

重力热管防止气井井筒天然气水合物新技术^{*}

吴晓东¹ 张玉丰¹ 韩国庆¹ 马春红² 李伟超¹

(1. 中国石油大学“石油工程”教育部重点实验室·北京 2. 中国石化集团国际石油勘探开发有限公司)

吴晓东等. 重力热管防止气井井筒天然气水合物新技术. 天然气工业, 2008, 28(6): 99-101.

摘要 利用重力热管的高效导热并且在额外消耗能量的情况下能够实现能量转移的特性, 无需改变井下管串结构, 借助空心抽油杆将重力热管应用于天然气井, 可以防止天然气水合物在气井井筒内产生。该技术将代替目前的井下节流和添加抑制剂等防止天然气水合物的方法, 使井筒天然气水合物的防止工作变得更加简单、方便、有效。研究表明, 重力热管的应用改善了气井井筒温度分布, 提高了井筒上部天然气的温度, 使其高于天然气水合物形成的最高温度, 从而有效地防止天然气水合物的产生, 并且重力热管的作用效果随着重力热管长度的增加而变好。

关键词 天然气 气井 水合物 重力热管 相变换热 温度

天然气水合物(Natural Gas Hydrates, NGH), 也称可燃冰, 是在有水存在、低温、高压条件下, 由气体或挥发性液体与水相互作用形成的白色类冰化合物^[1-3]。在天然气的生产过程中, 如果满足水合物生成条件就会在井筒内形成水合物, 从而导致生产效率大大降低, 严重时甚至会堵塞管道, 致使停产。目前, 预防天然气气井井筒水合物常用的方法是井下节流和添加抑制剂两种有效的方法^[4-5], 但是井下节流会带来复杂的井下作业, 而添加抑制剂则需要有与之相配套的添加工艺, 使井下管柱复杂化, 同时对环境的影响比较大^[6]。为此, 笔者将重力热管应用于天然气气井, 通过空心抽油杆内工质的循环相变来实现井筒能量的自平衡, 从而预防井筒天然气水合物的产生。

一、井筒天然气水合物形成位置预测

无论采用哪种预防方法, 预测井筒水合物形成的位置^[3-7]都是必不可少的一步。

根据热力学平衡理论, 无论哪种结构的水合物, 水相、气体以及水合物晶格体系化学位都存在下面的平衡关系:

$$\mu_{\alpha}^{\text{w}} = \mu_{\alpha}^{\text{H}} \quad (1)$$

式中: μ_{α}^{w} 为水在 α 相态(固相、液相、气相)时的化学

位; μ_{α}^{H} 为水在水合物相态时的化学位。

根据 1959 年 Van der Waals 和 Platteeuw 提出的 Langmuir 简单气体吸附模型, 计算空水合物晶体和填充晶格相态的化学位差为:

$$\mu_{\alpha}^{\text{w}} = \mu_{\alpha}^{\text{H}} + RT \sum_{i=1}^2 v_i \ln \left(1 - \sum_{k=1}^{N_c} y_{ki} \right) \quad (2)$$

其中: $y_{ki} = \frac{C_{ki} f_k}{1 - \sum_{i=1}^{N_c} C_{ji} f_j}$

式中: i 为水合物晶格空穴类型, $i=1, 2$; k 为混合物的组分数目; y_{ki} 为 i 类空穴被 k 类分子占据的概率; v_i 为 i 空穴的数目, 对于 I 型水合物, $v_1 = \frac{2}{23}$, $v_2 =$

$\frac{3}{23}$, 对于 II 型水合物, $v_1 = \frac{16}{136}$, $v_2 = \frac{8}{136}$; C_{ki} 是与温度

有关的常数。对于 I、II 型水合物, $C_{ki} = \frac{A_{ki}}{T} \exp \frac{B_{ki}}{T}$,

其中 A_{ki} 和 B_{ki} 是与孔隙结构有关的常数, 可由实验

测得; 对于 H 型水合物, $C_{ki} = \frac{A_{ki}^*}{T} \exp \left[\frac{B_{ki}}{T} \left(1 - \frac{T}{T_0} \right) \right]$,

A_{ki}^* 和 B_{ki} 见文献[8]。

根据热力学理论, α 相态的化学势计算表达式为:

^{*} 本文受到国家自然科学基金项目(编号:50674096)、中国石油天然气股份有限公司科技风险创新研究项目(编号:060511-2-1)、中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金项目(编号:04E7033)的资助。

作者简介 吴晓东, 1958年生, 教授, 博士生导师; 中国石油大学(北京)石油天然气工程学院副院长。地址:(102249)北京市昌平区中国石油大学石油天然气工程学院。电话:(010)89734626。E-mail:wuxd308@263.net

$$\mu^\alpha = \mu^0 + RT \ln \frac{f_W^\alpha}{f_W^0} \quad (3)$$

由以上式(1)、式(2)、式(3)可得:

$$\mu^\beta - \mu^0 = RT \ln \frac{f_W^\beta}{f_W^0} - RT \sum_{i=1}^2 v_i \ln \left(1 - \sum_{k=1}^{N_c} y_{ki} \right) \quad (4)$$

