

# 电热油藏采油物理模拟的相似准则及其应用

王殿生<sup>1</sup>, 关继腾<sup>1</sup>, 王玉斗<sup>1</sup>, 姚 军<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学物理学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学石油工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:** 电热油藏采油是一项开采稠油的新技术。根据电热油藏采油的机理,建立了电热油藏采油过程中电流场、渗流场、温度场的数学模型;采用方程分析法和量纲分析法推导出了电热油藏采油物理模拟的相似准则数群;结合电热油藏采油的工程判断,给出了一套适用于电热油藏采油物理模拟研究的主要相似准则。应用这一套相似准则,建立了电热油藏采油的低压三维物理模型实验系统,通过物理模拟实验研究了加热电功率和油层电导率对原油采收率的影响。结果表明:原油采收率随加热电功率的增加而提高,但电功率并不是越大越好,电功率增加到 50 kW 以上时,采收率提高幅度很小;油层电导率低,输入电能有效利用率高,采收率高。

**关键词:** 相似准则; 物理模拟; 电加热; 油藏; 原油采收率; 电功率; 电导率

**中图分类号:** TE357.4

**文献标识码:** A

电磁热采是开采稠油油藏的一项新的热采技术<sup>[1]</sup>。电磁热采一般可分为二类,一类称为电阻加热,频率在 300 Hz 以下,也称为低频加热,通过电阻损耗产生热量;另一类称为感应加热,频率在 2 MHz 以上,通过介质吸收产生热量<sup>[2]</sup>。电磁热采在低频条件下电阻加热起着主导作用;在高频条件下电介质加热起着决定作用。电磁热采新技术的研究主要集中在矿场实验、室内物理模拟和数学模拟三个方面。物理模拟是根据相似原理用按比例缩小的物理模型再现油田原型中的电热油藏采油过程。物理模拟可以比较客观地反映实际发生的基本过程,通过短期的小型模拟实验,可以大量、重复地直接观察到电热油藏采油的动态过程,预测生产前景,以指导油田矿场实验和制定开采方案。为了开展电热油藏采油技术的物理模拟研究,本文根据电热油藏采油的机理,建立了电热油藏采油的数学模型,采用方程分析法和量纲分析法导出了电热油藏采油物理模拟的相似准则数群;结合工程判断,给出了一套适用于电热油藏采油物理模拟研究的主要相似准则;建立了电热油藏采油的低压三维物理模型实验系统,通过物理模拟实验研究了加热电功率和油层电导率对原油采收率的影响。

## 1 相似准则数群的推导

相似理论是研究彼此相似现象之间物理量关系的基础理论<sup>[3]</sup>。根据相似理论,彼此相似现象之间是靠一组数值上彼此相等的相似准则联系的。寻找相似准则的常用方法有方程分析法和量纲分析法等。方程分析法是在能够准确地用数学方程组和定解条件描述物理现象的情况下,根据物理方程的因次和谐性,进行推导求得相似准则数。量纲分析法不需要写出描述现象的物理方程,只需要知道现象所涉及的物理量,所导出的相似准则数群比较完整,但相似准则数的物理意义不如方程分析法得出的清楚。因此,当能够对物理现象进行比较精确的数学描述时,一般先用方程分析法得出一套相似准则数群,再用量纲分析法进行检查,补上方程分析法可能漏掉的相似准则数。

收稿日期: 2005-05-11

作者简介: 王殿生(1965-),男,黑龙江依兰人,副教授,从事物理教学和电磁场应用方面的研究。Email: dshw@mail.hdpu.edu.cn

方程分析法可分为相似转换法和积分类比法。积分类比法推导相似准则数的基本步骤为: 写出描述物理现象的数学方程和定解条件; 用方程的某一项去除其它项; 按积分类比原则整理相似准则数。

### 1.1 数学描述

对于油、水 and 气三相流油藏的电热油藏采油过程,在下面基本假设前提下,根据质量守恒定律、达西定律、能量守恒定律和电流连续性方程,可以建立描述电热油藏采油过程中传热、传质及导电规律的偏微分方程组和相应的辅助方程<sup>[4]</sup>。

