

◆深水钻井完井专题▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.03.009

深水钻井防喷器温度场数值模拟研究

赵欣欣, 吴雪峰, 高永海, 李昊, 郭艳利

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:深水防喷器所处环境为低温高压,如有气侵出现,容易在防喷器位置生成天然气水合物,阻塞防喷器,产生井口安全隐患。为此,结合深水钻井工况,建立了深水钻井条件下闸板防喷器与环形防喷器的三维空间模型,并利用 Fluent 软件进行了温度场数值模拟,得到了防喷器不同位置的温度场分布。在此基础上,结合天然气水合物生成条件分析了防喷器的温度场分布,以及加热管对防喷器温度场的影响规律,并优选了加热管的布置位置。结果表明,在模拟环境条件下,闸板防喷器横向位置依靠防喷器通径内壁加热即可满足天然气水合物预防要求,在纵向侧面 1/4 处布置加热管效果较好;管线数量对环形防喷器温度场的影响很大,为满足温度高于天然气水合物形成温度的要求,可以将优化加热管数量与保温措施结合起来进行。

关键词:深水钻井 防喷器 温度分布 数值模拟 天然气水合物

中图分类号:TE52; TE921⁺.5 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2013)03-0046-05

Numerical Simulation of Temperature Distribution of Blowout Preventers in Deepwater Drilling

Zhao Xinxin, Wu Xuefeng, Gao Yonghai, Li Hao, Guo Yanli

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: In case of gas cutting, hydrate is likely to form in deep water blowout preventers due to low temperature and high pressure and block the blowout preventers, which might compose safety threat at wellhead. Combining deepwater drilling conditions, 3D models of ram preventers and annular blowout preventers in deepwater drilling condition were built-up, and numerical simulation of temperature field was performed to obtain the temperature distribution across the preventer. Then optimal heating locations of pipes were chosen according to the effect of heating pipe on blowout preventer temperature field. Result showed in the simulated temperature that heating by annulus itself in the transverse direction of the ram BOP, and heating pipe around 1/4 part of the longitudinal section could meet the requirements of preventing gas hydrate formation. Quantity of heating pipes has large influence on the temperature field of annular BOP. Optimization of pipe quantity and insulation combination should be considered to keep the temperature at annular BOP over hydrate formation temperature.

Key words: deepwater drilling; blowout preventer; temperature distribution; numerical simulation; natural gas hydrate

水下防喷器是保证钻探安全的重要设备之一,更是开井、关井的关键设备。防喷器处深水的低温和高压环境,尤其是关井后和开井前的流动间歇极易形成天然气水合物,造成防喷器阻塞,产生安全隐患^[1]。因此,必须要对水下防喷器的温度分布进行分析,以研究天然气水合物的分布情况^[2-3]。C. R. Lin 等人^[4]曾经对海底防喷器温度场进行了分析,采用三维有限元模型研究了深水防喷器和橡胶密封件的温度场分布;同时,还对二维分析结果和三维有限元分析结果进行了对比,证明两者在温度分布上

收稿日期:2013-03-01; 改回日期:2013-05-13。

作者简介:赵欣欣(1977—),女,河北涿州人,2000 年毕业于山东工程学院机械电子工程专业,2003 获石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位,讲师,现从事油气井流体力学和传热方面的教学与研究工作。

联系方式:(0532)86981928, zhaox@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“深水钻井中的气液两相流传热规律研究”(编号:51004113)、国家科技重大专项子课题“深水钻井水力学及井控关键技术研究”(编号:2011ZX05026-001-02)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目“海洋油气井钻完井理论与工程”(编号:IRT1086)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:13CX05006A)资助。

具有相同的趋势;但是,其中并未结合深水环境下容易形成天然气水合物的具体情况进行研究。因此,笔者对防喷器的温度场分布进行了模拟,并结合天然气水合物生成温度确定了防喷器中天然气水合物的生成区域,提出了初步的加热方案,以避免天然气水合物在防喷器关键区域生成。

