https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.411

红河断裂韧性剪切带内纳米颗粒的形态及其构造意义

蔡周荣[1,2,3],向俊洋[1,2,3],黄强太[1,2,3*],李建峰[4],卢丽娟[1,2,3]

1.中山大学海洋科学学院,广东广州 510275
2.中山大学海洋石油勘探开发广东高校重点实验室,广东广州 510006
3.广东省海洋资源与近岸工程重点实验室,广东广州 510006
4.中国科学院广州地球化学研究所,广东广州 510640

摘要: 纳米颗粒被发现广泛发育于韧性剪切带内,其发育特征与断层的剪切活动密切相关.为了解红河断裂韧性剪切带内纳米颗粒的发育特征,探讨其形成规律及与红河断裂活动性的关系,我们在不同的区段3次穿越红河韧性剪切带,采集了韧性剪切带内糜棱岩、片麻岩和片岩等近百块样品进行扫描电镜(SEM)的观察,通过对纳米颗粒的统计和分析,在样品中发现了具球粒状形貌特征的纳米单体,这些单体呈分散状分布于岩石表面,同时还发现了多达12种纳米颗粒聚集体,不同的聚集体在形貌特征以及发育阶段上都有着明显的差异,反映了红河断裂带剪切活动过程中不同位置经历不同的构造应力、温度和压力条件.

关键词: 红河断裂;韧性剪切带;纳米颗粒;聚集体;构造意义;构造地质.

中图分类号: P54 **文章编号:** 1000-2383(2018)05-1524-08 **收稿日期:** 2017-10-01

The Morphology of Nanoparticles in the Ductile Shear Zone of Red River Fault and Its Tectonic Significance

Cai Zhourong[1,2,3], Xiang Junyang[1,2,3], Huang Qiangtai[1,2,3*], Li Jianfeng[4], Lu Lijuan[1,2,3]

1.*School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou* 510275, *China*
2.*Guangdong University Key Laboratory of Offshore Oil Exploration and Development, Sun Yat-Sen University, Guangzhou* 510006, *China*
3.*Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Guangzhou* 510006, *China*
4.*Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*

Abstract: Nanoparticles are widely found in the ductile shear zone, and their development characteristics are closely related to the fault shear deformation. To better understand the morphological characteristics of nanoparticles in the ductile shear zone of Red River Fault, the formation law and the relationship with Red River fault activity, we have traversed the ductile shear zone of Red River Fault three times in different sections, collecting almost 100 samples including mylonite, gneiss and schist. One type of nano monomers was found by the scanning electron microscopy (SEM), which show unique morphology features, including spherulitic monomer. These monomers are scattered over the mineral surface. At the same time, twelve kinds of nanoparticles aggregations were found, with different aggregations showing obvious differences in their morphology features and development stages, reflecting different tectonic stress, temperature and pressure conditions that different areas have experienced in the shear process of the ductile shear zone of Red River Fault.

Key words: Red River Fault; ductile shear zone; nanoparticles; aggregation; tectonic significance; tectonic geology.

基金项目: 广东省自然基金项目(No.2015A030313157);国家自然科学基金项目(No.41206035).
作者简介: 蔡周荣(1979-),男,广东信宜人,副教授,主要从事构造地质研究.ORCID: 0000-0002-2033-9525. E-mail: caizhr@mail.sysu.edu.cn
* **通讯作者:** 黄强太,E-mail: Huangqiangtai@qq.com

引用格式: 蔡周荣,向俊洋,黄强太,等,2018.红河断裂韧性剪切带内纳米颗粒的形态及其构造意义.地球科学,43(5): 1524-1531.

近几年，纳米科技在地球科学领域掀起了一场变革，形成了一门新的学科——纳米地球科学，为研究解决地球科学问题提供了新思路（琚宜文等，2016）.纳米颗粒是指粒径小于 100 nm 的颗粒，多呈球状、棒状等形貌，纳米颗粒之间的有序聚集会在空间上形成形态多样的聚集体.20 世纪 90 年代，纳米颗粒首次被发现存在于断裂带内或韧性剪切带内，引起了构造地质学家的兴趣（Chester *et al*.，1993；陈敬中，1994；Wibberley and Shimamoto，2003），目前普遍认为这些纳米颗粒的发育与断层活动以及地震的发震机制有密切关系（Sammis and Ben-Zion，2008；de Paola *et al*.，2015）. Han *et al*.（2007，2010）研究认为断层的高速滑移会导致滑动区域的迅速增温，与此同时会产生纳米颗粒，而纳米颗粒在断层的滑移过程中能起到润滑剂的作用，使得断层摩擦系数大大降低，从而推动了断层两盘的运动；Siman-Tov *et al*.（2013）观察到沿死海转换带发育的碳酸岩断层镜面被一层粒径小于 1 mm 的纳米颗粒覆盖，并用“塑性－脆性”变形解释这些纳米颗粒的形成机制，认为方解石的双晶塑性变形形成了纳米尺寸的晶束，而后经过脆性变形形成纳米颗粒；de Paola *et al*.（2015）通过位移控制实验进一步表明断层内的纳米颗粒在地震初始阶段能起自润滑作用，使断层两盘的摩擦系数迅速降低.以上这些成果表明断层带内发育的纳米颗粒蕴藏着断层活动的重要信息，但其形成机理及其与断层、地震活动的关系还需要进一步深入研究.