#### 1.1.1 基本假设

油藏中有油、水、气三相流动;与热能相比,动能及粘滞力做功可以忽略不计;在油藏的任意小单元的体积中,达到热平衡和相平衡;忽略由于分子扩散与热扩散引起的传质传热;不考虑岩石的压缩性和热膨胀;忽略烃类的热裂解;不考虑毛管压力作用;忽略油层中激发极化等电化学现象的影响;岩石的内能是温度的线性函数;油藏内各处的残余油饱和度和束缚水饱和度是均匀的,且分别为常数;忽略束缚水和残余油的密度变化;油相、水相和气相的焓被认为是和内能相等的,并且是温度的线性函数;在低频电热油藏条件下,电磁波波长远远大于模拟系统的几何尺寸,不需要考虑工作频率的模拟问题<sup>[5]</sup>。

#### 1.1.2 数学模型

##### 1) 油藏物性方程

下面给出电热油藏采油过程中,各种状态参量和物性的依赖关系。孔隙度、渗透率及气体比焓分别为

$$\phi = \phi(x, y, z), \quad k = k(x, y, z), \quad h_g = h_g(T)$$

相对渗透率为

$$k_{ro} = k_{ro}(S_o, T), \quad k_{rw} = k_{rw}(S_w, T), \quad k_{rg} = k_{rg}(S_g, T)$$

岩石导热系数为

$$\lambda = \lambda(T), \quad c = c(T)$$

岩石和油水比热为

$$C_R = C_R(T), \quad C_c = C_c(T), \quad C_o = C_o(P, T), \quad C_w = C_w(P, T)$$

油层和盖层底层电导率为

$$\sigma_R = \sigma_R(S_w, T), \quad \sigma_c = \sigma_c(T)$$

流体密度为

$$\rho_o = \rho_o(P, T), \quad \rho_w = \rho_w(P, T), \quad \rho_g = \rho_g(P, T)$$

流体粘度为

$$\mu_o = \mu_o(P, T), \quad \mu_w = \mu_w(P, T), \quad \mu_g = \mu_g(P, T)$$

其中,下标 o, w, g 分别代表油相、水相和气相;下标 R, c 分别代表油层和盖层底层; P, T, S 分别表示油藏压力、温度和流体饱和度。

##### 2) 电流连续性方程

在低频电热油藏条件下电源频率较低,油藏中电流以传导电流为主,位移电流可以忽略不计。油藏中传导电流遵从电流连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1)$$

式中, J 为电流密度。记 E 为电场强度,  $\varphi$  为电势。因为  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$ , 所以式(1)可以表示为

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (2)$$

油藏中单位时间单位体积内所消耗的电功率即电功率密度为

$$q_e = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \quad (3)$$

电功率、加热电流及加热电压分别为

$$W_e = \int_V q_e dV, \quad I = \int_s E \cdot ds, \quad U = \int_L E \cdot dL \quad (4)$$

式中,  $q_e$  为电功率密度,  $W_e$  为电功率,  $I$  为电流,  $U$  为电压。

### 3) 质量守恒方程

由质量守恒定律可得油相、水相和气相的质量守恒方程分别为

$$\frac{\partial (\rho_o S_o \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_o \mathbf{u}_o) = 0, \quad \frac{\partial (\rho_w S_w \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}_w) = 0, \quad \frac{\partial (\rho_g S_g \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (5)$$

重力作用下达西定律为

$$\mathbf{u}_o = - (kk_{ro}/\mu_o) (\nabla P - \rho_o \mathbf{g}), \quad \mathbf{u}_w = - (kk_{rw}/\mu_w) (\nabla P - \rho_w \mathbf{g}), \quad \mathbf{u}_g = - (kk_{rg}/\mu_g) (\nabla P - \rho_g \mathbf{g}) \quad (6)$$

式中, 矢量  $\mathbf{u}_o, \mathbf{u}_w, \mathbf{u}_g$  为流体流动速度; 矢量  $\mathbf{g}$  为重力加速度。

### 4) 油层能量守恒方程

在电加热油层过程中认为电能全部转化为热能, 能量守恒方程为

$$-\nabla \cdot \mathbf{u}_e + q_e = \frac{\partial U_e}{\partial t} \quad (7)$$

式中,  $U_e$  为单位体积的内能;  $q_e$  为单位时间单位体积内输入的电能即加电功率密度; 矢量  $\mathbf{u}_e$  为能量流动速度, 物理意义为各流动相导热与对流热流之和, 即

$$\mathbf{u}_e = -\rho \nabla T + \rho_o e_o \mathbf{u}_o + \rho_w e_w \mathbf{u}_w + \rho_g e_g \mathbf{u}_g \quad (8)$$

