

# 水淹枯竭气藏型地下储气库盘库方法

胥洪成 王皆明 李春

中国石油勘探开发研究院廊坊分院

胥洪成等.水淹枯竭气藏型地下储气库盘库方法.天然气工业,2010,30(8):79-82.

**摘要** 地下储气库多周期运行盘库,是研究气库运行规律、分析漏失、进一步提高气库运行效率和降低气库运行成本的关键环节。已建立的未水淹气藏型地下储气库盘库数学模型却并不适用于水淹枯竭气藏型地下储气库,评价结果明显高于实际注采气量。为此,通过深入分析水淹枯竭气藏型地下储气库气驱排水扩容机理、多周期注采运行过程中气水两相宏观与微观运动规律及可能的分布状态,创新性提出了可动用库存量的概念,以注采气量与视地层压力在一个注采周期内满足定容压升降方程为评价准则,建立了水淹枯竭气藏型地下储气库盘库模型。实例验证结果表明,该模型计算的结果与实际吻合,可用于水淹枯竭气藏型地下储气库多周期运行盘库计算和分析。为储气库运行、管理及调整提供了依据。

**关键词** 地下储气库 水淹 枯竭气藏 盘库 库存量 模型

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.08.021

我国已建成的用于城市调峰的地下储气库位于大港板桥油气区,以水淹枯竭气藏型为主<sup>[1-4]</sup>。针对未水淹气藏型储气库自身特点,以真实库存量为盘库出发点,建立了未水淹气藏型地下储气库盘库数学模型<sup>[5]</sup>,但该模型用于库群水淹枯竭气藏型地下储气库多周期运行动态评价,结果却高于实际2~4倍。未水淹气藏型地下储气库的气水关系简单,多周期运行过程中,储存在地下的天然气能及时有效动用;而库群水淹枯竭气藏型地下储气库的储层物性中等,中孔中渗,非均质性强,建库前经历近30a衰竭式开发,水驱强度为弱—中等,构造顶部气井水淹停喷,气水关系极为复杂,含气孔隙中存在封闭气,侵入水占据大量孔隙,多周期运行时井间孔隙未能有效波及,导致可动含气孔隙体积大大减少。因此,非常有必要建立适合水淹枯竭气藏型地下储气库盘库的评价模型。

## 1 水淹枯竭气藏型储气库的运行机理

受储层物性及润湿性影响,水淹枯竭气藏内部存在较多的封闭气。由于储层岩石具有亲水性,在气水两相流动过程中,当驱替压差不大时,无论是孔隙还是喉道,气水分布及流动方式主要表现为水包气,水沿管

壁流动,气体在孔道中央流动,水驱气过程形成不同形式的封闭气,表现为绕流、卡断、孔隙盲端、角隅以及“H”型孔道形成的封闭气<sup>[6-7]</sup>。在气藏开发过程中,由于地层水或边水侵入后占据了一定的孔隙空间,凝析气反凝析损失也会占据一部分孔隙空间,从而减少了可动含气孔隙体积。建库后多周期运行过程中气驱水淹区主要对象仍然是以大孔道为主,微细孔道难以有效驱替,有效供气半径减小,从而降低了注采井网对砂体控制程度,使得部分气体不能及时动用。为此,提出了可动用库存量概念(其模型如图1所示),即注采

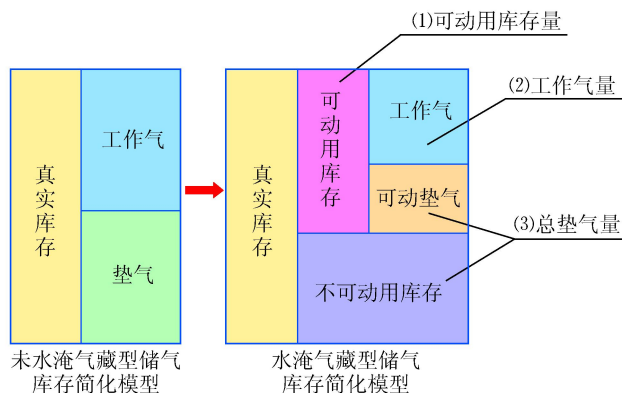


图1 储气库多周期运行库存量简化模型图

气阶段压力波及范围内能有效动用的库存量。库存分为可动用库存和不可动用库存两部分,彼此间相互作用和转化,随着注采井网及注采方式进一步完善,可动用库存量增加,动用程度也随之提高。

