

研究沉积层热导率变化的层析成像方法

薛爱民 焦灵秀

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

由于岩层的骨架热导率在整个沉积演化期内基本保持不变,所以可被看作常量。在流体性质不变的前提下,已经胶结成层的岩石的热导率仅随孔隙度和温度的变化而变化。通过对热史的计算机模拟和沉积史的模拟,可对不同时代的岩石热导率反演成像,从而获得不同时代与不同深度的热导率图像。本文讨论了利用磷灰石裂变径迹和镜质体反射率资料对热导率成像的方法,并给出一个利用镜质体反射率成像的理论模型。

关键词 热导率 层析成像 镜质体反射率 磷灰石裂变径迹

第一作者简介 薛爱民 男 39岁 副研究员 地球物理

岩石的热物理性质参数之一——热导率随岩石的矿物组成、颗粒粒度、粒形、粒结构以及孔隙度、温度、流体性质的变化而变化(Andrews CP等,1984)。如果忽略岩石沉积后流体性质的变化,对于一个已胶结成岩的岩石来说,影响其热导率变化的主要因素是孔隙度和温度。由于在实验室内测量的岩石热导率值不能直接应用于热史研究,它必须经过温度和孔隙度校正。一般情况下,这种校正是相当困难的,主要原因是我们并不知道岩石样品在地史时期内所经受的温度。虽然近十几年来,盆地模拟技术已经得到了广泛的发展,使油气盆地的演化和形成得以在计算机上得到重现,但这种技术强烈地依赖于热史模拟的正确性,然而地史时期内变化的热导率有时制约热史模拟的精度,所以对热导率随时间变化的研究成为热史研究中的重要环节。

本文从磷灰石裂变径迹资料和镜质体反射率资料出发,探讨沉积岩层热导率的成像技术。本文提出的层析成像方法是指建立在空间和时间两种坐标系下的方法。在不同的地史时间段,同一岩层的热导率呈现出不同的图像。从现今时代的热导率空间分布状态,反演以往某一时刻的热导率空间分布状态是本文的层析成像方法的含义。

1 基本原理

如上所述,热导率 k 随时间的变化主要起因于温度 T 和孔隙度 φ 的变化。若通过沉降史的恢复,获得了岩石各时代的孔隙度 φ 变化值,则热导率 k 仅是温度 T 的函数。考查如下方程:

$$AU = F \quad (1)$$

式中 F 是实测数据集合,实测数据包括镜质体反射率 R^0 、裂变径迹长度和退火年龄等; A 是系数矩阵; U 是解集。 U 包括从镜质体反射率 R^0 或裂变径迹资料获得的热史、热导率及剥蚀厚度等。

为了从(1)式反演出解 U ,针对不同的实测数据 F ,采用不同的计算方法。当应用磷灰石裂变径迹资料研究热导率变化时, F 为径迹长度分布实测值与预测值之偏差矩阵;(1)式中

等式左边的 AU 是与径迹长度分布和整个地史时期的热历史有关的表示式。当应用镜质体反射率 R° 资料研究热导率变化时, F 为实测的 R° 值与预测的 R° 值之偏差矩阵; AU 则是与 R° 和温度有关的矩阵。

如果温度 $T(t)$ 被模拟, 热导率可从:

$$k = \left(k_s \cdot \frac{T_s + 273}{T(t) + 273} \right)^{1-\phi} \cdot 0.67^\phi \quad (2)$$

式中得出 (Dave Deming 等, 1989)。(2) 式中的 T_s 为地表温度, $T(t)$ 为岩石某时刻温度。

在利用磷灰石裂变径迹资料研究热导率的情况下, (1) 式中的 AU 的表示式 (即与裂变径迹长度、退火年龄及热史有关) 可由以下一系列关系式给出:

裂变径迹退火程度称为退火率, 用 r 表示, 它是原始长度 L_0 ($L_0 \doteq 16.5 \mu\text{m}$) 和某时刻径迹长度 L 之比, $r = L/L_0$ 。 r 与时间和温度 T_s 的关系可写成 (Green P F 等, 1989):

$$T_s = [\ln(ta) - A(r)]^{-1} \cdot B(r) \quad (3)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} A(r) = -28.12 \\ B(r) = [g(r) + 4.87] / 0.000168 \\ g(r) = \{ [(1-r^{2.7}) / 2.7]^{0.35} - 1 \} / 0.35 \end{cases}$$

将地史时期的热演化过程分成几小段, 在每段内视温度为常数, 则可依上式写出 (Lutz TM 等, 1991)。

$$r_j = (1 - 2.7 \cdot \{ 1 + 0.35 \cdot \{ -4.87 + 0.000168 \cdot T_j \cdot [\ln(teg + \Delta t_j + 28.12)] \} \}^{1/0.35})^{1/2.7} \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