1 防喷器模型的建立

防喷器可分为闸板防喷器和环形防喷器。用长方体模拟单闸板防喷器,圆柱体来模拟环形防喷器。中心圆柱空腔为防喷器通径,取实际尺寸,用以安放钻杆和密封胶塞^[5-6]。采用 Gambit 软件进行防喷器建模与网络划分。

1.1 几何模型

1.1.1 闸板防喷器

以 CAMERON 公司的一款闸板防喷器为原型建模。防喷器通径为 346.1 mm,钻杆尺寸为 139.7 mm。该防喷器的结构和尺寸如图 1 所示^[7]。

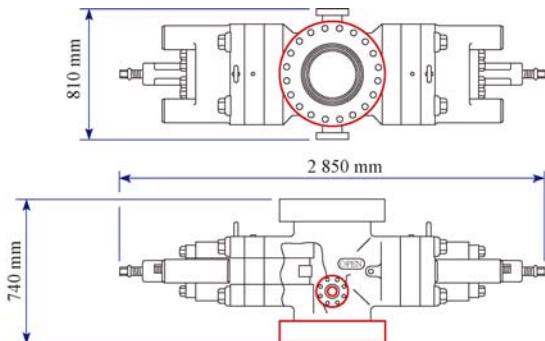


图 1 闸板防喷器实际结构

Fig. 1 Structure of the ram BOP

为便于运算,将单闸板防喷器简化为一个长方体,模型如图 2 所示。图 2 中,中心圆柱为防喷器通径,尺寸为 346.1 mm;分布的 4 个直径 80 mm 的小圆柱为加热管,用以提供热源。加热端口直径为 80 mm,圆心坐标分别为(712.5 mm, 185.0 mm)、(712.5 mm, -185.0 mm)、(-712.5 mm, 185.0 mm)和(-712.5 mm, -185.0 mm)。

1.1.2 环形防喷器

以 Hydril #539.8 mm 13.8 MPa 环形防喷器为原型建模,将其简化为一个圆柱体,中心处为通径。钻杆尺寸为 139.7 mm。该防喷器的结构和尺寸如图 3 所示。

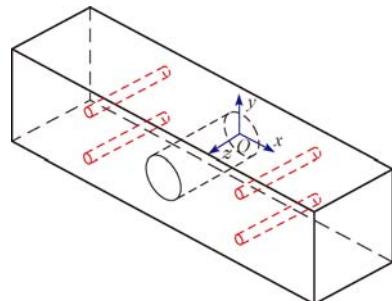


图 2 模拟的单闸板防喷器几何模型

Fig. 2 Geometric model of the single ram BOP

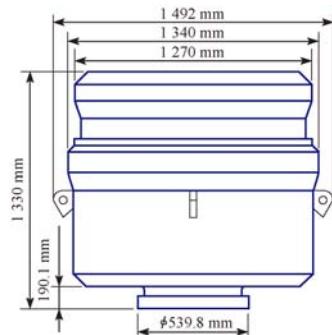


图 3 环形防喷器实际结构

Fig. 3 Structure of the annular BOP

模型如图 4 所示。图 4 中,中心圆柱为防喷器通径,尺寸为 539.8 mm,用于安放钻杆和密封胶塞;分布的 4 个直径 80 mm 的小圆柱为加热管,圆心坐标分别为(463.5 mm, 0 mm)、(0 mm, 463.5 mm)、(-463.5 mm, 0 mm)和(0 mm, -463.5 mm),用以提供模拟热源。

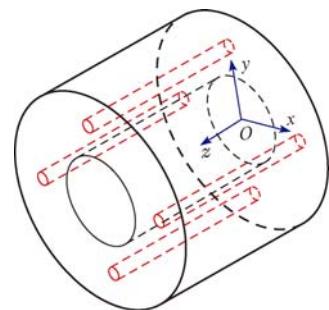


图 4 模拟的环形防喷器几何模型

Fig. 4 Geometric model of the annular BOP

1.2 相关理论模型及边界条件

因为所建模型中主要为径向传热,所以忽略管道沿轴线方向的传热,分析能量守恒定律可以得出其数学模型。

防喷器内部为热传导^[8-9]:

1) 对于单闸板防喷器模型

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

2) 对于环形防喷器模型

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] = 0 \quad (2)$$

式中: x, y, z 为单闸板防喷器上一点的坐标(以防喷器中心为原点); r 为环形防喷器上一点的径向坐标(柱坐标系); λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

防喷器与海水为对流换热:

1) 对于单闸板防喷器模型

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_s) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_s) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_s) \end{cases} \quad (3)$$

2) 对于环形防喷器模型

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_s) \quad (4)$$

式中: h 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T 为防喷器温度, K ; T_s 为海底处环境温度, K 。

其中, 模型中共有 2 种边界: 定温边界(共 5 个, 包括防喷器内壁和 4 个加热管内壁), 自由散热边界(共 3 个)。

通径内壁和注水管内壁为定温边界, 温度分别为 288 和 323 K; 深水海水温度受外界影响很小, 趋于稳定, 取 $T_s = 278 \text{ K}$ 。防喷器与海水的交界面为自由散热表面, 将其设置为对流换热型边界条件, 对流传热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。防喷器本体选择全钢结构, 密度为 $8030 \text{ kg}/\text{m}^3$; 比热容为 $502.48 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 热导率为 $16.27 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 水深 1000 m 。采用稳态传热模型进行模拟分析, 得到防喷器温度场分布。

2 模拟结果分析

在几何模型与定解条件的基础上, 进行防喷器温度场的模拟。根据有限元软件 Fluent 计算的数值结果, 得到闸板和环形防喷器的温度场分布, 结合天然气水合物的生成条件, 预测可能出现天然气水合物的区域, 并就不同防喷器温度场的分布进行了分析。

2.1 单闸板防喷器温度分布

单闸板防喷器模型为长方体型, 其特点为: 狹长形结构, x 方向(纵向)上较长, y 方向(横向)较短。具体温度分布如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 模型温度在 $278 \sim 323 \text{ K}$ 之间, 4 个加热管温度最高(为 323 K); 中心通径温度

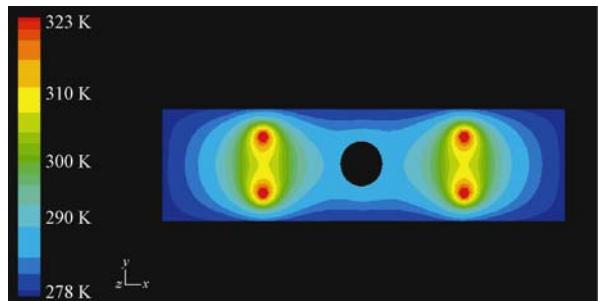


图 5 单闸板防喷器温度分布

Fig. 5 Temperature distribution across single ram BOP

在设定的 288 K 左右; 低温区域分布在防喷器的边缘, 为防喷器与海水环境进行温度交换的主要区域, 温度较低, 大致在 278 K 。

图 5 的温度分布结果显示, 整个系统的热源有 2 个: 加热管为主热源, 向防喷器周围提供热量, 通径面因为温度较外界环境温度高, 内壁周围的温度向四周递减, y 方向上由于距离较短, 在靠近边界的位置仍然保持了 280 K 左右的温度; x 方向上因为功能性的需要, 长度较 y 方向上长很多, 由于存在 4 个加热管, 2 个热源的温度场叠加, 从中心通径到加热管之间的温度整体保持在 296 K 左右, 从加热管到四周温度逐渐下降。整体来看, 290 K 以上的温度占整个断面的大部分, 低温只出现在周围区域, 温度分布较为理想。

