

苏 正,曹运诚,吴能友等.水合物层下伏游离气渗漏过程的数值模拟及实例分析.地球物理学报,2009,52(12):3124~3131, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.12.022

Su Z, Cao Y C, Wu N Y, et al. Numerical computation and case analysis of the venting process of free gas beneath hydrate layer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(12):3124~3131, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.12.022

水合物层下伏游离气渗漏过程的数值模拟及实例分析

苏 正^{1,2},曹运诚¹,吴能友^{1,2}, Lawrence M. Cathles³, 陈多福^{1,2*}

1 中国科学院边缘海地质重点实验室,广州地球化学研究所,广州 510640

2 中国科学院广州天然气水合物研究中心,中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室,广州能源研究所,广州 510640

3 Department of Earth & Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, New York 14853-1504, USA

摘 要 海洋环境中天然气水合物层是理想的毛细管封闭层,游离气被抑制在水合物层下,游离气层的气体压力随气体聚集和气层厚度的增加而升高,当气压超过封闭层的毛细管力时,游离气会克服毛细管进入压力、刺入上伏封闭层孔隙空间,毛细管封闭作用随之消失,从而形成水合物下伏游离气向海底的渗漏.通过对该过程进行的数值模拟计算表明:渗漏气体是以活塞式驱动上伏沉积层中的孔隙水向海底排出,水合物稳定带内流体渗漏速度随水流柱高度的减小而增加,当水流阻抗大于相应沉积层段的静岩压力时,沉积层将转变为流沙,流沙沉积被海流移除后便在海底留下凹陷麻坑.麻坑形成后流体运移通道演化为气体通道,气体快速排放.麻坑深度主要取决于游离气层的厚度和水合物封闭层(底界)的深度,而与沉积层的渗透率无关.麻坑深度一定程度上指示了渗漏前水合物层下伏游离气层的资源量.对布莱克海台海底麻坑深度的数值模拟计算表明,形成 4 m 深的海底麻坑需要至少 22 m 厚的游离气层.

关键词 天然气水合物,毛细管封闭,游离气渗漏,麻坑,布莱克海台

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.12.022

中图分类号 P738

收稿日期 2008-12-08,2009-11-27 收修定稿

Numerical computation and case analysis of the venting process of free gas beneath hydrate layer

SU Zheng^{1,2}, CAO Yun-Cheng¹, WU Neng-You^{1,2}, Lawrence M. Cathles³, CHEN Duo-Fu^{1,2*}

1 CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2 CAS Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, CAS Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3 Department of Earth & Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, New York 14853-1504, USA

Abstract A hydrate layer is an ideal capillary seal, beneath which free gas is trapped. Gas overpressure increases as gas accumulates and gas column grows. Capillary seals have the property that they fail completely when gas pressure reaches the point that they are invaded by gas, and thereafter they offer little resistance to gas venting. After the seepage is triggered, the venting gas will push the overlying water upward at increasingly higher velocities as the gas

基金项目 NSFC-广东联合基金(U0733003)、中国科学院边缘海地质重点实验室(MSLG08-04)、国家杰出青年基金项目(40725011)、国家重点基础研究计划 973(2009CB219508)、中国科学院广州能源研究所所长基金(o807re)和中国科学院项目百人计划(0807r11001)资助.

作者简介 苏 正,1980 年生,博士,助理研究员,主要从事天然气水合物及盆地流体活动的数值模拟研究.目前在中国科学院广州能源研究所工作.

* 通讯作者 陈多福, E-mail: cdf@gig. ac. cn

“piston” approaches the seafloor. Numerical model shows that as the water velocity increases, the near surface sediments will become quick at a depth that the resistance of water flow exceeds the hydrostatic pressure of the sediment hosting the water flow. These quick sediments can then be removed by bottom ocean currents, leaving a hollow pockmark on the seafloor. Thereafter, a free gas pathway is formed below the pockmarks and the reservoir gas drains quickly. The pockmark depth is a function of thickness of free gas column beneath the hydrate and depth of the hydrate seal (bottom of hydrate layer). Interestingly, pockmark depth does not depend on sediment permeability. Pockmark depth implies the resource amount of free gas beneath hydrate layer. The model shows that a 22-m-thick free gas layer at least is needed to form a 4-m-deep pockmark on the rise of Blake Ridge.

Keywords Gas hydrate, Capillary seal, Gas seepage, Pockmarks, Blake Ridge

1 引言

在海洋环境水合物稳定带内孔隙水溶解甲烷浓度超过甲烷水合物形成的溶解度时,溶解甲烷会结晶形成水合物,随着水合物含量的增加,形成水合物层圈闭,并在其之下发育游离气层^[1~4].在特定条件下水合物层之下的游离气沿通道向上渗漏进入海底,并在海底形成麻坑、自生碳酸盐岩、生物群落、气泡羽状体,如俄勒岗外海水合物脊^[5]、布莱克海台等^[6]、北刚果陆坡^[7,8]、挪威外海^[9]以及中国南海^[10].虽然水合物层下伏游离气向上渗漏活动在水合物发育区比较普遍,但是水合物层下伏游离气向上渗漏的机制和泄漏过程中的流体动力学特征、及流体泄漏对海底沉积地层的破坏(形成麻坑)过程并不清楚.

水合物层下伏游离气受到水合物层毛细管作用的封闭,随气体聚集和气层厚度增长,水合物下伏游离气的压力持续增加,当气体超压克服毛细管封闭作用后气体泄漏被激发,超压气体推动孔隙水向上排出,在海底形成麻坑,麻坑深度反映了流体的破坏强度和游离气层的超压幅度.因此,本文将应用水合物层毛细管封闭机理和沉积孔隙流体泄漏动力学,研究水合物稳定带之下游离气如何向上突破的动力学过程,建立游离气层压力状态与麻坑深度之间的数值模型,通过海底麻坑特征揭示水合物系统游离气层的演化规律.

2 毛细管封闭及游离气泄漏机理

海底沉积层中存在两类毛细管力封闭作用,第一类是存在于小型的气藏顶部的毛细管力封闭作

用,属于低渗透率的气体捕集封闭.封闭层的孔隙度和渗透率较低,而水更倾向于存在于较小的孔隙空间,因此封闭层的孔隙空间完全被水占有,而封闭层之下含气层的孔隙度和渗透率相对较高^[11].碎屑沉积物孔隙介质一般为水润湿相,气液界面处的毛细管力阻止天然气进一步向上运移,使气体处于孔隙较大的沉积层段,但当气体压力超过相应孔隙的气体的毛细管进入压力时,超压气体将刺入封闭层的小孔隙,气藏开始排气,并在上覆沉积层中产生气体的泄漏通道.侵入毛细管压力由拉普拉斯方程给出^[12]:

$$\Delta P_c = 2\gamma(1/r_f - 1/r_c),$$

其中 γ 为界面张力,取值 0.027 N/m ^[13], r_f 和 r_c 分别代表小孔隙和大孔隙的有效孔隙半径.

第二类毛细管力封闭作用存在于气-液二相共存的沉积孔隙中,气液二相均可流动^[14,15].由于整个沉积体是由沉积颗粒构成的孔隙介质,孔隙水优先占据并被吸附在孔隙的喉道位置,具有小孔径的孔喉部位产生的毛细管力抑制了孔隙腔中气体的流动.此类毛细管封闭条件是孔隙内两种流体共存,且二者均可流动.在泄漏活动初期这种情况出现在气流柱顶部和气柱周围的气-水混合部位,沉积层中毛细管封闭线的位置随气柱的发育而变迁.这类毛细管力封闭作用约束了气流柱的形状和发育,并使气流柱有一个相对平坦的顶部,同时也会形成一个相对稳定的通道直径,这意味着泄漏气柱顶部的气-水界面相对平坦,在理想均质介质中泄漏气体以“活塞”式向上推进.但是当泄漏气柱遇到渗透率在横向上不均匀或不连续(如断层)的沉积介质时会出现分支或扭曲的气体通道.

海洋环境扩散型水合物稳定带与下伏游离气之间属于第一类毛细管力的封闭,在水合物稳定带底

部水合物含量最高^[3,16], 水合物的形成降低了孔隙介质的有效孔隙度和渗透率, 使水合物层的孔隙度低于下伏游离气层的孔隙度, 水合物层的有效孔隙半径小于游离气层的有效孔隙半径. 亲水性的水合物沉积层内除水合物外的其余孔隙空间被水占据, 而下伏沉积体的孔隙空间完全被气体充填, 水合物层与游离气层之间就存在一个上覆孔隙水与下伏游离气的界面. 因此在水合物层与游离气层界面(大孔隙与小孔隙之间)上产生毛细管力, 其方向指向孔隙半径较大的含气层, 阻止下伏气体进入上覆含水层(水合物层), 抑制气体向上运移. 但是当下伏游离气层中的气体压力超过上覆水合物封闭层的毛细管力时, 超压气体将刺入水合物封闭层, 使水合物层的毛细管封闭作用完全失效或仅剩很小的封闭作用, 气

体泄漏开始. 超压的气体渗漏进入水合物稳定带后, 随着气柱的增长气体逐渐侵占原有孔隙水所占的孔隙空间, 驱使孔隙水向上排出, 并最终泄漏进入海底. 水合物稳定带内气柱的增长过程受第二类毛细管力封闭作用的控制, 使气流柱以“活塞”式增长, 而没有出现气流弯曲和分支, 这与地球物理资料显示的近于垂直的流体渗漏通道(气囱)特征一致^[8,9,17-19].

图 1 给出了海洋水合物层下伏游离气渗漏过程^[20]. 游离气在水合物层底界之下聚集, 气层厚度和气体超压逐渐增加(a), 当气体压力超过水合物封闭层的毛细管力时, 高压气体会在封闭薄弱点或气层最顶端刺穿封闭, 使水合物毛细管封闭失效(b). 气流柱在高压作用下向上推进, 并驱使上伏沉积孔隙水向外排出. 气流柱高度(h_g)逐渐增长, 而水流柱

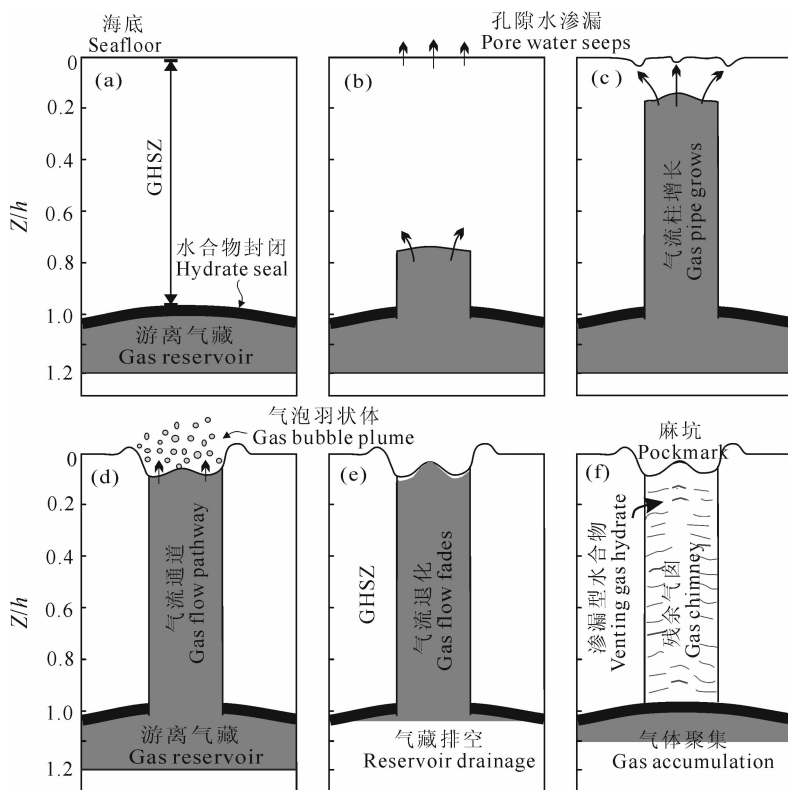


图 1 水合物下伏游离气渗漏概念模型示意图^[20]

Z 为海底以下深度, h 为水合物稳定带厚度(或水合物封闭层深度). 黑色带表示毛细管封闭层, 浅灰色表示气体所占据孔隙沉积层. (a) 气体被封闭在水合物层之下; (b) 气体刺穿封闭层开始泄漏; (c) 气柱高度增加, 推动水流向外排出, 水流柱高度相应缩短, 流体运移速度不断增加; (d) 含水沉积中孔隙压力超过静岩压力, 在海底出现麻坑, 形成单一的气流通道; (e) 游离气藏中的天然气被逐渐排空, 孔隙超压消失, 流体通道中的气流柱逐渐退化; (f) 气流柱完全消失, 在海底留下气烟囱, 并有水合物生成, 水合物封闭作用恢复, 并开始新的气体聚集.

Fig. 1 Schematic depiction of conceptual model for venting process of free gas beneath gas hydrate zone^[20]

Z is the depth below seafloor, h is the thickness of hydrate stability zone. Dark shaded band is the capillary seal; grey shade indicates areas where the sediment pores are filled with gas. (a) Free gas accumulates below hydrate, (b) and begins to vent after the sealing is failed. (c) Rising gas pipe displaces water with increasing rapidity, (d) and a hollow pockmark forms at seafloor. (e) Gas pocket drains soon after the pockmark formation and the gas pipe disappears. (f) Gas chimneys form beneath the pockmark, new hydrates form in the venting channel, and free gas accumulates again because of the healing of hydrate capillary seal.

高度(h_w)相应缩短(b 到 c 过程). 如果气压驱动力保持相对恒定, 由于岩层对水的黏滞力(或水流阻抗)远大于其对气的黏滞力(或气流阻抗), 随水流柱高度 h_w 减小, 流体渗漏速度将越来越快, 在单位长度水流柱上的压降(等于岩层对水流的黏滞力)随流体速度的增长而增加. 在气流接近海底时流体速度明显增强, 浅层水流阻抗(即水流对地层的作用力)超过相应沉积体的静岩压力, 浅层含水沉积将被流沙化, 当流沙化的沉积物被海底底流搬运后, 便在海底形成“新鲜的”麻坑, 此时麻坑下形成单一的气体运移通道(d). 由于气体黏度远小于水的黏度(约为 1/60), 气体排放异常迅速, 游离气藏中气体会很快排干, 流体渗漏通道中的气流逐渐退化(e), 孔隙流体压力回归静水压力, 孔隙水重新占据水合物封闭层和流体渗漏通道的孔隙空间, 在气流量减小体系温度降低的过程中伴随着水合物的生成(本文不做详细论述), 并因此减小了流体流动速度, 少量气体仍可滞留在流体渗漏通道内, 在地震记录上显示为气烟囱, 水合物层底部的毛细管封闭作用恢复, 水合物层之下游离气的聚集过程再次启动(f).

3 游离气渗漏过程的数学模型

气体渗漏过程中(图 1)气柱和水柱都是在游离气超压的驱动下流动, 流体运移的总驱动力等于气体超压 $(\rho_w - \rho_g)gd$. 气流柱不断增大, 并且以同一速度推动渗漏通道内的上覆孔隙水向上流动. 假定水合物稳定带为一种均质孔隙介质, 渗漏通道内流体(水 and 气)的渗漏速率相同, 孔隙介质内流体渗漏模型可用达西定律描述为

$$\begin{aligned} \Delta P &= (\rho_w - \rho_g)gd = \Delta P_g + \Delta P_w \\ &= \frac{V}{k} \left[\frac{\mu_g}{k_{rg}} h_g + \frac{\mu_w}{k_{rw}} h_w \right], \end{aligned} \quad (1)$$

其中, ΔP 为流体运移总推动力, 是施加在气流柱和水流柱上的压降之和 ($\Delta P_g + \Delta P_w$), 或者是气流阻抗与水流阻抗之和, 等于气层底部的超压 $(\rho_w - \rho_g)gd$. ρ 为流体密度, d 为游离气层的厚度, μ 为流体黏度, V 为流体速度, k 为沉积体的渗透率, k_{rg} 和 k_{rw} 分别为沉积体孔隙气和水的相对渗透率, h_g 和 h_w 分别为气流柱和水流柱的高度.

假定气流柱中气的饱和度和水流柱中水的饱和度均为 1, 气和水的相对渗透率为 1. 由方程(1), 流体(气体和水)的运移速度表示为

$$V = \frac{\partial h_g}{\partial t} = \frac{k(\rho_w - \rho_g)gd}{\frac{\mu_g}{k_{rg}} h_g + \frac{\mu_w}{k_{rw}} h_w}. \quad (2)$$

在方程(2)中, 若 $\frac{\mu_w}{k_{rw}} \cong 60 \frac{\mu_g}{k_{rg}}$, 可知流体运移速度随气流柱高度 ($h_g = h - h_w$) 的增长而增加. 对方程(2)进行积分得到气柱增长方程:

$$t_{\text{pipe}} = \frac{\left(\frac{\mu_g}{k_{rg}} - \frac{\mu_w}{k_{rw}} \right) \frac{h_g^2}{2} + \frac{\mu_w}{k_{rw}} h h_g}{k(\rho_w - \rho_g)gd}. \quad (3)$$

利用方程(3)既可以计算渗漏气流柱增长到某一高度所需要的时间, 也可以计算某一时间点水合物稳定带内气流柱的高度.

由方程(1)和方程(2)可知, 孔隙介质中单位长度流体柱所受阻抗随气流柱高度的增加(或水流柱高度的减小)而增加, 也就是说沉积物格架所受流体的反作用力(流体阻抗)逐渐增加, 当流体阻抗超过相应沉积体的静岩压力时, 相应沉积层将被流体化而成为流沙^[21], 渗漏流体速度须满足 $V \frac{\mu_w}{k_{rw}k} \geq \rho_s g$. 流沙沉积被海流移除后在海底形成麻坑, 被流沙化沉积体的底界确定了麻坑深度. 用 $V = \rho_s g \frac{k_{rw}k}{\mu_w}$ 替换方程(2)中流体速度 V , 麻坑深度 h_{pm} 替换水流柱高度 h_w , 即可得到麻坑深度方程:

$$h_{\text{pm}} = \frac{\frac{\rho_w - \rho_g}{\rho_s} d - \frac{k_{rw}}{k_{rg}} \frac{\mu_g}{\mu_w} h}{1 - \frac{k_{rw}}{k_{rg}} \frac{\mu_g}{\mu_w}}. \quad (4)$$

若 $\mu_w \cong 60\mu_g$, $k_{rw} \cong k_{rg} \cong 1$ (假定水流柱中水的饱和度和气流柱中气的饱和度近似为 1), 方程(4)可简化为

$$h_{\text{pm}} \cong \frac{\frac{\rho_w - \rho_g}{\rho_s} d - \frac{\mu_g}{\mu_w} h}{\rho_s}. \quad (5)$$

在一定的温压条件下流体密度和黏度为常数^[12]. 因此, 方程(5)中麻坑深度可近似为水合物下伏的游离气层厚度(d)和水合物封闭层深度(h)的函数, 与沉积体的渗透率无关. 模型计算中所有参数取国际标准单位.

4 模型应用及讨论

美国卡罗莱纳外海的布莱克海台区是典型的水合物发育区, 既有完美的 BSR 显示, 又有游离气的渗漏活动及在海底形成的麻坑^[6,22,23]. 大洋钻探计划(Ocean Drilling Program)164 航次对布莱克海台

进行了钻探取芯研究,其中 997 站位钻至海底之下 750 m,穿过了 BSR(海底之下 450 m),其中 180~462 m 层段含水合物,水合物平均饱和度为 6%,位于水合物稳定带底部(462 m)的水合物饱和度最高为 24%^[4]. 996 站位位于布莱克底辟链的最南端,处于 997 站位西北 98 km,最大钻孔深度为 63 m,刚好位

于麻坑之中,地震剖面显示该区 BSR 深度为 440 m,深部底辟作用使上覆地层变形、形成小型断层,成为有利的流体渗漏通道,在海底发育有深 4 m、直径 50 m 的麻坑,并且正在发生气体渗漏(图 2),钻探获得的水合物含量高,最高达沉积孔隙的 99%^[6,22~24].

驱动流体运移的气体超压取决于游离气层的厚

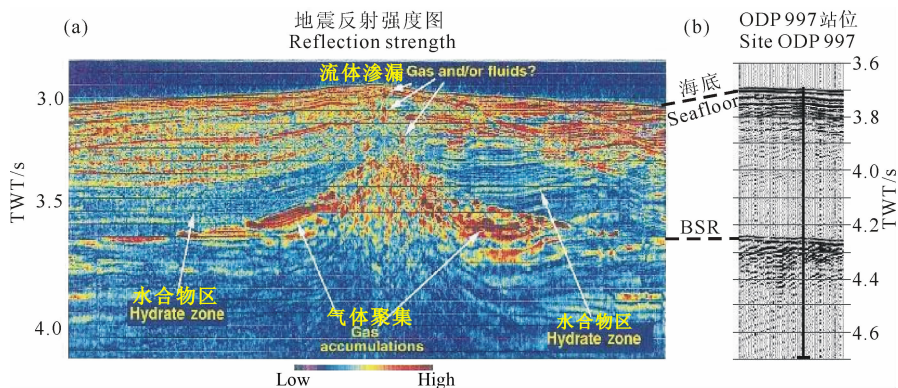


图 2 布莱克海台 ODP996 站的地震反射强度剖面揭示的 BSR、底辟构造、海底麻坑及与 ODP997 站揭示的 BSR 深度比较

(a) 地震反射强度显示布莱克海台水合物发育、气体聚集以及底辟构造顶端的流体渗漏^[23];

(b) ODP997 站 BSR 揭示的水合物封闭层深度^[22].

Fig. 2 BSR, diapir structure, pockmark and BSR at site 996 at Black Ridge, and comparison with seismic profile at site ODP 997

(a) Reflection strength shows the gas hydrate zone, free gas accumulation, and fluids seepage at seafloor above the crest of Blake diapir^[23]; (b) BSR depth at site 997^[22].

度. 如果下伏游离气层厚度达 100 m(图 1),其总的流体驱动力(等于气体超压)可达 0.8 MPa;如果游离气层厚度为 22 m,流体超压驱动力为 0.18 MPa(图 3 最左端 A 点). 渗漏开始时水流柱高度分数(等于 h_w/h)为 1,总水流阻抗等于气体总超压,整个水流柱所受阻抗随水流高度减小或气流柱高度增加而降低,但是由于水流速度增加,施加在单位长度水流柱上的驱动力和相应的黏滞力增加,水流阻抗逐渐趋近海底相应深度沉积层静岩压力,且在水流柱高度分别小于 40 m(对于游离气层厚度为 100 m)和 4 m(对于游离气层厚度为 22 m)时水流阻抗超过沉积介质的重量(图 3 中 D 点). 该位置以上的沉积物被流沙化^[21],转变成颗粒悬浮的液状混合物,这种流沙化沉积被海流搬运后在海底形成麻坑. 利用方程(3)可以计算游离气从水合物稳定带底部渗漏到达海底所需的时间. 假定渗透率为 10^{-12} m^2 时,100 m 厚的游离气层泄漏到海底的时间大约为 5 年.

方程(2)中流体渗漏速率与渗透率成正比,但方程(4)中麻坑深度不依赖于沉积体渗透率,只是水与气体相对渗透率比的函数,而相对渗透率决定于孔隙流体的饱和度^[12],因此沉积体渗透率控制流体渗

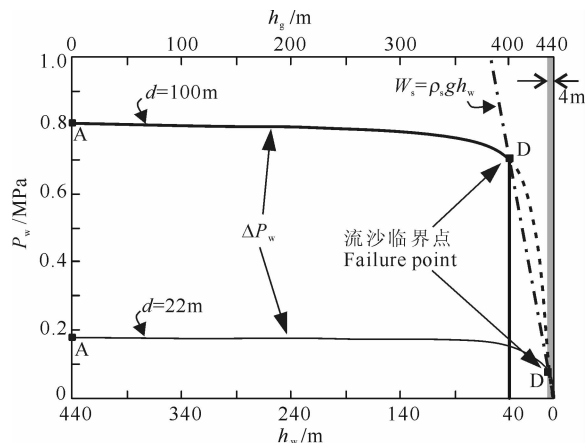


图 3 渗漏通道中的流体阻抗和含水沉积层的静岩压力曲线交点指示麻坑深度

水合物稳定带中气流柱高度增加(顶部坐标向右),水流柱高度减小(底部坐标向右),水流阻抗和静岩压力随之减小,水流阻抗大于静岩压力时发生流沙破坏,曲线交点位置指示麻坑深度(D 点). 布莱克海台 100 m 的游离气层发生渗漏时在海底可形成 40 m 深的麻坑,而 22 m 厚的气层泄漏时可形成 4 m 深的海底麻坑(最右边灰色阴影).

Fig. 3 Intersections of the resistance of the fluid flow and the lithostatic pressure of the sediments containing the water flow point pockmark depths

Gas pipe grows and water pipe shortens in hydrate stability zone, and water resistance and lithostatic pressure decreases accordingly. A failure happens when water resistance exceeds the lithostatic. Intersections of the curves indicate the pockmark depths. The pockmark depth is 40 m for a gas column of 100 m thick and 4 m for a gas column of 22 m thick at Blake Ridge (rightmost gray shadow).

漏速率,但不控制麻坑形成.实际上,渗透率越大,气体渗漏越快,麻坑形成越快;气体超压在水流柱和气流柱之间的分配不依赖于渗透率,而是决定于气体的超压幅度,以及流体黏度和气流柱高度(或水流柱高度).

利用方程(5)可以简单计算海底麻坑深度,同时在已知水合物底界(封闭层)深度和麻坑深度,也可以通过方程(5)计算游离气层的厚度.图4显示麻坑深度与游离气层厚度和封闭层深度的关系.在给定封闭层深度,麻坑深度随游离气层厚度的增加而增大,相反较大的沉积层厚度削弱了渗漏流体对麻坑的挖掘作用,水合物封闭层越浅,形成一定深度的麻坑所需的游离气层厚度越小.

地球物理显示布莱克海台 ODP996 站位周围的 BSR 深度为 440 m,而在 ODP996 站位正下方游离气藏气体沿底辟构造上升至大约 220 m(图2)处,再沿小断层渗漏至海底.由方程(5)可知麻坑深度与渗透率无关,取决于游离气藏的埋深和游离气层的厚度.对于海底 4 m 深的麻坑,计算表明在水合物层之下至少需要有 22 m 厚的游离气层.苏正和陈多福(2007)计算了布莱克海台 997 站位的水合物和游

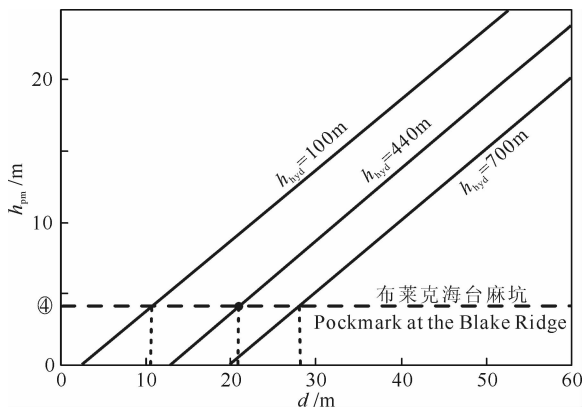


图4 水合物封闭层深度和麻坑深度与游离气层厚度的关系

麻坑深度主要决定于游离气层厚度和水合物封闭层埋深,与游离气层厚度成正比,与水合物层埋深呈反比.如果水合物封闭层深 700 m,形成 4 m 深的麻坑需要 27 m 的游离气层;如果水合物封闭层深为 440 m,则需要 22 m 的游离气层;如果水合物封闭层深 100 m,仅需要 11 m 厚的游离气层.

Fig. 4 Relation between pockmark depth, depth of hydrate seal and thickness of free gas column

Pockmark depth is in direct proportion to free gas thickness and inverse proportion to depth of hydrate seal. A free gas layer of 27 m thick is needed to form a pockmark of 4 m deep if the hydrate seal is 700 mbsf, but the calculated gas thickness is 22 m if the hydrate seal is 440 mbsf and 11 m if the hydrate seal is 100 mbsf.

离气含量分布,在水合物稳定带底界之下 26 m 处的气体饱和度为 28%,底界之下 74 m 处气体饱和度为 0.2%^[4],其水合物饱和度分布与同一区域的 ODP995 站位是相近的^[25]. 28% 的气体饱和度大于气体流动所需 20% 的饱和度,而底界之下 74 m 处 0.2% 的气体饱和度不能流动,也不能传递孔隙气体压力.如果 20% 的饱和度指示可传递气层的底界,则气层的有效压力传递厚度约为 30 m,这与我们 22 m 厚的游离气层模型计算结果相近(图 5).实际上,该站位水合物平均含量约为 6%^[4],可封闭气层厚度为 24 m(三角点所示),接近模型估计的 22 m.此外,在水合物稳定带底部的水合物饱和度达 24%^[4],其毛细管作用可封闭约 33 m 的游离气层(菱形点所示),与 Flemings 等(2003)估计的极限破坏厚度 29 m 相似(虚线所示位置)^[26],接近但略小于 30 m 的参考厚度.然而,在 996 站位游离气发生泄漏后,997 站位扩散型水合物的含量仍在持续增加^[27],水合物层的封闭能力也相应增强,游离气层厚度不断增长,因此,997 站位游离气厚度(30 m)大于 996 站位游离气发生泄漏时的 22 m 气层厚度是合理的.

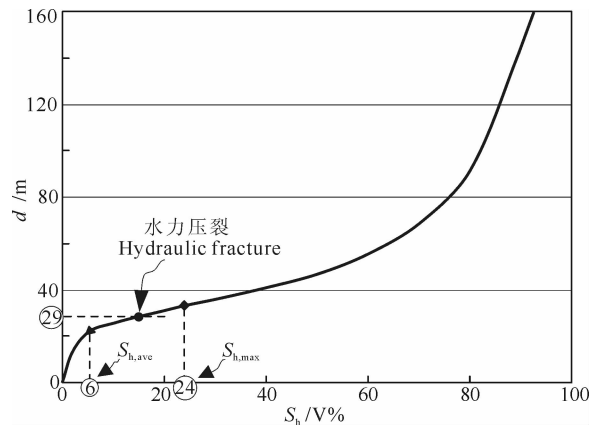


图5 布莱克海台水合物的饱和度与其所能封闭的游离气层厚度.气层厚度随水合物饱和度增加而增长,水平虚线与气层厚度曲线的交点(29 m)为 Flemings 等预测的 997 站位气层的临界水力压裂厚度^[26],圆形点标示约 30 m 的实际气层厚度,三角形点显示平均饱和度 6% 的水合物能封闭 24 m 的气层,而饱和度 24% 的水合物可封闭 33 m 的游离气层(菱形点).

Fig. 5 Hydrate saturation and thickness of free gas sealed at Blake Ridge

The free gas thickness increases with hydrate saturation at base of hydrate stability zone. The horizontal dashed line shows the critical thickness of free gas for hydraulic fractures at site ODP997 predicted by Flemings et al.^[26]. The practical thickness of free gas at the Blake Ridge is ~ 30 m (round point), free gas of 24 m thick can be sealed by the hydrate of 6% average saturation (triangle) and free gas of 33 m thick can be sealed by the hydrate of 24% saturation (diamond).

5 结 论

本文构建了水合物层下伏游离气渗漏动力学过程的数学模型,游离气被水合物层的毛细管作用所圈闭,下伏游离气的超压随游离气层厚度的增长而增加,当气体超压超过作用于水合物与游离气层界面的毛细管阻力时,游离气渗漏进入上伏水合物稳定带,并以“活塞式”驱动上伏孔隙水向外排出,渗漏速度随水流柱高度的减小而增加,当水流阻抗超过相应层段的静岩压力时沉积体变为流沙,流沙沉积被海流带走便在海底留下麻坑.模型显示麻坑深度为游离气层厚度和水合物封闭层埋深的函数,而与沉积介质的渗透率无关.游离气渗漏形成的海底麻坑对水合物下伏游离气层的厚度具有指示作用,在已知水合物封闭层深度和海底麻坑深度条件下,模型可以计算水合物层下伏游离气藏发生渗漏时的气层厚度,在布莱克海台海底形成 4 m 深的麻坑,需要至少 22 m 厚的游离气层.

致 谢 挪威国家石油公司 Martin Hovland 教授提供了全球麻坑基础资料和最新信息,表示感谢.

