

文章编号: 0253-9985(2005)04-0444-06

甲烷、二氧化碳和氮气在油相中溶解度的预测模型

薛海涛¹, 卢双舫¹, 付晓泰²

(1 大庆石油学院, 黑龙江大庆 163318 2 重庆医药工业研究院, 重庆 400061)

摘要: 以甲烷、二氧化碳、氮气在原油中的溶解度实验为基础, 观察 3 种气体在原油中的溶解特征和规律, 并从理论上探讨了气体在原油中的溶解机理, 提出以下观点: 1) 原油中的烃类物质在气体溶解过程中起主要作用, 而胶质、沥青质等大分子对气体溶解度的贡献很小; 2) 气体分子可与烃类物质分子形成加合物分子, 这个过程可看成是一个表观化学反应, 其反应程度可以用一个平衡常数 K 来描述; 3) 先期形成的气体-烃加合物分子对后续的气体还具有一定的溶解能力, 这种再溶解能力可以用一个二次作用系数 α 来描述; 4) 原油的性质用地面原油的密度、原油中烃的质量分数和烃的平均分子量来表征。在此基础上, 综合考虑影响气体溶解的其他因素, 推导出气体在原油中的摩尔溶解度理论方程和气油比的理论方程。经与实验数据对比, 理论计算值与实验结果有很好的 consistency。

关键词: 甲烷; 二氧化碳; 氮气; 原油; 溶解度; 预测模型

中图分类号: TE112.111 **文献标识码:** A

Forecasting model of solubility of CH_4 , CO_2 and N_2 in crude oil

Xue Haitao¹, Lu Shuangfang¹, Fu Xiaotai²

(1 Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang; 2 Chongqing Medicine Industry Institute, Chongqing)

Abstract Dissolution characteristics and mechanisms of CH_4 , CO_2 and N_2 in crude oil are studied through solubility experiments, resulting in the following understandings: hydrocarbons play a key role in the process of gas dissolution in crude oil while macromolecular substances such as colloid and asphaltene have a little influences on the gas solubility. ④ Gas molecules and macromolecular substances in crude oil can form adduct molecules, this process can be treated as an apparent chemical reaction and its reaction degree can be described by an equilibrium constant K . ④ Early formed gas-hydrocarbon adduct molecules have certain solvency to subsequently formed gas molecules, which can be described by a secondary dissolving coefficient α . Physical properties of crude oil can be characterized by the density (ρ_o) of surface crude oil and the mass fraction (x_T) and average molecular weight (M_T) of hydrocarbons in crude oil. Combined with other factors that have influences on gas dissolution, the theoretical equation of gas' mole solubility in crude oil and that of gas-oil ratio in crude oil are derived. Comparison with experimental data shows that calculated and measured values have a good consistency.

Key words Methane; CO_2 ; N_2 ; crude oil solubility; theoretical model

地层压力条件下天然气在原油中的溶解度是石油勘探开发中重要的基础参数, 在天然气资源评价^[1,2]、油藏数值模拟^[3]以及天然气驱、泡沫复合驱等方面得到了广泛的应用。长期以来, 我国

研究人员一般是根据国外报道的图版或经验公式来获取这方面的数据^[4-6]。但是, 由国外原油样品数据拟合得到的经验公式能否适用于我国原油, 已经遭到了质疑^[7]。韩布兴等曾研究过甲烷

基金项目: 国家重点基础研究开发规划项目 (G1999043307)

第一作者简介: 薛海涛, 男, 30 岁, 博士, 有机地球化学

收稿日期: 2005-08-01

在克拉玛依稠油中的溶解度^[8],并提出用基团贡献法计算甲烷在稠油中的溶解度^[9]。作者也对甲烷(CH_4)、二氧化碳(CO_2)、氮气(N_2)在原油中的溶解度进行了实验研究^[10]。由于原油组成的复杂性,目前还未见有一个比较通用的模型计算天然气在原油中的溶解度。以往报导的经验模型,由于考虑的因素比较少(只用气体的相对密度和地面原油的密度来表征天然气和原油的性质)^[4~6],难以适用于复杂多变的天然气-原油系统。为了解决这一问题,本文在实验的基础上,从理论上构建了一个多因素溶解度预测模型。并对主要参数进行了标定,使从理论上计算天然气在原油中的溶解度成为可能。

