

华南武功山地区韧性剪切带的纳米尺度测量研究

刘浩, 孙岩, 舒良树, 陆现彩

南京大学内生金属成矿机制国家重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京, 210093

内容提要: 在华南加里东造山带中段区域构造调查和中法合作研究的基础上, 对武功山地区从新元古代到中生代的韧性板劈理带、逆冲断层带、挤压片理带和拉伸构造带等多种构造类型的变形带, 就其超微观纳米粒子结构和动力薄膜进行了扫描电镜(SEM) 测量和新的探讨。上述 4 类韧性剪切带的表层高应变域 ab、ac 组构面上均发现纳米粒子, 颗粒直径一般为 50~90nm, 并因研磨滚动而形成磨粒(grinding grains)。由纳米粒、纳米线和纳米层构成一套纳米微线理、面理和组构系统, 与宏观的线理和面理平行一致, 还可见到完好的超微 S-C 面理和优选方位的纳米级应力矿物。韧性剪切的所谓静态摩擦, 实际上是纳米界限层以微弱摩擦力推进滑移量(slippage)形成的平滑运动, 这种平滑运动是纳米级单体和复体磨粒滚动滑移所致。本文从上述几方面揭示了韧性剪切带中纳米粒子存在的普遍性; 纳米结构与显微构造的可比性; 韧性剪切滑移机理的特殊性。最后, 以区内韧性剪切带在地壳浅构造位异常发育的特点, 从一个方面讨论华南加里东构造带在系统动力学行为上的时间滞后性。

关键词: 韧性剪切带; 纳米粒子; 平滑运动; 加里东造山带; 武功山

自 20 世纪 60 年代兴起韧性剪切带(亦称韧性变形带、韧性断层)和韧-脆性变形转变的探讨, 推动了构造地质学的研究, 丰富了地质学的概念(Ramsay, 1967), 然而这方面的研讨工作还多限于宏观和显微构造观察和有限应变几何测量。进入 21 世纪, 随着隧道式电子显微镜的广泛应用和地球动力学等相关力学的有力支撑(刘瑞珣, 2006), 有关韧性剪切带的研究向超微观和高应变、向流变学和摩擦学方面的研究逐步深入(Mandal et al., 2002; Bahroudi et al., 2003; Thorkelson et al., 2005)。本文拟在华南加里东造山带中段武功山地区区域构造调查和中法合作研究的基础上(Faure et al., 1996; 舒良树等, 1998; 孙岩等, 2003), 对该区的新元古代基底韧性板劈理剪切带、基底与盖层(上泥盆统五通组地层)间韧性断层剪切带、盖层(上石炭统-下二叠统船山组地层)中韧性挤压带、中生代变质核杂岩韧性伸展构造带, 在超微观纳米粒子层(nano-grain layers)和动力薄膜(dynamic thin film)高应变域(high strain domain)(Kusanno et al., 1999; Pieri et al., 2001)进行精细采样和纳米尺度的测量及探讨。

1 地质背景

江西武功山是华南早古生代褶皱造山带中露头完整、构造现象典型的一个地区, 位于华南与扬子两个陆块的新元古代碰撞缝合带, 即绍兴—江山—东乡—萍乡断裂的南侧, 赣江断裂的西侧。该区在垂向剖面和水平方向上均存在三个不同时代的构造单元(图 1):

(1)中-新元古代变质基底。由板岩化—千枚岩化—片岩化的中-上元古界神山群组成, 原岩为泥砂质岩石和少量玄武岩、凝灰岩, 近年来在元古代变质岩中获得的同位素测年值多集中在 1400~1800Ma(沈渭洲等, 1998);

(2)浅变质的上元古界南华系、震旦系、寒武系和奥陶系。南华系可分为下坊组和老虎塘组。下坊组岩石已经变质成为板岩, 原岩为含铁硅质岩、石英砂岩、页岩, 底部为复成分砾岩。老虎塘组为一套冰水相砾岩和含砾泥岩组合。南华系变质岩年龄为 700~800Ma(章邦桐等, 1996)。

震旦系由泥岩和砂岩不等厚互层而成, 夹灰岩和钙质砂岩透镜体或团块。已普遍变质为板岩。寒武系由泥砂质岩层夹灰岩透镜体组成, 韵律层理普

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40634022、40372092、40572118、40373024)、矿床地球化学国家重点实验室开放基金项目(编号 200701)、油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金项目(编号 PLN0606) 资助研究成果。

收稿日期: 2007-11-28; 改回日期: 2008-11-22; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 刘浩, 男, 1984 年生。南京大学地理与海洋科学学院助教。电话: 025-58646516; Email: njliuhao@Gmail.com。

