

DOI: 10.11779/CJGE20220123

含水合物土体的土水特征曲线及渗透系数

颜荣涛, 徐玉博, 颜梦秋

(桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 含水合物土的土水特征曲线和渗透系数对分析水合物开采效率和地层稳定性具有重要意义。通过自我改造而成的含水合物土的土水特征曲线的测试装置, 测试了含水合物土(黏质粉土和砂土)的土水特征曲线, 研究了水合物形成对土体的土水特征曲线的影响规律和机理, 并且分析了含水合物土体的非饱和状态下的渗透系数。试验结果分析表明: 水合物形成对含水合物土体的土水特征曲线存在明显影响; 随着水合物饱和度的增长, 可以看到边界效应段明显增大, 过渡段土水特征曲线变得逐渐平缓, 非饱和残余段对于残余水饱和度更低, 但是 VG 模型仍能有效的描述含水合物土的土水特征曲线; 进气值随着水合物饱和度的增加而增大, 而残余有效水饱和度则随之减小, 这主要是由于水合物形成改变了沉积物内部的孔隙孔径分布特征。在非饱和状态下, 由于渗流通道被气体挤占, 含水合物土的相对渗透系数随毛细吸力增加而减小, 但是在同样的毛细吸力下, 越大的水合物饱和度对应的相对渗透系数越小。

关键词: 含水合物土体; THF 水合物; 土水特征曲线; 进气值; 残余水饱和度; 渗透系数

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)05-0921-10

作者简介: 颜荣涛(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土力学的教学和科研工作。E-mail: 2012019@glut.edu.cn。

Soil-water characteristic curve and permeability of hydrate-bearing soils

YAN Rongtao, XU Yubo, YAN Mengqiu

(Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Understanding the soil-water characteristic curve (SWCC) and permeability of hydrate-bearing soils plays a critical role in analyzing the production efficiency and layer stability during hydrate exploitation. Based on the self-improved apparatus, hydrate is formed within clayey silt and sand sediment, and the SWCC of the hydrate-bearing clayey silt and sand is measured. Further, the influence law and mechanism of hydrate formation on the SWCC are investigated, and the permeability of the hydrate-bearing soils at unsaturated state is analyzed. The test results show the hydrate formation has a significant effect on the SWCC of the hydrate-bearing soils. As the hydrate saturation increases, the boundary effect segment remarkably increases, the SWCC changes gently during the transition segment, and the corresponding saturation reduces. However, the VG model is able to address the SWCC of the hydrate-bearing soils. Since the hydrate formation changes the pore-size distribution structure of the hydrate-bearing soils, the gas entry pressure increases but the saturation of the effective residual water decreases with the increasing hydrate saturation. Under the unsaturated state, the relative permeability of the hydrate-bearing soils reduces with the increasing capillary suction as the seepage channel is crowded by gas. At a given capillary suction, the higher hydrate saturation corresponds to the smaller relative permeability.

Key words: hydrate-bearing soil; THF hydrate; soil-water characteristic curve; gas entry pressure; saturation of residual water; permeability

0 引言

甲烷水合物是一种由甲烷气体和水在低温高压条件下形成的类似于冰雪状的化合物^[1]。在自然环境中, 甲烷水合物主要赋存于永久冻土区和深海大陆架的沉积物中, 并且储量巨大。因此, 甲烷水合物被认为是一种潜在的替代性战略能源, 并且吸引了很多国家科研人员的关注, 如美国、日本、加拿大、中国等。经过多年的研究, 很多国家已经对甲烷水合物进行了现

场试开采试验, 如前苏联、日本和中国等, 这些甲烷水合物原位试开采试验对推动整个甲烷水合物的商业开采提供了宝贵的经验^[1-2]。

目前为止, 科研人员对于开采甲烷水合物的方法已经基本达到了共识, 主要有降压分解法、注热升温

基金项目: 国家自然科学基金项目(11962004); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD20325010)

收稿日期: 2022-02-08

法、注入抑制剂法和二氧化碳置换法等^[3]。通过打破水合物稳定状态，水合物分解成为甲烷气体和水，而后抽取甲烷水合物从而达到甲烷水合物的开采目的。在甲烷水合物分解过程中，分解产生的甲烷气体和水使土体处于非饱和状态，并且向钻井迁移，其迁移规律直接影响了开采效率。因此，揭示含水合物土体的持水特性和非饱和渗透规律显得尤为重要，因为其为甲烷气体和水的迁移特性的主要影响因素^[4-6]。此外，持水特性也会对含水合物土体的力学特性产生明显影响，从而改变含水合物地层的稳定性^[7]。

土体的持水特性主要采用“土水特征曲线”进行描述，简称为“SWCC”，主要描述为基质吸力与水的含量之间的关系^[8]。一般来说，土体的土水特征曲线主要受孔隙分布状态、土体颗粒矿物成分和孔隙溶液化学性质控制^[9]。对于含水合物土体，水合物的形成或是分解会改变土体孔隙结构状态，进而影响含水合物土体的土水特征曲线。一些学者为了揭示水合物赋存对土水特征曲线的影响规律，从数值试验和室内试验的角度研究了含水合物土体的土水特征特性。Dai 等^[7]借用孔隙网络模型模拟器重现了含水合物土体的微观孔隙结构，并研究了含水合物土体的土水特征特性，结果证实了水合物赋存对土水特征曲线的影响，并认为毛细吸力和进气值都会随水合物饱和度增加而提高。Mahabadi 等^[10]基于 CT 扫描技术重构了含水合物沉积物的微观孔隙结构，而后借用孔隙网络模型模拟器研究了含水合物土体的土水特征曲线，结果表明高水合物饱和度会导致高进气值、高残余水饱和度，并且毛细吸力随水饱和度下降的越快。为了从室内试验角度说明水合物饱和度对含水合物土体土水特征曲线的影响，Mahabadi 等^[11]选择四氢呋喃（THF）作为甲烷的替代物，测试了含 THF 水合物土体的土水特征曲线，分析毛细吸力和进气值随水合物饱和度的变化关系。虽然目前在水合物饱和度对土水特征曲线的影响规律方面有了一定的认识，但为了建立一个有效土水特征曲线模型并用于分析甲烷水合物的开采效率以及评估开采过程中含水合物地层的稳定性，还亟需更多的含水合物土体的土水特征曲线试验数据和相关机制的认识。

