

# 地震动力：由巨观到微观

## ——1999 年台湾集集地震

马国凤<sup>†</sup>

(中央大学地球科学系暨地球物理研究所 台湾中坻 32001)

**摘要** 决定地震发生时的断层破裂能量和了解一个断层带的孕育与发展都需要地震和地质数据的结合。在一个大地震的发生过程中,藉由地震仪的记录分析,了解地震断层破裂过程中其断层的几何破裂行为及其机制,甚至分析其运动学上的灾害行为。在地震源分析中文章作者将以上行为分析称为地震的巨观分析。而地震的微观分析,则是以探讨当地震断层及破裂前缘持续向前前进时,其所需的破碎能量及其形成的极小颗粒之断层泥的物理化学机制。此断层滑移带中的断层泥之物理机制、化学组成及地震断层滑移带厚度,皆为了解地震滑移时摩擦行为及能量释放的重要参数。地震的巨观及微观行为的结合分析,为地震学上重要的突破,使人们得以进一步了解地震破裂过程中的摩擦行为、温度及压力的变化,并探讨地震时造成的地表位移、速度及加速度行为。但断层滑移带的断层泥并不易获得,除非有清楚的深部断层几何,并能以深钻的方式取得断层泥材料进行分析。1999年7.6级的台湾集集大地震产生地表或近地表8—12m的滑移,此近地表的滑移是钻井容易达成的,因此提供一次难得的机会,得出大地震滑移带的断层泥了解大滑移断层的动力机制。而2008年四川汶川地震为另一了解此巨观与微观机制的地震。

**关键词** 断层破裂过程,地震动力,深钻,断层泥,滑移带物理化学

## Earthquake dynamics-from macroscopic to microscopic : examples learnt from the 1999 Chi - Chi earthquake in Taiwan

MA Kuo-Fong<sup>†</sup>

(Department of Earth Sciences & Institute of Geophysics, National Central University, Taiwan Chungli 32001, China)

**Abstract** Determining the seismic fracture energy during an earthquake and understanding the associated creation and development of a fault zone requires a combination of both seismological and geological field data. The analysis of earthquake kinematics from seismic waveform data, which we call macroscopic seismology, can help us understand the temporal and spatial slip distribution, and furthermore, the possible associated hazard pattern. The actual thickness of the zone that slips during the rupture of a large earthquake is not known and is a key seismological parameter in understanding energy dissipation, rupture processes and seismic efficiency. This analysis requires the investigation of fault gouge related to an earthquake, and we call it microscopic seismology. The overall understanding of earthquake dynamics requires the integration of macroscopic with microscopic studies. The 1999 magnitude-7.6 earthquake in Chi-Chi, Taiwan, produced a large slip (8 to 12 m) at or near the surface, which was accessible to borehole drilling and provided a rare opportunity to sample a large slip fault. The Taiwan Chelungpu-fault drilling project retrieved samples from the fresh slip zone associated with the 1999 Chi-Chi earthquake. The surface fracture energy estimated from grain sizes in the gouge zone of the fault was directly compared to the seismic fracture energy determined from near-field seismic data. The chemical and physical characteristics of the retrieved core

2008-12-26 收到

<sup>†</sup> Email fong@earth.ncu.edu.tw

helped us give the constraints on the faulting dynamics as thermal pressurization, which yielded the large slip and slip velocity with less acceleration observed at the northern portion of the fault. The opportunity of linking earthquake studies from the macroscopic to the microscopic is rare and unique. The 2008 Wenchuan earthquake is another possible earthquake for this integrated seismology study.

**Keywords** earthquake rupture process, earthquake dynamics, fault zone drilling, fault gouge, slip zone physical chemistry

## 1 引言

2008年5月12日8.0级汶川大地震发生于四川盆地的西北边缘,在地质及地体构造上为沿着龙门山断裂带中的北川-映秀断层。龙门山断裂带与成都盆地的关系,在地形上类似1999年的7.6级台湾集集地震中破裂的车笼埔断层与台中盆地的关系,地体构造环境也与台湾921集集地震的车笼埔断层类似,两者都是位于板块边界活动构造变形前缘。汶川地震机制为东北-西南走向,往西倾角约 $30^\circ$ 的逆断层机制。目前研究分析,此地震断层长约250km,主要滑动量为扩展至深度数十公里处,最大位移量约9m,与921集集地震相对照,921地震为沿着车笼埔断层约100km的破裂长度,断层面往东倾角 $30^\circ$ ,近地表最大位移量达12m。四川地震的大尺度构造机制为印度板块往北挤压欧亚大陆板块造成青藏高原向北及向东位移,但受阻于四川地块,而形成宽大的南北向挤压构造带。龙门山断裂带是这个挤压构造带中最东缘的逆冲断层带,长约500km,宽约70km。这次地震活动主要是位于此断裂带中央的北川-映秀断层错动所致,以逆冲为主,伴有右移分量的错动。龙门山断层带与成都盆地新时期构造型式关联,与中台湾西部麓山带与台中盆地间十分相似,只是台湾构造运动是由于菲律宾海板块向西北西碰撞欧亚大陆板块所形成,因此台湾岛内断层的发展为东向西发展,而龙门山构造由于以上所述的青藏高原向北及向东位移,所以其构造为由西向东发展。

