



变质岩透入性面理的纳米结构研究

孙岩^{①②*}, 陆现彩^①, Xihui Zhang^③, 刘浩^{①②}, Aiming Lin^④

① 内生金属矿床成矿机制国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093;

② 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

③ Department of Management Information Systems, University of Memphis, Tennessee 38152, USA;

④ Department of Geosciences, Shizuoka University, Shizuoka 4222-8529, Japan

* E-mail: sunyan37@tom.com

收稿日期: 2008-07-23; 接受日期: 2009-02-06

国家自然科学基金重点项目(批准号: 40634022)、国家自然科学基金(批准号: 40673041, 40572118, 40372092)和油气藏地质及开发工程国家重点实验室、矿床地球化学国家重点实验室研究基金资助

摘要 通过江西变质岩透入性面理滑移面扫描电子显微镜(SEM)4 例观测, 发现其表面普遍存在纳米粒子层状结构, 并为三轴压力实验所验证. 在剪切滑移过程中纳米颗粒(直径 ϕ 40~95 nm)经过粒化-异化-分化, 个体形态有别, 结构层次分明. 这个纳米界限薄膜(层), 本质上是具有黏-弹性变形的摩擦-黏性(frictional-viscous)带. 在此微域条带中, 构造应力场-流变物理场-地球化学场非常活跃, 并同变质岩面理发育 3 个阶段(剪切滑移强化作用-弱化作用-易剥作用)密切相关. 进而可从黏-弹性变形行为揭示构造剪切的微观运动学机理.

关键词

变质岩面理
纳米结构
黏-弹性变形
摩擦-黏性带
滑移弱化作用

岩石学研究的发展离不开显微技术的进步, 随着隧道电子显微镜和原子力显微镜(AFM)在地质学研究上的应用^[1], 自 20 世纪 80 年代起就不乏有关于岩矿中发现纳米物质(颗粒直径 < 100 nm)的报导^[2,3]. 但其所描述的赋存形式大多是散点状、浸染状的零星分布, 有的还是空心的^[4]. 即是在天然的和实验的断层泥中存在着富集的纳米颗粒, 也不显示成层状展布^[5,6]. 近几年来, 通过对岩石剪切面的电镜量测, 发现岩石中的纳米物质呈层状结构展布^[7,8]. 之前, 变质面理的研究注重在面理的几何特征、结构分类、裂隙岩相和相关变质等方面^[9-12]. 现我们则侧重在面理的纳米结构、超微特点、构造物理和运动机理等方面. 下面以江西地区采集的变质岩样品的观测分析, 予以简要阐述.

1 样品采集制备

1.1 采样

区域变质岩采自江西新元古代的板溪群(Pt₂, (1097±11) Ma)和神山群(Pt₃, (972±8) Ma)基底变质岩系列, 原岩主要为泥砂质细碎屑岩. 动力变质岩采自早中生代印支运动(240~200 Ma)和晚中生代燕山运动(130~110 Ma)形成的断层岩系列(表 1)^[13,14]. 研究区内不论区域变质岩或是动力变质岩, 其岩石的特征典型, 变质岩面理明显^[15], 不失为变质岩面理观察和量测的理想地区.

面理的纳米结构研究至少要采集 3 种类型的标本. 第一种为一般标本, 用于岩石切片和各种分析. 在露头上就需要测量岩层、面理和线理的产状, 确定 a , b , c 组构轴. 第二种为袖珍标本, 用于电子显微镜

引用格式: Sun Y, Lu X C, Zhang X H, et al. Nano-texture of penetrative foliation in metamorphic rocks. Sci China Ser D-Earth Sci, 2008, 51(12): 1750—1758, doi: 10.1007/s11430-008-0138-9

观测, 需仔细刻凿, 软纸包裹. 构造要素就地测量. 第三种为实验标本, 用于三轴压力实验, 体积需比一般标本大 4~5 倍方可.

1.2 制样

手标本上, 面理表面光滑、平整, 常见丝绢光泽. 在地壳中浅层构造位采的样, 显微镜下常见浅色应力矿物, 如白云母、绢云母和石英等. 通过标本和显微镜下观察再精选电子显微镜观测样品, 将其表面清洗干净, 底面磨平. 通常观测 *ab* 组构造面(间或 *ac* 面).

2 电镜观察量测

本次观测使用 LEO-1530 VP 型扫描电子显微镜

(SEM), 并和 OXFORD-INCA300 型 X 射线能谱仪同步进行.

2.1 区域变质岩面理实例观测

江西变质岩基底的片岩、千枚岩和板岩系列中, 顺层滑动发育, 面理、线理和组构的叠加置换异常频繁, 方位变更尤为复杂. 一般面理 S_0 被 S_1 置换, 面理 S_2, S_3 发育较为普遍. 各种变质岩面理上一般均可观测到纳米粒子结构现象.

