

doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2016.04.002

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¹⁾ 马胜利¹⁾ 王羽²⁾ 何宏林³⁾
陈建业¹⁾ 杨晓松¹⁾ 嶋本利彦¹⁾

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。镜质体反射率是煤和石油天然气领域广泛使用的地质温度计,在断层岩和断层力学研究中也具有潜在的应用价值。文中对采自汶川地震断裂带的多种断层岩样品开展了镜质体反射率研究,揭示了断层活动对断层岩镜质体反射率的影响;从断层角砾带向断层核部,镜质体反射率呈现出增大的趋势,指示着地震过程中断层的摩擦生热过程。八角庙露头样品的镜质体反射率明显高于深溪沟露头,可能暗示着 2 个露头上断层活动性质的差异。研究还表明,对断层剖面的镜质体反射率开展系统性研究有助于识别以往地震的滑动带以及限定滑动带的宽度。对深溪沟露头上断层滑动面样品开展的测试表明,2 条宽度约 2mm 的局部黑色滑动带内存在镜质体反射率的异常高值;数值计算表明汶川地震过程中该露头附近断层滑动面上的宏观摩擦升温可能 $<162^{\circ}\text{C}$,同震阶段的动态摩擦系数较低,这些估计与高速摩擦实验的结果总体上是一致的。

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)04-0817-13

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。此外,断层带内是否存在显著摩擦生热的残留标志也能够对断层的活动方式究竟是地震还是缓慢蠕滑给出可能的指示(Fukuchi *et al.*, 2005)。因此,近年来的震后断层快速钻探均将温度测量作为主要的研究内容之一(Li *et al.*, 2013; Fulton *et al.*, 2013)。除了高投入的钻探项目中的温度测量外,断层岩样品的一些物理化学性质,如黏土矿物含量、微量元素浓度、磁化率、无机碳

(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。

含量、可萃取有机质、碳质组分拉曼光谱、镜质体反射率等(Mishima *et al.*, 2006; Hirono *et al.*, 2007, 2009; Ikehara *et al.*, 2007; Polissar *et al.*, 2011; Sakaguchi *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013a) 也能够间接地对断层带的摩擦升温效应给出相应的估计。其中, 对断层岩镜质体反射率的研究近年来逐渐受到了重视(Sakaguchi *et al.*, 2011; Kitamura *et al.*, 2012)。

镜质体、壳质体和惰质体是煤与干酪根等有机质主要包含的 3 类显微组分, 三者成因、光学性质和化学组成上存在显著的不同; 其中, 镜质体主要是高等植物的根、茎、叶的木质组织等经历腐殖化和凝胶化作用形成的(韩德馨等, 1996; Killops *et al.*, 2009)。镜质体反射率是指在波长(546 ± 5) nm(绿光) 处, 镜质体抛光面的反射光强度对垂直入射光强度的百分比(见相关国际和国内标准, 如 GB/T 6948, SY/T 5124, ASTM D2798)。镜质体反射率随着有机质的成熟度及所经历温度的增加而增大, 而且这一过程具有不可逆性; 因此, 镜质体反射率在评价煤阶、有机岩的成熟度, 探讨沉积盆地的温度演化方面均具有重要的应用(Waples, 1980; Tissot *et al.*, 1987; 郝芳等, 1988; 韩德馨等, 1996; 赵孟为等, 1996; Killops *et al.*, 2009)。对于断层带样品的镜质体反射率研究而言, 一些学者先后在断层带局部剪切带内揭示出镜质体反射率增大的现象, 并将这种现象归因于地震断层作用带来的摩擦生热效应(Bustin, 1983; O'Hara *et al.*, 1990; Sakaguchi *et al.*, 2007, 2011)。

汶川地震出露地表的断层带大多沿炭质泥岩发育, 多个露头上均出现碳含量较高的黑色断层岩(王萍等, 2009)。在地表破裂带东南段穿过的三叠纪、石炭纪地层中, 部分断层岩的有机碳含量较高(Togo *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2014a; 张雷等, 2014), 可能含有大量的镜质体。本文对龙门山断裂带代表性断层岩样品的镜质体反射率开展了测试工作, 从不同尺度对断层岩镜质体反射率及其空间分布进行了研究, 并结合测试数据, 对断层同震摩擦升温 and 动态滑动摩擦强度进行估计。

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)。沿地表破裂带由南向北, 在虹口深溪沟、虹口八角庙、茶坪肖家桥、擂鼓赵家沟、平溪矿坪子均发现了较好的断层带露头, 发育一定厚度的断层泥和一定宽度的断层角砾岩(韩亮等, 2010; Togo *et al.*, 2011; Hou *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013a, b; Yao *et al.*, 2013a; Wang *et al.*, 2014a, b)。由于镜质体主要源自高等植物的根、茎、叶等木质组织, 因此在泥盆纪以来的陆相沉积地层中比较普遍。从汶川地震地表破裂带的分布来看, 南段主要穿过相对年轻的地层, 如虹口附近的地表破裂带主要分布于三叠系须家河组的岩层中(Liu-Zeng *et al.*, 2010), 断层岩具备开展镜质体反射率研究的条件。

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。为此, 所选用的样品不局限于汶川地震滑动带附近的断层泥, 也包括露头上的老断层泥, 以便考虑以往的断层活动。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。

