas recovery from marine hydrate reservoir [J/OL]. International Journal of Coal Science & Technology,2023,10(1). DOI:10.1007/s40789-023-00599-0.

[4] 公彬,蒋宇静,王刚,等. 南海天然气水合物开采海底沉降预测[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(5):61-68.
GONG Bin,JIANG Yujing,WANG Gang,et al. Prediction of seabed settlement caused by natural gas hydrate exploitation in South China Sea[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2015,34(5):61-68.

[5] 王祥阜,邝月,梁伟,等. 损伤效应下天然气水合物产气规律模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(4):70-77.
WANG Xiangfu,QIU Yue,LIANG Wei,et al. Simulation study on gas production law of natural gas hydrate under damage effect[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2023,42(4):70-77.

[6] ZHANG K,SONG H B,SUN S Q,et al. Distribution and genesis of submarine landslides in the northeastern South China

- Sea[J]. Geological Journal, 2021, 56(3): 1187-1201.
- [7] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments[C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2005: 5-56.
- [8] HYODO M, YONEDA J, YOSHIMOTO N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed[J]. Soils and foundations, 2013, 53(2): 299-314.
- [9] MIYAZAKI K, MASUI A, SAKAMOTO Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment[J/OL]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2011, 116(B6). DOI: 10.1029/2010JB008049.
- [10] 黄冬梅, 朱盈盈, 乔书昱, 等. 含孔洞-双裂隙红砂岩宏观损伤特征数值试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 32-42.
HUANG Dongmei, ZHU Yingying, QIAO Shuyu et al. Numerical experiments on macro-and micro-damage characteristics of red sandstone with pore-double fractures[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(4): 32-42.
- [11] 蒋明镜, 彭楠, 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(9): 1624-1630.
JIANG Mingjing, PENG Di, SHEN Zhifu, et al. DEM analysis on formation of shear band of methane hydrate bearing soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1624-1630.
- [12] YOU Z S, LI Y H, JIANG M J, et al. A numerical investigation on the mechanical properties of hydrate-bearing sand using distinct element method[J/OL]. Journal of natural gas science and engineering, 2021, 96. DOI: 10.1016/j.jngse. 2021. 104328.
- [13] BRUGADA J, CHENG Y P, SOGA K, et al. Discrete element modelling of geomechanical behaviour of methane hydrate soils with pore-filling hydrate distribution[J]. Granular Matter, 2010, 12(5): 517-525.
- [14] GONG B, JIANG Y J, YAN P, et al. Discrete element numerical simulation of mechanical properties of methane hydrate-bearing specimen considering deposit angles[J/OL]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 76. DOI: 10.1016/j.jngse. 2020. 103182
- [15] 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/OL]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 69. DOI: 10.1016/j.jngse. 2019. 102915.
- [16] XU J L, XU C S, YOSHIMOTO N, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of methane hydrate-bearing sediments under high effective confining pressure[J/OL]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(3). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002728.
- [17] MORIDIS G J. Numerical studies of gas production from methane hydrates[J]. SPE Journal, 2003, 8(4): 359-370.
- [18] CAO X X, SUN J X, NING F L, et al. Numerical analysis on gas production from heterogeneous hydrate system in Shenhu area by depressurizing: Effects of hydrate-free interlayers[J/OL]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 101. DOI: 10.1016/j.jngse. 2022. 104504.
- [19] WAITE W F, SANTAMARINA J C, CORTES D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments[J/OL]. Reviews of Geophysics, 2009, 47(4). DOI: 10.1029/2008rg000279.
- [20] 周世琛, 郇筱林, 陈宇琪, 等. 天然气水合物沉积物不排水剪切特性的离散元模拟[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 73-83.
ZHOU Shichen, HUAN Xiaolin, CHEN Yuqi, et al. DEM simulation on undrained shear characteristics of natural gas hydrate bearing sediments[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 73-83.

(责任编辑:吕海亮)