

# 用核裂变径迹法和热释光法研究 瘦狗岭断裂活动年代<sup>\*</sup>

朱永亮<sup>1</sup> 梁致荣<sup>2</sup> 石汝杰<sup>2</sup>

(1) 中山大学物理学系, 广州 510275 (2) 中山大学地球科学系)

**摘 要** 用核裂变径迹法和热释光法测定广州市郊瘦狗岭的断裂活动年代。结果表明: 广州瘦狗岭断裂在中新生代是处在较大规模较强烈的活动时期, 而在第四纪早更新世及中更新世仍发生过较强烈的活动。最新的断裂活动是在  $43 \times 10^4$  a 前。两种方法的数据可以互相印证。

**关键词** 热释光断代, 核裂变径迹断代, 断裂活动

**分类号** O 571. 33, P 533

确定断裂活动的年代, 特别是最新一次活动的年代, 对于地震预报和工程地质都有十分重要的意义。核裂变径迹法具有所测定的年龄范围广 ( $10^2 \sim 10^9$  a) 和用样少的优点, 因此近年来广泛用于测定矿物的年龄、地质构造、活动上升速度, 以及沉积盆地热历史的研究。然而, 利用裂变径迹研究断裂活动方面, 却鲜有报道。热释光断代研究在我国是近 10 a 的事。这方法适用在几百至几百万年之间, 覆盖了整个第四纪的时标范围。

本文用这两种近年发展起来的断代方法研究广州瘦狗岭断裂活动的年代, 并进行对比。瘦狗岭断裂是控制广州地震的主要断裂带。过去对瘦狗岭断裂的研究一直处于定性阶段<sup>[1, 2]</sup>, 而且对其现今活动性一直有争议。本文以核技术对它进行定量研究, 对其活动史有了较清晰的了解, 这对于广州的地震预报和工农业建设是很有意义的。

## 1 核裂变径迹法测定断裂活动的年代

### 1.1 原 理

自然界中的铀主要由两种核素组成:  $^{238}\text{U}$  (占 99.3%) 和  $^{235}\text{U}$  (占 0.7%), 它们经过一系列的衰变, 最后生成稳定的 Pb。 $^{235}\text{U}$  的半衰期为  $7.13 \times 10^8$  a,  $^{238}\text{U}$  的半衰期约为  $4.5 \times 10^9$  a。除了 T 和 U 衰变外,  $^{238}\text{U}$  还发生自发裂变,  $^{238}\text{U}$  的自发裂变半衰期为  $1 \times 10^{16}$  a, 而  $^{235}\text{U}$  的自发裂变半衰期为  $1.8 \times 10^{17}$  a。由于  $^{238}\text{U}$  的丰度较高, 自发裂变半衰期较短, 是矿物中裂变径迹的主要来源 (矿物中还含有  $^{232}\text{Th}$ , 但其自发裂变半衰期  $\geq 10^9$  a, 故其裂变径迹可忽略不计)。铀核裂变过程中会释放出约 200 MeV 的能量, 两块裂变碎片沿反向反冲, 在其轨道

\* 广东省自然科学基金 (91080) 资助项目

收稿日期: 1996-07-16 朱永亮, 男, 59 岁, 副教授

上造成辐射损伤.这种径迹只有  $0.1 \mu\text{m}$  宽,  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  长,只能在电子显微镜下观察到.但化学刻蚀可使损伤带扩大,以至在 1 000 倍的光学显微镜下就能观察到.

裂变径迹年龄测定方法的基本原理<sup>[3]</sup>是假设在一个地质封闭的系统内,根据矿物中  $^{238}\text{U}$  自发裂变产生的径迹数和自发裂变的速率可以计算出裂变径迹年龄.自发裂变径迹积累的速率正比于  $^{238}\text{U}$  的含量,因此,除了测定样品中裂变径迹数之外,还必须测定样品中  $^{238}\text{U}$  的含量.为此,用热中子辐照样品,  $^{235}\text{U}$  在俘获热中子后发生诱发裂变.用金属箔活化法测定热中子积分通量.在测定了诱发裂变径迹密度之后,由于在天然铀中  $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$  的丰度比是恒定不变的,因此就可算出  $^{238}\text{U}$  的含量.

