

文章编号:1009-2722(2012)03-0066-05

平板填砂模型中天然气水合物注热与降压连续开采的实验研究

张卫卫,李淑霞

(中国石油大学(华东)石油工程学院,青岛 266555)

摘要:在平板模型中进行了天然气水合物的注热盐水与降压相结合的分解模拟实验,分析了分解过程中平面温度变化的情况、产气规律、产水规律及能量效率。实验结果表明:注入的热盐水并不能使模型内天然气水合物全部分解,有必要再进行降压分解;气体产出可明显地划分为注热分解产气和降压分解产气 2 个阶段;注热分解阶段产水速率略大于注水速率,降压分解产水速率很慢;注热与降压相结合的开采方式更加有利于天然气水合物的分解和产出,且能有效提高能量效率。

关键词:平板模型;天然气水合物;注热盐水;降压;实验

中图分类号:TE121 **文献标识码:**A

天然气水合物(natural gas hydrates, NGH)是 21 世纪重要的优质、洁净替代能源,其蕴藏量约为现有地球化石燃料(石油、天然气、煤)含碳量总和的 2 倍。目前提出的天然气水合物的开采模式有注热法、降压法、注入化学剂法、CO₂置换法、开矿法^[1-6]和斜井法等。其中,注热法和降压法被认为是最有潜力的开发技术,但注热法开采热损失严重;降压法受到水合物藏初始温度的限制,可见单独应用某一种方法都有其局限性。为此有的学者^[7]进行了一维填砂管中天然气水合物注热+降压分解实验,并对比了不同开采方式下的能量效率,认为注热+降压的开采方式更加有利于天然气水合物的开采,但一维模拟实验装置与实际天然气水合物藏存在较大的差别,所以,笔者利用与实际天然气水合物藏较相近的平板

模型进行了天然气水合物的注热+降压分解实验研究,分析其分解动态及能量效率,从而为今后实际天然气水合物藏的开采提供较为可靠的依据。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

实验装置主要包括二维平板模型、供液模块、供气模块、环境模拟模块、回压控制模块、测量模块、数据采集处理模块 7 个模块(图 1),其中,平板模型填砂厚度 60 mm,平面尺寸为 350 mm×350 mm,其上布置了 16 个温度测点、5 个模拟井、4 个压力测点,具体位置见图 2。

实验用砂为普通石英砂,粒径为 180~600 μm(30~80 目)。模型填砂后孔隙度为 35.09%。实验用水为配制盐水,质量百分比浓度为 2.0%,其中蒸馏水自制,NaCl 纯度≥99.5%。实验所用甲烷气为青岛天源气体公司提供,纯度为 99.9%。

收稿日期:2011-10-28

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(09CX05001A);国家水合物专项(GZH201100310)

