

饱和砂中气体运移及地基破坏变形模型试验研究

龙轶雯^{1,2,3}, 王思刘^{1,2}, 孙伟伦^{1,2,3}, 孔德琼^{2,1}, 王路君^{2,1}, 朱斌^{1,2,3*}

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州, 310058; 2. 浙江大学超重力研究中心, 浙江 杭州, 310058; 3. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州, 310058)

摘 要: 气体赋存与运移现象在海底沉积物中普遍存在, 相关规律和机理的研究对于海底设施服役安全评价、海底地貌变化解读以及温室气体泄露预测等方面具有重要意义。为研究饱和砂性土中气体运移及地基破坏变形模式, 本文研制了具备持续恒流精准注气能力的双缸柱塞泵, 对 0.15~0.3 mm (SG 组) 和 0.3~0.6 mm (LG 组) 两种粒径土样进行了注气试验。试验结果表明: 同一粒径的土样中气体突破土体的临界压力与气体注入流量表现出较强的线性相关性, 且两种粒径试验组的突破压力差值与其配位数线性插值得到的最小毛细管压力理论值近似。SG 组砂土中普遍发生毛细入侵-劈裂破坏; LG 组砂土在低速注气下仅发生毛细入侵, 在高流量下则先毛细入侵再发展为劈裂。定义了两个无量纲参数 X_C 和 X_E 衡量毛细力和超孔压对土体破坏变形模式的影响: X_C 影响毛细入侵过程中的运移方向和土体内部的气体饱和度; $X_E > 1$ 为发生劈裂破坏的必要条件, 且 X_E 值越大, 初始劈裂起点高度越低。高流量 SG 组砂土试验中气体持续释放阶段的注气压力有明显的下降趋势, 根据颗粒的流动特征可以推测土体发生流态化。分层土长历时注气试验结束呈现的 V 形土层特征可为流体管道反复喷发导致的地层变形相关假说提供试验论据。

关键词: 气体运移; 砂土; 模型试验; 毛细入侵; 劈裂

中图分类号: **文献标识码:** **文章编号:**

作者简介: 龙轶雯(1997 -), 女, 博士研究生, 主要从事海洋沉积物中液气运移研究。E-mail: longyiwen@zju.edu.cn。

Experimental study on mechanisms governing gas migration in saturated sands and resultant soil deformation

LONG Yiwen^{1,2,3}, WANG Siliu^{1,2}, SUN Weilun^{1,2,3}, KONG Deqiong^{2,1}, WANG Lujun^{2,1}, ZHU Bin^{1,2,3*}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Center for Hypergravity Experimental and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Gas accumulation and migration are common in marine sediments, impacting the safety of subsea infrastructure, the evolution of submarine morphology, and potential greenhouse gas leakage. This study developed a dual-cylinder plunger pump for precise long-term gas injection to investigate gas breakthrough, migration, and associated deformation in saturated sands. Injection tests were conducted on soil samples with particle sizes of 0.15–0.3 mm (Group SG) and 0.3–0.6 mm (Group LG). Results show a strong linear correlation between breakthrough pressure and flow rate for the same grain size. Analysis indicates that the breakthrough pressure difference between the two grain sizes approximates the theoretical minimum capillary force calculated from linear interpolation of the coordination number for different particle arrangements. Regarding deformation patterns: In SG and LG under high injection rates, gas initially invades via capillary invasion, followed by fracture invasion. At low injection rates, LG exhibits only capillary invasion. Two dimensionless parameters, X_C and X_E , were introduced to quantify the influence of capillary forces and excess pore pressure. X_C governs flow direction during the capillary invasion and the gas saturation of the soil. $X_E > 1$ is a necessary condition for fracture invasion and influences the height of the initial fracture onset. At high injection rates in SG, a downward trend in injection pressure suggests soil failure and fluidization. V-shaped features seen in layered soil in long-term gas injection tests can provide evidence for hypotheses related to stratigraphic deformation caused by repeated eruptions of fluid in conduits.

Key words: Gas migration; Sand soil; Model test; Capillary invasion; Fracture invasion

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目 (52127815); 浙江省自然科学基金杰出青年项目 (LR23E090001); 国家自然科学基金基础科学中心项目 (51988101)。

收稿日期: 2024 - 10 - 16

***通讯作者** (E-mail: binzhu@zju.edu.cn)

0 引 言

海底沉积物中的流体运移和喷发是一种广泛存在的地质现象,此过程会在沉积物中形成麻坑、泥火山等地貌单元,甚至引发海底滑坡等地质灾害^[1-2],造成海底基础设施服役风险。海底生态系统依赖喷发的流体输送矿物养分,但其伴生的烃类气体泄漏将导致一系列环境和气候问题^[3]。因此研究海底沉积物中的流体累积、运移及释放机理意义重大。此外,多相流体在多孔介质中的流动特性研究应用于多种工程应用,如 CO₂ 的地质封存^[4]、天然气水合物的开采^[5]等,了解多孔介质中气-水相互作用机制及其引发的介质结构演化有助于这些工程应用的进一步完善和实施。

