

俯冲带榴辉岩的变形作用及其对恢复 俯冲—折返过程的意义

曹 毅, 宋述光

CAO Yi, SONG Shu-guang

教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地质系, 北京 100871

MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Department of Geology, Peking University, Beijing 100871, China

摘要:榴辉岩是大洋和大陆俯冲带的重要岩石类型, 在研究俯冲带的形成过程、热结构、壳幔相互作用等方面有重要意义。通过对天然和实验样品中石榴子石、绿辉石等矿物的变形特征、变形机制、变形影响因素等的综合分析, 系统总结了高压变质带中榴辉岩矿物显微和超微变形研究的进展, 探讨了榴辉岩的变形特征对恢复俯冲与折返过程的意义及一些尚待解决的问题。

关键词:榴辉岩; 变形; 组构; 折返过程

中图分类号: P542^{+.4}

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2008)10-1646-08

Cao Y, Song S G. Deformation of subduction zone eclogite and its significance for the subduction-exhumation processes. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(10):1646-1653

Abstract: Eclogite is an important rock type within both oceanic and continental subduction zones and plays significant roles in revealing the formation and evolution of subduction zones, thermal structure and crust-mantle interaction. Studies of eclogite deformation enable us to understand the process of subduction and exhumation of rocks from the ancient subduction zones. This paper gives a systematic summary of the progress in the study of microstructures, deformation mechanisms and related influence factors in both natural and synthesized eclogite minerals (garnets, omphacite, etc.) in high-pressure metamorphic belts. The authors try then to probe into the significance of eclogite deformation in the study of reconstruction of the subduction and exhumation processes and some problems that still remain to be solved.

Key words: eclogite; deformation; fabric; exhumation process

早在 Häuy 1822 年定义“榴辉岩”一词以来^[1], 榴辉岩的研究便伴随着一些重要概念和多种地球动力学模型的诞生^[2]。1903 年, Becke 通过比较榴辉岩与辉长岩的矿物组合, 推断其为辉长岩高压下的同等物^[3]。1966 年, Ringwood 等^[4]通过实验研究证实榴辉岩是基性洋壳在高压变质作用下的产物。

洋壳榴辉岩化的过程伴随着强烈的脱水脆化, 它是深源地震产生的一个重要机制^[5-6]; 同时也是促

使俯冲、陆壳和洋壳分层的一个重要因素^[7-11]。而榴辉岩中柯石英^[12-13]和金刚石^[14]的发现, 证明俯冲板块可以达到超过 150 km 的深部后又折返出露地表, 并且可以发生强烈的变形^[15]。因此对榴辉岩变形特征的深入研究有助于恢复俯冲板块的受力特征及流变学性质。

俯冲带变形的研究工作主要开展于近 20~30 年, 尤其是在超高压变质概念提出以后。与变质沉积

收稿日期: 2008-07-30; 修订日期: 2008-09-23

基金项目: 北京大学校长基金, 国家自然科学基金(编号: 40773012)和全国博士学位论文作者专项资金资助(编号: 200531)资助。

作者简介: 曹毅(1986-), 男, 从事俯冲带的变质与变形研究。E-mail: caoyi0701@126.com

通讯作者: 宋述光(1963-), 男, 副教授, 从事区域构造和岩石学研究。E-mail: sgsong@pku.edu.cn

岩相比,榴辉岩抗变形的能力更强,更容易保留变形与变质作用在板块俯冲与折返各个不同阶段的信息^[16],因而受到研究者的重视。

早期工作的主要方向是通过普通的光学显微镜和少量透射电镜等仪器来研究榴辉岩主要造岩矿物的宏观和微观构造、岩石组构测量,以及对可能的变形机制进行探讨^[17-21],并同时开展了一些针对岩石矿物流变性的实验研究^[22]。20 世纪 90 年代以后,随着透射电镜及新型组构测量仪器(X-ray 衍射仪、TOF 中子衍射仪、SEM-EBSD 等)的广泛应用,榴辉岩变形的研究工作有了更迅速的发展,岩石矿物的超微构造、变形机制,及其地震波性质成为研究的主要方向^[23-28]。尤其是 2000 年以来,开始结合天然及人工样品的实验研究来测定流变学性质,模拟野外观察到的榴辉岩变形特征^[29-37]。在本文中,笔者通过综述榴辉岩宏观和微观变形研究的进展,探讨榴辉岩变形过程在俯冲与折返过程研究中的意义。

1 榴辉岩的变形特征

由于早期研究的榴辉岩主要来自于地幔橄榄岩包体,它们被认为是高压下岩浆成因的,往往显示弱的变形特征或没有变形,因而榴辉岩的石榴子石和辉石被认为是坚硬的矿物。直至发现强烈变形的高压、超高压变质成因的榴辉岩,榴辉岩的变形研究才得以迅速发展。

