

海域天然气水合物储层改造增产技术研究进展

王志刚¹⁾, 董凯飞²⁾, 郭永宣³⁾, 李小洋¹⁾,
王天文⁴⁾, 李宽¹⁾, 施山山¹⁾

1) 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊, 065000;

2) 河北省煤田地质局第四地质队(河北省矿山生态修复与资源综合利用中心), 河北张家口, 075100;

3) 河北省煤田地质局水文地质队, 河北邯郸, 056001;

4) 中国煤炭地质总局第四水文地质队, 河北邯郸, 056001

关键词: 天然气水合物; 储层改造; 增产技术; 渗透率

天然气水合物是以甲烷为主的烃类气体在高压、低温条件下形成的固态可燃的结晶化合物, 主要分布在温度和压力条件适合的陆域冻土区和海底, 其中有超过 90% 的天然气水合物分布在海底的沉积物中(黄鑫等, 2022; 王志刚等, 2023)。当前已探明的天然气水合物储量是全球石化燃料资源的 2 倍, 如果能够开采出 15% 的天然气水合物, 就可以满足人类 200 年的使用需求, 这对于满足人类日益增长的能源需求具有重要意义, 因此受到了世界各国的广泛关注(王志刚等, 2021; 苗晓明等, 2022; 李小洋等, 2023)。目前, 在天然气水合物勘查方面最为活跃的国家是中国、美国、日本、印度和韩国等, 其中日本于 2013 年和 2017 年先后在南海海槽进行了两次海域水合物试采, 第一次试采共持续 6 d, 累计产气量为 $11.95 \times 10^4 \text{ m}^3$, 在第二次试采中, 第一口井累计生产 12 d, 产气量为 $4.1 \times 10^4 \text{ m}^3$, 第二口井累计生产 24 d, 产气量为 $22.25 \times 10^4 \text{ m}^3$, 后因出砂严重被迫停止。中国于 2017 年和 2020 年在南海神狐海域进行了两次海域天然气水合物试采, 第一次试采采用直井方式进行生产, 累计试采 60 d, 产气量为 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 最高日产气量 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 第二次试采采用水平井方式进行生产, 累计试采 42 d, 产气量 $149.86 \times 10^4 \text{ m}^3$, 日均产气量 $3.67 \times 10^4 \text{ m}^3$, 与第一次试采相比进步巨大。虽然中国和日本的试采取得了一定的成功, 但

是在试采的过程中出现了产气量低、开采周期短的问题, 而储层渗透率低, 使得气液运移速度慢, 是导致产气量低的重要原因, 因此当前的试采距离商业化开采还有很大的差距, 急需加大相关工艺技术的攻关力度, 改善储层渗透率, 提高产气量, 为早日实现海域天然气水合物的商业化开采提供支撑。

1 海域天然气水合物储层改造的意义

在国家需求和战略引导下, 近年来世界各国对天然气水合物研究的投入越来越大。天然气水合物虽然具有非常高的工业开采价值, 但是如何将其从海底地层中高效、经济、安全的开采出来是困扰科研工作者的主要难题。尤其是海域天然气水合物大多赋存于水深 800 m 以上、海底以下 400 m 以浅的黏土质粉砂或淤泥沉积物中, 储层未成岩、胶结性差, 地层渗透率低, 天然气水合物在储层中以固态形式存在, 发挥着胶结储层和承压作用。在对天然气水合物进行开采的过程中, 水合物胶结和承压作用将会被破坏, 导致储层原有力学平衡发生改变, 如果无法有效控制, 可能会出现天然气水合物大量分解、地层沉降、井壁坍塌、海底滑坡和井喷等问题。储层改造是人为主动对储层进行改造的方式, 可以改善原生储层的渗透率和孔隙度, 根据以往的工程实践和科学研究可知, 储层改造对于提高低渗透储层的生产能力具有重要作用。基于海域天然气水合物储层的特点, 实施天然气水合物储层改造的目的是提高水合物储层的渗透率, 增强水合物储层

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号: 42102352); 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(编号: 2018YFE0208200); 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20221721)的成果。

收稿日期: 2023-12-10; 改回日期: 2024-02-05; 责任编辑: 周健。DOI: 10.16509/j.georeview.2024.sl.139

作者简介: 王志刚, 男, 1987 年生, 硕士, 工程师, 研究方向为水合物、页岩气、干热岩等钻井与研发工作; Email: 1036821833@qq.com。通讯作者: 王天文, 男, 1989 年生, 本科, 工程师, 研究方向为水文地质与工程地质、水文与水资源工程研究; Email: 562230029@qq.com。

