

地下储气库调峰产量与采气井数设计技术

马小明¹ 张秀丽¹ 张雪芳¹ 石恩荣² 成亚斌¹ 马东博¹

1. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院 2. 中国石化胜利油田有限公司河口采油厂

马小明等. 地下储气库调峰产量与采气井数设计技术. 天然气工业, 2013, 33(10): 89-94.

摘要 地下储气库的调峰产量和采气井数是其设计的关键指标, 目前国内主要以估算的方式来确定这两个参数, 未见理论与实际成熟配套的技术方法, 由此带来了地下储气库实际运行工作气量无法达标、采气调峰能力不足等后果, 直接影响到了地下储气库的运行效果。为此, 根据已建成的中国石油大港油田地下储气库群多年实际运行效果, 在研究地下储气库实际调峰运行规律的基础上, 以地下储气库不同调峰强度为模式, 应用微积分数学描述方法, 创建了以计算地下储气库日调峰气量、高峰期和低谷期采气井数为核心的马成 MC 公式, 描述了地下储气库工作气量、调峰气量、单井产量、采气井数之间的数学关系, 解决了在工作气量控制下调峰日产气量与采气井数的设计技术问题, 对地下储气库的调峰产量预测和生产井数设计具有指导意义。

关键词 地下储气库 工作气量 调峰产量 调峰曲线 采气井数 马成公式 生产井数

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.10.015

Productivity of the UGS storage wells and well numbers

Ma Xiaoming¹, Zhang Xiuli¹, Zhang Xuefang¹, Shi Enrong², Cheng Yabin¹, Ma Dongbo¹

(1. Exploration and Development Research Institute of Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China; 2. Hekou Gas Production Plant of Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 1, pp.89-94, 10/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The productivity of storage wells and well numbers are two key indexes in the design of UGS facilities, the determination of which still depends on estimation in present China. For lack of good enough theoretical and practical estimating methods, the actual operational working gas volume failed to reach the expected objective, and was unable to meet the peak-shaving need, which leads to a poor performance of UGS facilities. In view of this, according to many years' actual practices of groups of UGS facilities in the Dagang Oilfield and based on the study of the routine peak shaving of UGS facilities, the calculus method was applied to establish the domestic pioneer Ma-Cheng (MC) Formula with the daily peak-shaving gas volume, well numbers at peak and valley points as the core. This formula not only describes well the mathematical relationship between the operational gas volume, peak-shaving gas volume, single-well productivity, and well numbers, but solve such a technical problem in UGS design as how to balance the peak-shaving daily gas volume and well numbers under the controlled working gas volume. This formula is of great value in forecasting the peak-shaving productivity of UGS facilities and designing the production well numbers.

Key words: underground gas storage (UGS), working gas volume, peak-shaving gas volume, peak-shaving curve, gas production well number, Ma-Cheng Formula

作者简介: 马小明, 1962 年生, 高级工程师, 博士; 现任中国石油大港油田公司气藏工程首席专家、勘探开发研究院技术总监, 主要从事天然气开发和储气库研究工作。地址: (300280) 天津市中国石油大港油田公司勘探开发研究院新楼 1012 室。电话: (022) 63953147。E-mail: mxm688@sina.com

自2000年中国石油大港油田公司大张坨地下储气库正式建成以来,中国投入规模运营的地下储气库运营历史只有13年。由于中国地下储气库建库历史短、经验积累性差等原因,造成地下储气库所需采气井数设计方法不严谨,设计关键节点不清楚,估算的采气井数不能满足地下储气库运营需要,由此将带来3种危害:①在地下储气库采气期内因生产井数不够、累产气量不足造成地下储气库工作气量指标无法达到;②在地下储气库采气期内因生产井数不够、日产气量不足降低了地下储气库采气调峰能力;③建井工程与地面配套按少井低调峰能力决定了工程量规模,将增大后续调整难度。

