

大别山造山带的糜棱岩

徐树桐¹, 吴维平¹, 刘贻灿², 陆益群¹, 汪德华¹

(1. 安徽省地质科学研究所, 安徽 合肥 230001; 2. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 变质作用是糜棱岩的主要形成机制和鉴别标志。大别山糜棱岩是在变质作用条件下形成的与断层(或剪切带)有关的岩石, 可分为绿片岩相、角闪岩相、麻粒岩相和榴辉岩相糜棱岩。大别山糜棱岩的主要鉴别标志是相应变质相标志矿物的(韧性)塑性变形或晶内变形, 这与以往关于糜棱岩的定义有明显不同。大别山高压(超高压带)内的各类糜棱岩的形成时代与同相母岩峰期变质作用大致同期或略晚, 从老到新的顺序是: 榴辉岩相糜棱岩→麻粒岩相糜棱岩→角闪岩相糜棱岩→绿片岩相糜棱岩。根据需要, 大别山的糜棱岩可按岩性和结构做次级和更次级的分类。早期形成的榴辉岩相和麻粒岩相糜棱岩常常受到晚期角闪岩相糜棱岩和/或绿片岩相糜棱岩的叠加而成残留体, 并使大部分被改造成为晚期糜棱岩的外貌。大别山南部和北部低级变质岩内只有角闪岩相和绿片岩相糜棱岩, 形成时代从古生代到三叠纪。

关键词: 大别造山带, 糜棱岩, 变质相, 韧性变形, 简单剪切应变

中图分类号: P588.33+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)04-0625-12

Mylonites in the Dabie Mountain orogen

XU Shu-tong¹, WU Wei-ping¹, LIU Yi-can², LU Yi-qun¹ and WANG De-hua¹

(1. Anhui Institute of Geology, Hefei 230001, China; 2. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Mylonites in the Dabie orogen are fault and shear zone related rocks formed under metamorphic conditions. They can be divided into greenschist, amphibolite, granulite, and eclogite facies mylonites. The main criterion for identifying the mylonites in the Dabie Mountain is the ductile (plastic) deformation of index minerals of the constituent metamorphic facies. This is clearly different from the former definition and description of mylonite. Formation epoch of the mylonites in the Dabie Mountain was approximately the same as (or a little later than) that of peak metamorphism of their host rocks. From older to younger, the series follows the order eclogite facies mylonite→granulite facies mylonite→amphibolite facies mylonite→greenschist facies mylonite. According to lithology and texture, the mylonites can be further divided into second and third subclasses if necessary. Former mylonites of eclogite and granulite facies are always superimposed by the later facies and show the appearance of amphibolite or even greenschist facies mylonites; the earlier formed mylonites are thus preserved as relics in their retrograded products. Mylonites in the low-grade metamorphic rocks in southern and northern Dabie Mountain only experienced the metamorphic history of greenschist and amphibolite facies mylonitization during the Paleozoic-Triassic period.

Key words: Dabie orogen; mylonite; metamorphic facies; ductile deformation; dynamic recrystallization

收稿日期: 2010-12-23; 修订日期: 2011-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40542012); 国家“973”专题子项目(2003CB716500); 安徽省地质科学研究所大别山项目; 安徽省国土资源厅、安徽省地质矿产开发局基金匹配项目

作者简介: 徐树桐(1929-), 男, 研究员, 长期从事大别山地质研究, E-mail: xushutong@126.com

1 简介

自从 Lapworth (1885) 在苏格兰高地识别出一套与断层或剪切带有关的岩石并命名为糜棱岩 (mylonite) 之后, "mylonite" 一词被广泛采用, 但是对糜棱岩的定义却有很大争议。主要分歧是大部分人认为糜棱岩中的显微构造是韧(塑)性变形或重结晶作用条件下的产物 (Carter *et al.*, 1964; Smith, 1964; Hobbs, 1966; Bell & Etheridge, 1973), 也有人认为这些显微构造是脆性变形条件下的产物 (Higgins, 1971; Belliere, 1971)。此外, 还有人认为脆性和韧性变形同时存在, 并将糜棱岩和碎裂岩混合命名 (Zeck, 1974; White, 1982)。直到糜棱岩的彭罗斯 (Penrose) 会议, 才对糜棱岩命名原则或定义做了一个概括, 提出糜棱岩有 3 方面的特征: ① 颗粒变小, 尽管在看不到原岩时很难证明这一点; ② 产出在较狭窄的面状 (planar) 带内, 尽管带宽可达数十千米; ③ 增强的面理 (流动构造) 和/或线理。当时将糜棱岩定义为: "具有上述 3 种韧性变形标志 (criteria) 的、具少量或无微破裂的岩石", 将碎裂岩定义为: "有微破裂变形机制的高度变形岩石"。总的来说, 就是碎裂岩是脆性变形产物, 糜棱岩是韧性变形产物, 或者在变形机制不清楚的情况下, 以"糜棱质的 (mylonitic)" 作为野外名称 (Tullis *et al.*, 1982)。虽然有些人提出, 由于糜棱岩命名是以显微构造为根据的, 因此应尽量少用成因名词, 但是"糜棱岩" 一词本身就是成因名词, 因此"成因名词" 是难于避免的 (White, 1982)。“需要确定识别断层和剪切带的标志而不是争论糜棱岩的命名 (Tullis *et al.*, 1982)" 无疑是正确的。但是要确定识别断层和剪切带的标志, 首先必须正确确定鉴别糜棱岩的标志, 因此需要较为正确的糜棱岩的命名原则或定义。与彭罗斯会议大致同时, White (1982) 分析了误将糜棱岩与碎裂岩混合分类的原因。到目前为止, 所有研究糜棱岩的岩石学和构造地质学家都强调"矿物的重结晶作用" 是糜棱岩的重要标志。但是大部分研究者只强调糜棱岩结构而忽视其成分是否均匀, 只有部分作者注意到不同的矿物在相同的应力作用下有不同的表现, 例如在相同应力条件下, 长石和石英的变形特征不同 (Bell and Etheridge, 1973), 在相同变形条件下, 糜棱岩中的方解石、石英和长石的特征不同 (White, 1982)。Wise 等 (1984) 提出了糜棱岩

的命名原则并给出了糜棱岩的定义: "糜棱岩是用于粘性 (coherent) 岩石的通用名词, 有/或无碎斑, 以围岩的同构造颗粒强烈减小为特征, 减小到平均粒径 (0.5 mm), 并总是表现出至少有少量的同构造/重结晶恢复作用", 并认为少数糜棱岩不一定产出于断层带。Wise 等 (1984) 对正常变质岩与糜棱岩之间关系, 仅仅用应变率相对于恢复率的不同来表示, 而未做进一步说明和论证。最近, 地科联下属岩石命名委员会变质岩分会 (SCMR) 提出的糜棱岩定义和分类 (Brodie *et al.*, 2007) 对已往的问题并无实质性改进, 对此我们将另文讨论。

虽然大部分学者都同意糜棱岩是韧性变形产物, 但是对于区别韧性变形和脆性变形的标志, 似乎并无简单而统一的标准, 以致将"压溶 (pressure solution) 粒间滑动 (intergranular sliding) 都归于韧性变形的范畴 (Tullis *et al.*, 1982)。我们认为韧性变形的主要标志是晶内变形或晶体塑性或(动态)重结晶 (Nicolas and Poirior, 1976) 作用。脆性变形的主要标志是粒间变形, 粒间变形包括碎屑流 (debris flow) 和碎裂流 (cataclastic flow)。压溶的形成机制是应力作用下的化学过程, 并无晶内变形发生, 因此不应作为韧性变形的标志。作为韧性断层岩, 糜棱岩还必须有简单剪切作用形成的运动学标志。近 20 年来的文献中, 有很多学者意识到变质作用是形成和鉴别糜棱岩的最重要条件和标志, 不约而同地将糜棱岩命名为"××变质相糜棱岩" (Puelles *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007; Menegon *et al.*, 2008; Kanagawa *et al.*, 2008; Bestmann *et al.*, 2008; Cao *et al.*, 2010), 说明变质作用是形成糜棱岩的主要机制和判别标志, 也不同意前文提到的关于糜棱岩的定义和分类。尽管变质作用确实是形成糜棱岩最重要的条件和鉴别标志, 但是迄今为止, 并没有人将变质作用引入到糜棱岩的定义之中, 或者创立新的糜棱岩定义。由于缺乏关于糜棱岩的正确定义, 造山带内很多不同类型 (变质相) 的糜棱岩未被识别出来, 影响到对造山带变质变形历史的正确分析。糜棱岩的存在与否, 对于鉴别不同规模断层或剪切带的存在至关重要。造山带规模糜棱岩带的识别, 对于认识造山带的几何结构和构造演化历史是最基本问题之一。因此在讨论大别山糜棱岩时需要建立符合大别山实际的"糜棱岩定义"。