1 气体在原油中的溶解

为了构建一个比较合理的溶解度预测模型,必须首先探讨气体在原油中溶解的一般规律。 CH_4 、 CO_2 和 N_2 在原油中的溶解规律如下^[10]:

1) 甲烷在原油中的溶解度随压力的增加而增大,但随压力的增加溶解度增大的幅度越来越小。溶解度随温度的升高而减小。

2) CO_2 在原油中的溶解度也是随压力的增加而增大,随温度的升高而减小。但与甲烷不同的是, CO_2 的体积溶解度(C_v)-压力(p)曲线是上翘的,甲烷的 C_v - p 曲线是下弯的。这说明 CO_2 溶解到原油中后,对后续 CO_2 气体的溶解起到了促进作用。

3) N_2 在原油中的溶解度随压力的增加而增大,其趋势与甲烷相似。但是, N_2 的溶解度随温度升高而增大,这与 CO_2 和甲烷不同。

气体在原油中的溶解机理比在水中的要复杂得多。根本的原因是原油的组分十分复杂,就目前的分析手段来看,还不能完全确定原油中的所有组分。另外,不同的气体在原油中的溶解作用也是不同的,如 CH_4 、 CO_2 和 N_2 各有各的溶解特性。但如果能选择适当的参数来表征原油和天然气的性质,建立一个较准确的模型来预测天然气的溶解度是可能的。

2 预测模型

2.1 影响因素

前人的经验模型除考虑温度(t)、压力(p)外,

只用气体的相对密度(ρ_g)和地面原油的标准密度(ρ_o)来表征天然气和原油的性质。这种考虑的优点是简化了问题,缺点是可能偏离实际情况很远。比如 N_2 的相对密度为0.966, CH_4 的相对密度为0.552。如果原油的性质不变,当天然气中含大量 N_2 时,溶解度预测结果就会严重偏大(因为在相同温度、压力条件下, N_2 的溶解度比甲烷低得多。而以往的经验公式中,溶解度与气体的相对密度是呈正相关的^[10])。由此看来,构建模型首先应当考虑气体的组成。其次,用密度代表原油性质也必然有很大的局限性。事实上,在Lasater^[5]的模型中就引入了平均分子量参数,但由于他将原油平均分子量与地面原油标准密度相关联,实际上溶解度的独立变量仍然只有4个(ρ_g 、 ρ_o 、 t 和 p)。

上述讨论表明,作为一般原则,在考虑独立变量数时,一是要尽可能反映出体系的主要性质;二是要尽量减少独立变量数,使构建的模型相对简单;三是所选的独立变量应当比较容易获得。根据该原则,我们用以下独立变量来表征油气体系的性质。

1) 压力是气体与原油处于溶解平衡时的压力,是影响溶解度的重要参数之一。

2) 温度也是影响气体溶解度的重要参数之一,温度易于获得。

3) 原油中烃的重量分数(x_T)。原油的基本组成可以分为烃和非烃两大类。非烃部分主要是大分子胶质和沥青质,含量一般为5%~20%,平均分子量为3 000~5 000^[11]。常温下沥青质不溶于轻烃(如正庚烷),在原油中也以胶团形式存在。由于胶质、沥青质的平均分子量比烃的平均分子量(200~300)大得多,因此,在原油中烃的摩尔分数将接近于1。 x_T 是原油的常规分析数据,在实验中容易获得。

4) 原油中烃的平均分子量(M_T)。烃的平均分子量可以通过原油全烃气相色谱分析数据得到。

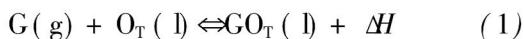
5) 地面原油的标准密度是油田原油的常规测试项目,容易获得。

6) 天然气组分溶于原油时的溶解平衡常数(K),它表征了气体的溶解能力。

2.2 基本假设

假设气体溶解可以看成是一种表观化学反

应,原油中溶解气体的主要成分为烃类,胶质、沥青质对气体的溶解可以忽略。烃类物质可以近似看成是具有 M_T 的一元溶液。假设气体分子溶解于原油时是借助于形成气 (G)-烃 (O_T) 加合物的形式,则表观化学反应为