式中,  $e_o, e_w, e_g$  为单位质量流体的内能, 油层单位体积的内能  $U_e$  为

$$U_e = \phi (S_o \rho_o C_o T + S_w \rho_w C_w T + S_g \rho_g h_g) + (1 - \phi) \rho R C_R T \quad (9)$$

式中,  $T = (T - T_0)$ ,  $T_0$  为初始油藏温度;  $\rho$  为油层密度。因此, 油层能量守恒方程可以表示为

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot (\rho \nabla T) - \nabla \cdot (\rho_o \mathbf{u}_o C_o T + \rho_w \mathbf{u}_w C_w T) - \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}_g h_g) + \rho R E^2 \\ & = [(1 - \phi) \rho R C_R + \phi (S_o \rho_o C_o + S_w \rho_w C_w)] \frac{\partial T}{\partial t} + \phi \frac{\partial (S_g \rho_g h_g)}{\partial t} \end{aligned} \quad (10)$$

### 5) 盖层底层中能量守恒方程

考虑盖层、底层的能量损失。由于盖层底层中没有流体的流动, 只有热传导项, 能量守恒方程为

$$\nabla \cdot (\rho_c \nabla T) + \rho_c E^2 = \frac{\partial (\rho_c C_c T)}{\partial t} \quad (11)$$

式中,  $\rho_c, c_c$  分别为盖层底层的岩石密度和导热系数。

### 6) 饱和度方程

油层中有油、水、气三相流动, 饱和度方程可表示为

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad (12)$$

## 1.1.3 定解条件

求解上述偏微分方程组所需要的定解条件包括边界条件和初始条件。

### 1) 边界条件

#### (1) 质量流量边界条件

边界上质量流量为 0, 即

$$\rho_o \mathbf{u}_{on} / lb = 0, \quad \rho_w \mathbf{u}_{wn} / lb = 0, \quad \rho_g \mathbf{u}_{gn} / lb = 0; \quad \rho_o \mathbf{u}_{on} / ub = 0, \quad \rho_w \mathbf{u}_{wn} / ub = 0, \quad \rho_g \mathbf{u}_{gn} / ub = 0 \quad (13)$$

式中,  $lb$  表示侧边界,  $ub$  表示上下边界,  $n$  表示垂直于边界的流线方向。产出井质量流量为

$$Q_o = D \int_0^H (\rho_o \mathbf{u}_o) \frac{dz}{\cos \theta}, \quad Q_{wg} = D \int_0^H (\rho_w \mathbf{u}_w + \rho_g \mathbf{u}_g) \frac{dz}{\cos \theta} \quad (14)$$

式中,  $D$  为井径,  $H$  为油层平均厚度,  $\theta$  为地层倾角。

#### (2) 热传导及电场边界边界条件

侧边界上的热传导为 0, 即

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{lb} = 0 \quad (15)$$

盖层底层与油层之间连续传热且电流连续,即有

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_R^{ub} = \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_c^{ub}, \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_R^{ub} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_c^{ub} \quad (16)$$

加热电极电压恒定,其它边界认为无电流流过,即

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_b = 0 \quad (17)$$

## 2) 初始条件

当  $t = t_0$  时,  $P = P_0$ ,  $T = T_0$ ,  $S_o = S_o(x, y, z, t_0)$ ,  $S_w = S_w(x, y, z, t_0)$ ,  $S_g = 0$ ,  $Q_o = 0$ 。

## 1.2 方程归一化

为了便于推导和改善相对渗透率的模拟,采用归一化的饱和度和归一化的相对渗透率,重新写出上述有关方程。

### 1) 归一化饱和度

记  $S_{or}$ ,  $S_{wc}$  分别为剩余油饱和度和束缚水饱和度,令  $S = 1 - S_{or} - S_{wc}$ , 则归一化饱和度为

$$\bar{S}_o = (S_o - S_{or}) / S, \quad \bar{S}_w = (S_w - S_{wc}) / S, \quad \bar{S}_g = S_g / S \quad (18)$$

式中,  $\bar{S}_o$ ,  $\bar{S}_w$ ,  $\bar{S}_g$  分别为归一化含油、含水和含气饱和度。

### 2) 归一化渗透率

归一化渗透率为

$$\bar{k}_{ro} = k_{ro} / k_{rocw}, \quad \bar{k}_{rw} = k_{rw} / k_{rwo}, \quad \bar{k}_{rg} = k_{rg} / k_{rgR} \quad (19)$$

