

# 电磁加热解除 近井地层凝析油堵塞的数学模型<sup>\*</sup>

冯金德<sup>1</sup> 蒲春生<sup>2,3</sup> 冯金城<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学·北京 2. 中国石油大学·华东 3. 西安石油大学 4. 新疆石油管理局采油工艺研究院)

冯金德等. 电磁加热解除近井地层凝析油堵塞的数学模型. 天然气工业, 2005; 25(11): 85~87

**摘要** 文章针对凝析油堵塞严重影响凝析气井产能的问题, 提出了用井下电磁感应加热技术来解除近井地层凝析油堵塞的方法, 并建立了相应的数学模型。凝析气的非等温渗流是一个涉及复杂相态变化的过程, 采用组分模型存在求解困难及计算所需参数难以获取的问题, 文章中渗流模型采用了有限组分模型, 既能模拟凝析气相态特征, 又避免了复杂的相态计算, 而且计算所需参数的获取相对容易。模型中考虑了凝析气的高速非达西渗流。用数值方法对数学模型求解, 并研制了模拟软件。

**关键词** 气井 凝析油 堵塞 电磁场 储集层加热 数学模型

## 一、引言

在凝析气井生产过程中, 当地层压力低于露点压力时, 凝析油就会大量析出并逐渐积累形成高饱和度区域, 导致气相渗透率减小, 气井产能降低, 这就是所谓的“凝析油堵塞”现象<sup>[1]</sup>。当凝析油气藏以衰竭方式开采到中后期, 地层能量已经难以将大量析出的凝析油排出井筒, 结果导致井筒严重积液<sup>[2]</sup>。凝析油堵塞和井筒积液会造成产气量大幅度下降, 甚至可使气井停喷<sup>[3]</sup>。国内外主要在循环注气、注水、排液采气、水力压裂和酸化等方面进行了大量研究与实践, 取得了较好的效果<sup>[4]</sup>, 但对于凝析油含量高、小储量、小断块、地露压差小并且以衰竭方式开发到中后期的特殊凝析气藏, 在采气增产工艺技术上没有新的突破。针对上述问题, 笔者提出了用井下电磁感应加热来解除近井地层凝析油堵塞, 从而提高凝析气井产能的方法。

## 二、数学模型

描述凝析油气渗流常用的是组分模型。鉴于经电磁加热后, 凝析油气的渗流是非常复杂的不稳定、非等温渗流过程, 如采用组分模型, 将存在模型求解困难及一些相关参数难以获取的问题, 所以本文采用有限组分模型<sup>[5]</sup>。在模型中考虑了凝析气的高速

非达西渗流。

### 1. 基本假设

假设为: ①地层均质等厚, 热力学性质各向同性; ②忽略岩石的热膨胀; ③凝析油与水的流动符合达西定律, 天然气流动为非达西渗流; ④忽略重力对渗流速度的影响; ⑤忽略由于分子扩散和热扩散引起的传热; ⑥在凝析气藏中的任意小单元中都满足热平衡和相态平衡; ⑦忽略烃类的热裂解; ⑧忽略套管与地层之间的水泥环对热传导的影响。

### 2. 物质守恒方程

对于油、气、水三组分, 允许气在油相和水相中都有溶解并允许油蒸发成气相, 油组分可在油和气相中存在, 气组分可在油、气、水三相中存在, 而水组分只存在于水相中。对每一组分有物质守恒方程。

气组分:

$$\nabla \cdot \left( \delta \frac{KK_{rg}}{B_g \mu_g} \nabla p_g + \frac{R_s KK_{ro}}{B_o \mu_o} \nabla p_o + \frac{R_{sw} KK_{rw}}{B_w \mu_w} \nabla p_w \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \phi \left( \frac{S_g}{B_g} + \frac{R_s S_o}{B_o} + \frac{R_{sw} S_w}{B_w} \right) \right] \quad (1)$$

油组分:

$$\nabla \cdot \left( \delta \frac{R_v KK_{rg}}{B_g \mu_g} \nabla p_g + \frac{KK_{ro}}{B_o \mu_o} \nabla p_o \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \phi \left( \frac{R_v S_g}{B_g} + \frac{S_o}{B_o} \right) \right] \quad (2)$$

水组分:

<sup>\*</sup> 本文由国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(No. 2001CB2091)资助。