## 2 盘库数学模型的建立

在应用物质平衡方法建立可动用库存量及可动含气孔隙体积模型基础上,联立真实气体状态方程,建立了水淹枯竭气藏型储气库盘库模型,为盘库分析奠定坚实的理论基础,同时为国内同类型地下储气库建设和生产运行管理提供科学依据。

### 2.1 可动用库存量

对于由弱—中等水驱气藏改建的地下储气库,忽略岩石和束缚水弹性膨胀作用,假设注采气量与视地层压力在一个注采周期内满足定容压升降方程,建立了可动用库存量数学模型:

$$G_{\text{rm}(i-1)} = \frac{(-1)^i Q_{(i)}}{(p/ZT)_{(i-1)} - (p/ZT)_{(i)}} (p/ZT)_{(i-1)} \quad (1)$$

当缺乏高压物性资料时,采用摩尔体积加权得到混合流体密度,根据经验公式计算偏差系数,然后迭代求解可动用库存量<sup>[8-10]</sup>。

### 2.2 地下可动含气孔隙体积

将式(1)可动用库存量反算到地下储气库地层条件下,得到地下可动含气孔隙体积,数学表达式为:

$$V_{\text{m}(i)} = \frac{Z_{(i-1)} T_{(i-1)} p_{\text{sc}}}{p_{(i-1)} T_{\text{sc}}} G_{\text{rm}(i-1)} \quad (2)$$

### 2.3 可动库容量

当地下储气库运行到上限压力时,库内可动用的天然气在地面标准条件下的体积为可动库容量,数学表达式为:

$$G_{\text{rm max}(i)} = \frac{p_{\text{max}}}{Z_{\text{max}} T_{(i)}} \frac{T_{\text{sc}}}{p_{\text{sc}}} V_{\text{m}(i)} \quad (3)$$

### 2.4 可动垫气量

当地下储气库运行压力降低到下限压力时,库内可动用的天然气在地面标准条件下的体积为可动垫气量,数学表达式为:

$$G_{\text{rm min}(i)} = \frac{p_{\text{min}}}{Z_{\text{min}} T_{(i)}} \frac{T_{\text{sc}}}{p_{\text{sc}}} V_{\text{m}(i)} \quad (4)$$

### 2.5 工作气量

当地下储气库从上限压力运行到下限压力时采出的天然气量,即地下储气库可动库容量与可动垫气量之差为工作气量,数学表达式为:

$$G_{\text{work}(i)} = G_{\text{rm max}(i)} - G_{\text{rm min}(i)} \quad (5)$$

### 2.6 总垫气量

当地下储气库运行压力降低到下限压力时,库内天然气在地面标准条件下的体积为总垫气量,即为不可动用库存量与可动垫气量之和,数学表达式为:

$$G_{\text{r min}(i)} = G_{\text{r}(i)} - G_{\text{rm}(i-1)} + G_{\text{rm min}(i)} \quad (6)$$

### 2.7 总库容

当地下储气库运行到上限压力时,库内天然气在地面标准条件下的体积为总库容,即为工作气量与总垫气量之和,数学表达式为:

$$G_{\text{r max}(i)} = G_{\text{work}(i)} + G_{\text{r min}(i)} \quad (7)$$

### 2.8 垫气损耗量

从下限压力升至上限压力时地下储气库的注气量与从上限压力降至下限压力时地下储气库的采气量之差为垫气损耗量<sup>[11-13]</sup>,其大小为本周期与上一周期总垫气量之差,数学表达式为:

$$Q_{\text{SH}(i)} = G_{\text{r min}(i)} - G_{\text{r min}(i-1)} \quad (8)$$

## 3 应用实例

### 3.1 盘库计算基础数据

国内某弱边水凝析气藏型地下储气库设计运行压力区间为 30.5~13.0 MPa,建库前剩余地质储量为  $9.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,地层压力为 11.48 MPa,地层温度为 102 °C,剩余凝析气的相对密度为 0.757 0,凝析油相对密度为 0.750 0。地下储气库投入运行后,完成了 6 个完整的注气和采气周期,累计注气  $24.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,累计采气  $19.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,净注气量为  $4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,回采率为 81%,运行动态数据详见表 1。

