

水射流技术在海洋水合物钻采过程中的应用研究进展

邓欣颖¹, 潘栋彬^{1,3*}, 李婕², 陈晨³, 余渝¹, 段浩然¹

(1. 战略金属矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室 江西理工大学, 江西 赣州 341000;

2. 金石钻探(唐山)股份有限公司, 河北 唐山 064002;

3. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室 吉林大学, 吉林 长春 130026)

摘要: 天然气水合物是一种储量巨大、清洁高效的新型能源, 我国海洋天然气水合物资源非常丰富, 安全高效开采水合物能够助力实现我国能源结构转型与“双碳”战略目标。水合物储藏具有非成岩、弱胶结与温压敏感性强的特点, 水射流技术应用于水合物钻采过程可有效解决常规方法引起的井壁坍塌与地层失稳等工程问题。本文总结了现有的水射流钻采水合物工艺与水射流钻具, 分析了水射流冲击作用下含水合物沉积物破碎过程影响因素与破碎机理, 最后对水射流技术在水合物钻采过程中的应用研究方向进行了展望, 以期为我国海洋天然气水合物钻采技术研究提供参考。

关键词: 海洋天然气水合物; 高效开发; 水射流破碎; 水射流钻具

中图分类号: P634; TE248; TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0016-08

A review of research on the application of water jet technology in marine hydrate drilling and mining processes

DENG Xinying¹, PAN Dongbin^{1,3*}, LI Jie², CHEN Chen³, YÜ Yu¹, DUAN Haoran¹

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Low-Carbon Processing and Utilization of Strategic Metal Mineral Resources, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China;

2. Jinshi Drilltech Co., Ltd., Tangshan Hebei 064002, China;

3. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Natural gas hydrates is a new type of energy, characterized by huge reserves, cleanliness and high efficiency. China is rich in hydrate resources, and the safe and efficient exploitation of hydrates can help realize the transformation of energy structure and the strategic goal of “double carbon”. Hydrate reservoirs are generally characterized by non-rock formation, weak cementation and strong temperature and pressure sensitivity. The application of water jet technology to hydrate drilling process can effectively solve the engineering problems of well borehole collapse and formation destabilization caused by conventional methods. This paper summarizes the existing water jet drilling hydrate technology and water jet drilling tools, and analyzes the influencing factors and breaking mechanism of

收稿日期: 2024-07-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.003

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目(编号: S202310407055); 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放课题“水合物井周地层钻井液侵入引起的渗流侵蚀机理研究”(编号: 2023360702029239); 战略金属矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室项目(编号: 2023SSY01041)

第一作者: 邓欣颖, 女, 汉族, 2004年生, 地质工程专业, 研究方向为岩土渗流侵蚀, 江西省赣州市红旗大道86号, 1547231255@qq.com。

通信作者: 潘栋彬, 男, 汉族, 1994年, 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: 邓欣颖, 潘栋彬, 李婕, 等. 水射流技术在海洋水合物钻采过程中的应用研究进展[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 16-23.

DENG Xinying, PAN Dongbin, LI Jie, et al. A review of research on the application of water jet technology in marine hydrate drilling and mining processes[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 16-23.

hydrate-containing sediment breaking process under the impact of water jet. Finally, the research direction for the application of water jet technology in the hydrate drilling process is prospected. This work can provide support for the research of natural gas hydrate development technology in China.

Key words: marine natural gas hydrate; efficient development; water jet breaking; drilling tools for water jet

0 引言

天然气水合物主要以甲烷水合物的形式存在,因其广泛的地理分布和巨大储量成为国际公认的具有巨大开发潜力的新型清洁能源。据估计,中国的海洋天然气水合物资源储量极为丰富,约为800亿t油当量,占中国石油与天然气总资源量的50%左右,其发现和开采有望接替传统能源^[1]。2020年12月,中国国务院发布的《新时代中国能源发展》白皮书明确指出,重点突破油气高效开发的关键技术,同时开展页岩气、天然气水合物等非常规资源的经济高效开发技术攻关,是当前能源战略的重要组成部分^[2]。安全高效开采水合物能够助力实现我国能源结构转型与“双碳”战略目标。自2002—2017年,加拿大、美国与日本等国家已多次进行天然气水合物的试采工作。中国在这一领域也取得了显著进展,分别于2017年和2020年在南海神狐海域成功实施了两次试采^[3]。尽管如此,目前天然气水合物试采技术仍处于技术验证阶段,尚未达到商业化生产目标。天然气水合物的钻采技术攻关仍面临诸多挑战。

