

冷冻屏障强化水合物降压开采数值模拟研究

戴晨丽^{1,2}, 曲莉莉^{1,2}, 王元^{1,2*}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 随着全球能源需求的增加, 海洋天然气水合物作为潜在的清洁能源受到广泛关注。然而, 水合物开采过程中甲烷泄漏和海洋生态破坏问题仍亟待解决。本研究提出了一种基于冷冻屏障的新型水合物开采方法, 旨在提升开采效率的同时降低环境风险。冷冻屏障通过在水合物储层上覆层形成固态冰屏障, 有效抑制气体扩散、增强储层稳定性并防止海水入侵, 同时避免传统开采方法对生态环境的破坏。通过数值模拟对比SH7站点和AT1站点的情况, 结果显示, 在低渗透率的SH7站点, 冷冻屏障使甲烷回收率提升16%, 产气量增加17.89%; 而AT1站点因屏障位置差异未显现同等效果。研究结果表明, 合理配置冷冻屏障为水合物的安全、环保开采提供了有效的技术支持, 具有良好的应用前景。

关键词: 海洋天然气水合物; 非渗透边界; 数值模拟; 渗透率; 冷冻屏障

中图分类号: TE53; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0088-08

Numerical simulation study of freezing barrier enhanced depressurization of hydrate exploitation

DAI Chenli^{1,2}, QU Lili^{1,2}, WANG Yuan^{1,2*}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: With the increase in global energy demand, marine natural gas hydrates have received widespread attention as a potential source of clean energy. However, methane leakage and marine ecological damage during hydrate extraction remain pressing challenges. In this study, a novel natural gas hydrate extraction method based on a freezing barrier is proposed, which aims to enhance the extraction efficiency and reduce the environmental risks. Through the formation of a solid ice barrier over the hydrate reservoir, the freezing barrier can effectively inhibit gas diffusion, enhance reservoir stability, and prevent seawater intrusion, while avoiding the ecological damage caused by traditional extraction methods. Numerical simulations comparing the SH7 site and the AT1 site show that in the low-permeability SH7 site, the freezing barrier increases the methane recovery rate by 16% and gas production by 17.89%, while the AT1 site does not show the same effect due to the difference in the barrier location. The results of the study show that the rational configuration of the freezing barrier provides effective technical support for the safe and environmentally friendly exploitation of natural gas hydrates and has good application prospects.

Key words: marine gas hydrate; impermeable boundary; numerical simulation; permeability; freezing barrier

0 引言

随着全球能源需求的快速增长, 天然气水合物

(NGH)作为一种潜力巨大的能源资源, 受到了广泛关注^[1-3]。其储量丰富、分布广泛、环保性强, 被认为

收稿日期: 2025-05-16; 修回日期: 2025-06-28 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.009

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“疏水型纳米颗粒抑制泥质粉砂水合物储层微粒迁移机理”(编号: 42472376)

第一作者: 戴晨丽, 女, 汉族, 1998年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为天然气水合物勘探与开发, 吉林省长春市西民主大街938号, daicl23@mails.jlu.edu.cn。

通信作者: 王元, 男, 汉族, 1988年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 主要从事天然气水合物高效钻采技术及油页岩原位转化开采技术相关研究工作, 吉林省长春市西民主大街938号, wy20119@jlu.edu.cn。

引用格式: 戴晨丽, 曲莉莉, 王元. 冷冻屏障强化水合物降压开采数值模拟研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 88-95.

DAI Chenli, QU Lili, WANG Yuan. Numerical simulation study of freezing barrier enhanced depressurization of hydrate exploitation [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 88-95.

是21世纪最具潜力的绿色替代能源之一^[4-7]。然而,随着勘探和开采的加速,甲烷泄漏和海洋地质风险等环境问题逐渐浮现^[8-9]。甲烷作为强效温室气体,其泄漏不仅加剧全球变暖,还可能破坏海域水合物的稳定性,危及海洋生态系统^[10-11]。因此,如何在确保高效开采的同时,减少对环境的负面影响,是未来能源开发中亟待解决的核心问题。

目前,降压法被认为是最经济的水合物开采技术,压力传递越快,水合物分解范围越广^[12-13]。但由于缺乏非渗透性盖层等原因,储层中的压降难以高效传递,不利于高产和稳产^[14-15]。由此,针对水合物储层缺乏低渗透封闭层和存在甲烷泄漏现象,提出构建非渗透边界上覆层的方法^[16]。构建非渗透边界人为封堵上覆层,可提高储层中水平方向上的压降传播,促进水合物的解离率,达到增产的目的。同时该方法能够减少海水入侵,抑制甲烷泄漏,减少出砂和产水量^[15]。此前,人们已经对如何构建防渗盖层进行了大量的研究,提出的方法主要有注入泥浆法、注入凝胶法、注入CO₂水合物法、注入混合气体法^[17-21]。然而在海底地层中注入泥浆或者凝胶,不仅会永久破坏地层原有的生态环境,还阻止海底植被的生长;注入材料无法回收,破坏水质,使海洋动物死亡;注入气体会降低地层稳定性,容易失稳^[22-23]。为了避免构建非渗透边界带来环境恶化以及气候变化等,本文提出在海洋水合物的上覆层设置冷冻屏障,辅助海洋水合物降压开采,如图1所示。在环境工程领域中,利用人工冻结法建造的地下防护工程具有良好的应用前景^[24]。基于人工冻结法,日本东京电力公司通过建设冻土墙初步解决福岛污水问题^[25]。冷冻屏障的存在能够抑制气体扩散,避免甲烷泄漏,增强上覆层沉积物强度,有效阻止海水入侵储层^[26]。其中,冷冻屏障中的固态冰在水合物开采的早期阶段能够提供额外的潜热,加速水合物的解离^[27]。此外,冷冻屏障具有极高的稳定性,解冻后不会改变地层性质,且不对海底环境造成破坏。因此,冷冻屏障构建非渗透边界辅助水合物降压开采对环境非常友好。