上述反应在一定温度、压力下达到溶解平衡,则反应的平衡常数为

$$K = \frac{[GO_T]}{p[O_T]} = \frac{\frac{n_g}{V_T}}{p \frac{n_T - n_g}{V_T}} = \frac{n_g}{P(n_T - n_g)} \quad (2)$$

式中 $[GO_T]$ 为加合物平衡浓度, mol ; $[O_T]$ 为烃的平衡浓度, mol ; p 为压力, MPa ; n_T 和 n_g 分别为液态烃和气的物质的量, mol ; V_T 为液态烃的体积, cm^3 。 K 为反应平衡常数。

根据初步研究, K 在不同压力下是变量,这与气体在水中的溶解不同。分析认为,可能是气体分子与油中液态烃分子形成的加合物分子 (GO_T) 对气体还具有一定的溶解能力,使得式 (2) 中油相的平衡浓度 $[GO_T]$ 不因溶气而显著变小。换句话说,加合物分子仍具有一定的液态烃的性质,对气体具有一定溶解能力。我们把这种继续溶解作用称为二次溶解作用 (二次作用)。但不同的气体,这种二次作用是有差别的。因此,可以较好地解释 CO_2 的溶解度曲线,即在等温下, CO_2 的 $C_v - p$ 曲线的斜率随着压力增大而增大^[10]。造成这种结果的原因是 CO_2 -烃加合物分子对后续 CO_2 的溶解能力比烃分子的溶解能力还要强。相反, CH_4 -烃加合物分子对后续 CH_4 的溶解能力比烃分子弱。为了使溶解度的表达式具有简单的形式,同时也避免高次项,我们在烃的浓度项中引入一校正因子 α 即

$$[O_T] = \frac{n_T - \alpha n_g}{V_T} \quad (3)$$

式中 α 为二次作用系数,与温度有关。当 α 为正值时,随反应的进行,烃的表观浓度变小;当 α 为负值时,由于气体加合物的溶解能力比烃强,烃的表观浓度反而增加。

将式 (3) 代入式 (2), 得

$$K = \frac{n_g}{p(n_T - \alpha n_g)} \quad (4)$$

2.3 模型

根据上面的基本假设,并由式 (4) 解得

$$n_g = \frac{K p n_T}{1 + \alpha K p} \quad (5)$$

式 (5) 两边同除 V_2 得

$$C = \frac{n_g}{V_2} = \frac{K p}{1 + \alpha K p} \frac{n_T}{V_2} \quad (6)$$

式中 C 为摩尔溶解度, mol/cm^3 ; V_2 为一定量原油在压力 p 下达到溶解平衡时的体积, cm^3 。

烃的体积为

$$V_T = \frac{n_T M_T}{\rho} = \frac{\rho_0 V_0 x_T}{\rho} \quad (7)$$

对上式整理得

$$n_T = \frac{V_T \rho}{M_T} \quad (8)$$

式中 ρ 为原油中烃的密度, g/cm^3 ; M_T 为烃的平均分子量; V_T 为烃的体积; V_0 为原油在地面条件下的体积, cm^3 ; ρ_0 为密度, g/cm^3 ; x_T 为烃的重量分数, 小数。

据式 (7) 和式 (8), 并结合体积系数 B 的计算模型^[12], 对式 (6) 进行整理得计算单组分气体溶解度的理论模型

$$C = \frac{K p}{1 + \alpha K p} \frac{n_T}{V_2} = \frac{K p}{1 + \alpha K p} \frac{\rho}{M_T} \frac{V_T}{V_2} = \frac{K p}{1 + \alpha K p} \frac{\rho_0 x_T V_0}{M_T V_2} = \frac{K p}{1 + \alpha K p} \frac{\rho_0 x_T}{M_T B} = \frac{K p x_T \rho_0}{M_T f(t) + \alpha K p M_T f(t) + K p x_T \rho_0 f(t) V_{gn}} \quad (9)$$

