

空化射流钻径向井开采天然气水合物关键技术研究进展

李根生, 田守增*, 张逸群

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, tscsydx@163.com

收稿日期: 2020-07-23

自然科学基金重大科研仪器研制项目“水力喷射径向水平井综合实验系统”(51827804)、自然科学基金青年基金“空化射流破碎天然气水合物矿体机理研究(51804320)”和自然科学基金重大项目“天然气水合物储层力学特征及多场耦合工程响应机制”(51991362)联合资助

摘要 天然气水合物是一种资源量丰富的高效清洁能源, 该资源的开发利用对满足我国日益增长的能源消费需求、保障国家能源安全以及推进绿色发展具有重要的战略意义。本文在调研国内外水合物开采技术、研究现状的基础上, 提出了利用空化射流钻径向水平井+筛管完井一体化方法开采深海浅层天然气水合物的新思路。介绍了包括总体工艺流程、射流破岩钻孔能力、射流钻头送进方式与延伸极限、井眼轨迹测量与控制等关键技术的研究基础和进展, 并使用开源软件HydrateResSim进行了径向井开采天然气水合物数值模拟。本文还讨论了该技术未来的主要研究方向, 包括高压水射流作用下水合物储层成孔特性、水力喷射钻井井筒多相流动规律、水合物储层微小井眼井筒稳定性评价与控制、天然气水合物径向水平井增产机理与效果评价、泥质粉砂水合物储层径向水平井开采工程参数优化等。研究发现空化射流钻径向水平井方法具有纯水力高效钻进、超短半径转向、精准中靶钻遇、衬管粗护井眼、井筒精细防砂的特点, 所形成的多层多分支井眼可与降压法或热激发法相结合, 扩大储层接触阵面、提高热量利用效率。研究成果可望为早日实现天然气水合物的商业化开采奠定基础。

关键词 径向水平井; 天然气水合物; 空化射流; 水力喷射; 开采技术

Research progress on key technologies of natural gas hydrate exploitation by cavitation jet drilling of radial wells

LI Gensheng, TIAN Shouceng, ZHANG Yiqun

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Exploration, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Natural gas hydrate is a potential alternative rich source of energy, which is efficient and environmentally friendly. The efficient development of natural gas hydrate resources is of great strategic significance to our country, especially in meeting our growing energy consumption needs, ensuring national energy security and promoting green development. On the basis of the review of natural gas hydrate mining technology and research status at home and abroad, this paper puts forward a new idea of using a cavitation jet drilling radial horizontal well and screen completion integrated method to develop deep sea natural gas hydrate buried in shallow layers. The paper mainly introduces the research foundation and research progress of key technologies including the overall process flow, jet drilling capacity, jet bit feeding method and extension limit, wellbore trajectory measurement and control. Then, the open source simulator HydrateResSim is used to perform depressurization induced gas production simulation by applying vertical and radial wells. This paper also discusses the main research directions of the technology in the future, which includes the pore-forming characteristics of hydrate reservoirs under the action of high-pressure water jets, the law

引用格式: 李根生, 田守增, 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. 石油科学通报, 2020, 03: 349-365

LI Gensheng, TIAN Shouceng, ZHANG Yiqun. Research progress on key technologies of natural gas hydrate exploitation by cavitation jet drilling of radial wells. Petroleum Science Bulletin, 2020, 03: 349-365. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.030

of multiphase flow in the wellbore of hydraulic jet drilling, the evaluation and control of the wellbore stability of micro-holes in hydrate reservoirs, gas hydrate radial horizontal well stimulation mechanisms and effect evaluation, parameter optimization of radial horizontal well exploitation in argillaceous silt hydrate reservoirs, etc. The study found that the cavitation jet drilling radial horizontal well method has the characteristics of pure hydraulic high-efficiency drilling, ultra-short radius steering, precise target drilling, fine sand control of the main wellbore, and flexible liner coarse protection of the radial well. The formed multi-layer and multi-lateral wellbores can be combined with a depressurization method or thermal excitation method to greatly expand the contact front of the reservoir and improve the efficiency of heat utilization. The research results are expected to lay the foundation for the early realization of the commercial exploitation of natural gas hydrates.

Keywords radial horizontal well; natural gas hydrate; cavitation jet; hydraulic jet; extraction technology

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.030

0 引言

天然气水合物是21世纪全球能源发展的战略制高点,而海底浅层蕴含着世界上最多的天然气水合物资源,该资源的开发利用对满足我国日益增长的能源消费需求、保障国家能源安全以及推进绿色发展具有重要的战略意义。2017年11月16日,国土资源部宣布天然气水合物成为我国第173个矿种。

天然气水合物是由天然气和水在高压低温的条件下形成的类冰状的结晶化合物。深海天然气水合物资源丰富、能量密度高,是一种极具开发前景的清洁能源^[1-3]。据估计,全球天然气水合物中的碳储量为18 000 Gt,约含甲烷当量3千万亿 m^3 ,相当于目前全球已探明常规化石燃料总碳量的2倍以上^[4]。2007年5月,国土资源部中国地质调查局在我国南海北部神狐海域成功钻取天然气水合物沉积物样品,证实了我国南海北部蕴藏有丰富的天然气水合物资源^[5]。2017年5月在该地区开展了天然气水合物试开采,采气点位于水深1266 m海底以下200 m的海床中,自5月10日正式出气至18日,累计产出超12万 m^3 、甲烷含量高达99.5%的天然气,由此宣告我国进行的首次天然气水合物试采取得了历史性突破,此后持续采气至7月18日关井,开始数据监测。2020年在水深1225 m的南海神狐海域采用水平井技术开展第二轮试采,创造了产气总量86.14万 m^3 、日均产气量2.87万 m^3 两项世界纪录。

天然气水合物不同于常规的石油、天然气等资源,它以胶结或者骨架支撑的形式存在于储层中^[6],地层压力与地温梯度对储层力学性质有很大的影响。水合物藏上部欠压实,地层中的水合物在介质中起胶结作用,若开采过程中水合物大量分解,地层骨架强度与地层稳定性降低,将导致出砂^[7]、井壁失稳垮塌等钻井复杂事故。另一方面,与钻进常规石油天然气地层

相比,水合物储层埋藏浅、岩石硬度小,单轴抗压强度低,同时伴随低温高压环境,所遇地层以粉砂泥质非成岩储层或泥岩砂岩等软质岩石为主。常规机械钻井破岩时,由于钻具摩擦引起局部温度变化以及钻井液盐分的影响,可能导致储层中水合物分解,使储层的承载力降低,分解产生孔隙气、孔隙水,这些现象会使井周围岩石的有效应力降低,同时含水量的增加会使颗粒间胶结作用减弱,从而导致井眼失稳。

目前一般采用降压法、注热法、注化学试剂法与 CO_2 置换法等开采方法对天然气水合物进行开采^[8]。但根据现有的开采技术、装备与试采的实际情况,单一或综合地采用这些方法均不能实现天然气水合物的商业化开采。一方面,水合物的开采效率较低,不能收回成本;另一方面,开采过程中的出砂、井底滑坡等可能出现的地质灾害尚未能完全解决,距天然气水合物的商业化开采还有着较大的距离。因此,针对我国此类非成岩天然气水合物资源,采取安全有效的方法进行开采有极大的必要性。

本文在调研国内外水合物开采技术、研究现状的基础上,分析现阶段天然气水合物试采的关键问题,结合实验室研究基础提出了利用空化射流钻径向水平井+筛管完井一体化方法开采天然气水合物(特别是我国南海的粉砂泥质非成岩储层)的新思路。该方法的关键是在井底破碎天然气水合物矿体,通过水力空化作用进行破岩,并形成径向井眼。空化射流技术可以显著提高机械钻速。空化射流产生的空泡在溃灭时伴随的局部高温、高压和高速微射流可以降低岩石的胶结强度,提高水射流破岩效率。针对水合物地层出砂、井壁失稳垮塌以及水平井可能引起滑坡、直径产量低的问题,通过空化射流钻径向水平井+筛管完井一体化方法,可在水合物储层的某一层位或多个层位钻出多个水平分支井眼、扩大水合物分解阵面,有效防止出砂,大幅提高单井产量、降低综合作业成本。此外

空化射流具有明显的周期振荡特性,后期开采配合脉冲发生器,利用脉冲空化射流反复冲击井底,既有利于提高采收率,又有利于岩屑运移,适合水合物地层的钻探开采。

1 总体工艺流程

为实现水合物的经济高效开发,笔者首次提出利用空化射流钻径向水平井,配合连续油管带衬管双重管柱、主井筒下筛管防砂的全新完井方式开采水合物的思路。该方法首先将带有导向孔的造斜器连接在油管底部下入井内,通过电磁伽马和陀螺仪调整导向孔的深度和方位,然后利用造斜器的导向作用在既定深度和方位对套管进行开窗作业,通过连续油管带衬管喷射钻进在水合物储集层中的不同方向上钻出径向井眼,最后主井筒悬挂防砂筛管,实现一趟管柱同时完成连续油管喷射钻井和衬管完井。该方法的施工过程如图1所示,主要包括:(1)利用传统钻头钻出主井筒后,下入接有油管锚定器和转向器的油管柱,进行方位设定和管柱锚定。(2)下入附带衬管的连续油管进行磨料射流开窗并喷射侧钻分支井眼,管柱组合自下而上为自进式射流钻头、井下工具和仪器、连续油管、割缝衬管。割缝衬管和连续油管之间通过一个液压型的分离装置相连接。(3)钻达目的井深时,在连续油管内部投入轻质钢球,钢球坐落在分离装置内时进行憋压,剪断装置上的滑套销钉,实现连续油管与衬管的分离,把衬管留在分支井眼内起到防砂和支撑井壁的作用,同时将连续油管取出。(4)解封油管锚,校深、测斜,改变转向器的方位和井深,进行下一个分支井眼的侧钻。(5)重复(2)~(3)的步骤,最后在主井筒悬挂防砂筛管。所形成的径向水平井开采天然气水合物藏示意图如图2所示。

剪断装置上的滑套销钉,实现连续油管与衬管的分离,把衬管留在分支井眼内起到防砂和支撑井壁的作用,同时将连续油管取出。(4)解封油管锚,校深、测斜,改变转向器的方位和井深,进行下一个分支井眼的侧钻。(5)重复(2)~(3)的步骤,最后在主井筒悬挂防砂筛管。所形成的径向水平井开采天然气水合物藏示意图如图2所示。

2 水力破岩能力

高压水射流技术在传统能源开采方面已得到广泛应用,其具有无污染、能量利用率高、低热、反作用小等特点,且能够大幅度提高采矿速率、降低成本。我国南海水合物弱胶结、非成岩、渗透性低的赋存特点完全满足高压水射流破碎的条件,2017年5月,固态流化法成功应用于我国南海神狐海域天然气水合物的试采工程中,水射流切割、破碎技术首次被现场应用于水合物开采。空化射流具有强大的冲蚀能力,能够破碎极硬的岩石。将高压低温环境和空化射流的空蚀作用结合起来,形成天然气水合物储层空化射流辅助破岩技术,为提高钻速、降低采掘能耗、节约钻井成本提供了一种可行的方法。

