

注化学试剂法开采天然气水合物研究综述

刘中华¹, 潘栋彬^{1,2*}, 王景鹏¹, 王丽霜¹, 成 坤¹, 代朝宇¹

(1. 江西理工大学矿业工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学矿冶环境污染防治江西省重点实验室, 江西 赣州 341000)

摘要: 天然气水合物高效开采是实现其商业化利用的基础与前提。注化学试剂法通过改变水合物相平衡条件、破坏笼型结构促进其分解, 是重要开采技术之一。本文综述了注醇类、盐类及热酸液开采水合物方法的研究进展, 分析了各类化学试剂的作用机理、水合物分解效率及联合开采过程。结果表明, 注醇类试剂开采主要通过亲水羟基降低水活度实现热力学抑制, 但开采过程面临环境污染严重、注剂量大等难题; 盐类试剂成本低且环境友好, 但单一应用开采潜力较低, 联合降压或热激可显著提升近50%的储层产气效率; 注热酸液通过化学溶蚀与热传递协同增产, 但机理研究不够全面。海洋泥质粉砂水合物储层细颗粒占比大、黏土含量高与渗透率低的特点导致注化学试剂法开采面临注入困难, 注剂种类、浓度与储层适配性亟待研究。本研究可为注化学试剂法高效开采水合物提供思路。

关键词: 天然气水合物; 注化学试剂; 醇类; 盐类; 热酸液; 泥质粉砂储层

中图分类号: P634; TE37 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0024-08

Review on exploitation of natural gas hydrates by chemical injection method

LIU Zhonghua¹, PAN Dongbin^{1,2*}, WANG Jingpeng¹, WANG Lishuang¹, CHENG Kun¹, DAI Chaoyu¹

(1. School of Mining Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China;
2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Prevention and Control in Mining and Metallurgy, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: Efficient exploitation of natural gas hydrates constitutes the foundation and prerequisite for their commercial utilization. As one of the vital exploitation technologies, the chemical reagent injection method facilitates hydrate dissociation by altering hydrate phase equilibrium conditions and destroying cage structures. This paper reviews the research progress of hydrate exploitation including injected alcohols, salts and hot acid solutions, and analyzes the action mechanism of various injected chemical reagents, hydrate dissociation efficiency and combined exploitation processes. The results demonstrate that alcohol-based reagents achieve thermodynamic inhibition mainly by reducing water activity via hydrophilic hydroxyl groups, yet their application suffers from severe environmental pollution and large injection dosage. Salt reagents feature low costs and environmental friendliness, while exhibiting limited exploitation potential when used alone, and combination with depressurization or thermal stimulation can boost reservoir gas production efficiency by nearly 50%. Hot acid injection enhances gas production through the synergy of chemical dissolution and heat transfer, whereas relevant mechanism research remains incomplete. Marine argillaceous silty hydrate reservoirs are characterized by high fine particle and clay contents as well as low permeability, which

收稿日期: 2026-04-24; 修回日期: 2026-05-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.003

基金项目: 国家级大学生创新训练计划项目(编号: 202510407019); 国家自然科学基金项目(编号: 42562030); 矿冶环境污染防治江西省重点实验室项目(编号: 2023SSY01071)

第一作者: 刘中华, 男, 汉族, 2004年生, 地质工程专业, 研究方向为天然气水合物钻采, 江西省赣州市红旗大道86号, 3088067056@qq.com。

通信作者: 潘栋彬, 男, 汉族, 1994年生, 讲师, 硕士生导师, 地质工程专业, 博士, 研究方向为水合物钻采与岩土渗流侵蚀, 江西省赣州市红旗大道86号, pandbedu@163.com。

引用格式: 刘中华, 潘栋彬, 王景鹏, 等. 注化学试剂法开采天然气水合物研究综述[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 24-31.

LIU Zhonghua, PAN Dongbin, WANG Jingpeng, et al. Review on exploitation of natural gas hydrates by chemical injection method [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 24-31.

brings about injection obstacles for the chemical reagent injection method. The compatibility between reagent type, concentration and reservoir conditions requires urgent investigation. This study can provide references for the efficient exploitation of natural gas hydrates via chemical reagent injection.

Key words: natural gas hydrate; chemical reagent injection; alcohols; salts; hot acid solutions; argillaceous silty reservoirs

0 引言

天然气水合物是由水分子通过氢键形成的笼型晶格包裹甲烷等气体分子而成的固态类冰状化合物^[1],主要赋存于深海沉积物和永久冻土层中^[2]。据估算,全球天然气水合物中的有机碳储量约为所有已知化石燃料碳储量的两倍,被视为21世纪最具潜力的替代能源之一^[3]。并且,水合物能稳定存在的温压条件与常规油气开采环境存在显著差异^[4],如何安全、经济、高效地促使水合物在储层原位分解并产出甲烷气体,是水合物资源开发利用的核心科学问题^[5]。

