

盐穴地下储气库注采热工性能模拟^{*}

曹琳¹ 谭羽非^{1,2} 李娜¹

(1. 哈尔滨工业大学 2. 中国地震局工程力学研究所博士后流动站)

曹琳等. 盐穴地下储气库注采热工性能模拟. 天然气工业, 2005; 25(8): 103~105

摘要 储气库在建设和运行时,一方面溶腔内气体通过自然对流与周围盐层进行热交换,与周围盐层壁面形成不稳态导热温度场;另一方面连续注采循环,使腔内气体压力、温度发生变化,特别是在连续采气时,降压的焦耳—汤姆逊效应极易使井口气体压力和温度进入生成水化物的危险范围,因此动态确定盐穴储气库注采天然气时的热工特性变化十分必要。为此,根据热力学、传热学和流体力学理论,针对注采过程天然气在井筒流动和溶腔内传热过程的特点,将井筒、溶腔和周围盐层视为一个系统,提出了描述注采动态工程相互耦合的数学模型及其求解方法,并开发了相应的数值计算软件。该软件可预测盐穴地下储气库在连续注采气过程中,溶腔内及井筒顶、底部气体的压力和温度,并判断水化物形成的危险范围等。研究成果能对盐穴地下储气库的建设和技术特性做出预测分析,对其运行工况给予指导,并对注采气地面系统的优化设计提供理论分析依据。

关键词 盐穴 地下 储气库 注入 采出 参数 数值模拟 数学模型 软件开发

在地质条件适合的地区,建造盐穴型地下储气库是从根本上解决城市短期用气不均衡性最经济合理的途径之一。动态确定地下盐穴储气库注采天然气时的热工特性变化十分必要^[1]。为此,笔者应用数值模拟方法,从天然气注采压缩、膨胀本质特征出发,考虑避免井口水化物生成及压力温度等约束条件,建立了从井筒、溶腔以及和周围盐层相互耦合的不稳态注采动态数学模型及求解方法,并开发了相应的数值计算软件。

一、数学模型的建立

1. 盐层温度场模型

将井筒周围盐层考虑为二维,溶腔周围盐层考虑为一维,建立轴对称的导热微分方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

边界条件:

$r=R$ 未被干扰的盐层处,为第一类边界条件。

$r=r_w$ 腔及井筒壁面处,为第三类边界条件,表示为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha [t_s - T(x, r, \tau)] \Big|_{x=0}$$

2. 溶腔模型

在 $d\tau$ (天) 时间内,溶腔注采过程的质量守恒方

程为:

$$P_R / Z_R T_R = P_{Ri} / Z_{Ri} T_{Ri} (1 \pm G_p / G) \quad (2)$$

式中: P_R 、 T_R 、 Z_R 表示腔内参数; P_{Ri} 、 T_{Ri} 、 Z_{Ri} 表示注采初始时参数,正号表示注气,负号表示采气; G 表示储库内原始储量, m^3 (标准状态); G_p 表示日注采量, m^3 (标准状态); $G_p = q_w \times d\tau$, q_w 为注采率, m^3/d 。

在 $d\tau$ (天) 时间内,溶腔注采过程的能量方程为:

$$nu = n_i u_i \pm \Delta nh + Q \quad (3)$$

式中: h 表示流入(流出)气体焓, $kJ/kmol$; u 表示溶腔内气体内能, $kJ/kmol$; u_i 表示溶腔初始气体内能, $kJ/kmol$, 且 $u = h - z_r R T_r$; Q 为溶腔和周围盐层换热量, kJ , 在用式(1)求出盐层温度场后,考虑在盐层壁面 $r=r_w$ 处由第三类边界条件求得。

3. 注采井筒模型

将气体在井筒中流动考虑为一维稳定流动,遵循质量守恒、动量平衡、能量守恒和真实气体定律,建立模型如下^[2,3]。

注气过程:

$$P_{bh} = P_{wh} \left\{ \exp(2 N_{gp}) + \frac{N_{fp}}{2 N_{gp}} [1 - \exp(2 N_{gp})] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

