

天然气水合物储层样品强度特征及强度准则研究

于锦彩, 程骋*, 王钢, 阳金桃

中国地质大学(北京)工程技术学院 北京

【摘要】天然气水合物以其清洁高效、储量大等特点成为一种潜力性能源,但是开采过程中可能会引起海底滑坡、地层沉降等地质灾害,需要对天然气水合物储层的强度特征及强度准则进行研究。以往学者对不同天然气水合物储层样品强度参数与饱和度变化的关系进行了许多研究,但是不同含天然气水合物储层样品实验得到的关系并不统一。本文针对此问题,基于各含天然气水合物储层样品强度参数随饱和度的变化关系进行总结和分析,并对于峰值强度和残余强度分别建立了相应的强度准则。

【关键词】天然气水合物储层; 强度准则; 峰值强度; 残余强度

【收稿日期】2024年9月25日

【出刊日期】2024年11月7日

【DOI】10.12208/j.pngc.20240001

Strength characteristics and criteria of natural gas hydrate bearing sediment samples

Jincai Yu, Cheng Cheng*, Gang Wang, Jintao Yang

School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing

【Abstract】 Natural gas hydrate has been becoming a potential source because of its clean, efficient and large reserves, but some geological disasters, such as seabed landslide and formation settlement, may occur during its exploitation, so it is necessary to study the strength characteristics and strength criteria of natural gas hydrate bearing sediment samples. Many researchers have conducted many studies on the relationship between the strength parameters of different kind natural gas hydrate bearing samples and the change of saturation, but the relationship obtained from experiments on natural gas hydrate bearing samples with different saturations is not uniform. So in this paper, the relationships between the strength parameters and saturations are summarized and analyzed based on the test results on different samples. The corresponding strength criteria for peak strength and residual strength are established.

【Keywords】 Natural gas hydrate bearing sediment; Strength criteria; Peak strength; Residual strength

1 绪论

天然气水合物储层作为一种特殊的地质体,储层压力、宿主砂粒类型和水合物饱和度的变化可能会影响材料参数。

许多学者针对不同含天然气水合物砂土体试样,对粘聚力和内摩擦角随饱和度的变化关系进行研究,通过文献^[1-4]发现不同试样的粘聚力和内摩擦角随饱和度的变化趋势不同。所以需要基于一系列实验结果,对二者随饱和度的变化趋势进行更加系统的研究。

为了更准确地描述天然气水合物储层的行为,需要针对其特点建立适用的强度准则。张怀文等^[5]

从试验数据中获取到了天然气水合物储层的粘聚力和内摩擦角值,然后建立了适用于天然气水合物储层的强度准则,但是此准则基于内摩擦角基本不变的假设,仅考虑了粘聚力随饱和度的变化。然而由以往研究可知,不同含水合物砂土体粘聚力和内摩擦角值均可能随饱和度变化,且规律不同,因而,还需要考虑内摩擦角随饱和度的变化,进一步完善天然气水合物储层的强度准则。

大多数情况下天然气水合物储层应力-应变曲线会较快进入屈服阶段,并没有明显的弹性阶段,而且在应力达到峰值点后,随着变形的继续增加,应变硬化和应变软化行为非常普遍^[6-9],所以还需要

*通讯作者: 程骋

研究残余粘聚力 c_r 和残余内摩擦角 φ_r 随饱和度的变化关系及其强度准则, 以准确描述天然气水合物储层在受压破坏过程中的应力-应变关系。

本文针对上述问题, 将基于一系列实验数据, 系统地分析不同的天然气水合物储层样品的粘聚力和内摩擦角与水合物饱和度之间的关系特征, 并构建考虑饱和度的强度准则。然后再系统分析残余粘聚力和残余内摩擦角的特征, 并建立考虑饱和度的残余强度准则。