2.2 环形防喷器温度分布

环形防喷器模拟计算结果见图 6。从图 6 可以看出, 模型温度在 $278 \sim 323 \text{ K}$ 之间, 4 个加热管区域温度最高(为 323 K); 中心通径温度在设定的 288 K 左右; 低温区域分布在防喷器的边缘并且远离加热管的区域, 为防喷器与海水环境进行温度交换的主要区域, 温度较低, 大致在 278 K 左右。

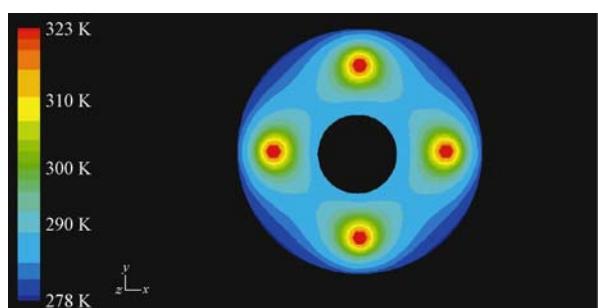


图 6 环形防喷器温度分布

Fig. 6 Temperature distribution across annular BOP

和单闸板防喷器一样, 整个系统也有 2 个热源, 分别为 4 个加热管和 1 个通径内壁。主热源为加热

管,能量从加热管流向外壁和防喷器通径;次热源为通径内壁,2 个热源的温度场在中间区域相互叠加,使温度在这一区域保持稳定且较高。

3 加热位置讨论

海底的低温高压环境有利于天然气水合物的生成。为避免该情况的产生,可以从加热角度进行考虑,在模拟结果的基础上,对几种可能采取的加热布置方式进行讨论,分析了加热措施对闸板防喷器和环形防喷器的影响规律。

3.1 单闸板防喷器加热管位置

鉴于实际情况下对结构和安装的考虑,加热管往往不能放置在防喷器本体内。因此尝试将加热管放置在防喷器边缘,然后分析其温度场分布,具体方式及结果见图 7。考虑到纵向端部温度较低,因此加热位置应主要分布于防喷器纵向上。

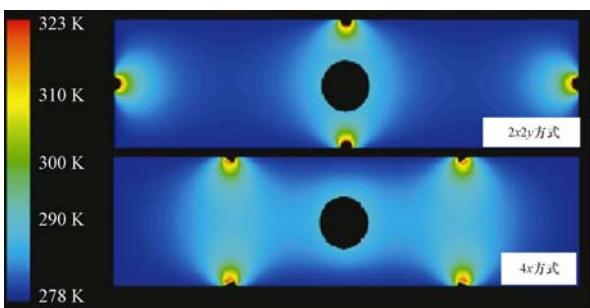


图 7 单闸板防喷器 2x2y 与 4x 方式布置加热管时的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of the single ram BOP with 2x2y heating pipe and 4x heating pipe

将加热管放置在长、宽方向的中间位置(即 2x2y 方式,图 7 上部图形)进行模拟,结果表明,4 个加热管对防喷器主体温度的影响不大,仅仅局限在纵向两端;而纵向中端的大部分温度仍然较低,在 280~284 K 之间;主热源(加热管)和次热源(通径)距离较大,在两热源之间形成了一定的低温区域,温度在 283 K 左右,纵向端部的热源也并没有给边缘区域带来很好的加热效果。所以,对于单闸板防喷器这种纵向和横向上差距较大的防喷器,该布置方法不合适。

由于横向上长度较短,仅次热源已经足够,主热源主要布置在纵向上,将加热管设在 x 方向 1/4 等分处(即 4x 方式,图 7 下部图形)。由图 7 可知,纵向上大部分区域温度较高,在 285 K 以上,部分边缘

