

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.410



H Odé 剪切变形理论在纳米尺度的表象

孙 岩¹, 琚宜文^{2*}, 黄 骋², 周 巍¹, 晁洪太³, 王志才³

1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3. 山东省地震局, 山东济南 250014

摘要:通常认为岩石是被剪破或张裂的,那么,为何我们能寻觅到位于同压力垂直方向的破裂构造呢? H Odé 剪切变形理论给出一个精辟的回答:在塑性或粘-弹性变形中,由于介质的分异作用,存在一个从屈服条件中获得的速度不连续性,这样,其介质就能沿着等速的特征面剪切滑移,该理论亦称为塑性剪切作用准则,之前是从宏观一直观力学表象予以验证,如构造挤压带的破裂面、正压力下 Griffith 裂隙端点裂开和垂直压力下的碎裂流动等.进而,我们对花岗岩标本实施高温/高压实验,并取其位于轴压垂直方向裂隙的薄壳表层做扫描电镜观测,然后把从其表层观察的具有 H Odé 力学表象的微纳米现象,同一般剪切作用的屈服效应结构,从3个方面相比较鉴别.(1)粘-弹性变形:高温-高压的实验样品更容易产生塑性压缩容积分流,不仅具粘性也具弹性变形,随之,样品可展现纳米涂层作用和纳米分层作用.(2)纳米尺度结构:纳米尺度颗粒能成为单一纳米粒-纳米线-纳米层结构,且复体的纳米粒可细分成粒状的、线状的和片粒状的结构等.(3)有序结构:尽管 H Odé 破裂的粒化流动和纹理流动的优选方位,同普通剪切作用相比,处于弱势范畴,然而综合分析观之,这两者的屈服特征是完全一致的.反之,我们应用 H Odé 剪切理论去研究一些非常规的变形现象,必能拓展纳米地质学的研讨范畴和认知能力.

关键词: H Odé 剪切变形;纳米尺度;粘-弹性变形;三轴压力实验;有序结构;构造地质.

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2018)05-1518-06

收稿日期: 2017-10-15

Representation of H Odé Shear Deformation Theory at Nanoscale

Sun Yan¹, Ju Yiwen^{2*}, Huang Cheng², Zhou Wei¹, Chao Hongtai³, Wang Zhicai³

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

Abstract: Generally speaking, a rock is broken by shearing action or tensile force, in that case, why can we find some fracture structures perpendicular to the pressure direction? It can be solved through H Odé shear deformation theory. In plastic (or viscous-elastic) deformation, there is a velocity discontinuity which may be gained from a yield condition due to a medium differentiation, and thus the medium can just shear slip along the characteristic planes with an equal velocity. This theory is also called the plastic shearing criteria, and it was firstly verified from a macroscopic-mesoscopic mechanics representation, including the fracture planes in compressive zone, extreme point rupture of Griffith crack under normal press, and cataclastic flow in vertical pressure. Furthermore, high temperature and high pressure (HT/HP) experiment to granite samples was carried out, and the thin shells of crack surfaces, which are perpendicular to the axle load, were taken for the SEM determination. Then the micro/nanosized phenomena observed in crack surfaces with H Odé mechanics representation are compared with the textures of general shearing yield function from three aspects. (1) Viscous-elastic deformation: the experimental specimens passed HT/HP are more likely to produce a plastic compactive volumetric flow, involving not only viscous deformation but also elas-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos.41530315, 41372213); 国家重点基础研究计划 (973 计划) 项目 (No.2012CB416706); 山东省自然科学基金项目 (No.ZR2012DM005).