2 峰值强度特征

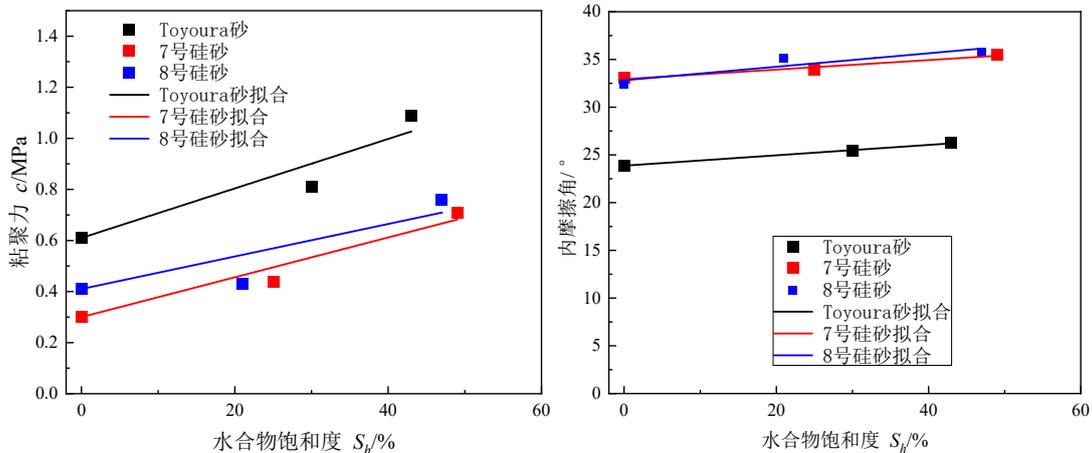
天然气水合物的开采可能引发地质灾害, 因此建立有关含天然气水合物储层的强度准则很有实际意义。

首先针对文献的实验数据^[1-4], 对其结果进行总结和分析。实验结果如表 1。通过绘制莫尔圆可得不同水合物在不同饱和度下的粘聚力和内摩擦角。

图 1 所示为粘聚力、内摩擦角与水合物饱和度关系。

表 1 各实验条件下的 c 、 φ 值

	饱和度/%	粘聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /°
Toyoura 砂样品 ^[1]	0	0.61	23.9
	27-34	0.81	25.4
	41-45	1.09	26.28
7 号硅砂样品 ^[1]	0	0.3	33.05
	23-28	0.44	33.96
	49	0.71	35.5
8 号硅砂样品 ^[1]	0	0.41	32.37
	19-23	0.43	35.12
	44-50	0.76	35.78
天然海滩砂样品 ^[2]	0	0.03	30.6
	15	1.84	31.7
	35	3.11	28.86
	57	4.2	28.17
天然砂样品 ^[3]	0	1.82	30.05
	15	2.32	31.24
	55	3.65	33.92
覆膜砂烧结岩样 ^[4]	0	3.56	22.21
	40	3.97	21.10
	60	4.25	23.57
	80	4.69	23.67



