柯石英榴辉岩相变质构造岩：超高压变质岩构造形迹

赵中岩 方爱民 俞良军

(中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化实验室, 北京 100029. E-mail: zyz86@hotmail.com)

摘要 青岛仰口湾出露了一套超高压韧性剪切混杂岩. 混杂岩由弱变形的岩块和高度塑性流变的糜棱岩组成. 超高压变质构造岩包括强变形的和糜棱岩化的榴辉岩. 柯石英在构造岩中以石榴石和绿辉石包裹体和粒间矿物的形式出现, 表明构造变形发生在柯石英的稳定域(800~850℃, > 30 GPa), 属上地幔范围. 柯石英呈短柱状和浑圆状, 具有波状消光和裂纹, 表现了以脆性变形为主的特点. 石榴石也以脆性破裂为主, 只有少量的细颈化和拉长. 绿辉石普遍被拉长, 并具有很强的定向排列, 波状消光, 亚晶粒和动态重结晶构造, 以塑性流变为特点. 超高压变质构造岩可能是在超高压变质岩折返的早期在剪切构造带中形成的, 其运动方向指示了超高压变质岩片折返的运动方向.

关键词 变质构造岩 超高压变质岩 柯石英 榴辉岩

变质构造岩是岩石在不同温度和压力条件下, 在构造应力的作用下, 发生构造变形的产物, 因而记录了其形成的温压条件和构造变形历史. 柯石英榴辉岩相变质构造岩是大陆壳在深俯冲和快速折返的过程中, 在超高压变质环境下, 产生的构造岩. 其形成的深度在超过 80 km 的上地幔, 压力大于 2.7 GPa, 温度高于 700℃. 1984 年以来, 随着超高压变质岩的不断发现和研究, 特别是岩石学和地球化学研究的深入, 人们对大陆深俯冲和快速折返的认识不断地深化. 在研究中最受关注的问题是大陆壳如何被俯冲到地幔的深度又返回地表的. 这一问题的解答依赖变质岩石学、地球化学、同位素年代学和构造地质学等多学科综合研究. 超高压变质带的构造地质特征、变形和变质历史以及流变学研究可以为大陆深俯冲和折返的构造模式提供重要依据. 阿尔卑斯超高压变质带构造的研究表明现存的构造形成于绿片岩相的变质环境, 而超高压变质岩变形微弱^[1,2]. 大别山超高压变质带的构造主要形成在角闪岩相变质环境, 部分榴辉岩块保存了榴辉岩相条件下形成的构造形迹^[3,4]. 一些学者认为这是由于超高压变质岩构造已经被后期的变形和变质作用所改造. 也有学者认为超高压变质岩的变形可能局限在韧性剪切带中, 而大部分超高压变质岩未遭受强烈的变形, 只是这种超高压韧性剪切带尚未被发现^[1,2,5], 有待进一步工作证实. 对超高压变质矿物, 如柯石英、石榴石、硬玉和绿辉石等的流变学研究, 因其在了解大陆壳岩石在深俯冲和折返过程中的流变学行为方面的重要意义而受到广泛的关注. 在高温高压条件下变形实

验研究已经提供了柯石英、硬玉、绿辉石和石榴石等矿物的流变学数据^[5,6]. 而有关石榴石、绿辉石和柯石英在天然变形的构造岩中的显微构造和流变特点的报道很少. 寻找在超高压变质条件下形成的构造形迹, 研究其变形特点, 是超高压变质岩研究的一个重要方面. 本文初步报道在苏鲁超高压变质带的仰口地区发现柯石英榴辉岩相变质构造岩及其野外产状和显微构造特点. 对该地区的深入研究尚在进行之中.

1 仰口超高压变质岩构造地质特征

在苏鲁超高压变质带是大别-苏鲁超高压变质带的东段, 从江苏的东海县经山东的日照、胶南、青岛、海阳, 至威海市, 在长约 500 km, 宽数十公里范围内, 发现了大量的柯石英榴辉岩相超高压变质的证据^[7~12]. 仰口的超高压变质岩出露在青岛东北大约 60 km, 崂山花岗岩体东北仰口镇海边(图 1), 面积不到 1 km².