断层带内纳米颗粒的形成过程及发育形态可能与断层剪切摩擦、压力、温度以及相关岩石力学性质等多种因素有关，反过来我们也可以通过对这些纳米颗粒形态的分析，恢复断层活动时的古温压环境.目前国内一些学者在华南武功山、龙门山断裂以及郯庐断裂带等断层或韧性剪切带内都发现了大量纳米颗粒，并对这些纳米颗粒的形态特征及其形成机理进行了研究和探讨（刘德良等，2004；孙岩等，2005，2016；刘浩等，2009；晁洪太等，2009，2016；袁仁茂等，2014；王焰新和田熙科，2016）.红河断裂带是位于印支和扬子地块之间的一条大型走滑断裂，该断裂带形成于古生代之前，构造活动强烈，断层活动具有多期性，断裂带内发育着典型的韧性剪切带，具备着形成纳米颗粒的条件.为系统总结断裂带内纳米颗粒的形态、类型和分布规律，本文选择红河断裂韧性剪切带为研究对象，通过在不同区段穿越 3 条剖面，采集近百块韧性剪切带内糜棱岩、片麻岩和片岩标本，对这些样品进行扫描电镜分析，观察其纳米颗粒发育特征，对其单体和聚集体的形貌特征进行了分类总结，并探讨了纳米颗粒不同形貌特征代表的温压环境，为研究红河断裂的活动构造提供新参考依据.

1　地质概况

红河断裂带展布于我国西南部，始于洱源，经过大理、红河，一直向东南方向延伸入海，在陆区的长度达上千公里，是扬子地块与印支地块间的分界断裂，构造活动复杂，有明显的新构造特征（胥颐等，2003）.新生代以来，红河断裂带经历了早期（古近纪）的大型左旋走滑运动和后期（新近纪以来）的右旋走滑运动（向宏发等，2004a，2004b），断裂带宽 30～60 km，普遍经历了变形变质作用，发育有糜棱岩、碎裂岩等，是一条典型的韧性剪切带.红河断裂带的构造性质在不同的区域内有明显的差异性（Scharer *et al*.，1994；Rangin *et al*.，1995），根据其运动性质可以将红河断裂分为北、中、南 3 段.北段自洱源至弥渡一带，由一系列大致平行呈面状展布的次级断裂构成，形成非常复杂的几何结构形态和典型的盆岭相间的构造地貌格局，以引张－剪切运动为特征，是走滑型断裂的尾端拉张区；中段自弥渡至元江，由结构比较简单的 2 条主干断裂组成，即东北边的红河断裂以及西南边的哀牢山断裂，中间仅有小规模的其他方向的断层与之交切，形成狭长条状线性断层谷地构造地貌，是以水平运动为特征的剪切段；南段自元江至河口，总体由规模相当、相距数百至1 500 m 且大致平行的次级断裂构成，其走向较之北段和中段发生了显著变化，由 NW 向逐渐转为 NWW 向，使得整个红河断裂带在平面形态上呈向西凸出的弧形（图 1）.中高温测年资料以及热史演化研究表明红河断裂带 SE 端与 NW 端皆经历 2 期冷却过程，SE 端与 NW 端分别于 32～30 Ma、32～22 Ma 经历第 1 期冷却过程（冷却速率约 90 ℃/Ma），在 26～24 Ma、22～20 Ma 分别经历第 2 期冷却过程，后者由于断裂活动减弱致使冷却速率明显增大，这两个阶段间的过渡段冷却缓慢的原因可能是由于该时段内周围地质体岩浆活动引发"供热"增加所致（宫伟和姜效典，2017）.前人依据断裂带中的断层泥及与断裂活动密切相关的构造岩进行磷灰石裂变径迹热年代学研究，得到 1.5～5.5 Ma 的年龄数据，认为红河断裂右行走滑强烈活动开始

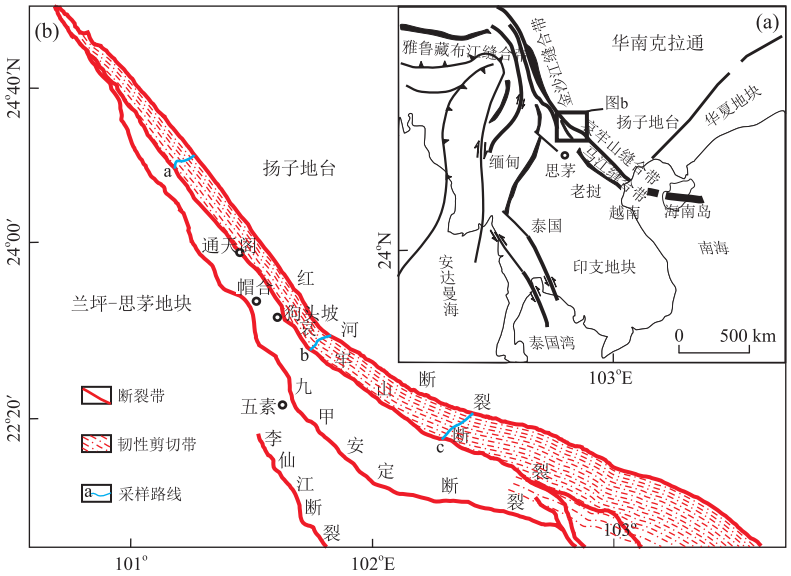

图 1　研究区构造位置图

Fig.1　Geological map of the study area

于5 Ma左右(Leloup *et al*., 1995;陈文寄等,1996;万景林等,1997).

2　样品采集与观察

本文的采样路线有 3 条(图 1),分别位于红河断裂带的北、中段,在建新、大理、元江 3 个位置横穿了整个韧性剪切带,并根据断裂的发育情况在这 3 条路线上设置了 30 余个采样点,采集了大量的岩石样品.韧性剪切带靠近两侧主断裂带主要以糜棱岩为主,中部发育糜棱岩、片岩或片麻岩以及混杂岩,显微镜下观察表明大部分岩石样品经历了变形和变质作用(图 2).

扫描电镜实验于华南师范大学实验中心完成.在观察之前,先将野外采回的样品凿成大小约 5 mm×5 mm 的薄片状,用导电胶将样品固定在样品台上(这一过程要保证样品表面裸露且平行于样品台),然后用型号为 Q150TES 的喷金仪器对样品观测面进行喷金,电流设定为 20 mA,时间为 140 s,以增强样品导电性,提高观测效果.实验观察的扫描电镜型号为 ZEISS Ultra 55,探头(det)型号为 TLD,加速电压(HV)一般设置为 15.00 kV.在用扫描电镜的同时,针对兴趣点用配套的能谱仪(仪器型号 OXFORD Inca Energy X-Max50 mm2)对其成分进行定量、半定量分析.

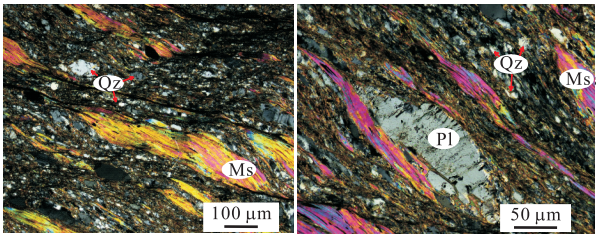

图 2　糜棱岩样品在正交偏光镜下变形变质特征

Fig.2　The deformation and metamorphic characteristics of mylonite samples under orthogonal polarizer

Qz.石英;Ms.白云母;Pl.斜长石.两图可见云母和长石受剪切作用被拉长弯曲变形,基质为重结晶石英

3　红河断裂带内纳米颗粒形态

通过对所采集到的 30 余组样品进行扫描电镜观察,发现红河断裂剪切带内的纳米颗粒形态多样,在不同样品中所观察到的岩石纳米颗粒呈现不同的形貌特征,有时甚至在同一样品中能观察到多种形态的纳米颗粒聚集体.对这些纳米颗粒形态特征进行分类总结后发现,红河断裂韧性剪切带的纳米颗粒可分为单体和聚集体(也称复体)两大类型.

单体纳米颗粒呈分散状排布,呈球粒状(图 3),圆度较好,几乎未发生过形变的纳米单体,粒径较均匀,一般小于 30 nm(图 4a).单体在空间上有序排布或集合在一起,岩石表面上形成了形态多样的纳米颗粒聚集体,我们对红河韧性剪切带内纳米颗粒的聚集体形态进行了统计和分析,共得到如下12种

表 1　红河断裂韧性剪切带纳米颗粒的聚集形态

Table 1　The aggregation morphology of nanoparticles within the ductile shear zone of Red River Fault

聚集形态	大小	发育阶段	能否观察到纳米单体	定向性
球粒状聚集体	单体约 20 nm	粒化阶段	能	几乎无定向
珊瑚状聚集体	约 200 nm	团聚阶段	能	几乎无定向
草莓状聚集体	直径约 200 nm	团聚阶段	能	几乎无定向
花状聚集体	单体约 30 nm,聚体约 500 nm 左右	团聚阶段	能	几乎无定向
铜钱状聚集体	长约 200 nm	团聚阶段	能	有一定定向性
棒状聚集体	宽 200 nm,厚约 20 nm	团聚阶段	能	有一定定向性
放射球状聚集体	直径可达几个微米	团聚阶段	能	几乎无定向呈放射状发散
黏块状聚集体	单个聚集体约 200 nm	再生阶段	不能	几乎无定向
片状聚集体	长 200～300 nm,厚约 20 nm	再生阶段	不能	几乎无定向
膜状聚集体(单体不可见)	厚约 20 nm,宽可达几个微米	再生阶段	不能	几乎无定向
膜状聚集体(单体可见)	厚约 20 nm,宽可达几个微米	团聚阶段	能	几乎无定向
聚集体共生	直径可达几个微米	再生阶段	能	几乎无定向