沉积物中的固-液两相动力学研究表明,流体通道并非固定不变,而是不断演化,形成一个复杂的地下管道系统^[6]。在渗流过程中,通道的不断形成加速了流体迁移,同时通道周围的土体发生流态化,导致饱和和地基的失稳^[7]。对于三相系统(液体、气体和颗粒),液体和气体表现出更为复杂的动力学行为^[8-9]。Campbell 等^[10]、Eriksen 等^[11]和 Boudreau 等^[12]针对气体在颗粒系统中的释放形式,提出了三种不同的机制:气泡连续释放机制、开放通道机制和气泡间歇释放机制。关于气体释放对土体的影响,可以分为两种情况:在小气体流量下,气体通过驱替孔隙水形成优势运移路径,但不会破坏颗粒的骨架结构;在大气体流量下,气体运移会改变周围颗粒的局部排列,甚至将小颗粒夹带运移,导致土体强度降低或失稳破坏。根据气体对土体的不同作用模式。Sun 等^[13]提出了毛细入侵和劈裂入侵两种气体运移模式,当气体压力大于毛细管进入压力时,气体通过将孔隙中的水排开而进入孔隙空间;当气体压力大于土体有效应力时,气体通过排开土体颗粒形成裂缝运移。Guo 等^[14]补充了局部隆起、整体隆起和流态化三种土体破坏模式:气体在局部区域的压力集中导致上覆土层的局部隆起或整体隆起;当土层中颗粒被水流完全抬起,土颗粒呈现类似于液体流动的状态,即发生了流态化。

针对三相系统相互作用机理,诸多学者开展了不同模型尺寸和观测手段的试验研究:Ferer 等^[15-16]采用光刻技术搭建了不同颗粒大小与喉道位置的 2D Hele-Shaw 模型试验,主要研究不考虑重力作用时刚性多孔介质中气体稳定驱替、毛细管指进和黏性指进等运移机理;Sun 等^[13]使用饱和和透明凝胶材料模拟土体以达到可视化的效果,研究了气体进入压力、毛细管压力和有效应力等因素对气体侵入模式的影响,但粘性凝胶材料的性质与沉积物固有的颗粒性质存在差异,因为不能将其视为理想的试验材料;Guo 等^[14]和

Barry 等^[17]基于 CT 成像技术实现了多孔介质系统的气体入侵行为和破坏模式的可视化,但 CT 腔室尺寸受限,无法有效反映沉积物中大尺度流体运移特性。

对于砂土地基中的气体运移和土体破坏变形模式,Varas 等^[18]通过二维和三维试验研究了空气向上通过水饱和的 0.15~0.6 mm 圆形颗粒层的过程,提出气体运移导致的流化区的形状受注气流率和颗粒尺寸的共同影响;Fauria 等^[19]通过监测砂层下方聚集的自由气体柱的体积来测量气体和液体压力之间的超压,通过控制砂层粒径(0.45~2.63 mm 范围内)和高度变量验证了毛细管力和有效应力对气体入侵模式的影响,证明了从高有效应力下的毛细管侵入到低有效应力下的裂缝主导侵入的转变;焦鹏飞^[20]通过对 0.063~0.25 mm 细砂和粉质粘土进行注气试验模拟砂土地基破坏后的麻坑形成过程,得到气体突破时间与土体高度、水深、气压的关系。

上述研究结果表明土层中的气体释放经历了压力累积和释放的循环,多孔介质的颗粒特性、固有渗透率、排水条件、有效应力以及流体粘度、注入速率和压力等因素都会影响气体的释放方式和土体破坏模式。基于南开海槽等地含气砂土地层特性^[21],本文着重机理研究,为提高试验可重复性简化地层条件,使用 0.15~0.3 mm 和 0.3~0.6 mm 的两种粒径砂土进行对比,研究粒径对饱和砂土中气体运移及地基破坏模式的影响。本次试验采用竖直透明亚克力平板模型箱,考虑重力效应下实现试验的可视化。已有研究主要关注气体突破土体的瞬时形态,并未考虑长历时注气后土体的破坏模式,因此本研究研发了一种可实现长时间恒流注气的双缸柱塞泵,以开展相关试验。现有平板试验研究中的注气流量局限在 0~10 mL/min,难以有效模拟海底沉积物中大流量气体的运移过程,因此本文将注气流量范围拓展至 0~100 mL/min,以探讨不同注气流量下,不同粒径土体的破坏压力及气体注入后的破坏特性,并寻找不同破坏变形模式的影响因素。

1 饱和土注气试验

1.1 试验装置

试验装置(图 1-a)由平板模型箱、双缸柱塞泵、信号采集系统和摄像机组成。模型箱由两块透明亚克力板(高 0.15 m,宽 0.1 m)组成,亚克力板间隔 0.005 m(图 1-b)。模型箱底部中间有内径 0.004 m 的注气圆管,注气圆管出口向上伸入土体 0.02 m,入口连接双缸柱塞泵(江苏拓创科研仪器有限公司,TC-500D 型)以控制气体的注入。该双缸柱塞泵主要由泵体、传动机构、伺服电机、气动阀、储气罐和传感器等部

分构成 AB 泵系统（图 1-c），在伺服电机的驱动下，柱塞上下运动，使气体进入或排出泵体，气泵流量调节范围为 0.0001~220 mL/min，单缸容积 500 mL。其特有的双缸串联恒流注气原理是：A 泵运行时，B 泵传感器实时追踪 A 泵压力，直至 A 泵气缸排尽后，系统切换至 B 泵运行，同时 A 泵在补气过程中实时追踪 B 泵，待 B 泵气体排尽又切换为 A 泵进行排气，如此实现大流量下恒流注气不间断的试验目标。模型注气口连接气压力传感器，量程 50 kPa，测量精度为 0.25% FS。试验过程使用摄像机对模型箱进行摄像。

