

# 油藏 CO<sub>2</sub> 地质埋存潜力的计算方法

丁帅伟, 李治平

(中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:**油藏具有良好的封闭条件和巨大的储存空间, 可以作为地质埋存 CO<sub>2</sub> 的理想场所。CO<sub>2</sub> 地质埋存的潜力可以从自由气埋存、溶解埋存和矿化埋存 3 个方面进行计算。自由气埋存量可用基于类比法的有效埋存量计算方法进行计算, 溶解埋存量采用相关溶解度公式进行计算, 矿化埋存量通过 X 衍射实验进行评价。利用文中提出的计算方法对某油田 CO<sub>2</sub> 的地质埋存潜力进行了初步评估。结果表明: 该油田 CO<sub>2</sub> 埋存的潜力约为  $33.569 \times 10^8 \text{ t}$ , 相当于 2003 年全国 CO<sub>2</sub> 排放总量的 94%。该计算方法也可为中国 CO<sub>2</sub> 的减排提供部分依据。

**关键词:** CO<sub>2</sub>; 减排; 地质埋存; 计算方法; 埋存潜力

**中图分类号:** TE992.1; TE357.45 **文献标识码:** A

## 引言

世界 CO<sub>2</sub> 排放量在逐年递增, 中国 CO<sub>2</sub> 排放量更是连续几年位居全球前几位, 过多的 CO<sub>2</sub> 排放会造成很多环境问题。预计 2030 年, 中国 CO<sub>2</sub> 排放总量可能超过美国, 居世界第一位<sup>[1]</sup>, 减排 CO<sub>2</sub> 刻不容缓。

Englezos 和 Lee 总结了 4 种方法来降低 CO<sub>2</sub> 等温室气体的排放<sup>[2]</sup>, 地下储存就是其中的一种方法。目前, 在室内与现场都进行过注 CO<sub>2</sub> 驱油的实验研究, 在气藏和煤层中也进行了储存 CO<sub>2</sub> 的潜力评价<sup>[1,3-5]</sup>。但是, 对于油藏储存 CO<sub>2</sub> 相关的计算理论和计算方法<sup>[6]</sup>, 都只是考虑了物理埋存量, 相应的化学埋存量还没有一个定量的计算。笔者从物理埋存和化学埋存 2 个方面考虑, 提出 CO<sub>2</sub> 地质埋存的计算理论和简单的计算方法。

## 1 地质埋存机理

CO<sub>2</sub> 的地下埋存机理可分为物理埋存和化学埋存<sup>[7]</sup> 2 大类。物理埋存是将 CO<sub>2</sub> 气体注入油藏中驱油, 油气让出的空间由 CO<sub>2</sub> 来填充, 提高石油采收率的同时把 CO<sub>2</sub> 埋存于地下。化学埋存包括溶解埋存和矿化埋存。溶解埋存是指 CO<sub>2</sub> 在岩石

孔隙当中运移时溶解在与其相接触的地层水或原油中。矿化埋存主要指 CO<sub>2</sub> 与岩石发生化学反应从而产生碳酸类矿物沉淀。其埋存作用时间为 100 ~ 10 000 a, 但是其主要影响因素为地层岩石的矿物成分, 当 CO<sub>2</sub> 注入油藏后主要以独立相存在于岩石孔隙中, 以溶解相存在于地层水、剩余油和岩石骨架中<sup>[8]</sup>。

## 2 地质埋存量的计算方法

### 2.1 物理埋存量的计算方法

许多国家、组织以及研究人员对 CO<sub>2</sub> 在油藏中埋存潜力进行了计算, 并提出了多种计算方法, 分别从理论埋存量和有效埋存量 2 个方面进行了阐述, 文中采用有效埋存量的计算方法来完成物理埋存量的计算。理论埋存量假设油气让出的空间都可用于 CO<sub>2</sub> 的存储, 而有效埋存量是在理论埋存量基础上考虑了储层性质、储层封闭性、埋存深度、储层压力系数及孔隙体积等因素影响的埋存量, 是通过引入 CO<sub>2</sub> 利用系数这个参量而获得<sup>[7]</sup>。计算公式如下:

$$M_{\text{CO}_2} = E_{\text{EXTRA}} \cdot N_D \cdot C \cdot R_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