作者简介:张卫卫(1983—),男,硕士,主要从事天然气水合物开采机理方面的研究工作。E-mail:zww200320022001@yahoo.com.cn

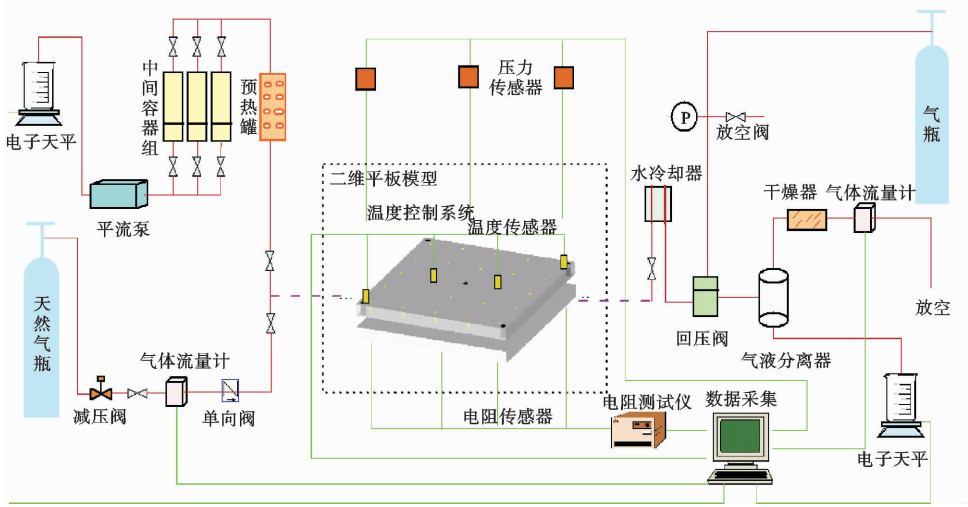


图 1 二维天然气水合物生成与分解实验模拟系统示意图

Fig. 1 A 2D experimental simulation system for NGH formation and dissociation

1.2 实验方法

实验步骤:

(1) 天然气水合物的生成。①通过中心 5# 井 (见图 2) 注入盐水,使填砂模型中饱和盐水;②通过中心 5# 井注入甲烷气体,驱出模型中一定量的盐水;③由中心 5# 井以一定流量匀速向模型内注入 CH₄,当压力达到预定值时,停止注气;④设定恒温箱温度,进行天然气水合物的等容生成,当系统压力不再降低时,即认为 NGH 等容生成已经完成。

(2) 天然气水合物注热分解。保持恒温箱温度恒定,调节回压阀压力与系统内压力一致,然后打开出口阀门。将预热罐温度设为预定温度,待其温度稳定后,由模型中心 5# 井注入热盐水,进行天然气水合物的注热分解,产气口设置在模型侧面 5# 与 9# 测温点之间(图 2),等到模型内不再产气时,注热结束。

(3) 天然气水合物的降压分解。注热盐水结束后,逐步降低回压阀压力至大气压。整个分解过程中记录产气、产水、平面温度随时间的变化。

2 实验结果分析

为进行天然气水合物的分解实验,首先需进行天然气水合物的等容生成。天然气水合物生成实验的基本数据见表 1。本实验采用注热与降压相结合的方式分解天然气水合物。注入热盐水的速率为 18 mL/min,注入时间为 208 min。

表 1 天然气水合物生成有关参数

Table 1 The parameters for NGH formation

参数	实验数据
NGH 生成前压力/MPa	8.6
模型内注入气量/L	90
模型内注入水量/g	1800
NGH 生成前温度/°C	28.3
NGH 生成后压力/MPa	3.0
NGH 生成后温度/°C	1.0
NGH 生成后饱和度/%	14.36
NGH 生成后模型内含水饱和度/%	57.99

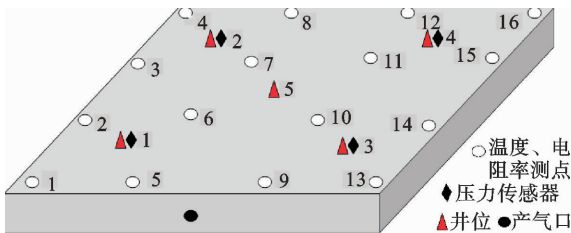


图 2 平板填砂模型各测点分布

Fig. 2 Distribution of measuring points in the 2D sand-packing model

其中水合物饱和度定义为岩石中 NGH 体积/岩石孔隙总体积。因为 NGH 为等容合成,合成前水、气的体积应该等于合成后水、气、NGH 的体积。根据水合物生成前后模型内压力和温度的变化,便可以计算出合成后水、气、NGH 的饱和度^[8,9]。

2.1 注热分解过程中填砂模型中间层面的平面温度变化规律

注热分解阶段填砂模型中间层面的平面温度变化见图 3。分别选取注热前(0 min)、水合物开始分解(40 min)及注热结束(208 min) 3 个时刻做出平面温度图。可以看出,随着热盐水的注入,