海洋天然气水合物与常规油气资源在地质储层特性上存在显著差异^[4-5]。海洋天然气水合物本身就是储层骨架或胶结物的一部分。这些储层通常埋藏较浅,岩石力学强度相对较低,且存在于极端的低温高压环境中。此外,储层的沉积物主要由泥质粉砂组成。在钻探过程中,地层压力和地温梯度对储层的力学性质具有显著影响。传统的机械钻井技术在破岩过程中,由于钻具与岩石的摩擦会导致局部温度升高,加之钻井液中盐分的作用,极易导致储层中的天然气水合物分解。水合物的分解不仅会降低储层的承载能力,还会释放出大量的水和气体,导致井周地层的有效应力降低,减弱沉积物颗粒间的胶结作用,最终引起井眼失稳。在天然气水合物的开采方面,长期依赖常规的开采方法,如降压法、热激法和化学试剂注入法等必然会导致水合物大量分解,从而降低地层的稳定性^[6-11]。这种分解作用极易引发出砂、井壁失稳甚至垮塌等

钻井复杂事故,对安全高效开采构成挑战。

为解决上述水合物钻采工程难题,水射流技术被应用到水合物钻井过程与开采过程中。水合物储层弱胶结的特点决定了其被水射流破碎、冲蚀的可行性,并且水射流冲击水合物过程不会影响储层的温压条件进而导致原位天然气水合物大范围分解,因此该技术能够较好地保持井壁稳定性及地层稳定性。截止目前,众多学者提出了水射流钻水平井、水射流割缝增透与水射流开采等一系列的钻采工艺,并围绕水射流破碎水合物开展了多方面研究,包括水射流钻具设计、水射流破碎水合物实验与数值模拟研究等。鉴于此,笔者梳理了水射流技术在海洋水合物钻采过程中的应用研究进展,并展望了未来的水射流破碎水合物研究方向,以期为我国海洋天然气水合物钻采技术研究提供参考。

1 水射流钻采工艺及钻具

合理高效的水射流钻采工艺与相关钻具研发是进行水射流高效破碎含水合物沉积物及天然气水合物开采的基础。现今学者主要提出了3种水射流钻采工艺和以多种结构的喷嘴为主的配套钻具。

1.1 水射流钻采工艺

Chen等^[12]提出了一种以管式输送与气举循环为核心的海洋天然气水合物射流开采工艺(图1),该工艺充分考虑了中国海洋天然气水合物的地质特性,特别是其弱胶结性和易于破碎的特点,并据此定制了全新的开采策略。其工艺原理与施工步骤可以概括如下:开采过程中当钻机到达预定井底深度时,利用高压泵系统,通过三壁钻杆的外通道以及双壁钻杆内外管之间的环状间隙,将高压水流输送至钻孔底部。在钻孔底部,高压水流形成强烈的喷射流,与此同时,旋转的钻头匀速提升并切割岩层。此外,压缩氮气通过三壁钻杆的第二通道输送至孔底一定深度的气水混合室。在气水混合室内,压缩氮气与海洋水合物形成气举反循环系统。气水混合室中形成的气液固三相混合物随后通过双壁钻杆和三壁钻杆的中心通道进入到海平面的

气液分离器中进行三相分离。在此过程中,氮气被分离并重新回到空压机进行循环利用,而开采出的矿样则被收集并存储于矿体箱中。

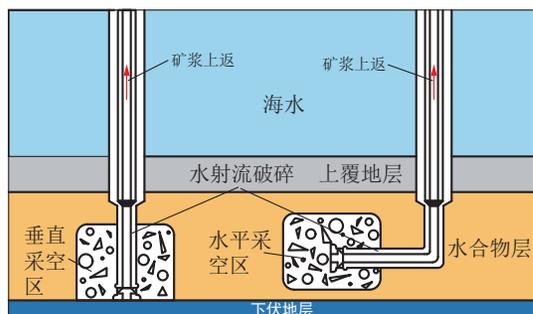


图1 以气举循环为矿浆输送方式水合物射流开采原理^[12]

Wang等^[13]提出了固态流化开采法(图2),用于开采储存于储层中的天然气水合物。该方法的核心思想是对含有天然气水合物的储层进行整体碎化处理,随后将处理后形成的水合物浆液运送至海平面的开采平台。水合物在运输过程中随着环境温度和压力的变化逐渐分解并释放出天然气,进而实现开采。固态流化法在运送水合物浆液的过程中,环境温度与压力的变化较为和缓,水合物稳定分解,避免了大量水合物同时分解可能引起的安全风险,确保了开采过程的安全性、可靠性和稳定性。此外,水合物分解后余留的沉积物可以直接进行就地回填,这不仅减少了后续处理的工作量,而且有效完成了环境恢复工作。值得注意的是,固态流化开采法已于2017年5月在中国南海神狐海域的荔湾三井成功应用,标志着该技术从理论走向实践的重要一步。

