

# 基于 VB 和 HYSYS 的地下储气库地面井筒 一体化压力计算系统

刘得军<sup>1</sup> 刘鹤<sup>1,2</sup> 孟凡彬<sup>3</sup> 王东军<sup>3</sup> 卫晓<sup>3</sup> 李彦<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院 2. 中国石油工程建设公司

3. 中国石油天然气管道工程有限公司天津滨海分公司

刘得军等. 基于 VB 和 HYSYS 的地下储气库地面井筒一体化压力计算系统. 天然气工业, 2013, 33(10): 104-109.

**摘要** 已有 HYSYS 软件本身没有井筒模块, 不能在 HYSYS 中实现对地下储气库注采气井筒部分压力系统的模拟。为此, 通过分析地下储气库注采气井筒压力传递机理, 建立了井筒压力计算数学模型; 在此基础上, 基于 VB 软件开发平台, 利用 HYSYS 模拟软件的 Extension 模块扩展功能, 将地下储气库注采气井筒压力传递模型嵌入 HYSYS 新的单元模块, 由此可方便地实现注采气井井口压力与井底压力之间的数值关联计算与压力模拟传递, 并且在 HYSYS 的 PFD 模拟流程图可以直接调用扩展开发的井筒模型。仿真计算结果表明, 采用开发出的井筒压力传递模块模拟计算出的压力数据与实测数据偏差很小, 能满足现场模拟计算的需求。此外, 基于 VB 与 HYSYS 模拟平台对地下储气库注采气井筒模块的成功开发使得地下储气库地面井筒压力模拟更加便捷, 操作过程简化, 实现了地下储气库地面管网压力系统与注采井筒压力系统的一体化模拟。

**关键词** 地下储气库 注采气井筒压力 井筒模型 HYSYS VB 一体化压力计算

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.10.018

## The VB- and HYSYS-based simulation integration of injection/withdrawal wellbore pressures with above-ground piping pressures in UGS facilities

Liu Dejun<sup>1</sup>, Liu He<sup>1,2</sup>, Meng Fanbin<sup>3</sup>, Wang Dongjun<sup>3</sup>, Wei Xiao<sup>3</sup>, Li Yan<sup>3</sup>

(1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. China Petroleum Engineering & Construction Corporation, Beijing 100120, China; 3. Tianjin Binhai Branch & China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Tianjin 300457, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 1, pp.104-109, 10/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** Without the wellbore module, the HYSYS failed to simulate the injection/withdrawal wellbore pressures of underground gas storage (UGS) facilities. To this end, a mathematical model was first built for the injection/withdrawal wellbore pressures based on the propagation mechanism of such pressures. Then, on the VB software development platform, with aid of the function of Extension module expansion in the HYSYS simulation software, the above mathematical model was embedded as a new unit module into the HYSYS software. This will not only be convenient to achieve the numerical correlation calculation between wellhead and bottomhole pressures as well as the simulation of pressure transmission, but be easy to directly call the wellbore model from the HYSYS simulation process flowchart diagram (PFD). The simulation results showed that the calculated pressure data almost agrees well with the measured ones and this developed wellbore pressure module can meet the site simulation requirement. Additionally, this study makes the simulation of wellbore pressures much more convenient with a simpler operation process, thereby to achieve the integration of the simulation of above-ground piping pressures with injection/withdrawal wellbore pressures in UGS facilities.

**Key words:** underground gas storage, injection/withdrawal wellbore pressure, wellbore module, HYSYS, VB

**作者简介:** 刘得军, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 博士; 主要从事地球物理探测理论与技术、检测技术与自动化装置、地下储气库压力系统优化等方面的研究工作。地址: (102249) 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学地球物理与信息工程学院。电话: (010)89733294。E-mail: liudejun@cup.edu.cn

通常情况下,天然气输气管网的输气量每个季度基本上是平均的,而用户的用气量则随季节波动较大,因此,有必要建设天然气地下储气库来解决季节性调峰问题<sup>[1-2]</sup>。随着我国天然气工业的迅速发展和城市建设规模的不断扩大,地下储气库在城市能源供求方面将起到越来越重要的作用,这为国内天然气地下储气库的建设与发展提供了新的机遇与挑战,与此同时,关于已运行地下储气库的节能优化方面的研究工作也将受到越来越多的关注<sup>[3-4]</sup>。