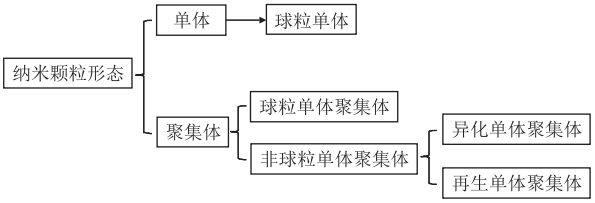

图 3　红河断裂带纳米颗粒的形态类型

Fig.3　The morphotype of nanoparticles within the ductile shear zone of Red River Fault

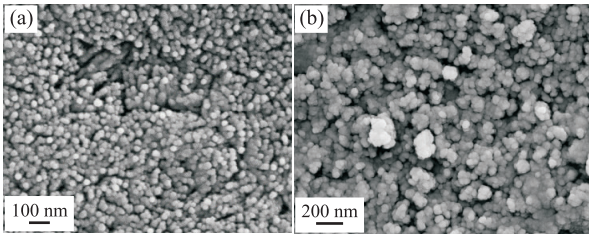

图 4　红河断裂带纳米颗粒的单体形态特征

Fig. 4　The morphological characteristics of nanoparticles within the ductile shear zone of Red River Fault

图 4a 和 4b 的采样点位置见图 6,其中 b 样中球粒状单体之间已经呈弱的粘连特征

类型(表 1).

球粒状聚集体(图 5a)、珊瑚状聚集体(图 5b)、草莓状聚集体(图 5c)以及可见单体的膜状聚集体(图 5k)这 4 种聚集体,是由球状单体在空间上按照不同规律团聚而形成的.其中球粒状聚集体(图 5a)与可见单体的膜状聚集体(图 5k)都是由球状单体直接堆积而成,其中球粒状聚集体的单体排布较为松散发育无定向性且未观察到有明显的生长规律,而膜状聚集体(单体可见)中单体的密度更大且排布十分紧密,有沿岩石表面继续发育扩张的趋势.而珊瑚状聚集体(图 5b)、草莓状聚集体(图 5c)的共同点在于,他们都是由球状单体先在空间上形成小的团聚体,再通过团聚体间的相互组合形成聚集体.通过对能谱图的分析,发现这两种聚集体在元素上的差异并不大,其主要组成元素都是 O、C、Si、Al,但这两种聚集体在形态上的差异却十分明显,草莓状聚集体在空间上主要呈横向发育并且小的草莓状团聚体相互之间会继续结合形成更大的团聚体,但草莓状的形状会被保留下来,而珊瑚状聚集体的发育方向是多向的,以发散的方式向四周生长且小的团聚体之间结合紧密排列有序,最终形成类似珊瑚骨架的大型聚集体(整个聚集体大小可达一个微米).

构成花状聚集体(图 5d)、放射球状聚集体(图 5g)、铜钱状聚集体(图 5e)、棒状聚集体(图 5f)的单体都是非球状单体,在这些聚集体中能清楚地观察到形态各异的非球状单体,如薄片状(花状聚集体、铜钱状聚集体)、针状(放射球状)以及棒状等.与球状单体相比异化后的单体体积要大很多,花状聚集体中的单体厚度约 10 nm 而长和宽都可达到几十个纳米,棒状聚集体和放射球状聚集体中的单体长度甚至可达 100 nm 以上.我们所观察到的异化后单体都是由球状单体转变而成,圆度较好的球状单体在外力的作用下被压扁或拉伸,最终形成形态各异的异化单体.与球状单体所形成的聚集体相比,异化后单体形成的聚集体在空间上的排布规律性并不强,生长较为自由但具有一定的定向性,聚集体在空间中的形态特征能在一定程度上反映其形成时所受的应力方向,如放射针状聚集体和棒状聚集体.

