

油藏多孔介质热质传递“三箱”分析模型研究¹⁾

王志国^{*,†,2)} 张雷[†] 张文福^{*,†} 贾永英^{*,†} 尹柴玲[†]

^{*}(黑龙江省防灾减灾及防护工程重点实验室, 大庆 163318)

[†](东北石油大学土木建筑工程学院, 大庆 163318)

摘要 油藏多孔介质孔隙组成及结构变化多样, 一些特性参数很难全部获得, 精确描述和分析困难; 另外, 多孔介质内渗流过程水力条件和作用机理复杂, 存在热流固耦合作用, 目前的一些分析方法和研究模型具有一定的局限性. 提出了油藏多孔介质的表征单元体 (representative elementary volume, REV) 描述表征方法; 基于表征单元体建立了多孔介质的黑箱模型、灰箱模型和白箱模型, 据此提出了多孔介质的“黑箱 → 灰箱 → 白箱”分析过程. 基于黑箱模型和灰箱模型推导了 REV 导热系数计算公式、给出了 REV 热质传递过程的热平衡方程. 结合中国油藏热采情况, 对多孔介质导热系数变化规律和蒸汽驱热质传递特性进行了分析, 得到了一些有意义的结果. 该工作为多孔介质热质传递过程分析提供了新思路和新方法.

关键词 表征单元体, “三箱”分析模型, 油藏多孔介质, 导热系数, 热质传递

中图分类号: TE357.44 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-13-379

引言

稠油油藏在中国油气资源所占有很大比重, 约占五分之一, 但稠油产量仅占油气总产量的 10% 左右, 如何提高稠油油藏的采收率是中国油气开采过程面临的主要问题之一^[1-2]. 稠油油藏具有“三高”(高黏度、高凝点和高含蜡)等特点, 一般来说常规开采手段难以采出. 热力采油是目前国内外稠油开采过程所采用的最为行之有效的方法. 在热采过程中, 随着热流体的注入和油气的采出, 油藏多孔介质内部的应力场和温度场等重新分布, 导致油藏多孔介质的物性参数发生变化. 孔隙度和渗透率等的变化会对油藏孔隙内的油气渗流产生影响, 存在着热流固耦合作用.

目前, 国内外一些学者对多孔介质热流固耦合作用进行了有效地研究. Hart 等^[3]提出了三场耦合作用机制; Jing 等^[4]描述了核废料贮库围岩(裂隙岩体)中的热-液-力耦合过程. 姜昌伟等^[5]研究了多孔介质内热磁对流耦合作用; 盛金昌^[6]给出多孔岩体介质的流固热三场全耦合数学模型; 黄涛等^[7]对等效性能场之间耦合作用机理进行了研究; 刘泽佳

等^[8]提出了非饱和和多孔介质内热流固耦合的混合元法. 对于油藏热流耦合问题, Class 等^[9-10]对油藏多孔介质多相和非等温渗流问题进行了数值模拟; Lewis 等^[11]研究了温度变化对油藏渗流过程的影响; 王志国等^[12]提出了稠油油藏的注热开采的两箱模型, 对热采过程进行了初步分析.

国内外学者对多孔介质内热流固耦合作用进行了有效研究, 得到诸多有意义的结果, 但由于多孔介质组成具有很强的不确定性, 作用机理复杂、影响因素众多, 很多问题尚待研究^[13]. 仅就稠油热采过程而言, 如何对油藏多孔介质内结构进行定量描述, 分析流体流动、传热传质与孔隙结构关系就需要深入研究.

针对油藏多孔介质存在一些不确定信息和不确定因素等难于量化问题, 本文提出了基于表征单元体的油藏多孔介质“三箱”分析模型; 基于黑箱和灰箱分析模型, 给出了多孔介质内导热系数的计算公式; 提出了油藏表征单元体的综合传热计算模型. 基于所建模型, 结合我国油藏热采情况, 对油藏多孔介质导热系数变化规律和蒸汽驱热质传递特性进行了分析.

2013-11-11 收到第 1 稿, 2013-12-23 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金项目 (51176023, 51178087)、提高油气采收率教育部重点实验室开放基金项目 (201301) 和黑龙江省教育厅科学技术研究项目 (12531057) 资助.

2) 王志国, 教授, 主要研究方向: 热力学与油气开采交叉科学研究. E-mail: dqwangzhiguo@126.com

1 油藏多孔介质的 REV 描述方法

1.1 多孔介质 REV 描述方法

油藏多孔介质是含有微小孔洞的固体体系, 具有孔隙形态多样化、孔隙分布跨度大, 内部流体多变等特点, 如何定量精确描述存在一定困难 [14].