需要指出的是, 本文只讨论大别山有哪些主要类型 (变质相) 的糜棱岩, 而不是讨论某一个具体断

层或剪切带内的糜棱岩的详细描述和分布状况。因为,虽然部分主要剪切带内有不同类型糜棱岩的叠加,但是都不能完全包括大别山全部的糜棱岩类型。

2 大别山地质概况

大别山位于中国中东部,是著名的碰撞造山带,地质位置在华北克拉通与扬子克拉通之间,从北向南可以划分为 7 个变质的岩石-构造单位和前、后陆带(图 1),它们分别是古生代变质复理石和弧前盆地煤系(MF+MYS)〔徐树桐等,2010〕条带状片麻岩单位(TG)〔扬子克拉通新元古代变质下地壳〕〔Ma

et al.,2000;Zhang *et al.*,2002)与陆壳有关的榴辉岩单位(ECL₂)与洋壳有关的榴辉岩单位(ECL₁)木兰山片岩或张八岭群变质的细碧石英角斑岩组合(ML)宿松群(SS)〔扬子克拉通新元古代变质的被动大陆边缘含磷岩系〕和大别杂岩(DB)〔扬子克拉通中元古代的变质基底〕〔陈道公等,2000〕。7 个岩石-构造单位中,TG 和 ECL₂ 是超高压变质带,其中有微粒金刚石、柯石英和其他超高压标志产出(Okay *et al.*,1989;Wang *et al.*,1989;Xu *et al.*,1992,2003,2005),ECL₁ 为高压变质带。高-超高压带的峰期变质和角闪岩相退变质的时代见表 1。

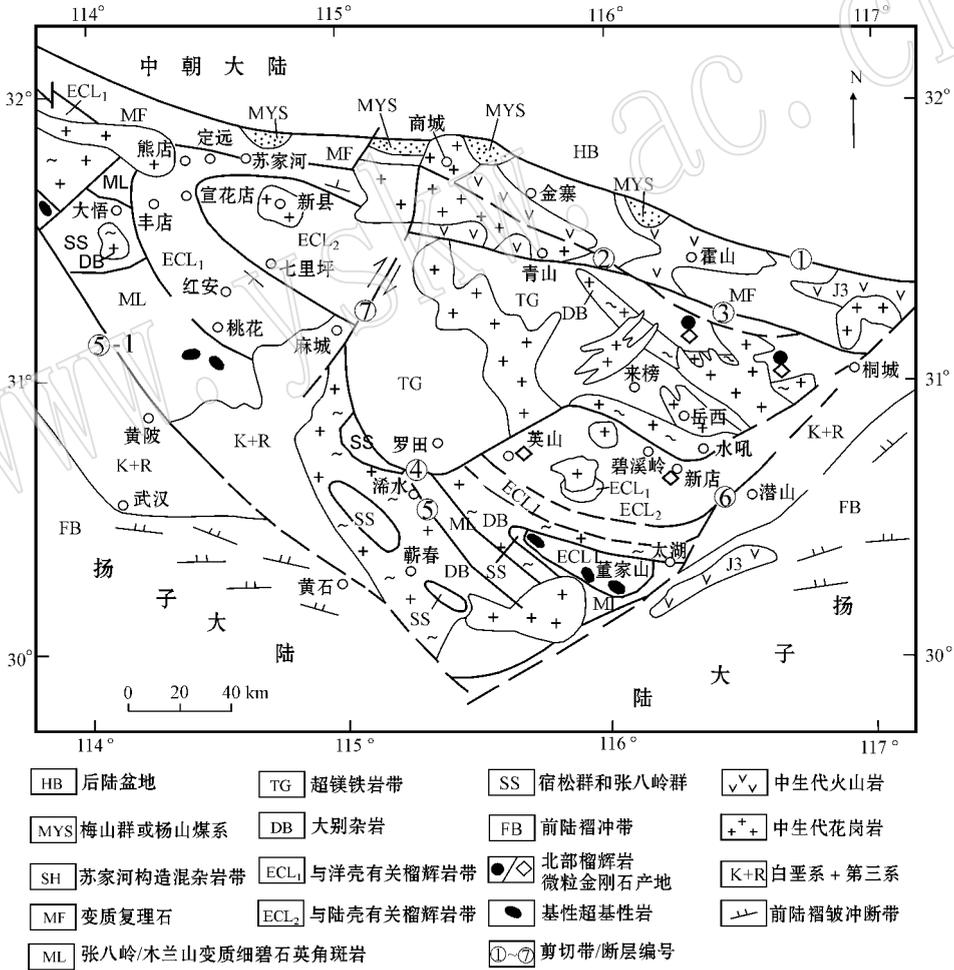


图 1 大别山构造地质略图(据徐树桐等,2010)

Fig. 1 Geological sketch map of the Dabie Mountain (after Xu Shutong *et al.*, 2010)

- ①—龟山-梅山断裂,地表未出露;②—桐城-桐柏脆性断裂;③—桐城-桐柏韧性剪切带;④—水吼-罗田-麻城韧性剪切带;
- ⑤—太湖-张家榜-桃花韧性剪切带;⑥—郟-庐断裂南段;⑦—商城-麻城断裂

- ①—Guishan-Meishan fault (buried); ②—Tongcheng-Tongbo brittle fault; ③—Tongcheng-Tongbo ductile shear zone; ④—Shuihou-Luotian-Macheng ductile shear zone; ⑤—Taihu-zhangjiabang-Taohua ductile shear zone; ⑥—South segment of Tan-Lu fault; ⑦—Shangcheng-Macheng fault

表 1 大别山高-超高压岩石构造单位一组符合地质条件的峰期和退变质年龄

Table 1 Isotopic ages of peak and retrograded metamorphism of UHP terranes of the Dabie Mountain

构造-岩石单位	TG	ECL ₂	ECL ₁	参考文献
峰期变质作用	212 ± 4 Ma	226.3 ± 3.2 Ma	236 ± 4 Ma	Liu 等(2007)
退化变质作用 (角闪岩相)	218 ± 3 Ma		232~234 Ma	Chen 等(2004)
	191 ± 5 Ma	219 ± 6.6 Ma	205 ± 4 Ma	Liu 等(2007) Chen 等(2004)

图 1 中,①~⑦断层或剪切带内的糜棱岩带主要为绿片岩相,且分布稳定。其他岩石-构造单位内都有糜棱岩分布,由于这些单位卷入深俯冲和折返,并且原始产状平缓,有多期褶皱叠加,糜棱岩带呈面状断续分布(徐树桐等,2002)。

3 大别山造山带的糜棱岩

3.1 大别山糜棱岩的命名原则

大别山糜棱岩有 3 个最主要特点:一是变质,二是韧性变形,三是有简单剪切应变标志。因此大别山糜棱岩的命名原则是:“大别山的糜棱岩是在变质作用条件下形成的与断层或剪切带有关的岩石”,因此它必然以晶内变形或(塑)性变形或动态重结晶机制为主。既然是变质作用条件下形成的断层岩,而变质作用又可大致分为绿片岩相、角闪岩相、麻粒岩相、榴辉岩相,因此也应当有绿片岩相、角闪岩相、麻粒岩相和榴辉岩相糜棱岩。大部分变质岩是多种矿物集合体,且不同矿物在不同变质作用温压条件下有不同表现,例如,石英、云母、方解石、钠长石等绿片岩相标志矿物,在绿片岩相条件下受到以简单剪切应变为主的作用时,会产生动态重结晶造成的细粒化,由于层状硅酸盐矿物较多而会有强烈面理化,而同一岩石内角闪岩相或麻粒岩相等高级变质相标志性矿物,如钾长石、石榴石、辉石等,则不会产生晶内(塑性)变形,反而会产生脆性变形。在这种情况下,应当将其定名为绿片岩相糜棱岩。换句话说,在低级变质相的糜棱岩中可以有绿片岩相矿物的韧性和角闪岩相矿物的脆性变形共存。在榴辉岩相或麻粒岩相变质作用条件下形成的糜棱岩中,榴辉岩相指示矿物(如石榴石和绿辉石等)可产生韧(塑)性变形及动态重结晶形成的细粒化,而低级变质相的指示矿物则会因较高温度($t \geq$ 结晶)下的恢复作用使颗粒变大。所以,低级变质相的指示矿物(石英、钠长石、碳酸盐矿物等)不会有细粒化表现。因此,高级变质相的糜棱岩只能根据相应指示矿物