土水特征曲线对非饱和土体的气-水迁移特性和力学强度特性方面具有重要意义。然而，试验测试数据为离散点，为了将土水特征曲线在数值计算中进行应用，必须引入能连续描述土水特征关系的土水特征曲线模型。目前典型的土水特征曲线模型主要有 B-C 模型，V-G 模型和 F-X 模型^[12]。在这些模型中，其相关模型参数往往与土水特征曲线的进气值和残余饱和度有关。因此，针对于一些较为离散的试验数据点，

一些学者往往采用这些理论模型拟合试验数据点，以进一步分析其土水特征特性，特别是试样的进气值和残余饱和度^[11, 13-14]。Mahabadi 等^[11]采用模型拟合试验数据点求得了进气值和残余饱和度；蔡国庆等^[13]和胡再强等^[14]则利用模型分别分析了砂质黄土和石灰改良黄土的进气值和残余饱和度。

为了描述土体在非饱和状态下气-水迁移规律，非饱和状态下的渗透系数是非常重要的。因此，研究含水合物土体的非饱和渗透系数也是水合物安全顺利开采的前提。一般来讲，饱和渗透系数是一个常数，而非饱和度状态下渗透系数是随吸力或是水饱和度变化的函数。对于常规土体，目前已经有了比较完善的非饱和渗透系数的测试方法^[15-16]。但在含水合物土体的渗透系数的测试中，长时间的测试过程很难保证水合物含量恒定，同时水合物的稳定条件的限制也增加了试验条件的要求。因此，测试含水合物土体的非饱和渗透系数存在一定困难。

基于基本渗流理论，很多学者建立了预测模型来间接测算不同饱和状态下土体的渗透系数^[17-19]。虽然间接计算的的渗透系数精度比不上试验所得，但是也能反映其基本特性，并且过程简单，没有试验条件限制^[20]。基于土水特征曲线，Childs & Collis-Geroge (CCG) 推导出了一种基于任意孔径分布状态的预测非饱和渗透系数的模型，该模型建立了渗透系数和基质吸力之间的关系^[8]。基于这种方法，李萍等研究了非饱和土黄土渗透系数随基质吸力的变化关系^[21]；胡再强等建立了预测非饱和状态下石灰改良土的渗透系数模型^[14]；谭志翔等^[22]分析了北疆白砂岩与泥岩的渗透曲线。显然，Childs & Collis-Geroge 模型为分析土体非饱和状态下的渗透系数提供了有效的分析途径。

针对以上分析，本文主要采用 THF 替代甲烷气体在两种土体中形成水合物，制得含水合物土体试样，并且利用轴平移技术测得了含水合物土体的土水特征曲线，并且分析了水合物饱和度对土水特征曲线的影响规律和机理；同时，基于土水特征曲线，采用 Childs & Collis-Geroge 预测了含水合物土体在非饱和状态下的渗透系数，并且分析渗透系数随吸力的变化关系。

1 试验介绍

1.1 试验仪器

本试验采用轴平移技术测试含水合物土体的土水特征曲线。轴平移技术主要通过提高非饱和土中孔隙气体的压力，并且把孔隙水压力控制在一定的参考值（如大气压），从而达到对基质吸力的有效控制^[8]。图 1 给出了用于测试含水合物土体的土水特征曲线的

装置示意图。该设备由原有的非饱和土水力参数测试仪改装, 由于 THF 水合物保持稳定需要对温度进行控制, 因此仪器主要改装部分为增加了控温水浴箱。改装后试验设备如图 1 所示, 该装置主要包括高压气源、高精度恒压阀、试样室、恒温水浴箱、气泡冲刷装置、高精度天平和计算机。高压气源由空压机提供, 空压机存一个气体缓冲罐能保证气源稳定; 气体压力可以通过高精度恒压阀调节控制, 从而保证气体压力的恒定; 试样室底部为高进气值陶土板, 陶土板具有透水不透气的功能, 从而实现了气水压力的单独控制; 试样室置于恒温水浴箱中可以实现温度的恒定控制; 由于气体在高压下的溶解度高于低气压环境, 因此气体通过陶土板扩散进入排水管中, 在排水管路中形成气泡, 影响试验结果, 因此设置了气泡收集装置用来排除气体扩散的影响; 高精度天平用来测量试样在基质吸力作用下排出的水量; 计算机进行数据采集和分析。由于试验所采用的吸力范围与陶土板进气值有关, 本次试验采用的陶土板规格为 3bar 和 5bar, 试样 A 采用 5bar 陶土板, 而试样 B 采用 3bar 陶土板, 其渗透系数分别为 1.21×10^{-9} , $2.50 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。

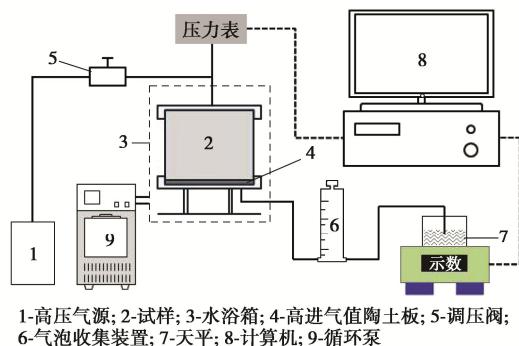


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram for measuring soil-water characteristic curve of hydrate-bearing soils

1.2 试验材料

本试验根据中国南海海域和日本 Naikai Trough 水合物赋存介地质资料^[23-24], 配制了两种不同颗粒级配的试验土体(试样 A, B)。试验土体的颗粒级配分布情况如图 2 所示。该土样的土粒相对质量密度情况均为 2.65。土样的基本物性指标见表 1, 根据其物理指标, 土样 A 定名为黏质粉土, 土样 B 定名为细砂。

表 1 土的基本物性指标

Table 1 Basic physical properties of soils

土样类型	相对质量密度	预制干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑限指数 I_p	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
试样 A	2.65	1.5	32.8	23.3	9.5	19	1.89
试样 B	2.65	1.5	—	—	—	2.98	1.36