1999台湾集集地震发生时,全台近800部强地动地震站,记录了地震发生当时地震破裂及传递特性,使得我们可以在地质调查之外,分析地震源于地底下断层错动及滑移速率行为,进而了解滑移特性与地震灾害行为的关系,配合精确的野外地质及地球物理调查、大地卫星数据及近场的地震资料,我们得以明确地描绘出断层在地底下的形貌,进而深钻至地震发生的断层滑移面,由其岩芯物理化学行为及颗粒分析,了解地震震源破裂的运动学及动力学特性。在此文中所描述的地震动力的“宏观”跟“微

观”是在921地震之后,以个人这几年来的研究为主体,以对地震波的观测和对地震断层岩芯深入的分析结果为内容。

## 2 集集地震运动学分析

自1993年开始,全台湾陆续建构了约九百多个强震站,沿着车笼埔断层,从南段到北段的强震站,将沿途断层的地震波形记录得非常清楚(图1)。在南段显示非常高频的信号,使得较矮的房子容易倒塌;北段则有较长周期的信号,相对较大的建筑较易造成灾害。以地震波的反演模拟可以得出断层发生时在地底下破裂的特性。

在运动学的分析中,我们使用了三种独立的数据组分析地震的破裂过程,这三种数据组包括高品质近源强地动纪录、广带远程地震断层位移波形、及完善分布的GPS断层位移<sup>[1,2]</sup>。以有限源逆推来预估断层几何面上的空间及时间滑移分布,结果显示了大部分滑移深度是很浅的(少于10km),且集中在震中北部有最大断层位移12—15m,接近震源的滑移为3—6m不等,滑移向量显示了在断层破裂时是呈现顺时针旋转,整个破裂持续约28s,而破裂速度约为剪力波波速度的75%到80%(见图2)。在研究中亦发现,集集地震之断层破裂面为复杂的三维构造,加上台湾区域速度侧向变化大,若欲仔细分析此地震之破裂行为,需以三维构造加以分析。以三维构造分析集集地震破裂过程<sup>[3,4]</sup>,透过并列线性逆推技术所求得的高精度震源逆推结果指出,921集集地震的震源总错动持续时间接近60s,其破裂过程不论在静态或动态上均极为复杂。静态破裂分析指出,主要错动发生在深度小于10km的断层浅部,最大错动量15.8m,位于断层北端转折区,并向下延伸至15km深处,此极大错动区属于同一发生机制而非独立事件;动态破裂分析中更可明显看出,断层面上南北两端有着截然不同的破裂行为,南端由滑移速率小但次数较多的重复滑移所构成,错动持续时间长达30s,而北端极大破裂区之破裂行为主要由

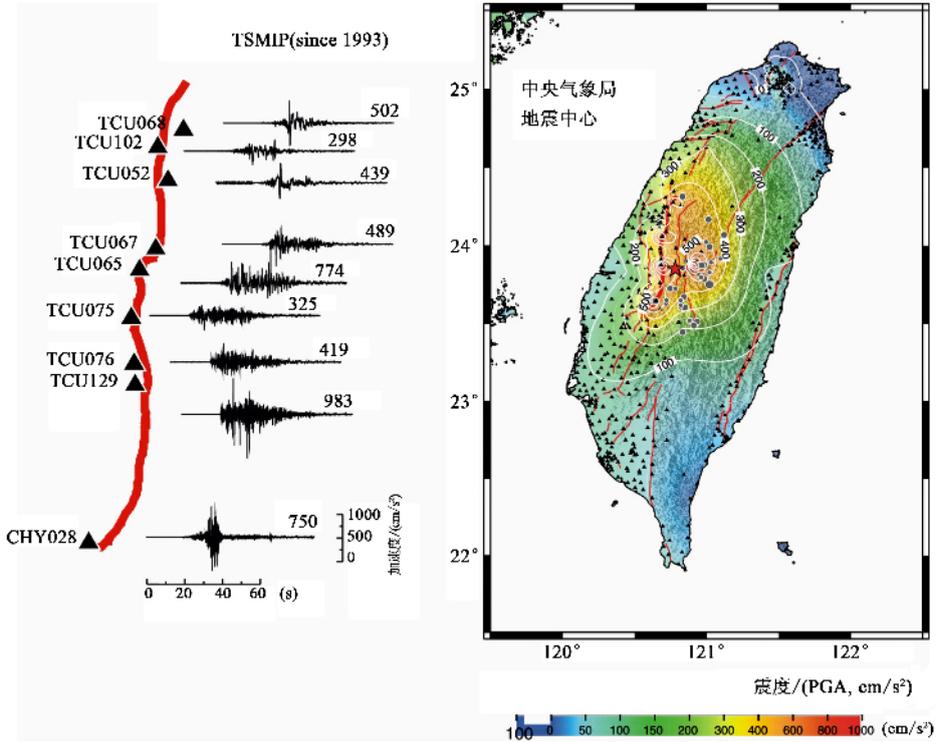


图1 台湾强震动观测网分布(黑色实心三角形)及1999年集集地震发生时全台的地震震度分布,震中以星号表示.细线表示活动断层,粗线为集集地震破裂的车笼埔断层.左图为其断层沿线的地震站加速度纪录,其右上方的数据表示其纪录的最大加速度值