的(塑)性变形来识别。由于云母在高温下分解,因而高级变质相糜棱岩的面理发育较差。实际上,糜棱岩彭罗斯会议的参加者已经注意到这个问题。例如在会议报告中提到:“实际上,通常的印象,糜棱岩是复矿岩石,其中的某种矿物表现为脆性,而其他一些矿物表现为韧性。根据岩性和变形机制,同等大小和相同类型的应变可产生很不相同的显微构造(Tullis *et al.*, 1982)”。但是并没有人将这种现象与变质作用条件联系起来,这可能与当时对高级变质相糜棱岩研究较少有关。既然糜棱岩是韧性变形的断层岩,简单剪切现象也应当是鉴别糜棱岩的重要标志。因此将大别山糜棱岩定义为:“变质作用条件下,由简单剪切应变为主形成的韧性断层岩”。虽然“变质作用条件下”带有成因含义,因而不符合某些学者的命名原则(Bell & Etheridge, 1973; Brodie *et al.*, 2007),但实际上成因含义在糜棱岩命名中是不可避免的,因为“Milling(磨碎)”的原义以及“重结晶”等都有成因含义,因此有些学者也认为,成因含义可以出现在糜棱岩的命名中(White, 1982)。任何地质工作者都可以采用本文建议的定义,在野外和室内识别(在变质作用条件下生成的)糜棱岩,而不致造成以往的混乱,特别不会造成将碎裂岩与糜棱岩混合命名的混乱。当以某某相糜棱岩命名时,人们从其名称就可以知道其形成时的大致温压条件。糜棱岩的成分可用作次级修饰词,例如角闪岩相花岗质糜棱岩等等。如果需要,还可以根据结构做更次一级分类,如细粒、粗粒、均质或碎斑状等等。由于大别山高压-超高压带内的糜棱岩是在从深部向浅部折返过程中形成的,此种糜棱岩带往往是相对于变质母岩中的退化变质带,不过在此不做进一步讨论。本文“简介”一节提到的糜棱岩定义中列出的鉴别糜棱岩的大部分标志仍然有效,但属于次要的标志。

另一个相关话题是碎裂岩,我们遵循“碎裂岩是脆性变形(粒间变形)产物”的原则,将其定义为“非变质作用条件下形成的断层岩”。在脆性变形的断层岩

中我们将碎块之间有吻合边缘的称为碎裂岩,无吻合边缘且细颗粒较多者称为断层角砾岩或断层泥。该问题不是本文讨论内容,在此不做进一步讨论。

3.2 大别山糜棱岩类型

在笔者等的早期研究中,认为大别山绝大部分变质岩都是动力变质形成的构造岩(徐树桐等,1984),但未做深入讨论。除去图1中标明的断层和剪切带外,大别山区的糜棱岩还分布在不同的岩石-构造单位内的变质岩中(图1)。图1中②~⑦号为较年轻剪切带,主要为绿片岩相糜棱岩,早期角闪岩相和麻粒岩相糜棱岩的痕迹偶有保存。图1中除后陆盆地和前陆褶冲带以外的所有岩石-构造单位内,都有糜棱岩产出。以绿片岩相为主的糜棱岩主要沿①~⑦号剪切带分布。沿②号剪切带,糜棱岩带的宽度达8 km,长度约100 km;沿④号剪切带的糜棱岩带宽度达10 km,长度约800 km(徐树桐等,1994)。以角闪岩相为主的糜棱岩主要分布在TG、ECL₁和ECL₂单位内,是在退变质过程中产生的,这些单位本身,就是强烈俯冲之后折返过程中退化变质的构造单位(Liu and Li, 2008)。麻粒岩相糜棱岩主要见于TG单位内,受退化变质作用影响,麻粒岩相糜棱岩往往是角闪岩相糜棱岩带内的残留体。榴辉岩相糜棱岩,特别是榴辉岩相的榴辉岩质糜棱岩(ECL₂单位内),与麻粒岩相糜棱岩一样,也呈残留体分布在角闪岩相糜棱岩带内。

3.2.1 绿片岩相糜棱岩

图1中②~⑦号剪切带以及MF、ML和DB等岩石-构造单位中都以绿片岩相糜棱岩为主,有时可见角闪岩相糜棱岩。

高压-超高压变质带(图1中的TG、ECL₁和ECL₂)单位内的绿片岩相糜棱岩都与退化变质有关,形成时代140 Ma或较晚(Ratschbacher *et al.*, 2000),且无后期韧性变形叠加,因而分布稳定。但是FM和ML单位内的绿片岩相糜棱岩(图2)的生成与前期的洋壳俯冲以及后继的陆/陆碰撞都有关系,形成时代可能包括古生代到三叠纪(徐树桐等, 2010),但是并未对有关样品做专门分析。

3.2.2 角闪岩相糜棱岩

角闪岩相糜棱岩分布较广,主要分布在高-超高压(HP-UHP)变质带、大别杂岩(DB)以及木兰山片岩(ML)等单位内。HP-UHP带内的糜棱岩是在折返过程中退化变质作用条件下产生的,因此是其围岩中的退变产物。在角闪岩相变质条件下,绿片岩

相矿物,如石英、白云母、方解石等的亚颗粒由于高温的恢复作用而消失,因此见不到石英等矿物的细粒化、波状消光、蠕虫结构等韧性变形的现象(图3)。角闪岩相糜棱岩的主要特征是:角闪岩相标志性矿物如角闪石斜长石等的(韧)塑性变形以及同类矿物由简单剪切形成的运动学标志。

角闪岩相糜棱岩在局部地区分布稳定,图1 TG、ECL₁和ECL₂单位内的大部分基质均为退变过程中形成的角闪岩相糜棱岩。据报道,大别山角闪岩相变质时限为191~205 Ma(陈道公等, 2003; Liu *et al.*, 2007),因此,角闪岩相糜棱岩是在HP-UHP向浅部折返过程中形成的,其形成时代也应为191~205 Ma或略晚,形成机制以简单剪切为主。图3a、3b附近,相同的岩石中发现有早期麻粒岩相(徐树桐等, 1994, 1999; Xu *et al.*, 2003; 刘贻灿等, 2006)糜棱岩残迹,因此角闪岩相糜棱岩应为退变产物(见后文)。Menegon等(2008)明确指出,意大利西北部Alps山有角闪岩相糜棱岩,不过他将“dissolution-precipitation creep”也作为糜棱岩化的重要机制;如果他的“dissolution-precipitation creep”就是通常所说的“压溶作用”(pressure solution),却未必妥当,因为压溶作用应为“化学过程”并且在纯剪切应变条件下也可发生。另一个角闪岩相糜棱岩例子是日本Pankenushi辉长岩中的糜棱岩,其中斜长石的韧性流变是主要特征(Kanagawa *et al.*, 2008)。我国云南滇苍山的糜棱岩也被明确定为角闪岩相糜棱岩(Cao *et al.*, 2010)。

3.2.3 麻粒岩相糜棱岩

大别山的麻粒岩相糜棱岩只见于图1的TG单位内,都是以退变残余的形式保存(图4)。据前期研究, TG单位内有两期麻粒岩相变质作用,变质历史为:早期麻粒岩相→榴辉岩相→晚期麻粒岩相(刘贻灿等, 2005)以及最后的角闪岩相。麻粒岩相糜棱岩主要特征是麻粒岩相标志性矿物的韧性变形和由简单剪切形成的运动学标志。

由于早期麻粒岩相是新元古代下地壳的组分(Ma *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2002),晚期麻粒岩相的峰期变质时代为晚三叠世,而大别山北部麻粒岩相糜棱岩分布区峰期变质年龄为212 Ma(Liu *et al.*, 2007),因此大别山麻粒岩相糜棱岩最早的形成年代应略晚于榴辉岩相,但未做过专门测定。麻粒岩相糜棱岩的存在,也表明此时的碰撞造山作用折返过程对深部地壳有强烈影响。

