

# 岩浆侵入多孔储层的热效应数学模型及其应用

于水

河南省煤田地质局物探测量队, 郑州 450009

**摘要** 构建了一个岩浆侵入多孔储层中的热效应数学模型,提出了模拟地质系统中的岩浆侵入/凝固热效应的等效算法,基于物理和数学方程上的等价原理,用瞬态有限元分析将岩浆侵入与岩石之间原始凝固边界移动问题,转化为一个边界没有运动的物理等效热源的新问题,即单步凝固模型与多步(三步)凝固模型。所提出的等效算法的主要优点是有限元网格大小固定,采用变积分时间步长来模拟有限元分析的侵入岩浆凝固热效应。多种热效应模型的对比发现,单步凝固模型与多步(三步)凝固模型的数值解具有近似的精度,所以单步凝固模型是有效模拟多孔岩石中岩浆侵入的热效应模型。单步和多步(三步)凝固模型与王民模型、Zhao模型对比后发现,单步和多步(三步)凝固模型与Zhao模拟的效果更为接近,理论上更接近地质实际。通过对商56区块沙三段油藏辉绿岩侵入热场的模拟分析应用,推算得到商56区块沙三段油藏的热裂解量为 $9.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,指出该油藏的保存条件有限,存在着大量的油气渗漏,并且原油的大部分损失是由于渗漏散失造成的。

**关键词** 多孔储层;单步凝固模型;多步凝固模型;商56区块油藏

**中图分类号** TE19

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.18.006

## Mathematical Model of Thermal Effect of Magma Intrusion into Porous Reservoir and Its Application

YU Shui

Geophysical Exploration & Surveying Team, Coal Geology Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450009, China

**Abstract** In this paper, a mathematical model is proposed for the thermal effect of intrusion of magma into porous reservoir to simulate the geological system of magma intrusion and the heat effect in solidification by using an equivalent algorithm, based on the equivalence principle of the physical and mathematical equations. The transient finite element analysis transforms the original rock magma solidification boundary movement into a physical equivalent heat source boundary with no new movement, namely, a single-step solidification model and a multi step (three step) solidification model. The main advantages of the proposed algorithm is that the finite element mesh size is fixed, the varied time step is used to simulate the intruding magma solidification thermal effect through the traditional finite element analysis. Comparing various thermal effect models, it is shown that the numerical single-step solidification model solution and the multi step (three step) numerical model solution enjoy similar accuracy, so the single-step solidification model can effectively simulate the thermal effect of the magma intrusion in the porous rock. Single and multi step (three step) solidification models are compared with the Wang Min model and the Zhao model, and it is shown that the single and multi step (three step) models give solidification results more consistent with those of the Zhao model, which theoretically are closer to the actual geological data. The diabase intrusive analysis of Shang 56 sha 3 pool is carried out to simulate the thermal field, and it is shown that the Shang 56 Sha 3 pool thermal cracking volume is  $9.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ , and the preservation conditions of the reservoir is poor, with a large amount of oil and gas leakage, to which is attributed mostly the loss of crude oil.

**Keywords** porous reservoir; single-step solidification model; multi-step solidification model; Shang 56 pool

收稿日期:2014-02-21;修回日期:2014-04-29

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-005)

作者简介:于水,总工程师,研究方向为地质物探开发理论与技术,电子邮箱:yushui6412@163.com

引用格式:于水. 岩浆侵入多孔储层的热效应数学模型及其应用[J]. 科技导报, 2014, 32(18): 41-47.

火山作用,特别是火山侵入作用给沉积地层带来了可观的热量,火山侵入烃源岩,必然会对烃源岩有机质的成烃产生重要影响,即火山岩的热效应将促进烃源岩的成烃<sup>[1-3]</sup>。但是当火山岩侵入到多孔油层中,将会带来不利的一面,如破坏先期形成的油藏,推动着油藏中原油裂解成气,甚至烧干油层<sup>[4]</sup>。

目前对烃源岩热效应已做了大量研究。其中,陈荣书等<sup>[5]</sup>对葛渔城-文安地区研究发现侵入体围岩中镜质体反射率急剧升高。孙永革等<sup>[6]</sup>对辽河盆地火山岩热效应的研究再次引发了国内学者的热议。但是国内大多数学者对于火山岩对沉积有机质的热效应研究基本处于定性描述阶段,缺乏数学模型的定量化模拟。Wang等<sup>[7]</sup>建立了简单的岩浆侵入体热传导模型;Hurter等<sup>[8]</sup>根据巴西南部巴拉那盆地的侵入岩数据,建立了描述侵入体热传导过程的数学模型;Fjeldskaar等<sup>[9]</sup>考虑潜热的影响,并依据热传导方程建立了描述侵入体附近温度场演化特征的模型;王民等<sup>[3]</sup>在Fjeldskaar等的研究基础上引入了地温的影响,并建立了新的地温场演化模型(以下简称王民模型),成为中国火山岩热效应定量化模拟研究的先导。