图 1b 展示了深溪沟露头上断层岩的分布, 该露头在汶川地震中具有较大的位移, 在破裂带横穿过的一处水泥路面附近, 最大垂直和水平位移分别达到 2.8m 和 4.8m(何宏林等, 2008; 图 1b 中 A 点附近)。前人在该处开挖了 1 个探槽, 并进行过系统的采样(何宏林等, 2008)。下文所用的黑色断层泥(A1, A2)、灰色断层泥(A3)和紧邻滑动带的定向样品均采自探槽。点 A 东北约 100m 处, 同震断层分成 4 个小分支, 垂直位移(NW 盘上升)分别为 1.5m、约 0.2m、1.2m 和约 0.2m(Liu-Zeng *et al.*, 2010), 出露的断层岩包括黑色角砾岩(B1)、灰黑色角砾岩(B2)和深灰色角砾岩(B3)。沿西北支流, 左岸出现大量连续的断层角砾岩带与断层泥带(图 1b 中的点 C, D, E)。其中, 点 C 处发育宽约 10m 的黑色角砾(C1)和宽约 1m 的黑色断层泥(C2)。点 D 附近发育断层角砾(D1), 局部存在数 cm 厚的断层泥层(D2)。点 E 出露灰黑色的断层角砾(E1)。总体而言, 汶川地震断层带在深溪沟露头附近宽 250~300m(Wang *et al.*, 2014a)。

图 2a, b 是深溪沟处断层探槽东北壁的照片及素描图。断层的上盘(西北盘)在汶川地震中俯冲至砾岩和第四纪沉积物之上。从上盘来看, 断层核部包含深灰色断层泥、黑色断层泥和浅灰色断层泥, 其中黑色断层泥的分布不规则, 在有些部位连续展布, 有些部位则零星分布。整个断层核部平均厚度约为 40cm。核部西北方向为灰黑色的细粒和粗粒断层角砾岩, 断层岩上方覆盖有厚 3~4m 的砾岩和第四纪沉积物。图 2c 所示为断层带近距离放大照片(对应于图 2a 中方框内的部位), 可见浅灰色、深灰色断层泥及条带状分布的黑色断层泥。我们在不同的单元取了 7 个样品用作镜质体反射率的测量(图中蓝色圆圈, S1—S7), 以便获得对断层带镜质体反射率在 m—dm 尺度上的认识。图 2d 展示了包含同震滑动带的定向样品(对应于图 2c 右侧虚线圈内的部位), 可见紧邻滑动面的部位存在强烈的剪切变形, 按颜色至少可以划分出浅灰色、深灰色、浅黑色、黑色等若干单元, 深色的条带连续展布, 大致与同震断层面平行。我们沿着垂直断层面的方向, 制备了 1 块长约 10cm, 宽约 3cm 的样品(图 2d 中的橙色虚线框), 用作镜质体反射率的精细测试。

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

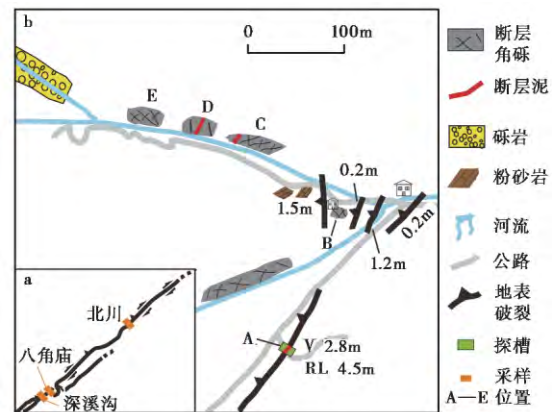


图 1 断层岩采样位置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of sampling locations of the fault rocks used in this study.

a 5 种断层泥样品的采样地点: 深溪沟(SXG-1, SXG-2)、八角庙(BJM-1, BJM-2)及北川(BC-1), 地表破裂引自徐锡伟等, 2008; b 深溪沟露头上断层岩的分布与采样位置(据 Liu-Zeng *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2014a)