根据中国已建成的中国石油大港油田公司地下储气库(以下简称大港地下储气库)群多年实际运行效果,总结地下储气库实际运行规律,评价原方案的设计思路和采气井数设计方法,引入微积分数学描述方法,创建一套以计算日调峰气量和合理采气井数为核心的采气井数优化设计技术,对指导中国地下储气库采气井数的设计、提升方案设计水平具有重要意义。

1 地下储气库调峰采气规律与规模

地下储气库对天然气用气市场的调峰补气作用,

决定了气库在自身具有的能力范围内,其采气供气规律必须与用气市场的需求规律相同,调峰采气规模必须与用气市场的需求规模相近^[1-3]。因此,地下储气库的方案设计理念 and 方案指标的设计选取必须以气库具备的工作气能力为基础,以适应用气市场的需求规律为前提,以尽可能满足市场的需气规模为目标。

天然气用途主要包括民用燃料气和工业原料气两类,通常用气量受季节温差的影响较大,存在着市场需求气量的不均衡性,在中国北方地区的冬季取暖以及在南方地区的夏季天然气制冷季节,各类天然气用户对天然气需求量急剧大幅提升,峰谷差为2~5倍。

地下储气库与用气市场的紧密相关性决定了气库生产的不均衡性。在供气期内,需根据市场用气量的变化来确定气库采气量的变化。从大港地下储气库群已经运行的十余个周期看,在中国北方冬季具有典型的用气规律,通常在11月中旬到下年度3月中旬的冬季120 d内,用气市场经历了低—高一低的用气量变化过程,则地下储气库群和储气库均相应发生了低—高一低的采气量变化过程,其气库采气量调峰曲线近似“钟形”分布(见图1、2)。气库采气量在春节期间达到高峰值,在采气期开始和结束的期间达到低谷值,其余时间为中低调峰期,高峰期与低谷期日产气量的峰谷比为2~5倍。