(a) 硅砂与 Toyoura 砂样品

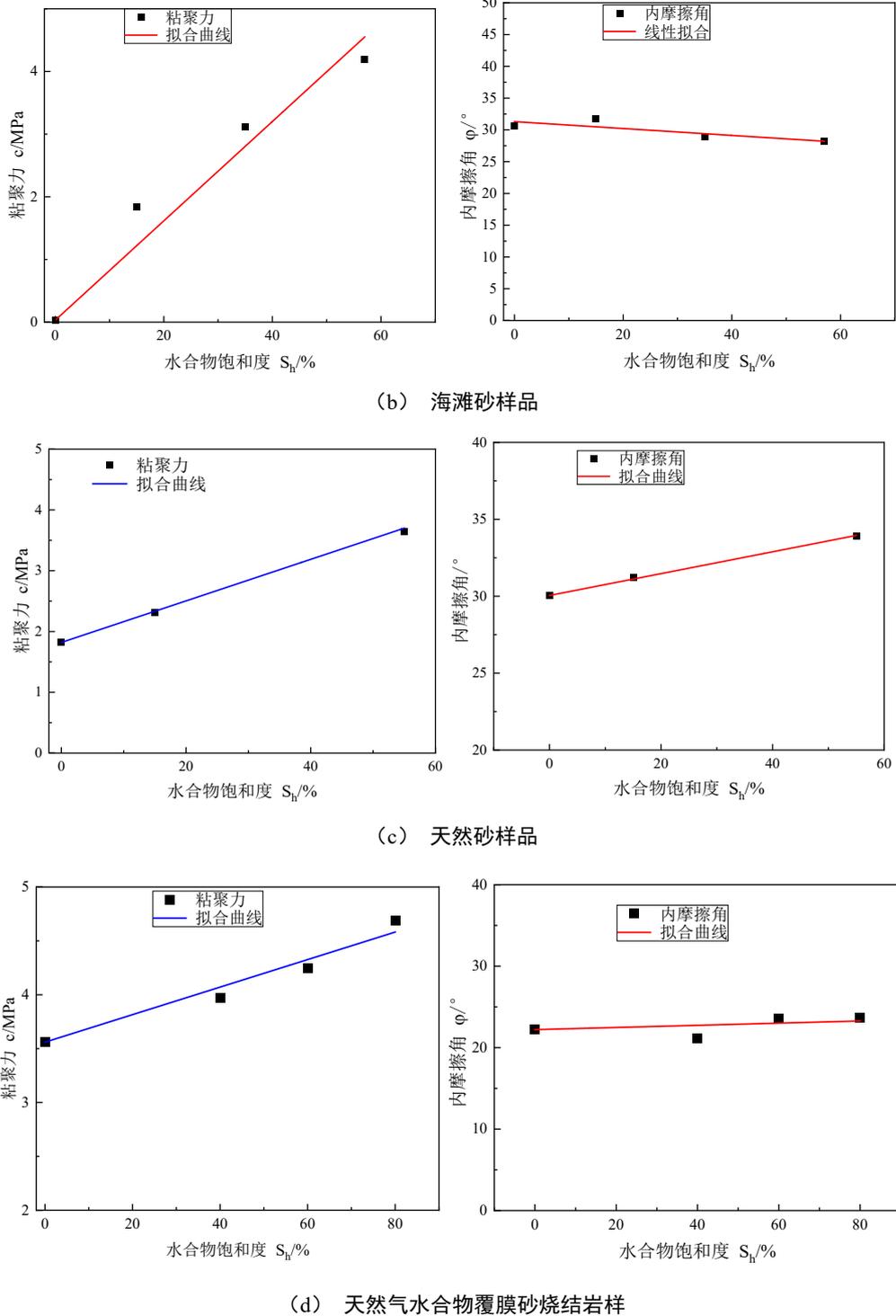


图 1 不同样品粘聚力、内摩擦角与水合物饱和度关系 (依次基于文献[1] [2] [3] [4]数据进行分析计算)

通过分析可得: 随饱和度增加, 含天然气水合物砂样粘聚力增加; 部分试样内摩擦角增加, 部分试样略有降低, 有些则变化范围较小。由图 1 可以看出:

(1) 硅砂与 Toyoura 砂样品^[1]: 随着水合物饱

和度的增大, 样品的粘聚力增大, 内摩擦角也随之略有增大。

(2) 海滩砂样品^[2]: 粘聚力随饱和度增加而明显增大, 但内摩擦角随着饱和度的增加略有降低。

(3) 天然砂样品^[3]: 粘聚力随着饱和度 S_h 的增

加而增加, 呈线性关系。同时, 内摩擦角也随着饱和度增加而增加。

(4) 天然气水合物覆膜砂烧结岩样^[4]: 粘聚力 c 随着水合物饱和度 S_h 的增加而上升, 内摩擦角 φ 随饱和度变化较小, 但也略有上升趋势。

综上所述, 对于不同的天然气水合物砂粒类型, 粘聚力和内摩擦角随饱和度的变化趋势有不同, 所以需要同时考虑二者随饱和度的变化关系来建立强度准则。

首先通过线性回归的方法建立粘聚力和内摩擦角与水合物饱和度的关系:

$$c(S_h) = \alpha + \beta S_h \quad (1)$$

$$\varphi(S_h) = m + n S_h \quad (2)$$

式中: c 为粘聚力, 单位为 MPa, S_h 为水合物饱

和度, 单位为%, φ 为内摩擦角, 单位为 $^\circ$ 。 α 、 β 、 n 、 m 为与样品相关的系数, 通过对实验数据拟合, 得到其数值如表 2。

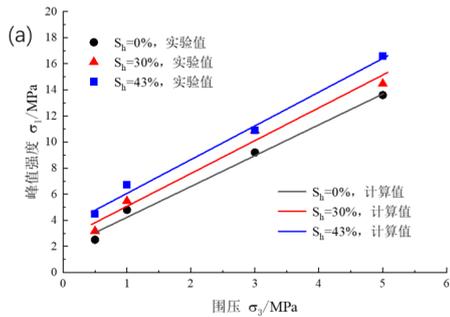
综合式 (1) 及式 (2) 可得天然气水合物砂土三轴压缩实验峰值强度与水合物饱和度 S_h 、有效围压 σ_3 的关系式:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1+\sin(\varphi(S_h))}{1-\sin(\varphi(S_h))} + 2c(S_h) \frac{\cos(\varphi(S_h))}{1-\sin(\varphi(S_h))} \quad (3)$$

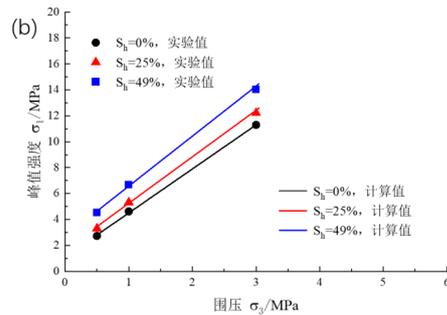
式 (1)、(2)、(3) 联合起来, 即可表示天然气水合物储层样品考虑不同饱和度条件的强度准则。依据该强度准则, 对天然气水合物试样在不同围压下的强度进行预测计算。图 2 为不同试样的峰值强度预测计算值与实验值结果, 从图中可以看到, 计算值与实验值非常接近, 表明该强度准则能较好地反映不同饱和度下各种水合物储层样品的峰值强度。

表 2 各试样 α 、 β 、 n 、 m 数值

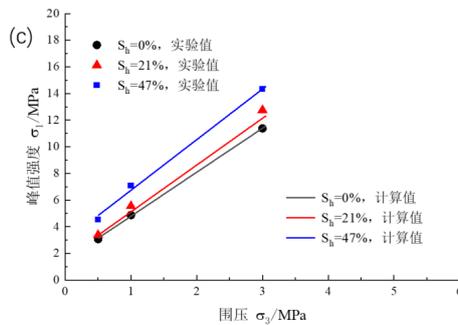
	c			φ		
	α	β	R^2	m	n	R^2
Toyoura 砂	0.61	9.7×10^{-3}	0.93	23.9	5.44×10^{-2}	0.99
7 号硅砂	0.3	7.8×10^{-3}	0.98	33.05	4.99×10^{-2}	0.97
8 号硅砂	0.41	7.8×10^{-3}	0.975	32.37	7.07×10^{-2}	0.83
海滩砂	0.03	0.079	0.995	30.6	5.4×10^{-2}	0.709
天然气水合物天然砂	1.82	3.42×10^{-2}	0.99	30.05	7.1×10^{-2}	0.99
天然气水合物覆膜砂烧结岩样	3.56	0.0128	0.998	22.21	1.3×10^{-2}	0.97



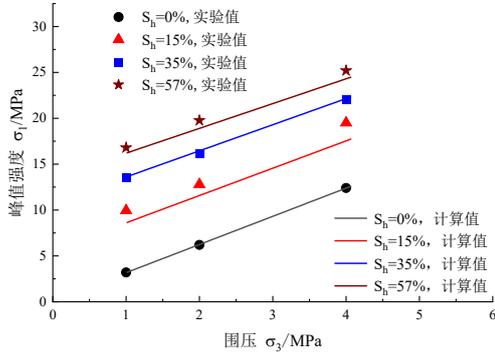
(a) Toyoura 砂;