的稳定性。通过储层改造可以增加储层内部的气液渗流通道,提升储层传热效率、压降传递效率和气液运移效率,从而提高水合物开采量和开采效率。通过储层改造可以增大含水合物储层的强度,提高储层的稳定性,为水合物的安全钻采提供保障。我国在第二轮水合物试采中,首次采用了水平井多级射孔技术对储层进行了改造,使得近井带渗透率提高了 4~6 倍,产气量较第一轮试采提高了 5.57 倍,证实了储层改造的重要性。储层改造对于未固结、低固结、低渗透率水合物的开采具有重要意义,不仅可以提高水合物的开采效率,同时还可以提高开采的安全性。

2 海域天然气水合物储层改造关键技术

(1) 水力压裂储层改造技术:水力压裂技术是将大量的压裂液注入到储层中,扩展储层原有裂缝,生成水力裂缝,为气液运移增加通道,提高储层渗透率和传热传质效率,从而大幅增加油气产量。水力压裂技术是低渗油气藏、页岩气、页岩油开采经常采用的储层改造增产举措,水力压裂形成的裂缝可以增大单井控制面积,增加油气导流通道,而在较高水合物饱和度条件下,水合物对储层发挥的胶结粘连作用,使沉积物具有类似于粉砂质页岩气藏的力学特性,具有能够诱导出水力裂缝的可能性,因此科研成员考虑将水力压裂技术应用到低渗透天然气水合物藏来提升产量(姚远欣等, 2020; 罗天雨等, 2020; 马晓龙, 2021)。水合物矿藏水力压裂随之成为了研究热点,被认为是提高海域天然气水合物开采效率的关键技术。目前针对压裂改造后产能、裂缝起裂扩展规律等方面开展的研究较多。通过数值模拟和试验研究发现在高饱和度水合物储层内,水力压裂可以构建裂缝通道,提高天然气水合物产能,但相关研究并未考虑水合物分解对压裂改造和储层力学变化的影响,且受到作业环境和水合物储层特性的影响,在水合物试采中并未开展过水力压裂作业,仍然处于现象分析的初级阶段,尚不完全清楚水合物沉积物水力压裂起裂机理以及裂缝扩展规律。

(2) 高压水射流储层改造技术:高压水射流技术广泛应用于石油钻井、煤层割缝增产、辅助压裂等领域,技术工艺已经比较成熟(杨林, 2018)。将其应用到海域天然气水合物储层改造中,主要依

靠高射流速度产生冲刷破坏和拉伸剪切破坏,破坏模式主要受水合物饱和度的影响,在水合物饱和度较低的情况下,沉积物的抗拉—抗剪强度较低,颗粒之间的黏结程度较低,破坏模式与砂土沉积物破坏模式类似。在水合物饱和度较高时,沉积物抗拉—抗剪强度较高,颗粒间固结程度较高,破坏模式与岩石破坏更加类似,依靠高压水射流可以使水合物沉积物形成破碎区域,进而提高近井带水合物储层渗透率,提高产气量。通过数值模拟研究发现,射流速度是影响水合物沉积物破碎深度和体积的主要因素,在利用高压水射流对水合物储层进行改造,结合降压和其他方法进行生产的过程中,较大的喷距可以减少破碎体积,减轻对储层稳定性的破坏,并且在设定储层条件和割缝参数的情况下,高压水射流割缝井的产能较裸眼完井产能提高 3 倍。

(3) 注浆液储层改造技术:天然气水合物储层改造后裂缝容易闭合、储层强度低等问题是导致储层改造失效的主要原因,因此需要根据天然气水合物储层结构特点,开发更加适用于泥质粉砂型水合物储层的改造技术。水力喷射微小井眼钻井技术是利用连续油管 and 喷射钻头进行欠平衡钻井的技术,在海域天然气水合物钻井中进行应用不仅可以解决高造斜率的问题,同时还可以在钻井的过程中将泡沫砂浆或者是可形成蜂窝状的储层改造剂注入到水合物储层中,不仅可以发挥支撑地层的作用,同时还为气液流动提供了通道,提高了地层渗透率,增加了产气量(王志刚等, 2020)。此外近井天然气水合物储层注浆液改造储层技术还包括劈裂注浆技术、高压旋喷灌浆技术、双增改造液技术等,这些注浆液改造技术都是利用了改造浆液凝固后可以形成具有较高渗透率和承压能力固体的特性来对水合物储层进行改造。通过实验发现改造后的天然气水合物储层不论是抗压强度,还是渗透率都有较大幅度的提升,是研究前景较大的一种储层改造方法,不过目前主要处于实验研究和数值模拟分析阶段。

然气水合物储层周围构建一个具有一定力学稳定性、封闭、低渗的盖层,二氧化碳水合物盖层的形成不仅可以防止外部自由水在水合物开采过程中的侵入,又可以避免泄露天然气,同时还可能提高产水气体的流动性。在二氧化碳盖层的保护下,产气效率得到了极大的提高,产水量显著减少(朱涛, 2019)。在一定温度范围内,二氧化碳水