式中,  $\bar{k}_{ro}$ ,  $\bar{k}_{rw}$ ,  $\bar{k}_{rg}$  为归一化油、水、气相对渗透率;  $k_{rocw}$  为束缚水饱和度下油相相对渗透率;  $k_{rwo}$  为残余油饱和度下水相相对渗透率;  $k_{rgR}$  为束缚水和残余油饱和度下气相相对渗透率。

### 3) 归一化流体连续性方程

在假设油藏中各处残余油饱和度和束缚水饱和度为常数的条件下,由式(5)和式(18),归一化流体连续性方程可以表示为

$$(\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_o)}{\partial t} + \nabla \cdot (u_o) = 0 \quad (20)$$

$$(\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (u_w) + (\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (u_g) = 0 \quad (21)$$

### 4) 归一化作用下达西定律

由式(6)和式(19),归一化重力作用下达西定律可以表示为

$$\begin{aligned} u_o &= - \mu_o^{-1} k(k_{rocw} \bar{k}_{ro}) (\nabla P - \rho_o g) \\ u_w &= - \mu_w^{-1} k(k_{rwo} \bar{k}_{rw}) (\nabla P - \rho_w g) \\ u_g &= - \mu_g^{-1} k(k_{rgR} \bar{k}_{rg}) (\nabla P - \rho_g g) \end{aligned} \quad (22)$$

### 5) 归一化能量守恒方程

由式(10)和式(18),归一化能量守恒方程可以表示为

$$\begin{aligned} [(1 - \phi) C_R + \phi(S_{or} \rho_o C_o + S_{wc} \rho_w C_w)] \frac{\partial T}{\partial t} + (\phi S) (\bar{S}_o \rho_o C_o + \bar{S}_w \rho_w C_w) \frac{\partial T}{\partial t} + \\ (\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_g \rho_g h_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_o C_o T u_o + \rho_w C_w T u_w) + \nabla \cdot (\rho_g h_g u_g) - R \nabla^2 T - R E^2 = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

### 6) 归一化饱和度方程

由式(12)和式(18),归一化饱和度方程可以表示为

$$\bar{S}_o + \bar{S}_w + \bar{S}_g = 1 \quad (24)$$

## 1.3 推导过程

以式(21)为例说明用方程分析法推导相似准则数的过程。由式(21)有

$$\begin{aligned} \frac{\nabla \cdot (u_w)}{(\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_w)}{\partial t}} &= \frac{\frac{\partial (u_w x)}{\partial x}}{(\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_w)}{\partial t}} = \frac{u_w t}{\phi S \bar{S}_w x}, \quad \frac{(\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_g)}{\partial t}}{(\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_w)}{\partial t}} = \frac{\bar{S}_g}{\bar{S}_w} \\ \frac{\nabla \cdot (u_g)}{(\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_w)}{\partial t}} &= \frac{\frac{\partial (u_g x)}{\partial x}}{(\phi S) \frac{\partial (\bar{S}_w)}{\partial t}} = \frac{u_g t}{\phi S \bar{S}_w x}, \quad \frac{\nabla \cdot (u_w)}{\nabla \cdot (u_w)} = \frac{u_w}{u_w} \end{aligned}$$

分别可得相似准则数

$$1 = u_w t / (\phi S \bar{S}_w L), \quad 2 = {}_g \bar{S}_g / ({}_w \bar{S}_w), \quad 3 = {}_g u_g t / (\phi S {}_w \bar{S}_w L), \quad 4 = {}_g u_g / ({}_w u_w)$$