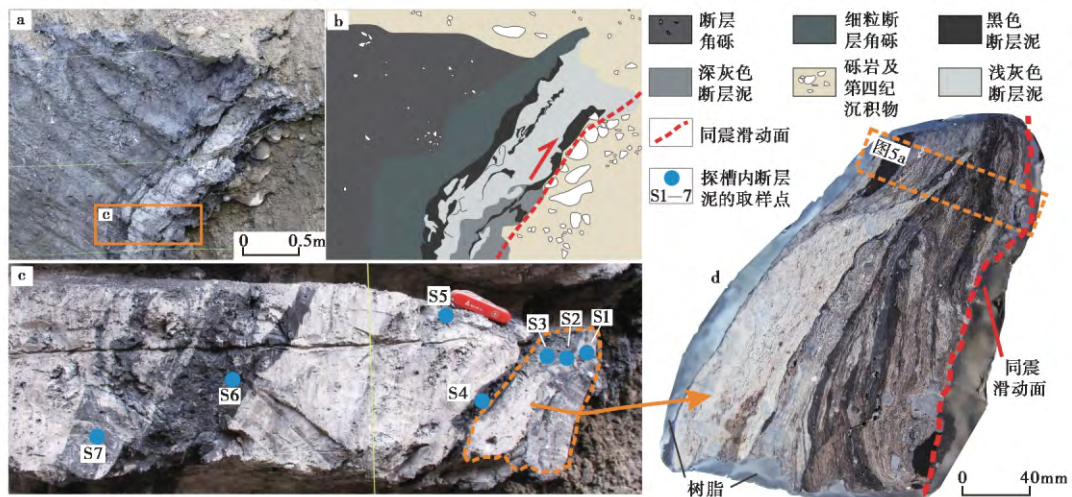


图2 深溪沟探槽中揭示的断层带内部结构及断层岩

Fig. 2 The internal structure and fault rocks of the Longmenshan fault zone in a trench at Shenxigou.

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)

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 $(1.48 \pm 0.21)\%$ 和 $(1.18 \pm 0.14)\%$,而八角庙露头上2种黑色断层泥的镜质体反射率非常高。特别是采自须家河组与彭灌杂岩边界附近的1个巨厚断层泥层(厚约4m)中的黑色断层泥,其所含镜质体的反射率平均值高达 $(3.49 \pm 0.43)\%$;另一种断层泥的镜质体反射率也高达 $(2.92 \pm 0.22)\%$ 。

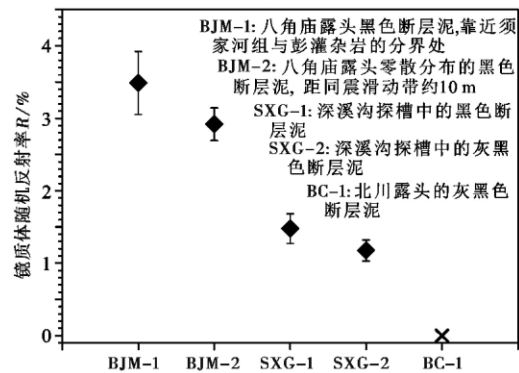


图3 龙门山断裂带八角庙、深溪沟和北川断层露头断层泥样品的镜质体随机反射率

Fig. 3 The random vitrinite reflectance of fault gouges collected from the Longmenshan fault zone at Bajiaomiao, Shenxigou and Beichuan outcrops.

2.2 深溪沟断层角砾和断层泥的镜质体反射率

对深溪沟露头断层岩样品的镜质体反射率测试包括整个露头尺度、探槽尺度和滑动带尺度,分别代表了百 m、m 和 cm—mm 尺度。图 4a 展示了深溪沟露头上 A、B、C、D、E 5 个位置上(点位见图 1b) 共计 11 种断层岩样品的镜质体随机反射率值。其中,断层泥用菱形表示,断层角砾用方块表示,不同的颜色代表了不同的点位。各采样点离汶川地震深溪沟主滑动面(即图 1 下部主破裂带穿过处)的垂直距离标注在图中,同一点位上的多个样品由近及远依次从左至右绘在图中。这 11 种断层岩样品除了 A3 为灰色之外,均呈现为灰黑或黑色。由图可见,在远离同震滑动带的 C、D、E 处,断层泥和角砾的镜质体反射率比较均一,介于 $(0.98 \pm 0.17) \% \sim (1.16 \pm 0.22) \%$ 。B 处虽然离同震主滑动带约 10m,但 3 种样品的镜质体反射率却存在略有升高的趋势。在 A 处,2 种黑色断层泥的镜质体反射率分别为 $(1.98 \pm 0.25) \%$ 和 $(1.48 \pm 0.21) \%$,另一种灰色断层泥的镜质体反射率相对较小,约为 $(1.18 \pm 0.14) \%$ 。

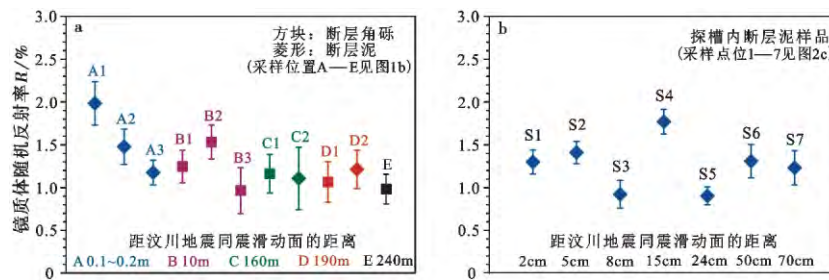


图 4 龙门山断裂带深溪沟露头断层泥和断层角砾的镜质体随机反射率及其空间分布

Fig. 4 The random vitrinite reflectance and its spatial distribution of fault gouge and breccia samples collected from the Longmenshan fault zone at Shenxigou outcrop.