总体上,对烃源岩中火山侵入热效应的研究较多,对储层中侵入岩热效应的研究较少。张东辉<sup>[10]</sup>建立了多孔介质导热模型;Zhao等<sup>[11]</sup>提出了岩浆侵入多孔岩石的热影响等效数学模型(以下简称Zhao模型);许飞等<sup>[12]</sup>在对热采稠油的研究中,提出了一套新的多孔介质的热传导计算模型。但是这些模型都具有一定的局限性,张东辉<sup>[10]</sup>提出的模型缺乏模拟岩浆侵入之后凝固过程;许飞等<sup>[12]</sup>提出的模型主要是用于蒸汽热采的过程,与实际岩浆侵入相比规模较小,并且缺失岩浆侵入之后凝固过程的模拟;Zhao模型缺乏对多孔岩石中流体热效应的考虑。本研究旨在运用瞬态有限元分析等效算法建立一个逼近地质实际的地层水条件下岩浆侵入储层的热效应数学模型,并在相同的地质条件下与Zhao模型、王民模型的模拟效果进行对比分析。在此基础上,将该热效应模型结合原油裂解化学动力学原理,实现对火山岩侵入油藏热效应造成的原油裂解的定量评价。

## 1 模型的建立

多孔储层的各相之间或各相内部存在温差时,多孔储层内部就会有传热发生。多孔结构中的传热过程因多孔储层的结构特点而十分复杂。通过分析多孔储层的传热过程,可知主要问题是固体颗粒之间是否存在接触时的导热以及孔隙之中流体的导热,显然对于多孔储层来说,储层中流体热效应是不可忽视的,以下尝试从等效热源的角度建立起岩浆侵入含水砂岩的热效应模型(图1)。图1中侵入岩浆厚度为 $L_M$ ,侵入岩浆两侧围岩的长宽均为 $L_R$ ,以侵入岩浆的中心位置为坐标原点,垂直于岩浆侵入方向为 $x_1$ ,岩浆侵入方向分别为 $x_2$ 和 $x_3$ 。

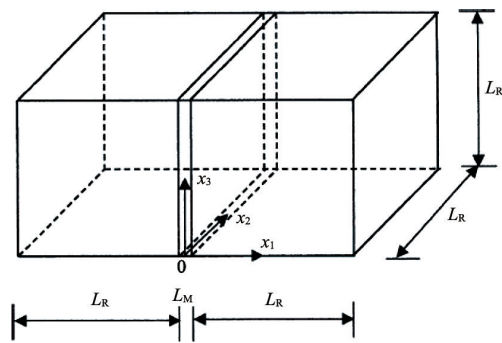


图1 岩浆侵入围岩示意图

Fig. 1 Sketch of magma intruding host rock

热传导可表示为

$$\begin{cases} (\rho_M c_{p,M}) T_{M,t} = \lambda_M T_{M,i} & (x_1, x_2, x_3) \in V_M \\ (1 - \varphi)(\rho_R c_{p,R}) T_{R,t} + \varphi(\rho_w c_{p,w}) T_{w,t} = \lambda T_{r,i} & (x_1, x_2, x_3) \in V_r \end{cases} \quad (1)$$

式中, $T_{R,t}$ 、 $T_{w,t}$ 、 $T_{M,t}$ 分别为(不含水)岩石、水和岩浆在 $t$ 时刻的温度; $T_{r,i}$ 和 $T_{M,i}$ 分别为横切面 $i$ 上的(含水)岩石和岩浆的温度; $\rho_R$ 、 $c_{p,R}$ 分别为(不含水)岩石的密度、比热容; $\rho_w$ 、 $c_{p,w}$ 分别为地下水的密度、比热容; $\rho_M$ 、 $c_{p,M}$ 和 $\lambda_M$ 分别为岩浆的密度、比热容和导热系数; $\lambda_r$ 为(含水)岩石导热系数; $\varphi$ 为(含水)砂岩的孔隙度; $V_r$ 和 $V_M$ 分别属于岩石和岩浆的体积范围。

围岩与侵入岩浆接触界面上,温度和热流特征公式为

$$T_r = T_M \quad (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}) \in \Gamma_{r,M} \quad (2)$$

$$(1 - \varphi)\lambda_R n_i T_{R,t} + \varphi\lambda_w n_i T_{w,t} - \lambda_M n_i T_{M,t} = \rho_M [Q + c_{p,M}(T_{l,M} - T_m)] n_i x_{i,t} \quad (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}) \in \Gamma_{r,M} \quad (3)$$

式中, $T_r$ 为围岩与侵入岩浆接触界面上的围岩温度, $T_M$ 为围岩与侵入岩浆接触界面上侵入岩浆的温度。 $x_{ii}$ 是岩石与侵入岩浆的接触界面第 $i$ 个坐标分量; $x_{i,t}$ 是指 $t$ 时刻时岩石与侵入岩浆界面第 $i$ 个坐标分量; $n_i$ 是距离岩石与侵入岩浆接触界面第 $i$ 个有限元面积常量; $T_{l,M}$ 是侵入岩浆的初始温度, $T_m$ 是侵入岩浆固结后的温度, $\lambda_w$ 为地下水导热系数, $\lambda_r$ 为(不含水)岩石导热系数, $T_{w,i}$ 为横切面 $i$ 上的地下水温度。 $Q$ 是侵入岩浆熔化潜热, $\Gamma_{r,M}$ 是侵入岩浆与岩石的界面。在岩石与侵入岩浆接触界面外,岩浆岩侵入热效应的边界条件也适用于Neumann模型<sup>[13]</sup>。

如果岩石的空间展布比侵入岩浆大得多,并且岩石的热特征与侵入岩浆差不多,从物理和数学的角度可以将式(1)、(2)、(3)合并为

$$(\rho_M c_{p,M}) T_{M,t} = (1 - \varphi)\lambda_R T_{R,t} + \varphi\lambda_w T_{w,t} + (T_{l,M} - T_m) f(x_1, x_2, x_3, t) \quad (x_1, x_2, x_3) \in V_r + V_M \quad (4)$$

