

考虑热传导开采天然气水合物藏的可行性研究： 以南海神狐海域为例

苏正^{1,2,3}, 曹运诚^{1,4}, 杨睿^{1,2,3}, 张可霓⁵, 吴能友^{1,2,3}

(1 中国科学院广州天然气水合物研究中心, 广东广州 510640 2 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广东广州 510640 3 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640, 4 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640 5 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 天然气水合物作为一种新型替代能源, 如何有效开发成为当前研究的热点, 热激发被认为是除降压法外天然气水合物开采的另一重要途径; 然而, 目前对于天然气水合物热开采效率及其经济可行性仍没有清楚的认识。本研究构建了天然气水合物注热开采的模型, 该模型经过理想简化, 忽略了开采过程中热对流和压力差的影响, 只考虑热作用对水合物分解的影响; 进一步计算了水合物注热开采的热消耗效率和天然气的能量效益、可研究水合物开采的最大产出效率。通过对南海北部神狐海域天然气水合物藏特征以及钻井取心相关重要参数的研究, 计算了天然气水合物的注热开发潜力, 并通过相关参数的敏感性计算和分析研究, 论证了神狐海域天然气水合物注热开采效率和可行性。研究结果显示, 神狐海域水合物藏的单位长度生产井段 3 a 的最大累积产气量为 509 m³, 远低于工业开发标准。水合物热激发分解速度缓慢, 注热开采水合物生产成本较高, 经济效益低下; 因此, 基于热传导开采南海神狐海域天然气水合物不具备工业应用的可行性。

关键词: 天然气水合物; 注热开发; 数值分析; 神狐海域

中图分类号: P744.4 P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2011)03-0608-09

Feasibility of Gas Production from Hydrate Reservoir Considering Heat Conduction: Taking Shenhu Area in the South China Sea as an Example

SU Zheng^{1,2,3}, CAO Yun-cheng^{1,4}, YANG Rui^{1,2,3}, ZHANG Ke-ni⁵, WU Neng-you^{1,2,3}

(1 Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences Guangzhou, Guangdong 510640, China;
2 Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences Guangzhou, Guangdong 510640, China;
3 Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences Guangzhou, Guangdong 510640, China;
4 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences Guangzhou, Guangdong 510640, China;
5 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract How the gas to be effectively produced from hydrate deposits has become a hot research topic. Heat stimulation is regarded as another important way for producing hydrate besides depressurization. However, the production efficiency and economic feasibility of gas production by heat stimulation have not been clearly understood. In this paper, a model for predicting gas production from hydrate deposits by heat stimulation was developed. The model was idealized and simplified by neglecting the effects of heat convection and pressure in sediment. We computed the heat consumption efficiency and gas energy efficiency of gas production by heat stimula-

收稿日期: 2010-12-28; 改回日期: 2011-04-25; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家重点基础研究计划项目(2009CB219508); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-805); 国家自然科学基金-广东联合基金项目(U0933004); 广东省博士启动基金项目(0909J1001); 中国科学院广州能源研究所所长基金项目(o807re)。

作者简介: 苏正, 男, 博士, 副研究员, 1980年出生, 海洋地质学专业, 主要从事天然气水合物、地热和盆地流体活动的数值模拟研究。Email: suzheng@ms.gic.ac.cn

通信作者: 吴能友, 男, 研究员, 1965年出生, 海洋地质学专业, 主要从事海洋地质、天然气水合物、石油天然气资源调查与研究。Email: wuny@ms.gic.ac.cn

tion, only considering effect of hydrate dissociation. This model can be used to predict the maximum production efficiency. After thorough analysis of the characteristics of hydrate reservoirs and significant parameters from drilling and sampling research, we calculated the production potential of Shenhu hydrate deposits and investigated the production efficiency and feasibility. The result shows that the maximum amount of cumulative gas production at Shenhu is about 509 m^3 per meter in three years, and the production potential is much lower than the industrial criterion for marine production. Therefore, it is concluded that hydrate dissociation rate is very low, and production cost is high and economic value is low under the current production technology. Thus it is unfeasible to produce gas from Shenhu hydrate deposits only considering the thermal conduction.

Key words gas hydrate; heat stimulation; numerical analysis; Shenhu area

0 引 言

天然气水合物是由小型气体分子和水分子构成的化合物, 其中气体分子被吸附在由水分子构成的笼型晶囊中。自然界中水合物的客体分子可能是二氧化碳、硫化氢或氮气, 但分布最为广泛的是甲烷水合物^[1]。水合物的形成需要低温高压环境, 并伴随着放热反应过程, 但当其所处的低温高压环境被破坏后, 水合物可能发生分解。天然气水合物作为潜在的替代能源具有巨大的资源潜力, 同时, 其作为碳循环的重要环节也是全球气候变化的重要影响因素。因此, 世界各国对于天然气水合物的研究表现出浓厚的兴趣。然而, 天然气水合物能否真正在世界能源领域有所贡献取决于如何最终将天然气有效开采出来^[2]。

目前认为主要有 3 种途径开采水合物中的天然气^[2]: (1) 降压, 使系统压力低于天然气水合物的相平衡压力^[1, 3]; (2) 热激发, 通过加热使系统温度高于天然气水合物的相平衡温度^[1-4]; (3) 阻抗剂, 通过加入化学阻抗剂改变水合物的相平衡^[1]。这 3 种方法都是通过改变水合物系统的相平衡点, 使水合物分解释放出天然气。其中, 降压法被认为是最简洁、高效和节能的天然气水合物开发手段^[2, 5-9]; 使用阻抗剂不光工艺操作复杂、代价昂贵, 而且事实上很难有效地将阻抗剂打入沉积体中, 抑或引起地层压力升高而掩盖了阻抗剂的作用效果; 热激发法在实验模拟和数值模拟中都有广泛应用^[4-9], 但其开发效率较低, 在未来天然气水合物开发实践中能否采用尚无定论。

