

断层作用热模型及其对烃源岩热演化的影响

童亨茂¹, 张生根², 胡远清³

(1. 石油大学石油与天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102200;

2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 湖北鄂东北地质大队, 湖北 孝感 432100)

摘要: 从盆地的应力状态分析入手, 从断层摩擦生热的角度, 建立了断层作用生热的定量模型。在此基础上, 确定了断层摩擦产生的热量与断层的性质、深度、构造应力和流体压力等之间的定量关系, 定量分析了断层摩擦生热对烃源岩热演化的影响。结果表明: 断层作用的生热量主要决定于断层的深度, 构造应力的大小、流体压力、断层的位移量、断面摩擦系数等; 断层的活动速率对断层摩擦的生热量没有影响, 但对断层带内产生的温度却起决定性的作用; 在断层快速活动的条件下(地震型), 断层摩擦生热虽然可以产生很高的温度, 可以造成断层附近岩石的局部熔融, 但其影响范围和影响持续的时间是十分有限的。

关键词: 断层; 摩擦生热; 定量模型; 热演化

中图分类号: P542+.31

文献标识码: A

0 引言

断层摩擦生热造成的构造动力变质作用现象在野外是比较常见的: 如同一动力变质岩带中, 常见强(深)、弱(浅)变质岩石, 或不同温压条件下形成的变质矿物呈线性条带分布, 彼此相邻、相间或相互过渡, 甚至在一条断裂带中也出现条带状混合岩和花岗岩化带^[1]; 应力矿物和玻化岩(假玄武玻璃岩)等断层挤压摩擦、碰撞等构造动力变质作用形成的产物经常在断裂带附近出现^[2-3]; 新疆的一金矿与断裂变质作用有关^[4]; 全球俯冲带在仰冲板块上发育的火山也与板块间相对运动造成的摩擦作用密切相关。对此, 莫柱荪^[5]、杨开庆^[6]分别称之为“断裂变质作用”或“构造动力成岩成矿作用”。

按照动-热能量转换与耗散原理, 在构造动力持续作用下, 构造动能转化为热能, 促使构造带中的物质在变形的同时产生变质。Furlong等^[7]的研究表明: 冷系统因断层活动剪切摩擦生热而转化为热系统是可能的。

构造动力作用产生热而引起变质作用的现象已有很多学者作了研究^[1-6,8]。但对构造动

收稿日期: 2006-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40372098)资助。

作者简介: 童亨茂(1967-), 男, 浙江省嵊州市人, 副教授。1992年获北京大学理学硕士学位。主要从事盆地构造分析、构造应力场、构造物理模拟等方面的研究工作。

力作用产生的热量的定量研究和由此产生的热量对周围烃源岩热演化的影响范围、程度至今还没有一个明确的认识。

烃源岩的热演化受基底构造变动、基底热流、沉积速率、岩石热导率、放射性生热率、各种类型的热事件等多种因素的控制^[9]，而构造动力作用生热对烃源岩热演化的影响是有待进一步深入研究的课题。

构造动力作用产生热量从本质上说是机械能转化为热能，其中断层活动的摩擦作用是能量转化的主要方式。由于烃源岩主要分布在沉积盆地中，本文研究主要针对沉积盆地，从盆地的应力状态分析入手，从断层摩擦生热的角度，建立断层作用生热的定量模型，定量地研究不同类型盆地中不同性质、深度、规模、活动速率、活动历史的断层摩擦产生的热量及其对烃源岩热演化的定量影响，确定断层活动对烃源岩成熟度的影响程度和影响范围。

1 沉积盆地的应力状态

一方面断层的活动方式受地应力的控制，另一方面，断层活动产生的热量与地应力状态密切相关。为此，为建立断层摩擦生热的定量模型，先分析盆地的应力状态。

1.1 地应力的构成

地壳内每一点的应力状态都可以由3个相互垂直的主应力表示(σ_1 、 σ_2 、 σ_3)，在盆地内往往是水平方向和竖直方向的。地壳内岩体的变形是几对力引起的应力联合作用的结果，其中最主要的力是构造力和重力。