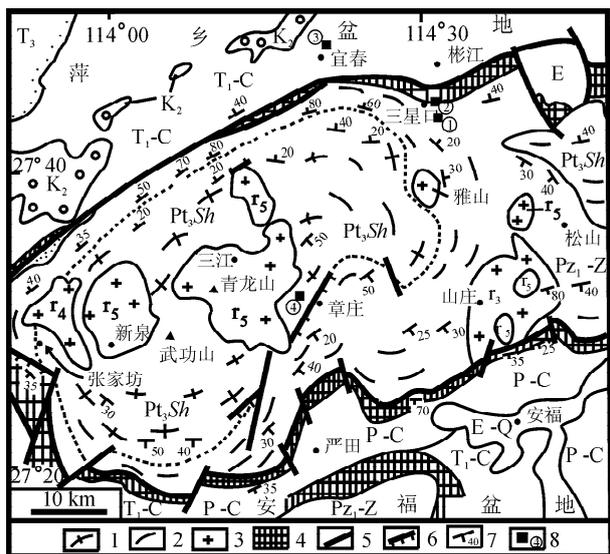


图1 华南武功山地区构造简图(据舒良树等, 1998)

Fig. 1 Tectonic map of Wugongshan, South China

1—早古生代片麻岩和花岗岩片麻岩; 2—新元古代板岩和千枚岩; 3—晚中生代花岗岩; 4—千枚岩化的泥盆系粗碎屑岩; 5—大型拆离断层, 已被后期断层切割; 6—正断层; 7—面理产状; 8—采样点及编号

1—Gneiss and granite gneiss, early Paleozoic; 2—slate and phyllite strata, Neoproterozoic; 3—granite, late Mesozoic; 4—phyllitic Devonian clastic rock; 5—large-scale detachment fault, cutted by later fault; 6—normal fault; 7—attitude of foliation; 8—sampling point and its number

遍, 产三叶虫和腕足类, 底部为数十米厚的含碳板岩。可见波痕构造。奥陶系由泥砂质岩层组成, 碳质层发育, 韵律层理普遍, 产腕足类。

本区缺失志留系, 上泥盆统粗碎屑岩层角度不整合在板岩化奥陶系之上。

(3) 未变质的晚古生代—中生代沉积盖层。岩石组合与生物群落与江南地区相似。

武功山晚中生代热隆型变质核杂岩分布在早古生代褶皱变质基底之上。该变质核杂岩由中心部位的早白垩世花岗质深成岩、大型拆离带(下部韧性剪切糜棱岩化带、大型拆离正断层和上部脆性剪切碎裂岩带)以及南北二侧的半地堑沉积盆地组成(舒良树等, 1998)。变质核杂岩的轴部位于洪江—万龙山一带, 被燕山期花岗岩所占据。大型拆离带发生在晚泥盆世石英岩和元古代板岩—千枚岩中, 可分为南北两支, 南支位于严田—山庄一线, 北支位于新余—温汤一带。其核部花岗岩和围岩的面理产状构成一个穹窿形地貌, 所有岩石中的拉伸与矿物线理均南北向分布。岩石流变强烈, 从深到浅物质连续变形演化, 具明显分带性。

2 样品采集制备观察

2.1 样品采集

从纳米尺度观测韧性剪切带, 主要是从韧性剪切面的表层采取样本。鉴于采集的是微观和超微观的袖珍样本, 故不能按常规取样。而是要仔细凿刻铲刮, 切不可重力敲打。或者也可于野外采取大样本后, 在室内再行处置。样品均要用软纸包裹, 防止相互摩擦。

2.2 制备观察

超微观样品大小随所用电镜试样托盘尺寸而定。本次观测使用德制 LEO-1530VP 型扫描电镜(SEM), 并和 X 射线能谱议(OXFORD-INCA300 型)同步进行。圆形托盘直径为 7mm。观测前, 将试样底面磨平, 表面清洁风干。依据野外测量标本产状方位和组构轴(a, b, c 轴)定向。通常观察构造面 ab, 也可观察运动面 ac。

3 纳米粒子量测厘定

武功山地区从变质基底到沉积盖层发育的不同规模的韧性剪切带, 就其带中剪切滑移面所测量的纳米粒子的纳米结构、颗粒粒度、组构面理、超微结构和矿物变形等, 按切割地层的时代自老至新分述对比。剪切带和纳米层的扼要观察项目、表现特征如表 1 所列, 这里仅做图像展示和必要诠释:

3.1 基底韧性板劈理剪切带

基底新元古界神山群(Pt₃Sh)泥质板岩中由顺层滑动引起的变形十分发育, 面理 S₁ 置换 S₀。S₁、S₂ 均板劈理化, 个别地段见 S₃(图 1①, 2)。板劈理剪切滑移面上发育动力薄膜, 上表面光滑, 有丝绸光泽。取 S₁ 表层 ab 面进行 SEM 观察, 纳米粒子密集, 纳米结构清晰(图 3)。纳米颗粒小者颗粒直径 53.48nm, 大者 112.07nm(仪器精确测量), 一般为 70~90nm, 大小相对均一。许多颗粒已团聚成复合体, ab 面成压扁状, 厚度 80~100nm(物理学和力学规定, 只要在一维方向上小于 100nm, 即可谓纳米级物质)(杨卫等, 2002)。复合体通常为粒状或饼状, 分散或团聚(Kambe et al., 2001), 其中圆度(圆化程度)和球度(球状程度)上佳者称为高品质纳米颗粒(Nikolaev, 1999)。由于压扁和异化(isomerization)的缘故, 板劈理面理 S₁ 面中的纳米粒子圆度较好, 球度稍差。据论证(孙岩等, 2003)均系剪切滚动研磨所致, 统称为磨粒(grinding grains)。单体磨粒在运动中可集结成具有一定圆度和

表 1 武功山地区韧性剪切带纳米粒子结构量测厘定和对比一览

Table 1 Measurement and comparison of the texture of nano-sized particles in the ductile shear zone in Wugongshan

采样点号(图 1) 韧性剪切带	切过地层		产状	宽度 (m)	纳米结构	颗粒粒度(nm 级)			组构面理 (nm- μ m 级)	超微构造 (nm- μ m 级)	矿物变化 (结合微观)
						大小(nm)	圆度	球度			
① 基底韧性板劈理剪切带	神山群泥质板岩	Pt ₃ Sh	355° ∠38°	基底发育普遍	纳米颗粒, 研成磨粒, 饼状结构	70~90	圆	稍差 压扁	复体磨粒呈饼状, 压扁状, 厚度 80 ~ 100nm	纳米颗粒团块, 周围环绕球状磨粒, 形成复体磨粒构造	硅质成分增加, 多为板状或扁平状残粒
② 基底盖层间韧性断层带	神山群泥质板岩和五通组浅紫色厚层砂岩	Pt ₃ Shen D ₃ w	355° ∠65°	15	颗粒异化, 聚集成团, 结成复体	55~75	次圆	较差	超微观 ab 面显 ac 面组构, 见纳米尺度叶片面理	拉长纳米粒或连接成纳米线, 纽结成复体磨粒, 并略显流动现象	强烈硅化石英变晶, 多为石英碎粒
③ 盖层韧性挤压片理带	船山组黑白相间厚层灰岩	C ₃ -P ₁ c	205° ∠72°	45	颗粒团聚, 层层叠叠, 均匀分布	一般 90 ~ 110 小者 50 ~ 70	圆	稍好	纳米线同直观线理一致, ab 面同直观片理面一致	复体磨粒成团簇状, 散布超微剪切带边缘	方解石变成同质异像纤维状文石
④ 变质核杂岩韧性拉伸构造带	片麻状花岗质糜棱岩	中生代	175° ∠25°	2000	颗粒散布, 或成线状, 层状展现	一般 50 ~ 70 大者 120 ~ 150	很圆	好	纳米线连续性较好, 与 a 轴相符, 平行 ab 面叶片非常发育, 厚度 100~300nm	斜列状云母鱼构造(II 型 S-C 面理) 清晰, 平行 ac 面纳米粒显流动状构造	白云母变化显著, Fe 质增加, 颜色变深, 厚度变薄 (80~100nm)

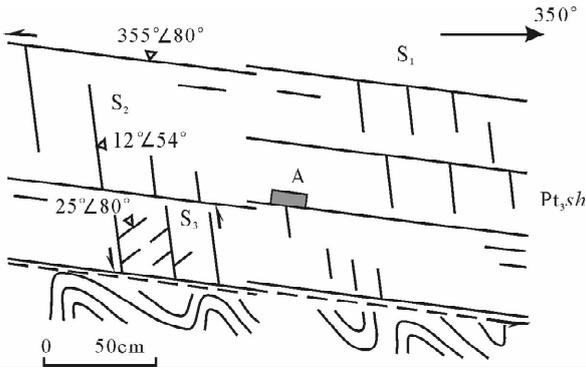


图2 武功山三星口新元古界神山群(Pt₃Sh)泥质板岩韧性板劈理剪切带剖面图

Fig. 2 Profile map of the ductile cleavage shear zone, argillites(Pt₃Sh), Sanxingkou, Wugongshan
 S1, S2, S3—面理; 355°/38°—倾向、倾角(下同);
 A—取样点(下同)
 S1, S2, S3—foliation; 355°/38°—dip direction and dip angle (the same below); A—sampling point (the same below)