区域分度较低。靠近防喷器通径区域温度较高,在 287 K 以上,高于 1 000 m 水深条件下天然气水合物的形成温度,该方式是一种比较理想的布置方式。

3.2 环形防喷器加热管位置

在环形边缘区域平均分布 4 根和 6 根加热管,通过防喷器向四周传热。计算结果如图 8 所示。

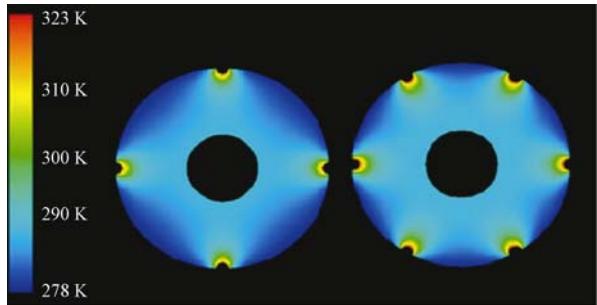


图 8 4 根和 6 根加热管均布在环形防喷器边缘时的温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of the annular BOP with 4 heating pipes and 6 heating pipes

由图 8 可知,由于有加热管的存在,防喷器近加热管边缘区域温度较高,在 286 K 左右;远离加热管的边缘处温度较低。与内置加热管相比,边缘加热管布局对热源的利用率不高,原因在于当加热管全部埋在防喷器中时,加热面积较大,而边缘加热时每个加热管仅有 1/2 部分用于加热,故效率不高。6 根加热管与 4 根加热管相比,整个温度场分布有了较大改善,防喷器整体温度升高了 2~5 ℃,但对部分边缘区域温度影响不大,可以考虑结合保温材料等方式来提高防喷器的整体温度。

4 可能生成天然气水合物的位置

根据天然气水合物相态曲线,甲烷在 10 MPa 压力下的生成温度为 14 ℃左右^[10]。结合上述未设置加热点板防喷器,以及 3 种加热情况的温度纵向分布与 10 MPa 下的天然气水合物生成温度进行比较,结果如图 9 所示。其中,Δt 是防喷器温度与模拟环境下天然气水合物生成温度的差,Δt>0 表示不会有天然气水合物生成,Δt<0 则有可能生成天然气水合物。

从图 9 可以看出:单闸板防喷器若无加热措施,几乎全在临界温度以下;单纯从加热角度来看,内置加热措施效果最好,除边缘外均在临界温度以上,但实际安装操作不可行;2x2y 方式布置意义不大,近井

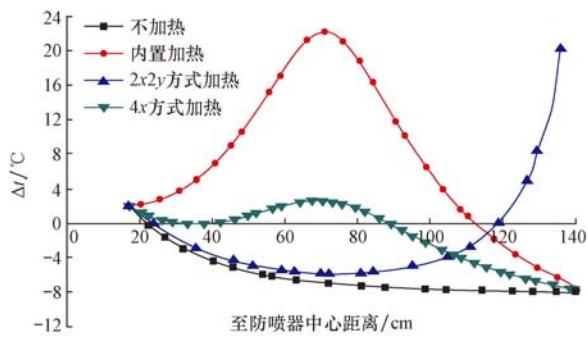


图 9 闸板防喷器的径向温度分布

Fig. 9 Radial temperature distribution of the single ram BOP

筒区域几乎未受加热影响;4x式布置对防喷器有较好的效果,可以使近井筒地带不生成天然气水合物,是一种比较理想的加热布置方式。

对于环形防喷器,取较低的径向温度跟10 MPa下天然气水合物的生成温度进行比较,结果如图10所示。

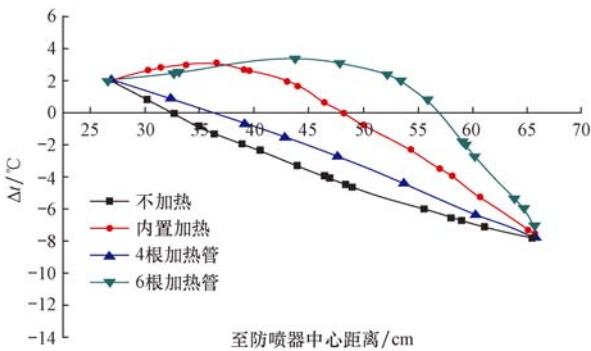


图 10 环形防喷器的径向温度分布

Fig. 10 Radial temperature distribution of the annular BOP

由图10可知:在模拟环境条件下,沿边缘均匀布置的4根加热管加热效果不明显,虽然比未加热时整体温度略高,但仅有35%的区域在天然气水合物的生成温度以上;内置加热时,近井筒约70%区域的温度在临界温度以上;布置6根加热管时,防喷器整体温度进一步提高,不会生成天然气水合物的区域约占85%,该布置方案加热效果较好。

