

# 凝析油气渗流理论研究进展

欧阳良彪

中国科学技术大学近代力学系, 合肥 (邮政编码230026)

**摘要** 本文综述了凝析油气渗流研究的现状。简要介绍了凝析油气藏特征。开采方案及其试井分析方法, 着重讨论了凝析油气渗流的基本方程、解析解法和数值模拟。在此基础上, 提出了该理论研究的发展前景。

**关键词** 凝析油气藏; 渗流; 试井分析; 解析解; 数值模拟

## 1 引言

所谓凝析油气藏即能采出天然气和凝析油的气藏。凝析油是汽油及密度大于汽油但小于 $0.786\text{g cm}^{-3}$ 的其他馏分的混合物。在地层条件下, 天然气和凝析油通常呈单一的气相状态, 并符合反凝析规律。它既不同于油藏, 也不同于气藏, 是一种新型的工业性油气储集类型。

凝析油气藏是30年代初首先在美国发现的。随钻井深度的增加, 世界上许多国家, 如苏联、英国、加拿大、澳大利亚、挪威、阿联酋和我国等也相继发现了凝析油气藏。依目前勘测情况, 苏联的凝析油气藏数目最多, 储量也最大。

凝析油气藏和一般油藏、气藏相比具备一系列优点。世界上每年有越来越多的凝析油气藏投入工业性开发。因此凝析油气渗流研究具有重大现实价值。

凝析油气渗流比一般油、气渗流更为复杂。对相当多的凝析油气渗流, 如果地层压力高出露点压力太多, 循环注气开发以及井筒流动、管道输运等, 不可避免地出现凝析反凝析、蒸发反蒸发和溶解分离过程。此外, 由于凝析油气渗流的高温高压特性, 理想气体状态方程不适用, 需要应用形式上繁杂得多的状态方程。所有这些都给凝析油气渗流的研究增加相当大难度。这就是为什么发现凝析油气藏50多年来其渗流理论研究尚不深入的根本原因。

本文综述凝析油气渗流研究的现状。先介绍凝析油气藏的主要特征、开采方案及试井分析方法。而后引出凝析油气渗流的控制方程。接着分析凝析油气渗流的解析解法。最后讨论凝析油气渗流的数值模拟。在此基础上, 进一步提出凝析油气渗流理论研究的发展前景。

## 2 凝析油气藏特征及开发

### 2.1 凝析油气藏特征

凝析油气藏赖以形成的地质物理条件, 决定了它具有一系列不同于油藏、气藏的特征。

这些特征主要反映在以下几个方面:

①凝析油气藏的埋藏深度较深,地层温度高,压力高<sup>[1,2]</sup>。

②油气藏温度、压力随深度变化,导致凝析油的含量、组分构成和露点压力的变化<sup>[3-5]</sup>。在相同地质条件下,凝析油含量取决于温度和压力,因而也就取决于埋藏深度:埋藏越深,地层温度和压力都越高,凝析油含量也就越高。同时,露点压力还受产率的影响。产率愈高,露点压力愈低。

③出现凝析和反凝析,溶解和分离过程。气中溶解有凝析油,含量随露点压力改变;油中又溶解有气,含量随泡点压力变化。这种相间传质现象构成凝析油气渗流的重要特征。

④凝析油气藏开发过程中,储集地层变形,进而改变介质的孔隙度和渗透率。Абасов<sup>[6]</sup>研究发现,这种介质孔隙度、渗透率的变化遵循一定的规律。在某些情况下,储层变形还将影响天然气、凝析油采收率。Джамалбеков<sup>[7]</sup>实验显示:在刚性水压驱动条件下,强变形地层的气体采收率比弱变形地层的要高出14.8%,而凝析油采收率正相反,弱变形地层的较高。

⑤湍流的影响不可忽视。凝析油气渗流中,气体渗流速度高,构成湍流流动。这时Darcy定律不适用,代之应采用非线性的渗流规律。

⑥含CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>S等腐蚀性气体。

## 2.2 凝析油气藏开发

所谓凝析油气藏的合理开发是指在遵守资源和环境保护前提下,力争取得最大的国民经济效益,即达到最佳经济技术指标,获得最高天然气和凝析油采收率。凝析油气藏开发方案很多,如衰竭式、注水注气保持地层压力等。此外,也应用混合方案<sup>[8]</sup>。

2.2.1 衰竭式开发<sup>[9,10]</sup> 这是最为简单和直观的开采方案。它具有容易满足国民经济对天然气的需要,基建投资少,可很快收回成本等一系列优点。其缺点是天然气及凝析油采收率低、凝析油损失大,从经济和长远角度考虑是不理想的。

2.2.2 循环注气开发<sup>[11]</sup> 这是最常用的保持地层压力的方法。因通常注入采自同一层位而又经脱油的气体,故称循环注气。它一方面能保证最充分地驱替含凝析油的湿气,防止凝析油滞留地层,另一方面可储备天然气,用于将来出售。