HYSYS 软件广泛应用于地下储气库地面工程中,在地下储气库地面管网模拟、泵与压缩机的选型、单井注采气量计量及压力计算等方面得到了很好的应用。但已有 HYSYS 软件本身没有井筒模块,不能在 HYSYS 中实现对地下储气库注采气井筒部分压力系统的模拟。因此,在现场实际应用中必须采用其他专门软件(如 Wellflo 软件)来完成注采井筒部分压力系统的模拟<sup>[5-6]</sup>,然后采用人工办法将井筒模拟数据导入用 HYSYS 建立的地面管网 PFD 流程图中,进而实现地面管网与注采井筒之间的压力传递计算。因为井筒与地面管网压力传递与模拟分别采用两套软件进行,若想提高计算精度,就必须对两套模拟软件都有所了解,这种人工导入的方法不仅现场工作量大,操作繁琐,极易造成数据传递误差,同时也给操作人员带来了一定的难度。

笔者基于 VB 软件开发平台,利用 HYSYS 模拟软件的 Extension 模块扩展功能,开发出地下储气库注采气井筒压力模块,该模块可以代替 Wellflo 软件对注采气井筒压力进行模拟计算<sup>[7]</sup>。通过在 HYSYS 的 PFD 模拟流程图中直接调用该井筒模块,可方便地实现注采气井井口压力与井底压力之间的数值关联计算与压力模拟传递,进而在 HYSYS 中实现地下储气库地面管网压力系统与注采井筒压力系统的一体化模拟。该模块的成功开发使得地下储气库地面、地下井筒压力模拟更加便捷,操作方便。仿真计算表明,采用开发出的井筒压力传递模块模拟计算出的压力数据与实测数据偏差很小,可以满足现场模拟计算需求。

## 1 储气库气井井筒压力计算方法

### 1.1 干气(注气期)井筒压力计算

地下储气库注气期间,天然气可作为干气计算,与传统的气藏开采井一样,地下储气库注气井满足井筒压力变化的规律。

计算气井井底压力的方法很多,其中以 1956 年

Cullender 和 Smith 提出的模型更受青睐<sup>[8]</sup>,至今仍为气藏工程井筒压力计算的首选方法,被广泛应用于干气井井筒压力的计算。气井井筒压力计算的实用模型都是由气体稳定流动能量方程推导而来的。天然气从井口沿油管注入井底,在总能量消耗的结构中,动能损耗甚小,作为理想模型可以忽略不计。这样气体稳定流动能量方程可简化为:

$$\frac{dp}{\rho} + g dH + \frac{fv^2}{2g} dH = 0 \quad (1)$$

式中  $p$  为压力, Pa;  $\rho$  为气体密度;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $H$  为井深, m;  $f$  为 Moody 摩阻系数;  $v$  为气体流速, m/s。

式(1)是一个在任何状态( $p, T$ )下都成立的能量守恒微分方程式,采用国际单位制(SI 单位制)表示。将  $p, u$  等参数的单位换算为法定计量单位,从式(1)可推导出 Cullender 和 Smith 方法用于干气井井筒压力计算的模型<sup>[8-10]</sup>,即:

$$\int_{p_{wf}}^{p_{if}} \frac{\frac{ZT}{p} dp}{1 + \frac{1.324 \times 10^{-18} f(q_{sc} TZ)^2}{d^5 p^2}} = \int_0^H 0.034 15 \gamma_g dH \quad (2)$$

式中  $p$  为压力, MPa;  $T$  为气体温度, K;  $Z$  为气体偏差系数;  $f$  为干气摩阻系数;  $q_{sc}$  为产气量,  $m^3/d$ ;  $d$  为油管内径, m;  $\gamma_g$  为气体相对密度;  $p_{wf}$  为井底流动压力, MPa;  $p_{if}$  为井口油管流动压力, MPa。

利用平均温度和平均压缩系数计算法求解式(2):

$$\int_{p_{wf}}^{p_{if}} \frac{dp}{\left[ p + \frac{1.324 \times 10^{-18} f(q_{sc} \bar{T}\bar{Z})^2}{d^5 p^2} \right]} = \frac{0.034 15 \gamma_g H}{\bar{T}\bar{Z}} \quad (3)$$