在岩石非线性弹性变形的假设条件下，3个方向的主应力分别为^[10]

$$\sigma_{gv} = \rho gh \quad (1)$$

$$\sigma_{h1} = \sigma_{gv} \times \left[\frac{\mu}{1-\mu} \right]^{1/n} + \sigma_{ii} \quad (2)$$

$$\sigma_{h2} = \sigma_{gv} \times \left[\frac{\mu}{1-\mu} \right]^{1/n} + \sigma_{ia} \quad (3)$$

其中： ρ 为上覆岩石的平均密度， h 为深度， g 为重力加速度， μ 为泊松比， n 为与非线性压缩有关的常数，一般岩石采用0.67； σ_{ia} 、 σ_{ii} 分别为水平方向的最大构造应力和最小构造应力； σ_{gv} 、 σ_{h1} 、 σ_{h2} 分别为竖直方向和水平方向的主应力，其大小和排列顺序由盆地的性质、活动情况和深度决定。

1.2 地应力的大小

对于盆地地应力的性质和大小，目前还存在一种错误的认识，即伸展盆地水平伸展方向的主应力是张性的。实际上，超过一定的深度张应力就不存在了^[10]。世界上已有盆地的地应力测量结果也证实了这一点。因此超过一定的深度(50~200m)，3个方向的主应力都是压性的，伸展盆地也是如此，只是其中的最大构造应力分量(σ_{ia})是张性的。

在不同性质的盆地和盆地演化的不同阶段，构造作用引起的构造应力可以有很大的变化，但构造应力在盆地中基本上是近水平的。伸展盆地、挤压

表1 不同盆地发生断裂时的构造应力估算结果(据王平, 1993)

Table 1 Estimates of tectonic stress values in different types of basins during faulting

埋深 /m	最大挤压构造应力 (挤压盆地) /MPa	最大伸展构造应力 (伸展盆地) /MPa
1000	120	3
2000	177	6
3000	222	9

盆地的构造应力的差别很大, 根据王平^[8]对发生断裂时的地应力的估算(表1), 挤压盆地活动期的构造应力比伸展盆地的构造应力大一个数量级以上。

2 断层摩擦生热的定量模型

2.1 理论模型

断层摩擦生热决定于断层面上有效正应力(有效正压力)、断层面的面积和断层活动产生的滑距。根据前面的分析, 在盆地内, 垂向主应力为重力应力, 水平方向的主应力为重力应力和构造应力的代数和(见式(2)和式(3))。根据计算, 倾角为 θ 、走向与构造主压应力方向夹角为 ϕ 、深度为 h 的断层在断面上的正压力 σ_n 为:

$$\sigma = \left\{ \rho_s g h [(1 + \cos 2\theta) + (1 - \cos 2\theta) \left(\frac{\mu}{1 - \mu} \right)^{1/n}] + \left(\frac{\sigma_{ia} + \sigma_{ii}}{2} - \frac{\sigma_{ia} - \sigma_{ii}}{2} \cos 2\phi \right) (1 - \cos 2\theta) \right\} / 2 \quad (4)$$

流体压力 p 为:

$$p = f \rho_w g h \quad (5)$$

则断面上的有效正压力为: $\sigma'_n = \sigma_n - p$

假定断层为平板断层, 则滑距为 l 时, 单位面积(m^2)摩擦产生的热量为:

$$W = k \sigma'_n l \quad (6)$$

其中 f 为流体压力系数, k 为摩擦系数, ρ_w 为水的密度。

2.2 数值分析

下面根据上述建立的断层生热量理论模型, 针对具体的断层参数, 来估算一下断层摩擦生热量的具体数值。

根据断层生热量理论模型(见式(4)~(6)), 编制了单位面积($1m^2$)断层的摩擦生热量与断层的滑移量、深度、构造应力和流体压力系数之间的关系图(图1~图4)。