本试验主要利用 THF 代替 CH_4 合成水合物来研究含水合物土体的土水特征曲线, 这主要是因为 THF 水合物和 CH_4 水合物在很多物理性质方面很相似, 如热传导系数、比热、重度、分解热、剪切波速、压缩波速等性质^[25-26]。此外, 相对于 CH_4 水合物, THF 水合物具有以下优点: ①THF 水合物稳定条件相对于更为简单, 在标准大气压条件下只需要 4℃以下的温度就可以形成水合物并保持稳定, 而 CH_4 水合物除了温度要求外, 还需要较高的压力条件; ②THF 能与水混溶, 与土体混合均匀后能形成较为均匀的含水合物土体试样; ③能较精准的控制水合物饱和度。值得说明的是, THF 水合物并不会像 CH_4 水合物在分解的时候产生气体, 因此在设计相关实验时应该考虑应用范围^[25, 27-28]。考虑到这些优缺点, 采用 THF 水合物替代 CH_4 水合物主要倾向于研究含水合物土体的力学特性和水力特性^[11, 27-29]。本试验主要研究含水合物土体的土水特征曲线特性, 不涉及水合物的分解过程, 因此采用 THF 水合物替代 CH_4 水合物是合理的。

本试验采用的 THF 购置于西陇科学股份有限公司。THF 的分子式为 $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$, 摩尔质量为 $M_{\text{THF}}=72.107 \text{ g/mol}$ 。THF 与水在合适的温度条件下形成的水合物为结构 II 型水合物, 分子式为 $8\text{C}_4\text{H}_8\text{O} \cdot 136\text{H}_2\text{O}$, 摩尔质量为 $M_h=3027.576 \text{ g/mol}$ 。THF 水合物的密度为 $\rho_h=0.981 \text{ g/cm}^3$ 。根据 Mahabadi 等^[11]的估算, THF 溶液形成水合物会使体积增大 1.6%, 在计算水合物和水的饱和度时没有考虑这种影响。试验用水为去离子水, 摩尔质量为 $M_w=18.02 \text{ g/mol}$, 密度为 $\rho_w=1.0 \text{ g/cm}^3$ 。

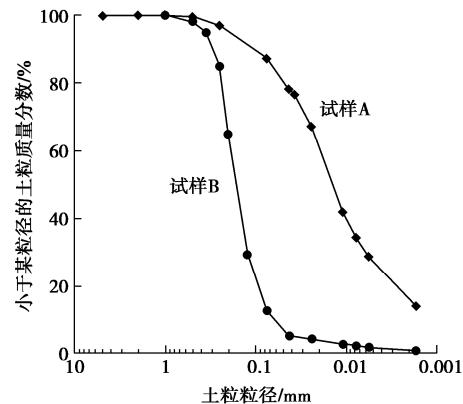


图 2 试验土体的颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of testing soils

1.3 试样制备

根据 THF 水合物的分子式 ($8\text{C}_4\text{H}_8\text{O} \cdot 136\text{H}_2\text{O}$), THF 水合物中 THF 与水的物质的量比为 1:17。如果按质量百分比来看, 当 THF 质量分为 19.1%, 水的质量分数为 80.9% 时, THF 溶液可以完全转化为 THF 水合物。在本次试验中, 试验开始前试验应该为饱和

度状态, 即孔隙完全由水合物和水填充。根据这一要求, 推导出了不同水合物饱和度情况下 THF 和水的质量比:

$$\frac{m_{H_2O}}{m_{THF}} = \frac{5.376 - 1.126S_h}{S_h} \quad (1)$$

式中: m_{H_2O} 为水的质量; m_{THF} 为 THF 的质量; S_h 为水合物饱和度, $S_h = V_h/V_v$, V_h 为水合物体积, V_v 为土体骨架组成的孔隙体积。值得说明的是, 该式的推导没有考虑水合物形成体积膨胀的影响。基于式(1), 可以根据不同的水合物饱和度来选用不同的 THF 和水的质量比溶液进行饱和。

试样制备用土按初始含水率为 10% 配制, 在水与土体充分混合后, 利用密封袋封装并置于保湿缸养护 24 h 以便水分迁移均匀。采用千斤顶按干密度为 1.5 g/cm³ 压制环刀样, 试样直径为 54.5 mm, 高度为 30.3 mm。压制完成的试样将进行抽真空, 而后导入制备的 THF 溶液 (质量浓度对应于相应的水合物饱和度 S_h) 饱和, 并且密封浸泡 24 h, 确保试样充分饱和。饱和完成后, 采用保鲜膜—锡箔纸—保鲜膜 3 层包裹试样, 并且置入密封袋以达到更好的密封效果。这主要是由于 THF 具有较强的挥发性, 通过密封措施防止 THF 挥发。随后, 将试样放入到-10℃的冰箱 72 h, 诱导水合物成核, 然后将冰箱温度调到 1℃ 并且放置 14 d 以保证水合物充分形成。在 1℃ 环境中, 零下温度诱导过程中形成的冰会全部融化, 使 THF 溶液完全形成水合物。

1.4 试验过程及方案

试验开始前, 对排水管路、陶土板进行抽真空饱和。然后, 将制备好的试样从冰箱中取出称重, 置于陶土板上, 安装好仪器, 后放置在 1℃ 的水浴箱内。整个过程应尽量迅速, 避免水合物分解。随后, 逐步逐级施加吸力, 通过电子天平测量出水量, 由计算机采集数据并且记录出水量随时间的变化关系。当一级吸力下出水量达到稳定后, 施加下一级吸力, 重复操作至所有吸力施加完成。

本试验主要研究两种不同含水合物土体的土水特征曲线。两种试样控制干密度均为 1.5 g/cm³, 试样 A 研究的水合物饱和度为 S_h 为 0, 0.35, 0.50, 0.65; 而试样 B 研究的水合物饱和度为 S_h 为 0, 0.35, 0.50。值得说明的是, 长时间的测试过程可能也会导致少量的水合物溶解于水, 难以维持水合物饱和度的恒定。在试验过程中, 当施加吸力到排水困难时, 终止了试验。

由于这些试验条件的限制和测试的难度, 导致了试验数据点相对普通土的测试点较少。

2 结果与分析

2.1 土水特征曲线

为了分析含水合物土的土水特征曲线, 本文主要提供了基质吸力 ψ 和有效水饱和度 S_w^* 之间的关系。含水合物土体的有效水饱和度 S_w^* 的定义以含水合物土体的固体骨架基础 (固体骨架包括土体颗粒和水合物颗粒), 可表示为

$$S_w^* = \frac{V_w}{V_v - V_h} = \frac{S_w}{1 - S_h} \quad (2)$$

式中: V_v 为土颗粒骨架所形成的孔隙体积; V_w 为水的体积; V_h 为水合物颗粒的体积; S_w , S_h 分别为基于土颗粒骨架形成的孔隙空间的水饱和度和水合物饱和度, $S_w = V_w/V_v$, $S_h = V_h/V_v$ 。