参考文献(References)

[1] Xu W, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**: 5081~5095

[2] Davie M K, Buffett B A. A steady state model for marine hydrate formation: constraints on methane supply from pore water sulfate profiles. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(B10): 2495, doi:10.1029/2002JB002300

[3] Chen D F, Su Z, Cathles L M. Types of gas hydrates in marine environments and their thermodynamic characteristics. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006, **17**(4): 723~737

[4] 苏 正,陈多福.海洋环境甲烷水合物溶解度及其对水合物发育特征的控制.地球物理学报,2007,**50**(5):1518~1526
Su Z, Chen D F. Calculation of methane hydrate solubility in marine environment and its constraints on gas hydrate occurrence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(5):1518~1526

[5] Tréhu A M, Bohrmann G, Rack F R, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Volume 204, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 2003

[6] Paull C K, Spiess F N, Ussler W III, et al. Methane-rich plumes on the Carolina Continental rise: associations with gas hydrates. *Geology*, 1995, **23**:89~92

[7] Sahling H, Bohrmann G, Spiess V, et al. Pockmarks in the

Northern Congo Fan area, SW Africa: complex seafloor features shaped by fluid flow. *Marine Geology*, 2008, **249**: 206~225

[8] Gay A, Lopez M, Berndt C, et al. Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin. *Marine Geology*, 2007, **244**(1-4): 68~92

[9] Hovland M, Svensen H, Forsberg C F, et al. Complex pockmarks with carbonate-ridges off mid-Norway: products of sediment degassing. *Marine Geology*, 2005, **218**:191~206

[10] 陈多福,李绪宣,夏 斌.南海琼东南盆地天然气水合物稳定域分布特征及资源预测.地球物理学报,2004,**47**(3):483~489
Chen D F, Li X X, Xia B. Distribution of gas hydrate stable zones and resource prediction in the Qiongdongnan basin of the South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(3):483~489

[11] Cathles L M. Changes in sub-water table fluid flow at the end of the Proterozoic and its implications for gas pulsars and MVT leadzinc deposits. *Geofluids*, 2007, **7**(2):209~226

[12] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: Elsevier, 1972

[13] Vigil G, Xu Z, Steinberg S, et al. Interactions of silica surfaces. *J. Colloid. Interface Sci.*, 1994, **165**:367

[14] Cathles L M. Capillary seals as a cause of pressure compartmentation in sedimentary basins. Presented at the Gulf Coast Section SEPM Foundation 21st Annual Research Conference on Petroleum Systems of Deep-Water Basins, 2001. 561~572

[15] Shosa J D, Cathles L M. Experimental investigation of capillary blockage of two-phase flow in layered porous media, in Petroleum Systems of Deep-Water Basins: Global and Gulf of Mexico Experience; Proceedings of the GCSSEPM Foundation. 21st Annual Bob F. Perkins Research Conference, 2001. 725~739

[16] 苏 正,陈多福.海洋天然气水合物的类型及特征.大地构造与成矿学,2006,**30**(2):256~264
Su Z, Chen D F. The types of gas hydrates and their characteristics in marine environment. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 2006, **30**(2):256~264

[17] Hovland M, Judd A G. Seabed Pockmarks and Seepages. Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. London: Graham & Trotman Ltd., 1988

[18] Hovland M, Svensen H. Submarine pingoes: indicators of shallow gas hydrates in a pockmark at Nyegga, Norwegian Sea. *Marine Geology*, 2006, **228**:15~23

[19] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin. *Marine Geology*, 2006, **226**(1-2): 25~40

[20] Cathle L M, Su Z, Chen D F. The physics of gas chimney and pockmark formation with implications for seafloor and

- gas sequestration risk assessment. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, in Press
- [21] Nicholl M J, Karnowski M. Laboratory apparatus for the demonstration of quicksand. *Journal of Geoscience Education*, 2006, **54**(5):578~583
- [22] Matsumoto R, Paull C, Wallace P and the Leg 164 Scientific Party. Gas hydrate sampling on the Blake Ridge and Carolina Rise: ODP, Leg 164 Preliminary Report, 1996
- [23] 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. *Marine Geology*, 2000, **164**:79~89
- [24] Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J eds. Proc. ODP, Sci. Results, 164: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 2000
- [25] 王秀娟,吴时国,刘学伟.天然气水合物和游离气饱和度估算的影响因素.地球物理学报,2006, **49**(2):504~511
- Wang X J, Wu S G, Liu X W. Factors affecting the estimation of gas hydrate and free gas saturation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2):504~511
- [26] Flemings P B, Liu X, Winters W J. Critical pressure and multiphase flow in Blake Ridge gas hydrates. *Geology*, 2003, **31**:1057~1060
- [27] Liu X, Flemings P B. Dynamic multiphase flow model of hydrate formation in marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**, B03101, doi: 10.1029/2005JB004227

(本文编辑 何 燕)