当液体中某处的静压降低到饱和蒸汽压以下^[9-10]时,液体中原来溶解的气体大量析出并迅速膨胀,这一现象称为空化^[11-12]。空化对物体产生破坏作用,并

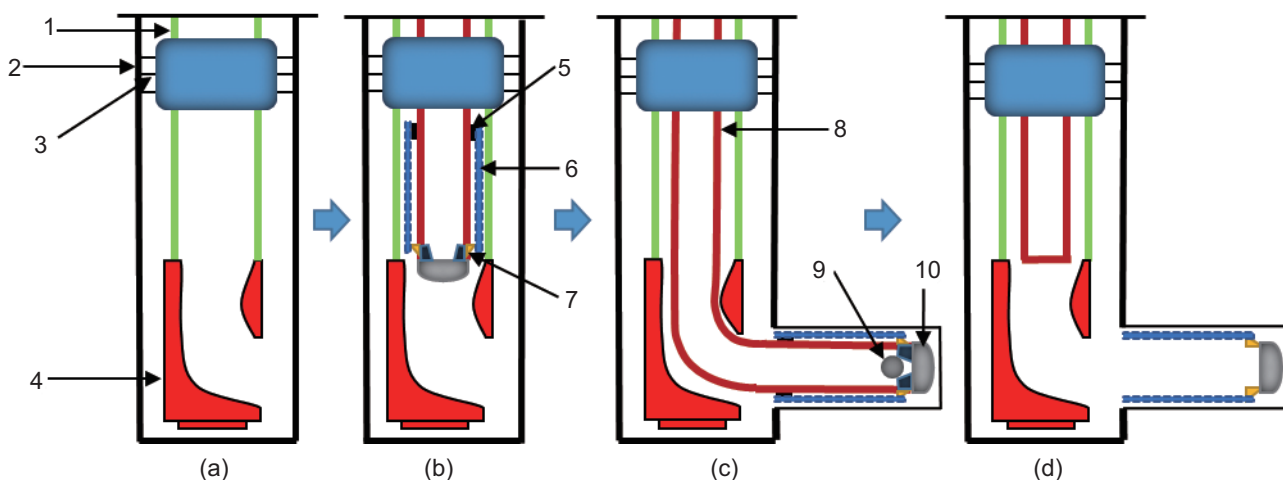


图1 空化射流喷射径向水平井+筛管完井一体化设计:1-油管 2-套管 3-油管锚 4-转向器 5-橡皮圈 6-割缝衬管 7-分离器 8-连续油管 9-钢球 10-射流钻头 (a)下入转向器,锚钉油管;(b)下入带有衬管的连续油管;(c)喷射侧钻径向井眼,投球憋压剪断销钉;(d)分离连续油管和衬管。

Fig. 1 Integrated design of cavitation jet radial horizontal well and screen completion: 1- Tubing 2- Casing 3- Tubing anchor 4- Steering gear 5- Rubber ring 6- Slotted liner 7- Separator 8- Coiled tubing 9- Small steel ball 10- Jet drill (a) Into the steering gear, anchor tubing; (b) into the coiled tubing with liner; (c) jet side drilling radial wellbore, throwing ball to hold back the shear pin; (d) Separate the coiled tubing and the liner.

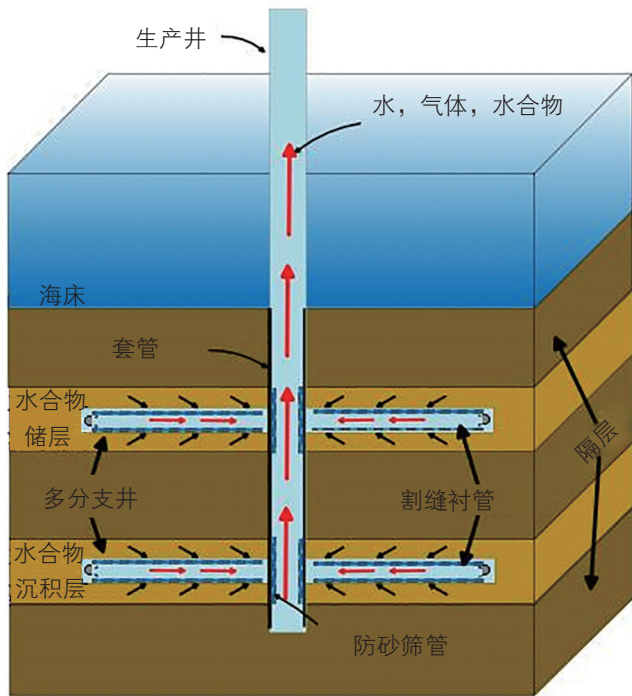


图2 径向水平井+筛管完井一体化开采天然气水合物藏示意图

Fig. 2 Schematic diagram of integrated exploitation of gas hydrate reservoirs by radial horizontal well and screen completion

产生强烈的振动、噪声和热力效应。空化射流即在水射流中引入空化和空蚀，利用其强大的破坏作用和振动噪声冲击波来提高射流冲蚀效率，效果显著^[13-16]。当含有空泡的射流冲击水合物沉积物时，空泡溃灭并在水合物表面产生极高的冲击压力和应力集中，破碎胶结物。在相同泵压和流速条件下，空化射流的这种局部压力放大作用使其冲蚀破岩效果大大优于非空化射流^[17-21]。

2.1 空化射流空泡动力学分析

空化射流流场中空泡溃灭的微观过程和空泡溃灭强度对于了解空化效应、射流冲蚀性能提高的作用机理、预测不同工况下空化射流破岩能力等都具有重要意义^[22]。

(1) 空泡动力学数学模型

采用Keller-Miksis方程来描述射流流场中空泡半径 R 随周围流场瞬态压力 $P(t)$ 的波动而变化的规律^[12]：

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{dR}{dt}\right) R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{dR}{dt}\right) \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \\ & = \left(1 + \frac{dR}{dt}\right) \frac{P_b(t) - P(t)}{\rho} + \frac{R}{\rho c} \frac{dP_b(t)}{dt} - \frac{4\nu}{R} \frac{dR}{dt} - \frac{2S}{\rho R} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中 ρ 是液体密度，单位是 Kg/m^3 ； ν 是黏度，单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； S 是表面张力，单位是 N/m ； c 是液体中声速，单位是 m/s ； P_b 为空泡内部的压力。该方程考虑了液体密度 ρ 、黏度 ν 、表面张力 S 及可压缩性的影响。

采用如下的van der Waals状态方程确定 P_b ：

$$P_b = \frac{(N_{\text{vapor}} + N_{\text{non-cond}})kT}{\frac{4\pi}{3}(R^3 - h^3)} \quad (2)$$

式中 $N_{\text{non-cond}}$ 和 N_{vapor} 分别为空泡内不可凝结气体和水蒸气的物质的量， h 为van der Waals半径，单位是 nm ； k 为玻尔兹曼常数， $k=1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； T 为空泡内部的温度，单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。

某一时间间隔 Δt 内空泡内温度的变化 ΔT 可由下式计算^[20]：

$$\Delta T = \frac{1}{(C_{\text{vw}} N_{\text{vapor}} + C_{\text{vg}} N_{\text{non-cond}})} \times \left[-P_b \Delta V - \frac{kA(T_b - T_{\infty})}{R} \Delta t - e\sigma A(T_b^4 - T_{\infty}^4) \Delta t \right] \quad (3)$$

其中 A 为空泡表面积，单位是 m^2 ； κ 为液体的热传导系数， $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ； e 为热辐射系数； σ 为Stefan-Boltzmann常数。

空化气泡与外部流体的质量交换可用下面的扩散方程描述^[23]：

$$\frac{dN_i}{dt} = 4\pi R^2 D_i \left(\frac{C_{\text{wi}} - C_i}{l_d} \right) \quad (4)$$

式中 D_i 为气体的扩散系数，单位是 m^2/s ； C_i 和 C_{wi} 分别为气体在气泡内的浓度和在周围流体中的平衡浓度，单位是 mol/L ； l_d 为扩散距离，单位是 m 。

式(1)–式(4)构成一个封闭的方程组，给定空泡外压力的变化 $P(t)$ ，可求解出空泡半径及其内部温度和压力随时间的变化。

(2) 空化气泡在空化射流场中的动态变化规律

钻井中通过喷嘴形成的淹没射流流场是一个强湍流场，Versluis等^[24]的计算表明，空化气泡在高速射流场中经历的压力降可以用一个高斯函数表示：

$$P(t) = P_{\text{amb}} - P_a \exp\left[-\frac{a(t-t_0)}{\Delta t_{\text{span}}} \right] \quad (5)$$

上式中 P_{amb} 为流场所受到的围压，单位是 MPa ； P_a 为压力降的幅值，单位是 MPa ； Δt_{span} 为压力降持续时间，单位是 ms ； a 为待拟合的参数。

可用下式表示 P_a 与射流速度的关系：

$$P_a \approx \lambda \frac{1}{2} \rho v_{\text{jet}}^2 \quad (6)$$

其中 λ 为自振效应系数，表征由于自振效应造成的涡

环中心压降增大, $\lambda > 1$, 在本文的计算中选择 $d = 4$ mm 的风琴管自振喷嘴。

空化气泡在自振射流流场表现出的动态变化规律如图 3 所示。计算条件: 围压为 5 MPa, 射流速度为 140 m/s, 空化核半径为 10 μm , 流场介质为清水。从图中可以看出, 在初始阶段, 空化核受井底高围压的影响, 处于受抑制状态。随着空泡外压力降低, 空

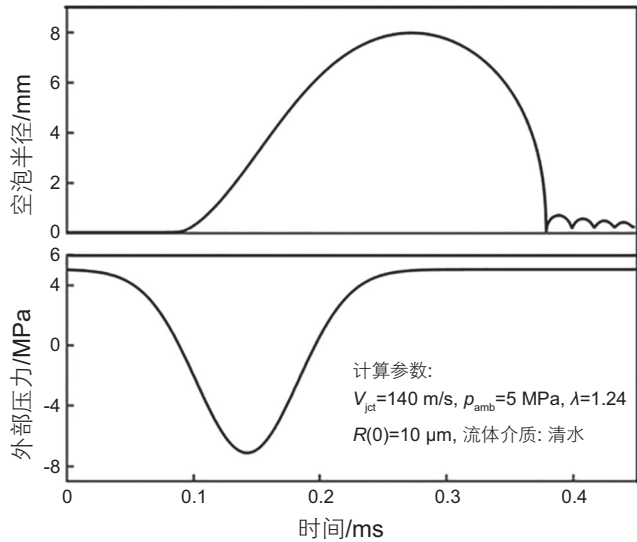


图 3 上图, 空泡半径随时间变化; 下图, 空泡外压力随时间变化

Fig. 3 The upper graph, the bubble radius changes with time; the lower graph, the external pressure of the bubble changes with time

化气泡开始膨胀, 直至在 $t = 0.27$ ms 时达到最大半径 8.0 mm。随后在外部高压流体挤压下, 空泡开始被压缩。空泡溃灭过程十分剧烈, 空泡壁向内运动的最大速度可达 5.5 Mach。当空泡被压缩到最小体积时, 其内部积累了巨大的压力和温度, 促使空泡反弹。反弹中最大的壁面运动速度可达 0.33 Mach, 反弹能达到的最大半径为 0.39 mm。其后空泡经历了多个溃灭—反弹的过程, 但溃灭和反弹的剧烈程度逐渐减轻。