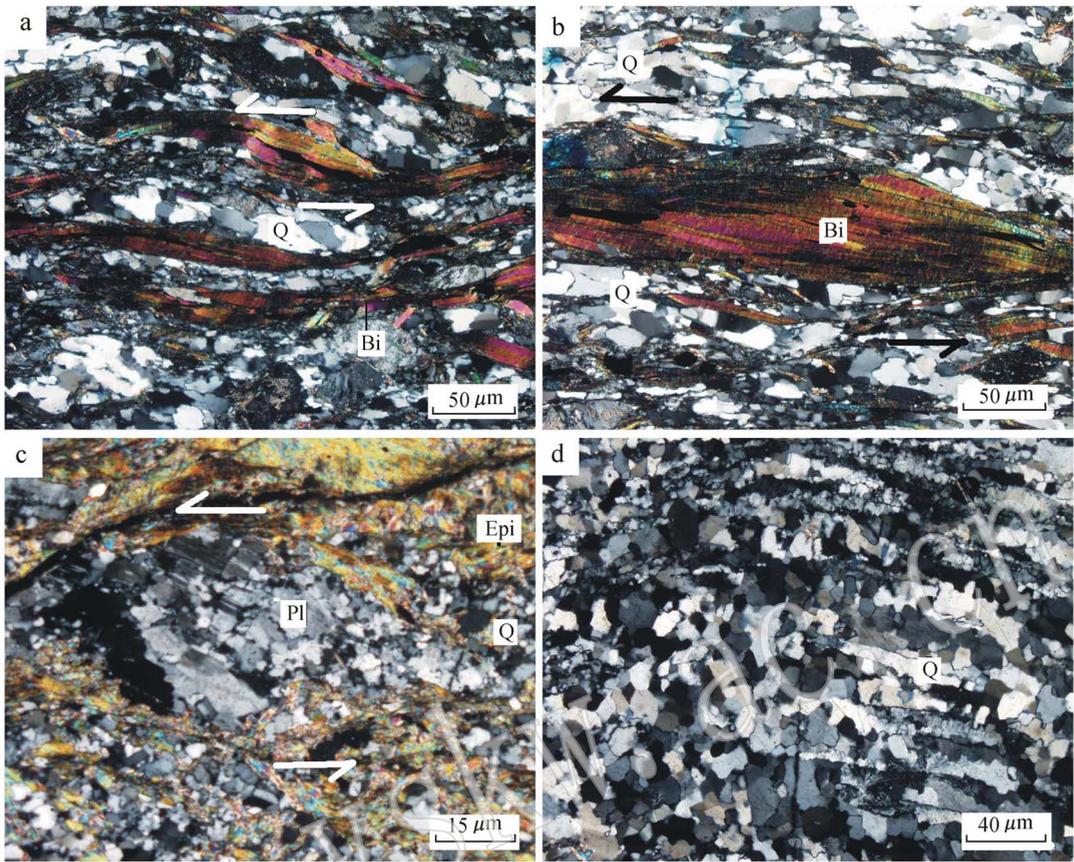


图 2 大别山绿片岩相糜棱岩正交偏光显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of greenschist facies mylonites in the Dabie Mountain (crossed polar)

a—剪切带②附近绿片岩相长英质糜棱岩(薄片 881045-1), 石英碎斑(Q)细粒化, 有波状消光, 黑云母(Bi)定向排列, 形成良好面理; b—剪切带②附近绿片岩相英闪云闪长质糜棱岩(薄片 881045-2)中云母鱼(Bi)及石英碎斑(Q)的动态重结晶; c—一张八岭变火山岩(图 1 中 ML)中的绿片岩相石英角斑质糜棱岩(薄片 8810308-3), 斜长石(Pl)碎斑有破裂, 石英有动态重结晶, 细粒化绿帘石(Epi)是斜长石退变产物; d—木兰山片岩(ML)中, 绿片岩相石英质糜棱岩, 石英(Q)晶内变形, 边缘有乳虫状结构, 可能由位错攀移(dislocation creep)造成, 局部细粒化, 有不对称褶皱; 箭头表示相对运动方向

a—greenschist facies felsic mylonite(thin-section 881045-1) close to sheaar zone ②, quartz porphyroclast(Q) with grain size reduction and wavy extinction, biotite (Bi) with preferred orientation defined foliation; b—greenschist facies tonolitic mylonite(thin-section 881045-2), with mica-fish(Bi) and quartz porphyroclast (Q), showing dynamic recrystallization; c—greenschist facies quartz keratophyre mylonite (thin-section 8810308-3) in ML(Fig. 1), the plagioclase(Pl) porphyroclast showing brittle fractures, quartz showing dynamic recrystallization, grain size reduction in epidote which is the retrograded products of plagioclase; d—greenschist facies quartz mylonite in ML(Fig. 1), myrmekitic texture in quartz is postulated to be from dislocation creep; arrows show relative movement direction

糜棱岩相糜棱岩与绿片岩相糜棱岩有明显不同之处: ①由于缺少层状硅酸盐矿物, 面理不发育(图 4c); ②由于变质温度较高, 动态重结晶形成的亚颗粒因恢复作用不能保存, 因而这类矿物虽有定向但颗粒较粗大(图 4b), 所以绿片岩相和角闪岩相矿物中的亚颗粒化应是后期变形产物, 有时只保存波状消光等晶内变形特征。作为高等级变质相的辉石、石榴石、角闪石及基性斜长石等矿物可以发生退化

变质作用, 如果在退化变质过程中发生糜棱岩化, 则会形成叠加于前期糜棱岩的、成为相应变质相(角闪岩相或绿片岩相)为主的糜棱岩; 相反, 在无后期糜棱岩化叠加时, 大部分矿物退化变质为角闪岩相(图 4b)或绿片岩相矿物时, 前期糜棱岩中部分标志矿物表现为残留体, 同时在宏观上表现为绿片岩相或角闪岩相变质岩, 而在微观尺度表现为残留糜棱岩相糜棱岩(图 3a)。因此以往的有关糜棱岩的定义不能

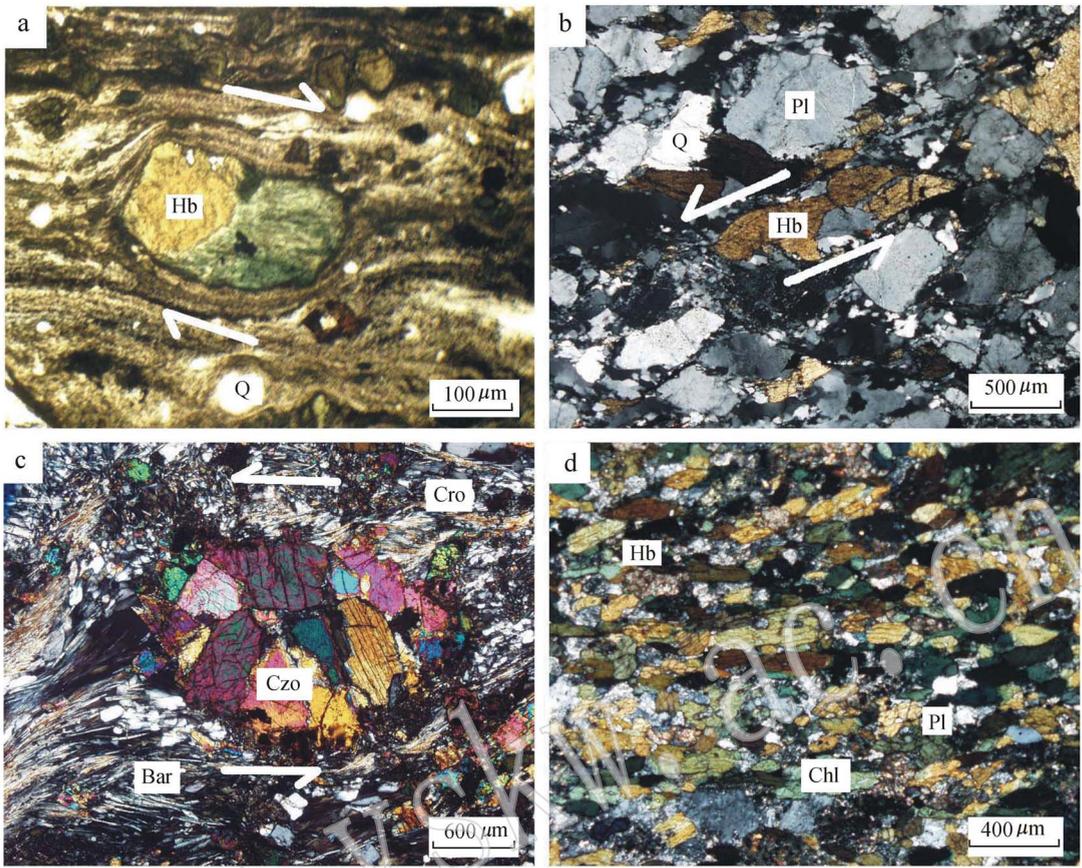


图 3 角闪岩相糜棱岩正交偏光显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of amphibolite facies mylonites in the Dabie Mountain (crossed polar)