* 本课题得到中国博士后基金项目(20040350161)的资助。

作者简介: 曹琳,女,1979年生,哈尔滨工业大学博士研究生;2001年、2004年在哈尔滨工业大学先后获得学士学位和硕士学位;主要从事盐穴型天然气地下储气库的研究。地址:(150090)哈尔滨工业大学市政环境工程学院 2651号。电话:13704818349。E-mail:caolin121@126.com

$$h_b - h_i - g\Delta L = \left(\frac{2fu^2}{d_i} \right) \Delta L \quad (5)$$

采气过程:

$$P_{wh} = P_{bh} \left[\exp(-2N_{gp}) + \frac{N_{fp}}{2N_{gp}} [\exp(-2N_{gp}) - 1] \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$h_u - h_b + g\Delta L = \left(\frac{2fu^2}{d_i} \right) \Delta L \quad (7)$$

式中: $N_{gp} = \frac{M_g g L \cos \alpha}{ZRT}$; $N_{fp} = \frac{4fZRT\omega_k^2}{d_i M_g A^2 P^2}$; $w_g = \rho \rho / t$; L 表示井筒总长度; α 表示管的垂向倾角; d_i 表示管内径; f 、 M_g 分别表示摩擦系数、气体分子量; h_b 表示井口气体焓; h_u 表示井底气体焓。

其中,式(3)~式(7)焓值的表达式为: $h = h_0 + \int_0^P \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP$, 且 $h_0 = \int_0^T c_{p0} dT$ 表示理想气体的焓; c_{p0} 表示定压摩尔比热, $\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$, $c_{p0} = \omega + aT + aT^2 + a_3T^3$ 。进一步将 BWRS 状态方程代入天然气焓的计算公式, 经整理得:

$$h_g = M_g \left\{ \begin{aligned} & \omega T_g + \frac{1}{2} a T_g^2 + \frac{1}{3} a_2 T_g^3 + \frac{1}{4} a_3 T_g^4 \\ & + \left(B_0 RT_g - 2A_0 - \frac{4C_0}{T_g^2} - \frac{5D_0}{T_g^3} - \frac{6E_0}{T_g^4} \right) \rho_g \\ & + \frac{1}{2} \left(2bRT_g - 3a - \frac{4d}{T_g} \right) \rho_g^2 + \frac{1}{5} a \left(6a + \frac{7d}{T_g} \right) \rho_g^5 \\ & + \frac{c}{\gamma T_g^2} \left[3 - \left(3 + \frac{\gamma_0^2}{2} - \gamma_0^4 \right) \exp(-\gamma_0^2) \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: T_g 、 ρ_g 分别表示采出或注入气体的温度(K)和密度。

4. 水化物形成预测模型

将水化物形成的压力-温度曲线进行回归, 得到在给定温度下, 达到热力学平衡时, 天然气水化物生成条件的热力学表达式:

$$P = 10^{-3} \times 10^{-P^*} \quad (9)$$

式中: P 表示给定温度下, 达到热力学平衡时, 形成水化物的最低压力, MPa ; P^* 表示参考压力, 为温度的函数, 计算公式如下(其中温度单位取 $^{\circ}\text{C}$)。其中: γ_g 表示天然气的比密度; T 表示天然气的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$\gamma_g = 0.5539, P^* = 3.419517 + 5.202743 \times 10^{-2} T - 5.307049 \times 10^{-3} T^2 + 3.398805 \times 10^{-5} T^3;$$

$$\gamma_g = 0.6, P^* = 3.009796 + 5.284026 \times 10^{-2} T - 2.252739 T^2 + 1.511213 \times 10^{-5} T^3;$$

$$\gamma_g = 0.7, P^* = 2.814824 + 5.019608 \times 10^{-2} T + 3.722427 \times 10^{-4} T^2 + 3.781786 \times 10^{-6} T^3;$$

$$\gamma_g = 0.8, P^* = 2.70442 + 5.82964 \times 10^{-2} T - 6.639789 \times 10^{-4} T^2 + 4.008056 \times 10^{-5} T^3;$$

$$\gamma_g = 0.9, P^* = 2.613081 + 5.715702 \times 10^{-2} T -$$

$$1.871161 \times 10^{-4} T^2 + 1.93562 \times 10^{-5} T^3;$$

$$\gamma_g = 1.0, P^* = 2.527849 + 6.25 \times 10^{-2} T - 5.781353 \times 10^{-4} T^2 + 3.069745 \times 10^{-5} T^3$$