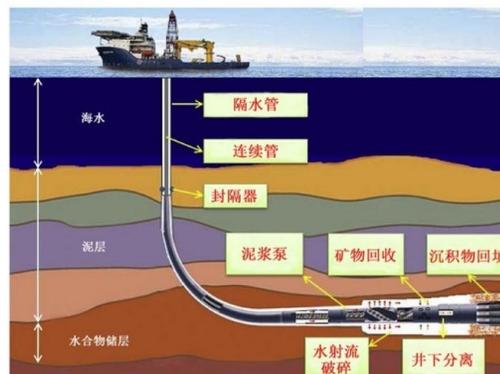
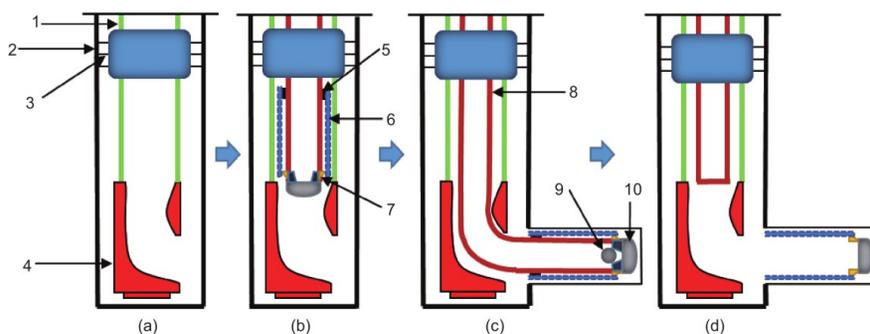


图2 水合物固态流化开采^[13]

李根生等^[14]在研究天然气水合物开采优化方案时,基于空化射流钻探原理,使用径向水平井结合双重管柱系统以及筒下防砂筛管实现了全新的完井开采。该开采技术通过连续油管上的衬管喷射钻头可以在水合物储层中沿不同方向钻出径向井眼。该技术施工方法的操作流程如图3所示:(1)利用传统钻孔技术完成主井筒的钻探,将末端带有锚定器和转向器的油管柱下入井内。(2)将连续油管系统下入井内,并采用磨料射流技术在套管上进行开窗。连续油管系统中的衬管喷射钻头在不同方向喷射形成分支井眼。(3)当钻孔达到预定深度后,向连续油管内部投入轻质钢球。通过憋压操作使钢球剪断滑套销钉,实现了连续油管与衬管的分离。(4)连续油管与衬管的分离完成后,进行油管锚的解封,并进行深度校正与倾斜度测量,确保施工精度。(5)重复步骤(2)至(3),直至完成所有预定的分支井眼施工。施工的最终阶段,将防砂筛管悬挂在主井筒内。



(a)下入转向器,锚钉油管;(b)下入带有衬管的连续油管;(c)喷射侧钻径向井眼,投球憋压剪断销钉;(d)分离连续油管和衬管;1—油管;2—套管;3—油管锚;4—转向器;5—橡皮圈;6—割缝衬管;7—分离器;8—连续油管;9—钢球;10—射流钻头

图3 空化射流喷射径向水平井^[14]

1.2 水射流钻具

黄蓉^[15]通过分析单喷嘴射流流场速度,优化其结构尺寸。确定了带扩散角的喷嘴结构,得到了5种不同直径的单喷嘴结构。再通过调整喷嘴个数和分布,得到组合喷嘴结构,发明了一套全新的射流破碎工具。陈晨等^[16]为确保天然气水合物储层开采作业后的长期稳定性,设计了一种创新的沉积物回填装置(图4)。该装置集成了5大核心系统:原位监测系统、原料收集系统、配料系统、泵送注入系统以及回填效果检测系统。这一集成系统的设计旨在实现对回填过程的实时监控、方案制定、材料配比、施工执行以及效果评估的全面优化。

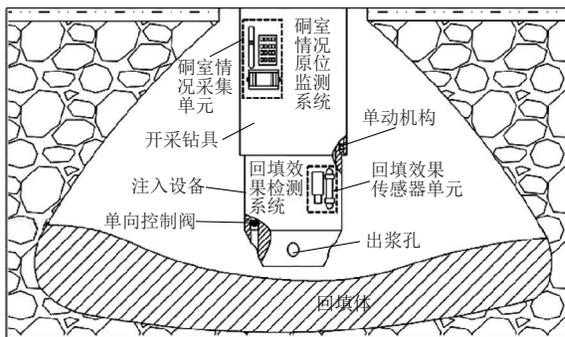
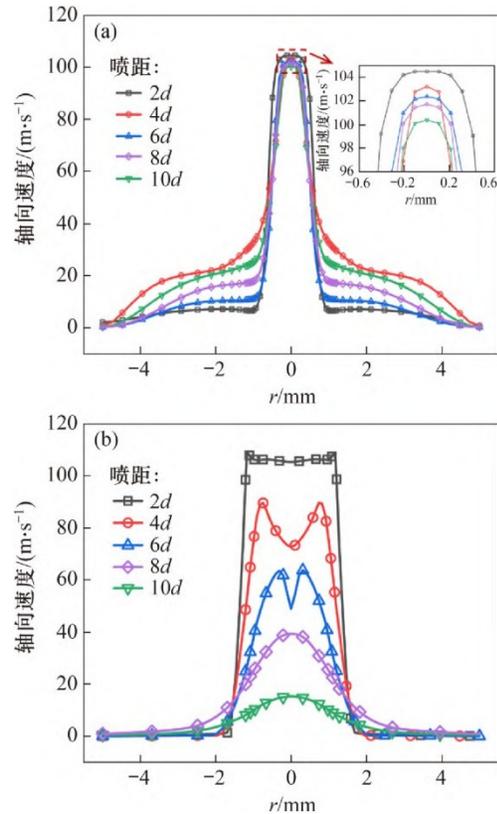


