

DOI:10.3724/SP.J.1140.2011.01157

天然气水合物快速加热分解导致地层破坏的实验

张旭辉¹, 鲁晓兵¹, 王淑云¹, 李清平², 姚海元²

(1 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2 中国海洋石油研究中心, 北京 100027)

摘要: 沉积层中水合物分解可能引起多种形式的地质灾害。针对水合物加热分解, 尤其是快速加热条件下, 可能引起的沉积层破坏方式及破坏条件进行了模型实验。模型实验分别在一个矩形模型箱中和一个圆柱形模型箱中进行, 以模拟二维和一维情况。实验结果表明, 随着水合物分解条件(如缓慢加热、快速加热)和水合物沉积层与覆盖层情况的变化(如地层非均匀、盖层可渗透和封闭等), 沉积层在水合物分解后可能出现多种破坏方式, 如滑塌缓慢破坏以及分层和喷发等强烈破坏, 这些破坏均可对工程实践带来严重的危害, 是水合物开发和深海油气田开采首要解决的问题之一。

关键词: 水合物分解; 分解区; 分层; 喷发; 滑塌

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2011)01-0157-08

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^[1]。水合物沉积层是指蕴含这种固态水合物的砂、黏土以及混和土等土质的沉积层质。随着世界油气可开采量的减少和消耗量的增加, 深海水合物开采的迫切性日益显著。美国、日本、加拿大等国开展了大量的相平衡条件、勘探方法等方面的工作, 并进行了试采^[2-3]。

油气开采、水合物开采或自然条件变化会引起水合物沉积层中水合物分解。1 体积的水合物完全分解可产生标准状态下 164 体积的甲烷气体和 0.8 体积的水, 因此, 如果沉积层孔隙内的水合物分解产生的气体不能迅速消散, 那么, 孔隙内会产生很大的超静孔隙压力^[4-5], 使得骨架的有效应力减小, 沉积层的承载能力降低; 同时降低沉积层的胶结, 使得沉积层可能出现滑塌等破坏。深海油气田的开采以及水合物的开发时, 高温的油气或钻井液使得管道成为高温热源, 不断向水合物沉积层提供热量引起水合物分解, 分解范围随时间不断推移^[6]。Briaud 等^[7-8]的研究表明, 位于海床下 50 m 处 1 m 直径的导管中高温油引起的水合物分解前锋经过 15 年时间将扩展 20 m 远, 40 年时间则扩展 30 m 远。这种扩展可能对海床中结构物构成威胁。水合物分解范

围的扩展可能引起海底滑坡^[9-11], 挪威大陆架边缘由于水合物分解发生的海底滑坡(Storegga 滑坡)共滑动 2 500~3 200 km³ 沉积层, 是目前为止发现的最大的海底滑坡^[9]。大量的地质调查和分析表明产生该滑坡的原因是当时水温增加、水合物发生分解, 在海底形成大面积的薄弱层。国外学者也报道了水合物快速热分解可能引起的局部灾害, 如在钻探和生产过程中, 高温井穿过水合物层, 出现井喷、油气井套管的破坏、井位下沉等灾害。

鉴于此, 本文针对水合物分解可能引起的地质灾害问题进行了实验研究, 主要目的是考察在地层破坏前水合物快速热分解相变后生成的液气流动缓慢且地层变形较小时, 地层中压力和温度的变化特点, 以及地层可能的破坏模式等。

1 实验方法

1.1 实验装置与测量手段

1.1.1 一维装置与测量

为简洁方便地分析水合物分解引起的地层破坏机理和主要控制因素, 本文设计了一套实验装置, 由有机玻璃圆柱筒、热源、压力测试系统、温度测试系统以及数据采集系统组成。有机玻璃筒的直径为 5 cm, 高度为 30 cm; 热源由加热棒和温控器共同组成, 其中加热棒(直径 1 cm, 高度 12 cm, 功率 400 W)布置在圆柱筒的中轴线上, 加热棒的中心距离圆柱筒底部 6 cm; 温控棒(高度 6 cm)的探头与加热棒的中心紧密接触在一起, 通过温控器控制温度, 当探头处温度超过温控器设定温度时, 电源关闭; 反之, 电源开启, 控

基金项目: 国家高技术发展研究专项; 国家重大油气专项“2008ZX05026-04-011”; 中国科学院三期创新方向性项目(KJJCX2-YW-L02); 国家自然科学基金项目(1077218)。

