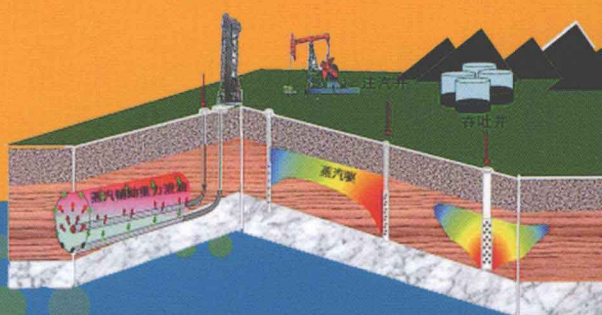


蒸汽驱 动态预测方法和 优化技术

刘喜林 范英才 刘永建 著



ZHENGQIQU
DONGTAI YUCE FANGFA HE
YOUHUA JISHU



石油工业出版社

蒸汽驱动态预测方法 和优化技术

刘喜林 范英才 刘永建 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书依据蒸汽驱开采稠油的基本原理,系统地介绍了蒸汽驱新理论和生产动态预测及分析方法;将蒸汽驱新理论和粒子群智能算法相结合,提供了数值模拟新方法和计算机软件,给出了国内外油田应用实例。本书介绍的理论、方法和软件进一步完善了蒸汽驱动态预测、优化和调整技术。

本书可供从事油藏注蒸汽采油工艺以及稠油热采的工程技术人员、研究人员和石油院校有关师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

蒸汽驱动态预测方法和优化技术 / 刘喜林, 范英才, 刘永建著.
北京: 石油工业出版社, 2012.8

ISBN 978-7-5021-9152-8

I. 蒸…

II. ①刘…②范…③刘…

III. 蒸汽驱-稠油开采

IV. TE357.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 142995 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64251362 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 8.5

字数: 216 千字

定价: 40.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

为了实现蒸汽驱油田的合理开发和对生产的科学管理,必须对蒸汽驱动态和生产能力进行实时预测、分析、优化和及时调整。虽然可以用数值模拟的方法进行预测和指导,但这种方法所需采集的信息量大、输入的数据多、计算复杂且耗时较长,成本较高;现有的解析解虽然快捷,但其考虑因素少,假设条件多,精确度低,仅具有估算价值。因此,研发既有相当高的精确性又避免数值模拟方法复杂性的蒸汽驱油藏动态预测方法、研制便于现场应用的计算机软件和优化蒸汽驱技术参数,对于改善蒸汽驱效果、大幅度提高石油采收率具有重大意义和应用价值。

本书依据物质守恒和能量守恒原理,结合蒸汽驱油藏内油、气、水及温度分布规律,建立了严格的积分形式的质量平衡方程和能量平衡方程,所建方程为定量分析蒸汽驱动态的时变性和复杂性奠定了理论基础并提供了解题思路。

本书提出了蒸汽超覆与蒸汽前缘推进两种情况下相互转换的等效及拟等效位置定义和计算方法,建立了蒸汽驱地质物理模型,解决了应用 Van Lookeren 理论处理动力学不稳定问题的相容性问题,为定量分析蒸汽驱蒸汽超覆及前缘推进现象提供了依据。

本书建立了由前缘推进模型(FAPM)和蒸汽超覆模型(SOPM)构成的蒸汽驱动态预测理论模型(SFPM)。SFPM模型可用于蒸汽驱油藏筛选、蒸汽驱实施方案设计、敏感性参数分析和生产动态实时预测与调整。SFPM模型是优化蒸汽驱技术参数的目标函数。

本书提出了基于粒子群算法的蒸汽驱动态优化与调整方法。结果表明:(1)粒子群优化方案显著增加了每个月累计油汽比值,提高了石油采收率;(2)采用粒子群算法优化注汽方案,可使齐40块蒸汽驱保持120个月累计油汽比大于0.15,明显改善了蒸汽驱效果;(3)应用粒子群优化方案进行蒸汽驱,可使累计油汽比曲线下降缓慢,明显延长高效生产期。本书开发的蒸汽驱理论模型、优化和调整系统及其软件的预测结果符合油田生产实际,具有重要的应用价值。

本书的研究工作得到了中华人民共和国科学技术部、中国石油勘探开发研究院及中国石油辽河油田公司大力支持,得到了国家科技重大专项课题“提高稠油蒸汽驱效率技术”(课题编号2008ZX05012-001,2011ZX05012-003)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目“热采油藏内稠油胶质沥青质水热降解机理及反应动力学研究”(项目编号200802200001)及国家自然科学基金项目“稠油井下改质降黏机理及开采新技术基础研究”(No.21046002)的经费支持,博士生倪红梅参与完成了书中计算机软件的研制工作,在此一并表示真挚的谢意!