1972 年, Bear^[14] 在研究土体渗流时, 提出了表征单元体 (representative elementary volume, REV) 概念. 在土体结构小于 REV 时, 土体结构参数、性能等出现波动, 失去研究意义. 此后一些国内外学者将之引入到岩体结构中 [15-19].

对于油藏多孔介质而言, 引入孔隙度与表征单元体 REV, 实际的多孔介质可视为连续介质, 可以对表征单元体性质 (包括多孔介质性质、充满孔隙空间的流体性质和热力学性质等) 进行描述和分析.

在油藏孔隙区域内, 包含了具有结构相似的固相骨架和孔隙空间的单元体, 称之为表征单元体. 一般来说, 表征单元体中固体骨架和孔隙空间应为均匀分布. 表征单元体的选择标准为:

- (1) 表征单元体内变量的平均值与所选择的表征单元体的尺寸、形状等无关;
- (2) 表征单元体内变量值在几何空间坐标和时间上是连续可微的.

可以说, 表征单元体的尺寸范围与整个流动区域相比应该足够小; 同时, 相比于单个孔隙, 表征单元体的尺寸又要足够大, 应包含足够数目的骨架和孔隙. 如图 1 所示.

图 1 描述了 REV 的体积大小 V 的确定范围, 即

$$V_{\min} < V < V_{\max} \tag{1}$$

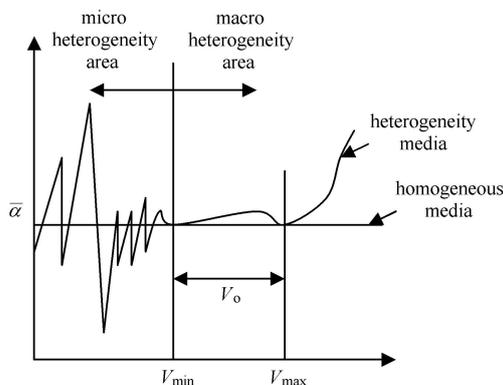


图 1 表征单元体及孔隙度的定义

Fig. 1 Definition of representative volumetric element and porosity

1.2 油藏多孔介质 REV 选取方法

表征单元体的尺度 l , 与其整体结构尺度 L , 微

结构 (如裂纹, 孔隙等) 尺度 d 以及岩体应力波动尺度 λ 相比较须满足如下条件:

- (1) $l \gg d$: 该条件保证表征单元体内包含较多的非均匀微结构, 在表征单元体内能获得准确的连续介质模型和有效的特征参数;
- (2) $l \ll L$: 保证表征单元体与整体结构尺寸相比, 可被视为一个不计体积的质点; 满足连续介质假设, 可进行宏观力学计算;
- (3) $l \ll \lambda$: 保证在局部化过程中, 得到满足边界条件的应力或应变分布均匀的代表单元体.

综上所述, 油藏表征单元体的选取满足的尺度要求为

$$d_0 \ll d \ll l \ll L, \quad l \ll \lambda \tag{2}$$

2 基于 REV 的油藏多孔介质“三箱”分析模型

油藏多孔介质结构及其赋存条件具有复杂性、多变性, 存在认识不清、信息不准等不确定性因素, 同时相关机理模型研究针对特定条件, 适应性不强. “模型给不准”、“参数给不全”已成为相关机理研究的“瓶颈”问题 [20]. 本文提出了基于 REV 的“三箱”描述及分析模型.

2.1 油藏多孔介质表征单元体黑箱描述模型

当多孔介质相关信息没有或很少时, 可采用黑箱模型描述. 即把油藏表征单元体看作是由不“透明”边界所包围时得到的系统 [12], 如图 2 所示. 一般来说, 黑箱模型只能用于油藏多孔介质热质传递过程的粗略分析.

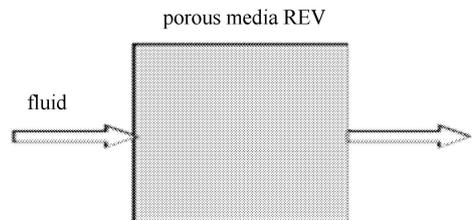


图 2 基于 REV 的多孔介质黑箱描述模型

Fig. 2 Black box description model of porous based on REV media

2.2 油藏多孔介质表征单元体灰箱描述模型

当给出了一些多孔介质相关信息时, 可采用灰箱模型描述. 所谓灰箱模型, 即油藏表征单元体内部部分“透明”, 可以进行一些精细分析, 如图 3 所示. 灰箱模型比黑箱模型更加精确.

