

# 一种实用有效的三相相平衡计算方法及应用

郭春秋<sup>1</sup> 袁士义<sup>1</sup> 叶继根<sup>1</sup> 吕选鹏<sup>2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 2. 中国石油大港油田井下公司)

郭春秋等. 一种实用有效的三相相平衡计算方法及应用. 天然气工业, 2003; 23(5): 83 ~ 86

**摘 要** 气液液三相平衡计算在油气藏开发中有着重要的实用意义。与气液两相平衡计算相比, 气液液三相平衡计算技术还很不成熟, 其主要难点在于稳定性分析和如何确定平衡常数初值。针对气液液三相平衡计算中存在的上述难点, 文章提出了一种新的解决方法, 并从理论上证明了该方法的可靠性。该方法通过对系统进行两次两相平衡计算, 得到气液液三相平衡计算的平衡常数初值, 从而解决了三相平衡计算中的稳定性分析和平衡常数初值问题, 算例表明文章提出的方法是可靠的。文章还采用该方法计算了大港千米桥凝析气藏流体凝析水含水率, 从理论上区分了千米桥凝析气藏产出水的来源问题, 取得了令人满意的结果。

**主题词** 气相 液相 相平衡 稳定性 平衡常数 凝析油气藏 数学模型

由相平衡热力学理论可知, 系统达到相平衡的充要条件是该系统的吉布斯自由能最小。相平衡计算就是寻求使得系统吉布斯自由能达到最小的一组解。与两相平衡计算相比, 三相平衡计算技术还不成熟, 原因在于三相平衡计算两个难点未得到很好解决: 稳定性分析, 即判断系统是否处在三相; 如何确定平衡常数初值以保证迭代的收敛性。

许多学者在解决这两个问题方面已做了很多深入细致的研究工作。Fussell<sup>[1]</sup>和 Risnes<sup>[2]</sup>最早将两相平衡计算方法引入三相平衡计算中, 以后, Michelson<sup>[3]</sup>、Nghiem<sup>[4]</sup>、Nagarajan<sup>[5]</sup>、Baker<sup>[6]</sup>和 Trebble<sup>[7]</sup>等人发展了相稳定性检验和确定平衡常数初值的方法, 使三相平衡计算技术得到了很大的发展, 可以用于实际计算。

但是笔者发现, 前人的方法在解决上述两个问题上仍存在一定的缺陷。例如, 用 Nghiem<sup>[4]</sup>的方法作稳定性检验需要对驻点赋初值, 遗憾的是该方法求得的驻点有时收敛到无效解; 有时经过几次迭代, 其中一组平衡常数收敛到常数 1, 导致最终计算结果失效。针对上述难点, 本文在前人工作的基础上, 对稳定性检验作了进一步的补充改进工作, 将三相平衡计算分解成两次两相平衡计算, 从而得到三相平衡计算的两组平衡常数初值。理论和实例证明该方法能很好地解决三相平衡计算中稳定性分析和平衡

常数初值问题。

## 数学模型

与两相平衡相似, 三相平衡要求混合物各组分满足物质平衡和热力学平衡条件。设给定封闭系统的组分数为  $n_c$ , 各组分摩尔分数为  $z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ); 将达到平衡状态的三相分别称为气相、液相和液相, 其摩尔分数分别为  $V$ 、 $L$ 、 $L_q$ , 各组分在三相中的摩尔分数分别为  $y_i$ 、 $x_{qi}$ 、 $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ), 逸度用  $f_i^V$ 、 $f_i^L$ 、 $f_i^{Lq}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ ) 表示, 则三相系统的逸度方程和物质守恒方程可表示如下:

$$\begin{cases} f_i^V(y_1, y_2, \dots, y_{n_c}) - f_i^L(x_1, x_2, \dots, x_{n_c}) = 0 \\ f_i^{Lq}(x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{qn_c}) - f_i^L(x_1, x_2, \dots, x_{n_c}) = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n_c) \quad (1)$$

$$\begin{cases} Vy_i + L_q x_{qi} + L x_i = z_i \\ y_i = 1 \\ x_{qi} = 1 \\ x_i = 1 \\ V + L_q + L = 1 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n_c - 1) \quad (2)$$

方程组(1)、(2)中方程个数为  $3n_c + 3$ , 未知数个

**作者简介:**郭春秋, 1972 年生, 2002 年在中国石油勘探开发研究院获油气田开发博士学位, 现从事油藏工程研究。地址: (100083) 北京市 910 信箱石油勘探开发研究院海外研究中心。电话: (010) 62097814。

数也为  $3n_c + 3(y_i, x_{qi}, x_i, V, L_q, L; i = 1, 2, \dots, n_c)$ , 方程组封闭。

## 前人的成果及存在的缺陷

对于多组分气—液两相平衡闪蒸计算而言,其求解方法主要有逐次替换法和牛顿迭代法,而且,实用中往往将两者结合使用以取得更快的收敛速度。气—液—液三相平衡计算是在气—液两相平衡计算的基础上发展起来的。至今,国内外的文献尚没有根据压力、温度和系统组成直接进行三相平衡计算的技术报道,通常作法是:先对系统进行两相平衡闪蒸计算,然后根据两相计算结果进行相稳定性检验,当判定系统不稳定时则进行三相平衡计算;反之,系统为稳定气—液两相,结束计算。

以液相为例,相稳定性检验需要通过逐次替换法或 Newton 法求解下列方程组:

$$\ln Y_i = h_i - \ln_i(y) \quad (i = 1, 2, \dots, n_c) \quad (3)$$

其中:  $h_i = \ln x_i^* + \ln(x)$  ( $i = 1, 2, \dots, n_c$ );

$x = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{n_c}^*)$  是两相平衡计算得到的液相组分的摩尔分数;

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_{n_c});$$

$$y_i = Y_i / \sum_{i=1}^{n_c} Y_i。$$

迭代初值取为<sup>[4]</sup>:

$$Y_i^{(0)} = 0.5(x_i^* + y_i^*) \text{ 或 } Y_i^{(0)} = x_i^* (x) > \quad (4)$$

方程组(3)显然有一组无效解,即:  $Y_i = x_i^* (i = 1, 2, \dots, n_c)$ , 式(4)给出的两组初值有可能收敛到无效解。该方法的稳定性检验思路如下:分别以式(4)给出的两组初值求解方程组(3),如果求出的解至少有一组是有效解并且该有效解满足  $\sum Y_i = 1$ , 则系统存在稳定三相;反之,系统为两相稳定。如果稳定性检验证明系统存在稳定三相,则以两相计算求出的  $y_i^*$  为气相初值,  $x_i^*$  和  $Y_i / \sum Y_i$  按平均分子量由大到小分别作为第一和第二液相初值,进行三相平衡闪蒸计算。

上述稳定性检验方法从理论上讲是正确的,但是对文献[8]的例子进行计算时发现:当系统处在三相稳定状态时,用式(4)给出的两组初值求解方程组(3)会出现同时收敛到无效解的情况。也就是说,用式(4)给出的两组初值求解方程组(3)并不总是有效的。

## 本文的改进工作

由于两相平衡计算方法比较成熟、可靠,为解决三相平衡计算中的稳定性检验问题,本文作者将两相平衡计算引入三相平衡稳定性检验过程中,具体改进工作为:首先对系统作两相(包括气—液和液—液两相,下同)平衡计算;然后分别以两相平衡闪蒸计算得到的两相摩尔组成作为新系统的组成,对这两个新系统再次作两相平衡闪蒸计算,并根据闪蒸计算结果作稳定性分析,如两个新系统的闪蒸计算均为单相,说明系统为稳定气液两相,结束计算,反之,说明系统处在三相,此时综合两次两相平衡计算结果,得到两组合理的可用于三相平衡计算的平衡常数初值;最后用逐次替换方法进行三相平衡计算,当逐次替换方法收敛速度明显变慢时,再将逐次替换方法过渡到 Newton 法。下面再从理论上说明该方法的普遍适用性。第一次两相平衡计算结果记为相和相,现考查分别以相和相的组分再次作两相平衡计算的计算结果。如果相和相的计算结果都为单相,根据相平衡理论,说明不能从相和相中分离出第三相使得相和相的吉布斯自由能减小,即相和相是稳定的,这样系统就是两相稳定的。反之,如果相和相至少有一相可以分离成两相,为叙述方便,假设相可以分离出相<sub>a</sub>和相<sub>b</sub>,同样根据两相平衡理论,相<sub>a</sub>和相<sub>b</sub>的吉布斯自由能之和比相吉布斯自由能要小。这样,系统处在相<sub>a</sub>、相<sub>b</sub>和相三相状态下的吉布斯自由能比处在相和相两相状态下的吉布斯自由能要小,也就是说,系统处在三相更稳定些。

## 应用实例与分析

### 1. 三组分三相平衡计算实例

为了验证本文方法的可行性,应用文献[8]中的三组分系统的三相平衡实例进行了试算验证。设系统含三组分<sup>[8]</sup>——C<sub>1</sub>、CO<sub>2</sub>、nC<sub>16</sub>,温度为 294.3 K,组分间相互作用系数为:  $k_{C_1/CO_2} = 0.1$ ,  $k_{C_1/C_{16}} = 0.078$ ,  $k_{CO_2/C_{16}} = 0.125$ ,状态方程用 PR 方程。利用自编的软件对该组分系统的以下两个物理过程作了计算:假设系统压力为 7 MPa 不变,C<sub>1</sub>和 nC<sub>16</sub>摩尔分数相同,CO<sub>2</sub>摩尔分数在 0%~100%之间改变,计算系统相态平衡情况;在的基础上,令 CO<sub>2</sub>摩尔分数为 90%,压力在 6.3~7.1 MPa 之间变化,重新计算系统相态平衡情况。

计算结果见图 1 和图 2,图中小圆圈表示文献

[8] 的计算结果,由图可见,本文计算结果与文献[8]结果非常接近。

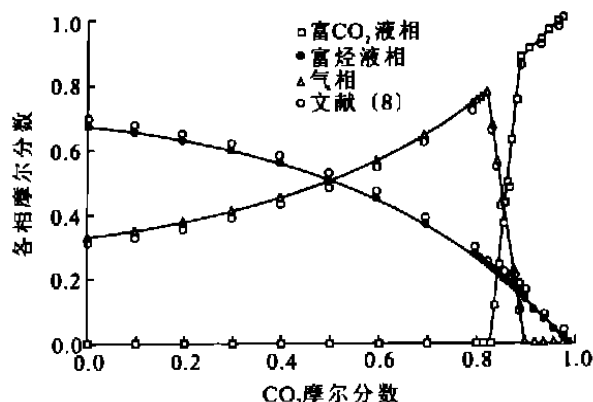


图 1 各相摩尔分数与  $\text{CO}_2$  浓度关系

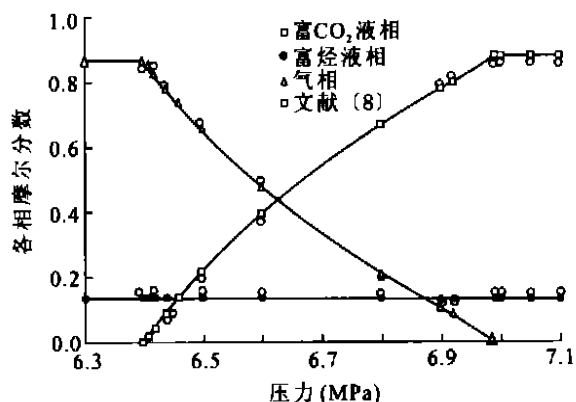


图 2 各相摩尔分数与压力关系

## 2. 千米桥凝析气藏出水问题相平衡计算研究

利用作者自编的三相平衡计算程序对大港千米桥凝析气藏产水率进行研究。以板深 8 井为例,已知地层温度为 165,原始地层压力为 43.8 MPa,取样流体实验测定的饱和压力为 42.21 MPa,该气藏为饱和凝析气藏,其凝析油含量约为  $306 \text{ g/m}^3$ 。

为了定量计算凝析水量,首先以板深 8 井 PVT 气样及其实验结果为基础,对等组分膨胀和等容衰竭实验进行拟合,以确定烃组分、 $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  的临界特征参数,拟合结果见图 3、图 4。对气样进行拟化得到的 7 个拟组分见表 1,其中  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  三个拟组分是  $\text{C}_7+$  的三个组分,摩尔组成分别为:0.145 76、0.763 89、0.034 81、0.011 51、0.022 31、0.021 01、0.000 71。