由于著者学识有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请专家和广大读者批评指正。

目 录

绪 论	1
第一节 蒸汽驱动态预测方法研究进展	1
第二节 本书的主要内容	6
第一章 基本方程	7
第一节 质量平衡方程	7
第二节 能量平衡方程	8
第三节 初始和边界条件	9
第四节 本章小结	10
第二章 蒸汽驱动态预测理论模型 (SFPM) 的建立	11
第一节 蒸汽驱预测理论模型 (SFPM) 概要	11
第二节 前缘推进模型 (FAPM)	12
第三节 蒸汽超覆模型 (SOPM)	40
第四节 面积扫油效率	62
第五节 井眼 (筒) 热损失	67
第六节 井的限制条件	69
第七节 时间步长尺寸选择	70
第八节 本书理论计算值与油田实际值的对比	71
第九节 本章小结	74
第三章 蒸汽驱动态智能优化与调整系统	77
第一节 蒸汽驱动态优化与调整系统功能和特点	77
第二节 蒸汽驱动态优化与调整系统安装及运行	79
第三节 蒸汽驱动态优化与调整系统使用说明	81
第四节 基于粒子群算法的智能蒸汽驱动态优化与调整技术研究	116
第五节 本章小结	124
附录 单位换算表	125
参考文献	130

绪 论

在注蒸汽热力采油工程中，蒸汽吞吐几个周期以后，地层压力将会下降，井底附近的含水饱和度增加，产油量逐渐下降。因此，依靠蒸汽吞吐增加最终采收率是有限的（蒸汽吞吐采收率一般为 15% ~ 20%），故必须适时地转入蒸汽驱，蒸汽驱示意图见图 1 所示。当转入蒸汽驱以后，如何实现蒸汽驱油田的合理开发和稠油油藏蒸汽驱的科学管理，以油藏描述为基础、生产动态分析为主线及跟踪数值模拟为手段，油藏地质、注采工艺、现场管理三方面协调统一，不断优化调整蒸汽驱技术，是当前面临的重要课题。因此，本书在认真分析蒸汽驱解析理论和数值分析方法优势及存在问题的基础上，紧密结合蒸汽驱工程实际，开发和研究较简单的预测方法，对于完善热采数值模拟技术、实时进行蒸汽驱动态优化和方案调整以便指导蒸汽驱高效运行，具有重要意义。

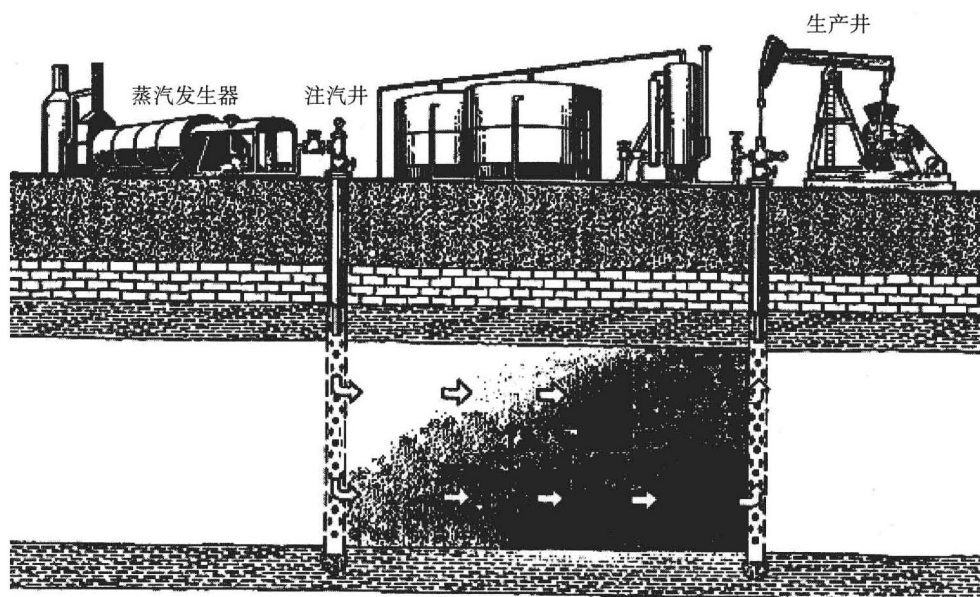


图 1 蒸汽驱示意图

第一节 蒸汽驱动态预测方法研究进展

蒸汽驱理论研究工作先驱是 Lauwerier^[1]。1955 年，他第一次研究了由于注入热流体引起油藏内热传递的问题。Lauwerier 分析了由于热量向邻层散失而导致的沿流动方向温度的下降现象。在合理假设条件下，他推导出了油藏内和相邻地层中的温度分布函数。

Marx 和 Langeheim^[2] 在 1959 年提出了一个模型，他们的这一模型是注蒸汽热力采油理论发展进程中的一座里程碑。Marx 和 Langeheim 理论可以用来估算热侵速率、累积加热

区和以恒定的速率向理想化的油藏中稳定注入热量的理论经济极限。他们假设注入的热量被地层保持在一个恒温蒸汽带内，然后靠热传导向上覆和下伏地层散失，蒸汽前缘没有热量流动。这一模型适用于厚地层、高蒸汽干度、低压和高蒸汽注入速率工况。Ramey^[3]在1959年扩展了Marx-Langeheim的研究成果，其理论贡献是由原来恒定注汽速率发展为允许可变注汽速率。