为了说明含水合物土体 SWCC 的特征, 以土样 A 中 $S_h=0.5$ 情况为例, 分析了其土水特征曲线的特征, 如图 3。从图 3 可以看出, 含水合物土体的土水特征曲线的形状与普通土体的相似, 可以分为即边界效应段、过渡段和残余饱和段 3 个区域^[30-31]。在边界效应段, 即使施加了相应的吸力, 试样孔隙还是被水填充饱和, 水处于连续状态; 当吸力增加并且超过一定值 (进气值), 气体开始进入试样孔隙并且排出孔隙水, 处于过渡段。这一阶段, 气水都处于连续状态, 但随着水分逐渐被排出, 孔隙空间逐渐被气体所替代。随着吸力的进一步增加, 孔隙水进一步减小到残余饱和度阶段, 孔隙空间中的孔隙水处于不连续状态, 即使吸力进一步增加也很难减小含水率。

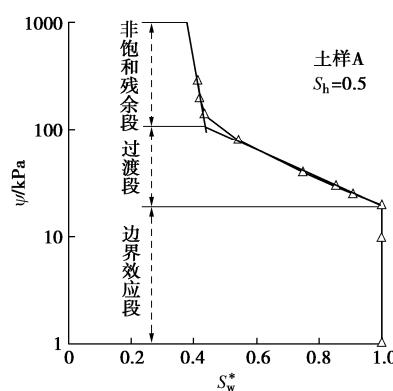


图 3 含水合物土体的土水特征曲线

Fig. 3 Soil-water characteristic curve for HBS

图 4 给出了两种不同土体的含水合物土体的土水特征曲线, 结果证实了水合物的形成对土水特征曲线产生了明显影响。随着水合物饱和度的增长, 可以看到边界效应段明显增大, 含水合物土体能在更高的吸力范围内保持饱和状态; 过渡段受水合物饱和度的影

响也较大, 土水特征曲线随着水合物饱和度增加变得逐渐平缓; 非饱和残余段在高水合物饱和度情况对于残余含水率更低。这些改变都是由于土体孔隙中水合物的形成改变了土体内部孔隙大小及分布状态, 从而影响了含水合物土体的土水特征曲线。

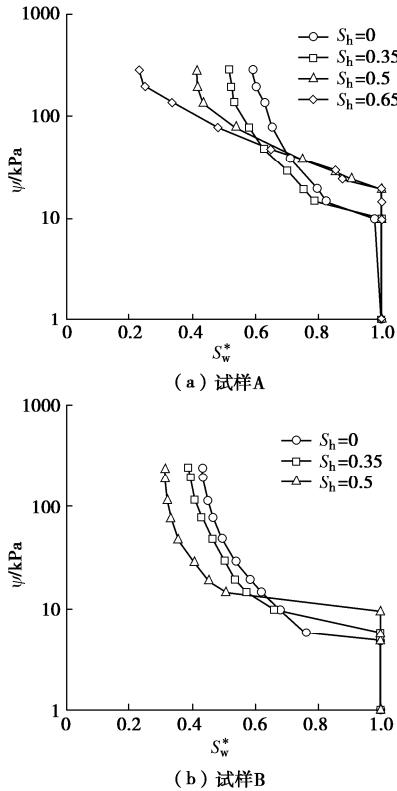


图4 含水合物土体的 SWCC 曲线

Fig. 4 Soil-water characteristic curves for HBS

图5给出了 $S_h=0$ 和 $S_h=0.5$ 情况下试样A和试样B的SWCC曲线。比较 $S_h=0$ 情况下两种不同试样的SWCC特征, 可以发现试样A的SWCC曲线位于试样B之上, 说明在同样的有效水合物度情况下, 试样A对应的吸力值要高于试样B。这主要是由于试样A的赋存介质为黏质粉土, 而试样B的赋存介质为细砂, 试样A的孔隙大小要小于试样B, 对孔隙水的吸附作用要大于试样B。对于水合物饱和度 $S_h=0.5$ 的情况, 试样A的SWCC也处于试样B上方。这也是由于试样A和试样B的赋存介质不一样, 细颗粒赋存介质的自身整体孔隙要远远小于细砂, 在同样饱和度的水合物填充后, 孔隙也会远远小于细砂的情况。在这种情况下, 试样A在同样有效水饱和度对应的吸力要大于试样B。

2.2 模型模拟

众所周知, 试验测试出的基质吸力和含水率的关系为数据点形式。然而, 在计算分析土体内部非饱和渗流和力学特性的时候, 必须保证基质吸力与含水率关系的连续性。因此, 土水特征曲线模型就显得尤为

重要。van Genuchten (VG)模型是比较常用的土水特征曲线模型^[32], 已经被证实能用于描述多种特殊土体的土水特征曲线, 但是是否能应用于含水合物土体, 还有待进一步验证^[8, 12-14, 21-22, 30]。因此, 本节将采用VG模型来分析含水合物土体的土水特征曲线。

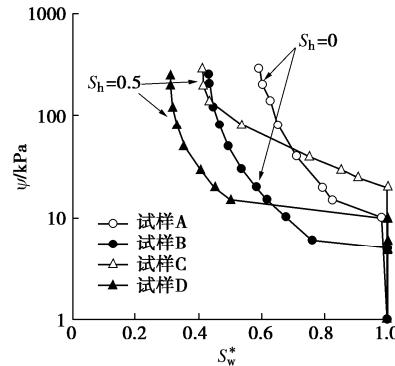


图5 不同含水合物土体中的 SWCC 曲线

Fig. 5 Soil-water characteristic curves for different HBS

VG模型的具体表达式为

$$S_w = S_w^r + (1 - S_w^r) \left(\frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right)^m \quad (3)$$

式中: α , m , n 为模型参数, α 与试样的进气值有关, m , n 综合控制了土水特征曲线的形状。

采用这VG模型拟合了试样A和试样B在不同水合物饱和度情况下的土水特征曲线, 使用参数见表2, 3。图6分别给出了VG模型对含水合物土体的土水特征曲线的拟合效果(试样A, B)。可以发现, 无论是试样A还是试样B, VG模型对不同水合物饱和度情况下的土水特征曲线的模拟所得的相关系数 R^2 都在0.98以上, 其中试样A均在0.99以上(表2, 3), 说明VG能较好的模拟含水合物土体的土水特征曲线。此外, 计算所得的土水特征曲线都能连续平滑的描述的含水合物土体的SWCC试验点。