图4 用于海底天然气水合物开采生成嗣室回填装置及回填方法^[16]

张逸群等^[17]开发了一种新型的旋转空化射流喷嘴(图5)。利用流体力学软件构建了收缩-扩张型空化射流及旋转空化射流的三维数值模型,分析了射流在速度、压力和气象分布方面的规律。研究发现,旋转空化射流在扩散性方面表现出显著的优势。具体来说,旋转空化射流的轴心线速度在传播过程中的衰减速度较快,而在径向和切向上的速度较大,卷吸掺混能力更强。此外,旋转空化射流的破碎面积较大。进一步的分析显示,旋转空化射流在负压分布范围及其极值方面较收缩-扩张型空化射流有显著增加。旋转空化射流在剪切层内形成了大量包含空化泡的旋涡和空泡群产生的联动效应显著提升了射流的空蚀能力。

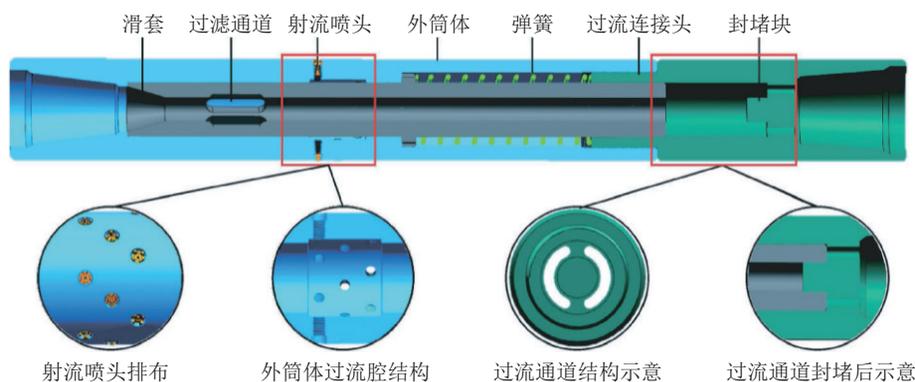
王国荣等^[18]在喷嘴设计领域进行了深入的优化研究,特别关注了喷嘴孔径的规整度及破碎颗粒返排效果的影响。通过对结构设计、尺寸参数和孔眼排列等因素的综合考量,成功研制出了一种多功能的水射流破碎开采喷嘴。这种喷嘴的设计旨在



(a)收缩-扩张型空化喷嘴;(b)旋转空化喷嘴
图5 喷嘴距 h 为 $10d$ 时射流切向速度分布^[17]

提高破碎效率和返排效果,从而优化整个开采过程。张计春^[19]基于6种常用的岩石射流破碎喷嘴结构,开展了喷嘴射流外流场速度分布特性研究分析,对比单喷嘴射流时外流场的速度云图分布、不同结构下喷嘴射流出口速度、射流核心段长度及沿喷嘴轴心线的速度衰减等优选出最佳射流采掘的锥直形喷嘴结构。唐洋等^[20]设计出了一种特殊的压控滑套(图6),其工作时不受井深、水深影响,并对其进行了测试,结果表明:(1)30°为最佳压控滑套入口处锥面角度;(2)通过的钻井液量与滑套轴向力、其内部产生的压降成正比;(3)滑套移动并激活了射流喷头主要通过钻井液的作用;(4)滑套运动不受压力滑套内力影响。

在此基础上,唐洋等^[21]又创建了一个滑套冲蚀磨损数值分析数学模型,专门预测滑套在应用中冲蚀磨损的高发区域,并分析了钻井液颗粒大小、流速和封堵块位置对磨损效果的具体影响。张辛等^[22-23]对比分析了在天然气水合物储层条件下,角形喷嘴、亥姆霍兹喷嘴和锥形喷嘴3种喷嘴的空化

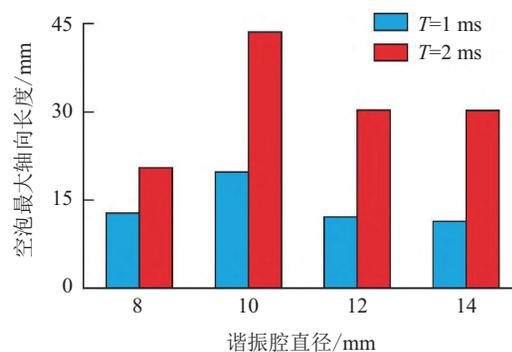
图6 压控滑套结构示意图^[20]