图 4 给出了计算时间内空泡溃灭过程中内部温度和压力的变化。从图中可以看出, 第一次溃灭产生了高达 2.84×10^4 K 的高温和 9.12×10^4 MPa 的高压。由于溃灭速度极快, 压力和温度峰值持续的时间非常短。例如, 空泡内部压力大于 100 MPa 的持续时间只有大约 0.37 μs , 温度大于 5000 K 的持续时间有大约 0.30 μs 。然而, 考虑到空化射流中存在大量的空化气泡, 他们在短时间内溃灭并作用于周围岩石, 由此带来的射流冲蚀性能提升幅度是非常可观的。空泡后续溃灭的强度迅速降低, 溃灭温度和压力大幅减小, 空化破坏材料的能力主要取决于第一次剧烈的溃灭。

空泡溃灭后, 在其内部产生的巨大压力将以压力波的形式向周围流体扩散。形成巨大的冲击压力。在本节计算中, 考虑到空泡在生长过程中最大半径 $R_{\text{max}} = 8$ mm, 选取距离空泡中心为 $2R_{\text{max}}$ 的一点作为观测点, 该点的压力随变化如图 5 所示。空泡的第一次溃灭在观测点形成了一个很高的压力脉冲, 其峰值达到 252 MPa。钻井过程中遇到的普通砂岩的抗压

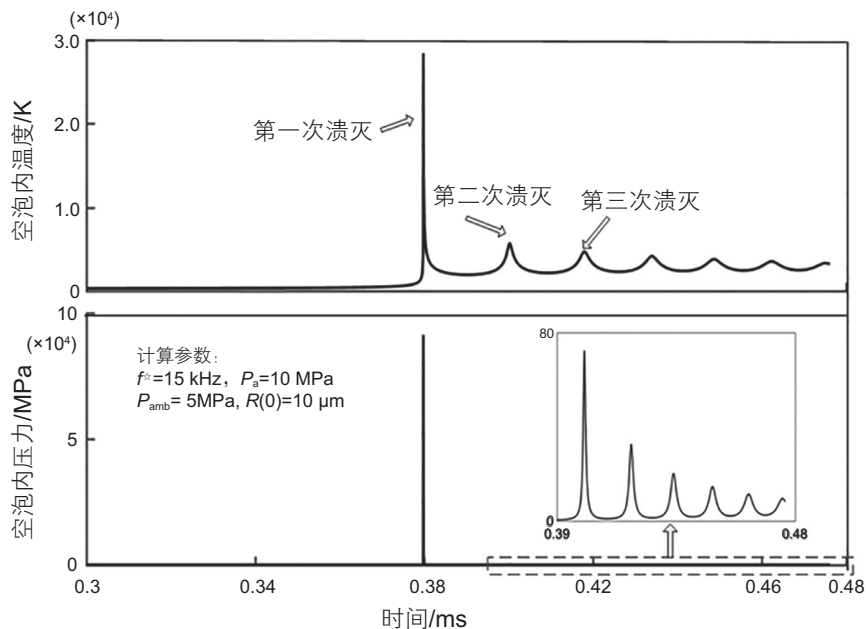


图 4 空泡溃灭的特点: 上图, 空泡内温度变化; 下图, 空泡内压力变化

Fig. 4 Characteristics of vacuole collapse: upper picture, temperature change in the vacuole; lower picture, pressure change in the vacuole

强度一般在 30~60 MPa, 因此, 第一次溃灭产生的压力脉冲如果作用于岩石表面, 造成岩石的破坏。约 $0.30 \mu\text{s}$ 。然而, 考虑到空化射流中存在大量的空化气泡, 他们在短时间内溃灭并作用于周围岩石, 由此带来的射流冲蚀性能提升幅度是非常可观的。空泡后续溃灭的强度迅速降低, 溃灭温度和压力大幅减小, 空化破坏材料的能力主要取决于第一次剧烈的溃灭。

2.2 空化射流冲蚀实验

实验所用的喷嘴是风琴管空化喷嘴和Helmholtz振荡腔空化喷嘴, 用 120° 锥形喷嘴作对比试验, 如图 6 所示。实验的流体介质为清水, 在实验过程中水的温度变化很小, 射流冲击岩石前和冲蚀后的水温变化在 $2\sim 4^\circ\text{C}$ 范围内。射流速度一般不超过 200 m/s , 马赫数较小, 认为水是不可压缩的, 不考虑黏滞性和温度的

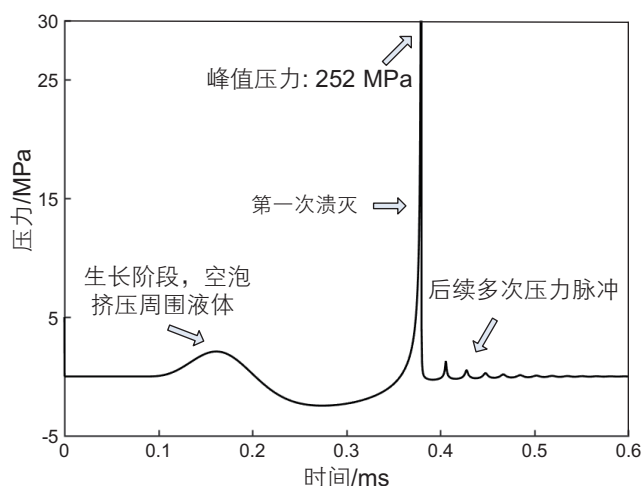


图 5 距离空泡中心 16 mm 处的观测点接收到的压力波动
Fig. 5 Pressure fluctuations received at the observation point 16 mm away from the center of the cavity

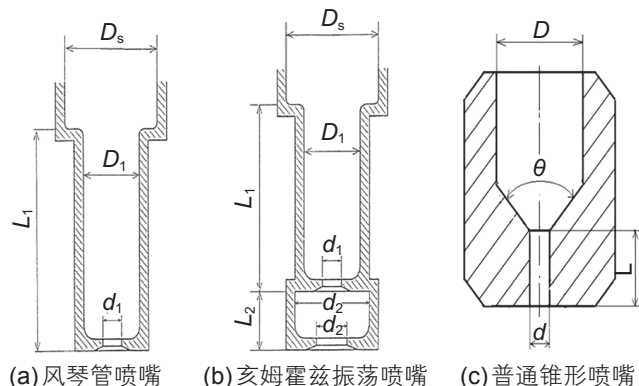


图 6 实验用自振空化喷嘴和普通锥形喷嘴示意图
Fig. 6 Schematic diagram of self-vibrating cavitation nozzle and ordinary cone nozzle for experiment

影响。实验所用的各种测量仪表都具有足够的精度, 实验重复多次, 测量准确

冲蚀人造砂岩和天然红砂岩岩心, 通过冲蚀坑体积来衡量射流冲蚀岩石能力, 岩心试样是直径为 125 mm 、高为 100 mm 的圆柱体。采用填充石蜡的方法间接测量射流对人造砂岩冲蚀坑的体积, 冲蚀坑深度用卡尺直接测量。分别计算了体积冲蚀速度、深度冲蚀速度和比能 SE。

(1) 风琴管空化喷嘴和普通锥形喷嘴冲蚀岩石效果比较:

实验条件: 泵压 $P=12.25 \text{ MPa}$, 岩石: 人造砂岩。图 7 分别是三种风琴管空化喷嘴和 120° 普通锥形喷嘴在相同泵压下的体积冲蚀速度、深度冲蚀速度和比能的比较, 图中纵坐标体积冲蚀速度、深度冲蚀速度和比能分别是以 120° 普通锥形喷嘴的相应参数的最大值为标准无因次化的。可以看出, 在相同泵压条件下, No.2, No.9, No.10 风琴管空化喷嘴的冲蚀效果明显比 120° 普通锥形喷嘴好, 且风琴管喷嘴的比能明显小于锥形喷嘴。

(2) 风琴管空化喷嘴和Helmholtz振荡腔空化喷嘴冲蚀岩石效果比较:

岩石: 人造砂岩。泵压为 $(14.5 \pm 0.3) \text{ MPa}$, 排量为 $(1.0 \pm 0.03) \text{ L/s}$, 进行 No.10 风琴管空化喷嘴和四种 Helmholtz 振荡腔空化喷嘴在不同喷距时的冲蚀人造砂岩实验。

图 8 分别是 No.10 风琴管空化喷嘴和四种 Helmholtz 振荡腔空化喷嘴的体积冲蚀速度、深度冲蚀速度和比能的比较, 图中纵坐标体积冲蚀速度、深度冲蚀速度和比能分别是以 No.10 风琴管空化喷嘴的相应参数的最大值为标准无因次化的。可以看出, 对于所试验的四种 Helmholtz 振荡腔空化喷嘴来说, No.2 Helmholtz 振荡腔空化喷嘴的冲蚀岩石效果最好, 它与 No.10 风琴管空化喷嘴的冲蚀效果比较接近, 其余三种振荡腔空化喷嘴的冲蚀效果则相对较差。

2.3 高压射流冲蚀含水合物材料的数值模拟和实验

2.3.1 高压射流冲蚀含水合物材料数值模拟

传统的有限元方法在模拟物体受力变形的过程中往往会产生网格畸变, 无法准确描述水射流流场作用下破碎水合物的动态过程。笔者采用 Ls-Dyna 显示动力分析有限元程序对水射流冲蚀含水合物沉积物 (HBS) 过程进行数值模拟研究, 采用 ALE 和 SPH 数值方法求解, 如图 9(a) 所示。该热流固耦合模型考虑喷嘴出口真实流场, 分别模拟空气、淹没和淹没围压环