同理由式(22)、式(23)、式(16)、式(14)、式(11)及式(4)可得相似准则数

$$\begin{aligned} 5 &= u_o t / (\phi S \bar{S}_o L), & 6 &= P k \bar{k}_{ro} / (\mu_o u_o L), & 7 &= {}_o g k \bar{k}_{ro} / (\mu_o u_o), & 12 &= \bar{k}_{ro}, & 13 &= \bar{k}_{rw} \\ 8 &= P k \bar{k}_{rw} / (\mu_w u_w L), & 9 &= {}_w g k \bar{k}_{rw} / (\mu_w u_w), & 10 &= {}_g g k \bar{k}_{rg} / ({}_g g k \bar{k}_{rg}), & 14 &= \bar{k}_{rg} \\ 11 &= P k \bar{k}_{rg} / (\mu_g u_g L), & 15 &= {}_o C_o / ({}_R C_R), & 16 &= {}_w C_w / ({}_R C_R), & 24 &= \bar{S}_o, & 25 &= \bar{S}_w \\ 17 &= {}_o C_o \phi S / ({}_R C_R), & 18 &= \phi S {}_g \bar{S}_g h_g / ({}_R C_R T), & 19 &= {}_o C_o u_o t / ({}_R C_R L), & 29 &= c / {}_R \\ 20 &= {}_w C_w u_w t / ({}_R C_R L), & 21 &= {}_g u_g h_g t / ({}_R C_R L T), & 22 &= R t / ({}_R C_R L^2), & 27 &= c t / ({}_c C_c L^2) \\ 23 &= {}_R E^2 t / ({}_R C_R T), & 26 &= \bar{S}_g, & 28 &= {}_c E^2 t / ({}_c C_c T), & 31 &= L^2 {}_o u_o / Q_o, & 32 &= L^2 {}_w u_w / Q_w \\ 30 &= c / {}_R, & 33 &= L^2 {}_g u_g / Q_w, & 34 &= W_e / (E^2 L^3), & 35 &= U / (EL), & 36 &= I / (EL^3) \end{aligned}$$

### 1.4 相似准则数群

由方程分析法共得出 36 个相似准则数,经检查发现,有些相似准则数不是独立的,如  $9 = \frac{10}{2} 4$  应删掉;有些相似准则数可以用比较简单的形式来代替。经过分析和整理,可得到下列 31 个相似准则数:

$$\begin{aligned} 1 &= u_o t / (\phi S L), & 2 &= u_w / u_o, & 3 &= u_g / u_o, & 4 &= P k / (\mu_o u_o L), & 5 &= {}_o k g / (\mu_o u_o) \\ 6 &= \mu_w / \mu_o, & 7 &= \mu_g / \mu_o, & 8 &= {}_o / {}_w, & 9 &= {}_g / {}_w, & 10 &= \phi S, & 11 &= \bar{k}_{ro}, & 12 &= \bar{k}_{rw} \\ 14 &= {}_o C_o / ({}_R C_R), & 15 &= {}_w C_w / ({}_R C_R), & 16 &= {}_c C_c / ({}_R C_R), & 17 &= R t / ({}_R C_R L^2 \phi S) \\ 18 &= \bar{S}_o, & 19 &= \bar{S}_w, & 20 &= \bar{S}_g, & 21 &= E^2 t / ({}_R C_R T), & 22 &= c / {}_R, & 23 &= c / {}_R \\ 24 &= L^2 {}_o u_o / Q_o, & 25 &= Q_w / Q_o, & 26 &= C_o / C_R, & 27 &= C_c / C_R, & 28 &= W_e / ({}_R T L) \\ 13 &= \bar{k}_{rg}, & 29 &= U^2 {}_R / ({}_R T), & 30 &= I^2 / ({}_R R T L^2), & 31 &= \phi S {}_g h_g / ({}_R C_R T) \end{aligned}$$

根据电热油藏采油的数学描述可知,共有 39 个变量,具体为  $u_o, u_w, u_g, {}_o, {}_w, {}_g, {}_R, c, \mu_o, \mu_w, \mu_g, C_o, C_w, C_R, C_c, h_g, {}_R, c, P, k, g, L, T, t, \phi, S_o, S_w, S_g, k_{ro}, k_{rw}, k_{rg}, {}_R, c, E, W_e, U, I, Q_o, Q_w$ 。这些变量包括 5 个基本量纲。由相似理论 定理,应有  $39 - 5 = 34$  个相似准则数,说明在方程分析法中漏掉了 3 个相似准则数。由量纲分析法可得漏掉的 3 个相似准则数为

$$32 = C T / u^2, \quad 33 = P / (u^2), \quad 34 = k / L^2$$

上述 34 个相似准则数构成模拟电热油藏采油过程的完成相似准则数群。

## 2 相似准则的确定

根据相似理论,物理模型与原型相似的基本要求是满足相似三定理,由此导出比例模型和油田现场原型要满足几何相似、流体与岩石物性参数相似、模型与原型具有相似的初始条件和边界条件。但由于油藏和生产的复杂性,在物理模型中要完全按比例模化全部推导出来的相似准则是做不到的。因此,物理模拟的关键是具体分析所研究油藏的问题,抓住主要矛盾,确定并在模拟中实现那些起着主导和决定作用的相似准则数,忽略次要的相似准则数,在一定程度上比较真实地反映流体的渗流规律、能量的传递规律和电流的传导规律。