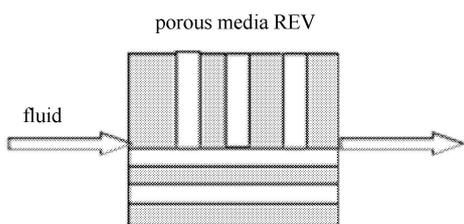


图 3 基于 REV 的多孔介质灰箱描述模型

Fig. 3 Gray box description model of porous based on REV media

2.3 油藏多孔介质表征单元体白箱描述模型

当描述表征单元体的相关信息全部获得时，可以采用白箱模型。油藏表征单元体由“透明”边界所包围的体系构成，其内部结构及组成等参数全部已知，称之为白箱模型，如图 4 所示。

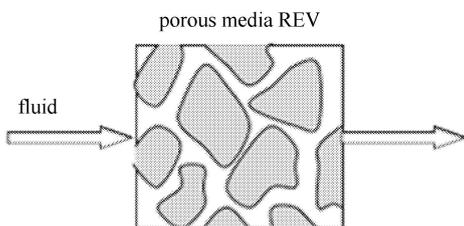


图 4 基于 REV 的多孔介质白箱描述模型

Fig. 4 white box description model of porous based on REV media

对于实际的多孔介质，由于相关信息很难全部获得，进行白箱分析时很困难的，只能是由灰箱逐渐接近。

2.4 基于“三箱”模型的多孔介质分析过程

面对多孔介质内部组成及结构信息不全，理论和实验研究输入参数有限问题，基于前述的多孔介质描述方法，本文提出采用“黑箱 → 灰箱 → 白箱”的“三箱”分析模型。在参数很少时，如仅有孔隙度时，采用黑箱模型；知道了内部孔隙的分布时，可采用灰箱模型；给足全部信息时，采用白箱模型。实际过程是从黑箱逐步演变为灰箱，逐步接近白箱，如图 5 所示。

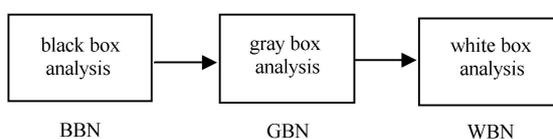


图 5 基于 REV 的多孔介质分析过程

Fig. 5 The analysis process of porous media based on REV

3 基于“三箱”模型的油藏热质传递过程分析

3.1 油藏表征单元体导热系数计算分析模型

当油藏多孔介质的温度不太高，无相变，固体颗粒相互紧密接触且移动甚微，其内部传热过程主要由热传导模式控制。

(1) 多孔介质导热黑箱模型

对于仅给出多孔介质孔隙度 ϕ 时，基于黑箱描述模型的有效导热系数，当按串联模式计算时，有

$$\lambda_c = (1 - \phi)\lambda_s + \phi\lambda_f \quad (3)$$

式中， λ_c 为按串联模式计算的有效导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； λ_f 为流体导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； λ_s 为骨架导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； ϕ 为油藏孔隙度，%。

当按并联模式计算时，有

$$\frac{1}{\lambda_b} = (1 - \phi)\frac{1}{\lambda_s} + \phi\frac{1}{\lambda_f} \quad (4)$$

式中， λ_b 为按并联模式计算的有效导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

由式 (4) 可得

$$\lambda_b = \frac{1}{(1 - \phi)\frac{1}{\lambda_s} + \phi\frac{1}{\lambda_f}} = \frac{\lambda_s\lambda_f}{(1 - \phi)\lambda_f + \phi\lambda_s} \quad (5)$$

(2) 多孔介质导热灰箱模型

真实的油藏多孔介质中，内部流体流动的方向十分复杂时，通道存在的形式也不同。按通道串联和通道并联两种情况同时存在进行简化。在黑箱模型的基础上进一步增加模型的灰度，如在给出孔隙度的基础上，增加孔隙分布，可进行灰箱计算。

引入孔隙通道分布系数 α ，其定义为

$$\alpha = \frac{N_c}{N} \quad (6)$$

式中， N_c 为平行于渗流方向串联通道的数量， N 为通道总数量。

油藏多孔介质表征单元体总导热系数可表示为

$$\lambda_z = \alpha\lambda_c + (1 - \alpha)\lambda_b \quad (7)$$

将串联导热系数和并联导热系数公式代入总导热系数公式得

$$\lambda_z = \alpha[(1 - \phi)\lambda_s + \phi\lambda_f] + \frac{(1 - \alpha)\lambda_s\lambda_f}{(1 - \phi)\lambda_f + \phi\lambda_s} \quad (8)$$