表2 van Genuchten (VG)模型参数(试样A)

Table 2 Model parameters for van Genuchten Model (Soil A)

参数	S_w^r	α/kPa^{-1}	m	n	R^2
$S_h=0$	0.582	0.110	0.019	46.115	0.9961
$S_h=0.35$	0.490	0.104	0.019	45.230	0.9936
$S_h=0.50$	0.358	0.040	0.185	6.034	0.9985
$S_h=0.65$	0.180	0.035	0.200	5.819	0.9954

注: R^2 为相关系数。

表3 van Genuchten (VG)模型参数(试样B)

Table 3 Model parameters for van Genuchten Model (Soil B)

参数	S_w^r	α/kPa^{-1}	m	n	R^2
$S_h=0$	0.419	0.218	0.027	34.131	0.9839
$S_h=0.35$	0.378	0.150	0.014	83.230	0.9882
$S_h=0.50$	0.311	0.105	0.030	60.051	0.9923

对于不同水合物饱和度的情况，各模型均采用了不同的模型参数，如表 2, 3。对试样 A，水合物饱和度的增加也导致了残余水饱和度 S_w^* 的减小，参数 α , m 减小，然而参数 n 表现出增加的趋势。参数 α 与试样的进气值有关，一般呈现倒数关系，因此参数 α 的降低也说明了进气值随着饱和度的增加。对于试样 B，残余水饱和度 S_w^* 和参数 α 都随着水合物饱和度增大而减小；而参数 m , n 并不表现出单调的变化，随着水合物饱和度增加，参数 m 呈现先减小后增加，而参数 n 表现先增加后减小。明显地，试样 A 和试样 B 的模型参数 m , n 随水合物饱和度的增加展现出不同变化趋势。这可能是由于试样 A 和试样 B 由于土性不同，黏质粉土和砂土中水合物的形成可能产生不同的孔隙结构演化规律，从而影响了模型参数 m , n 。

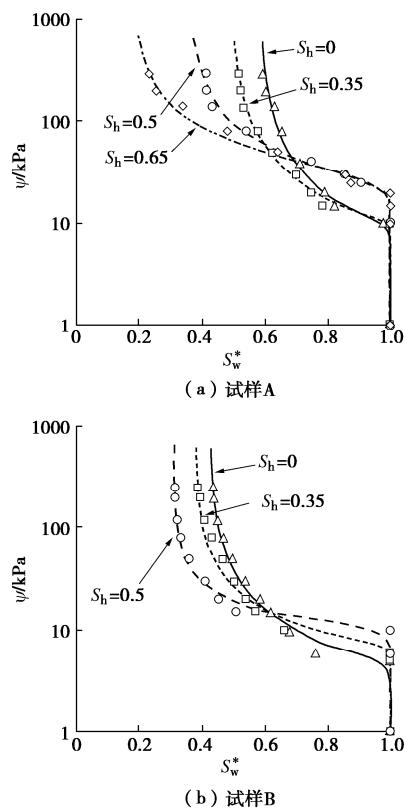


图 6 土水特征曲线模型模拟

Fig. 6 Simulations for soil water characteristic curves of HBS

2.3 残余水饱和度和进气值

由于试验数据点的限制，含水合物土体 SWCC 的残余水合物饱和度和进气值很难按照其定义在 SWCC 曲线上直接确定^[33]。因此，本研究利用 VG 模型参数与残余水饱和度和进气值的关系进行间接计算。根据表 2, 3 的残余水饱和度和参数 α 值，图 7 给出了不同水合物饱和度情况下的试样的有效残余水饱和度 S_w^* 和进气值 ψ_b 。进气值 ψ_b 可以按照公式 $\psi_b = 1/\alpha$ 计算得出^[34]。在图 7 (a) 中，残余水饱和度随着水合物饱和度的增大而减小。对于试样 A，在 $S_h=0$ 时，其有

效残余水饱和度为 0.582，当水合物形成达到 $S_h=0.65$ 时，其有效残余水饱和度降低到 0.180。对于试样 B，当水合物饱和度从 0 增加到 0.5 时，有效残余水饱和度从 0.419 减小到 0.311。这一变化趋势与 Mahabadi 等的试验结果相反^[11]。Mahabadi 等^[11]测试了含 THF 水合物砂土沉积物的土水特征曲线，其试验结果显示有效残余水饱和度随着水合物饱和度增加而增高。这可能与沉积物的粒径大小有关，Mahabadi 等^[11]试验中的沉积物去除了小于 0.075 mm 的细粒土，全部为砂土颗粒；而在本试验中，试样 A 含有 87% 的细粒颗粒，而试样 B 含有 12.7% 的细粒颗粒。这种颗粒大小可能会影响水合物的生长模式，改变土体的内部结构，从而对 SWCC 产生了不同的影响。具体的机制将在下一节进行分析。

图 7 (b) 给出了试样 A 和 B 的进气值随着水合物饱和度的变化关系，显示进气值随着水合物饱和度增加呈现不同程度的增加。在试样 A 中，当水合物饱和度 S_h 从 0 增加到 0.35 时，进气值增大很小，当水合物饱和度 S_h 继续增加到 0.5 或 0.65 时，进气值表现出显著的增加。而对于试样 B，进气值随着水合物饱和度增加也呈现增加趋势。该规律与前人研究结果基本一致^[7, 11]，这主要是水合物形成填充于沉积物孔隙中，减小了沉积物的大孔隙，从而增大了进气值。

