

黄炳香,蔡青旺,赵兴龙. 基于储层保护的天然气水合物间接置换开采方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(1):1-9. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.001

HUANG B X, CAI Q W, ZHAO X L. Indirect Replacement Mining Method of Natural Gas Hydrates Based on Reservoir Protection [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(1):1-9. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.001

# 基于储层保护的天然气水合物 间接置换开采方法

黄炳香\*, 蔡青旺, 赵兴龙

(中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**物质运移和热量传递的效率低下以及储层稳定是天然气水合物高效开采面临的难题之一.提出了基于储层保护的间接置换开采方法.采用重力筛分介质分离天然气水合物分解和二氧化碳水合物合成的反应界面并在界面间分离和运移反应物,形成物质的单向运移通道;提高物质运移效率,使天然气水合物分解和二氧化碳水合物合成分区同时进行.将储层环境热、注入流体的敏感热和二氧化碳水合物合成释放的热作为天然气水合物分解的热源,保持热传导距离相对反应界面恒定,优化供热效率.通过主动降温固结井周地层流体,封堵地层裂隙和强化地层.利用二氧化碳水合物重塑储层强度.在矿床中留设支撑结构/矿柱分担水合物分解区的上覆岩重.优化布井参数和开采时空顺序来协调地层整体变形,维持地层相对完整.通过保护地层结构相对完整和封堵地层裂隙维持储层的密封性能和开采井的压力控制能力.该方法对于实现天然气水合物安全高效开采具有借鉴作用.

**关键词:**天然气水合物;储层稳定;置换;热质传递;协调开采

中图分类号:TD801

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)01-0001-09

## Indirect Replacement Mining Method of Natural Gas Hydrates Based on Reservoir Protection

HUANG Bingxiang, CAI Qingwang, ZHAO Xinglong

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,  
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The low efficiency of heat and mass transfer and the reservoir instability were challenges to the efficient and safe mining of natural gas hydrates (NGH). The indirect replacement mining method of NGH based on reservoir protection was proposed. The gravity-separating medium was adopted to separate the reaction interfaces and the reactants were separated and transferred between the interfaces of the NGH dissociation and the CO<sub>2</sub>-hydrate formation, to increase the efficiency of mass transfer by providing unidirectional migration channel of each material. The NGH dissociation and CO<sub>2</sub>-hydrate formation reacted in mutually independent regions at the same time with the separation of gravity-separating medium. The ambient heat from reservoir, the sensitive heat from the injected fluids and the heat released from the CO<sub>2</sub>-hydrate formation were supported for the NGH

收稿日期:2020-02-05

基金项目:国家“万人计划”科技创新领军人才专项资助

\*通信作者, E-mail: huangbingxiang@cumt.edu.cn

dissociation. The distance of heat transferring was kept relatively constant to the reaction interface, to optimize the heat transferring efficiency. Consolidation of fluids by proactive cooling in the overlying strata around the well was used to strengthen the strata and repair the mining-induced fissures. The strength of depleted reservoir was rebuilt by the  $\text{CO}_2$ -hydrates. The support structure was established to share the burden of hydrate dissociating reservoir. The extraction well placement and the mining spatiotemporal sequence were optimized to coordinate the overall deformation and maintain the relative strata integrity. The relative integrity of strata and the mining-induced fissures blocking help to maintain the tightness of strata and the pressure-maintaining ability of extraction well. This method was expected to inspire the efficient and safe mining of NGH.

**Keywords:** natural gas hydrate; reservoir stability; replacement; heat and mass transfer; coordinated mining

全球天然气水合物中的有机碳含量约为已探明常规化石能源中有机碳含量的2倍<sup>[1-2]</sup>,其能源潜力巨大.随着天然气水合物试验开采在世界范围内取得突破,安全高效开采成为下一步天然气水合物商业化开发的关键性问题之一.在天然气水合物安全开采方面,天然气水合物所赋存的软弱储层与传统油气藏的坚硬沉积岩储层不同,目前的油气开发技术未能解决天然气水合物开采过程中例如储层稳定等地质安全问题;在天然气水合物高效开采方面,已经提出或实施的开采方法也没能解决由于水合物堵塞等多种原因造成的单井开采效率低下的问题.同时,在开发利用的过程中,天然气水合物中巨大的有机碳储量也可能给环境带来巨大压力,碳平衡问题也是天然气水合物开发的另一个潜在挑战.针对现有开采方法的不足,发展在天然气开采过程中实现储层稳定,并且开采后保留储层的稳定固碳能力<sup>[3-5]</sup>实现碳中和的新开采方法,对天然气水合物商业化开发具有重要意义.

天然气水合物是天然气分子(主要为甲烷、乙烷和丙烷等为主)与水分子在低温高压的环境中通过范德华力形成的笼型水合物<sup>[6]</sup>.如果周围空间具有圈闭作用,天然气水合物就可能聚集形成天然气水合物藏(如图1).天然气水合物藏主要被发现于2类地区<sup>[7-11]</sup>:(1)高纬度大陆地区永久冻土带150~2 000 m的地层及极地大陆架海下地层中;(2)浅海陆坡水深300~3 000 m的海底以下0~1 000 m的地层沉积物中.天然气水合物藏的产状主要与圈闭空间有关,在细观尺度上,天然气水合物通过与矿物颗粒胶结或者在孔隙空间中充填的2种形式赋存在沉积物或者沉积岩的孔/裂隙中<sup>[12]</sup>.在宏观尺度上,海域天然气水合物矿床中的水合物产状类型主要有孔隙状、颗粒状、节理状、脉状和层状<sup>[8, 13-14]</sup>等,主要赋存在未成岩松散沉积层中<sup>[15]</sup>;陆域天然气水合物矿床中的产状主要有孔隙充填或者裂隙充填等2种类型,赋存在岩层或沉积层中.