例 1, 标本采自赣北星子县归宗(采石场)板溪群(Pt_{2ban})石英云母片岩, 岩层强烈挤压、波状弯曲(硅化石英脉呈拉长透镜状)(图 1(a))(表 1). 滑移面上白云母片清晰可辨. 扫描电子显微镜下, 可见白云母呈假

表 1 江西区域变质岩和动力变质岩透入性面理的纳米结构观测一览表

样号	采样点	面理构造			纳米结构				超微结构 (纳米至微米级)
		地层与岩石	面理产状	线理和组构	单体颗粒		复体颗粒		
					颗粒直径 /nm	圆度球度	颗粒直径 /nm	形状	
JX-102	星子县归宗	板溪群石英云母片岩 (Pt_{2ban})	$315^\circ \angle 48^\circ$	定向组构	65~85	尚好	200~300 个别达 2 μm	似圆形	白云母片变薄 (< 100 nm) 纳米线和已分解柱状纳米体大体平行
JX-54	南城县岳口	神山群云母片岩 (Pt_{3shen})	$320^\circ \angle 60^\circ$	线理与面理产状一致	40~60 60~80	尚佳	100~250	个别显梅花状	表层长柱状纳米体密集, 个别纳米层显揉皱状
JX-106	分宜滨江(武功山)	五通组(D_{3w}) 石英砂岩 板劈理化动力变质岩	$215^\circ \angle 75^\circ$	优选方位	75~95	尚好	250~450	饼状 长条状	表层纳米级线状构造平行 a 轴
JX-112	安福章庄(武功山)	中生代片麻糜棱岩	$170^\circ \angle 20^\circ$	拉伸线理	70~90 100~120	尚佳	150~250 个别 500	椭圆形	纳米线、纳米层连续性较好, 层次清楚

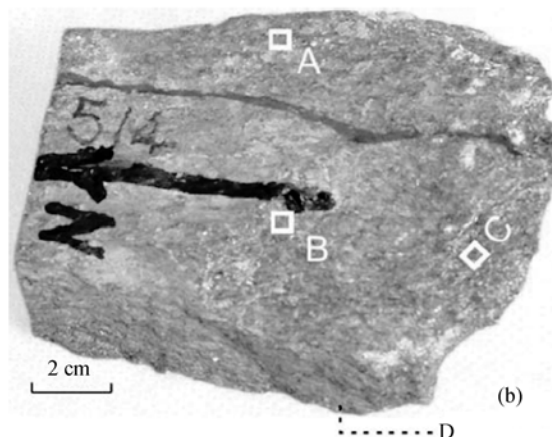


图 1 区域变质岩面理的露头和本标

(a) 板溪群(Pt_{2ban})石英云母片岩露头, 箭头示采样点; (b) 神山群(Pt_{3shen})白云母片岩标本. A, B, C, D 示微区分析采样点

六方形(图 2(a)). 所见的完全解理面(001), 平行 *ab* 面, 高倍放大视域下即可见到纳米级颗粒物质, 单体一般直径(ϕ)65~85 nm, 圆度(圆化程度)和球度(球状程度)尚好, 密集分布. 聚集成复体者, 一般 ϕ 200~300 nm, 个别达 2 μ m(已相当泥岩颗粒的尺度)(图 2(b)).

例 2, 标本采自赣南南城岳口(采石场)神山群 (Pt_{3shan})云母片岩(图 1(b)). 岩层展布较为平稳, 面理 S₁ 滑移面清晰. 为详细观测起见, 在标本的顶部、中间和底部分别取片理(滑移面)电子显微镜下观测(图 1(b)). 顶部样品(A)白云母板状晶体表层可见拉长纳

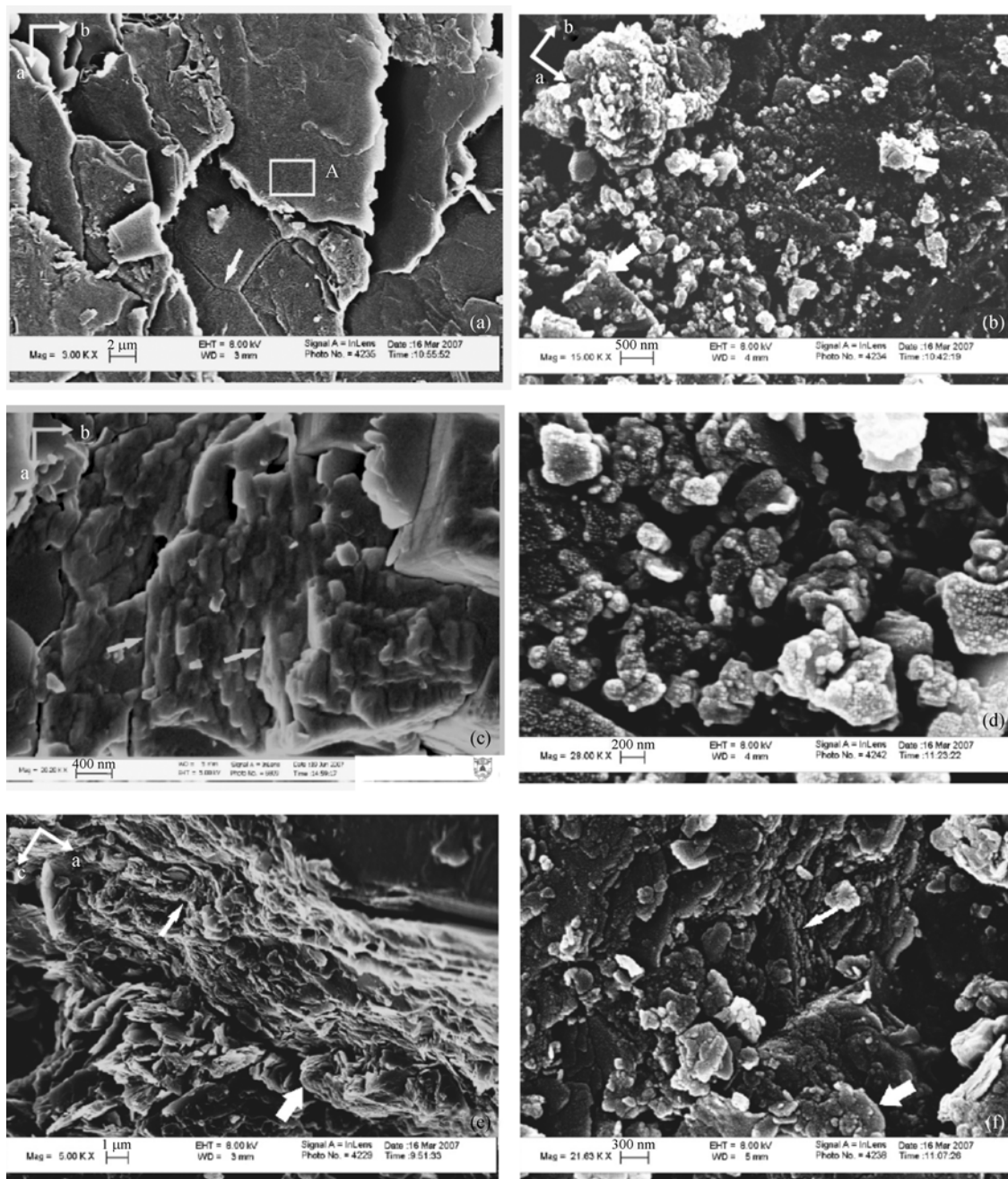


图 2 区域变质岩面理样品扫描电子显微镜(SEM)图像

(a) 白云母呈假六方形(箭头示); (b) 略显弯曲纳米线(细箭头)和裂解开的柱状体(粗箭头)(图 2(a)A 域放大); (c) 拉长纳米颗粒构成纳米线呈长柱状(箭头指); (d) 复体纳米颗粒又聚集成团块; (e) ac 面上晶体显薄片状(纳米尺度)弯曲(细箭头)和揉皱(粗箭头); (f) 拉长纳米颗粒位于揉皱右翼(细箭头), 复体颗粒集成梅花状团块(粗箭头)

米颗粒($\phi 60\sim 80$ nm)组成纳米线,呈长柱状(杆状)且平行 a 轴(图 2(c)). 顶部样品(B)可见圆度球度较佳的纳米颗粒($\phi 50\sim 70$ nm),复体纳米颗粒大都聚集成团($\phi 100\sim 250$ nm 不等)(图 2(d)). 中部 ac 面样品(C),即在(110)或(010)面观测,见云母板状晶体呈薄片状(纳米尺度)、弯曲和小揉皱(图 2(e)). 底部样品(D),见纳米颗粒($\phi 40\sim 60$ nm)显拉长状,所构成的纳米层被揉皱,个别复体颗粒集成梅花状团块(图 2(f)).

2.2 动力变质岩面理实例观测

江西地区各期构造运动均发育多种动力变质岩,以加里东、印支和燕山运动尤为明显.各种动力变质岩中所发育的面理构造,虽然其规模和程度不及区域变质岩,但均可在滑移面上见到纳米粒子结构.

例 1,标本采自分宜滨江(武功山)逆冲断裂带中的板劈理带,动力变质岩已板岩化,原岩为上泥盆统五通组(D_{3w})石英砂岩.面理多有铁染,线理清晰.电子显微镜下,单体纳米颗粒饱满($\phi 75\sim 95$ nm),大都集成复体团块.在其表层有些拉长状纳米颗粒构成短纳米线和柱状体团块,延伸方向一致,平行 a 轴(图 3(a)).

例 2,标本采自安福章庄(武功山)变质核杂岩韧性拉伸构造带,位于神山群(Pt_{3shen})云母片岩和中生代花岗岩之间.动力变质岩为片麻状糜棱岩,糜棱面理、拉伸线理受晚中生代拉伸构造制约.电子显微镜下,单体纳米颗粒圆润(一般 $\phi 70\sim 90$ nm,大者 $100\sim 120$ nm),复体纳米颗粒的圆度和球度程度也较好. ac 面上纳米线延伸稳定,紧密排列,层次分明(图 3(b)),

厚度在数十微米.

3 三轴压力实验

(1) 鉴于上述区域变质岩的原岩为泥质(泥砂质)细碎屑岩^[13,14],故采取矿井下完整的泥岩(四川广安华蓥山煤矿上二叠统龙潭组(P_{2l}))实验.岩石烘干后切成 $51\text{ mm}\times 19\text{ mm}\times 19\text{ mm}$ 的长立方体,再使用配备活塞式高温高压容器的三轴岩石力学实验机(型号: CJ500)在轴压 166 MPa,围压 50 MPa 和温度 400°C 的情况下,经历 6 小时 50 分钟的实验.样品尺寸变为 $43.7\text{ mm}\times 21.4\text{ mm}\times 21.4\text{ mm}$,应变速率为 5.82×10^{-6} 在试样中可见到片理面理化现象,刻取样品, ab 面 SEM 观测.

(2) 扫描电子显微镜下样品面理化面表层已形成颗粒分布均匀、圆度球度较佳的纳米粒子($\phi 45\sim 55$ nm)(图 4(a)).其单体颗粒大都集成复体颗粒,层层叠叠,层次明显.由于塑性流动,紧密挤压,有些单体颗粒完全融于复体颗粒之中,有些复体颗粒则紧紧镶嵌成梅花状团块构造,甚至呈连环梅花状排列,极为别致(图 4(b)).不难看出,在实验样品中面理化表面的纳米结构已经很好地模拟再现了上述的天然现象.

4 面理超微分析

4.1 纳米层状结构

从上述天然和实验的面理构造电镜观测显现,其滑移表层有纳米粒-纳米线-纳米层组成,纳米层状结构的特征在 ac (运动面)上表现的尤为清晰(图 2(e), 3(b)).在剪切滑移过程中纳米颗粒的发育大体经过 3

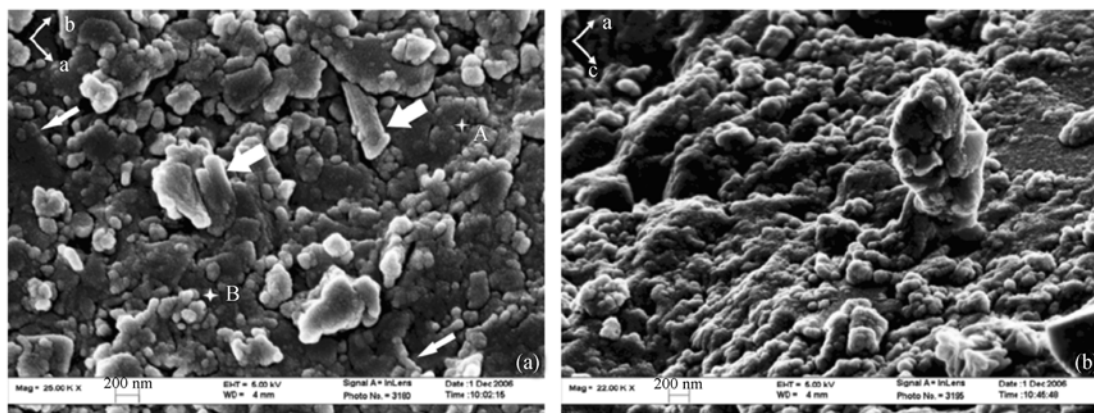


图 3 动力变质岩面理样品扫描电子显微镜图像

(a) 纳米线(细箭头指)和柱状体团块(粗箭头)延伸方向相符. A, B 为能谱分析点. (b) 紧密排列的纳米粒和纳米线

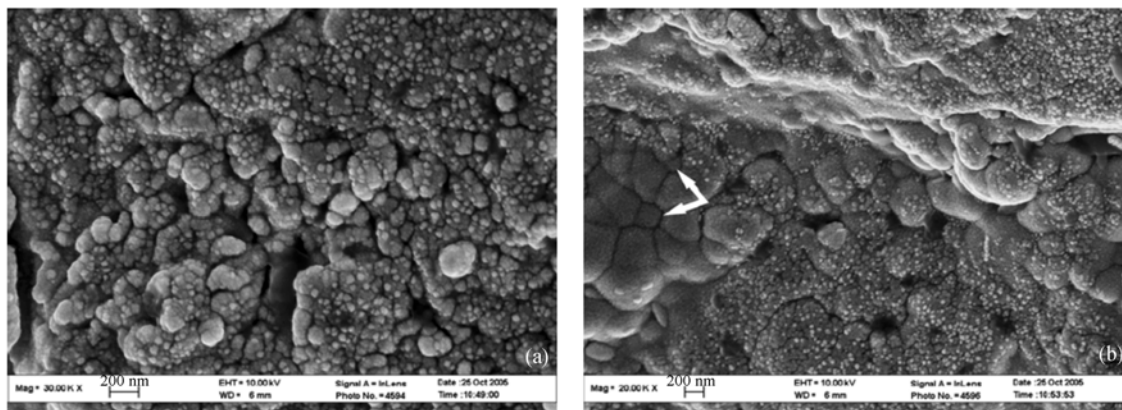


图4 泥岩高温高压实验面理化样品扫描电子显微镜图像

(a) 均匀分布的纳米粒子; (b) 复合纳米颗粒排列成连环梅花状团块构造(箭头指)

个阶段, 即颗粒粒化 (granularization)- 颗粒异化 (alienation)- 颗粒团聚 (reuniting)^[16]. 物理实验表明, 当纳米薄膜厚度大于单体纳米颗粒时, 就容易聚集成复合颗粒团^[17]. 而天然形成的纳米团块常分布极不均匀和纳米长条截开等现象, 系为成团块后再次分解、分化和分散所致. (如图 2(b), (f)). 粒化的颗粒的直径(ϕ)大都在 40~95 nm 或略大(表 1), 异化的颗粒多呈拉长状, 排列成长柱状(图 2(c), 3(a)). 颗粒由个体聚成复合体, 也都保持着一定的圆度和球度(图 2(b), (d)). 这在三轴压力实验样品中显得很清楚(图 4(a)). 纳米层理沿基础滑移面(basal slip plane)(如白云母的 001 面)叠层剪切(deck shear)过程中, 同样可产生各种流变微观构造现象^[18], 诸如吕德尔线(Lüder Line), S-C 面理和揉皱式的小褶皱(图 2(e))等^[15].

4.2 摩擦黏性变形带

岩石剪切作用会产生狭窄的摩擦黏性(frictional-viscous, FV)变形带(或条带)^[19], 其实黏弹性固体在一定荷载下产生屈服, 就可出现塑性变形. 或者说弹塑性变形中均有黏性效应^[20]. 只是因摩擦原因而强化了这种效应. 所以也就会有脆-黏性(brittle-viscous, BV)变形带之说^[21]. 不过, 这都是宏观或直观范围内的 FV 和 BV 构造现象. 事实上, 上述面理滑移表层的纳米层理也是一种超微观范畴内摩擦黏性带(条带).

同直观上 FV 带一样, 超微观上的纳米层理条带也是一个高应变、高敏感活动域^[22]. 由于纳米粒子

具有多功能物理化学效应^[23]在其微域的构造应力场-流变物理场-地球化学场非常活跃, 就会形成一些少见的高度不均匀的显微构造(highly heterogeneous microstructures)^[24]和少见的构造地球化学作用. 诸如图 2(f)和 4(b)中的复合纳米颗粒团构成的梅花状和连环梅花状构造. 兹从颗粒粒化动力学(granular dynamics)的观点^[25], 推测同颗粒的非均匀纹理流动(heterogeneous streak flow)相关^[26]. 另从图 3(a)中 A, B 点纳米颗粒的能谱分析图(图 5(a), (b))和通过计算的分析数据(表 2)表明, 氧化物 SiO₂, Al₂O₃ 百分含量都高于正常值(尤其是 Al₂O₃ 在五通组砂岩中一般都

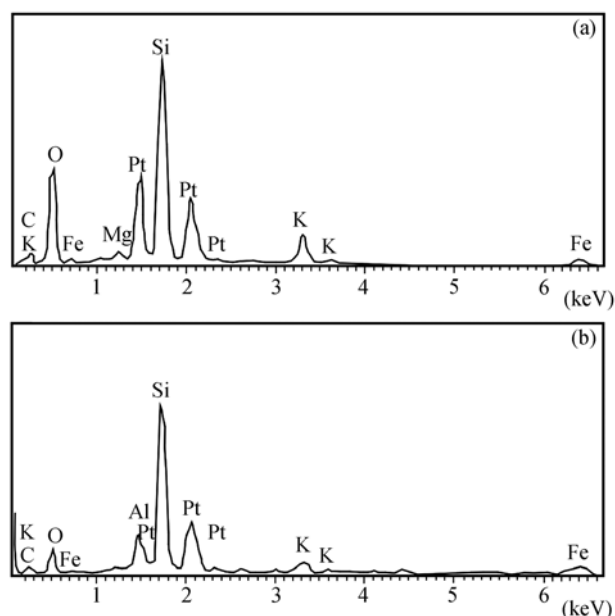


图5 能谱分析元素峰值图

<10%)。依据断裂构造地球化学原理, 从元素的离子比重、半径和电位判断在剪切带中元素 Si 易稳定^[27,28]。而元素 Al 的集中则可能与面理表层云母的增加有关, 还需结合纳米粒子的化学催化、活化和激化性能^[29]深入研究。

4.3 面理形成三阶段

第一阶段: 剪切滑移强化作用 (shear slip-strengthening), 晶质的或非晶质的滑移面在此作用下经过剪切→碎裂(fracturing)→磨损(attrition)→粉碎(comminution)→研磨(grinding), 长英质颗粒可从微米级($\phi 2.0\sim 1.6\ \mu\text{m}\rightarrow\phi 1.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$)达到纳米级(ϕ 可达 10 nm)^[5,30], 在磨碎(molar)滚动和粒化作用下形成圆化边缘^[31]。显然在此应变硬化、高应变速率的剪切激化作用下, 在面理表层产生了密集的圆度球度较佳的纳米级颗粒(图 3(b), 4(a))。

第二阶段: 剪切滑移弱化作用(shear slip weakening), 这是一种微观动力的反馈机制(dynamic feedback mechanism), 一种自弱化作用(self-weakening), 且同摩擦热降解(thermal decomposition)同时

发生的^[32]。鉴于剪切过程存在着构造脉动(structural pulse)^[33]、应变弱化(strain weakening)^[34]、能量耗散(dissipation)和颗粒边界滑移(grain-boundary sliding)^[35]流动等导致动力反馈的自弱化, 如同布里渊(Brillouin)光时域反射测量光纤应变模拟所形象反映的图像(图 6(a), (b))^[36]。在此应变软化和低应变速率弱化作用下, 面理表层的纳米颗粒流变、异化和团聚(图 2(b), 3(a)), 纳米层产生弯曲揉皱等构造现象(图 2(e), (f))。事实上, 图 3(b)和(a)也都经过此阶段, 只是表现的不明显而已。

第三阶段: 鳞片易剥作用(scaly exfoliation), 这种作用可以从直观的(mesosopic)形貌(morphological)的特征显现出来^[37], 而其微观超微观发育机制则同剪切滑移强化-滑移弱化作用一脉相承。剪切滑移变形发育阶段已从应变硬化-应变软化-应变退化(strain decaying)^[23], 以及经剪切作用后的水解弱化作用(hydrolytic weakening)^[18]而加剧。从超微观上分析, 对于面理的易剥效应, 应是首先从纳米粒子界限层(nano-confinement layer)的分离作用(separating)^[38]开始启动的。诸如图 2, 3 所示的面理滑移表层的纳米

表 2 图 3(a)中的 A 和 B 点能谱分析计算数据

点号	组分	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O
点 A	重量百分比/%	64.33	4.4	2.02	21.22	8.03
	分子含量百分比/%	74.27	1.9	3.5	14.41	
点 B	重量百分比/%	76.66	4.51		12.88	5.97
	分子含量百分比/%	85.44	1.88		8.43	4.25

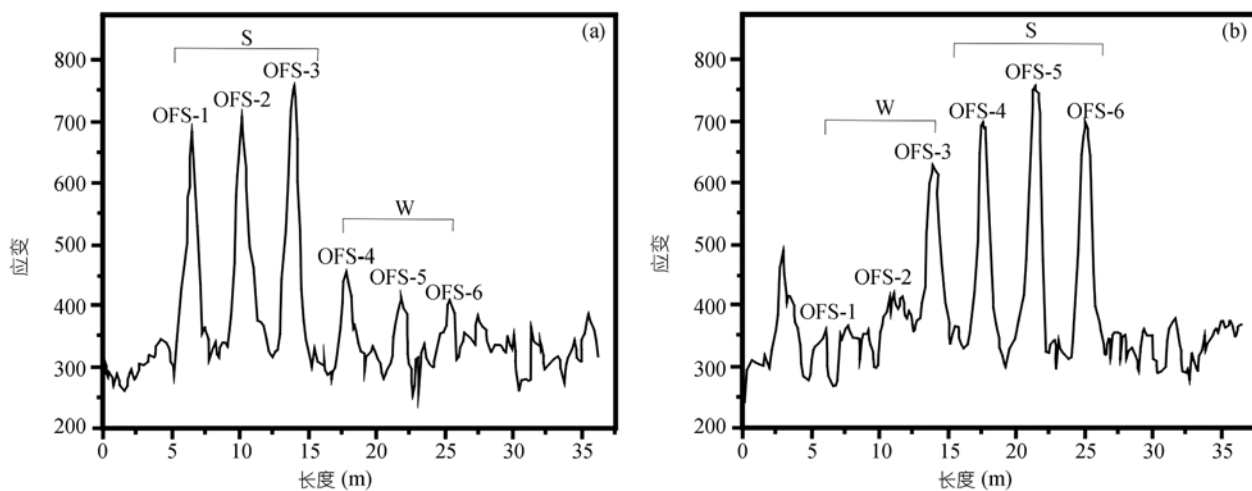


图 6 光时域反射测量光纤应变模拟

(a) 剪切滑移150 mm 光纤应变图; (b) 剪切滑移300 mm 光纤应变图. OFS, 1~6 光纤位置; S, 滑移强化域; W, 滑移弱化域

粒子层, 因此直观上所示的片状矿物分离易剥作用只是表象而已。

5 结语和讨论

(1) 通过江西区域变质岩和动力变质岩透入性面理滑移面扫描电镜实例观测, 发现其表层普遍存在纳米粒子层状结构, 并为实验模拟所验证。在剪切滑移过程中, 纳米粒子经粒化-异化-分化, 个体复体形态有别, 纳米结构层次分明。这个纳米界限薄膜(层)本质上是具有黏弹性变形的摩擦-黏性带。在此微域带中, 构造应力场-流变物理场-地球化学场非常活跃, 并同变质岩面理发育演化的 3 个阶段(剪切滑移强化作用-弱化作用-易剥作用)密切相关。

(2) 构造地质学的研究, 在 20 世纪中期主要是注重弹-塑性变形、脆-韧性变形观察, 到末期转到刚-黏性变形的探讨^[38]。作为构造地质研究的两个主体-褶皱和断裂的剪切运动, 从流变学的观点分析, 都是综合地呈现弹性和黏性等多种力学行为。诚然, 实验证明, 黏-弹性构造变形的剪切运动中, 结构面上表现为滚动滑移(rotating slip)摩擦而不是整体结构滑移

(structure slip)^[39], 纳米-微米粒子层的滑移尤为明显, 它可起到润滑和减阻作用, 加速断裂的活动运移和规模扩展。无疑, 对面理滑移面纳米结构的研究, 可揭示地质构造剪切运动的微观运动学机理^[40], 进而结合宏观区域构造探讨构造动力学行为^[41]。

(3) 值得提出的是, 地震地质学家观测到日本的阪神地震、中国台湾的集集地震和郯庐断裂附近的第四纪活动断层, 其发震(触发)断裂宽度仅为几厘米-几毫米的滑移带^{1)[42,43]}。2008 年 5 月 12 日发生过的四川汶川 $M_s 8$ 级地震, 初步确定灌县-安县断层带为发震断裂^[44]。该断裂近地表发散加宽, 向下是变狭窄的。由上述面理纳米结构研究不难推断, 狭窄发震断裂拟为纳米-微米粒子层摩擦-黏性带, 其剪切运动过程在微观机理上也有着应变硬化-应变软化和应变退化的发育阶段。物理学中的临界理论指出, 宏观和微观是相反相成的, 宏观系统的失稳是极其大量的微观粒子能量释放所致^[45]。近来一些中外地质学家正在搜集发震断裂带的岩石样品进行超微观观测, 可期对地震发震(触发)断裂构造的萌生机理会有全新的认识。

致谢 研究工作得到南京大学王德滋院士、都有为院士和南京航空航天大学郭万林教授指导; 中国科学院地球化学研究所吴学益教授和王子江高工指导高温高压实验; 中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学和地层学国家重点实验室王春朝高工协助电子显微镜测试; 审稿专家提出建设性意见, 谨此一并致谢。

参考文献

- 1 Jordan G, Higgins S R, Eggleston C M, et al. Acidic dissolution of plagioclase: *in situ* observations by hydrothermal atomic force microscopy. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(19-20): 3183—3191
- 2 Bakken B M, Hochella M F, Marshall J F. High-resolution microscopy of gold in unoxidized ore from the Carlin mine, Nevada. *Econ Geol*, 1989, 84(1): 171—179
- 3 Taran A, Bernard A, Gavilanes J, et al. Native gold in mineral precipitates from high-temperature volcanic gases of Colima volcano, Mexico. *Appl Geochem*, 2000, 15: 337—346
- 4 Berezkin V L. Genesis of areliam shungite with reference to its distinctive structural features. *Geochem Int*, 2001, 30(3): 220—227
- 5 Yund R, Blanpied M, Tullis T, et al. Amorphous material in high strain experimental gouge. *J Geophys Res*, 1990, 95: 15589—15602
- 6 Wilson B, Dewers T, Reches Z, et al. Particle size and energetics of gouge from earthquake rupture zones. *Nature*, 2005, 434: 749—752
- 7 孙岩, 葛和平, 陆现彩, 等. 韧脆性剪切滑移叶片中超微磨粒结构的发现和分析, *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(7): 619—625
- 8 Sun Y, Lu X C, Shu L S, et al. Observation of ultra-micro texture of fault rocks in shearing-sliding zone. *Prog Nat Sci*, 2005, 15(5): 430—434
- 9 Dey T N. Some mechanism of microcrack growth and interaction in compressive rock failure. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech*, 1981, 18: 199—207