### 3.2 盘库计算结果

根据新建的盘库数学模型,采用迭代算法,利用某地下储气库多周期运行注采动态系列数据,连续计算了各周期末的盘库技术指标,见表 2。

### 3.3 盘库计算结果分析

根据盘库结果,分析可动用库存量、可动含气孔隙体积、工作气量、垫气损耗量及损耗率等主要技术指标的变化规律。

#### 3.3.1 可动用库存量

可动用库存量逐渐增加,不可动用库存量总体略有降低,库存的动用程度随之增加,其变化示意图见图 2。经过 6 个周期后,可动用库存量由  $2.85 \times 10^8 \text{ m}^3$  增至  $11.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,增加了 3.1 倍;不可动用库存量由  $8.62 \times 10^8 \text{ m}^3$  降至  $8.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,降幅为 3.5%;库

表1 某地下储气库多周期运行动态数据表

周期	注入量		采出量		库内压力/ MPa	库内温度/ ℃	相对密度
	气/ $10^8 \text{ m}^3$	气/ $10^8 \text{ m}^3$	油/ $10^4 \text{ m}^3$	水/ $10^4 \text{ m}^3$			
1	1.59	/	/	/	21.45	93.2	0.5907
	/	0.94	0.28	0.19	13.80	89.3	0.6066
2	4.54	/	/	/	30.80	98.0	0.5906
	/	3.89	1.44	1.88	12.23	93.0	0.6040
3	5.17	/	/	—	31.08	98.0	0.5905
	/	1.18	0.09	0.05	24.65	97.0	0.6012
4	2.69	/	/	/	29.81	105.7	0.5904
	/	3.30	1.20	1.72	17.67	101.7	0.5987
5	4.53	/	/	/	30.65	99.9	0.5904
	/	5.18	0.51	0.92	14.22	98.0	0.5959
6	6.07	/	/	/	31.35	95.6	0.5904
	/	5.38	0.60	0.98	15.26	93.7	0.5933

表2 某地下储气库多周期运行盘库数据表

周期	真实库存量/ $10^8 \text{ m}^3$	可动库存量/ $10^8 \text{ m}^3$	可动含气孔隙体积/ $10^4 \text{ m}^3$	可动库容量/ $10^8 \text{ m}^3$	可动垫气量/ $10^8 \text{ m}^3$	工作气量/ $10^8 \text{ m}^3$	总垫气量/ $10^8 \text{ m}^3$	总库容/ $10^8 \text{ m}^3$	垫气损耗量/ $10^8 \text{ m}^3$
1	11.47	2.85	149	3.77	1.80	1.97	10.45	12.42	0.57
2	15.07	7.01	280	6.96	3.30	3.66	11.43	15.09	0.98
3	16.34	7.17	285	7.07	3.25	3.81	12.45	16.26	1.01
4	17.85	9.39	397	9.56	4.47	5.09	13.03	18.12	0.58
5	19.07	10.55	427	10.51	4.89	5.62	13.45	19.07	0.43
6	19.96	11.63	456	11.40	5.30	6.10	13.68	19.77	0.22