合物热力学稳定性要比甲烷水合物热力学稳定性高,因此从热力学角度分析注二氧化碳储层改造技术是可行的,但在进行实验、数值分析的同时,还需要进一步验证是否可以进行实际应用。

(5) 甲醇吞吐储层改造技术: 甲醇同时具有亲水基团和疏水集团, 与水和烷烃都有较强的溶解能力, 是解决凝析气井反凝析和水锁伤害的有效方法(李虎等, 2010)。甲醇吞吐储层改造技术就是在降压开采之前利用甲醇吞吐促进近井区域水合物分解, 从而改善储层渗透性。通过数值计算发现, 甲醇吞吐在改善天然气水合物储层的渗透率和提高产量方面具有较好的效果, 吞吐期间带走的地层热量有助于周围热量的流入, 可以进一步促进天然气水合物的分解, 但甲醇吞吐对储层也有负面影响, 会对储层造成一定的伤害, 因此需加大对不同吞吐时间、不同甲醇浓度影响储层改造效果的研究力度。

3 结论与展望

天然气水合物是一种清洁、高效、绿色环保的可替代传统能源的新能源, 其中海域天然气水合物开采潜力最大。近年来随着天然气水合物试采的成功, 使得能源领域专家学者对开采这种新型能源的信心倍增。但从当前实际的试采情况来看, 海域天然气水合物开采仍然面临着许多的难题, 其中产气量和采出效率低是要重点解决的问题。天然气水合物储层改造是提高产气量的重要举措, 目前研究的天然气水合物储层改造技术主要有水力压裂储层改造技术、高压水射流储层改造技术、注浆液储层改造技术、注二氧化碳储层改造技术、甲醇吞吐储层改造技术等, 这些储层改造技术对于提高天然气水合物采气量和采出效率具有积极的意义, 不过从整体来看尚处于初步研究阶段, 主要以理论分析、数值模拟和室内实验为主, 后续还需要进行深入系统的研究, 形成完善的海域天然气水合物储层改造技术理论体系, 为早日实现海域天然气水合物的商

业化开采提供技术支撑。

参 考 文 献 / References

- 黄鑫, 王海波, 张乐, 贺甲元, 岑学齐. 2022. 天然气水合物藏开采增产技术研究进展. 科学技术工程, 22(9): 3405~3415.
- 李虎, 李相方, 赵林. 2010. 注甲醇吞吐解除反凝析堵塞和水锁的正负面作用分析. 钻采工艺, 33(1): 90~93.
- 李小洋, 张欣, 田英英, 张永勤, 梁金强, 黄伟. 2023. 海洋天然气水合物开采增产新技术可行性研究. 钻采工艺, 46(5): 87~92.
- 罗天雨, 冯一, 胡仁德, 石咏衡. 2020. 海下天然气水合物储层压裂工艺技术. 钻采工艺, 43(4): 67~70.
- 马晓龙. 2021. 泥质粉砂型水合物储层水力压裂数值模拟及实验研究. 长春: 吉林大学.
- 苗远明, 冯秀丽, 李景瑞, 肖倩文, 但孝鹏, 尉建功. 2022. 南海甲烷渗漏研究进展及其对我国南海科学钻探选址的启示. 地质学报, 96(8): 2877~2895.
- 王志刚, 巩建雨, 吴纪修, 尹浩, 施山山, 闫家, 李小洋. 2023. 海域天然气水合物钻完井关键技术研究进展. 科技导报, 41(20): 71~78.
- 王志刚, 胡志兴, 李小洋, 伍晓龙, 董新柱, 史二岭, 尹浩, 梁健, 刘秀美. 2020. 水力喷射微小井眼技术用于海域天然气水合物钻探的可行性分析. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(2): 30~35.
- 王志刚, 李小洋, 张永彬, 尹浩, 胡晨, 梁金强, 黄伟. 2021. 海域非成岩天然气水合物储层改造方法分析. 钻探工程, 48(6): 32~38.
- 杨林. 2018. 海底水合物储层在高压水射流作用下的破碎过程及储层改造增产研究. 长春: 吉林大学.
- 姚远欣, 李栋梁, 梁德青. 2020. 天然气水合物储层水力压裂研究进展. 新能源进展, 8(4): 282~290.
- 朱涛. 2019. CO₂ 水合物盖层的生成和稳定性研究及效果评价. 北京: 中国石油大学(北京).

WANG Zhigang, DONG Kaifei, GUO Yongxuan, LI Xiaoyang, WANG Tianwen, LI Kuan, SHI shanshan:
Research progress on recovery improvement technology of natural gas hydrate reservoir in sea area

Keywords: natural gas hydrate; reservoir modification; stimulation technology; permeability