天然气水合物储层稳定性与储层承载性能有关,具体受水合物矿体及储层结构的影响.其中力学承载性能受水合物主导的天然气水合物矿床(例如产状为层状、脉状的水合物藏)抗剪强度通常较低:例如从日本海获取的原位高纯天然气水合物样品能承受的最大偏应力约为0.1~3.2 MPa(围压10 MPa,通过液态介质加载)<sup>[12]</sup>,并且随矿床中水合物体积分数降低,抗剪强度呈下降趋势.相反,力学承载性能受储层主导的天然气水合物矿床(例如产状为孔隙充填型的水合物藏)的支撑结构强度主要取决于主体岩层/沉积物,水合物的形成有利于提升储层的固结强度<sup>[17-18]</sup>.此外,水合物分解对储层承载性能影响也较大<sup>[18]</sup>.在钻取水合物样品过程中发现:赋存天然气水合物的岩芯在其内部水合物分解后形成“蜂窝状”脆弱结构<sup>[19]</sup>,而高品位水合物样品则会由于水合物分解而使得储层支撑结构完全崩塌<sup>[12]</sup>;这可能造成地层向开采区域挤压变形.如果天然气水合物储层由于天然气水合物分解而变形或坍塌,可能影响水合物开采的作业环境和物质运移通道,导致开采效率降低.

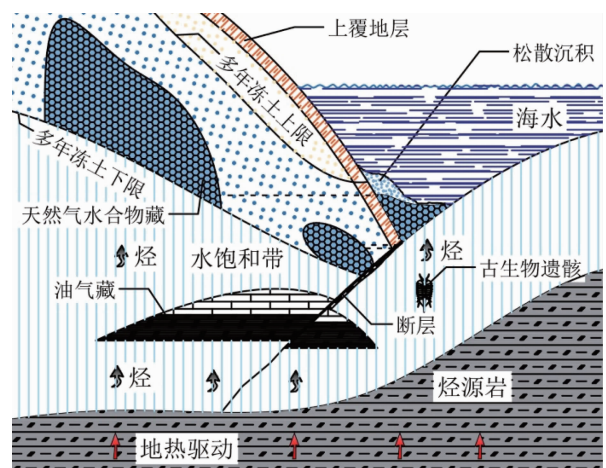


图1 天然气水合物成藏示意(据 Collett 等,有修改)<sup>[16]</sup>

天然气储层能以水合物的形式固碳<sup>[3-5]</sup>,形成的二氧化碳水合物是在已分解的天然气水合物储层中重塑储层强度的一种可能方案.现有针对天然气水合物储层固碳的研究主要从置换原理和置换工艺2个方面开展.实验测定( $T=271.2\sim 275.2\text{ K}$ ,  $p=3.25\text{ MPa}$  条件下)二氧化碳水合物合成的焓变绝对值大于天然气水合物分解的焓变绝对值<sup>[20]</sup>,从热力学理论和实验验证两方面说明二氧化碳置换天然气水合物的自发性.二氧化碳从天然气水合物中直接置换出天然气的实质是不同的客体分子(甲烷、二氧化碳)以竞争形式占据水分子笼穴.但组成天然气水合物晶体(常见的有I型、II型和H型3种<sup>[21-23]</sup>)的水分子笼穴尺寸不同<sup>[11]</sup>;研究显示,只有中等笼型的天然气水合物易被二氧化碳置换,但是小型笼的天然气水合物却不能<sup>[24-25]</sup>;这在反应原理上造成了直接置换的效率较低.此外,在现场实施时,由于反应界面由近井区域向远井区域移动,反应前后在储层中都形成天然气/二氧化碳固态水合物,阻碍物质运移,造成反应速率慢,置换周期长<sup>[26]</sup>.

直接置换过程中的水合物拥堵主要是由于反应物(二氧化碳)和生成物(天然气)在固体水合物间相向运移,无法解决新生成水合物拥堵的问题.由此,间接置换开采成为了一种可能的优化方案.因为相比天然气水合物,形成二氧化碳水合物所需的压力更低,温度更高;在同等条件下,二氧化碳水合物赋存也更稳定<sup>[27-28]</sup>(如图2,A区和B区).在一定的温度和压力条件下(如图2,B区),二氧化碳呈液态,二氧化碳水合物稳定存在,但是天然气水合物会分解为气体,基于此,可利用二氧化碳水合物间接置换天然气水合物.间接置换工艺设想在天然气水合物开采完后的储层中注入二氧化碳并使其形成二氧化碳水合物进行固态封埋.但是鉴于现有技术下水合物较慢的分解速率以及使商业开采达到经济合理的规模,完成间接置换工艺的循环周期较长.而天然气水合物分解后,储层变形与时间相关,间接置换工艺在不稳定的储层环境下也难以完成.目前也没有任何针对维持储层圈闭空间的稳定性而提出的具体开采方案.