式(4)中 $T_{M,t}$ 表示侵入岩浆固结前 $t$ 时刻横切面 $i$ 上的温度, $T_{R,t}$ 分别为横切面 $i$ 上的(不含水)围岩的温度, $f(x_1, x_2, x_3, t)$ 是侵入岩浆固化过程等效热源的物理函数:

$$f(x_1, x_2, x_3, t) = \rho_M [Q + c_{p,M}(T_{l,M} - T_m)] n_i x_{i,t} / \Delta L_{M,k} \quad (5)$$

式(5)中, $\Delta L_{M,k}$ 为 $\Delta t_{M,k}$ 时间段期间侵入岩浆的侵入的长度, $x_{i,t}$ 为 $t$ 时刻 $\Delta t_{M,k}$ 时间内第 $i$ 个坐标分量距离岩石与侵入岩浆

的接触界面的距离。如果侵入岩浆的温度等于岩浆凝固温度,式(5)可修改为

$$f(x_1, x_2, x_3, t) = \rho_M Q n_i x_{i,t} / \Delta L_{M,k} \quad (6)$$

一旦热源确定,  $f(x_1, x_2, x_3, t)$  主要由分析或实验获取。式(4)可以由常规有限元求解,侵入岩浆凝固过程的物理等效热源的确定是成功计算地质系统中侵入岩浆凝固过程热效应的关键。尽管侵入岩浆凝固过程的物理等效热源可以由实验确定,但从节省时间与实验材料角度说,更希望通过数值模型解析侵入岩墙或者岩床热效应。

为了确定岩墙或者岩床侵入岩浆凝固过程的物理等效热源,需要作一个理想化的模拟分析。理想化的模型设定为从中心侵入围岩的一套岩墙体,岩墙与围岩整体为一个长方体模型。模型的外表面被隔离且围岩和侵入岩的初始温度分别为  $T_{r,0}$  和  $T_{l,0}$ 。侵入体两侧岩石的长、宽、高均为  $L_R$ ,侵入岩浆的长度为  $L_M/2$ 。假设岩石的厚度远大于侵入岩浆,即  $L_R > L_M$ ,比较符合于地下岩墙与岩床的地质实际(图1)。在这个假设的前提下,理想条件下的岩浆固化可以处理成比较通用的一维 Stefan 固化问题。

由于图1中  $x_1$  方向关于原点几何对称,岩浆岩的热效应宽度等于初始侵入岩浆的厚度的一半,将岩浆体沿  $x_1$  方向上分割成  $K$  段,  $K$  为岩浆固化方向的有限元点数,因此这个方向上的有限元点的长度为  $\Delta x_1 = L_M/2K$ 。为了固定有限元点的数量,需要限定  $\Delta x_1$  为一个常量。在  $\Delta t_{M,k}$  时间段内,限定侵入岩浆的变化长度等于岩浆固化方向上有限元点的长度,即  $\Delta L_{M,k} = \Delta x_1 = L_M/2K$ 。因而  $n_i$  和  $x_{i,t}$  可表示为

$$n_i x_{i,t} = x_{i,t} \approx \frac{\Delta x_1}{\Delta t_{M,k}} = \frac{\Delta L_{M,k}}{\Delta t_{M,k}} \quad (7)$$

式(7)中,  $\Delta t_{M,k}$  为岩浆凝固边界从第  $k$  个有限元边界的一侧  $t = \Delta t_{M,k-1}$  向岩浆的固化方向  $t = \Delta t_{M,k}$  的移动时间间隔。

$$T_r = \begin{cases} T_{l,M} & \left( 0 \leq x_1 < \frac{L_M}{2} - 2\beta\sqrt{\alpha t}, t \leq t_{M,\max} \right) \\ T_{r,0} + \frac{(T_{l,M} - T_{r,0})\operatorname{erfc}\left(\frac{2x_1 + L_M - 4\beta\sqrt{\alpha t}}{4\sqrt{\alpha t}}\right)}{1 + \operatorname{erf}(\beta)} & \left( \frac{L_M}{2} - 2\beta\sqrt{\alpha t} \leq x_1 \leq L_R, t \leq t_{M,\max} \right) \\ T_{r,0} + \frac{\rho_M L_M [c_{p,M}(T_{l,M} - T_{r,0}) + Q]}{2[(1-\varphi)\rho_R c_{p,R} + \varphi\rho_w c_{p,w}]\sqrt{\alpha\pi t}} e^{-\frac{x_1^2}{4\alpha t}} & (t > t_{M,\max}) \end{cases} \quad (14)$$

式中  $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$  是变量  $x$  的互补误差函数;  $t_{M,\max} = L_M^2/(16\alpha\beta^2)$  是完成的侵入岩浆凝固的最大时间。

总之,所提出的侵入岩浆凝固热效应的等效模拟算法,主要包括3个步骤:

- 1) 对于给定值的岩石初始温度  $T_{r,0}$ ,侵入岩浆的初始温度  $T_{l,M}$  以及凝固温度  $T_m$ ;
- 2) 由式(10)确定的  $\beta$  值代入式(12)解出侵入岩墙或者岩床凝固所产生的物理等效热源;
- 3) 利用传统的有限元法求解式(4),即侵入岩浆凝固后的整个域中的温度分布。

$$\Delta t_{M,k} = t_{M,k} - t_{M,k-1} \quad (k=1, 2, 3, \dots, K) \quad (8)$$

对于时间间隔  $\Delta t_{M,k}$ ,侵入岩浆的凝固边界方向达到第  $k$  个有限元边界,可用式(3)加以求解。

$$t_{M,k} = \frac{k^2(\Delta x_1)^2}{4\alpha\beta^2}, t_{M,k-1} = \frac{(k-1)^2(\Delta x_1)^2}{4\alpha\beta^2} \quad (k=1, 2, 3, \dots, K) \quad (9)$$

式(9)中,  $\alpha = (1-\varphi)\lambda_R/(\rho_R c_{p,R}) + \varphi\lambda_w/(\rho_w c_{p,w})$  是岩石的热扩散系数,  $\beta$  可由超越方程式(10)确定。

$$\frac{e^{-\beta^2}}{\beta[1 + \operatorname{erf}(\beta)]} = \frac{Q\sqrt{\pi}}{c_{p,R}[T_m + T_{r,0}]} \quad (10)$$

式(10)中,  $T_{r,0}$  为岩石的初始温度;  $\operatorname{erf}(\beta)$  为变量  $\beta$  的误差函数。

$$\operatorname{erf}(\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\beta e^{-r^2} dr \quad (11)$$

将式(7)、(8)、(9)代入式(6)中,得到式(12):

$$f(x_1, x_2, x_3, t_{M,k}) = \frac{4\rho_M Q \alpha \beta^2}{(2k-1)(\Delta x_1)^2} \quad (k=1, 2, 3, \dots, K) \quad (12)$$

需要指出的是,由于岩浆凝固边界通过侵入岩浆与岩石初始界面的第  $k$  个有限元边界的时间间隔为  $\Delta t_{M,k}$ ,式(12)计算的是第  $k$  个有限元物理等效热源,从侵入岩浆与岩石的初始界面开始计数,有限元点步长固定后,时间变量步长可以由岩浆凝固期间有限元分析式(9)代入式(8)计算得到。从数值分析的角度,改变时间步长比有限元网格的改变容易得多。

通过理想化的模型,其特有的热扩散距离为

$$L_{df} = \sqrt{\alpha t_M} = \frac{L_M}{4\beta} \quad (13)$$

式(13)表明,若要在实验室里完成该理想实验,岩石的长度  $L_R$  应该大于热扩散距离  $L_{df}$ ,该条件是设置实验的基本假设条件。由于理想模型的几何对称性,侵入岩浆凝固过程的温度分布为

值得注意的是,物理等效热源仅适用于有限元分析的侵入岩浆凝固过程。侵入岩浆的凝固及凝固后的自动转换,是使用所提出的等效算法在传统的有限元分析的侵入岩浆凝固热效应模拟的一个优点。

## 2 模型的对比

Zhao等<sup>[11]</sup>提出的岩浆侵入多孔岩石的热效应模型,没有考虑到多孔岩石中流体的热性质。王民等<sup>[9]</sup>提出的岩浆侵入烩源岩的热效应模型在烩源岩的应用中取得了良好的效果。本研究拟采用这2种模型和本研究提出的模型进行对比

分析,以期指出它们的效果和存在的差异,并对存在的差异结果进行分析。将模型输入参数设置一致,分别对各模型进行模拟。

瞬态数值模拟是解决岩浆侵入围岩形成的岩墙凝固过程热效应的良好方案。时间步长的选择及确定是瞬态数值模拟的关键。图2为岩浆固结问题的有限元网格示意图。该图中原始岩浆侵入的区域由240个黑色方形块有限元组成,而整个计算域是由640个方形块有限元组成,模型计算区域的长和宽分别为42 m和20 m,其中侵入岩浆的厚度为2 m(因为侵入体两侧对称,仅仅从侵入体的中心到一侧进行模型计算)。

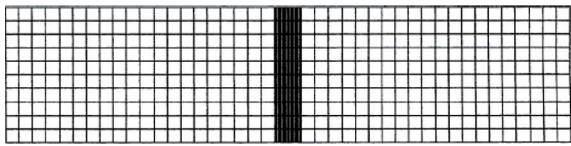


图2 计算模型的有限元点分布

Fig. 2 Finite element calculation model of point distribution

为了方便本模型与Zhao模型和王民模型对比,在有限元分析中采用的基础参数基本一致,具体如下。岩浆( $\rho_m$ )和(无水)围岩( $\rho_r$ )的密度:2.9 g/cm<sup>3</sup>;地下水( $\rho_w$ )的密度:1 g/cm<sup>3</sup>;岩浆比热( $c_{p,m}$ )和(无水)围岩的比热( $c_{p,r}$ ):1200 J/(kg·°C);地下水的比热( $c_{p,w}$ ):4210 J/(kg·°C);围岩的孔隙度( $\varphi$ ):18%;(无水)围岩热传导系数( $\lambda_r$ )为1.74 W/(m·°C),岩浆热传导系数( $\lambda_m$ )为1.1 W/(m·°C),地下水热传导系数( $\lambda_w$ )为0.62 W/(m·°C)。侵入岩浆的初始温度设定为1000 °C,围岩的初始温度为20°C。