效果,并研究了围压和谐振腔直径对风琴管喷嘴空化性能的影响。研究表明,亥姆霍兹喷嘴在水合物开采中拥有最优的空化性能,且随着进口压力的增加,空化效果得到了显著提升。然而,过高的进口压力可能会产生阻滞效应,从而降低亥姆霍兹喷嘴的空化效率。此外,对风琴管喷嘴的空化性能进行研究时发现,在围压条件下空化泡的生长和扩散更快,使得射流的冲击力更强,且风琴管喷嘴的谐振腔直径为10 mm时对套管产生的冲击坑深度最大(见图7)。

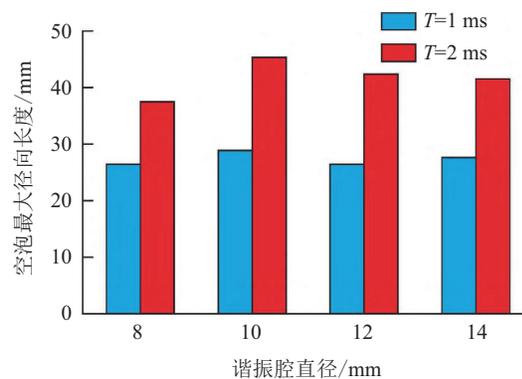
2 水射流破碎水合物实验

当前室内模拟水射流破碎水合物的实验研究主要集中在2个关键领域:一是分析影响水合物破碎过程的各种因素,二是深入探究水合物破碎的内在机制。Pan等^[24]制备了四氢呋喃水合物,系统研究了水合物饱和度、射流速度和喷射距离对水射流破碎过程的影响,发现侵蚀孔底部沉积物颗粒和水合物颗粒的堆积严重抑制了水射流对含水沉积物的垂直侵蚀。在特定的喷射流速下,喷射距离有一个最佳值,介于4~28 mm之间。此外,与喷射距离和水合物饱和度相比,体积侵蚀效率和深度侵蚀效率对喷射流速的变化更为敏感。潘栋彬^[25]研制了能够实时观测破碎过程的高压低温水射流破碎试验系统(图8),该系统能够实时监控破碎过程。研究发现,在高压水流的冲击下,含水合物的沉积物在表面产生向周围区域传播的应力波,造成其自身的体积破碎;而在低压水射流作用下则以冲刷破坏为主。

张逸群等^[26-27]对比研究了旋转空化射流与收缩-扩张型空化射流破碎含水合物两者的过程,发现旋转空化射流冲刷水合物沉积物形成的孔深及



(a)空泡最大轴向长度



(b)空泡最大径向长度

图7 外流场空泡长度^[23]

孔径比收缩-扩张型空化射流的大1.5倍和1.0倍。其产生的高温、高压及微射流特性会使破碎时获得更佳的冲蚀效果。王国荣等^[28]以冻土样替代含水合物沉积物,通过水射流破碎实验研究得出的实验数据拟合曲线清晰地表明,在排量一定时,射流喷嘴破碎冻土孔眼直径与上提下放趟数呈指数递增关系。且上提下放相同时,冻土效率会随着排量增大而提高;随着喷嘴在冻土作业中的使用次数增加,冻土的破碎效率会先提升至一个峰值,随后逐

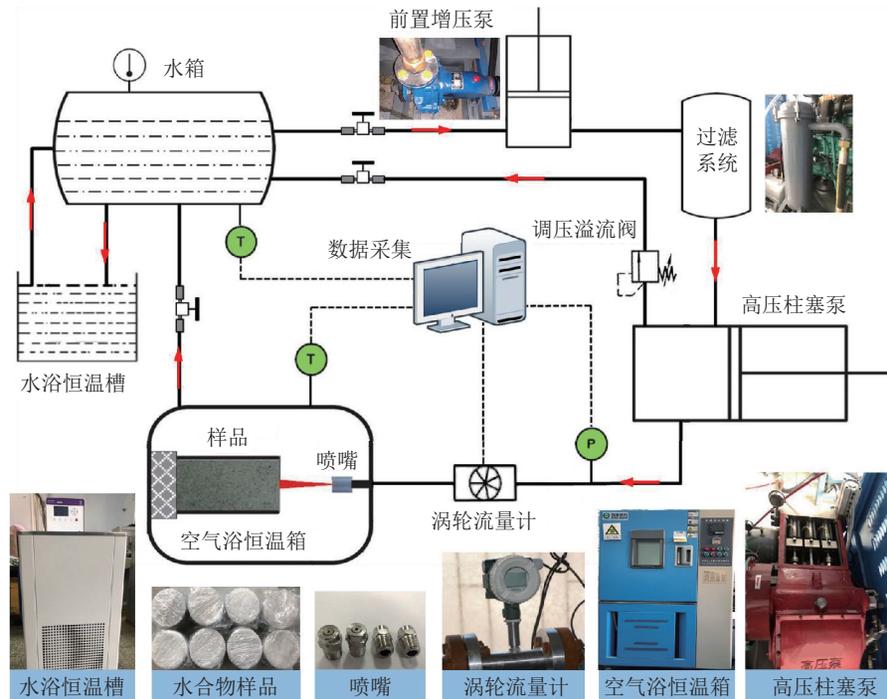


图8 高压低温水射流破碎试验系统示意^[25]