1.1 石榴子石的变形特征

石榴子石是榴辉岩中主要的矿物之一(30%~45%),尤其是在高压(>10 GPa)条件下,铝硅质石榴子石与辉石可以形成复杂的固溶体,随着压力进一步升高,四次配位的 Si 和八次配位的 Mg、Ca 等原子共同置换六次配位的 Al 原子,使辉石完全转变为富 Si 的石榴子石结构^[38-39];因而石榴子石在地幔过渡带(410~660 km)尤为富集^[40],石榴子石的流变特征对上地幔的相关研究有重要意义。

通过透射电镜观察以及自然与人工合成样品的实验研究,人们证实了石榴子石具有很高的强度^[20,41-42]。尽管长期的研究发现石榴子石发育低密度的位错^[23,28,43]和拉伸变形等塑性变形,但在地表的榴辉岩中,石榴子石往往都呈刚性的自形颗粒,不易受变形作用的影响^[27,44-45],尤其是在低温的榴辉岩中。当温度低于某个值时,石榴子石显示脆性变形,发生多期破裂,并充填退变质矿物或后期热液矿

物。Wang 等^[46]由实验外推,给出了石榴子石的脆韧性转变温度值大约为 800~900℃^[46];而 Voegele 等^[33]通过更高围压的实验研究,得出该温度大约为 1000℃。在超高压变形的高温榴辉岩中,石榴子石的强度显著降低,与绿辉石的强度差小于一个数量级^[15]。

在石榴子石变形机制的研究中,通过透射电镜(TEM)的观察,石榴子石的位错很多(不同类型榴辉岩的位错特征详见参考文献[47]),主要有 $1/2<111>$ 和 $<100>$ 两组布格向量^[21]。前者为主要的并具有较高的布格矢量长度,因而具有高的 Peierls 力,阻碍位错的滑动^[41]。但在高温下,由于石榴子石具有高的对称性,以及大量可选择的滑移系(共有 66 个),石榴子石不需要大的转动就能发生位错滑移,因此它会形成弱且随机分布的晶格优选定位(LPO),但却具有明显的拉伸变形^[15,48],这就提出了石榴子石位错蠕动的变形机制。Mainprice^[49]通过基于透射电镜观察到的试验样品的位错滑移系,在不同的受力应变状态下经过理论数值模拟,得出了与自然观察相似的晶格优选取向分布图。与这种机制相对应,自然样品与实验的观察也都表明扩散与颗粒边界滑移也是造成石榴子石塑性变形的机制^[36-37,50-53],形成具有与位错蠕动类似的显微构造特征。

长期以来,对水在石榴子石变形中所起的作用研究得比较少。但有一点是已被证实的,就是水的存在会使石榴子石发生弱化,降低其塑性流动强度,从而促进位错滑移及扩散、颗粒边界滑移。苏文等^[54]和刘祥文等^[55]推测,水分子团的存在会直接导致石榴子石 Si-O 和 Al-O 四面体中硅氧键与铝氧键水解弱化,促使已断裂的硅氧键与铝氧键重新成键,降低 Peierls 力,促进位错滑动,并通过 4 个 OH 与 SiO₄ 的替代形成新的位错,促使位错成核,形成石榴子石的塑性变形。另一方面,颗粒边界上的水分子有可能与其表层的原子发生水合作用,形成水化层,增强扩散效应。Zhang 等^[36-37]通过高温高压下对天然榴辉岩合成的人工“湿”榴辉岩样品的实验研究,观察到重结晶的石榴子石细小亚颗粒在原先的石榴子石大颗粒边部发生滑动,形成细长的石榴子石“尾部”,而同等实验条件下的“干”石榴子石却未发生明显变形,进一步证实了水在促进颗粒边界滑动上起了重要的作用。

1.2 绿辉石的变形研究

绿辉石是构成榴辉岩的另一类主要矿物，它是一种富集 Na 和 Al 的高压单斜辉石，根据 Morimoto 等^[56]的分类，绿辉石含有硬玉($\text{NaAlSi}_3\text{O}_6$)、霓石($\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$)和普通辉石($(\text{Ca,Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$)3 个端元组分。

大多天然榴辉岩样品(500–750℃,>1.5 Gpa)显示，绿辉石受到了明显的变形改造。由于石榴子石呈现刚性块体的特征，且其他矿物含量较少，绿辉石基本承担了全部的应变。然而，早期众多辉石流变性质的实验研究，证实样品主要为单颗粒和多颗粒的斜方辉石和单斜辉石，如单斜辉石的多颗粒研究^[22,57–58]、单颗粒研究^[59]，斜方辉石的多颗粒研究^[60–61]、单颗粒研究^[62]，都证明辉石有很高的流变强度，但仅能在很高的温度下发生塑性变形。因此由这些结果外推，绿辉石无法在实际榴辉岩变形的温度范围内发生变形，与普遍观察到的绿辉石强烈变形的事实不相符。而在之后的一些实验中，使用单一的硬玉^[63]和透辉石^[35]却得出了完全不同的辉石流变强度，绿辉石的流变强度介于硬玉与透辉石之间^[35]。因而，针对较低温度条件下榴辉岩发生的强烈变形，不少学者提出了以下一些观点：钠质辉石具有低的熔点，降低了其流变强度^[45,64]；很高的偏应力作用^[11]；水岩相互作用导致岩石弱化等^[64–65]。