从图1中可以看出, 假定断层在3000m的深度, 断层的位移量为1000m, 断面的摩擦系数为0.5, 流体压力系数为1.0, 则单位面积($1m^2$)断层摩擦所做的功约为11500MJ(兆焦耳)。若断层摩擦所做的功都转化为热量(事实上滑动摩擦所做的功绝大部分转化为热能), 则这一数量的热量相当于同样面积、厚度约为3.5m、温度为1100℃的花岗岩岩浆冷却到常温时所产生的热量。若断层的位移量减小到10m(在地震活动时主断层的位移幅度约为1~5m, 大的可以到10m这一量级^[11-12]), 在上述条件下, 所做的功相当于同样面积、厚度为0.8~3.5cm(流体压力系数为1.6~1.0)、温度为1000℃的花岗岩岩浆冷却所产生的热量(一般岩石的比热容见表2)。这一结果表明, 由于断层的快速活动(地震), 断面摩擦产生的热量来不及逸散, 足可以造成断面附近的岩石瞬时熔化而形成玻化岩(假玄武玻璃), 但熔化的量是十

表2 部分岩石的密度、比热容测试数据^[13]

Table 2 Densities and thermal capacities of part of rocks

岩类	密度 /g·cm ⁻³	比热容 /kJ·(kg·K) ⁻¹
石英砂岩	2.748	0.921
粉砂岩	2.874	0.876
硅质岩	2.732	0.863
花岗岩	2.757	0.901
灰岩	2.721	0.913
粗安岩	2.630	0.879
角砾凝灰岩	2.691	0.917

分有限的(根据上述估算,在盆地深度范围内(一般小于8000m),形成的玻化岩厚度一般不会超过5cm)。

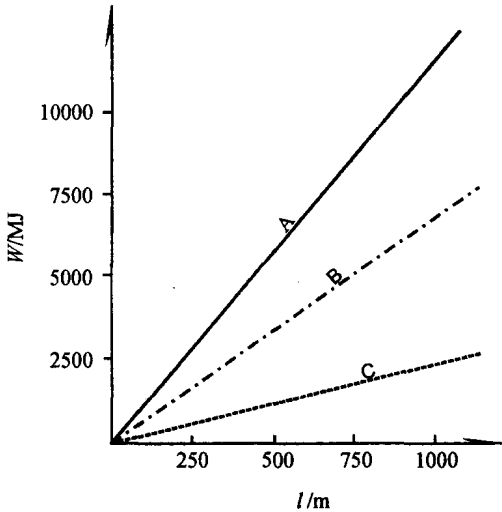


图1 断层单位面积摩擦生热量与断距的关系

Fig.1 Relationship between frictional heat per unit area on the fault plane and fault displacement

直线A、B、C分别代表流体压力系数为1.0、1.3、1.6时断层单位面积的摩擦生热量随断距而产生的变化,其中 $h=3000\text{m}$, $\theta=45^\circ$, $\sigma_{ii}=\sigma_{oo}=0$, $\mu=0.3$, $k=0.5$

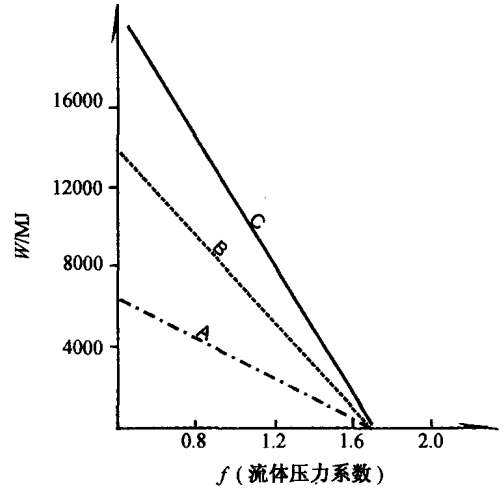


图2 断层单位面积摩擦生热量与流体压力系数的关系

Fig.2 Relationship between frictional heat per unit area on the fault plane and fluid pressure factor