**作者简介:** 冯金德, 1974年生, 博士研究生; 现从事油气田开发理论与系统工程研究。地址: (102249)北京市昌平区中国石油大学 251号信箱。电话: (010)89733726。E-mail: kind.f@163.com

$$\nabla \cdot \left( \frac{KK_{rw}}{B_w \mu^s} \nabla p_w \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (3)$$

式中：
$$\delta = 1 / \left( 1 + \frac{\beta_0 KK_{rg} V}{\mu^g} \right)$$

### 3. 能量守恒方程

由井下电磁感应加热的传热机理可知,地层热量的传递主要依靠热传导和热对流,在目的层中可以认为没有热源存在;同时引入能量利用率来体现热量通过盖、底层的损失<sup>[6]</sup>。最终的能量守恒方程为:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot \left[ \left( \rho C_o \frac{KK_w}{\mu} \nabla p_o + \hat{q}_k C_g \frac{KK_w}{\mu} \nabla p_g + \rho_w C_w \frac{KK_w}{\mu} \nabla p_w \right) T \right] = \frac{\partial (MT)}{\partial t} \quad (4)$$

式中：
$$M = \phi \rho_o C_o S_o + \phi \rho_g C_g S_g + \phi \rho_w C_w S_w + (1 - \phi) \rho C_r$$

### 4. 辅助方程

饱和度约束方程为:

$$S_o + S_g + S_w = 1 \quad (5)$$

毛管力方程为:

$$p^{ego} = p_g - p_o \quad (6)$$

$$p^{cow} = p_o - p_w \quad (7)$$

### 5. 状态方程

$$\begin{cases} \rho_o = \rho_o(p_o, T, C_{io}) \\ \rho_g = \rho_g(p_g, T, C_{ig}) \\ \rho_w = \rho_w(p_w, T, C_{iw}) \end{cases} \quad (8)$$

### 6. 相关参数

在渗流方程中  $R_s$  为溶解油气比,  $R_v$  为挥发油气比,是用来描述凝析气相态变化的重要参数。它们可根据定容衰竭实验(CVD)数据,用文献[7]的方法计算。经电磁加热后,凝析气为非等温渗流,  $R_s$  和  $R_v$  将受温度影响。在不同温度下重复 CVD 实验,然后用差值的方法就可得出实验温度范围内任意温度下的  $R_s$  和  $R_v$  值。其它参数的计算采用文献[8~10]方法。

## 三、数值模型

对数学模型中一阶空间导数和时间导数采用一阶向前差分展开;对二阶导数采用二阶中心差分展开;在一维径向坐标中将偏微分方程离散化。

### 1. 无产量加热模型的差分方程

$$A_1 T_{i+1}^{n+1} + (-A_1 - A_2 - A_3) T_i^{n+1} + A_2 T_{i-1}^{n+1} = -A_3 T_i^n \quad (9)$$

式中： $A_1 = \lambda_{i+1/2}^n$

$A_2 = \lambda_{i-1/2}^n$

$$A_3 = (r_{i+1}^2 - 2r_i^2 + r_{i-1}^2) M_i^n / 4\Delta t$$

### 2. 生产阶段

(1) 压力方程的差分方程

$$C p_{gi}^{n+1} + A p_{gi}^{n+1} + B p_{gi}^{n+1} = D \quad (10)$$

式中： $A = b_s a / \alpha_s + b_s a / \alpha_s + b_r + b_s$

$B = b_s a / \alpha_s + b_s a / \alpha_s + b_s + b_i$

$C = b_z + b_i + b_s a / \alpha_s + b_s a / \alpha_s$

$$D = \left( \frac{b_s a}{\alpha} + b \right) p_{gi+1}^n + \left( \frac{b_s a}{\alpha} + b \right) p_{gi-1}^n - \left( \frac{b_s a}{\alpha} + b \right) p_{gi}^n +$$

$$\left[ \frac{b_s (a + \alpha)}{\alpha} + \frac{b_s a}{\alpha} + \frac{b_s a}{\alpha} + b_s + b_i + b_s + b_r \right] p_{gi}^n +$$

$$\left[ \frac{b_s (a + \alpha)}{\alpha} + b_i + b_z \right] p_{oi}^n - \left( \frac{b_s a}{\alpha} + b \right) p_{oi-1}^n$$