通过各种组构分析仪器测量不同榴辉岩中绿辉石[010],[001],(110), $\pi(100)$ 的晶格优选方位(LPO)，根据所得到的极图特征，可以大致将其晶格组构分为以下类型^[44]。

(1)S 型或压平型组构。最早由 Helmstaedt 等^[18]提出，以[010]晶轴聚集垂直面理，而[001]分散在面理的大圆上为特征(图 1-a)，这是榴辉岩中最常见的一种组构类型。宏观上，岩石形成很好的面理，但无明显线理。

(2)L 型或拉伸性组构。也是由 Helmstaedt 等^[18]提出的，以[001]晶轴聚集平行宏观线理，[010]分散在垂直线理的大圆上为特征(图 1-b)。这在榴辉岩中也很常见。岩石形成很好的拉伸线理。

(3)退火组构： $\pi(100)$ 晶轴最大密度值垂直面理，[001]最大密度值平行线理；而[010]密度最大值在面理上，垂直线理(图 1-a)。这种类型在绿辉石中较少见，但在地幔橄榄岩中的斜方辉石中较常见^[66–67]。Philipot 等^[11]在低温榴辉岩中发现了此类组构，认为它与榴辉岩变形后的退火粗粒化生长有关。Abalos 等^[44]在 Cabo Ortegal 杂岩的块状榴辉岩中也发现了该类组构。

(4)组合型组构。有 2 个[010]最大值，一个垂直面理，另一个在面理上垂直线理。可以认为是退火组构与 L、S 型组构的中间类型，也有[001]和[010]分别分布在线理与垂直面理的方向上，称为 LS 型(图 1-c)。

(5)无定向组构。往往与花岗变晶结构相关，各个晶轴基本无定向，代表岩石未经过变形或在变形后发生静态重结晶^[18]。

绿辉石的组构特征是与变形机制直接相关的，位错蠕变是形成绿辉石 S、L 型等晶格优选方位分布的最主要机制。(100)[001]、{110}[001]和{110}1/2<110>是其中最重要的位错滑移系^[19–20,26,68]。长期以

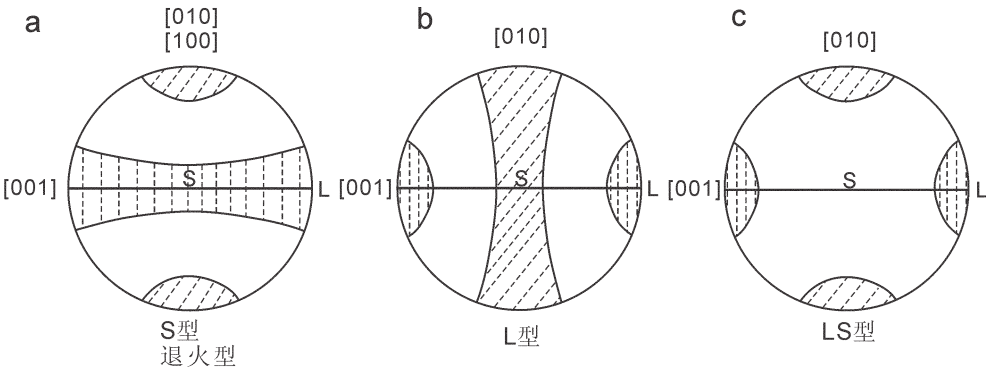


图 1 绿辉石不同类型的组构特征^[35]

Fig. 1 Different fabric types of omphacite

a—S 型和退火型组构；b—L 型组构；c—LS 型或中间型组构

来对自然与实验样品的显微构造观察都证明,它们具有相类似的 CPO 特征,且(010)[001]不是其中主要的滑移系。但在单一滑移系作用下,优选的滑移面与滑移方向趋向分别与面理和线理一致,因此,这就提出了一个问题,单一滑移系还是多滑移系是形成绿辉石组构的原因^[20,25,64,69-70]。在多滑移系模型下,由于(010)平行面理可以使{110}有最大的分解应力,从而形成观察到的组构特征^[24,35]。这些位错形成一系列显微构造,如孤立自由位错(isolated free dislocations)、位错环(loops)、节点(nodal points)、倾斜壁(tiltwalls)、亚颗粒边界(subgrain boundary)、复杂的位错网(dislocation network)、双晶(twins)、堆垛层错(stacking faults)和反相域边界(antiphase domain boundary)等^[19,64]。此外,由于不同晶面有不同的生长/溶解速率,它正比于晶面的结合能 E_{att} ,在单斜辉石中(010)<(100)<<(001)。因而,在流体帮助下晶体各向异性的溶解扩散与生长也是形成绿辉石形态变形的一个原因。流体的作用往往使石榴子石形成一些裂隙并充填绿辉石^[71],使已应变的绿辉石发生广泛生长,但无明显的位错变形特征^[27,45]。形成同构造绿辉石脉体^[11,72](往往是流体压力成因的)、榴辉岩内的矿物聚集条带等。Godard 等^[45]和 Mauler 等^[27]认为应变导致的边界迁移只会影响晶体的形态或形态优选方位(SPO),而不会影响其 LPO 特征;扩散导致的定向生长可以造成晶体 SPO 与 LPO 的变化^[27,45],并且水能增加绿辉石组构的强度^[37]。