南海北部陆坡带是目前我国天然气水合物调查研究的重点区域, 而神狐海域被认为是其中最有可能的区块。神狐海域处于南海北部陆坡中段, 介于西沙海槽和东沙海岛之间, 构造上处于珠江

口盆地珠 凹陷, 自中新世以来进入构造沉降, 沉积速率高, 为该区天然气水合物发育创造了良好地质条件。神狐海域沉积体厚度为 1 000~ 7 000 m, 有机质含量为 0.46%~ 1.9%^[10-12], 提供了丰富的水合物发育的物质基础。综合地质、地球物理、地球化学和地热调查结果显示, 南海北部神狐海域是天然气水合物发育的有利场所。基于天然气水合物的产出标志, 广州海洋地质调查局在神狐海域进行了钻探取心研究^[13-14], 并证明在 SH2、SH3 和 SH7 3 个站位的砂泥沉积中有甲烷水合物存在, 其水深介于 1 108~ 1 235 m 之间, 最厚水合物层达 40 m, 水合物饱和度最高为 48%, 水合物层上、下均为渗透性含水层, 且无明显游离气藏发育^[14], 属于典型的 3 型水合物藏^[15]。

神狐海域已被拟定为我国水合物勘探开发的重点靶区。虽然国内在水合物开采方法、机理和开采潜力评价上有一些研究^[16-22], 然而对于如何开发以及开发潜力如何仍没有具体认识。本文研究的目的是通过建立热激发开采天然气水合物的物理模型, 基于孔隙介质传热传质原理以及天然气水合物的分解理论构建水合物热开发的数学模型, 计算模拟并孔点源加热过程中能量径向传输过程对水合物分解的热效应, 确定天然气水合物的分解半径、并孔热源的利用效率, 并计算热能的投入和产出。在本文的研究中, 通过对数学模型的理想简化, 以忽略传质过程(并孔气流的生产过程)来放大注热开发效率, 讨论神狐海域水合物注热开发能效的最大极限, 科学论证南海北部神狐海域天然气水合物热激发开采的可行性。

1 概念模型

本文的水合物热开发基本思路是基于当前油气开发工艺技术的垂直单井开发模型, 由于对称

性,数值计算中可采用环状网格划分方法进行离散计算,以格点特征表征单元格的性质。地层的加热操作可通过在井孔放置电磁线圈或其他可能途径热使井管以及井壁升温,并实现径向传热,诱发水合物分解,分解的天然气和水沿传热的相反路径流向井孔(传质与传热路径相反),并通过套管网孔进入生产井管。由于神狐水合物层并无明显的上下边界,而且其盖层和下伏层均为含水渗透层,生产过程中上、下含水层中的水也可能进入井管,因而降低了天然气的开发效率,为减小上、下含水层的影响,实际开发中流体产出井段(即生产井段)长度应小于水合物层厚度。在本文模型计算中只取单位水合物层厚度(1 m),井孔温度可任意调节,井孔热量径向水平传导,分解的天然气被完全产出,但不研究气体传输和产气过程,同时也不考虑垂向的热传导和物质传输,这一理想简化确保了无垂向的热能损耗、无分解气的垂向逃逸和水的垂向补给(图1)。此外,假定水合物的分解过程相当于以井孔为中心的径向剥离,距离井孔近的水合物优先完全分解,而后距离远的再分解。

由于本文旨在进行理想化数值计算分析,实际地层温压只作为参考量,不影响计算;因此,模型中初始地层的压力和温度用实际地层静水压力和实测温度的平均值表示。例如,在神狐水合物层, $P = 14.58 \text{ MPa}$, $T = 14.76$ [14]; $T = T_e -$

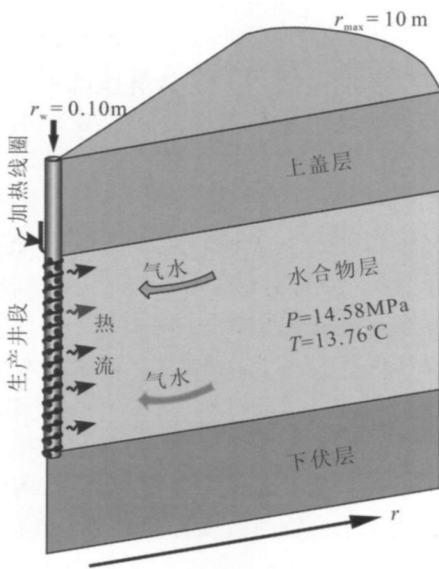


图1 甲烷水合物的注热开发模型示意图 [5, 14, 23]

Fig 1 Schematic illustration of gas production from hydrate deposit by thermal stimulation [5, 14, 23]

T 描述相平衡温度(T_e)与实际地温(T)之差(后文中称为地层温差),是水合物分解所必须提升的地层温度; Q_H 表示分解水合物所需的反应热。而且认为开发过程中水合物的分解为平衡反应过程,即当地层温度升高 T 、并能提供 Q_H 的热量便可使水合物发生分解、释放天然气,这种平衡反应生产模型反映了水合物藏的最大产能。同时还进一步假定,所有经平衡反应分解的水合物天然气都能被完全产出,而不考虑流体在地层中的实际赋存状态和传输效率,这也就是忽略地层中压力的作用效果,撇开了研究实际压力分布和演化、以及地层渗透特征对气体产能的影响,也忽略了井孔生产(气体和水)而导致的热能损耗,只研究水合物在热作用下的分解过程。这种假设使本文垂直单井中的注热开发效率再次放大,相当于水合物热开发效率的极限值,以此理想简化模型研究神狐天然气水合物的最大开发效率,并结合一定的定性分析和经验认识,即可认识神狐水合物注热开发的可行性。如果其产能仍低于海洋工业开发的最低门槛,则就可以判定通过热激发开采神狐天然气水合物是行不通的。