因为裂变径迹在经历高温过程时会退火消失,因此经历一次最后的地质活动之后,矿物冷却到退火温度以下时,从此之后产生的裂变径迹就能保存至今.当矿物冷却到退火温度时,作为计时的零点.

$$\text{则矿物的年龄 } t = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left( 1 + \frac{d \lambda_D I e^h}{d_f \lambda_f} \right) \quad (1)$$

其中,  $\lambda_D$  为  $^{238}\text{U}$  的衰变常数 ( $1.55 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$ );  $\lambda_f$  为  $^{238}\text{U}$  的自发裂变常数 ( $6.9 \times 10^{-17} \text{a}^{-1}$ );  $I$  为  $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$  的丰度比 ( $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 7.26 \times 10^{-3}$ );  $h$  为积分中子通量 ( $1.7 \times 10^{15}$  中子 /  $\text{cm}^2$ );  $e$  为  $^{235}\text{U}$  的裂变截面 ( $526 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ );  $d$  为诱发裂变径迹密度;  $d_f$  为自发裂变径迹密度.

当断裂活动时,断裂两边岩石发生摩擦滑动而使温度升高,温度可达到摄氏几百度,最高约可达  $1000^\circ\text{C}$ .这就使得断层的退火温度较低的矿物(如磷灰石)中的裂变径迹退火归零.断裂活动后,温度下降,径迹重新累积,“时钟”重新开始计时,如无其他热事件影响,则样品的裂变径迹年龄即为最后一次较强断裂活动的年龄.

## 1.2 测定裂变径迹年龄的实验及结果

由于磷灰石的径迹保存温度比较低,对温度反应比其他矿物更为灵敏,所以在本文中采用磷灰石作为测量样品,磷灰石中新形成的径迹平均长度为  $16.3 \pm 0.9 \mu\text{m}$ .

本文在瘦狗岭选定了 5 个点进行采样(见图 1).

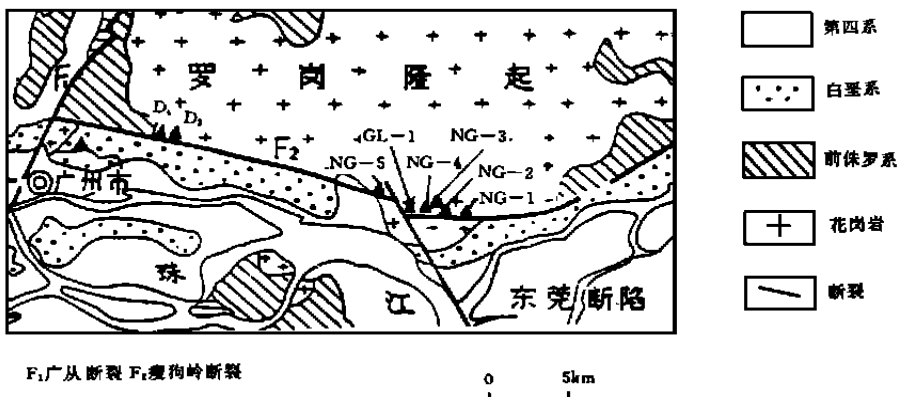


图 1 广从断裂和瘦狗岭断裂示意图

Fig. 1 Guangzhou-Conghua fault and Shougou Hill fault

样品经过电磁分选,化学浮选等过程,把磷灰石富集,挑出矿物颗粒,用环氧树脂将其粘

在聚四氟乙烯板上,经磨片与抛光.将样品加热,使自发裂变径迹退火复零,然后在北京原子能研究院的反应堆中进行中子辐照以获得诱发裂变径迹.

将粘有磷灰石颗粒的光片在 6% 的  $\text{HNO}_3$  中蚀刻 30 s,使得与抛光面相交的径迹经蚀刻后暴露出来.在  $100\times 10$  倍的显微镜下进行观察和统计,把上述所得的各个参数用于方程式 (1),计算出瘦狗岭断裂的裂变径迹年龄如表 1 所示.