目前,天然气水合物的开采方法主要有降压法^[6-7]、热激法^[8-9]、注化学试剂法^[10-11]以及CO₂置换法^[12-13]等。其中,降压法的优势在于其成本较低,操作方便^[14],但单纯使用降压法容易导致水合物的二次生成、储层压力失衡和产气速率过慢等问题^[15]。热激法虽然可以为水合物开采提供直接热量使其分解,但在热液长距离运输过程中热量容易流失,最后到达储层的热量不足,无法使水合物充分分解,而且成本也较高^[16]。注化学试剂法通过向水合物储层中注入特定化学试剂,改变水合物相平衡条件或直接破坏水合物笼型结构,从而促使水合物在原有温压条件下失稳分解^[17]。该方法可以与其他开采方法联用,且具有良好的互补协同性,因此成为水合物开采技术体系中的重要组成部分。

国内外学者们对不同种类化学试剂(主要为醇类与盐类,近年来热酸液也受到关注)作用下的水合物分解过程与分解效率开展了大量研究。本文在梳理现有文献的基础上,从醇类、盐类、热酸液三类化学注剂出发,系统综述其作用机理、分解效率、联合开采效果及工程适用性,并针对我国南海泥质粉砂水合物储层的特殊地质条件,分析注化学试剂法面临的挑战与未来研究方向。

1 注醇类试剂开采水合物

在天然气水合物开采领域中,醇类化学注剂具有高效的抑制性能和成熟的工业化生产体系,是分

解天然气水合物的重要试剂之一。醇类化学注剂如甲醇、乙醇、乙二醇等,通过其亲水性羟基与液态水分子形成氢键,破坏水合物的稳定性^[17]。具体而言,醇类注剂溶于水后能有效降低水的活度,束缚水分子,减少可用于形成水合物的自由水,进而使水合物的相平衡条件向着更高压、更低温的方向偏移,打破原位环境中的稳定状态,最终实现甲烷气的产出。刘庭崧等^[18]采用分子动力学模拟研究表明,醇类分子中的亲水性羟基极大地破坏了水合物的笼型结构,并且羟基可以与局部的液态水分子形成氢键,从而抑制水合物的形成并促进其分解。

在众多醇类化学注剂中,甲醇和乙二醇是在天然气水合物开采中应用最为广泛的两种。甲醇具有抑制性能优良、黏度低、流动性好、扩散能力强等特性,其传递速率高于传热速率^[19-20]。在麦索雅哈气田开采初期,工作人员向两口井的底部层段注入甲醇后,天然气产量增加了6倍^[21]。Li等^[22]通过实验手段研究了不同抑制剂对水合物分解的影响,结果表明,相同质量分数下甲醇具有更好的抑制性能。Liu等^[23]通过分子动力学模拟得到了不同甲醇浓度下的水合物分解时间及相对分解速率的倒数,并进行多次并行模拟验证。如图1^[23]所示,在277.15 K和20 MPa条件下,随着甲醇浓度的增加,添加1~20 mol甲醇时分解速率逐渐增加,20~80 mol甲醇时分解速率趋于平稳,80~100 mol甲醇时分解速率迅速下降。从图中可知甲醇浓度具有最佳值,加入20 mol甲醇溶液对水合物分解效果最佳。但是,甲醇具有较高的毒性,还具有腐蚀性以及易燃易爆等特性,难以满足安全环保的使用要求。

乙二醇也能作为天然气水合物分解促进剂,其分解机理在于为水合物提供分解热,并能降低水合物内部的孔隙支撑能力,从而加快分解速率^[24]。乙二醇因含有两个羟基,而羟基的强吸附能力使水分子难以重新排列为稳定的晶格,进而延缓水合物生成速率,达到分解水合物的目的^[25]。Fan等^[26]研究了乙二醇对水合物分解热的影响,发现注入乙二醇

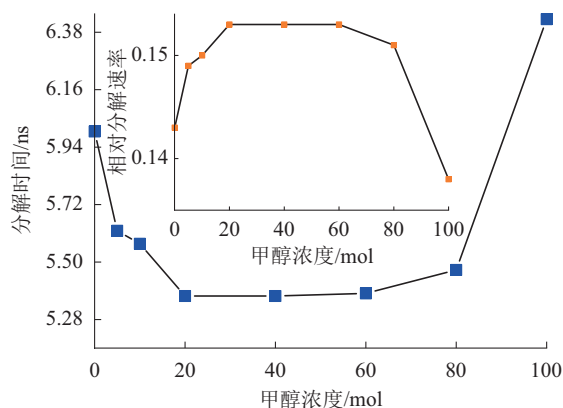


图1 在 277.15 K 和 20 MPa 条件下水合物分解时间及相对分解速率^[23]

能够明显降低水合物分解需要的热量,提高分解速率。邱奕龙^[27]认为乙二醇是一种高效、可控的化学促进剂。边中等^[28]进一步指出,与甲醇相比,乙二醇除改变相平衡条件外,还会显著降低水分子的活跃程度。孙华忠等^[24]发现,相较于 CaCl_2 等盐类注剂,乙二醇能更显著地减弱水合物试样的力学强度,并且相比甲醇,乙二醇更易降低水合物的强度和储层稳定性,因此更适用于需要快速分解、提高开采效率的场景。然而,乙二醇在同等效果下用量远超甲醇,且乙二醇回收再生难度大、成本高,全生命周期成本高于甲醇。

单一的醇类注剂开采水合物在实际工程中面临注剂量大、成本高昂且环境危害严重等瓶颈,难以大规模推广。近些年来,国内外学者开始着力于将醇类注剂与其他开采方法联合,其中降压联合醇类化学注剂的研究最为深入。宋志康等^[25]在低温条件下采用三阶降压模式 ($4.00 \rightarrow 3.00 \rightarrow 2.00$ MPa),分别研究了注乙二醇、甲醇、乙醇对水合物分解和开采效率的影响。研究表明,当采用多级降压+注 30% 乙二醇模式时,分解效率较纯降压模式提升 51.3%,2 h 内开采效率提高 67.3%;醇类质量分数越高,促分解效果越好,但实际开采中应选择适宜的质量分数以避免环境污染。孙漪霏^[29]的研究结果显示,与常规降压法相比,采用“乙二醇+降压”的联合开采方法能够将水合物开采效率提升 2 倍以上。但需要注意的是,在达到同等抑制效果时,乙二醇的用量远超甲醇,且其回收再生难度大、成本高,导致全生命周期成本较高,在长期开采中经济性不如甲醇。热激法也能和醇类化学试剂联

用,也有不少学者做了相关研究。在热激法中,注热水虽然对水合物开采有效,但开采效果有限,而注热甲醇试剂的方法恰好可以弥补这一缺陷。张永田等^[20]根据实际地质参数建立了三维三相四组分开采海域天然气水合物数值模型,如图 2^[20]所示,通过与降压开采、注热水等方式横向比较,得出注热甲醇抑制剂和注热水在中后期的产气效果要好于单一降压法,注热甲醇溶液能够弥补注热水的不足,产气效果更好,降压、注热水和注入热甲醇产气速度和累积产气量如图 3^[20]所示。但是注热甲醇法也有和注热水法一样的缺点,即产水量大的问题尚未得到有效解决,降压、注热水和注入热甲醇产水速度和累积产水量如图 4^[20]所示。

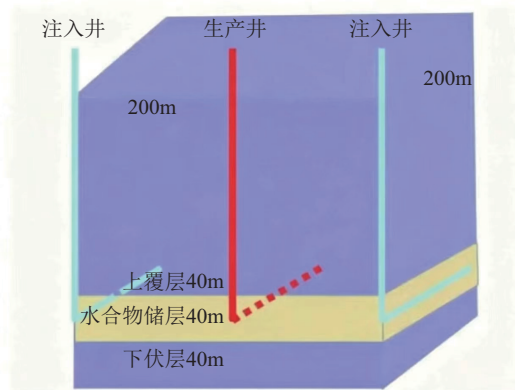


图2 神狐海域储层模型示意^[20]

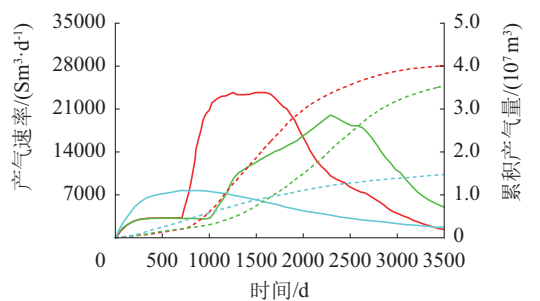


图3 降压、注热水和注入热甲醇产气速度和累积产气量^[20]

综上所述,醇类化学注剂在水合物开采领域的研究已较为深入。在机理层面,甲醇、乙二醇等通过羟基与水分子形成氢键、降低水活度、破坏其笼型结构,从而达到分解的目的。在分解效率层面,

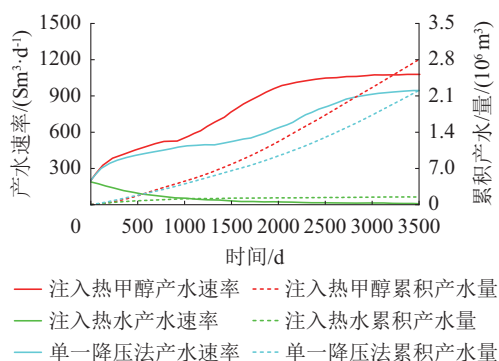


图4 降压、注热水和注入热甲醇产水速度和累积产水量^[20]