令  $C^2 = \frac{1.324 \times 10^{-18} f(q_{sc} \bar{T}\bar{Z})^2}{d^5}$ , 则式(3)写为:

$$\int_{p_{wf}}^{p_{if}} \frac{dp}{\left( p + \frac{C^2}{p} \right)} = \frac{0.034 15 \gamma_g H}{\bar{T}\bar{Z}} \quad (4)$$

求解积分得:

$$\int \frac{p dp}{C^2 + p^2} = \int \frac{dp}{p + \frac{C^2}{p}} = \frac{1}{2} \ln(C^2 + p^2) \quad (5)$$

式(5)可积分得:

$$\ln \left( \frac{C^2 + p_{wf}^2}{C^2 + p_{if}^2} \right) = \frac{2 \times 0.034 15 \gamma_g H}{\bar{T}\bar{Z}} \quad (6)$$

$$\frac{C^2 + p_{wf}^2}{C^2 + p_{if}^2} = \exp \left( \frac{2 \times 0.034 15 \gamma_g H}{\bar{T}\bar{Z}} \right) \quad (7)$$

将  $C^2$  代入式(7),化简后得:

$$p_{wf} = \sqrt{p_{if}^2 e^{2s} + \frac{1.324 \times 10^{-18} f q \bar{T} \bar{Z}}{d^5} (e^{2s} - 1)} \quad (8)$$

$$s = \frac{0.034 \ 15 \gamma_g H}{\bar{T} \bar{Z}} \quad (9)$$

$f$  摩擦系数计算方法:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \lg \left( \frac{\epsilon}{d} + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right) \quad (10)$$

$$Re = \frac{d \times q \times \gamma_g}{\mu_g} = 1.776 \times 10^{-2} \frac{q \times \gamma_g}{d \times \mu_g} \quad (11)$$

式中  $\bar{T}$  为动管柱内气体平均温度, K,  $\bar{T} = \frac{T_{wf} + T_{if}}{2}$ ;

$f$  为 moody 摩擦系数;  $H$  为油管下到气层中部的深度, m;  $q$  为标准状态下的气体流量,  $m^3/d$ ;  $d$  为油管内径, m;  $\gamma_g$  为气体相对密度,  $\gamma_g = \frac{M_g}{28.96}$ ;  $M_g$  为天然气平均分子量(跟天然气组分有关);  $\mu_g$  为气体黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $\frac{\epsilon}{d}$  为相对粗糙度。

## 1.2 高含水气井(采气期)井筒压力计算

对于枯竭油气藏型地下储气库来说,由于库内采出的天然气中含有水和凝析油等,因此,不能简单地按照注气时的干气模型来处理。通常情况下,在采气井的井筒压力模块设计中,可将天然气中含有凝析油和水的问题视为复合烃类气体与水的气、水两相问题,认为气、水两相混合物的流态仍为雾状流,因而气、水体积流速相同,即相对速度为零。在此条件下,可以根据气井干气模型来修正井筒公式<sup>[11-12]</sup>。

$$\int_{p_{if}}^{p_{wf}} \frac{ZT}{p} dp = \frac{1.324 \times 10^{-18} f (q_{sc} TZ)^2}{d^5 p^2} \times F_w \int_0^H 0.034 \ 15 \gamma_g dH \quad (12)$$

根据平均压缩系数与平均温度的计算方法,采用与干气井模型类似的推导步骤可得:

$$p_{wf} = \sqrt{p_{if}^2 e^{2s} + \frac{1.324 \times 10^{-18} f q \bar{T} \bar{Z}}{d^5} (e^{2s} - 1)} \quad (13)$$

$$s = \frac{F_w \times 0.034 \ 15 \gamma_g H}{\bar{T} \bar{Z}} \quad (14)$$

式中  $F_w$  为含水修正因子,  $F_w = 1 + \omega_w / \omega_g$ ;  $\omega_w$  为水的质量流量,  $kg/d$ ,  $\omega_w = q_w \times \rho_w / (24 \times 3 \ 600)$ ;  $\omega_g$  为气体

的质量流量,  $kg/d$ ,  $\omega_g = 1.205 \times q_g \times \gamma_g / (24 \times 3 \ 600)$ 。