基于基础参数及式(10)和式(11)可以确定 $\beta$ 的值约为0.73。为了检验侵入岩浆凝固的时间步长对数值解总体精度的影响,对比了2种时间步模型,即单步凝固模型和多步(三步)凝固模型。对于单步凝固模型,侵入岩浆凝固过程仅有单步过程,由式(9)确定凝固时间步长为10.86 d,从式(12)确定相应的物理等效热源为989.06 W/m<sup>3</sup>。然而,对于多步(三步)凝固模型,侵入岩浆固化过程中选择3个不同的时间步长。利用式(9)求得的3个时间步长为别为10.86/9、10.86/3、5×10.86/9 d,对应的物理等效热源分别为8901.54、2967.18、1780.31 W/m<sup>3</sup>。在岩浆完全凝固后,10.86 d的恒定时间步长用于其余阶段的有限元分析。

图3给出了多步(三步)凝固模型不同时间不同位置的模拟结果。从图3可以看出,从21.73~434.4 d中,岩浆侵入附近的温度前期随时间显著降低(温度从21.73 d的786°C迅速降低至108.6 d的381°C),后期温度则缓慢降低;而远离岩浆侵入中心6 m的区域,围岩温度在一直缓慢上升。整体上,随时间增加岩浆侵入热效应影响范围逐渐增大。

单步和多步(三步)凝固模型的热效应数值模拟效果表明(图4),单步和多步(三步)凝固模型模拟得到的数值结果

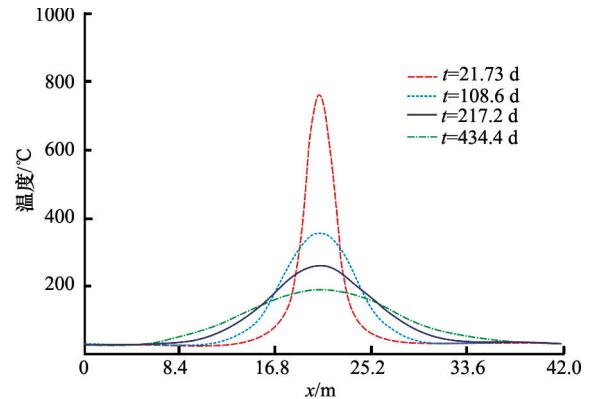


图3 多步(三步)凝固模型不同时间不同位置温度对比

Fig. 3 Temperature comparisons for multi step (three-step) solidification model at different times and different positions

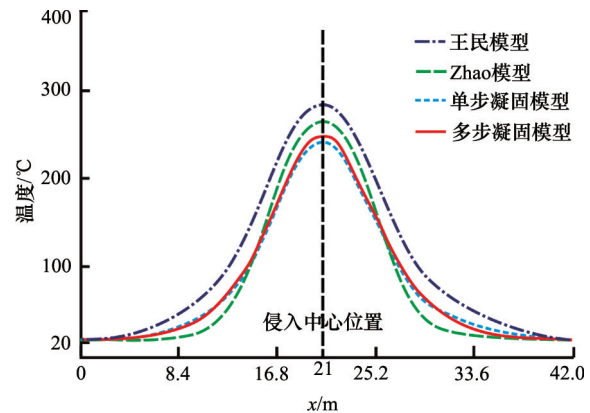


图4 计算217.2 d后不同模型的温度位置曲线

Fig. 4 Temperatures obtained by different models and at different positions after 217.2 days

高度相关。时间步长为21.72 d(即 $t=21.72$  d),模拟在217.2 d后,单步凝固模型和多步(三步)凝固模型的数值模拟的岩浆与围岩的温度最大差值分别为732.1°C和735.5°C,单步凝固模型和多步(三步)凝固模型的数值解最大温度差值为3.4°C。

为了验证所提出的瞬态数值模拟等效算法模型对岩浆侵入多孔岩石的热效应问题的适用性,将单步和多步模型与其他岩浆侵入热模拟效应模型进行了详细的对比(图4)。整体上,单步和多步(三步)凝固模型较Zhao模型计算的距离岩浆体不同位置的温度相对平缓,而普遍较王民模型计算的距离岩浆体不同位置的温度要低。

计算在217.2 d后,王民模型岩浆体中心的温度为276°C,明显高于其他模型计算得到的温度,而且该模型计算得到的岩浆体热效应影响范围最大;Zhao模型模拟的岩浆体附近的温度也较高,但是该模型计算得到的侵入岩浆体的影响范围有限,岩浆侵入后217.2 d后,热效应影响厚度仅为10 m左右;对于考虑了多孔储层中流体的热效应的单步和多步凝固模型,在岩浆侵入217.2 d后,其计算侵入岩浆中心的温度最低为242°C,较王民模型得到的温度低34°C;由于单步和多步

凝固模型考虑了多孔岩石(储层)中流体(水)的热扩散作用,使得岩浆体中心附近的温度低于Zhao模型计算的温度,而距离岩浆体中心超过约6 m( $x=15$ 或者 $x=27$ )以后,单步和多步凝固模型计算的温度高于Zhao模型计算的温度。对比单步凝固模型和多步凝固模型,单步凝固模型岩浆体中心温度较多步凝固模型岩浆体中心温度低4.5℃,而距离岩浆体中心超过约10 m后,单步凝固模型计算的温度高于多步凝固模型。多步(三步)凝固模型细化了计算模型,较单步凝固模型在原理上趋近于地质实际,但是多步(三步)凝固模型需要人为调整时间步长,分别设定各步的时间步长,增大了工作量和计算量,但计算效果提升有限。这表明,单步凝固模型的数值解,与多步(三步)凝固模型的数值解具有近似的精度,所以单步凝固模型是有效的模拟多孔岩石中岩浆侵入的热效应模型。

