

断层区纳米颗粒的成因机制及其对断层滑动的影响

刘昕旺

广东省铁路规划设计研究院有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2023年2月9日; 录用日期: 2023年3月17日; 发布日期: 2023年3月27日

摘要

由于脆性破裂条件下难以产生小于 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒, 关于断层区产生的纳米颗粒成因一直存在争议。本文总结了前人关于纳米颗粒成因机制的观点, 如热分解作用、冲击加载和亚临界扩展、脆韧性机制、颗粒边界滑移、岩石矿物粉末化作用等。当孤立的球状纳米颗粒出现时, 其有助于润滑断层, 导致摩擦系数下降, 进而促进断层快速滑动。随着断层滑动摩擦产生高温, 球状纳米颗粒相互粘结, 形成集合体, 润滑作用消失, 摩擦系数增强, 断层滑动趋于缓慢而稳定。关于纳米颗粒的成因和对断层润滑作用, 尚存在诸多争议。未来的研究应该集中于不同矿物之间、不同温压条件、不同应变速率之间纳米颗粒形成条件和对断层滑动影响的对比研究, 以期获得不同矿物之间纳米颗粒形成的条件和对断层弱化作用的影响。

关键词

纳米颗粒, 成因机制, 断层滑动

Formation Mechanisms of Nanoparticles Infault Zone and Their Influence in Fault Slip

Xinwang Liu

Guangdong Railway Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Feb. 9th, 2023; accepted: Mar. 17th, 2023; published: Mar. 27th, 2023

Abstract

The formation of nanoparticles in fault zoneslip surface has been controversial, because it is diffi-

cult to produce particles smaller than 1 μm under the brittle condition. In this paper, the previous views on the formation mechanisms of nanoparticles in fault zone are summarized, such as thermal decomposition, shock loading, subcritical crack growth, brittle-ductile mechanism, grain boundary sliding, rock and mineral powder, etc. When the isolated spherical nanoparticles appear, they contribute to lubricating the slip surface, leading to the decrease of friction coefficient and promoting the fault rapid slip. With the high temperature generated by frictional heating, the isolated spherical nanoparticles adhere to each other, forming agglomerated nanoparticle aggregates. As the lubrication effect disappears and the friction coefficient increases, the slip tends to be slow and stable. There are still many debates about the formation of nanoparticles and their effect on fault lubrication. The future researches should focus on the comparative study of the formation conditions of nanoparticles between different minerals, temperature and pressure conditions, strain rates and their effects on fault slip, so as to obtain the formation conditions of nanoparticles between different minerals and their effects on fault weakening.

Keywords

Nanoparticles, Formation Mechanisms, Fault Slip

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纳米颗粒是指三维空间中至少有一维粒径小于 100 nm 的颗粒, 通常呈球状、纤维状、管状等形态特征。长期以来, 无论是在自然界的断层光滑面、韧性剪切带, 还是在实验剪切断层中, 都发现了纳米颗粒的存在。机械破碎和研磨作用表明, 当颗粒接近 1 μm 的研磨极限时, 颗粒会产生塑性变形而非脆性破裂。破裂模型和低温塑性力学表明, 在压缩荷载和短时间尺度下, 在任何应变速率下都不可能产生明显较小的颗粒。因此, 断层中的这些纳米颗粒的成因也一直存在争议, 目前尚不清楚纳米颗粒在整个滑动摩擦过程中是如何影响断层的。本文总结了部分学者在自然界和实验断层中发现的纳米颗粒, 探讨了纳米颗粒相应的成因机制, 并对未来断层纳米颗粒的研究方向进行了展望。

2. 纳米颗粒成因机制

2.1. 热分解作用

Han 等(2007)利用采自意大利 Carrara 大理岩样品进行模拟断层实验[1], 实验使用的法向正应力范围为 1.1~13.4 MPa, 等效滑移速率为 0.03~1.30 m/s, 实验结束后利用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)和 X 射线衍射(XRD)进行观察。结果表明, 断层泥形成于位移的早期阶段(<2 m), 其外带和内带分别由方解石、生石灰(CaO)和/或熟石灰组成[Ca(OH)₂]。靠近断层泥附近的岩石内, 方解石颗粒发生破裂, 破碎的方解石颗粒粒径向断面逐渐减小, 直至变成断层泥。断面主要由一百到数百纳米粒径的颗粒集合体组成(图 1(B)), 每个集合体又由直径约为数到数十纳米的纳米颗粒组成(图 1(C))。为此, Han 等人认为, 这些纳米颗粒的形成, 主要是方解石的热分解作用产生。在滑移的早期阶段, 方解石在高温下发生分解反应: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$, 形成生石灰。生石灰形成之后, 通过吸收水分转化为熟石灰: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2$ 。在分解区前缘(DF)出现的许多裂缝(图 1(A)), 有利于水分的渗透, 也有助于生石灰转化为熟石灰。

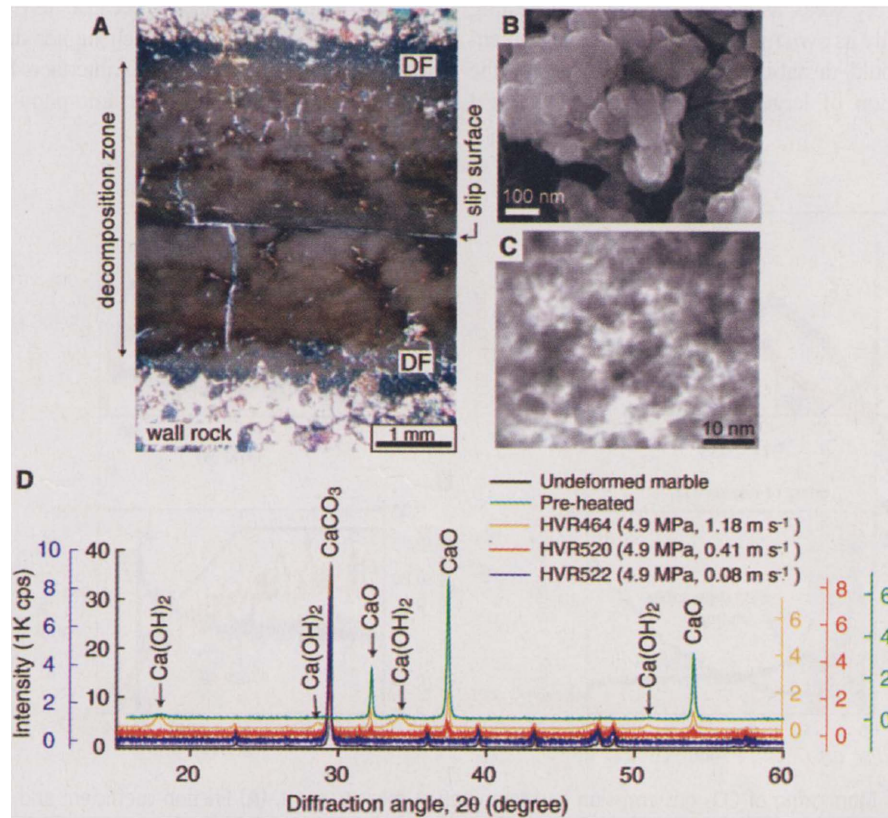


Figure 1. Textures and decomposition products in fault zones

图 1. 断层的颗粒结构及其分解矿物

2.2. 冲击加载和亚临界裂纹扩展

Samms & Ben-Zion (2008) 基于理论公式推导, 提出在压缩条件下, 独立于温度和应变速率的最小绝对晶粒大小为公式(1)

$$d_{\min} = 16 \left(\frac{CK_{IC}}{2\hat{\tau}_p} \right)^2 \quad (1)$$

[2]式中, C 为与颗粒形状相关的常数, 球体可取 $\sqrt{2/3}$; K_{IC} 为临界应力强度因子, $K_{IC} = \sqrt{EG_C}$, 其中 E 为杨氏模量, G_C 为断裂能量; $\hat{\tau}_p$ 为温度在 0 K 时的流体压力。

在冲击加载条件下, 压应力可比流体压力高达 50 倍, 流体压力可使最小晶粒大小减小 2500 倍, 远低于纳米尺度。应力的扩展可以大大降低 K_{IC} 的有效值, 从而产生小晶粒。在有流体存在的条件下, 实验很难证明亚临界裂纹扩展 K_{IC} 的有效值极限。Atkinson (1984) 认为裂纹扩展导致 K_{IC} 可能低至其正常值的 20%, 将式中的 K_{IC} 换成 $0.2 K_{IC}$, 则橄榄石的最小粒径为 $d_{\min} = 11\text{ nm}$, 石英的最小粒径为 $d_{\min} = 3\text{ nm}$, 均可以产生纳米级颗粒[3]。

2.3. 脆韧性机制

Siman-Tov 等(2013)对采自死海构造活动区内的 3 条不同断层上的天然碳酸盐岩[4], 进行了微观尺度的表面属性和粗糙度研究。他们发现, 断层镜面之下可分为两层, 两层之间边界粗糙, 最外层厚度 $< 1\ \mu\text{m}$, 由方解石纳米颗粒组成(图 2(B)), 粒径数十到数百纳米, 颗粒未见优选方向, 方解石纳米颗粒分布于硅

铝矿物的基质中；内层由微米级方解石晶体组成(图 2(C))，沿晶体边界观察到孔隙。方解石晶体由一系列平行带组成，反映了可能由机械双晶形成的亚颗粒边界，这是塑性变形的特征。在一些孔隙中，可以观察到双晶的微小部分，可能是从更大的亚颗粒上撕裂下来的(图 2(C)中的黑色椭圆)。它们认为纳米颗粒可能通过类似机械铣削的两步过程形成：1) 晶体中应变导致塑性变形，并产生束状长晶体；2) 束状长晶体通过脆性断裂撕裂形成纳米颗粒(图 2(D))。由于塑性变形产生的双晶宽度大小约为 $50 \pm 30 \text{ nm}$ ，因此脆性断裂撕裂形成的颗粒的大小可达纳米级。

