

天然气水合物试采技术

杜卫刚

中国石油集团海洋工程有限公司天津分公司 天津 300451

通讯作者:Email:duwg.cpo@cnpc.com.cn

引用:杜卫刚. 天然气水合物试采技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(1): 20-24.

Cite: DU Weigang. Production test technology of natural gas hydrate [J]. Well Testing, 2019, 28(1): 20-24.

摘要 天然气水合物试采期间,储层分解可能导致井筒失稳,井筒中水合物的二次生成易造成管柱堵塞、套管破坏、井喷等生产事故。基于1965年前苏联陆地冻土天然气水合物试采到我国南海海域天然气水合物试采所取得的成果,分析了热注法、降压法、化学剂注入法、气体置换法等试采方法的原理、应用及其优缺点,同时介绍了近年水合物试采实验研究新方法新理论。分析表明,降压法是目前水合物试采中最成熟的试采方法,建议与其他试采方法联合使用,进一步提高天然气水合物的试采产量。

关键词 天然气水合物; 试采; 降压法; 热注法; 化学剂注入法; 气体置换法; 产量

中图分类号: TE37 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.2019.01.004

Production test technology of natural gas hydrate

DU Weigang

Tianjin Branch of CNPC Offshore Engineering Company Limited, Tianjin 300451, China

Abstract: During the production test of natural gas hydrate, the decomposition of reservoir may lead to the instability of wellbore, and the regeneration of hydrate in wellbore may cause the string blockage, casing damage, blowout and other incidents. Based on the production test results of natural gas hydrate from the land permafrost of the former Soviet Union in 1965 to the South China Sea, this paper analyzed the principle, application, advantages and disadvantages of the production test methods such as heat injection, depressurization, chemical injection and gas displacement, and introduced the new method and theory used in the experimental study on production test of natural gas hydrate in recent years. The analysis results show that the depressurization is the most mature method for production test of hydrate. It is suggested to use the depressurization in combination with other methods, so as to further improve the testing production of natural gas hydrate.

Keywords: natural gas hydrate; production test; depressurization; heat injection; chemical injection; gas displacement; yield

天然气水合物(以下简称水合物)是由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质,一般分布于深海沉积物或陆域的永久冻土中,因其外观像冰一样且遇火即可燃烧,所以又被称作可燃冰。水合物是一种规模巨大的新型绿色能源,据测算,其热当值相当于目前已探明的所有化石燃料(包括煤、石油和天然气)总和的2倍,可供人类使用约1000年^[1]。

1965年前苏联在西伯利亚麦索雅哈(Messoyakha)气田开发过程中发现多年冻土层内存在大量的水合物^[2],并尝试对水合物进行试采,试采成功。因此,前苏联成为世界上首个试采水合物成功的国家。该区块从1969年开始试采到1990年最终停

产,间歇生产17年,生产约 $51.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 气体^[3]。1998年加拿大联合日本,在加拿大麦肯齐(Mackenzie)三角洲地区开展Mallik 2 L-38井水合物开采,试采工程历时39 d,钻井深度1 150.0 m,钻探取芯8次。由于恶劣天气和一些机械故障,使得试采项目被迫取消。2002年加拿大联合日本、美国等5个国家开展Mallik 5 L-38井试采工作。该井连续试采5 d,累计产气量 470 m^3 ,最高产气量 $350 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2007年加拿大重返Mallik 2 L-38井进行水合物试采工作。2007年4月进行了短暂的水合物试采,12.5 h内产气 830 m^3 ,产水 20 m^3 。2008年3月10-16日再次试采Mallik 2 L-38井,成功产气 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,成为水合物试采历史上又一里程碑。2012年美

国在阿拉斯加 Ignik Sikumi1 井成功试采水合物,试采持续 38 d,实际生产 30 d,累计产气 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[4]。2013 年日本实施了世界上首次海域水合物试采工作,作业水深 1 006 m^[5],试采持续 6 d,产气 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均日产气 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$,累计产水达 1 245 m³^[6]。2017 年日本再次实施海域水合物试采,第一口试采井 5 月 4-15 日试采 12 d,累计产气 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,因出砂问题而中止。第二口试采井 6 月 5-28 日试采 24 d,累计产气约 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[7]。

我国对于水合物的研究从 1995 年开始,并于 2007 年 5 月成功获取水合物实物样品。2017 年 5 月 10 日-7 月 9 日在我国南海神狐海域水合物试采连续进行 60 d,累计产气 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[7]。此次试采成功是我国首次、也是世界首次实现资源量占全球 90% 以上、开发难度最大的泥质粉砂型水合物的安全可控开采。