### 3 模型的应用

惠民凹陷是渤海湾盆地重要的油气资源区,凹陷内部构造相对复杂,表现出“多断少褶”的特征。火山岩大量分布是该地区的另一个特点,第三系沉积时期惠民凹陷火山活动频繁,发生了多次的岩浆侵入与喷出。火山岩岩体产状多样,有岩墙与岩床状的侵入相产出,也有火山锥、熔岩被等喷出相产出。以惠民凹陷东南部的商56区块沙三段油藏为例(图5),该油藏是一个遮挡型的砂岩油藏,位于侵入辉绿岩体北侧的商56井日产量达到80 t,油质较重,达到0.94 g/cm<sup>3</sup>,南侧商75井在2932 m处还可见沥青分布,而该油藏的油水界面高度为2928.4 m<sup>14</sup>。该油藏的成藏期为东营末期,而岩浆活动主要为沙四段-馆陶组沉积时期,岩浆侵入发生在成藏之后。从其油质与古油水界面的变化来看,辉绿岩体侵入促使油藏原油的裂解。该地区烃源岩正处于成熟期,且该地区未发现较大规模气藏,如果不考虑油藏中原油微渗漏,油藏储量减少量可以视作为岩浆热烘烤导致原油裂解,并且裂解后的天然气渗漏的结果,使其油藏储量减少量达2.53×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>。

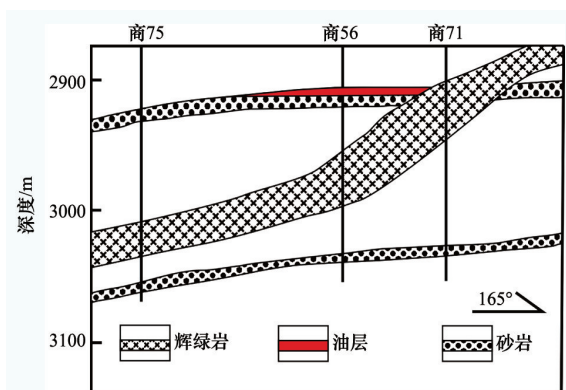


图5 商56区块油藏剖面  
Fig. 5 Profile of Shang 56 reservoir

采用单步凝固模型对该油藏进行火山岩热效应模拟,模拟输入参数:岩浆的比热容为780 J/(kg·K);热导率为2.5 W/mK,初始温度为1100℃,侵入岩浆的宽度为59 m;地温梯度为3℃/100 m,地表温度为20℃,侵入辉绿岩岩体密度为3 g/cm<sup>3</sup>;砂岩密度为2.5 g/cm<sup>3</sup>,热导率为1.9 W/(m·K);比热容为780 J/(kg·K),孔隙度为16%。

由单步凝固模型计算得知(图6),距离侵入岩浆边界为1倍侵入岩厚度(60 m)位置处,按赵文智<sup>15</sup>研究成果,原油裂解大量生气始于160℃,对应主生气期在Ro值大于1.6%的高-过成熟阶段,该处大量热裂解时间长达420年。相对于距离1倍侵入岩厚度处的长时间高温,在距离2倍侵入岩厚度(120 m)处热裂解期仅为3.2年,影响有限。

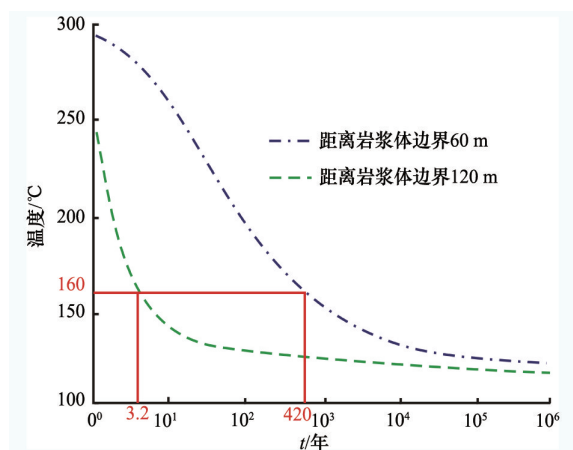


图6 商56区块油藏辉绿岩侵入后距离岩浆体边界不同距离热效应(单步凝固模型)

Fig. 6 The heat effect diagram of Shang 56 reservoir diabase intrusive magma at different distances from the magma boundary (Single-step solidification model)

为了进一步研究侵入岩浆热效应对油气裂解的影响,尝试结合化学动力原理计算该油藏的热解量,选用的原油动力学实验样品为渤海湾盆地东营凹陷的王580井Es<sub>4</sub>的原油样品<sup>16</sup>,该样品原油组成与该地区其他井(非异常热井)的原油性质相似,其热模拟数据及标定的油成气化学动力学参数如图7和图8所示。