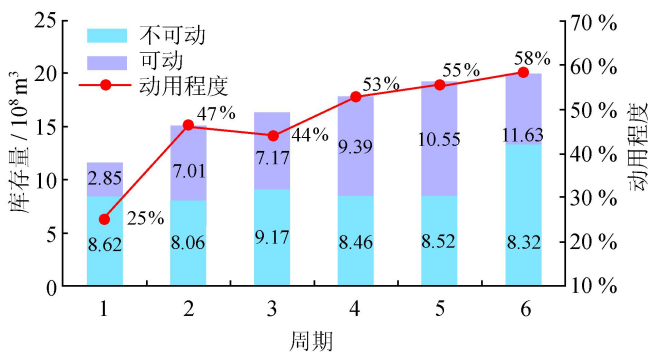


图2 多周期运行库存量变化分析图

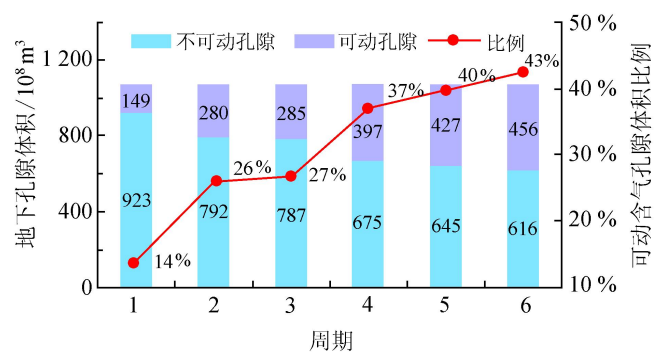


图3 多周期运行可动含气孔隙体积变化分析图

存动用程度从25%增至58%，提高了1.3倍，但目前仍有42%库存不可动用。

### 3.3.2 可动含气孔隙体积

可动含气孔隙体积总体上具有明显上升趋势，运行初期较快，之后减缓趋稳，其变化示意图见图3。经过6个周期后，可动含气孔隙体积由 $149 \times 10^4 \text{ m}^3$ 增

至 $456 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，增加了2倍。第6周末库内可动含气孔隙体积仅为总孔隙体积的43%，未能动用的孔隙体积比例高达57%。

### 3.3.3 工作气量

工作气能力快速提高，工作气比例总体增加，其变化示意图见图4。经过6个周期后，工作气量由1.97

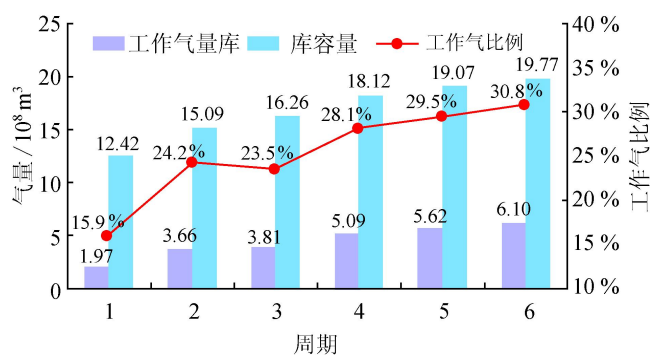


图 4 多周期运行工作气量变化分析图

×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 增至 6.10×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 增加 2.1 倍。工作气比例由 15.9% 增至 30.8%, 增幅为 90%。

### 3.3.4 垫气损耗量及损耗率

运行初期气库快速扩容, 垫气损耗量增加, 损耗率较高, 之后进入稳定扩容阶段, 垫气损耗量开始减少, 损耗率随之大幅降低, 其变化示意图见图 5。前 3 个周期损耗量由 0.572×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 增至 1.101×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 增幅为 92%; 随后 3 个周期快速降至 0.221×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 降幅达 80%。垫气损耗率由 35.9% 降低到 3.6%, 降幅达 90%。

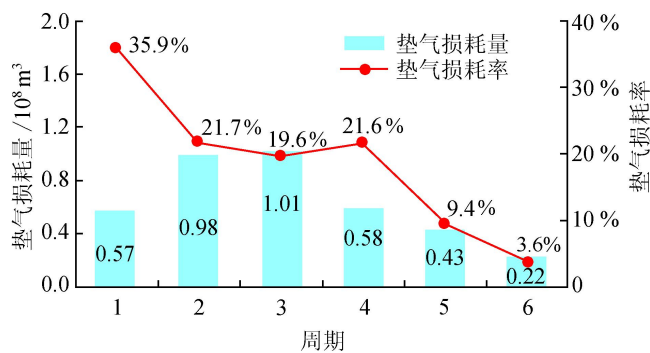


图 5 多周期运行垫气损耗量变化分析图

### 3.4 小结

1) 由于地下储气库在建库前大面积水淹, 受储层物性及润湿性影响, 孔隙中存在大量封闭气, 建库后注入气可能被再次捕集。因此, 水淹枯竭气藏型地下储气库多周期运行过程中部分含气孔隙不能及时动用, 即存在不可动用库存。