由于 PVT 取样样品不包含水,为了利用三相平衡计算方法定量计算凝析水含水率,在以上 7 个拟组分的基础上还应该加上一个水组分,而水作为一个独立的组分其临界特征参数是可以通过查表得到的。加水以后的原始样品的摩尔组成可以根据上述

实验气样组成、计算结果以及岩心实验分析资料综合计算得到。取地层束缚水饱和度 20% (体积百分数),计算得到地层条件下气水系统的摩尔组成。

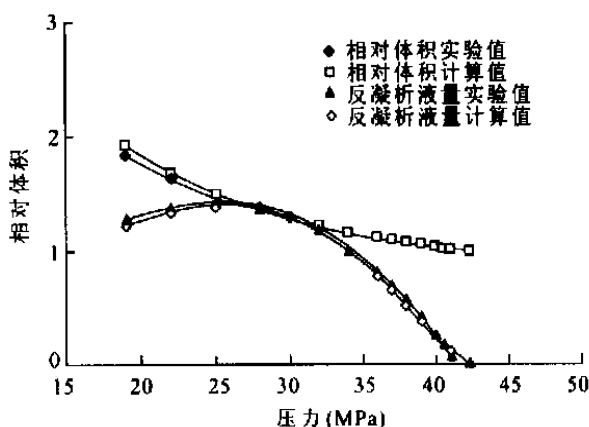


图 3 板深 8 井 1998 年样品等组分膨胀实验拟合

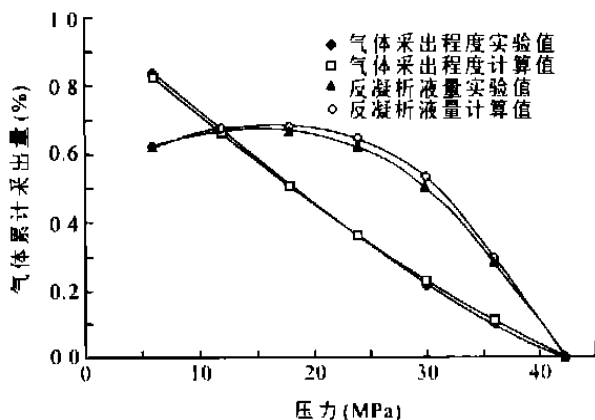


图 4 板深 8 井 1998 年样品等容衰竭实验拟合

为了定量计算凝析水量,假设地层条件下只有气相渗流,将采出井流体按地面实际分离条件进行两级分离计算,两级分离器压力分别为 2.5、0.1 MPa,温度分别为 321.15、293.15 K,经两级分离后得到油和水摩尔分数分别为 0.048 622 5、0.041 528 6,计算得到的体积含水率为 8.995 3%,结果见表 1。

从上述结果可知,计算凝析水含水率约为 9%,板深 8 井的实际含水率在 8%~11%,说明该井的水主要来自于凝析水;而板深 7 井的实际含水率在 24%~31%,远大于计算凝析水含水率,说明大部分采出水来自于孔隙水。

## 结 论

(1) 本文提出了一种改进的三相平衡计算方法,该方法以两相平衡闪蒸计算为基础,较好地解决了三相平衡计算中稳定性检验和平衡常数初值问题,实例计算表明该方法是可靠的。