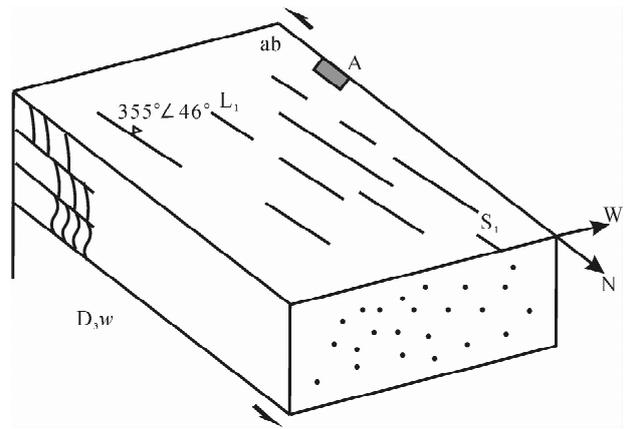


图4 武功山四方井上泥盆统五通组(D₃w)逆冲到神山群(Pt₃Sh)之上, 断层上盘 a, b 两组线理和滑动方向立体示意图

Fig. 4 3D map of the lineation a, b and slide direction of hanging wall of fault in Sifangjing, Wugongshan, Block A (D₃w) thrust onto Block B (Pt₃Sh)
 L₁—a 线理; L₂—b 线理; Q—石英杆构造。(其他图例同上)
 L₁—lineation a; L₂—lineation b; Q—rodding structure of quartz; (other; the same as above)

球度的复体磨粒。

值得指出的是纳米级单体磨粒团聚而成的微米级较大磨粒, 可集成为较大微米级团块(圆度、球度较差者), 成为复体磨粒(一般 100~200nm), 并呈现串珠状亮域, 这种复体磨粒构造可显多次复体, 相互包容, 常位于滑脊及其侧翼(图 3)。

3.2 基底盖层间韧性断层带

盖层上泥盆统五通组(D₃w)地层与神山群之间的韧性断层带, 断层岩和两盘地层多期硅化, 其上

盘顺层劈理发育, 隐现透入性线理, 偶见石英杆 b 线理(图 1②, 4)。SEM 测量结果, ab 面上可见到 ac 面上组构形貌, 叶片状滑移面理厚度 50~150nm, 其表层纳米磨粒一般为 55~75nm, 复体磨粒为 110~130nm, 并部分显熔融流动迹象。

3.3 盖层韧性挤压片理带

上石炭统-下二叠统船山组(C₃-P₁c)块状灰岩经强烈挤压呈片理带, 片理呈叶片状、鳞片状, 有的灰岩扭压成缓波状、透镜状(图 1③, 6, 7), 后期有

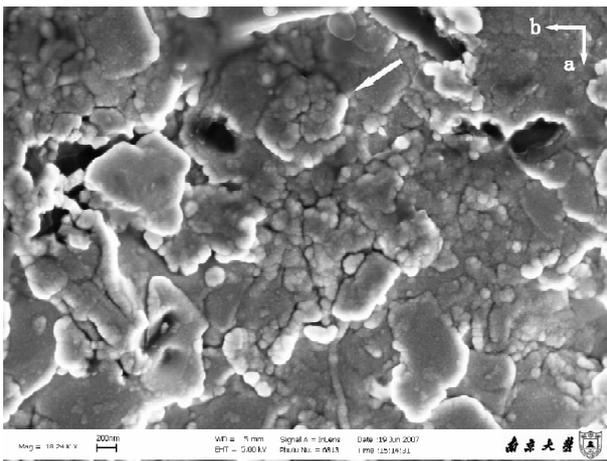


图3 图2中A点样品ab面SEM量测
 Fig. 3 SEM of the ab fabric plane of the sample from point A in Fig. 2

箭头指纳米级复体磨粒团块, 有的周边凸显球形纳米磨粒
 The arrow shows conglomeration of nano-sized grinding grains, some of them have spherical nano-sized grinding grains on their circumference

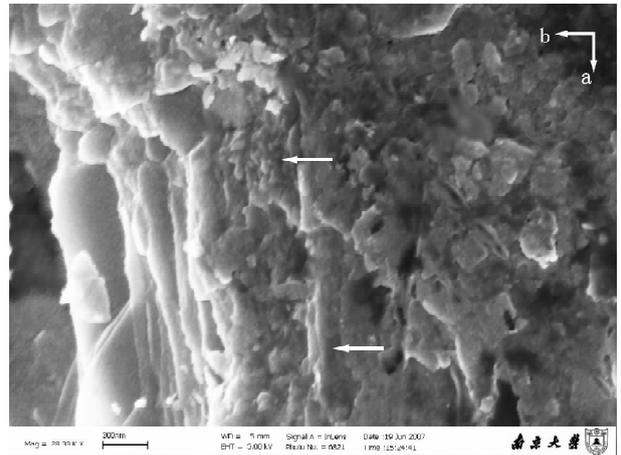


图5 图4中A点样品SEM量测
 Fig. 5 SEM of the sample from point A in Fig. 4

箭头示纳米磨粒定向排列并形成纳米线
 The arrow shows nano-sized grinding grains which are in directional arrangement, and forming the nano-sized lines



图 6 宜春市郊高士路发育于船山组(C₃-P₁c)灰岩中的强烈韧性挤压片理带

Fig. 6 Strong extrusion schistose belt in limestone (C₃-P₁c) Road Gaoshi, Yichun

笔杆方框处示取样点;箭头示脆性剪切面

The pen and the pane show the sampling point;

The arrow shows the brittle shear plane

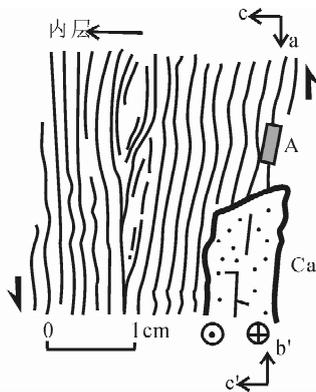


图 7 图 6 取样点片理带标本素描(ac 面)

Fig. 7 Sketch of the sample from sampling point in schistose belt in Fig. 6

Ca—脆性动力薄壳(b'c'面)

Ca—brittle dynamic thin-shell (plane b'c')

左行平移断层运动造成的高应变域动力薄壳(dynamic thin shell), 厚度 1~1.5cm, 由层状方解石组成, 低温(01i2)动力双晶发育(Ferrill et al., 2004)。显示韧性和脆性两种动力薄层(膜和壳), 在宏观上对比明显, 迥然有别。该样品纳米线密布连接成层(图 8)。

需要提出的是, 拉长的纳米颗粒或纳米线相互紧密结合扭结包容, 组成多次复体磨粒构造, 多呈团簇状散布于超微剪切带边缘(图 8), 这在脆性动力薄壳中罕见。另外, 该样品中纳米级应力矿物发

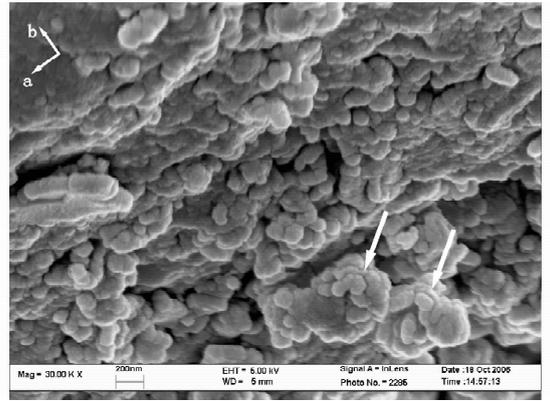


图 8 图 7 中 A 点样品 SEM 量测(纳米结构)

Fig. 8 SEM of the sample from point A in Fig. 7 (nano-sized structure)

箭头指多次复体磨粒相互扭结

The arrow shows snarling of the multiple grinding grains

育, 方解石层平行剪切面, 厚度仅 70~80nm。特别是同方解石同质异象的超微状应力矿物文石, 其厚、宽分别为 50~60nm 和 85~105nm, 长度可达 2~3μm, 显示出形体优选方位(Wenk, 2002), 与 a 轴一致, 极为醒目(图 9)。

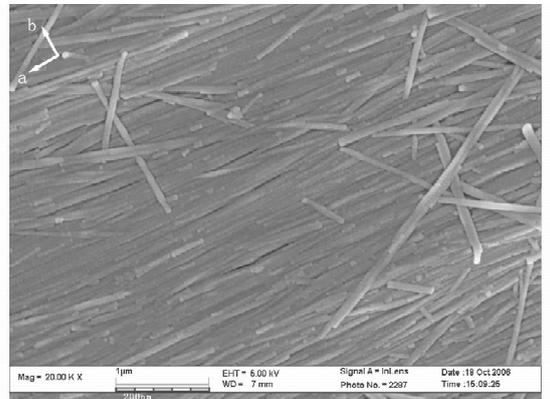


图 9 图 7 中 A 点样品 SEM 量测(应力矿物)