直线A、B、C分别代表断层深度为1000m、2000m、3000m时断层单位面积的摩擦生热量随流体压力系数而产生的变化,其中 $l=1000\text{m}$, $\theta=45^\circ$, $\sigma_{ii}=\sigma_{oo}=0$, $\mu=0.3$, $k=0.5$

2.3 影响因素分析

从断层生热量的理论模型(式(4)、(5)和(6))分析,影响断层摩擦生热量数值的因素有上覆岩层的平均密度(一般变化不大)、断层的深度、断层的走向与倾角、构造应力大小、岩石物性、流体压力、断层的滑动距离等因素,若考虑单位时间的生热量,还与断层的活动速率有关。这些因素的影响方式和程度是不一致的,下面分别加以分析。

(1) 深度

从式(4)可以看出,断层摩擦的生热量与断层的深度线性正相关。在不考虑构造应力的情况下,断层活动的摩擦生热量与深度成正比(图2)。

(2) 断层的走向与倾角

断层走向是与构造应力(差应力)联系起来影响断层摩擦生热量的。差应力大,断层走向影响就越大;反之影响就小。

(3) 构造应力的大小

从式(4)右端第二项可以看出,构造应力对断层摩擦生热量的影响主要表现为两项,一项为平均构造应力,另一项为差异构造应力。断层摩擦产生的热量与构造应力线性正相关(图4)。

平均构造应力与盆地的性质和活动强度相关(表1)。对于挤压性盆地,在3000m的深度,最大构造应力可达到220MPa;而对于张性盆地,在同样深度,最大构造应力一般为5~

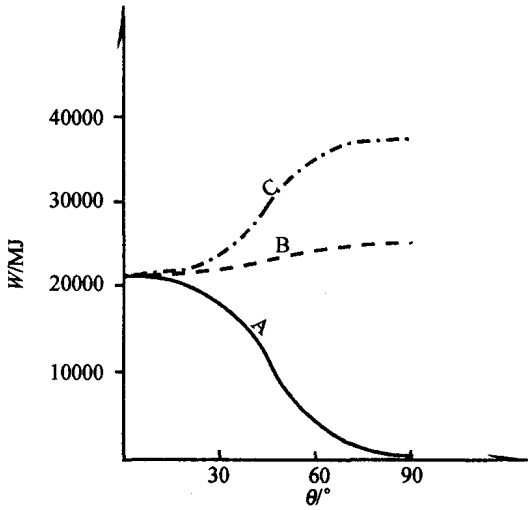


图 3 断层单位面积摩擦生热量与断层倾角的关系

Fig.3 Relationship between frictional heat per unit area on the fault plane and fault dip angle

曲线 A、B、C 分别代表最大构造应力 σ_{ia} 为 -5、100、150MPa (压应力为正) 时, 断层单位面积的摩擦生热量随断层倾角而产生的变化, 其中 $h = 3000\text{m}$, $l = 1000\text{m}$, $\phi = 90^\circ$, $\sigma_{ii} = 0$, $\mu = 0.3$, $k = 0.5$, $f = 1.0$

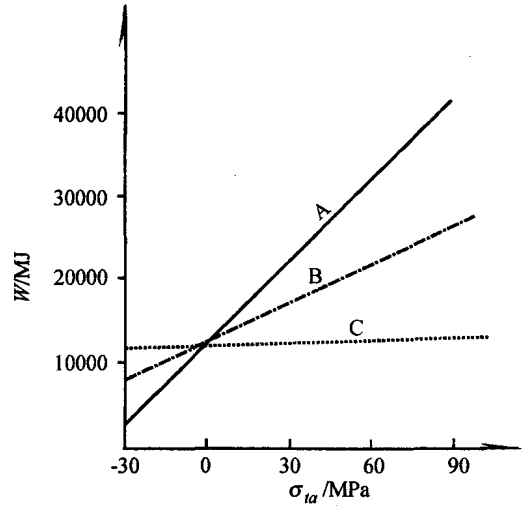


图 4 断层单位面积摩擦生热量与构造应力的关系

Fig.4 Relationship between frictional heat per unit area on the fault plane and tectonic stress