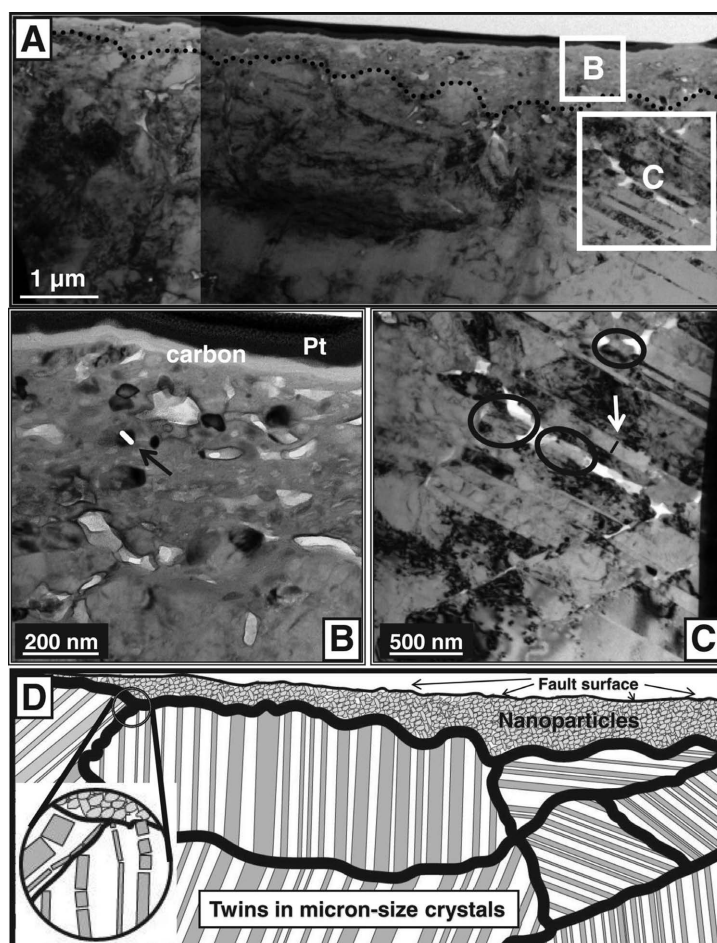


Figure 2. Microscopic characteristics of fault mirror
图 2. 断层镜面微观特征

2.4. 颗粒边界滑移

De Paola 等(2015)将碳酸盐岩的高速滑移实验划分为三个阶段[5]，阶段 I 形成了 $150 \mu\text{m}$ 厚的局部滑移区，碎屑颗粒大小 $1 \leq D \leq 5 \mu\text{m}$ ，相当对较低的温度下($\leq 100^\circ\text{C}$)，脆性破裂和碎裂作用时该阶段的主要变形方式(见图 3)。阶段 II 滑移区表现出粘性特征，出现多个滑移面。随着摩擦产生的温度升高，较大的方解石碎屑颗粒晶内产生塑性变形，形成高密度的自由位错和亚颗粒($D \leq 100 \text{ nm}$)，从而在滑移区出现约 $5 \mu\text{m}$ 厚的次圆状纳米颗粒薄夹层。阶段 III 滑移区整体特征与阶段 II 类似，但颗粒的微观结构有所不同。纳米颗粒呈等轴粒状，展现出三联点式棱角状边界，没有出现优选方向，表现出低位错密度，这可能是由于在高温下($\geq 900^\circ\text{C}$)与超塑性变形有关的颗粒边界滑移机制形成的。

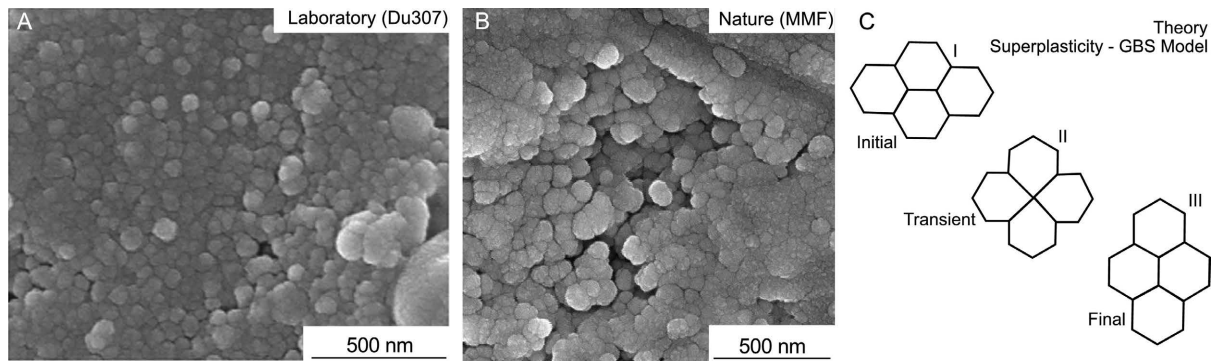


Figure 3. Triplet structure of nanoparticles and genetic model of particle boundary slip developed from experimental sample and natural sample

图 3. 实验样品与自然界样品发育的纳米颗粒三联点结构及其颗粒边界滑移成因模式图

2.5. 岩石矿物粉末化作用

Sun 等(2008)采集三个不同地区的构造岩进行 SEM 观察[6], 均在剪切滑移面上发现了纳米颗粒, 同时对野外采集的细粒花岗岩进行三轴压缩试验, 也观察到了与上述三个构造岩类似的微观特征。岩石摩擦过程中受非线性强耦合多单元作用限制的非稳定复杂系统, 岩石粉碎和磨损过程远离平衡, 能量耗散导致自组织、自反馈、自催化功能作用, 形成有序的纳米颗粒结构。纳米颗粒形成与剪切-摩擦-黏性的发展存在共生关系, 在剪切运动中, 纳米颗粒层的滑动运动引发了岩石内部的分配、离析和分层。岩石的塑性流变本质上是超微颗粒(纳米颗粒和微颗粒)的运动。纳米颗粒的形成与演化经历了四个阶段:

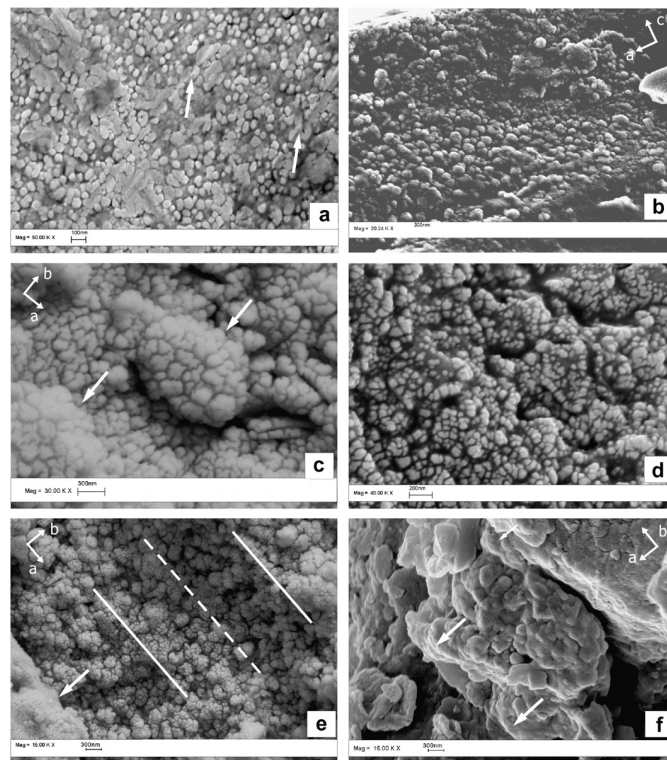


Figure 4. SEM photos of the nano-sized particle layer in shear plane in different rocks, on different scales and for different kinds

图 4. 不同尺度、不同种类岩石剪切面纳米颗粒层的 SEM 照片

- 1) 颗粒化阶段：由于剪切作用，矿物沿晶面、节理面或双晶面滑动、研磨，形成圆度较好的光滑球状纳米颗粒(图 4(a)和图 4(b))；
- 2) 转换阶段：颗粒异化，形态改变，它们之间彼此紧密排列，形成类似于马赛克的纹理(图 4(c)和图 4(d))；
- 3) 团聚阶段：颗粒集中形成 200~400 nm 的颗粒集合体，并呈现出形状和结晶优选取向(图 4(c))；
- 4) 再生阶段：颗粒集合体在剪应力作用下发生塑性变形，然后在不同颗粒的表面再生新的纳米颗粒。

3. 纳米颗粒对断层滑动的影响

对于断层弱化的机制问题，学者们提出了各种观点，包括软弱物质的出现、热加压、熔体润滑和流体增压等。最近，对这一科学问题的创新视野是从纳米颗粒的角度研究断层弱化。多数学者认为，纳米颗粒的出现，尤其是球状纳米颗粒的出现，有助于颗粒发生旋转、滚动，从而润滑断层，显著降低摩擦系数。

Cai 等(2019)通过红河韧性剪切带内的脆性断层和韧性剪切带内的样品观察[7]，结合实验模拟，总结了纳米颗粒对断层弱化及强化的表现。研究发现，纳米颗粒主要呈现两种类型，一种是在脆性断层样品或低温剪切试验样品中，纳米颗粒表现为单个圆状、球状颗粒(图 5(a)和图 5(b))，颗粒未经历变形。而在韧性剪切带内样品或中高温剪切试验样品中，纳米颗粒相互粘结，表现为草莓状、花丛状、蠕虫状、团粒状等集合体为主(图 5(c)~(f))，单个颗粒粒径变大，经历了结晶生长或塑性变形。纳米颗粒的形成经历了矿物颗粒细粒化、摩擦磨削纳米颗粒化以及高温下纳米颗粒结晶粘结团聚化三个阶段(图 6)。

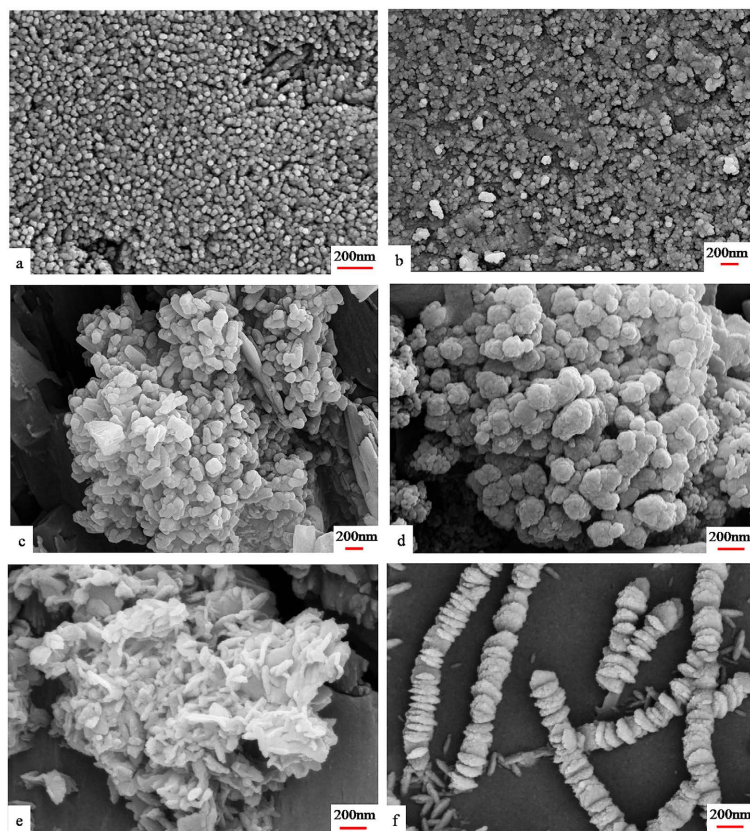


Figure 5. Nanoparticles develop in brittle fault (a-b) and ductile shear zone (c-f)
图 5. 脆性断层(a)~(b)和韧性剪切带内(c)~(f)发育的纳米颗粒

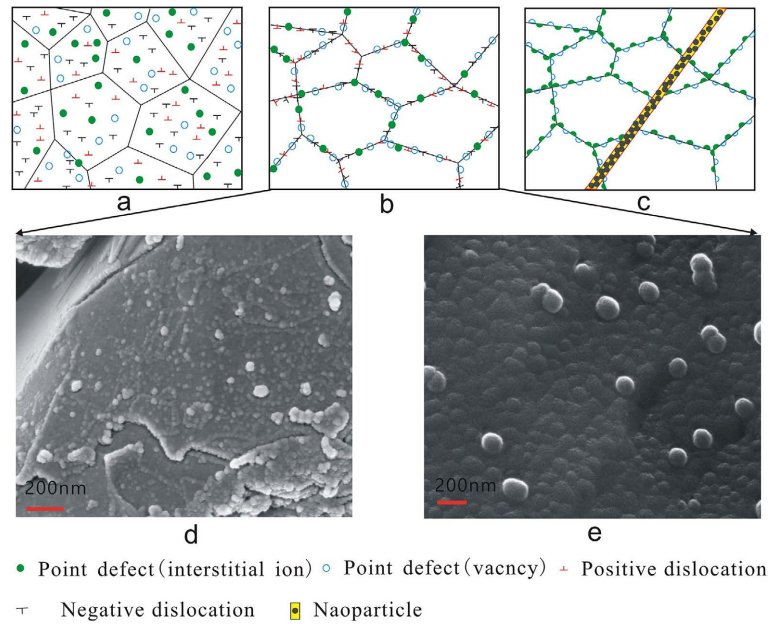


Figure 6. The formation process of nanoparticles after rock fracture
图 6. 岩石破裂后纳米颗粒的形成过程

根据试验温度和颗粒大小演化建立的速率 - 状态相关的摩擦本构方程，断层的形成和演化经历了四个阶段：

- 1) 在强烈剪应变作用下，岩石发生碎裂并产生断层(图 7(a)) [8] [9] [10] [11]，此阶段表现为速度强化行为(图 8 中 I 区) [12]，对应矿物颗粒的细化化；
- 2) 随着矿物研磨形成纳米颗粒，断层产生了润滑效应，摩擦系数下降，加速断层滑动(图 7(b))，表现为速度弱化行为(图 8 中 II 区)； [13]
- 3) 随着断层摩擦导致温度的升高，纳米颗粒生长或粘结成集体，润滑效应消失，摩擦强度增加(图 7(c))，表现为速度强化行为(图 8 中 III 区) [14] [15]；
- 4) 最后，随着摩擦系数的增加，断层趋于缓慢而稳定地滑动(图 7(d))。