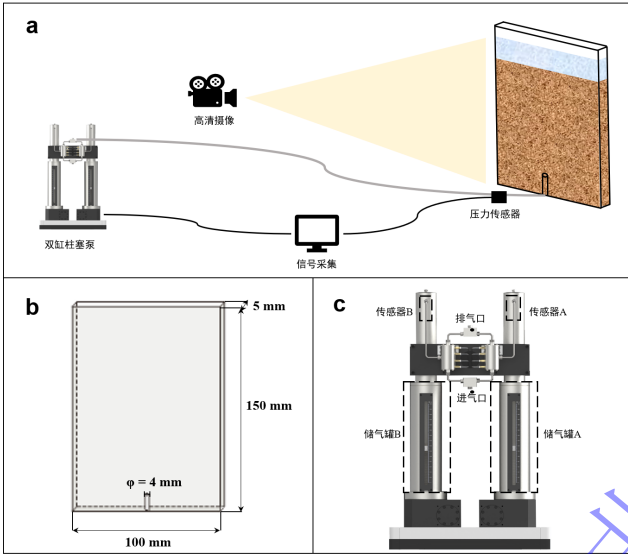


图 1 模型试验装置：a. 试验装置布置示意图（灰色：注气管线路，黑色：信号传输线路）；b. 平板模型箱尺寸；c. 双缸柱塞泵实物图

Fig. 1 Model test apparatus: a. Schematic diagram of the experimental setup; b. Hele-Shaw cell model; c. Dual-cylinder plunger pump

1.2 试验材料

本次试验材料来自福建标准砂，其土体比重 $G_s=2.633$ 。筛选出粒径范围为 0.15~0.3 mm 和 0.3~0.6 mm 的两种砂土作为试验材料，级配曲线见图 2。

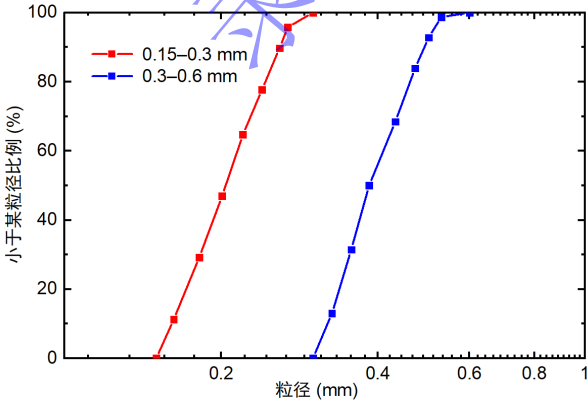


图 2 级配曲线图

Fig. 2 Grain-size distribution curves

0.15~0.3 mm 粒径砂土最小和最大干密度分别为 1.372 g/cm³ 和 1.676 g/cm³，中值粒径 d_{50} 为 0.2 mm；0.3~0.6 mm 粒径砂土最小和最大干密度为 1.434 g/cm³ 和 1.768 g/cm³，中值粒径 d_{50} 为 0.38 mm。为方便后续试验介绍，本文将采用 0.15~0.3 mm 和 0.3~0.6 mm 粒径砂土进行的试验组分别描述为 SG 组砂土试验和 LG 组砂土试验。

1.3 试验流程

本试验采用水下浇砂法制备试样，首先在平板模型箱中倒入 0.02 m 高的水，用小漏斗向模型箱内洒落筛分后的砂土，并通过敲击的方式使砂土密实，控制试样孔隙率 φ 为 0.4。本次试验的砂土总高度为 0.12 m，注气口上方土高 H 为 0.1 m，砂层上部水高 h 为 0.02 m。为了更好地观察注气过程中土体颗粒的迁移情况，在 1~3 组试验中选用了粒径范围相同的两种颜色砂土分层布置，每层厚度 0.02 m。具体试验参数设置见表 1。连接试验装置管线后，启动摄像机录制和入口压力数据采集，然后开启柱塞泵进行恒流注气。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental Conditions			
编号	砂土粒径 d (mm)	注气速率 v (mL/min)	模型地基 类型
1	0.15~0.3	1	分层
2	0.15~0.3	1	分层
3	0.15~0.3	5	分层
4	0.15~0.3	10	均匀
5	0.15~0.3	50	均匀
6	0.15~0.3	100	均匀
7	0.3~0.6	5	均匀
8	0.3~0.6	10	均匀
9	0.3~0.6	20	均匀
10	0.3~0.6	50	均匀
11	0.3~0.6	100	均匀

2 试验结果

2.1 气体突破压力

图 3 为第 4 组试验入口压力时程图，根据气体压力变化情况，可以将试验分为 ABC 三个阶段。A 阶段为气体压力累积阶段，该阶段中气体压力 p_g 不断累积，直到其与孔隙水压力 p_w 的差值超过临界毛细压力时，气体突破土颗粒喉道进行毛细入侵。B 阶段为气体进入土体后释放导致的气压下降阶段，在 B 阶段气体浮力克服毛细力寻找最优路径进行排水（或劈裂），气体通道到达土体顶部释放，累积的气体压力发生骤降。C 阶段为气体持续释放阶段，该阶段气体连续通道可视为气柱，随着注气量的增加，气柱内部的浮力增大，直到克服重力、粘滞力和表面张力，顶部气体

以气泡形式脱离, 导致气柱内部压力下降, 该脱气机制导致持续注气过程中, 气柱压力呈现交替的增长与下降, 使注气压力保持在一稳定数值上下浮动。本文将 AB 阶段的转折点处压力定义为入口峰值压力 p_{brk} , 其压力数值在后续分析中称为气体突破压力; 将 BC 阶段转折点处压力定义为稳定通道压力 p_{cha} , 具体介绍见 2.3 节。