a—图 1 的 TG 单位鹿吐石铺水电站附近之角闪岩相斜长角闪质极细粒糜棱岩(薄片 881058), 碎斑为已被磨圆的角闪石(Hb), 基质中为细粒斜长石和角闪石, 可能处于剪切带的强应变部位, 围岩为斜长角闪片麻岩; b—洗儿塘附近 TG 单位内角闪岩相斜长角闪质糜棱岩(薄片 829058), 斜长石(Pl)边缘有动态重结晶造成的细粒化, 角闪石(Hb)形成不对称碎斑; c—ML 单位中绿片岩(蓝片岩过渡相)的细碧质糜棱岩(薄片 8810424-1), 大部分冻蓝闪石(Bar)和青铝闪石(Cor)退变为绿泥石(Chl), 斜黝帘石(Czo)碎斑强烈波状消光, 边缘因动态重结晶而细粒化; d—龙潭大桥附近 ECL₂ 单位内, 角闪岩相斜长角闪质糜棱岩(薄片 8810248ad), 角闪石(Λ m)细粒化并被拉长为矿物纹理, 有时形成微褶; 箭头表示相对运动方向

a—amphibolite facies mylonite in TG unit at the Lutushipu Power Station (Fig. 1)(thin-section 881058), amphibolite porphyroclast (Hb) has been fully rounded, very fine grained matrix identified to be plagioclase and hornblende, mylonite has similar composition to its host rock, plagioclase-amphibolite (retrograded from granulite facies rocks); b—amphibolite facies mylonite in TG unit at the Xi'ertang (thin-section 829058), plagioclase (Pl) dynamically recrystallized as subgrains on the margin of larger crystals, amphibole (Hb) deformed as a asymmetric porphyroclast (amphibolite fish); c—green schist-blueschist facies mylonite in ML unit (Fig. 1)(thin-section 8810424-1), most barrosite (Bar) and crossite (Cor) have been retrograded to chlorite (Chl), zoisite porphyroclast (Czo) shows undulatory extinction with sub-grains on its margin due to dynamic recrystallization; d—amphibolite facies plagioclase-amphibolitic mylonite in unit ECL₂ close to the Longtan Bridge (thin-section 8810248ad), amphibole (Hb) has been granulated, stretched and folded; arrows show directions of movement.

包括多期变质相叠加的糜棱岩。挪威西部片麻岩区 Flatraketi 村以东 1 km 出露的奥长环斑花岗岩(Rapakivi)边缘有麻粒岩相糜棱岩, 但其显微构造及变质历史未见报道 (Geological Survey of Norway, 2003)。西班牙西北部 Bazariza 组中的糜棱岩带被认为是麻粒岩相糜棱岩 (Puelles *et al.*, 2005), 日

本变质带 Hidaka 内也有麻粒岩相糜棱岩, 其中的第 1 和第 2 期变形属于高压麻粒岩相糜棱岩, 特点为斜长石的(动态)重结晶, 表现为斜长石由恢复作用控制的位错攀移(dislocation creep), 辉石碎斑表现为塑性变形。

3.2.4 榴辉岩相糜棱岩

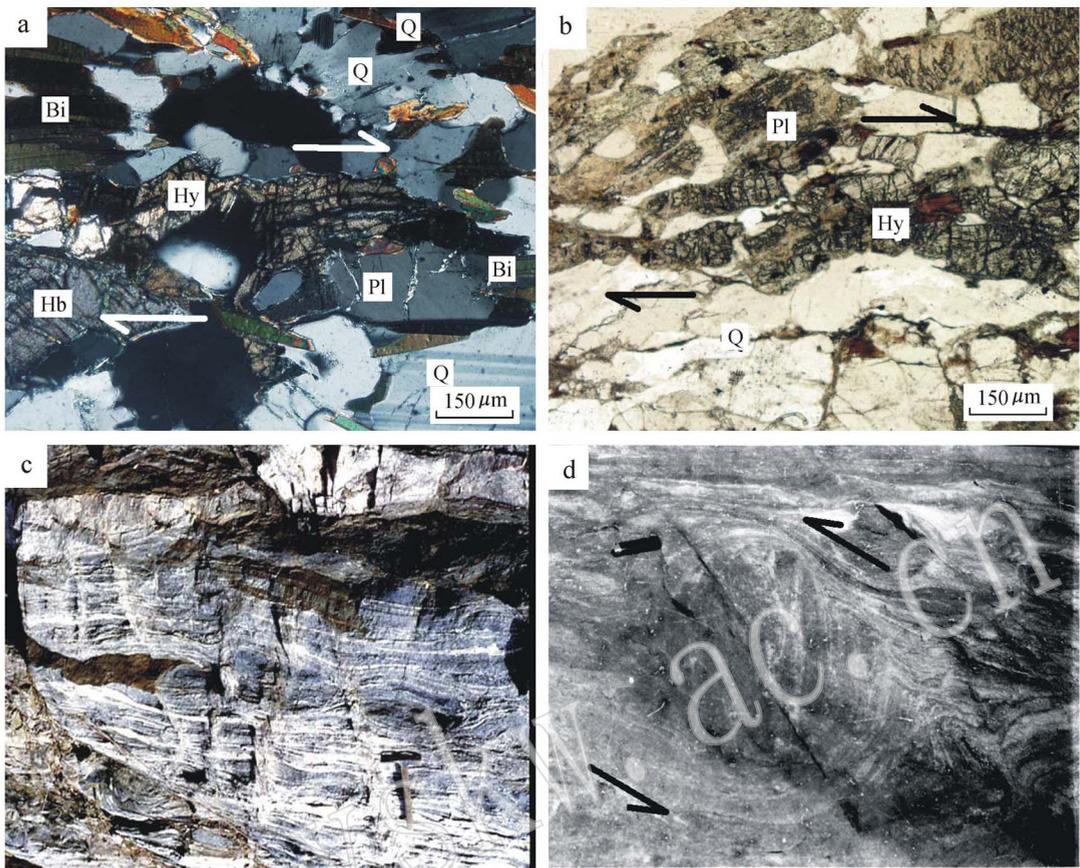


图4 大别山麻粒岩相糜棱岩照片

Fig. 4 Photographs of granulite facies mylonites in the Dabie Mountain

a—燕子河以西蔡家河路边, 残留麻粒岩相斜长角闪质糜棱岩(薄片 8434-L), 斜长石(Pl)动态重结晶(局部细粒化普遍波状消光, 紫苏辉石(Hy)成菱形碎斑(被石英包体分割), 长石有韧性变形特征, 说明有角闪岩相糜棱岩化叠加, 正交偏光; b—大河(桐柏)麻粒岩相角闪斜长质糜棱岩(薄片 9010664-7), 韧性变形同 4a, 自然光; c—塔儿河麻粒岩相角闪斜长质糜棱岩的露头; d—麻粒岩相角闪斜长质糜棱岩露头中旋转的自碎岩块, (观察点 8270340); 箭头表示相对运动方向

a—remnant of granulite facies mylonite at Caijiahe close to Yanzhihe (thin-section 8434-L), plagioclase(Pl) has been granulated by dynamic recrystallization with visible undulatory extinction, lozenge-shaped hypersthene(Hy) is separated by quartz inclusion. Ductile deformation of all of the feldspathic minerals indicate the imposition of later amphibolite facies mylonitization. Crossed polars; b—remnant of granulite facies plagioclase-amphibolite mylonite at Dahe in Tongbo orogen (thin-section 9010664-7), hypersthene (Hy) is ductilely deformed. Natural light; c—the outcrop of remnant granulite facies mylonite at Ta'erhe; d—rotated rock fragment by self-breaking of the granulite facies mylonite at the locality as C observation point 8270340); arrows show the directions of relative movement

榴辉岩相糜棱岩是在榴辉岩相变质作用条件下由非共轴应变形成的, 主要特点是榴辉岩相矿物发生韧(塑)性变形以及有非共轴应变标志(以简单剪切应变为主造成)(图 5、图 6)。很多学者将这类糜棱岩称为“榴辉岩相剪切带(Philipot and Kienast, 1989; Anderson and Osmundson, 1994; Zhao *et al.*, 2003)。但是剪切带是几何名词而不是岩石名称, 糜棱岩才是组成剪切带的岩石。徐树桐等(1999)和赵中岩等(Zhao *et al.*, 2005)分别报道过大别山和苏鲁地区的榴辉岩相糜棱岩。