以中心注水井为圆心,模型内温度逐渐均匀升高。

根据李淑霞、郝永卯等^[8-10]前期实验得出的天然气水合物相平衡温度与压力关系式,可算出本实验压力(3 MPa)下的相平衡温度为 2 °C。王英梅等^[11]通过实验研究,发现等压条件下天然气水合物分解需要一个温度驱动力,且温度驱动力越大,分解速率越快。由图 4 看出,当注热进行了 40 min 时,瞬时产气速率变小且保持稳定,此时是水合物分解产生的气体。注热 40 min 时模型中间层面温度变化见图 3-II,中心注热井附近的最高温度是 6 °C,可见在本实验压力条件下,天然气水合物等压分解所需的温度驱动力大约为 3~4 °C。

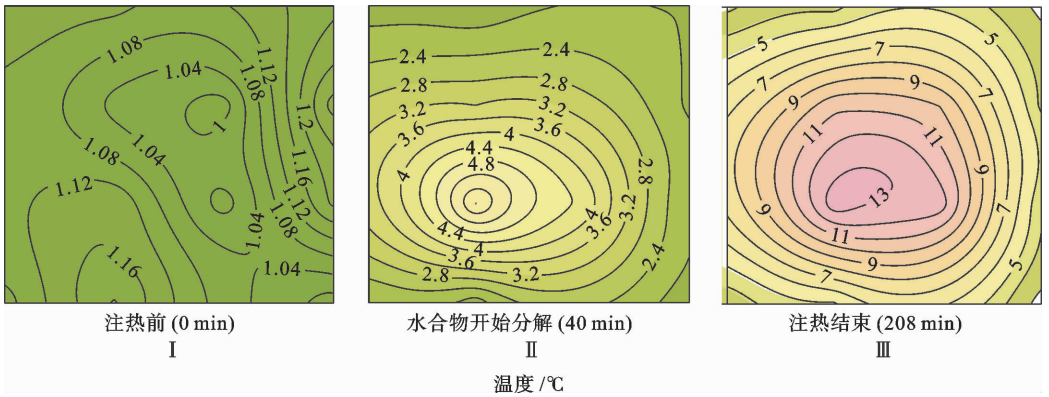


图 3 注热分解过程中填砂模型中间层面的平面温度变化

Fig. 3 The change of temperature on the middle floor of sand-packing model during thermal stimulation

2.2 产气变化规律

天然气水合物分解过程中的产气速率变化情况见图 4。可以看出,产气速率可划分为注热产气和降压产气 2 个阶段。

(1)注热产气阶段,包括自由气产出和天然气水合物分解产气阶段。①自由气产出阶段。此时产气速率较快,由于平板模型内含有自由气,气体在多孔介质中的流度远远大于水,受到注入热盐水的驱替作用后,自由气马上产出。根据气体状态方程,可以算出模型内自由气转化到大气压条件下的体积为 23.46 L,而实际产出 7.14 L,明显小于理论计算值。其原因为注入热盐水速率较快,在注水口与产气口之间易形成产气通道,从而不利于模型内其他区域自由气的驱替。②天然气