作者简介: 张旭辉(1982—), 男, 博士, 主要从事水合物开采相关关键力学问题和二氧化碳地质埋存后逃逸机理研究。

收稿日期: 2010-09-21; 改回日期: 2010-10-11。张光威编辑

制温度误差小于 5 °C，这样温控器一方面控制热源温度，一方面也测试了热源温度。在筒底接出管道(管道口粘结透水石，防止土体堵塞管道)，连接气体压力表测量水合物热分解后的气体压力，这样温控棒探头测量的是加热棒的中心附近沉积层的温度，压力表测量的是加热棒底部附近沉积层内的孔隙压力，如图 1。整个实验过程由摄像设备实时采集。

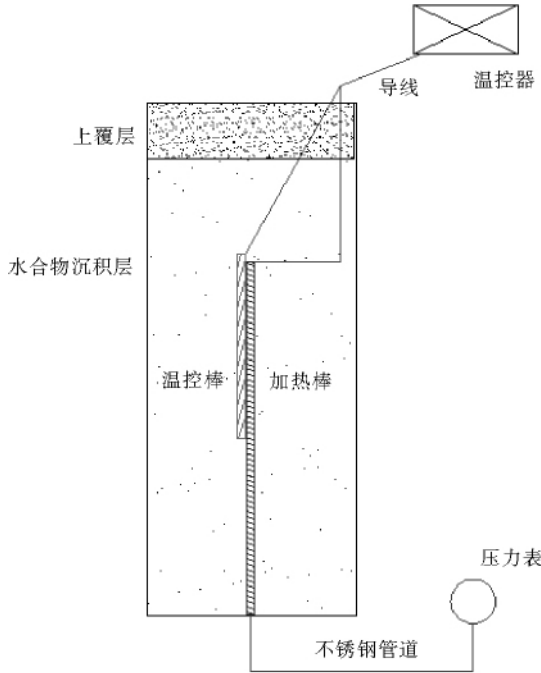


图 1 天然气水合物分解一维实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the one dimensional experimental equipment

1.1.2 二维装置与测量

为获得水合物分解引起的与实际物理过程更为

接近的地层失稳的类型以及温度压力演化规律，设计了二维模型箱模拟实验装置，由长 $L=50\text{ cm}$ ，高 $H=30\text{ cm}$ ，宽 $w=10\text{ cm}$ 的有机玻璃模型箱、热源、温度测量系统、压力测量系统、摄像和数据采集系统组成。热源与平面一维模拟实验相同，由加热棒和温控器组合而成，加热棒沿水平方向布置在模型箱的中间位置，布置方式为沿长度方向中心线上距模型箱底部 10 cm，横向布置长度为 12 cm 加热棒，这种加热棒加热效率高，热源控制温度效果较好，但模拟轴对称与一维情况的分解区域的扩展有一定的近似。在筒壁上与热源高度相等处以及热源上部 5 cm 边壁处接出管道(管道口粘结透水石，防止土体堵塞管道)，连接气体压力表组成压力测量系统测定水合物分解产生的气体压力；5 个温度传感器探头布置在水合物沉积层宽度方向中心轴线上，间距为 2 cm，整个实验过程由摄像设备实时采集，如图 2。

对于缓慢加热使水合物分解的实验设计说明如下：在上述二维模型箱内填入坡度为 5° 的水合物沉积层，沉积层右侧高度为 25 cm；将两根直径为 1 mm 的钢丝插入土体，且分别距离箱体左右边壁 6 cm，测量其随土体的变形，如图 3；然后，将模型箱放入冰箱且保持土面水平(将模型箱体左侧垫起)。3~5 天后，将模型箱取出，在室温下使水合物缓慢分解，观察土体竖向位移随水合物分解发生的变化，同时测量钢丝发生的位移。