不同于前文所提到几种聚集体,在黏块状聚集体(图 5h)、片状聚集体(图 5i)以及膜状聚集体(单体不可见)(图 5j)中几乎观察不到形态完整的纳米单体,纳米单体在这些聚集体中几乎完全熔融,只能

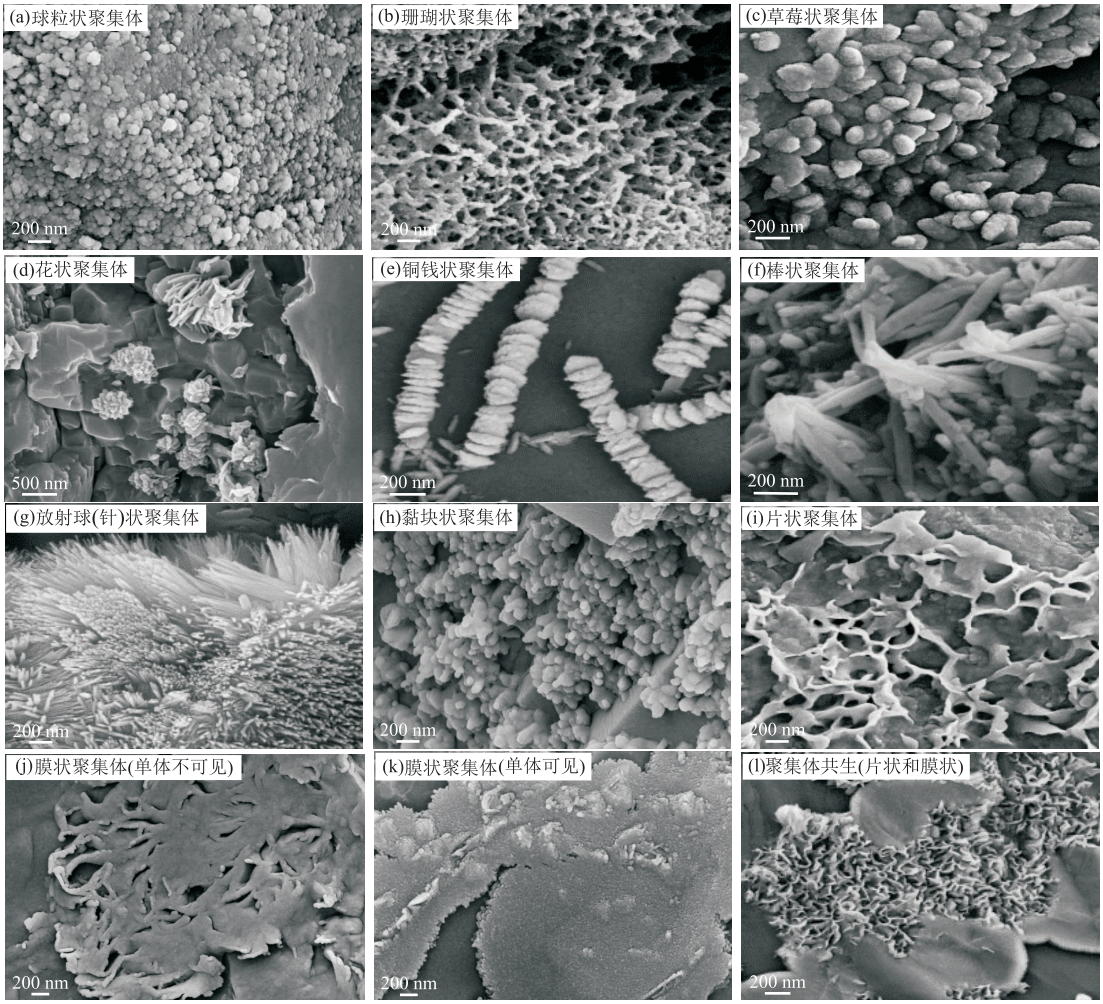

图 5 红河断裂韧性剪切带纳米颗粒的聚集形态

Fig.5 The aggregation morphology of nanoparticles within the ductile shear zone of Red River Fault

图 5a～5l 的采样点位置见图 6

在聚集体边缘观察到一些正处于熔融过程中的纳米单体.其中黏块状聚集体的熔融规模较小,形成直径约在 200 nm 左右的块状聚集体,同一区域内多个小的块状聚集体最终聚集形成我们观察到的黏块状聚集体.而片状和膜状聚集体的熔融范围则大很多,形成的聚集体大小可达几微米,并有沿矿物表面继续生长的趋势.我们认为单纯在外界应力的作用下,纳米颗粒不会发生熔融,也很难形成规模如此大的聚集体,所以这类聚集体在发育过程中一定还受到其他因素的影响.在断层的滑动过程中,摩擦会产生大量的热量,不少研究者指出,薄弱带(断层宽度≤几厘米)一次大的位移事件(位移≈几米),假设断层摩擦力达到 130 MPa,可能使摩擦温度升高约 1 000 ℃.红河断裂带纳米颗粒的主要元素为 O、C、Si、Al 4 种,以硅酸盐矿物为主,含有少量碳酸盐矿物,这一类矿物熔点都不是很高,因此摩擦而导致的温度升高,可能让已形成的纳米颗粒发生熔融而破坏其原有的形态结构,并形成新聚集体.通过电镜观察我们发现,有的区域内存在两种聚集体共生的情况,如图 5l 中膜状聚集体和放射针状聚集体共存且二者紧密结合无明显的边界,这可能是高温下原有的膜状、放射针聚集体形态结构被破坏并向新的聚集体演化的过程结果.