Willman^[4]等人在1961年提出了一个方程来估算恒定注汽速率的加热半径 R_h ：

$$R_h^2 = \frac{14.6 i_{st} L_{vdh}}{K_h (T_s - T_R)} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left\{ \frac{\sqrt{t}}{2} - \frac{h_n}{8} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \frac{(\rho c_p)_t}{(\rho c_p)_{ob}} \ln \left[\frac{4}{h_n} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \frac{(\rho c_p)_{ob}}{(\rho c_p)_t} \sqrt{t+1} \right] \right\} \quad (1)$$

式中 i_{st} ——蒸汽注入速度，bbl/d；

L_{vdh} ——水的汽化潜热，Btu/lb；

K_h ——导热系数，Btu/(h·ft·°F)；

T_s ——蒸汽温度，°F；

T_R ——原始油层温度，°F；

α ——油藏热扩散系数，ft²/d；

t ——注蒸汽时间，d；

h_n ——油层的净厚度，ft；

$(\rho c_p)_t$ ——油层上覆岩层的体积热容，Btu/(ft³·°F)；

$(\rho c_p)_{ob}$ ——油层下伏岩层的体积热容，Btu/(ft³·°F)。

他们还预测了径向流油藏中恒定蒸汽体积流量所需的蒸汽注入速率 i_{st} ：

$$i_{st} = \frac{\pi R_h^2 (T_s - T_R)}{14.6 t L_{vdh}} \left[h_n (\rho c_p)_t + 4 K_h \sqrt{\frac{t}{\pi \alpha}} \right] \quad (2)$$

式中 R_h ——注入蒸汽的加热半径，ft。

本模型的概念、假设和限制与Marx和Langeheim的模型相似。

以上介绍的各位学者专家的研究成果是假设油藏中温度分布为阶梯函数，直接将蒸汽驱油藏分为热区和冷区两个部分。这一概念一直延续到1969年才由Mandl-Volek^[5]等人的研究所突破，Mandl-Volek提出的物理模型创新之处是考虑了蒸汽驱油藏的蒸汽带和冷区之间的热交换，引入了“临界时间”概念，并指出不能忽略蒸汽前缘对流的热传导作用。临界时间以前，使用与Marx和Langeheim相同的方程；临界时间以后计算蒸汽体积的方程变为：

$$V_s = \frac{q_{inj} h_n^2 (\rho c)_t \alpha}{4 K_h^2 T_s} \left[\left(e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} + 2 \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right) - \sqrt{\frac{t_D - t_{CD}}{\pi}} \left(\frac{1}{1 + F_{hD}} + \frac{t_D - t_{CD} - 3}{3} e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} - \frac{t_D - t_{CD}}{3 \sqrt{\pi t_D}} \right) \right] \quad (3)$$

其中：

$$F_{\text{hD}} = \frac{f_{\text{sdh}} L_{\text{vdh}}}{c_w T_s} \quad (4)$$

$$t_D = \frac{4K_h (\rho c)_{\text{ob}} t}{h_n^2 (\rho c)_t} \quad (5)$$

式中 V_s ——注入蒸汽的体积, bbl;
 q_{inj} ——注入热量速度, Btu/d;
 c_w ——水的比热容, Btu/(lb·°F);
 f_{sdh} ——井底蒸汽干度;
 其他符号意义同前。

解如下关系式可确定恒定注入速率下的无因次临界时间 (t_{CD})、温度和蒸汽干度:

$$e^{t_{\text{CD}}} \operatorname{erfc} \sqrt{t_{\text{CD}}} = \left(1 + \frac{f_{\text{sdh}} L_{\text{vdh}}}{c_w T_s} \right)^{-1} \quad (6)$$

1978年, Myhill 和 Stegemeier^[6] 在 Mandl-Volek 理论上, 经过进一步研究, 建立了蒸汽驱前缘驱替理论体系, 得到了业界认同。

Neuman^[7] 在 1975 年及 1985 年发表了一个蒸汽驱的重力超覆模型, 推动了蒸汽驱理论研究的日臻完善。研究中 Neuman 创造了许多新概念新公式。

(1) 蒸汽带厚度 (h_{st}) 和面积 (A):

蒸汽带厚度为:

$$h_{\text{st}} = \frac{4K_h c_w (T_s - T_R)}{M_s L_{\text{vdh}}} \sqrt{\frac{t - \tau}{\pi \alpha}} \quad (7)$$

式中 $t - \tau$ ——第一次加热后到 T_s 的时间, d;
 M_s ——蒸汽带的体积热容, Btu/(ft³·°F)。

蒸汽带面积为:

$$A = \frac{f_{\text{sdh}} (1 - f_p) i_{\text{st}} \rho_w L_{\text{vdh}}}{K_h (T_s - T_R)} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \quad (8)$$

式中 f_{sdh} ——井下蒸汽干度;
 f_p ——被产出的注入蒸汽的分数。

(2) 从蒸汽带中驱出的原油体积 (V_o):

$$V_o = \frac{(1 + f_b) f (S_{\text{oi}} - S_{\text{ors}}) f_{\text{sdh}} (1 - f_p) i_{\text{st}} \rho_w c_w t}{M_s} \quad (9)$$