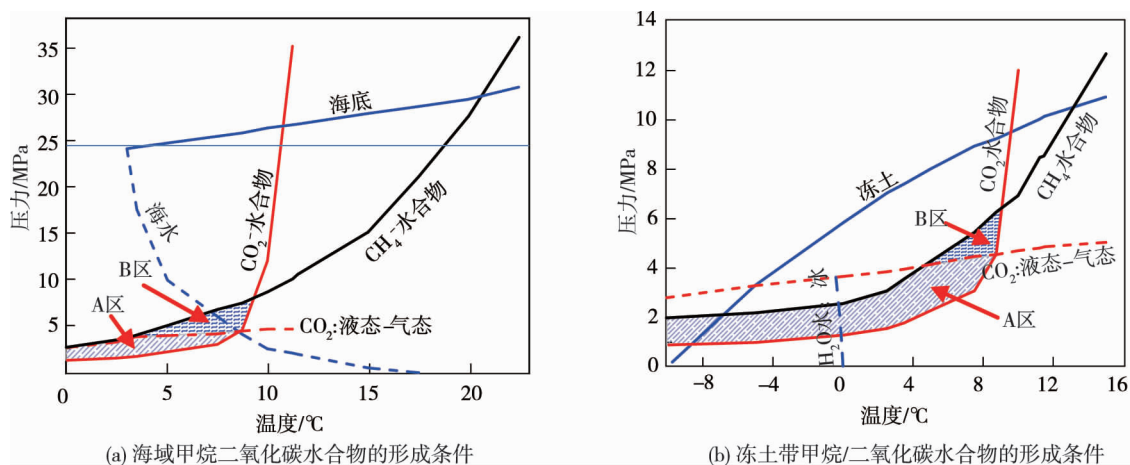


图2 甲烷与二氧化碳的水合物形成条件对比<sup>[27-28]</sup>

图注:图中数据仅作为讨论用,准确数据在不同因素(如气体组分,储层含水量,含盐量,孔隙尺度等)的影响下可能变化

本文针对天然气水合物安全高效开采,基于储层保护提出一种天然气水合物热间接置换开采方法.关注间接置换开采过程中的反应效率提升和采动影响下储层的稳定性问题.在间接置换开采过程中创新性地使用重力筛分介质分离天然气水合物分解和二氧化碳水合物合成的反应界面并且使这2种反应在开采过程中分区域同时发生,以期解决水合物封堵和储层的稳定性问题.为了在工程尺度为间接置换开采提供更好的反应条件,提出了对储层空间结构和热状态的保护.通过储层局部强度增强和重建以及对储层整体变形的协调来保留储层的密封保压性能和储层的空间资源.该方法对于实现天然气水合物安全高效开采具有借鉴作用.

## 1 天然气水合物储层特性

低温高压是天然气水合物赋存储层的典型特征.这种储层的高孔隙压力源自重力(主要来自上覆沉积物、沉积岩层、水体等的重力).而储层的低温环境则与储层自然形成条件有关,这类储层主要分为冻土层和海底陆坡.其中高原寒区冻土是岩石和沉积物在外部寒冷环境的影响下形成的,其地层温度主要与海

拔、纬度、气候条件、水分含量等因素有关<sup>[30]</sup>。而海底陆坡的地层温度则主要与海水温度有关:海水温度在铅垂方向一般随着海水深度的增加而降低<sup>[31]</sup>,一般深层海水的水温稳定在3~4℃左右(该温度条件下,海水密度最大)。所以,大部分已发现水合物储层的温度范围一般在0~22℃,储层的压力范围一般在5~50 MPa<sup>[12,32]</sup>。

传统矿产资源(如煤、石油、天然气等)的矿床由矿体和围岩组成,围岩通常是沉积岩,储层坚硬;而水合物的矿床主要由水合物和松散沉积物(砂、淤泥等)组成(也有部分矿床由水合物与沉积岩组成),储层较松软。再者,油气储层中的孔隙/裂隙空间被流体充填,具有一定的物质运移潜力,但是天然气水合物储层中的孔隙/裂隙空间被天然气水合物固体通过胶结或者充填的方式占据,阻碍反应物运移。此外,由于水合物矿床的低渗特性,水合物开采使孔隙压力梯度增高,也对储层的支撑结构有害<sup>[12,19]</sup>,易造成储层结构不稳定。

由于天然气水合物矿床与传统化石能源矿床在组成上和物质运移能力上的差异,将传统化石能源的开采技术用于水合物开采时,生产效率不理想<sup>[33]</sup>。以经济性最好的降压开采法为例:水合物降压开采的试验研究在实验室的封闭容器内进行,密封保压是实现压力控制的关键。但是降压开采法在现场运用时,水合物分解致使储层胶结弱化;在开采过程中抽采储层流体引起储层中流体运移和孔隙压力降低<sup>[34]</sup>,增加了储层支撑骨架的有效应力;局部储层在强度衰减和外部荷载增加的双重作用下储层更易发生局部破坏。在低渗储层中,水合物开采增加了储层的整体非均匀性,造成结构性应力集中,增加储层的局部畸变和储层的整体沉降。如果储层由于变形沉降引起的开采作业空间闭锁或者储层密封失效,可能会进一步影响降压开采时对压力控制和流体运移控制的需求,造成开采效率不理想。这个问题在其他例如注热、催化剂、置换等开采方法中同样存在,造成储层中物质传输困难而无法高效开采。