另外,在上述观察到的多种纳米颗粒形貌中,南京大学的边立曾教授认为有些可能是一些菌类纳米微生物附在岩石表面,如图 5e 中铜钱状聚集体,如果真的如此,那么这类型的纳米颗粒就是后期生物作用形成的,与岩石的变形和温压环境无关.由于取样和制样困难,目前还无法通过透射电镜进行确定,这些问题还有待进一步的深入研究.

4　纳米颗粒的构造意义

红河断裂带是世界上著名的走滑剪切断裂,断裂带内发育着典型的韧性剪切带,本文通过穿越断裂带内不同区段(图 6),对该韧性剪切带不同位置进行采样分析,在近百个样品的扫描电镜下进行纳米颗粒形态观察,分类总结得到 3 类纳米单体以及 12 种聚集体,可能代表了典型韧性剪切带内纳米颗粒的形貌特征,同时也可能涵盖了纳米颗粒发育的 4 个阶段:粒化阶段、异化阶段、团聚阶段、再生阶段(孙岩等,2003).这些纳米颗粒单体和聚集体的形貌特征为今后断裂韧性剪切带的纳米级构造分析提供了参考依据.

本文通过对岩石采样点的分析,发现球粒单体纳米颗粒主要分布于靠近主断层位置,而其他形态单体或聚集体主要分布于韧性剪切带的中间部位(图 5),这种分布规律与断裂的构造活动有关.断裂带内纳米颗粒是岩石在高压剪切破裂作用下的产物,实验表明岩石在常温高压剪切破裂过程中可以形成纳米颗粒,这种条件下形成的纳米颗粒具有脆性、球粒状特征,呈分散排布,对应于我们在红河断裂带内观察到的球粒单体.而纳米颗粒对温度比较敏感,超过一定温度时,纳米颗粒会慢慢生成,其性质也跟着发生改变,由脆性变为塑性,由球粒状变成各种形态,由单体发生变异或生长变为聚集体,对应于我们在红河断裂带内观察到的非球粒单体以及各种形态聚集体.如果长时间处于高温环境,纳米颗粒则会继续生长或重结晶,直至消失.红河断裂带在其形成之后,经历了多期次强烈的剪切活动,每次强烈的活动断裂带内岩石会因高压剪切破裂而产生纳米颗粒,同时断层摩擦而产生大量的热量,会导致温度的升高,当岩石表面温度达到临界值时,纳米颗粒就会开始熔融并破坏其原有的形态结构形成新的聚集体,在此类聚集体中一般无法观察到单个的纳米颗粒.如果高温持续时间较长,则纳米颗粒会继续生长或重结晶而消失.

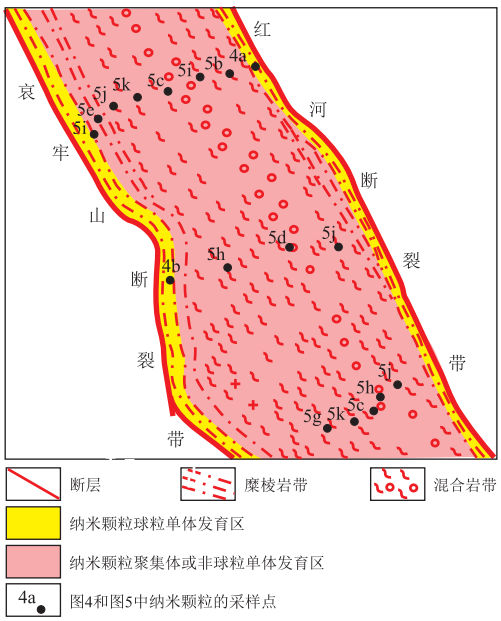

图 6　不同类型纳米颗粒在断裂带内的分布示意

Fig.6　Distribution of different types of nanoparticles in the fault zone

我们现在能观察到的纳米颗粒的形成原因可分为 2 类,断裂带中间的纳米颗粒聚集体或非球粒单体可能是红河断裂带最后一次强烈活动的产物,刚开始岩石由于高压剪切破裂而形成球粒单体,然后这些单体由于断裂带摩擦生热而形成聚集体或非球粒单体,现在能保存下来的可能仅是小部分,更多可能由于继续生长或重结晶而消失.靠近主断层部位形成的纳米颗粒球粒单体可能是红河断裂带较弱剪切活动的产物,岩石由于高压剪切破裂而形成球粒单体,由于断层活动性弱,走滑位移量小而无摩擦生热或生热少,无法使纳米颗粒继续生长团聚或变异,这些球粒单体得以保存.

从以上分析可知,断裂带内纳米颗粒的发育形态对断裂的活动性有重要的指示意义,纳米颗粒聚集体或非球粒单体指示着断层最后一次强烈活动,而球粒单体则指示断层的弱活动性.不同的纳米颗粒聚集体是否代表着不同的形成温度,能否通过纳米颗粒的形貌特征去恢复断裂带活动时不同部位的温度范围?这个科学问题非常值得下一步深入的研究,或许在不久的将来,随着测试技术的进步以及研究的深入开展,纳米颗粒会成为一种研究断裂活动的地质温度计——纳米地质温度计.