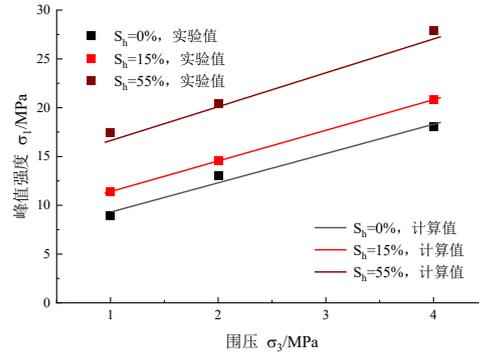
(b) 7号硅砂



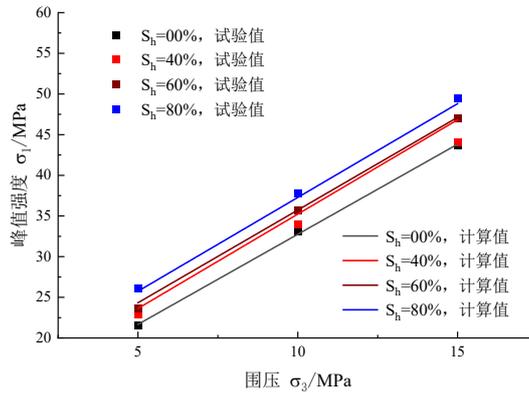
(c) 8号硅砂



(d) 天然气水合物天然海滩砂



(e) 天然气水合物天然砂

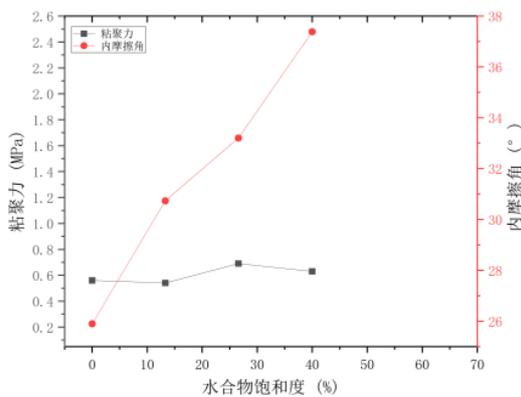


(f) 天然气水合物覆膜砂烧结岩样

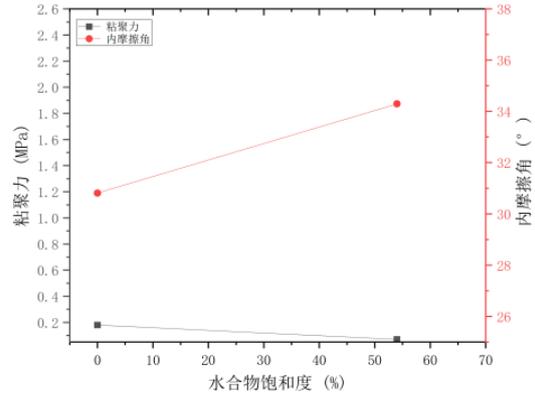
图2 天然气水合物试样峰值强度计算结果对比 (依次基于文献[1] [2] [3] [4]数据进行分析)

表3 含水合物试样的 c_r 、 ϕ_r 值

宿主砂粒类型	S_h (%)	c_r (MPa)	ϕ_r ($^\circ$)
混合砂样品[10]	0	0.56	25.89
	13.3	0.54	30.73
	26.6	0.69	33.20
	40	0.63	37.38
Toyoura 砂样品[11]	0	0.18	30.81
	54	0.07	34.29



(a) 含水合物混合砂样品



(b) 含水合物 Toyoura 砂样品

图3 不同样品 c_r 、 ϕ_r 随饱和度变化关系 (依次基于文献[10, 11]数据进行分析计算)

3 残余强度特征

通过对 Dong 等人^[10]以及 Masayuki 等人^[11]得出的应力-应变曲线进行分析, 可以发现含水合物样品在经历峰值应力后, 即使出现破坏, 仍然能够维持一种较低的应力水平, 即存在残余强度。目前, 关于天然气水合物储层残余强度性质的研究还比较少, 所以有必要分析和总结一下残余强度的相关性质, 特别是残余粘聚力 c_r 和残余内摩擦角 φ_r 。

通过对 Dong 等人^[10]以及 Masayuki 等人^[11]的试验数据进行处理和分析得到了含水合物混合砂样品以及含水合物 Toyoura 砂样品的 c_r 、 φ_r 值如表 3 所示:

由图 3 (a) 可以看出:

(1) 当水合物饱和度增大到 13.3% 时, 残余粘聚力可能开始随水合物饱和度增大而增大, 在增大到某个值后, 增加趋势开始放缓甚至有下降的趋势;