国内外学者通过实验和数值模拟的方法,均证明了醇类注剂能够加快水合物的分解速率以及产气速率,而水合物与其他试剂的联用更是强强联合,其中多级降压+注30%乙二醇模式的分解效率提升可达51.3%。然而,醇类化学试剂目前在商业上并不能大量推广。一方面,其在实际生产中成本高昂且注剂量大;另一方面,醇类试剂具有毒性,容易对环境造成污染,并且其回收再利用工艺复杂、成本较高。这些局限性决定了醇类试剂的商业化开采仍面临严峻挑战,未来研究应着重于开发绿色可降解注剂以及探索更多的醇类联用手段。

2 注盐类试剂开采水合物

盐类化学注剂在开采水合物方面也有广泛应用。注入盐类化学试剂开采天然气水合物,其核心机理在于利用盐类的热力学抑制作用打破水合物的相平衡,促使水合物笼型结构失稳分解,从而释放出甲烷气体。盐类溶液通过改变水分子活度能显著影响天然气水合物的相平衡条件^[30]。孙始财等^[31]系统分析了NaCl、MgCl₂、CaCl₂等氯盐溶液对甲烷水合物分解温度的影响,发现其在水合物分解时的分解温度较纯水体系分别降低了4.8~1.0、5.3~1.5和4.3~1.8 K。这种差异主要源于离子静电作用产生的溶剂化效应和盐析效应,其中二价金属离子,如Mg²⁺、Ca²⁺,因具有更强的吸附能力,对水合物分解的促进作用更为显著。Wei等^[32]进一步通过分子动力学模拟揭示,不同无机盐的解离效能与其离子半径呈负相关,MgCl₂因离子半径最小且吸附能力最强,其促进水合物分解的能力优于CaCl₂、KCl和NaCl。Ma等^[33]开发的三维三相四组

分数值模型进一步揭示,盐(NaCl)浓度对产气速率具有显著正向影响(由图5^[33]可见不同盐浓度对水合物饱和度的影响,中早期盐浓度对水合物分解影响不大,但末期1500 d时,高浓度盐组中水合物分解区更大)。20 MPa注压条件下高盐度注剂可使开发周期缩短40%以上。Lee等^[34]研究了不同NaCl浓度下甲烷气体的产生情况,结果显示盐质量分数在16%时效果最佳,而过高质量分数时促进效果减弱。

盐类化学注剂虽然成本低廉,但由于其对储层分解效果不理想、可能引发储层危害等弊端,单独注盐类试剂开采水合物并不可行,采用联用策略效果更佳。盐类注剂可以与热激法联用,其本质是将盐水升温后注入储层形成热盐水驱替。李淑霞等^[35]通过实验模拟得出,水合物开采初期注高温热盐水时的产气速率和能量效率比注低温热盐水更高,而在开采后期注入高温热盐水的能量效率并不高,由图6^[35]可见,当注热水盐度较高时,水合物的分解速度更快,能够提高水合物分解阶段的能量效率。

此外,有部分学者研究了盐类注剂与降压法联用甚至与热激法、降压法三联用的开采方法,其分解效果亦较为理想。Wang等^[36]采用TOUGH+HYDRATE进行数值模拟获取了产气与产水,并基于焓(Exergy)分析方法,对注盐联合降压开采天然气水合物的能量效率进行了定量评价,结果表明,这两种方法联合可获得较高的能量效率比。张婷婷等^[37]基于TOUGH+HYDRATE模拟了祁连山冻土区五点水平井系统下降压联合热盐水开采,研究表明生产前期注盐可加快分解、提高产气速率;但生产中后期注采井间贯通后,热盐水直接产出,抑制剂扩散范围受限,加之自由水稀释,增产效用减弱,后期产气主要依赖降压与热刺激。注盐可有效避免二次生成的水合物堵塞问题,证实盐类注剂能降低相平衡条件。宋志康等^[25]通过实验得出,多级降压+注盐类能有效提高天然气水合物开采和分解效率,且随盐类质量分数的增大而增大。在多级降压+注无机盐类模式中,多级降压+注15%氯化钙模式性能最优,与纯多级降压模式相比,其分解效率提高47.3%,2 h内的开采效率提高60.4%。曾浩鹏^[38]研制了三维中尺度反应釜进行实验,结果表明降压+注盐在实验尺度上确实能大幅提升产