### 2.1 特征量的选择

选择特征量的目的是为了模型到原型的比例改变时系统不发生变化<sup>[6]</sup>。在大多数情况下,选择特征量的依据是在所关心的范围内能给出最好的物性拟合。对于电阻加热油藏开采稠油的情况,主要目的是:加热油层,油层中最高温度应不高于油藏压力下地层水的汽化温度,避免因加热电极周围地带水分蒸发而导致电阻加热不能进行的情况发生。对于稠油油藏,产液量中含水量很低,产水量始终不是主要部分。因此,根据电阻加热油藏采油的工程实际,各个特征量的选取如表 1 所示。

表 1 特征量的选取

序号	物理量	特征量	符号	序号	物理量	特征量	符号
1	孔隙度	油层孔隙度	$\phi$	10	热容量	油层岩石热容量	$R C_R$
2	时间	到首次开始加热的时间	$t$	11	比热	油的比热	$C_o$
3	饱和度	加热开始时可动油饱和度	$S = 1 - S_{or} - S_{wc}$	12	导热系数	油层导热系数	$R$
4	长度	油层的有效厚度	$L$	13	电导率	油层电导率	$R$
5	渗透率	油层绝对渗透率	$k$	14	温度	最高温度与最低温度之差	$T = T_{max} - T_{min}$
6	压力	最大生产压差	$P = P_{max} - P_{min}$	15	电压	开始加热时的电压	$U$
7	密度	油的密度	$\rho$	16	电流	开始加热时的电流	$I$
8	粘度	油的动力粘度	$\mu_o$	17	产液流量	油的流量	$Q$
9	加速度	重力加速度	$g$				

注：最高温度小于油藏压力下地层水的汽化温度；最低温度为油藏初始温度。

## 2.2 相似准则的确定

在保证重要的因素和机理相似的前提下,结合电热油藏采油工程上的判断<sup>[1,2,5]</sup>,按照简化处理原则,对上述 34 个相似准则数重新整理,归纳与选择出 5 个主要的相似准则作为电热油藏采油按比例物理模拟的相似准则,其物理意义及所模拟的物理量见表 2 所示。

表 2 按比例物理模拟主要相似准则

序号	相似准则	物理意义	模拟参数	来源
1	$\frac{P}{\rho g L}$	压力与重力之比	$\frac{P_M}{P} = \left( \frac{L_M}{L} \right) \left( \frac{\rho_M}{\rho} \right) \left( \frac{g_M}{g} \right)$	4/ 5
2	$\frac{g t}{\phi S R C_R L^2}$	传导热量与油层岩石储存热量之比	$\frac{t_M}{t} = \left( \frac{\phi_M S_M}{\phi S} \right) \left( \frac{L_M}{L} \right)^2 \left( \frac{R_M C_{RM}}{R C_R} \right) \left( \frac{R}{R_M} \right)$	17
3	$\frac{\rho k g t}{\phi S \mu_o L}$	用 $\phi$ 和 $S$ 修正的达西定律	$\frac{k_M}{k} = \left( \frac{\phi_M S_M}{\phi S} \right) \left( \frac{L_M}{L} \right) \left( \frac{\mu_M}{\mu_o} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_M} \right) \left( \frac{t}{t_M} \right)$	1 5
4	$\frac{W_e t}{R C_R T L^3}$	电热能量与油藏储存热能之比	$\frac{W_{eM}}{W_e} = \sqrt{\left( \frac{R_M C_{RM}}{R C_R} \right) \left( \frac{T_M}{T} \right) \left( \frac{L_M}{L} \right)^3 \left( \frac{t}{t_M} \right)}$	10 17 28
5	$\frac{Q t}{\rho \phi S L^3}$	产油量与可采储量之比	$\frac{Q_M}{Q} = \left( \frac{L_M}{L} \right)^3 \left( \frac{\rho_M}{\rho} \right) \left( \frac{\phi_M S_M}{\phi S} \right) \left( \frac{t}{t_M} \right)$	1/ 24