由于采气期间,天然气流向是从井底到井口,已知量是井底压力,所以可推导出井口流压为:

$$p_{if} = \left[ \frac{p_{wf}}{e^{2s}} - \frac{1.324 \times 10^{-18} f q \bar{T} \bar{Z}}{d^5 e^{2s}} (e^{2s} - 1) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

## 1.3 井筒压力计算方法修正

在干气模型与湿气模型压力求解中,采用的均是平均温度与平均压缩系数方法求解压力值。这种计算方法便于程序编程,但其计算精度存在问题。笔者采用多段迭代的方法(以 100 m 井筒为一段),使误差最小化<sup>[13]</sup>。

$Z = F(P, T)$ , 在气井井筒压力传递过程中,压缩系数值随着井筒各个节点的压力、温度变化而变化。如果在整个井筒中以井底压力、温度与井口压力、温度平均值来进行计算,  $Z$  值误差会相对过大。以采气过程为例将井底压力与地层温度为初值,计算出井底压缩系数值,代入到式(15)中计算出距离井底 100 m 处压力值,再以此段井筒的平均压力、平均温度计算平均压缩系数,重新代入公式中计算出 100 m 处新的压力值,依此类推,直至计算出井口压力。这种计算方法充分考虑随着气井井深的变化压缩系数值是时刻改变的,计算误差较小,将多段迭代的方法写入到程序中依次计算出井口压力值。

## 2 HYSYS 中新增 Extension 单元模块

HYSYS 可以通过添加外围模块或组件来扩展它的功能。基于开放平台的理念,目前可以为 HYSYS 添加单元操作模块、反应动力学方程、属性包等。此外,完成 HYSYS 拓展的代码为动态链接库(DLL),程序代码不可见,可以很好地保护所有权。HYSYS 拓展后的模块或组件可以同 HYSYS 内部其他模块或组件一样共同参与流程模拟与数值计算。每一个拓展模块或组件都有其相应的图标和属性,不同于自动化链接功能,它存在于整个流程模拟中。HYSYS 拓展功能可以通过 C++、VB 等多种支持 OLE 的语言调试与调用<sup>[14-15]</sup>。在开发井筒压力模块时,首先利用 VB 语言编写 DLL 程序,把井筒压力传递数学模型嵌入到 DLL 程序中,并通过迭代分段计算的思路编写程序,通过编译计算出分段井筒节点的压力分布,最后得到井口压力、温度等参数。

VIEW EDIT 作为 HYSYS 单元模块内部界面设计的专门软件,设计模块输入、输出物流端口、数值显示界面等并可与 DLL 程序相关联,完成 DLL 注册后,

在 VB 与 HYSYS 单元模块之间能够进行内部数据计算传递,在 HYSYS 中可以添加新的 Extension 单元模块。完成井筒压力模块注册后,利用 VB 程序中的计算模块计算出压力、温度分布,通过系统内部实时数据传递,在 HYSYS 流程图中可以直接显示井底的压力、温度等数值。

### 3 嵌入效果图

在城市用气淡季时,地下储气库处于注气工作阶段,此时,所剩余的天然气经过增压等工艺流程后被注入地下储气库进行储存;而在城市用气旺季,长输管线中的天然气量无法满足消费需求,地下储气库则处于

采气工作阶段,利用其调峰功能弥补城市用气的缺口。

利用 HYSYS 软件可模拟地下储气库注采气期间地面的工艺流程,各个单元模块都有其独立的计算模型,通过模拟计算可得到各个物流的温度、压力、摩尔流量等数值。对这些数据进行实时监测与分析可以指导现场生产。图 1 所示为基于 HYSYS 的某地下储气库地面流程工艺模拟简图,其中混合器、冷凝器、换热器、三相分离器、两相分离器、安全阀、节流阀、泵、压缩机、安全阀、精馏塔等单元模块均有各自独立的内部计算模型,能够进行独立计算而互不影响。若通过物流关系将其连接后,在满足各个单元模块自由度的前提下,给定输入或者输出物流的组分、温度、压力等信息后,也可以迅速计算出整个物流的其他信息<sup>[16]</sup>。