1 水合物试采技术难点

水合物形成条件特殊,存在于低温高压的环境中,分布在永久冻土带和深海浅层沉积物中,试采工作环境恶劣,需要采用特殊的试采设备。水合物储层胶结差,试采期间,储层分解会导致出砂造成砂堵或地层沉降导致井筒失稳,特别是海底水合物储层大多没有完整的圈闭构造和致密盖层,开发可能导致海底滑坡等地质灾害,风险较大^[8]。水合物试采过程中因温度和压力的变化,试采井筒可能二

次生成水合物^[9],导致试采管柱堵塞、套管破坏、井喷等生产事故,进而引发污染等自然灾害。因此,水合物的试采难度很大。

2 水合物试采技术

目前对于水合物的试采,并没有成熟公认的试采技术,这是因为水合物试采过程中涉及多相传递和转换,试采过程复杂且可能带来一系列的环境问题。目前,水合物试采技术主要有热注法、降压法、注化学抑制剂法、置换法,以及几种方法的联合使用。试采的主要原理是打破水合物存在的温度-压力条件,使水合物进行分解,然后进行试采。

2.1 热注法

热注法的原理是在不改变储层压力的条件下,通过注入加热的流体(蒸汽、热水等)或直接加热储层,打破水合物稳定存在的温度条件,促使水合物的分解。2002 年加拿大麦肯齐三角洲 Mallik 5 L-38 井采用热注法进行试采,其井身结构及试采流程如图 1 所示。将对储层水合物加热用的 KCl 泥浆加温到 50 ℃ 以上,KCl 泥浆通过 42.3 mm 的注入管柱到达水合物储层。水合物因温度的变化分解,生成的气体、水,以及温度降低的 KCl 泥浆从 88.9 mm 管柱与 42.3 mm 管线环空返回到地面,经分离器分离出气体进行燃烧,液体进入加温装置加温后,再经泥浆泵注入管柱到达水合物储层继续使水合物分解,注入过程循环进行。

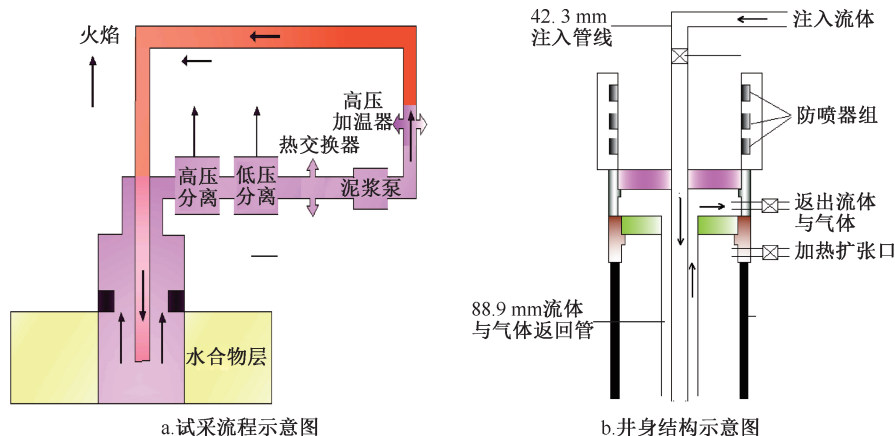


图1 加拿大麦肯齐三角洲 Mallik 5 L-38 井试采流程图(引自文献[10])

Fig.1 Production test process of Well Mallik 5 L-38 in McKenzie Delta, Canada^[10]

Mallik 5 L-38 井采用热注法试采水合物,证明这种方法是有效的^[11]。热注法经研究衍生出循环注入热流体加热、火驱法加热、井下电磁加热,以及微波加热等方法,通过直接加热水合物储层,促使水合物分解。热注法的主要缺点在于热利用效率

较低,试采过程难以实现大量的能量注入^[12],即便是被认为能量效率较高的电磁加热方法最终能量效率也仅有 40%^[13]。

2.2 降压法

降压法是在不改变水合物储层温度的条件下,

通过降低水合物储层压力,使水合物稳定存在的压力条件被打破而达到水合物分解。该方法是目前试采中应用最普遍的试采方法,被认为是最具有经济潜力的试采技术^[14]。降压法最早在俄罗斯西伯利亚麦索雅哈水合物试采开发中应用。2002年加拿大麦肯齐三角洲 Mallik 5 L-38 井采用热注法试采水合物同时进行了降压试验,在原理和实践上证明降压法可行。2008年加拿大麦肯齐三角洲 Mallik 2 L-38井单独使用降压法进行试采,井身结构和井下装置如图2所示^[11]。