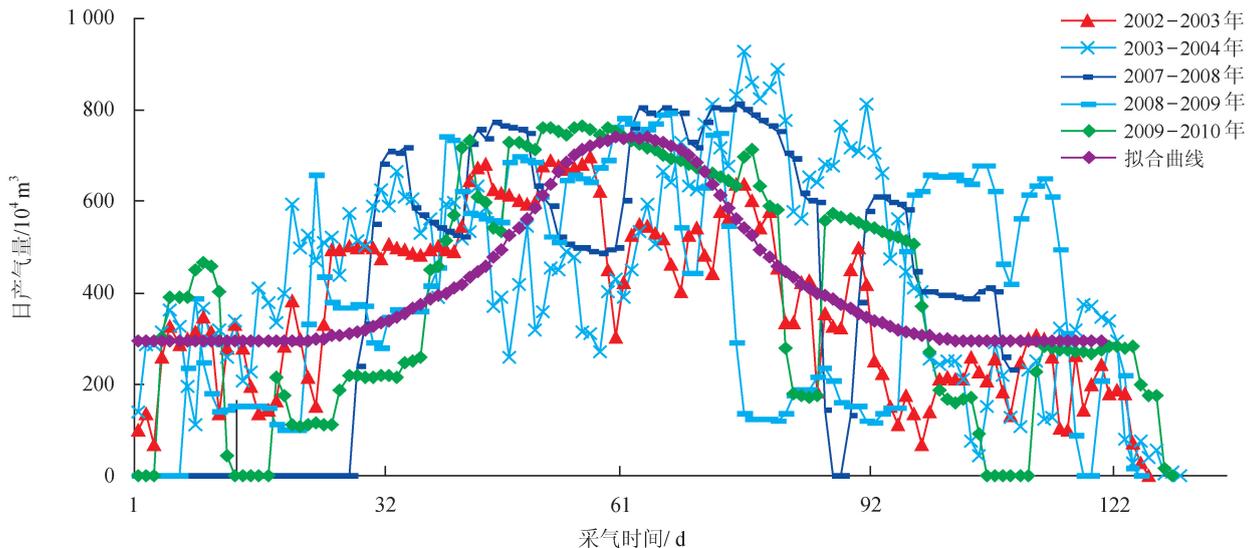


图1 某地下储气库不同采气周期调峰采气曲线图

2 地下储气库调峰采气运行特征

将华北地区已投入生产运行的地下储气库调峰采气规律与规模进行归纳,可以建立标准的地下储气库调峰采气运行模式图(图3、4)。

分析地下储气库调峰采气运行模式图,可以明确气库调峰采气运行的关键指标如下:

1) 气库工作气量(G_w): 采气期内采气总量, 10^4 m^3 , 图中阴影面积, 具体数值由气库方案确定。由于不同气库的规模大小不同, 因此气库工作气量数值不同。

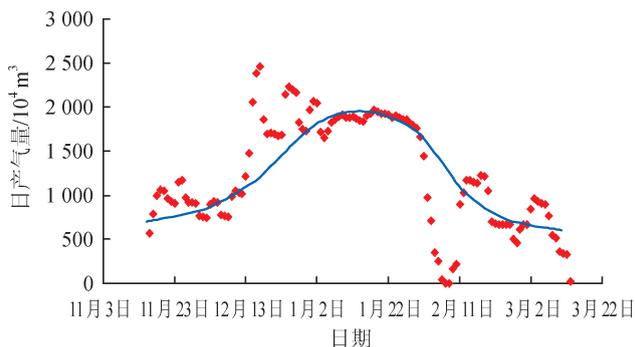


图 2 某地下储气库群单一采气周期调峰采气曲线图

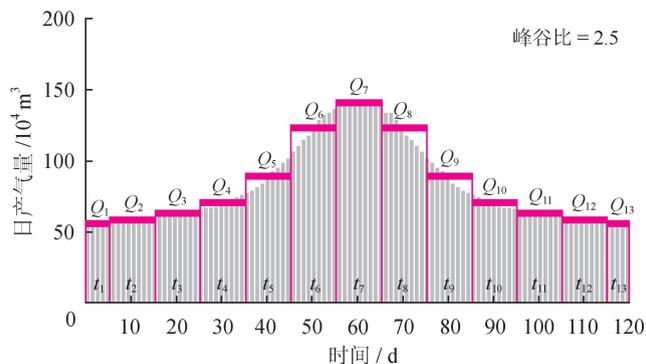


图 3 地下储气库峰谷比 2.5 时调峰采气运行模式图

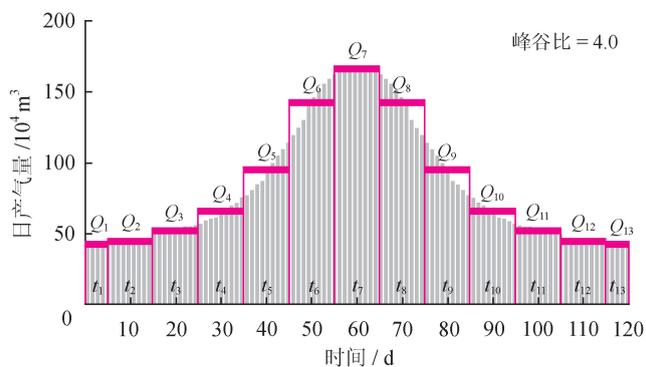


图 4 地下储气库峰谷比 4 时调峰采气运行模式图

2) 气库采气期 (T): 调峰采气时间天数, d , 图中横坐标长度, 具体数值根据气库方案确定。本处按华北地区供气规律取 $T=120 d$, 其中为保证研究精度, 可将采气期细分, 如本例为 12 个周期, 每周期 $\Delta t=10 d$ 。周期特征: ①各周期以采气期中间点为基点, 向两侧呈均匀对称分布; ② Δt_1 、 Δt_{13} 周期为气库最低调峰采气期, 各为 $1/2$ 周期 Δt ; ③ Δt_7 周期为气库最高调峰采气期, 其余周期为中间过渡调峰采气期。