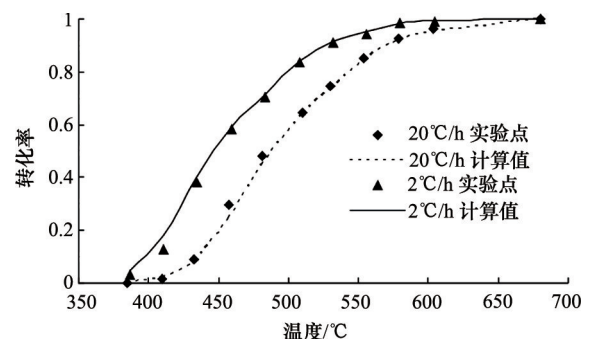


图7 王580井Es<sub>4</sub>油样裂解生气转化率曲线  
Fig. 7 Wang 580 well Es<sub>4</sub> oil cracked gas conversion rate

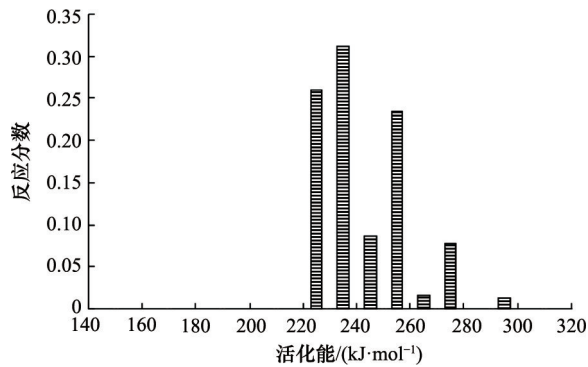


图8 王580井Es<sub>4</sub>油样裂解生气反应活化能分布

Fig. 8 Activation energy distribution of Wang 580 well Es<sub>4</sub> oil sample in reactions of cracking generate to gas

结合王580井原油成气化学动力学参数,在商56区块沙三段油藏辉绿岩侵入热场基础上进行地质外推<sup>[7]</sup>,计算了距离岩浆体不同距离处原油的裂解率(图9)。其中在距离岩浆体1/2岩浆体宽度(30 m)处,原油的总裂解率高达63%,是距离岩浆体1倍岩浆体宽度(60 m)处的3倍左右,是距离岩浆体2倍岩浆体宽度(120 m)处原油裂解率的21倍;且在距离岩浆体1/2岩浆体宽度(30 m)处,原油大量裂解长达100年之久,与赵文智等<sup>[15]</sup>认为的160℃确定的420年时长存在一定的差异。而距离岩浆体1倍岩浆体宽度(60 m)处裂解时长为18年左右,距离岩浆体2倍岩浆体宽度(120 m)处的裂解时长仅为2~3年。

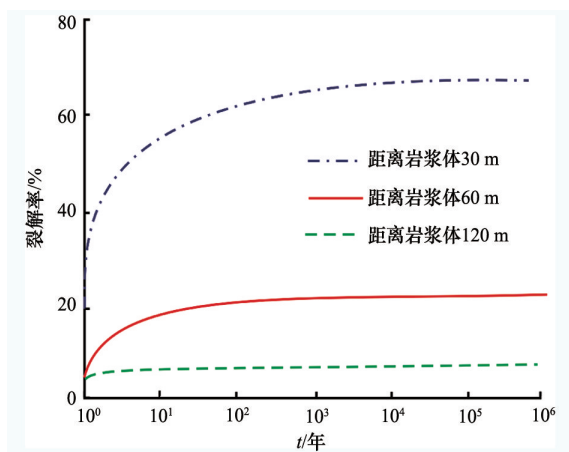


图9 商56区块油藏辉绿岩侵入后距离岩浆体边界不同距离裂解率对比(单步凝固模型)

Fig. 9 Cracking rate comparisons of Shang 56 reservoir in different distances from the diabase intrusive magma boundary (Single-step solidification model)

通过对细分距离岩浆体不同距离的计算得到的裂解率,结合现今原油储量,推算了油藏原油裂解量,推算公式为

$$q_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i(1 - T_{r_i})}{T_{r_i}}$$

式中第*i*个细分单元格, *n*为细分单元格的

个数;*q<sub>i</sub>*为第*i*个单元格的储量, *T<sub>r<sub>i</sub></sub>*为第*i*个单元格位置处的原油裂解率。推算得到的商56区块沙三段油藏热裂解量为9.02×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。模型计算热裂解量比古油藏总损失量少1.43×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,即这部分损失量就是油藏渗漏丢失的油气资源量,进一步说明该油藏可能是保存条件不是特别好的油藏,存在着大量的油气渗漏,并且损失的大部分是由于渗漏散失。

#### 4 结论

1) 提出了模拟地质系统中岩浆侵入/凝固热效应的等效算法,基于物理和数学方程上的等价原理用瞬态有限元分析原始岩浆侵入与岩石之间凝固边界移动问题,转化为一个带物理等效热源的没有运动边界的新问题。所提出的等效算法的主要优点是固定有限元网格大小,采用变积分时间步长用来模拟在传统的有限元分析的侵入岩浆凝固热效应,相关的成熟的热效应模型的对比也验证了所提出算法的正确性和有效性。

2) 通过多种热效应模型的对比发现,单步凝固模型的数值解与多步(三步)凝固模型的数值解具有近似的精度,所以单步凝固模型是有效的模拟多孔岩石中岩浆侵入的热效应模型。单步和多步(三步)凝固模型对比王民模型、Zhao模型后发现,单步和多步(三步)凝固模型与Zhao模型模拟的效果更为接近,从理论上也更接近地质实际。

3) 通过对商56区块沙三段油藏辉绿岩侵入热场模拟,推算得到的商56区块沙三段油藏热裂解量为9.02×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。指出该油藏的保存条件有限,存在着大量的油气渗漏,并且原油损失的大部分是由于渗漏散失。

