

DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2013.04.16.01

文章编号: 1674-5086(2015)04-0107-10

中图分类号: TE58

文献标志码: A

天然气水合物分解超孔隙压力研究

张 炜^{1,2*}, 李新仲¹, 李清平¹, 曹 静¹

1. 中海油研究总院, 北京 朝阳 100028

2. 中国科学院力学研究所博士后流动站, 北京 海淀 100190

摘要: 针对海洋油气资源开采和海洋工程施工过程中天然气水合物分解所引发的工程风险问题, 展开了天然气水合物分解超孔隙压力理论模型研究。研究中采用理论解析方法, 基于水合物分解前后的相态模型和热力学中的通用气体定律, 推导了水合物分解导致的沉积物体积膨胀模型, 进一步采用土力学中土体的压缩和回弹特性, 最终获得了水合物分解超孔隙压力理论解析模型。采用典型的海底滑坡工程案例, 验证了模型的合理性与正确性, 并针对模型中复杂的影响参数展开参数考察, 获得了不同参数的影响效应。研究对认识水合物分解产生的超孔隙压力的演变机理, 保证水合物的储层稳定性, 规避水合物分解带来的工程灾害具有重要的理论价值和现实意义。

关键词: 天然气水合物; 水合物分解; 体积膨胀模型; 超孔隙压力模型; 参数考察

Study on Excess Pore Pressure by Natural Gas Hydrate Dissociation

Zhang Wei^{1,2*}, Li Xinzhong¹, Li Qingping¹, Cao Jing¹

1. General Research Institute, China National Offshore Oil Corporation, Chaoyang, Beijing 100028, China

2. Postdoctoral General of Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Haidian, Beijing 100190, China

Abstract: For the engineering risk caused by natural gas hydrate dissociation during the offshore hydrocarbon resource exploitation and ocean engineering construction processes, a theoretical model is proposed for the analysis of excess pore pressure due to the gas hydrate dissociation. The theoretical-analytical method is adopted in the study. Firstly, based on the phase behavior models before and after the hydrate dissociation and the general gas law in thermodynamics, the volume expansion model of sediments caused by the hydrate dissociation is derived, and then, according to the soil compression and swelling behavior in soil mechanics, the theoretical-analytical model is obtained for the analysis of excess pore pressure by the hydrate dissociation. The reasonability and validity of the model have been verified by the representative submarine landslide case. Besides, a parametric analysis has been performed to investigate the complex affecting parameters in the model. This study is of important theoretical value and practical significance to understand the evolution mechanism of the excess pore pressure resulting from the hydrate dissociation, ensure the hydrate reservoir stability and avoid the project risk.

Key words: natural gas hydrate; hydrate dissociation; volume expansion model; excess pore pressure model; parametric analysis

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20150707.1443.001.html>

张 炜, 李新仲, 李清平, 等. 天然气水合物分解超孔隙压力研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(4): 107-116.

Zhang Wei, Li Xinzhong, Li Qingping, et al. Study on Excess Pore Pressure by Natural Gas Hydrate Dissociation[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 37(4): 107-116.

* 收稿日期: 2013-04-16 网络出版时间: 2015-07-07

通信作者: 张 炜, E-mail: zhangwei28@cnooc.com.cn

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB219507); 国家科技重大专项(2011ZX05026-004; 2011ZX05056-002)。

引言

天然气水合物是近几十年来在海洋和陆地冻土带发现的新型清洁能源。据估算,全球水合物中蕴藏的天然气总量约 $(1.8\sim 2.1)\times 10^{16}$ m^3 ,主要分布在水深大于 300 m 的海洋及陆地永久冻土带沉积物中,其储量相当于全球已探明传统化石燃料(煤、石油和天然气)总碳量的两倍^[1]。水合物的赋存稳定性对温度和压力条件十分敏感,极易发生分解。常温常压下,1 m^3 的水合物分解将产生 164.6 m^3 的甲烷和 0.87 m^3 的自由水^[2],若水深为 1 000 m,将导致体积膨胀接近 1 倍,如此规模的体积膨胀将致使地层超孔隙压力急剧增加,有效应力降低,促使含水合物地层发生大范围变形或失稳破坏,例如海底滑坡^[3-5]、沉积物滑塌^[6]、海底麻坑和泥火山的形成^[7-9]、软沉积物变形^[10]及海底小山丘的形成^[11]等。此外,作为一种温室效应较为严重的气体,海底天然气水合物的分解对全球气候的变化和海洋生态环境都将产生重大影响^[12]。因此,准确预测水合物分解产生的超孔隙压力显得尤为必要。

Grozic J L H 等^[13]建立了预测含气土和含水合物土体响应的力学模型,通过引入热力学概念获得了水合物分解产生的超孔隙压力。但模型中存在取值难定的非常规土体参数,因此,该模型应用范围有限,且文献中并未列出超孔隙压力模型的推导过程。

Fleming P B 等^[14]基于现场实测数据,采用经验方法预测了美国北卡罗来纳州大洋钻探计划 997 号站布莱克海峡水合物储层分解产生的超孔隙压力。显然,经验预测法不能动态反馈水合物分解及沉积物压缩与超孔隙压力之间的关系。