由热力学理论可知,水在空水合物晶格和水在液态或冰态的化学势差为:

$$\frac{\mu^\beta - \mu^0}{RT} = \frac{\Delta \mu}{RT_0} - \int_{T_0}^T \frac{\Delta H_0 + \Delta C_p (T - T_0)}{RT^2} dT + \int_0^p \frac{\Delta V}{RT} dp \quad (5)$$

联立式(4)、式(5)可得平衡状态下水合物的热力学关系式:

$$\frac{\Delta \mu}{RT_0} - \int_{T_0}^T \frac{\Delta H_0 + \Delta C_p (T - T_0)}{RT^2} dT + \int_0^p \frac{\Delta V}{RT} dp = \ln \frac{f_W^\alpha}{f_W^0} - \sum_{i=1}^2 v_i \ln \left(1 - \sum_{k=1}^{N_c} y_{ki} \right) \quad (6)$$

以某井的实际生产为例(表1),预测井筒水合物的形成位置。

表1 实际生产数据及天然气组成表

实际生产数据		天然气组成(%)	
井深(m)	2 964	CH ₄	82
地层厚度(m)	5.6	C ₂ H ₆	7
渗透率(10 ⁻³ μm ²)	1.5	C ₃ H ₈	4
产量(m ³ /d)	300 000	i-C ₄ H ₁₀	0.3
井底温度(°C)	62	n-C ₄ H ₁₀	0.1
地面温度(°C)	10	C ₅ 及其以上	1.9
井底压力(MPa)	30.5	CO ₂	4
地面天然气 相对密度	0.88	N ₂	0.7

根据式(7)温度与压力的耦合关系迭代计算常规生产井井筒的温度压力分布,见图1。

$$\begin{cases} -\frac{dp}{dZ} = \rho \frac{dv}{dZ} + \rho g \sin \theta + f \frac{\rho v^2}{d} \\ T_{out} = T_{eout} + \left[\frac{1 - e^{A(Z_{in} - Z_{out})}}{A} \right] \times \\ \left(-\frac{g \sin \theta}{C_{pm}} - \frac{v}{C_{pm}} \frac{dv}{dZ} + C_{jm} \frac{dp}{dZ} \right) \end{cases} \quad (7)$$

同时,应用式(6)对井筒各位置压力下的水合物形成的最高温度进行了计算,见图1。从图1中可知,井筒300 m以下井段的温度高于形成水合物的最高温度,只有在300 m以上井段才满足水合物生成条件。因此,预测生成水合物的位置在井深300 m处。

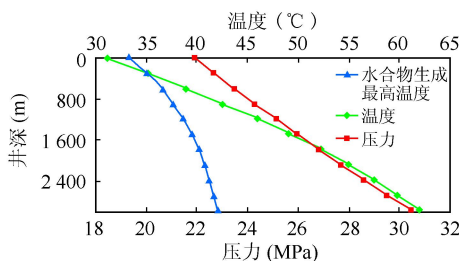


图1 常规天然气井压力温度以及井筒水合物形成最高温度分布图

二、重力热管防止井筒水合物方法

1. 重力热管的基本原理

重力热管是一种有效的、结构最为简单的一种热管传热元件,它利用内部工作液体(即工质)的相变来传递热量,且不需要外加动力而使工质自行循环。重力热管工作时,液态工质在吸热段吸热,气化为气态工质,并不断流向放热段,气态工质在放热段释放潜热,冷凝为液态工质,液态工质在重力的作用下回流到吸热段,吸收热量开始下一循环。这样,在重力热管的作用下,管外流体的热量就由其下部向上部自行转移^[9-11]。

2. 重力热管与井筒流体的耦合计算

重力热管井的井筒可以分为3个部分,即无热管井段、重力热管吸热段和重力热管放热段。无热管井段的温度分布与常规气井温度计算相同。因此,要对重力热管吸热段和放热段的传热进行计算。

(1)热管吸热段与油管内流体及地层传热模型
取热管底端为坐标原点,垂直向上为正。

在油管流体上取长为dl的微元体,微元体能量平衡方程式如下:

$$\begin{cases} -W dt = K_{12} (t - t_e) dl + \\ K_{11} \{ t - [t - g_T (l + h)] \} dl \\ l = 0, t = t_{e0} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $K_{12} = \frac{0.32 \rho^{0.65} \lambda^{0.3} c_{pl}^{0.7} q_e^{0.2} q_e^{0.4}}{\rho_e^{0.25} r^{0.4} \mu^{0.1}} \left(\frac{p_{in}}{p_a} \right)^{0.3}$
式中: K_{12} 为热管吸热段平均换热系数, W/(m²·°C); t_{e0} 为热管底端的井筒流体温度, °C; t_e 为热管吸热段管壁温度, °C; h 为热管底端距井底纵向距离, m; q_e 为井筒流体传递给热管吸热段平均热流密度, kJ/m³; r 为工质汽化潜热, J/kg; λ 为工质导热系数, W/(m²·°C); c_{pl} 为工质比热容, kJ/(kg·°C); p_{in} 为工质饱和蒸汽压, Pa; p_a 为大气压, Pa。