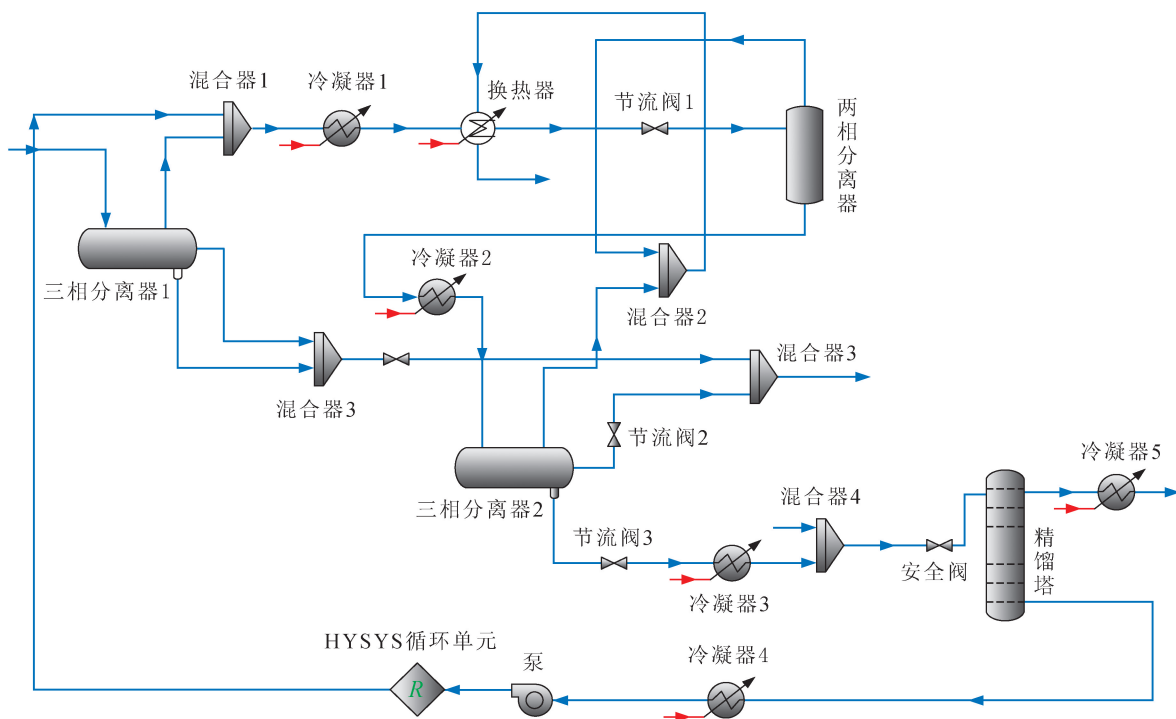


图 1 HYSYS 模拟某地下储气库地面工艺流程图

HYSYS 虽然地面工艺模拟功能十分强大,但因缺少地下储气库注采气井筒及地下压力系统模块,因而通过自身无法完成对整个气库地上井筒压力系统的一体化模拟计算,必须借助其他软件来完成井筒及地下压力系统的模拟转换,给现场实际应用带来不便。因此,有必要基于 HYSYS 的模块扩展功能单独开发专用的 HYSYS 注采气井筒及地下压力单元模块,进而在 HYSYS 的 PFD 流程图中直接观察井底的压力变化,实现地上井筒压力系统一体化模拟。

图 2 为 HYSYS 干气井筒模块与地面管网连接图,“注气井筒”就是依据 HYSYS 的 Extension 扩展功能,基于 VB 平台开发出的注气井筒压力模块。调

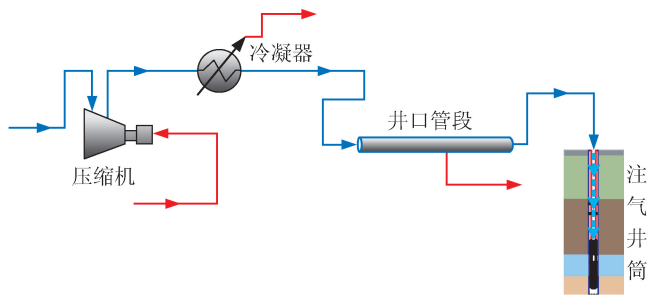


图 2 HYSYS 干气井筒模块与地面管网连接图

用该井筒 DLL 文件、完成单元模块注册后,就可在 HYSYS 的 PFD 流程图中直接添加拓展的地下井筒

模块。通过建立注气流程时的物流连接,即可组成一个简化的注气过程地下储气库地面管网与井筒模拟流程,此时输入端压力变化,井底压力也将依据所嵌入的井筒注气压力模型进行相应的改变。