即

$$\lambda_z = \frac{(\alpha - 2\alpha\phi + 2\alpha\phi^2)\lambda_s\lambda_f + \alpha\phi(1 - \phi)(\lambda_s^2 + \lambda_f^2)}{\phi\lambda_s + (1 - \phi)\lambda_f} \quad (9)$$

3.2 油藏表征单元体传热计算分析模型

油藏表征单元体内孔隙内流体热量传递包括 3 部分, 单元体内部流体与孔隙骨架间的对流换热; 单元体流体间的导热及对流换热; 单元体内井注入 (或采出) 流体所含热量 [12].

(1) 黑箱传热模型

表征单元体内孔隙内流体热量传递黑箱模型如图 6 所示.

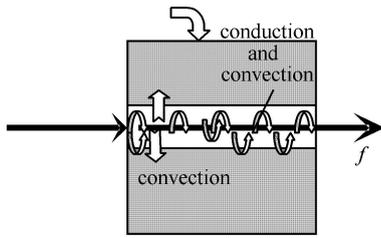


图 6 表征单元体热质传递黑箱模型

Fig. 6 The black box model of heat and mass transfer in porous media

基于图 6 的黑箱模型, 可建立油藏多孔介质表征单元体热平衡方程式.

(导入热流量 - 导出热流量) - 热损失 + 注入/采出热量 = 单元体的能量变化量

$$-\nabla q_e - \bar{q}_{loss} + \bar{q}_{well} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho e) \quad (10)$$

式中, ∇q_e 为热流密度矢量, \bar{q}_{loss} 为单位时间内, 顶、底层能量损失, $J/(m^3 \cdot s)$; \bar{q}_{well} 为单位时间内, 单位体积源 \ 汇相的热量, 注入为正, 采出为负.

(2) 灰箱综合传热模型

灰箱分析模型与黑箱分析模型相比, 在考虑油藏内部与外界的热量传递过程和系统内能的变化时, 考虑到了系统内部个组分间的能量转换过程, 如图 7 所示.

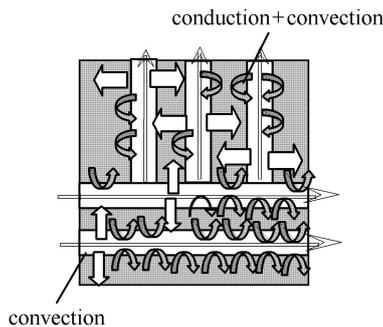


图 7 表征单元体热质传递灰箱模型

Fig. 7 The gray box model of heat and mass transfer in porous media

基于灰箱分析模型, 根据能量守恒定律, 建立油藏多孔介质系统热平衡方程如下:

导入热流量值 + 流体对流产生的热流量 + 流体传递给骨架的热量 + 注入热量 = 单元体能量变化量

$$\begin{aligned} & \nabla \left[(\lambda_o S_o + \lambda_w S_w + \lambda_g S_g) \phi \nabla T_f \right] + \nabla \left[\phi T_f (S_o \rho_o C_o \nabla v_o + \right. \\ & \quad \left. S_w \rho_w C_w \nabla v_w) + \phi S_g \rho_g h_g \nabla v_g \right] + \\ & \gamma_s h (T_s - T_f) + \bar{q}_{well} = \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi T_f (S_o \rho_o C_o + S_w \rho_w C_w) + \phi S_g \rho_g h_g \right] \quad (11) \end{aligned}$$

式中, S_π 为 π 相流体的饱和度; v_π 为 π 相流体的渗流速度, m/s ; C_π 为 π 相流体的比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ_π 为 π 相流体的密度, kg/m^3 ; λ_π 为 π 相流体的导热系数, $J/(m \cdot s \cdot ^\circ C)$; h_g 为饱和蒸汽的比焓, J/kg ; γ_s 为岩石比表面积, m^{-1} ; h 为岩石与流体间的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; π 为 o, w, g , 分别代表油、水、蒸汽三相.