本研究基于中国南海神狐海域SH7站位和日本南海东部海槽AT1站位实测数据,利用TOUGH+HYDRATE构建相应的产能模型,模拟冷冻屏障工况下储层产能响应和物性演化规律,对比分析在不同类型储层中冷冻屏障的普适性。本研究以期为解决甲烷泄漏和水合物安全高效环保开采提供借鉴。

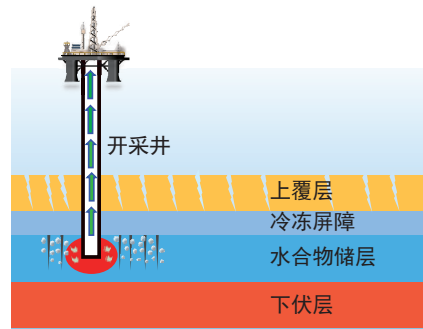


图1 利用冷冻屏障开采水合物示意

Fig.1 Schematic diagram of gas hydrate extraction using a refrigerated barrier

1 数值模型与仿真方案

1.1 地质模型

选取中国南海典型水合物探井SH7站点测井资料^[17]和日本南海东部海槽AT1站位测井资料^[28]建立地质模型,如图2所示。SH7站点的水深为1108 m,对应的海底温度为6.44 °C,水合物储层(HBL)位于海底以下155~177 m范围内,地质模型由3层组成:水合物储层(22 m)、上覆层(30 m)和下伏层(30 m)。AT1站点的水深为998 m,对应的海底温度为2.8 °C,水合物储层(HBL)位于海底以下276~338 m范围内,地质模型由3层组成:水合物层(62 m)、上覆层(30 m)和下伏层(30 m),其中水合物层因地质条件划分为3层,顶层和底层是富砂沉积物,中间层是以粉土为主的沉积物。上覆地层和下伏地层厚度取值均为30 m,以确保水合物储层能够与周围地层进行准确的热交换和压力传递^[29]。考虑到水合物储层实际地质情况,上覆层的最上方1 m和下伏层最下方1 m设定为恒定边界^[30]。模型在X方向的长度为400 m,垂直井位于HBL中心,井眼半径为0.1 m。为了提高数值计算效率,Y方向储层厚度设定为1 m,根据X方向的对称性取模型的一半区域进行研究,即X方向取200 m。

1.2 区域离散化

根据SH7站点数据构建的三维模型中,X方向仿真域细分为125段,Z方向仿真域细分为47段,其中垂直井网格尺寸为0.2 m×0.2 m,与井径一致。网格尺寸沿着远离井口的方向从最小0.9 m×0.8 m到最大2.5 m×3.9 m。总的来说,模拟域共包含125×47=5875个网格,其中5624个网格是活动的,其余位于最上层、最下层恒压边界和对应垂直井的网格是非活动网格。根据AT1站点数据构建的三

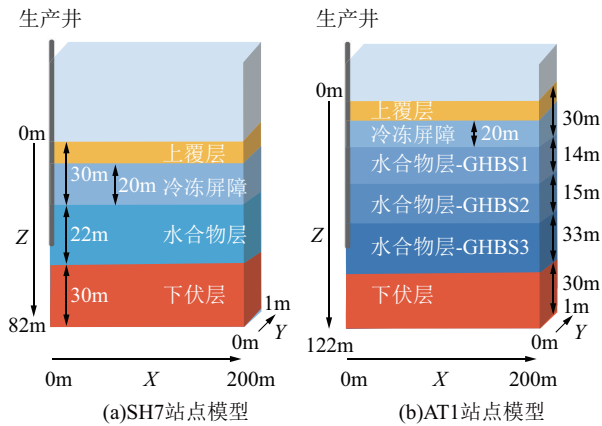


图2 构建的三维模型示意

Fig.2 Schematic of the constructed 3D models

维模型中, X 方向仿真域细分为125段, Z 方向仿真域细分为55段, 其中垂直井网格尺寸为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, 与井径一致。网格尺寸沿着远离井口的方向从最小 $0.9\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 到最大 $2.5\text{ m} \times 4.9\text{ m}$ 。总的来说, 模拟域共包含 $125 \times 55 = 6875$ 个网格, 其中6624个网格是活动的, 其余位于最上层、最下层恒压边界和对应垂直井的网格是非活动网格。

1.3 初始条件和模型参数

模型的初始条件和参数根据SH7、AT1现场测井资料确定。SH7、AT1站点的三维模型中水合物储层底部的原始温度和压力、温度梯度等模型参数见表1, 储层的原始压力分布遵循静水压力梯度, 由此可得到整个地层的原始压力和温度分布。此外, HBL中水合物分布均匀, 其分解不会导致沉积物骨架变形。孔隙内部流体静态平衡时采用毛细压力模型, 动态平衡时采用相对渗透模型。