(2) 残余内摩擦角一般会随水合物饱和度增大而增大。

含水合物混合砂样品的残余粘聚力以及残余内摩擦角与水合物饱和度之间存在某种线性关系, 这种线性关系可以用式 (4) 以及式 (5) 表示出来:

$$c_r = A + BS_h \quad (4)$$

$$\varphi_r = M + NS_h \quad (5)$$

式中, A 、 B 、 M 、 N 是拟合参数, 表 5 给出了它们的拟合值:

表 5 参数 A 和 B 以及 M 和 N 的拟合值

A	B	M	N
0.55	0.27	26.26	27.71

故莫尔-库伦强度准则可以式 (6) 表示出来, 而 c_r 和 φ_r 可以表示为水合物饱和度 S_h 的函数, 如式 7、式 8 所示:

$$\sigma_{1r} = \frac{2c_r \cos \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r} + \frac{1 + \sin \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r} \sigma_3 \quad (6)$$

$$c_r(S_h) = A + BS_h \quad (7)$$

$$\varphi_r(S_h) = M + NS_h \quad (8)$$

将式 (7) 和式 (8) 代入式 (6), 得到式 (9), 该方程展示了天然气水合物储层样品残余强度 σ_{1r} 与水合物饱和度 S_h 以及围压 σ_3 之间的关系, 可以作为天然气水合物储层的残余强度准则。

$$\sigma_{1r} = \frac{\cos(\varphi_r(S_h))}{1 - \sin(\varphi_r(S_h))} 2c_r(S_h) + \frac{1 + \sin(\varphi_r(S_h))}{1 - \sin(\varphi_r(S_h))} \sigma_3 \quad (9)$$

4 结论

(1) 本文系统地总结分析了不同天然气水合物储层样品粘聚力和内摩擦角随饱和度的变化关系。随饱和度增加, 含天然气水合物砂样粘聚力增加; 而内摩擦角不同, 部分类型含水合物砂土体内摩擦角增加, 部分略有降低, 有些则变化较小;

(2) 通过对试样粘聚力 c 、内摩擦角 φ 与水合物饱和度 S_h 建立关系, 得到天然气水合物储层对应的峰值强度准则, 对其进行拟合验证, 结果与实验结果较为吻合;

(3) 对残余强度下的粘聚力及内摩擦角随水合物饱和度变化进行了研究, 并建立了相应的残余强度准则。

参考文献

- [1] 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): 4057-75.
- [2] 刘乐乐, 张旭辉, 刘昌岭, et al. 含水合物沉积物三轴剪切试验与损伤统计分析 [J]. *力学学报*, 2016, 第 48 卷 (第 3 期): 720-9.
- [3] 孙中明. 沉积物中水合物饱和度及其相应力学特性的实验研究 [D]; 中国石油大学 (华东), 2013.
- [4] 孙晓杰, 程远方, 李令东, et al. 天然气水合物岩样三轴力学试验研究 [J]. *石油钻探技术*, 2012, (第 4 期): 52-7.
- [5] 张怀文, 程远方, 李梦来, et al. 南海北部深水浅层天然气水合物储层力学特性试验及强度准则建立 [J]. 2017, 第 29 卷 (第 6 期): 115-21.
- [6] UCHIDA S, KLAR A, YAMAMOTO K. Sand production model in gas hydrate-bearing sediments [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 86: 303-16.
- [7] KAJIYAMA S, WU Y, HYODO M, et al. Experimental investigation on the mechanical properties of methane hydrate-bearing sand formed with rounded particles [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 45: 96-107.
- [8] MIYAZAKI K, MASUI A, TENMA N, et al. Study on

- Mechanical Behavior for Methane Hydrate Sediment Based on Constant Strain-Rate Test and Unloading-Reloading Test Under Triaxial Compression [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2010, 20(1): 61-7.
- [9] LI Y, HU W, TANG H, et al. Mechanical properties of the interstratified hydrate-bearing sediment in permafrost zones [J]. *Energy*, 2023, 282.
- [10] DONG L, LI Y, LIAO H, et al. Strength estimation for hydrate-bearing sediments based on triaxial shearing tests [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 184.
- [11] 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.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS