

# 水合物分解气体泄漏引起的海床破坏实验研究<sup>1)</sup>

魏 伟<sup>\*,†,2)</sup> 陈旭东<sup>\*\*</sup> 鲁晓兵<sup>\*\*</sup> 张旭辉<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> (中国地质大学 (北京), 北京 100083)

<sup>†</sup> (中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

<sup>\*\*</sup> (中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要** 海床下水合物分解可能造成大量的生成气体泄漏. 气体渗漏一方面造成海床表层的破坏; 另一方面使得海水密度减小造成海上一些结构的安全隐患. 本文通过实验研究泄漏气体在水中上升过程中的扩散行为, 以及渗漏对海底粉砂土海床的破坏规律. 考虑压力, 盖层厚度在渗漏气体对盖层土体形态破坏的影响, 获得了气体在水中上升过程中的扩散角的特点, 以及气体泄漏导致的海床冲刷坑范围随气体压力、土层厚度的变化规律, 可以为进一步的研究和工程应用提供参考.

**关键词** 水合物, 泄漏, 海床破坏

中图分类号: P744.4 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0879-13-152

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE SEA FLOOR DAMAGE DUE TO GAS ESCAPE IN HYDRATE DISSOCIATION<sup>1)</sup>

WEI Wei<sup>\*,†,2)</sup> CHEN Xudong<sup>\*\*</sup> LU Xiaobing<sup>\*\*</sup> ZHANG Xuhui<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> (School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

<sup>†</sup> (Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, Hebei, Langfang 065007, China)

<sup>\*\*</sup> (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** The dissociation of gas hydrate in seabed produces a lot of gas. If the seabed is permeable, the gas will escape, which will lead to the damage of the seabed, and to the decrease of the density of sea water and to threaten the safety of the structures above. In this paper, the movement and the expansion behavior of gas in the water are studied, then the damage of the seabed due to the gas escape is analyzed. The effects of gas pressure and thickness of soil layer are investigated. The expansion angle of gas in the water is obtained. The characteristics of the hole size induced by the gas escape under various gas pressure and soil thickness are also obtained. These results can be used in further research and practice.

**Key words** gas hydrate, gas escape, seabed damage

## 引 言

天然气水合物是在高压和低温条件下, 由水和天然气组成的类冰的笼形结晶化合物. 天然气水合物广泛分布在大陆、海洋和一些内陆湖的深水环境, 是一种重要的潜在能源<sup>[1-2]</sup>.

地下高压气体容易造成渗漏<sup>[3]</sup>. 当然, 渗漏的快慢与地层的渗流特性密切相关<sup>[4]</sup>. 水合物分解

也同样可能造成水合物的渗漏. 随着水合物范围扩大<sup>[5-6]</sup>, 分解释放的天然气超过气体饱和度, 在沉积物中产生气泡, 在不排水排气或低渗条件下, 孔隙压力会急剧增加, 分解区域的沉积物的有效应力减小, 沉积物的强度大大衰减<sup>[7-8]</sup>, 导致海床滑塌或其中结构物的破坏<sup>[9-13]</sup>. 当水合物盖层为高渗漏的土层时, 气体逸出后一方面造成海床表层的破坏; 另一方面形成的气泡在海水中上升, 当逸出气体的量足

2013-04-17 收到第 1 稿, 2013-05-31 收到修改稿.

1) 中国石油天然气集团公司科技管理部“天然气水合物资源潜力分析及勘探评价技术研究”项目 (2011A-4806) 资助.

2) 魏伟, 1966 年生, 男, 在站博士后, 高级工程师, 主要从事天然气水合物等非常规能源的研究工作. E-mail: weile@petrochina.com.cn

够大时, 会使得海水密度减小. 这就可能对海上一些结构, 如船舶, 海上浮式平台造成安全隐患<sup>[14]</sup>. 因此, 对海底天然气水合物分解渗漏可能造成的灾害的研究在工程上有重要意义.

地层中水合物分解后,  $1\text{m}^3$  水合物可以产生  $164\text{m}^3$  气体, 如果完全没有泄漏的话, 可以产生高达  $50\text{MPa}$  的孔隙压力<sup>[15]</sup>. 一旦孔隙压力超过了上覆层重量和拉伸强度, 上覆层就会破坏, 如发生分层和喷发破坏<sup>[16]</sup>.

本文通过实验模拟并观测分析气泡在水中上升过程中的扩散角; 通过实验模拟水合物分解渗漏后对海底土体的破坏规律, 考虑不同压力, 不同盖层厚度下, 对渗漏气体对盖层土体可能造成的形态破坏进行观察分析.

## 1 气泡扩散角实验

实验主要是研究气体从海底水合物的上覆层渗漏到水中后上升并扩散的过程, 故实验中直接用不同压力的气体从模型箱底部喷出以模拟不同水合物分解条件下的渗漏情况. 这样可使实验简便快速且满足研究目的. 实验布置: 实验水槽 (长  $\times$  宽  $\times$  高 =  $50\text{cm} \times 10\text{cm} \times 50\text{cm}$ , 水槽上画有角度分割线,  $30^\circ$  以内每两条线之间的角度是  $5^\circ$ )、照相机、气压控制装置、空气泵等. 实验装置如图 1.

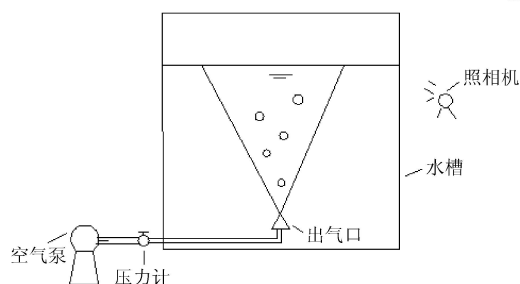


图 1 气泡扩散角实验装置示意

实验中采用模型箱底部小孔排出一定压力气体模拟气体泄露, 小孔出口直径为  $3\text{cm}$ ,  $6\text{cm}$  两种情况. 每种孔径下水深采用  $25\text{cm}$ ,  $35\text{cm}$  和  $40\text{cm}$  3 种情况观测水深的影响. 气体采用的是空气, 实验温度为室温, 使用压力计控制气压, 分别观察不同出口气压下 (模拟不同渗漏强度, 实验中采用的出口气压为  $2.5\text{kPa}$ ,  $5\text{kPa}$ ,  $7.5\text{kPa}$ ,  $12.5\text{kPa}$ ,  $15\text{kPa}$ ,  $17.5\text{kPa}$ ,  $20\text{kPa}$ ) 气泡的上升运动并用相机拍下各个压力下气泡的运动图像.

实验中观察到不同压力下气泡运动图像类似,

如图 2 所示. 气泡羽流边界在接近出气口附近的扩散角均在  $5^\circ \sim 10^\circ$ , 接近液面处出气泡扩散范围相对大一些, 比  $10^\circ$  略大. 气泡的扩散大致是按直线扩散的, 扩散角约为  $10^\circ$ . 液面高度以及出口孔径对气泡的扩散角影响很小.

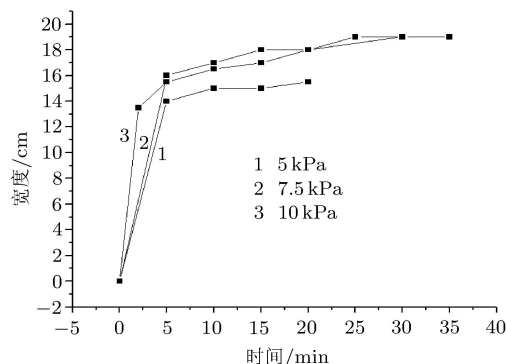


图 2 表面破坏区宽度随时间变化

## 2 可致水中结构下沉的气泡含量

设当船体刚好下沉时为临界状态, 即结构物重量刚好等于浮力

$$\rho_c = G/V_s$$

其中,  $\rho_c$  为临界密度,  $V_s$  为船总体积,  $G$  为船重和其上载重之和.

由于气体的质量与海水质量相比太小, 故计算时忽略气泡的质量, 则对任一海水密度  $\rho$

$$\rho = \frac{\rho_w V_w}{V_w + V_g}$$

令  $V_g/(V_w + V_g) = \omega$ , 则对于任意密度对应的气泡体积的百分含量  $\omega$  有

$$\omega = \rho/\rho_w$$

那么当海水密度为临界密度时海水中气体体积的百分含量为

$$\omega_c = \rho_c/\rho_w$$

其中  $\omega_c$  为气体体积的百分含量,  $V_w$  为水的体积,  $V_g$  为气泡的体积,  $\rho_w$  为水的密度.

由气泡扩散角试验可知, 气泡上升时的扩散角度约为  $10^\circ$ . 故这里采用气泡扩散角  $10^\circ$  来分析能引发海上结构下沉时水体中气体的总量. 考虑含有渗漏气体的海水区域为一锥形. 假设水体高度为  $h$ , 则水体表面气泡所在区域的半径为  $r = h \tan 10^\circ$ . 设进入该区域的气体总体积为  $a$ , 天然气水合物在海

水中的溶解度为  $\beta$  (由资料查得 1 体积的水可以溶解约  $3.136 \times 10^{-2}$  体积的天然气)。

锥形的体积为

$$V = \frac{\pi r^2 h}{3} = \frac{\pi h^3 \tan^2 10^\circ}{3}$$

由前一节分析得到的临界密度, 考虑总的进气量内水体中所含气泡和已经溶解于水中的气体组成, 则能引发海上结构下沉的进气总量为

$$a = [(1 - \omega_c) \beta + \omega_c] V$$

### 3 气泡对土体破坏的实验模拟

#### 3.1 实验内容及实验装置

这一节的目的是研究水合物生成气体的渗漏对上覆盖层的破坏, 实验中不直接用水合物沉积物进行实验, 而是用不同压力的气体模拟不同水合物分解条件下的渗漏及对土体的冲刷情况。这样可使实验简便快速且满足研究目的。实验主要是通过在水箱内埋入一定高度, 一定密度的土体, 然后通过模型箱底部排气孔排出不同压力气体的方法来模拟海底天然气水合物分解渗漏后对水合物盖层的破坏。实验水箱尺寸为  $50 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 。采用的气体是空气, 土体采用的是粉砂土 (干密度为  $1600 \text{ kg/m}^3$ ), 渗透性在  $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$  范围, 内摩擦角约  $35^\circ$ 。

#### 3.2 实验过程

砂土的初始含水率为  $w = 6.35\%$ , 土层深度采用 10 cm, 15 cm, 25 cm 3 种情况以模拟以上覆盖层厚度的影响。出口气体压力分别采用 2.5 kPa, 5 kPa, 7.5 kPa, 10 kPa, 12.5 kPa 以模拟气体的渗漏强度的影响。实验时首先配置土体到设定的高度, 然后将水从模型箱底部阀门慢慢渗入水槽中直到液面距土体顶面的距离为 20 cm 时关闭阀门, 然后让其沉淀一段时间开始进行实验。用压力计控制压力, 开始实验。实验中观察土体的破坏发展过程、破坏的最终形态, 并量取记录土体破坏区的最终宽度和高度。

#### 3.3 实验结果

##### (1) 土层厚度 10 cm 时的实验结果

当压力为 2.5 kPa 时, 打开阀门后气体从土体底部喷出, 气泡从土体表面冒出。气体渗漏后对其上覆具有渗透性的覆盖层产生破坏, 土体呈现锥形破坏, 圆锥的宽度和高度分别为 9 cm 和 2 cm。土体破坏区随着时间的增加而不断扩展变大, 一定时间

之后土体破坏区趋于稳定, 不再变化。压力越大, 达到最终破坏形态的时间也越久。各个出口压力下破坏区宽度和深度随时间的变化见图 2 和图 3。随着压力增加, 破坏区的尺寸增加, 增长速度也增加。在 5 kPa 与 7.5 kPa 时的最大破坏区尺寸接近, 虽然 7.5 kPa 时的增长速度更快。显然, 压力越大, 气体流速越快, 对土体的冲刷和破坏作用越强。

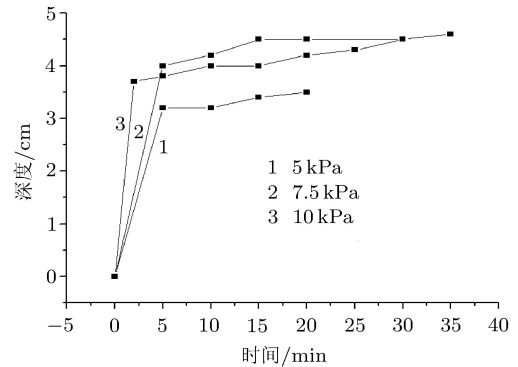


图3 土体破坏区深度随时间变化

##### (2) 土深度 15 cm 的情况

液面到土体顶面的距离  $h_w = 20 \text{ cm}$ 。实验时首先打开通气阀门, 加压至 2.5 kPa, 气泡先是在土体表面渗出, 气泡喷出的位置固定于沿进气口竖直方向, 水体开始变浑浊。随着时间的延长, 有气泡带出砂砾开始沉淀下来。实验过程中土体破坏区的宽度随时间的增长而变大, 一段时间后, 破坏区的范围基本不变。在其他压力 (5 kPa, 7.5 kPa) 下, 实验现象相似, 但是随着压力的增加, 破坏区的尺寸明显增加, 且较土深度 10 cm 时的大 (图 4, 图 5)。随着土层厚度增加, 气体渗流通过的距离增加, 扩散半径也增加, 因此冲坑的尺寸也随着增加。

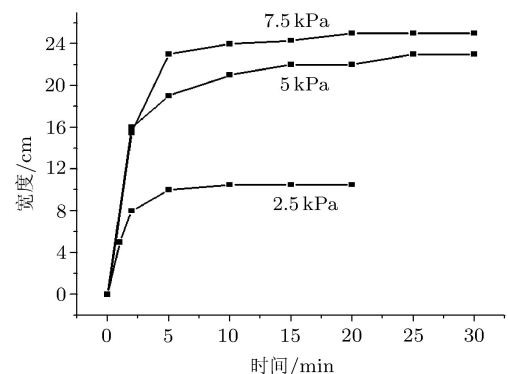


图4 破坏区的宽度 (土厚 15 cm)

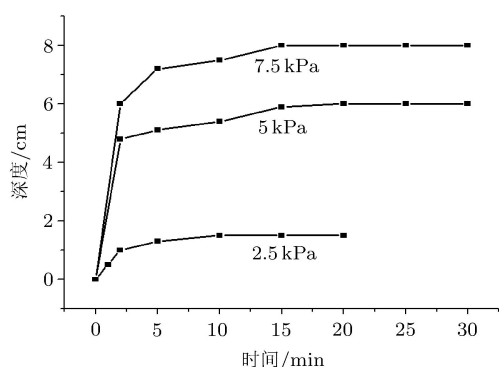
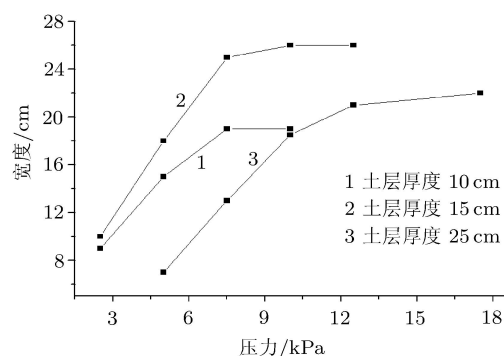


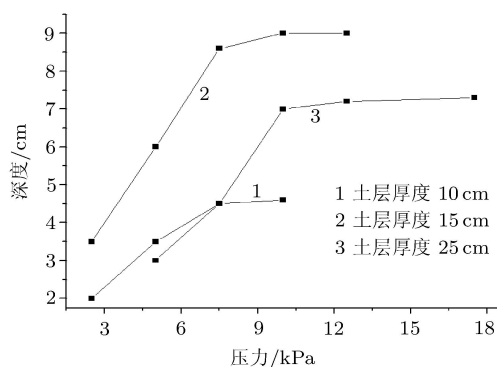
图 5 破坏区的深度 (土厚 15 cm)