量纲分析法中得出的相似准则数  $k/L^2$  在物理模型中不能做到,而且与方程分析法得出的  $Pk/(\mu_o \rho_o L)$  相矛盾。 $P/(\rho_o u^2)$  和  $TC/u^2$  含有  $u^2$  项,表示惯性力,一般在稠油油藏渗流中不考虑惯性力的影响<sup>[7]</sup>。因此,由量纲分析法得出的 3 个相似准则在物理模型实验中不模拟。

由于模型的绝对渗透率通常很大,原型稠油油层岩石一般为疏松的石砾岩,毛细管力与粘滞力或重力相比微不足道;电阻加热开采稠油过程中含水量很低,产量是以产油量为主,完全匹配油水相对渗透率曲线是没有必要的,相对渗透率曲线的匹配,可以用归一化饱和度对相对渗透率曲线端点的匹配来放松对整条曲线的匹配<sup>[8]</sup>。因此,在这一套相似准则中没有考虑毛细管力和相对渗透率。其他一些现象,如原油蒸馏、油水就地乳化、流体和多孔介质的热膨胀与可压缩性等也不在这一套相似准则的考虑之中。

## 3 物理模拟实验

根据上述电热油藏采油物理模拟的相似理论,建立了低压三维物理模型实验系统,研究了物理模拟实验方法,采用辽河油田第一口电热油藏采油的现场试验井(冷 43-56-665 井)的相关数据作为原型数据,利用表 2 中的一套相似准则实现油田现场原型与物理模型之间主要参量的相互换算,结合工程实际判断和实验条件,采取一些折中方法调整各参量之间的比例,将油田现场原型近似地按比例缩小到实验室物理模型。通过物理模拟实验,研究了在边加热边采油生产方式下加热电功率和油层电导率对采收率影响。

有关原型参数与模型参数之间的按比例模化、物理模型的设计、实验系统的组成、实验方法等方面的具体内容请参阅参考文献[9]和[10]。

### 3.1 电加热功率对采收率的影响

在边加热边采油生产方式下,加热油藏的电功率分别为 20, 38, 52, 105 kW, 连续生产 1 598 d 后,不同电功率对应的原油采收率如图 1 所示。由实验结果可知,随着加热电功率的增加,原油采收率提高,但增加的幅度越来越小。当电功率增加到约 50 kW 以上时,再增加电功率,采收率提高幅度很小。这表明,当电功率增加到一定程度以后,输入电能利用率随着加热电功率的增加而降低。

### 3.2 油层电导率对采收率的影响

在边加热边采油生产方式下,油层电导率和盖层电导率之比分别约为 1/10 和 1/5 的原油采收率如图 2 所示。从实验结果可以看出,油层电导率高,原油采收率低。这是由于低频电加热是以电阻加热为主,油层电导率高,油层消耗的电能少,输入电能的有效利用率低,原油采收率低。

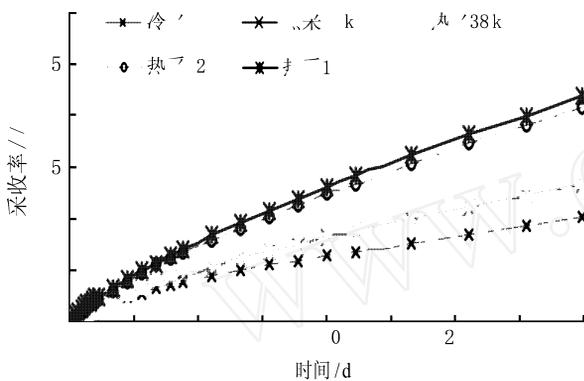


图1 不同电加热功率 油的 收率

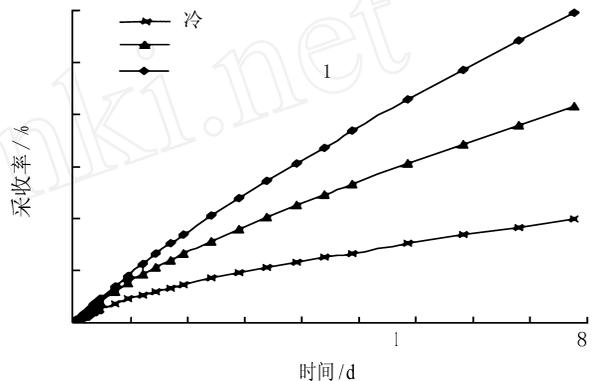


图2 由层电导率对电加热 由 收率的影响

## 4 结论

1) 根据描述电热油藏采油的数学方程,采用方程分析法,结合电热油藏采油的工程实际判断,确定出了一套适用于电热油藏采油物理模拟的相似准则。应用这一套相似准则可以实现电热油藏采油现场原型和物理模型主要参量之间的相互换算,开展近似的按比例物理模拟实验研究。