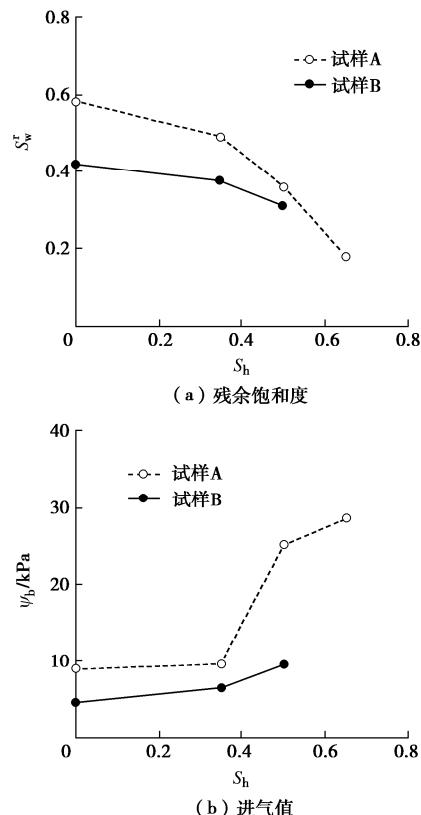


图 7 残余水饱和度和进气值随水合物饱和度的变化关系

Fig. 7 Change in residual water saturation and gas entry pressure versus hydrate saturation

2.4 核磁共振测试及微观分析

核磁共振技术是一种能快捷、无损测试材料孔隙结构的探测技术。近几年来, 核磁共振技术已经开始引入岩土领域进行孔隙分布的探测分析^[35-36]。通过质子群受到磁场的作用从非平衡状态恢复到平衡状态这一过程, 测试核磁信号的自由衰减曲线(FID曲线), 进一步反算出受到不同束缚状态下质子的恢复时间

(驰豫时间 T_2) 及信号幅值, 形成 T_2 分布曲线。驰豫时间 T_2 物理上可以反映了孔隙水所受的束缚状态, 如孔隙水所处的孔径大小, 而信号幅值则代表该状态下水含量的多少。基于此, T_2 分布曲线就可以用来分析土体孔径的分布特征^[35, 37]。本研究主要采用核磁共振技术来分析含水合物土的孔径分布特征, 从而进一步分析水合物形成对含水合物土的 SWCC 的影响机制。

图 4, 6 显示水合物饱和度对试样 A, B 的土水特征曲线具有相类似的影响趋势, 同时考虑到制样条件的限制, 本次核磁共振试验主要选择试样 A 作为代表进行分析。含水合物土试样与用于土水特征曲线测试的试样制备过程完全相同, 测试时处于饱和状态。经过相应的参数设置后, THF 水合物信号很弱, 所获的结果可以忽略水合物信号^[36, 38], 因此获取的 T_2 分布状态可以用来分析含水合物土试样的孔隙孔径分布特征。图 8 给出了含水合物土体(试样 A)在不同水合物饱和度情况下的 T_2 时间分布图。随着水合物饱和度的增加, 可以发现含水合物土的 T_2 分布状态发生了明显的变化, 证明其孔隙大小分布发生了改变。在图 8 中, 以 $T_2=1 \text{ ms}$ 为界限, 可以发现在 $T_2>1 \text{ ms}$ 内, 信号幅值随着饱和度增大而减小, 这说明对于较大孔径的孔隙体积减小了; 而在 $T_2<1 \text{ ms}$ 内, 信号幅值随着饱和度增大而增大, 这说明较小孔径的孔隙体积增大了。

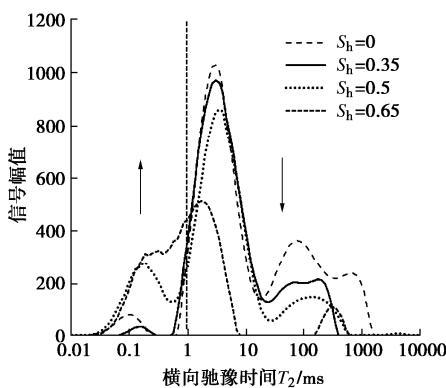


图 8 含水合物土体的核磁试验结果

Fig. 8 NMR testing results for HBS

为了更为具体地理解这一过程, 图 9 给出了水合物形成前后含水合物土的内部结构示意图, 用以说明

水合物形成过程对孔隙结构的影响。水合物形成以后, 水合物会填充于土体孔隙中, 因此导致了大部分较大孔隙的孔径减小, 比较典型的孔隙为图 9 红色圆圈标注的孔隙, 因此在图 8 中看到了与 $T_2>1 \text{ ms}$ 相对应的孔隙体积减小。由于试样的进气值对应于最大孔径, 水合物填充导致了孔径减小, 因此也导致了进气值随着水合物饱和度的增加而增大。

在冻土力学中, 冰形成引起的冻胀吸力可能会导致土颗粒被撑开, 导致土体发生冻胀^[39]。这种现象在水合物形成也可以发生, 水合物形成会导致了构成较小孔隙的相邻土颗粒被撑开, 使得较小孔隙的孔径进一步增加, 正如图 9 中蓝色圆圈标注部分, 因此图 8 中 $T_2<1 \text{ ms}$ 内显示的孔隙体积增大。这种改变了引起了残余饱和度随着水合物饱和度的增大而减小。

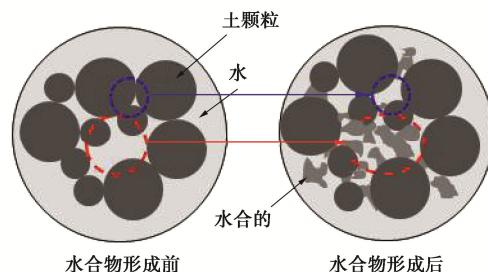


图 9 水合物形成前后含水合物土的内部结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram for inter-structure of HBS before and after the hydrate formation

3 非饱和渗透特性分析

含水合物土的非饱和土的渗透特性在分析水合物开采过程中气-水迁移是非常重要的。然而, 目前在实验室测试含水合物土体的非饱和渗透系数并非易事。统计渗透系数模型是一种可以通过土体的土水特性曲线来间接地计算土体在非饱和状态下的渗透系数的方法^[8]。因此, 本文基于 Childs & Collis-George 的统计渗透模型来分析含水合物土体的非饱和渗透系数。