表 1 配样得到的地层条件下凝析气摩尔组成和地面分离后的油、水两相摩尔组成

组 分	配样得到的地层条件下凝析气摩尔组成			地面分离后的油、水两相摩尔组成	
	原始组成(含束缚水)	气相组成(样品)	水相组成	油相组成	水相组成
H <sub>2</sub> O	4.831 81 ×10 <sup>-1</sup>	4.572 76 ×10 <sup>-2</sup>	9.987 27 ×10 <sup>-1</sup>	1.066 07 ×10 <sup>-4</sup>	9.999 98 ×10 <sup>-1</sup>
CO <sub>2</sub> + C <sub>2</sub>	7.532 99 ×10 <sup>-2</sup>	1.391 83 ×10 <sup>-1</sup>	7.794 83 ×10 <sup>-5</sup>	5.606 66 ×10 <sup>-3</sup>	1.111 51 ×10 <sup>-7</sup>
N <sub>2</sub> + C <sub>1</sub>	3.947 93 ×10 <sup>-1</sup>	7.287 71 ×10 <sup>-1</sup>	1.195 08 ×10 <sup>-3</sup>	2.191 39 ×10 <sup>-3</sup>	2.184 93 ×10 <sup>-6</sup>
C <sub>3</sub> + C <sub>4</sub>	1.798 77 ×10 <sup>-2</sup>	3.325 07 ×10 <sup>-2</sup>	4.710 71 ×10 <sup>-8</sup>	3.157 79 ×10 <sup>-2</sup>	6.648 96 ×10 <sup>-13</sup>
C <sub>5</sub> + C <sub>6</sub>	5.949 40 ×10 <sup>-3</sup>	1.099 76 ×10 <sup>-2</sup>	1.957 65 ×10 <sup>-11</sup>	9.827 40 ×10 <sup>-2</sup>	1.215 41 ×10 <sup>-18</sup>
P <sub>1</sub>	1.152 95 ×10 <sup>-2</sup>	2.131 26 ×10 <sup>-2</sup>	2.419 66 ×10 <sup>-13</sup>	4.353 28 ×10 <sup>-1</sup>	3.480 80 ×10 <sup>-23</sup>
P <sub>2</sub>	1.086 00 ×10 <sup>-2</sup>	2.007 50 ×10 <sup>-2</sup>	5.867 22 ×10 <sup>-21</sup>	4.128 68 ×10 <sup>-1</sup>	8.864 68 ×10 <sup>-39</sup>
P <sub>3</sub>	3.695 00 ×10 <sup>-4</sup>	6.830 30 ×10 <sup>-4</sup>	2.029 40 ×10 <sup>-36</sup>	1.404 76 ×10 <sup>-2</sup>	2.050 21 ×10 <sup>-67</sup>

(2)利用本文作者自编的三相相平衡计算程序对千米桥凝析气藏流体样品进行了计算,为认识千米桥凝析气藏的产出水来源问题提供了理论依据。

符 号 说 明

$f$  为逸度; $x$  为各组分在液相 I 中的摩尔分数; $L$  为液相 I 摩尔分数; $x_q$  为各组分在液相 II 中的摩尔分数; $n_c$  为组分数; $y$  为各组分在气相中的摩尔分数; $L_q$  为液相 II 摩尔分数; $z$  为总摩尔分数; $V$  为气相摩尔分数; 为逸度系数; $x$  为两相计算结果中的液相各组分摩尔分数; $y$  为从液相中分离出的一相的组分摩尔分数; $y_i$  为  $y_i^*$  的初值。

上标:

V、L、 $L_q$  表示气相、液相 I、液相 II。

下标:

$i$  为第  $i$  组分。

参 考 文 献

1 Fussel L T. A technique for calculating phase equilibria of three coexisting hydrocarbon phases. SPE6722 ,1977  
2 Risnes R. Equilibrium calculation for coexisting liquid phas-

es. SPE11126 ,1982  
3 Michelson M L. The isothermal flash problem part I. Fluid Phase Equilibria ,1982 ; (9)  
4 Nghiem L X,Li Y K. Effect of phase behavior on CO<sub>2</sub> displacement efficiency at low temperatures. In: Model studies with an equation of state. SPE13116 ,1984  
5 Nagarajan N R,Cullick A S. New strategy for phase equilibrium and critical point calculation by thermodynamic energy analysis. Part I Stability Analysis and Flash ,1991 ;62 :191 ~ 210  
6 Baker L E,Pierce A C,Luks K D. Gibbs energy analysis of phase equilibria. SPEJ ,1982 ;10 :731  
7 Trebble M A. A preliminary evaluation of two and three phase flash initiation procedures. Fluid Phase Equilibria , 1989 ;53 :113  
8 Huanquan Pan ,Abbas F. Complex multiphase equilibrium calculation by direct minimization of gibbs free energy by use of simulated annealing. SPE Reservoir Evaluation & Engineering ,1998 ; (2) :36 ~ 41

(收稿日期 2003 - 05 - 18 编辑 韩晓渝)

# NEW TECHNIQUE OF GAS WATER RECOVERING TOGETHER FOR LOW PERMEABILITY AND BOTTOM WATER RESERVOIR BY PERFORATING WATER-BEARING FORMATION<sup>1)</sup>