#### 参考文献(References)

- [1] Galushkin Y. Thermal effects of igneous intrusions on maturity of organic matter: A possible mechanism of intrusion[J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(11-12): 645-658.
- [2] Chen Zhenyan, Yan Huo, Li Junsheng et al. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(6): 1004-1014.
- [3] 王民, 卢双舫, 薛海涛, 等. 岩浆侵入对有机质生烃作用的影响及数值模拟[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 177-184.  
Wang Min, Lu Shuangfang, Xue Haitao, et al. The effects of magmatic intrusions on the maturation of organic matter and its numerical simulation[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 177-184.
- [4] Thorpe A N, Senftle F E, Finkelman R B, et al. Change in the magnetic properties of bituminous coal intruded by an igneous dike, Dutch Creek Mine, Pitkin County, Colorado[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 40(1): 223-241.
- [5] 陈荣书, 何生. 岩浆活动对有机质成熟作用的影响初探:以冀中葛渔城—文安地区为例[J]. 石油勘探与开发, 1989, 16(1): 29-37.  
Chen Rongshu, He Sheng. A preliminary discussion of magma activity the maturation of organic matter: Taking Geyucheng—Wenan area of Hebei Province as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 16(1): 29-37.
- [6] 孙永革, 傅家谟, 刘德汉, 等. 火山活动对沉积有机质演化的影响及其

- 油气地质意义——以辽河盆地东部凹陷为例[J]. 科学通报, 1995, 40(11): 1019-1022.
- Sun Yongge, Fu Jiamo, Liu Dehai, et al. Effect of volcanism on maturation of sedimentary organic and its significance for hydrocarbon generation, a case; East Sag of Liaohe Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(11), 1019-1022.
- [7] Wang X, Lerche I, Walters C. The effect of igneous intrusive bodies on sedimentary thermal maturity[J]. Organic Geochemistry, 1989, 36(3): 303-307.
- [8] Hurter S J, Pollack H N. Effect of the Cretaceous Serra Geral igneous event on the temperatures and heat flow of the Paraná Basin, southern Brazil[J]. Basin Research, 1994, 6(4): 239-244.
- [9] Fjeldskaar W, Helset H M, Johansen H, et al. Thermal modelling of magmatic intrusions in the Gjallar Ridge, Norwegian Sea: Implications for vitrinite reflectance and hydrocarbon maturation[J]. Basin Research, 2008, 20(1): 143-159.
- [10] 张东辉. 多孔介质扩散、导热、渗流分形模型的研究[D]. 南京: 东南大学, 2003.
- Zhang Donghui. Diffusion, percolation and heat conduction in fractal porous media[D]. Nanjing: Southeast University, 2003.
- [11] Zhao C B, Hobbs B E, Ord A, et al. An equivalent algorithm for simulating thermal effects of magma intrusion problems in porous rocks[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, 38(13): 2479-2488.
- [12] 许飞, 郭钢, 胡康, 等. 稠油油藏中含内热源多孔介质的传热研究[J]. 石油化工应用, 2012, 31(2): 28-31.
- Xu Fei, Guo Gang, Hu Kang, et al. The research on heat transfer of combustible porous media with inner heat source[J]. Petrochemical Application, 2012, 31(2): 28-31.
- [13] Neuman S P. On advective transport in fractal permeability and velocity [J]. Water Resource Research, 1995, 31(6): 1455-1460.
- [14] 操应长, 杨剑萍. 湖盆火山作用与油气的关系——以惠民凹陷第三系火成岩及其油藏为例[J]. 地质评论, 1999, 45(增刊): 587-593.
- Cao Yingchang, Yang Jianping. Relation between the Lacustrine volcanism and hydrocarbon—A case study of the tertiary igneous rocks and related reservoirs of the Huimin depression[J]. Geological Review, 1999, 45(supplement): 587-593.
- [15] 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1-7.
- Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Zhang Shuichang, et al. Successive generation of natural gas materials and its significance exploration from organic in future[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 1-7.
- [16] 于仲坤, 薛海涛, 卢双舫, 等. 东营凹陷 Es4-Ek 油气资源评价[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(27): 1671-1815.
- Yu Zhongkun, Xue Haitao, Lu Shuangfang et al. Oil and gas resource evaluation of Es4 and Ek formation, Dongying Depression[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(27): 1671-1815.
- [17] 卢双舫. 有机质成烃动力学理论及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 37-129.
- Lu Shuangfang. Hydrocarbon generation by organic matter dynamics theory and application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 37-129.

(编辑 陈华蛟)

## ·学术动态·



中国科学技术协会

## 国际科学大师论坛在云南师范大学举办

2014年5月24日,第16届中国科协年会国际科学大师论坛在云南师范大学举办。中国科协副主席、书记处书记陈章良出席论坛。2000年图灵奖获得者、清华大学理论计算机科学研究中心主任姚期智教授主持论坛。1991年诺贝尔生理学奖获得者、德国哥廷根大学教授厄温·内尔,1982年菲尔兹奖获得者、美国哈佛大学教授丘成桐,1996年诺贝尔物理学奖获得者、美国斯坦福大学教授道格拉斯·奥谢罗夫出席论坛,分别做题为“脑研究与人类生活”、“现代数学和其他科学的交互影响”、“科学进步的历程”的主旨报告。来自全国的600多位科研人员参加论坛。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/15668186.html>。