直线 A、B、C 分别代表 ϕ 值为 90° 、 45° 、 $\phi = 0^\circ$ 时, 断层单位面积的摩擦生热量随构造应力而产生的变化, 其中 $h = 3000\text{m}$, $l = 1000\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $\sigma_{ii} = 0$, $\mu = 0.3$, $k = 0.5$

20MPa。这样, 在其他条件相同的情况下, 压性盆地断层的摩擦生热量要大得多。

差异应力主要与盆地的活动性有关, 也与盆地的性质有一定的关系。它主要使盆地内不同走向的断层表现为各向异性, 差应力越大, 不同方向断层摩擦生热量的各向异性程度就越高。

(4) 岩石物性

岩石物性对断层摩擦生热量的影响表现为两个方面, 一方面通过改变断面的正压力来产生影响, 另一方面通过影响摩擦系数来产生影响, 其中后一方面的影响可能要大一些。

(5) 流体压力 (流体压力系数)

从式 (5) 可以看出, 流体压力的作用减小了断面上的有效正压力, 这样, 流体压力越大, 断面的有效正压力就越小, 断层摩擦生热量就越小。另外, 流体的存在还会影响断面的摩擦系数, 流体压力越大, 摩擦系数往往就越小。

流体压力对断层摩擦生热量的影响是非常大的 (图 3)。在图 3 所示的条件下, 如对于倾角为 45° 的断层, 压力系数为 1.6 时断层的摩擦生热量约是压力系数为 1.0 时的 1/8。

(6) 摩擦系数

断面的摩擦生热量与摩擦系数成正比。断面的摩擦系数决定于断面两侧的岩性、断面的性质和活动情况、流体的性质与含量等。一般情况下, 岩石的摩擦系数为 0.15 ~ 0.7。

(7) 断层的滑距

断层的摩擦生热量与滑距成正比 (图 2)。不同规模的断层, 其滑距有很大的差异, 如俯冲带断层的滑移距离可达数千公里, 微小断层的断距可以小于 1.0m。

(8) 断层的活动速率

断层的活动速率对断层摩擦的累计生热量没有影响,但对断层带内的温度却起决定性的作用。在断层的快速运动时(如地震),虽然断层的位移量是十分有限的(几米的数量级),但可以造成瞬间的高温,而形成玻化岩^[2~3];而对于断层的低速运动(断层正常的活动速率都是很低的,一般为1~1000mm/ka),虽然累计的摩擦生热量可以很大,但由于热量来不及聚集就发生扩散,断层带内无法形成高温。具体的断层带内温度的定量变化在下面详细讨论。

3 断层摩擦生热对烃源岩热演化影响的定量分析

断层摩擦生热对烃源岩热演化的影响主要决定于断层的摩擦生热量和断层的活动速率。断层的活动速率在稳滑的情况下是十分缓慢的(断层正常的活动速率一般为1~1000mm/ka,如岷江断裂北段第四纪以来发生快速活动,活动速率为1000mm/ka^[14]),但在地震活动的情况下,断层的活动速率则可以是很高的,在瞬间(以秒为量级)断层的活动量可达数米。在这两种情况下,断层的活动速率的差距在8~11个数量级以上。在稳滑情况下,由于断层的活动速率非常低,虽然累计的摩擦生热量可以很大,但是热量来不及聚集就发生扩散,对烃源岩的热演化基本上没有什么影响,下面主要针对断层的快速活动(地震型)来分析。