Sultan N 等^[15]定量研究了有限孔隙空间内水

合物分解产生的超孔隙压力。但该研究仅考虑了有限空间内水合物分解产生的最大超孔隙压力,且采用 CO_2 水合物试验数据近似代替甲烷水合物,因此相关结论有待进一步验证。

Xu W 和 Germanovich L N^[16]定量研究了不同渗透性能的海洋沉积物中水合物分解产生的超孔隙压力,建立了理论模型并初步考察了不同参数的影响大小,探讨了水合物分解的不同触发机制,建议了一定的规避措施。但该模型形式为微分形式,不仅存在无法确定的土体参数,还引入了无法量化的水合物分解时间,模型适用性有限。

本文通过建立水合物沉积物初始状态和完全分解后最终状态下的相态模型,采用热力学基本思想,建立了水合物分解导致沉积物体积膨胀的计算模型。在此体积膨胀模型基础之上,利用土体压缩和回弹特性建立了沉积物体积变化和有效应力的关系,获得了水合物分解引起的超孔隙压力理论解析模型。最后,本文针对特定的海底滑坡工程实例对超孔隙压力模型进行验证,并展开参数考察,分析各参数的影响效应。本文研究对认识水合物分解产生的超孔隙压力演变机理,保证水合物储层的稳定性,规避水合物分解带来工程风险具有重要的理论价值和现实意义。

1 水合物分解导致沉积物体积膨胀

天然气水合物分解将产生大量的甲烷气体并致使孔隙体积膨胀,假设水合物分解前沉积物为饱和状态,即孔隙体积全部由固体水合物和自由水填充,且热传递和外界压力改变较孔隙压力变化更为急剧。在常温常压条件下,建立水合物沉积物初始状态和完全分解后最终状态下的相态模型,如图 1 所示。

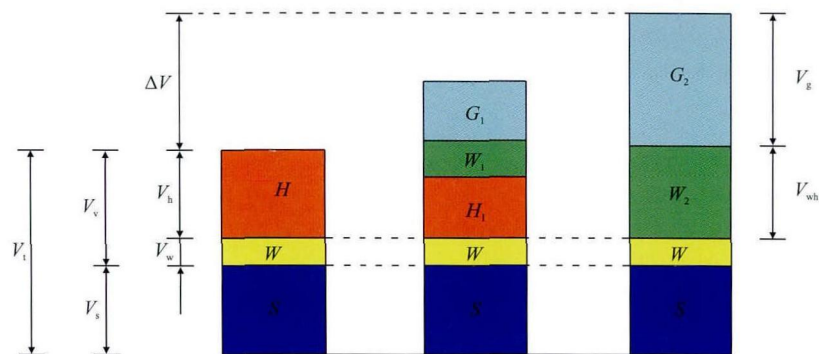


图 1 水合物分解的相态模型

Fig. 1 Phase behavior model for hydrate dissociation

图中: S —固体土颗粒的体积分数, 无因次; W —自由水的体积分数, 无因次; H —水合物的体积分数, 无因次; W_1 —水合物分解产生的水的中间量; W_2 —水合物全部分解后产生的水的体积分数, 无因次; G_1 —水合物分解产生的气体的中间量; G_2 —水合物全部分解后产生的气体的体积分数, 无因次; H_1 —水合物分解中间阶段剩余水合物的体积分数, 无因次; V_h —固体水合物的体积, m^3 ; V_w —自由水的体积, m^3 ; V_s —固体土颗粒的体积, m^3 ; V_v —孔隙的体积, m^3 ; V_t —水合物沉积物的总体积, m^3 ; V_g —水合物全部分解后产生的气体的体积, m^3 ; V_{wh} —水合物全部分解后产生的水的体积, m^3 ; ΔV —水合物分解引起的总体积变化, m^3 。

设水合物未分解的初始状态总体积为 $1 m^3$, 则孔隙率为

$$n = \frac{V_v}{V_t} = V_v \quad (1)$$

式中:

n —孔隙率, 无因次。

在初始状态时, 根据图 1 所示的体积关系有

$$V_v = V_h + V_w \quad (2)$$

由此, 自由水的饱和度为

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (3)$$

式中:

S_r —自由水的饱和度, 无因次。

将式(1)和式(2)代入式(3), 消去自由水的体积 V_w , 得

$$S_r = \frac{n - V_h}{n} \quad (4)$$

将式(4)变形, 可得

$$V_h = n(1 - S_r) \quad (5)$$

在常温常压条件下, $1 m^3$ 的水合物分解将产生 $164.6 m^3$ 的甲烷和 $0.87 m^3$ 的自由水。在水合物完全分解之后, 水合物的体积会转变为气体的体积和水的体积。因此, 水合物分解引起的体积变化可表示为

$$\Delta V = V_g + V_{wh} - \Delta V_g - V_h \quad (6)$$

在水合物分解过程中认为土颗粒和水不可压缩, 因此自由水和土颗粒的体积保持不变。将 ΔV_g 表示为

$$\Delta V_g = V_{g(i+1)} - V_{gi} \quad (7)$$

式中:

$V_{g(i+1)}$ —水合物分解引起某阶段压力增加下的自由气体体积, m^3 ;

V_{gi} —某分解阶段前压力未增加下的自由气体体积, m^3 ;