2) 在边加热边采油生产方式下,原油采收率随加热电功率的增加而提高,但并不是电功率越大越好。采收率的提高与输入电能利用率有个最佳经济平衡关系,加热电功率的选择有一个最佳的取值范围。

3) 稠油油藏电加热采油可以提高采收率一倍以上。油层电导率低,输入电能利用率高,原油采收率高,加热效果好。

### 参考文献:

- [1] Islam M R, Chakma A. A New Recovery Technique for Heavy Oil Reservoirs with Bottomwater[J]. SPE Res Eng (SPE 20258), 1992, 7(2): 180-186.
- [2] Vinsome P K W, Mc Gee B C W, Vermeulen F E, et al. Electrical Heating[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1994, 33(9): 29-35.
- [3] 葛家理,周得华,同登科. 复杂渗流系统的应用与实验流体力学[M]. 山东东营:石油大学出版社,1998.
- [4] 王殿生,关继腾,王玉斗. 单井电阻加热采油技术研究[J]. 石油大学学报,1998: 22(4): 54-58.
- [5] Hepler L G, Chu Hsi. AOSTRA 油砂、沥青、重质油技术手册[M]. 梁文杰,等译. 山东东营:石油大学出版社,1992: 333-371.
- [6] Stegemeier G L, Volek C W, Laumbach D D. Representing Steam Processes with Vacuum Models[J]. SPE Journal (SPE 6787), 1980(2): 151-174.

- [7] 王利群,周惠中,徐元辉,等.油藏蒸汽驱比例物理模拟相似准则[C]//新技术研究与应用论文集.北京:原子能出版社,1988:108-127.
- [8] 周惠中,徐元辉,王利群,等.克拉玛依油田东二区蒸汽驱物理模拟试验[C]//新技术研究与应用论文集.北京:原子能出版社,1991:96-107.
- [9] 王殿生,陈月明,关继腾.电加热油藏采油物理模拟研究[J].石油大学学报,2001,25(2):54-58.
- [10] 王殿生,关继腾,王玉斗,等.用物理模型研究单井电热油藏的温度分布[J].青岛大学学报(工程技术版),2003,18(4):36-40.

## Theory and Application of the Scaling Laws for Physical Modeling on Oil Recovery from Reservoirs with Electrical Resistance Heating

WANG Dian-sheng<sup>1</sup>, GUAN Ji-teng<sup>1</sup>, WANG Yu-dou<sup>1</sup>, YAO Jun<sup>2</sup>

(1. College of Physical Science and Technology, China Petroleum of University, Dongying 257061, China;

2. College of Petroleum Engineering, China Petroleum of University, Dongying 257061, China)

**Abstract:** Electrical resistance heating (ERH) is a new thermal stimulation technique for recovering heavy oil reservoirs. The mathematical model for analyzing ERH patterns was developed on the basis of the mechanism of oil recovery from reservoirs with electrical resistance heating. The scaling groups for physical modeling studies on oil recovery with ERH technique are derived with equational analysis and dimensional analysis on this mathematical model, and a set of main scaling parameters was inferred based on the engineering judgment. A 3-dimensional physical model in low-pressure situation was built with the set of main scaling parameters. The effects of the electric power heating reservoirs and the electric conductivity of oil rock on the oil recovery with ERH technique were studied by using the physical modeling experiments. The experimental results show: the higher the heating electric power is, the higher the value of oil recovery factor is. Whereas the electric power has little effects on the oil recovery, it is above 50 kW. When the electric conductivity of reservoir is low, the power supplied to the reservoir is utilized efficiently, and the value of oil recovery factor from the reservoirs with electrical heating is also high.

**Key words:** scaling laws; physical modeling; electrical heating; oil reservoirs; oil recovery factor; electric power; electric conductivity