回注比是循环注气开发的一重要参数,回注比愈大,采收率就愈高。但提高回注量需付出经济代价,如提高地面设施的能力和容量。如果因提高回注量投入大量资金,而开发上收效甚微,经济上显然不足取。王瑞河<sup>[12]</sup>由数值模拟得出结论:回注比控制在0.7左右的循环注气,是苏1潜山凝析气藏的最佳开采方式。

2.2.3 注水开发<sup>[13-15]</sup> 和循环注气相比,注水开发有明显优点:天然气可马上出售,注入花费少,组分构成不变以及可较好保持地层压力。但迄今为止注水方案并未获得实际应用。原因在于注入水俘获大量天然气,这部分天然气很难在随后采用降压方式予以开采。

2.2.4 注N<sub>2</sub>开发<sup>[16-21]</sup> 将从空气中分离产生的氮气注入凝析油气藏有利于提高油气采收率。只要有足够能源供应并采用适宜的技术,氮气可在任何地方产生,注入的氮气可以同天然气一样在地层内循环维持压力,防止在井周围产生凝析液。

Daltanban et al<sup>[10]</sup>, Bruggeman et al<sup>[11]</sup>借助数值实验等手段详细比较了上述开发方案。

### 2.3 凝析油气藏试井分析

作为渗流理论的 1 个组成部分, 试井分析必不可少。对凝析油气系统, 存在 1 个临界饱和度, 当反转凝析液超过临界值时, 液态才开始流动。而对实际凝析油气渗流, 凝析液饱和度通常低于这个数值, 即可认为地层中凝析液流速为零。因此, 有人提出凝析油气井试井资料的处理可沿用单相气井的试井分析方法<sup>[22]</sup>。但实践证明, 这种方法不能确切地表征凝析油气渗流的真实情况。在井筒及地层流动过程中, 随压力、温度降低, 出现了反转凝析现象, 这决定了凝析油气井试井分析方法应与单相气井有所不同。

张树宝等<sup>[23]</sup>将井口得到的凝析液量折算成相应的凝析气量, 再用二项式或指数式来整理凝析油气藏的试井资料。国外的试井研究则侧重于应用虚拟压力、虚拟压力积分和定态理论的概念。这些做法都获得较为理想的结果。

## 3 控制方程

### 3.1 物质平衡方程

假设地层均质各向同性, 水中不溶解气体。忽略重力、浮力和毛管力影响。

利用质量守恒原理, 可以推出

$$\text{气} \quad \nabla \cdot \left( \left( \frac{R_g V_o}{B_o} \right) + \left( \frac{V_g}{B_g} \right) \right) + q_g = -\phi \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{R_g S_o}{B_o} + \frac{S_g}{B_g} \right) \quad (3.1)$$

$$\text{油} \quad \nabla \cdot \left( \left( \frac{v_o V_g}{B_g} \right) + \left( \frac{V_o}{B_o} \right) \right) + q_o = -\phi \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{v_o S_g}{B_g} + \frac{S_o}{B_o} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{水} \quad \nabla \cdot \left( \frac{V_w}{B_w} \right) + q_w = -\phi \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (3.3)$$

式中  $R_g$ ,  $v_o$  分别为溶解油气比和凝析油气比,  $B_m$ ,  $V_m$ ,  $S_m$ ,  $q_m$  ( $m=g, o, w$ ) 分别为各相的体积系数、渗流速度、饱和度和流量,  $\phi$  为介质孔隙度, 下标  $g, o, w$  分别表示气、油和水。

### 3.2 运动方程

$$\mathbf{V}_m = -\frac{kk_{r,m}}{\mu_m} \nabla (p_m - \gamma_m z) \quad (3.4)$$

其中  $k$ ,  $k_{r,m}$  分别代表绝对渗透率和相对渗透率,  $\mu_m$  为粘性系数,  $p_m$  为压力,  $\gamma_m$  为重度。

对凝析油气渗流, 气流速度较高, 产生偏离上述 Darcy 定律的现象。许多研究者将这归因为湍流因素的影响<sup>[24-26]</sup>或惯性的影响<sup>[27,28]</sup>。合理的解释是: 随渗流速度的增加, 惯性引起最初的偏离, 湍流则影响更高速度的流动。

显而易见, 应用 (3.4) 需要知道 3 相相对渗透率数据。这可通过油水或油气 2 相的实验数据代替, 或由饱和度-毛管压力关系曲线预测<sup>[29,30]</sup>。

水、气相对渗透率可直接使用实验数据, 它们只是自身饱和度的函数。而油相相对渗透率则为水、气饱和度的 2 元函数, 其表示有多种<sup>[31-34]</sup>, 比较而言, Stone-II<sup>[33]</sup>公式和 Aziz<sup>[34]</sup>公式应用较广泛<sup>[35]</sup>。

### 3.3 状态方程

如前所述, 凝析油气渗流特征之一为高温高压特性。这决定了理想气体状态方程的不适用性。为此, 人们提出了一系列修正方程, 主要包括 RK<sup>[36]</sup>, ZJRK<sup>[37,38]</sup>, SRK<sup>[39]</sup>, PR<sup>[40]</sup>,