下标: i —水合物分解的增量步。

根据波义耳定律

$$p_{i+1}V_{g(i+1)} = p_iV_{gi} \quad (8)$$

式中:

p_{i+1} —水合物分解引起某阶段压力增加下的压强, Pa;

p_i —某分解阶段前压力未增加下的压强, Pa。

由式(8)可得

$$\Delta V_g = V_{gi} \left(\frac{p_i}{p_{i+1}} - 1 \right) \quad (9)$$

每一阶段水合物分解气体体积都会增加, 因为每一次循环计算, 水合物分解将释放更多的气体。将式(5)和式(9)代入式(6)可得水合物分解引起的总体积变化

$$\Delta V = V_g - 0.13n(1 - S_r) - V_{gi} \left(\frac{p_i}{p_{i+1}} - 1 \right) \quad (10)$$

如果水合物分解过程发生在常温常压条件下, 则可直接用式(10)计算体积变化。然而, 实际情况下的温压条件与常温常压条件并不一致, 此时假设气体的摩尔体积不变, 可用通用气体定律来计算原位温压条件下的气体体积

$$\begin{cases} m_{STP} = m_{eq} \\ \frac{RT_{STP}}{p_{STP}V_{gSTP}} = \frac{RT_{eq}}{p_{eq}V_g} \end{cases} \quad (11)$$

式中:

m_{STP} —常温常压条件下的气体摩尔体积, L/mol;

m_{eq} —实际温压情况下的气体摩尔体积, L/mol;

R —气体常数, J/(mol·K);

T_{STP} —常温, K;

p_{STP} —常压, Pa;

V_{gSTP} —常温常压下的气体体积, m^3 ;

T_{eq} —天然水合物稳定的临界平衡温度, K;

p_{eq} —天然水合物稳定的临界平衡压力, Pa。

在纯水条件下, 天然气水合物稳定的临界平衡温压关系可由经验公式表示为 $\ln(p_{eq} \times 1000) = 38.98 - 8533.8/T_{eq}$ 。在海水条件下(设海水盐度为

3.5%), 天然气水合物稳定的临界温度将降低约 1.5 °C, 即盐度含量对水合物的形成具有一定的抑制作用。

常温常压条件下有 $T_{\text{STP}}=298.15 \text{ K}$, $p_{\text{STP}}=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_{\text{gSTP}} = 164.6V_{\text{h}}$, 由此可得

$$\frac{298.15}{1.013 \times 10^5 \times 164.6V_{\text{h}}} = \frac{T_{\text{eq}}}{p_{\text{eq}}V_{\text{g}}} \quad (12)$$

因此原位温压条件下的气体体积可表示为

$$V_{\text{g}} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 164.6 \times V_{\text{h}} \times T_{\text{eq}}}{298.15 \times p_{\text{eq}}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(10), 可得水合物分解导致沉积物的体积变化为

$$\Delta V = \frac{1.013 \times 10^5 \times 164.6 \times n(1 - S_{\text{r}}) \times T_{\text{eq}}}{298.15 \times p_{\text{eq}}} - 0.13n(1 - S_{\text{r}}) - V_{\text{gi}} \left(\frac{p_i}{p_{i+1}} - 1 \right) \quad (14)$$

2 水合物分解引起的超孔隙压力

为了确定水合物沉积物对分解导致的体积变化的响应, 需获得体积变化与沉积物有效应力的关系。因水合物分解将导致沉积物孔隙压力增大, 同时有效应力减少, 此过程与土体在压缩固结过程之后的卸载回弹过程一致, 土体有膨胀趋势。因此考虑利用土体压缩和回弹的相关指标用于建立体积变化和有效应力的关系。引入衡量土体在体积应力作用下产生体积改变能力的指标——体积变形系数

$$m_{\text{v}} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma'} \quad (15)$$

式中:

m_{v} —体积变形系数, kPa^{-1} ;

$\Delta \varepsilon$ —水合物分解产生的应变变化, 无因次;

$\Delta \sigma'$ —水合物分解导致的有效应力变化, kPa 。

引入压缩模量

$$E_{\text{s}} = \frac{1}{m_{\text{v}}} = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta V/V_{\text{t}}} \quad (16)$$

式中:

E_{s} —压缩模量, kPa 。

将式(16)变形, 可得体积变化和有效应力的关系

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{t}}} = \frac{\Delta \sigma'}{E_{\text{s}}} \quad (17)$$

因总体积 $V_{\text{t}}=1 \text{ m}^3$, 式(17)可变为

$$\Delta V = \frac{\Delta \sigma'}{E_{\text{s}}} \quad (18)$$

若温度或热传递及压力的变化过程与孔隙压力消散过程相比足够快, 则水合物沉积物有效应力的减小, 可以通过将式(18)代入式(14)来计算

$$\frac{\Delta \sigma'}{E_{\text{s}}} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 164.6 \times n(1 - S_{\text{r}}) \times T_{\text{eq}}}{298.15 \times p_{\text{eq}}} - 0.13n(1 - S_{\text{r}}) - V_{\text{gi}} \left(\frac{p_i}{p_{i+1}} - 1 \right) \quad (19)$$