其中 teg 为温度 T_j 所对应的等效时间, 即

$$\ln(teg) = -28.12 + [g(r_j - 1) + 4.87] / (0.000168 T_j) \quad (5)$$

通过 (4) 式得出各时间段上的退火率 r_j , 由此长度分布也可求出。

裂变径迹资料中另一个重要的实测值为退火年龄 FTA 。它可从长度分布中求出:

$$FTA = Rnt_o \cdot (\sum d_j) / n \quad (6)$$

其中:

$$Rn \doteq 1.07$$

$$d_j = r_j \quad 0.66 < r_j \leq 1$$

$$d_j + 2.15r_j - 0.76 \quad 0.35 < r_j \leq 0.66$$

$$d_j = 0 \quad 0 < r_j \leq 0.35 \quad (7)$$

t_o : 退火时间。

从 (3) 式可以得知: T_s 越高, r 越小, 即温度升高的结果使裂变径迹长度缩短。公式 (6) 说明: 温度升高的结果, 使退火年龄变小。

在利用镜质体反射率 R° 资料研究热导率时, (1) 式中等式左边项 AU 可用以下关系式

(Wood DA 等, 1988)表示:

$$\Sigma TTI = \left[\sum_{n=1}^{n=m} \frac{A}{Q_n} \left(\frac{RT_{n+1}^2}{E + 2RT_{n+1}} e^{-E/RT_{n+1}} - \frac{RT_n^2}{E + 2RT_n} e^{-E/RT_n} \right) \right] + \left[\sum_{n=1}^{n=m} (t_{n+1} - t_n) A \cdot e^{-E/RT_n} \right] \quad (8)$$

$$T_n = T_{n-1}$$

式中: A = Arrhenins 方程系数, 可取为 61.56,

E = 活化能, 取 218 kJ/mol.

$Q_n = \frac{dT}{dt}$, 为加热率.

$R = 0.008314$ kJ/molK, 气体常数,

T = 温度(K)

t = 时间(Ma)

而镜质体反射率 R° 与 TTI 的关系可表示为:

$$\log R^\circ \% = -0.0001(\log \Sigma TTI)^3 + 0.003(\log \Sigma TTI)^2 + 0.109(\log \Sigma TTI) + 0.106 \quad (9)$$

(8)、(9)两式指出镜质体反射率 R° 与温度 T 的对应关系。

2 反演热史的方法

从磷灰石裂变径迹资料获取热史的方法可归结为对(1)式的求解, 具体的反演技术可从目标函数(Lutz TM 等, 1991):

$$W = m_1 w_1 + m_2 w_2 \quad (10)$$

的极小值的估算中得到。上式中 m_1 、 m_2 为权系数, 而 w_1 、 w_2 由下式给出:

$$W_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f_i^p - f_i^o]^2 \quad (11)$$

$$W_2 = \frac{(FTA^p - FTA^o)^2}{(2\sigma)^2} \quad (12)$$

式中: N 为径迹长度分布直方图的段数

f_i^p 为预测的长度分布值

f_i^o 为实测的长度分布值

FTA^p 为预测的年龄值

FTA^o 为实测的年龄值

σ 为年龄测量中的标准差

由镜质体反射率 R° 资料求取热史的方法与上述方法基本相同, 只是上述各公式(11)、(12)式中的参数意义不同。

通过用磷灰石裂变径迹资料和镜质体反射率 R^0 资料对热史进行反演,可以获得在不同地史时期的、不同空间位置上的热参数特征,并对此成像。这种不同时期的、不同水平层面或

表1 理论模参数表

岩层	年龄 (Ma)	现今热流 mW/m^2		岩石骨架热 (W/nt)	初始孔隙度	孔隙衰减因子	岩性
		基底热流	放射性热流				
第 I 层	20	46	24	2.2	0.6	0.407	泥页岩
第 II 层	40	46	24	3.0	0.45	0.404	粉砂岩
第 III 层	50	46	24	3.5	0.4	0.403	砂岩
第 IV 层	80	46	24	4.4	0.4	0.403	含砾砂岩
第 V 层	100	46	24	3.3	0.5	0.406	泥质砂岩