Martin<sup>[41]</sup>指出,上述各状态方程可统一表示成压缩因子的3次方程形式。Coats<sup>[42]</sup>利用基本热力学平衡关系导出这一通用状态方程

$$z^3 + ((m_1 + m_2 - 1)B - 1)z^2 + (A + m_1m_2B^2 - (m_1 + m_2)B(B + 1))z - (AB + m_1m_2B(B + 1)) = 0 \quad (3.5)$$

对 RK, ZJRK, SRK 状态方程,  $m_1 = 0, m_2 = 1$

对 PR 状态方程,  $m_1 = 1 + \sqrt{2}, m_2 = 1 - \sqrt{2}$

实际经验表明,尽管使用上述状态方程有时可得较好结果,但不能视为完全可靠的方法。特别在衰竭式开发中,状态方程往往无法计算出和实验相符的反转凝析液饱和度数值。幸运的是,利用参数调整(通常由非线性回归自动完成),状态方程还是能够调整计算出令人满意的结果。

### 3.4 约束关系

$$S_g + S_o + S_w = 1 \quad (3.6)$$

式中  $S_g, S_o, S_w$  分别代表气、油、水相饱和度。

## 4 解析方法

### 4.1 精确解法

假定:①地层均质等厚,各向同性;②忽略重力、浮力和毛管力影响;③理想气体等温渗流;④凝析液饱和度低于临界数值,即研究的是凝析液的积聚过程。

此时,地层压力  $p$  和凝析液饱和度  $S$  满足

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{2\phi\mu_g} \Delta p^2 = a^2 \Delta p^2 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = bp(\nabla p)^2 - c \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (4.2)$$

式中  $a, b, c$  为常数,大小取决于介质以及地层条件。

#### 4.1.1 1维不稳定凝析油气渗流 定解方程

$$\frac{\partial p}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = bp \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 - c \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (4.4)$$

定解条件

$$p(0, t) = p_w, p(\infty, t) = p_i, p(x, 0) = p_i, S(x, 0) = 0$$

根据  $\pi$  定理,可得方程(4.3), (4.4) 的自模解

$$S(x, t) = 2\delta_1 \int_{\xi}^{\infty} \frac{F_1}{\xi} \left( \frac{dF_1}{d\xi} \right)^2 d\xi - \frac{1}{2} \delta_2 (F_1^2(\xi) - 1) \quad (4.5)$$

式中  $\xi = x/(a\sqrt{p_i t}), \delta_1 = bp_i^2/a^2, \delta_2 = 2cp_i^2, F_1(\xi) = p(x, t)/p_i$ 。压力分布  $p(x, t)$  可容易求出。

#### 4.1.2 平面径向不稳定凝析油气渗流 类似地有

$$S(r, t) = \int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{2} \delta_1 \lambda^2 \xi^{-3} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4}\right) d\xi / \sqrt{1 - \frac{1}{2} \lambda E_i\left(-\frac{\xi^2}{8}\right) - \frac{\delta_2 \lambda}{4} E_i\left(-\frac{\xi^2}{8}\right)} \quad (4.6)$$

## 4.2 近似解法

4.2.1 稳态替换法 所谓稳态替换法，顾名思义，即将每一时刻不稳定渗流视为稳定渗流并代替之，从而求出相应的不稳定渗流解。

①平面径向不稳定凝析油气渗流。众所周知，相应的气体稳定渗流  $p(r, t)$  为

$$p(r, t) = p_i \sqrt{1 - \lambda \ln \frac{R(t)}{r}} \quad (4.7)$$

式中  $R(t)$  为假想供给边缘半径。代入 (4.2)，积分并略去 2 阶以上小量，有

$$S(r, t) = \frac{q\mu_g A}{4\pi kh} \left(\frac{R}{r}\right)^2 \left(1 + \frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda}{2} \ln \frac{R}{r} \sqrt{1 - \lambda \ln \frac{R}{r}}\right) \quad (4.8)$$

计算表明，精确解 (4.6) 和近似解 (4.8) 之间差别很小。

② 1 维不稳定凝析油气渗流。同样将气体稳定渗流压力分布代入 (4.4)，得

$$S(x, t) = 2E_2 \ln((\sqrt{E_3 x t^{-1/2} + 1} + 1)/(\sqrt{E_3 x t^{-1/2} + 1} - 1)) \quad (4.9)$$

其中

$$E_1 = \sqrt{3k(p_i^2 - p_w^2)(p_i + p_w)/\phi\mu_g(p_w^2 + p_i p_w - 2p_i^2)}$$

$$E_2 = b(p_i^2 - p_w^2)/(4p_w E_1), \quad E_3 = (p_i^2 - p_w^2)/(p_w^2 \sqrt{E_1})$$