图 4b 所示为深溪沟探槽内 7 个位置上断层泥样品的镜质体随机反射率(采样点位见图 2c 中的 S1—S7),这些样品距汶川地震同震滑动面的大概距离标注在图中。可见靠近同震滑动面样品的镜质体反射率的空间分布呈现出复杂性。离汶川地震主滑动面 2~5cm 的 S1 和 S2 深灰色断层泥样品,其镜质体反射率约为 $(1.30 \pm 0.14) \% \sim (1.41 \pm 0.13) \%$; 稍远的 S3 和 S5 灰色断层泥反射率相对较低,仅为 $(0.92 \pm 0.16) \%$ 和 $(0.91 \pm 0.10) \%$; S4 黑色断层泥具有最高的反射率,约为 $(1.77 \pm 0.14) \%$; 离滑动面 50~70cm 的 S6 和 S7 黑色断层泥反射率约为 $(1.31 \pm 0.20) \%$ 和 $(1.23 \pm 0.20) \%$ 。

2.3 深溪沟含滑动带样品的镜质体反射率

考虑到图 4b 中探槽样品镜质体反射率的复杂性,我们决定对滑动带附近的区域开展更精细的分析测试。图 5a 中的照片展示的是深溪沟探槽中采集的 1 块包含汶川地震同震滑动带的定向样品(图 2d 中虚线框内的部分)。根据断层泥颜色和剪切结构的差异,我们将该定向样品分成 11 个小变形单元,分别测量每个单元的镜质体反射率。需要说明的是,图 5a 所示的照片只是使用平面磨床粗磨之后的状态,最终测试的样品经过了精细的抛光,符合镜质体反射率测试的要求;只是由于抛光之后各变形单元颜色和结构的界限变得不太明显,为方便显示这里仍使用粗磨后的照片。在测量过程中,对于镜质体较少的单元,我们尽可能地每个可测点进行逐一测量;对镜质体较丰富的单元,我们沿测线按照适当的间距对可测点进行测量;整个样品

共计完成 576 个镜质体测点的测量。

图 5b 展示了各单元内镜质体测点的随机反射率与对应单元中心位置(离开滑动面的距离)的关系图。可见在离开滑动面约 2cm 以外的区域,各单元内的镜质体反射率总体变化不大,颜色偏黑的单元 3、9、11 内数值略大;但在紧邻滑动带的单元 1 内,出现了异常高值,多个测点的反射率数值超过了 2.0%,最大值甚至接近 3.0%。在测试过程中,我们发现单元 1 内镜质体反射率的异常高值主要集中在 2 条黑色细条带内(图 5a 中黄色箭头所示的部位),该黑色带内镜质体测点的反射率均 $>1.5\%$,明显高于周边部位。

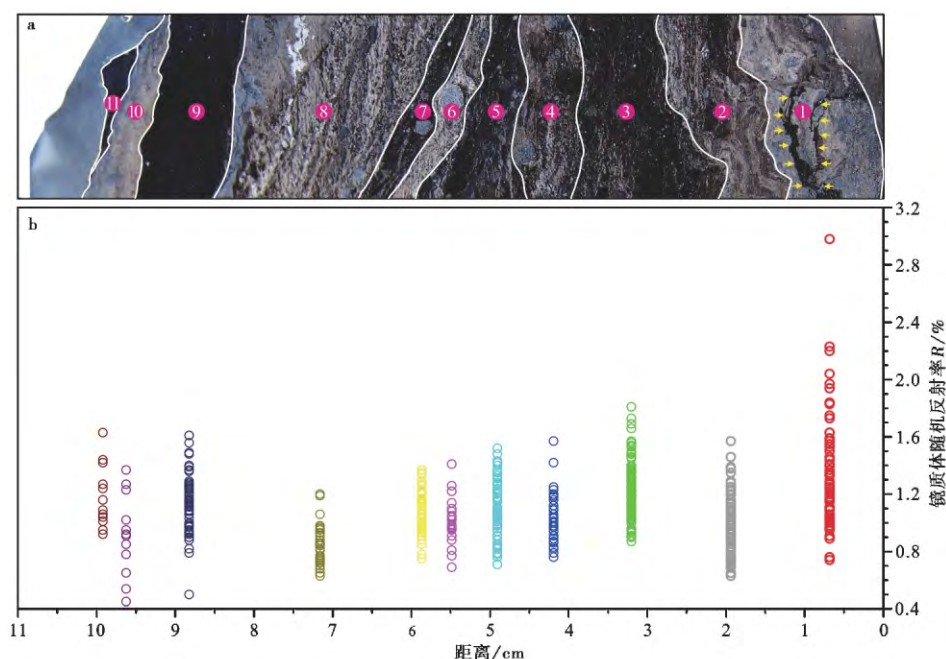


图 5 深溪沟含同震滑动带的定向样品的镜质体随机反射率及其空间分布

Fig. 5 The random vitrinite reflectance and its spatial distribution of an oriented sample containing coseismic slip zone of the Wenchuan earthquake collected from the Longmenshan fault zone at Shenxigou outcrop.