空间垂直断面上的热参数图像,可以得出某一区域内的岩石热导率的分布特征。

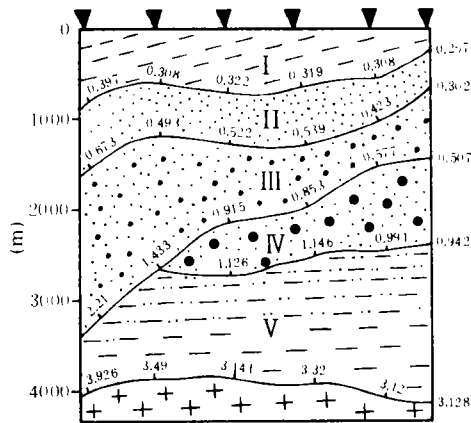


图1 地质模型(注:图中数字为 R^0 值,图例见表1)

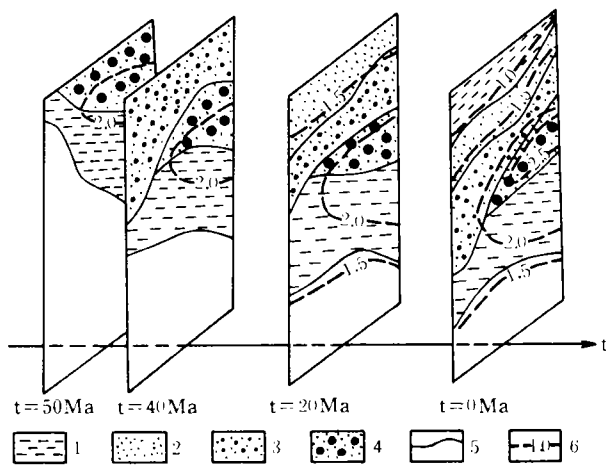


图2 地质断面不同时间热导率成像图

3 理论模型成像算例

本文设计了一个应用镜质体反射率资料 R^0 对热导率层析成像的模型, 模型参数见表 1。

地质模型见图 1, 这里显示了一个有 6 个钻孔, 每个孔均有镜质体反射率 R^0 资料的地质剖面图。对每个钻孔的镜质体反射率 R^0 资料作热反演, 并获得各时代的热导率图像(图 2)。

从图 2 看出, 现今热导率最大值分布于含砾砂岩层内, 它的最大值大于 $2.5W/m \cdot k$, 但 20Ma 以前, 该岩层中热导率却达不到 $2.5W/m \cdot k$ 。随着年代久远, 该岩层的热导率随温度降低本应升高, 但却由于孔隙度的增大、含水性增强, 热导率反而降低。

通过对岩石热导率在空间和时间上进行成像, 可以清楚地了解除在不同地史时期内某一地区的岩石热导率的性质及其演化过程, 有助于对这一地区的热演化史的认识。

刘光鼎教授在百忙中领导和指导了这项研究工作, 谨表谢意。

(收稿日期: 1992 年 11 月 24 日)

参 考 文 献

- 1 Andrews-Speed, Oxburgh ER and cooper BA. — Temperature and Depth—Dependent Heat Flow in Western North Sea, *AAPG Bulletin* 1984, 68, 1764~1781
- 2 Dave Deming and David Shapmans. Thermal Histories and Hydrocarbon Generation; Example form Utah—Wyoming Thrust Belt, *AAPG Bulletin*, 1989, 73, 1455~1471
- 3 Green PF, Duddy IR, Laslett GM, Hegarth KA, Gleadow AJW and Lovering JF. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales, *Chemical Geology* (Isotope Geoscience Section), 1989, 79, 155~182
- 4 Lutz TM and Goma Omar. An inverse method of modelling thermal histories from apatite fission-track data, *Earth and Planetary Science Letters*. 1991, 104, 181~185
- 5 Wood DA, Relationships Between Thermal maturity Indices Calculated Using Arrhenius Equation and Lopatin Method; Implications for Petroleum Exploration, *AAPG Bulletin*. 1988, 72, 115~134

ON TOMOGRAPHY APPLYING IN THE THERMAL CONDUCTIVITY VARIATION OF SEDIMENTARY FORMATIONS

Xue Aimin Jiao Lingxiu

(*Research Institute of Geophysics, Academia Sinica*)

Abstract

As the thermal conductivity of sedimentary formations is stable throughout the period of sedimentary evolution, it can be regarded as a constant. With a premise of invariable of fluid property, the thermal conductivity of cemented rocks changes only with the variation

of porosity and temperature. By the computer modellings on thermal history and sedimentary history, the thermal conductivity of rocks in different times can be inversed and imaged, obtaining the images of thermal conductivity in varing times and depths. In this paper, the authors discuss the imaging method of thermal conductivity according to the fission track of apatite and the data of vitrinite reflectivity and suggest a theoretical model of imaging using vitrinite reflectivity.