式中 S_{oi} ——原始含油饱和度;
 S_{ors} ——蒸汽带内残余油饱和度;
 f ——油层孔隙度;

其中, $f_b = F \left(\frac{T^* - T_R}{T_s - T_R} \right)$, 由 Neuman 图表得到。

(3) 注入速率的降低率 (i_m) 和维持蒸汽带体积不变的井下蒸汽干度。通过求解下面方程来确定:

$$i_m f_{dm} (1 - f_{pm}) = i_b f_{db} (1 - f_{pb}) \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t^*}{1 - t^*} \right) \quad (10)$$

式中 i, i_{st} ——注蒸汽速率, bbl/d;

下标 b 和 m——分别表示热量降低前和后;

t^* ——注汽量下调开始时间。

(4) 停止注蒸汽后的额外驱替原油 V_{OT} 。

由如下公式给出:

$$V_{OT} = \frac{[2(T_{s1} - T_R) - (T_{s2} - T_R)] V_o}{T_{s1} - T_R} \quad (11)$$

其中, V_o 是用时间 t^* 从式 (9) 中算出的原油产量, 下标 “1” 和 “2” 指停止注蒸汽前后的情况。Neuman 没有提出一种方法来估算式 (8) 和式 (10) 中被产出的注入蒸汽的分数 (f_p)。因此, 此值为可调节参数。

另一项著名的关于蒸汽超覆研究由 Van Lookeren^[8] 完成, 并在 1977 年发表了文章。Van Lookeren 分析了汽—液界面形状, 提出可利用界面形状系数 A_{RD} 优化地面注蒸汽速率, 提出一个方程来估算蒸汽带的平均厚度 h_{st} :

$$h_{st} = 0.5 h_r A_{RD} \quad (12)$$

蒸汽驱理论研究成果促进了蒸汽驱动态预测方法的形成, 至此, 形成了两类预测蒸汽驱效果的模型: (1) 前缘推进模型: 用水平前缘驱替来模拟蒸汽驱机理。假设蒸汽带水平发展, 超出驱替前缘的蒸汽指进趋势被冷凝机理所抑制。(2) 垂向驱替或重力超覆模型: 重力超覆模型假设蒸汽带传播的主要方向为垂直向下 (图 2)。

Rhee 和 Doscher^[9] 在 1980 年也提出蒸汽带扩张的主要方向为垂直向下。基于这一方法, 他们建立了一个半解析的预测模型。模型包括 Marx 和 Langeheim 及 Van Lookeren 所提出的一些概念。此模型中, 加热区体积和形状的计算严格遵循热量平衡, 体积和组成的计算近似遵循焓平衡及物质平衡。尽管这一模型显示出与现有实验数据良好的一致性, 但是由于复杂的蒸馏机理和所采用的流体流动模型, 使得它的应用并不容易。

Gomma^[10] 在 1980 年使用三维蒸汽驱数值模拟结果研究出来一套以油藏特征和作业条件为函数的预测蒸汽驱原油采收率和原油与蒸汽比的新方法。Gomma 的方法还包括了孔隙度、油层净总厚度比、砂岩厚度、原始含油饱和度及蒸汽驱后残余油饱和度的影响。然而, 由于在关系式的建立过程中基于有限范围的油田数据, 使得这一方法有一些缺点。因此, Gomma 建议他的方法只应用于这样的油藏, 即其性质要相似于加利福尼亚 Kern River 油田的油藏。