3 讨论

3.1 断层岩镜质体反射率对断层活动性的指示意义

图 3 揭示了八角庙露头代表性断层泥样品具有非常高的镜质体反射率,远高于与之相距仅数千米的深溪沟露头的断层泥样品。由于该图中反射率测试所用的黑色断层泥并不是采自汶川地震的同震断层附近,因此与汶川地震断层的摩擦滑动是不相关的,反映的是断层带过去的热历史。图 3 中的结果暗示着在过去的地震事件中,八角庙附近可能具有更强烈的断层作用。这一推断与断层带结构及断层岩分析取得的认识是一致的。在深溪沟至八角庙一带,断层带大概沿着下三叠统须家河组和彭灌杂岩的边界分布,但 2 个露头上的断层结构和断层岩分布存在一些差异。深溪沟附近只出露了断层泥和断层角砾(Wang *et al.*, 2014a),而八角庙附近除了出露断层泥和断层角砾外,还出现了碎裂岩(Wang *et al.*, 2014b)。作为深部断层岩

的代表, 碎裂岩的出露暗示着龙门山断裂带在八角庙处比深溪沟处具有更大的抬升量。基于以上认识, 我们认为对断层不同段或不同部位断层岩样品开展镜质体反射率测试, 可能会对断层的活动性提供有价值的信息。只是限于镜质体的起源问题, 该方法对于志留纪以前的岩层并不适用(如北川断层泥样品中未观察到镜质体)。

在断层露头尺度上, 断层岩的镜质体反射率呈现出越靠近断层面, 数值越大的特点(图 4a), 反映了断层活动的热效应对断层岩镜质体反射率可能存在着重要影响。但是, 在紧邻断层面 1m 的尺度内, 我们观察到断层岩的镜质体反射率与距离之间的关系比较复杂(图 4b)。可能的原因是每次地震事件的同震滑动带存在一些偏移, 所测的局部高值可能是过去地震事件的断层作用造成的。Sakaguchi 等(2011)在对日本 Nankai 海沟钻探岩心样品的研究中, 曾用镜质体反射率来识别地震滑动带。由于工作量的限制, 本文并未对图 2c 中长约 1m 的断层泥样品进行密集连续取样测试, 尽管如此, 图 4b 的结果仍预示着可能存在多个镜质体反射率高值带, 分别对应着过去地震事件中可能的滑动带。因此, 对于成熟断层带, 如果对横跨断层面的断层岩样品进行精细的镜质体反射率测试, 就有可能识别过去所有的地震滑动带, 甚至对地震事件的个数也能做出估计。从这个意义上讲, 断层岩的镜质体反射率确实能够作为指示地震事件的重要地质指标, 对于探讨地震活动性具有重要的应用价值。

3.2 对同震滑动带宽度的启示

按照断层带结构描述的一般准则, 考虑到剪切结构方向性和连续性(参见图 2d), 图 5a 中的单元 1—5 被认为是同震滑动带, 总宽度 5~6cm。但图 5b 中各变形单元镜质体反射率的离散特征似乎对这种认识提出了疑问。各单元内镜质体反射率的离散度在一定程度上指示了镜质体颗粒摩擦升温的不均匀性, 也暗示着剪切变形的不均匀性。实际上, 仅凭肉眼我们就可以在多数变形单元内分辨出更细的剪切条带, 特别是单元 1 内存在 2 条明显的黑色条带(图 5a)。这 2 条黑色条带具有较大的镜质体反射率值, 造成单元 1 内的反射率离散度较大。Lin(2011)曾报道过八角庙同震滑动面上存在由剧烈磨细和流体化作用产生的黑色超碎裂脉体, 图 5a 中黄色箭头所示的黑色条带很可能具有类似的成因, 这或许也正是其具有较高镜质体反射率的原因。那么, 无论单元 1 内的黑色条带代表着单条滑动带, 还是被挤入裂隙之中的滑动带物质, 其镜质体反射率高值强烈局部化的事实是否暗示着真正的同震主滑动带宽度远小于根据野外剪切结构观察划定的宽度呢?

Sibson(2003)曾对地震断层的滑动带宽度问题做过总结, 认为在地表通常应当是 mm—cm 量级, 向地下深部延伸有逐渐减小的趋势。对汶川地震多个断层带露头结构的直观描述也揭示了同震滑动带的宽度大约是几 cm(Chen *et al.*, 2013a; Yao *et al.*, 2013a)。但是, 一些学者认为真正容纳高度剪切变形的只是名义上“视”滑动带中的一部分, 其宽度可能只有数百 μm (Rice, 2006)。这种观点在高速摩擦实验样品的微结构观察中能够得到一些佐证。经历高速剪切变形的实验样品, 一般在靠近旋转端围岩附近发育有宽度约数百 μm 的高度剪切变形带, 该带内部粒度显著减小, 一般呈现出滑动带叠覆的特征; 然而, 相对于数百 μm 的高度变形带, 单条滑动带的宽度仅有几 μm 至几十 μm (Yao *et al.*, 2013a, b)。同理可以推断, 野外断层带上真正容纳同震滑动的主滑动带的宽度也应当远小于依据宏观剪切结构划分的视滑动带宽度。根据图 5b 的结果, 我们认为对断层滑动面附近镜质体反射率空间分布的精细观测能够对同震主滑动面的宽度给出更可靠的估计。

3.3 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, ρ 、 c 、 α 、 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 $A_0 = \tau \times v / (2w) = \tau \times u / (2w t^*)$, 这里 τ 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。