Fig. 9 SEM of the sample from point A in Fig. 7 (stress mineral)

纤维状文石, 形体优选方位

Fibrous aragonite, shape preferred orientation

3.4 变质核杂岩韧性拉伸构造带

中生代变质核杂岩中的片麻状花岗质糜棱岩, 透入性糜棱面理断续延展, 广泛发育(图 1④, 10, 11)。电镜下面理面上的纳米粒、纳米线、纳米层在各个层面上都发育良好, 分布均匀, 堪称典型, 在韧性剪切带的纳米结构中具有代表性(图 12)。这里特别要展示一个完好的纳米级斜列型云母鱼构造(图 13), 即所谓的 II 型 S-C 构造(Lister, 1984),



图 10 武功山罗家片麻状花岗质糜棱岩
Fig. 10 Gneissic granitic mylonite, Luojia,
Wugongshan

箭头方框处示取样点

The arrow and the pane show the sampling point

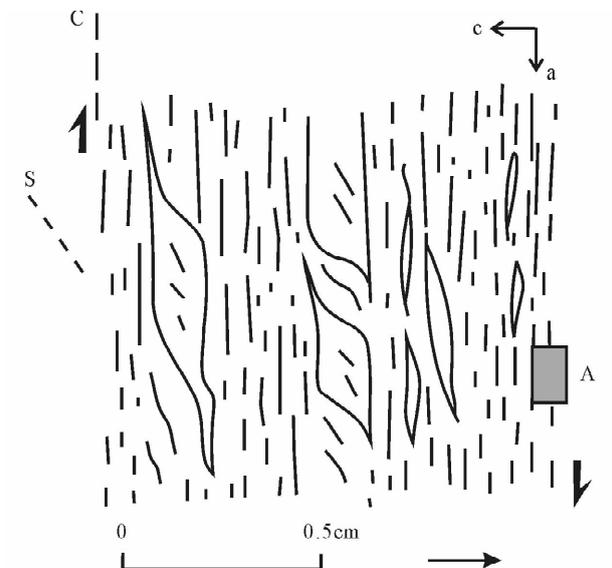


图 11 图 10 取样点糜棱岩标本素描(ac 面)

Fig. 11 Sketch (plane ac) of the mylonite sample from
sampling point in Fig. 10

S, C 示 S-C 面理

S, C shows the S-C foliation

由于平行 a 轴 C 面的剪切滑动, 云母超微斜列碎片
略显弯曲, 尾部拖曳, 所示右行下滑动向, 与标本、
露头(图 10, 11)观察一致。

4 结语

综合上述华南加里东造山带中段武功山地区 4
个实例韧性剪切带中纳米尺度的测量, 就其纳米粒
子与韧性剪切关系等相关问题总结如下:

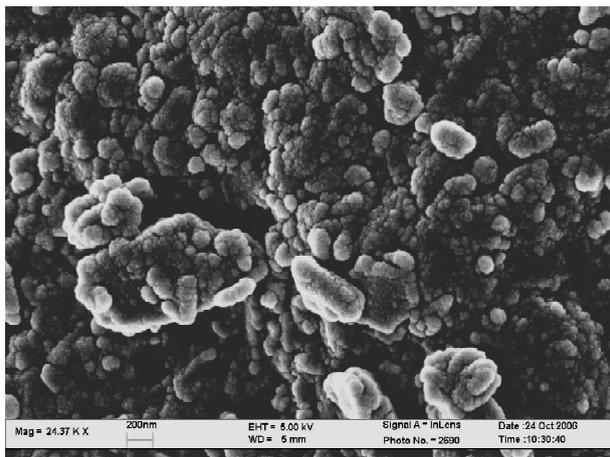


图 12 图 11 中 A 点样品 SEM 量测(纳米结构)
Fig. 12 SEM of the sample from point A in Fig. 11
(nano-sized structure)

单体纳米颗粒多聚集成复体颗粒, 散布较为均匀
Single nano-sized particles aggregate into
composite particles, and distribute uniformly