## 4.2.2 虚拟函数和线源解

①虚拟压力。将 Darcy 定律 (3.4) 代入 (3.1)，(3.2)，忽略重力效应，并设  $q_o, q_g$  为零，则有

$$\text{气} \quad \nabla \cdot \left( \left( \frac{R_s k_{r_o}}{\mu_o B_o} + \frac{k_{r_g}}{\mu_g B_g} \right) \nabla p \right) = \frac{\phi}{k} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{R_s S_o}{B_o} + \frac{S_g}{B_g} \right) \quad (4.10)$$

$$\text{油} \quad \nabla \cdot \left( \left( \frac{v_s k_{r_g}}{\mu_g B_g} + \frac{k_{r_o}}{\mu_o B_o} \right) \nabla p \right) = \frac{\phi}{k} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{v_s S_g}{B_g} + \frac{S_o}{B_o} \right) \quad (4.11)$$

方程所反映的非线性特性可通过引入虚拟压力函数而消除<sup>[44]</sup>。虚拟压力定义为

$$p_{p_o} = \int \left( \frac{k_{r_g} v_s}{\mu_g B_g} + \frac{k_{r_o}}{\mu_o B_o} \right) dp \quad (4.12 a)$$

$$p_{p_g} = \int \left( \frac{k_{r_g}}{\mu_g B_g} + \frac{R_s k_{r_o}}{\mu_o B_o} \right) dp \quad (4.12 b)$$

$$p_{p_t} = \int \left( \frac{k_{r_g}(1+v_s)}{\mu_g B_g} + \frac{k_{r_o}(1+R_s)}{\mu_o B_o} \right) dp \quad (4.12 c)$$

实际应用中，虚拟压力定义的选择依赖于油藏特性、生产条件及边界条件。 $p_{p_o}$ ， $p_{p_g}$ ， $p_{p_t}$  分别应用于地面油产量、气产量和总产量一定的情形<sup>[45]</sup>。

对比气相情形，多相流虚拟压力通常不仅仅是压力的函数，它还和测试历史有关。例如降落测试与其后恢复测试的虚拟压力函数有一定的差异<sup>[46]</sup>。

②虚拟时间。对单相气流，Bratvold<sup>[47]</sup>指出，虚拟时间<sup>[48]</sup>和规范化时间<sup>[49]</sup>的应用可以提高计算平均地层压力的精度。尽管表皮因子等的计算对它们并不特别敏感。

规范化时间  $\Delta \tilde{t}$  定义为 (虚拟时间的其他定义，在此从略)

$$\Delta \tilde{t} = \frac{\Delta t}{\mu_g(p_{w.o})c_g(p_{w.o})} \quad (4.13)$$

③线源解。对于平面径向凝析油气渗流，Bøe<sup>[45]</sup>应用虚拟压力和 Boltzmann 相似变换求出相应解析解。采用 Boltzmann 变量  $y = \frac{\phi r^2}{4kt}$ ，并引入记号  $\beta = \frac{S_o}{B_o} + \frac{v_g S_g}{B_g}$ ，则由方程 (4.11) 可得

$$\frac{d}{dy} \left( y \frac{dp_{p.o}}{dy} \right) = - \left( \frac{c}{\lambda} \right)^* y \frac{dp_{p.o}}{dy} \quad (4.14)$$

其中

$$\left( \frac{c}{\lambda} \right)^* = \left( \left( \frac{\partial \beta}{\partial S_o} \right)_p \frac{dS_o}{dy} + \left( \frac{\partial \beta}{\partial p} \right)_{S_o} \right) / \alpha$$

它实际上为通用化的压缩系数和流度之比。对单相流，它相当于压缩性和粘度的乘积；对两相凝析油气渗流，它相当于总压缩性除以总流度。

若视  $(c/\lambda)^*$  为常数，则 (4.14) 给出标准线源解

$$p_{p.o.w} = p_{p.o.i} - \frac{141.2q}{2kh} (\ln t_D + 0.80907) \quad (4.15)$$

式中  $q$  为常地面流率， $t_D = 0.0002637kt/\phi r_w^2(c/\lambda)^*$ 。

对其余两种形式的虚拟压力定义可求出类似线源解。当然  $(c/\lambda)^*$  表达式有所不同。

线源解存在一定局限性。它要求饱和度和压力可表示成 Boltzmann 变量的单值函数。数学上 Boltzmann 变换还需满足其他条件，包括无穷大地层和边界条件取 Boltzmann 变量形式等。

#### 4.2.3 定态理论及其应用

①定态理论。定态理论首先由 O'Dell et al<sup>[50]</sup> 提出，后经 Fussell<sup>[51]</sup> 修正而得到发展。Chopra et al<sup>[52]</sup> 从物质平衡方程和相平衡概念的角度对这理论进行证明。近两三年来它已成功地用于求解凝析油气渗流问题<sup>[53-56]</sup>。

考虑油、气两相， $n$  组分情形，忽略毛管力、重力、浮力和弥散影响。基本方程为

$$\nabla \cdot (\lambda_o x_i + \lambda_g y_i) \nabla p + q_i = \phi \frac{\partial M Z_i}{\partial t} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.16)$$