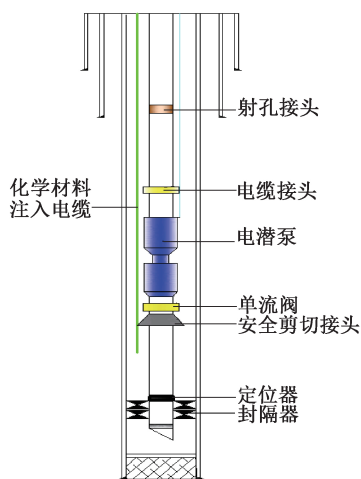


图2 Mallik 2 L-38 井试采井井下管柱结构(引自文献[11])
Fig.2 Structure of downhole string in Well Mallik 2 L-38^[11]

电潜泵用于提升井筒中水降低井筒压力达到水合物分解。2013年日本南海海槽第一次试采采用降压法进行,井身结构和井下装置如图3所示^[15]。

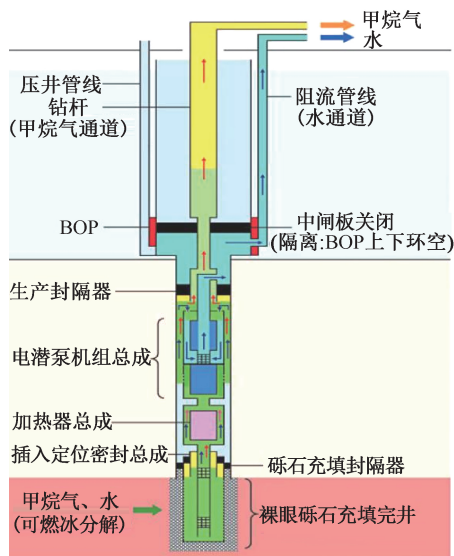


图3 日本海域水合物试采流程图(引自文献[15])
Fig.3 Process of hydrate production test in Japan Sea^[15]

管柱结构增加了防砂设计,同样应用电潜泵降压,试采过程中采用了气液分离的生产模式。此外,管柱结构中还增加了加热器,但因其损坏没有得到应用。2017年第二次、第三次试采均采用降压法,试采管柱基本相同,只是去除了加热器,采用膨胀筛管完井。2017年我国南海海域水合物试采同样采用降压法进行试采,并取得成功。

降压法试采的关键在于降低储层的压力,打破水合物的相平衡而进行试采。目前,均采用电潜泵降低井内的静液柱压力,使储层压力降低促进水合物的分解。然后,通过人工举升将水合物分离出的气体、流体举升到井口,持续降低水合物储层的压力来实现降压开采。

从目前试采应用来看,降压法应用最广,从冻土层水合物到海域水合物均得到应用。其优点在于开采过程相对经济简单,有利于大规模开采,不需要额外的能量补充。缺点在于只有当水合物储层位于温压平衡边界附近时,降压开采法才具有经济可行性。同时,由于水合物分解过程吸热,导致储层温度不断降低,影响产气效率,甚至有些地层温度过低,又会达到一种新的相平衡,最终不再分解。

2.3 化学剂注入法

化学剂注入法是利用水合物与某些化学物质(如甲醇、乙醇、乙二醇和盐水等)混合后能够改变水合物相平衡的条件,打破水合物稳定存在状态促使其分解,来实现水合物的试采。前苏联西伯利亚麦索雅哈冻土水合物开发中应用该方法,通过注入甲醇和氯化钙等水合物抑制剂促进水合物的进一步分解。该方法对于抑制水合物二次生成效果明显,但对促进水合物分解效果不是很明显。同时,由于此方法对储层及环境的影响并不确定,且所需的化学试剂费用昂贵,与水合物表面接触困难,分解作用缓慢,基本作为防止水合物二次生成使用。

2.4 气体置换法

气体置换法是利用 CO_2 更容易生成水合物的物理化学特性,通过在某一特定的压力范围内向储层内注入 CO_2 , CO_2 与水合物分解出的水形成新的 CO_2 水合物,并释放出热量使水合物的分解反应持续进行,从而置换出甲烷气体。美国在2012年阿拉斯加北坡冻土水合物试采项目中应用 CO_2 置换法,其井身结构如图4所示^[16]。先通过流体通道将 CO_2 与 N_2 混合液体注入到井内,13 d 共注入