3) 气库调峰产量 (Q_i): 采气期内某天的日产气量 ($10^4 m^3$), 图中某天所对应的纵坐标值。调峰气量分布特征: ①尽管气库实际采气运行过程中, 每一天的调峰产量不尽相同, 但在同一周期 Δt 内, 可视为日产气

量为一均值。②各周期调峰产量具有较为固定的比例关系。在 12 个计算单元内, 以最末半个周期 Δt_{13} 平均日产气量 (Q) 为基数测算。③气库最高调峰气量以春节为中心点的前后各 5 d 内取平均日产量。气库最低调峰气量以停止供气前的 5 d 内平均日产量。④气库高峰采气期平均日产气量与低峰采气期平均日产量的比值称为峰谷比, 即 Q_7/Q_{13} 。

4) 气库合理的采气井数 (N): 同时满足高峰采气期日产气量 (Q_7) 和低峰采气期日产气量 (Q_{13}) 的所需采气井数。由于气库采气是降压开采过程, 早期 Δt_1 阶段气库压力最高, 单井产气能力最强, 但调峰需求气量不高, 需要的气井数最少; 高峰采气期 (Δt_7) 阶段气库压力中等, 单井产能较强, 但调峰需求气量 (Q_{max}) 最高, 需要的气井数最多为 N_g ; 晚期 Δt_{13} 阶段气库压力最低, 单井产能最弱, 但调峰需求气量最低, 需要的气井数为 N_d ; N_g 和 N_d 井数不一定谁多谁少, 有两种可能, 一是 N_g 口井在气库调峰最末期的产量可以达到最低调峰量 (Q_{13}) 时, 说明 N_g 口井可以实现气库各阶段指标, 此时气井数合理。二是 N_g 口井在气库调峰最末期的产量不能达到最低调峰量 (Q_{13}) 时, 说明 N_g 口井无法满足最低调峰需求, 则应按满足 Q_{13} 产量的井数 N_d 作为气库合理的调峰井数 N 。

3 地下储气库调峰采气运行数学模型与计算方法

地下储气库调峰采气运行数据是由气库实际生产数据统计得到, 由此很难建立标准的牛顿—莱布尼兹定积分计算数学模型, 但可以根据定积分原理, 将地下储气库调峰采气运行模式图划分为若干个计算单元, 计算每个单元的面积, 并将全部计算单元面积求和, 即为全部图形的总面积 (图 5), 在物理意义上图形总面积即对应气库的工作气量, 可由此反推求得任一计算单元的 Q_n 值, 即调峰日产气量值。

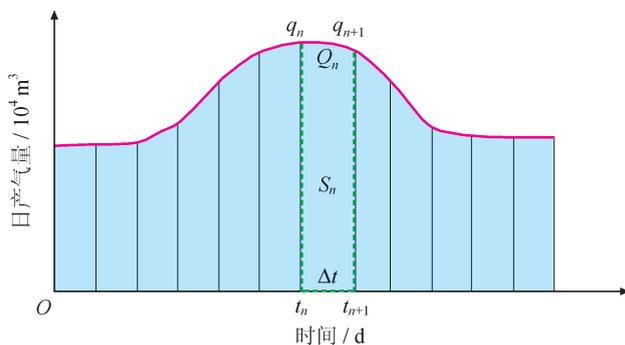


图 5 地下储气库调峰采气运行数学模型图

高等数学提供了计算图形面积积分近似值的方法^[4],计算精度可以满足一般工程计算的需要。通常为了提高近似计算的精度,可以采取如下方法:①根据计算精度要求化小计算单元的自变量 Δt 长度。②每个计算单元小曲边图形的面积可以用相应的矩形或梯形面积来近似代替,但以梯形法精度较高。