李曙光等人^[13]曾在该区做了岩石学研究, 并称之为榴辉岩相蛇绿混杂岩. 进一步研究证明该区岩石是经历了柯石英相超高压变质作用^[3,11,12]的深俯冲陆壳的一部分. 该区的超高压变质岩可划分为两个构造地质单元(图 1): 构造整合地质单元和构造非整合地质单元(超高压韧性剪切混杂岩). 构造整合地质单元由互层状花岗片麻岩、副片麻岩、退变质榴辉岩和超基性岩等超高压变质岩组成, 与苏鲁超高压变质带其他地区的超高压变质岩基本相同. 花岗片麻岩的矿物共生组合为钾长石、斜长石、石英、云母、

图 1 仰口超高压变质岩地质图

1. 片麻岩; 2. 超基性岩; 3. 退变质榴辉岩; 4. 石英斑岩岩脉; 5. 榴辉岩; 6. 糜棱岩化榴辉岩; 7. 花岗片麻岩; 8. 花岗质糜棱岩

角闪石和少量石榴石。片麻岩中锆石含有柯石英的包裹体, 指示了超高压变质历史^[11]。超基性岩中榴辉岩块的石榴石具有单斜辉石和金红石等矿物的出溶纹, 表明其可能曾经被俯冲到 200 km 以下的深度^[14]。副片麻岩以含石榴石云母石英岩为主, 矿物共生组合为石英、白云母和少量石榴石。退变质榴辉岩由角闪石、石榴石和斜长石组成, 石榴石含有柯石英假象包裹体, 指示其经历过超高压变质作用。这些互层状片麻岩中可以识别出两期主要褶皱变形和 1 期混合岩化作用。第 1 期表现为等斜褶皱, 发育了与成分层相平行的透入性片麻理(S_1 平行于 S_0)。片麻理由云母、角闪石、石英和长石的定向排列组成。第 2 期褶皱以轴面近直立、枢纽近水平的紧闭褶皱为特点。 S_1 片麻理和 S_0 成分层被再一次褶皱, 并且被在转折端发育的 S_2 轴面劈理切割。卷入变形的变质矿物共生组合表明这两期变形发生在角闪岩相变质环境。在这一地质单元中未发现超高压变质期的构造形迹。

超高压韧性剪切混杂岩(构造非整合地质单元)以构造窗的形式出露在互层状超高压片麻岩中。两个构造单元之间, 有一条宽 20~30 cm 的超糜棱岩带。超高压韧性剪切混杂岩由大小不等的变形和未变形的岩块和经受了强烈剪切变形的基质组成, 具有典型的混杂岩“基质包岩块”的特点(block in matrix structure)(图 2(a))。岩块包括钾长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、辉长岩和片麻岩。各类岩块都发生了不同程度的柯石英榴辉岩相变质^[13,12]。变质作用从

部分地保存了岩浆岩结构的岩块核部到全部榴辉岩化的边部逐渐增强^[12]。各块体的变形程度也差异很大。有的岩块具有发育良好的片麻理构造, 局部发育了数厘米宽的小型韧性剪切带, 剪切带切穿了片麻理构造(图 2(b))。剪切带内的糜棱岩具有石榴石和绿辉石矿物共生组合, 表明变形发生在榴辉岩相变质条件下。有的岩块无片麻理并保存了较好的花岗结构, 但原生矿物已经被榴辉岩相矿物取代, 只保留了原生矿物的假晶(图 2(c))。混杂岩岩块在岩性和结构构造上的不同反映了它们在被卷入混杂岩之前经历了不同的变质与变形历史。在岩块的边部, 变形逐渐增强, 岩块内早期的片麻理构造和剪切带被改造, 最终被糜棱岩化, 卷入基质的变形。基质由互层状糜棱岩和超糜棱岩组成, 面理和线理发育。卷入糜棱岩化过程的矿物有绿辉石、石榴石、钾长石、蓝晶石、金红石等超高压变质矿物。在糜棱岩化和强变形的榴辉岩中, 也发现了柯石英和柯石英假象。由于在混杂岩的岩块和基质中都存在超高压变质矿物的共生组合, 剪切变形和构造混杂作用应发生在超高压变质条件下。糜棱岩面理由于受后期褶皱变形的改造和刚性岩块的影响, 产状变化很大, 但总体南倾。线理产状较稳定, 以 40~60° 角南倾。糜棱岩基质中存在两期褶皱: 一期为同剪切期剪切褶皱和鞘褶皱; 另一期为轴面近直立且有水平枢纽的紧闭和等斜褶皱。后者使糜棱岩的线理和面理发生了再褶皱, 其产状和构造式样与构造整合地质单元中第 2 期褶皱相