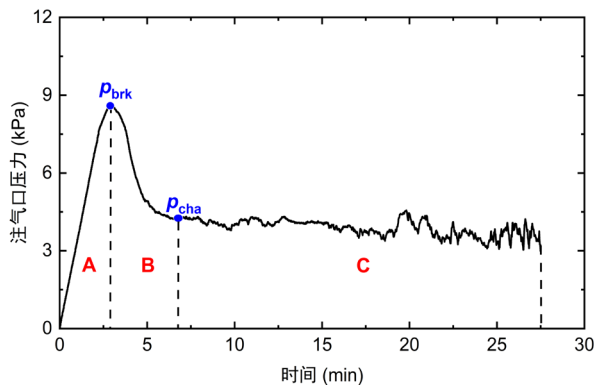


图 3 典型入口压力历程

Fig. 3 Typical time trace of inlet pressure

图 4 展示了不同粒径和不同注气速率试验组的气体突破压力, 对于同一粒径的土样, 气体突破压力与注气流量呈线性正相关; 对于同一注气流量, 气体突破压力随颗粒粒径的增大而减小, 本文中 SG 组和 LG 组试验突破压力差值为 2.133 kPa。下文将重点分析该突破压力差值的决定性影响参数。

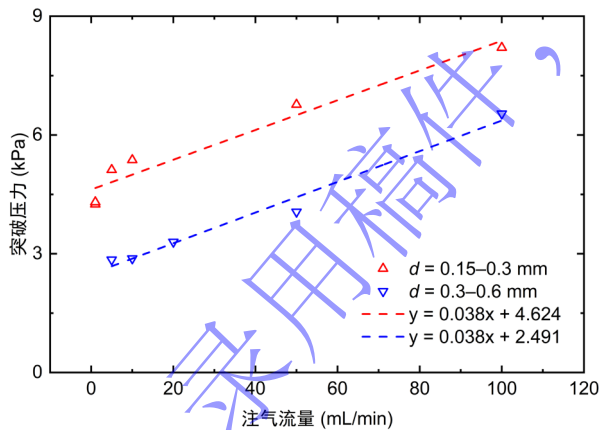


图 4 不同粒径和注气速率试验的气体突破压力

Fig. 4 Gas breakthrough pressure in experiments with different grain sizes and injection rates

基于 Young-Laplace 方程, 假设土体颗粒为球形, 且土颗粒间孔喉半径为 r_c , 可得发生毛细入侵时所需临界气压差为:

$$p_c = p_g - p_w = \frac{2\gamma}{r_c} = \frac{4\gamma}{d_c}, \quad (1)$$

其中水和空气在 20° 下的表面张力 γ 取值为 0.0728 N/m。参考 Geistlinger 等^[22]提出的孔隙率 ϕ 与

颗粒配位方式的关系式 (式 2) 计算出试验砂土的颗粒配位数 Z 为 7.86。

$$\phi = 0.0043\langle Z \rangle^2 - 0.1193\langle Z \rangle + 1.072, \quad (2)$$

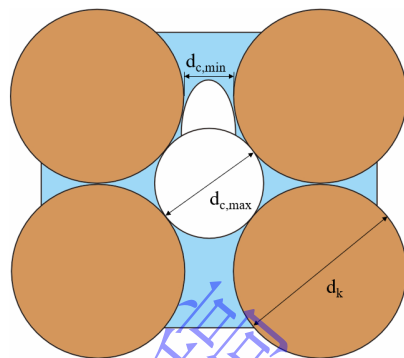


图 5 颗粒间喉道示意图 (改编自 Geistlinger 等^[22]和 Jain 等^[23])

Fig. 5 Schematic diagram of particle throat

参考 Geistlinger 等^[22]推导的不同颗粒配位方式下, 气体在孔喉最小和最大位置 (图 5) 入侵对应的直径系数关系式:

$$d_{c,min} = \xi_{min} \cdot d_k = (0.155-0.414)d_k, \quad (3)$$

$$d_{c,max,1} = \xi_{max} \cdot d_k = (0.458-0.732)d_k, \quad (4)$$

基于立方体心排列和简单立方排列这两种土颗粒排列方式对应颗粒配位数 Z 分别为 12 和 6, 对相应的孔喉直径系数 (式 3、4) 进行线性插值, 得到试验砂土的最小喉道系数 ξ_{min} 和最大喉道系数 ξ_{max} 分别为 0.334 和 0.647, 进而得到两组砂土的理论平均喉道系数 $d_{c,mean}$:

$$d_{c,mean} = \frac{(\xi_{min} + \xi_{max})}{2} \cdot d_k, \quad (5)$$

参考 Jain 等^[23]用平面几何方法对直径 d_k 的球形颗粒相接触形成的空心腔体尺寸进行推导, 得到相邻球形颗粒间的距离为 $d_{c,min}$ 时的喉道尺寸 $d_{c,max,2}$:

$$d_{c,max,2} = \left(\sqrt{1 + \left(1 + \frac{d_{c,min}}{d_k} \right)^2} - 1 \right) \cdot d_k, \quad (6)$$

根据式 (3) ~ (6) 中得到的不同喉道直径代入式 (1) 计算两组不同粒径土体的毛细入侵压力, 其中多孔介质平均颗粒直径 d_k 取两组砂土的中值粒径 d_{50} , 计算结果如表 2 所示。本次试验得到的 SG、LG 试验组气体突破压力差值为 2.133 kPa, 与采用 $d_{c,min}$ 计算出的两种砂土毛细入侵压力差值最为接近, 可知粒径对突破压力的影响由最小喉道尺寸的毛细压力决定。需要指出的是, 计算式 (2) 假定砂土颗粒为圆球形玻璃珠, 而本试验中砂土的砂粒形状和大小的不均匀性会影响实际孔隙率和配位数, 因此喉道尺寸和突破压力的准确计算需要更详细的试验数据和更复杂的模