## 4 计算实例

### 4.1 注气井

某气井注气周期内地层、井筒数据与生产数据如下:设计井深为 1 850 m,地层温度为 84 °C;注气期间天然气按干气计算;地层运行压力为 10 MPa;单井日注气量分别为 (8、10、15、20、25、30、35、40、60) × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;油管直径为 0.076 m。

在 HYSYS 流程图中输入相应的井口压力数据, HYSYS 自动计算出井底压力数据。表 1 列出了模拟计算数据与已知井底压力数据的对比结果。

表 1 注气井 HYSYS 计算数据与实测数据对比表

注气量/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	井口压力/ MPa	实测井底 压力/MPa	计算井底 压力/MPa
8	10.67	12.30	12.20
10	11.33	13.06	12.95
15	13.14	15.15	15.02
20	15.16	17.45	17.33
25	17.30	19.87	19.78
30	19.58	22.39	22.38
35	21.95	24.97	25.09
40	24.40	27.60	27.89

由表 1 可以看出,随着注气量的增加,井口压力与井底压力都会逐渐上升,并且井底压力会比井口压力高;因为井底压力与周围地层压力存在着压力差,天然气将随着注气的不断进行而逐渐扩散到气藏周围,完成天然气注气储存过程。通过所开发的 HYSYS 注气井筒压力模块计算得到的井底压力数据与实测井底压力数据非常接近,最大误差不超过 1.05%,满足现场的实际要求。

### 4.2 采气井

某气井采气周期内地层、井筒数据与生产数据如下:设计井深为 2 900 m,地层温度为 103 °C,气体比重为 0.60,地层运行压力为 27 MPa,单井日产气量分别为 (10、15、20、25、30、35、40、60) × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;油管直径为 0.076 m。

在 HYSYS 流程图中输入相应的井底压力数据, HYSYS 自动计算出井口压力数据。表 2 列出了模拟计算数据与已知井口压力数据的对比结果。

表 2 采气井 HYSYS 计算数据与实测数据对比表

采气量/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	井底压力/ MPa	实测井口 压力/MPa	计算井口 压力/MPa
10	26.83	20.61	20.53
15	26.71	20.35	20.30
20	26.57	20.04	20.00
25	26.40	19.66	19.70
30	26.21	19.22	19.40
35	26.00	18.72	18.89
40	25.76	18.15	18.44
45	25.49	17.51	17.81
60	24.53	15.09	5.35

随着采气量的增加,井口压力也随着井底压力的降低而逐渐降低。由于采气时地层压力高于井底压力,井底压力高于井口压力,所以地层中的天然气将被压力差驱使经由地下储气库井筒进入地面管网系统,完成天然气采气过程。通过所开发的 HYSYS 采气井筒压力模块计算得到的井口压力数据与实测井口压力数据非常接近,最大误差不超过 2%,满足现场的实际要求。

## 5 结束语

基于 VB 平台,利用 HYSYS 的模块扩展功能,单独开发出专用的 HYSYS 注采气井筒压力模块。通过调用该井筒 DLL 文件、完成单元模块注册后,可在 HYSYS 的 PFD 流程图中直接添加所开发的井筒模块。按要求建立注采气物流流程连接,即可构成注采气过程地下储气库地面管网与井筒模拟流程,可在同一个流程中观察到地上井筒压力的变化,实现了地上井筒一体化压力模拟计算,简化了操作流程。仿真结果表明,模拟计算结果与实测数据接近,计算误差满足实际工程需要,在地下储气库模拟应用中有重要作用。

### 参 考 文 献

- [1] 杨伟,王雪亮.国内外地下储气库现状及发展趋势[J].油气储运,2007,26(6):15-19.  
YANG Wei, WANG Xueliang. Underground gas storage—status quo and development worldwide[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(6): 15-19.
- [2] 郭洁琼,仇晶,杜学平.华北华东地区天然气季节调峰对比分析探讨[J].石油与天然气化工,2012,41(5):488-490.  
GUO Jieqiong, QIU Jing, TU Xueping. Comparative analysis of natural gas season peaking in North and East China [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2012, 41(5): 488-490.
- [3] 杨琴,余清秀,银小兵,等.枯竭气藏型地下储气库工程安全风险与预防控制措施探讨[J].石油与天然气化工,2011,40