1.4 仿真方案

本工作中对比研究了SH7站点地质模型和AT1站点地质模型在冷冻屏障条件下的水合物开采性能, 探讨冷冻屏障的适用性和有效性。此外, 为了提高生产性能并消除生产井底部结冰的可能性, 将井底压力设置为 4.5 MPa 。参数范围见表2。

2 结果与讨论

2.1 不同储层条件下水合物开采物性空间分布

2.1.1 压力分布

不同案例在开采过程中的压力分布(P)演化情况如图3所示。开采60 d后, 案例1中低压区($P \leq 8\text{ MPa}$)的范围明显小于案例2。这是由于案例2设置

表1 地质模型参数

Table 1 Geological model parameters

参数	SH7站点 参数值	AT1站点 参数值
上覆层厚度/m	30	30
下伏层厚度/m	30	30
水合物层厚度/m	22	14(GHBS1), 15(GHBS2), 33(GHBS3)
孔隙度	0.38	0.43(上覆层), 0.41(GHBS1), 0.42(GHBS2), 0.40(GHBS3), 0.40(下伏层)
上覆层渗透率/mD	75	10
下伏层渗透率/mD	75	1000
水合物层渗透率/mD	75	1100(GHBS1), 400(GHBS2), 1000(GHBS3)
盐度/%	3.05	3.05
地温梯度/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1})$	0.0433	0.03
水合物饱和度	0.44	0.60(GHBS1), 0.35(GHBS2), 0.70(GHBS3)
气相指数(n_g)	3.572	2.5(砂土), 3.0(黏土/泥土)
水相指数(n)	3.572	3.5(砂土), 5.0(黏土/泥土)
水合物层底部初始温度/ $^\circ\text{C}$	14.15	13.72
水合物层底部初始压力/MPa	13.83	13.52
束缚水饱和度	0.29	0.25(砂土), 0.55(黏土/泥土)
束缚气饱和度	0.05	0.01(砂土), 0.05(黏土/泥土)
孔隙结构指数	0.45	0.45(砂土), 0.15(黏土/泥土)
毛细管压力/Pa	10^5	10^4 (砂土), 10^5 (黏土/泥土)
岩石密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2600	2650

表2 冷冻屏障设置参数

Table 2 Freezing barrier setting parameters

案例	三维模型站点	冷冻屏障	上覆层渗透率/mD
1	SH7	无	75
2	SH7	有	0
3	AT1	无	10
4	AT1	有	0

了冷冻屏障, 能够有效阻止上覆层海水的侵入, 从而维持水合物储层的初始压力梯度, 增强了持续降压效果。开采至1825 d, 案例1的压力演化区域沿 X 轴和 Z 轴均有显著扩展, 表明压力向地层深部的垂向传递和消散更加充分。而案例2的低压区主要沿 X 轴扩展, 集中分布于水合物储层内部, 有效限制了压力消散, 有利于促进水合物的大规模分解。对

于案例 3 和案例 4, 低压区的变化趋势差异不大。这是因为案例 4 中的冷冻屏障设置于上覆层, 未直接作用于水合物储层, 与储层之间未形成有效耦合, 对压力演化的调控作用有限。从第 60~1825 d, 其压力变化趋势与案例 1 和案例 2 基本一致。显然, 冷冻屏障在贴近水合物储层的条件下, 能够显著增强压力在储层内部的传递, 提升水合物的分解效率, 从而提高水合物的开采性能和安全性。然而, 当冷冻屏障与水合物储层之间未形成直接接触时, 其对压力调控和气体产量的促进作用较为有限。

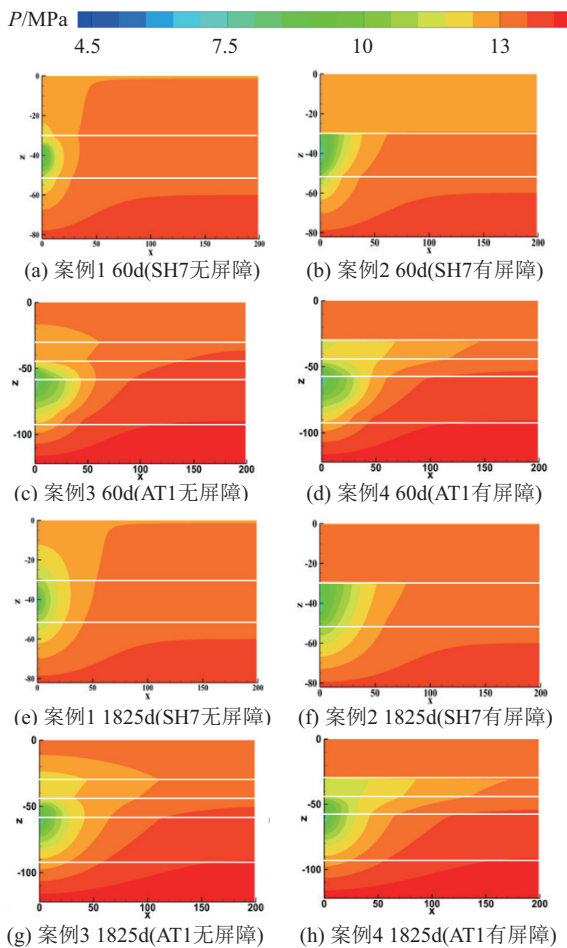


图 3 储层压力分布演化

Fig.3 Evolution of reservoir pressure distribution

2.1.2 温度分布

不同案例在开采过程中温度分布 (T) 的演化特征如图 4 所示。在案例 1 中, 由于水合物分解所伴随的强烈吸热效应, 生产初期井筒附近温度显著下降。随着生产推进至 60 d, 热传导效应使高温区逐渐向上扩展, 局部热刺激增强了甲烷气体的产出。但在生产至第 1825 d, 高温区域逐渐向下扩散, 热量