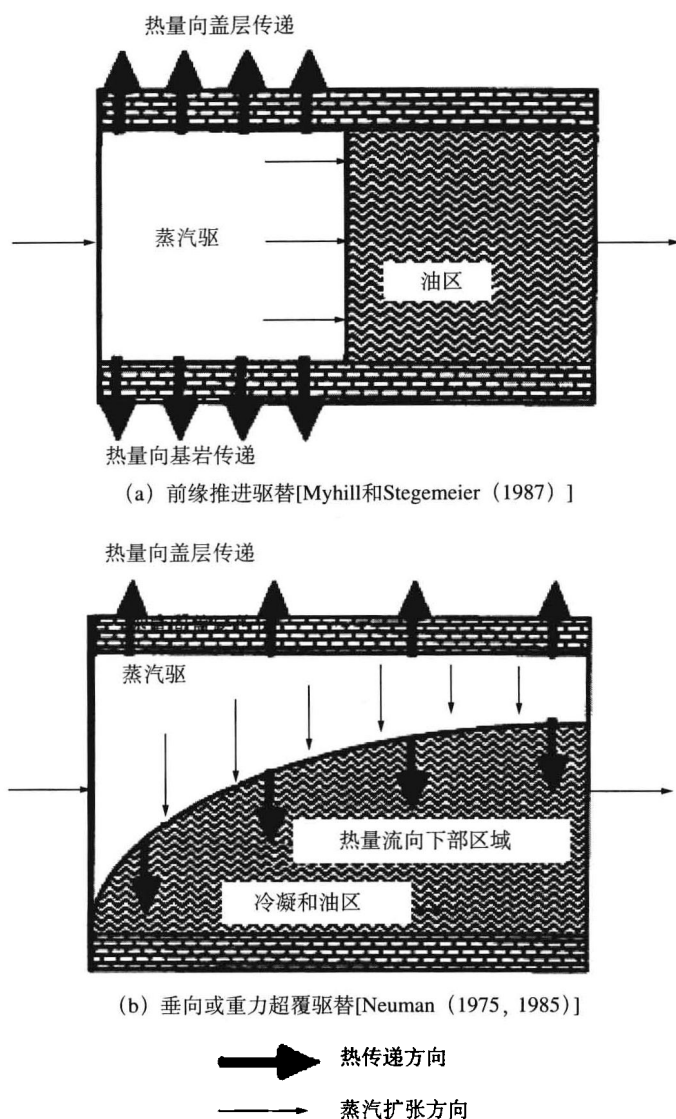


图2 蒸汽驱的机理分布示意图

Jones^[11] 在 1981 年建立了一个简化的预测模型，其建模基础是 Van Lookeren 为寻求最优注汽速率而做的计算和 Myhill 与 Stegemeier 计算原油产率之模型的改进。Jones 模型包含了基于现场情况的经验可调参数，依赖这些可调参数，Jones 模型才能被用来模拟一定蒸汽注入速率下原油的生产史。

一个简化的重力超覆模型由 Farouq Ali^[12] 在 1982 年建立，它通过从总注入热量中减去蒸汽带的含热量以及分成两部分考虑覆盖层超覆，从而确定了未波及区的平均温度。Farouq Ali 认为他们开发的理论模型更有可能应用于稠油而不是轻油。

Doscher 和 Ghassemi^[13] 在 1983 年提出的蒸汽驱工艺包含两部分：一是在含油带和超覆系统间的界面加热原油，二是气压驱动（汽提）热原油。Doscher 和 Ghassemi 建立的模型指出了采油对于油层厚度的不敏感性，尤其是在工程方案的早期阶段更是如此。他们的结果也表明原油黏度下降，原油与蒸汽之比上升。

不像先前的模型, Vogel^[14] 在 1984 年提出, 蒸汽带不断膨胀不会激发原油产量增加, 但可以认为原油开采是通过“蒸汽阻力”辅助的重力泄油进行的。他指出了基于不断膨胀蒸汽带的能量平衡所建立的预测模型存在明显不足。对于主要为超覆的蒸汽带, 热平衡计算需要同时考虑产生的蒸汽和进入油层的蒸汽。Vogel 提出地下总的热量需求等于蒸汽带的热量加上加热油藏上覆岩层及下伏岩层损失的热量:

$$Q_{\text{total}} = Ah_n(\rho c)_s(T_s - T_R) + 2K_1 A(T_s - T_R) \sqrt{\frac{t_{\text{inj}}}{\pi \alpha_1}} + 2K_2 A(T_s - T_R) \sqrt{\frac{t_{\text{inj}}}{\pi \alpha_2}} \quad (13)$$

式中 Q_{total} ——总的注入热量, Btu;

A ——蒸汽加热面积, ft²;

K_1, K_2 ——油层的上覆岩层和下伏岩层的导热系数, Btu/(h·ft·°F);

α_1, α_2 ——油层的上覆岩层和下伏岩层的热扩散系数, ft²/d;

t ——注蒸汽时间, d;

T_s ——蒸汽温度, °F;

T_R ——原始油层温度, °F。

其中, 下标“1”指上覆区域, 下标“2”指下伏区域。他建议最优蒸汽注入速率应基于 Q_{total} 来计算。Vogel 强调蒸汽驱中, 最佳方案是初期以较高速率注蒸汽, 然后降低注汽速率以对应减少的垂向热损失; 蒸汽突破后, 产油量与注汽速率高低关系不明显。

Leung 和 Miller^[15] (1986) 提出了一个简单的水平油藏蒸汽驱重力超覆模型。此模型基于 Vogel 的观察, 通过传导加热蒸汽带以下的原油增加了原油产率。此模型对一些油田的数据显示出了很好的历史拟合效果。需要指出的一点是, Leung 和 Miller 的模型只有在知道原始采油速率精确值的情况下, 才能准确决定有关经验参数, 这时模型才能预测采油量。

1983 年, Pope 和 Aydelotte^[16] 根据成功蒸汽驱的经验, 认真分析了蒸汽驱油藏的温度场、压力场及饱和度场分布特点, 提出了预测蒸汽驱动态的新方法。新方法最引人注目之处是 Pope-Aydelotte 提出的蒸汽驱模型把蒸汽驱油藏分为 4 个区 (蒸汽区、热流体区、原油富集区、原始油藏区), 物理模式更加明确。纵观蒸汽驱理论的发展历程可以看出, 物理模型由简单地把蒸汽驱油藏分为两区发展到分为 4 区, 进而发展到考虑蒸汽超覆。预测方法由半经验模型发展到解析模型, 解析模型也由前缘驱替模型发展到蒸汽超覆模型。尽管还有众多学者及工程技术人员提出了独具特色的蒸汽驱理论模型^[17~23], 但本书认为 Pope 和 Aydelotte 理论是目前采用解析方法预测蒸汽驱动态的最好模型。

