

气田开发

富含凝析水、元素硫气井生产动态预测方法

常志强¹, 杨永全¹, 张尚铨¹, 孙雷², 徐文圣¹, 谢剑飞¹, 曾有信¹

(1. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000;

2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610051)

摘要:在稳态条件下推导了考虑油、气、水三相流动区及油、气、水、硫四相相态变化影响的气井流入动态模型,建立了气井井筒动态预测模型、井筒携固模型、井筒携液模型。结合地层流入、井筒流出、井筒携液、井筒携固等模型,提出了更为综合、全面的气井生产动态预测方法,并进行了实例计算,结果表明,该方法能更好地进行考虑凝析水、元素硫多相流体复杂相态变化影响的气井生产系统敏感参数分析,指导该类气井实现最优化生产,具有理论和实际意义。

关键词:凝析水;元素硫;渗流;生产动态;相态;携液;携固

中图分类号:TE33

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2008)04-0566-05

0 引言

目前,气井生产动态预测方法常采用单相方法或在此基础上进行的经验校正^[1-9],忽略了地层及井筒中流体组分的变化,不符合特殊类型气井、凝析气井的特点。如果再用常规的烃类流体相态研究方法去指导开发这些特殊类型气藏、凝析气藏,就会致使该类气藏在开发方式、油气藏工程设计和动态分析方面产生一定误差。

随着天然气勘探开发向地层深部的发展,一些具有异常高温、高压、含硫、富含气态凝析水的特殊类型气藏、凝析气藏不断涌现,并且所占的比例越来越大。为了合理利用和开发我国的气藏及凝析气藏资源,提高我国气藏、凝析气藏开发的生产和管理水平,对气井的生产动态分析进行全面、系统的研究,发展新的评价技术,将是必要的和急需的工作。

1 地层流入动态模型

在油气水三相流动中,气相粘度较小,流度较大,将凝析气的流动视为非达西渗流;凝析油和水相粘度较大,流度较小,假定其属于达西渗流。且在地层渗流中,假定地层流体中含硫未达到饱和,

而地层流体中的元素硫、凝析水将对流体混合物的粘度、密度等参数产生影响,因此根据稳态理论、达西定律和非达西定律^[1],油、气、水三相流动运动方程如下:

对油相:

$$\frac{dp_o}{dr} = \frac{1000\mu_o}{kk_{ro}} \frac{q_o}{2\pi rh\rho_o} \quad (1)$$

对气相:

$$\frac{dp_g}{dr} = \frac{1000\mu_g}{kk_{rg}} \frac{q_g}{2\pi rh\rho_g} + \beta_g \rho_g \left(\frac{q_g}{2\pi rh\rho_g} \right)^2 \quad (2)$$

$$\beta_g = \frac{0.03168}{(kk_{rg})^{1.25\Phi^{0.75}}} \quad (3)$$

对水相:

$$\frac{dp_w}{dr} = \frac{1000\mu_w}{kk_{rw}} \frac{q_w}{2\pi rh\rho_w} \quad (4)$$

经推导,可得产能方程如下:

$$\begin{aligned} \varphi(p_e) - \varphi(p_{wf}) = & \left[\frac{5.6 \times 10^{-3} \cdot \rho_{sc}}{\pi kh} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right) \right] \cdot q_{sc} + \\ & \left(\frac{3.0 \times 10^9 \cdot \rho_{sc}^2}{\pi^2 h^2} \int_{r_w}^{r_e} \frac{\beta_g k_{rg} M_r^2}{r^2 \mu_g} dr \right) \cdot q_{sc}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

该方程也适合于油气两相或单相条件,产能方程的求解可参考文献[1]。

2 井筒流出动态模型

对于富含气态凝析水、元素硫的特殊气藏,当压力和温度降低到露点压力和露点温度以下时,凝析气体中原本处于气态的凝析油就会凝析成为液态,同时井筒中还会有气态凝析水和元素硫沉积的影响。