表 1 样品的裂变径迹年代

Tab. 1 The result of nuclear fission track dating from samples

样品编号	岩石名称	所测矿物	自发裂变径迹		诱发裂变径迹		裂变径迹
			总数	密度 ( $\times 10^4 / \text{cm}^2$ )	总数	密度 ( $\times 10^4 / \text{cm}^2$ )	年龄 $\times 10^4 \text{ a}$
NG-1	断层泥	磷灰石	30	0.051	98	3.21	1.59 $\pm$ 0.34
NG-2	断层泥	磷灰石	53	0.012	89	2.82	0.43 $\pm$ 0.07
NG-3	糜棱岩	磷灰石	86	0.875	126	2.93	29.9 $\pm$ 4.44
NG-4	糜棱岩	磷灰石	104	0.987	78	2.74	36.2 $\pm$ 0.90
NG-5	糜棱岩	磷灰石	80	0.693	98	2.56	27.1 $\pm$ 4.30

## 2 热释光断代方法测定断裂活动年代

### 2.1 测量原理

热释光断代技术可用来测量数百年至 300 万年的地质学上热事件发生的年代,其精度在 10% 以内.其理论依据是断裂强烈活动时,断裂两盆岩石错动产生的热效应可使断层中的石英和方解石等矿物的原有热释光能量完全释放到零值,或者产生新生的矿物,如石英、方解石等.断裂活动后,上述这些天然矿物受微量的天然放射性核素  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  放出的射线及宇宙射线的辐照,使矿物晶体中的电子受到激发,并被处于价带和导带之间的陷阱俘获,并积存起来.

放射性核素半衰期长达  $10^9 \text{ a}$ , 可以作为每年提供固定剂量的放射源.接受剂量的矿物(磷光体)主要是石英、方解石和长石等晶体.在发生热事件的时刻至今,这些磷光体记录了被辐照累积的剂量  $D$ , 只要知道每年的吸收剂量率  $\dot{D}$ , 就可得出热事件发生的年龄  $A$

$$A = D / \dot{D}$$

$D$  是由测量热释光而得出.因为电子被深度为  $E$  的陷阱俘获后,其逃脱几率 ( $p$ ) 为

$$p = s e^{-E/kT}$$

$s$  是电子企图逃脱频率,  $k$  是玻尔兹曼常数,  $T$  是绝对温度.

当晶体受热后,这些电子被激发而进入导带,再跃迁至价带而放出光子.因为热释光的强度正比于单位体积晶体中被陷阱俘获的电子的数目,因而就与吸收剂量  $D$  成正比.

### 2.2 热释光的测定

热释光是由灵敏度高、暗电流小的光电倍增管转换成电脉冲,并被定标器所记录.样品被放置在升温炉内的加热板上(加热速率  $1^\circ\text{C}/\text{s}$ ),密封加热炉,将炉抽真空至 5 Pa,然后充高纯  $\text{N}_2$ ,在恒定的  $\text{N}_2$  气流中升温 (3 L/min),获得热释光的生长曲线.并用已知剂量率的  $\text{U}$  源作人工辐照,测出相应的热释光,得出样品的发光效率,进而求出天然热释光的辐照剂量.这即是将天然辐照剂量  $D$  用人工  $\text{U}$  剂量进行标定.与天然辐照积累剂量相当的  $\text{U}$  剂量记作  $D_e$ .

天然辐照的年剂量由 4 部份提供, 即由 T, U, V 射线及宇宙线提供, 其年剂量率相应为  $R^T, R^U, R^V$  及  $R_c$ . 由于岩石的屏蔽作用,  $R_c$  可忽略不计.

由于 T, U, V 射线在矿物中的射程不同对于粒度大小不同的样品, 要分为粗粒和细粒两种情况来处理.

2.2.1 细粒方法 样品的直径为  $1 \sim 8 \mu\text{m}$ , 小于 T 粒子射程 ( $20 \sim 50 \mu\text{m}$ ), T 粒子可以完全穿透它. 细粒样品的年剂量率

$$R = R^T + R^U + R^V$$

但是 T 辐射的热释光效率低于 U 或 V 的热释光效率, 这是因为 T 粒子径迹周围的电离密度高, 使得电子陷阱饱和. 在我们统一将三种射线提供的剂量换算成 U 剂量时, 在  $R^T$  前要乘上 T 粒子对 U 粒子的相对发光效率  $X$  而 V 射线的发光效率和 U 粒子基本上是一样的. 所以