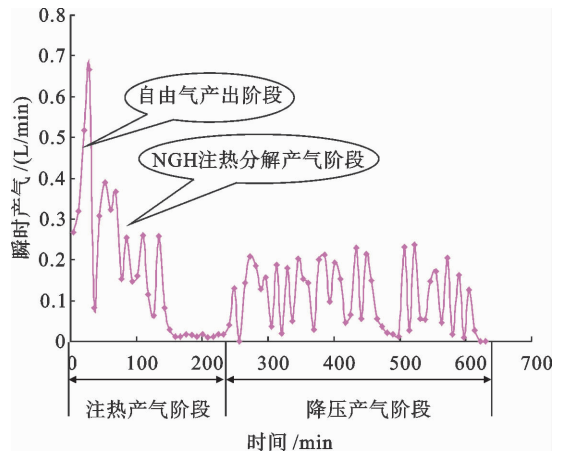


图 4 天然气水合物分解过程中产气速率变化

Fig. 4 Gas production rate vs. time during NGH dissociation

水合物分解产气阶段。此时产气速率较平稳,根据天然气水合物分解产气理论,单位体积的固体天然气水合物分解会产生 164 单位体积的气体,如果前期生成的天然气水合物全部分解,可算出天然气水合物注热分解过程的理论产气值为 61.23 L,而实际该阶段的产气值为 35 L,只占理论值的 57.16%。这是因为实验在低温条件下进行,注入的热盐水仅能加热中心注入井附近区域,图 3 表示的只是模型中间层面(也就是注入井口所在平面)的温度变化,模型顶、底部及角隅等区域由于实验系统热损失大,尚有部分水合物没有分解。因此,有必要进行下一阶段的降压分解。

(2)降压产气阶段。当注热分解阶段基本结束,产气量逐渐降低为 0 之后,降低模型内的压力,使模型内剩余天然气水合物降压分解。该阶段缓慢降低系统压力,天然气水合物均匀分解,产气速率比较稳定。在降压过程中,每次降低 0.1 MPa,等瞬时产气值低于 0.02 L/min 时再进行下一次的降压,直至模型内压力降到大气压。该阶段的累积产气量为 40 L,这包括降压阶段水合物分解的产气量和前期注热已经分解但未产出的气量。由此得出,注热与降压相结合的开采方式与单独注热相比,更加有利于天然气水合物的分解和产出。

2.3 产水变化规律

天然气水合物分解过程中产水速率随时间的变化见图 5。与产气过程对应,产水也分为 2 个阶段。

(1)注热产水阶段。包括模型内自由水产出及水合物分解产水两部分。①自由水产出阶段,对应于图 5 前 40 min 的产水变化。由于自由气体在多孔介质中的流度远远大于水,受到注入热盐水的驱替作用,自由气很快产出,而自由水的产出则有一个滞后过程。②天然气水合物分解产水阶段,对应于图 5 的 40~208 min 的产水变化。此时瞬时产水值较大且上下浮动,产水速率略大于注水速率。此阶段的产水受注入热盐水和 NGH 分解产水的共同影响。

(2)降压产水阶段,对应于图 5 的 208 min 至实验结束的产水变化。随着压力降低,模型内剩余天然气水合物分解产气、产水。此阶段没有热

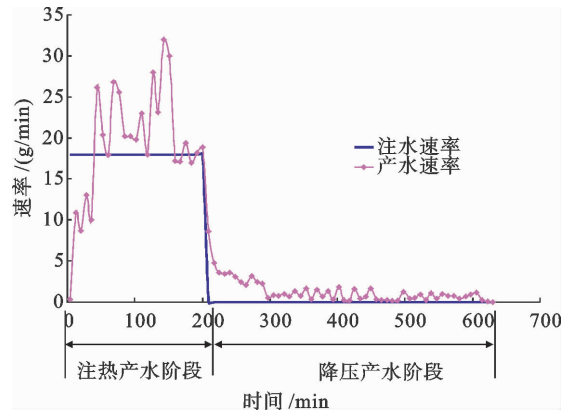


图 5 天然气水合物分解过程中产水速率变化

Fig. 5 Water production rate vs. time during NGH dissociation

盐水的注入,产水量主要为模型内剩余天然气水合物分解的水。

2.4 能量效率分析

参考能量效率的定义^[10]为:

$$\lambda = Q_{ou} / Q_{in} = \frac{\Delta h_g V_g}{C_w m_w (T_w - T_o)} \quad (1)$$

式中: λ 换热效率;

Q_{in} 、 Q_{ou} 为注入、产出热量, J;

C_w 为水的比热容, 4.2 J/(g·°C);

m_w 为注入热盐水量, mL;

T_w 为注水温度,这里取为模型注入热水处的入口温度, 40 °C;