式(19)中: 左侧项表示由于有效应力变化导致的土体体积变化; 右侧第一项表示平衡温度和压力条件下水合物分解释放的气体体积; 第二项表示常温常压条件下水合物体积和水合物分解产生的水的体积之差 ($1.00 \sim 0.87 \text{ m}^3$); 第三项表示由于自由气体压缩引起的体积变化。

考虑方程左侧项, 由于土体的压缩模量 E_{s} 难以确定, 因此, 需寻求常规参数替代压缩模量。水合物分解导致有效应力的变化进而引起体积变化的过程与土体固结过程相似, 体积的变化与沉积物孔隙比的关系可以表示为

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{t}}} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (20)$$

式中:

Δe —水合物分解导致的孔隙比变化, 无因次;

e_0 —水合物未分解时的初始孔隙比, 无因次。

引入压缩系数

$$a_{\text{v}} = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} \quad (21)$$

式中:

a_{v} —压缩系数, kPa^{-1} ;

负号—孔隙比随有效应力的增加而减小。

将式(20)和式(21)代入式(16), 可得

$$E_{\text{s}} = \frac{1 + e_0}{a_{\text{v}}} \quad (22)$$

由前述可知, 水合物分解引起有效应力的降低与压缩之后的卸载回弹过程一致, 由此, 建立压缩系数与膨胀指数的关系, 定义膨胀指数

$$C_{\text{s}} = \frac{\Delta e}{\Delta \lg \sigma'} = \frac{\Delta e}{\lg(\sigma' + \Delta \sigma') - \lg \sigma'} = \frac{\Delta e}{0.434 \ln \left(1 + \frac{\Delta \sigma'}{\sigma'} \right)} \quad (23)$$

式中:

C_{s} —膨胀指数, 无因次;

σ' —有效应力, kPa 。

将式(21)和式(23)代入式(22), 可得

$$E_s = \frac{(1 + e_0) \Delta\sigma'}{0.434 C_s \ln \left(1 + \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'} \right)} \quad (24)$$

采用 Wroth C P^[17] 提出的塑性指数、土粒比重和压缩指数的关系,可近似表示为

$$C_c = \frac{I_p \times G_s}{200} \quad (25)$$

式中:

C_c —压缩指数,无因次;

I_p —塑性指数,无因次;

G_s —土粒比重,无因次。

$$\begin{cases} \Delta u = -\Delta\sigma' = \frac{(1 + e_0) \Delta\sigma'}{0.434 C_s \ln \left(1 + \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'} \right)} \left[n(1 - S_r) \left(0.13 - 164.6 \frac{T_{eq}}{298.15} \frac{1.013 \times 10^5}{p_{eq}} \right) + V_{gi} \left(\frac{p_i}{p_{i+1}} - 1 \right) \right] \\ C_s = (0.002 I_p + 0.14) \left(\frac{I_p \times G_s}{200} \right) \end{cases} \quad (27)$$

式中:

Δu —水合物分解导致的超孔隙压力变化, kPa。

根据 Nixon M F^[18] 的研究,游离气体体积压缩

$$\begin{cases} \Delta u = -\Delta\sigma' = \frac{\Delta\sigma' (1 + e_0)}{0.434 C_s \ln \left(1 + \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'} \right)} n(1 - S_r) \left(0.13 - 164.6 \frac{T_{eq}}{298.15} \frac{1.013 \times 10^5}{p_{eq}} \right) \\ C_s = (0.002 I_p + 0.14) \left(\frac{I_p \times G_s}{200} \right) \end{cases} \quad (28)$$

通过式(28),采用逐步分解模式计算水合物分解导致的超孔隙压力变化。首先,在水合物分解前,沉积物处于静水压力条件下,初始孔隙压力采用静水条件计算,有效应力不变;其次,进行第一次迭代计算,为促进水合物分解,假设少量水合物分解,即 $\Delta\sigma' \rightarrow 0$, 则有 $\ln(1 + \Delta\sigma'/\sigma') \rightarrow \Delta\sigma'/\sigma'$, 将其代入式(28)即可得第一次迭代计算的超孔隙压力变化值;最后,根据前一步计算得到的超孔隙压力变化值(即有效应力变化值)代入式(28)中逐步迭代计算,即可获得水合物分解所有步的超孔隙压力大小直至水合物完全分解。

需要说明的是,式(28)仅适用于超孔隙压力迅速聚集且没有发生任何消散的条件,如不排水条件。事实上,孔隙压力可能通过沉积物孔隙或沿裂缝消散,消散的孔隙压力数值取决于地层的相关特性(如渗透性),孔隙压力在低渗透率沉积物中的消散速度比在高渗透率沉积物中低。以上研究假定超孔隙压力瞬时形成,上部有低渗透层,孔隙压力不发生消散,这是一种比较保守的分析。实际上,水合物分解过程中会有部分超孔隙压力发生消散,因

Wroth 指出,当 I_p 从 15 变为 100 时, C_s/C_c 从 0.17 变为 0.34, 假设 C_s/C_c 随 I_p 的变化为线性关系, 则 C_s 可表示为

$$C_s = (0.002 I_p + 0.14) \times \left(\frac{I_p \times G_s}{200} \right) \quad (26)$$