根据计算得出的井口温度、压力, 确定出形成水化物的最低压力, 与井口压力的比较, 即可判断是否进入水化物生成区间。

二、模型求解

描述储库运行的基本变量有 7 个: 溶腔内的压力 P_R 、温度 T_R ; 井底压力 P_b 、温度 T_b ; 井口压力 P_{wh} 、温度 T_{wh} ; 日注采率 G_P 。

(1) 注入时, 在任意初始条件下, 已知 P_{wh} 、 T_{wh} 、 G_P , 约束条件为 $P_R \leq P_{R\max}$ (储库设计时最大允许压力), 求 P_b 、 T_b 、 T_R 、 P_R , 由式(2)、式(3)、式(4)、式(5)这 4 个方程, 可求解此 4 个未知数。注意由于注入气与盐穴壁的传热, 此时 $T_R \neq T_b$, 而 $P_R = P_b$ 。

(2) 采出时, 在任意初始条件下, 已知 G_P (日采出量), 约束条件为 $P_{wh} \geq P_{w\min}$ (最小井口允许压力) 求 T_{wh} 、 P_{wh} 、 T_b 、 P_b 、 T_R 、 P_R , 由式(2)、式(3)、式(4)、式(5)这 4 个方程, 可求解出 4 个未知数。但注意在采出时有两个耦合方程 $T_R = T_b$, $P_R = P_b$, 方程组仍封闭。

求解方法如下。

将式(2)、式(3)分别改写为只含有溶腔压力 P_R 和温度 T_R 的方程组:

$$F_{MB}(P_R, T_R) = 0, F_{EB}(P_R, T_R) = 0$$

采用 N-R 迭代方法, 写成:

$$\frac{\partial F_{MB}^k}{\partial P} \Delta P_R^{k+1} + \frac{\partial F_{MB}^k}{\partial T} \Delta T_R^{k+1} = -F_{MB}(P_R^k, T_R^k),$$

$$\frac{\partial F_{EB}^k}{\partial P} \Delta P_R^{k+1} + \frac{\partial F_{EB}^k}{\partial T} \Delta T_R^{k+1} = -F_{EB}(P_R^k, T_R^k)$$

控制 $\Delta P_R \leq 10 \text{ kPa}$, $\Delta T_R \leq 1^{\circ}\text{C}$, 迭代计算得到 P_R 、 T_R 的值。

对井筒参数的求解, 联立式(4)、式(5), 采用节点分析法, 将气井沿井深等分为多个长度单元, 在每个单元连续求解气井方程组。过程中涉及气体性质有关的参数(气体 Z 因子、黏度、摩擦系数), 在计算每个单元中进行两步求解, 首先取平均压力、平均温度为已知的单元中顶部或底部的压力和温度, 然后再将计算得到的压力、温度与已知的压力、温度求算术平均值作为平均压力、平均温度, 重新计算。两步计算之后的结果进入下一个单元, 作为下一步计算的初始值重复上述步骤, 如此连续向前推算直到预计终点。在求解方法上, 仍采用同溶腔方程的 N-R

迭代方法。

采出时计算得出井口温度后,进入水化物形成预测程序,计算达到热力学平衡时,形成水化物的最低压力,如果井口压力小于计算所得形成水化物的最低压力,则不会有水化物形成;反之,则将有水化物形成。

三、模拟算例

借鉴文献[4]盐穴储气库的有关数据进行了模拟计算,在溶腔初温 20 °C、初压 13 MPa,未被干扰的盐层温度 55 °C 状态下,连续 20 d 以 0.4 m³/d 注气后,再以 0.5 m³/d 的采出率连续采出至 80 d,时间步长取 1 d,部分计算结果见图 1~4。