(a) 宽度随压力的变化

(3) 土层厚 25 cm 的情况

第 3 组实验土高 25 cm, 液面到埋土顶面的距离  $h_{水} = 20$  cm. 实验时当压力为 2.5 kPa 时, 打开通气阀门, 在土体顶面无气泡冒出, 在此条件下放置约 30 min, 土体表面仍无气体逸出, 土体未破坏. 出口压力为 5 kPa 时, 土体中央有气泡冒出, 带走少量的土体, 土体表面逐步发展破坏, 但区域较小. 破坏区宽度和高度分别为 7 cm 和 3 cm. 控制出口压力在 7.5 kPa, 10 kPa, 12.5 kPa, 17.5 kPa 时, 土体破坏现象与出口压力 5 kPa 时类似. 7.5 kPa 时土体破坏区宽度和深度见表 1. 气体压力一定时, 土层越厚, 气体受到的阻力也越大, 当超过一定厚度时, 气体压力不足以从土体表面冲刷走土体颗粒, 就观测不到破坏区. 因此, 对于一定的渗漏气体压力, 存在一个最大破坏区对应的土体厚度, 低于这个厚度, 破坏区尺寸随土体厚度而增加, 之后则减小.



(b) 深度随压力的变化

表 1 压力 7.5 kPa 时土体破坏区宽度和深度

压力 = 7.5 kPa		
时间/min	宽度/cm	高度/cm
0	0	0
5	10	4
10	11	4.5
15	13	4.5
20	13	4.5
25	13	4.5

利用以上 3 组实验所得的不同压力下土体破坏区的最终宽度和高度做出土体破坏区随压力的变化曲线, 如图 6 所示. 可以看出, 土体破坏后, 在一定压力范围内, 土体破坏区的宽度和高度与压力的增长近似成线性关系. 在压力增长到一定值后, 破坏区的宽度和高度基本不再随压力的变化而变化. 且盖层土体高度越高, 达到土体破坏时的压力越大或是时间越长.

图 6 破坏区深度随压力变化趋势

(4) 实验结果与分析

在气体逸出土层过程中, 由于其具有一定的动能, 先将部分细土颗粒带出, 并随着气体运动引起的水流飘走. 随着细颗粒的失去, 土体骨架逐渐变得不稳固, 在气流的作用下, 最终垮塌并随着气流和水流被冲走. 在向上运动过程中, 随着气流和水流速度的降低, 土体颗粒逐渐沉降, 最终形成具有一定形状的冲坑.

由实验现象可以得出: 土体覆盖层厚度越大, 气体逸出所受的阻力越大, 气体逸出的时间越长, 需要的压力越大. 土高 10 cm 时, 在压力 2.5 kPa 时土体破坏, 气体很快冒出; 土高 15 cm 时, 在压力 2.5 kPa 下, 气体间隔约 1 min 后才逸出, 土体破坏; 土高 25 cm 时, 在压力 2.5 kPa 下, 未见气体从土体表面逸出, 土体也未破坏, 当加压至 5 kPa 时, 土体才破坏, 气体逸出.

这是因为当施加压力后, 气流进入喷嘴出口处会受到阻滞. 当土体渗透条件一定时, 土体越厚, 气流渗透而出的路径会越长, 气流所受到的阻力也会越大, 而且压力越小, 气流出口的速度越小, 动量也

越小;因此,土体高度越高,气流逸出的路径的增大以及土体阻力的变大会使得气流逸出土体顶面导致土体破坏的时间越长或所需的压力也越大。

本文针对的是气体渗漏对海床浅表层的影响,这个区域内,土层的应力与气体压力相比一般较小,其变化对结果影响较小。如考虑土层深部的情况,则需要考虑土层应力的影响,这种情况下土层主要受到气体压力发生开裂或突出等破坏而形成气体通道,与浅表层的破坏形式不一样,需要另外研究。

#### 4 结 论

针对天然气水合物的分解渗漏可能引发的灾害问题进行了初步的研究,得出主要结论如下:

- (1) 渗漏气泡最大扩散角度约  $10^\circ$ 。
- (2) 气体的渗漏对盖层造成的破坏为锥形破坏。
- (3) 在一定气体压力范围内,土体破坏区的宽度和高度随压力的增加呈线性增长。
- (4) 盖层厚度是决定土体破坏区尺寸的主要因素,存在一个特征厚度。小于这个厚度,破坏区尺寸随厚度而增加,超过这个厚度,则相反。
- (5) 本文实验条件是黏质砂土,干密度在  $1600 \text{ kg/m}^3$ ,渗透性在  $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$  范围,内摩擦角约  $35^\circ$ 。对于其他土质及条件下的结果,还需要做进一步的研究。