$$A = \frac{D_e}{X R^T + R^U + R^V}$$

将细粒沉淀在银托片上 ( $h = 16 \text{ mm}$ ) 即成待测样品. 将样品分成 5 组 (每组 4~5 个样品), 分别测①天然热释光  $TL_n$ , ②用  $^{90}\text{Sr}$  U 源辐照后的热释光  $TL_{m, U}$ , ③辐照  $2U$  相应的  $TL_{m, 2U}$ , ④用  $^{210}\text{Po}$  T 源辐照后的  $TL_{m, T}$  及⑤辐照  $2T$  相应的  $TL_{m, 2T}$ . 作  $TL-U$  剂量曲线 (图 2), 直线与横坐标轴的截距即为  $D_e$ . 用同样方法作图可求出 T 等效剂量  $D_T$ , 并以下式求出 T 粒子对 U 粒子的相对发光效率  $X$

$$X = \frac{D_U}{D_T} \times 0.85$$

0.85 为能量修正系数, 由于  $^{210}\text{Po}$  的  $E_T$  和铀钍系的 T 粒子能量不同, 所以必须修正.

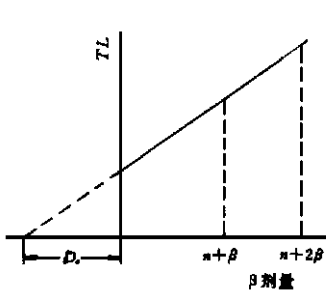


图 2 热释光 - U 剂量曲线

Fig. 2 Curve of the TL - U dose

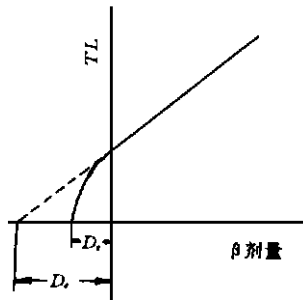


图 3 低剂量部分的非线性现象

Fig. 3 The nonlinear phenomenon appears in the low dose part

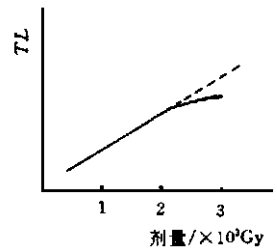


图 4 高剂量部分的饱和现象

Fig. 4 The saturation phenomenon appears in the high dose part

但是, 实践表明, 上述剂量附加线性拟合法求出  $D_e'$  的值比真的  $D_e$  值大 (图 3), 即在最初几戈瑞剂量的灵敏度比其后剂量范围的灵敏度高, 这种非线性现象在地质样品中常可见到. 若直接用剂量附加线性拟合法求出的年龄值将比实际的年龄值偏老. 要把曲线的非线性部分描绘出来, 可把矿物热释光全部退火, 然后多次重新辐照, 并求出相应的热释光<sup>[4]</sup>.

另外, 在大剂量部分, 热释光出现饱和现象<sup>[4]</sup>, 这使得热释光测年龄的范围有了上限. 这是由于陷阱已被填充至饱和所致.

显然, 只有关注到低剂量部分的非线性 (或超线性) 及高剂量部分的饱和现象 (图 4), 才

能求出正确的年龄值。

2.2.2 粗粒方法 矿物样品的颗粒在  $100\mu\text{m}$  左右。这方法的优点是可以将 T 粒子提供的剂量去掉,因而不需要对 T 剂量部分的修正。

由于 T 粒子在石英中的射程短,其径迹只是在颗粒的表面,只要用 10% 的 HF 腐蚀 1 h,把石英颗粒表面一层去掉,则 T 剂量就不必考虑了。

$$\text{年龄 } A = D_e / R^{1+R^V}$$

### 2.3 数据及年龄值

用热释光法测定瘦狗岭断裂活动年代的各数据(表 2)。

表 2 瘦狗岭断裂活动年代热释光法测定数据表

Tab. 2 The data of TL dating about fault activities of Shougou Hill

野外 编号	取样 地点	样品性质	$w_L \times 10^6$	$w_{TR} \times 10^6$	$w_{K_2O} / \%$	$D_e / \times 10^4 \text{ Gy}$	年剂量 (mGy)	TL 年龄 ( $\times 10^4 \text{ a}$ )	备注
GL-1	南岗	断层泥	4.36	10.30	5.44	0.513	6.00	$8.55 \pm 0.59$	
NG-2	南岗	断层泥	5.71	12.30	41.60	3.13	7.39	$42.35 \pm 3.17$	用 HF 腐蚀 45min
D <sub>3</sub>	老干所	断层滑动面物质	2.35	4.72	12.80	6.55	4.47	$146.53 \pm 10.98$	
D <sub>4</sub>	老干所	断层滑动面物质	2.76	5.93	17.10	7.37	5.37	$137.24 \pm 10.29$	