式中  $\lambda$  为流度比， $x_i$ 、 $y_i$  分别为第  $i$  组分的液相和气相摩尔分数， $M$  为总体烃质量，即  $M = p_o S_o + p_g S_g$ 。定态概念即指系统中各组分质量不随时间改变，由此可推出

$$\frac{k_{r.o}}{k_{r.g}} = \frac{p_g L \mu_o}{p_o V_o \mu_g} \quad (4.17)$$

其中  $L = \lambda_o / (\lambda_o + \lambda_g)$ ， $V = \lambda_g / (\lambda_o + \lambda_g)$ ，它们可直接由闪蒸 (flash) 方程算出。

在凝析油气藏中，如果  $p < p_{dew}$  (露点压力)，则地层中有凝析液析出， $L > 0$ ，由 (4.17) 知  $k_{r.o} > 0$ ，这说明在地层压力小于露点压力条件下，如果油、气两相处于平衡状态，那么油、气两相必定都是流动的。换句话说，对定态问题，凝析液饱和度出现间断，其大小强弱决定于介质的相对渗透率特性。

Jones et al<sup>[53]</sup> 指出，定态理论适用于下列两种情形：1) 边界影响起主要作用，且外边

界压力大于露点压力；2) 无限作用油藏的定压生产。在这些条件下，利用定态理论可以精确估算  $kh$ ， $\bar{p}$  和  $s$  [54]。

显然，应用定态理论需要知道相对渗透率数值。这是定态理论的另一不足之处。

②定态理论的应用。Vo et al [56] 提出将定态理论和单相渗流解结合用于求解多相渗流的方法。并针对凝析油气藏、挥发性油气藏和黑油油藏进行计算，获得令人满意的结果。

从理论上讲，这一方法主要基于以下假设：生产时间足够长；下式

$$f(\lambda_i) = 2\pi khc_1 \int_{r_w}^{\infty} \left( \lambda_i \frac{\partial p}{\partial r} \right)_i dr$$

随时间变化忽略不计； $f(\lambda_i)$  计算可采用定态理论

$$f(\lambda_i) = 2\pi khc_1 \int_{p_w}^{p_i} (\lambda_i)_{..} dp \quad (4.18)$$

上述假设在文献[53]和[56]中有详细解释和说明。需要指出的是：(4.18) 的成立取决于  $p_i - p_{dew}$  和  $p_i - p_b$  ( $p_b$  为泡点压力) 的大小。压力差越大，(4.18) 越精确。对于固定井筒压力生产

$$k\bar{k}_{r,g} = -\frac{1}{2} \frac{q_i(r_w)}{2\pi hc_1} \left/ \left[ \frac{d \ln q_i(r_w)}{d \ln t} \int_{p_w}^{p_i} \frac{p_g}{\mu_g} \left( 1 + \frac{L}{V} \right) dp \right] \right. \quad (4.19)$$

$$s = -\frac{1}{2} \left[ -\ln \left( \frac{4t_D}{e^\nu} \right) + \left( \frac{d \ln q_i(r_w)}{d \ln t} \right)^{-1} \right] \quad (4.20)$$

式中  $c_1$  为转换常数， $\nu$  为 Euler 常数， $s$  为表皮因子。

对于固定井筒产率生产

$$k\bar{k}_{r,g}(r_w) = q_i(r_w) \left/ \left[ 4\pi hc_1 \left( \frac{p_g}{\mu_g} \left( 1 + \frac{L}{V} \right) \right)_{p_w} \frac{dp_w}{d \ln t} \right] \right. \quad (4.21)$$

油相相对渗透率  $k_{r,o}$  可由定态理论 (4.17) 算出。

## 5 数值模拟

从上节可以看出，凝析油气渗流仅在一些特殊条件下才有相应的解析解，而更多的情况下解析解并不存在。因此，一般的凝析油气渗流问题唯有借助数值模拟方法加以解决。根据烃类流体性质 (PVT 数据) 计算的方法，可以将凝析油气渗流数值模拟方法划分为 4 类模型：黑油模型，改进黑油模型，组分模型和中介模型。对于具体凝析油气渗流问题，其数值模型的选择取决于油气藏的特点及其开发方案 [57,58]。

### 5.1 黑油模型

油藏工程中最常用的数值模拟莫过于黑油模型。其主要假设在于以两个“组分”代表烃类物质系统：1 个是非挥发性组分，即黑油或标准状态下的原油；另 1 个是溶解在油相和水相中的挥发性组分 (标准条件下为气体)。这假设意味着该系统至多只含 3 种组分 (油、气、水) 和 3 种相态 (油、气、水)，而且随压力的降低，分离出的气体组分构成与压力无关。

只要地层压力、温度不处于临界状态，也不出现反凝析，黑油模型就可以给出令人满意的结果。但是，大多数凝析油气渗流中，这些条件往往并不满足，因此，黑油模型对凝析油气渗流不适用。除非对它作必要的修正，否则给出的结果不可信。