第二节 本书的主要内容

本书主要内容包括: (1) 建立了包括驱替前缘在内的、严格分析与地层倾角有关的蒸汽超覆影响的整体质量守恒和能量守恒方程。(2) 本书认为蒸汽驱温度场具有时变性, 地下温度是个变量, 而前人理论则认为蒸汽驱温度分布是常量, 显然这是不符合实际。(3) 论述了基于粒子群算法的蒸汽驱动态智能优化和调整技术方法, 进一步完善了蒸汽驱技术。

第一章 基本方程

本书依据物质守恒和能量守恒原理提出蒸汽驱动态预测方法。物质守恒方程和能量守恒方程（也可称为质量和能量平衡方程）是定量研究蒸汽驱问题的理论基础。

第一节 质量平衡方程

推导质量平衡方程及后续将讨论的能量平衡方程采用的几何图形如图 1-1 所示。

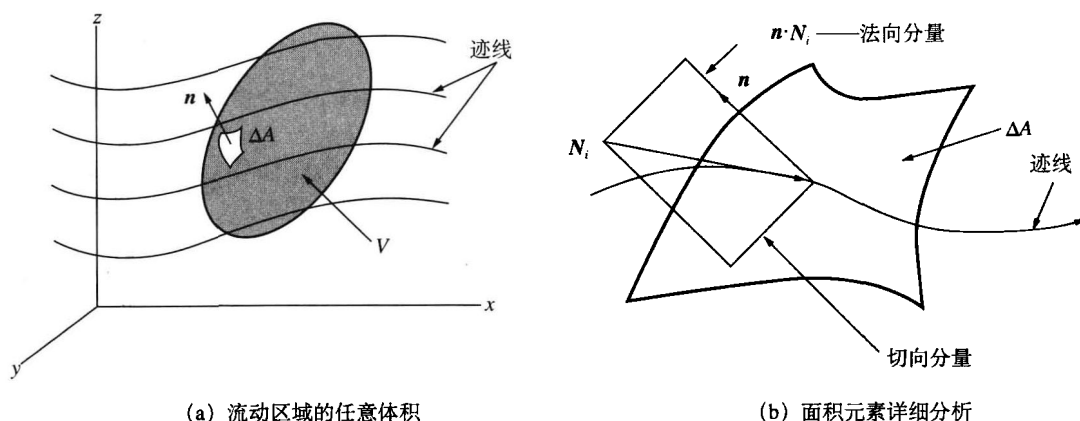


图 1-1 推导平衡方程的几何图形

今设想可渗透介质中所包含的一个随机而确定的体积 V 中有某一任意数目的物质从其中流过。这里令 $i=1, \dots, N_c$, 为物质的各组分, $j=1, \dots, N_p$, 为物质的各相。如图 1-1 所示, V 的表面积规定由各基元表面积 ΔA 所构成, 从 ΔA 的中心以单位向外的法线矢量 n 标出, 所有这些基元的表面 ΔA 之和就是体积 V 的总表面积。所以, 各基元表面积之和就是最大的 ΔA 趋于零时的面积积分。

在体积 V 中, 具有 i 组分的某物质平衡方程是:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{在 } V \text{ 中的} \\ \text{积聚速率} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} i \text{ 被输送入} \\ V \text{ 的速率} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} i \text{ 从 } V \text{ 中流出} \\ \text{来的速率} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{在 } V \text{ 中产} \\ \text{生的速率} \end{array} \right\}, \quad i=1, \dots, N_c \quad (1-1)$$

这个方程是以速率形式表达的平衡方程。式 (1-1) 右边的前两项可写成:

$$\left\{ \begin{array}{l} i \text{ 被输送入} \\ V \text{ 的速率} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} i \text{ 从 } V \text{ 中流} \\ \text{出来的速率} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{已输送入 } V \text{ 的} \\ i \text{ 的净速率} \end{array} \right\}, \quad i=1, \dots, N_c \quad (1-2)$$

根据这种表达方式, 式 (1-1) 和式 (1-2) 中的各项可分别视为积聚项、净流入量项

和源项。下面试图为这些项写出具体数学表达式。

i 组分的积聚项是：

$$\left\{ \begin{array}{l} i \text{ 在 } V \text{ 中的} \\ \text{积聚速率} \end{array} \right\} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \begin{array}{l} i \text{ 在 } V \text{ 中} \\ \text{的总质量} \end{array} \right\} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_V W_i dV \right\} \quad (1-3)$$

式中的 W_i 是在单位体积中以 i 的质量单位表示的 i 的总浓度。这一积分表示出在 V 中的各无穷小体积单元按其总浓度加权后的和。由于 V 是固定不变的，所以有：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_V W_i dV \right\} = \int_V \frac{\partial W_i}{\partial t} dV \quad (1-4)$$

净流入量项也可以从图 1-1 所示的单个面积单元所通过的输送速率而得。令 i 组分的流量矢量为 N_i ，其为每单位表面积及每单位时间内所通过 i 组分的质量。 N_i 可以容易地分解成法向的分量和切向的分量。然而，只有法向分量 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i$ 流过 ΔA ，其穿过 ΔA 的流量是：

$$\left\{ \text{穿过 } \Delta A \text{ 的 } i \text{ 的输送速率} \right\} = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i \Delta A \quad (1-5)$$