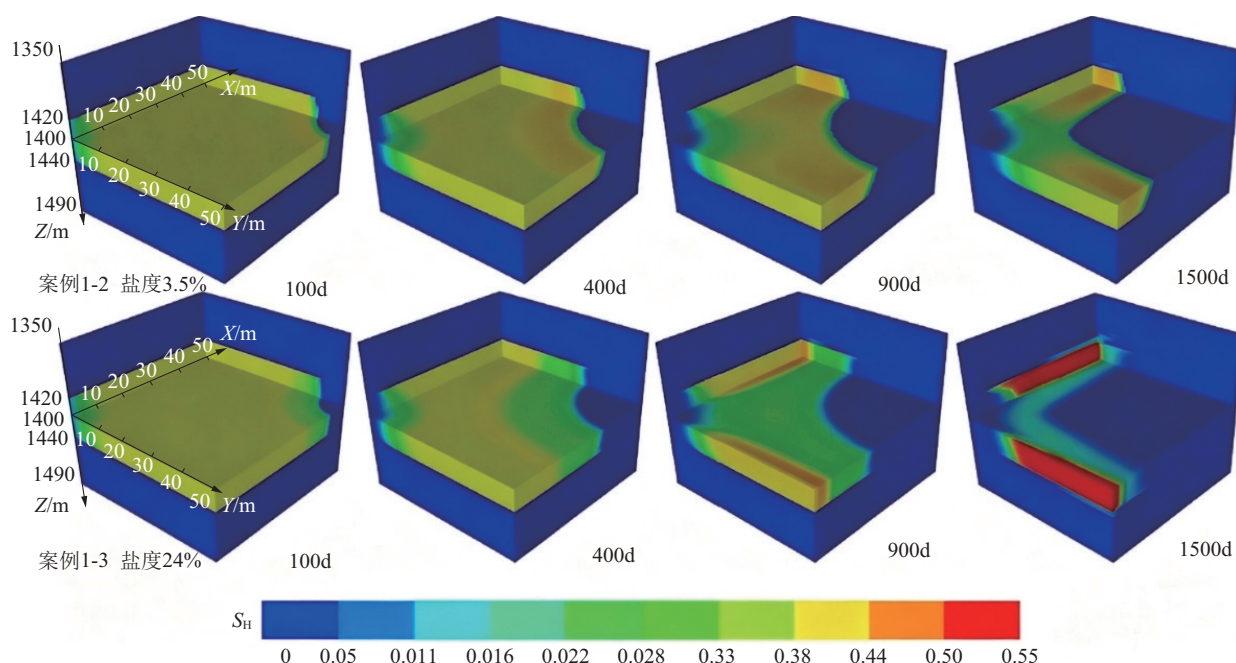


图5 不同盐浓度下注入在100、400、900和1500 d时的水合物饱和度(S_H)演变^[33]

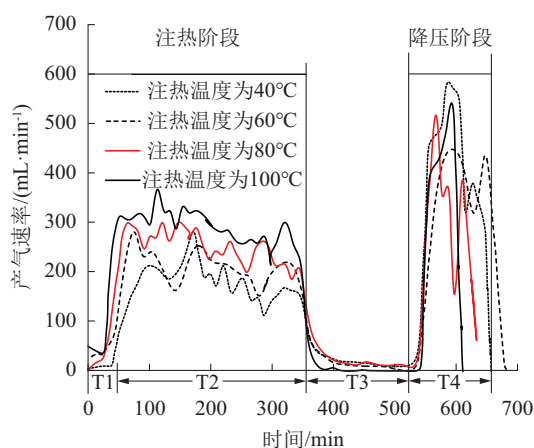


图6 注入不同温度热盐水时的产气速率变化^[35]

气速率,但其现场可行性受制于盐液分布不均、产出短路、黏土储层伤害三大瓶颈,目前尚不具备独立商业化条件,需配合水平井布井、分段注入等工程策略加以优化。马英瑞^[39]通过“数值模拟量化增益+智能算法自动寻优”,不仅证明了“降压+注盐”在非封闭水合物藏中能让我采收率从40%提升到90%,更给出了“低温(23.5℃)、高盐(24%)”这一目前商业低成本工程开采的最优解。

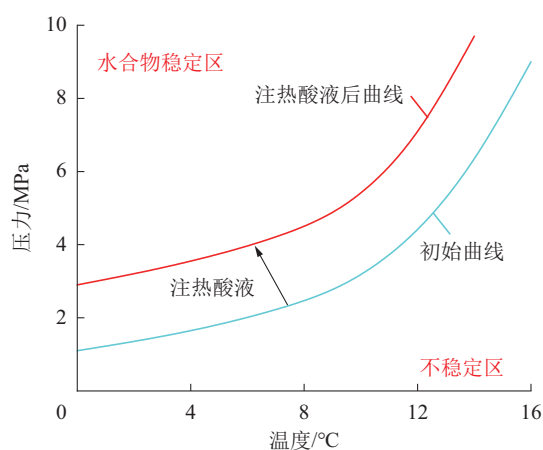
总之,盐类化学注剂是以降低水活度为核心机理、辅助天然气水合物开采的重要化学剂。在机理层面,不同盐类的解离效能与其离子类型、离子半径及浓度密切相关。盐类注剂具备成本低廉、来源

广泛、环境友好度可控等优势,与醇类相比更为环保、更为经济。然而,盐类注剂单独开采水合物并没有很好的分解优势,与降压法和热激法的双联用或三联用具有更好的作用空间。未来研究应聚焦于新型盐类注剂的开发以及更好的、更具成本优势的联用方法。