榴辉岩相糜棱岩在露头规模上的表现与麻粒岩相糜棱岩有相似之处: ①由于层状硅酸盐矿物较少, 因而面理比角闪岩相和绿片岩相糜棱岩的面理差; ②只有退变时才有长石类矿物。当有角闪岩相或绿片岩相糜棱岩化叠加、退化变质作用和糜棱岩化作用同时发生时, 才会有相应的矿物亚颗粒化或其他晶内变形现象并保存下来, 同时也就变成了绿片岩相或角闪岩相糜棱岩。由于榴辉岩相糜棱岩化之后还有角闪岩相糜棱岩化叠加, 石榴石和绿辉石后成合晶中凡与主应变方向垂直或大交角者(Sym_2)、大

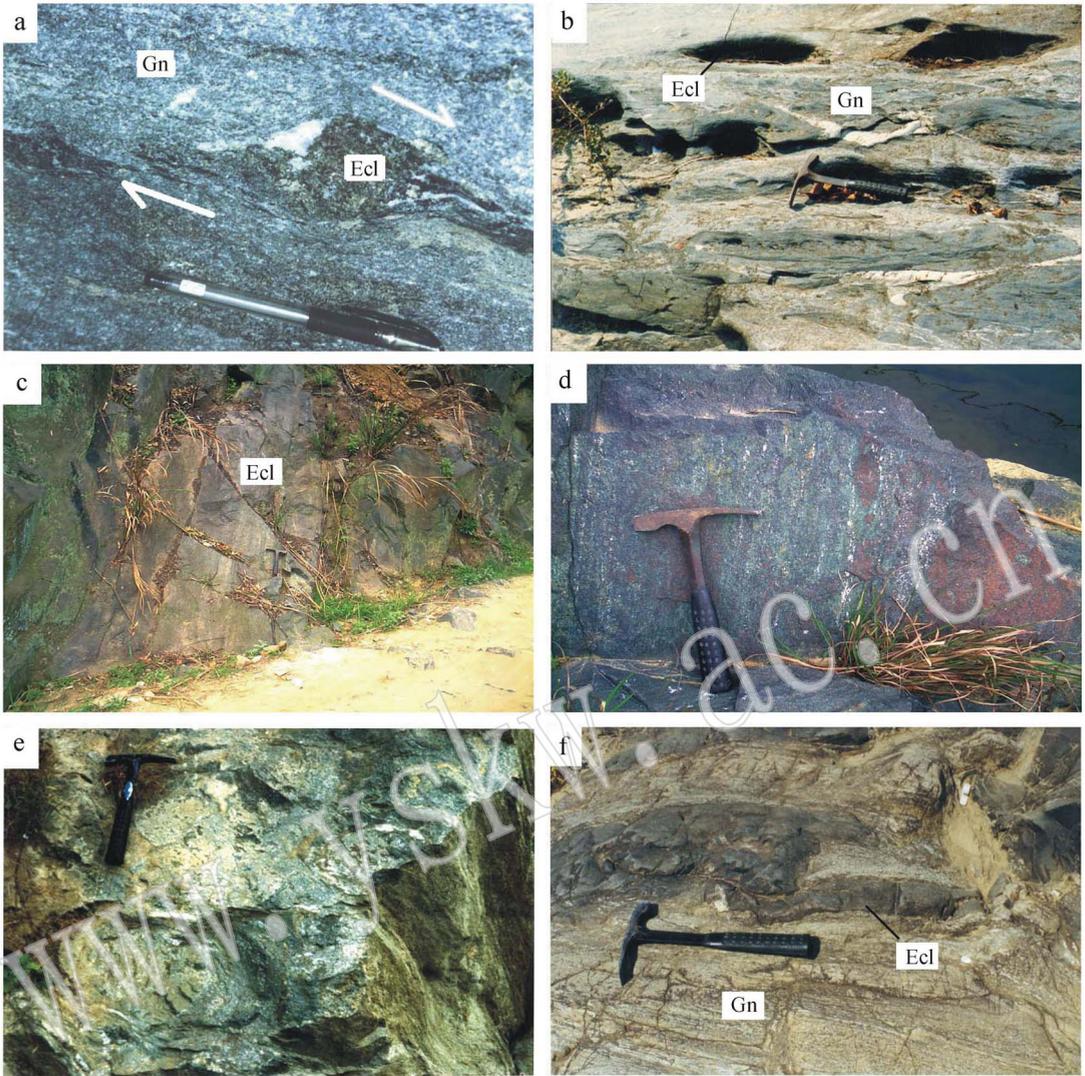


图 5 榴辉岩相糜棱岩在露头上的表现

Fig. 5 Photographs of outcrop of eclogite facies mylonites in the Dabie Mountain

a—潜山县毛屋(石马附近)以西 1 km 左右路边(观察点 989023)长英质片麻岩中的榴辉岩相糜棱岩,榴辉岩(Ecl)因韧(塑)性变形形成不对称透镜体(类似于糜棱岩中的“σ”碎斑),长约 25 cm,压溶的石英(Q)沉淀在无应变(strain free)区,面理因无(或极少量)层硅酸盐矿物而不发育,石英长石有明显拉长,但长石和石英只有轻微的波状消光,无明显细粒化,说明有角闪岩相和绿片岩相弱糜棱岩化作用叠加; b—牌楼河中的榴辉岩相糜棱岩,榴辉岩因韧(塑)性变形而形成一系列透镜体(观察点 8810249),围岩为英云闪长质的榴辉岩相糜棱岩,其中云母主要为多硅白云母; c—燕窝(双河)榴辉岩相榴辉岩质糜棱岩(ECL)(观察点 8810250,97414),因石榴石和绿辉石的强烈拉伸、压扁而有良好的面理和线理,仔细观察可发现有榴辉岩条带形成的不对称褶皱,指示的相对运动方向与微观标志一致(见图 6c),也与图 5a 中所示运动方向相同; d—榴辉岩相榴辉岩质糜棱岩面理上巨大的绿辉石线理(局部退变为闪石); e—石马附近徐家屋公路边,榴辉岩相钙硅酸盐质糜棱岩中,因韧性变形形成的“Λ”(鞘)褶皱群(观察点 8810264); f—大别山西部高桥公路边,因韧性变形形成的榴辉岩条带及褶皱;箭头表示相对运动方向

a—the outcrop of remnant eclogite facies mylonite in amphibolite facies felsic mylonite, which is the retrogressive product, at the locality close to Maowu(observation point 989023), a fragment of eclogite(Ecl)ductilely deformed to asymmetric lens(something like “σ” porphyroclast), quartz(Q)deposited in strain free domain, foliation weakly developed, feldspar and quartz apparently stretched, indicating the imposition of amphibolite facies mylonitization; b—a outcrop of retrograded eclogite facies mylonite in the river bed at Pailou; eclogite(Ecl) has been ductilely deformed into a series of lens(observation point 8810249); c—the outcrop of eclogite facies eclogitic mylonite at Shuanghe(observation point 8810250, 97414), foliation is defined by stretched garnets and omphacites, some eclogite stripes have deformed into asymmetric folds; d—mineral lineations of large crystals of omphacite on foliation(locally retrograded to amphibole); e—a group of Λ-folds or sheath folds in calcic-silicates of eclogite facies at the locality close to Shima (observation point 8810264); f—eclogite ductilely deformed into stripe and fold, by the road at Gaoqiao in western Dabie Mountains; arrows show directions of relative movement