有关绿辉石组构的另一个重要问题是造成其晶格组构由 S 型转变为 L 型的机制。Helmstaedt 等^[18]首先提出 S、L 型晶格组构是分别与压平和拉伸的绿辉石形态相关的,它们的转变与变形域由压缩到拉伸相关,其后许多学者的研究都证实了这一观点^[27,73-74](这点在下面会进行详细讨论)。然而,又有一些学者提出,这种组构变化并不是由变形域的几何变化引起的,而是决定于由温度变化引起的伴随原子有序化排列的布格向量的变化^[25,75-76]。当温度低于 750℃(这是一个绿辉石空间群临界转变温度,它同时与绿辉石的硬玉组分有关)时,空间群由 C2/c 转变为 P2/n,伴随原子发生有序排列。原先高温时完整的 $1/2<110>$ 布格向量分解为由堆垛层错分离的 2 个部分向量,增加了 $1/2<110>$ 位错滑动所需要的能量和物质的强度。因而,具有[001]布格向量的位错成为低温下的最主要位错,使绿辉石由 S 型组构

转变为 L 型组构。

1.3 石英的变形研究

在高压榴辉岩中,石英多以脉体或石榴子石包裹体的形式存在,少数还存在于石榴子石的压力影中。而超高压榴辉岩中的柯石英由于大都存在于其他矿物的包裹体内,极少见到其变形特征,一般只见到因降压、体积增大相变为石英而在寄主矿物内形成的放射性裂纹。尽管石英具有很低的强度,容易发生塑性变形,但石英的变形研究并不是研究的主要内容,因为一方面其含量较少,另一方面由于其广泛的稳定域,易静态重结晶,次生长恢复,常形成随机的 LPO 分布^[7],且不易确定其变形的温度和压力范围。但在某些情况下,与榴辉岩共生的石英脉中的石英亚颗粒特征和重结晶颗粒粒径的研究,可以帮助恢复古应力作用的大小^[7]。但值得注意的是,由于变形作用往往是局部化的,并集中在岩石中所受应力高且抗应变强度弱的矿物层上,要真正通过石英颗粒来恢复榴辉岩本身受到的应力大小和应变速率还是有很大局限性的。但是在地壳浅层且未受后期构造热事件影响的剪切带中,石英却常具有很好的 LPO。

1.4 金红石的变形研究

金红石是 TiO_2 在高温下的同质多象变体,四方晶系,因此[100]和[010]是 2 个相等的方向,晶体沿[001]方向生长。对金红石变形的研究还很少,主要是对金红石单晶的实验研究。通过对一系列不同温度、不同应变率的压缩应变的研究,发现在温度大于 875℃时,{101}<101>和{110}<001>是主要的 2 组滑移系^[78-81]。Mauler 等^[27]测定了榴辉岩中金红石的组构,具有与绿辉石相似但相对较弱的组构类型,位错滑移和伴随晶体各向异性溶解与生长的扩散蠕动是形成金红石 LPO 的主要原因。

2 实验岩石学或榴辉岩等变形实验总结

对榴辉岩矿物的变形实验研究是继早期对天然样品的直接观察后而发展起来的的一个新的阶段。众多学者通过对人工合成矿物或由天然样品合成的岩石样品的高温高压变形实验(利用 multianvil apparatus、Griggs apparatus 等),在给定的温度压力、变形域、应力大小、应变速率、水含量等条件下,发现实验后的样品具有与天然榴辉岩相类似的显微变形构造及组构特征(具体描述见上文),实验的榴辉岩样

品经历了比天然样品高得多的温度及应变率,说明实验结果可以通过符合某种变形机制的应变速率方程外推到天然样品,这也是实验研究最根本的出发点。

3 通过变形特征反演俯冲折返过程

俯冲折返过程是伴随着变质与变形 2 个过程的,而高压、超高压岩石俯冲折返的模型依赖于榴辉岩的流变学特征及它们的受力状况。由于绿辉石集中了榴辉岩应变中的主要应变,因此,它是恢复岩石受力情况和俯冲折返过程的主要标志。

影响绿辉石的晶格组构变化(L 型与 S 型的转变)现在一般被认为有 2 种主要机制(见上文),尽管 Brenker 等^[25]提出了通过温度变化影响位错的活动,从而形成不同类型绿辉石组构的观点,但是大多数学者对此并不赞同,而是把这种组构转变归于变形域或应变域的几何形态的变化,并提供了以下的一些事实。①在截然不同的温度压力条件下,形成了类似的绿辉石组构;②而在大致相近的温压条件和绿辉石成分条件下,发现了截然不同的绿辉石组构,尤其是一些控制在稳定温压条件下的实验研究,在相同变形域得到了不同的组构类型^[39];③同一榴辉岩样品中,除绿辉石外的其他矿物(如金红石)形成与绿辉石相似的组构。