式中:  $M_{\text{CO}_2}$  为 CO<sub>2</sub> 在油藏中有效埋存量,  $10^7 \text{ t}$ ;

收稿日期: 20100303; 改回日期: 20100914

基金项目: 国家重大基础研究发展计划(973 计划)“温室气体提高石油采收率的资源化利用及地下埋存研究”项目(2006CB705801); 中国地质大学(北京)第八届“创新杯”大学生课外学术科技作品竞赛项目(51913028)

作者简介: 丁帅伟(1987-), 男, 中国地质大学(北京)能源学院石油工程专业本科在读, 主要从事油气田开发工程方面的研究。

$E_{\text{EXTRA}}$  为由于  $\text{CO}_2$  注入而获得的额外采收率, %;  $N_D$  为探明石油地质储量,  $10^9 \text{ m}^3$ ;  $C$  为接触系数;  $R_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  利用系数, 净  $\text{CO}_2$  注入量与原油采出量的比值,  $\text{t}/\text{m}^3$ 。其中参数  $E_{\text{EXTRA}}$ 、 $R_{\text{CO}_2}$  采用 Ecofys 提出的 3 个等级中的最高等级进行评价, 数值分别为 20、5。

## 2.2 化学埋存量的计算方法

### 2.2.1 原始地层水中溶解的 $\text{CO}_2$ 量的粗略计算

地层水的物理性质及参数比较复杂, 本文假设地层水是纯水的情况, 计算思路为: 在一定温度和压力下, 根据  $\text{CO}_2$  在纯水中的溶解度的相关经验公式, 代入油藏中原始地层水的总体积即可计算出原始地层水中溶解的  $\text{CO}_2$  量。

这里采用参考文献[9]的经验公式:

$$R_s = 0.0024 \left[ \left( K_p + \frac{\phi_i}{RT + b_m p} \right) p - \frac{b_m p^2 K_p}{RT + b_m p} \right] \quad (2)$$

对于  $\text{CO}_2$  的水合平衡常数  $K_p$ , 暂时采用甲烷的水和平衡常数, 表达式为:

$$\ln K_p = \frac{2133.89}{T} - 18.561 \quad (3)$$

式中:  $R_s$  为标准状态下溶解气水比,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $K_p$  为水合平衡常数;  $b_m$  为  $\text{CO}_2$  的范德华体积,  $\text{m}^3/\text{mol}$ ;  $\phi_i$  为  $\text{CO}_2$  的有效间隙度;  $R$  为理想气体常数, 约为  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为水的温度,  $\text{K}$ ;  $p$  为水的压力,  $\text{Pa}$ 。

对于  $\text{CO}_2$  的有效间隙度的求取, 先采用甲烷的有效间隙度, 其值与温度有关, 相关的关系图版可以参照文献[9]的研究所得。

### 2.2.2 剩余油中溶解 $\text{CO}_2$ 量的粗略计算

相对于探明储量, 这里假设储量的 60% 为剩余油, 溶解度计算时采用参考文献[10]的经验公式:

$$R_s = \frac{22400 K_{p_{\text{oil}}} \cdot \rho_o x_T}{1 + \alpha K_{p_{\text{oil}}} M_T} \quad (4)$$

计算时,  $K$  和  $\alpha$  可分别用下面的公式求得:

$$\ln K = 773.247 \frac{1}{T_{\text{oil}}} - 18.5898 \quad (5)$$

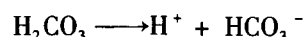
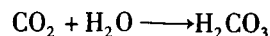
$$\alpha = 0.00008286t - 0.7061 \quad (6)$$