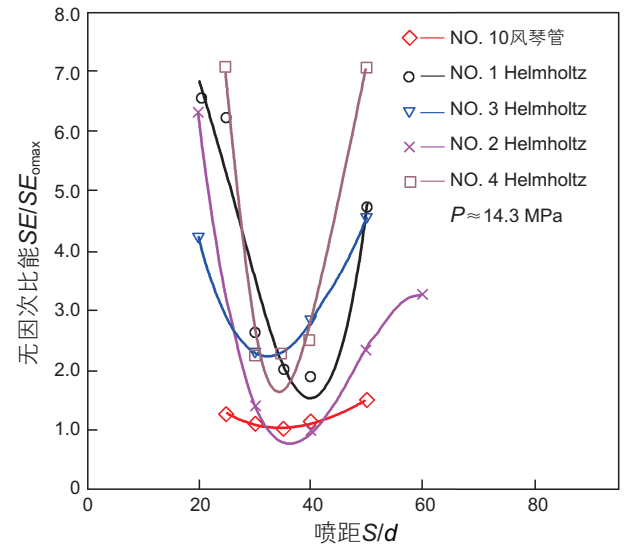
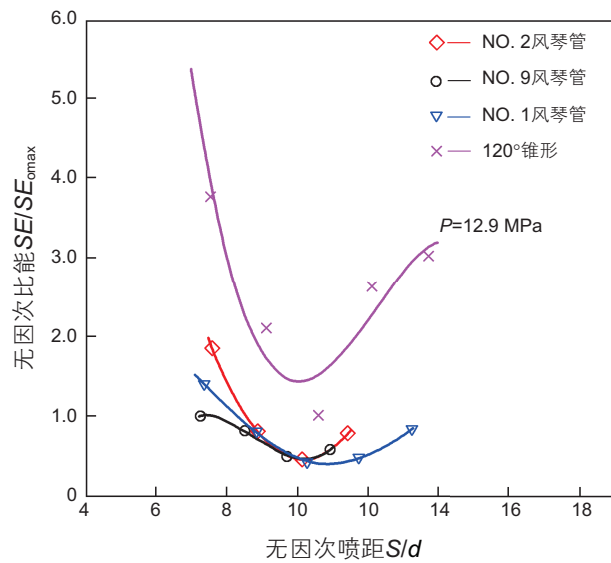
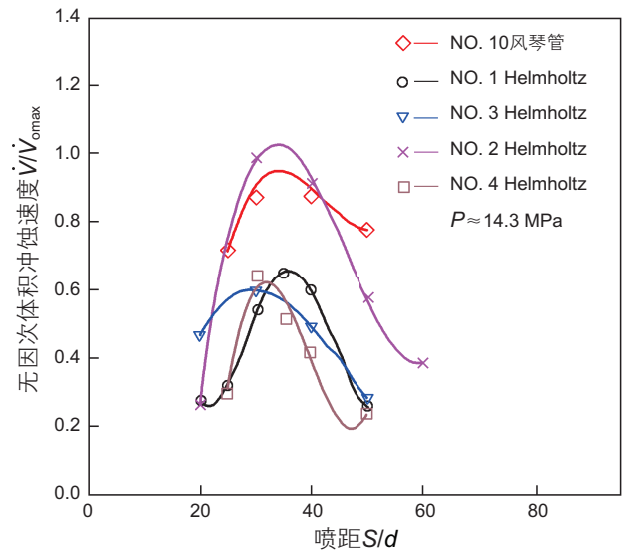
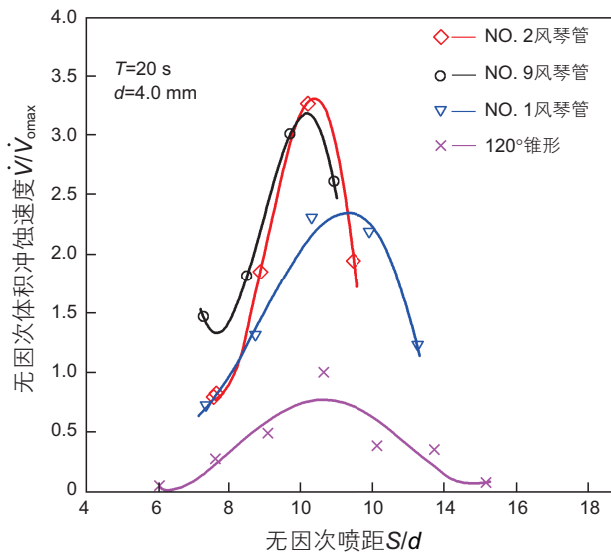
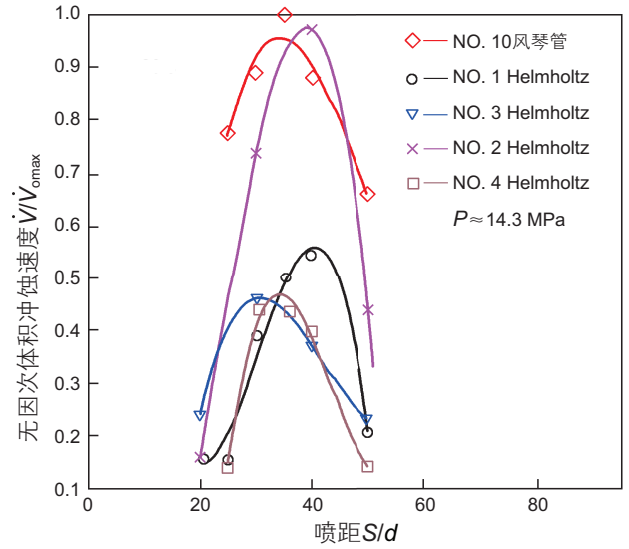
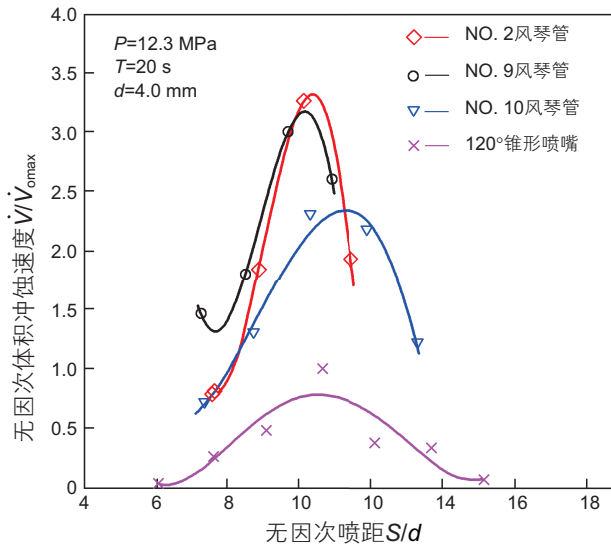


图 7 风琴管喷嘴和普通锥形喷嘴破岩效果比较

Fig. 7 Comparison of rock-breaking effect of organ pipe nozzle and ordinary cone nozzle

图 8 风琴管喷嘴和Helmholtz喷嘴破岩效果比较

Fig. 8 Comparison of rock breaking effect of organ pipe nozzle and Helmholtz nozzle

境下水射流对材料模型的破坏方式及效果,同时设置不同速度梯度测定水射流的临界速度。最后,针对材料模型的损伤场、内部应力变化和侵蚀坑特性等进行分析并对ALE与SPH两种计算方法进行对比。模拟研究表明,ALE与SPH方法均可以很好地模拟天然气水合物沉积物的水射流冲蚀过程,且淹没及围压条件均能降低水射流对两种材料的冲蚀效率,ALE方法模拟效果更佳。此外,射流过程中通过摩擦、热传导、塑性变形产生的热量对水合物的破坏作用可以忽略,水合物的破坏方式主要以冲击破坏为主。不同速度梯度下的射流冲蚀效果如图9(b)和图9(c)所示,在直径为2 mm的直喷嘴的冲蚀作用下,两种方法中天然气水合物沉积物的临界速度均在25~50 m/s之间。

2.3.2 高压射流冲蚀含水合物材料室内实验

研究高压水射流破碎天然气水合物矿体有助于进

一步加强水射流技术在天然气水合物矿藏钻采过程中的应用,通过实验,可以进一步地研究水射流的喷嘴直径、靶距及冲蚀坑形态等问题,从而优化现场开采参数,提高开采效率。由于天然气水合物的合成需要高压低温条件,常规的围压射流破岩实验装置无法满足实验需要,因此我们重新设计加工了一套天然气水合物原位合成及射流冲蚀装置(图10),并在此基础上展开实验研究。该装置加载了天然气水合物矿体生成系统、实时温压分层测量系统、电阻率测水合物饱和度系统、高压射流系统、激光空化系统、分离计量系统等,整套实验都在特制的可视围压釜内进行,保证了实验的准确性。除此之外,还加装了一套三轴水合物矿体射流夹套,用以研究在冻土地层条件下,高压水射流对原位生成的含水合物岩样的冲蚀破坏效果。

通过此设备开展了天然气水合物及其沉积物的制

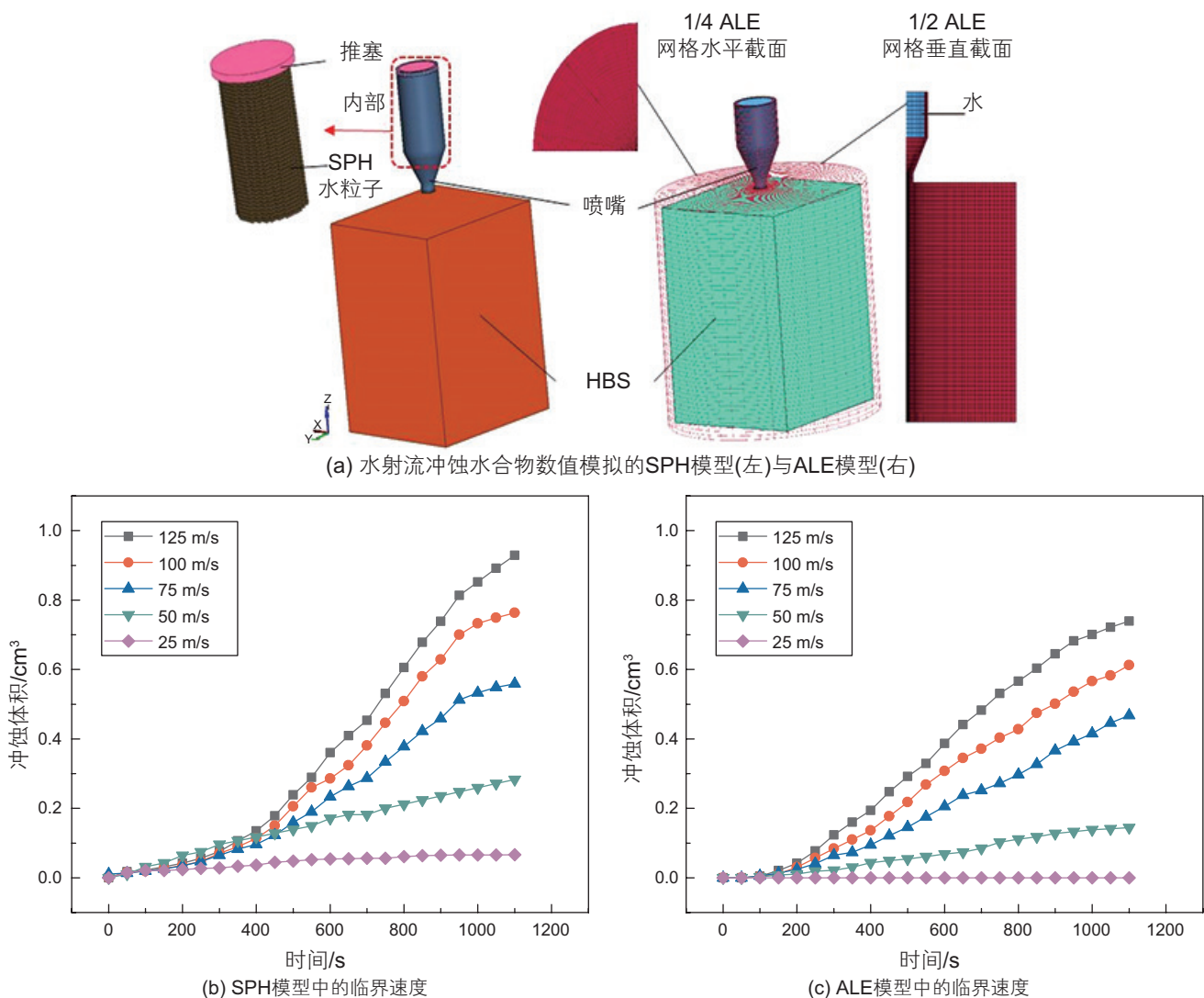


图9 水射流冲蚀水合物数值模型及冲蚀效果

Fig. 9 Numerical model and erosion effect of water jet erosion hydrate



图 10 天然气水合物原位合成及射流冲蚀装置及纯水合物样品的冲蚀坑

Fig. 10 In-situ synthesis of natural gas hydrate and jet erosion device and erosion pits of pure hydrate samples