2 数学模型

沉积地层中水合物的注热开发过程包含了两种能量消耗形式,一是使地层温度升高到水合物分解相平衡温度所需的热量 Q_T ,一是提供水合物分解所需的反应热 Q_H 。因此,热能的直接消耗量 Q 为:

$$Q = Q_T + Q_H \quad (1)$$

其中: $Q_T = c_p T$, $Q_H = S_{h-h} H$; 为沉积地层密度, h 为水合物密度, c_p 为沉积体热容, c_p 是沉积地层构成组分的函数, S_{h-h} 表征地层的孔隙度。

从方程(1)可以看出总能量 Q 是实际地层温度与相平衡温度之差 T 、以及孔隙中水合物饱和度 S_h 的函数。本文计算中取 $c_p = 3000 \text{ kJ}/(\text{m}^3)$, 甲烷水合物分解焓 $H = 420 \text{ kJ}^{[1]}$ 。水合物分解热(焓)消耗相对整体热消耗的比率(称为水合物分解热消耗效率, R_{DH})为:

$$R_{DH} = Q_H / (Q_H + Q_T) \\ = S_{h-h} H / (S_{h-h} H + c_p T) \quad (2)$$

另一方面,水合物分解产生的甲烷气是要被作为燃料而消耗的,天然气的总燃烧热与总能量消耗比(称为水合物热分解的能量效率, R_{CH})体现

了水合物注热开发的价值:

$$R_{CH} = Q_C / (Q_H + Q_T) \\ = S_{h-h} / (S_{h-h} H + c_p T) \quad (3)$$

其中: Q_C 为水合物分解天然气的净燃烧热, 表示天然气的净热值。

方程 (1) 中 Q 表示热能的直接消耗, 是水合物分解所必须的能量消耗, 但除此消耗以外还存在另一种形式的能量损失, 即传导进入地层的热量随井孔流体的产出被带出地层, 因而使井孔热源的加热效率打折扣, 降低了热效率。在基于传统油气开发工艺条件下的水合物开发研究中, 传热和传质过程也是以井孔为中心, 沿径向的能量和质量传输, 并使水合物发生分解; 因此, 天然气水合物垂直单井开发的能量径向传输方程为:

$$\frac{c_p r T}{t} = \left[\frac{r}{r} \frac{T}{r} \right] - \frac{((c_g q_g + c_w q_w) r T)}{r} - Q_h r \quad (4)$$

方程 (4) 右端项依次表示了热传导、热对流和水合物的分解热。其中: λ 为地层热导率, r 表示以井孔中轴线为原点的半径距离, t 为时间, c_w 和 c_g 分别表示水和气体的比热容, q_w 和 q_g 分别为水和气的通量。

如果忽略水合物开发过程中物质的传输过程以及其对水合物分解的影响, 仅考虑水合物受热分解, 也就是说不考虑地层中气体和水在压力差的驱动下流向井孔的产出过程, 只研究地层中热传递和水合物分解的吸热作用, 视水合物分解为单一的能量交换过程, 即省略方程 (4) 中的热对流项。因此, 水合物分解的能量控制方程可改写为:

$$\frac{c_p r T}{t} = \left[\frac{r}{r} \frac{T}{r} \right] - Q_h r \quad (5)$$

3 神狐水合物注热开采效率

南海北部陆坡神狐海域是我国天然气水合物研究的重点区域, 但神狐水合物的开发潜力还有待于进一步论证。钻探取心调查虽然证明在 SH2、SH3 和 SH7 3 个站位有甲烷水合物的发育, 但在 SH3 站位的水合物层厚度仅为 10 m, SH7 站位为 22 m, 而且水合物饱和度也相对较低; SH2 站位水合物层最厚, 达 40 m, 但水合物饱和度变化幅度大^[14]。因此, 本文的模拟计算以 SH2 站位水合物的产出特征为参考, 论证该区域内水合物的热开发潜力。

SH2 站位位于神狐 1 235 m 水深的海域, 其水合物分布于海底之下 188 ~ 228 m, 沉积介质的孔隙度为 0.38, 孔隙中水合物饱和度为 1.0% ~ 47.3%, Su 等推测这种砂泥沉积的渗透率非常低^[14]。以水合物层中间温度和压力值^[14]代表模拟系统初始温压, 初始地层温度为 14.76 °C, 初始静水压力为 14.58 MPa, 根据甲烷气体的状态方程^[24], 气体密度为 120 kg/m³。水合物热开发物理模型设定井孔半径 $r_w = 0.1$ m (图 1), 最大模拟计算半径 $r_{max} = 10$ m, 在一维空间的径向步长 $\Delta r = 0.01$ m, 模拟开采的时间周期为 3 a。水合物热开发效率模拟的主要考察要素为: 初始地层温度与相平衡温度的差值 T 、井孔温度 (边界温度)、水合物饱和度和地层导热率。

3.1 参考条件分析

水合物分解热消耗效率 R_{DH} 反映了水合物注入开发的直接热效应 (方程 (2)), 如果水合物藏的初始温度与水合物分解相平衡温度之差 (地层温差) 较大, 则大量热能损耗在地层加热过程中, 不利于水合物的加热开发; 另一方面, 如果水合物饱和度很低, 分解水合物所需能量的比重太低, 则仍有太多热能浪费在改变地层温度上。在南海北部陆坡的神狐海域, SH2 站位水合物顶、底界面的温差为 1.77 °C, 水合物层平均温度 (14.76 °C) 与底界温度 (表征相平衡温度, 等于 15.65 °C) 之差为 0.89 °C^[14]; 因此, 本文取 $T = 1$ °C 为参考温差, 水合物饱和度的参考值为 0.30, 模拟域厚度为 40 m, 其中的可采气量计算为 25 万 m³。