型。本试验着重机理研究，从微观颗粒结构出发进行理论验证，宏观砂土地基中的适用性还需通过进一步大模型试验比尺验证进行完善。

表 2 毛细入侵临界压力 p_c 计算结果

Table 2 Theoretical value of the capillary invasion pressure p_c					
	$p_c(d_{50})$ /kPa	$p_c(d_{c,min})$ /kPa	$p_c(d_{c,max,1})$ /kPa	$p_c(d_{c,mean})$ /kPa	$p_c(d_{c,max,2})$ /kPa
0.15~0.3 mm	1.456	4.359	2.250	2.968	2.934
0.3~0.6 mm	0.766	2.294	1.184	1.562	1.073
Δp	0.690	2.064	1.066	1.406	1.862

2.2 土体破坏与变形模式

图 6 为 SG 组砂土在不同流量注气试验过程中不同阶段的典型现象。

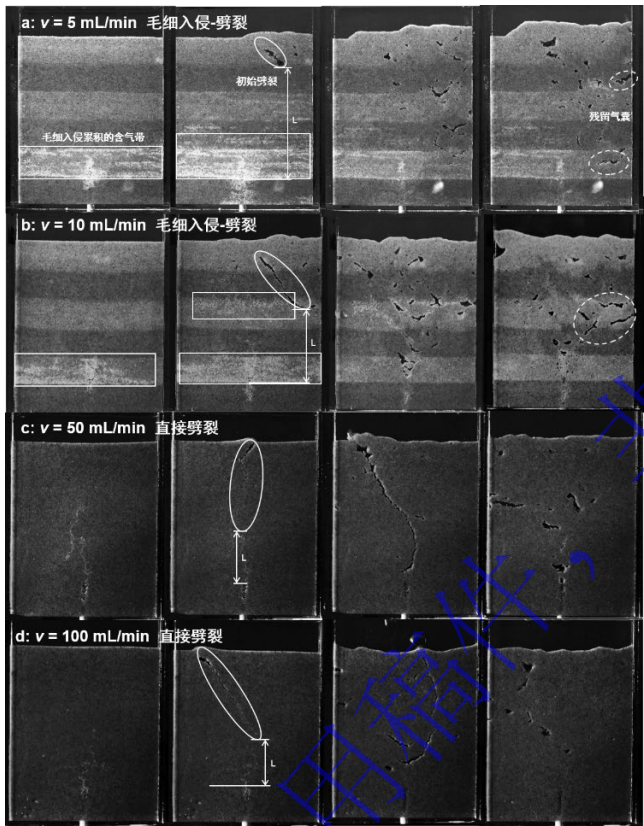


图 6 注气速率对砂土破坏形式的影响（方形框：含气带，椭圆形实线框：初始裂缝，椭圆形虚线框：残留条状气囊）

Fig. 6 The impact of gas injection rates on soil deformation patterns

在低流量下（5 mL/min、10 mL/min），气体进入饱和土体初期通过毛细入侵在土体中运移，形成含气带，当含气带向上发展到一定高度时，土体发生劈裂，形成贯穿至土体顶部的斜向裂缝，气体通过裂缝溢出。气体溢出后裂缝暂时闭合，当有气体再次运移时裂缝又重新张开，并且会不断形成新的裂缝。随着注气的长时间进行，土体内部出现由于裂缝中气体未完全释放残留下的条状气囊，注气初期积累的含气带也基本消失，如图 6（a）（b）所示。本文将这种在低流量条

件下 SG 组砂土中发生的破坏模式定义为毛细入侵-劈裂破坏。在高流量下（50 mL/min、100 mL/min）土体中未产生明显含气带，气体纵向入侵后通过形成长条裂缝运移。在裂缝反复迭代过程中，观察到细颗粒被裂缝中气流抬起或随气流边缘流动的现象，此现象导致颗粒骨架结构改变，土体发生流态化破坏，颗粒流动程度随着注气时间加剧，试验组注气速率的增大也对颗粒流动产生了明显的增强效果。从图 6 中初始劈裂起点距注气口的垂直距离 L 可以看出，毛细入侵过度到劈裂入侵的初始裂缝起点高度随注气流量的增大而减小，这可能是由于突破压力 p_{brk} 随注气流量的增大导致的。