同时,Bascou 等^[24]通过在不同变形域下的理论模拟得到了不同的组构类型。因此,通过不同的绿辉石晶格组构类型,可以恢复榴辉岩所受的应力状态。尽管如此,在此方面的研究并不多。

Kurz 等^[73-74]曾通过这种方法,系统地分析了东、西、中 Alps 高压、超高压榴辉岩中绿辉石的显微构造和晶格、形态组构特征,结合区域构造背景,反演了榴辉岩的折返过程和可能的模型^[73-74]。他将 S 型组构与压平的变形域相联系,同时绿辉石的轴比位于 Flinn 图解的压平区域,与俯冲过程中的埋藏造成的压缩或是地壳拉张造成榴辉岩折返的模型相一致;而 L 型组构则与拉伸变形相关,叠加有简单的剪切变形,绿辉石轴比位于 Flinn 图解的拉伸区域,代表了榴辉岩沿俯冲带通道的折返;L、S 组构间的过渡类型往往与简单剪切、平面应变一致(图 2)。

除绿辉石外,Ji 等^[15]通过对苏鲁超高压榴辉岩中石榴子石形态组构的研究,得出了与辉石相似的变形特征。

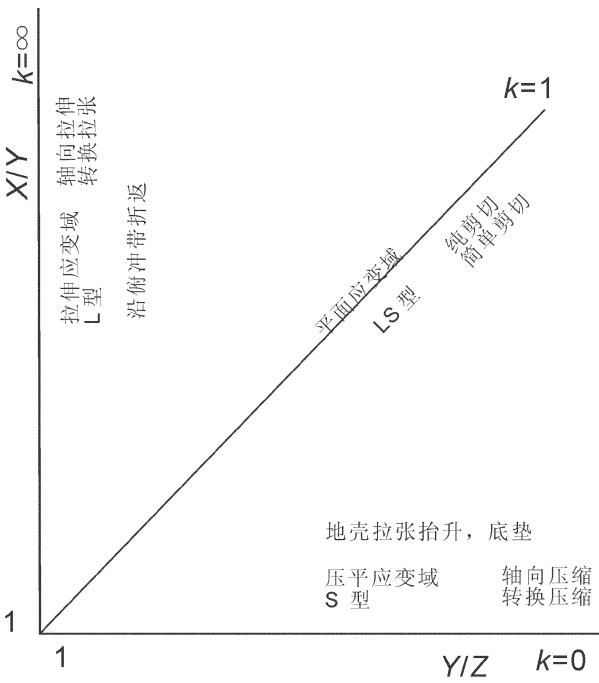


图 2 Flinn 图解表示的各类组构类型及折返过程
Fig. 2 Flinn diagram showing various fabric types and exhumation process

4 讨 论

4.1 低温榴辉岩中其他矿物在高压、超高压变质过程中的变形特征是怎样的

由于大多以往的榴辉岩变形研究都集中在中、高温及少数低温榴辉岩中,而对于一些低温的富集帘石、蓝闪石矿物的变形构造和组构特征的研究却很少。那么,这些矿物在高压、超高压下的变形特征和变形机制又是怎么样的?这将是今后研究的一个重要问题。

4.2 水在榴辉岩变形作用中的定量研究

水在榴辉岩变形中所起的作用已经得到了证实,它不仅可以促进扩散蠕变,还可以降低矿物的固相线温度,从而降低其流变强度。此外,增加的水压还会促进岩石破裂,改变岩石的变形组构。但这些都还是些定性的研究,是否能够从定量的角度来研究水对岩石变形特征的影响是一个值得考虑的问题。由于低温榴辉岩往往富含水,它对于低温下榴辉岩的变形,以及更进一步的变形变质相互作用都有很重要的影响,因此它是研究低温榴辉岩变形的一

个重要窗口。

4.3 利用绿辉石晶格、形态组构反演俯冲折返模型的问题

在利用绿辉石晶格、形态组构反演俯冲折返模型时,由于绿辉石的晶格与形态组构在有的情况下并不是完全一致的,可能与晶格组构还受到其他因素的影响有关,而形态组构可能会更准确地反映应力状态。但由于形态 Flinn 图解要求发生变形前的颗粒在三维结构上是等粒的,往往会给其形态组构的研究带来困难。因此,结合多样品的晶格、形态组构可以更准确地反演俯冲折返模型。

4.4 如何定量研究榴辉岩俯冲折返过程中受到的应力状态

榴辉岩在俯冲与折返过程中受到的应力、应变率大小并未得到深入研究。以往的一些古压力计主要是针对石英、橄榄石和方解石,使用矿物颗粒、亚颗粒的大小,以及位错密度来估计受到的应力大小。Tullis^[82]提出使用双晶来测定单斜辉石受到的剪切应力方向,但由于实验数据有限及多重变形机制的共同影响,要很好地恢复榴辉岩受到的应力状态目前还存在一定困难。因此还需要进一步从实验中获得岩石、矿物的变形特征与应力状态的关系,以恢复榴辉岩俯冲与折返过程中的受力特征。