基于定积分在几何上表示为曲边梯形的面积,所以,定积分计算单元小曲边图形面积的近似值方法为:用分点 $t=t_1, t_2, \dots, t_n$ (t_n 将 T 分为 n 个等长的小单元, $\Delta t_n = T/n$), 过分点做纵线交于曲线得交点 $q = q_1, q_2, \dots, q_n$ 点,将相邻两点连接起来得弦线,于是得到 n 个小梯形(图5)。

梯形面积的计算公式为:

$$S_n = (q_n + q_{n+1})\Delta t / 2 \quad (1)$$

在一般工程项目中,当 Δt_n 取值较小,单元内的产量变化不大时, q_n 与 q_{n+1} 可取平均值 $Q_n = (q_n + q_{n+1})/2$,则式(1)可简化成:

$$S_n = Q_n \Delta t_n \quad (2)$$

总面积的计算公式为:

$$s = \sum_{n=1}^n S_n = \sum_{n=1}^n Q_n \Delta t_n \quad (3)$$

对于某一特定的地下储气库,气库工作气量 G_w 相当于图形总面积 S ,则由马小明一成亚斌建立的数学公式表示如下:

$$G_w = \sum_{n=1}^n Q_n \Delta t_n \quad (4)$$

式(4)明确了地下储气库工作气量与变化的日调峰气量之间的数学关系,为国内首创,简称马成公式(1)或MC1。其中 Q_n 为 Δt_n 单元内的平均日产气量, 10^8 m^3 ; S_n 为 Δt_n 单元内的面积。

4 地下储气库调峰采气运行日采气量计算方法

地下储气库日调峰气量是变化值,按照已有的地

下储气库调峰采气运行模式,不同计算周期的日采气量具有较为固定的比例关系,已由马小明一成亚斌计算得出,称为马成系数 m 值(表1),系数的应用条件是在120 d的采气期内,日采气量“钟形”对称分布,划分成计算周期数12次(最初和最末的2个半周期合为1个周期),每周期长10 d。当设定最低采气周期的日产气量为基准日产气量 Q 时,其他周期的日产气量为基准产量的 m 倍。由马小明一成亚斌建立的数学公式表示如下:

$$Q_n = m_n Q \quad (5)$$

式(5)明确了地下储气库各个计算周期的日采气量数学比例关系,为国内首创,简称马成公式(2)或MC2。

将式(5)带入式(4),得

$$G_w = \sum_{n=1}^n Q_n \Delta t_n = \sum_{n=1}^n m_n Q \Delta t_n = (m_1 + m_2, \dots, m_{12}) Q \Delta t_n \quad (6)$$

将式(6)变形,即得到计算低谷期日采气量的公式:

$$Q = G_w / [(m_1 + m_2 + \dots + m_{12}) \Delta t] \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)可以给出各个计算周期的日采气量 Q_n 。此公式是马成公式1(MC1)的常用代数表达式,简称为马成公式或MC式。

对于某特定的地下储气库,其工作气量 G_w 已由方案给定,计算单元已选定区间长度 $\Delta t_n = 10 \text{ d}$, m 值可由表1查得。将上述已知参数带入马成公式(7)即可求得基准日产气量 Q ,将 Q 带入式(5)即可求得任一计算周期的日采气量 Q_n 。