式中:  $R_s$  为标准状态下的溶解气油比,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $K$  为反应平衡常数;  $p_{\text{oil}}$  为油藏压力,  $\text{MPa}$ ;  $\rho_o$  为原油在地面的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\alpha$  为二次作用系数, 与温度有关;

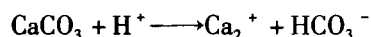
$x_T$  为烃的质量分数;  $M_T$  为烃的平均分子质量;  $T_{\text{oil}}$  为油藏温度,  $\text{K}$ ;  $t$  为油藏温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2.3 岩石骨架溶解 $\text{CO}_2$ 量的粗略计算

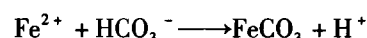
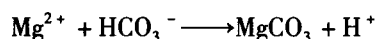
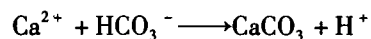
当  $\text{CO}_2$  被注入储层后, 就会以气体的形式被储存或作为临界流体被储存于盖层之下, 会发生如下化学反应<sup>[7]</sup>:



由于储层酸性的增加使原始的储层矿物得以溶解, 主要的矿化反应如下:



这些溶解的碳酸氢根离子与二价的阳离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ ) 反应而沉淀为新的碳质矿物 ( $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{FeCO}_3$ )。



故含有  $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Fe}(\text{II})$  元素矿物的储层可以成为埋存  $\text{CO}_2$  的储层。

利用目标储层中的岩心进行 X 衍射实验, 经过分析可以半定量得出岩石中各类矿物质的体积百分含量, 结合单位体积矿物储存  $\text{CO}_2$  的潜力<sup>[7]</sup>, 就能得出每立方米目标岩性的岩石的  $\text{CO}_2$  反应量。从而可以估计出油田的  $\text{CO}_2$  最终地下矿物埋藏量。

## 3 实例计算

某油田截至 2004 年底, 共探明 26 个油藏, 累计含油面积为  $2\,048.6 \text{ km}^2$ , 探明石油地质储量为  $10.83 \times 10^8 \text{ t}$ , 平均原始含水饱和度为 45%。油藏埋深为 500 ~ 2 500 m, 大部分在 1 000 ~ 2 000 m 之间。储集层物性差, 渗透率一般小于  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔隙度为 11% ~ 15%, 计算中孔隙度取值 11.28%。油田地层油黏度为 3 ~ 6  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ , 地面脱气原油密度为  $0.8408 \text{ g}/\text{m}^3$ , 地层原油体积系数为 1.157 2, 地层平均温度为  $101.6^{\circ}\text{C}$ , 平均压力为 21.2  $\text{MPa}$ 。

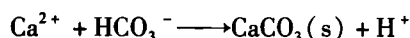
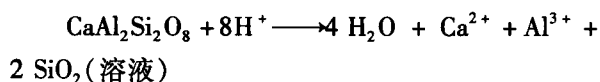
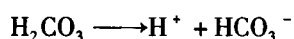
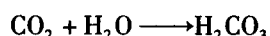
根据上述的一系列理论和文献调研所获取的数据, 计算时烃的质量分数  $x_T$  及烃的平均分子量  $M_T$  取值分别为 0.989 3、210.444, 油层平均有效厚度取值为 1 172.235 m。最终计算结果如表 1 所示。该油田可减排  $\text{CO}_2$  量大约为  $33.569 \times 10^8 \text{ t}$ , 相

当于2003年全国CO<sub>2</sub>排放总量的94%。可见该计算方法也可为中国CO<sub>2</sub>的减排提供部分依据。另外对于物理埋存,可以提高的最高石油采收率为20%,提高的原油产量为 $1\,623.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,相当于发现了一个中小型油田。