备研究，由分层布置的温压传感器提供不同时间不同位置的温压数据，结合电阻率测量装置分析釜内水合物的生成情况。对纯水合物及不同饱和度下的水合物沉积物的制备过程进行对比发现，采用先注气再降温，初始阶段下方注气，其他阶段上方持续注气的实验方法，可以较快地生成满足实验需求的水合物样品。另外，实验中发现，十二烷基硫酸钠(SDS)等催化剂虽然可以加快水合物矿体样品的生成，由于水合物攀附釜体内壁生长，致使制备样品中间结构疏松，不满足射流实验需要；采用先降温后注气的方法会在注气阶段，在气液界面上产生一层水合物薄膜，极大地阻碍了水合物的后续生成。在此基础上，我们对实验室制备的纯天然气水合物样本进行射流冲蚀实验，发现在水合物的冲蚀过程中，冲蚀坑呈小块状剥离，内壁较为粗糙，即使是 15 °C 的高压水流作用下，冲蚀坑表面的水合物也未发生较大程度的相变分解。

此外，该装置还可以进行激光空化的实验，本装置中的激光发生模块可以将 1 J 的能量聚焦于围压釜内液面以下的一个点中，从而诱导该点处发生激光空化现象。激光空化可以产生大量空泡及巨大噪声，在空泡溃灭时可以对周围物体产生较强的破坏作用。初步实验结果证明，激光诱发空化现象所形成的连续微射流可以对距焦点一定距离处的目标靶件产生较强破坏，说明空化可以较大程度提高射流冲蚀效率。

3 自进方式与延伸极限

水力喷射径向水平井技术依靠纯水力钻进，在套管实现内超短半径转向，其中旋转射流喷嘴(自进式喷嘴)是其实现连续破岩成孔核心装备，起到“发动

机”的作用。旋转射流喷嘴，由普通喷嘴内部加入导流元件组成，高压流体经导流元件作用后具有三维速度，可降低破岩门限压力，且扩散能力强，主要以剪切、拉伸等作用破岩，效率较高。笔者采用平行实验的方法对旋转多孔喷嘴进行性能评价(图 11-13)。经参数调整与结构优化，选取泵压 40~50 MPa 进行连续喷射钻孔，人造砂岩内平均钻进速度 12 m/h，成孔直

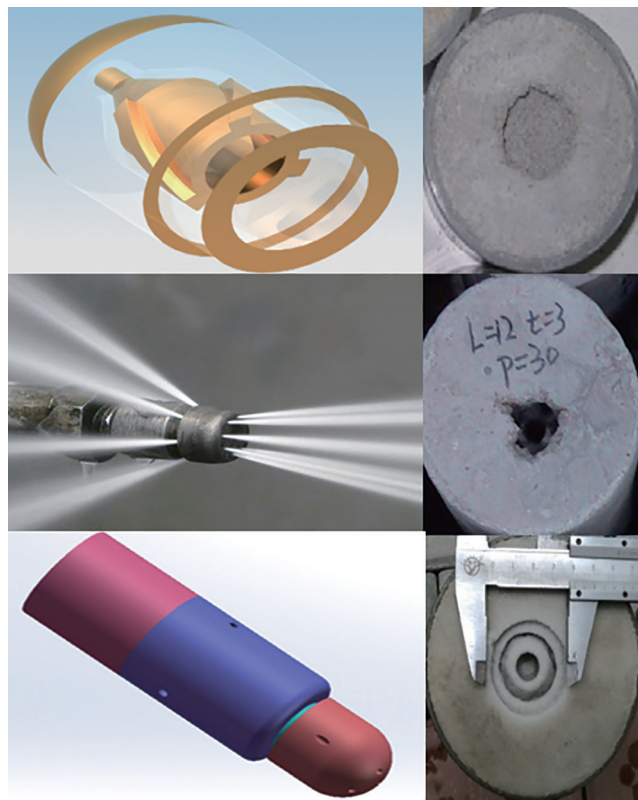


图 11 直旋混合、多孔、旋转多孔射流喷嘴破岩

Fig. 11 Rock-breaking with straight-rotating mixed nozzle, porous and rotating porous jet nozzles



图 12 旋转多孔喷嘴破岩实验(人造砂岩)
Fig. 12 Rock breaking experiment with rotating porous nozzle (artificial sandstone)

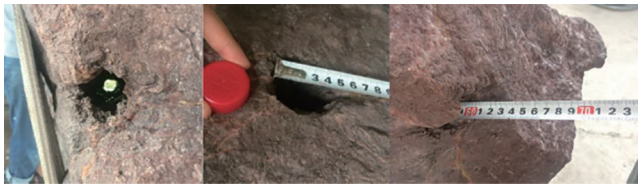


图 13 旋转多孔喷嘴破岩实验(碳酸盐岩)
Fig. 13 Rotary porous nozzle rock breaking test (carbonate rock)

径约 40 mm; 奥陶系硬质碳酸盐岩内平均钻进速度 1.1 m/h, 成孔直径约 50 mm; 内壁平整性一般, 轨迹规则无明显弯曲。由于水合物储层强度更低, 因此所用旋转多孔喷嘴可以满足水合物储层钻井破岩要求。

径向水平井高压软管主要依靠旋转多孔喷嘴的自进力拖动进入地层, 其基本结构如图 14 所示。Li Jingbin 等^[25]通过受力分析以及合理的假设, 得到了旋转多孔射流钻头自进力计算模型:

$$F_j = \frac{\rho}{A_0} \times M \times m \times Q_0^2 \quad (7)$$

$$m = \frac{0.81A_0^2}{C^2 d_{nc}^4} \times S + 0.5(1+S) - \left[\frac{k}{(n_2+1)(k+1)} \right]^2 D_2^4 S + n_3 \times \left[\frac{1}{n_3(k+1)} \right]^2 D_3^2 \cos \theta_3 \quad (8)$$

式中: F_j 为钻头自进力, N; A_0 为射流钻头入口截面积, m^2 ; m 为钻头自进力系数; Q_0 为钻头入口流量, L/s; S 为钻头前端面面积系数; k 为射流钻头前后孔眼流量比; D_i 为射流钻头入口直径分别与中心、前向、后向孔眼直径之比($i=1, 2, 3$); n_2 为前向孔眼个数; n_3 为后向孔眼个数; θ_3 为后向孔眼与射流钻头中轴线夹角, $^\circ$ 。

径向水平井的延伸极限是指在一定的钻井系统和施工条件下, 所能钻出的最大水平井眼长度^[26]。为方便计算, 做如下假设: 在钻进过程中高压软管始终处于拉伸状态, 不存在轴向屈曲变形; 高压软管在垂直的油管中处于平衡的受力状态; 喷嘴的前向射流能够破碎岩石形成允许高压软管通过的孔眼。

径向水平井钻井时管柱受力情况如图 15 所示。在径向水平井段, 沿着井眼延伸的方向, 喷射钻进管柱的受力有: 射流钻头的自进力、转向器对高压软管的摩擦力、井壁对高压软管的摩擦力、环空流体对高压软管的摩擦力。以井眼延伸的方向为正方向, 喷射钻进管柱的受力合力为:

$$F = F_j - F_{fd} - F_{fw} - F_{fa} \quad (9)$$

式中, F 为喷射钻进管柱的受力合力, N; F_{fd} 为转向

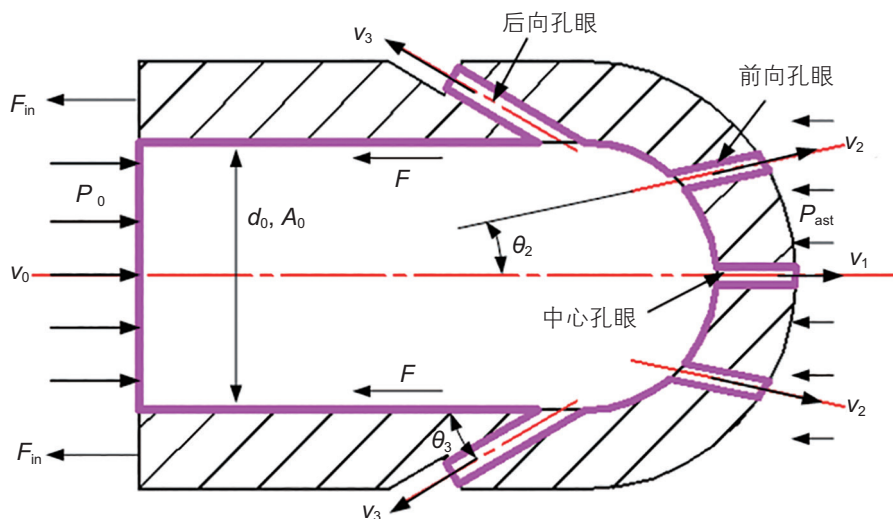


图 14 旋转多孔射流钻头结构示意图
Fig. 14 Schematic diagram of the rotating porous jet bit

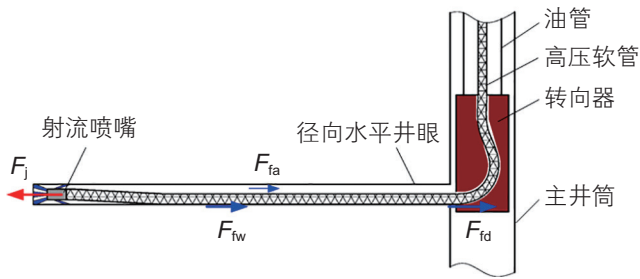


图 15 径向水平井喷射钻进系统受力示意
Fig. 15 Forced schematic diagram of radial horizontal well jet drilling system

器对高压软管的摩擦力, N ; F_{fw} 为井壁对高压软管的摩擦力, N ; F_{fa} 为环空流体对高压软管的摩擦力, N 。

由式(9)可以看出: $F > 0$ 时, 高压软管可以继续前进, 此时摩擦力逐渐增大; $F = 0$ 时, 动力和阻力相等, 高压软管停止运动, 此时的井眼长度即为径向水平井的延伸极限。

4 井眼轨迹测量与控制

由于径向钻井作业过程中BHA需要在套管内完成超短半径($<300\text{ mm}$)转向, 常规井下测量工具无法通过转向装置并重入径向井眼。而随着微机电技术的发展, 小尺寸、低功耗的微机电系统在无人机飞控、人体/机器人运动识别等领域得到了广泛的应用, 对径向井眼轨迹测量具有重大参考价值。针对径向井钻井作业工艺特点与要求, 对其轨迹测量装置提出如下技术要求。①小尺寸: 针对目前转向器轨道直径 38 mm 、曲率半径 122 mm 的结构参数, 建议测量装置(不含软管接头 50 mm)直径 $d < 22\text{ mm}$ 、长 $L < 80\text{ mm}$; ②高续航: 针对目前径向钻井平均 3000 m 作业深度, 考虑连续油管柱下放速度, 建议测量装置至少满足 $3\sim 4\text{ h}$ 续航时间; ③高耐性: 测量装置应能适应 40 MPa 以内、 $-45\sim 105\text{ }^\circ\text{C}$ 井下环境。