图 2 反映水合物加热分解效率随水合物饱和度的增加而增大, 但随温差的增大而降低的规律。这意味着在水合物稳定带底界位置, 由于实际地层温度与水合物相平衡温度完全吻合, 而且水合物饱和度相对较高, 因此, 不需要消耗热量使地层升温, 所有能量都供给到水合物的吸热分解, 水合物的受热分解效率必然最高, 并产出最多的甲烷气。但居于水合物层顶部的温度与相应点的相平衡温差较大, 而且水合物的饱和度很低 (< 10%), 水合物的热分解效率则相对较低, 热量不能被有效利用。需要强调的是, 方程 (2) 中并没有考虑热的传输过程, 没有研究井孔热量能否有效到达水合物分解前缘。事实上, 水合物分解产生的天然气和水由沉积介质流向井孔, 这与井孔高温热源的传递方向相反, 井孔产出流体把一部分热量带回井孔或排出, 由于流动相气和水的传热

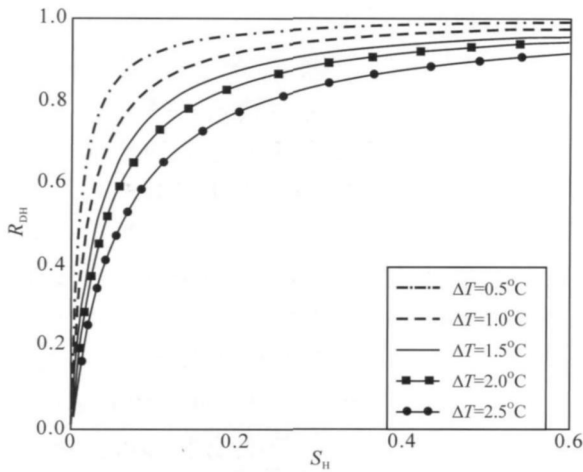


图 2 水合物分解热消耗效率 R_{DH} 与水合物饱和度 S_H 的依赖关系及其对温差 T 的敏感性

Fig 2 Dependence of efficiency of heat consumption by hydrate dissociation R_{DH} on hydrate saturation S_H and sensitivity to temperature difference T

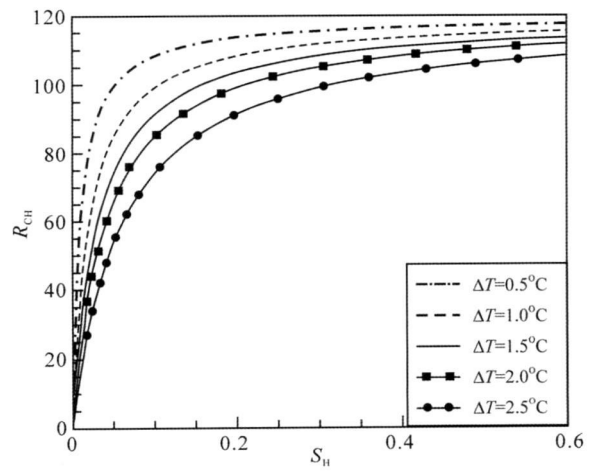


图 3 水合物热分解的能量效率 R_{CH} 与水合物饱和度 S_H 的依赖关系及其对温差 T 的敏感性

Fig 3 Dependence of energy efficiency of hydrate dissociation by heat stimulation R_{CH} on hydrate saturation S_H and sensitivity to temperature difference T

效率远高于固相沉积格架(岩石), 气和水的反向流动和生产, 必然严重减少到达水合物分解前缘的热量, 这相当于降低了井孔周围沉积体的热传输能力(热导率)。

目前对于天然气水合物的开发研究基本上是基于能源利用的需求, 而在水合物的热激发开采中是通过向地层中注入热量使水合物发生分解并生产天然气, 生产的天然气可作为新的燃料用于生产和生活, 从经济角度考虑, 开发中的热投入经济效益必须划算。如果把生产的甲烷气完全燃烧, 计算燃烧释放的热(甲烷的净热值为 50 200 kJ/kg), 并与生产投入的热量进行对比, 即为水合物分解的能量效率(方程(3))。如图 3 所示, 以神狐海域 SH 2 站为例, 参考其水合物饱和度为 0.30 时, 能量效率 R_{CH} 高达 100 并随温差 T 的降低而增加。但在此计算中同样没有考虑热传输效率的影响, 实际上由于流体产出, 大量热量被流体带出井外, 而且开发越快, 损耗越多; 因此, 井孔热流不能高效地到达水合物分解前缘, 激发水合物分解。此外, 以上计算(图 2 和图 3)中都没有考虑时间因素, 如果天然气的产出速率很小, 在时间尺度上的能量效率以及热消耗效率可能很低。

基于概念模型的假设: 在热量满足的格点水合物完全分解, 呈圆柱层剥离, 分解的天然气被全部产出, 分解反应再进入下一格点。这种假设与实际水合物分解特征有所不同, 实际水合物