参考文献:

- [1] Häuy R J. Traité de minéralogie, revue, Corrigée, considérablement augmentée par l'auteur. [M]. Paris: Bachelier et. Huzard, 1822.
- [2] Godard G. Eclogites and their geodynamic interpretation: A history [J]. Journal of Geodynamics, 2001, 32:165–203.
- [3] Becke F. Ber mineralbestand und struktur der kristallinen schiefer. Denkschriften der k. Akademie der wissenschaften [J]. Mathematisch–Naturwissenschaftliche Klasse, 1903, LXXV:1–53.
- [4] Ringwood A E, Green D H. An experimental investigation of gabbro–eclogite transformation and some geophysical implications [J]. Tectonophysics, 1966, 3:383–427.
- [5] Austrheim H, Boundy T M. Pseudotachylytes generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust [J]. Science, 1994, 265:82–83.
- [6] Hacker B R, Peacock S M, Abers G A, et al. Subduction factory – 2. Are intermediate–depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? [J]. Journal of Geophysical Research–Solid Earth, 2003, 108, (B1): 2030.
- [7] Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism [J]. Tectonophysics, 1993, 219:177–189.
- [8] Seber D, Barazangi M, Ibenbrahim A, et al. Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the alboran sea and rif–betic mountains [J]. Nature, 1996, 379:785–790.
- [9] Ducea M, Saleeby J. A case for delamination of the deep batholithic crust beneath the sierra nevada, california [J]. International Geology Review, 1998, 40:78–93.
- [10] Bird P. Continental delamination and the colorado plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84:7561–7571.
- [11] Philippot P, Van Roermund H L M. Deformation processes in eclogitic rocks—evidence for the rheological delamination of the oceanic–crust in deeper levels of subduction zones [J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14:1059–1077.
- [12] Chopin C. Coesite and pure pyrope in high–grade blueschists of the western alps—a 1st record and some consequences [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1984, 86:107–118.
- [13] Smith D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics [J]. Nature, 1984, 310:641–644.
- [14] Sobolev N V, Shatsky V S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks—a new environment for diamond formation [J]. Nature, 1990, 343:742–746.
- [15] Ji S, Saruwatari K, Mainprice D, et al. Microstructures, petrofabrics and seismic properties of ultra high–pressure eclogites from sulu region, china: Implications for rheology of subducted continental crust and origin of mantle reflections [J]. Tectonophysics, 2003, 370:49–76.
- [16] van der Klauw S N G C, Reinecke T, Stockhert B. Exhumation of ultrahigh–pressure metamorphic oceanic crust from Lago di Cignana, Piemontese Zone, Western Alps: The structural record in metabasites [J]. Lithos, 1997, 41:79–102.
- [17] Rabier J, Veyssiere P, Grilhe J. Possibility of stacking–faults and dissociation of dislocations in garnet structure [J]. Physica Status Solidi A–applied Research, 1976, 35:259–268.
- [18] Helmstaedt H, Anderson O L, Gavasci A T. Petrofabric studies of eclogite, spinel–websterite, and spinel–hercynite xenoliths from kimberlite–bearing breccia pipes in Southeastern Utah and North-eastern Arizona [J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77:4350–4365.
- [19] van Roermund H L M, Boland J N. The dislocation substructures of naturally deformed omphacites [J]. Tectonophysics, 1981, 78: 403–418.
- [20] van Roermund H. Petrofabrics and microstructures of omphacites in a high temperature eclogite from the Swedish Caledonides [J]. Bulletin of Mineralogy, 1983, 106:709–713.
- [21] Allen F M, Smith B K, Buseck P R. Direct observation of dissociated dislocations in garnet [J]. Science, 1987, 238:1695–1697.
- [22] Ave Lallemand H G. Experimental deformation of diopside and websterite [J]. Tectonophysics, 1978, 48:1–27.
- [23] Ando J I, Fujino K, Takeshita T. Dislocation microstructures in naturally deformed silicate garnets [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1993, 80:105–116.
- [24] Bascou J, Tommasi A, Mainprice D. Plastic deformation and development of clinopyroxene lattice preferred orientations in eclogites [J].