针对上述问题, 笔者提出了随钻测量、钻后重入两种工具设计方案, 并对其进行结构设计(图 16)。其中, 钻后重入方案设计尺寸($D=22\text{ mm}$, $L=65\text{ mm}$)满足技术要求, 具有较高可行性。考虑井下复杂环境, 采取离线存储、测后导出的形式进行数据传输, 预留 64 Mb 数据存储空间, 理论可支持连续采集 3.5 h (200 Hz , 10 参数); 引入分段测量机制, 通过对工作时段合理配置, 有效提高作业时间, 为单层位多方位的轨迹测量创造条件。

然而, 由于径向井孔眼直径较小, 钻后重入具有

一定的失败风险, 因此设计了随钻式径向井轨迹测量工具(如图 17 和图 18)。工具采用测、电、储分离式设计, 由测量模块与支持模块构成。支持模块内含高温电池与存储芯片, 安装于连续油管, 可以满足多天连续测量作业需求。测量模块集成于高压软管接头,

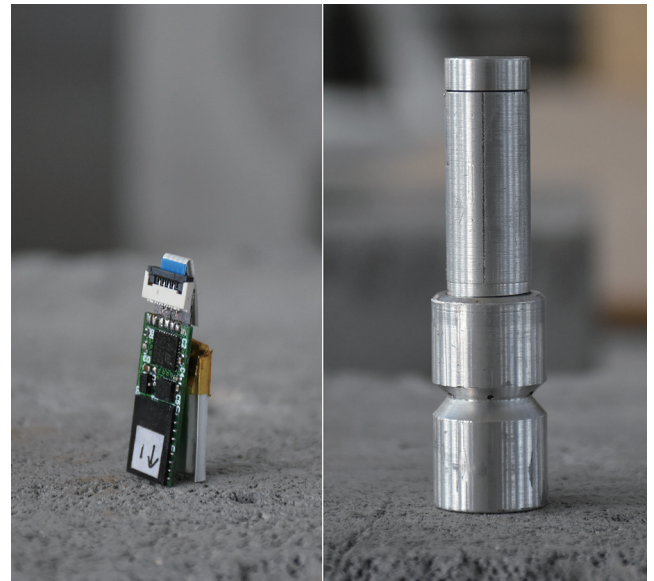


图 16 径向井眼轨迹测量原型机图^[27]
Fig. 16 Prototype of radial wellbore measurement

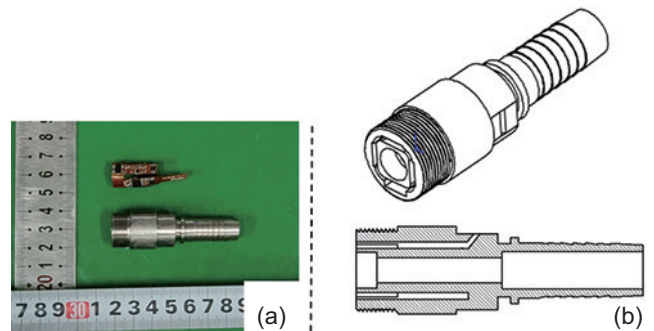


图 17 第三代径向井轨迹随钻测量工具原型机(测量模块)^[28]
Fig. 17 The prototype of the third-generation radial well trajectory measurement while drilling tool (measurement module)

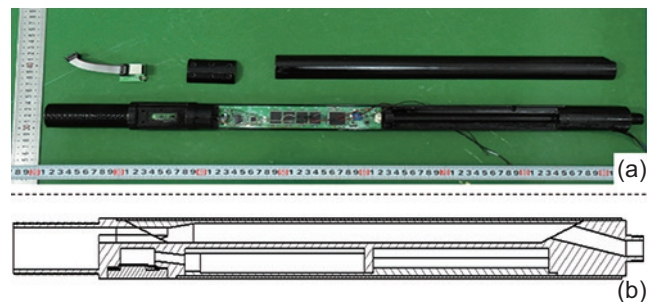


图 18 第三代径向井轨迹随钻测量工具原型机(支持模块)^[28]
Fig. 18 The prototype of the third-generation radial well trajectory measurement while drilling tool (support module)

直径 22 mm，长度 70 mm，可与长度小于 60 mm 的射流喷嘴配套使用。测量模块与支持模块采用 485 通讯协议，通过软管理设线缆的方式进行电力与数据传输。此外，由于连续油管末端尺寸限制较弱，支持模块存在继续加装地面—井下数据通讯模块的条件，但综合考虑成本与工艺，建议采用“随钻测量+离线存储”

的模式。

笔者搭建了径向井轨迹测量实验平台(图 19)，采用“随钻测量+离线存储”的模式获取测量了各关键环节数据特征，进行工艺可行性验证与工具、方法性能评价。测试中通过获取测量工具在实钻井眼中的运动姿态进行轨迹推算(图 20)，以陀螺仪数据为真实

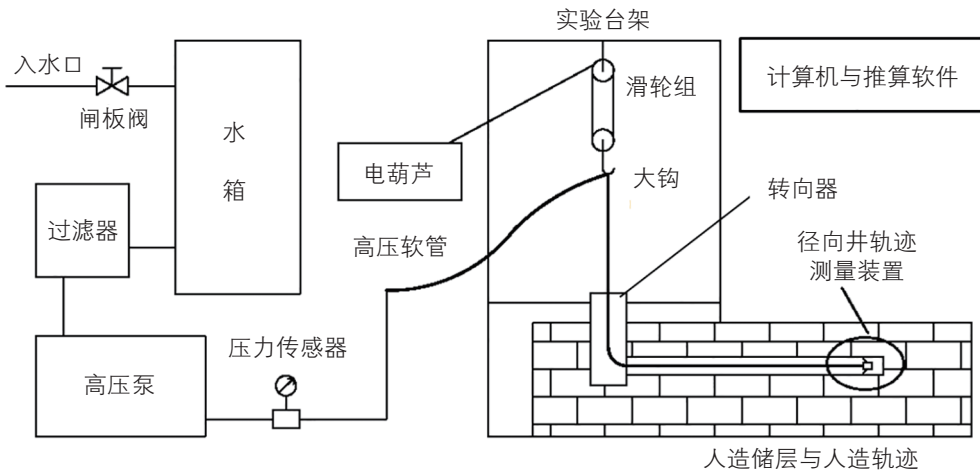


图 19 径向井轨迹测量实验平台结构示意图^[29]

Fig. 19 Schematic diagram of radial well trajectory measurement experimental platform structure

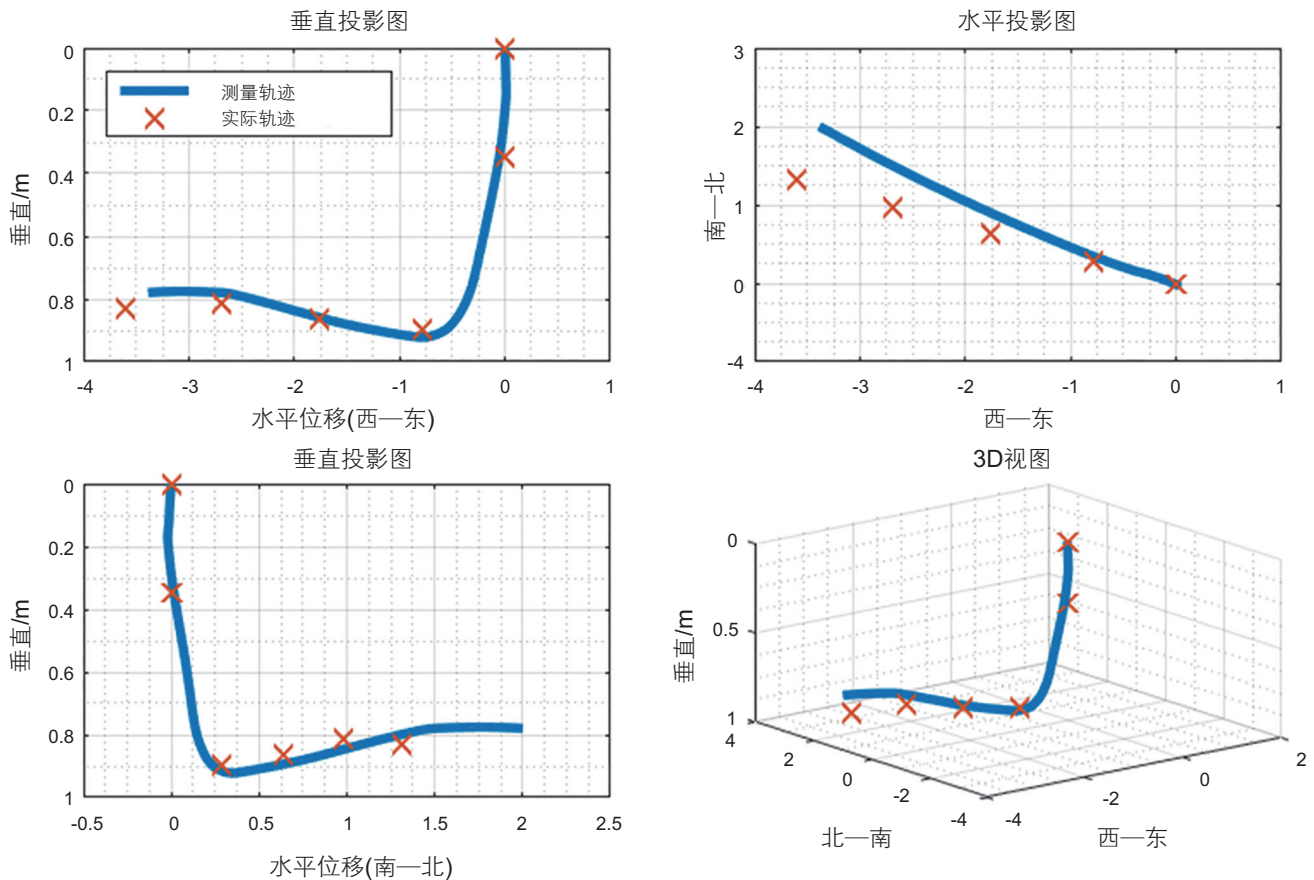


图 20 推算轨迹示意图^[29]

Fig. 20 Schematic diagram of solution trajectory

姿态的估计，以磁强计与加速度计数据为姿态的观测值，建立卡尔曼滤波器求解四元数，从而获得井眼内各点处井斜角与方位角。结果表明，该工具与方法测量各环节数据特征区别明显，所测轨迹参数(测深，垂深，水平位移)误差小于15%，满足工程要求。最终，基于上述轨迹测量流程与轨迹推算方法，使用MATLAB与VB.net进行混合编程，开发径向井轨迹推算软件一套(图21)。