图 2

(a) 构造混杂岩中未变形的花岗岩团块包裹在糜棱岩中; (b) 构造混杂岩中片麻岩岩块发育良好的片麻理构造和韧性剪切带(钉锤左); (c) 未变形的花岗岩显微构造照片, 长石分解为柱状的蓝晶石(Ky)和粒状的石榴石集合体(Gt), 但还保存长石假晶(Pp)的形态, 照片长边 1.28 mm; 正交偏光; (d) 弱变形的榴辉岩显微照片, 石榴石和绿辉石(Om)未发生明显的定向排列, 照片长边 1.28 mm, 正交偏光

同, 属同一期变形的产物, 变形发生在角闪岩相变质环境。

2 超高压变质构造岩的显微构造特征

构造混杂岩中最大的榴辉岩岩块从核部到边部保存了良好的进变质作用和递进变形的踪迹。岩块的核部是部分榴辉岩化的辉长岩^[12]。岩块的边部过渡为弱变形的榴辉岩、强变形榴辉岩和糜棱岩化榴辉岩。超高压变质构造岩产出在边部强变形带和糜棱岩带中。显微构造研究显示, 弱变形榴辉岩主要由等轴状石榴石和短柱状绿辉石组成, 无明显的形态组构(图 2(d))。绿辉石有波状消光, 亚晶粒不发育。石榴石呈自形和半自形晶, 没有变形。强变形的榴辉岩由石榴石、绿辉石、多硅白云母、柯石英和金红石等超高压变质矿物组成。柱状和片状矿物长轴定向排列, 平行片理面(图 3(a))。石榴石未发生明显的塑性流变, 绿辉石有明显的塑性变形, 呈长柱状, 波状消光, 亚晶界发育(图 3(a))。柯石英以包裹体和粒间晶体存在, 呈浑圆状和短柱状形态, 具有明显的波状

消光, 大部分颗粒有裂纹(图 3(b), (c)), 裂纹不切穿退变的石英反应边和寄主矿物, 表明破裂发生在柯石英矿物的稳定域, 而柯石英退变为石英发生在破裂之后。糜棱岩化榴辉岩的矿物组合与强变形的榴辉岩基本相同。石榴石表现了轻微的塑性变形, 有部分细颈化和布丁化发生(图 3(d)), 大部分表现了明显的脆性破裂的特点。绿辉石则发生了高度塑性流变, 原生的绿辉石假象被剪切拉长, 并被细粒的动态重结晶颗粒取代(图 3(d))。动态重结晶颗粒具有强烈的形态组构, 且具有流动构造的特点, 环绕刚性的石榴石颗粒, 形成眼球状构造。柯石英大多已经退变为石英的多晶集合体, 但仍保存浑圆状颗粒形态, 未发现明显的变形, 说明其变形发生在柯石英退变为石英之前。从强变形的榴辉岩到糜棱岩化榴辉岩是一个递进变形过程, 柯石英以包裹体和粒间晶体形式存在说明变形发生在柯石英榴辉岩相条件下。糜棱岩化榴辉岩中柯石英包裹体以假象存在, 反映了变形可能发生在超高压变质岩折返的早期, 从柯石英的稳定域抬升到石英稳定域的过程, 属于超高压榴辉岩相变质环境。