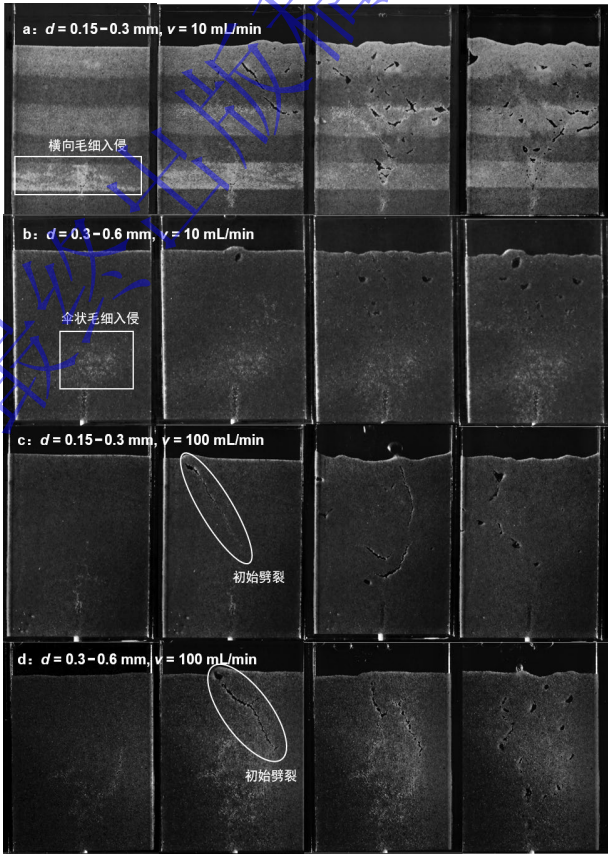


图 7 颗粒粒径对砂土破坏形式的影响

Fig. 7 The impact of grain sizes on soil deformation patterns

图 7（a）（b）为在 10 mL/min 的注气速率下 SG、LG 组砂土的试验现象。与 SG 组中的优先横向排水和毛细入侵-劈裂破坏形式不同，在 LG 组中，气体全程以毛细入侵模式在土体内部运移，形成伞状含气带，直到土体顶部区域隆起小土丘随后释放气泡。随着注气的持续进行，土体不断发展新的排水通道，与旧通道交替释放气泡。图 7（c）（d）为在 100 mL/min 的注气速率下 SG、LG 组砂土的试验现象。两组试验在高流量注气初始过程中表现的破坏类型类似，均为气体通过毛细入侵向上运移，随后发生劈裂入侵释放气体，但 LG 组土体中的初始裂缝宽度更宽，观察到气

体在向上运移过程中会带走部分细颗粒并将其释放在土体表面，同时气体通道保持相对稳定。

参考 Shin 等^[24]和 Alfaro 等^[25]对颗粒介质中水力压裂起裂与扩展机制的系统研究，斜向裂缝的产生机制可归因于两种典型破坏模式：一种是孔隙流体压力超过抗拉强度所诱发的张拉破坏，另一种是符合摩尔-库仑准则的剪切破坏机制。这两种破坏机制均强调劈裂破坏的发生与有效应力状态密切相关。由于毛细入侵和劈裂入侵两种破坏模式分别受毛细管压力和有效应力主导，本文使用两个无量纲参数 $X_C = p_c / \sigma'$ 和 $X_E = \Delta u / \sigma'$ 表示毛细管压力、超孔压对破坏模式转变的影响。其中 p_c 是气体通过颗粒间喉道需要克服的毛细管力，根据 2.1 节选用式 3 进行计算。假设气体为连续体，气体在到达注气入口发生突破的瞬间，其前端压力全部由孔隙水承担，所造成的注气口处气体超压 Δu 取试验测得的气体突破压力 p_{brk} 与净水压力间的差值；有效应力 σ' 根据有效应力原理 (Terzaghi, 1943) 计算。

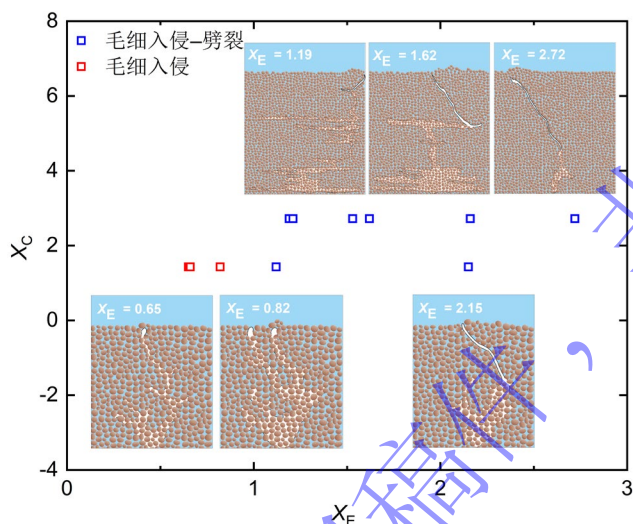


图 8 土体破坏模式与破坏因子 X_C 、 X_E 关系示意图 (蓝色: 水, 白色: 气体, 褐色: 土颗粒)

Fig. 8 The relationship between soil deformation patterns and impact factors X_C , X_E

图 8 给出了土体破坏模式与破坏因子 X_C 、 X_E 关系的示意图。 X_C 主要影响毛细入侵的方向和土体内部的气体饱和度，在 X_C 较小时，气体向四周呈伞状均匀入侵；在 X_C 较大时毛细入侵通道大量横向发展，排水范围和气饱和度更大。 X_E 决定试样注气过程中是否发生劈裂，当 $X_E \leq 1$ 时，气体只发生毛细入侵，通过排出多孔介质中的孔隙水形成通道释放气体；当 $X_E > 1$ 时，气体通过毛细入侵向上运移，到达一定高度时劈裂土体释放，且初始劈裂起点高度 L 随 X_E 增大而减小。

2.3 长历时注气效应

在饱和土的注气试验中，气体在土体中的累积和

突破过程 (AB 阶段) 往往只需要几十秒到几分钟。当第一个气泡在土体顶部释放，即意味着土体中已经形成一条运移通道，在后续的持续注气过程中，气体会沿着这条通道或者产生新的运移通道持续释放气泡。本文将试验中首个气泡在土体表面释放后的持续出气过程定义为 C 阶段 (如图 3)，该阶段注气口气压相较于 p_{cha} 会出现小幅上下浮动，是由于连续气体通道的脱气机制导致持续注气过程中气柱压力的增大和气泡释放后气柱压力降低的循环。

图 9 展示了不同试验组别的长历时注气时程曲线，在低注气流量 (1~20 mL/min) 下，SG 和 LG 组 C 阶段的气体压力都维持在 p_{cha} 上下浮动；而在高注气流量 (50~100 mL/min) 下，SG 组 C 阶段气体压力相对 p_{cha} 发生了明显的降低。由于在高注气流量下，气体入侵后土体快速发生劈裂，且裂缝坍塌后又快速生成新的裂缝通道释放气体，该过程反复交迭后土体残留大量短裂缝和条形气囊，土体整体向上抬升。结合 2.2 节在裂缝的迭代过程中观察到的土体颗粒流动特征，图 9 (c) (d) 中注气压力发生明显下降可能是因为细粒径土体骨架在高流量气体注入下快速更新气体通道，颗粒间的接触和摩擦力减小，结构被破坏，导致其承载能力和抵抗变形的能力降低，柱塞泵维持恒定流量气体通道所需的压力降低。