目前, 煤和石油研究领域常用的镜质体反射率模型是基于平行反应的变活化能计算模型(Sweeney *et al.*, 1990):

$$R(\%) = \exp(-1.6 + 3.7F) \quad (2)$$

式(2)中, R 为镜质体反射率; F 代表着反应程度, 可以由描述镜质体成熟过程的一系列平行反应的动力学参数计算得到。然而, Kitamura 等(2012)基于中高速摩擦实验开展的相关研究表明, 式(2)给出的长时间尺度内镜质体成熟的动力学模型并不适用于断层同震滑动中短时间内急剧升温的情况。比如对于给定的镜质体反射率增量, 该模型将高估摩擦升温的数值; 对于给定的摩擦升温, 该模型将低估镜质体反射率的增量。Kitamura 等(2014)对高速摩擦样品的镜质体反射率和计算得到的温度数据进行了拟合, 给出了 1 个简单的经验式:

$$\Delta R(\%) = 0.28 \exp(0.0048 T_{\max}) - 0.10 \quad (3)$$

式(3)中, ΔR 表示镜质体反射率的增量, T_{\max} 为镜质体颗粒所经历的最高温度。式(3)中忽略了时间依赖性, 只针对类似于地震的快速摩擦升温情况。该式并不严谨, 比如 T_{\max} 在常温时, ΔR 就大约为 0.2%; 但在快速摩擦升温比较显著时, 该式能够较好地描述实验数据(Kitamura *et al.*, 2014)。

具体到本文中的深溪沟断层露头探槽处, 取滑动位移 $u = 5.3\text{m}$ (何宏林等, 2008), 滑动持续时间 $t^* \approx 10\text{s}$ (Zhang *et al.*, 2009), 断层泥密度 $\rho = 2160\text{kg/m}^3$, 比热 $c = 800\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 热扩散率 $\alpha = 6.5 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ (Chen *et al.*, 2013b; Yao *et al.*, 2013b)。考虑到图 5b 中单元 1 内的黑色条带代表着断层同震变形中局部化的 1 条滑动带, 其宽度近似为 2mm (即 $2w = 2\text{mm}$), 其内镜质体测点的反射率平均值为 1.84%。考虑到单元 1 内镜质体测点的反射率平均值为 1.33%, 我们假设同震摩擦滑动导致黑色滑动带的镜质体反射率从 1.33% 增加到 1.84%, 即 $\Delta R = 0.51\%$ 。由式(3)可得, 断层同震摩擦升温最大值约为 162°C 。对于同震动态摩擦系数的估算, 断层上的正应力是 1 个不确定的量。考虑到断层的运动是逆冲走滑, 最大主应力位于水平方向, 因此浅表的正应力不一定很低, 如前人震后在映秀附近 20m 深度用压磁应力解除法测得的水平方向最大和最小主应力为 4.3MPa 和 2.7MPa (吴满路等, 2010)。根据式(1)和(3), 在正应力分别取 1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa 的情况下, 估算得到的断层同震动态摩擦系数分别约为 0.36、0.18 和 0.12。Wang 等(2014a)曾报道过深溪沟探槽断层泥样品在不同正应力下发生高速摩擦

滑动的稳态摩擦系数(<0.22), 本文上述计算中给出的数值与高速摩擦实验的结果基本上吻合。

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:

在断层露头尺度, 从断层角砾带往断层核部, 断层岩的镜质体反射率呈现出增大的趋势, 反映了地震过程中断层的摩擦生热对断层带镜质体反射率的影响。不同露头上断层岩的镜质体反射率可能存在显著的不同, 如虹口八角庙的断层岩的镜质体反射率明显高于深溪沟露头, 反映了断层在前者附近可能具有更强烈的活动。在断层核部, 镜质体反射率的空间变化比较复杂, 可能代表着过去多次地震事件带来的影响。因此, 如果横跨断层带开展系统性的镜质体反射率测试, 就有可能识别出以往地震的滑动带, 对每次地震滑动带的宽度也能给出更好的约束。在同震滑动带明确的情况下, 断层岩的镜质体反射率能够用于评估断层的摩擦生热和动态摩擦强度。以深溪沟露头上包含滑动面的 1 块样品为例, 计算表明汶川地震过程中该露头附近的宏观摩擦升温可能 $<162^{\circ}\text{C}$, 在正应力分别被假定为 1.0MPa、2.0MPa 和 3.0MPa 的情况下, 估算得到的断层同震动态摩擦系数分别约为 0.36、0.18 和 0.12。

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 bedded rocks during the Wenchuan earthquake [J]. Quaternary Sciences, 30(4), 745—758 (in Chinese).
- 郝芳, 陈建渝. 1988. 可作为有机相指标的镜质体反射率 [J]. 地质科技情报, 4: 113—117.
- HAO Fang, CHEN Jian-yu. 1988. Vitrinite reflectance may be used as marker of organic facies [J]. Geological Science and Technology Information, 4: 113—117 (in Chinese).
- 何宏林, 孙昭民, 王世元, 等. 2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带 [J]. 地震地质, 30(2): 359—362.
- HE Hong-lin, SUN Shao-min, WANG Shi-yuan, *et al.* 2008. Rupture of the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake [J]. Seismology and Geology, 30(2): 359—362 (in Chinese).
- 王萍, 付碧宏, 张斌, 等. 2009. 汶川 8.0 级地震地表破裂带与岩性关系 [J]. 地球物理学报, 52(1): 131—139.
- WANG Ping, FU Bi-hong, ZHANG Bin, *et al.* 2009. Relationship between surface ruptures and lithological characteristics of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(1): 131—139 (in Chinese).
- 吴满路, 张岳桥, 廖椿庭, 等. 2010. 汶川地震后沿龙门山断裂带原地应力测量初步结果 [J]. 地质学报, 84

