

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2016.04.001

# 汶川地震断层岩的镜质体反射率

## ——对断层同震摩擦滑动性质的约束

姚 路<sup>1)</sup> 马胜利<sup>1)</sup> 王 羽<sup>2)</sup> 何宏林<sup>3)</sup>

陈建业<sup>1)</sup> 杨晓松<sup>1)</sup> 嶋本利彦<sup>1)</sup>

1) 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2) 中国科学院上海应用物理研究所, 上海光源, 上海 201800

3) 中国地震局地质研究所, 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 地震断层滑移过程中的摩擦升温能够指示断层的动态摩擦性质, 为我们认识地震的动力学过程及能量分配提供一种途径; 断层带摩擦生热的残留标志也能作为识别地震活动的依据。

**关键词** 汶川地震断裂带 断层岩 镜质体反射率 动态摩擦强度 摩擦升温

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2016)04-0001-13

## 0 引言

评估断层同震滑动过程中的摩擦升温效应具有非常重要的科学意义。一方面, 断层面上的摩擦升温可用于估算断层动态滑动摩擦强度和摩擦力做功, 有助于认识地震的动力学过程以及能量分配(Kanamori *et al.*, 2004)。另一方面, 摩擦升温在断层动态弱化中起到了决定性的作用(Yao *et al.*, 2016a, b), 认识断层动态弱化机制需要了解其同震摩擦升温情况。

## 1 断层带结构和样品的选择

2008年5月12日发生的 $M_w$ 7.9汶川地震在映秀-北川断裂和灌县-江油断裂上分别产生了长度约240km和超过70km的地表破裂带(徐锡伟等, 2008)。

本文在断层岩样品的选用上考虑如下3个方面: 1) 在汶川地震断层带不同露头上选择代表性的断层泥样品, 探讨断层泥的镜质体反射率是否与断层的活动性存在一定的关联。2) 选择1个代表性的断层带露头, 系统地测量断层岩样品的镜质体反射率及其在露头尺度上的空间分布, 探讨断层的同震摩擦滑动是否会显著影响断层岩的镜质体反射率。3) 在同震滑动带附近和紧邻滑动带定向标本的尺度上, 探讨镜质体反射率及其空间分布与断层的同震摩擦滑动是否存在紧密联系。为此, 我们从深溪沟、八角庙和北川露头上共选择了5种黑色或深灰色的断层泥样品(图1a), 在深溪沟露头上选择了多个部位的断层角砾、断层泥样品和1块紧邻滑动带的定向样品。

[收稿日期] 2015-03-12 收稿, 2016-07-31 改回。

[基金项目] 中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA1311)与地震动力学国家重点实验室自主研究课题(LED2014A06)共同资助。

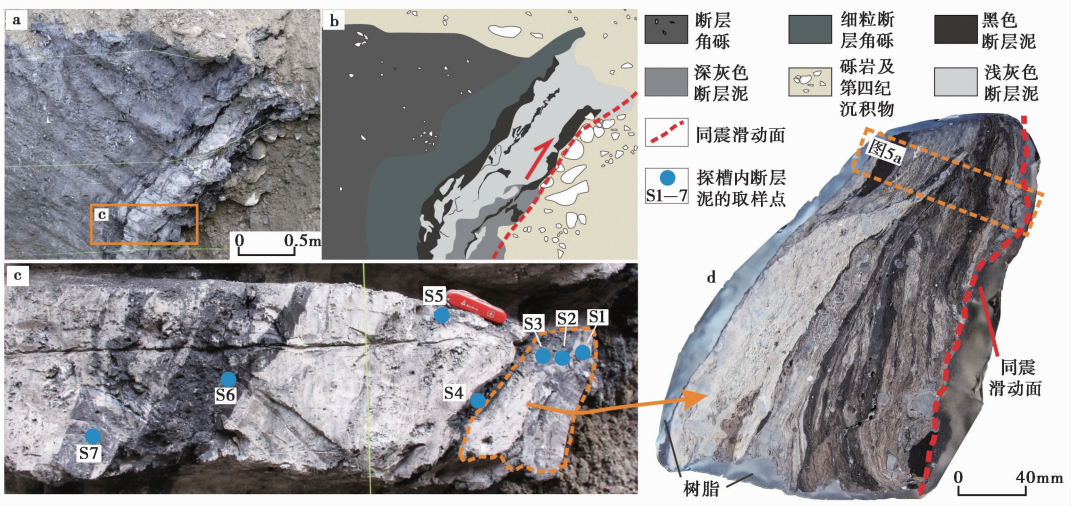


图 1 深溪沟探槽中揭示的断层带内部结构及断层岩

Fig. 1 The internal structure and fault rocks of the Longmenshan fault zone in a trench at Shengxigou.

a, b 断层带照片及其素描图; c 断层带局部放大照片(对应于 a 中方框部位)及断层岩取样位置(蓝色圆点, 样品 S1—S7); d 包含汶川地震滑动带的定向样品及其结构(右侧为滑动面)

## 2 断层岩的镜质体反射率

本文中断层岩样品镜质体反射率的测试在中国地质大学(北京)材料科学与工程学院显微实验室进行, 所用设备为由莱卡 Orthoplan 型偏光显微镜和 MPV-3 显微光度计组成的测试系统。油浸液和反射率标准物质的使用、待测样品的制备方法、反射率的测试流程均严格参照国家标准 SY/T 5124-2012《沉积岩中镜质体反射率测定方法》。由于我们并不关注断层岩中镜质体颗粒反射率在不同方向上的差异, 因此只测量了随机反射率(无起偏器情况下不旋转载物台所测得的反射率), 下文提到的镜质体反射率均为随机反射率。

### 2.1 不同断层露头上断层泥样品的镜质体反射率

本节测试所用的 5 种灰黑—黑色断层泥分别来自深溪沟、八角庙和北川断层露头(图 1a)。其中, 同震断层在深溪沟和八角庙附近穿过三叠系须家河组, 在北川附近穿过寒武系。由于地层较老, 这里用作对比的北川灰黑色断层泥中理应不含有镜质体。5 种断层泥的测试结果如图 3, 北川灰黑色断层泥如预计的那样不含镜质体, 深溪沟黑色和灰黑色断层泥的镜质体反射率平均值(含标准差)分别为  $(1.48 \pm$

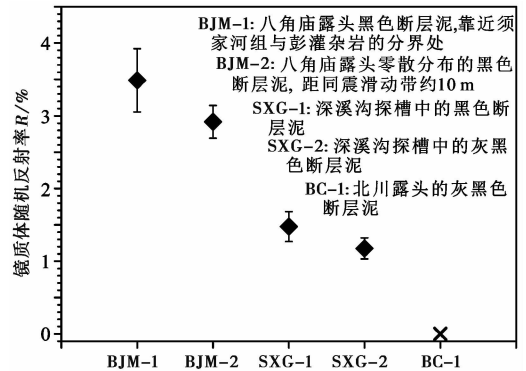


图 2 龙门山断裂带八角庙、深溪沟和北川断层露头断层泥样品的镜质体随机反射率

Fig. 2 The random vitrinite reflectance of fault gouges collected from the Longmenshan fault zone at Bajiaomiao, Shengxigou and Beichuan outcrops.

0.21)%和(1.18±0.14)% , 而八角庙露头上 2 种黑色断层泥的镜质体反射率非常高。

## 3 讨论

### 3.1 对同震摩擦生热和动态摩擦强度的估计

考虑一维断层模型, 如果将断层摩擦滑动等效为宽度为  $2w$  的滑动带内的剪切变形, 那么距滑动带中心  $x$  的位置在摩擦滑动开始后  $t$  时刻的温度可以表示为(Lachenbruch, 1986; Fulton *et al.*, 2012)

$$T(x, t) = \frac{A_0}{\rho c} \left( t \left[ 1 - 2i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{w-x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) - 2i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{w+x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \right] - H(t-t^*) (t-t^*) \left[ 1 - 2i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{w-x}{\sqrt{4\alpha(t-t^*)}} \right) - 2i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{w+x}{\sqrt{4\alpha(t-t^*)}} \right) \right] \right) \quad (1)$$

式(1)对于  $x \leq w$  (即滑动带内) 成立。其中,  $A_0$  是生热率,  $\rho$ 、 $c$ 、 $\alpha$ 、 $t^*$  分别为密度、比热、热扩散系数和滑动持续时间; 生热率  $A_0$  可以表示为  $A_0 = \tau v / (2w) = \tau u / (2w t^*)$ , 这里  $\tau$  为剪应力,  $v$  为平均滑动速率,  $u$  为滑动位移;  $i^2 \operatorname{erfc}(x)$  表示高斯误差函数的 2 次累积积分;  $H(t)$  为单位阶跃函数。