散失显著, 热刺激作用减弱, 导致气体产率下降。案例 3 的温度演化趋势与案例 1 相似。相比之下, 案例 2 中由于存在冷冻屏障, 展现出更有利的热力学特征。在整个生产周期内, 人工形成的冷冻屏障温度逐步升高, 并沿 X 轴方向形成稳定的温度梯度。与案例 1 相比, 下伏层的高温区向生产井迁移速度更快, 表现更明显。冷冻屏障不仅在初期为水合物分解提供潜热, 同时在生产过程中有效抑制热量向外界散失, 为水合物持续解离提供热能保障, 从而最大限度提高甲烷气体的回收效率。而在案例 4 中, 冷冻屏障的设置位置未直接覆盖水合物储层, 造成低温区逐渐向下扩展, 削弱了热刺激作用, 显著减缓了水合物的分解速率和气体释放过程。

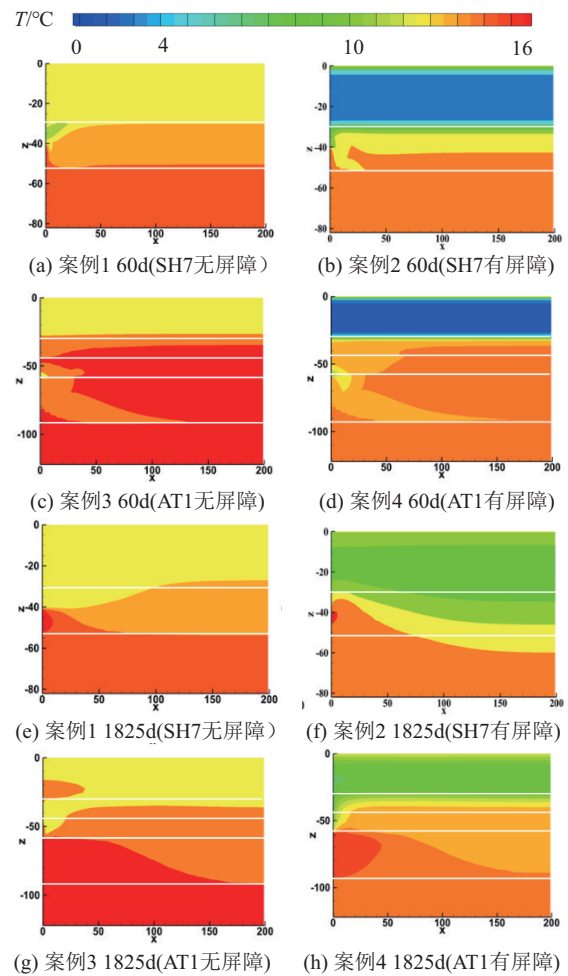


图 4 储层温度分布演化

Fig.4 Evolution of reservoir temperature distribution

2.1.3 水合物饱和度的空间分布

不同案例在生产过程中水合物饱和度空间分布的演化过程如图 5 所示。在生产初期, 井筒周围

迅速出现了明显的水合物分解前沿,其主要特征包括由压力下降引起的近井圆形解离区域,以及HBL与邻近上下伏层之间由于海水入侵形成的分解界面。生产至第60 d,案例1中井筒周边水合物完全解离的区域范围明显大于案例2,而案例3与案例4的水合物解离区域变化幅度较小,解离范围基本一致。至第1825 d,案例1井筒周围已形成较为成熟的水合物解离区,表现出显著的空间扩展性。而在案例2中,尽管水合物饱和度为0.45的区域已扩展至50 m,但HBL的上边界未形成明显的水合物解离前沿。这表明,在生产初期来自上覆渗透层的海水入侵虽然加速了水合物的解离,但也限制了解离前沿的横向扩展。与此同时,案例4中冷冻屏障的存在明显抑制了水合物的快速分解,延缓了解离过程,表现出较长的分解周期。这进一步说明了冷冻屏障在控制解离速率和延长稳定生产周期中的潜力。与可渗透性边界条件相比,冷冻屏障通过有效阻止海水入侵,维持储层的初始压力梯度,并在生产过程中提供后续热刺激,有助于实现水合物更大范围、更加持久的解离与产气。然而,冷冻屏障的作用效果受其与储层相对位置的影响显著,合理设计空间配置是实现高效开采的关键。