1.2 实验设计

采用质量分数为 19% 的四氢呋喃溶液饱和沉积层并形成水合物沉积层，其依据为：四氢呋喃与水

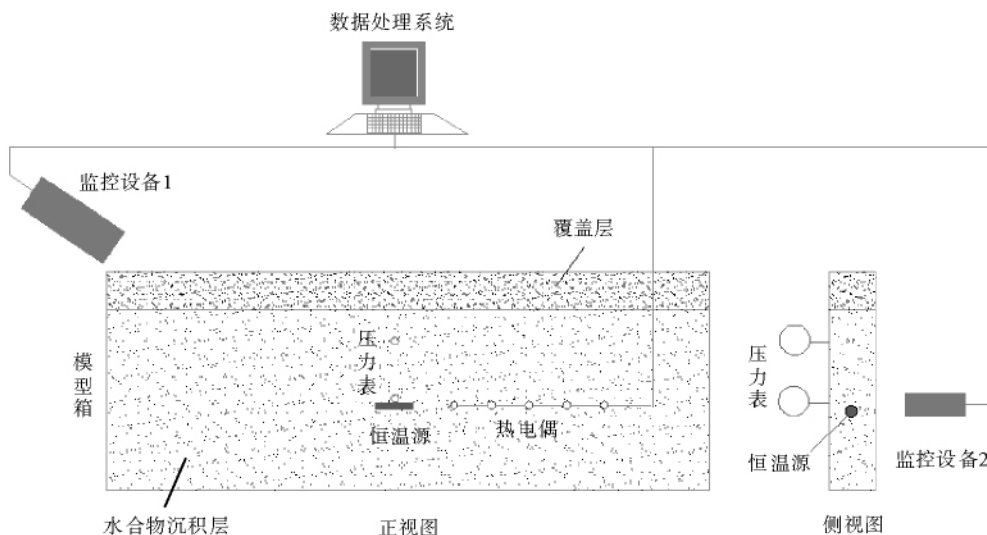


图 2 天然气水合物分解二维实验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of the two dimensional experimental equipment

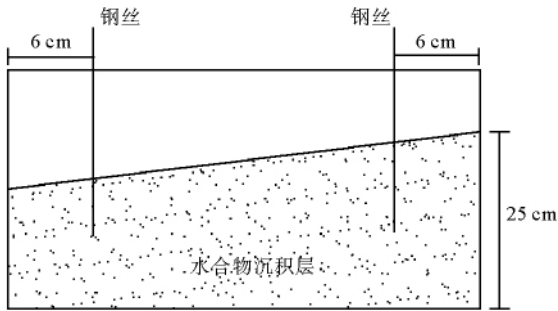


图 3 水合物缓慢分解实验布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing the experimental equipment for slow hydrate dissociation

可较完全均匀地形成 II 型水合物^[12-13],四氢呋喃水合物在常压下的理想分解点为 4.4 °C^[14];国内外学者针对纯四氢呋喃水合物的热物理性质、四氢呋喃溶液配比和不同温度条件水合物合成的诱导时间等问题开展了大量的研究工作^[15-18],四氢呋喃水合物与甲烷水合物具有相似的物理性质;四氢呋喃水合物沉积层的人工合成具有相对容易、安全、经济等优越性。

水合物沉积层样品制备、热源和测量探头布置:在模型筒或箱内填入高度为 20 cm 的砂土层,干密度为 1.6 g/cm³,分 4 次砸实而成,每次 5 cm,为保证层与层之间较好的衔接,在前一层砸实后的表面划毛,再砸实后一层;然后,用质量分数为 19% 的四氢呋喃溶液,均匀饱和沉积层;热源、压力表和温度传感器探头按照装置介绍中的位置布置;最后将模型箱放入冰箱内,控制冰箱温度为 -8 °C,冷冻 2 天,水合物沉积层形成。

为了比较不同盖层特性的影响,在一维和二维模型中均制备了两种盖层:5 cm 高的含水量为 6% 的粉细砂覆盖层;5 或 2 cm 的水合物沉积层覆盖层。

进行水合物热分解实验时,预先设定温控器的

最高温度,然后通电加热,加热棒在几分钟内达到设定温度,之后进入等温加热阶段。在实验过程中,记录不同时刻压力和温度。特别地,二维缓慢分解情况是将模型箱放于室温下使得水合物缓慢分解观察地层的变形和破坏形式。

2 结果与分析

2.1 二维模型实验结果

2.1.1 缓慢加热分解情况

在二维模型箱内形成倾斜度为 5° 的水合物沉积层。在实验中观察到水合物分解过程中,土面升高,土体内有气泡形成。从图 4a 中可以看到,随着水合物的分解,钢丝的水平位移(即土体的侧向滑移)越来越大,最后趋于稳定。这说明土体强度有所降低,但是还没有完全丧失。图 4b 给出了水合物分解后水合物沉积层坡底到坡顶的竖向位移(沉陷)情况,可以看到,水合物分解后沉积层发生沉陷,沉陷在坡顶位置沉陷大。这是因为高度越大,总的累计变形越大,后部沿坡面滑移也使垂直变形增加。