断层在快速活动的条件下(地震活动),断层摩擦产生的热量是很短的时间内完成的,因此可以认为是瞬间产生的。这样,在地震活动条件下,断层摩擦产生的热量对周围烃源岩热演化的影响相当于瞬时侵入、具有一定厚度、同样热容量的层状岩浆对周围烃源岩的影响。从前面断层摩擦生热量的定量分析(见图1~图4)可以看出,在3000m的深度,断层的位移量为10m(相当于这一深度断层在地震活动中的最大位移)的情况下,单位面积(1m²)断层摩擦所做的功一般不会超过400MJ(兆焦耳),这一数量的热量相当于同样面积、厚度约为10cm、温度为1000℃的层状花岗岩岩浆冷却到正常温度(3000m的深度正常地温约为100℃左右)所产生的热量。这样,我们可以通过对层状花岗岩浆冷却散热过程模型的研究来分析地震型断层活动对烃源岩热演化的影响。

3.1 层状岩浆侵入体散热过程的数学模型

本文对层状岩浆侵入体散热过程的数学模型主要基于以下几点假设:

- (1) 侵入体的侵入是瞬时发生的;
- (2) 散热主要以热传导的方式进行;
- (3) 侵入体和围岩的热扩散率都是均匀的。

那么,处于任意深度 z 和任意时间 t 的温度 $T(z, t)$ 就可以描述如下^[7]:

$$T(z, t) = T_s + Q(t) \int_0^z \frac{dz}{k(z)} + \left[4\pi(t - t_1) \right]^{-\frac{1}{2}} \int_{z_1(t)-L}^{z(t)} dy K(y)^{-\frac{1}{2}} \left[T_1 - T_s - Q(t) \int_0^y \frac{dz'}{k(z')} \right] \times \left\{ \exp \left[\frac{-(z-y)^2}{4K(y)(t-t_1)} \right] - \exp \left[\frac{-(z+y)^2}{4K(y)(t-t_1)} \right] \right\} \quad (7)$$

式中 T_s 为地表温度, $Q(t)$ 为时间为 t 时刻的基底热流值, $K(z)$ 为深度 z 和时间 t 时刻的热传导率, $K(y)$ 为热扩散率常数, T_1 为侵入体的侵入温度, t_1 为侵入体的侵入时间, L 为侵入体的厚度, $z_1(t)$ 为 t 时刻下部边界的深度。

取地表温度 $T_s = 10^\circ\text{C}$;基底热流值 $Q(t) = 45\text{mW/m}^2$;热传导率 $K(t) = 1.25\text{m/Wk}$;

扩散率常数 $K(\gamma) = 0.01\text{cm}^2/\text{s}$ 。那么只要给出侵入时间 (t_1)、侵入深度 (z)、侵入温度 (T)、侵入体的厚度 (L) 就可以利用式 (8) 计算任意深度下温度的演化史。

3.2 数值计算

根据上述建立的瞬时侵入、层状岩浆散热作用的理论模型，利用计算机编程计算了厚度为 10cm、温度为 1000℃ 的层状花岗岩岩浆在 3000m 深度的冷却散热过程中随着时间的变化对周围烃源岩热演化的影响 (图 5, 地表温度、基底热流值、热传导率、扩散率常数取上述给定值)。

从图 5 可以看出，地震型断层活动对烃源岩热演化的影响具有以下几个特点：

(1) 影响的范围十分有限。从图 5 可以看出，在不同时间范围内 ($0.00001\text{a} \rightarrow 1\text{a}$)，温度异常区的范围均非常窄，一般不超过 3m。温度有显著影响 (影响的温度超过 20℃) 的范围小于 1.5m 厚。超过 5m 后，影响基本上可以忽略不计。

(2) 影响的时间十分短暂。从图 5 可以看出，超过 0.1a 后 (约 1 个月)，温度异常区基本消失。

(3) 在短时间 (0.01a) 和小范围 (0.5m) 内对周围烃源岩的温度影响是十分显著的。

根据上述分析结果，可以得到以下两方面的结论：

(1) 在断层快速活动的条件下，虽然由于断层的快速活动，断层面可以产生很高的温度，但断层摩擦产生的热量其影响范围和影响持续的时间是十分有限的。

(2) 在多次快速活动的断层带内，断层面附近的窄带内，岩石的热演化程度可以大大高于周围的岩石，造成断层带内非常局部的高热演化的特征。

4 结论

本文通过对断层作用热模型及其对烃源岩热演化影响的定量研究，可以得到如下结论：

(1) 断层作用的生热量主要决定于断层的走向和倾角、构造应力的 大小、流体压力、断层的位移量、断面摩擦系数等。断层的活动速率对断层摩擦的累计生热量没有影响，但对断层带内的温度却起决定性的作用。