2.2 不同储层条件下水合物开采产气性能

不同案例在降压生产过程中 CH_4 产率(Q_p)及总 CH_4 产气量(V_p)的变化规律如图6所示。井筒内产生的甲烷主要来源于水合物分解及孔隙水中溶解气的析出。以案例1为例, CH_4 产率在短时间内快速上升,并于第8 d达到峰值74.304 STm^3/d ,这是由于生产初期产水量迅速增加,促使孔隙水中溶解的 CH_4 释放。相比之下,案例2中冷冻屏障阻止海水入侵,产水减少, CH_4 产率上升速度较慢,在第36 d达到峰值65.966 STm^3/d ,气体释放被限制。对于案例3和案例4,前者第7 d达到产气峰值35.924 STm^3/d ,后者在第8 d达到产气峰值34.88 STm^3/d ,这是由于冷冻屏障远离水合物储层,无法有效阻止海水入侵。在后续生产过程中,随着储层内热量逐渐耗散,尤其是生产井周围水合物解离所需的热能不足, CH_4 产率自峰值后持续下降。在300~1200 d期间,案例1的下降速率明显快于案例2,表明冷冻屏障对维持产气稳定性具有积极作用。而案例3与案例4的下降曲线基本重合,显示其产气机制差异不大。在总产气量方面,案例1和案例2呈现出类似的逐步增长趋势,但案例2在长期产气

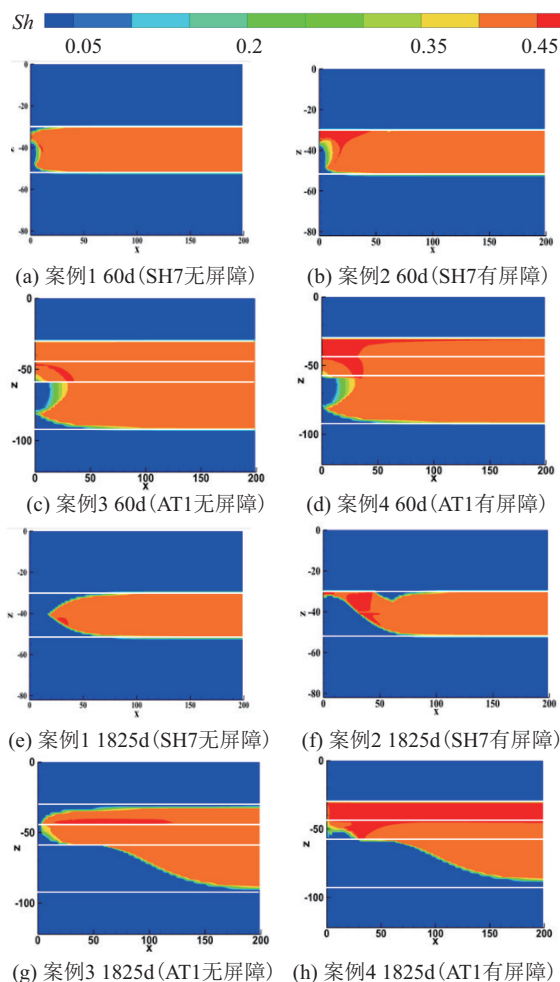


图5 水合物饱和度分布演化

Fig.5 Evolution of hydrate saturation distribution

效率方面更具优势,在第1800 d总产气量上升16%,这表明冷冻屏障在后期维持产气稳定性方面的有效性。同样,案例3和案例4的总产气趋势相似,由于产气速率的下降产气量在60 d达到峰值,案例4产气量是案例3的10倍,进一步验证了冷冻屏障在特定配置下可显著提升水合物开采效率与 CH_4 产量。结果表明,冷冻屏障在初期可能延缓产气速度,但在后期可有效保持产气稳定性,并提高水合物分解程度,具备良好的工程应用前景。

2.3 不同储层条件下水合物分解性能

不同案例在生产过程中 CH_4 释放速率(Q_d)及总 CH_4 释放体积(V_d)的变化规律如图7所示。案例1中, CH_4 释放速率在生产初期(0~10 d)迅速上升,并在第10 d达到峰值220.320 m^3/d ,随后迅速下降,表明水合物解离初期释放速率较高但持续时间较短。案例2的 CH_4 释放速率变化趋势与案例1相似,但整体释放过程更为平缓,表现出更持续的产气能力。

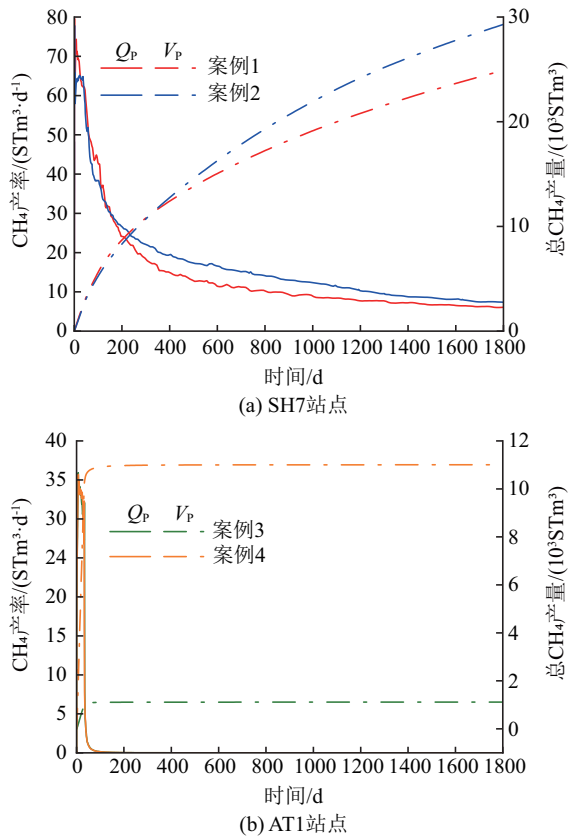


图6 降压井生产过程中 CH_4 产率(Q_p)和总 CH_4 产气量(V_p)的变化规律

Fig.6 Changing law of CH_4 production rate (Q_p) and total CH_4 gas production (V_p) during the production process of a bucking well