2.1.2 快速分解情况

快速加热使水合物分解时,沉积层可能发生强烈的破坏。实验中发现在模型箱内发生喷发现象,其具有 3 个特征过程:

- (1)开始加热时,沉积层中从加热棒的周围出现不断扩展的分解区,在 30 min 左右分解区域发展到一定程度后停止,然后保持约 10 min;
- (2)模型箱壁处发出声波并略微变形,喷发现象发生,持续约 10 s;
- (3)喷发发生在模型箱壁与水合物沉积层接触面分离,气体携带土喷出,沉积层中留下空腔(图 5)。

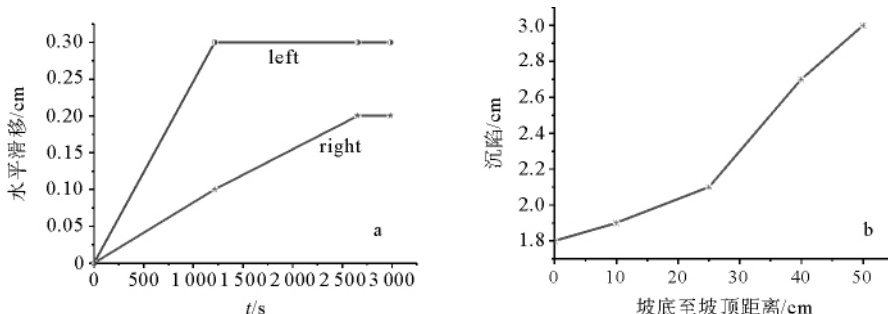


图 4 天然气水合物分解后坡体水平滑移和沉陷

(a) 水平滑移;(b) 沉陷

Fig. 4 The horizontal displacement and settlement of the slope after dissociation of hydrate

(a) Horizontal sliding displacement;(b) Settlement

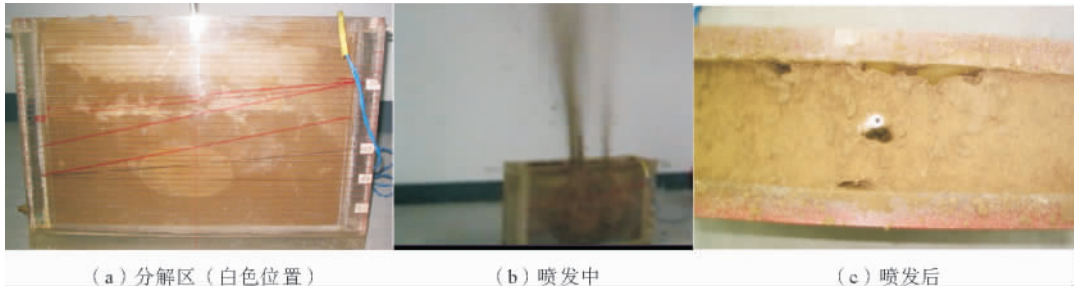


图5 模型箱内水合物分解的喷发现象

Fig. 5 Burst in the test box

图 6a 给出了 A、B、C 3 组四氢呋喃水合物沉积层中水合物热分解过程中热源处温度演化曲线, 可以看到: 热源处在加热开始后很快达到恒定的加热温度, 之后有一小段时间温度下降, 然后温度再上升至趋于平稳, 直至出现破坏。从图 6b 可以看到: 在热源加热一段时间后测试到压力上升, 由于相变阵面扩展到模型箱边壁管道口处和连接压力表的管道中的水合物分解皆需一段时间, 气体压力的测量滞后于温度的测量, 当压力表测量到压力值后, 温度压力演化逐渐对应, 直至喷发开始, 压力值急剧下降。压力测量的起点以及压力最大值不同主要原因有以下两个方面: (1) 压力起点不在温度起点, 是因为与压力表连接的管道起点在模型箱壁面处, 只有当管道内的水合物分解后才能形成气体通路, 压力表才有示数, 压力的起始时间由加热速度、管道内水合物含量等多种因素决定; (2) 最高压力的不相同, 原因是 A 与 C 的覆盖层为水合物沉积层, 渗透性极弱, 未分解区域沉积层与模型箱壁的摩擦力对其本身的位移限制强, 分解区域的气体压力最大值较大。B 的覆盖层为砂土层, 渗透性强, 且与模型箱壁的摩擦