(2) 根据建立的断层生热量的定量模型，断层的快速活动 (地震) 足可以造成断面附近的岩石瞬时熔化而形成玻化岩 (假玄武玻璃)，但熔化的量是十分有限的 (根据估算玻化岩厚度一般不会超过 5cm)。

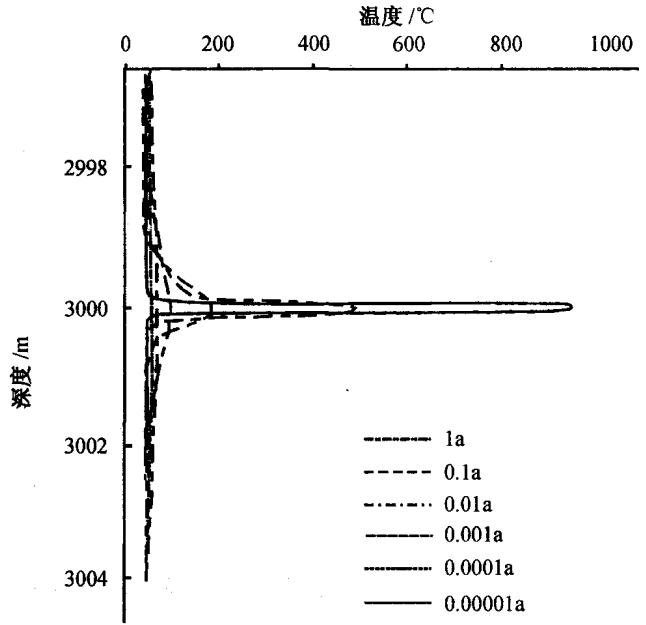


图 5 厚度为 10cm、温度为 1000℃ 的花岗岩岩浆的冷却散热模型

Fig.5 Heat spreading model of 10 cm thick granite magma at 1000℃

(不同类型的曲线代表不同时间的温度分布曲线，时间单位为年)

(3) 在断层快速活动的条件下(地震), 由于断层的快速活动, 断层面虽然可以产生很高的温度, 但断层摩擦产生的热量其影响范围和影响持续的时间是十分有限的, 影响的时间不会超过1个月, 影响的范围不会超过3m。

(4) 在多次快速活动的断层带内, 断层面附近的窄带内, 烃源岩的热演化程度可以大大高于周围的岩石, 造成断层带内非常局部的烃源岩的高热演化特征。

参 考 文 献

- [1] 王治顺, 朱大岗. 构造动力变质作用初论 [J]. 地质力学学报, 1995, 1 (1): 60~66.
- [2] 刘建民, 董树文, 张家声, 等. 大别造山带东部假玄武玻璃的显微构造特征及其意义 [J]. 地球学报, 2005, 26 (3): 229~234.
- [3] 刘建民, 董树文. 假玄武玻璃的研究进展与现状 [J]. 地质论评, 2001, 47 (1): 64~69
- [4] 尹意求, 李嘉兴. 一种与断裂变质作用有关的新类型金矿床——新疆阿勒泰市萨热阔布金矿床 [J]. 矿产地质, 2004, 18 (1): 8~12.
- [5] 莫柱荪. 论断裂变质作用 [M]. 中国区域地质. 北京: 地质出版社, 1983.
- [6] 杨开庆. 动力成岩成矿理论的研究内容和方向 [M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [7] 伊恩·勒齐著. 蔡希源等译. 盆地分析的定量方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [8] 胡能高, 王志博, 杨家喜. 贺兰山群变质岩中假玄武玻璃的成因 [J]. 西安地质学院学报, 1995, 17 (2): 6~12.
- [9] 石广仁. 含油气盆地数值模拟方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [10] 王平. 含油气盆地构造力学原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [11] 王华林. 1668年郟城8.5级地震断裂的全新世滑动速率、古地震和强震复发周期 [J]. 地震研究, 1996, 19 (2): 206~224.
- [12] 王赞军, 张晓青, 江志萍, 等. 柴达木盆地两条中央断裂的特征及其发生上限地震的位移量估算 [J]. 西北地震学报, 1999, 21 (2): 183~188.
- [13] 余恒昌, 邓孝, 陈碧琬. 矿山地热与热害治理 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [14] 赵小麟, 邓起东, 陈社发. 岷山隆起的构造地貌学研究 [J]. 地震地质, 1994, 16 (4): 429~439.