对于仅由于热传递导致的水合物分解,假设在不排水条件下总应力不变,即有效应力的变化与超孔隙压力的变化相等: $\Delta u = -\Delta\sigma'$ 。进而,将式(24)代入式(19)消除变量 E_s , 同时联立式(26), 得到水合物分解导致的超孔隙压力变化计算表达式

对沉积物孔隙压力或有效应力的影响不大,通常情况下可以忽略不计,因此,可以将式(27)简化表示为

此有效应力降低幅度变小,对地层稳定性的影响相对减小。

此外,在实际分析中,增量步大小的选择对孔隙压力的计算至关重要,由于水合物分解具有压力依赖性,每一步分析都会因释放的气体而使压力升高,进而减少在随后分析步中产生的超孔隙压力大小。因此,每一分析步中水合物分解的数量越少或水合物分解速率越低,计算越准确。

3 工程实例分析及参数考察

3.1 自然界滑坡案例研究

作为 20 世纪 80 年代后期天然气水合物研究的重要成果之一,在挪威西部大陆架发生的与天然气水合物分解有关的大型海底滑坡——Storegga 滑坡。该滑坡从挪威西海岸一直延伸至冰岛南部。目前,发生滑坡的原因还不够清楚,诸多潜在因素正在调查,其中最可能的原因为一次地震,地震使得弱沉积的海洋黏土沉积物发生扰动。然而,无论是从剪切幅度还是滑坡形状来看,存在一种辅

助机制使得沉积物发生了大规模的运动, 而该辅助机制已经确认为是贯穿整个滑坡区的水合物分解。若该类大型滑坡再次发生, 无论是海洋环境, 还是滑坡区附近的生物群及工程作业均会受到严

重影响, 由此引发的海啸和甲烷气体的释放也将不容忽视。工程案例分析中采用的参数取值如表 1 所示^[15, 19], 其中水合物分解层深度和水深均取该滑坡发生海域的平均值。

表 1 Storegga 海底滑坡案例分析参数取值
Tab. 1 Values of parameters for the analysis of Storegga submarine landslide case

内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	沉积物浮重度 γ' ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	土粒比 重 G_s	塑性指 数 I_p	分解层深度 D/m	水深 h / m	水合物初始饱和 度 S_h/m	孔隙率 n / %	初始孔隙 比 e_0	地温梯度 k / ($\circ\text{C}\cdot 100^{-1}\text{m}^{-1}$)	海底温度 $T_0/^\circ\text{C}$
28	16	2.7	35	350	470	19	38	0.6	2	0

由于海底沉积物在形成过程中经历了一定程度的早期成岩作用, 沉积物中孔隙水之间连通受阻, 且天然气水合物的形成也会阻碍孔隙水的连通, 阻断了沉积物中孔隙水与底层海水的联系, 因此采用静岩压力表征实际的沉积物压力条件更接近客观实际, 即

$$p_{eq} = \gamma_w h + \gamma' D \quad (29)$$

式中:

γ_w —水的重度, kN/m^3 ;

h —水深, m ;

γ' —沉积物浮重度, kN/m^3 ;

D —水合物分解层深度, m 。

由表 1 可得水合物为分解前, 即沉积物稳定条件下的各项力学参数, 如表 2 所示。

表 2 沉积物稳定条件下的力学参数
Tab. 2 Mechanical parameters in the sediment stability condition

静水压力 p_0/MPa	初始有效应力 σ'/MPa	临界平衡压力 p_{eq}/MPa	临界平衡温度 $T_{eq}/^\circ\text{C}$
8.04	3.85	10.2	13.71

表 2 中初始有效应力 σ' 采用经验公式计算
$$\sigma' = \frac{(1 + 2K_0)}{3} \gamma' D$$

式中: K_0 —侧压力系数, 无因次, $K_0 = 1 - \sin \phi$;
 ϕ —内摩擦角, ($^\circ$)。

设水合物的分解速率为 0.5%, 由此可以获得水合物全部分解产生的超孔隙压力变化曲线, 如图 2 所示。将水合物每分解 1% 后产生的超孔隙压力值列于表 3。

由图 2 和表 3 可知, 随水合物不断分解, 超孔隙压力不断增加, 但增加幅度逐渐降低, 在 Storegga 海底滑坡的工程案例中, 在水合物初始饱和度为 19% 的情况下, 若水合物完全分解则产生的最终超孔隙压力为 3.692 MPa, 该数值逼近地层的初始有效应力 3.85 MPa, 由此可知, 当沉积物中饱和度

为 19% 的水合物全部分解时, 产生的超孔隙压力约等于地层的有效应力, 致使地层失稳且发生大面积的海底滑坡, 该结论与工程案例背景相同且与杨晓云^[19] 分析结果一致, 由此证明超孔隙压力模型的合理性和正确性。

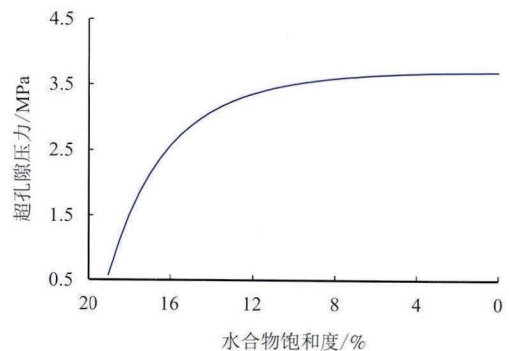


图 2 Storegga 海底滑坡水合物分解产生的超孔隙压力
Fig. 2 Excess pore pressure due to hydrate dissociation in Storegga submarine landslide