对于地下储气库不同峰谷比时的低峰期基准日产气量 Q ,可由马成公式和马成系数计算得到(表1),为与工程项目表述习惯相一致,气量 Q 单位可选为 $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,则数值应乘以10 000倍,计算结果如下:

$$\text{峰谷比为 } 2.0 \text{ 时, } Q = 60G_w \quad (8)$$

$$\text{峰谷比为 } 2.5 \text{ 时, } Q = 56G_w \quad (9)$$

表1 地下储气库日产气量比例——马成系数(m)表

峰谷比	采气周期												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2.0	1.00	1.04	1.12	1.26	1.53	1.87	2.00	1.87	1.53	1.26	1.12	1.04	1.00
2.5	1.00	1.04	1.12	1.26	1.59	2.19	2.50	2.19	1.59	1.26	1.12	1.04	1.00
3.0	1.00	1.04	1.12	1.34	1.86	2.62	3.00	2.62	1.86	1.34	1.12	1.04	1.00
3.5	1.00	1.04	1.14	1.43	2.03	2.99	3.50	2.99	2.03	1.43	1.14	1.04	1.00
4.0	1.00	1.05	1.24	1.56	2.27	3.42	4.00	3.42	2.27	1.56	1.24	1.05	1.00

注:1)采气周期 Δt 为10 d,全时长为120 d;2) $\Delta t_1 + \Delta t_{13} = \Delta t = 10 \text{ d}$

$$\text{峰谷比为 } 3.0 \text{ 时, } Q=50G_w \quad (10)$$

$$\text{峰谷比为 } 3.5 \text{ 时, } Q=46G_w \quad (11)$$

$$\text{峰谷比为 } 4.0 \text{ 时, } Q=42G_w \quad (12)$$

5 地下储气库调峰采气合理井数的计算方法

地下储气库合理采气井数就是同时能够实现地下储气库工作气量与日调峰气量的最少井数,合理采气井数与地下储气库调峰采气规律及规模直接相关,与不同采气时间对应的单井产量高低直接相关。根据地下储气库运行关键节点的产量需要,合理的采气井数(N)需要满足 3 个条件:①满足冬季春节前后市场最高需气量 Q_{\max} ;②满足采气期末市场最低需气量 Q ;③能够达到采气期总产气量即地下储气库工作气量 G_w 。

由马成公式 MC 可知,满足了地下储气库日产气量(Q)的同时即可实现工作气量(G_w)。因此,计算地下储气库合理采气井数可归结为计算满足采气期日产气量的井数,但由于不同采气阶段地下储气库压力不同造成单井产量不同^[5],同时市场的需气量不同,不同时段相对应的采气井数可能不同,需要分别计算高峰期气井数(N_g)和低谷期气井数(N_d),取最多井数作为合理井数(N)。换言之,能够同时满足高峰期和低谷期日产气量的采气井数即为合理采气井数(N)。

根据物质平衡原理^[6],地下储气库日采气量 Q_n 应等于地下储气库 N_n 口采气井数的单井日采气量 q_n 的总和,即

$$Q_n = N_n q_n \quad (13)$$

将式(13)变形后,得到采气井数计算公式:

$$N_n = Q_n / q_n \quad (14)$$

式(14)为采气井数计算的通用公式。

将式(7)代入式(14),得到在低谷采气期采气井数的计算公式:

$$N_d = Q / q_d = \{G_w / [(m_1 + m_2 + \dots + m_{12}) \Delta t_n]\} / q_d \quad (15)$$

将式(5)代入式(14),得到在高峰采气期采气井数的计算公式:

$$N_g = Q_{\max} / q_g = m_7 Q / q_g \quad (16)$$

合理采气井数选取条件为: $N \geq N_g$, $N \geq N_d$, 即选取 N_g 与 N_d 中的最大值作为合理井数(N)。

6 地下储气库调峰产量与合理采气井数实例检验

某地下储气库经过 10 余年的生产运行^[7],生产指

标已得到确认,即最大库容量为 $17.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,有效工作气量为 $6.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,最高调峰期日产气量为 $800 \times 10^4 \sim 900 \times 10^4 \text{ m}^3$,运行压力为 $15 \sim 29 \text{ MPa}$,单井产能为 $70 \times 10^4 \sim 35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采气井 15 口,运行时间为 120 d,用此实例验证马成公式计算的地下储气库调峰产量和合理采气井数是否合理。