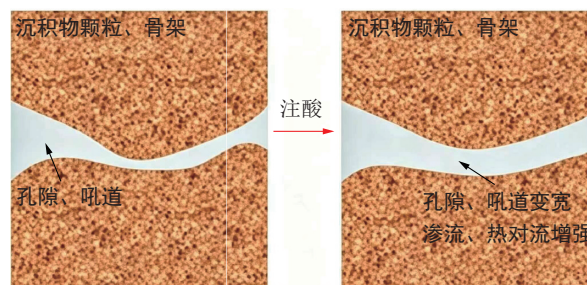
3 注热酸液开采水合物

注热酸液开采水合物是近些年来新型的开采措施。其本质在于将酸液注剂升温与热激法联用的形式。酸液通过其在水合物储层的化学溶蚀和相平衡调控能力,能够实现水合物高效分解与产气提升。一方面,酸液可以改变水合物储层的矿化度,使水合物稳定区间向低温、高压偏移,在相同温压条件下水合物更易分解;另一方面,酸液能溶蚀岩石骨架矿物,提升孔隙度与渗透率,强化流体渗流与热对流,扩大了水合物分解范围^[40-41],图7^[42]为注热酸液激发水合物分解的机理示意图。热酸液同时提供分解所需热量,与酸液化学作用耦合,可加快分解速率、缩窄分解过渡区。

相比传统降压法分解范围小、产气量低的缺陷,注热酸液方法能溶解沉积物矿物、提升孔隙度与渗透率,并增强热对流,高效促进水合物分解^[43]。Sakamoto等^[40]通过在甲烷水合物储层降压开采后进行注热酸



(a) 注热酸液使相平衡条件改变



(b) 注热酸液使孔喉变宽, 渗流增强

图7 注热酸液激发水合物分解的机理示意^[42]

液二次开采,数值分析后得出注入热酸液能促进甲烷水合物的分解以及提高天然气采收率的结论。李庆超等^[42]在数值模拟中对比了降压策略和注热酸策略,得出注热酸策略的产气速率是降压策略的1.76倍,说

明注热酸液策略对于天然气水合物的增产效果显著,表1为降压法和注热酸液法开采水合物数据对比。此外,确定好适宜的注热酸温度、浓度,对天然气开采的产气效率会有较大提升。

表1 降压法和注热酸液法开采水合物数据对比

开采方法	日均产气速率/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	累积产气量/ m^3	水合物分解范围/m	优缺点
降压法	2.92×10^5	0.80×10^7	13.6	经济、工艺简单,但易引发水合物的二次生成
注热酸液法	5.15×10^5	1.41×10^7	23.7	产气速率高、可以抑制水合物的二次生成,但不经济且更容易造成储层失稳

酸的种类对水合物的开采影响也是不可忽视的。Zheng等^[44]通过对比氨基磺酸与柠檬酸发现:酸的种类显著影响自热酸液的放热强度、峰值温度与有效加热范围;强酸(氨基磺酸)升温更高、热波及更广,更利于水合物分解开采;弱酸(柠檬酸)放热能力弱、作用范围局限,增产效果有限。

综上所述,注热酸液可有效促进天然气水合物分解,其产气效果显著优于传统降压法,对天然气水合物的开采具有很高的可行性且未来具有非常好的商业前景,但目前尚未深入研究各种类别热酸液的作用机理,也缺少对水合物实际开采效果的分析。未来研究应聚焦于新型酸液的开发及其作用机理和分解效果的研究。

4 注剂开采的挑战

目前已有研究多集中于纯水合物体系和砂质储层中的水合物分解行为,但我国南海海域水合物藏多为泥质粉砂水合物储层。南海水合物主要赋

存于未固结泥质粉砂沉积物中,矿物组分复杂(富含黏土、石英、碳酸盐等),孔隙结构以微纳米级生物化石孔和黏土晶间孔为主,渗透率极低且非均质性强^[45]。水合物相变行为受温压场控制,细颗粒且富含黏土矿物的特性使得化学试剂的注入与扩散面临很大的不确定性。

化学试剂种类、浓度与泥质粉砂水合物储层物性特征的适配性尚待深入研究。储层中蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物具有很大的比表面积且表面富集电荷,可能会吸附已注入的化学试剂进而降低其有效浓度,因此降低水合物分解效率。并且,泥质粉砂储层渗透率极低,在没有降压或热激诱导的情况下实际开采工程中注入化学试剂将面临很大的困难,造成化学试剂在储层中的扩散范围受限,进而显著降低水合物分解效率。需要注意的是,化学试剂分子吸附于黏土矿物颗粒表面,可能改变其水化程度,造成黏土矿物分散运移,储层孔隙结构改变,导致储层渗透率进一步降低。

注剂开采过程中,水合物分解后储层强度降低,气液渗流通道尺寸可能减小甚至闭合,这将进一步加大注入难度,并恶化气液产出条件。事实上,水合物本身是储层胶结骨架的一部分,水合物分解会造成沉积物有效应力增大、黏聚力降低,沉积物骨架被压缩引起孔隙坍塌,储层渗透率降低,进而影响注剂开采产能。