## 5.2 改进黑油模型

黑油模型不能用于模拟凝析油气渗流，其根本原因在于它无法反映凝析和反凝析机理。人们试图对黑油模型进行改进，使之能够克服这一困难。

Spivak et al<sup>[69]</sup>，Banks et al<sup>[60]</sup>，Coats<sup>[42]</sup>，李允等<sup>[61]</sup>借助于考虑两拟组分的方法处理凝析油气渗流问题，这两拟组分为凝析液和仅以气相形式出现的干气。前者在标准条件下为液态，但可以在油藏条件下蒸发变成气态。气相中的这1凝析液成分和压力有关，其处理方式和黑油模型中油相气态成分相类似。

Cook et al<sup>[62]</sup>在1维数值模拟中计入组分效应，即认为所有流体的性质（包括气相中的液态成分）为注入气量的函数。正如Henry<sup>[63]</sup>指出的那样，文[62]的处理隐含平衡常数 $k$ 仅为压力函数的条件。因此这种模型对于 $k$ 值同为组分函数的情况不成立。

## 5.3 组分模型

组分模型在渗流理论研究中获得广泛应用<sup>[53-56,64-69]</sup>。它不仅能准确描述一般油气渗流问题的物理模型，而且可以反映凝析油气渗流的凝析、反凝析以及分离、溶解等重要机理。

组分模型求解的方程包括流体运动方程、各组分的质量守恒方程。此外还包括油气两相的相平衡关系、相物质平衡方程以及摩尔分数和饱和度约束关系等。利用这些方程，可以求出压力、总组分数、各相的组分数和饱和度。详细的计算方法和步骤可参见Nghiem et al<sup>[67]</sup>和Aziz<sup>[69]</sup>。

凝析油气藏中，流体通常至少包含20种组分。因此取同样组分数的完全组分模型显然是不可取的，因为这将花费相当可观的计算时间。组分数越少，所需计算时间越少。但是，组分太少的组分模型将不可避免地又面临黑油模型及改进黑油模型的困难。一般情况下，取7个左右虚拟组分即可达到精度要求<sup>[42]</sup>。

虚拟组分的个数及其组分构成的选择因人而异。一般取性质相近，在渗流过程中表现相似的组分构成同一虚拟组分。不同的虚拟组分构成对计算结果有一定影响。计算表明：将 $C_1^+$ 或 $C_2^+$ 作为1虚拟组分的组分模型将出现较大误差。对凝析油气渗流中存在凝析反凝析的情况尤其如此。Coats<sup>[42]</sup>通过计算，比较了8种不同虚拟组分构成的结果。其中3种构成将 $C_1^+$ 作为1虚拟组分，4种构成将 $C_1^+$ 分为3个虚拟组分，最后1种构成将 $C_1^+$ 分为5个虚拟组分。结果表明，为了保证足够高的计算精度，至少应该选取6个以上虚拟组分。其中甲烷为1虚拟组分， $C_1^+$ 分为3—4个虚拟组分，而 $C_2-C_6$ ， $N_2$ ， $CO_2$ 等划分为2—3个虚拟组分。Mott<sup>[64]</sup>赞同类似观点。

大多数组分模型都采用IMPES算法。Chien et al<sup>[70]</sup>，Jones et al<sup>[68]</sup>则提出并应用全稳式组分模型解法。这可以大大提高数值计算稳定性。当然，相应的代价是所需计算时间大大增加。

## 5.4 中介模型

前面讨论的黑油模型（包括改进黑油模型）和组分模型各有其局限性。黑油模型计算简单、省机时，但不能反映凝析反凝析物理机理。组分模型则相反，可以反映凝析反凝析物理机理但机时耗费太多。Chase et al<sup>[71]</sup>，Ko<sup>[72]</sup>，Lo<sup>[73]</sup>，Bolling<sup>[74]</sup>，Mott et al<sup>[75]</sup>和Tompkins et al<sup>[76]</sup>提出试图同时吸取黑油模型和组分模型有利因素的中介模型。他们或采



用组分模型但避开状态方程的求解<sup>[74]</sup>，或者采用黑油模型但考虑流体PVT特性同为压力和组分之函数<sup>[75,76]</sup>。从本质上讲，Kendall et al<sup>[77]</sup>，王瑞河<sup>[12]</sup>所用模型即属中介模型。利用中介模型，经常可以得到理想的计算结果。

## 6 研究构想

基于以上回顾，我们认为凝析油气渗流理论的研究前景应侧重于以下几个方面。

①从理论角度进行详细的凝析油气渗流机理研究。迄今为数不多的凝析油气渗流研究几乎都将问题作较大的简化，如1维、地层均质各向同性等。当然这是问题的极端复杂性所决定的。对凝析油气渗流，完整的理论研究应该考虑各种复杂因素的影响，如地层非均质性；多维渗流；地层参数随压力的变化；露点压力、组分构成、重度等随埋深变化；毛管力、重力、浮力等影响；湍流影响；物化反应过程。这些因素有的可能对流动影响不大，但有些因素可能构成严重影响。从理论上确定这些因素的影响程度，对渗流理论将是极大的完善。