分解存在一个过渡带, 没有明显的分解半径, 但这种假设更能直接体现水合物的分解速度, 最量化水合物的开采效益。根据方程(5)可以计算水合物的分解量。水合物受热分解释放甲烷气和水, 其中甲烷的质量分数为 0.129, 单位体积沉积体中水合物分解释放甲烷气的质量为 $0.129 S_{H_0}$ 。如图 4 所示, 经历 3 a 时间(1 095 d)水合物分解到 $r_d = 2.91$ m, 但随着水合物分解进行, 地层增温和水合物分解的能量需求增加, 致使水合物分解半径 r_d 的增长速率减小。但天然气的累积产量增长稳定, 单位厚度(1 m)水合物层中 3 a 的累计产气量为 509 m^3 (图 4), 每天的平均产气量为 0.46 m^3 。以 SH 2 站水合物层厚 40 m 计算^[14], 3 a 一共能产出甲烷气 $20\,360 \text{ m}^3$, 约为模拟域中水合物所含甲烷气总量的 8%, 平均每天的累积产气量为 18 m^3 , 比海洋工业开采的绝对标准($2 \text{ m}^3/\text{s}$ 或 $172\,800 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[5])低 9 600 倍, 但模型显示这已是神狐水合物分解产出的最大速率。

垂直井孔位置的恒温加热引起地层温度发生改变, 但由于沉积地层的导热性很差, 井孔热不能有效地从井孔向周围传递, 致使高温区仅限于井孔周围很小范围, 而距离井孔较远的含水合物层温度维持相对稳定, 处于明显的低温区。如图 5 所示, 在参考热导率 $= 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 情况下, 温度在井孔周围发生剧烈变化, 从井孔到水合物分解前缘(等于分解半径 r_d)温度从 200 骤降至地层初始温度, 不同时间的温度剖面反映了地层温

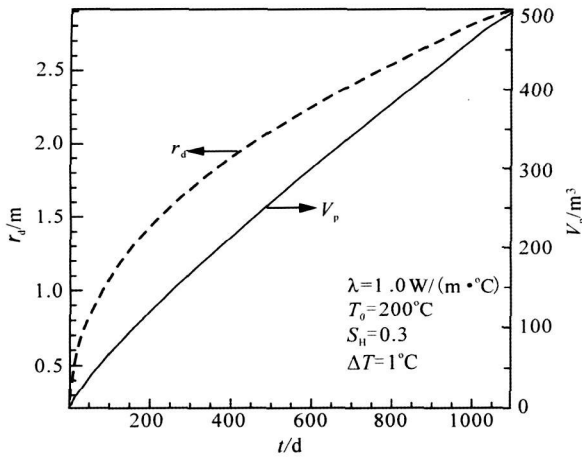


图 4 天然气水合物热分解半径 r_d 和气体累积产量 V_p 的时间演化(水合物层厚度 = 1 m)

Fig. 4 Evolution of hydrate dissociation radius r_d and cumulative gas production V_p (the thickness of the simulated lay is 1 m)

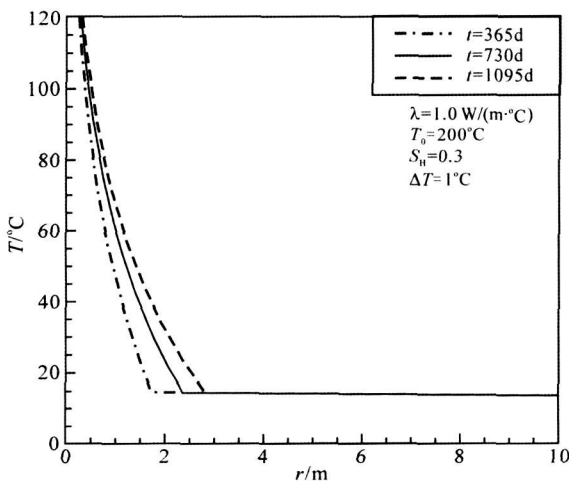


图 5 水合物热激发开采中地层温度分布及其随时间的演化

Fig. 5 Spatial distribution and temporal evolution of formation temperature during hydrate production by heat stimulation

度的变化和水合物分解半径的迁移, 而且迁移速度降低, 第 1 年 (365 d) 分解了 1.83 m, 第 2 年 (730 d) 分解到 2.45 m, 第 3 年 (1095 d) 迁移到 2.91 m, 这反映了升温面积或水合物分解量的减小。图 5 中的温度传递没有考虑流体对流和生产作业的影响 (方程 (5)), 而实际上流体反向对流和井孔抽取都将十分明显影响地层的温度分布和水合物分解过程, 因此, 井孔四周的高温区范围应更小, 温度变化梯度更大, 而且实际地层的有效热导率应低于参考值 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$ 。

3.2 参数敏感性分析

天然气水合物的热激发分解效率和分解半径依赖于温度差 (初始地层温度与相平衡温度差)、井孔边界温度、水合物饱和度以及地层的有效热导率^[19-20]。其中地层温差和水合物饱和度在水合物开发工程中可视为固定参数, 而井孔边界温度可以人为改变, 以取得最好的热能利用和水合物分解效率; 地层的有效热导率表征了井孔热源向地层水合物的能量传输效率, 其影响因素包括原始地层特征性质和水合物分解引起的能量迁移。通过对以上影响参数的敏感性分析即可判断水合物热激发开采的主要响应指标, 指导节能高效的水合物开发作业。

井口温度是水合物热激发开采的主要控制参数, 其作用效果也相对明显。如图 6 所示, 在参考热导率、水合物饱和度以及地层温差不变的情况下, 提高井口边界输入温度明显有助于改善水合物分解效率。这是由于井口温度的增加提高了沉积层中径向地温梯度, 热流量提高, 单位时间内更多热量到达水合物分解前缘, 分解出更多天然气。例如, 在井孔边界温度为 100 时, 3 a 时间的水合物分解半径为 2.62 m; 而 $T_0 = 200$ 时, 同样的生产期内 r_d 增加到 3.7 m。另一方面, 边界温度增加对水合物生产效率的改善作用逐渐减小, 如 T_0 从 100 增加到 150, 分解半径增加了 0.5 m, 而在 T_0 从 150 增加到 200 时, 分解半径的增长为 0.4 m。这是由于增加井孔温度能