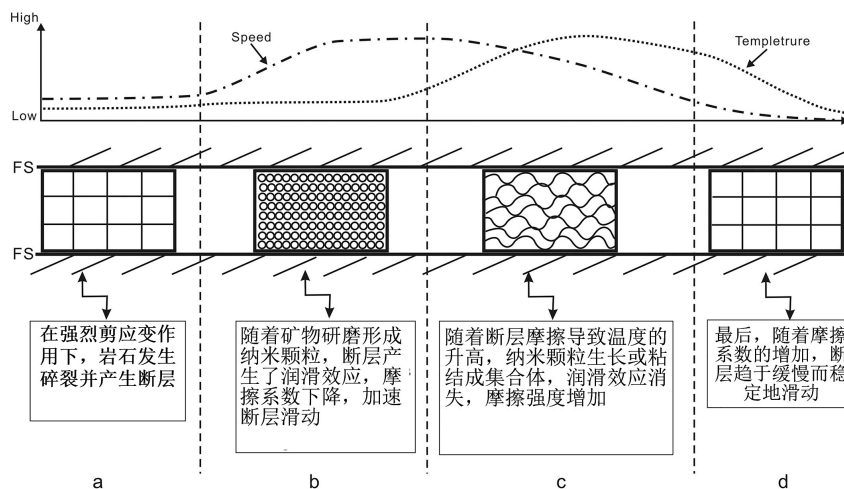


Figure 7. The model of the role of nanoparticles during the process of fault sliding
图 7. 纳米颗粒对断层滑动的影响

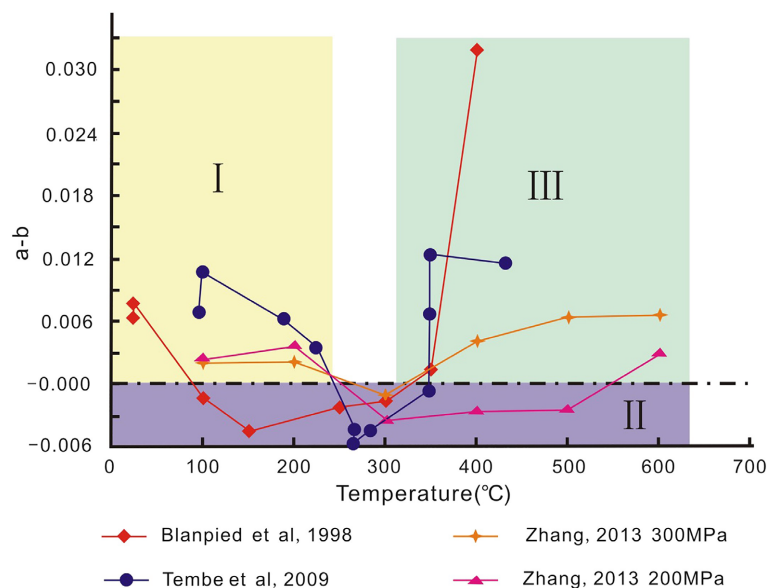


Figure 8. The relationship between the temperature and the velocity dependence of steady state friction

图 8. 温度与速度依赖的稳态摩擦关系图

4. 结论

关于断层面上纳米颗粒的成因，本文对较为主流的热分解作用、冲击加载和亚临界扩展、脆韧性机制、颗粒边界滑移、岩石矿物粉末化作用等观点进行了总结。实际上，还存在位错雪崩、非晶相的结晶作用、快速固结作用和压溶作用等观点，不同的成因机制或与断层原岩的矿物组成有关。此外，关于断层面上纳米颗粒的发育条件，实验模拟结果也是各不相同。有的学者在高温高压的条件下观察到纳米颗粒，有的学者在室温的低应变速率的模拟试验中观察到纳米颗粒，温度或许并非纳米颗粒形成的必要条件，或许不同岩石的矿物组成可能对纳米颗粒的发育更为重要。

从前人的观点来看，纳米颗粒的形成至少应该要经历塑性变形阶段，至于塑性变形的温压条件，针对不同的矿物，尚值得深入研究。同时，断层面上的纳米颗粒为解释断层滑动弱化的行为提供了一种新视野，虽然大多数学者认为纳米颗粒的出现可以对断层产生润滑作用，但在不同条件下的室内模拟试验中，纳米颗粒对断层的润滑作用行为也变现出不一致性，纳米颗粒是否具有润滑作用也强烈地依赖于周围条件。