式中 $\rho_0 x_T$ 和 M_T 是表征原油性质的参数; V_{gn} 为表观摩尔体积, cm^3/mol ; $f(t)$ 为温度系数, 小数^[12]。如把 C 转换为体积浓度 C_v (cm^3/cm^3), 只须用 C 乘以 22 400 即可。从上式可见, 只要知道 K 和 α 与温度的关系以及表征原油和气体性质的基本参数, 由上式即可计算气体的平衡溶解度。反过来, 利用实验条件下溶解度测定数据, 可以标定 K 和 α 值。

工业上常用地面油的溶解能力表示气体在地层原油中的溶解度。从式 (9) 可以导出下式

$$C_0 = \frac{n_g}{V_0} = \frac{n_g}{V_2} \frac{V_2}{V_0} = C B = \frac{K p}{1 + \alpha K p} \frac{\rho_0 x_T}{M_T} \quad (10)$$

式中 C_0 为单位体积地面原油在某温度、压力下达到两相平衡时溶解气体的摩尔数, mol/cm^3 。

式 (10) 表明, 当溶解度用 C_o 表示时, 溶解度方程具有简单的形式, 由于 1 mol 气体在标准状态下的体积为 $22\,400 \text{ cm}^3$, 所以, 由式 (10) 可以进一步得到

$$R_s = 22\,400 C_o = \frac{22\,400 K_p}{1 + \alpha K_p} \frac{d_o x_T}{M_T} \quad (11)$$

式中 R_s 为气油比, m^3/m^3 。

显然, 式 (11) 比式 (9) 简单得多, 只需知道原油性质参数和气体的压力, 就可以预测气油比, 是一个简单实用的气油比计算公式。本文试算时所用样品的 x_T 为 $0.853\,4$, M_T 为 215.36 。

3 K 和 α 的标定

3.1 方法

K 和 α 的标定主要依据式 (9) 给出的 C 与 K 和 α 的关系和文献 [10] 报道的 CH_4 , CO_2 和 N_2 在原油中的溶解度实验数据。具体做法是, 选取一条溶解等温线, 使 α 以很小的步长变化, 对于每一个 α 值计算不同压力点的 K 值。压力范围为 $0 \sim 25.33 \text{ MPa}$ 。直到找到一个 α 使得对应的 K 值随压力的变化量最小 (即 K 值接近于一个常数)。 K 和 α 值即为该温度下的溶解平衡常数和二次作用系数。因此, 气体的溶解能力就可以用 K 和 α 来表征。

3.2 K 和 α 与温度的关系

用上述方法标定了 CH_4 , CO_2 和 N_2 3 个组分在不同温度下的 K 和 α 值, 将各组分不同温度下的 K 取对数, 并对绝对温度的倒数 ($1/T$) 作图 (图 1)。从图 1 可见, 所有组分的 $\ln K$ 与 $1/T$ 均呈直线关系, 符合化学反应的一般规律。除 N_2 以外, 组分的溶解常数随温度升高而减小, 表明升高温度, 溶解度下降。唯独 N_2 的溶解度, 在 35°C 以上

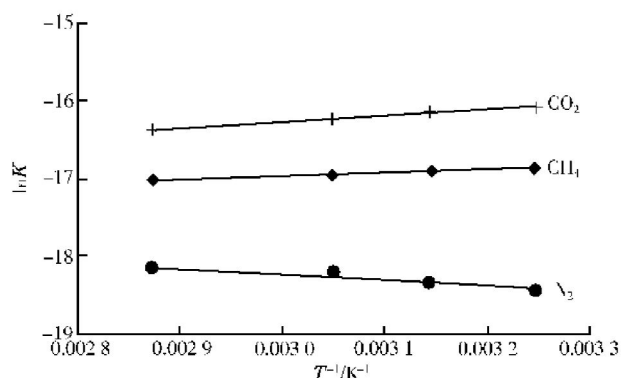


图 1 CH_4 , CO_2 和 N_2 的 $\ln K$ 与 $1/T$ ($1/\text{K}$) 的关系

Fig. 1 $\ln K$ vs $1/T$ ($1/\text{K}$) of CH_4 , CO_2 and N_2

是随温度升高而增加 (35°C 以下未进行实验)。溶解度随温度升高而增加, 意味着 N_2 在原油中也存在类似于气体在水中的间隙填充溶解机理。可以预料, 像氦和氩这样的惰性气体可能有与 N_2 相类似的性质。 N_2 随温度变化的这种趋势在韩布兴等人的实验中也观察到 [13]。