## 3 讨 论

(1) 应用裂变径迹法测定 NG-3, NG-4, NG-5 三个样品最后一次热事件的年代,测得为  $28.5 \text{ Ma}$  和  $36.2 \text{ Ma}$ 。由于在 1000 倍显微镜下观察到的径迹长度的分布是单峰的,表明断裂最后一次活动使磷灰石原径迹完全退火消失,所测得的年龄代表了糜棱岩记录到的断裂最后一次较强活动的年龄,断层岩石曾经受到  $375^\circ\text{C}$  以上的温度的作用,断层活动的强度较大,因此,所测出的两个裂变径迹年龄具有确切的地质意义,表明了瘦狗岭断裂东段,在  $36.2 \text{ Ma}$ ,  $28.5 \text{ Ma}$  经历了两次较强的活动时期。由此可见,瘦狗岭断裂在中新生代是处在较大规模较强烈的活动时期。这与前人的定性结论一致。

(2) 应用裂变径迹法测定 NG-1, NG-2 两个断层泥样品中的裂变径迹年龄,为  $1.59$  和  $0.43 \text{ Ma}$ ,表明该断裂在第四纪早更新世及中更新世仍发生过较强烈的活动。

(3) 应用热释光法测定在南岗采得的 NG-2 断层泥和 GL-1 断层滑动面物质的热释光年龄,分别测得  $(42.35 \pm 3.17) \times 10^4 \text{ a}$  和  $(8.55 \pm 0.59) \times 10^4 \text{ a}$ 。前者与用裂变径迹法测量同样品的结果是完全一致的,说明两种方法可以相互佐证。而后者表明瘦狗岭断裂在南岗地段在晚更新世中期亦曾发生过较强烈的活动。

(4) 应用热释光法测定了瘦狗岭老干所采集到的断层滑动面物质 D<sub>3</sub> 和 D<sub>4</sub>, 这两个样品沿断裂走向相距约  $100 \text{ m}$ , 分别测得  $(146.53 \pm 10.98) \times 10^4 \text{ a}$  和  $(137.24 \pm 10.29) \times 10^4 \text{ a}$ , 这两个数据都与用裂变径迹法测得的南岗段 NG-1 样品的年龄  $1.59 \text{ Ma}$  相一致。这表明在早更新世即在约  $1.50 \text{ Ma}$  期间,整个瘦狗岭断裂再一次发生过较大规模的活动。

这两种核方法来测定断裂最新活动年代是可行的,多种方法研究断裂活动可以提高

研究结果的可靠性。这两种核方法在地震地质,地震预测预报以及工程防震等领域有着广阔的应用前景。

北京原子能研究院郝秀红帮助对矿物进行中子辐照,在此表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- 1 严国柱. 广州—罗浮山断裂,构造带的基本特征及其形成演化的研究. 中山大学学报(自然科学版), 1985(1): 63~ 72
- 2 王振才. 广州地区地震构造背景. 华南地震, 1983,增刊: 8
- 3 杜润生. 固体核裂变径迹探测器原理及其应用. 北京: 科学出版社, 1988
- 4 梁致荣,刘彝筠,黎烈均. 确定断裂最新活动年代的热释光测量技术研究. 中山大学学报论丛, 1992(1): 104~ 109

## The Determination of Age of the Fault Activities of Shougou Hill, Guangzhou by Thermoluminescence Dating and Nuclear Fission Track Dating

Zhu Yongliang\* Liang Zhirong Shi Rujie

**Abstract** The age of the fault activities had been determined by *TL* dating and nuclear fission track dating. The results show that the fault of Shougou Hill had large and intense activities in mid-cenozoic era, however, intense activities still occurred in early pleistocene and mid-pleistocene. The last activity of the fault occurred 430 000 years ago. The data of *TL* dating are conformable with data of nuclear fission track dating.

**Keywords** thermoluminescence dating, nuclear fission track dating, fault activity

\* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275