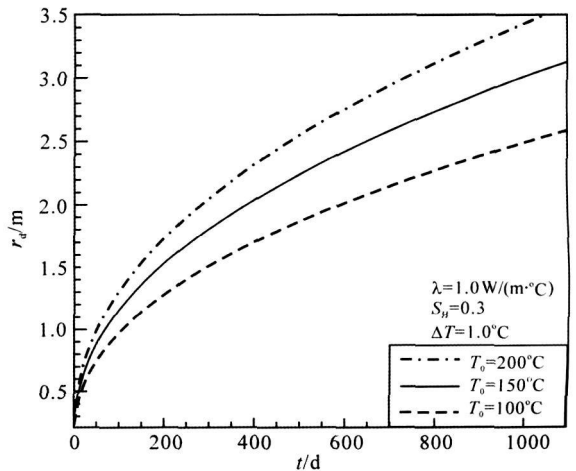


图 6 天然气水合物的分解半径演化及其对井孔温度的敏感性

Fig. 6 Evolution of hydrate dissociation radius and its sensitivity to bottom-hole temperature

非常有效地提高近井孔位置的温度梯度，而在距离井孔较远时，由于地层的热传输能力较低，温度梯度的变化幅度趋于平缓，水合物分解变缓。

提高原始地层温度是井孔注入热能的一个重要直接消耗，又是天然气水合物热激发开采所必需的代价，其影响大小取决于地层温差幅度 T ，温差越大，能量消耗越多。如图 7 所示，在保持参考地层热导率、井孔边界温度和水合物初始饱和度不变条件下，地层温差越小，水合物分解半径增长越快，而且随着开采时间的增加，其响应效果越加明显。但总体来说，地层温差对水合物分解速率的影响较小。这是因为单位沉积体的热容远小于其所含水合物的总分解焓，地层升温所需的热量在总热消耗中的比重很小。当温差 T 较大时，其能量消耗比重会显著增加，但在神狐海域水合物层的最大温差为 1.77 ，因此，初始地层温差对于神狐水合物热开发的影响作用不大，即地层初始温度对水合物开发效率的影响较小。

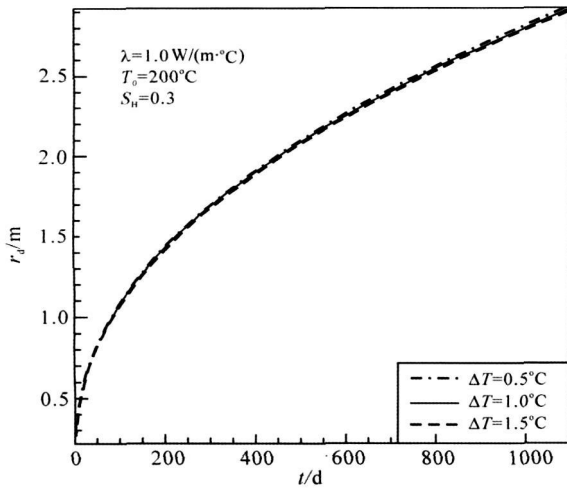


图 7 天然气水合物的分解半径演化及其对地层温差的敏感性

Fig 7 Evolution of hydrate dissociation radius and its sensitivity to the temperature difference

水合物饱和度是本文模型计算中热能消耗的最主要影响因素，水合物饱和度对注热消耗和水合物分解半径增长有显著影响。在参考地层热导率、井孔边界温度和地层温差不变的情况下，探讨了水合物分解半径对于水合物饱和度的敏感响应，如图 8 所示。降低水合物饱和度能明显增加水合物分解半径的增长速率。在水合物饱和度 S_H 为 40% 时，分解半径 $r_d = 2.5$ m，而当 S_H 为 20% 时，同样生产期内 r_d 增加到 3.4 m。这是因为孔隙

中的水合物都是通过井孔供热分解，分解所需的总热量正比于水合物的饱和度，水合物饱和度越高，单位体积需要更多的分解热，在同样边界温度供热的条件下，分解半径增长缓慢。神狐海域 SH2 站位的的研究结果显示，水合物饱和度值在 0~48% 区间内发散分布，而且在浅层低温区水合物的饱和度基本低于 10%，在此特征条件下的注热开采，不仅使很多能量损耗在地层升温上，降低了热分解效率，而且产出的天然气量较低，分解天然气的能量效益不高。因此，低的水合物饱和度下水合物热分解半径的增长速率提高，但水合物藏所蕴含的气体资源量却减小了，不满足经济开发的需求，即水合物饱和度不是影响热开发效率的关键因素。

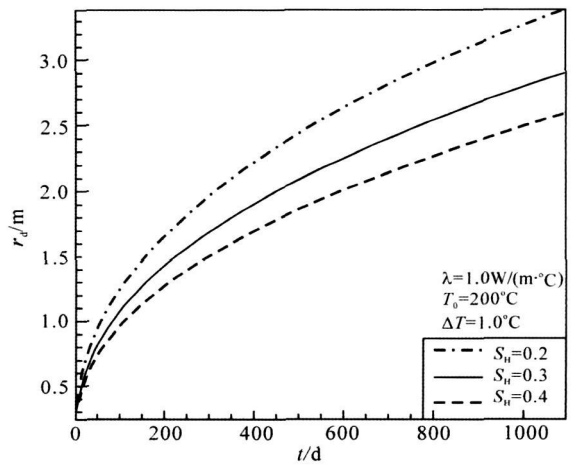


图 8 天然气水合物的分解半径演化及其对水合物饱和度的敏感性

Fig 8 Evolution of hydrate dissociation radius and its sensitivity to hydrate saturation