- (9): 1292—1297.
- WU Man-lu, ZHANG Yue-qiao, LIAO Chun-ting, *et al.* 2010. Preliminary results of in-situ stress measurement along the Longmenshan fault zone after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1292—1297(in Chinese) .
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 2008. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造 [J]. *地震地质*, 30(3): 597—629.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, YE Jian-qing, *et al.* 2008. The M_s 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure [J]. *Seismology and Geology*, 30(3): 597—629(in Chinese) .
- 张雷, 何昌荣. 2014. 龙门山映秀-北川断裂平溪黑色断层泥中有机质成分分析及对断层摩擦滑动性质的影响 [J]. *地震地质*, 36(3): 896—906. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.03.026.
- ZHANG Lei, HE Chang-rong. 2014. Analysis of organic components and its effect on the frictional properties of Pingxi black gouge in Yinxu-Beichuan Fault of Longmenshan fault zone [J]. *Seismology and Geology*, 36(3): 896—906(in Chinese) .
- 赵孟为, Behr H. 1996. 鄂尔多斯盆地三叠系镜质体反射率与地热史 [J]. *石油学报*, 17(2): 15—23.
- ZHAO Meng-wei, Behr H. 1996. Vitrinite reflectance in Triassic with relation to geothermal history of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 17(2): 15—23(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.
- Chen J, Yang X, Yao L, *et al.* 2013b. Frictional and transport properties of the 2008 Wenchuan earthquake fault zone: Implications for coseismic slip-weakening mechanisms [J]. *Tectonophysics*, 603: 237—256.
- Fukuchi T, Mizoguchi K, Shimamoto T. 2005. Ferrimagnetic resonance signal produced by frictional heating: A new indicator of paleoseismicity [J]. *J Geophys Res*, 110(B12404) . doi: 10.1029/2004jb003485.
- Fulton P M, Brodsky E E, Kano Y, *et al.* 2013. Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements [J]. *Science*, 342(6163) : 1214—1217. doi: 10.1126/science.1243641.
- Fulton P M, Harris R N. 2012. Thermal considerations in inferring frictional heating from vitrinite reflectance and implications for shallow coseismic slip within the Nankai subduction zone [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 335: 206—215.
- Hirono T, Ujiie K, Ishikawa T, *et al.* 2009. Estimation of temperature rise in a shallow slip zone of the megasplay fault in the Nankai Trough [J]. *Tectonophysics*, 478(3-4) : 215—220.
- Hirono T, Yokoyama T, Hamada Y, *et al.* 2007. A chemical kinetic approach to estimate dynamic shear stress during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 34(19) : L19308.
- Hou L, Ma S, Shimamoto T, *et al.* 2012. Internal structures and high-velocity frictional properties of a bedding-parallel carbonate fault at Xiaojiaqiao outcrop activated by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Science*, 25, 197—217.
- Ikehara M, Hirono T, Tadai O, *et al.* 2007. Low total and inorganic carbon contents within the Taiwan Chelungpu fault system [J]. *Geochemical Journal*, 41(5) : 391—396.
- Kanamori H, Brodsky E E. 2004. The physics of earthquakes [J]. *Reports on Progress in Physics*, 67(8) : 1429—1496.
- Kitamura M, Mukoyoshi H, Fulton P M, *et al.* 2012. Coal maturation by frictional heat during rapid fault slip [J].