可以认为,在注剂开采前对储层进行改造是提升注剂效率与开采效率的必要前提。已有研究提出采用“双增”改造浆液(一种固化后能增强储层强度与渗透率的浆液)对泥质粉砂型天然气水合物储层的连通性进行改造,拓宽储层内的气水渗流通道,增强气水渗流能力^[46]。这可能是提升注剂开采效率的储层改造措施。此外,针对泥质粉砂储层的物性特征,探索水力压裂、射流割缝^[47]等储层改造手段与注化学试剂法联合应用,也是突破注剂开采瓶颈的重要方向。

5 结论

(1)醇类注剂能凭借羟基的特性破坏水合物的笼型结构,其降低水活度的热力学抑制作用机理已充分阐述。多级降压联合注醇类可使水合物分解效率提升50%以上。然而,醇类试剂用量大、成本高、回收利用困难且具有毒性,对环境的破坏严重等瓶颈,制约了其未来在商业化开采中的应用。

(2)盐类(尤其是氯化物)通过离子静电作用产生溶剂化效应和盐析效应,水合物分解机理阐释较为全面。盐类注剂具有来源广、污染小、成本低的优势,但其单一应用会导致水合物开采效率较低,与降压或热激联合开采是提升开采效率的良好途径,多级降压+注15%氯化钙的分解效率提升可达47.3%。

(3)注热酸液开采包含了化学溶蚀与热传递协同作用,能够显著提升水合物储层产气效率(可达降压法的1.76倍),具有良好的工程应用前景。但目前各种热酸液的作用机理缺乏系统分析,不同酸液种类、浓度、温度下储层中水合物分解行为、产气产水行为值得深入研究。

(4)我国南海水合物藏多为泥质粉砂储层,颗粒细、富含黏土矿物且渗透率极低,化学试剂的注入与扩散面临困难。未来研究应聚焦于化学试剂与泥质粉砂水合物储层的适配性评价、储层改造与

注剂联合开采工艺的研发,以及环保型高效化学注剂的开发,提升注化学试剂法开采水合物的商业化应用潜力。

参考文献:

- [1] Pineda M, Phan A, Stamatakis M, et al. Multiscale simulations of gas hydrates: From molecular mechanisms to mesoscale growth and macroscale flow and production predictions[J]. *CrytEngComm*, 2026,28(16):2513-2534.
- [2] Pan D, Zeng Y, Zhu Q, et al. Recent advances in enhanced technologies for CH₄-CO₂ replacement in gas hydrate extraction: A review of mechanisms, challenges, and prospects[J]. *Energy Reports*, 2026,16:109419.
- [3] Choudhary N, Phirani J. Uncertainty propagation in predicting recovery from gas hydrate reservoirs: From reservoir characteristics to performance analysis[J]. *Energy & Fuels*, 2024,38(5):4021-4030.
- [4] Aydin H, Merey S. The effect of gas production from deeper conventional gas reservoirs on shallower gas hydrate layer stability: A case study in the conditions of the Sakarya Gas Field, Western Black Sea[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021,94:104103.
- [5] 李守定,孙一鸣,陈卫昌,等.天然气水合物开采方法及海域试采分析[J]. *工程地质学报*, 2019,27(1):55-68.
- [6] 钟浩森,司鹄.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(4):108-116.
- [7] 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.
- [8] 郭旭洋,金衍,卢运虎,等.海域天然气水合物降压开采诱发储层力学性质劣化及沉降规律建模研究[J]. *钻探工程*, 2023,50(6):27-36.
- [9] 李清平,周守为,赵佳飞,等.天然气水合物开采技术研究现状与展望[J]. *中国工程科学*, 2022,24(3):214-224.
- [10] 刘姝,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.
- [11] Pan D, Ma X, Chen C, et al. Numerical analysis of hydrate exploitation performances of depressurization combined with thermal fluid injection in marine hydrate reservoir with impermeable boundary[J]. *Gas Science and Engineering*, 2023,110:204894.
- [12] Zeng Y S, Pan D B, Chen C, et al. Effect of reservoir goaf on methane recovery and carbon dioxide sequestration in sandy and clayey hydrate reservoirs: An experimental study[J]. *China Geology*, 2026,9:318-330.
- [13] 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.
- [14] Jin G, Xu T, Xin X, et al. Numerical evaluation of the methane production from unconfined gas hydrate-bearing sediment by thermal stimulation and depressurization in Shenhu Area, South China Sea[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016,33:497-508.
- [15] 王鹏,王路君,朱斌,等.砂质沉积物内水合物降压开采时井管水合物二次生成效应研究[J]. *地学前缘*, 2025,32(2):206-215.
- [16] 韩笑,刘姝,万青翠,等.热激法开采天然气水合物研究进展