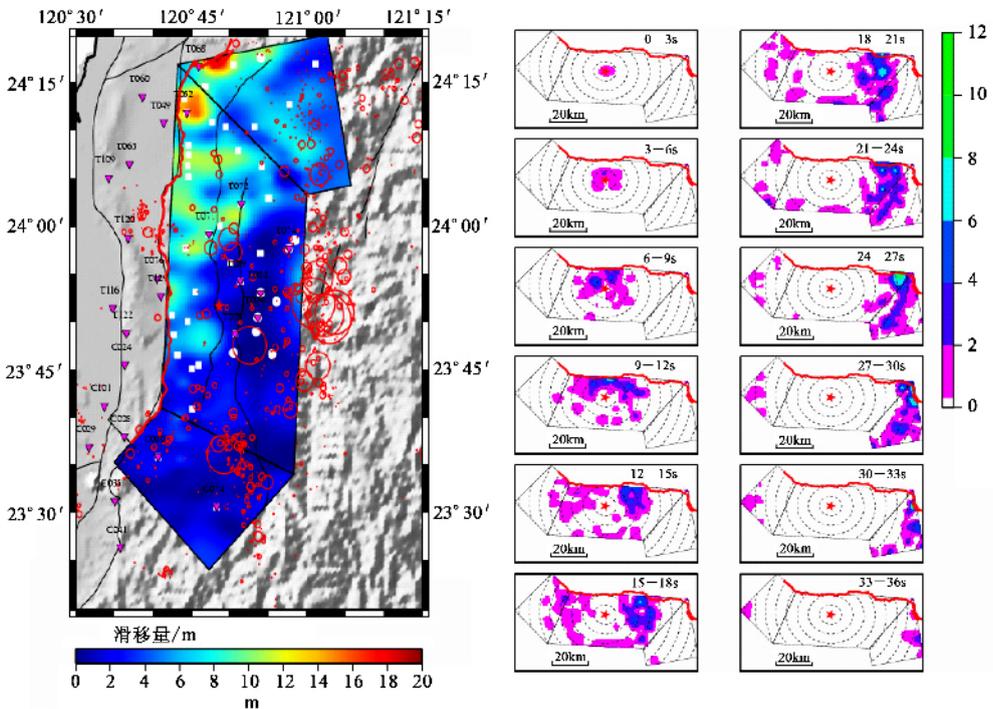


图2 以有限断层波形反演得出集集地震破裂的车笼埔断层面上滑移量分布,颜色阶显示其滑移量.右方图标显示地震断层破裂时每三秒的破裂位置及滑移量<sup>[2]</sup>

滑移速率极高、持续时间仅 10s 的单一错动所支配。与过去的相关地震源分析研究比较,此分析用于静态破裂分析时的解析能力有很大的提升,即使就细部的动态破裂过程来看,此次的分析确实发现许多过去所无法完整呈现的现象。这些高精度的静态、动态破裂过程,对于后续震源物理与强地动预估等相关研究,可提供更为详尽的信息。

此南北滑移量的差异,究竟是由什么机制所控制?地震断层的位移跟速度是一个混沌的行为,因为断层滑动时会产生摩擦力,摩擦生热,热造成熔融,熔融带来润滑,断层一受到润滑就更容易造成大幅度的位移滑动,此滑动又产生热,如此不断的循环形成一自我回馈的系统。所以地震研究与一般物理化学研究不同,它还必须考虑在地质材料条件下的力学特性。

由简单的理论来看,地震断层两面(或称上下盘)的接触面是不平滑的表面,当地震发生的时候,不平滑的接触面由于摩擦产生高频的信号,但一旦其滑动速度变得很快时,断层两面内的材料(断层泥),会因其存在的液体与熔融物质而产生液压,这压力造成断层的正压力,将断层扩开,若没有液体的存在,它会产生熔融,此时断层受到润滑作用,断层接触面变平滑,高频的加速度消失,变成较长周期的加速度及较大的速度及位移<sup>[5,6]</sup>。此断层润滑的行为,在断层北段的地震站 TCU068 有清楚的“暗示”,如图 3 所示,其加速度的高频信号,当速度达到最高的时候高频信号不见了,此时位移持续滑移至最大位移<sup>[7]</sup>。从地震动力学观点来看,我们接着想要从地震的摩擦行为和断层面的物理与化学特性来了解地震能量的大小,此研究的关键在于取得地震滑移过的断层材料。在此之前的研究皆使用暴露在地表并且经过好几千年甚至万年的断层材料,而 921 地震的车笼埔断层则可提供最佳的新鲜滑移过的断层材料<sup>[8]</sup>,因此我们积极展开台湾车笼埔断层深钻计划(Taiwan Chelungpu-fault drilling project, TCDP)。

### 3 微观地震动力

在地震断层破裂滑移的行为中,热与压力(摩擦力)扮演着重要的角色,控制了地震最后的行为,此行为的观测除了地震动力模拟(Earthquake Dynamic Modeling)外,最直接的观测为取得地震断层滑移过的材料(断层泥)作分析,以了解在巨大的滑