- Geophysical Research Letters ,39(16) : L16302.
- Killops S D , Killops V J. 2009. Introduction to Organic Geochemistry [M]. Blackwell Publishing , Malden.
- Kitamura M , Mukoyoshi H , Hirose T. 2014. A new fault-thermometer based on vitrinite maturation by coseismic frictional heating [R]. General Assembly 2014 , European Geosciences Union , EGU2014-9552 , Vienna , April 27-May 2 , 2014.
- Lachenbruch A H. 1986. Simple models for the estimation and measurement of frictional heating by an earthquake [R]. U S Geological Survey , Open File Report 80-625. 47-146.
- Li H , Wang H , Xu Z , *et al.* 2013. Characteristics of the fault-related rocks , fault zones and the principal slip zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole -1(WFSD-1) [J]. Tectonophysics , 584: 23-42.
- Lin A. 2011. Seismic slip recorded by fluidized ultracataclastic veins formed in a co-seismic shear zone during the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake [J]. Geology , 39(6) : 547-550.
- Liu-Zeng J , Wen L , Sun J , *et al.* 2010. Surficial slip and rupture geometry on the Beichuan Fault near Hongkou during the M_w 7.9 Wenchuan earthquake , China [J]. Bulletin of the Seismological Society of America , 10: 2615-2650.
- Mishima T , Hirono T , Soh W , *et al.* 2006. Thermal history estimation of the Taiwan Chelungpu Fault using rock-magnetic methods [J]. Geophysical Research Letters , 33(23) : L23311.
- O'Hara K , Hower J C , Rimmer S M. 1990. Constraints on the emplacement and uplift history of the Pine Mountain thrust sheet , eastern Kentucky: Evidence from coal rank trends [J]. The Journal of Geology , 98(1) : 43-51.
- Polissar P J , Savage H M , Brodsky E E. 2011. Extractable organic material in fault zones as a tool to investigate frictional stress [J]. Earth and Planetary Science Letters , 311(3-4) : 439-447.
- Rice J R. 2006. Heating and weakening of faults during earthquake slip [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth , 111(B05311) .
- Sakaguchi A , Chester F , Curewitz D , *et al.* 2011. Seismic slip propagation to the updip end of plate boundary subduction interface faults: Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTro SEIZE cores [J]. Geology , 39(4) : 395-398.
- Sakaguchi A , Yanagihara A , Ujiie K , *et al.* 2007. Thermal maturity of a fold-thrust belt based on vitrinite reflectance analysis in the Western Foothills complex , western Taiwan [J]. Tectonophysics , 443(3-4) : 220-232.
- Sibson R H. 2003. Thickness of the seismic slip zone [J]. Bulletin of the Seismological Society of America , 93(3) : 1169-1178.
- Sweeney J J , Burnham A K. 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bulletin , 74(10) : 1559-1570.
- Tissot B P , Pelet R , Ungerer P. 1987. Thermal history of sedimentary basins , maturation indices , and kinetics of oil and gas generation [J]. AAPG Bulletin , 71: 1445-1466.
- Togo T , Shimamoto T , Ma S , *et al.* 2011. Internal structure of Longmenshan fault zone at Hongkou outcrop , Sichuan , China , that caused the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Earthquake Science , 24(3) : 249-265.
- Wang H , Li H , Si J , *et al.* 2014b. Internal structure of the Wenchuan earthquake fault zone , revealed by surface outcrop and WFSD -1 drilling core investigation [J]. Tectonophysics , 619-620(2014) : 101-114.
- Wang Y , Ma S , Shimamoto T. 2014a. Internal structure and high-velocity frictional properties of Longmenshan fault zone at Shenxigou outcrop activated by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Earthquake Science , 27: 499-528.
- Waples D W. 1980. Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration [J]. AAPG Bulletin , 64(6) : 916-926.

- Yang T , Chen J , Wang H , *et al.* 2012. Rock magnetic properties of fault rocks from the rupture of the 2008 Wenchuan earthquake , China and their implications: Preliminary results from the Zhaojiagou outcrop , Beichuan County (Sichuan) [J]. *Tectonophysics* , 530-531(2012) : 331—341.
- Yao L , Ma S , Shimamoto T , *et al.* 2013a. Structures and high-velocity frictional properties of the Pingxi fault zone in the Longmenshan fault system , Sichuan , China , activated during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Tectonophysics* , 599: 135—156.
- Yao L , Shimamoto T , Ma S , *et al.* 2013b. Rapid postseismic strength recovery of Pingxi fault gouge from the Longmenshan fault system: Experiments and implications for the mechanisms of high-velocity weakening of faults [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* , 118: 4547—4563.
- Yao L , Ma S , Niemeijer A R , *et al.* 2016a. Is frictional heating needed to cause dramatic weakening of nanoparticle gouge during seismic slip? Insights from friction experiments with variable thermal evolutions [J]. *Geophysical Research Letter* , 43: 6852—6860. doi: 10.1002/2016GL069053.
- Yao L , Ma S , Platt J D , *et al.* 2016b. The crucial role of temperature in high-velocity weakening of faults: Experiments on gouge using host blocks with different thermal conductivities [J]. *Geology* , 44(1) : 63—66. doi: 10.1130/G37310. 1.
- Zhang Y , Feng W , Xu L , *et al.* 2009. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake [J]. *Science in China(Ser D)* , 52(2) : 145—154.

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

YAO Lu¹⁾ MA Sheng-li¹⁾ WANG Yu²⁾ HE Hong-lin³⁾ CHEN Jian-ye¹⁾
YANG Xiao-song¹⁾ SHIMAMOTO Toshihiko¹⁾

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. The residual indicators of frictional heating within the fault zone also can be taken as an evidence for seismic events. The vitrinite reflectance is a commonly-used geothermometer in the coal, oil and gas industries. It also has some potential applications in the studies of fault rock and fault mechanics. We studied vitrinite reflectance (VR) of fault rocks collected from surface outcrops of the Wenchuan earthquake fault zone in this paper. The measured data reveal that the VR of fault rocks are affected by fault motion, and there is a trend that the VR increases towards the fault core, which indicates the effects of frictional heating. The VR of fault rocks from the Bajiaomiao outcrop is much higher than those from the Shenxigou outcrop, which probably suggests the difference in fault activity at the two outcrops. Our study also suggests that systematic measurement of VR across the fault zone is helpful in identifying slip zones and determining their widths. From the VR measurement on an oriented specimen containing the slip surface of the Wenchuan earthquake from the Shenxigou outcrop, we observed anomalous high VR values in two black-colored slip zones of about 2mm in width near the slip surface. The numerical calculation shows that the maximum temperature rise on the fault plane near Shenxigou was probably less than 162°C during the Wenchuan earthquake, which means the dynamic fault strength was quite low. These estimations are roughly in accord with the results from the high-velocity frictional experiments.

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。