式(8)通解为:

$$t = \left[t_{e0} - \frac{W}{K_{11} + K_{12}} \left(\frac{K_{11} t_{e0} + K_{12} t_c + K_{11} g_T}{W} \right) \right] e^{-\frac{K_{11} + K_{12}}{W} l} + \frac{W}{K_{11} + K_{12}} \left\{ \frac{K_{12} t_c + K_{11} [t_c - g_T (l + h)]}{W} + \frac{K_{11} g_T}{K_{11} + K_{12}} \right\} \quad (9)$$

(2)热管放热段与油管内流体及地层传热模型取放热段顶底端为坐标原点,垂直向下为正。

在油管流体上取长为 dl 的微元体,微元体能量平衡方程式如下:

$$\begin{cases} -W dt = K_{11} [t - (t + g_T l)] dl - K_{12}' (t - t_c) dl \\ l = 0, t = t_w \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$K_{12}' = 0.943 \left[\frac{\rho g h^3 (\rho - \rho_c) [r + 0.68 G_{pl} (t - t_c)]}{\mu (t - t_c) l} \right]^{1/4}$$

式中: K_{12}' 为热管放热段平均换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t 为井口处地层温度, $^\circ C$; t_c 为热管放热段管壁温度, $^\circ C$; t_w 为井口流体温度, $^\circ C$; t_s 为工质饱和和蒸气温度, $^\circ C$; l_c 为放热段长度, m 。

求解式(10)得到冷凝段井筒温度分布:

$$t = \left[t_w + \frac{W}{K_{11} - K_{12}} \left(\frac{K_{11} t_w - K_{12}' t_c + K_{11} g_T}{W} \right) \right] e^{\frac{K_{11} - K_{12}}{W} l} + \frac{W}{K_{11} - K_{12}} \left\{ \frac{K_{11} (t_c + g_T l) - K_{12}' t_c + K_{11} g_T}{W} \right\} \quad (11)$$

3.重力热管井筒温度

通过对式(9)和式(11)的迭代求解,计算出重力热管下入不同深度时的井筒温度分布,见图2。

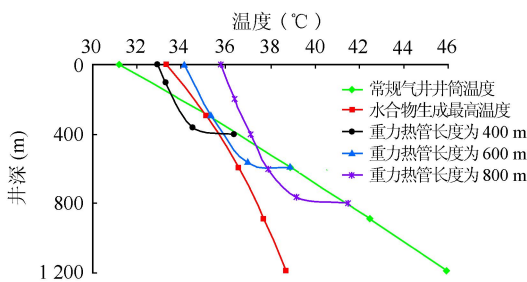


图2 重力热管改善天然气井井筒温度分布图

从图2可知,重力热管具有明显改善井筒温度剖面的作用,并且重力热管下入深度越大,改善温度剖面的效果越明显。实例中,水合物在井深300 m

处形成,重力热管的长度最少为600 m,才能起到在整个井筒内防止水合物生成的目的。

三、结论

(1)将重力热管应用于防止天然气井水合物是重力热管应用领域的又一突破。

(2)将重力热管应用于天然气井,无需改变井下结构,只需在井内下入空心抽油杆便可以为工质提供工作环境。

(3)重力热管有明显改善气井井筒温度的作用,具有明显防止天然气水合物的作用,并且重力热管长度越大调整气井温度剖面的效果越好。

参考文献

- [1] 吴茂炳,王新民,李在光.天然气水合物的形成分布特征及其开发前景[J].中国石油勘探,2003,8(2):75-79.
- [2] 李明川,樊栓狮,赵金洲.多孔介质中天然气水合物形成实验研究[J].天然气工业,2006,26(5):27-28.
- [3] 喻西崇,赵金洲,郭亚玲.地层多孔介质中水合物生成条件的预测[J].天然气工业,2002,22(6):102-105.
- [4] 纪宝君.气井水合物防治技术研究与应用[J].大庆石油地质与开发,2004,23(3):73-76.
- [5] 王宇,邓柯,宋东斌.大牛地气田水合物防治工艺[J].内蒙古石油化工,2005(12):112-114.
- [6] 吴革生,王效明,韩东,等.井下节流技术在长庆气田试验研究及应用[J].天然气工业,2005,25(4):65-69.
- [7] 刘建仪,杜志敏,李颖川,等.新的水合物生成条件预测模型[J].天然气工业,2004,24(12):96-98.
- [8] 喻西崇,郭建春,赵金洲,等.井筒和集输管线中水合物生成条件的预测[J].西南石油学院学报,2002,24(2):65-69.
- [9] FAGHRI A. Heat pipe science and technology [M]. [S.I.]:Taylor & Francis Press,1995.
- [10] NOIR S H. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon[J]. Applied Thermal Engineering, 2005,25(3):495-506.
- [11] HONG ZHANG, JUN ZHUANG. Research, development and industrial application of heat pipe technology in China[J]. Applied Thermal Engineering, 2003(23):1067-1083.

(收稿日期 2007-12-19 编辑 钟水清)