为此，未来的研究应该集中于不同矿物之间、不同温压条件、不同应变速率之间纳米颗粒形成条件和对断层滑动影响的对比研究，试验选取单一变量，如研究相同温压条件下的同一矿物在不同应变速率影响下纳米颗粒的形成规律及特征，通过试验条件分解以及再综合的过程，进一步了解不同矿物之间纳米颗粒形成的条件和对断层弱化作用的影响。

参考文献

- [1] Han, R., Shimamoto, T., Hirose, T., *et al.* (2007) Ultra-Low Friction of Carbonate Faults Caused by Thermal Decomposition. *Science*, **316**, 65-74. <https://doi.org/10.1126/science.1139763>
- [2] Sammis, C.G. and Ben-Zion, Y. (2008) Mechanics of Grain-Size Reduction in Fault Zones. *Journal of Geophysical Research*, **113**, B02306. <https://doi.org/10.1029/2006JB004892>
- [3] Atkinson, B.K. (1984) Subcritical Crack Growth in Geological Materials. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 4077-4114. <https://doi.org/10.1029/JB089iB06p04077>

-
- [4] Siman-Tov, S., Aharonov, E., Sagy, A., *et al.* (2013) Nanograins Form Carbonate Fault Mirrors. *Geology*, **41**, 703-706. <https://doi.org/10.1130/G34087.1>
- [5] De Paola, N., Holdsworth, R.E., Viti, C., *et al.* (2015) Can Grain Size Sensitive Flow Lubricate Faults during the Initial Stages of Earthquake Propagation? *Earth and Planetary Science Letters*, **431**, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.002>
- [6] Sun, Y., Shu, L.S., Lu, X.C., *et al.* (2008) Recent Progress in Studies on the Nano-Sized Particle Layer in Rock Shear Planes. *Progress in Natural Science*, **18**, 367-373. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2007.12.001>
- [7] Cai, Z.R., Lu, L.J., Huang, Q.T., *et al.* (2019) Formation Conditions for Nanoparticles in a Fault Zone and Their Role in Fault Sliding. *Tectonics*, **38**, 159-175. <https://doi.org/10.1029/2018TC005171>
- [8] De Paola, N., Holdsworth, R.E., Viti, C., Collettini, C. and Bullock, R. (2015) Can Grain Size Sensitive Flow Lubricate Faults during the Initial Stages of Earthquake Propagation? *Earth and Planetary Science Letters*, **431**, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.002>
- [9] Han, R., Hirose, T. and Shimamoto, T. (2010) Strong Velocity Weakening and Powder Lubrication of Simulated Carbonate Faults at Seismic Slip Rates. *Journal of Geophysical Research*, **115**, B03412. <https://doi.org/10.1029/2008JB006136>
- [10] Han, R., Hirose, T., Shimamoto, T., Lee, Y. and Ando, J. (2011) Granular Nanoparticles Lubricate Faults during Seismic Slip. *Geology*, **39**, 599-602. <https://doi.org/10.1130/G31842.1>
- [11] Siman-Tov, S., Aharonov, E., Sagy, A. and Emmanuel, S. (2013) Nanograins Form Carbonate Fault Mirrors. *Geology*, **41**, 703-706. <https://doi.org/10.1130/G34087.1>
- [12] Blanpied, M.L., Marone, C.J., Lockner, D.A., Byerlee, J.D. and King, D.P. (1998) Quantitative Measure of Variation in Fault Rheology Due to Fluid-Rock Interactions. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 9691-9712. <https://doi.org/10.1029/98JB00162>
- [13] He, C., Yao, W., Wang, Z. and Zhou, Y. (2006) Strength and Stability of Frictional Sliding of Gabbro Gouge at Elevated Temperatures. *Tectonophysics*, **427**, 217-229. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.023>
- [14] Tembe, S., Lockner, D. and Wong, T.-F. (2009) Constraints on the Stress State of the San Andreas Fault with Analysis Based on Core and Cuttings from San Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD) Drilling Phases 1 and 2. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B11401. <https://doi.org/10.1029/2008JB005883>
- [15] Zhang, L. (2013) An Experimental Study on Frictional Sliding of Fault Rocks from Longmenshan Fault Zone under Hydrothermal Conditions. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing. (In Chinese)