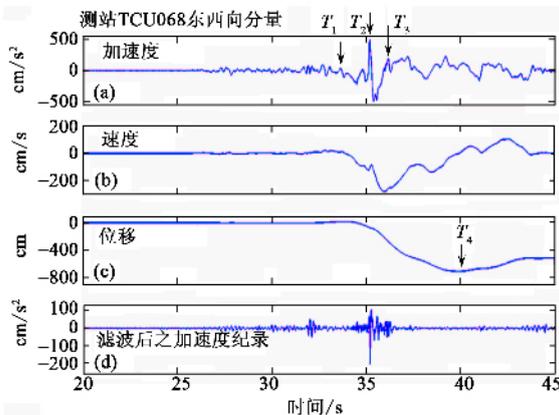


图3 TCU068 地震站记录的的东西分量加速度、速度及位移纪录,最下方为 5Hz 高通滤波后的加速度纪录。地震于  $T_1$  时开始, $T_2$  时有最大加速度, $T_3$  时有最大速度,于  $T_4$  时滑移停止。在  $T_3$  以后,高频信号消失,显示在此时可能断层滑润行为开始

移过程当中,其在断层泥上所产生的物理及化学行为,及其摩擦的行为和温度的变化。此种微观分析,或许可帮助我们更明确地了解地震动力进而分析地震的开始与结束。直到现在我们还是无法完全了解集集地震的行为,但此地震带来的地震资料及断层泥材料,使我们在作巨观的地震波分析中,可配合地质及其他地球物理的研究,发展断层滑移的时空分布及其加速度及速度的滑移特性。在微观的过程中,由断层的材料了解其摩擦力跟热的变化,或许可以帮助我们更明确地了解地震动力学进而分析地震的开始与结束。我们今天所看到的只是一个“暗示”,希望以此为基点,对地震的开始与结束建立一个更清楚的模型。

### 4 台湾车笼埔断层深钻计划(TCDP)

集集地震错动的车笼埔断层滑移长约 100km,造成高达 8m 之垂直位移。由地震资料所反演出的断层面上之滑动位移量,与地表地质观测的结果相当吻合,显示出大部分的滑移发生于深度少于 10km,且在靠近断层北端,有一个高达 12m 的巨大滑移量。在断层北段区域,位移量非常大,但地表加速度之等级反而是较低的;而在断层南段有较小的位移,但加速度等级较高。此近地表之断层位移且倾角小的滑移特性,提供了我们在世界地震地质界一个独一无二的机会,藉由钻探得出地震大量位移下的新鲜断层泥,了解断层带在位移时的物理及化学行为。此大规模滑动位于浅层,且断层几何是  $30^\circ$  的倾角,因此垂直钻井即有机会打到断层带。与美国与

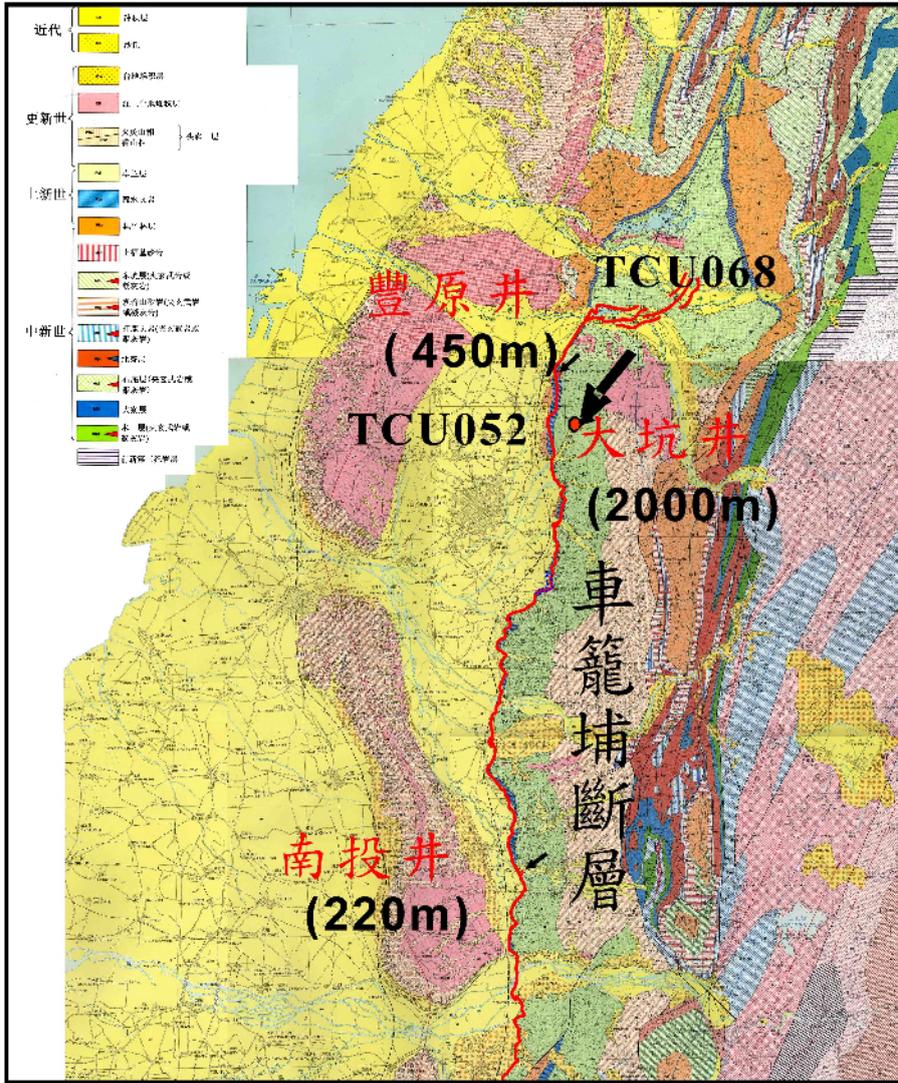


图4 车笼埔深钻在2001年开钻的南北两孔浅井(丰原井与南投井)及2004年 TCDP 计划台中大坑深井的地理位置. 深色线条为1999集集地震车笼埔断层错动的断层线

日本作过的相关研究相比较,其当地的地震断层滑移量都在较深的位置,且多为垂直走向的断层,钻井需要庞大的经费,必须先垂直钻后再侧钻,容易产生失误.九二一地震的强震、大地测量、地质及地球物理探测的数据,将断层底下的几何描绘得非常清楚,虽然深钻只提供点的数据,但此控制点乃是重要的关键信息.

在地震发生后的来年,我们与日本学者合作于断层北段及南段进行两口浅井钻探(~300m),分别为丰原井与南投井<sup>[9]</sup>.此浅井的丰富经验及科学成果使得我们有信心做更深的钻探(图4).Wang等<sup>[10]</sup>在集集地震发生后,完成了数个沿着或穿越车笼埔断层的、由震测剖面清楚表示的断层面图,此明显的断层图可以当作是破裂区位置的样本,提供以大坑为深钻点和由震测剖面显示的断层滑移面约位

于大坑井下1100m深度的信息(图5).地震数据反演显示此处位移量约为12m.在2005年深钻开始进行,共钻两口井及一侧钻(A井B井及C井),其中A井为2km深,在深度1111m打到断层带;B井为1.5km,在深度1136m打到断层带,皆成功取出岩心,进而由B井950m处侧钻再取出岩心(图6),提供世界各地学者进行研究分析.利用此岩心以探讨组成微小结构变形以及岩石力学在破裂原处等的物理特性,并以其化学组成及岩心颗粒,了解其物理(包含静力学及动力学)及化学地震破裂过程及机制,并藉助于深井力学实验,了解断层应力结构.深钻完成后,我们于2007年在井A设置高分辨率的跨断层七层三分量井下地震仪,提供监测断层带孕震期断层滑移行为的重要监测.除此之外,利用跨断

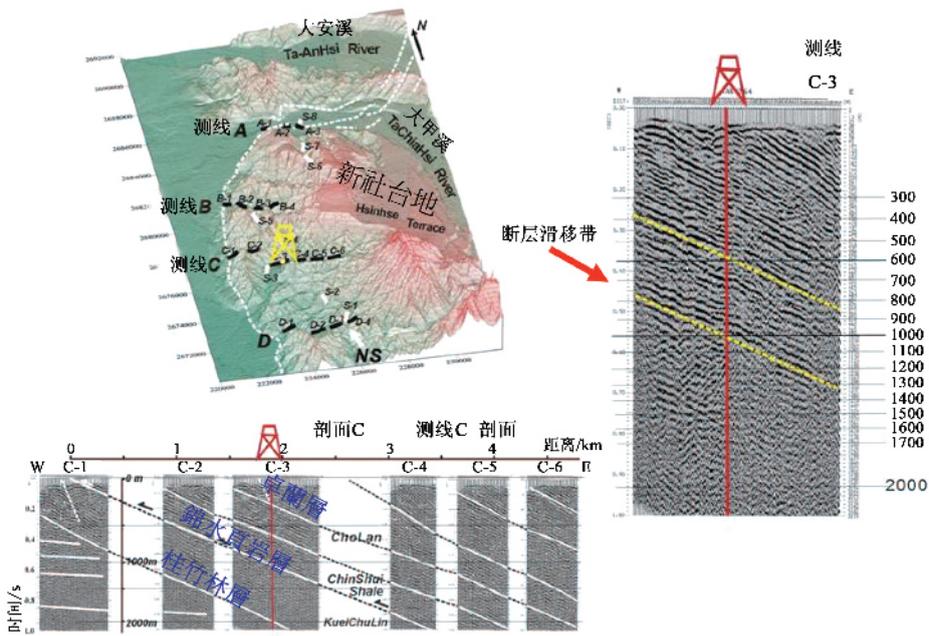


图5 横跨井址之一东西向震测剖面 表现出测区地层均匀向东倾斜及其所对应的各岩层. 显示 TCDP 深钻处的车笼埔断层深度大约在 1000m 处 提供岩芯钻取时重要的深度参考<sup>[10]</sup>