根据图 1 将各组分的 $\ln K$ 对 $1/T$ 进行线性回归, 得 CH_4 , CO_2 和 N_2 在原油中的溶解常数与温度的关系式为

$$\text{CH}_4: \ln K = 481.741 \frac{1}{T} - 18.387\,4 \quad (12)$$

$$\text{CO}_2: \ln K = 773.247 \frac{1}{T} - 18.589\,8 \quad (13)$$

$$\text{N}_2: \ln K = -702.406 \frac{1}{T} - 16.137\,2 \quad (14)$$

将 α 值对温度 t 作图, 得到图 2。从图 2 可见, α 与温度 t 有近似的线性关系。将 CH_4 , CO_2 和 N_2 的 $\alpha-t$ 曲线进行线性回归, 得到各组分的 $\alpha-t$ ($^\circ\text{C}$) 关系式

$$\text{CH}_4: \alpha = 0.000\,276\,3t - 0.063\,33 \quad (15)$$

$$\text{CO}_2: \alpha = 0.000\,082\,86t - 0.706\,1 \quad (16)$$

$$\text{N}_2: \alpha = -0.002\,445\,71t - 0.864\,4 \quad (17)$$

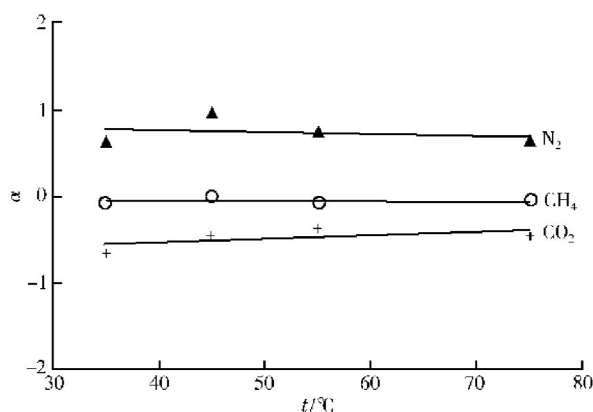


图 2 CH_4 , CO_2 和 N_2 的二次作用系数 α 与温度 t 的关系

Fig. 2 Secondary dissolution coefficient (α) of CH_4 , CO_2 and N_2 vs temperature (t)

4 结果与比较

表 1 表 2 和表 3 分别为 CH_4 , CO_2 和 N_2 在原油中的实测溶解度 [10] 与根据上述方法得到的计算溶解度的比较。由表可见, CH_4 , CO_2 和 N_2 在原油

中的计算溶解度与实测溶解度的平均相对偏差分别为 1.07%, 3.07% 和 1.93%。本文模型的计算结果与实验结果呈现出较好的一致性。

表 1 CH₄ 在原油中的溶解度计算值与实测值的比较

Table 1 Comparison of the calculated and measured dissolubility values of CH₄ in crude oil

温度/ ℃	压力/ 10 ⁵ Pa	测定溶解度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	计算溶解度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	气油比/ (m ³ ·m ⁻³)
35	43.15	14.7	14.6	15.3
	81.89	26.8	26.3	28.4
	128.50	38.5	39.1	43.6
	179.50	52.6	51.6	59.5
	220.60	60.6	60.7	71.9
45	44.13	14.0	14.3	15.1
	83.85	26.3	25.9	28.2
	129.00	37.3	37.9	42.6
	177.50	50.3	49.6	57.5
	223.60	59.8	59.7	71.2
55	25.50	8.4	8.1	8.5
	50.99	15.5	15.7	16.8
	84.34	25.2	25.1	27.5
	130.40	37.0	37.1	41.9
	179.50	48.1	48.6	56.8
75	221.6	57.4	57.8	69.2
	48.05	13.8	13.8	14.9
	82.38	23.2	23.0	25.5
	132.40	35.4	35.4	40.5
	180.90	46.9	46.4	54.8
	221.10	55.0	54.9	66.5