表 3 水合物每分解 1% 产生的超孔隙压力值
Tab. 3 Excess pore pressure due to every 1% hydrate dissociation

水合物饱和度/ %	超孔隙压力/ MPa	水合物饱和度/ %	超孔隙压力/ MPa
19	0.566	9	3.557
18	1.497	8	3.595
17	2.130	7	3.623
16	2.565	6	3.645
15	2.870	5	3.661
14	3.087	4	3.674
13	3.244	3	3.682
12	3.359	2	3.688
11	3.444	1	3.691
10	3.509	0	3.692

3.2 参数考察

孔隙压力模型式(28)表明, 影响水合物分解产生的超孔隙压力参数诸多, 为分析不同参数的影响效应, 对式(28)中的各项参数进行考察。分析式(28)中的各项参数, 其中初始孔隙比 e_0 与孔隙率

n 之间存在关联关系; 膨胀指数 C_s 与塑性指数 I_p 和土粒比重 G_s 存在关联关系; 自由水饱和度 S_r 与水合物初始饱和度 S_w 存在关联关系; 水合物平衡温度 T_{eq} 与平衡压力 p_{eq} 存在关联关系, 平衡压力 p_{eq} 又与水深 h 、浮重度 γ' 和分解层深度 D 存在关联关系; 初始有效应力 σ' 与侧压力系数 K_0 、浮重度 γ' 和分解层深度 D 存在关联关系, 侧压力系数 K_0 又与有效内摩擦角 φ 存在关联关系。综上所述, 与超孔隙压力相关的独立的直接影响参数包括孔隙率 n 、塑性指数 I_p 、土粒比重 G_s 、水合物初始饱和度 S_w 、水深 h 、浮重度 γ' 、分解层深度 D 和有效内摩擦角 φ 。由于天然气水合物的地质力学行为研究资料很

少, 在参数考察中做如下假设:

(1) 水合物分解采用理想热交换进行, 即分解温度一直在水合物平衡温度以上, 在分解中不考虑水合物的二次生成; (2) 水合物分解完全且是瞬间完成的; (3) 沉积物渗透性能较低, 采用不排水条件下的岩土工程特性; (4) 不考虑海底坡度的影响, 假设沉积物性质一致, 水合物分布均匀, 分布深度一定, 初始饱和度在分布范围内保持不变; (5) 水合物的分解速率在整个分解过程中保持不变。

参数考察工况如表 4 所示, 其中各参数的取值均参照国内外关于水合物沉积物相关参数的典型取值, 设定水合物分解速率为 0.5%。

表 4 水合物分解超孔隙压力模型参数考察取值工况
Tab. 4 Values in parametric analysis in the excess pore pressure model for hydrate dissociation

工况	$n/\%$	I_p	G_s	$S_w/\%$	h/m	$\gamma'/(kN \cdot m^{-3})$	D/m	$\varphi/(\circ)$
1	20~40	30						
2		20~40	2.70					
3			2.65~2.76		600	17.5		
4				10~40			350	22.5
5	30				200~1 000			
6		30	2.70			15.0~20.0		
7				25	600		100~600	
8						17.5	350	15.0~30.0

参数考察结果如图 3 所示, 各工况水合物分解产生的最终超孔隙压力值列于表 5。由图可知, 对于所有考察工况, 随着水合物不断分解, 超孔隙压力不断增大, 但是增加幅度不断降低, 这是由于分解前一步产生的超孔隙压力增大对下一步水合物的分解具有抑制作用。

由图 3a、图 3d~ 图 3g 可知, 随着孔隙率 n 、水合物初始饱和度 S_w 、水深 h 、浮重度 γ' 、分解层深度 D 的增加, 水合物完全分解后产生的超孔隙压力值也增加, 由图 3b、图 3c、图 3h 可知, 随着塑性指数 I_p 、土粒比重 G_s 及有效内摩擦角 φ 的增大, 水合物完全分解后产生的超孔隙压力值降低。

从图 3c 和图 3e 可以发现, 土粒比重 G_s 和水深 h 对超孔隙压力影响十分微小, 由公式(26)可知, 一方面由于土粒比重数值相对于分母和塑性指数 I_p 而言其影响作用较小, 另一方面, 土粒比重 G_s 自身的取值范围也有限。而水深 h 的影响主要体现在初始静水压力的计算中, 进而影响水合物的平衡临界压力, 而对于特定的海洋环境, 水合物平衡的临界

温压关系一定, 又由于二者在超孔隙压力计算模型中是相除关系, 因此其影响作用相应削弱。除土粒比重 G_s 和水深 h 影响较小以外, 其余各参数的影响均较为明显, 其中尤以水合物初始饱和度 S_w 和分解层深度 D 的影响最为显著。