式中出现负号是因为 $\mathbf{n}$ 和 $\mathbf{N}_i$ 可以是反向输送入 ΔA ($\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i < 0$)，那么从式 (1-1) 看出，该项必须是正的。将无穷小的表面单元加在一起，即得：

$$\left\{ \text{输送入 } V \text{ 中的净速率} \right\} = - \int_A \mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i dA \quad (1-6)$$

因为面积积分是对 V 的整个表面积分，无论是流入 V 或从 V 中流出均已包括在式 (1-6) 中。

i 在体积 V 中的净生产速率为：

$$\left\{ i \text{ 在 } V \text{ 中的净生产速率} \right\} = - \int_V R_i dV \quad (1-7)$$

式中 R_i 是每单位体积及每单位时间所产生的 i 的质量单位数。该项即可考虑到在 V 中因一个或较多的化学反应，或者是某些物理源产生 i 物质 ($R_i > 0$) 数量或使 i 消灭的数量 ($R_i < 0$)。

整理上述诸式，可得任一物质的 i 组分的质量守恒方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_V W_i dV \right\} + \int_A \mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i dA = \int_V R_i dV, \quad i=1, \dots, N_c \quad (1-8)$$

第二节 能量平衡方程

蒸汽驱工程涉及的能量平衡方程，可称为热能平衡方程，可以通过热力学第一定律描述的一般性能量平衡方程中减去机械能项得到。

能量平衡方程或热力学第一定律可表述为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{能量在 } V \text{ 中} \\ \text{积聚速率} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{能量输入} \\ V \text{ 中的静速率} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{在 } V \text{ 中产生} \\ \text{能量的速率} \end{array} \right\} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 中的 V 是如图 1-1 所示的任意体积。

今忽略动能和势能的影响, 再将式 (1-9) 与式 (1-1) 两者进行对比, 采用与研究质量平衡方程类似的方法, 可推导得能量平衡方程式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_V U dV \right\} + \int_A \mathbf{n} \cdot \mathbf{L} dA + \int_A \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_T dA = 0 \quad (1-10)$$

式中 U ——总内能;

L ——焓流量矢量;

q_T ——以 Fourier 定律给出的传导热通量。

如果用 $\dot{H}_p$ 和 $\dot{H}_i$ 代表从 V 中产出焓的速率和向 V 中注入焓的速率, $\dot{Q} = \int_A \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_T dA$ 表示井筒的热耗和油藏的上覆岩层及下伏岩层的热损失, 则蒸汽驱能量平衡方程也可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_V U dV \right\} = \dot{H}_i - \dot{H}_p - \dot{Q} \quad (1-11)$$

第三节 初始和边界条件

求解非等温条件下质量、能量平衡方程的初始条件为:

$$W_i = W_i(\mathbf{x}, 0)$$

$$p = p(\mathbf{x}, 0)$$

$$T = T(\mathbf{x}, 0)$$

或者:

$$U = U(\mathbf{x}, 0)$$

式中, p 、 T 及 U 分别为压力、温度和内能。

边界条件是根据 3 种边界类型给出的, 这 3 种边界类型是: 内流边界 $\partial\Omega_1$ 、外流边界 $\partial\Omega_0$ 、无流边界 $\partial\Omega_n$ 。

$\partial\Omega_1$:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = \sigma_i(t)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{L} = \sigma(t)$$

$\partial\Omega_0$:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{K}_{ij} \cdot \nabla x_{ij}) = 0$$

$$p_j = p_k \quad k \neq j$$

$$p = p_1(t)$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla T = 0$$

$$\partial\Omega_n:$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0$$

$$\left[\mathbf{n} \cdot \nabla \cdot (K_T \nabla T)\right] \partial\Omega_n^- = \left[\mathbf{n} \cdot \nabla \cdot (K_T \nabla T)\right] \partial\Omega_n^+$$

第四节 本章小结

针对蒸汽驱问题的实际，本章推导了积分形式的质量和能量平衡方程，这些方程是定量研究蒸汽驱问题的理论基础。

第二章 蒸汽驱动态预测理论 模型 (SFPM) 的建立

第一节 蒸汽驱预测理论模型 (SFPM) 概要

依据质量守恒和能量守恒原理, 考虑蒸汽超覆现象, 本书在建立蒸汽驱预测理论模型 (Steam Flood Predictive Model, SFPM) 时, 把蒸汽驱油藏划分为 4 个区, 即蒸汽区 (4 区)、热流体区 (3 区)、原油富集区 (2 区) 和原始油藏区 (1 区), 针对每个区建立地质物理模型; 在此基础上, 再根据每个区的性质分别建立两类物理模型, 即前缘推进模型 (Frontal-advance Predictive Model, FAPM) 和蒸汽超覆模型 (Steam-overlay Predictive Model, SOPM)。通过各区超覆前缘等价位置的转换, 以质量平衡方程和能量平衡方程为基础, 求解各区中油、汽、水饱和度, 温度以及各区的等价位置, 从而计算出油、汽、水产量以及采收率和油气比等参数。同时, 应用达西定律计算出各区之间的汽液流速和压差, 实现注汽压力及注汽速率等技术参数的优化和调整, 据此来预测蒸汽驱动态并指导采油生产。