#### 参 考 文 献

- 1 Hisashi OK, Sridhar N, Song F, et al. Synthesis of methane gas hydrate in porous sediments and its dissociation by depressurizing. *Powder Technology*, 2002, 122(2-3): 239-246
- 2 余义兵,宁伏龙,蒋国盛等. 纯水合物力学性质研究进展. *力学进展*, 2012, 42(3): 347-358 (Yu Yibing, Ning Fulong, Jiang Guosheng, et al. Mechanical behavior of pure hydrates. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(3): 347-358 (in Chinese))
- 3 郑委,鲁晓兵,张旭辉等. CCS 工程中盖层渗透率对  $\text{CO}_2$  逃逸的影响. *力学与实践*, 2010, 32(4): 30-34 (Zheng Wei, Lu Xiaobing, Zhang Xuhui, et al. The effects of caprock permeability on the leakage of  $\text{CO}_2$  in a  $\text{CO}_2$  capture and storage project. *Mechanics in Engineering*, 2010, 32(4): 30-34 (in Chinese))
- 4 吴岱峰,鲁晓兵,刘庆杰等. 低渗岩心驱替过程中的压力分布特征研究. *力学与实践*, 2012, 34(5): 27-31, 51 (Wu Daifeng, Lu Xiaobing, Liu Qingjie, et al. Pressure distribution in flooding of low permeability reservoirs. *Mechanics in Engineering*, 2012, 34(5): 27-31, 51 (in Chinese))
- 5 李清平,张旭辉,鲁晓兵. 沉积物中水合物形成机理及分解动力学研究进展. *力学进展*, 2011, 41(1): 1-14 (Li Qingping, Zhang Xuhui, Lu Xiaobing. Advances in formation mechanism and dissociation kinetics of gas hydrate in sediments. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(1): 1-14 (in Chinese))
- 6 张旭辉,刘艳华,李清平等. 沉积物中导热体周围水合物分解范围研究. *力学与实践*, 2010, 32(2): 39-41 (Zhang Xuhui, Liu Yanhua, Li Qingping, et al. The dissociation scope of gas hydrate in deposit around heat conductor. *Mechanics in Engineering*, 2010, 32(2): 39-41 (in Chinese))
- 7 Gilles G, David G, Aleksandr M. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake ridge. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B8): 17781-17795
- 8 Lu XB, Wang L, Wang SY, et al. Study on the mechanical properties of THF hydrate deposit. In: Proceedings of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, 2008
- 9 Lu XB, Wang L, Wang SY, et al. Instability of seabed and pipes induced by NGH dissociation. In: Proceedings of 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, 2010
- 10 Lu XB, Zhang XH, Wang SY. Strong failure of seabed induced by gas hydrate dissociation. In: 7th International Conference Gas Hydrate, Edinburgh, 2011
- 11 Locat J, Lee HJ. Submarine landslide, advances and challenges. *Journal of Canadian Geotechnical Engineering*, 2002, 39(1): 193-212
- 12 Sultan N, Cochonat P, Foucher JP, et al. Effect of NGHs melting on seafloor slope instability. *Marine Geology*, 2004, 213(1-4): 379-401
- 13 王秀娟,吴时国,董冬冬等. 琼东南盆地气烟囱构造特点及其与天然气水合物的关系. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(5): 103-108 (Wang Xiujuan, Wu Shiguo, Dong Dongdong, et al. Analysis of fluid potential in the Qiongdongnan basin and its implication to gas hydrate formation. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(5): 103-108 (in Chinese))
- 14 Zhang Youxue. Experiment simulations of gas-driven eruptions: kinetics of bubble growth and effect of geometry. *Bull Volcanol*, 1998, 59(4): 281-290
- 15 Briaud JL, Chaouch A. Hydrate melting in soil around hot conductor. *ASCE Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 1997, 123(7): 645-653
- 16 Zhang XH, Lu XB, Li QP, et al. Formation of layered fracture and outburst during gas hydrate dissociation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 76(3-4): 212-216

(责任编辑:胡漫)