798 823 m³混合液体,之后关井4 d。试采通过泵辅助降低储层压力,同时准备有连续油管排液有利于水合物分解,30 d生产甲烷气体28 317 m³。

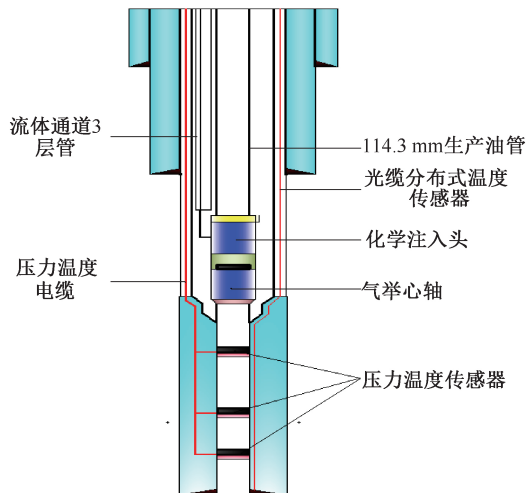


图4 美国CO₂置换法试采管柱结构示意图(引自文献[16])

Fig.4 Schematic diagram of CO₂ displacement method in the United States [16]

气体置换法的优点在于形成CO₂水合物的热量比分解水合物的热量要多20%,有利于水合物储层的持续分解。CO₂将甲烷从水合物中置换出来形成稳定的CO₂水合物,没有生产性废水,形成更加稳定的CO₂水合物,增加储层稳定性,避免了潜在的地质灾害。缺点在于气体生产率偏低,需要消耗大量的化学材料和使用特殊设备,试采成本较高。

2.5 其他试采方法

除了上述方法外,一些学者也提出了新的试采思路。刘守为等提出了水合物的固态流化法试采,通过井底的射流将水合物储层破碎成细小颗粒,然后随钻井液沿井筒向上返出至海面平台,最后分离得到天然气^[17]。张旭辉等提出了机械-热联合法,通过机械挖掘水合物地层,并将水合物粉脆成小颗粒,然后使其与海水掺混,通过热传导和对流换热促使水合物分解^[18]。Khlebnikov V. N.等提出了热力学抑制剂与CO₂同注开采水合物的方法,简称抑制剂-置换法,通过实验验证该方法可促进CH₄水合物的分解,提高其开采效率^[19]。李淑霞等提出了注热盐水法,通过实验证明当注入水盐度较大(达到10%后)时,水合物快速分解,注热水盐度的增加可以加快水合物的开采速度^[20]。

3 结论

(1)通过对热注法、降压法、注化学试剂法、气

体置换法等试采技术的应用及优缺点分析,认为降压法是目前水合物试采应用最多、最广、最成熟的一种试采方法,目前国内外水合物试采研究也主要集中在降压法上。

(2)单一的试采技术在一定程度上限制水合物试采产量的提高,建议将注热法、气体置换法、化学剂注入法等与降压法联合使用。

(3)水合物的试采方法应与水合物储层特性相匹配,并制定合理的生产制度,避免试采过程中水合物的二次生成,以及储层出砂造成的试采中断。

(4)目前水合物试采技术还不能实现商业开采,需要对试采技术进行不断创新、验证、改进,找到更合适的开采方法,以期早日实现商业开采,解决能源、环境问题。

致谢:感谢中国石油集团工程技术有限公司海洋钻采工艺研究所提供大量参考文献,以及编撰过程中有关老师的细心指导。

参考文献

- [1] 朱超祁,张民生,刘晓磊,等. 海底天然气水合物开采导致的地质灾害及其监测技术[J]. 灾害学,2017,32(3):51-56. ZHU Chaoqi, ZHANG Minsheng, LIU Xiaolei, et al. Gas hydrates: Production, geohazards and monitoring [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3):51-56.
- [2] COLLET T S, GNSBURG G D. Gas hydrates in Messoyakha gas field of the West Siberian Basin-A re-examination of the geologic evidence [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1998,8(1):22-29.
- [3] COLLETT T S, LADD J. Detection of gas hydrate with down hole logs and assessment of gas hydrate concentration (saturations) and gas volumes on the Blake ridge with electrical resistivity log data [C]. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 2000,164:179-191.
- [4] RUPRECHT Y C M, HORNER J, WHITE M D. Experimental and numerical investigation of guest molecule exchange kinetics based on the 2012 Ignik Sikumi gas hydrate field trial [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 35:1480-1489.
- [5] YAMAMOTO K, FUJII T. Drilling and data acquisition programs for the methane hydrate offshore production test in the Eastern Nankai Trough [C]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2013.
- [6] YAMAMOTO K, TERAOKA Y, FUJII T, et al. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough [R]. Japan Geoscience Union Meeting, 2014.
- [7] 魏伟,张金华,于荣泽,等. 2017年天然气水合物研发热点回眸[J]. 科技导报,2018,36(1):83-90. WEI Wei, ZHANG Jinhua, YU Rongze, et al. The review