Guan Wenlong, Li Jingsong, Li Xiangfang (Petroleum University, Beijing). *NATURAL GAS IND.* v. 23, no. 5, pp. 79 ~ 82, 9/25/2003. (ISSN1000 - 0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:**Bottom water coning will cause the productivity of gas wells decrease dramatically. The measures, such as not perforating the water-bearing formation, and suppressing the producing pressure differential, are usually taken for bottom water reservoirs to prevent bottom water coning. But for a low permeability and bottom water reservoir, its critical coning production is low, sometimes even lower than the production what is economically recoverable. Aiming to the reservoirs, the article suggests the new technique of gas water recovering together by perforating water-bearing formation, converting the gas and water two phases percolation of the reservoir into the gas and water two phases flow through the tubing, and decreasing the energy loss in the producing process. The results of numeral simulation indicate gas water recovering together specially to this kind of gas reservoirs can not only improve the ultimate recovery of the gas reservoir but also extend the stable rate period. The technique is suitable to the bottom water reservoir with clearly understood bottom water distribution and small bottom water energy, also suitable to the inter-zonal water gas reservoirs. Besides, its economic feasibility also depends on the expense of the surface water processing costs.

**SUBJECT HEADINGS:**Bottom water reservoir, Low permeability pools, Bottom water coning, Gas water recovering together, Ultimate recovery, Mathematical model.

**Guan Wenlong** was born in 1970, and is studying for doctoral degree. Add: Petroleum University, Shuiku Rd., Changping, Beijing (102249), China Tel: (010) 89734340. Tel: 13011113232. E-mail: guanwenlong@sina.com

# PRACTICAL AND EFFICIENT METHOD FOR THREE-PHASES EQUILIBRIUM CALCULATION AND ITS APPLICATION<sup>1)</sup>

Guo Chunqiu, Yuan Shiyi, Ye Jigen, (PCL Exploration & Development Research Institute), and Lu Xuanpeng (Down-hole Service Com. of PCL Dagang

Oil Field). *NATURAL GAS IND.* v. 23, no. 5, pp. 83 ~ 86, 9/25/2003. (ISSN1000 - 0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:**The three-phases (gas, liquid and liquid) equilibrium calculation has important signification in the development of oil and gas reservoirs. Comparing to the two-phases (gas and liquid) equilibrium calculation, the three-phases (gas, liquid and liquid) equilibrium calculation is immature. The main problems are stability analysis and how to determine the initial value of equilibrium constant. Aiming to the problems, the article suggests a new resolution, and proves its reliability theoretically. The initial value of equilibrium constant for the three-phases (gas, liquid and liquid) equilibrium calculation is obtained by calculating the two-phases equilibrium twice. So, it solves the problems of the stability analysis and the initial value of equilibrium calculation for the three-phases (gas, liquid and liquid) equilibrium calculation. The calculated cases in the article indicate the resolution is reliable. Applying the resolution, the condensate water cut of the gas-condensate reservoir of Dagang Qianmiqiao Oil Field is calculated. So, the source of the produced water in Qianmiqiao Gas-Condensate Reservoir is demonstrated theoretically. The results are satisfactory.

**SUBJECT HEADINGS:**Gas phase, Liquid phase, Phase equilibrium, Stability, Equilibrium constant, Condensate pools, Mathematical model.

**Guo Chunqiu** (Doctor) was born in 1972. Add: P. O. Box 910, Beijing (100083), China Tel: (010) 62097814

# FORMATION WATER CHARACTERISTICS OF CARBONIC GAS RESERVOIR IN SHAPINGCHANG GAS FIELD<sup>1)</sup>

He Qi (Exploration and Development Research Institute of PCL Southwest Branch). *NATURAL GAS IND.* v. 23, no. 5, pp. 87 ~ 89, 9/25/2003. (ISSN1000 - 0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:**Carbonic gas reservoir in Shapingchang gas field is another important finding after Wubeiti and Longmen carbonic gas reservoirs by Chongqing gas mine of PCL Southwest Branch. It is the main gas field for gas transmission eastward from Sichuan. Its proved reserves reach to about  $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ . According to the development program made in May, 2001, the production of Shapingchang carbonic gas reservoir will be  $13 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ . It is very important for the gas transmission eastward engineering and the gas field development whether or