在案例3和案例4中, CH_4 释放速率峰值分别达到了1092、1113 m^3/d 。然而,在生产后期,所有案例的 CH_4 释放速率均出现下降趋势,主要原因可能是井筒附近缺乏足够热量供应,限制了水合物的持续分解。在总 CH_4 释放体积方面,生产结束时案例1和案例2分别为 $32.911 \times 10^4 \text{ STm}^3$ 和 $38.799 \times 10^4 \text{ STm}^3$,且分别占储层中总水合物的48.43%和57.10%。该结果表明,储层顶部非渗透性覆盖层的存在,有助于维持压力梯度与热量积聚,从而显著提升水合物分解效率,总 CH_4 释放体积提高17.89%。而在案例3和案例4中,尽管冷冻屏障的存在一定程度上控制了产气路径,但案例4的总 CH_4 释放体积明显低于案例3,表明若冷冻屏障不直接与水合物储层相邻,其对热量传递与水合物分解的抑制作用反而限制了产气效率。结果表明渗透边界条件和冷冻屏障的位置对于水合物的分解效率和甲烷释放行为具有重要影响,合理配置屏障结

构是实现高效水合物开采的关键技术途径之一。

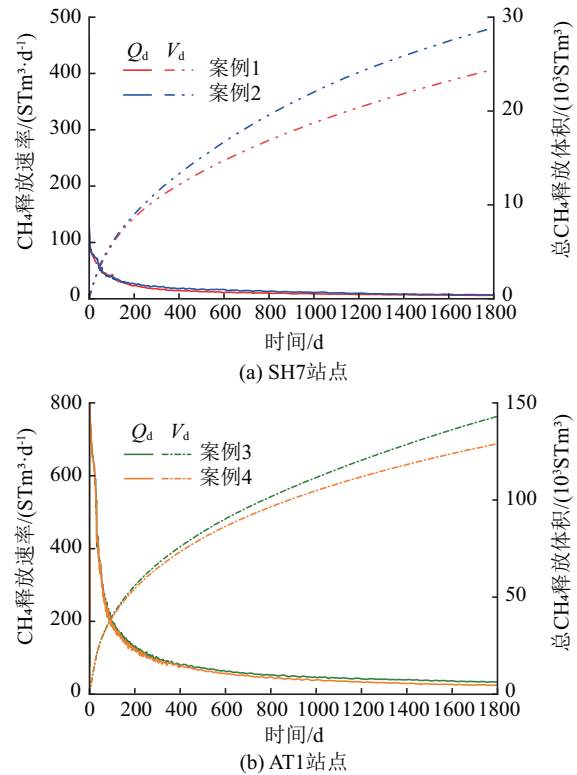


图7 生产过程中水合物分解 CH_4 释放速率(Q_d)和总 CH_4 释放体积(V_d)的演变

Fig.7 Evolution of CH_4 release rate (Q_d) and total CH_4 release volume (V_d) from hydrate decomposition during the production process

2.4 能量比

从产投比角度评价不同案例采气效率,引入能量比公式^[31]:

$$RE = \frac{V_p M_{\text{gas}}}{C_w M_{\text{inj}} (T_{\text{inj}} - T_0)} \quad (1)$$

式中: V_p ——总 CH_4 产气量; M_{gas} ——甲烷气体的燃烧热; C_w ——水的比热容; M_{inj} ——注水的累积量; T_{inj} 、 T_0 ——分别代表注入水和储层的温度。

在本研究中认为 C_w 是恒定的。根据式(1)计算不同案例能量比,其随时间的变化曲线见图8。由图可得,能量比和总 CH_4 产气量变化规律具有相似性。较高的能量比表示同等的输入能量具有更高的生产值^[32]。当生产周期小于500 d,案例1的能量比大于案例2,但在后期的生产中案例2涨幅明显大于案例1,能量比也更高。在案例3和案例4的对比中,两者的曲线趋势一致,能量比差距不大。这说明合理配置冷冻屏障具有更高的生产价值。

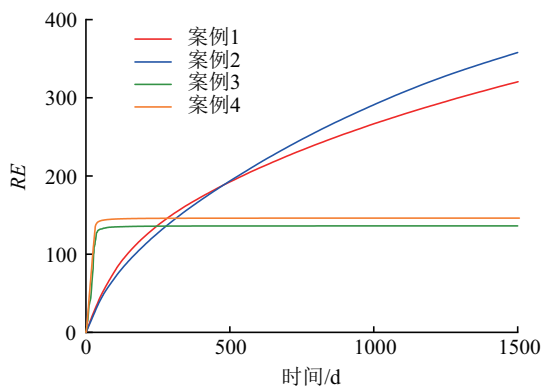


图8 不同案例能量比

Fig.8 Energy ratios for different cases

3 结论

本研究通过SH7和AT1站点数值模拟,系统评估了冷冻屏障在不同储层对水合物开采性能的影响。主要结论如下:

(1)冷冻屏障有效地限制了压力向上传递和热量扩散,使能量集中在HBL和上覆岩层内。这种集中作用促进了压力在HBL的传递,增大了水合物开采范围,同时也缓解了水合物开采过程中常见的热量不足问题。数据表明具备非渗透性上覆层的水合物储层开采潜力明显优于具备渗透性上覆层的水合物储层,CH₄产气率提高16%,总CH₄释放体积提高17.89%。

(2)冷冻屏障的合理配置是实现高效开采的关键因素。当冷冻屏障位置与水合物开采储层相邻时,可形成有效的封闭系统,具有更高的生产价值;但当两者不相邻时,虽能促进压力传递,提升初期产气量,却无法有效阻止海水入侵,最终会限制水合物的持续分解。

该研究验证了冷冻屏障封盖层促进水合物分解和阻止甲烷泄漏的有效性,为其实际应用提供了理论基础。然而,对于长期开采的水合物储层,下伏层的海水入侵、压力传递和热能扩散等复杂因素也会对水合物的开采效率产生显著影响。在今后的工作中,我们会考虑下伏层渗透率对水合物储层中水合物分解和产气行为的影响,以形成系统性的辅助手段强化水合物降压开采,为实现水合物安全、高效、环保的商业化开采提供支撑。

参考文献(References):

[1] 刘协鲁,阮海龙,赵义,等. 海域天然气水合物保温保压取样钻具研究与应用进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 33-39.

LIU Xielu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for Marine natural gas hydrate[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 33-39.

[2] 宁伏龙,梁金强,吴能友,等. 中国天然气水合物赋存特征[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 1-24, 203.

NING Fulong, LIANG Jinqiang, WU Nengyou, et al. Reservoir characteristics of natural gas hydrates in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 1-24, 203.

[3] 周淑慧,郝迎鹏,沈鑫,等. 对天然气在新型能源体系中地位和作用的认识[J]. 国际石油经济, 2024, 32(1): 2-16.

ZHOU Shuhui, HAO Yingpeng, SHEN Xin, et al. The position and role of natural gas in the new energy system[J]. International Petroleum Economics, 2024, 32(1): 2-16.

[4] 石思思,陈星州,马健,等. 南海北部神狐海域W19井天然气水合物储层类型与特征[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 24-29.

SHI Sisi, CHEN Xingzhou, MA Jian, et al. Natural gas hydrate reservoir classification and characterization in the Well W19 of Shenhu Sea Area, northern South China Sea[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 24-29.

[5] 张炜,邵明娟,田黔宁. 日本海域天然气水合物开发技术进展[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(5): 98-102.

ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, TIAN Qianing. Technical progress of a pilot project to produce natural gas hydrate in Japanese waters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 98-102.

[6] 王淑玲,孙张涛. 全球天然气水合物勘查试采研究现状及发展趋势[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(7): 24-32.

WANG Shuling, SUN Zhangtao. Current status and future trends of exploration and pilot production of gas hydrate in the world[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(7): 24-32.

[7] 刘妹,李文杰,李莉佳,等. 天然气水合物开采方法研究现状及展望[J]. 钻探工程, 2024, 51(5): 12-23.

LIU Shu, LI Wenjie, LI Lijia, et al. Current status and prospects on natural gas hydrate exploitation methods[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 12-23.

[8] 赵洁,王家生,岑越,等. 南海东北部GMGS2-16站位原生矿物特征及对水合物藏演化的指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(5): 144-155.

ZHAO Jie, WANG Jiasheng, CEN Yue, et al. Authigenic minerals at site GMGS2-16 of northeastern South China Sea and its implications for gas hydrate evolution[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(5): 144-155.

[9] 赵生才. 气体水合物的研究现状与科学问题[J]. 科技导报, 2001, 1(7): 11-13, 5.

ZHAO Shengcai. Present state in the research of gas hydrates and its scientific problems[J]. Science & Technology Review, 2001, 1(7): 11-13, 5.

[10] 杨金秀,王琛,邢兰昌,等. 海域天然气水合物相关的流体运移及海底甲烷渗漏研究[J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 113-125.

YANG Jinxiu, WANG Chen, XING Lanchang, et al. Fluid migration and seabed methane seepage associated with marine gas hydrate systems[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(2): 113-125.

[11] 叶黎明,罗鹏,杨克红. 天然气水合物气候效应研究进展[J].