- Journal of Structural Geology, 2002, 24:1357–1368.
- [25] Brenker F E, Prior D J, Muller W F. Cation ordering in omphacite and effect on deformation mechanism and lattice preferred orientation (LPO)[J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24:1991–2005.
- [26] Ingrin J, Doukhan N, Doukhan J C. High-temperature deformation of diopside single-crystal .2. Transmission electron-microscopy investigation of the defect microstructures[J]. Journal of Geophysical Research–Solid Earth and Planets, 1991, 96:14287–14297.
- [27] Mauler A, Godard G, Kunze K. Crystallographic fabrics of omphacite, rutile and quartz in vendée eclogites (Armorican Massif, France). Consequences for deformation mechanisms and regimes[J]. Tectonophysics, 2001, 342:81–112.
- [28] Prior D J, Wheeler J, Brenker F E, et al. Crystal plasticity of natural garnet: New microstructural evidence[J]. Geology, 2000, 28:1003–1006.
- [29] Mauler A, Bystricky M, Kunze K, et al. Microstructures and lattice preferred orientations in experimentally deformed clinopyroxene aggregates[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22:1633–1648.
- [30] Dimanov A, Lavie M P, Dresen G, et al. Creep of polycrystalline anorthite and diopside[J]. Journal of Geophysical Research–Solid Earth, 2003, 108, (B1): 2061.
- [31] Bystricky M, Mackwell S. Creep of dry clinopyroxene aggregates[J]. Journal of Geophysical Research–Solid Earth, 2001, 106:13443–13454.
- [32] Cordier P, Raterron P, Wang Y. Tem investigation of dislocation microstructure of experimentally deformed silicate garnet[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1996, 97:121–131.
- [33] Voegelé V, Ando J I, Cordier P, et al. Plastic deformation of silicate garnets: I. High-pressure experiments[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1998, 108:305–318.
- [34] Jin Z M, Zhang J, Green H W, et al. Eclogite rheology: Implications for subducted lithosphere[J]. Geology, 2001, 29:667–670.
- [35] Zhang J F, Green H W, Bozhilov K N. Rheology of omphacite at high temperature and pressure and significance of its lattice preferred orientations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246:432–443.
- [36] Zhang J F, Green H W. On the deformation of UHP eclogite: From laboratory to nature[J]. International Geology Review, 2007, 49:487–503.
- [37] Zhang J F, Green H W. Experimental investigation of eclogite rheology and its fabrics at high temperature and pressure [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25:97–115.
- [38] Akaogi M, Akimoto S. Pyroxene-garnet solid-solution equilibria in systems $\text{Mg}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$ – $\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ and $\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$ – $\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ at high-pressures and temperatures[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1977, 15:90–106.
- [39] Ringwood A E, Major A. Synthesis of majorite and other high pressure garnets and perovskites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 12:411–418.
- [40] Ringwood A E. Phase-transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55:2083–2110.
- [41] Karato S, Wang Z C, Liu B, et al. Plastic-deformation of garnets – systematics and implications for the rheology of the mantle transition zone[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 130:13–30.
- [42] Ingrin J, Madon M. TEM observations of several spinel-garnet assemblies: Toward the rheology of the transition zone[J]. Terra Nova, 1995, 7:509–515.
- [43] Doukhan N, Sautter V, Doukhan J C. Ultradeep, ultramafic mantle xenoliths: Transmission electron microscopy preliminary results [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1994, 82:195–207.
- [44] Abalos B. Omphacite fabric variation in the Cabo Ortegal eclogite (nw Spain): Relationships with strain symmetry during high-pressure deformation[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19:621–637.
- [45] Godard G, Van Roermund H L M. Deformation-induced clinopyroxene fabrics from eclogites[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17:1425–1443.
- [46] Wang Z C, Ji S C. Deformation of silicate garnets: Brittle-ductile transition and its geological implications[J]. Canadian Mineralogist, 1999, 37:525–541.
- [47] Voegelé V, Cordier P, Sautter V, et al. Plastic deformation of silicate garnets: II. Deformation microstructures in natural samples [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1998, 108:319–338.
- [48] Ji S, Martignole J. Ductility of garnet as an indicator of extremely high temperature deformation[J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16:985–996.
- [49] Mainprice D, Bascou J, Cordier P, et al. Crystal preferred orientations of garnet: Comparison between numerical simulations and electron back-scattered diffraction (EBSD) measurements in naturally deformed eclogites[J]. Journal of Structural Geology, 2004:2089–2102.
- [50] Terry M P, Heidelbach F. Deformation-enhanced metamorphic reactions and the rheology of high-pressure shear zones, Western Gneiss Region, Norway[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2006, 24:3–18.
- [51] den Brok B, Kruhl J H. Ductility of garnet as an indicator of extremely high temperature deformation: Discussion[J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18:1369–1373.
- [52] Storey C D, Prior D J. Plastic deformation and recrystallization of garnet: A mechanism to facilitate diffusion creep [J]. Journal of Petrology, 2005, 46:2593–2613.
- [53] Terry M P, Heidelbach F. Superplasticity in garnet from eclogite facies shear zones in the Haram Gabbro, Haramsoya, Norway[J]. Geology, 2004, 32:281–284.
- [54] 苏文, 从柏林, 游振东. 石榴子石塑性变形的机制: 水解弱化[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31:999–1005.
- [55] Liu X W, Jin Z M, Jin S Y, et al. Differences of deformation characteristics of garnets from two types of eclogites: Evidence from TEM study[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21:411–420.
- [56] Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes[J]. Mineralogical Maga-