作者简介: 孙岩 (1937-), 男, 教授, 博导, 构造地质学和构造地球化学. E-mail: sunyan37@sina.com

*** 通讯作者:** 琚宜文, ORCID: 0000-0002-5068-088X. E-mail: juyw03@163.com

引用格式: 孙岩, 琚宜文, 黄骋, 等, 2018. H Odé 剪切变形理论在纳米尺度的表象. 地球科学, 43(5): 1518-1523.

tic one. Consequently, the specimens can exhibit effects of nano-coating and nano-layering. (2) Nanosized texture: nanosized grain (with diameter 60—80 nm) can turn into single nanoparticle-nanoline-nanolayer texture, and aggregate grains may be subdivided into granular, linear granular and schistose granular textures, etc. (3) Ordered fabrication: though preferred orientations of the granular flow and streak flow in H Odé shear fractures belong to a weaker scale than common shearing, their yield characteristics are entirely corresponding with the latter from comprehensive analysis. It is suggested that H Odé shear theory can be applied to research some few unconventional deformation phenomena, and it can offer a new perspective for nanogeology researches.

Key words: H Odé shear deformation; nanosize; viscous-elastic deformation; tri-axial compression experiment; ordered fabrication.

0 引言

在力学家看来,无定形流淌的水是有弹性的,坚固的岩石是在不停的流动着的(Reiner and Leaderman, 1960).这是因为在理论上,物体都兼具弹—塑性(以是否易恢复变形作区分)、脆—韧性(是否易破碎变形)和刚粘性(是否易流动变形)这 6 种力学属性,只是依哪一种为主而已.物体力学性能的多样性,促使研究者提出多种与之相适应的强度理论.自 Galileo G.(1564—1642)创立最大主应力理论以来的数百年间,涌现出的强度理论达数十种之多,在构造地质学中启用最普遍的是 Mohr H. 的最大剪应力理论,还有 Griffith A. A. 的脆性破裂准则(Griffith, 1921), de Saint-Venant B. 的弹性变形近极强原理,和 Banshinger J. 的屈服效应理论(冯端, 1975)等力学准则,可深入诠释构造地质学、构造岩石学和构造地球化学中的一些微观机制(孙岩和韩克丛, 1985).如果说材料学、力学和构造地质学的研究侧重点,从 20 世纪中叶起已从弹—塑性转为脆—韧性变形,那么自 21 世纪始,其侧重点已逐渐转向非线性的刚—粘性、粘滞性和流变性,特别是粘—弹性的变形,这与断裂剪切带中纳米结构的成因尤为密切相关(Sun *et al.*, 2008; Paggi and Reinoso, 2015; Wang *et al.*, 2016).本文所阐述的 H Odé 剪切变形理论,早在 20 世纪 60 年代就提出来的塑性流变变形力学准则(Odé, 1960; 孙岩等, 1986),作者拟结合纳米尺度鉴别予以深入研讨,必对断裂剪切带中粘—弹态纳米结构变形机理提出新的理论依据.

1 H Odé 剪切变形

1.1 理论综述

H Odé 理论指出,由于塑性变形中存在着速度不连续,这样应力—应变关系可以从塑性介质分异的屈服条件中获得.即横过一定的塑性体截面,速度是不连续的,而相对应应力作用则是连续的,如是介质

将沿着速度相等的平面(特征面)发生韧性剪切变形、塑性流变变形(Odé, 1960).该理论一问世,就得到构造地质学家的极大重视.Hills(1961)扼要地把这一理论称为塑性剪切作用(plastic shearing)准则.他认为:大多数地质体本质上是存在塑性流动的,起初并不具有明显的弹性应变,在不失掉粘性的差异运动下,亦即应变率高的固态流动下,产生剪切破裂变形.

1.2 力学表象

(1)通常认为,物体都是被剪破、张裂的,那对于施力方向(挤压作用)同变形延伸方向相垂直的破裂变形当如何解释呢?如在灰岩地层中,常见陡立的对冲断裂带、挤压带中,多有重结晶化、层理化,以至破裂面,偏光镜下不难看出方解石的 e 面(0112)双晶固态流变发育等,正是 e 面诱发片理塑性剪切变形,而不是最大剪应力的 S_1 或 S_2 所引起的变形.

(2)由于岩石物质不均匀,存在孔隙、裂纹和 Griffith 临界裂隙(Griffith, 1921),在外力作用下其微裂缝尖端的张应力 σ_t 为:

$$\sigma_t = \frac{2(\xi_0 \sigma_y - \eta \tau_{xy})}{\xi^2 + \eta^2},$$

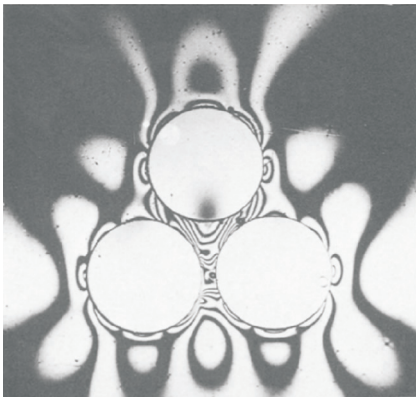


图 1 质点间应力集中现象的光弹实验
Fig.1 A photo-elastic experiment of strain concentration phenomena between particles
据 Berka(1982)简化;3 个嵌入松脂实验材料的波利质点,相互间距为质点直径的 1/10,曲线为干涉条纹

表 1 岩石单轴挤压强度测试数据

Table 1 Determining data about uniaxial pressure strength in rocks

采样地点	地层岩性	标本编号	挤压强度 R_P (MPa)			强度比值	
			破裂 P_1	破碎 P_2	粉碎 P_3	P_2/P_1	P_3/P_2
江苏无锡大鸟嘴	中下泥盆统茅山群($D_{1-2}m$)砂岩	B-102	39.20	71.00	20.98	1.81	2.95
无锡南大浮	同上	B-108	21.74	34.39	26.08	1.56	2.50
南京江宁湖山	中石炭统黄龙组(C_2h)灰岩	B-505	20.52	26.12	30.44	1.27	1.17
南京江宁栖霞山	同上	B-306	46.79	67.14	76.71	1.43	1.12

注:河海大学工程力学系朱文弦教授协助测试.

式中: ξ_0 为裂缝的宽与长之比; η 为偏平裂缝坐标; σ_y 和 τ 分别为正应力和剪应力(Lajtai,1971).显然,在偏平裂缝的走向同正应力垂直的塑流态和粘弹态应变的情况下,即可显现 H Odé 剪切变形表象.这在光弹实验上显得尤为清晰(图 1;孙岩等,1986).

(3)岩石单轴挤压强度测试(试用 WAW 600 型刚性压力机)结果(表 1)表明,岩块破坏有个破裂—破碎—粉碎的过程,在破碎和碎粒阶段,其中较大的碎片、碎粒,在垂直压力的方向上有滑移迹象,显示碎裂流动(cataclastic flow)的运动机理(Lu *et al.*, 2005),这与 H Odé 剪切流变的变形原理是完全符合的.

2 纳米尺度鉴别

H Odé 力学准则的提出已过去半个多世纪了,之所以没有得到广泛的应用,在于其形成机理特别是微观机理没有获得全面深入的诠释和认可.现今纳米科技和纳米地质学兴起,在理论、实践和实验有了新思维、新认识和新手段(Hochella,2002;据宜文等,2016),对纳米尺度的结构和构造现象有了新的发现与认识(沈宝云等,2016;王朋飞等,2017),具备了对该准则从微观上重新分析和鉴别的必要和充分条件.

2.1 样品制备

燕山期花岗岩样品采自江西北部星子县,样品切割成高 40 mm、直径 17 mm 的长圆柱体,再使用配备有活塞式高温高压釜的三轴岩石力学实验机(型号:CJ-500)进行压力实验(温度、轴压和施力时间等各种参数见表 2).实验后的样品,在其与轴压相垂直的方向,出现一系列平行、密集的宽度不一的裂缝(一般 0.2~0.8 mm),并有稀少的平行轴向方向的裂缝.之所以未见斜列的剪切裂缝,通常与试件原岩的变形组构和隐形裂缝有关,这会诱发不同类型高温高压样品裂缝构造的发育.前者略显 H Odé 剪切变形的力学表象(图 2,实箭头所示裂缝两头,右

表 2 花岗岩样品三轴压力实验参数

Table 2 Experimental parameters of triaxial compression in the granitic specimens

样品号	轴压 (MPa)	围压 (MPa)	温度 (°C)	实验用时 (h)	应变率 (s^{-1})
样品-1	1 600	260	365	10	7.63×10^{-6}
样品-3	1 753	320	600	10	9.72×10^{-6}

注:中国科学院地球化学研究所吴学益教授协助测试.

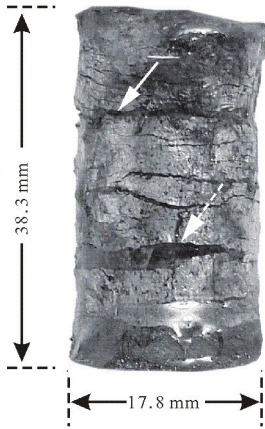


图 2 三轴压力实验产生 H Odé 剪切变形力学表象的试样

Fig.2 A specimen with mechanical feature of H Odé shear deformation produced by the triaxial compression experiment

许多垂直于主压力方向发育的裂隙显示出 H Odé 剪切变形的力学表象,实箭头标示 SEM 样品采集点,张裂垂直于上述剪裂隙生长,不仅张开延伸且引发脱落现象(虚箭头)

凹左凸,表现出滑移转动的细微迹象),后者仅显出張裂而已.工作至此,我们仔细刻取图 2 实箭头处所示裂缝表层,作为微纳米尺度鉴别的扫描电子显微镜(SEM)用样,并严格按操作程序(清样—装样—镀膜)实施.

2.2 电镜观测

在用 SEM 观测断裂剪切带表层剪切薄壳(通常由同动力矿物、弱勢矿物和超软矿物组成)时,我们发现,粘—弹性变形、纳米结构和有序组构是其明显的特征,那么在上述的 H Odé 剪切变形样品(表 2,样品 1,样品 2,图 2 实箭头示)中,能否观察到这

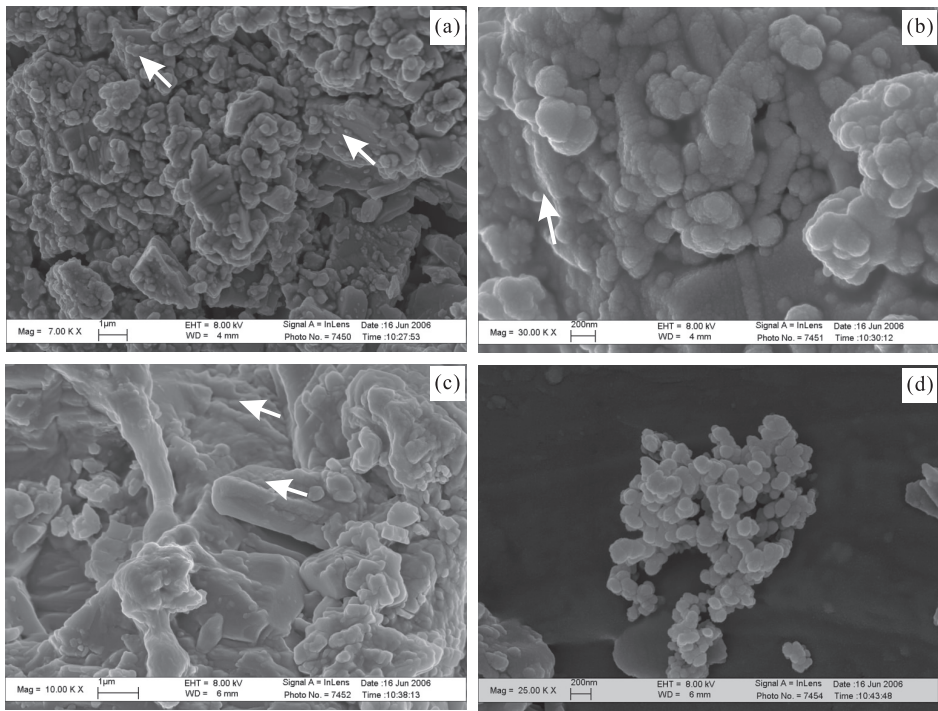


图 3 三轴压力实验样品 1(a,b)和样品 2(c,d)纳米结构和有序组构特征的 SEM 图像

Fig.3 SEM images of the nanotexture and ordered fabrication characteristics about specimen 1 (a, b) and specimen 2 (c, d) in the triaxial compression experiment

a.变形早期形成的纳米层状构造已变成微米级碎块,稀少的拉长的纳米颗粒呈定向排列(箭头示),且同碎块的延长方向相一致;b.纳米颗粒构成了纳米线和纳米层(箭头),单体的纳米颗粒聚集成复合的纳米颗粒和多重复合体的纳米颗粒,并显现花斑状构造(图片右边尤甚);c.长的碎块和拉长的微/纳米颗粒(箭头)大体上相互平行,在一定的程度上可以表示简单剪切作用的运动方向,其中央部分,一条粘性流变的条纹横过碎块分布范围,彰显了粘-弹态 H Odé 剪切运动中粘性和弹性变形中存在有不协调的现象;d.H Odé 剪切面展现一光滑的面,剪切摩擦形成微/纳米复合颗粒泪滴状落在屈服界面上

些特征呢? 下面一一鉴别陈述.

(1)粘-弹性变形(viscous-elastic deformation).所谓粘-弹性变形是指连续介质综合地呈现粘性流体和弹性固体两者的力学行为,即兼具粘性和弹性 2 种不同机理的变形(杨挺青等,2004).样品 1 和样品 2 中的剪切薄壳系由毫米级的同动力矿物(压力敏感矿物石英)组成,在高轴压和高围压下,这部分敏感矿物更易产生塑性压缩容积流动(plastic compactive volumetric flow)(Aydin *et al.*,2006)、脆性转韧性和脆性转粘性的力学行为(Cashman *et al.*,2007).事实上,图 3a 和 3c 中纳米涂层的层理就是一种超微观范畴内摩擦粘性(层)带(Sun *et al.*,2013),而图 3b 和 3d 中微/纳米颗粒展现颇佳的圆度和球度,则彰显出剪切薄层物质具有弹性变形的力学行为.即不能单纯从一种力学特性(弹-塑性、脆-韧性或粘-刚性)来描述之.

(2)纳米结构(nanosized texture).纳米尺度的粒状形态,样品 1 和样品 2 中均具饱满圆润状,其大小分别为 30~60 nm(直径)和 80~120 nm(图 3),

纳米科技界常称为微/纳米颗粒.纳米单体颗粒可存在纳米粒-纳米线-纳米层的发育过程(图 3a, 3c),也可存有纳米单体颗粒-纳米复合体颗粒-纳米多重复合体颗粒的发育进程(图 3b,3d),或两者兼而有之.纳米(或微/纳米)尺度的结构,可细分为粒状、线粒状、片状和片粒状等多种(Zhou *et al.*,2017).样品 1 和样品 2 中的纳米结构主要表现为粒状和线粒状.粘-弹性变形中的纳米(微/纳米)结构构造,在应硬化-应变软化-应变退化的变形过程中,会在变形初期产生破损、破裂和破坏的脆性行为(Viti and Hirose,2009),这在图 3a 和 3c 中均有不同程度的反映.

(3)有序组构(Ordered fabrication).从非线性理论,广义地讲,粘-弹性的非平衡态变形达到一定的阈值时,会产生有序的耗散结构(dissipative structure)(Sun *et al.*,1992),就本次三轴压力实验的样品(表 2)来讲,它的塑性流动屈服效应(yield effect),体现在压缩/闭合(compactive/closing)和膨胀/张开(dilantant/opening)的层次性(Aydin *et al.*, 2006),如

图 3a,3c 中应变硬化层次已受到后期应变退化的破坏;还体现在粒化流动 (granular flow) 和纹理流动 (streak flow) 中的方向性 (Thorkelson and Breitsprecher, 2005), 能在 H Odé 剪切变形中获得这种现象 (图 3a,3c) 已难能可贵。诚然, 这种介质沿速度相等面发生的剪切运动只能是单剪型 (simple shear pattern) 而不是纯剪型 (pure shear pattern) (Sun *et al.*, 2014)。

3 结论

鉴于物体力学性能的多样性, 研究者们也提出了多种与之相适应的强度力学理论。H Odé 剪切变形准则是适用于粘—弹性变形行为的一种理论, 过往都是从宏观范畴讨论其剪切变形的力学表象, 在本文的前半部分我们做了阐述。实际上是进入粘—弹性变形之后, 应力应变不再成比例关系, 由于速度不连续, 发生一种剪切作用滞后现象, 所以是在施加力的一段时间后, 才会产生在垂直正应力方向的 H Odé 剪切运动, 这时的变形应变率 (ϵ) 的值同施加力 (σ) 才会成比例关系。

我们在本文后半部分着重依三轴压力测试样品的 SEM 观测, 从超微观的粘—弹性变形、纳米结构和有序组构鉴别 H Odé 简单剪切变形具有通常剪切变形的微/纳米构造特征。(1) 纳米涂层层理是一种超微摩擦粘性软化带, 微/纳米颗粒的圆度和球度展现出弹性力学行为。(2) H Odé 剪切变形同样可产生复体纳米颗粒、纳米线层和纳米线粒结构。(3) 同样可见到有序的定向组构, 只是显示出一种弱勢的而不是强势的现象, 一种单剪型而不是纯剪型的罢了。

H Odé 准则虽然是一个简单的力学概念, 但也是一个基本的富有研究性的力学理论。我们是从纳米尺度结构构造为其进行了鉴别验证, 反过来可用其诠释非常规粘—弹性微/纳米变形现象, 必能拓展纳米地质学的研究框架和认知水平。

致谢: 感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改建议和意见, 研究工作得到南京大学王德滋院士、都有为院士和中国地质大学 (武汉) 蒋少涌教授的关心、指导和支 持; 中国科学院地球化学研究所吴学益教授指导高温高压实验以及中国科学院南京古生物地层研究所国家重点实验室王春朝高工协助电镜测试, 谨此一并诚挚致谢!

References

Aydin, A., Borja, R. I., Eichhubl, P., 2006. Geological and

- Mathematical Framework for Failure Modes in Granular Rock. *Journal of Structural Geology*, 28(1): 83—98. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.07.008>
- Berka, L., 1982. On Stress Distribution in a Structure of Polycrystals. *Journal of Materials Science*, 17(5): 1508—1512.
- Cashman, S. M., Baldwin, J. N., Cashman, K. V., et al., 2007. Microstructures Developed by Coseismic and Aseismic Faulting in Near-Surface Sediments, San Andreas Fault, California. *Geology*, 35(7): 611—614. <https://doi.org/10.1130/G23545A.1>
- Feng, D., 1975. *Physics of Metals*. Science Press, Beijing, 623—822 (in Chinese).
- Griffith, A. A., 1921. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character (Series A)*, 221: 163—198.
- Hills, E. L., 1961. *Elements of Structural Geology*. Chapman and Hall Ltd., London, 95—97. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5843-2>
- Hochella, M. F., 2002. Nanoscience and Technology: The Next Revolution in the Earth Sciences. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(2): 593—605. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00818-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00818-X)
- Ju, Y. W., Sun, Y., Wan, Q., et al., 2016. Nanogeology: A Revolutionary Challenge in Geosciences. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(1): 1—20 (in Chinese with English abstract).
- Lajtai, E. Z., 1971. A Theoretical and Experimental Evaluation of the Griffith Theory of Brittle Fracture. *Tectonophysics*, 11(2): 129—156. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(71\)90060-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(71)90060-6)
- Lu, X. C., Sun, Y., Shu, L. S., et al., 2005. Cataclastic Rheology of Carbonate Rocks. *Science China Earth Sciences*, 48(8): 1227—1233.
- Odé, H., 1960. *Memoir. Geology Society America*, 79: 293—322.
- Paggi, M., Reinoso, J., 2015. An Anisotropic Large Displacement Cohesive Zone Model for Fibrillar and Crazing Interfaces. *International Journal of Solids and Structures*, 69: 106—120. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.04.042>
- Reiner, M., Leaderman, H., 1960. Deformation, Strain, and Flow. *Physics Today*, 13: 47. <https://doi.org/10.1063/1.3057119>
- Shen, B. Y., Liu, B., Liu, H. L., et al., 2016. Xiaomei Ductile Shear Zone on Hainan Island in a Nanoscale Perspective. *Earth Science*, 41(9): 1489—1498 (in Chinese with English ab-

- stract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.504>
- Sun, Y., Han, K. C., 1985. Division of Fractured Tectonic Zone. Science Press, Beijing, 1—163 (in Chinese).
- Sun, Y., Jiang, S. Y., Wei, Z., et al., 2013. Nano-Coating Texture on the Shear Slip Surface in Rocky Materials. *Advanced Materials Research*, 669: 108—114. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.669.108>
- Sun, Y., Jiang, S. Y., Zhou, W., et al., 2014. Mechanical Analysis and Identification Markings of Nanoparticle Distribution in Narrow Friction Zones. *Trans. Tech. Publications*, 924: 312—318. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.924.312>
- Sun, Y., Lu, X. C., Zhang, X. H., et al., 2008. Nano-Texture of Penetrative Foliation in Metamorphic Rocks. *Science China Earth Sciences*, 51(12): 1750. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-0138-9>
- Sun, Y., Shen, X. Z., Gou, F. Y., 1986. Observation and Experiments on the H Odé Shearing Deformation. *Journal of Guilin College of Geology*, 6(4): 347—351 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y., Yang, S. F., Zhang, Q. L., et al., 1992. Dissipative Structures of Rock- and Ore-Forming Systems in Faults. *Chinese Journal of Geochemistry*, 11(2): 121—132. <https://doi.org/10.1007/BF02871999>
- Thorkelson, D. J., Breitsprecher, K., 2005. Partial Melting of Slab Window Margins: Genesis of Adakitic and Non-Adakitic Magmas. *Lithos*, 79(1): 25—41. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.049>
- Viti, C., Hirose, T., 2009. Dehydration Reactions and Micro/Nanostructures in Experimentally-Deformed Serpentinites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 327—338. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0337-6>
- Wang, P. F., Jiang, Z. X., Li, Z., et al., 2017. Micro-Nano Pore Structure Characteristics in the Lower Cambrian Niutitang Shale, Northeast Chongqing. *Earth Science*, 42(7): 1147—1156 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.093>
- Wang, X. G., Hu, B., Tang, H. M., et al., 2016. A Constitutive Model of Granite Shear Creep under Moisture. *Journal of Earth Science*, 27(4): 677—685. <https://doi.org/10.1007/s12583V016-0709-1>
- Yang, T. Q., Luo, W. B., Xu, P., et al., 2004. Viscoelastic Theory and Application. Science Press, Beijing, 1—414 (in Chinese).
- Zhou, W., Jiang, S. Y., Ju, Y. W., et al., 2017. Studies on Micro/Nano-Sized Grinding Grains on Shear-Slip Surfaces in Rocks. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 17(9): 7069—7075. <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.14527>

附中文参考文献

- 冯端, 1975. 金属物理. 北京: 科学出版社, 623—822.
- 据宜文, 孙岩, 万泉, 等, 2016. 纳米地质学: 地质领域革命性挑战. 矿物岩石地球化学通报, 35(1): 1—20.
- 沈宝云, 刘兵, 刘海龄, 等, 2016. 海南岛小妹韧性剪切带的纳米尺度. 地球科学, 41(9): 1489—1498.
- 孙岩, 韩克丛, 1985. 断裂构造岩带的划分. 北京: 科学出版社, 1—163.
- 孙岩, 沈修志, 勾佛仪, 1986. H Odé 剪切变形的观察和实验研究. 桂林冶金地质学院学报, 6(4): 347—351.
- 王鹏飞, 姜振学, 李卓, 等, 2017. 渝东北下寒武统牛蹄塘组页岩微纳米孔隙结构特征. 地球科学, 42(7): 1147—1156.
- 杨挺青, 罗文波, 徐平, 等, 2004. 粘弹性理论与应用. 北京: 科学出版社, 1—414.