②重视不同开发方案条件下凝析油气渗流的理论研究。随着石油勘探开发事业的发展，将来会有一大批新的凝析油气藏被探明并投入开采。从有效保护和充分利用资源角度出发，针对各种具体凝析油气藏，应该制定相应的合理开发方案。这除了进行最优化理论的方案设计外，不同开发方案对凝析油气渗流影响的理论研究也是非常必要的。

③结合理论研究挖掘简单可行的凝析油气渗流近似解。和其他基础学科比较，渗流理论有更广泛的应用要求，凝析油气渗流也是如此。完整精确的凝析油气渗流理论可能因为其复杂性而削弱它的实用性。实践中更受欢迎的是模型经过简化、计算简单快速的近似解。

④拓展凝析油气渗流研究的数学手段。由于凝析油气渗流理论研究尚很不深入，所应用的数学手段仍有待丰富。正像它们成功地用于解决油、气渗流问题那样，各种积分变换、变分原理、差分有限元在凝析油气渗流研究中也应有所作为。数值模拟，作为凝析油气渗流研究的重要方法，无论其应用模型，还是其数学解法，应加以完善。各相关学科在数值模拟方面的进展和成果，也应及时地反映和吸收到凝析油气渗流的研究当中。

⑤探索正确有效的凝析油气藏试井分析方法。目前这方面的理论研究工作较少，且大多是在单相气井试井分析基础上加以修正，未能正确反映凝析油气渗流试井的真实物理情况。

完成本文工作过程中，孔祥言教授给予大力支持和指导；美国Unocal公司D T Vo博士和中原油田科学情报所李德智先生惠赠研究论文，在此一并致以衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- 1 李德智. 国外石油科技水平调查: 采油技术报告. 石油情报研究所, 北京 (1987)
- 2 黄锡兴等. 天然气工业, 10, 1 (1990): 7—14
- 3 Schulte A M. SPE9235 (1980)
- 4 Behrenbruch P, et al. SPE13185 (1984)
- 5 Wheaton R J. SPE18267 (1988)
- 6 Абасов М Т. Изв АН Аз СССР, Сер Наук Землс, 1 (1984): 3—8
- 7 Джамалбеков М А. Азерб Нефт Х-во, 4 (1987): 14—17
- 8 Зоров Г А, и др. Газ Пром-сть, 2 (1984): 30—31
- 9 高宏等. 天然气工业, 7, 1 (1987): 91—96
- 10 Daltanban T S, et al. Conf. on Development of Condensate Fields, London, Sept 20—21 (1988)
- 11 Bruggeman J L, et al. *ibid*

- 12 王瑞河. 石油学报, **8**, 3 (1987) : 55—65
- 13 Wilson D C, et al. Seminar on North Sea Condensate Reservoirs & Their Development (1982) : 47—51
- 14 Matthews J D, et al. *JPT*, **40**, 8 (1988) : 1049—1056
- 15 Dake L P. 1983 OYEZ Symp. on North Sea Condensate Reservoirs & Their Development, London, May 24—25 (1983)
- 16 Clancy J P. *Petroleum Int.*, **42**, 5 (1984) : 41
- 17 —. 3rd European Meeting on IOR, Roma, Apr. 16—18 (1985)
- 18 Bleakley W B. *Petroleum Engineer*, **57**, 12 (1985) : 30
- 19 Adler AB, et al. *SPE* 12046 (1983)
- 20 钟华. 国外石油科技水平调查: 油田开发报告. 石油情报研究所, 北京 (1987)
- 21 Hagoort J, et al. *JPT*, **40**, 4 (1988) : 463—469
- 22 赵焕新. 试采技术, **4** (1985) 34—44
- 23 张树宝等. 石油钻采工艺, **6** (1985) : 49—56
- 24 Fancher G H, et al. *Ind. Eng. Chem.*, **25** (1933) : 1139—1147
- 25 Elenbaas J R, et al. *Trans. AIME*, **174** (1948) : 25—40
- 26 Cornell D, et al. *Ind. Eng. Chem.*, **45**, 10 (1953) : 2145—2152
- 27 Hubbert M. *Trans. AIME*, **207** (1956) 222—239
- 28 Houpeurt A. *Revue de L'Institut Francais du Petrole*, **14**, 11 (1959) : 1468—1484
- 29 Fayers F J, et al. *SPEJ*, **24**, 4 (1984) : 224—232
- 30 Baber L K. *SPE*17369 (1988)
- 31 Land C. *SPEJ*, **18**, 6 (1978) : 149—156
- 32 Stone H L. *JPT*, **22**, 2 (1970) : 214—218
- 33 —. *JCPT*, **12**, 4 (1973) : 52—61
- 34 Aziz K, et al. *Petroleum Reservoir Simulation*. Applied Science Publishers, London (1979)
- 35 Klins M A. Carbon Dioxide Flooding. Int. Human Resources Development Corporation (1984)
- 36 Redlich O, et al. *Chem. Review*, **44** (1949) : 233
- 37 Zudkevitch D, et al. *AIChE J.*, **16**, 1 (1970) : 112
- 38 Joffe J, et al. *ibid*, **16**, 3 (1970) : 496
- 39 Scave G. *Chem. Eng. Sci.*, **27** (1972) : 1197
- 40 Peng D Y, et al. *Ind. & Eng. Chem. Fund.*, **15** (1976) : 59
- 41 Martin J J. *ibid*, **18** (1979) : 81
- 42 Coats K H. *JPT*, **37**, 10 (1985) : 1870—1886
- 43 Баренблатт Г И. Изв АН СССР, ОН, **11** (1956)
- 44 Fetkovitch M J. *SPE*4529 (1973)
- 45 Bøe A, et al. *SPEFE*, **4**, 4 (1989) : 604—610
- 46 Raghavan R. *SPEJ*, **16**, 8 (1976) : 192—208
- 47 Bratvold R B. MS Thesis, Univ. of Tulsa, Tulsa (1984)
- 48 Scott J O. *SPE*7931 (1979)
- 49 Agarwall R G. *SPE*8279 (1979)
- 50 O'Dell H G, et al. *JPT*, **19**, 1 (1967) : 41—47
- 51 Fussell D D. *JPT*, **25**, 7 (1973) : 860—870
- 52 Chopra A K, et al. *SPEFE*, **1**, 6 (1986) : 603—608
- 53 Jones J R, et al. *ibid*, **3**, 3 (1988) : 578—594
- 54 —, et al. *ibid*, **4**, 1 (1989) : 93—104
- 55 Vo D T, et al. *ibid*, **4**, 4 (1989) : 576—584
- 56 —, et al. *SPE*18112 (1988)
- 57 Mott R E, et al. Seminar on North Sea Condensate Reservoirs & Their Development (1982) : 67—81
- 58 —, et al. Conf. on Development of Condensate Fields, London, Sept 20—21 (1988)
- 59 Spivak A, et al. *SPE*4271 (1973)
- 60 Banks D, et al. Proc. 1981 European Symp. on EOR (1973) : 441—450
- 61 李允等. 西南石油学院学报, **3** (1985) : 28—41
- 62 Cook R E, et al. *SPEJ*, **14**, 5 (1985) : 471—481
- 63 Henry R L. *JPT*, **28**, 2 (1976) : 1180—1182
- 64 Kazemi H, et al. *SPEJ*, **18**, 4 (1978) : 355—368
- 65 Fussell L T, et al. *ibid*, **19**, 2 (1979) : 211—220