$a = \alpha G_{i+1/2}^n$

$\alpha = \alpha G_{i-1/2}^n$

$\alpha_s = R_{s,i+1/2}^n O_{i+1/2}^n$

$\alpha_i = R_{s,i-1/2}^n O_{i-1/2}^n$

$\alpha = (r_{i+1}^2 - 2r_i^2 + r_{i-1}^2) \phi / 4\Delta t$

$\alpha_s = -a - \alpha - \alpha S_{gi}^n \frac{\partial b_s}{\partial p_g}$

$\alpha = -\alpha - \alpha_i - \alpha S_{oi}^n b_{oi}^n \frac{\partial R_s}{\partial p_o} - \alpha S_{oi}^n R_{si}^n \frac{\partial b_o}{\partial p_o}$

$\alpha = \alpha b_{gi}^n - \alpha b_i^n R_{si}^n$

$\alpha = -a p_{gi+1}^n + (a + \alpha) p_{gi}^n - \alpha p_{gi-1}^n -$

$\alpha p_{oi+1}^n + (\alpha + \alpha_i) p_{oi}^n - \alpha_i p_{oi-1}^n$

$b_i = O_{i+1/2}^n$

$b_z = O_{i-1/2}^n$

$b_s = \delta R_{v,i+1/2}^n G_{i+1/2}^n$

$b_i = \delta R_{v,i-1/2}^n G_{i-1/2}^n$

$b_s = (r_{i+1}^2 - 2r_i^2 + r_{i-1}^2) \phi / 4\Delta t$

$b_s = -b_i - b_z - b_s S_{oi}^n \frac{\partial b_s}{\partial p_o}$

$b_r = -b_s - b_i - b_s S_{gi}^n b_{gi}^n \frac{\partial R_v}{\partial p_g} - b_s S_{gi}^n R_{vi}^n \frac{\partial b_g}{\partial p_g}$

$b_s = b_s b_{oi}^n - b_s b_i^n R_{vi}^n$

$b_o = -b_i p_{oi+1}^n + (b_i + b_z) p_{oi}^n - b_z p_{oi-1}^n -$

$b_s p_{gi+1}^n + (b_s + b_i) p_{gi}^n - b_i p_{gi-1}^n$

(2) 饱和度差分方程

$$S_{oi}^{n+1} = S_{oi}^n + \frac{(b_i + b_s) dp_{gi+1} + (b_s + b_r) dp_{gi}}{b_s} + \frac{(b_z + b_i) dp_{gi+1} - b_z}{b_s} \quad (11)$$

(3) 能量守恒方程的差分方程

$$a T_{i+1}^{n+1} + b T_i^{n+1} + c T_{i-1}^{n+1} = d T_i^n \quad (12)$$

式中： $a = 2\lambda_{i+1/2}^n + (C_o O)_{i+1/2}^n (p_{oi+1}^{n+1} - p_{oi}^{n+1}) +$

$\delta (C_g G)_{i+1/2}^n (p_{gi+1}^{n+1} - p_{gi}^{n+1})$

$$\begin{aligned}
 b &= -2\lambda_{i-1/2}^n - 2\lambda_{i-1/2}^{n-1} + (C_o O)_{i-1/2}^n (p_{oi}^{n+1} - p_{oi}^{n+1}) - \\
 &\quad (C_o O)_{i-1/2}^n (p_{oi}^{n+1} - p_{oi}^{n+1}) + \\
 &\quad \delta(C_g G)_{i-1/2}^n (p_{gi}^{n+1} - p_{gi}^{n+1}) - \\
 &\quad \delta(C_g G)_{i-1/2}^n (p_{gi}^{n+1} - p_{gi}^{n+1}) + d \\
 c &= 2\lambda_{i-1/2}^n - (C_o O)_{i-1/2}^n (p_{oi}^{n+1} - p_{oi}^{n+1}) - \\
 &\quad \delta(C_g G)_{i-1/2}^n (p_{gi}^{n+1} - p_{gi}^{n+1}) \\
 d &= -(r_{i+1}^2 - 2r_i^2 + r_{i-1}^2)M_i^n / 2\Delta t
 \end{aligned}$$

### 四、模型求解

对差分方程组中的各项参数和系数,采用显式方法进行处理以使非线性差分方程组线性化。用 IMPES 的方法<sup>[11]</sup>解出压力和含油饱和度,再将求得的压力和饱和度值代入能量守恒方程,可以解出温度。空间节点的中间值按上游权的取值原则进行计算。计算流程图如图 1 所示。计算实例可见参考文献[12]。