A QUANTITATIVE MODEL OF HEAT PRODUCTION BY FAULTING AND ITS EFFECT ON THERMAL EVOLUTION OF HYDROCARBON SOURCE ROCKS

TONG Heng-mao¹, ZHANG Sheng-gen², HU Yuan-qing³

(1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, University of Petroleum, Beijing 102200, China;

2. Petroleum Exploration & Production Institute, Sinopec, Beijing 102200, China;

3. Edongbei Geological Survey Team of Hubei Province, Xiaogan, Hubei, 432100, China)

Abstract: A quantitative heat-producing model of faulting was constructed proceeding from the basin stress state analysis and from the viewpoint of frictional heat production. On the basis of the model, the quantitative relationships between the heat quantity produced by fault plane friction and the fault nature, depth, tectonic stress and fluid pressure were established, and the effects of heat produced by fault plane friction on the thermal evolution of hydrocarbon source rocks were analyzed quantitatively under earthquake conditions. The results show that: the fault depth, tectonic stress, fluid pressure, fault

displacement, friction coefficient on fault planes are decisive factors of heat quantity produced by faulting; the rate of fault movement has nothing to do with the cumulative heat quantity produced by fault friction, but it is a key factor of the temperatures on the fault plane; under the conditions of a high rate of fault movement (e. g. earthquake type), very high temperatures may be produced by fault friction, which can cause partial melting of rocks near fault planes but the scope and lasting time of its influence on the thermal evolution of rocks are very limited.

Key words: fault; heat produced by friction; quantitative model; thermal evolution; stress

(上接第 468 页)

CHARACTERISTICS OF INTER-SALT NON-SANDSTONE RESERVOIRS AND GENESIS OF FRACTURES IN THE JIANGHAN OIL FIELD

XIANG Shu-an¹, LING Qing-zhen², TU Shui-jiang³, WANG Feng¹

(1. School of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083; 2. Liaohe Oilfield, Panjing 124010, Liaoning;

3. Changqing Oilfield, Xi'an 717408, Shaanxi)

Abstract: Salt rhythms are well developed in the Qianjiang subbasin, Jianghan basin, and some rhythms contain oil accumulations of commercial value. The rocks consist predominantly of mudstone, evaporite, gypsaceous mudstone and glauberite dolostone. The reservoir spaces mainly include pores, cavities and fractures, with fractures predominating. There are several types of reservoir spaces in one reservoir. In such reservoirs, permeability does not completely depend upon porosity but is related to the size, shape and degree of connection of pore throats, as well as the development of fractures and degree of filling. The reservoir belongs to a medium-porosity, low- to very low-permeability one. Based on core observations, thin-section analysis, well tests and study of the shape, attitudes, density and distribution scope of the fractures, the authors consider that the fractures mainly formed under the integrative effects of high abnormal pressures, differential compaction, diagenesis and tectonism, of which diagenesis was the main factor for the formation of horizontal interlayer fractures and tectonism is the main factor for the formation of swelling and shear fractures.

Key words: Jianghan oil field; inter-salt non-sandstone reservoir; genesis; fracture; abnormal pressure; differential compaction; tectonism