根据 Childs & Collis-George 建模方法, 可以将土体的 SWCC 曲线的水饱和度分成 χ 等分, 基于每一等份的中点的水饱和度计算毛细吸力, 然后根据下式计算相应毛细吸力的渗透系数:

$$k(\psi_i) = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=i}^{\chi} [(2j+1-2i)\psi_j^{-2}] \quad (i=1, 2, \dots, \chi), \quad (4)$$

$$A_d = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^2}{2\mu_w N^2}, \quad (5)$$

$$k_{sc} = A_d \sum_{j=1}^{\chi} [(2j-1)\psi_j^{-2}]. \quad (6)$$

式中: $k(\psi_i)$ 为对应于第 i 份的渗透系数; k_s 为饱和状态下的渗透系数; k_{sc} 为计算所得饱和状态下的渗透系数; A_d 为调整系数; T_s , ρ_w , g , μ_w 分别为水的表面张力、密度、重力加速度和绝对黏度; θ_s 为饱和体积含水量; χ 为最大饱和度和残余饱和度之间的等份数; N 为饱和度为 1~0 的计算间断总数, $N = m[1/(1-S_w^r)]$, ψ_j 为第 j 等份点中点的毛细吸力; i 为整个等份数; j 为等份数编号。

根据式(4), (6), 可以推导出含水合物土的相对渗透系数 k_r :

$$k_r(\psi_i) = \frac{k(\psi_i)}{k_s} = \frac{\sum_{j=i}^{\chi} [(2j+1-2i)\psi_j^{-2}]}{\sum_{j=1}^{\chi} [(2j-1)\psi_j^{-2}]} \quad (7)$$

基于两种不同的含水合物土的土水特征曲线(试样 A 和试样 B), 可以利用式(7)计算出试样 A 和试样 B 的相对渗透系数随毛细吸力的变化关系。从图 10 中可以看出, 无论是试样 A 还是试样 B, 随着毛细吸力的增加, 相对渗透系数都随之减小。这主要是由于毛细吸力的增加驱出了孔隙中的水, 从而导致试样中孔隙水的渗流通道减小, 从而导致相对渗透系数减小。此外, 图 10 还显示随着水合物饱和度增加, 相对渗透曲线呈现出不同程度的向右偏移。

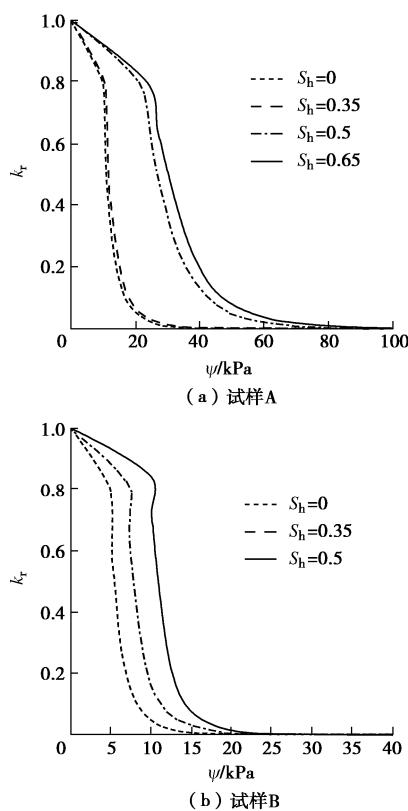


图 10 含水合物土的相对渗透系数(试样 A 和试样 B)

Fig. 10 Relative permeability of HBS (Specimens A and B)

究其原因, 主要是由于水合物的填充作用, 在图 10 考虑的毛细吸力范围内, 含水合物土体的持水性要普遍高于无水合物土, 并且随着水合物含量越高, 同样毛细吸力对应的水饱和度越高, 因此能提供相对更大的渗流通道, 从而拥有更大的相对渗透系数。

4 结 论

本文通过自我改造的土水特征曲线的测试装置, 测试了黏质粉土和细砂两种不同赋存介质的含水合物土的土水特征曲线, 研究了水合物形成对土体土水特征曲线的影响规律和影响机理, 并且分析了含水合物土在非饱和状态下的相对渗透系数。主要得到 3 点结论。

(1) 随着水合物饱和度的增长, 可以看到边界效应段明显增大, 进气值变大, 过渡段土水特征曲线变得逐渐平缓; 非饱和残余段对应的残余含水率更低。采用 VG 模型能有效的模拟含水合物土的土水特征曲线。

(2) 大孔隙中水合物的填充减小了孔径大小, 从而增加了进气值; 而水合物形成过程导致细小颗粒形成的孔隙大小被撑大, 从而使残余水饱和度减小。

(3) 两种含水合物土在非饱和状态下的相对渗透系数随毛细吸力的增加而减小, 主要是由于渗流通道被气体挤占。由于含水合物土持水性的影响, 在同样的毛细吸力下, 越大的水合物饱和度对应的相对渗透曲线越小。

参 考 文 献:

- [1] LIJITH K P, MLAGAR 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.
- [2] 韦昌富, 颜荣涛, 田慧会, 等. 天然气水合物开采的土力学问题: 现状与挑战[J]. 天然气工业, 2020, **40**(8): 116-132. (WEI Changfu, YAN Rongtao, TIAN Huihui, et al. Geotechnical problems in exploitation of natural gas hydrate: Status and challenges [J]. Natural Gas Industry, 2020, **40**(8): 116-132. (in Chinese))
- [3] 张旭辉, 鲁晓兵, 李鹏. 天然气水合物开采方法的研究综述[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, **49**(3): 38-59. (ZHANG Xunhui, LU Xiaobing, LI Peng. A comprehensive review in natural gas hydrate recovery methods[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2019, **49**(3): 38-59. (in Chinese))
- [4] RUTQVIST J, MORIDIS G J, GROVER T, et al. Coupled