渐下降。其射流破碎冻土孔眼直径在排量一定时,和上提下放趟数呈正相关关系。张计春等^[29]通过水射流破碎含水合物沉积物实验发现,喷嘴直径一定,射流靶距和破碎深度、破碎体积在射流时间、压力一定时,有着反比例的关系;而当射流靶距和射流时间一定时,破碎深度及其体积与射流压力呈二次方关系。王雷振^[30]以冻土作为天然气水合物沉积物替代试样,研究了水射流破碎含水合物沉积物过程,结果表明,63 s是一个临界破碎时间点。在射流过程中,天然气水合物沉积物在时间超过63 s以后,破碎深度几乎不再增加;对临界破碎深度的影响程度由深至浅依次是:饱和度、射流压力和喷嘴直径。余兴勇等^[31]在水射流破碎含水合物沉积物实验研究中发现,锥直形喷嘴射流核心段长度与喷嘴直径呈正相关关系,而与射流压力、收缩段长度无关;射流基本段速度衰减与收缩段无关,且该衰减与喷嘴直径和射流压力有呈负相关的趋势。廖华林等^[32]通过实验研究发现,在水力切割后,模拟水合物储层呈现出多种复杂破坏形式。且切割套管缝宽受喷嘴直径、喷射压力和加砂体积分数三者共同的影响,而喷嘴移动距离则决定了缝长。赵金洲等^[33]设计了一套开采理论物理模拟实验,专注于天然气水合物非成岩样品的开采、处理和运送。他

们研究了海洋环境中的固态流化开采技术,揭示了开采过程中关键参数的变化趋势,并成功验证了开采理论模型的准确性。

3 水射流破碎水合物数值模拟

凭借数值模拟能实现流(水射流)固(水合物)耦合作用过程的动态监测,同时可以获取大量的应力场分布与射流流场等信息,已有较多的学者开展了大量基于LS-DYNA软件平台的水射流破碎水合物数值模拟研究工作。而首次使用任意拉格朗日-欧拉方法(ALE)建立了数值模型是Chen等^[34],其使用该模型对侵蚀效率与射流速度、喷嘴直径和距离的关系进行了研究,得出结论:射流速度和喷嘴直径与水射流侵蚀效率成正比,与距离成反比。而射流速度是最重要的因素,并存在一个阈值速度(侵蚀含水合物沉积物所需的最小喷射速度)。同时,综合分析实验结果得知:射流速度为150 m/s、间距为0.5 cm、喷嘴直径为2.5 mm时,侵蚀体积最大(见图9~11)。

赵克贤^[35]利用ALE技术构建了水射流破碎含水合物沉积物的数值模型,发现无论是天然气水合物沉积物还是纯水合物,都有一个临界射流速度(速度范围是25~50 m/s或者50~75 m/s)和最佳

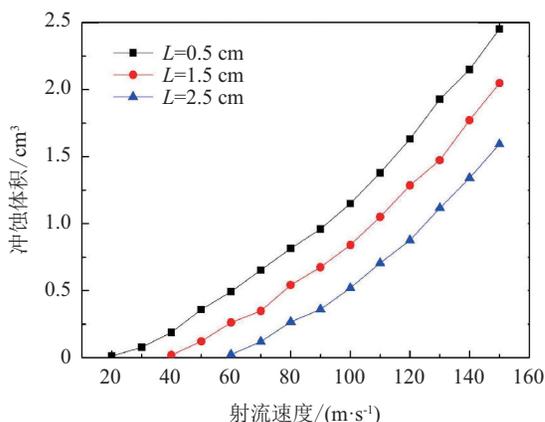


图9 射流速度对冲蚀体积的影响^[34]

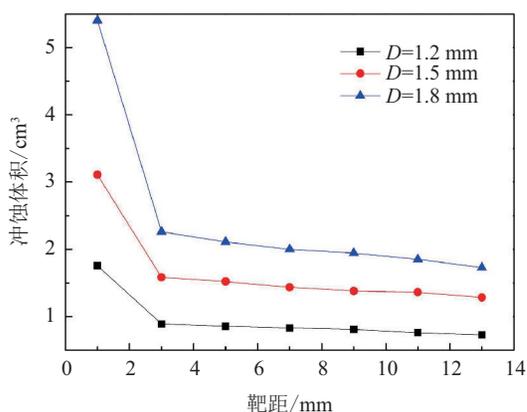


图10 靶距对冲蚀体积的影响^[34]