5 结 论

1) 结合水深与天然气水合物的生成温度和压 力可确定防喷器所需的加热温度,应合理布置加热方式以及保温措施,避免防喷器关键部件发生天然气水合物阻塞。

2) 闸板防喷器纵向尺寸大于横向,横向依靠防喷器通径内壁加热即可;纵向位置需要对加热管布

置进行优化,以取得较好的加热效果。计算结果表明,在纵向1/4位置布置加热管效果较好。

3) 在模拟条件下,环形防喷器在边缘布置4根加热管时效果不明显,布置6根加热管能保证环形防喷器大部分温度高于天然气水合物的生成温度,如要进一步提高环形防喷器的温度,需要结合其他保温措施进行。

参 考 文 献

References

- [1] Shing-Ming Chen. Un-planned shut-in and deepwater gas hydrate prevention[R]. OTC 20436, 2010.
- [2] 苏堪华,管志川,苏义脑.深水钻井水下井口力学稳定性分析[J].石油钻采工艺,2008,30(6):1-4,15.
Su Kanhua, Guan Zhichuan, Su Yinao. Mechanical stability analysis of subsea wellhead for deepwater drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(6):1-4, 15.
- [3] 王定亚,邓平,刘文霄.海洋水下井口和采油装备技术现状及发展方向[J].石油机械,2011,39(1):75-79.
Wang Dingya, Deng Ping, Liu Wenxiao. Technology and trend of subsea wellhead and production equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(1):75-79.
- [4] Lin C R, Bunch P D, Li Yousun, et al. Thermal analysis of subsea blowout preventer[R]. OTC 6999, 1992.
- [5] 许亮斌,张红生,周建良,等.深水钻井防喷器选配关键因素分析[J].石油机械,2012,40(6):49-53.
Xu Liangbin, Zhang Hongsheng, Zhou Jianliang, et al. Analysis of the key factors for configuring deepwater drilling BOP[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(6):49-53.
- [6] 曹式敬.超深水防喷器组及其控制系统配置探讨[J].石油钻探技术,2012,40(5):115-118.
Cao Shijing. Discussion on configuration of subsea BOP stack and its control system in ultra-deep water[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5):115-118.
- [7] 谢新设,秦疆,张宝彦,等.FZ35-105防喷器的研制与应用[J].石油钻探技术,2009,37(4):65-67.
Xie Xinshe, Qin Jiang, Zhang Baoyan, et al. Study and application of FZ35-105 blow out preventer[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(4):65-67.
- [8] 高永海,孙宝江,王志远,等.深水钻探井筒温度场的计算与分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(2):58-62.
Gao Yonghai, Sun Baojiang, Wang Zhiyuan, et al. Calculation and analysis of wellbore temperature field in deepwater drilling [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(2):58-62.
- [9] 唐晓东,陈广明,王治红,等.注空气开采海上稠油井筒传热模型研究[J].特种油气藏,2009,16(1):87-91.
Tang Xiaodong, Chen Guangming, Wang Zhihong, et al. Wellbore heat transfer model of recovering offshore heavy oil by air injection[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2009, 16(1):87-91.
- [10] 任韶然,刘建新,刘义兴,等.多孔介质中甲烷水合物形成与分解实验研究[J].石油学报,2009,30(4):583-587.
Ren Shaoran, Liu Jianxin, Liu Yixing, et al. Experimental study on formation and dissociation of methane hydrate in porous media[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4):583-587.

[编辑 令文学]