表1 某油田CO<sub>2</sub>地质埋存潜力统计

| 埋存类型 | 单位埋存量( $\text{t}/\text{m}^3$ ) | 总的埋存量/ $10^8 \text{ t}$        |
|------|--------------------------------|--------------------------------|
| 物理埋存 | 0.75480                        | 8.170                          |
|      | 地层水                            | 0.00157                        |
|      |                                | 0.019                          |
| 化学埋存 | 剩余油                            | 0.74225                        |
|      |                                | 6.780                          |
|      | 岩石骨架                           | 87.28000                       |
|      |                                | 18.600                         |
| 总计   |                                | $33.569 \times 10^8 \text{ t}$ |

根据单位体积矿物储存CO<sub>2</sub>的潜力评价表<sup>[7]</sup>,计算时可知岩石中只有斜长石( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )能与注入的CO<sub>2</sub>气体发生反应,假设单位体积的矿物只有50%与CO<sub>2</sub>接触并完全吸收该气体。其中斜长石与CO<sub>2</sub>混合潜力为 $436.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。反应如下:



从表1可以看出,CO<sub>2</sub>矿化埋存的潜力最大,但其完全埋存所需要的时间也最长。为此在进行CO<sub>2</sub>地质埋存时,需考虑若干年后的扩散情况。

## 4 结 论

(1) 地质埋存对于全球温室气体CO<sub>2</sub>的减排具有极大的潜力,并且埋存的同时还能达到提高石油采收率的目的。本文提出的计算方法考虑了CO<sub>2</sub>的化学埋存量,对于CO<sub>2</sub>地质埋存的定量评价具有一定的参考价值,但尚有改进与提升的空间,如CO<sub>2</sub>在水中的溶解,可以建立原始地层水而非纯水的模型进行计算,因此精确化是需要进一步完善的内容。

(2) X衍射实验可以用于CO<sub>2</sub>矿化埋存量的

定量评价,并且证明CO<sub>2</sub>的矿化埋存的潜力最大,但埋存周期也最长,为此还需考虑其若干年后CO<sub>2</sub>的扩散情况。

(3) 实例中该油田CO<sub>2</sub>埋存的潜力约为 $33.569 \times 10^8 \text{ t}$ ,相当于2003年全国CO<sub>2</sub>排放总量的94%。其中物理埋存量约为 $8.17 \times 10^8 \text{ t}$ ,化学埋存量约为 $25.399 \times 10^8 \text{ t}$ ,可见化学埋存潜力较大于物理埋存潜力,但前者完全埋存需要的时间远大于后者。

## 参考文献:

- [1] 刘延锋,李小春,方志明,等. 中国天然气田CO<sub>2</sub>储存容量初步评估[J]. 岩土力学,2006,27(12):2277.
- [2] Englezos P, Lee J D. A cleaner source of energy and opportunity for innovative technologies[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2005,22(5):671-681.
- [3] 王进安,袁广均,张军,等. 长岩心注二氧化碳驱油物理模拟实验研究[J]. 特种油气藏,2001,8(2):75-78.
- [4] 谷丽冰,李治平,欧瑾. 利用二氧化碳提高原油采收率研究进展[J]. 中国矿业,2007,16(10):66-69.
- [5] 刘延锋,李小春,白冰. 中国CO<sub>2</sub>煤层储存容量初步评价[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2947-2952.
- [6] 沈平平,廖新维,刘庆杰. 二氧化碳在油藏中埋存量计算方法[J]. 石油勘探与开发,2009,36(2):216-220.
- [7] 沈平平,廖新维. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M]. 北京:石油工业出版社,2009:21-23;39-52.
- [8] 江怀友,沈平平,李治平,等. 世界二氧化碳埋存及利用方式研究[J]. 国际石油经济,2007,15(7):17.
- [9] 付晓泰,王振平,卢双舫. 气体在水中的溶解机理及溶解度方程[J]. 中国科学B辑,1996,26(2):124-129.
- [10] 薛海涛,卢双舫,付晓泰. 甲烷、二氧化碳和氮气在油相中溶解度的预测模型[J]. 石油与天然气地质,2005,26(4):444-448.

编辑 林树龙