由此可见,维持储层稳定是天然气水合物安全高效开采的前提。储层稳定与水合物的存在密切相关,二氧化碳间接置换开采天然气水合物是一种优选工艺。另外,水合物稳定依赖具有一定的压力和低温环境的储层。在天然气水合物置换开采过程中,储层的低温环境使得二氧化碳水合物更稳定,但是不利于天然气水合物分解,这个问题可通过二氧化碳水合物与天然气水合物的相态条件差异解决(如图2)。

在天然气水合物高效开采中,影响天然气水合物分解速率和采出率的一个充分必要条件是热量供应<sup>[29]</sup>。例如降压开采时,水合物从储层中吸收分解所需的热量,但是这种供热模式下水合物的分解效率达不到商业化开发的要求<sup>[35-36]</sup>。目前提出了利用地热,高温表层海水,发电余热等多种热解工艺,但是在这些方法中热量传递方向与物质运移方向相反,随着水合物分解界面远离开采井,供热效率随着供热距离增长会降低;并且长期的外部热源扰动,也可能影响水合物稳定,进一步影响储层的固碳能力。因此保护储层热状态稳定成为保护储层稳定的一个关键。

## 2 基于储层保护的天然气水合物间接置换开采

影响天然气水合物开采效率的2个重要因素是反应物的有效运移和反应热的有效供给<sup>[27,29]</sup>。已有的开采方法主要受限于物质运移效率、分解所需热源的供应效率等问题,难以实现高效开采。基于天然气水合物储层的特点,优化热量和物质传递路径、维护储层结构和热状态的相对稳定,是当前天然气水合物开采工艺应当重点考虑的问题。基于此,提出基于储层保护的天然气水合物间接置换开采方法。

首先,分离天然气水合物分解和二氧化碳水合物合成的反应界面,改进水合物开采的供热模式。解决天然气水合物开采时物质在固体水合物间运移困难的问题,需要从改善运移介质和运移方向两方面进行。在降压开采工艺的基础上,向天然气水合物已分解区域的储层中注入重力筛分介质、二氧化碳液体;利用重力筛分介质将水和注入的二氧化碳筛分至下层二氧化碳合成的反应界面,而保留天然气水合物分解的天然气在上层的天然气水合物分解界面,密度不同的反应物通过重力筛分介质在两反应界面间运移分隔,实现反应界面分离(如图3a)。通过开采井控制二氧化碳的注入和天然气的抽出,开采井内部物质形成相对独立的单向运移通道。同时,来自储层的环境热、注入液体释放的敏感热和来自CO<sub>2</sub>水合物合成释放的热量通过储层或者重力筛分介质传导到天然气水合物分解界面使用(如图3a)。采用分步后退式开采法,即天然气水合物向上分解,重力筛分介质随反应界面移动,同一时间二氧化碳水合物不断在下方已开采的



储层中形成,实现整体的间接置换开采。

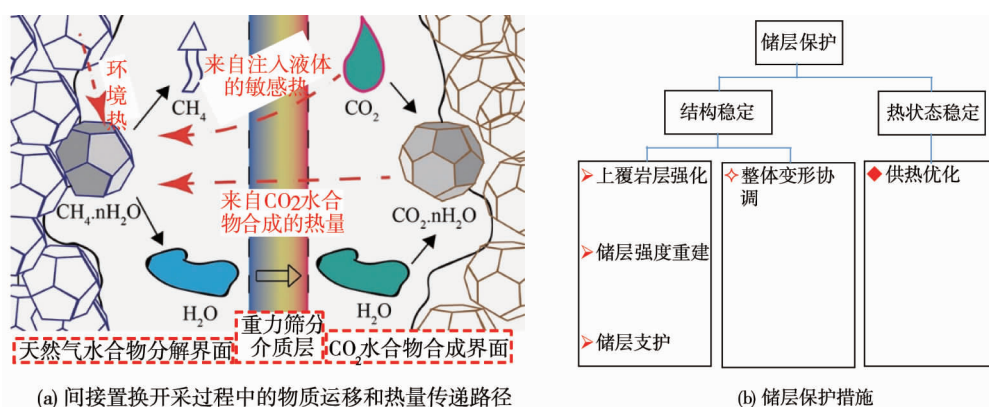


图3 天然气水合物储层保护性开采

其次,从储层空间结构和储层热状态两方面实现储层稳定(如图3b),形成相对稳定的开采作业环境和物质运移通道.在储层空间结构稳定方面,利用二氧化碳水合物重塑已开采储层的强度,通过开采井主动降温固结/冻结井周上覆地层,利用这2种方式提升地层承载性能;同时,开采过程中依次将天然气水合物矿床和二氧化碳水合物矿床留设为矿柱承载上覆地层,减缓由采动引起的地层局部结构性变形.除了局部变形减缓,还要协调地层整体变形,即优化开采井分布和单井开采时空参数,整体协调地层沉降维持上覆地层的完整性.通过保护地层空间结构的相对稳定和地层整体性来维持开采井的密封保压性能,同时也为天然气水合物开采和储层固碳提供稳定的作业空间和流体运移通道.在储层热状态稳定方面,采用上述间接置换开采,充分利用二氧化碳置换天然气水合物的反应自发性<sup>[20]</sup>,减小外部热源对储层的扰动。

### 3 关键技术探讨

#### 3.1 主动降温固结保压技术

开采井的密封保压是天然气水合物开采作业的基础.由于水合物分解以及地层流体抽出,地层整体向水合物已分解的储层区域挤压,可能造成井周地层以拉伸、剪切以及屈曲等形式破坏,这种地层非连续破坏现象在油气开采工程中常表现为套管损坏<sup>[37-39]</sup>;而天然气水合物松软的上覆沉积物/沉积层,在地层非连续变形时可能形成贯通的裂隙网络(如图4),致使储层流体逃逸,最终影响开采井的密封保压能力.密封保压可以分为钻井的密封和上覆盖层强度的优化两方面.在钻井密封方面,常用的

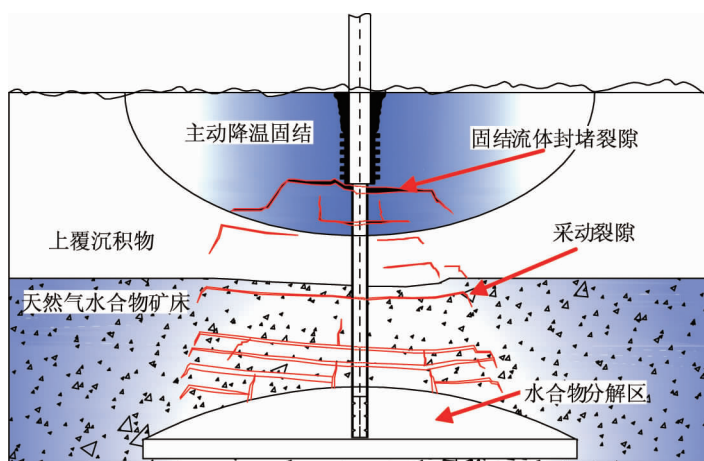


图4 主动降温固结/冻结密封

固井工艺是使用以水泥浆为主的固井液密封套管与地层间的环空区.但考虑到固结水泥与沉积物及天然气水合物储层的变形性质差异,井周地层可以通过主动降温固结/冻结地层中的流体的方法封堵裂隙并提升储层强度(如图4),达到井周地层裂隙封堵和地层承载性能提升的目的。

降温冻结地层是一项较为成熟的工程技术.在实验条件下测定:冻结或者水合物固结可将松散沉积的剪切强度提升1.4倍以上<sup>[17-18]</sup>;在管状空间中冻结纯净水形成的冰阀可抵抗高达100 MPa的轴压<sup>[40]</sup>.目前,井巷施工中通过降温冻结强化松散地层已有较多运用<sup>[41]</sup>,且基于冻结的钻井工艺在天然气水合物钻井取芯中取得了有效的应用<sup>[39]</sup>,控制了井壁稳定。

降温固结密封也是一项较适用于天然气水合物的松散储层的密封技术.固结/冻结的密封方式对密封

环境的清洁要求较低<sup>[40]</sup>;通过固结/冻结地层裂隙/孔隙中的流体形成水合物固结带或者冻结带(当然冰的形成受到含盐量、温度、压力等多种因素的影响),除了能具备连续的裂隙修复能力和储层强化能力,在“低温场”影响下地层强度的梯度变化也减小,也有利于减缓非连续变形。

低温环境促进水合物的合成,有利于储层稳定和储层固碳,但对开采的水合物分解具有潜在抑制作用。但研究发现:可燃冰分解的总体积占比受可燃冰可用于分解的总热量影响,而分解速率则与热量供应速率具有较大的联系<sup>[35]</sup>,例如在低温环境下水形成冰以后,部分冰的潜热反而有助于水合物分解<sup>[36]</sup>。在工程中,低温环境对天然气水合物分解和二氧化碳水合物合成的矛盾作用可从两方面解决:(1)利用二氧化碳水合物与天然气水合物相态曲线的差异,控制温度和压力条件(如图2中B区),使得天然气水合物趋向于分解而二氧化碳水合物趋向于稳定合成,同时二氧化碳与水保持液态但是天然气保持气态;(2)通过开采井进行分区域控温,主动调控和维持储层在不同垂深的温度,实现水合物高效分解(供热升温)和储层稳定(降温)的双重目标。

### 3.2 重介筛分间接置换技术

天然气水合物开采既包含传统的流体运移等物理过程,又包含水合物分解合成的化学过程,实现天然气水合物高效开采的关键问题则是实现反应热的有效供应和物质的高效运移。已有开采工艺以开采井为中心,水合物分解产气的反应界面由“近井区域”向“远井区域”移动,造成了反应物与生成物相向运移、反应热传递方向与物质运移方向相反、二次生成的水合物堵塞运移通道等诸多问题。这也是现有催化剂、注热、二氧化碳直接置换等水合物开采原理在实验室或现场运用效果不佳的重要原因。现有在已开采的天然气水合物储层中封埋二氧化碳的开采方案,也就是二氧化碳间接置换开采。间接置换开采在置换原理上突破水合物笼型限制和物质运移困难的阻碍,但是现有间接开采工艺中储层天然气水合物分解和二氧化碳水合物合成在时间上不同步,考虑到储层变形的时间效应,应使储层中无水合物的时间间隔应该进一步缩短,否则不利于储层稳定。为了解决上述问题,本文提出了基于重力筛分的间接置换开采工艺。

基于重力筛分的间接置换开采工艺的操作流程:在降压开采的基础上,向天然气水合物已分解的储层中注入重力筛分介质和液态二氧化碳;以重力筛分介质层为界,将天然气水合物储层分为上部的天然气水合物分解界面和下部的二氧化碳水合物合成界面(如图3和图5)。在开采过程中,通过开采井维持储层在特定温度和压力条件(如图2中B区的温压条件)下,使得二氧化碳和水保持液态、天然气呈气态,并且天然气水合物趋于分解为气体(甲烷)而液态 $\text{CO}_2$ 趋于形成稳定的

$\text{CO}_2$ 水合物<sup>[28]</sup>;持续注入二氧化碳和抽出天然气,使得天然气水合物持续向上分解并且 $\text{CO}_2$ 水合物持续在天然气水合物已经分解的储层中合成(如图5);采用上行分段后退式开采,保持开采井与重力筛分介质层随天然气水合物的分解界面向上移动。

在上述间接置换开采过程中,开采井驱动物质单向运移。二氧化碳由开采井压入后通过重力筛分介质进入二氧化碳水合物合成区,液态水通过重力筛分介质进入二氧化碳水合物合成区;分解形成的天然气停留在天然气水合物分解区的储层中并被开采井抽出(如图5)。热量由二氧化碳水合物合成区、重力筛分介质层和储层向天然气水合物分解界面传递供给;在连续开采过程中,热源有3种:注入液体(二氧化碳、重力筛分介质等)的敏感热;二氧化碳水合物合成时释放的热;来自储层的环境热。上行分段后退开采过程中,热源与反应界面的供热距离相对恒定,且可以充分地间接利用二氧化碳形成水合物时释放的反应热。

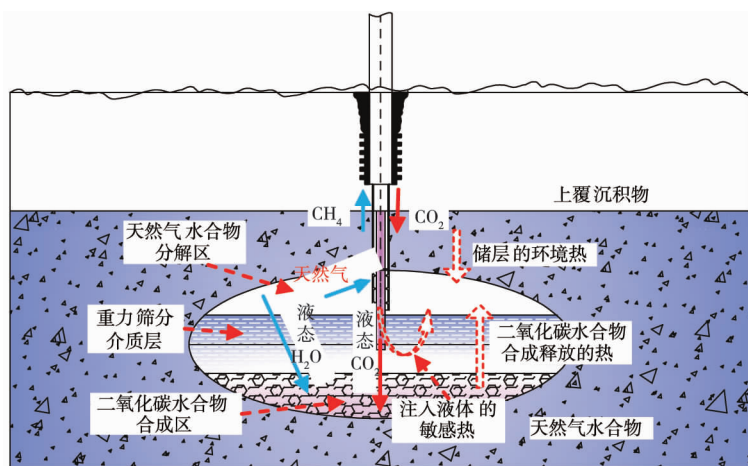


图5 重介筛分间接置换开采



通过基于重力筛分的间接置换开采工艺,天然气水合物分解和二氧化碳水合物合成分区域同时进行,进一步缩短储层中无水合物的时间间隔,在储层有限强度的基础上,及时进行储层强度重塑,减缓储层局部变形,有利于储层稳定.开采井驱动物质独立地单向运移,热源供应相对恒定,更有利于水合物高效开采;而充分利用二氧化碳形成水合物时释放的反应热,可减小外部热源对储层热状态的扰动,增强储层的固碳能力.

重力筛分介质在开采过程中具有隔离反应界面和基于重力筛分物质的作用,这要求重力筛分介质与水及液态二氧化碳微溶或难溶,并且密度比水及液态二氧化碳大.有较为丰富的物质可以作为天然气水合物开采过程中的重力筛分介质,例如戊烷、己烷、辛烷和甲苯等.

### 3.3 协调开采技术

天然气水合物开采可能引起周围地层(岩层/沉积层)向已开采区域颈缩变形.在时间效应、开采尺寸、以及变形方向等多种因素影响下,地层可能出现非连续变形,形成采动裂隙.地层非连续变形的原因主要是由于天然气水合物分解造成的储层局部承载性能差异以及采动引起的结构性变形.开采过程中的密封保压和储层固碳都以储层完整为前提,维持储层完整性对安全高效开采具有重要意义.

维持储层完整性分为减缓局部变形和协调整体变形两方面.对于局部变形减缓,采用主动降温优化上覆层强度和使用二氧化碳水合物重构储层强度这2种方案改造储层承载性能.而对于结构性局部变形,在开采过程中,将未开采的天然气水合物矿体或已经形成稳定二氧化碳水合物的矿体依次留设为开采矿柱支撑地层,减缓采动应力对储层支撑结构的破坏.除了减缓局部变形,还要协调地层的整体变形;从空间上协调开采顺序来优化应力分布,使储层承担的外部荷载更均匀地分布,平衡地层结构性变形.协调开采的原则:整体优化开采井空间布置参数和开采时空顺序,使得各开采井引起的储层沉降在水平方向间隔分散,在竖直方向趋近协调同步.例如,如图6所示,采用多口开采井分水平分阶段对一个天然气水合物层状矿床(产状可能是孔隙状、颗粒状、节理状等)进行开采,开采井在水平面上可以采用间隔条带布置,且同一条带上的开采井分阶段间隔开采,使得应力被分散承载,降低局部应力峰值;开采过程中综合考虑单口开采井的开采范围和布井参数留设天然气水合物矿柱来支撑地层,待天然气水合物开采完的井中形成稳定二氧化碳水合物后,将其替代原有天然气水合物矿柱作为新支撑结构/矿柱,并在二次回采中将原先未开采的天然气水合物矿柱采出,提高天然气水合物的采出率.在单口井开采中,采用上行分段后退式开采,即优先开采下部矿体,后开采上部矿体;利用这种分步后退式开采使得上部矿体在下部矿体采动的诱发下一定程度地形成裂隙,实现储层增透效果.