力弱, 压力最大值降低, 同时, 气体最高压力略低于四氢呋喃在热源温度下的蒸气压力。

实验测试的压力曲线上有 4 个拐点: 以图 5b 中的 A 组实验为例做解释。第 1 个拐点处, 压力上升到一个极值后下降, 这是由于水合物相变阵面已达到了模型箱壁, 且连通压力表管道中水合物也已分解成了四氢呋喃液体和水, 沉积层中水合物分解产生的气体进入连通压力表的管道, 将管道中的四氢呋喃液体和水挤出, 四氢呋喃液体和水渗流到热源附近, 热源热量大部分提供给四氢呋喃液体和水的相变, 因此, 热源处的温度从 150 °C 的加热温度开始下降, 压力也随着下降; 第 2 个拐点处, 压力下降到一个极值后上升, 这是由于管道中挤出的水和四氢呋喃液体的相变完成, 热源热量足够引起热源附近温度的升高, 压力也随着上升; 第 3 个拐点处, 压力上升到一个极值, 基本保持不变一段时间, 这个阶段是水合物相变阵面继续推移, 水合物以及水合物分解产物的相变、沉积层中的热传导与热源的供热平衡, 温度压力也保持一定的平衡状态; 第 4 个拐点处, 压力从平稳状态开始迅速下降, 这个阶段是气

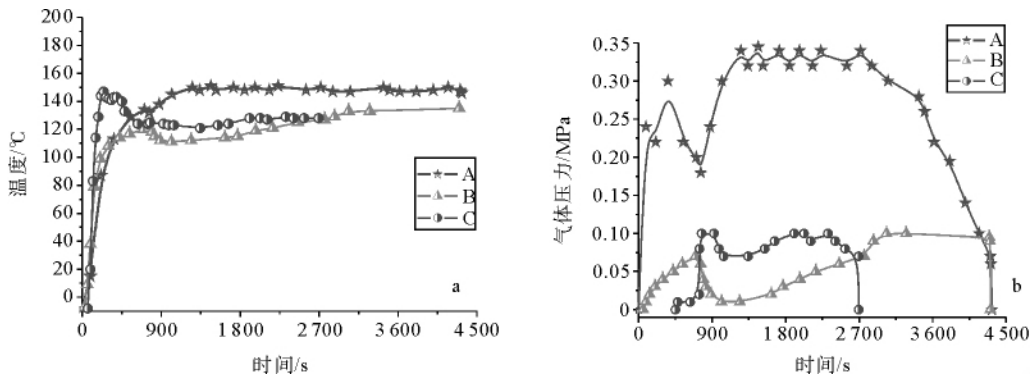


图 6 天然气水合物热分解压力温度随时间的变化曲线

a 温度变化曲线; b 压力随时间的变化曲线

Fig. 6 pressure-temperature curves with time

a Temperature curves; b Pressure curve

体开始在上覆层渗透,并引起上覆层的软化和变形直至喷发破坏,气体快速膨胀而压力降低至零。实验中,观察到覆盖层上表面开始有融化隆起现象时,压力表测到的超静孔隙压力均为 0.1 MPa,上覆层喷发破坏即将发生时,临界超静孔隙压力为 0.1 MPa。

表 1 给出了实验设计参数和测量参数。稳定过程的平均温度越高,加热时间越长,分解半径越大,分解范围扩展过程是一个含相变的热传导过程。破坏形式有 3 种,即覆盖层开裂喷出、覆盖层顶部圆孔喷出和水合物层与模型箱边壁的粘结拉裂破坏喷出。

表 1 天然气水合物热分解实验设计和测量参数

Table 1 Designed and measured parameters

实验标号	A	B	C
稳定过程的平均温度/°C	130	120	112
覆盖层厚/cm	2(水合物沉积层)	2(砂土层)	2(水合物沉积层)
加热时间/min	44.9	71.8	40.8
分解半径/cm	9	9.75	8
喷发时瞬时压力/MPa	0.07	0.095	0.03
突出持续时间/s	1	5	6
喷出土量/g	645	860	257
破坏模式	盖层开裂喷出	圆孔喷出 口直径 2 cm	圆孔喷出 口直径 2 cm

实验中气体携带喷出的土均来源于分解区域。在实验后挖开模型地层,空腔的大小恰是实验中观察到的分解区域大小,说明分解区内的土体已经液化甚至气化。从图 7 可以看出,喷发时喷出土量与喷发时瞬时压力的大小呈线性关系。