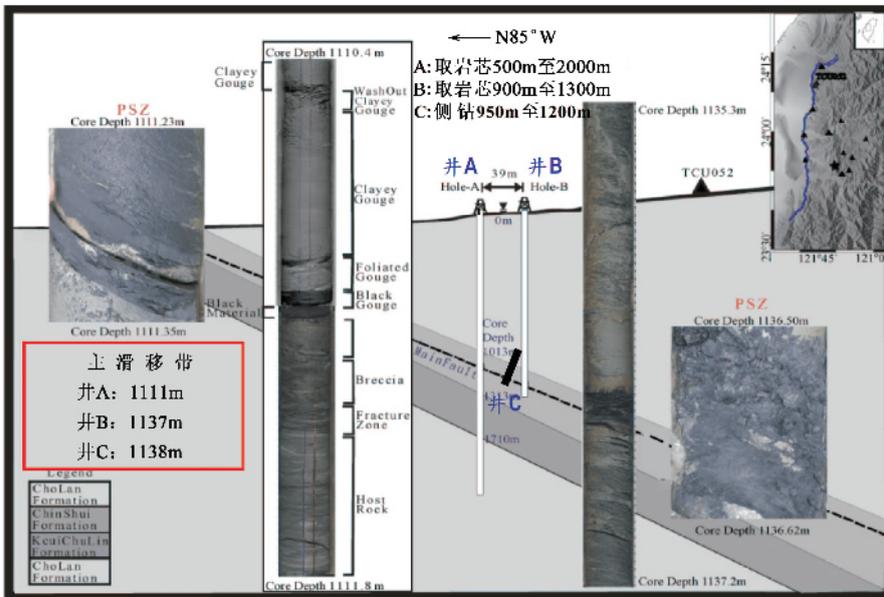


图6 车笼埔深钻井 A 井 B 及在井 B 侧钻的井 C 的示意图. 井 A 的主要滑移带 (primary slip zone) 在深度 1111m, 井 B 为 1137m, 而井 C 为 1138m 的深度. 井 A 及井 B 的主要滑移带岩芯亦显示于图中. 虚线表示车笼埔断层的滑移面, 主要在锦水页岩层内滑移

层的双井, 施行双井实验, 在井 B 灌入高压水 (fluid injection test) 探讨地震诱发行为及断层带渗透率. 由于浅井易受地表的影响, 在地球物理勘测之后, 在台中大坑开钻, 由于经费预算的关系, 以 2km 深的钻井并预估在 1km 打到断层带为目标, 并期待能打到车笼埔断层下的三义断层. 获得的多项研究成果已由许多研究学者发表于重要期刊 (<http://eqke.earth.ncu.edu.tw/TCDP/TCDPpapers.html>).

车笼埔断层钻井数据验证之科学目标为: 假设一, 弱断层 - 低分离度剪切应力下的滑移; 假设二, 断层的物理性质、化学性质及断层状态会随着地震循环 (earthquake cycle) 改变; 假设三, 大的滑移量及滑移速度会润滑断层并量化地震的总能 (尤其摩擦能)

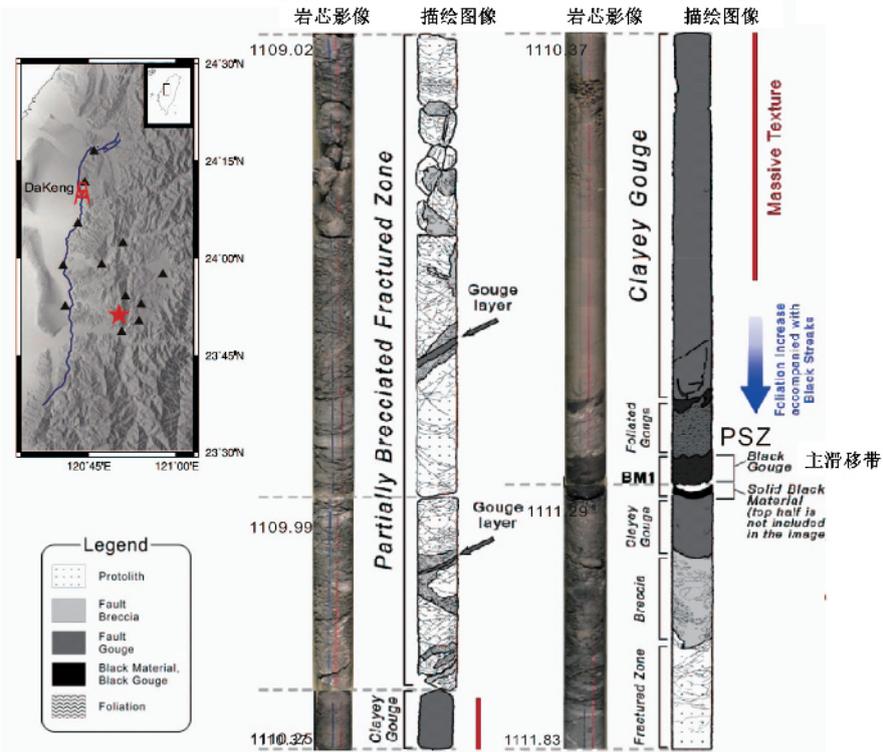


图7 井A近主要滑移带(primary slip zone, PSZ)的1m岩芯影像及描绘图,其显示粒子颗粒在近PSZ处颗粒越来越小

的估算<sup>[7,11-13]</sup>。为此钻井数据探讨以下的项目如：  
 (1)断层状态：何种因素控制滑动及应变的局部分布？能量如何被分配到震波散、摩擦力耗损、颗粒磨碎和化学反应？  
 (2)液体压力：垂直及横向的液体压力变化区域为何？断层带的范围内液体压力的时间变化为何？在大地震过后液体的垂直及横向移动宽度为何？  
 (3)应力状态：断层附近的应力变化为何？  
 (4)温度：断层带的温度构造为何？  
 (5)液体化性：断层带的液体来源及组成为何？  
 (6)渗透率：断层带的物质及其围岩的渗透性为何？  
 (7)井下应变测量：在不同的时间范围内，断层带中应变如何传递？  
 (8)震波速度( $V_p$ 和 $V_s$ )：断层带范围内震波速度( $V_p$ 及 $V_s$ )为何？泊松比为何？井孔观测与地物资料：在井孔中所测量出的物理特性及异质性与地球物理观测到的数据的关联性有多少？所产生关联性如何表示？  
 (9)参考位置的观测：钻井数据与参考位置数据之比较？沿此断层有不同的物理特性吗？  
 (10)新的微生物资料：在不同的岩石状态下搜集一些新的微生物资料。