- 66 Coats K H. *ibid*, 20 (1980) : 363—376  
 67 Nghiem L T, et al. *ibid*, 21 (1981) : 686—698  
 68 Young L C, et al. *ibid*, 23 (1983) : 727—742  
 69 Aziz K. Seminar on North Sea Condensate Reservoirs & Their Development (1982) : 53--64  
 70 Chien M C H, et al. SPE13385 (1985)  
 71 Chase C A Jr, et al. SPE10514 (1982)  
 72 Ko S C M. CIM paper 82—33—76 (1982)  
 73 Lo T S. SPE13518 (1985)  
 74 Bolling J D. SPE15998 (1987)  
 75 Mott R E, et al. AEE Winfrith Report R-2171 (1987)  
 76 Tompkins M W, et al. SPE17353 (1988)  
 77 Kendall R P, et al. SPE11483 (1983)

## ADVANCES IN THE RESEARCH FOR GAS-CONDENSATE FLUID FLOWS THROUGH POROUS MEDIA

Ouyang Liang-biao

Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China

**Abstract** This paper outlines the status of researches for gas-condensate fluid flows through porous media. Characteristics, well-testing and developing schemes of gas-condensate reservoirs are briefly described. Their corresponding governing equations, analytical solutions and numerical simulations are also discussed. Finally, some key research topics of gas-condensate fluid flow through porous media are proposed.

**Keywords** *gas-condensate reservoir; fluid flow through porous media; well-testing analysis; analytical solution; numerical simulation*

(上接第 276 页)

的。它也研究在自然界中这些性质出现在什么样的结构中，又是供何种功能之用。所以，生物流变学不应与生物力学或其分支（包括生物流体力学）相混淆。据 Alex Silberberg 两天前在法国的 Nancy 向我说的定义，“生物力学和生物流体力学指的是应用于生物流变系统的力学和流体力学”<sup>[38]</sup>。而生物流变学的各个领域则在生命过程这一背景之下研究生物材料的变形（包括流动）。

简要地总结一下，可以说，生物流变学这门学科作为与其他生命学科联系的链环正在相当迅速地扩展，因而对于那些至今尚未确立这种联系的许多生命学科讲来，它正变得重要起来。

生物流变学这门生命科学最终将会使我们更接近于了解生命的起源。在这一不断探索的过程中，专攻生物流变学的那些大学生将处于各生命学科的最前沿，他们将和所有人一样，怀着敬畏的心情，面对着生命的奥秘与奇迹。

**参考文献** (39篇，略)

严宗毅译自：*Biorheology*, 27, 1 (1990): 3—19. (俞稼梁 董务民校)