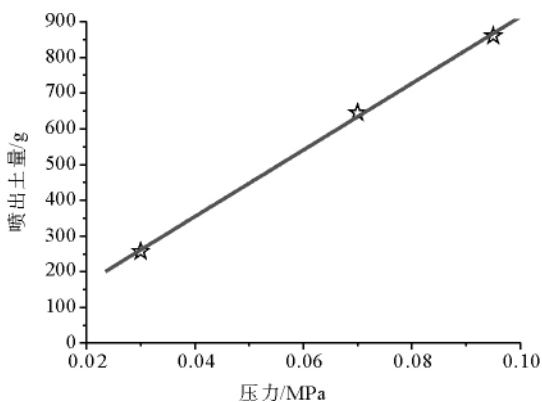


图 7 天然气水合物热分解喷出土量与喷发时压力的关系曲线

Fig. 7 Relation between burst soils and gas pressure

2.2 一维模型实验结果

实验中随着上覆层的不同,定性观察实验发现 A、B 两组实验出现分层破坏现象,C 实验出现喷发破坏现象:

(1)A 和 B 两组实验中,上层覆盖着黏聚力为 0、内摩擦角为 33° 、渗透率为 10^{-10} m^2 的砂土沉积层,孔隙压力演化的最大值较小,在实验后期出现明显的分层现象。分层的位置一般为两处,首先出现在水合物沉积层与上覆层接触面处,然后,水合物沉积层的最上面两个制样时形成的确实面之间。分析原因是随着水合物沉积层分解区域的向上扩展,水合物相变产生的气体逐渐向上渗透,孔隙压力缓慢增长直至稳定,当气体达到水合物沉积层与上覆层之间(较薄弱带)时,孔隙压力足够推动上覆层向上移动时,沉积层在此处断裂,下方气体进一步渗透聚集,形成第一个明显的分层,此时该处的气体压力大于或等于上覆层土体的重力与上覆层-模型筒间的侧壁摩擦力。上覆层上移使得分层区域的压力降低,当水合物沉积层第 1 层与第 2 层确实面(较薄弱带)间的孔隙压力与第 1 个分层区域的孔隙压力差大于或等于第 1 层的重力和侧壁摩擦时,沉积层再次发生断裂,气体又在此处聚集,形成第 2 个分层,如图 8。

(2)C 实验上覆层为黏聚力为 3.1 MPa、内摩擦角为 12.4° 、渗透率为 0 的水合物沉积层,加热后沉积层中的孔隙压力演化的最大值较大。约 4 min 后,有声波发出,进而上覆层被推动,发生喷发破坏。分析原因是由于水合物沉积层的胶结性较强,强度较高,不易断裂。只有当孔隙压力达到甚至超过上层某处沉积层的重力、沉积层与筒壁的摩擦力之和时,沉积层孔隙内的高压气体携带分解区域的土体剧烈地喷发,如图 9。

图 10 给出了 3 次实验 A、B、C 的温度和压力变化结果。在 A 和 B 两次实验中,上覆层为砂土沉积层,设定热源的最高温度为 200°C ,水合物热分解过程中热源处温度随时间的变化基本一致。在加热的前 2 min 内,温度快速上升,直到 105°C 左右保持不变,分析主要原因是由于开始阶段水合物沉积层和热源温差大,电热棒输入热量的功率高,温度快速上升,随着水合物分解范围扩大,气体向上渗透,相当一部分水合物分解产生的四氢呋喃液体和水在重力和气体压力的作用下向热源位置聚集,于是热源处温度在一定时间内保持在水的沸点左右。孔隙压力开始随着温度的升高和分解相变产生气体量的增加而上升,当温度平稳不变时,压力由于渗透降低,然



图 8 天然气水合物热分解的分层现象

Fig. 8 Stratification after thermal dissociation of gas hydrate



图 9 天然气水合物热分解的喷发现象

Fig. 9 Burst of soils after thermal dissociation of gas hydrate

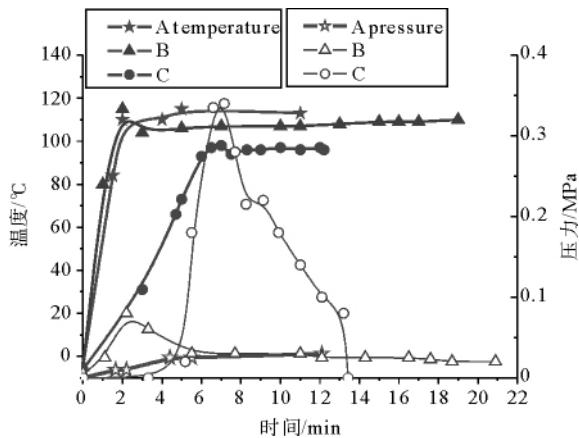


图 10 天然气水合物热分解的压力温度随时间的变化曲线

Fig. 10 pressure-temperature curve with time

后渗透和相变产生的气体量平衡时,孔隙压力基本稳定在一个数值上。B组实验中未看到压力上升阶段主要是由于连接压力表管道中形成了较多的水合物堵塞了气体通道。当管道中的水合物分解后,压力表才测到了孔隙压力,在孔隙压力平稳阶段,A、B