1) 晁洪太, 孙岩, 王志才, 等. 发震断裂的纳米级运动学观测一例. *自然科学进展*, 2009, 待发表

- 10 Lister G S, Snoke A W. S-C mylonite. *J Struct Geol*, 1984, 6: 617—638
- 11 Isik V, Seyitoglu G, Comen I. Ductile-brittle transition along the Alaschit detachment fault and its structural relationship with the Simar detachment fault, Menderes massif, western Turkey. *Tectonophysics*, 2003, 374(1-2): 1—18
- 12 Brogi A. Foliation relationships and structural facing vs. vergence determinations in refolded low-grade metamorphic rocks: an example from the Tuscan Metamorphic Basement (Northern Apennines, Italy). *J Struct Geol*, 2006, 28: 115—128
- 13 Shu L S, Faure M, Jiang S Y, et al. SHRIMP zircon U-Pb age, litho- and biostratigraphic analyses of the Huaiyu Domain in South China—Evidence for a Neoproterozoic orogen, not Late Paleozoic-Early Mesozoic collision. *Episodes*, 2006, 29(4): 244—252
- 14 舒良树, 邓平, 于津海. 武夷山西缘流纹岩的形成年代及地球化学特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(8): 950—959
- 15 舒良树, 孙岩, 王德滋, 等. 华南武功山中生代伸展构造. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28(5): 431—438
- 16 孙岩, 舒良树, 陆现彩, 等. 岩石剪切面纳米粒子层的近期研究进展. *自然科学进展*, 2007, (10): 1331—1337
- 17 何丽静, 林晓聘, 汪铁宝, 等. 单晶 Si 表面离子束溅射沉积 Co 纳米薄膜研究. *物理学报*, 2007, 56(12): 7159—7164
- 18 孙岩, 陆现彩, 舒良树, 等. 碳酸盐岩的碎裂流变研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(12): 1111—1117
- 19 Hunt G W, Peletier M A. The maxell stability criterion in Pseudo-energy models of kink banding. *J Struct Geol*, 2000, 22(5): 669—681
- 20 杨挺青, 罗文波, 徐平, 等. 黏弹性理论与应用. 北京: 科学出版社, 2004. 1—414
- 21 Tullis J. Deformation of granites rocks: experimental studies and natural examples. *Rev Miner Geomech*, 2002, 51: 51—56
- 22 Bagde M N, Petros V. Technical note, the effect of machine behavior and mechanical properties of intact sandstone under static and dynamic uniaxial cycle loading. *Rock Mechan Rock Engineer*, 2005, 38(1): 56—57
- 23 Kambe N. Highly uniform nano-structured building block of metal and their compounds. *Script Material*, 2001, 44: 1671—1675
- 24 Trepmana C A, Stockhert B. Quartz micro structure development during non-steady state plastic flow rapidly decaying stress and strains rate. *J Struct Geol*, 2003, 25: 2035—2051
- 25 Bercovici D, Karato S I. Theoretical analysis of shear localization in the lithosphere. *Miner Geochem*, 2002, 51: 387—420
- 26 Thorkelson D J, Breitsprecher K. Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas. *Lithos*, 2005, 79(1-2): 25—41
- 27 孙岩, 徐士进, 刘德良, 等. 断裂构造地球化学导论. 北京: 科学出版社, 1998. 1—246
- 28 Kister A F M. Hydrologic segmentation of high-temperature shear zones: structural geochemical and isotopic evidence from auriferous mylonites of the Rento mine, Zimbabwe. *J Struct Geol*, 2000, 22: 811—829
- 29 Schoonen M A A, Xu Y, Strongin B R. An introduction to geocatalysis. *J Geochem Explor*, 1998, 62(1-3): 201—205
- 30 Wibberley C A J, Schimato T. Earthquake slip weakening and asperities explained by thermal pressurization. *Nature*, 2005, 306: 689—691
- 31 O'Hara K. Reaction weaken and emplacement of crystalline thrusts: diffusion control on reaction rate and strain. *J Struct Geol*, 2007, 29: 1301—1334
- 32 Keulen N, Heilbronner R, Stunitz H, et al. Grain size distributions of fault rocks: a comparison between experimentally and naturally deformed granitoid. *J Struct Geol*, 2007, 29: 1282—1300
- 33 Apraiz A, Eguilyz L. Hercynian tectono-thermal evolution associated with crustal extension and exhumation of the Lora del Rio metamorphic core complex (Ossa-Morena zone, Iberian Massif, SW Spain). *Int J Earth Sci*, 2002, 91(1): 76—92
- 34 Holdsworth R E. Weak faults-rotten cores. *Science*, 2004, 303: 181—182
- 35 Raimbourg H, Toyoshima T, Harima Y, et al. Grain-size reduction mechanisms and rheological consequences in high-temperature gabbro mylonites of Hidaka, Japan. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 267: 637—653
- 36 解国爱, 贾东, 吴晓俊, 等. 构造模拟实验中的光纤应变测量. *地质通报*, 2007, 26(5): 520—525
- 37 Vannuchi P, Maltman A, Bettelli G, et al. On the nature of scaly fabric and scaly clay. *J Struct Geol*, 2003, 25: 673—688
- 38 刘瑞珣. 流变学基础模型的地质应用及启示. *地学前缘*, 2007, 14(4): 61—65
- 39 Sun Y, Shu L S, Lu X C, et al. A comparative study of natural and experimental nano-sized grinding grain textures in rocks. *Chin Sci Bull*, 2008, 53(8): 1217—1221
- 40 Shu L S, Faure M, Wang B, et al. Late Palaeozoic-Early Mesozoic geological features of South China: response to the Indosinian collision events in Southeast Asia. *Comptes Rendus Geosci*, 2008, 340(2-3): 151—165
- 41 Shu L S, Sun Y. Simulating experiments for the deformation and microstructures of granite in the central part of the Jiangnan Belt, South China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1996, 39(1): 82—92
- 42 Oachi T, Aiming L, Allen C, et al. The Chi-Chi (Taiwan) earthquake: earthquake fault and strong motions. *Bull Seismol Soc Am*, 2001, 91: 966—976
- 43 Chao H T, Deng Q D, Li J L, et al. Study on active faults in Quaternary unconsolidated sediments by microstructural method. *Earthq Res China*, 2002, 16(2): 119—126
- 44 卢华复, 贾东, 王良书, 等. 关于汶川地震发震机制. *高校地质学报*, 2008, 14(2): 133—138
- 45 于禄, 郝柏林, 陈晓松. 相变和临界现象. 北京: 科学出版社, 2006. 1—236