图7为车笼埔深钻在A井中约1km深的断层带岩芯,在深度1111m处约有12cm组织非常细密的黑色物质,并在2km深时发现三义断层。此12cm的断层材料颜色非常深,非常细致,为断层主要滑移带,目前依据其物理与化学性质及其他证据,验证其

确为集集地震发生时的滑移带。但此滑移带到底滑移了几次？车笼埔断层在历史上发生过很多次地震,集集地震仅为其中之一。在经过断层模片处理后,得到如图8所示的断层主要滑移带影像及描绘图,从其中可以看到这段滑移带有4层,此12cm由许多次地震产生,而且这4层差不多间距2—3cm,而且每层的最下面约有0.5cm由更细致的材料所组成,上面几层都有横切的滑痕,其中在最下一层的2cm滑移带受到的干扰最少,且滑痕很平整,暗示此次地震由最下层的滑移带错动发生。此滑移带的观测亦暗示地震是重复发生在此滑移带,若下次车笼埔断层地震发生,依然会在此滑移带错动,且每次地震发生的行为皆相当类似,不过根据槽沟的开挖,显示下次地震的发生,可能会在三、四百年之后。

地震的总能量有多少能量贡献在断层微细颗粒的形成,有多少贡献到地震波辐射能,有多少贡献到热的变化？此问题为地震界研究的重要问题。921地震最难能可贵的地方就是可以把这些能量量化,地震的破碎能量与热能到底是什么样的关系,跟辐射能量到底是怎样分配？利用岩芯我们可以将其量化,了解滑移带颗粒子的特性,利用穿透式显微镜、绕射式显微镜和光学显微镜,可以观察出在100nm等级的显微镜下岩芯颗粒的不规则形状,反映其为断层摩擦形成的不规则颗粒,我们计算出将其磨成



图8 主要滑移带抛光后的构造及其描绘图像。单独的一层错动区域厚度约2—3cm,底部5mm处颗粒细小,位于主要错动区域的最下层处,有一2cm厚的区域,并无明显的搅动,显示可能为最近发生错动的位移带,因此推断为最主要滑移带(major slip zone, MSZ)

此大小厚度的滑移带需要多少能量。对岩芯的颗粒大小分析得出其颗粒大小与个数,其分布如图9所示,显示其行为是依据幕次现象(Power law)。在计算中我们得出形成2cm的滑移带需要 $4.3\text{MJ}/\text{m}^2$ ,若从车笼埔断层的滑动历史来看,其断层自形成以来已经发生过约30次以上的地震。假设这些地震都是在刚才12cm的滑移带内,则此2cm的滑移带至少有4—6次的地震发生。所以每次地震造成的厚度大概是3—5mm。所以一个地震形成的断层泥破裂能约是 $1\text{MJ}/\text{m}^2$ 。

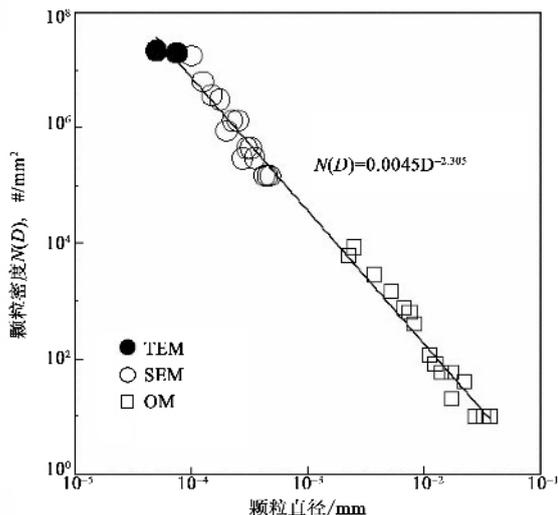


图9 主要滑移带(primary slip zone)处断层泥的颗粒大小分布

由地震波的分析,我们除了得到滑移量之外,也可得到力的变化,因此计算出地震发生的当下所做的功,其约为 $48\text{MJ}/\text{m}^2$ 。断层泥破裂能为 $1\text{MJ}/\text{m}^2$ ,与其比较,仅为其2%,其他的能量可能皆变成热。地震发生后有很大的摩擦热能,在地震发生后一年,利用断层带的浅井,量出断层带温度的变化,大概是 $0.1^\circ\text{C}$ ,得出在高滑移量的位置其热能大概是 $26\text{MJ}/\text{m}^2$ 。与岩芯 $1\text{MJ}/\text{m}^2$ 破裂能比较,热能占一大部分。利用岩芯的热相关参数,例如传导系数、扩散系数、密度、比热等等,得出传导系数造成在滑移的过程当中其温度跟压力的变化。东京大学田中教授根据热的参数及温度压力,计算出释放了大概 $10.5\text{MPa}$ 的应力,与地震波计算出的 $11\text{MPa}$ 相当一致,暗示此地震在北边的滑移时其应力是完全释放,也就是车笼埔断层在累积了近三百年后其应力完全释放。