- (4):410-412.
- YANG Qin, YU Qingxiu, YIN Xiaobing, et al. Discussion on the safety risk and prevention and control measures for dry gas reservoir type of underground gas storage engineering[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2011, 40(4): 410-412.
- [4] 王希勇,熊继有,袁宗明,等.国内外天然气地下储气库现状调研[J].天然气勘探与开发,2004,27(1):49-51.
- WANG Xiyong, XIONG Jiyou, YUAN Zongming, et al. Current status investigation of underground gas storages in the world[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2004, 27(1): 49-51.
- [5] 黄伟,陈玉祥,王欣.利用 WellFlo 软件提高井筒压力计算的精度[J].钻采工艺,2004,27(4):54-55.
- HUANG Wei, CHEN Yuxiang, WANG Xin. Improving the calculation accuracy of wellbore pressure by using Well-Flo software[J]. Drilling & Production Technology, 2004, 27(4): 54-55.
- [6] 李士富,呼延念超,李亚萍.调峰型天然气液化 HYSYS 软件模型[J].石油与天然气化工,2010,39(1):1-2.
- LI Shifu, HUYAN Nianchao, LI Yaping. HYSYS software model for variable-load natural gas liquefaction processes [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2010, 39(1): 1-2.
- [7] ODEN R D, JENNINGS J W, TEXAS A, et al. Modification of the Cullender and Smith equation for more accurate bottom hole pressure calculation in gas wells[C]//Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, 10-11 March 1988, Midland, Texas, USA. New York: SPE, 1988.
- [8] 朱德武,郑晓志,陈雷.凝析气井垂直管流计算新方法[J].断块油气田,1999,6(1):44-47.
- ZHU Dewu, ZHENG Xiaozhi, CHEN Lei. A new method of vertical flow calculating in condensate gas wells [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1999, 6(1): 44-47.
- [9] 杨继盛,刘建仪.采气实用计算[M].北京:石油工业出版社,1994:90-99.
- YANG Jisheng, LIU Jianyi. Gas recovery practical calculation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 90-99.
- [10] 孙福街,张小平,程林松,等.深层高温高压凝析气井压力分布的简便算法[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(6):57-60.
- SUN Fujie, ZHANG Xiaoping, CHENG Linsong, et al. Exact and simple method for calculating pressure distribution in deep gas condensate well with high temperature and pressure[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2004, 28(6): 57-60.
- [11] 黄炜.高气水比气井筒压力的计算方法[J].天然气工业,2002,22(4):64-66.
- HUANG Wei. Computing method of wellbore pressure in the gas well with high gas-water ratio[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(4): 64-66.
- [12] 杨志伦.含水气井井筒压力计算方法[J].油气井测试,2007,16(4):6-10.
- YANG Zhilun. Calculating method of wellbore pressure in the gas well with water content[J]. Well Testing, 2007, 16(4): 6-10.
- [13] 孟悦新,李相方,尹邦堂,等.凝析气井井筒流动压力分布计算方法[J].工程热物理学报,2010,31(9):1508-1512.
- MENG Yuexin, LI Xiangfang, YIN Bangtang, et al. The calculation of wellbore pressure distribution for condensate wells [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(9): 1508-1512.
- [14] Aspen Technology. Aspen HYSYS simulation basis[M]. Burlington, Massachusetts: Aspen Technology Inc., 2009: 100-210.
- [15] 王鹏宇.气体膜分离过程 HYSYS 模拟系统的研究[D].大连:大连理工大学,2005:22-37.
- WANG Pengyu. Study on HYSYS simulation system for gas membrane separation process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005: 22-37.
- [16] 李奇,姬忠礼,段西欢,等.基于 HYSYS 和 GA 的天然气净化装置用能优化[J].天然气工业,2011,31(9):102-106.
- LI Qi, JI Zhongli, DUAN Xihuan, et al. An optimization method for energy consumption of natural gas sweetening facilities based on the HYSYS simulator and genetic algorithms[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(9): 102-106.

(修改回稿日期 2013-08-01 编辑 何明)