4 油藏多孔介质表征单元体渗流方程

油藏表征单元体渗流过程包括蒸汽凝结过程、注入和采出过程, 据此可得油、水、蒸汽三相渗流基本微分方程 [13]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K_{ox}}{B_o \mu_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial x} - \rho_o g \frac{\partial D}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{K_{oy}}{B_o \mu_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial y} - \rho_o g \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K_{oz}}{B_o \mu_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial z} - \rho_o g \frac{\partial D}{\partial z} \right) \right] + q_{osc} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi \rho_o S_o}{B_o} \right) \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K_{wx}}{B_w \mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x} - \rho_w g \frac{\partial D}{\partial x} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{K_{wy}}{B_w \mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial y} - \rho_w g \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K_{wz}}{B_w \mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial z} - \rho_w g \frac{\partial D}{\partial z} \right) \right] + q_{wsc} + \frac{q_c}{\rho_{ws}} = \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi \rho_w S_w}{B_w} \right) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K_{gx}}{B_g \mu_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial x} - \rho_g g \frac{\partial D}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{K_{gy}}{B_g \mu_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial y} - \rho_g g \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K_{gz}}{B_g \mu_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial z} - \rho_g g \frac{\partial D}{\partial z} \right) \right] + q_{gsc} - \frac{q_c}{\rho_{gs}} = \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi \rho_g S_g}{B_g} \right) \quad (14) \end{aligned}$$

式中, $K_{\pi i}$ 为孔隙内 π 相的 i 方向的 ($i = x, y, z$) 渗透率; μ_{π} 为孔隙内 π 相的黏度, Pa; p_{π} 为孔隙内 π 相的压力, Pa; B_{π} 为流体 π 相的体积系数; $q_{\pi sc}$ 为单位体积岩石中注入流体 π 相的体积流量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 注入蒸汽为正, 采出为负; q_c 为基于底层条件下, 油藏表征体积单元孔隙中由蒸汽凝结成水的质量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; ρ_{ws} 为地面标准状况下的水的密度, kg/m^3 ; ρ_{gs} 为地面条件下的蒸汽密度, kg/m^3 ; D 为油藏表征体积单元基准面垂直方向深度, m.

其他渗流过程相关方程见文献 [12], 限于篇幅不再重述.

5 模拟计算及分析

基于本文所建的 REV 分析模型, 对油藏导热系数进行计算, 据此分析多孔介质内部孔道的分布情况、孔隙度以及其他相关参数对多孔介质导热系数的影响. 应用 CMG-STARS 软件, 基于 REV 灰箱方法对蒸汽驱油过程温度分布进行研究.

5.1 油藏多孔介质导热系数计算分析

5.1.1 基于黑箱模型的导热系数计算

计算过程的流体参数: 原油的导热系数 λ_{oil} 为 $1.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; 岩石的导热系数为 λ_s 为 $2.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$. 多孔介质的孔隙度 ϕ 分别为 $0.1, 0.2, \dots, 1.0$. 孔隙度对黑箱分析模型下多孔介质内部导热系数的影响如图 8 所示.

由图 8 可知, 多孔介质的孔隙度越大, 多孔介质内部的导热系数越小. 随着孔隙度的增大多孔介质 REV 体积单元性质越接近于流体的性质, 其内部的导热系数变小.

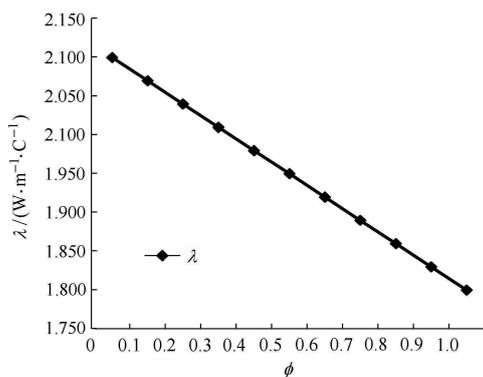


图 8 孔隙度对多孔介质内部导热的影响
Fig. 8 The influence of porosity on porous media internal thermal conductivity

5.1.2 基于灰箱模型的导热系数计算

(1) 孔隙度对多孔介质导热系数影响

当多孔介质的孔隙通道分布系数为 0.5, 孔隙度分别为 $0.1, 0.2, \dots, 1.0$ 时, 总导热系数、串联部分导热系数以及并联部分导热系数变化如图 9 所示.