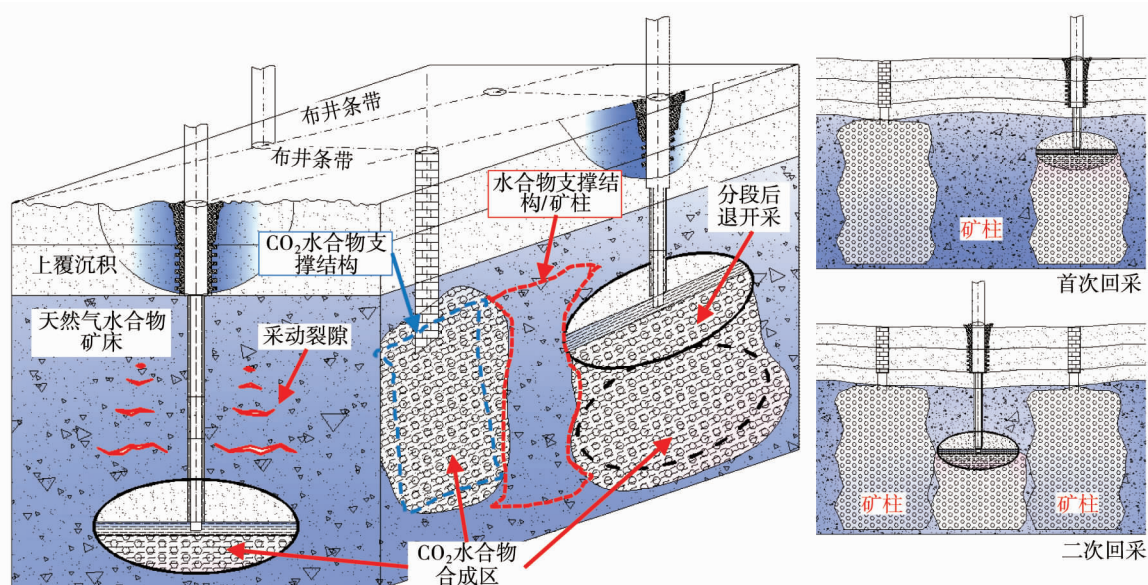


图6 协调开采的平面布井和时空开采顺序

## 4 结论

1) 为了在天然气水合物开采过程中提高物质运移和热量供应效率以及储层稳定性,提出了一种基于储层保护的间接置换开采方法。

2) 在开采中引入重力筛分介质隔离天然气水合物分解和二氧化碳水合物合成的反应界面,并在反应界面间分离和运输反应物质,优化物质运移效率,使天然气水合物分解与二氧化碳水合物合成能分区域同时进行。将储层的环境热、注入流体的敏感热和  $\text{CO}_2$  水合物合成释放的热量作为热源,保持热传递距离相对恒定,优化天然气水合物分解的热源供应效率。

3) 从减缓局部变形和协调整体变形两方面保护储层的结构稳定,通过主动降温固结/冻结井周地层中的流体来强化地层和封堵地层裂隙;交替留设矿柱来支撑储层。优化开采井空间布置参数和开采的时空顺序,维持沉降地层相对完整,保护开采井的密封保压能力。

## 参考文献:

- [1] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in NGH [J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 23(11/12): 997–1008.
- [2] Makogon Y F. Hydrates of hydrocarbon[M]. Tulsa: PennWell Publishing Company, 1997.
- [3] Palodkar A V, Jana A K. Fundamental of swapping phenomena in naturally occurring gas hydrates [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16563.
- [4] Liang Z. Geological storage of  $\text{CO}_2$ : overseas demonstration projects and its implication to China [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(1): 93–98.
- [5] Cai B, Li Q, Liu G, et al. Environmental concern-based site screening of carbon dioxide geological storage in China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7598.
- [6] Sloan E D. Gas hydrates: Review of physical/chemical properties [J]. *Energy & Fuels*, 1998, 12(2): 191–196.
- [7] Kvenvolden K A, Lorenson T D. The global occurrence of NGH [J]. *Geophysical Monograph Series*, 2001: 3–18.
- [8] 刘昌岭, 孟庆国. 天然气水合物实验测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [9] Kerkar P, Jones K W, Kleinberg R, et al. Direct observations of three dimensional growth of hydrates hosted in porous media [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(2): 5673–299.
- [10] Buffett B A, Zatsepina O Y. Formation of gas hydrate from dissolved gas in natural porous media [J]. *Marine Geology*, 2000, 164: 69–77.
- [11] Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases. 3rd ed [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [12] Yoneda J, Kida M, Konno Y, et al. In situ mechanical properties of shallow gas hydrate deposits in the deep seabed [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(24): 14459–14468.
- [13] Dai J, Xu H, Snyder F, et al. Detection and estimation of gas hydrates using rock physics and seismic inversion: Examples from the northern deepwater Gulf of Mexico [J]. *Leading Edge*, 2004, 23(1): 60–66.
- [14] Uchida T, Dallimore S, Mikami J. Occurrences of NGHs beneath the permafrost zone in Mackenzie Delta: Visual and X-ray CT imagery [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 912(1): 1021–1033.
- [15] 周守为, 陈伟, 李清平, 等. 深水浅层非成岩天然气水合物固态流化试采技术研究及进展 [J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 1–8.
- [16] Collett T S. NGH as a potential energy resource [M]. Springer: Netherlands, 2000.
- [17] Winters W J, Pecher I A, Booth J S, et al. Properties of samples containing NGH from the JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L–38 gas hydrate research well, determined using Gas Hydrate And Sediment Test Laboratory Instrument (GHASTLI) [J]. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 1999, 544: 241–250.
- [18] Li Y, Luo T, Sun X, et al. Strength behaviors of remolded hydrate-bearing marine sediments in different drilling depths of the South China Sea [J]. *Energies*, 2019, 12(2): 253.
- [19] Zhu Y, Zhang Y, Wen H, et al. Gas hydrates in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, Northwest China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2010, 84(1): 1–10.
- [20] Ota M, Abe Y, Watanabe M, et al. Methane recovery from methane hydrate using pressurized  $\text{CO}_2$  [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2005, 228(s1): 553–559.