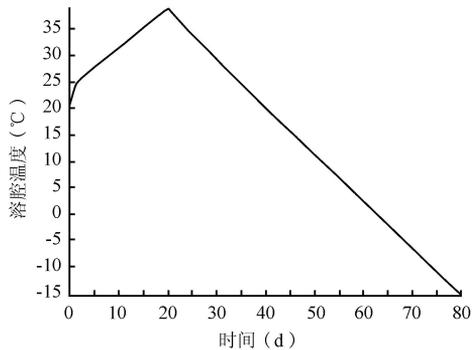


图 1 溶腔温度随时间变化图

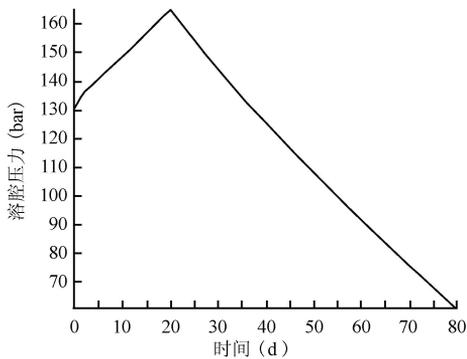


图 2 溶腔压力随时间变化图

注:1 bar=0.1 MPa,下同

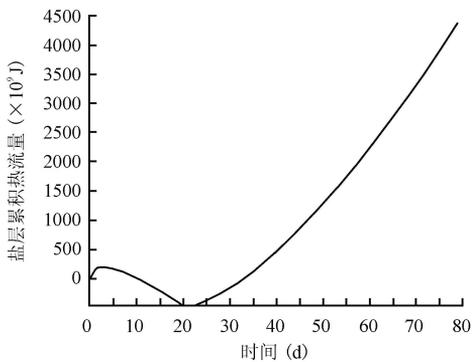


图 3 累积热量随时间变化图

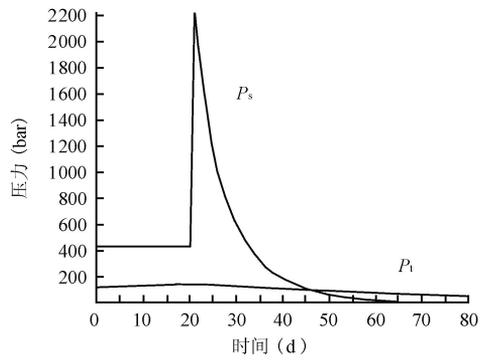


图 4 水化物生成压力和井口压力随时间变化图

由图 1、2、3 可看出:开始几天库内温升较大,这是由于初期库内气体与周围盐层温差较大,可吸收盐层较多热量。而后期库内气体与周围盐层温差逐渐减小,致使后期温度变化较为平缓。连续采出时,库内气体温度、压力随采气时间逐渐下降。由图 4 可看出:注入 20 d 后,再连续采出至 45 d 时,虽然库内压力未达到最小设计压力,但由于井口压力、温度近似直线下降,且温度降比压力降明显,井口压力已经低于井口水化物的生成压力,此时井口天然气已进入水化物形成区。因此连续的采出,温度、压力降低过大,要特别注意控制天然气脱水,避免形成天然气水合物。

四、结论

(1)笔者开发的软件可预测任意连续注采循环时井口、井底及溶腔内天然气压力和温度的变化。

(2)当城市需调峰日采量较大时,最好增加井数,因为井筒流量过大,压力降过大,达到最小井口压力约束时,采收率降低。

(3)为防止在井口形成天然气水合物,应避免高采出率的连续采出。

参考文献

- 1 TekMR. Underground Storage of Natural Gas. Houston: Gulf Publishing Co, 1989:292—298
- 2 Jacques Hagoort. Simulation of Production and Injection Performance of Gas Storage Caverns in Salt Formations. SPE Reservoir Engineering, 1997;(11):278—281
- 3 Hagoort J.气藏工程原理.北京:石油工业出版社,1992
- 4 苏家麟译.霍恩西盐穴储气库工程进度报告.IGU/A4, 1994

(修改回稿日期 2005-06-06 编辑 居维清)