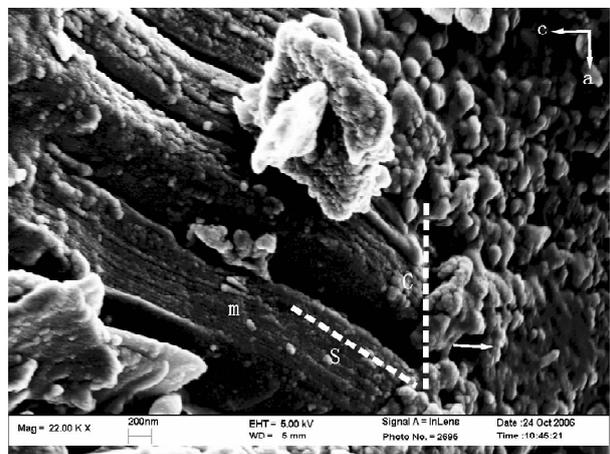


图 13 图 11 中 A 点样品 SEM 量测(斜列云母鱼构造)
Fig. 13 SEM of the sample from point A in Fig. 11
(en echelon mica fish structure)

m—云母超微碎片; S, C—示 S-C 面理; 箭头

指纳米颗粒流动(平行 a 轴)

m—ultra-scaled mica fragment; S, C shows the S-C foliation;
the arrow shows the nano-sized particle flowed parallel to a axis

(1) 从基底到盖层的韧性剪切带, 包括断层、
劈理和各种面理等滑移面高应变域, 实际上是一层
极薄的动力薄膜(一般为微米级), 如同物理化学上
的涂层(coating)和镀层(plating), 具有表面张力和
活度(Musil, 2000; 姜晓霞等, 2000)。在微观上都
可显示韧性拆离效应(effect of ductile detachment)
(Bahroud et al., 2003), 其中 ab, ac 组构面上, 在
SEM 测量中均发现纳米级粒子, 一般为 50~

90nm, 大者 110~170nm。显示韧性剪切带中纳米粒子的存在具有普遍性。

(2) 从纳米尺度测量, 韧性剪切带由纳米粒、纳米线、纳米层次形成一套纳米线理、面理和组构系统。纳米线线状呈现, 纳米层叠层展布(图 13 等), 滑移主导的(slip-dominated)定向组构(Dawson, 2002)(包括图 9 应力矿物优选方位), 都与直观的线理和面理平行相符。还有图 13 所示的 S-C 构造等超微组构构造与典型的显微构造基本上显示一致性、可比性。

(3) 与动态摩擦不同, 韧性剪切是静态摩擦(static friction), 是以一种似静止渐增的滑移(quasistatic camulative slip)(Wilson et al., 2005), 在纳米界限层(nano-confinement layer)微弱摩擦力传递推进滑移量(slippage)成平滑运动机制(Urbakh et al., 2004)。而这种平滑表现在韧性剪切带中, 则是纳米单体和复体的磨粒(如图 5、图 8 所示)的滚动滑移, 无疑, 这显示了韧性剪切机理的特殊性。

(4) 华南加里东造山带的武功山地区是具有透入性构造和叠层纳米结构异常发育的韧性剪切带, 从元古代基底一直断续延至泥盆纪(实例 2 宽达 15m)、石炭二叠纪(实例 3 宽达 45m), 与国内外典型加里东造山带相比(就作者参加考察过的天山地区、东澳大利亚地区等), 可以认为是具有一定的构造事件穿时性。即力学上称的系统动力学行为的时间滞后(time delay)概念(徐鉴等, 2006)。该地区加里东运动的这一特色(至于是否是叠加构造效应等), 还应结合构造事件多种方法的同位素测年和区域构造不同层次的岩石流变进行深入研究。

致谢:有关纳米结构的特性厘定多次得到南京航空航天大学戴振东教授和南京大学物理系都有为院士的指导, 地球科学与工程学院王德滋院士, 周新民、卢华复、陈武教授多方指教, 南京地质古生物所王春朝高工, 南京大学物理系郝西萍副教授协助实验, 谨此一并致谢。

参 考 文 献

姜晓霞, 沈伟. 2000. 化学镀论及实践, 北京: 国防工业出版社, 136~161.

刘瑞珣. 2006. 地球动力学的力学支撑. 见: 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会(论文摘要). 南京: 南京大学, 9~10.

沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 王德滋, 黄莹, 潘均. 1998. 江西省中生代花岗岩类的 Nd-Sr 同位素研究. 科学通报, 43(24): 2653~2657.

舒良树, 孙岩, 王德滋, Faure M, Charvet J, Monie P. 1998. 华南武功山中生代伸展构造. 中国科学(D辑), 28: 431~438.

孙岩, 舒良树, 朱文斌, 郭继春, 陈祥云, Faure M, Charvet J, Lin W. 2001. 中扬子地区碰撞造山形变作用的 3 个演化阶段. 中国科学(D辑), 31: 455~463.