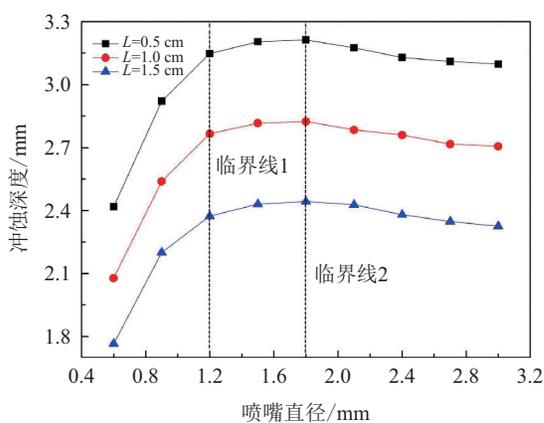


图11 喷嘴直径对冲蚀深度的影响^[34]

目标距离(8 mm,喷嘴直径的11倍)。Wang等^[13]基于水射流破碎含水合物沉积物按ALE方法数值模拟,发现水射流破碎水合物矿体的破碎方式接近岩石破碎(主要是拉伸、一剪、切割、破碎等方法),其主要作用是使水射流破碎的矿体破碎方式辅以冲刷、破碎,使射流破碎颗粒,整体分布岩石破碎较

少。冯清等^[36]使用LS-DYNA软件,建立了用于淹没喷流破碎天然气水合物沉积物的拉格朗日-欧拉流固耦合模型。调查发现:喷嘴直径明显影响喷嘴破碎的坑径,喷嘴破碎的效率可以通过提高喷流速度得到有效的提高。喷嘴直径直接影响破碎坑的直径大小。黄凯源等^[37]开展了通过对模拟水射流作用下水合物颗粒运移规律数值的研究,结果表明:主流与涡流间的距离越接近,速度越小。管壁平行的程度和主流的流向也会影响流速的大小,当主流方向与管壁越一致,其速度越大。黄浩宸等^[38]基于分子动力学理论研究了天然气水合物空蚀作用的规律,其结果显示,水合物的分解速度在蚀微环境中可以有效地加快,在模拟条件下可以使水合物比起常规降压开采的速率提升达22.5倍。高文爽等^[39]通过数值模拟的研究发现了水射流、温度和压力三者都对开采天然气水合物起到重要的作用,而其中起到主要作用的是温度。靳成才等^[40]通过水射流破碎含水合物沉积物数值模拟研究,发现在喷嘴入射角度增大过程中冲蚀体积会先增大后缩小,最后趋于一个稳定值,在入射角为 10° 的情况下,冲蚀体积达最大值。

4 结论与展望

(1)海洋天然气水合物储层普遍具有弱胶结、埋藏浅与非成岩等特点,这决定了水射流高效破碎含水合物沉积物的理论可行性,在水合物钻采过程中水射流技术具有很大的应用潜力。

(2)现有的水射流钻采工艺种类较多,实施原理较为简易,但工程可行性有待进一步验证,并且相应的水射流钻具研发设计尚处于初步阶段,天然气水合物水射流钻采工艺与水射流钻具的改进与完善将会是一个长期持续的研究方向。

(3)水射流破碎含水合物沉积物实验方面已进行了较为广泛的研究,基本阐释了水合物破碎过程的影响因素(主要包括水射流速度、喷嘴结构与环境条件)与水合物破碎模式。然而,目前研究尚未考虑水合物原位温压条件及水合物相变对于沉积物力学性质的影响,需对其破坏机理进一步探索。

(4)水射流破碎含水合物沉积物数值模拟研究也取得了明显进展,水射流破碎过程中流固耦合作用机制与物理场演变过程得到了较为充分的阐释,但目前研究主要是基于有限元理论且水合物力学

模型都以岩土体为替代。因此,未来应重点攻关能够真正描述水合物相变与力学性质变化的力学模型,引入离散元理论,从微观层面全面揭示水射流破碎机理。

参考文献:

- [1] XU C-G, CAI J, YU Y-S, et al. Effect of pressure on methane recovery from natural gas hydrates by methane-carbon dioxide replacement[J]. *Applied Energy*, 2018, 217: 527-36.
- [2] 《新时代的中国能源发展》白皮书(全文)[J]. *石油和化工节能*, 2021(1): 1-29
- [3] 天工. 我国海域天然气水合物试采成功[J]. *天然气工业*, 2017, 37(5): 37.
- [4] 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.
- [5] Han Junpeng, Ma Xiaolong, Pan Dongbin. Effects of a multi-stage fractured horizontal well on stimulation characteristics of a clayey silt hydrate reservoir [J]. *ACS omega*, 2022, 7(40): 35705-35719.
- [6] Pan Dongbin, Zhong Xiuping, Zhu Yin, et al. CH₄ recovery and CO₂ sequestration from hydrate-bearing clayey sediments via CO₂/N₂ injection[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 83: 103503.
- [7] Zhang Guobiao, Ma Xiaolong, Jiang Dandan, et al. Characteristics of hydrate formation, decomposition, and phase equilibrium in the transition area formed by the high-pressure jet breaking and sand filling method[J]. *Energy Reports*, 2022, 8(11): 312-321.
- [8] Pan Dongbin, Zhong Xiuping, Li Bing, et al. Experimental investigation into methane production from hydrate-bearing clayey sediment by CO₂/N₂ replacement[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2020, 38(6): 2601-2617.
- [9] Pan Dongbin, Ma Xiaolong, Chen Chen, 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: 204894.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Chen Chen, Pan Dongbin, Yang Lin, et al. Investigation into the water jet erosion efficiency of hydrate bearing sediments based on the arbitrary Lagrangian Eulerian method[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(1): 182.
- [13] Wang L, Wang G, Mao L, et al. Experimental research on the breaking effect of natural gas hydrate sediment for water jet and engineering applications[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019: 106553.
- [14] 李根生, 田守崧, 张逸群. 空化射流钻径向井开采天然气水合物关键技术研究进展[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(3): 349-365.
- [15] 黄蓉. 海底天然气水合物射流破碎实验及工程应用研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [16] 陈晨, 李曦桐, 孙友宏, 等. 用于海底天然气水合物开采生成硇室回填装置及回填方法: CN106224000B[P]. 2016-12-14.
- [17] 张逸群, 武晓亚, 李根生, 等. 天然气水合物旋转空化射流冲蚀性能研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(3): 909-923.
- [18] 王国荣, 钟林, 周守为, 等. 天然气水合物射流破碎工具及其配套工艺技术[J]. *天然气工业*, 2017, 37(12): 68-74.
- [19] 张计春. 海洋水合物固态流化射流采掘喷嘴设计研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2021.
- [20] 唐洋, 姚佳鑫, 王国荣, 等. 深海浅层非成岩天然气水合物喷射破碎压控滑套的研制[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 186-194.
- [21] 唐洋, 何胤, 姚佳鑫, 等. 天然气水合物喷射破碎压控滑套冲蚀磨损特性研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(2): 254-260, 270.
- [22] 张辛. 海域天然气水合物空化喷嘴内流场数值模拟[J]. *化工机械*, 2024, 51(3): 448-453, 476.
- [23] 张辛, 葛家旺, 高嘉宝, 等. 天然气水合物风琴管喷嘴空化冲击特性研究[J]. *石油机械*, 2023, 51(12): 78-84.
- [24] Pan Dongbin, Yang Lin, Chen Chen, 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.
- [25] 潘栋彬. 海洋天然气水合物的联合开采方法研究: 射流破碎与CO₂/N₂置换[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2022.
- [26] 张逸群, 武晓亚, 李根生, 等. 天然气水合物旋转空化射流冲蚀性能研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(3): 909-923.
- [27] 张逸群, 胡萧, 武晓亚, 等. 旋转射流冲蚀天然气水合物试验及数值模拟研究[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(3): 24-33.
- [28] 王国荣, 钟林, 周守为, 等. 天然气水合物射流破碎工具及其配套工艺技术[J]. *天然气工业*, 2017, 37(12): 68-74.
- [29] 张计春, 钟林, 王国荣, 等. 非成岩水合物单喷嘴射流破碎规律实验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(2): 607-613.
- [30] 王雷振. 海洋非成岩天然气水合物射流破碎速率理论与实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2020.
- [31] 余兴勇, 钟林, 王国荣, 等. 固态流化单喷嘴破碎水合物深度预测新模型及验证[J]. *天然气工业*, 2022, 42(3): 150-158.
- [32] 廖华林, 王鄂川, 董林, 等. 水力切割模拟水合物储层成孔特性试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(3): 924-932.
- [33] 赵金洲, 李海涛, 张烈辉, 等. 海洋天然气水合物固态流化开采大型物理模拟实验[J]. *天然气工业*, 2018, 38(10): 76-83.
- [34] Chen C, Pan D B, Yang L, et al. Investigation into the Water Jet Erosion Efficiency of Hydrate-Bearing Sediments Based on the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(1): 182.
- [35] 赵克贤. 连续射流冲蚀天然气水合物矿体机理及参数优化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- [36] 冯清, 王国荣, 钟林, 等. 非成岩水合物组合喷嘴射流破碎规律研究[J]. *中国造船*, 2023, 64(4): 106-119.
- [37] 黄凯源, 叶琼泽, 刘吉成, 等. 射流作用下水合物颗粒运动规律研究[J]. *化学工程与装备*, 2023(1): 17-18, 21.
- [38] 黄浩宸, 张逸群, 武晓亚, 等. 基于分子动力学模拟的天然气水合物空蚀作用规律[J]. *天然气工业*, 2023, 43(5): 129-140.
- [39] 高文爽, 陈晨, 房治强. 高压射流开采天然气水合物的数值模拟研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2010(4): 49-52, 95.
- [40] 靳成才, 陈晨, 潘栋彬, 等. 淹没水射流关键参数对天然气水合物沉积物冲蚀体积的影响规律研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(5): 1-7.

(编辑 荐华)