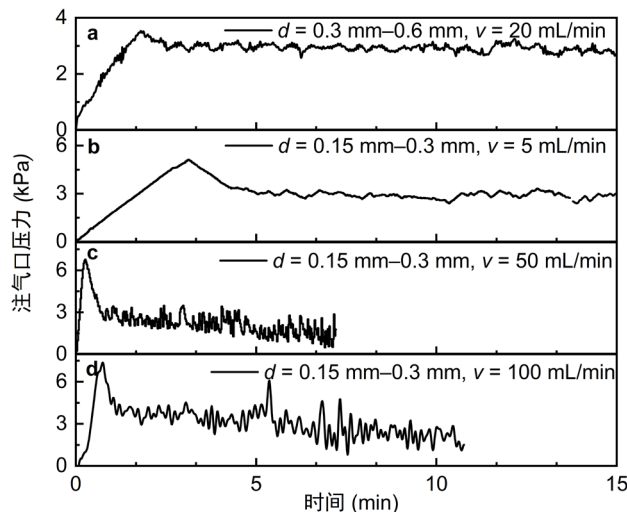


图 9 长历时注气时程曲线: a、b. 低流量注气稳定后注气口压力稳定 (土体未发生流态化); c、d. 细颗粒高流量注气稳定后注气口压力下降 (土体发生流态化)

Fig. 9 Time trace of gas injection: a, b. Pressure remains stable in low-speed tests; c, d. Pressure decreases in high-speed tests

图 10-a 展示了采用两种颜色细砂分层布置的土样试验现象，可以观察到在经过裂缝的反复生成和坍塌后，注气口两侧的土体颗粒随气流逐渐向斜上方运移，并在土层中形成 V 形褶皱，且土体有明显的整体抬升现象。Gay 等^[26]研究了地中海西北部麻坑和流体

管道所在位置粉质砂层下的三维地震剖面图（图 10-b），通过分析 V 形构造周围沉积物层密度或流体流量的突变，提出流体运移管道中流体反复循环喷发导致地层变形这一假说。

类似的地质构造在北海 Faeroe-Shetland 盆地砂岩层中也被观测到（图 10-c），其楔形侵入体沿两侧向外逐渐变细，Cartwright 等^[27-28]认为这些地层褶皱是由于流体在侵入过程中对上覆岩层的超压造成的。这些地震剖面图和本文中分层土长历时注气结束后呈现的 V 形特征及土体抬升现象相似，本试验结论可以为自然界中的 V 型褶皱/楔形地貌形成机理提供依据。

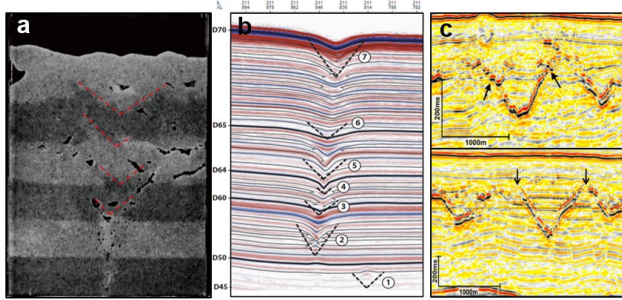


图 10 a. 10 mL/min 流量注气 30min 后土体呈现 V 形土层特征; b. 地中海西北部陆架到深海盆地麻坑下流体通道呈现的 V 形褶皱 (Gay 等^[26]); c. 北海 Faeroe-Shetland 盆地地下砂岩中的楔形侵入体(Cartwright 等^[27])

Fig. 10 a. V-shaped folds beneath the pockmarks; b. Conical sandstone intrusions; c. V-shaped soil layer features in test

3 结 论

为揭示砂性土中气体运移和突破规律以及不同参数对土体变形模式的影响，本文采用具备持续恒流精准注气能力的双杠柱塞泵开展了可视化的注气试验。制备了 0.15~0.3 mm (SG 组) 和 0.3~0.6 mm (LG 组) 两种粒径的砂土试样，共进行了 8 组均匀土试验和 3 组分层土试验。主要得出以下结论：

(1) 试验重现了气体在饱和砂土层中运移的三个阶段：气体在土层中的压力累积阶段、侵入土体后通过最优路径释放阶段和气体持续释放阶段。对于同一粒径范围的土样，气体突破压力与注气流量呈线性正相关；粒径差异造成的气体突破压力差值与对配位数线性插值得到的最小毛细管理论值近似。

(2) SG 组观察到毛细入侵-劈裂破坏；LG 组低流量下只发生毛细入侵，高流量下气体毛细入侵后劈裂土体释放。为量化毛细力和超孔隙水压力的影响，引入两个无量纲参数 $X_C = p_c / \sigma'$ 和 $X_E = \Delta u / \sigma'$ 。 X_C 影响毛细入侵过程中的运移方向和气饱和度。 $X_E > 1$ 时，气体通过毛细入侵运移，运移到一定高度时劈裂土体释放，且初始劈裂起点高度 L 随 X_E 增大而减小； $X_E \leq 1$ 时，