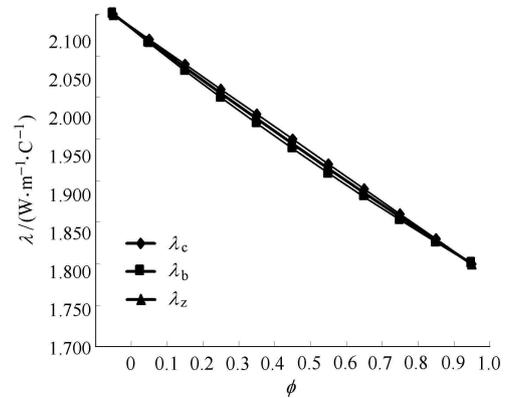


图 9 孔隙度对多孔介质内部导热系数的影响
Fig. 9 The influence of porosity on porous media internal thermal conductivity

由图 9 可知随孔隙度的增大, 导热系数呈减小的趋势, 与黑箱模型下孔隙度对多孔介质内部导热系数的影响相同. 由于油藏多孔介质内部岩石骨架和原油的导热系数相差不大, 所以总导热系数基本呈线性变化. 串联导热系数、并联导热系数与总导热系数三者的数值大小相当.

(2) 孔隙通道分布系数对多孔介质内部导热系数的影响

取多孔介质内部的流体为空气, 其状态参数为: 1 标准大气压下, 温度为 10°C , 导热系数 λ_a 为 $0.025 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; 岩石的导热系数为 λ_s 为 $2.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$. 当多孔介质的孔隙通道分布系数为 0.5, 孔隙度分别为 $0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.0$ 时, 总导热系数、串联导热系数 (即孔隙通道分布系数 α 为 1) 以及并联导热系数 (即孔隙通道分布系数 α 为 0) 变化如图 10 所示.

由图 10 可知, 总导热系数呈曲线分布, 主要原因在于多孔介质内流体的导热系数与岩石骨架导热系数相差较大; 孔隙通道分布系数越大, 总导热系数曲线越趋近于通道串联时的导热系数曲线.

当孔隙通道分布系数为 1 时, 灰箱模型接近于理想状态的白箱模型, 多孔介质内孔道分布均匀, 方向一致, 呈现为单一的串联通道, 有利于热量的传导.

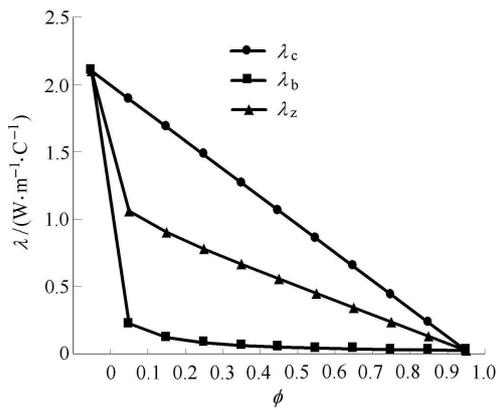


图 10 孔隙通道分布系数对多孔介质内部导热系数的影响

Fig. 10 The influence of distribution coefficient of porosity on internal thermal conductivity porous media

5.2 基于孔隙度变化的能量传递过程灰箱分析

5.2.1 模型建立及基本参数设定

应用 CMG-STARS 热采模拟软件, 基于 REV 分析模型, 进行模拟计算. 蒸汽驱过程数值模拟参数及注入井区域油藏初始条件如表 1 所示.

当四口注入井同时注入蒸汽时, 油藏最终温度分布如图 11 所示.

表 1 蒸汽驱过程数值模拟参数及油藏初始条件

Table 1 Numerical parameters of steam drive and reservoir initial condition

H/m	D/m	A/m ²	ϕ	K_h /mD	K_v /mD	ρ (API)	T/°C	P/kPa
550	35	50 000	0.3~1.0	400	40	22	37.8	8 500

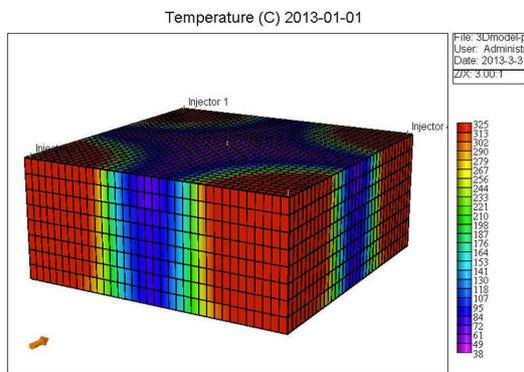
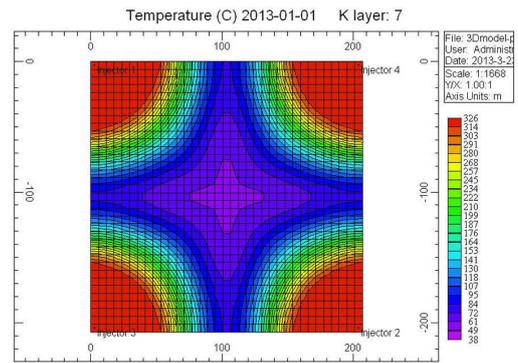