地层有效热导率是水合物注热开采效率的关键因素，表征了沉积体的热传输效率。图 9 显示，水合物分解速率(分解半径)随热导率的提高而明显增长，在常见的干样热导率(dry thermal conductivity) = $1 \text{ W}/(\text{m})$ 条件下，3 a 时间水合物的分解半径为 3.57 m；而在湿样热导率(wet thermal conductivity) = $3.1 \text{ W}/(\text{m})$ 条件下，热开发效率更加显著，3 a 水合物的分解半径达 5.78 m。然而，在水合物注入开发中既有热流从井孔高温区径向发散传递，同时有水合物分解流体的反向流动，由于孔隙流体的热容高于孔隙沉积格架的热容；因此，井孔气体和水的产出带走大量热能，井孔输入热量的大部分甚至全部将被损耗。在实际开发中这种能量损耗将更加明显。

因为井孔压力低于初始地层压力以提高流体的产出速率, 也加速了热流的损耗速度。实际沉积体的有效热导率既要表征孔隙介质特征, 又要体现流体的逆向 (与热传递方向相反) 对流, 实际有效热导率应该低于干样和湿样热导率。如果实际热导率 $= 0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 时, 分解半径 $r_d = 1.83 \text{ m}$, 3 a 仅能从水合物中分解出 200 m^3 的甲烷气; 如果 $= 0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 时, $r_d = 0.86 \text{ m}$, 3 a 仅能分解出 44 m^3 的甲烷气; 而事实上, 真正能从井孔产出的量或将更小。因此, 以简单的垂直单井对神狐天然气水合物进行注热开发, 其开采效率和经济效益非常低, 说明基于热传导开采神狐海域的天然气水合物是不可行的。增加水合物热开发过程中地层的实际有效传热效率是提高产能的最敏感因素, 是水合物热开发工艺技术研究亟待解决的关键问题。

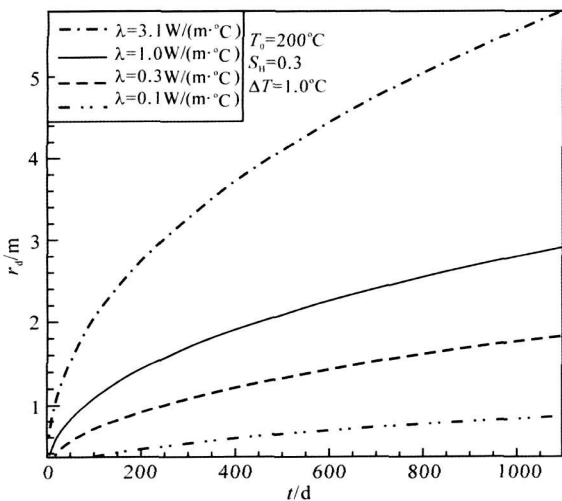


图 9 天然气水合物的分解半径演化及其对沉积地层有效热导率的敏感性

Fig 9 Evolution of hydrate dissociation radius and its sensitivity to the effective thermal conductivity

4 结 论

本文构建了天然气水合物垂直单井开发的径向一维的理想简化模型, 并模拟计算了南海北部神狐海域水合物的注热开发效率。研究发现, 天然气水合物热激发开采在理论上具有较高的热消耗效率和低的能量产出效益, 增加井孔温度和地层热导率、降低水合物饱和度和地层温差都有利于提高水合物的分解速度, 提高产能和效益。但实际上, 由于神狐海域水合物饱和度分布发散, 尤其是实际地层的有效热导率较低, 井孔边界高

温热流不能有效地径向传输至水合物分解前缘, 而且随着天然气水合物分解和流体产出, 更多的热能被流体带出地层, 形成额外的能量损耗, 使实际地层的导热效率远低于流体稳定的沉积体, 水合物分解产气率低; 因此, 在神狐海域利用垂直井进行热激发工业开采天然气水合物不具备可行性。

参考文献:

- [1] Sloan E D. Clathrate Hydrates of Natural Gases [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1998: 1-100.
- [2] Moridis G J, Collett T, Dallimore S, et al. Numerical studies of gas production from several methane hydrate zones at the Mallik Site, Mackenzie Delta, Canada [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 43: 219-239.
- [3] 郝永卯, 薄启炜, 陈月明, 等. 天然气水合物降压开采实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 217-220.
- [4] 杜庆军, 陈月明, 李淑霞, 等. 天然气水合物注热开采数学模型 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 470-473.
- [5] Moridis G J, Reagan M T, Kim S J, et al. Evaluation of the gas production potential of marine hydrate deposits in the Ulleung Basin of the Korean East Sea [R]. Jakarta: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, 2007.
- [6] Moridis G J, Reagan M T. Strategies for gas production from oceanic class 3 hydrate accumulations [R]. Houston: Offshore Technology Conference, 2007.
- [7] Moridis G J, Reagan M T. Gas production from oceanic class 2 hydrate accumulations [R]. Houston: Offshore Technology Conference, 2007.
- [8] Moridis G J, Kowalsky M B, Pruess K. Depressurization-Induced Gas Production from Class 1 Hydrate Deposits (LBNL-59780) [R]. Dallas: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2005.
- [9] Moridis G J, Collett T S, Boswell R, et al. Toward production from gas hydrates: current status, assessment of resources, and simulation-based evaluation of technology and potential [R]. Keystone: Colorado Unconventional Reservoirs Conference, 2008.
- [10] McDonnell S L, Max M D, Cherkis N Z, et al. Tectonosedimentary controls on the likelihood of gas hydrate occurrence near Taiwan [J]. Marine Petroleum and Geology, 2000, 17: 929-936.
- [11] Wang P, Prell W, Blum P. Ocean drilling program leg 184 scientific prospectus South China Sea site 1144/184 [M] // Wang P, Prell W, Blum P. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports. College Station: Ocean Drilling Program, 2000: 1-97.
- [12] Wu N, Yang S, Zhang H, et al. Preliminary discussion on gas hydrate reservoir system of Shenhu area, north slope of South China Sea [M] // ICGH. Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, British Columbia.