5　结论与认识

通过扫描电镜观察,在红河断裂韧性剪切带的样品中发现了形态各异的纳米颗粒,进一步分类总结,识别出一种纳米颗粒单体以及 12 种纳米颗粒聚集体,这些单体或聚集体代表了纳米颗粒的不同发育阶段,同时了反映了形成时不同的温度和压力条件.

纳米颗粒的形貌特征对研究断裂活动有重要的指示意义.现今保存下来的球粒单体代表着较弱的断裂活动,而聚集体或非球粒单体则可能是最后一

次断裂强烈活动的产物.纳米颗粒对温度反应很敏感,不同的聚集体形貌可能代表着断层摩擦生热形成的不同温度范围,纳米地质温度计未来可能会成为揭示断裂活动的重要参数.

致谢:感谢南京大学孙岩教授和边立曾教授在成文过程中的悉心指导,感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改建议和意见!

References

Chao, H.T., Sun, Y., Wang, Z.C., et al., 2009. A Case of Nano-seismic Observations of Seismogenic Fractures. *Progress in Natural Science*, 19(10): 1076-1081 (in Chinese).

Chao, H. T., Sun, Y., Wang, Z. C., et al., 2016. Observations and Analyses of Nano/Micro-Structures of Coseismic Stick Slipping and Aseismic Creep Slipping Faults. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(1): 37-42 (in Chinese with English abstract).

Chen, J.Z., 1994. Nanotechnology Development and Nanomineralogy Research. *Geological Science and Technology Information*, 13(2): 32-38 (in Chinese with English abstract).

Chen, W. J., Li, Q., Wang, Y. P., 1996. Miocene Diachronic Uplift Ailao Mountains-Red River Left-Lateral Strike-Slip Shear Zone. *Geology Review*, 42(5): 385-390 (in Chinese with English abstract).

Chester, F.M., Evans, J.P., Biegel, R.L., 1993. Internal Structure and Weakening Mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 98(B1): 771-786. https://doi.org/10.1029/92JB01866

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.

Gong, W., Jiang, X.D., 2017. Thermal Evolution History and Its Genesis of the Ailao Shan-Red River Fault Zone in the Ailao Shan and Day Nui Con Voi Massif during Oligocene-Early Miocene. *Earth Science*, 42(2): 223-239 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.017

Han, R., Hirose, T., Shimamoto, T., 2010. Strong Velocity Weakening and Powder Lu-Brication of Simulated Carbonate Faults at Seismic Slip Rates. *Journal of Geophys Research*, 115: B03412. http://doi.org/10.1029/2008JB006136.

Han, R., Shimamoto, T., Hirose, T., et al., 2007. Ultra-Low Friction of Carbonate Faults Caused by Thermal Decomposition. *Science*, 316: 878-881. https://doi.org/10.1126/science.1139763

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).

Leloup, H.P., Lacassin, R., Tapponnier, P., et al., 1995. The Ailao Shan-Red River Shear Zone (Yunnan, China), Tertiary Transform Boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3-84.

Liu, D. L., Yang, Q., Li, W. Y., et al., 2004. A Discovery of Nanometer-Grade Grain in the Mylonite of Ductile Fracture in the South of Tancheng-Lujian Fracture Zone. *Science Technology and Engineering*, 4(1): 42-43 (in Chinese with English abstract).

Liu, H., Sun, Y., Shu, L.S., et al., 2009. Nano-Scaled Study on the Ductile Shear Zone in Wugongshan, South China. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 609-616 (in Chinese with English abstract).

Rangin, C., Klein, M., Roques, D., et al., 1995. The Red River Fault System in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, 243(3-4): 209-222.

Sammis, C. G., Ben-Zion, Y., 2008. Mechanics of Grain-Size Reduction in Fault Zones. *Journal of Geophysic Research*, 113: B02306. https:// doi. org/10. 1029/2006JB004892

Scharer, U., Zhang, L. S., Tapponnier, P., 1994. Duration of Strike-Slip Movement in Large Shear Zones: The Red River Belt, China. *Earth Planet Science Letters*, 126: 379-397.

Siman-Tov, S., Aharonov, E., Sagy, A., et al., 2013. Nanograins Form Carbonate Fault Mirrors. *Geology*, 41(6): 703-706.

Sun, Y., Ge, H.P., Lu, X.C., et al., 2003. Discovery and Analysis of Ultrafine Abrasive Grain Structure in Slip-Glide Shear Blades. *Science China Earth Sciences*, 33(7): 619-625 (in Chinese).

Sun, Y., Ju, Y.W., Lu, X.C., et al., 2016. To Re-Recognize Deformable Geological Bodies on the Nano-Level. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(1): 52-55 (in Chinese with English abstract).