图 3 超高压变质构造岩的显微构造

(a) 柯石英榴辉岩相构造岩中绿辉石、多硅白云母和蓝晶石长轴定向排列, 形成构造岩的面理, 照片长边 3.16 mm, 正交偏光; (b) 柯石英榴辉岩相构造岩中, 发育在绿辉石间的粒间柯石英, 呈自形晶, 轻微波状消光, 有微裂隙发育, 照片长边 0.3 mm, 正交偏光; (c) 柯石英榴辉岩相构造岩中, 发育在绿辉石中的柯石英包裹体, 呈它形, 短柱状, 外圈已经退变为石英, 柯石英发生脆性破裂, 裂纹不穿过石英圈和绿辉石, 照片长边 0.3 mm, 单偏光; (d) 糜棱岩化榴辉岩, 石榴石被拉长、布丁化, 并断裂, 裂纹不穿过绿辉石, 绿辉石全部动态重结晶为长轴有定向排列的细小颗粒, 照片长边 1.55 mm, 单偏光。Om: 绿辉石; Gt: 石榴石; Co: 柯石英

3 超高压变质构造岩的大地构造意义

对中国苏鲁-大别和欧洲阿尔卑斯含柯石英和金
刚石的超高压变质岩的深入研究为大陆深俯冲和折
返的大陆板块运动提供了越来越多的证据。变质岩
石学研究表明, 超高压变质岩都经历了一个早期的
近等温的快速降压过程和一个晚期的较均匀的降温
降压过程^[9,12,15]。同位素年代学研究表明早期的快速
折返大约发生在 5~10 Ma 的时间范围内^[16,17]。也就是
在 10 Ma 的时间内, 超高压变质岩从大于 100 km 的
地幔深度返回到 20~30 km 的中下地壳, 抬升速率至
少 8~20 mm/a。超高压变质岩快速折返的构造模式是
构造地质学研究 and 关注的重要课题。地质工作者在
研究中国大别-苏鲁超高压变质带基础上建立了各种
构造模式。值得指出, 现存的构造模式基本建立在
对角闪岩和绿片岩相构造研究的基础之上, 代表了晚

期均匀降温降压阶段的构造演化过程。超高压变质
岩折返早期的构造模式的建立, 有待于对柯石英和
榴辉岩相超高压变质岩构造和流变学的研究。仰口
的变质构造岩发育在韧性剪切混杂岩中、柯石英以粒
间矿物、石榴石和绿辉石包体形式出现, 表明剪切变
形发生在柯石英矿物的稳定域, 即温度在 800℃以上,
压力大于 3.0 GPa, 深度应大于 100 km, 属上地幔。
柯石英呈浑圆状和短柱状形态, 并只有轻微的波状
消光, 表明其未发生明显的塑性流变。而柯石英普遍
具有裂纹, 同时裂纹不切穿退变的石英边和寄主矿
物。这些显微构造特征都反映了变形发生在柯石英
的稳定域, 且处于柯石英由塑性变形向脆性变形的
转换阶段, 以脆性变形为主, 是超高压变质岩折返早
期的特征。绿辉石以动态重结晶为主要变形机制, 也
反映了榴辉岩相的变质环境。因此, 仰口的韧性剪切

混杂岩应该形成于超高压变质岩折返早期从柯石英榴辉岩相向石英榴辉岩相转化的超高压变质环境。对其几何学、运动学和流变学的研究,可以帮助我们深入了解超高压变质岩的快速折返机制。

仰口超高压变质岩的两个构造单元与苏鲁超高压变质带的其他地区有很多共同特点。构造整合地质单元与苏鲁地区广泛出露的超高压变质岩在岩性、构造、变质作用等方面相同,代表了超高压变质岩的主体。而超高压韧性剪切混杂岩可能是区域性韧性剪切带的一部分。从莒南到青岛之间长 200 km, 宽 10 km 的范围内,陆续出露了高压和超高压糜棱岩带。这些糜棱岩带无一例外地出现在超高压变质岩的底部,变质相为榴辉岩相或柯石英榴辉岩相。从其与区域超高压变质岩的产状关系和变质程度推测,这些高压和超高压糜棱岩带很可能是超高压变质岩在构造折返过程的早期,在超高压变质岩片底部形成的韧性剪切带,具有拆离构造的性质。这一推测还有待进一步工作证实。仰口的糜棱岩中 S/C 组构造运动学标志指示,超高压岩片向北逆冲。仰口超高压变质构造岩的显微构造反映了超高压变质矿物在超高压变质条件下的流变学特点。柯石英的刚度较大,以脆性变形为主。石榴石的塑性变形较柯石英明显,颗粒有轻微拉长,细颈化和布丁化偶有发现,但仍以脆性破裂为主,表明石榴石也处于脆/塑转换的变形域。绿辉石发生了高度的塑性流变,是柯石英榴辉岩中主要的应变承载矿物(strain accommodating mineral)。具有流动构造的绿辉石被剪切拉长并细粒化和定向排列,表明绿辉石以动态重结晶为应变弱化(strain softening)的主要变形机制。应变分流(strain partitioning)不仅发生在显微构造尺度上,在宏观上,基质与岩块之间,整合构造单元和韧性剪切带之间,应变的局部化和分流都发挥重要的作用。