- of research on natural hydrate in 2017 [J]. Science & Technology Review, 2018,36(1):83-90.
- [8] 朱超祁,贾永刚,刘晓磊,等. 海底滑坡分类及成因机制研究进展[J]. 海洋地质与第四地质,2015,35(6):153-163.
ZHU Chaoqi, JIA Yonggang, LIU Xiaolei, et al. Review on research of submarine landslide classification and genesis [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(6):153-163.
- [9] 张峥,王春晓,张鸿超. 吉林探区深层天然气井水合物形成机理分析与探索[J]. 油气井测试, 2013, 22(6): 24-27.
ZHANG Zheng, WANG Chunxiao, ZHANG Hongchao. Analysis and research on the formation mechanism of the deep gas well hydrate in Jilin exploration area [J]. Well Testing, 2013, 22(6):24-27
- [10] 栾锡武,赵克斌,孙冬胜,等. 天然气水合物的开采——以马利克钻井为例[J]. 地球物理学进展, 2007,22(4):1295-1304.
LUAN Xiwu, ZHAO Kebin, SUN Dongsheng, et al. Gas hydrates production-In case of Mallik test well [J]. Progress in Geophysics, 2007,22(4):1295-1304.
- [11] 左汝强,李艺. 加拿大 Mallik 陆域永冻带天然气水合物成功试采回顾[J]. 探矿工程(岩土挖掘工程), 2017, 44(8):1-12.
ZUO Ruqiang, LI Yi. The review of Mallik NGH successful production tests in Canada's permafrost zone [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(8):1-12.
- [12] KAMATH V A, GODBOLE S P. Evaluation of hot-brine stimulation technique for gas production from natural gas hydrates [J]. Journal of Petroleum Technology, 1987,39(11):1379-1388.
- [13] ISLAM M R. A new recovery technique for gas production from Alaskan gas hydrates [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 1991,11(4):267 - 281.
- [14] HUANG N S, LI Q P, LI G, et al. Experimental investigation into factors influencing methane hydrate formation and a novel method for hydrate formation in porous media [J]. Energy & Fuels, 2013,27(7):3751-3757.
- [15] 王星,孙子刚,张自印,等. 海域天然气水合物试采实践与技术分析[J]. 石油钻采工艺,2017,39(6):744-750.
WANG Xing, SUN Zigang, ZHANG Ziyin, et al. Practical production test of natural gas hydrate in sea areas and its technological analysis [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017,39(6):744-750.
- [16] 左汝强,李艺. 美国阿拉斯加北坡永冻带天然气水合物研究和成功试采[J]. 探矿工程(岩土挖掘工程), 2017,44(10):1-17.
ZUO Ruqiang, LI Yi. The research and successful production test for NGH in Alaska North Slope, USA [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(10):1-17.
- [17] 周守为,赵金洲,李清平,等. 全球首次海洋天然气水合物固态流化试采工程参数优化设计[J]. 天然气工业,2017,37(9):1-14.
ZHOU Shouwei, ZHAO Jinzhou, LI Qingping, et al. Optimal design of the engineering parameters for the first global trial production of marine natural gas hydrates through solid fluidization [J]. Natural Gas Industry, 2017,37(9):1-14.
- [18] 张旭辉,鲁晓兵. 一种新的海洋浅层水合物开采法——机械-热联合法[J]. 力学学报, 2016,48(5):1238-1246.
ZHANG Xuhui, LU Xiaobing. A new exploitation method for gas hydrate in shallow stratum: Mechanical-thermal method [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016,48(5):1238-1246.
- [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室研究[J]. 天然气工业,2017,37(12):40-46.
KHLEBNIKOV V N, GUSHCHIN P A, ANTONOV S V, et al. Simultaneous injection of thermodynamic inhibitors and CO₂ to exploit natural gas hydrate: An experimental study [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(12):40-46.
- [20] 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.
LI Shuxia, LI Jie, CAO Wen. Experimental studies on the effects of hot brine salinity on gas hydrate production [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2015,29(2):482-486.

编辑 刘述忍

第一作者简介:杜卫刚,男,1985年4月出生,工程师,2008年毕业于中国石油大学(华东)机械设计制造及其自动化专业,现从事储层改造与完井防砂工作。电话:022-66306297,13512940743;Email:duwg.cpo@cnpc.com.cn。通信地址:天津市塘沽区福建北路1019号石油科技大厦四楼,邮政编码:300451。