## 5 结论

从车笼埔研究计划中,我们对地震从宏观面到微观面进行研究,在宏观的研究过程中,用波的传导以及运动学模拟来观察地震,而微观行为研究则刚开始,因为断层带的岩芯非常稀有。在车笼埔断层研究中,地震的能量得以量化,但其成因及模型的建立仍有待地震学界的共同努力。地震的能量是否一开始就决定了地震的大小,还是随着其滑移的过程而改变总能量?总能量是否一开始就决定了,若地震总能量一开始就决定了,那就可以知道地震规模会有多大,而车笼埔计划在大坑取得岩芯后,依然还有许多其他实验要继续进行,因为很难得钻到一个1.3km的断层带,我们目前在深钻井孔摆置了7层的三分量井下地震仪,监测地层的滑动,想要了解地震的诱发与开始。在此我们希望地震学的研究,能由地震波的观测发展到对地震断层岩芯材料的深入分析,即由宏观迈入微观,来进一步地探讨地震的始末。汶川地震在地质构造上与台湾集集地震类似,为30度倾角逆断层,希望藉由集集地震的动力学研究经验,扩展至汶川地震的动力学研究,此二地震的研究成果,将对逆断层构造上地震及其灾害的分析有重要的贡献。汶川地震断层,亦将有断层钻探的研究,其岩芯分析亦能与此动力学分析结合比较。此二地震,1999年集集地震及2008年汶川地震,将为世界上唯二结合运动学、动力学及岩芯分析的完整研究成果,对于了解地震物理化学行为将有重大的贡献。

## 参考文献

- [ 1 ] Ma K F , Mori J , Lee S J *et al.* Bull. Seismol. Soc. Am. , 2001 91 :1069
- [ 2 ] Ji C , Helmberger D J *et al.* J. Geophys. Res. , 2003 , 108 : 2412
- [ 3 ] Lee S J , Ma K F , Chen H W. J. Geophys. Res. , 2006 , 111 : B11308
- [ 4 ] Lee S J , Chen H W , Ma K F. J. Geophys. Res. , 2007 , 112 : B06307
- [ 5 ] Kanamori H , Heaton T. Geophysical monograph , 2000 , 120 :147
- [ 6 ] Brodsky E , Kanamori H. J. Geophys. Res. , 2001 , 106 :16357
- [ 7 ] Ma K F , Brodsky E E , Mori J *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2003 , 30 :1244
- [ 8 ] Ma K F , Tanaka H , Song S R *et al.* Nature , 2006 444 :73
- [ 9 ] Tanaka H , Wang C Y , Chen W M *et al.* Terr. Atmos. Ocean. , 2002 , 113 :227
- [ 10 ] Wang C Y , Li C L , Yen H Y. Geophys. Res. Lett. , 2002 29 : 1790
- [ 11 ] Tanaka H , Chen W M , Wang C Y *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2006 33 :L16316
- [ 12 ] Tanaka H , Chen W M , Kawabata K *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2007 34 :L01309
- [ 13 ] Kano Y , Mori J , Fujio R *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2006 33 : L14306

## · 物理新闻和动态 ·

## 纳米材料的摩擦机理

长期以来,美国物理学家们一直认为,纳米材料的摩擦理论与日常生活中材料的摩擦理论是完全不相同的。因为一个纳米尺寸的装置,它的表面积与其体积之比要比宏观材料的表面积与体积之比大得多,这就意味着纳米材料的表面积很容易被磨损,有时当两个表面相互接触时还可能被粘在一起,所以对于纳米大小的材料,摩擦是一个大问题。为了要控制纳米材料上的摩擦问题,科学家们不得不首先搞清楚它们的摩擦是如何产生的。

现在美国威斯康辛大学的 I. Szuifarska 教授和他的同事们完成了一个将纳米材料的表面用一组原子的集合来描述的计算机模拟。当材料表面之间发生滑动时,原子间的位置与相互距离将发生变化,对其进行监测就可测量出原子量级上的滑动摩擦,这是第一次在微观领域的定量模拟试验。将这些结果与用原子力显微镜针尖在钻石表面的原子进行滑动摩擦时的实验数据进行对比,结果显示,摩擦力的大小与纳米表面上的原子数成正比,这个结果显然是和宏观材料表面的滑动摩擦力与两个滑动表面的总面积成正比的结论相一致。同时研究组还发现,表面粗糙度的理论也适用于纳米量级的材料。

总而言之,从这个模拟和实验的工作来看,摩擦理论是可以适用于从宏观到微观的物体的,也就是说,我们可以建立一个在所有尺度上的统一的摩擦理论,从数学上来说,这是一个连续统一的摩擦模型。有了这个理论基础,我们就可以给出各种实验条件下材料的摩擦系数。

(云中客 摘自 Nature 26 February 2009)



## 北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

[www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn)

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询。我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等。



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜。
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金,及介质反射镜。直径5mm—200mm。
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶。直径5mm—200mm。
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤,SMA接口光纤探头,紫外石英聚焦探头。
- 国产滤光片:规格为直径5mm—200mm。(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片。
- 进口光学滤光片:长波通滤光片/短波通滤光片,波长:400—1000nm,窄带干涉滤光片

地址:北京市海淀区知春路49号希格玛大厦B座#306室 电话:010-88096218/88096217 传真:010-88096216

网址:[www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn) E-mail:[kevinchen@goldway.com.cn](mailto:kevinchen@goldway.com.cn) [shinan@goldway.com.cn](mailto:shinan@goldway.com.cn) [zengan@goldway.com.cn](mailto:zengan@goldway.com.cn)

联系人:陈锴先生,施楠小姐,曾安小姐,郑海龙先生