Sun, Y., Lu, X.C., Liu, D.L., et al., 2005. Discovery, Nomenclature of the Centimeter Scale Grinding Gravels and the Nanometer Scale Grinding Grains in Fault Shearing Zones and the Significance for Oil-Gas Geology. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 521-526 (in Chinese with English abstract).

Wan, J. L., Li, Q., Chen, W. J., 1997. Fission Track Evidence of Diachronic Uplift alone the Ailao-Red River Left-Lateral Strike-Slip Shear Zone. *Seismology and Geolo-*

gy，19(1)：87－90 (in Chinese with English abstract).

Wang，Y. X.，Tian，X. K.，2016. New Opportunities for the Study of Geology：Nano Geology. *Bulletin of Mineralogy，Petrology and Geochemistry*，35(1)：79－86 (in Chinese with English abstract).

Wibberley，C. A. J.，Shimamoto，T.，2003，Internal Structure and Permeability of Major Strike-Slip Fault Zones：The Median Tectonic Line in Mie Prefecture，Southwest Japan. *Journal of Structural Geology*，25：59－78. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00014-7

Xiang，H.F.，Han，Z.J.，Guo，S.M.，et al.，2004a. Large-Scale Dextral Strike-Slip Movement and Asociated Tectonic Deformation along the Red-River Fault Zone. *Seismology and Geology*，26(4)：598－610 (in Chinese with English abstract).

Xiang，H.F.，Han，Z.J.，Guo，S.M.，et al.，2004b. Processing About Quantitative Study of Large-Scale Strike-Slip Movement on Red River Fault Zone. *Advance in Earth Sciences*，19(Suppl.)：56－59 (in Chinese with English abstract).

Xu，Y.，Liu，J.F.，Liu，F.T.，et al.，2003. The Crust-Upper Mantle Structure of Ailaoshan-Red River Fault Zone and Its Adjacent Area. *Science China Earth Sciences*，33(12)：1201－1208 (in Chinese).

Yuan，R.M.，Zhang.B.L.，Xu，X.W.，et al.，2014. The Characteristics，Formation Mechanism and Seismic Significance of Micro-Nanometer Particles in the Shearing Surface of Wenchuan Earthquake. *Science China Earth Sciences*，44(8)：1821－1832 (in Chinese).

附中文参考文献

晁洪太，孙岩，王志才，等，2009.发震断裂的纳米级运动学观测一例.自然科学进展，19(10)：1076－1081.

晁洪太，孙岩，王志才，等，2016.同震和无震剪切滑移作用的纳微米级构造观察与分析.矿物岩石地球化学通报，35(1)：37－42.

陈敬中，1994.纳米科技的发展与纳米矿物学研究.地质科技情报，13(2)：32－38.

陈文寄，李齐，汪一鹏，1996.哀牢山－红河左旋走滑剪切带中新世抬升的时间序列.地质论评，42(5)：385－390.

宫伟，姜效典，2017.哀牢山－红河断裂带－大象山段渐新世－早中新世热史演化及成因.地球科学，42(2)：223－239.

琚宜文，孙岩，万泉，等，2016.纳米地质学：地学领域革命性挑战.矿物岩石地球化学通报，35(1)：1－20.

刘德良，杨强，李王晔，等，2004.郯庐断裂南段韧性剪切带糜棱岩中纳米级颗粒的发现.科学技术与工程，4(1)：42－43.

刘浩，孙岩，舒良树，等，2009.华南武功山地区韧性剪切带的纳米尺度测量研究.地质学报，83(5)：609－616.

孙岩，葛和平，陆现彩，等，2003.韧脆性剪切带滑移叶片中超微磨粒构造的发现和分析.中国科学：地球科学，33(7)：619－625.

孙岩，琚宜文，陆现彩，等，2016.从纳米层次重新认识变形的地质体.矿物岩石地球化学通报，35(1)：52－55.

孙岩，陆现彩，刘德良，等，2005.断裂剪切带厘米级磨砾和纳米级磨粒的发现、命名及其油气地质意义.高校地质学报，11(4)：521－526.

万景林，李齐，陈文寄，1997.哀牢山－红河左旋走滑剪切带构造抬升时间序列的裂变径迹证据.地震地质，19(1)：87－90.

王焰新，田熙科，2016.地学研究的新机遇——纳米地质学.矿物岩石地球化学通报，35(1)：79－86.

向宏发，韩竹军，虢顺民，等，2004a.红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形.地震地质，26(4)：598－610.

向宏发，韩竹军，虢顺民，等，2004b.红河断裂带大型右旋走滑运动定量研究的若干问题.地球科学进展，19(增刊)：56－59.

胥颐，刘建华，刘福田，等，2003.哀牢山－红河断裂带及其邻区的地壳上地幔结构.中国科学：地球科学，33(12)：1201－1208.

袁仁茂，张秉良，徐锡伟，等，2014.汶川地震剪切滑动面微－纳米级颗粒的特征、形成机制及地震意义.中国科学：地球科学，44(8)：1821－1832.