实验测量的孔隙压力基本一致。

在C实验中,上覆层为水合物沉积层,设定热源的最高温度为200℃。加热4min后,模型中热源周围的温度和压力快速上升,直到100℃左右,温度和压力同时达到最大值;而后温度稍微下降并趋于平稳,压力迅速下降直至喷发。由于上覆层为渗透性几乎为零的水合物沉积层覆盖层,气体渗透缓慢且沉积层与模型筒壁的摩擦力大,不容易发生分层破坏。当气体最高压力达到0.34MPa,推动上覆沉积层向上移动而引起喷发破坏。

需特别指出,压力表在水合物热分解开始一段时间示数为零,分析原因有两点:一方面连接压力表的管道口布置在模型筒的底部,水合物相变前锋从热源扩展到模型箱的底部需要一段时间,另一方面,连接压力表的管道中初始含有四氢呋喃水合物,其含量的多少以及相变的快慢对沉积层中孔隙压力的测量结果有影响,因此,前几分钟压力表测量的孔隙压力数据不能真实地反映沉积层内孔隙压力的演化

数据。在压力表示数增长至稳定后,测量结果可以同步地反映沉积层内孔隙气体压力。

3 结论

(1)当水合物缓慢分解且沉积层渗透性较大时,沉积层中压力可较快消散,水合物分解使分解区域的黏聚力降低,因此,沉积层的整体承载力降低而发生沉降甚至坍塌,当水合物沉积层具有一定坡度时发生滑坡失稳。因此,我国南海北部陆坡水合物沉积层(具有一定的坡度)中的水合物分解后可能引起滑坡、沉陷等地质灾害必须重视。

(2)当水合物快速分解时,由于未分解区域的沉积层渗透性低,气体压力不能快速消散,因此,水合物分解后,在分解区域形成一个高压气区,使得该区域土体接近液化甚至气化。随着水合物分解区域的扩展,当气体压力等于上覆沉积层重力、沉积层与模型箱的摩擦力时出现分层,当超过上部所有阻力时发生剧烈的破坏现象(喷发、开裂等),且破坏一般发生在沉积层的薄弱处,如层理、沉积层扰动处。因此,在深海油气田开采(管道穿过水合物沉积层)或者水合物开采过程中,管道高温引起的水合物快速分解可能导致分解区域承载力的急剧降低,覆盖层的稳定性评估是首要解决的问题。

(3)在本文实验中考察的是在地层破坏前水合物热分解相变后生成的液气流动缓慢且地层变形较小情况。发生分层破坏时高压气体压力可达到 0.1 MPa;喷发破坏时高压气体压力可达到 0.3 MPa。这几种破坏形式对实际工程均是严重的威胁,但由于测量手段还不够精细等原因本文对破坏的发展演化机理尚未深入研究。

致谢:赵京、王爱兰参与了全部实验工作,在此致谢。

参考文献(References)

[1] Hisashi O K, Sridhar N, Song F, et al. Synthesis of methane gas hydrate in porous sediments and its dissociation by depressurizing[J]. Powder Technology, 2002, 122:239-246.

[2] Gilles G, David G, Aleksandr M. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B8): 17781-17795.

[3] Riedel M, Bellefleur G, Dallimore SR, et al. Amplitude and frequency anomalies in regional 3D seismic data surrounding the Mallik 5L-38 research site, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada[J]. Geophysics, 2006, 71(6): 183-191.

[4] Xu W, Germanovich L N. Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical approach[J]. J. Geophys. Res., 111, B01104, doi:10.1029/2004JB003600, 2006.

[5] Nabil Sultan. Comment on "Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical approach",[J]. J. Geophys. Res. -Solid Earth, 2007, 112(B2) NIL_78-NIL84.

[6] Zhang X H, Lu X B, Li Q P, et al. Thermally induced evolution of phase transformations in gas hydrate sediment. SCIENCE CHINA Physics[J]. Mechanics & Astronomy, 2010, 53(8): 1530-1535.