表 2 CO₂ 在原油中的溶解度计算值与实测值的比较

Table 2 Comparison of the calculated and measured dissolubility values of CO₂ in crude oil

温度/ ℃	压力/ 10 ⁵ Pa	测定溶解度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	计算溶解度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	气油比/ (m ³ ·m ⁻³)
35	15.0	12.2	12.3	12.8
	30.0	25.7	26.2	28.2
	45.2	42.6	42.2	47.6
	60.2	60.9	60.5	71.7
45	15.0	12.5	11.1	11.7
	30.0	23.6	23.4	25.3
	45.0	37.0	37.1	41.6
	60.5	53.8	53.0	62.0
55	15.5	11.0	10.5	11.1
	30.3	21.5	21.4	23.2
	45.5	31.8	33.6	37.6
	60.2	45.1	46.5	53.9
75	15.5	9.8	8.9	9.5
	30.3	17.0	17.8	19.5
	46.5	28.5	28.2	31.6
	61.0	38.9	38.0	43.8

表 3 N₂ 在原油中的溶解度计算值与实测值的比较

Table 3 Comparison of the calculated and measured dissolubility values of N₂ in crude oil

温度/ ℃	压力/ 10 ⁵ Pa	测定溶解度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	计算溶解度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	气油比/ (m ³ ·m ⁻³)
35	51.0	3.5	3.6	3.7
	100.0	7.0	6.8	7.0
	149.0	9.8	9.8	10.1
	199.5	12.6	12.6	13.0
45	50.5	3.9	3.8	3.9
	100.0	7.5	7.2	7.5
	152.5	10.5	10.6	11.0
	201.0	13.3	13.4	14.0
55	60.0	5.1	4.8	4.9
	101.0	7.8	7.7	8.1
	153.0	11.6	11.2	11.7
	200.0	14.5	14.1	14.8
75	50.0	4.4	4.4	4.7
	103.0	8.8	8.7	9.2
	158.0	12.5	12.7	13.6
	199.0	15.5	15.5	16.6

参 考 文 献

- 1 陈章明, 徐景祯. 油气圈闭评价方法 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1993 113~ 116
Chen Zhangming, Xu Jingzhen. Evaluation methods of oil and gas traps [M]. Harbin: Harbin Industrial University Publishing House, 1993 113~ 116
- 2 卢家烂, 傅家谟. 不同条件下天然气运移影响的模拟实验研究 [J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(2): 153~ 160
Lu Jialan, Fu Jiamu. Experimental study on simulation of influential factors of gas migration under different conditions [J]. Oil & Gas Geology, 1991, 12(2): 153~ 160
- 3 庞雄奇, 陈章明, 陈发景. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1993 90~ 91
Pang Xiongqi, Chen Zhangming, Chen Fajing. Numerical simulation of hydrocarbon generation, remaining and expulsion from source rocks in geohistory and their quantitative evaluation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993 90~ 91
- 4 Standing M B. A pressure-volume-temperature correlation for mixtures of California oil and gas [J]. Drill and Prod Prac, 1947, (5): 275~ 386
- 5 Lasater J A. Bubble point pressure correlation [J]. Trans AME, 1958 213 379~ 381
- 6 Vazquez M, Beggs H D. Correlation for fluid physical property prediction [J]. Journal of Petroleum Technology, 1980 (6): 968~ 970
- 7 薛海涛, 卢双舫, 付晓泰, 等. 预测原油中气油体积比的模型精度 [J]. 大庆石油学院学报, 2004 28(1): 1~ 3