气体仅通过毛细入侵释放气体。

(3) 对于气体持续释放阶段的注气压力，高流量 (50~100 mL/min) 下 SG 组的注气压力相对 p_{cha} 有明显的下降趋势。结合裂缝快速迭代过程中观察到的颗粒流动特征，注气压力的下降可能是由于土体在高流量气体注入下颗粒骨架结构被破坏，土体发生流态化。此外，分层土长历时注气试验结束呈现的 V 形土层特征与自然界中的 V 型褶皱吻合度较高，为管道中流体反复循环喷发导致的地层变形相关假说提供了试验论据。

参考文献：

- [1] ANDREASSEN K, HUBBARD A, WINSBORROW M, et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor[J]. Science, 2017, 356(6341): 948-953.
- [2] SUCKALE J, KELLER T, CASHMAN K V, et al. Flow-to-fracture transition in a volcanic mush plug may govern normal eruptions at Stromboli[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(23): 12071-12081.
- [3] BOHRMANN G, HEESCHEN K, JUNG C, et al. Widespread fluid expulsion along the seafloor of the Costa Rica convergent margin[J]. Terra Nova, 2002, 14(2): 69-79.
- [4] SZULCZEWSKI M L, MACMINN C W, HERZOG H J, et al. Lifetime of carbon capture and storage as a climate-change mitigation technology[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(14): 5185-5189.
- [5] FAURIA K E, REMPEL A W. Gas invasion into water-saturated, unconsolidated porous media: Implications for gas hydrate reservoirs[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 312(1-2): 188-193.
- [6] RIGORD P, GUARINO A, VIDAL V, et al. Localized instability of a granular layer submitted to an ascending liquid flow[J]. Granular Matter, 2005, 7(4): 191-197.
- [7] WILHELM T, WILMAN K. On the onset of flow instabilities in granular media due to porosity inhomogeneities[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(12): 1929-1944.
- [8] 包承纲, 詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 129-136. (BAO Chenggang, ZHAN Liangtong. Relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 129-136. (in Chinese))
- [9] VARAS G, VIDAL V, GÉMINARD J C. Venting dynamics of

- an immersed granular layer[J]. *Physical Review E*, 2011, **83**(1): 011302.
- [10] CAMPBELL JM, OZTURK D, SANDNES B. Gas-driven fracturing of saturated granular media[J]. *Physical Review Applied*, 2017, **8**(6): 064029.
- [11] ERIKSEN J A, MARKS B, SANDNES B, et al. Bubbles breaking the wall: Two-dimensional stress and stability analysis[J]. *Physical Review E*, 2015, **91**(5): 052204.
- [12] BOUDREAU B P, ALGAR C, JOHNSON B D, et al. Bubble growth and rise in soft sediments[J]. *Geology*, 2005, **33**(6): 517-520.
- [13] SUN Z H, SANTAMARINA J C. Grain-displacive gas migration in fine-grained sediments[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2019, **124**(3): 2274-2285.
- [14] GUO Z Q, GAO X B, WU H Y, et al. Failure patterns in layered gas-storage systems[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2024, **12**(3): 183-193.
- [15] FERER M, JI C, BROMHAL G S, et al. Crossover from capillary fingering to viscous fingering for immiscible unstable flow: Experiment and modeling[J]. *Physical Review E*, 2004, **70**(1): 016303.
- [16] TOUSSAINT R, LØVOLL G, MÉHEUST Y, et al. Influence of pore-scale disorder on viscous fingering during drainage[J]. *Europhysics Letters*, 2005, **71**(4): 583-589.
- [17] BARRY M A, BOUDREAU B P, JOHNSON B D, et al. First-order description of the mechanical fracture behavior of fine-grained surficial marine sediments during gas bubble growth[J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2010, **115**(F4): 2010JF001833.
- [18] VARAS G, RAMOS G, GÉMINARD J C, et al. Flow and fracture in water-saturated, unconstrained granular beds[J]. *Frontiers in Physics*, 2015, **3**(4).
- [19] FAURIA K E, REMPEL A W. Gas invasion into water-saturated, unconsolidated porous media: Implications for gas hydrate reservoirs[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, **312**(1-2): 188-193.
- [20] 焦鹏飞. 北黄海海底麻坑沉积物特征分析及麻坑形成模型试验研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2018. (JIAO Pengfei. Study on the sediment characteristics of the seabed pockmark in the North Yellow Sea and the model test of pockmark forming[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2018. (in Chinese))
- [21] UCHIDA T, TSUJI T. Petrophysical properties of natural gas hydrates-bearing sands and their sedimentology in the Nankai Trough[J]. *Resource Geology*, 2004, **54**(1): 79-87.
- [22] GEISTLINGER H, KRAUSS G, LAZIK D, et al. Direct gas injection into saturated glass beads: Transition from incoherent to coherent gas flow pattern[J]. *Water Resources Research*, 2006, **42** (7).
- [23] JAIN A K, JUANES R. Preferential mode of gas invasion in sediments: grain-scale mechanistic model of coupled multiphase fluid flow and sediment mechanics[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2009, **114**(B8): B08101.
- [24] SHIN H. Development of discontinuities in granular media[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2009.
- [25] ALFARO M C, Wong R C K. Laboratory studies on fracturing of low-permeability soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*. 2001, **38**(2): 303-315.
- [26] GAY A, CAVAILHÈS T, GRAULS D, et al. Repeated fluid expulsions during events of rapid sea-level rise in the Gulf of Lion, western Mediterranean Sea[J]. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 2017, **188**(4): 24.
- [27] CARTWRIGHT J, JAMES D, HUUSE M, et al. The geometry and emplacement of conical sandstone intrusions[J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, **30**(7): 854-867.
- [28] TAYLOR M H, DILLON W P, PECHER I A. Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Blake Ridge Diapir: new insights from seismic data[J]. *Marine Geology*, 2000, **164**(1-2): 79-89.