图 11 油藏多孔介质热质传递后温度分布

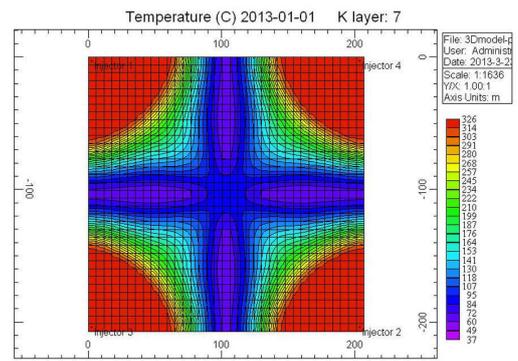
Fig. 11 Temperature distribution of reservoir porous media in heat and mass transfer

5.2.2 孔隙度对热传递的影响

调整油藏孔隙度 ϕ 值进行模拟计算. 当 $\phi = 0.3$ 和 $\phi = 0.8$ 时温度场的分布情况, 如图 12 所示.



(a) $\phi = 0.3$



(b) $\phi = 0.8$

图 12 不同孔隙度下油层温度场分布

Fig. 12 The temperature distribution of reservoir in different porosity

(1) 油藏内部温度场变化分析

从图 12 可以看出, 随着孔隙度的增大, 油藏内部注入流体增加、能量传递过程加快, 油藏内部注入井与采出井之间的温度逐渐升高, 热量由注入井逐渐向采出井传递.

(2) 采出井区域温度场变化分析

随着孔隙度的增大, 热质传递过程出现不均匀性, 指进现象呈现增加趋势. 采出井附近的温度场等温线从类似十字形逐步演变为类似正方形.

6 结 论

(1) 提出了油藏多孔介质的 REV 描述及表征方法;

(2) 建立了基于 REV 的油藏多孔介质黑箱模型, 灰箱模型和白箱模型;

(3) 基于黑箱和灰箱模型, 给出了油藏多孔介质导热计算关系式, 并进行了数值计算和分析;

(4) 推导了基于 REV 热质传递过程的热平衡方程. 应用 CMG-STARS 油藏数值模拟软件, 基于能量

传递过程灰箱模型, 分析了孔隙度变化时油藏多孔介质的能量传递特性。

油藏多孔介质结构及其赋存条件复杂, 精确描述困难, 相关机理模型研究针对特定条件, 适用性不强, “模型给不准”、“参数给不全”成为“瓶颈”问题。本文提出的“三箱”分析方法, 可以对油藏多孔介质中的能量、质量和动量迁移特性从粗浅到精细过进行研究, 对于掌握油气开采过程中的一些相关机理, 分析驱油过程的变化规律、控制最佳驱替条件和提高原油采收率等有一定意义。