- Xue Haitao, Lu Shuangfang, Fu Xiaotai et al Accuracy of prediction model of oil/gas volume ratio in crude oil[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2004, 28(1): 1-3
- 8 韩布兴, 阎海科, 胡日恒. 甲烷在克拉玛依九区稠油中的溶解度及甲烷饱和稠油的粘度与密度[J]. *油田化学*, 1990, 7(2): 188-190
- Han Buxing, Yan Haike, Hu Riheng. The solubility of CH_4 in viscous crude in 9th section of Karamai oilfield and viscosity and density of methane-saturated viscous crude[J]. *Oilfield Chemistry*, 1990, 7(2): 188-190
- 9 柯杰, 韩布兴, 阎海科, 等. 气体在克拉玛依九区稠油中的溶解度关联与计算[J]. *石油学报*, 1994, 15(3): 91-95
- Ke Jie, Han Buxing, Yan Haike et al Correlation and calculation of gas solubility for heavy oil in Karamai oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1994, 15(3): 91-95
- 10 薛海涛, 刘灵芝, 周丽华, 等. 天然气在大庆原油中的溶解度[J]. *大庆石油学院学报*, 2001, 25(2): 12-15
- Xue Haitao, Liu Lingzhi, Zhou Lihua, et al Solubility of natural gas in Daqing crude oil[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2001, 25(2): 12-15
- 11 [苏]马尔哈辛 • •. 油层物理化学机理[M]. 李殿文, 译. 北京: 石油工业出版社, 1987, 5-7
- а Барко • •. Reservoir's physico-chemical mechanism [M]. Translated by Li Dianwen. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987, 5-7
- 12 薛海涛, 卢双舫, 付晓泰. 溶气原油体积系数、密度的预测模型[J]. *地球化学*, 2003, 32(6): 613-618
- Xue Haitao, Lu Shuangfang, Fu Xiaotai Prediction models of volume factor and density of gas dissolution crude oil[J]. *Geochimica*, 2003, 32(6): 613-618
- 13 韩布兴, 阎海科, 胡日恒. CO_2 、 N_2 在克拉玛依九区稠油中的溶解度及甲烷饱和稠油的粘度与密度[J]. *油田化学*, 1993, 10(3): 264-267
- Han Buxing, Yan Haike, Hu Riheng. The solubility of CO_2 、 N_2 in heavy oil in 9th section of Karamai oilfield and viscosity, density of heavy oil saturated with methane[J]. *Oilfield Chemistry*, 1993, 10(3): 264-267

(编辑 高 岩)

(上接第 443 页)

- 8 陈义才, 沈忠民, 黄泽光, 等. 碳酸盐烃源岩排烃模拟模型及应用——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(3): 203-206
- Chen Yicai, Shen Zhongmin, Huang Zeguang Modeling model for hydrocarbon expulsion in carbonate source rocks and its application in practice example from the Majiagou Formation of Ordovician in Ordos basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(3): 203-206
- 9 陈发景, 田世澄, 马正, 等. 压实与油气运移[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1989, 63-95
- Chen Fajing, Tian Shicheng, Ma Zheng et al Compression and hydrocarbon migration[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1989, 63-95
- 10 Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence[M]. New York: Springer-Verlag, 1984, 293-340
- 11 Secor D T. Role of fluid pressure in jointing[J]. *Am Jour Sci*, 1965, 263: 633-646
- 12 张卫华, 陈荣书, 陈习峰, 等. 分阶段排烃模拟模型研究[J]. *石油实验地质*, 1999, 21(4): 357-363
- Zhang Weihua, Chen Rongshu, Chen Xifeng et al Studying on the simulation model of stage-by-stage hydrocarbon expulsion[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1999, 21(4): 357-363
- 13 王新洲, 宋一涛, 王学军, 等. 石油成因与排油物理模拟方法、机理及应用[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996, 145-164, 209-224
- Wang Xinzhou, Song Yitao, Wang Xuejun et al Physical simulation of petroleum formation and oil expulsion methods mechanism and application[M]. Dongying: Press of the University of Petroleum, China, 1996, 145-164, 209-224
- 14 温珍河. 辽河滩海地区的生排烃数值模拟[J]. *石油与天然气地质*, 2001, 22(1): 33-37
- Wen Zhenhe Numerical simulation of hydrocarbon generation and expulsion in beach of Liaohe oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22(1): 33-37
- 15 张一伟, 张卫海, 查明, 等. 勘探早期盆地分析与油气评价[M]. 北京: 地质出版社, 1998, 72-77
- Zhang Yiwei, Zhang Weihai, Zhang Ming et al Basin analysis and hydrocarbon evaluation at early exploration stage[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998, 72-77
- 16 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994, 11-87
- Shi Guangren Numerical methods of petroliferous basin modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994, 11-87

(编辑 高 岩)