2) 含气孔隙体积总体呈现上升趋势。但由于建库前边水侵入占据孔隙空间, 多周期运行注采井网控制范围有限, 有效供气半径小, 导致大量孔隙仍不能有效动用。

3) 由于地下可动含气孔隙体积上升, 使气库总体

运行效率得以提高, 工作气量及工作气比例大幅度增加, 垫气损耗量及损耗率总体降低。

## 4 结论

1) 针对水淹枯竭气藏型地下储气库的自身特点, 首次提出了可动用库存量概念, 建立了适合于弱—中等水驱的水淹枯竭气藏型地下储气库盘库的数学模型, 进一步丰富和发展了储气库盘库理论。通过国内某水淹枯竭气藏型地下储气库 6 个周期实例计算验证了新建盘库数学模型的正确性。

2) 受储层物性及润湿性影响, 水淹枯竭气藏内部存在较多封闭气, 建库后气驱水淹区主要对象为储层相对发育带, 其他区域难以有效驱替, 因此, 多周期运行过程中部分库存不可动用。

3) 国内某水淹枯竭气藏型地下储气库多周期运行盘库分析表明: 盘库技术指标的可靠性在很大程度上取决于注采气末平均地层压力, 因此, 建议在注采转换时留够平衡期, 加强压力监测。

4) 该方法已应用于国内某库群多周期运行动态跟踪评价中, 取得较好效果, 为水淹枯竭气藏型地下储气库调整方案编制与实施、多周期运行配注配产优化提供了科学依据, 同时对提高气库运行效率、降低成本具有重要指导意义。

### 符 号 说 明

$G_{r(i)}$  为某周期末库存量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $G_{rm(i-1)}$  为某周期初可动库存量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $G_{rm \max(i)}$  为某周期可动库容量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $G_{rm \min(i)}$  为某周期可动垫气量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $G_{r \text{ work}(i)}$  为某周期工作气量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $G_{r \min(i)}$  为某周期总垫气量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $G_{r \max(i)}$  为某周期总库容量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $Q_{SH(i)}$  为某周期垫气损耗量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $V_{m(i)}$  为某周期可动含气孔隙体积, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $Q_{(i)}$  为某周期注采气量, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;  $p_{(i)}$  为某周期末地层压力, MPa;  $T_{(i)}$  为某周期末地层温度, °C;  $Z_{(i)}$  为某周期天然气偏差系数;  $p_{sc}$  为标准状态下的压力, MPa;  $T_{sc}$  为标准状态下的温度, K;  $i$  表示注采周期数, 其中奇(偶)数分别表示注(采)气周期。

### 参 考 文 献

- [1] 王起京, 张余, 刘旭. 大张坨地下储气库地质动态及运行效果分析[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 89-92.
- [2] 杨树合, 何书梅, 杨波, 等. 大张坨地下储气库运行实践及评价[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 425-428.
- [3] 张幸福, 谢广禄, 曾杰, 等. 大张坨地下储气库运行模式分析[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(4): 240-244.
- [4] 王皆明, 姜风光. 地下储气库注采动态预测模型[J]. 天然气工业, 2009, 29(2): 108-110.
- [5] 王皆明, 胡旭健. 凝析气藏型地下储气库多周期运行盘库

- 方法[J].天然气工业,2009,29(9):100-102.
- [6] WU Haojiang, ZHOU Fangde, WU Yuyuan. Intelligent identification system of flow regime of oil-gas-water multiphase flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(3):459-475.
- [7] CIESLINSKI J T, MOSDORF R. Gas bubble dynamics — experiment and fractal analysis [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(9):1808-1818.
- [8] 李登伟,张烈辉,周克明,等.可视化微观孔隙模型中气水两相渗流机理[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008, 32(3):80-83.
- [9] 周克明,李宁,张清秀,等.气水两相渗流及封闭气的形成机理实验研究[J].天然气工业,2002,22(增刊):122-125.
- [10] 杨继盛,刘建仪.采气实用计算[M].北京:石油工业出版社,1994.
- [11] 刘旭,王凤田,王起京.Q/SY 195.1—2007 地下储气库天然气损耗计算方法[S].北京:石油工业出版社,2007.
- [12] 白雪峰,房爱兵.地下储气库天然气回采的节流脱水分析[J].天然气工业,2006,26(6):121-123.
- [13] 谭羽非,林涛.利用地下含水层储存天然气应考虑的问题[J].天然气工业,2006,26(6):114-117.

(修改回稿日期 2010-06-13 编辑 何 明)