- 地球科学进展, 2011, 26(5): 565-574.
- YE Liming, LUO Peng, YANG Kehong. Advances in climatic effects study of gas hydrates[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(5): 565-574.
- [12] 欧芬兰, 于彦江, 寇贝贝, 等. 水合物藏的类型、特点及开发方法探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(1): 194-213.
- FenlanOU, YU Yanjiang, KOU Beibei, et al. Gas hydrate reservoir types, characteristics and development methods[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 194-213.
- [13] 王晓宇, 郑明明, 吴双, 等. 深水油气含水合物地层固井过程数值模拟分析及工艺参数优化研究[J]. *钻探工程*, 2025, 52(1): 84-92.
- WANG Xiaoyu, ZHENG Mingming, WU Shuang, et al. Numerical simulation analysis and optimization of process parameters in the cementing process of gas hydrate-bearing sediments in deep water oil and gas wells[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(1): 84-92.
- [14] 秦帆帆, 孙嘉鑫, 游志刚, 等. 南海水合物及伴生游离气储层封堵改造与水平井降压合采模拟研究[J]. *地质学报*, 2024, 98(9): 2806-2821.
- QIN Fanfan, SUN Jiabin, YOU Zhigang, et al. Numerical simulation on co-extraction of hydrate and free gas in the South China Sea using a combination of formation sealing and horizontal well techniques[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(9): 2806-2821.
- [15] 刘喜龙, 齐赞, 谢鹏飞, 等. 基于扩展有限元的天然气水合物储层多簇劈裂注浆数值模拟[J]. *钻探工程*, 2025, 52(4): 26-36.
- LIU Xilong, QI Yun, XIE Pengfei, et al. Numerical simulation of split-grouting of gas hydrate reservoir based on extended finite element method[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(4): 26-36.
- [16] 潘栋彬, 马晓龙, 陈晨, 等. 海域天然气水合物降压联合注热及边界封堵开采模拟研究[J]. *地质论评*, 2023, 69(S1): 535-538.
- PAN Dongbin, MA Xiaolong, CHEN Chen, et al. Simulation study on hydrate exploitation performances of depressurization combined with thermal fluid injection and boundary sealing in Marine hydrate reservoir [J]. *Geological Review*, 2023, 69(S1): 535-538.
- [17] Chen C, Yang L, Jia R, et al. Simulation study on the effect of fracturing technology on the production efficiency of natural gas hydrate[J]. *Energies*, 2017, 10(8): 1241.
- [18] 马英瑞. 海域水合物藏可渗盖层封闭改造和注抑制剂开采研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- MA Yingrui. Study on the permeable overburden sealing and exploitation by inhibitor injection of marine hydrate reservoir [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [19] Zhao E M, Hou J, Liu Y G, et al. Enhanced gas production by forming artificial impermeable barriers from unconfined hydrate deposits in Shenhu area of South China sea[J]. *Energy*, 2020, 213: 118826.
- [20] 贾帅. 注CO₂/N₂混合气改造甲烷水合物盖层渗透特性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- JIA Shuai. Study on the permeability characteristics of methane hydrate cap reformed by CO₂/N₂ injection[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [21] 李楠, 贾帅, 孙振峰, 等. 注CO₂+N₂混合气改造-开采CH₄水合物储层[J]. *化工进展*, 2022, 41(5): 2356-2363.
- LI Nan, JIA Shuai, SUN Zhenfeng, et al. Exploitation of CH₄ hydrate reservoir reformed by (CO₂+N₂) gas injection[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(5): 2356-2363.
- [22] 高伟健, 李伟. 海底不稳定性研究进展及展望[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 109-121.
- GAO Weijian, LI Wei. Progress and prospect of seafloor instability research[J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2023, 25(3): 109-121.
- [23] 朱涛. CO₂水合物盖层的生成和稳定性研究及效果评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- ZHU Tao. Experimental study on the formation and stability of CO₂ hydrate caprocks research and effect evaluation[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [24] 刘娟. 江底强渗透地层冻结法可行性分析[J]. *江西建材*, 2021(8): 193-195.
- LIU Juan. Feasibility analysis of freezing method for strong permeable stratum of river bottom[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2021(8): 193-195.
- [25] 伍浩松, 张焰. 日本福岛冻土墙泄漏总体性能未受影响[J]. *国外核新闻*, 2020(2): 21.
- WU Haosong, ZHANG Yan. The overall performance of the Fukushima permafrost wall leak in Japan was not affected[J]. *Foreign Nuclear News*, 2020(2): 21.
- [26] Wang C, Li K Y, Lin Z K, et al. Study on the supercooling characteristics of freezing soil based on nucleation theory[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(9): e2023WR034800.
- [27] Thomson H, Corbett J J, Winebrake J J. Natural gas as a marine fuel[J]. *Energy Policy*, 2015, 87: 153-167.
- [28] Gu Y H, Sun J X, Qin F F, et al. Enhancing gas recovery from natural gas hydrate reservoirs in the eastern Nankai Trough: deep depressurization and underburden sealing[J]. *Energy*, 2023, 262(Part B): 125510.
- [29] 杨作亚, 武晓敏. 天然气水合物藏多层联合开采数值模拟研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(3): 393-402.
- YANG Zuoya, WU Xiaomin. Numerical simulation study on multi-layer combined exploitation of natural gas hydrate reservoirs [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(3): 393-402.
- [30] 钟浩森, 司鸽. 降压法开采天然气水合物二次生成数值模拟研究[J]. *石油钻探技术*, 2025, 53(2): 1-9.
- ZHONG HAO Miaomiao, SI Hu. Numerical simulation of natural gas hydrate reformation during gas recovery induced by depressurization [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2025, 53(2): 1-9.
- [31] Nie S S, Liu K, Zhong X P, et al. Numerical investigation of production performance of challenging gas hydrates from deposits with artificial fractures and impermeable barriers[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 5361.
- [32] Feng J C, Wang Y, Li X S, et al. Three dimensional experimental and numerical investigations into hydrate dissociation in sandy reservoir with dual horizontal wells[J]. *Energy*, 2015, 90(Part 1): 836-845.