- [J]. 油气储运, 2019, 38(8): 849-855.
- [17] Wang S, Zha X, Shao B, et al. Molecular dynamics simulation of hydrate decomposition under action of alcohol inhibitors[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2023, 30(6): 12-28.
- [18] 刘庭崧, 刘妮. 醇类抑制剂对甲烷水合物形成的影响[J]. 原子与分子物理学报, 2022, 39(1): 7-11.
- [19] Khlebnikov V N, Gushchin P A, Antonov S V, 等. 热力学抑制剂与CO₂同注开采天然气水合物的实验研究[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 40-46.
- [20] 张永田, 陈晨, 马英瑞, 等. 注入甲醇抑制剂法开采神狐海域天然气水合物数值模拟研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 101-108.
- [21] 徐兴恩, 蒋季洪, 白树强, 等. 天然气水合物形成机理与开采方式[J]. 天然气技术, 2010, 4(1): 63-65.
- [22] Li X S, Wan L H, Li G, et al. Experimental investigation into the production behavior of methane hydrate in porous sediment with hot brine stimulation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(23): 9-11.
- [23] Liu Z, Shi D, Hei Y, et al. Effects of different concentrations of methanol on the decomposition of methane hydrate: Insights from molecular dynamics simulations[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 7283-7290.
- [24] 孙华忠, 李忠慧, 熊青山, 等. 分解促进剂对水合物力学的特性影响分析[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(6): 66-73.
- [25] 宋志康, 王雷, 黄鑫, 等. 天然气水合物多级降压+注化学剂联合开采实验研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2022, 42(5): 43-49.
- [26] Fan S, Zhang Y, Tian G, et al. Natural gas hydrate dissociation by presence of ethylene glycol[J]. Energy & Fuels, 2006, 20(1): 419-425.
- [27] 邱奕龙. 海洋非成岩天然气水合物固态流化开采过程分解规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [28] 边中, 郭利明, 段超著, 等. 天然气水合物生成要素影响研究[J]. 能源化工, 2024, 45(4): 21-24.
- [29] 孙漪霏. 降压结合其它技术开采天然气水合物实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [30] Hu Y, Chen Z, Jiang Q, et al. Probing the mechanism of salts destroying the cage structure of methane hydrate by molecular dynamics simulation[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 223: 211523.
- [31] 孙始财, 刘昌岭, 业渝光, 等. 氯盐溶液中甲烷水合物高压分解条件及影响因素[J]. 物理化学学报, 2011, 27(12): 2773-2778.
- [32] Wei N, Zheng H, Guo B, et al. Acceleration mechanism of methane hydrate dissociation in inorganic salt solutions: Experimental and molecular dynamics study[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 252: 213913.
- [33] Ma Y, Zhong X, Li X, et al. Numerical simulation of gas extraction from marine hydrate sediments using sodium chloride injection[J]. Fuel, 2023, 342: 127910.
- [34] Lee J. Experimental study on the dissociation behavior and productivity of gas hydrate by brine injection scheme in porous rock[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(1): 456-463.
- [35] 李淑霞, 李杰, 曹文. 注热水盐度对水合物开采影响的实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(2): 482-486.
- [36] Wang X H, Chen Y, Li X X, et al. An exergy-based energy efficiency analysis on gas production from gas hydrates reservoir by brine stimulation combined depressurization method[J]. Energy, 2021, 231: 120960.
- [37] 张婷婷, 李波, 韦文娜. 祁连山冻土区水合物多井系统降压联合热盐水增产数值模拟[J]. 当代化工研究, 2023(11): 42-44.
- [38] 曾浩鹏. 降压结合注盐溶液开采天然气水合物实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [39] 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.
- [40] Sakamoto Y, Kaneko F, Nakano Y, et al. Numerical study on enhanced gas recovery from methane hydrate reservoir during in-situ heating process by acid injection[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2019, 29(3): 347-358.
- [41] Su Z, Cao Y, Wu N, et al. Numerical analysis on gas production efficiency from hydrate deposits by thermal stimulation: Application to the Shenhu Area, South China Sea[J]. Energies, 2011, 4(2): 294-313.
- [42] 李庆超, 吴静娟, 李强. 注热酸液策略开发南海水合物的可行性评价[J]. 非常规油气, 2025, 12(3): 55-64.
- [43] 李令东, 程远方, 梅伟, 等. 温度影响天然气水合物地层井壁稳定的有限元模拟[J]. 天然气工业, 2012, 32(8): 74-78.
- [44] Zheng X, Wu D, Zhou B, et al. Exothermic characteristics research of chemical self-heating solution in the gas hydrate exploitation process[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 1049360.
- [45] 边航, 张召彬, 李守定, 等. 南海天然气水合物开采机理与规模化开发挑战[J]. 工程地质学报, 2025, 33(5): 1736-1750.
- [46] 孙友宏, 沈奕锋, 张国彪, 等. 海底水合物储层双增改造浆液及其固结体性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 1-10.
- [47] Pan D, Yang L, Chen C, et al. Experimental investigation into the erosion performance of water jets on marine hydrate-bearing sediment[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(1): 228.

(编辑 王文)