我们结合气—液—液—固四相相平衡热力学闪蒸计算模型^[1]和状态方程,对偏差因子、粘度等进行

$$\sum_{i=1}^n h_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{z_i k_i^{VL_1}}{V k_i^{VL_1} k_i^{VL_2} + (1 - L_2 - S - V) k_i^{VL_2} + L_2 k_i^{VL_1}} + \frac{k_s^{VL_1} (z_s - S)}{V k_s^{VL_1} k_s^{VL_2} + (1 - L_2 - S - V) k_s^{VL_2} + L_2 k_s^{VL_1}} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{z_i k_i^{VL_2}}{V k_i^{VL_1} k_i^{VL_2} + (1 - L_2 - S - V) k_i^{VL_2} + L_2 k_i^{VL_1}} + \frac{k_s^{VL_2} (z_s - S)}{V k_s^{VL_1} k_s^{VL_2} + (1 - L_2 - S - V) k_s^{VL_2} + L_2 k_s^{VL_1}} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{z_i k_i^{VL_1} k_i^{VL_2}}{V k_i^{VL_1} k_i^{VL_2} + (1 - L_2 - S - V) k_i^{VL_2} + L_2 k_i^{VL_1}} + \frac{k_s^{VL_1} k_s^{VL_2} (z_s - S)}{V k_s^{VL_1} k_s^{VL_2} + (1 - L_2 - S - V) k_s^{VL_2} + L_2 k_s^{VL_1}} = 1 \quad (8)$$

$$\frac{k_s^{VL_2} (z_s - S)}{V k_s^{VL_1} k_s^{VL_2} + (1 - L_2 - S - V) k_s^{VL_2} + L_2 k_s^{VL_1}} = \frac{1}{k_s^{SL_1}} \quad (9)$$

采用牛顿—拉夫森迭代求解,算出气、油、水、硫各相的平衡摩尔分量 V, L_1, L_2, S 和各相摩尔组成 x_i, y_i, h_i, g_i 。具体求解步骤详见文献[1]。

(4) 分别对气相和凝析油相利用 PR 状态方程计算压缩因子 Z_V, Z_{L_1} 和逸度 $f_i^V, f_i^{L_1}$ 。

(5) 根据正规溶液理论和吉布斯能量模型求解平衡水相的活度系数 $r_i^{L_2}$ 和标准态逸度 $f_i^{OL_2}$, 得到平衡水相的逸度:

$$f_i^{L_2} = a_i^{L_2} f_i^{OL_2} = h_i r_i^{L_2} f_i^{OL_2} \quad (10)$$

(6) 借鉴 Panagiotopoulos 和 Kumar (1985)^[2] 提出的相关理论,液相和气相中纯组分硫的状态方程参数采用调整状态方程中引力参数 a 和斥力参数 b 来拟合元素硫的饱和蒸汽压和液相密度来获得,进而得到 $f_s^V, f_s^{L_1}, f_s^{L_2}$ 。

(7) 对于固相纯组分硫,不采用状态方程法计算逸度,而是直接采用对低压下纯组分硫的升华压进行高压校正得到 f_s^S 。

(8) 判断是否满足热力学平衡,若:

$$f_i^V = f_i^{L_1} = f_i^{L_2} \quad (11)$$

$$f_s^V = f_s^{L_1} = f_s^{L_2} = f_s^S \quad (12)$$

则结束相平衡计算;若不满足,重新校正各组分的平衡常数:

$$k_i^{VL_1} = (f_i^{L_1} / x_i) / (f_i^V / y_i) \quad (13)$$

修正。这样考虑了多相流体复杂相态变化的井筒动态模型,就能提高富含凝析水、元素硫的特殊类型气藏、凝析气藏井筒动态预测精度。该方法对一般气藏、凝析气藏也是通用的,进行相应简化,也可得到很好的预测效果。主要过程如下:

2.1 偏差因子的确定

(1) 赋初值, $k_i^{VL_1}, k_i^{VL_2}, k_i^{VS}$ 。

(2) 进行相平衡稳定性判断。

(3) 选下列四相闪蒸计算物质平衡方程组:

$$k_i^{VL_2} = (f_i^{L_2} / x_i) / (f_i^V / h_i) \quad (14)$$

$$k_i^{VS} = (f_i^{L_1} / x_i) / (f_i^V / g_i) \quad (15)$$

然后继续迭代计算,直到满足精度为止。这样,我们可分别得到气、油、水、硫各相的平衡摩尔分量 V, L_1, L_2, S 和偏差因子 $Z_V, Z_{L_1}, Z_{L_2}, Z_S$ 最后得到气液混合物总偏差系数 Z :

$$Z = V \times Z_V + L_1 \times Z_{L_1} + L_2 \times Z_{L_2} + S \times Z_S \quad (16)$$

2.2 混合物粘度的确定

根据相平衡闪蒸计算得到的 y_i, x_i, Z_V, Z_L , 用剩余粘度法计算不同压力下的凝析油和凝析气的粘度 μ_o, μ_g , 进而可求出气液混合物粘度 μ_m :

$$\mu_m = \left[\left(\frac{1}{1 + \text{WOR}} \right) \mu_o + \left(\frac{\text{WOR}}{1 + \text{WOR}} \right) \mu_w \right]^{H_L} \cdot \mu_g^{(1-H_L)} \quad (17)$$

3 井筒携液模型

通过研究发现,气井携水比携油困难,在气井油、气、水同产时,要有效排除井底积液,即需达到最小携水产气量,我们在李闯等^[3]的携液模型基础上,结合相平衡闪蒸计算,对相关参数进行考虑相态变化的修正,可得到考虑相态变化的井筒携液模型:

$$q_{sc} = 2.5 \times 10^4 \frac{\text{PAV}_g}{\text{TZ}};$$

$$V_g = 2.5 \left[\frac{\sigma(\rho_w - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{18}$$

4 井筒携固模型

将固体硫颗粒自由沉降末速 μ_0 作为研究出发点,并将 μ_0 作为气井携固能力的临界点:

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{4d(\rho_s - \rho_L)g}{3\rho_L\delta}} \tag{19}$$

在实际生产中,物料形状都是不规则的颗粒,因此不能直接应用球体的自由沉降末速公式来计算颗粒的自由沉降末速,一般取形状系数 Ψ 作为计算不规则颗粒沉降末速的修正系数^[4],修正临界流速 $u'_0 = \Psi u_0$ 。同时,在计算具有一定浓度颗粒的自由沉降末速时,还要将固体颗粒的沉降末速公式乘以浓度影响系数 F_s ,则有: $u''_0 = F_s u'_0$ 。 u''_0 即是实际生产时固体颗粒的沉降末速,进而可得到气井携固临界流量计算公式:

$$q_{sc} = 2.5 \times 10^4 \frac{PAu''_0}{TZ} \tag{20}$$

5 实例分析

根据 SC 油田×井测试资料和 PVT 实验报告,该井原始地层压力为 55.79 MPa,地层温度为 120℃,硫化氢含量为 226 g/m³,井筒中有少量元素硫沉积,其中气的相对密度为 0.739 9;水的相对密度为 1.043;固相硫密度为 2.04 g/cm³,其井流体组成见表 1 所示。

表 1 SC 油田×井流体组成

组分	井流体(%,mol/mol)
H ₂ S	14.83
H ₂ O	2.20
N ₂	0.43
He	0.01
H ₂	0.01
CO ₂	8.98
C ₁	73.21
C ₂	0.02
C ₃ ~C ₇ ⁺	0.31

该井基本不含重质烃类组分,凝析油含量极少,但不可忽略凝析水的影响,水从地层流体中凝析,会降低气相渗透率,影响气井产能。根据本文建立的流入动态模型,绘制了该井的流入动态曲线,并与不考虑相态变化的常规方法进行了对比(图 1)。从图 1 可见,由于凝析水的析出,导致气相渗透率大大降低,降低了气井产能。因此,考虑相态变化的地层流入动态模型更为适合生产实际。

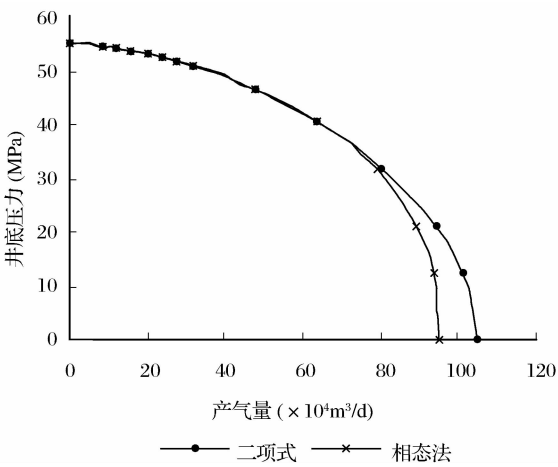


图 1 原始地层压力下的流入动态曲线

根据 SC 油田×井 2006 年 2 月 8 日实测数据(表 2),该井产水量为 2.45 m³/d,产气量为 25.45 × 10⁴ m³/d。根据井口油压计算井底压力,再与实测井底压力进行对比。从表 2 可以看出:考虑多相流体复杂相态变化的气井井筒动态预测方法比不考虑相态变化的方法计算结果更加精确。

根据携液、携固模型,分别计算该井不同油管尺寸的最小携液、携固产气量,并作出携液、携固曲线,如图 2、图 3 所示。从图中可见,气井携固比携液困难,携固最小产气量随管径减小而减少,随压力增大而增大。

最后,我们将地层流入、井筒流出、井筒携液、井筒携固曲线绘制在一张图版上,如图 4 所示。从图中,我们可以很直观地确定 SC 油田×井的合理产气量范围,可以针对不同油管优化配产。同时结合考虑了井筒携液、携固问题,这样可得到更为合理的生产参数,指导 SC 油田×井最优化生产。

表 2 SC 油田×井测试的数据及计算结果

油嘴 (mm)	油压 (MPa)	测点温度 (℃)	油层中部				计算结果			
			深度 (m)	流压 (MPa)	静压 (MPa)	压力系数	不考虑相态变化 (MPa)	相对误差 (%)	考虑相态变化 (MPa)	相对误差 (%)
16	19.67	105	4 801.4	40.06	55.72	1.18	38.58	3.37	40.73	1.67