T_o 取为模型内的环境温度, 1.0 °C;

Δh_g 为 CH₄ 气燃烧热, 39.7 J/mL;

V_g 为产出 CH₄ 气体积, mL。

注热分解阶段的产气量是 35 L, 能量效率为 2.27。降压分解阶段的产气量是 40 L, 所以注热与降压相结合开采后的产气量是 75 L, 能量效率为 4.86。可见,注热与降压相结合的开采方式能有效地提高能量效率。

3 结论

(1)随着热盐水的注入,以中心注水井为圆心,模型内温度逐渐均匀升高,但热盐水波及面积有限,且天然气水合物的分解存在一个温度驱动力。

(2)注热分解产气分为自由气产出阶段和天然气水合物分解产气阶段,由于热损失严重,注热

分解阶段并不能使模型内的天然气水合物全部分解;降压产气阶段天然气水合物能够均匀分解,产气速率比较稳定。

(3)注热分解阶段的产水主要受注入水和NGH分解产水的共同影响,降压分解阶段产水主要受模型内剩余天然气水合物分解产水影响。

(4)注热与降压相结合的开采方式有利于天然气水合物的分解和产出,提高了能量效率。

参考文献:

[1] Huseb J, Graue A, Kvamme B, et al. Experimental investigation of methane release from hydrate formation in sandstone through both hydrate dissociation and CO₂ sequestration [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates. Vancouver: ICGH, 2008.

[2] 李淑霞, 陈月明, 杜庆军. 天然气水合物开采方法及数值模拟研究评述[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(3): 146-150.

[3] Pooladi-Darvish M. Gas production from hydrate reservoirs and its modeling [J]. Journal of Petroleum Technology,

2004, 56(6): 65-71.

[4] 孙建业, 业渝光, 刘昌岭, 等. 天然气水合物新开采方法研究进展[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(11): 24-31.

[5] Ohgaki K, Takano K, Sangawa H, et al. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates phase equilibria for CO₂ CH₄ mixed hydrate system [J]. Chem. Eng. Jpn., 1996, 29(3): 478-483.

[6] 周锡堂, 樊栓狮, 梁德青. CO₂ 置换开采天然气水合物研究进展[J]. 化工进展, 2006, 25(5): 524-527.

[7] 李淑霞, 陈月明, 张卫卫, 等. 多孔介质中天然气水合物注热+降压开采的实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(2): 202-208.

[8] 李淑霞. 天然气水合物开采物理模拟与数值模拟研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2006.

[9] 郝永卯. 天然气水合物开采技术实验与理论研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2005.

[10] 郝永卯, 陈月明, 李淑霞. 天然气水合物注热开采实验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(4): 60-63.

[11] 王英梅, 吴青柏, 张鹏, 等. 冰点以下甲烷水合物等压分解实验研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2): 244-248.

EXPERIMENTAL STUDY OF NATURAL GAS HYDRATE DISSOCIATION IN POROUS MEDIA WITH A 2D EXPERIMENTAL SYSTEM BY CONTINUOUS THERMAL STIMULATION AND DEPRESSURIZATION

ZHANG Weiwei, LI Shuxia

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: Experimental study on NGH dissociation was carried out with a special designed 2D experimental system. The experiment was performed by injecting hot brine and decreasing pressure (thermal stimulation plus depressurization). The change of temperature, gas production rate, water production rate and energy efficiency were analyzed during the NGH dissociation. Experimental results demonstrate that the injecting hot brine water does not bring in the full dissociation of all of NGH in the model. So it is necessary to decrease pressure. Then the dissociated gas can be obviously divided into thermal dissociated gas and depressurized dissociation gas. Water production rate of the thermal stimulation is obviously greater than that of depressurization. Thermal stimulation together with depressurization can achieve higher energy efficiency and therefore is a better method for NGH dissociation and production.

Key words: two-dimensional experimental system; natural gas hydrate; thermal stimulation; depressurization; experimental study