- 2008 6-10.
- [13] Wu N, Yang S, Zhang H, et al. Gas hydrate system of Shenhu area northern South China Sea Wire-line logging geochemical results and preliminary resources estimates [R]. Houston: Offshore Technology Conference, 2010.
- [14] Su Z, Moridis G J, Zhang K, et al. Numerical investigation of gas production strategy for the hydrate deposits in the Shenhu area [R]. Houston: Offshore Technology Conference, 2010.
- [15] Moridis G J, Kowalsky M. Gas production from unconfined class 2 hydrate accumulations in the oceanic subsurface [M] // Max M, Johnson A H, Dillon W P, et al. Economic Geology of Natural Gas Hydrates. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2006: 249-266.
- [16] Li G, Moridis G J, Zhang K, et al. Evaluation of Gas Production Potential from Marine Gas Hydrate Deposits in Shenhu Area of South China Sea [J]. Energy Fuels, 2010, 24: 6018-6033.
- [17] 李小森, 陈琦, 李刚, 等. 海底水合物矿藏降压开采与甲烷气体扩散过程的数值模拟 [J]. 现代地质, 2010, 24(3): 598-606.
- [18] 李刚, 李小森. 单井热吞吐开采南海神狐海域天然气水合物数值模拟 [J]. 化工学报, 2011, 62(2): 458-468.
- [19] 李淑霞, 姜兴兴, 姜汉桥, 等. 天然气水合物藏注热开采敏感参数分析 [J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2): 54-57.
- [20] 李淑霞, 陈月明, 杜庆军. 天然气水合物开采数值模拟的参数敏感性分析 [J]. 现代地质, 2005, 19(1): 108-112.
- [21] 龚斌, 蒋国盛, 吴翔, 等. 海洋天然气水合物开采方法及产量分析 [J]. 热带海洋学报, 2009, 28(3): 82-84.
- [22] Su Z, Cao Y, Wu N. A model for predicting gas well performance of free gas zone beneath hydrate layer [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 71: 179-186.
- [23] Su Z, Moridis G J, Zhang K, et al. Numerical investigation of gas production strategy for the hydrate deposits in the Shenhu area [R]. Houston: Offshore Technology Conference, 2010, 71: 179-186.
- [24] Duan Z, Miller N, Greenberg J, et al. The prediction of methane solubility in natural waters to high ionic strengths from 0 to 250 and from 0 to 1600 bar [J]. Geochemistry et Cosmochimistry Acta, 1992, 56: 1451-1460.

(上接第 588 页)

- fission tracks in randomly oriented grains of apatite [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, 2007, 256(2): 683-692.
- [17] Laskett G M, Green P E, Duddy I R, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite: quantitative analysis [J]. Chemical Geology, 1987, 65: 1-13.
- [18] Ketchum R A, Donelick R A, Donelick M B. AFT solve: a program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data [J]. Geological Materials Research, 2000, 2(1): 1-32.
- [19] 周祖翼, 廖宗廷, 杨凤丽, 等. 裂变径迹分析及其在沉积盆地研究中的应用 [J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 332-337.
- [20] 周祖翼, Donelick R. 基于磷灰石裂变径迹分析数据的时间-温度历史的多元动力学模拟 [J]. 石油实验地质, 2001, 23(1): 97-102.
- [21] 张志诚, 王雪松. 裂变径迹定年资料应用中的问题及其地质意义 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2004, 40(6): 898-905.
- [22] 常远, 刘锐, 杨嘉. 磷灰石裂变径迹技术与地学应用综述 [J]. 上海地质, 2004(1): 47-53.
- [23] 王钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 中国地温分布的基本特征 [M]. 北京: 地震出版社, 1990: 1-231.
- [24] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 171-282.
- [25] Ying J F, Zhang H F, Sun M, et al. Petrology and geochemistry of Zijinshan alkaline intrusive complex in Shanxi Province, western North China Craton: Implication for magma mixing of different sources in an extensional regime [J]. Lithos, 2007, 98: 45-66.
- [26] 付明希, 胡圣标, 汪集旻. 华北东部中生代热体制转换及其构造意义 [J]. 中国科学: D辑, 2004, 34(6): 514-520.
- [27] 肖媛媛, 任战利. 山西临县紫金山碱性杂岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质论评, 2007, 53(5): 656-663.
- [28] 杨兴科, 杨永恒. 鄂尔多斯盆地东部热力作用的期次和特点 [J]. 地质学报, 2006, 80(5): 705-711.
- [29] 杨兴科, 晁会霞, 郝孟林, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体 SHRMP 测年地质意义 [J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 54-63.
- [30] Yang Xingke, Chao Huixia, Volkova N I, et al. Geochemistry and SHRMP geochronology of alkaline rocks of the Zijinshan massif in the eastern Ordos basin, China [J]. Russian Geology and Geophysics, 2009, 50: 751-762.
- [31] 岳乐平, 李建星, 郑国章, 等. 鄂尔多斯高原演化及环境效应 [J]. 中国科学: D辑, 2007, 37(增刊): 16-22.