分析不同参数的影响效应, 由图 3a~ 图 3c 和图 3e 可知, 孔隙率 n 、塑性指数 I_p 、土粒比重 G_s 和水深 h 的影响主要体现在水合物分解的初始阶段, 在分解初始阶段, 超孔隙压力的增长速率有所不同, 而在水合物完全分解以后, 产生的最终超孔隙压力值相差较小, 最大相差仅为 5.6%。由图 3d、图 3f~ 图 3h 可知, 随着水合物初始饱和度 S_w 、浮重度 γ' 、分解层深度 D 和有效内摩擦角 φ 的变化, 分解产生的超孔隙压力值成倍变化, 最大相差有 5 倍之多。

通过以上参数分析可知, 不同参数对超孔隙压力的影响效应不同, 针对特定的实际条件, 该分析对规避关键影响参数, 保证地层稳定性具有重要的指导作用。

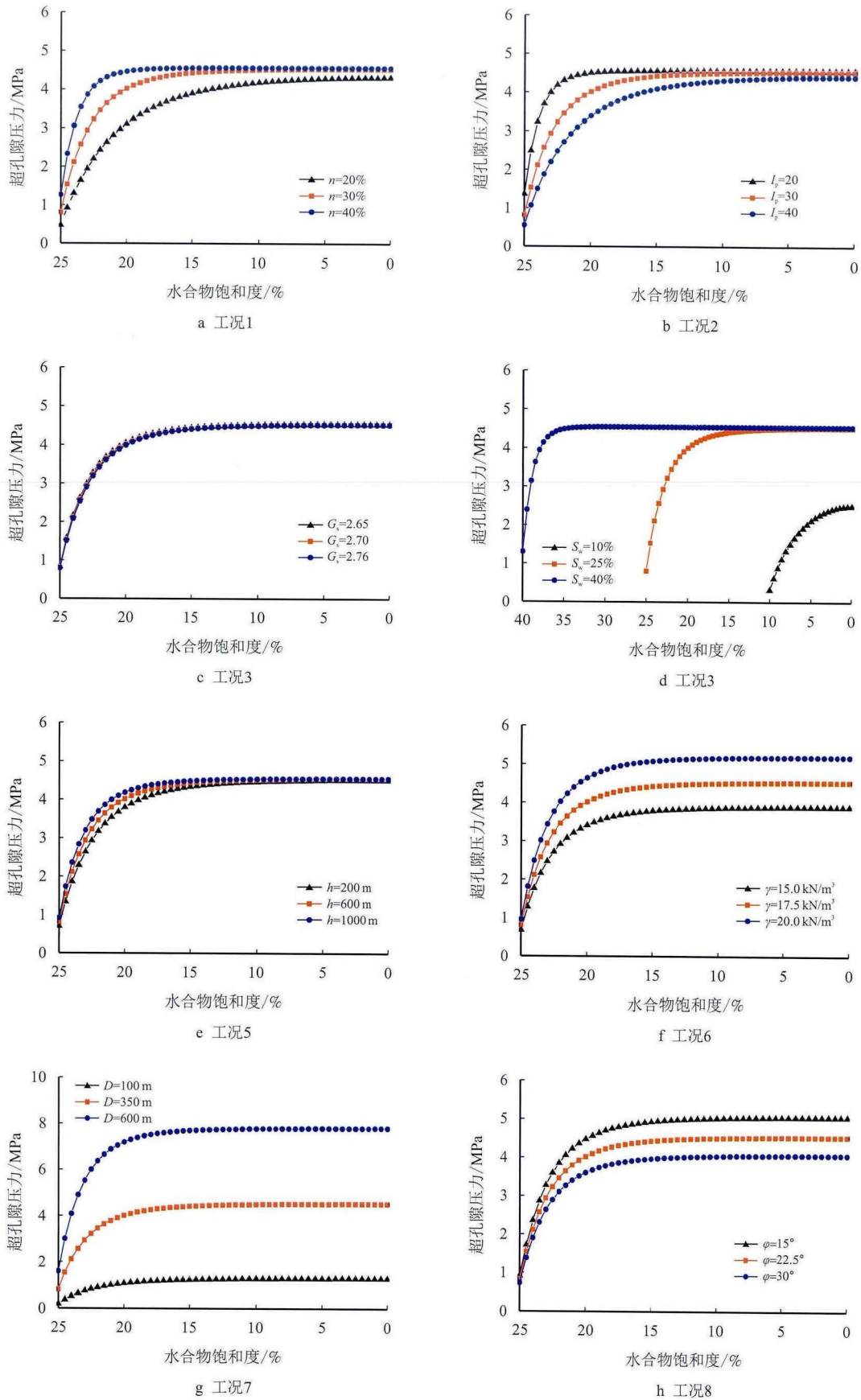


图3 参数考察分析结果
Fig. 3 Results of parametric analysis

表5 水合物分解产生的最终超孔隙压力值

Tab. 5 Final values of excess pore pressure due to hydrate dissociation

工况	参数	参数取值	超孔隙压力/MPa
工况 1	$n/\%$	20	4.305
		30	4.539
		40	4.562
工况 2	I_p	20	4.562
		30	4.539
		40	4.412
工况 3	G_s	2.65	4.541
		2.70	4.539
		2.76	4.535
工况 4	$S_w/\%$	10	2.495
		25	4.539
		40	4.562
工况 5	h/m	200	4.508
		600	4.539
		1 000	4.552
工况 6	$\gamma'/(kN\cdot m^{-3})$	15	3.886
		17.5	4.539
		20	5.192
工况 7	D/m	100	1.287
		350	4.539
		600	7.805
工况 8	$\varphi/(^\circ)$	15	5.042
		22.5	4.539
		30	4.062