参 考 文 献

- 1 李景宝. 提高稠油开采的技术研究. 中国科技信息, 2009, (3): 18-19 (Li Jingbao. Study on improving technology for heavy oil production. *China Science and Technology Information*, 2009, (3): 18-19 (in Chinese))
- 2 张义堂. 热力采油提高采收率技术. 北京: 石油工业出版社, 2006, 1-4 (Zhang Yitang. *Improving Heavy Oil Recovery Technology on Thermal Oil Recovery*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 1-4 (in Chinese))
- 3 Hart RD, John CM. Formulation of a fully-couple thermal-mechanical-fluid model for non-linear geologic system. *Int J Rock Mech Min Sic & Geomech Abstr*, 1986, 23(3): 213-224
- 4 Jing L, Tsang CF, Stephasson O, et al. DECOVALEX-An international cooperative research projects on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1995, 32: 389-398
- 5 姜昌伟, 李贺松, 陈冬临等. 磁场对多孔介质内方腔内空气热磁对流的影响. 力学学报, 2012, 44(1): 23-29 (Jiang Changwei, Li Hesong, Chen Donglin, et al. Numerical analysis of the effect of an inclined coil on thermomagnetic convection of air in a porous cubic ebckisire. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(1): 23-29 (in Chinese))
- 6 盛金昌. 多孔介质流-固-热三场全耦合数学模型及数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2006, 25: 3028-3033 (Sheng Jinchang. Fully coupled thermo-hydro-mechanical model of saturated porous media and numerical modeling. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25: 3028-3033 (in Chinese))
- 7 黄涛, 杨立中, 陈一立. 工程岩体地下水渗流-应力-温度耦合作用数学模型的研究. 西南交通大学学报, 1999, 34(1): 11-15 (Huang Tao, Yang Lizhong, Cheng Yili. A mathematic model for the coupling among groundwater seepage-stress-temperature in engineering rock mass. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1999, 34(1): 11-15 (in Chinese))
- 8 刘泽佳, 李锡夔. 非饱和多孔介质中热-渗流-力学耦合的混合元法. 力学学报, 2006, 38(2): 170-175 (Liu Zejia, Li Xikui. Mixed finite element method for coupled thermo-hydro-mechanical analysis in unsaturated porous media. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(2): 170-175 (in Chinese))
- 9 Class H, Helmig R. Numerical simulation of non-isothmal multi-phase multi-component processes in porous media.2.Applications for the injection of steam and air. *Advances in Water Resources*, 2002, 25: 55-564
- 10 Sheorey T, Muralidhar K. Isothermal and non-isothermal oil-water flow and viscous fingering in a porous medium. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, 42: 665-676.
- 11 Thomas L. Linearized description of the non-isothermal flow of a saturated vapor through a micro-porous membrane. *Journal of Membrane Science*, 2007, 301: 107-117
- 12 王志国, 陈键, 杨文哲等. 稠油油藏热流耦合“两箱”分析模型及应用研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 1007-1015 (Wang Zhiguo, Chen Jian, Yang Wenzhe, et al. Study on “two boxs” analysis models of coupled thermal flow in heavy oil reservoirs and their application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 1007-1015 (in Chinese))
- 13 杨文哲. 蒸汽在油藏多孔介质中的热质传递机理及数值模拟.[博士论文]. 大庆: 大庆石油学院, 2010 (Yang Wenzhe. Heat and mass transfer mechanism and numerical simulation of steam in reservoir porous media. [PhD Thesis]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010 (in Chinese))
- 14 Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: American Elsevier, 1972
- 15 Min KB, Jing L. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinctelement method. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2003, 40(6): 795-816
- 16 Wang M, Kulatilake PHS. Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2002, 39(7): 887-904
- 17 Long JCS. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research*, 1982, 18(3): 645-658
- 18 Kulatilake PHSW, Panda BB. Effect of block size and joint geometry on jointed rock hydraulics and REV. *ASCE J Eng Mech*, 2000, 126(8): 850-862
- 19 向文飞, 周创兵. 裂隙岩体表征体积元研究进展. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 5686-5692 (Xiang Wenfei, Zhou Chuangbing. The advances in investigation of representative elementary volume for fractured rock mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 5686-5692 (in Chinese))
- 20 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程. 北京: 科学出版社, 2006 (Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. *Rock Mechanics and Engineering*. Beijing: Chinese Science Press, 2006 (in Chinese))

STUDY ON ANALYSIS METHOD OF “THREE BOX” IN HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS OF RESERVOIR MEDIA¹⁾

Wang Zhiguo^{*,†2)} Zhang Lei[†] Zhang Wenfu^{*,†} Jia Yongying^{*,†} Yin Chailing[†]

**(Heilongjiang Key Laboratory of Disaster Prevention, Mitigation and Protection Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)*

**(School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)*

Abstract The composition and structure of reservoir porous media are varied. It is difficult to obtain its full parameters, and the accurate description and analysis become difficult as well. In addition, the hydraulic conditions and mechanism of seepage process in porous media are complex, and there also has thermo-hydro-mechanical coupling effect in porous media. So the current analysis methods and models have certain limitations. This paper presents the REV (representative elementary volume) description method of reservoir porous media. Based on the REV, the author established black-box model, gray-box model and white-box model of porous media, and proposed “black box → gray box → white box” analysis process in porous media. Also based on black-box and gray-box models, the calculation formulas of REV thermal conductivity were derived, and heat balance equation of heat and mass transfer process was given. Combined with our reservoir thermal recovery situation, this paper analyzed the variation of the thermal conductivity and the characteristics of heat and mass transfer in steam drive, and obtained some useful results. This paper provided a new idea and method to analyze the heat and mass transfer in porous media.

Key words representative elementary volume, “three box” analysis model, reservoir media, thermal conductivity, heat and mass transfer

Received 11 November 2013, revised 23 December 2013.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51176023, 51178087), Opening Project of Enhance Oil Recovery Key Laboratory of Ministry of Education (201301) and the Science and Technology Research Program of Heilongjiang Provincial Department of China (12531057).

2) Wang Zhiguo, professor, research interests: thermodynamics and oil-gas mining interdisciplinary. E-mail: dqwangzhiguo@126.com