本书建立的蒸汽驱预测理论模型 (SFPM) 将微观驱油效率、垂向扫油效率和面积扫油效率结合起来计算原油采收率, 式 (2-1) 表达了蒸汽驱预测理论 (SFPM) 的基本概念:

$$N_p = E_A E_v E_D S_{oi} V_p / B_o \quad (2-1)$$

式中 N_p ——原油采收率;
 E_A ——面积扫油效率;
 E_v ——垂向扫油效率;
 E_D ——微观驱油效率;
 S_{oi} ——初始含油饱和度;
 V_p ——总孔隙体积, ft^3 ;
 B_o ——原油地下体积系数。

E_D 可采用经典的一维模型做近似计算, 即应用 Buckley-Leverett 理论或者广义分相流理论解决等温流动条件下的简单问题。但是, 无论如何, 建立在水驱基础上的经典理论不能精确地计算出蒸汽驱的驱替效率 E_D 。

在等温流动条件下, 可以求得在两种极端条件下的 E_v 解析解, 这两种极端条件分别是存在垂向平衡或者是不存在垂向连通的情况。在非等温条件时计算 E_v 可以采用与等温时类似的方法。

对于特定的井网, 利用已发表的经验关联公式, 可以获得计算 E_A 的方法, 得到 E_A 的值。但是, 到目前为止, 能够被蒸汽驱工程使用的 E_A 关联式很少, 并且可用关联式的限定

条件也较多。工程可接受的一种替代的办法是：应用适用于水驱的 E_A 公式将其中的常规流度比换成等效流度比即可。

本书建立的理论模型 (SFPM)，将 E_A 和 E_D 合并考虑后用拟驱替效率 E_D 表示，因此 E_A 和 E_D 在计算时并不显示出来。另外，还开发了一个描述 E_D 的一维模型，这个一维模型就是后续部分要论述的蒸汽驱油藏中蒸汽前缘推进模型 (FAPM)。

蒸汽驱工程实践表明，蒸汽超覆是明显的，蒸汽超覆虽然有利于强化注入能力，但其严重降低 E_v 。本书建立蒸汽超覆模型 (SOPM) 可以用来分析超覆机理和确定敏感参数，直接产生 E_D 功用。SOPM 是蒸汽驱预测理论模型 (SFPM) 的重要组成部分。

在进行具体预测研究时，本书引进了粒子群优化算法，依据群体智能理论优化蒸汽驱技术参数；另外，本书还提出了新的简化方法将拟驱替效率与面积扫油效率相结合，完成相应的数值计算。但应该说明，这里建立的 SFPM 理论限定在五点法井网情况，对于其他类型的井网，需要将此理论略微改造再使用。

第二节 前缘推进模型 (FAPM)

一、地质物理模型的建立

大量的研究及生产资料表明，在蒸汽驱过程中，由于蒸汽的密度低、黏度低，重力分离作用使其在油层中上浮舌进，形成所谓的蒸汽超覆，造成汽液分区；此外，蒸汽驱的凝结和热对流作用使蒸汽驱下游出现热流体区（热水或热油）；蒸汽的驱动作用使受热区下游的流体聚集形成原油富集区；随着蒸汽的不断注入，蒸汽带不断向前移动驱替油层中的原油，这样便使生产井中有原油连续不断地产出。因此，像 Aydelotte 和 Pope 那样将蒸汽驱油藏分为 4 个区域来分析是符合实际的。本书在建立蒸汽驱预测理论模型时采用了 Aydelotte 和 Pope 的分区思路，将蒸汽驱油藏分为 4 个区，如图 2-1 所示。1 区、2 区、3 区及 4 区分别为原始油藏区、原油富集区、热流体区及蒸汽区。这 4 个区域被波动的前缘分隔开，波动前缘垂直于流动方向。

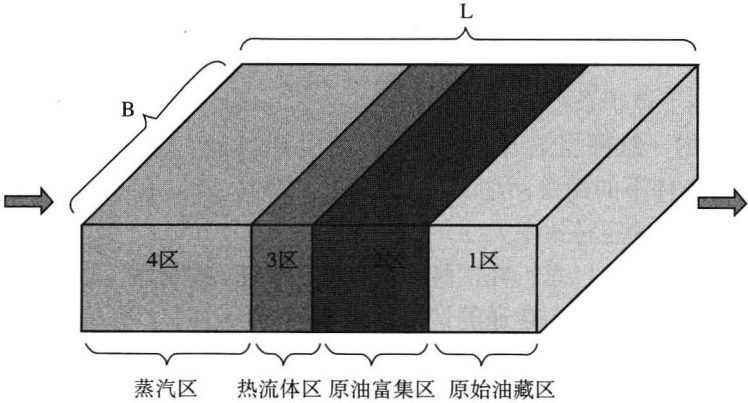


图 2-1 蒸汽驱地质物理模型示意图