孙岩, 葛和平, 陆现彩, 朱文斌, 郭继春, 刘德良, Wang C Y. 2003. 韧性剪切带滑移叶片中超微磨粒结构的发现和分析. 中国科学(D辑), 33: 619~625.

徐鉴, 裴利军. 2006. 时滞系统动力学近期研究进展与展望. 力学进展, 36: 17~30.

杨卫, 马新玲, 王宏涛, 洪伟. 2002. 纳米力学进展. 力学进展, 32: 161~174.

章邦桐, 胡恭任. 1996. 赣中存在元古代华夏(古陆)变质基底的地球化学证据. 矿物岩石地球化学通报, 15(4): 239~242.

Bahroudi A, Koyi H A, Talbot C J. 2003. Effect of ductile and frictional decollements on style of extension. J Struct Geol, 25: 1401~1423.

Dawson P R. 2002. Modeling deformation of polycrystalline rocks. Rev Mineral Geochem, 51: 331~352.

Faure M, Sun Y, Shu L, Monie P, Charvet J. 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogen, The case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, Southeastern China). Tectonophysics, 263: 77~106.

Ferrill D A, Morris A P, Evans M A, Burkhard M, Groshong R H, Onasch C M. 2004. Calcite twin morphology: a low temperature deformation geothermometer. J Struct Geol, 26: 1521~1529.

Kambe N, Kumar S, Chiravolu S. 2001. Refractive index engineering of nano-polymer composites. Mater Res Soc Proc, 676: 8~22.

Kusano E, Kitagawa M, Satoh A, Kobayashi T, Nanto H, Kinbara A. 1999. Hardness of compositionally nano modulated tin films. Nanostruct Mater, 12: 807~810.

Lister G S, Snoke A W. 1984. S-C Mylonite. J Struct Geol, 6: 617~638.

Mandal N, Chakraborty C, Samanta SK. 2002. Controls on the failure of brittle inclusions hosted in a ductile matrix. J Struct Geol, 23: 51~66.

Musil J. 2000. Hard and Superhard nanocomposite coatings. Surf Coat Tech, 125: 322~330.

Nikolaev P. 1999. Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide. Chem Phys Lett, 313: 91~97.

Pieri M, Burlini L, Kunze K, Stretton I, Olgaard DL. 2001. Rheological and microstructural evolution of Carrara marble with high shear strain: result from high temperature torsion experiments. J Struct Geol, 23: 1393~1413.

Ramsay J. 1967. Folding and Fracturing of Rocks. London: McGraw Hill, 120~170.

Thorkelson D J, Breita-precher K. 2005. Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas. Lithos, 79: 25~41.

- Urbakh M, Klafter J, Gourdon D, Israelachvili J. 2004. The nonlinear nature of friction. *Nature*, 430: 525~528.
- Wilson B, Dewers T, Reches Z, Brune J. 2005. Particle size and energetics gouge from earthquake rupture zones. *Nature*, 434: 749~752.
- Wenk, H-R, 2002. Texture and anisotropy. *Rev Mineral Geochem*, 51: 291~330.

Nano-Scaled Study on the Ductile Shear Zone in Wugongshan, South China

LIU Hao, SUN Yan, SHU Liangshu, LU Xiancai

School of Earth Sciences and Engineering, State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract

Based on the Sino-France cooperated regional tectonics investigation of the middle part of the Caledonian orogenic belt in South China, SEM studies on nano-sized particles and dynamic thin-shell or films in different kind of ductile shear zones from Neoproterozoic to Mesozoic (ductile cleavage zone, thrust fault zone, extrusion schistose zone, tensile structural zone) in Wugongshan were carried out. Nano-sized particles(50~90 nm), grinded and rolled into grinding grains, were found in the ab and ac fabric planes of the high strain zone on the surface of the four types of ductile shear zones. The nano-sized particles, lines and layers composed a system of nano-sized lineation, foliation and fabrication, which parallels to the visual lineation and foliation. Ultra micro S-C foliation and preferred nano-sized stress mineral were also found. In addition, the so-called "static friction" is actually the smooth movement, which is formed by slippage pushed by slight friction of nano-sized particle layers, and caused by the grinding and rolling of the nano-sized particle and composed particle. We discovered that the nano-sized particle layers are widely distributed in ductile shear zone, the nano-sized textures is comparable to the micro-sized textures, and the mechanism of ductile shear movement is special. Then, we discussed the system dynamics on the time delay of the Caledonian orogenic belt in South China, since the ductile shear zones were abnormal developed in the superficial structural position of this area.

Key words: ductile shear zone; nano-sized particle; smooth movement; Caledonian orogenic belt; Wugongshan