[7] Briaud J L, Chaouch A. Hydrate melting in soil around hot conductor[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997,123(7): 645-653.

[8] Chaouch A.,Briaud J L. Post melting behavior of gas hydrates in soft ocean sediments[J]. OTC8298, 1997, 1-11.

[9] Jung WY, Peter R V. Effects of bottom water warming and sea level rise on Holocene hydrate dissociation and mass wasting along the Norwegian-Barents Continental Margin[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, B06104.

[10] Driscoll N W, Weissel J K, Goff J A. Potential for large-scale submarine slope failure and tsunami generation along the U. S. mid-Atlantic coast[J]. Geology, 2000, 28(5): 407-410.

[11] Milkov A V. World distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrate[J]. Marine Geol., 2000, 167: 29-42.

[12] KAZUSHIGE NAGASHIMA, Interferometric observation of mass transport processes adjacent to tetrahydrofuran clathrate hydrates under nonequilibrium conditions [J]. Fluid Phase Equilibrium, 2003, 214: 11-24.

[13] TOMOYUKI IID A. Formation and dissociation of clathrate in stoichiometric tetrahydrofuran-water mixture subjected to one-dimensional cooling or heating[J]. Chemical Engineering Science, 2001, (56): 4747-4758.

[14] Akiya T, Shimazaki T, Oowa M. Formation characteristics of tetrahydrofuran hydrate to be used as a cool storage medium[C]//Annual Meeting of the Society of Chemical Engineers, Tokyo, Japan, 1997.

[15] 马应海, 苟兰涛, 何晓霞, 刘芙蓉. 四氢呋喃水合物零度以上生成动力学研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2): 244-248.

[16] 谢应明, 梁德青, 等. 四氢呋喃水合物换热管外结晶分解动力学研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(3): 313-316.

[17] Nagashima K, Orihashi S, Yamamoto Y, Takahashi M. Encapsulation of saline solution by tetrahydrofuran clathrate hydrates and inclusion migration by recrystallization [J]. J. Phys. Chem. B, 2005, 109, 10147-10153.

[18] Zeng H, Wilson L D, Walker V K, et al. The effect of biological and polymeric inhibitors on methane gas hydrate growth kinetics[J]. J. Am. Chem. Soc., 2006, 128, 2844-2850.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE POSSIBLE STRATUM FAILURE CAUSED BY FAST THERMAL INDUCED HYDRATE DISSOCIATION

ZHANG Xuhui¹, LU Xiaobing¹, WANG Shuyun¹, LI Qingping², YAO Haiyuan²

(1 Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 2 COONC, Beijing 100027)

Abstract: Hydrate dissociation in marine deposits may cause large disasters. Experiments are carried out to study the failure conditions and modes caused by the dissociation of hydrate. A rectangular model box and a cylindrical model box are designed to simulate the two-dimensional and one-dimensional conditions respectively. It is shown that kinds of failure modes, including slowly sliding and settlement, layered destruction and burst, occur with the thermal dissociation of hydrate happened fast or slow and for different hydrate deposit and cover deposit (such as the heterogeneity of the deposit, permeability of the cover layer). Each kind of these failures is a severe threat to engineering.

Key words: hydrate dissociation; dissociation zone; layered destruction; burst; sliding and settlement

书 海 拾 贝

天然气水合物实验技术及应用

业渝光, 刘昌岭 等编著 地质出版社出版

本书系统地介绍了天然气水合物的各种实验技术以及这些技术应用到水合物研究中的最新成果, 在侧重介绍作者所在实验室十年来取得的成果的同时, 对国内外研究进展也做了较全面的介绍。

本书分 13 章。第 1 章简要介绍了天然气水合物的性质、形成与分布及其勘探技术; 第 2 章至第 4 章介绍了超声、电阻和时域反射 3 种探测技术的开发及其应用; 第 5 章和第 6 章介绍了水合物的热物理、渗透率及力学特性等物性参数实验技术; 第 7 章和第 8 章介绍了水合物地球化学方面的实验技术; 第 9 章至第 11 章介绍了水合物稳定性条件、分解动力学及模拟开采实验技术; 第 12 章和第 13 章介绍了激光拉曼、X-CT 等现代仪器测试技术在水合物研究中的应用。

本书可供从事天然气水合物勘探与开发研究人员、技术人员及管理人员使用, 也可供大专院校相关专业的师生参考和使用。

本书共 30 千字, 16 开, 定价 50 元, 2011 年 4 月出版发行。

(本刊)