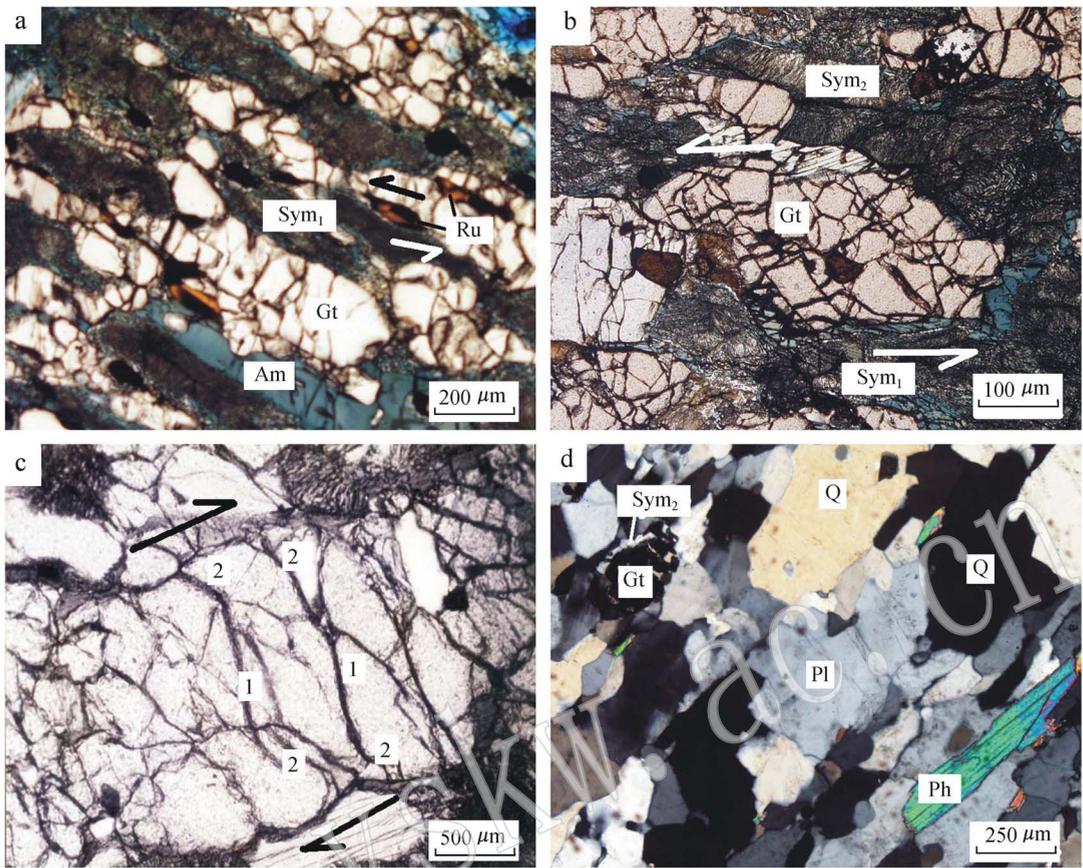


图6 榴辉岩相糜棱岩的显微构造照片

Fig. 6 Photomicrographs of microstructure of eclogite facies mylonite in the Dabie Mountain

a—双河面理化榴辉岩的显微构造,石榴石(Gt)和金红石(Ru)因塑性变形而形成条带,具优选定向(薄片 98401-4-1),大部分绿辉石已退变为后合成晶和富钠闪石(Δm),Gt和大部分绿辉石的后合成晶形平行于主晶边缘或面理,为早期后合成晶(Δsym_1),说明有角闪岩相糜棱岩化作用叠加,另一部分后合成晶形成于角闪岩相糜棱岩化之后(Δsym_2),仍保持与主晶垂直;b—双河榴辉岩中(薄片 97414-1)非共轴应变变形形成的不对称石榴石碎斑,部分后合成晶(Sym_1)受角闪岩相糜棱岩化影响而变形;c—石榴石碎斑在角闪岩相条件下的脆性变形,因前进变形而形成反“S”形破裂(徐树桐等,1999),1为早期破裂,2为后期破裂(薄片 97414-1);d—牌楼河中(薄片 881024,同图 5b),含榴辉岩透镜体的英云斜长质糜棱岩的显微构造,其中椭圆形石榴石(Gt)和多硅白云母(Ph)都表现有韧性变形特征,长石(退变矿物)有波状消光,石英(Q)颗粒较粗大无波状消光,可能为早期的糜棱岩相榴辉岩,后期有角闪岩相糜棱岩化作用叠加,榴辉岩的长英质围岩最终表现为以角闪岩相为主的长英质糜棱岩,或残留榴辉岩相糜棱岩,石榴石左上角边缘的后合成晶(Sym_2)未变形,应是角闪岩相糜棱岩化作用之后形成的;

Δ 、B、C为自然光 D为正交偏光;箭头表示相对运动方向

a—the microstructure of eclogite facies eclogitic mylonite at Shuanghe, preferential orientation of stripe-shaped garnet(Gt)and rutile (Ru) is formed by ductile deformation (thin-section 98401-4-1),most omphacite has retrograded to amphibole (Δm), some symplectite of Gt and omphacite align sub-parallel to their host minerals (Δsym_1) due to later amphibolite facies mylonitization, others keeping perpendicular to their host crystals is the later one (Sym_2); b—a asymmetric porphyroblast of garnet (Gt) in eclogite facies eclogitic mylonite at Shuanghe(thin-section 97414-1); c—reverse “S”-shaped fractures in garnet generated by brittle deformation during amphibolite facies mylonitization under simple shear strain(Xu Shutong *et al.*, 1999),“1”is the earlier segment and “2” the later(thin-section 97414-1); d—microstructure (thin-section 881024) of country rock of eclogite at Pailou (the same as Fig. 5b), ellipsoid garnet(Gt)and phengite (Ph) behave as ductile deformation, retrogressive plagioclase(Pl)shows undulatory extinction, coarse grained quartz (Q)shows no ductile deformation features, this felsic gneiss is dominated by amphibolite facies mylonite with remnant of eclogite facies mylonite, undeformed symplectite at the upper left corner around Gt is the later symplectite (Sym_2). Δ ~C: natural light,

D: crossed polars; arrows show directions of relative movements

部分角闪岩相糜棱岩化之后的后合成晶(图 6a、6d)与主应变方向大致平行者是早期后合成晶(Sym_1)由角闪岩相糜棱岩化造成的(图 6b)。

大别山榴辉岩相糜棱岩的韧性变形在 TEM 下

得到充分证明。据透射电镜研究,石榴石中普遍有位错环、位错壁、位错网和自由位错存在,自由位错密度为 $\rho = 3.96 \times 10^8$,表明有过强烈的晶内(韧性)变形,石榴石韧性变形温度为 $730 \sim 770^\circ\text{C}$,流变应力

$\sigma + 0.03 \text{ GPa}$, 平均应变轴比为 $X:Z = 3.89$, $X:Y = 2.86$, $Y:Z = 2.42$; 福林指数 $K = 1.18$; 证明其变形机制以简单剪切为主; 在后继的角闪岩相变形过程中, 石榴石表现为脆性变形(徐树桐等, 1999)。榴辉岩相糜棱岩形成于折返早期, 时代应略晚于榴辉岩峰期变质年龄 $212 \sim 236 \text{ Ma}$ (Liu *et al.*, 2007)。榴辉岩相糜棱岩的存在, 表明超高压变质带的折返过程对下地壳有强烈的影响。

最近有人报道了以石榴石动态重结晶为特征的晶内规模的榴辉岩相糜棱岩带(Bestmann *et al.*, 2008)。挪威西部片麻岩区的 Salta、Vetruhus and Flister 的条带状榴辉岩, 是具露头规模的榴辉岩相糜棱岩(Geological Survey of Norway, 2003)。

4 结论

(1) 大别山的糜棱岩是变质作用条件下形成的与断层或剪切带有关的断层岩。因变质作用不同, 所以有不同变质相的糜棱岩。大别山糜棱岩可以分为绿片岩相糜棱岩、角闪岩相糜棱岩、麻粒岩相糜棱岩和榴辉岩相糜棱岩。如有必要, 还可根据岩性和结构做次级和更次级的命名(分类), 如角闪岩相长英质碎斑状糜棱岩等。

(2) 不同变质相糜棱岩的主要鉴别标志是不同变质相标志性矿物的(韧)塑性变形和以简单剪切为主的运动学标志。韧性变形的主要特征是晶内变形, 而不是粒间变形(如碎裂流)。

(3) 早期形成于深部的榴辉岩相糜棱岩和麻粒岩相糜棱岩, 常常受到晚期形成于浅部的角闪岩相和绿片岩相糜棱岩叠加, 而表现为残留的榴辉岩相和麻粒岩相糜棱岩, 说明大别山超高压带折返初期在地壳深部也有强烈的相对运动, 且延续时间长, 并一直影响到上部地壳。

致谢 本文由国家自然科学基金项目(40542012)、国家“973”专题子项目(2003CB716500)、安徽省地质科学研究所大别山项目、安徽省国土资源厅基金、安徽省地质矿产开发局基金匹配项目资助, 在此表示衷心感谢。