5 天然气水合物开采数值模拟

本文使用开源软件HydrateResSim分别模拟了直井和径向井降压开采天然气水合物，通过对比其开发效果，进一步展示了径向井开采天然气水合物的增产潜力。模型中使用的参数(表1)主要基于我国南海神狐海域的钻探、测井数据^[30-32]。为了节约计算时间，本文假设所开采储层为一薄层，纵向渗流可忽略，从而将模型简化为平面二维模型。此外本文所模拟的径向井分支数为4，分支夹角为90°，根据模型具有的对称性，选取四分之一面积的水合物储层建立数值模型。模型大小为25×25 m，封闭边界，主井筒水力半径7 cm，径向井延伸长度为6 m。模型示意图如图22所示，模型中地层原始压力为13 MPa，降压开采时主井筒井底压力保持在5 MPa。由于模型尺度较小，为减小边界效应的影响，本文主要选取了1 h，24 h，120 h的模拟结果进行对比分析。

分析降压开采过程中主要物理场及水合物饱和度变化，有助于理解径向井开采天然气水合物储层的增产效果及增产机理。图23绘制了降压开采1 h、24 h、120 h后的压力分布云图。从图中可以看出，对于直

井，其井筒周边存在一个近似于圆形的低压区域，且随开采时间增加，圆形低压区不断向外扩大。对于径向井，降压开采初始时刻，其产生的低压区主要分布在主井筒和径向井分支周边区域。随着开采的持续，径向井产生的压力降迅速向外传播，压降前缘趋于圆滑，压降前缘形状趋于直井压降前缘，但相同时刻径向井开采压降波及范围明显更大，其中降压开采120 h后径向井压降传播距离约为直井的2倍。

一定温度下，只有当压力低于水合物的相平衡压力点，水合物才会发生分解。由直井降压开采压力云图可知，储层渗流阻力主要集中在近井区域，在储层内部的压降梯度较小，不利于储层内部水合物的分解。图24展示了开采过程中水合物饱和度的分布及变化，

表1 模拟计算参数

Table 1 Simulation calculation parameters

参数	取值
初始压力/ P_i	13 MPa
初始温度/ T_i	14 °C
井底压力/ P_w	5 MPa
井底温度/ T_w	14 °C
初始含水饱和度/ S_{wi}	0.4
初始水合物饱和度/ S_{hi}	0.6
储层渗透率/ k	10 mD
孔隙度/ ϕ	0.3
沉积物密度/ ρ	2600 kg/m ³
湿岩热导率/ K_w	3.1 W/(m·K)
干岩热导率/ k_D	1 W/(m·K)
岩石比热/ C_R	1000 J/(kg·K)
相对渗透率	Aziz修正模型 ^[33]
毛细力	Van Genuchten模型 ^[34]
束缚水饱和度	0.3
不可流动气相饱和度	0.05

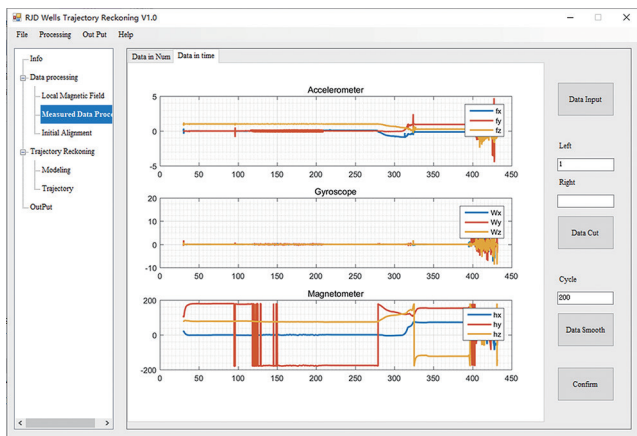


图21 径向井轨迹推算软件界面截图

Fig. 21 Screenshot of the interface of the radial well trajectory calculation software

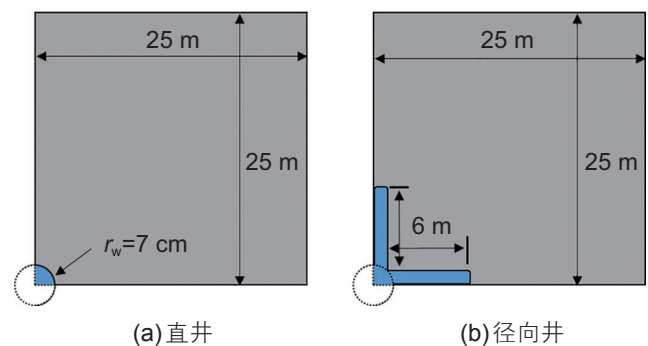


图22 降压开采模型示意图

Fig. 22 Schematic diagram of the decompression mining model

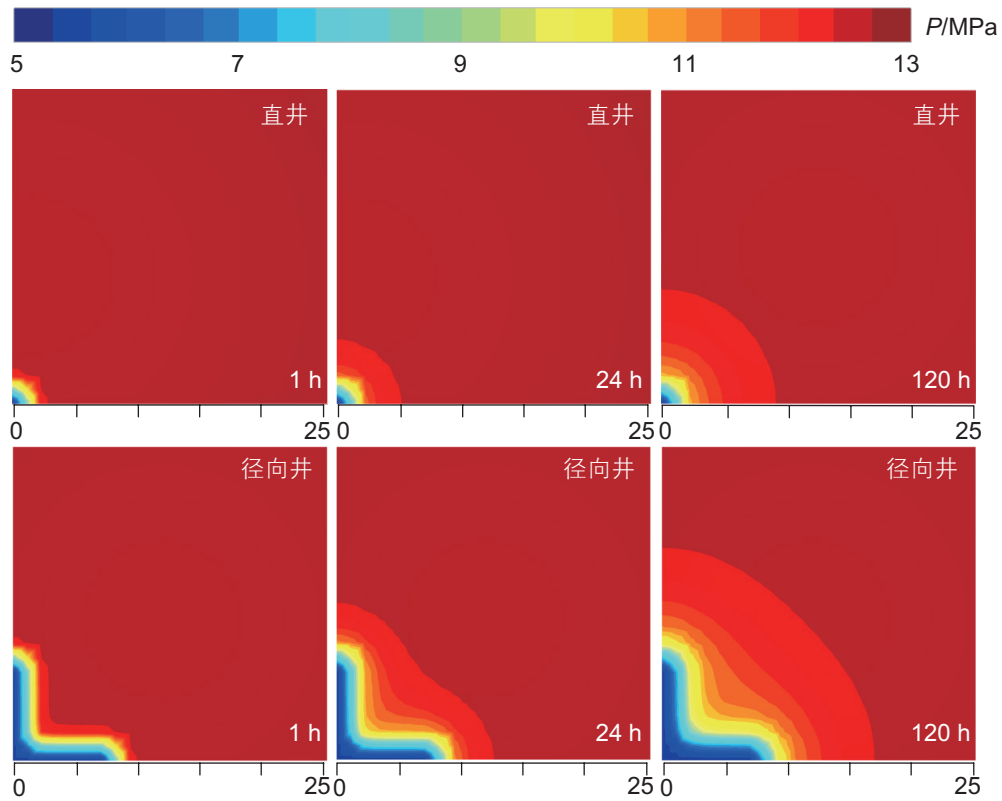


图 23 降压开采过程中压力变化云图

Fig. 23 Contour of pressure changes during depressurization mining

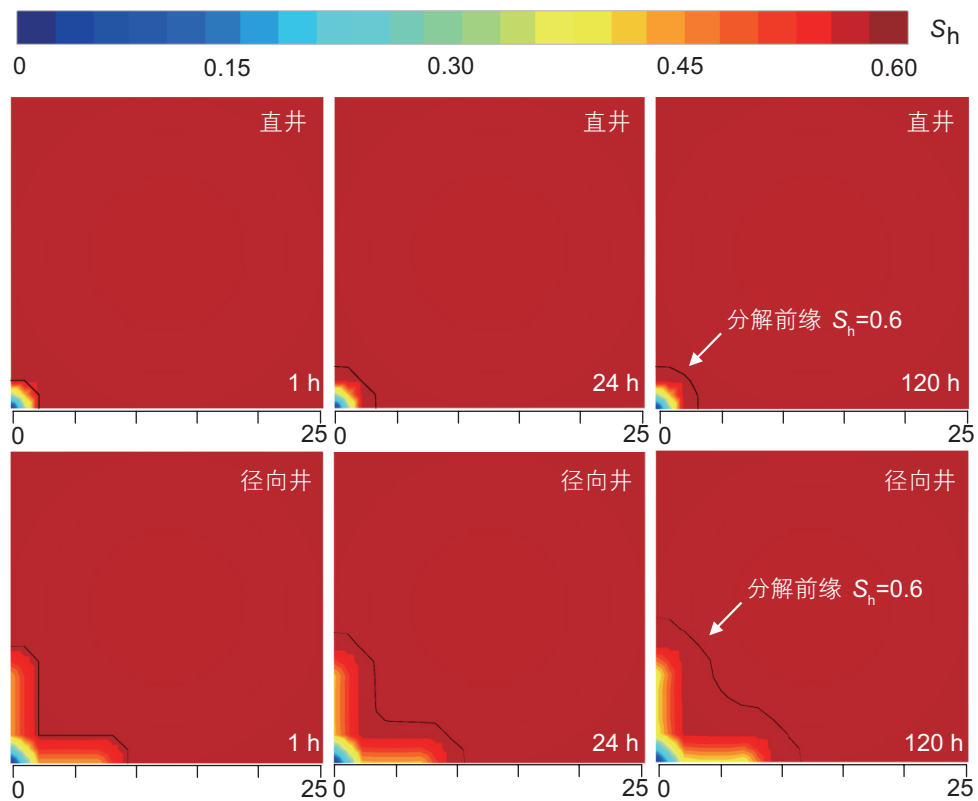


图 24 降压开采过程中水合物饱和度分布云图

Fig. 24 Contour of hydrate saturation during depressurization

各图中的黑线为水合物等饱和度线($S_h=0.6$)所在位置,其标明了水合物发生分解的区域。由图可知,相同时刻,直井降压开采水合物分解区域远小于径向井降压开采,直井降压开采过程中,水合物分解区域不断向外扩展,但由于压降主要集中在井筒附近,其分解前缘向储层内部移动速度很慢。作为对照,径向井降压开采过程中水合物分解前缘围绕井筒向外迅速扩展,120 h后,分解前缘沿径向井分支的延伸方向传播距离超过 10 m。水合物分解为吸热反应,且本模型边界为封闭边界,其分解所需热量主要来自于储层内部传热,因此降压开采过程中必然会导致储层温度的降低。

图 25 为降压开采 120 h 后储层温度云图,显示了由于水合物分解引起的温度场变化,其中采用径向井开采所产生的温度下降范围及幅度均远大于直井开采。此外,由于紧邻主井筒的区域水合物已经完全分解,