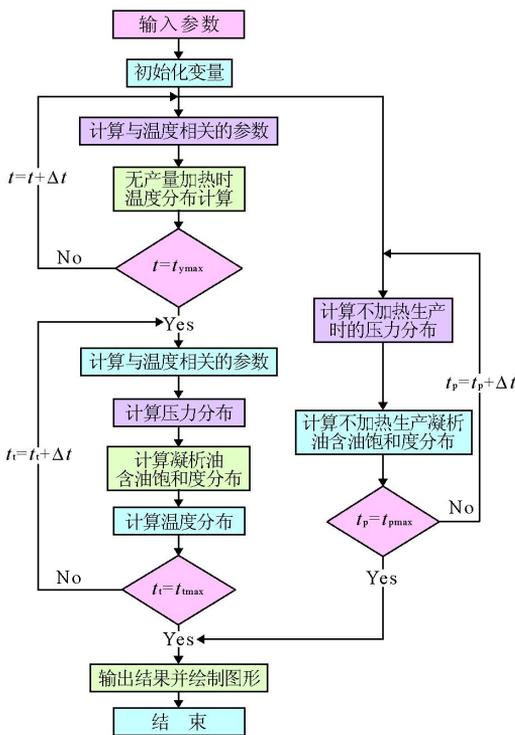


图 1 计算流程图

### 五、结 论

凝析气田衰竭式开发到后期,存在的主要问题是近井地层凝析油堵塞和井筒积液;提出用电磁加

热技术来解除近井地层凝析油堵塞,并建立了相应的数学模型;渗流模型采用有限组分模型,避免了复杂的相态计算且能较好的描述凝析气的相态特征;用数值方法对模型进行求解。

### 符 号 说 明

$\delta$ 为惯性—湍流修正系数; $\beta$ 为非达西流因子; $K$ 为气藏孔隙介质的绝对渗透率,  $m^2$ ;  $K_{ro}$ 、 $K_{rg}$ 、 $K_{rw}$ 分别为油、气、水的相对渗透率; $\mu_g$ 、 $\mu_o$ 、 $\mu_w$ 分别为气、油、水的粘度,  $Pa \cdot s$ ;  $p_g$ 、 $p_o$ 、 $p_w$ 分别为气、油、水相的压力,  $Pa$ ;  $\lambda$ 为气藏的综合导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $C_g$ 、 $C_o$ 、 $C_w$ 、 $C_r$ 分别为气、油、水和岩石的比热,  $kJ/(kg \cdot K)$ ;  $M$ 为气藏的热容量,  $kJ/(m^3 \cdot K)$ ;  $B_o$ 、 $B_g$ 、 $B_w$ 分别为油、气、水的体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $S_o$ 、 $S_g$ 、 $S_w$ 分别为含油饱和度、含气饱和度和含水饱和度。

下标:  $i = o, g, w$ 。

### 参 考 文 献

- 1 刘建仪,郭平,李士伦.反凝析污染对凝析气井伤害的实验评价研究.天然气工业;2001;21(5)
- 2 刘玉慧,袁士义等.反凝析液对产能的影响机理研究.石油勘探与开发;2001;28(1)
- 3 Bamum R S et al,金应渊等译.凝析气藏特性——由于凝析使生产能力和采收率降低.国外油田工程,1997;(4)
- 4 李士伦.我国气田、凝析气田开发技术展望.天然气工业,1997;17(1)
- 5 宋考平,宋洪才等.油藏数值模拟理论基础.北京:石油工业出版社,1996
- 6 张锐等.稠油热采技术.北京:石油工业出版社,1999
- 7 Mark P W, Brian F T. Method computes PVT properties for gas condensate. Oil & Gas Journal, 1995;31(7)
- 8 杨继盛,刘建仪.采气实用计算.北京:石油工业出版社,1994
- 9 沈平平.油层物理实验技术.北京:石油工业出版社,1995
- 10 陈月明.注蒸汽热力采油.山东东营:石油大学出版社,1996
- 11 韩大匡等.油藏数值模拟基础.北京:石油工业出版社,1993
- 12 蒲春生,冯金德,聂翠平.凝析油气井电磁加热增产影响因素研究.天然气工业,2004;24(4)

(收稿日期 2005-06-07 编辑 韩晓渝)