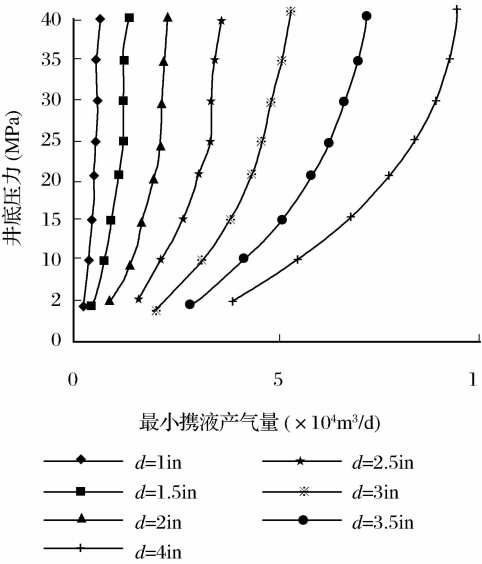


图 2 SC 油田×井不同油管尺寸下的最小携液产气量

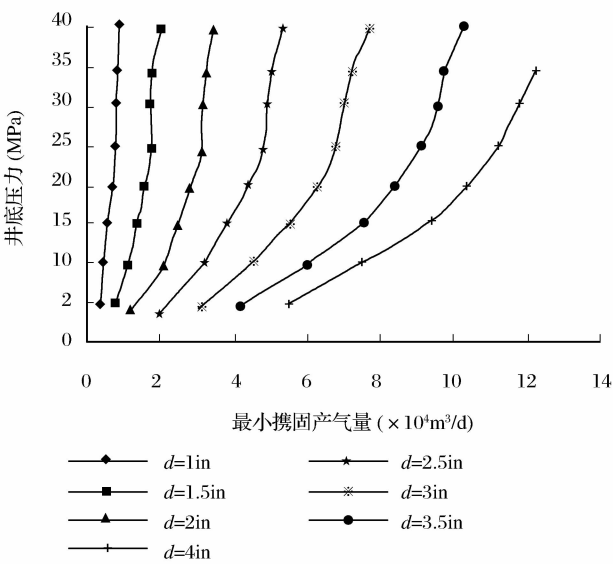


图 3 SC 油田×井不同油管尺寸下的最小携固产气量

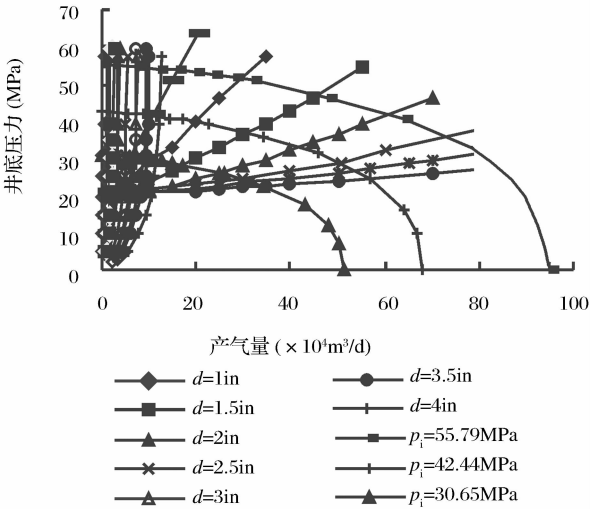


图 4 SC×井系统分析综合曲线

6 结语

- (1)根据天然气和凝析液在地层中的渗流特征,在稳态理论的基础上,可确定气井产能方程,特别是对于富含凝析水、元素硫气藏,预测结果更为精确。
- (2)考虑流体相态变化的井筒流出动态模型能提高富含凝析水、元素硫的特殊类型气井、凝析气井井筒动态预测精度,比不考虑相态变化的计算结果更为精确。
- (3)结合相平衡闪蒸计算和地层流入、井筒流出、井筒携液、携固模型,可建立更为综合、全面的气井生产动态预测方法。
- (4)将气井的流入、流出、携液、携固曲线绘制在一张图版上可得到更为综合、直观的系统分析综合曲线,可更好地指导气田优化生产。

符号说明: p_o 、 p_g 、 p_w 分别为油、气、水相在半径 r 处的压力,MPa; q_o 、 q_g 、 q_w 分别为油、气、水相半径 r 处质量流量,kg/s; k_{ro} 、 k_{rg} 、 k_{rw} 分别为油、气、水相半径 r 处相对渗透率; z_i 、 z_s 分别为混合体系中 i 组分、硫组分总摩尔组成; ρ_o 、 ρ_w 、 ρ_v 分别为凝析油、水、气相密度,kg/m³; ρ_{lm} 、 ρ_{vm} 分别为液体、气体混合物密度,kg/m³; x_i 、 y_i 、 h_i 、 g_i 分别为气、油、水、固相中 i 组分摩尔组成; $k_i^{VL_1}$ 、 $k_i^{VL_2}$ 、 k_i^{VS} 分别为气油、气水、气固平衡常数; f_s^V 、 $f_s^{L_1}$ 、 $f_s^{L_2}$ 、 f_s^S 分别为硫组分在气相、油相、水相、固相中的逸度,Pa; V 、 L_1 、 L_2 、 S 分别为体系达到平衡时气、油、水、固相的摩尔分数; Z_V 、 Z_{L_1} 、 Z_{L_2} 、 Z_S 分别为气、油、水、固相的偏差因子; $f_s^{OL_2}$ 为组分 i 的平衡水相标准态逸度,Pa。 $\alpha_s^{L_2}$ 、 $r_s^{L_2}$ 分别为组分 i 的平衡水相活度、活度系数; f_i^V 、 $f_i^{L_1}$ 、 $f_i^{L_2}$ 分别为组分 i 在气、油、水相中的逸度,Pa; $[p_i]$ 为组分 i 等张比容; σ_o 、 σ_w 、 σ_m 分别为气油、气水、气液界面张力,dyn/cm; μ_g 、 μ_o 、 μ_w 、 μ_m 分别为气、油、水相及混合物粘度,mPa·s;WOR 为水油比,m³/m³;A 为油管截面积,m²;P 为井底或井口压力,MPa; V_g 为井底或井口条件下的气井携液临界流速,m/s;T 为井底或井口温度,K;Z 为 P、T 条件下的气体偏差系数; ρ_s 、 ρ_l 分别为固体颗粒、液体混合物密度,kg/m³; Ψ 、 F_s 分别为形状系数、浓度影响系数。

参考文献:

[1] 常志强.富含凝析水、高含硫气藏气井生产动态分析新理论及新方法研究[D].西南石油大学,博士论文,2007.