References

Anderson T B and Osmundson P T. 1994. Deep crustal fabrics and a

- model for the extensional collapse of the southwest Norwegian Caledonides[J]. *Journal of Structural Geology*, 16(9): 1191~1203.
- Bell T H & Etheridge M A. 1973. Microstructure of mylonites and their descriptive terminology[J]. *Lithos*, 6: 337~348.
- Belliere J. 1971. Mylonites, blastomylonites et domaines polymetamorphiques[J]. *Ann. Soc. Geol.*, 94: 249~263.
- Bestmann Michel, Habler Gerlinde, Heidelbach Florian, *et al.* 2008. Dynamic recrystallization of garnet and related diffusion processes [J]. *Journal of Structural Geology*, 30: 777~790.
- Brodie K, Fettes D, Harte B, *et al.* 2007. Structural terms including fault rock terms[A]. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR [C]. Web. Version of 01, 02, 07.
- Cao Shuyuan, Liu Junlai and Leiss Bernd. 2010. Orientation-related mechanisms of naturally deformed amphibole in amphibolite mylonites from the Diancang Shan, SW Yunnan, China[J]. *Journal of Structural Geology*, 32: 606~622.
- Carter N L, Christie J M and Griggs D T. 1964. Experimental deformation and recrystallization of quartz[J]. *Jour. Geology*, 72: 687~733.
- Chen Daogong, Delloule E, Xia Qunke, *et al.* 2000. Preliminary U-Pb ion probe age determination of zircons from gneisses, Northern Dabie Terrain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 199~202 (in Chinese with English abstract).
- Geological Society of Norway. 2003. Guidebook to the Field Excursions in the Nordfjord(Stadtlandet(Almklovdalen Area)[R]. NGU Report 2003.005.
- Higgins M W. 1971. Cataclastic Rocks[J]. *Geol. Surv. Prof. Pap.*, 687: 1~97.
- Hobbs B E. 1966. Microfabric of tectonites from the Wyangala Dam Area, New South Wales, Australia[J]. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 77: 685~706.
- Ishii K, Kanagawa K, Shigematsu N, *et al.* 2007. High ductility of K-feldspar and development of granitic banded ultramylonite, in the Ryoke metamorphic belt, SW Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 29: 1083~1098.
- Kanagawa Kyuichi, Shimano Hirobumi and Hiro Yoshikuni. 2008. Mylonitic deformation of gabbro in the Hidaka metamorphic belt of central Hokkaido, Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 30: 1150~1166.
- Lapworth C. 1885. The Highland controversy in British geology: its causes, course and consequences[J]. *Nature*, 32: 558~559.
- Liu Y & Li S. 2008. Detachment with subducted continental crust and multi-slice successive exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic rocks: Evidence from the Dabie-Sulu orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(20): 3105~3119.
- Liu Y, Li S and Xu S. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating for gneiss in northern Dabie high T/P metamorphic zone, central China: Implications for decoupling within subducted continental crust[J]. *Lithos*, 98: 170~185.
- Liu Yican, Xu Shutong, Li Shuguang *et al.* 2005. Eclogite from the subducted lower crust of the Yangtze Plate within the Luotian dome and its geological implication[J]. *Earth Science*, 30(1): 71~77 (in

- Chinese with English abstract).
- Liu Yican, Xu Shutong, Li Shuguang, *et al.* 2006. Ultrahigh-pressure metamorphic evidence for gneiss from the northern Dabie complex, Central China: message from zircon[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1 827~1 832(in Chinese with English abstract).
- Ma C, Ehlers C, Xu C, *et al.* 2000. The roots of the Dabieshan ultrahigh pressure metamorphic terrane: constraints from geochemistry and Nd-Sr isotopic systematic[J]. *Precambrian Research*, 102: 279~301.
- Menegon Luca, Penacchioni Giorgio and Spiess Richard. 2008. Dissolution-precipitation creep of K-feldspar in mid-crustal granite mylonites[J]. *Journal of Structural Geology*, 30: 565~579.
- Nicolas A and Poirior J P. 1976. Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks[M]. John Wiley & Sons, 444.
- Okay A I, Xu S and Sengor A M C. 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogite, central China[J]. *Eur. J. Mineral.*, 1: 595~598.
- Philippot P and Kienast J. 1989. Chemical microstructure changes in eclogite-facies shear zones(Monviso Western Alps, North Italy) as indicators of strain history and the mechanism and seal of mass transfer[J]. *Lithos*, 23: 179~200.
- Puelles P, Mulchrone K F, Abalos B, *et al.* 2005. Structural analysis of high-pressure shear zones(Bacariza Formation, Cabo Ortega, NW Spain)[J]. *Journal of Structural Geology*, 27: 1 046~1 060.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, *et al.* 2000. Exhumation of the ultrahigh pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault[J]. *Journal of Geophysic Reseach*, 105(B6): 13 303~13 338.
- Smith C S. 1964. Some elementary principles of polycrystalline microstructure[J]. *Metall. Rev.*, 9: 1~48.
- Tullis J, Snoko A W and Todd V R. 1982. Significance and petrogenesis of mylonitic rocks(Penrose Conference Report)[J]. *Geology*, 10: 227~230.
- Wang X, Liou J G and Mao H. 1989. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China[J]. *Geology*, 17: 1 085~1 088.
- White S. 1982. Fault rocks of the moine thrust zone: a guide to their nomenclature[J]. *Texture and Microstructures*, 4: 211~221.
- Wise D U, Dunn D E, Engelder J T, *et al.* 1984. Fault-related rocks: suggestion for terminology[J]. *Geology*, 12: 391~394.
- Xu Shutong, Dong Shuwen, Zhou Haiyuan, *et al.* 1984. Fault rocks and southward thrusting of Dabie complex in east Dabie Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 29(11): 1 527~1 530.
- Xu Shutong, Liu Yican, Jiang Laili, *et al.* 1994. Tectonic Regime and evolution of Dabie Mountain[M]. Beijing: Science Press, 175(in Chinese).
- Xu Shutong, Liu Yican, Jiang Laili, *et al.* 2002. Architecture and kinematics of the Dabie Mountains orog[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 133(in Chinese).
- Xu Shutong, Wu Weiping, Lu Yiqun, *et al.* 2010. Tectonic background of low grade metamorphic rocks of the Dabie Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 795~810(in Chinese with English abstract).
- Xu Shutong, Liu Yican, Su Wen, *et al.* 1999. Geometry, kinematics and tectonic implication of the deformed garnets in the foliated eclogite from the ultrahigh pressure metamorphic belt in the Dabie Mountains, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 321~337(in Chinese with English abstract).
- Xu S, Liu Y, Che G, *et al.* 2003. New findings of microdiamonds in eclogites from Dabie-Sulu region central eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(10): 988~994.
- Xu S, Liu Y, Chen G, *et al.* 2005. Microdiamonds, their classification and tectonic implications for the host eclogites from Dabie and Su-Lu regions in central eastern China[J]. *J. Mineral. Mag.*, 69(4): 509~520.
- Xu S, Okay A I, Ji S, *et al.* 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 256: 80~82.
- Zeck H P. 1974. Cataclases, hemicataclases, holocataclases, blastoditto, and mylonblastites(cataclastic rocks)[J]. *American Journal of Science*, 274: 1 064~1 073.
- Zhang H S, Gao Z, Zhong B, *et al.* 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granuloids: constrains on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China[J]. *Geochemical Geology*, 186: 281~299.
- Zhao Z Y, Fang A M and Yu L J. 2003. High- to ultrahigh-pressure (UHP) ductile shear zones in the Sulu UHP metamorphic belt, China: implications for continental subduction and exhumation[J]. *Terra Nova*, 15(5): 322~329.
- Zhao Z Y, Wei C and Fang A. 2005. Plastic flow of coesite eclogite in a deep continental subduction regime: Microstructures, deformation mechanisms and rheologic implication[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 237: 209~222.

附中文参考文献

- 陈道公, Delouie E, 程昊, 等. 2003. 南大别黄镇低温榴辉岩多同位素体系年代学研究[J]. *中国科学 D 辑*, 33: 828~840.
- 陈道公, Dellouie E, 夏群科, 等. 2000. 北大别片麻岩中锆石 U-Pb 年龄初步测定[J]. *岩石学报*, 16(2): 199~202.
- 刘贻灿, 徐树桐, 李曙光, 等. 2005. “罗田穹隆”中的下地壳俯冲成因榴辉岩及其地质意义[J]. *地球科学*, 30(1): 71~77.
- 刘贻灿, 徐树桐, 李曙光, 等. 2006. 北大别片麻岩的超高压变质证据——来自锆石提供的信息[J]. *岩石学报*, 22(7): 1 827~1 832.
- 徐树桐, 董树文, 周海渊, 等. 1984. 大别山东段(安徽)大别杂岩中的断层构造岩和推覆构造[J]. *科学通报*, 5: 298~391.
- 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 1994. 大别山的构造格局和演化[M]. 北京: 科学出版社, 175.
- 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 2002. 大别山造山带的构造几何学和运动学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 133.
- 徐树桐, 刘贻灿, 苏文, 等. 1999. 大别山超高压带面理化榴辉岩中变形石榴子石的几何学和运动学特征及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 15(3): 321~337.
- 徐树桐, 吴维平, 陆益群, 等. 2010. 大别山低级变质岩的构造背景[J]. *地质通报*, 29(6): 795~810.