4 结论

仰口出露的超高压变质构造岩是在柯石英榴辉岩相变质条件下超高压岩石折返过程的早期在韧性剪切带中形成的,是构造折返的有力证据。显微构造研究表明在超高压变质条件下,柯石英和石榴石表现出以脆性变形为主的特点,而绿辉石以塑性变形为主,并以动态重结晶为变形机制。应变在刚性矿物和塑性矿物之间,超高压岩片和剪切带之间发生分流,并集中在柔性带中。

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1999075506)资助。

参 考 文 献

- Henry C, Michard A, Chopin C. Geometry and structural evolution of ultra-high-pressure and high-pressure rocks from the Dora-Maira massif, Western Alps, Italy. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15: 965~981
- Michard A, Henry C, Chopin C. Structures in UHP rocks: A case study from the Alps. In: Coleman R, Wang X, eds. *Ultrahigh Pressure Metamorphism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 132~158
- Wallis S R, Ishiwatari A, Hirajima T. Occurrence and field relationships of ultrahigh-pressure granitoid and coesite eclogite in the Su-lu terrain, eastern China. *Journal of the Geological Society, London*, 1997, 154: 45~54
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L. What brought them up? Exhumation of the Dabieshan ultrahigh-pressure rocks. *Geology*, 1995, 23: 743~746
- Stöckhert B, Renner J. Rheology of crustal rocks at ultrahigh pressure. In: Hacker B R, Liou J G, eds. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh Pressure Rocks*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 57~95
- Jin Z M, Zhang J, Green H W. Eclogite rheology: Implications for subducted lithosphere. *Geology*, 2001, 29: 667~670
- Hirajima T, Ishiwatari A, Cong B, et al. Coesite from Mengzhong eclogite at Donghai County, northeastern Jiangsu Province, China. *Mineralogical Magazine*, 1990, 54: 579~583
- Enami M, Zang Q. Quartz pseudomorph after coesite in eclogite from Shangdong Province, east China. *American Mineralogist*, 1990, 75: 381~386
- Wang Q, Ishiwatari A, Zhao Z. Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China: A preliminary study. *European Journal of Mineralogy*, 1993, 5: 141~152
- Yang J, Godard G, Kienast J R, et al. Ultrahigh-pressure (60 kb) magnesite-bearing garnet peridotites from northeastern Jiangsu, China. *J Geology*, 1993, 101: 541~554
- Ye K, Yao Y, Katayama I, et al. Large areal extent of ultra-high-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: New implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 2000, 52: 157~164
- Zhang R Y, Liou J G. Partial transformation of gabbro to coesite bearing eclogite from Yangkou, the Sulu terrain, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15: 183~202
- Li S, Sun W, Ge N, et al. Eclogite facies ophiolite mélange in Qingdao: Its petrologic evidence and P-T path. *Acta Petrologica Sinica*, 1992, 8: 351~362
- Ye K, Cong B, Ye D. The possible subduction of continental material to depth greater than 200 km. *Nature*, 2000, 407: 734~736
- Okay A I. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrain: Dabie Shan, China. *European Journal of Mineralogy*, 1993, 5: 659~675
- Gebauer D, Schertl H P, Brix M, et al. 35 Ma old ultrahigh pressure metamorphism and evidence for very rapid exhumation in the Dora Maira massif, Western Alps. *Lithos*, 1997, 41: 5~27
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161: 215~230

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-12-946>

(2002-02-26 收稿, 2002-04-09 收修改稿)