- [21] Pauling L, Marsh R E. The structure of chlorine hydrate [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1952, 38(2): 112–118.
- [22] Claussen W F. A second water structure for inert gas hydrates [J]. Journal of Chemical Physics, 1951, 19(11): 1425–1426.
- [23] Ripmeester J A, Tse J S, Ratcliffe C I, et al. A new clathrate hydrate structure [J]. Nature, 1987, 325(6100): 135–136.
- [24] Ota M, Morohashi K, Abe Y, et al. Replacement of CH<sub>4</sub> in the hydrate by use of liquid CO<sub>2</sub> [J]. Energy Conversion & Management, 2005, 46(11/12): 1680–1691.
- [25] Yuan Q, Sun C Y, Yang X, et al. Recovery of methane from hydrate reservoir with gaseous carbon dioxide using a three-dimensional middle-size reactor [J]. Energy, 2012, 40(1): 47–58.
- [26] Sukru M, Al-Raoush R I, Jongwon J, et al. Comprehensive literature review on CH<sub>4</sub>–CO<sub>2</sub> replacement in microscale porous media [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2018, 171: 48–62.
- [27] Zhou X, Fan S, Liang D, et al. Determination of appropriate condition on replacing methane from hydrate with carbon dioxide [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(8): 2124–2129.
- [28] Naval G. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: Current knowledge and issues [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 51: 169–184.
- [29] Zhao J, Liu D, Yang M, et al. Analysis of heat transfer effects on gas production from methane hydrate by depressurization [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 77: 529–541.
- [30] 周幼吾,邱国庆,郭东信,等. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [31] 冯士筭,李凤岐,李少筭. 海洋科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [32] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates — A potential energy source for the 21st century [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2007, 56(1/3): 14–31.
- [33] Song Y C, Yu F, Li Y H, et al. Mechanical property of artificial methane hydrate under Triaxial compression [J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2010, 19(3): 246–250.
- [34] Lu X B, Chen X D, Zhang X H, et al. On Soil Layer Damage Due to Gas Escape [C]//12th International IAEG Congress, Torino, Italy, SEP 15–19, 2014, Engineering geology for society and territory, marine and coastal processes, 2014, 4: 3–7.
- [35] Zhao J, Zhu Z, Song Y, et al. Analyzing the process of gas production for natural gas hydrate using depressurization [J]. Applied Energy, 2015, 142(15): 125–134.
- [36] Song Y, Cheng C, Zhao J, et al. Evaluation of gas production from methane hydrates using depressurization, thermal stimulation and combined methods [J]. Applied Energy, 2015, 145(1): 265–277.
- [37] Liu F, Sun H, Jung J, et al. Experimental study of pullout capacity of plate anchors shallowly embedded in hydrate bearing sediments [J]. Ocean Engineering, 2019, 173(1): 548–555.
- [38] Fang L, Lin T, Giovanni C, et al. Spatiotemporal destabilization modes of upper continental slopes undergoing hydrate dissociation [J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105268.
- [39] Moridis G, Collett T S, Pooladi-Darvish M, et al. Challenges, uncertainties and issues facing gas production from gas hydrate deposits [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2011, 14(1): 76–112.
- [40] Akyurt M, Aljawi A N A, Aldousari S. Ice-based technique for burst testing of tubular elements [J]. Journal of King Abdulaziz University Engineering Sciences, 2005, 16(1): 103–130.
- [41] 张文. 我国冻结法凿井技术的现状与成就 [J]. 建井技术, 2012, 33(3): 4–13.



黄炳香,男,1978年12月生,湖北通城人,中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室常务副主任,教授,博士生导师。国家“万人计划”科技创新领军人才、国家优秀青年科学基金获得者、科技部中青年科技创新领军人才等。主要从事煤岩体压裂与煤系共伴生资源协调开采方面的研究,工程应用包括坚硬顶板控制、坚硬顶煤弱化、应力定向转移、局部集中应力解除、冲击地压防治、含瓦斯煤层增透、突出煤层消突、地应力测量、煤层气开采、陆域可燃冰开采、煤与煤系共伴生资源协调开采、矿井闭坑等。形成了理论→技术→装备→技术服务的发展模式。出版专著2部,发表学术论文100余篇,第一发明人授权国际发明专利10项、国内发明专利20项。科研成果获省部级科技一等奖5项(3项排名第一)、二等奖4项等。成套技术2017年入选科技部与原国家安全生产监督管理总局第一批安全生产先进适用技术与产品,2019年获国家能源局煤炭行业标准和煤炭学会团体标准制订立项。