4 结 论

(1) 基于水合物分解前后的相态模型,建立了常温常压条件下,天然气水合物分解导致的沉积物体积膨胀公式。进一步通过热力学的通用气体定律将该公式推广至一般条件下,水合物分解导致的体积膨胀模型。

(2) 基于体积膨胀模型,利用土体压缩和回弹的相关指标用于建立体积变化和有效应力的关系,进而获得超孔隙压力与体积膨胀之间的关系。利用土体固结等的相关指标和文献经验公式,换算模型中存在的非常规土体参数,最终建立了天然气水合物分解超孔隙压力理论解析模型。

(3) 针对超孔隙压力模型,结合典型的海底滑坡工程案例,验证了模型的合理性与正确性,并针对模型中复杂的影响参数展开参数考察,获得了不同参数对超孔隙压力的影响效应。

参考文献

- [1] Max M D. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [2] Sloan E D. Clathrate hydrate of natural gases [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1998.
- [3] Paull C K, Buelow W J, Ussler W, et al. Increased continental-margin slumping frequency during sea-level lowstands above gas hydrate-bearing sediments[J]. *Geology*, 1996, 24(2): 143-146.
- [4] Rothwell R G, Thomson J, Kähler G. Low-sea-level emplacement of a very large Late Pleistocene 'megaturbidite' in the western Mediterranean Sea[J]. *Nature*, 1998, 392(6674): 377-380.
- [5] Mienert J, Vanneste M, Bünz S, et al. Ocean warming and gas hydrate stability on the mid-norwegian margin at the Storegga Slide[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(1): 233-244.
- [6] Dillon W P, Nealon J W, Taylor M H, et al. Seafloor collapse and methane venting associated with gas hydrate on the Blake ridge: causes and implications to seafloor stability and methane release[M]//Paull C K, Dillon W P. *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*. Washington DC, American: American Geophysical Union, 2001: 211-233.
- [7] Vogt P R, Gardner J, Crane K. The Norwegian-Barents-Svalbard(NBS) continental margin: introducing a natural laboratory of mass wasting, hydrates, and ascent of sediment, pore water, and methane[J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19(1-2): 2-21.
- [8] Van Rensbergen P, De Batist M, Klerkx J, et al. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal[J]. *Geology*, 2002, 30(7): 631-634.
- [9] Zühlsdorff L, Spiess V. Three-dimensional seismic characterization of a venting site reveals compelling indications of natural hydraulic fracturing[J]. *Geology*, 2004, 32(2): 101-104.
- [10] Kennett J P, Fackler-Adams B N. Relationship of clathrate instability to sediment deformation in the upper Neogene of California[J]. *Geology*, 2000, 28(3): 215-218.
- [11] Davies R, Cartwright J, Rana J. Giant hummocks in deep-water marine sediments: Evidence for large-scale differential compaction and density inversion during early buri-

- al[J]. *Geology*, 1999, 27(10): 907–910.
- [12] Kennett J P, Cannariato K G, Hendy I L, et al. Methane hydrates in quaternary climate change: The clathrate gun hypothesis[M]. Washington D C: AGU, 2003.
- [13] Grozic J L H, Kvalstad T J. Effect of gas on deepwater marine sediments[C]//Proceedings of The International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Aa Balkema Publishers, 2001, 3: 2289–2294.
- [14] Flemings P B, Liu X, Winters W J. Critical pressure and multiphase flow in Blake Ridge gas hydrates[J]. *Geology*, 2003, 31(12): 1057–1060.
- [15] Sultan N, Cochonat P, Foucher J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1): 379–401.
- [16] Xu W, Germanovich L N. Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical approach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B1): 1–12.
- [17] Wroth C P. Correlations of some engineering properties of soils[C]//Proceedings of the Second International Conference on the Behaviour of Off-Shore Structures, held at Imperial College, London, England, 1979.
- [18] Nixon M F. Influence of gas hydrates on submarine slope stability[D]. Alberta: University of Calagary, 2005.
- [19] 杨晓云. 天然气水合物与海底滑坡研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.

作者简介



张 炜, 1983 年生, 男, 汉族, 湖南郴州人, 工程师, 博士后, 主要从事深水浅层水合物勘探、开发及工程风险分析方面的研究。E-mail: zhangwei28@cnooc.com.cn



李新仲, 1964 年生, 男, 汉族, 河北衡水人, 教授级高级工程师, 主要从事海洋工程方面的研究。E-mail: lixzh@cnooc.com.cn



李清平, 1969 年生, 女, 汉族, 山西灵石人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事多相流、水下生产系统及天然气水合物等方面的研究。E-mail: liqp@cnooc.com.cn



曹 静, 1963 年生, 女, 汉族, 辽宁朝阳人, 教授级高级工程师, 主要从事海底管道及立管方面的研究。E-mail: caojing2@cnooc.com.cn

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>