- zine, 1988, 52:535–550.
- [57]Kirby S H, Kronenberg A K. Deformation of clinopyroxenite – evidence for a transition in flow mechanisms and semibrittle behavior [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89:3177–3192.
- [58]Boland J N. Deformation of clinopyroxenite – evidence for a transition in flow mechanisms and semibrittle behavior –comment [J]. *Journal of Geophysical Research–Solid Earth and Planets*, 1986, 91: 5023–5025.
- [59]Raterron P, Jaoul O. High –temperature deformation of diopside single-crystal .1. Mechanical data[J]. *Journal of Geophysical Research–Solid Earth and Planets*, 1991, 96:14277–14286.
- [60]Raleigh C B, Kirby S H, Carter N L, et al. Slip and clinoenstatite transformation as competing rate processes in enstatite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76:4011–4022.
- [61]Ross J V, Nielsen K C. High –temperature flow of wet polycrystalline enstatite[J]. *Tectonophysics*, 1978, 44:233–261.
- [62]Mackwell S J. High –temperature rheology of enstatite – implications for creep in the mantle[J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18:2027–2030.
- [63]Stöckhert B, Renner J. Rheology of crustal rocks at ultrahigh pressure[M]//Hacker B R, Liou J G. When continents collides: Geodynamics and geochemistry of ultrahigh –pressure rocks. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1998: 57–95.
- [64]Buatier M, Van Roermund H L M, Drury M R, et al. Deformation and recrystallization mechanisms in naturally deformed omphacites from the Sesia–Lanzo zone–geophysical consequences[J]. *Tectonophysics*, 1991, 195:11–27.
- [65]Lorimer G W, Spooner E T C, Champnes Pe. Dislocation distributions in naturally deformed omphacite and albite[J]. *Nature–Physical Science*, 1972, 239:108–109.
- [66]Nicolas A, Poirier J P. Crystalline plasticity and solidstate flow in metamorphic rocks[M]. New York: Wiley, 1976.
- [67]Mainprice D, Nicolas A. Development of shape and lattice preferred orientations–application to the seismic anisotropy of the lower crust [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 11:175–189.
- [68]Raterron P, Doukhan N, Jaoul O, et al. High temperature deformation of diopside iv: Predominance of {110} glide above 1000°C [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1994, 82:209–222.
- [69]Boundy T M, Fountain D M, Austrheim H. Structural development and petrofabrics of eclogite facies shear zones, Bergen Arcs, Western Norway –implications for deep crustal deformational processes [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1992, 10:127–146.
- [70]Bascou J, Barruol G, Vauchez A, et al. EBSD –measured lattice –preferred orientations and seismic properties of eclogites [J]. *Tectonophysics*, 2001, 342:61–80.
- [71]Erambert M, Austrheim H. The effect of fluid and deformation on zoning and inclusion patterns in poly –metamorphic garnets [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993, 115:204–214.
- [72]Philippot P. ‘Crack seal’ vein geometry in eclogitic rocks. Formation de veines par fracturation incrémentale et remplissage progressif dans les conditions du métamorphisme écolitique [J]. *Geodinamica Acta*, 1987, 1:171–181.
- [73]Kurz W. Constriction during exhumation: Evidence from eclogite microstructures[J]. *Geology*, 2005, 33:37–40.
- [74]Kurz W, Jansen E, Hundenborn R, et al. Microstructures and crystallographic preferred orientations of omphacite in alpine eclogites: Implications for the exhumation of (ultra–) high –pressure units[J]. *Journal of Geodynamics*, 2004, 37:1–55.
- [75]Davidson P M, Burton B P. Order–disorder in omphacitic pyroxenes; a model for coupled substitution in the point approximation[J]. *American Mineralogist*, 1987, 72:337–344.
- [76]van Roermund H L M, Lardeaux J M. Modification of antiphase domain sizes in omphacite by dislocation glide and creep mechanisms and its petrological consequences[J]. *Mineralogical Magazine*, 1991, 55:397–407.
- [77]Abalos B, Azcarraga J, Ibaguchi J I G, et al. Flow stress, strain rate and effective viscosity evaluation in a high –pressure metamorphic nappe (Cabo Ortegal, Spain)[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1996, 14:227–248.
- [78]Blanchin M G, Bursill L A, Lafage C. Deformation and microstructure of rutile[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A—Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1990, 429: 175–202.
- [79]Blanchin M G, Faisant P. High –temperature compression in oxygen atmosphere of rutile TiO₂ single –crystals [J]. *Revue De Physique Appliquee*, 1979, 14:619–627.
- [80]Blanchin M G, Fontaine G. Transmission electron –microscope observations of deformed rutile (TiO₂)[J]. *Physica Status Solidi A—applied Research*, 1975, 29:491–501.
- [81]Blanchin M G, Fontaine G, Piccard G, et al. Crystallographic shear structures in rutile[J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1979, 58: 347–347.
- [82]Tullis T E. The use of mechanical twinning in minerals as a measure of shear –stress magnitudes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85:6263–6268.