- [2] Panagiotopoulos A Z, Kumar S K. A generalized technique to obtain pure component parameters for two-parameter equations of state[M]//Fluid Phase Equilib. Amsterdam:Elsevier, 1985; 77-78.
- [3] 李闽, 郭平, 谭光天. 气井携液新观点[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5):105-106.
- [4] 张书平, 王晓荣, 樊连连, 等. 气井携砂理论研究与应[J]. 断块油气田, 2007, 14(1):50-52.
- [5] Michelsen N L. Phase Envelope Calculations for Hydrocarbon-Water Mixtures [R]. SPE 77770.
- [6] Nghiem L X, Aziz K. A robust iterative method for flash calculation using the SRK or PR EOS[J]. Soc Pet Eng J, 1983, (6): 990-999.
- [7] 王宗贤, 陈泽良, 杨树合, 等. 流体相态研究在凝析气藏开发中的应用[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6):662-665.
- [8] Heidemann R A, Phoenix A V, *et al*, A chemical equilibrium equation of state model for elemental sulfur and sulfur-containing fluids[J]. Ind, Eng, Chem, Res, 2001 40:2160-2167.
- [9] 常志强, 孙雷, 康征, 等. 富含凝析水的凝析油气体系相态研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2):206-209.

Production Performance Analysis of Gas Wells with Rich Condensate Water and Elemental Sulphur

CHANG Zhi-qiang¹, YANG Yong-quan¹, ZHANG Shang-Kun¹,
SUN Lei², XU Wen-sheng¹, XIE Jian-fei¹, ZENG You-xin¹

(1. Tarim Oil Field Company, PetroChina, Korla 841000, China; 2. Southwest Petroleum University, Chengdu 610051, China)

Abstract: Considering the phase behavior of multi-phase liquids, this paper developed a dynamic inflow model for the gas-well, and established a performance prediction model of condensate gas wells. In combination with the formation inflow model, wellbore outflow model, it has also drawn a system analysis curve. Through this curve, we can predict the gas well production performance more directly and comprehensively. Also we can accurately predict the production performance of gas well at different times, improving the analysis result of numerical simulation.

Key words: Condensed water; Elemental sulfur; Seepage flow; Production performance; Phase behavior; Liquid continuous withdrawal; Solid continuous withdrawal.

(上接第 552 页)

- [24] Perry E A, Hower J. Late-stage dehydration in deeply buried pelitic sediments [J]. AAPG Bulletin, 1972, 56 (10): 2013-2021.
- [25] Colton-Bradley V C. Role of pressure in smectite dehydration effects on geopressure and smectite-to-illite transition [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(11):1414-1427.
- [26] Huizinga B J, Tannenbaum E, Kaplan I R. The role of minerals in the thermal alteration of organic matter-III. Generation of bitumen in laboratory experiments[J]. Organic Geochemistry, 1987, 11(6):591-604.

Influence of Pressure on Hydrocarbon Generation under Catalytic Clays

TAO Wei^{1,2}, ZOU Yan-Rong¹, LIU Jin-zhong¹, ZHANG Xin^{1,2}, ZHANG Chang-chun^{1,2}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Kerogen was mixed with montmorillonite, illite, kaolinite, manganese sulfate, and the samples were put into gold-tubes, welded. Then gold-tubes in a stainless steel autoclave were pyrolyzed under 100MPa and 200MPa conditions. The quantification of pyrolyzate analysis was performed through Wason-ECE Agilent 6890 gas chromatography. The results show that catalytic clays have different effects in the process of pyrolysis and hydrocarbon generation. Kaolinite has a positive effect on hydrocarbon gaseous generation, however, montmorillonite, illite and manganese sulfate retard the generation of hydrocarbon. Pressure can enhance the catalytic activity of catalytic clays, the yields of hydrocarbon gaseous are increased with pressure. At the level of 200 MPa, it is most obviously for montmorillonite to improve the catalytic activity, but kaolinite is little. The influence of pressure on clay-catalytic hydrocarbon generation comes from the difference of clay mineral structure and its response to pressure.

Key words: Pressure; Clay mineral; Gaseous hydrocarbon.