地下储气库运行遵循市场用气规律,调峰峰谷比取 2.5。用马成公式和马成系数表进行计算。

1) 地下储气库低谷期日产气量:

$$Q = G_w / [(m_1 + m_2 + \dots + m_{12}) \Delta t_n] = 56G_w = 56 \times 6 \times 10^4 \text{ m}^3 = 336 \times 10^4 \text{ m}^3$$

2) 地下储气库高峰期日产气量:

$$Q_{\max} = m_7 Q = 2.5 \times 336 \times 10^4 \text{ m}^3 = 840 \times 10^4 \text{ m}^3$$

3) 在低谷采气期采气井单井产量为 $35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,则低谷采气期采气井数为:

$$N_d = Q / q_d = 336 / 35 = 9.6 (\text{口})$$

4) 在高峰采气期采气井单井产量 $55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,则高峰采气期采气井数为:

$$N_g = Q_{\max} / q_g = 840 / 55 = 15.3 (\text{口})$$

5) 合理采气井数选取条件:

$N \geq N_g$ (15 口); $N \geq N_d$ (10 口); 选取 N_g 与 N_d 中的最大值作为合理井数,即 $N = 15$ 口。

计算结果表明:应用马成公式计算该地下储气库调峰峰谷比为 2.5 时,最高调峰期日产气量为 $840 \times 10^4 \text{ m}^3$,合理采气井数为 15 口。与实际相比,日产气量符合率为 99%,采气井数符合率为 100%,预测值与实际状态高度一致,证实该计算方法科学实用。

7 结论

1) 依据已建地下储气库群的实际调峰运行数据,总结地下储气库运行规律,并建立标准的地下储气库调峰采气运行模式图,具有规范性和代表性。

2) 运用微积分数学描述方法,创建了以计算日调峰气量、采气井数为核心的马成 MC 公式,描述了地下储气库工作气量、调峰气量、单井产量、采气井数之间的数学关系,创建了在工作气量控制下的日产气量与采气井数设计技术。

3) 利用建立的日产气量与采气井数设计技术对已运行多年的某地下储气库进行实例验证,计算结果与实际运行数据相符,说明该设计技术科学实用。

4) 以中国华北地区天然气用气市场需求规律和地下储气库采气规律为基础,建立了地下储气库日产气

量与采气井数优化设计技术,对于全国区域内的地下储气库日产气量与井数设计问题,因其在设计思想、设计原理、设计方法、技术路线、计算公式和参数建立等关键技术环节和技术要素是相同的,所以可以推广应用。若遇到不同运行状态的特殊地下储气库,仅进行参数数值的适当修正即可,不影响设计技术的正确性。

参 考 文 献

- [1] 马小明,赵平起.地下储气库设计实用技术[M].北京:石油工业出版社,2011:48-51.
MA Xiaoming, ZHAO Pingqi. Design and practical technique of underground natural gas storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 48-51.
- [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, DU 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] 赵树嫄.微积分[M].北京:中国人民大学出版社,1982:246-255.
ZHAO Shuyuan. Calculus[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 1982: 246-255.
- [5] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2000:247-248.
LI Shilun. Natural gas projects[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 247-248.
- [6] 杨广荣,余元洲,贾广雄,等.物质平衡法计算天然气地下储气库的库容量[J].天然气工业,2003,23(2):96-99.
YANG Guangrong, YU Yuanzhou, JIA Guangxiong, et al. Using material balance calculation underground natural gas storage capacity[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 96-99.
- [7] 马小明,杨树合,史长林,等.为解决北京市季节调峰的大张坨地下储气库[J].天然气工业,2001,21(1):105-107.
MA Xiaoming, YANG Shuhe, SHI Changlin, et al. Da Zhangtuo underground natural gas storage in order to resolve Beijing seasonal demand gas[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(1): 105-107.

(收稿日期 2013-08-01 编辑 何 明)