表 1 演化计算中介质模型及其参数设置

(沈正康等, 2003; 王椿镛等, 2003; 邵志刚等, 2008; 徐晶等, 2013)

Table 1 Parameters of the medium in modeling of the evolution computation(after SHEN Zheng-kang *et al.*, 2003; WANG Chun-yong *et al.*, 2003; SHAO Zhi-gang *et al.*, 2008; XU Gang *et al.*, 2013)

层名	厚度/km	P 波速度 $V_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	S 波速度 $V_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	壳幔密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	瞬时粘滞系数 $\eta_1/\text{Pa}\cdot\text{s}$	稳态粘滞系数 $\eta_2/\text{Pa}\cdot\text{s}$
沉积层	3	4.6	2.656	2 615		
上地壳	9	6.05	3.493	2760	弹性	
	10	6.17	3.562	2 679		
下地壳	3	6.25	3.608	2 835		
	5	6.25	3.608	2 835	$5.0 \times 10^{17}$	$6.3 \times 10^{18}$
	10	6.55	3.782	2835	$5.0 \times 10^{17}$	$6.3 \times 10^{18}$
上地幔	18	6.8	3.926	2977	$5.0 \times 10^{17}$	$6.3 \times 10^{18}$
	—	7.8	4.503	3175	0	$1.0 \times 10^{20}$

## 4 结论

本文对采自汶川地震断层带的多种断层角砾和断层泥样品开展了镜质体反射率测试, 取得的主要认识如下:

**致谢** 镜质体反射率的分析测试得到了中国地质大学(北京)材料科学与工程学院显微实验室孙庆云老师的指导和帮助, 中国地震局地质研究所魏占玉、石峰等提供了深溪沟探槽样品, 在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- 韩德馨, 任德贻, 王延斌, 等. 1996. 中国煤岩学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- HAN De-xin, REN De-yi, WANG Yan-bin, *et al.* 1996. Coal Petrology of China [M]. China University of Mining and Technology Press, Xuzhou (in Chinese).
- 韩亮, 周永胜, 陈建业, 等. 2010. 汶川地震基岩同震断层泥结构特征[J]. 第四纪研究, 30(4): 745—758.
- HAN Liang, ZHOU Yong-sheng, CHEN Jian-ye, *et al.* 2010. Structural characters of co-seismic fault gouge in bed rocks during the Wenchuan earthquake [J]. Quaternary Sciences, 30(4), 745—758 (in Chinese).
- Bustin R M. 1983. Heating during thrust faulting in the Rocky Mountains: Friction or fiction? [J] Tectonophysics, 95 (3-4): 309—328.
- Chen J, Yang X, Ma S, *et al.* 2013a. Mass removal and clay mineral dehydration/rehydration in carbonate-rich surface exposures of the 2008 Wenchuan earthquake fault: Geochemical evidence and implications for fault zone evolution and coseismic slip [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(2): 474—496.

## THE VITRINITE REFLECTANCE OF FAULT ROCKS FROM THE WENCHUAN EARTHQUAKE FAULT ZONE: CONSTRAINTS ON FRICTIONAL PROPERTIES OF THE FAULT DURING THE EARTHQUAKE

YAO Lu<sup>1)</sup> MA Sheng-li<sup>1)</sup> WANG Yu<sup>2)</sup> HE Hong-lin<sup>3)</sup> CHEN Jian-ye<sup>1)</sup>  
YANG Xiao-song<sup>1)</sup> SHIMAMOTO Toshihiko<sup>1)</sup>

1) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2) Key Laboratory of Interfacial Physics and Technology, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

3) Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

### Abstract

The temperature rise caused by frictional heating during seismic slip is able to indicate dynamic frictional properties of the seismic fault, which provides an approach to understand the dynamic process and energy budget of an earthquake.

**Key words** the Wenchuan earthquake fault zone, fault rocks, vitrinite reflectance, dynamic frictional strength, frictional heating

[作者简介] 姚路, 男, 1986年生, 2013年在中国地震局地质研究所获固体地球物理学博士学位, 助理研究员, 主要研究方向为断层力学及相关的构造物理实验, 电话: 010-62009010, E-mail: yaolu\_cug@163.com; luyao@ies.ac.cn。