- multiphase fluid flow and wellbore stability analysis associated with gas production from oceanic hydrate-bearing sediments[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012(92/93): 65-81.
- [5] KIMOTO S, OKA F, FUSHITA T. A chemo-thermo-mechanically coupled analysis of ground deformation induced by gas hydrate dissociation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, **52**(2): 365-376.
- [6] ZHOU M, SOGA K, YAMAMOTO K, et al. Geomechanical responses during depressurization of hydrate-bearing sediment formation over a long methane gas production period[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2020, **23**: 100111.
- [7] DAI S, SANTAMARINA J C. Water retention curve for hydrate-bearing sediments[J]. Geophysical Research Letters, 2013, **40**(21): 5637-5641.
- [8] LU Ning, WILLIAM J L. 非饱和土力学[M]. 韦昌富, 等 译. 北京: 高等教育出版社, 2012. (LU Ning, WILLIAM J L. Unsaturated Soil Mechanics[M]. WEI Cangfu, et al trans. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))
- [9] AUBERTIN M, MBOINMPA M, BUSSIÈRE B, et al. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties [J]. Canadian Geotechnique Journal, 2003, **40**(6): 1104-1122.
- [10] MAHABADI N, DAI S, SEOL Y, et al. The water retention curve and relative permeability for gas production from hydrate-bearing sediments: pore-network model simulation[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2016, **17**: 3099-3110.
- [11] MAHABADI N, ZHENG X, JANG J. The effect of hydrate saturation on water retention curves in hydrate-bearing sediments[J]. Geophysical Research Letters, 2016, **43**: 1-9.
- [12] LEONG E C, RAHARDIO H. Review of soil water characteristic curve equations[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(12): 1106-1117.
- [13] 蔡国庆, 韩博文, 杨雨, 等. 砂质黄土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊1): 11-15. (CAI Guoqing, HAN Bowen, YANG Yu, et al. Experimental study on soil-water characteristic curves of sandy loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 11-15. (in Chinese))
- [14] 胡再强, 梁志超, 郭婧, 等. 非饱和石灰改良黄土的渗透系数预测[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊2): 26-31. (HU Zaiqiang, LIANG Zhichao, GUO Jing, et al. Prediction of permeability coefficient of unsaturated lime-improved loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 26-31. (in Chinese))
- [15] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和原状和重塑Q3黄土渗水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1020-1027. (YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng, et al. Hydraulic conductivity of unsaturated undisturbed and remolded Q3 loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1020-1027. (in Chinese))
- [16] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 9-20. (CHEN Zhenghan, XIE Dingyi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 9-20. (in Chinese))
- [17] KUNZE R J, UEHARA G, GRAHAM K. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1968, **32**(6): 760-765.
- [18] SAMINGAN A S. Mechanical and hydraulic properties of compacted tropical residual soils[J]. Polymer Korea, 2009, **33**(33): 97-103.
- [19] GARG N K, GUPTA M. Assessment of improved soil hydraulic parameters for soil water content simulation and irrigation scheduling[J]. Irrigation Science, 2015, **33**(4): 247-264.
- [20] 翟钱, 朱益瑶, 叶为民, 等. 全吸力范围非饱和土水力渗透系数的计算[J]. 岩土工程学报, 2021, **44**(4): 660-668. (Zhai Qian, Zhu Yiyao, Ye Wi-min, et al. Estimation of hydraulic conductivity of unsaturated soils under entire suction range[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(4): 660-668. (in Chinese))
- [21] 李萍, 李同录, 王红, 等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数 Childs & Collis-Geroge 模型预测[J]. 岩土力学, 2013, **34**(增刊2): 184-189. (LI Ping, LI Tonglu, WANG Hong, et al. Soil-water characteristic curve and permeability prediction on Childs & Collis-Geroge model of unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 184-189. (in Chinese))
- [22] 谭志翔, 王正中, 葛建锐, 等. 北疆白砂岩与泥岩的土水特征曲线及渗透曲线实验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊1): 229-233. (TAN Zhixiang, WANG Zhengzhong, GE Jianrui, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve and permeability curve of white sandstone and mudstone in northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 229-233.

- (in Chinese))
- [23] LIU C, MENG Q, HU G, et al. Characterization of hydrate-bearing sediments recovered from the Shenhua area of the South China Sea[J]. Interpretation, 2017, **5**(3): 1-39.
- [24] 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.
- [25] LEE J Y, YUN T, SANTAMARINA J C, et al. Observations related to tetrahydrofuran and methane hydrates for laboratory studies of hydrate-bearing sediments [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2007, **8**(6): 1-10.
- [26] 任静雅, 鲁晓兵, 张旭辉. 水合物沉积物电阻特性研究初探[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 161-165. (REN Jingya, LU Xiaobing, ZHANG Xuhui. Preliminary study on electric resistance of hydrate-bearing sediments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 161-165. (in Chinese))
- [27] LEE J Y, SANTAMARINA J C, RUPPEL C, Volume change associated with formation and dissociation of hydrate in sediment[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2010, **11**(3): Q03007.
- [28] KIM J, SEOL Y, DAI S, The coefficient of earth pressure at rest in hydrate-bearing sediments[J]. Acta Geotechnica, 2021, **16**: 2729-2739.
- [29] LEE J Y, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Mechanical and electromagnetic properties of northern Gulf of Mexico sediments with and without THF hydrates[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, **25**(9): 884-895.
- [30] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3345-3351. (SUN De'an, LIU Wenjie, LÜ Haibo. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3345-3351. (in Chinese))
- [31] HAN Z, VANAPALLI S K. Stiffness and shear strength of unsaturated soils in relation to soil-water characteristic curve[J]. Géotechnique, 2016, **66**(8): 627-647.
- [32] VAN GENUCHTEN M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892-898.
- [33] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Can Geotech J, 1994, **31**: 521-531.
- [34] HAN Z, VANAPALLI S K. Simple approaches for modeling hysteretic soil water retention behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019 **145**(10): 04019064.
- [35] 田慧会, 韦昌富, 魏厚振, 等. 压实黏质砂土脱湿过程影响机制的核磁共振分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(8): 2129-2136. (TIAN Huihui, WEI Cangfu, WEI Houzhen, et al. A NMR-based analysis of drying processes of compacted clayey sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **35**(8): 2121-2136. (in Chinese))
- [36] 陶高梁, 柏亮, 袁波, 等. 土-水特征曲线与核磁共振曲线的关系研究[J], 岩土力学, 2018, **39**(3): 101-107. (TAO Gaoliang, BAI Liang, YUAN Bo, et al. Study of relationship between soil-water characteristic curve and NMR curve [J], Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(3): 101-107. (in Chinese))
- [37] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学: 理论创新、科研方法及治学感悟[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022. (CHEN Zhenghan. Unsaturated Soil Mechanics and Special Soil Mechanics: Theoretical Innovation, Scientific Research Method and Research Insights[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2022. (in Chinese))
- [38] 田慧会, 魏厚振, 颜荣涛, 等. 低场核磁共振在研究四氢呋喃水合物形成过程中的应用[J], 天然气工业, 2011, **31**(7): 97-114. (TIAN Huihui, WEI Houzhen, YAN Rongtao, et al. Application of lowfield NMIR to the studies of the THF hydrate formation process[J]. Natural Gas Industry, 2011, **31**(7): 97-114. (in Chinese))
- [39] ZHOU J, WEI C. Ice lens induced interfacial hydraulic resistance in frost heave[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, **171**: 102964.