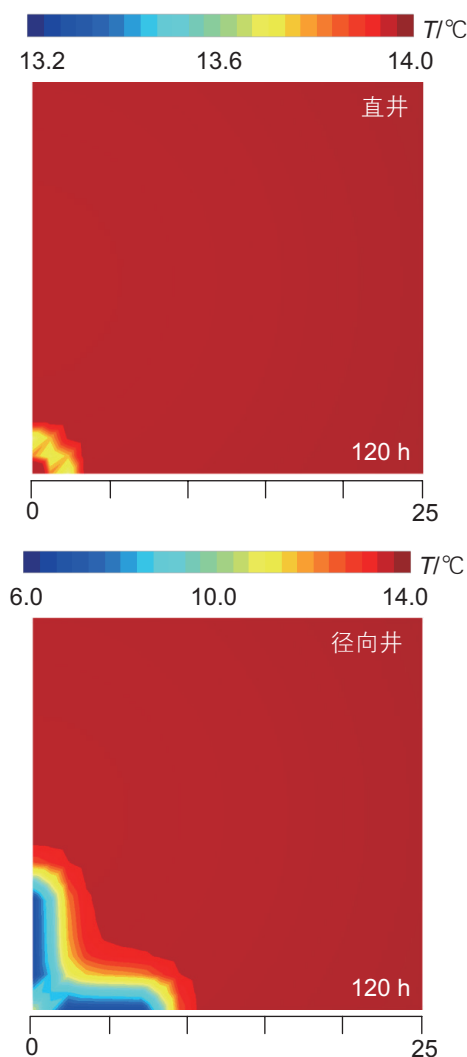


图 25 降压开采过程中温度分布云图

Fig. 25 Contour of temperature distribution during depressurization mining

因此温度云图中的低值出现在开采井周边水合物正在发生分解的区域,而不是主井筒。总体来看,降压开采模拟过程中,温度场、压力场、水合物饱和度相互影响,不断变化,但其不同时刻的分布云图均表明径向井降压开采天然气水合物矿体能有效降低近井地带渗流阻力,促进压力降向地层内部传播,开发效果远优于直井降压开采,具有较好的应用前景。

6 总结与展望

作为一种极具潜力的未来清洁能源,天然气水合物开采研究具有重要的战略意义。传统的降压法、注热法、注化学试剂法、 CO_2 置换法等得到了不断完善,一些新的开采思路如固态流化法、部分氧化法、移动隔水管法等正处于积极研究之中。但现有理论和方法不能满足我国南海天然气水合物安全高效开发的重大需求,亟需开展适用于南海天然气水合物钻采的新技术研究。通过对现有技术的总结和对天然气水合物钻采关键问题的思考,我们提出了空化射流钻径向水平井+筛管完井一体化方法,现将其未来的主要研究方向总结如下:

(1) 高压水射流作用下水合物储层成孔特性。天然气水合物矿体合成及其力学特性实验研究;局部强压力脉冲作用下含水合物材料破坏特征;空化作用下矿体微观结构演化与宏观力学特性多尺度研究。

(2) 水力喷射钻井井筒多相流动规律。井筒多相流天然气水合物生成与分解动力学;天然气水合物钻井(分支—主)井筒气—液—固变质量非稳态流动模型;水合物堵塞流动障碍形成/演化规律与井筒压力控制。

(3) 水合物储层微小井眼井筒稳定性评价与控制。空化射流钻井过程井壁稳定性研究;开采扰动下径向水平井界面弱化特性及失效模式;井筒稳定性控制/天然气水合物储层径向水平井防砂工艺研究。

(4) 天然气水合物径向水平井增产机理与效果评价。水合物开采过程中储层物性参数动态演化规律研究(相变—渗流机理);降压/注热/流化开采条件下径向水平井产能主控因素分析;多分支径向水平井井型参数优化设计与评价。

(5) 泥质粉砂水合物储层径向水平井开采工程参数优化。喷射钻井工具研制与调试;水合物储层径向水平井延伸能力预测(推进式、反喷牵引式,作用时间的影响);水力参数设计与储层适应性分析;基于我国南海试采区储层工程、地质特征,确定以井筒稳定性为制约条件的多分支径向水平井开采井型结构参数组合。

参考文献

- [1] LEE S Y, HOLDER G D. Methane hydrates potential as a future energy source[J]. Fuel Processing Technology, 2001, 71(1).
- [2] 李栋梁, 樊栓狮. 天然气水合物资源开采方法研究[J]. 化工学报. 2003(S1): 108-12. [LI D L, FAN S S. Research on the exploitation method of natural gas hydrate resources[J]. Journal of Chemical Engineering, 2003(S1): 108-12.]
- [3] LI X S, XU C G, ZHANG Y, RUAN X K, et al. Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review[J]. Applied Energy, 2016, 172: 286-322.
- [4] BOSWELL R, COLLETT T S. Current perspectives on gas hydrate resources[J]. Energy & environmental science, 2011, 4(4): 1206-15.
- [5] 罗敏, 王宏斌, 杨胜雄, 等. 南海天然气水合物研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(1): 56-69. [LUO M, WANG H B, YANG S X. Research progress of natural gas hydrate in the South China Sea[J]. Mineral Petrology and Geochemistry Bulletin, 2013, 32(1): 56-69.]
- [6] PRIEST J A, REES E V, CLAYTON C R. Influence of gas hydrate morphology on the seismic velocities of sands[J]. Journal of geophysical research: solid earth. 2009, 114(B11).
- [7] 宁伏龙, 窦晓峰, 孙嘉鑫, 等. 水合物开采储层出砂数值模拟研究进展[J]. 石油科学通报, 2020, 02: 182-203. [NING F L, DOU X F, SUN J X, et al. Progress in numerical simulation of sand production from hydrate reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2020, 02: 182-203(in Chinese).
- [8] 高文爽, 陈晨, 房治强. 高压热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, 33(04): 49-52+95. [GAO W S, CHEN C, FANG Z Q. Numerical simulation study on exploitation of natural gas hydrate by high pressure hot jet[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2010, 33(04): 49-52+95.]
- [9] CRUM L A. Nucleation and stabilization of micro bubbles in liquids[J]. Applied Scientific Research, 1982, 38(1): 101-15.
- [10] ARORA M, OHL C D, MORCH K A. Cavitation inception on micro particles: A self-propelled particle accelerator[J]. Physical review letters. 2004, 92(17): 174501.
- [11] FRANC J P, MICHEL J M. Fundamentals of cavitation. Rotterdam: Springer Netherlands; 2006.
- [12] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics. New York: Cambridge University Press; 2013.
- [13] 李根生, 马加骥. 高压水旋转射流处理近井导层技术研究与应用[J]. 石油钻采工艺. 1997, 19(A12): 80-6. [LI G S, MA J J. Research and application of high pressure water rotating jet treatment technology for near well guide layer[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 1997, 19(A12): 80-6.]
- [14] 李根生, 马加计, 沈晓明, 等. 高压水射流处理地层的机理及试验[J]. 石油学报. 1998, 19(1): 96-9. [LI G S, MA J J, SHEN X M, et al. Mechanism and experiment of high-pressure water jet treatment of formation[J]. Acta Petroleum, 1998, 19(1): 96-9.]
- [15] 李根生, 牛继磊, 刘泽凯, 等. 水力喷砂射孔机理实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版. 2002, 26(2): 31-4. [LI G S, NIU J L, LIU Z K, et al. Experimental study on the mechanism of hydraulic sandblasting perforation[J]. Journal of the University of Petroleum: Natural Science Edition, 2002, 26(2): 31-4.]
- [16] 李根生, 沈忠厚, 张召平, 等. 自振空化射流钻头喷嘴研制及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 11-3. [LI G S, SHEN Z H, ZHANG Z P, et al. Development and field test of self-vibrating cavitation jet bit nozzle[J]. Petroleum Drilling, 2003, 31(5): 11-3.]
- [17] 易灿, 李根生, 陈日吉. 围压下自振空化射流冲蚀性能实验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(2): 291-6. [YI C, LI G S, CHEN R J. Experimental study on erosion performance of self-vibrating cavitation jet under confining pressure[J]. Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 291-6.]
- [18] 李根生, 沈忠厚. 自振空化射流理论与应用[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2008. [LI G S, SHEN Z H. Theory and application of self-vibrating cavitation jet[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008.]
- [19] 李根生, 史怀忠, 沈忠厚, 等. 水力脉冲空化射流钻井机理与试验[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 239-43. [LI G S, SHI H Z, SHEN Z H, et al. Mechanism and experiment of hydraulic pulse cavitation jet drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 239-43.]
- [20] 王学杰, 李根生, 康延军, 等. 利用水力脉冲空化射流复合钻井技术提高钻速[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 117-20. [WANG X J, LI G S, KANG Y J, et al. Using hydraulic pulse cavitation jet composite drilling technology to increase drilling speed[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 117-20.]
- [21] 史怀忠, 李根生, 王学杰, 等. 水力脉冲空化射流欠平衡钻井提高钻速技术[J]. 石油勘探与开发. 2010(1): 111-5. [SHI H Z, LI G S, WANG X J, et al. Hydraulic pulse cavitation jet underbalanced drilling technology to increase drilling speed[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010(1): 111-5.]
- [22] 彭可文, 田守嶒, 李根生, 等. 自振空化射流空泡动力学特征及溃灭强度影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 326-32. [PENG K W, TIAN S C, LI G S, et al. Cavitation dynamic characteristics of self-vibrating cavitation jets and factors influencing collapse

- strength[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 326–32.]
- [23] STOREY B D, SZERI A J. Water vapour, sonoluminescence and sonochemistry[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, 456(1999): 1685–709.
- [24] VERSLUIS M, SCHMITZ B, VONDER H A, et al. How snapping shrimp snap: Through cavitating bubbles[J]. *Science*, 2000, 289(5487): 2114–7.
- [25] LI J, LI G, HUANG Z, et al. The self-propelled force model of a multi-orifice nozzle for radial jet drilling[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 24: 441–8.
- [26] 毕刚, 马东军, 李根生, 等. 水力喷射侧钻径向水平井眼延伸能力[J]. *断块油气田*, 2016, 23(05): 643–647. [BI G, MA D J, LI G S, et al. Extendibility of radial horizontal wellbore with hydraulic jet sidetracking[J]. *Fault Block Oil and Gas Field*, 2016, 23(05): 643–647.]
- [27] HUANG Z, HUANG Z W, SU Y N, et al. A feasible method for the trajectory measurement of radial jet drilling laterals[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2019, 35(1).
- [28] HUANG Z, HUANG Z W, WU L, et al. Trajectory measurement of radial jet drilling wells: Improved tool and data processing[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 142(3).
- [29] HUANG Z, HUANG Z W, SU Y N, et al. Where the laterals go? A feasible way for the trajectory measurement of radial jet drilling wells[C]. *America: Society of Petroleum Engineers*, 2018.
- [30] 李淑霞, 刘佳丽, 武迪迪, 等. 神狐海域水合物藏降压开采的数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(24): 38–43. [LI S X, LIU J L, WU D D, et al. Numerical simulation of depressurized mining of hydrate reservoirs in Shenhu sea area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(24): 38–43.]
- [31] SUN J, NING F, LIU T, et al. Gas production from a silty hydrate reservoir in the South China Sea using hydraulic fracturing: A numerical simulation[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(4): 1106–22.
- [32] LI G, LI X S, ZHANG K, et al. Effects of impermeable boundaries on gas production from hydrate accumulations in the Shenhu Area of the South China Sea[J]. *Energies*, 2013, 6(8): 4078–96.
- [33] AZIZ K. *Petroleum reservoir simulation*[J]. *Applied Science Publishers*, 1979, 476.
- [34] VAN G M T. A closed - form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil science society of America journal*, 1980, 44(5): 892–8.

(编辑 马桂霞)