

榴辉岩中石英出溶体的拉曼光谱学研究及其构造意义

王璐¹, 金振民², 何谋春³

(1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074;
3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 利用拉曼光谱学和费氏台方法对若干地区超高压榴辉岩中柯石英和榴辉岩中石英出溶体的超显微构造特征进行了研究. 研究表明, 石榴石(或绿辉石)中柯石英向石英相变是一个连续变化过程. 绿辉石中石英出溶体和主晶具有一定的晶体学拓扑关系, 即石英出溶体长轴有两个展布方向: 平行于绿辉石(100)裂理面和平行于绿辉石(-101)面. 目前, 部分学者推断榴辉岩绿辉石中石英出溶体可作为超高压变质作用的标志. 笔者认为, 棒状定向石英在绿辉石中出溶的温压条件和出溶机理尚未查明. 因此, 需加强过量二氧化硅单斜辉石出溶机理的超高压实验研究, 从而为证实石英出溶体作为超高压标志提供实验定量约束.

关键词: 超高压榴辉岩; 柯石英; 石英出溶体; 拉曼光谱.

中图分类号: P588 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)02-0143-08

作者简介: 王璐(1978—), 女, 1999年毕业于中国地质大学(武汉)地球科学学院, 获学士学位, 主要从事超高压岩石显微构造研究.

0 引言

柯石英是石英的同质异构体, 两者成分均为 SiO_2 , 但前者的密度 (2.92 g/cm^3) 远大于后者 (2.65 g/cm^3), 是石英的超高压相. 柯石英形成的初始温度和压力条件为 $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$, $2.4 \sim 2.8 \text{ GPa}$ (相当于地下 $80 \sim 100 \text{ km}$ 深度的静岩压力). 1953 年, Coes^[1] 首先在高温高压条件下合成了柯石英. 1984 年, Chopin^[2] 和 Smith^[3] 首次在西阿尔卑斯的 Dora Maira 地块高级泥质蓝片岩和挪威西部(加里东造山带)白云石—榴辉岩中发现了石榴石和单斜辉石中的柯石英包体. 而后我国学者 Xu^[4]、Wang 等^[5] 和 Okay 等^[6] 也相继在大别山榴辉岩中发现了柯石英. 柯石英包体的发现说明低密度表壳岩 ($2.6 \sim 2.9 \text{ g/cm}^3$) 可以在大陆碰撞造山过程中俯冲到地下 90 km 以下的高密度上地幔 ($3.2 \sim 3.4 \text{ g/cm}^3$) 深处, 然后又快速折返至地表^[7]. 因此人们普遍把柯石英作为代表超高压变质作用的特征矿物.

大别山是秦岭—桐柏造山带的东延部分, 东段被郯—庐断裂带切割, 在地质位置上, 它位于华北地

块和扬子地块之间, 具有复杂的构造演化历史. 自从在这些古老的变质岩系中发现含柯石英和微粒金刚石的榴辉岩以来, 大别山所经历的超高压变质作用就成为地质科学家们关心的热点^[6,8]. 然而人们仅在超高压单元出露好的南大别山发现了超高压变质作用的标志——柯石英和金刚石, 北大别山至今却没有发现含柯石英榴辉岩^[9~12]. 魏春景等^[13]、刘贻灿等^[14]、徐树桐等^[15] 在北大别山发现了不含柯石英的榴辉岩和退变榴辉岩, 因此北大别山是否经历了超高压变质作用一直是大家关注的问题. 最近, 一些学者相继在榴辉岩的单斜辉石中发现石英出溶体^[3,16~22], 部分学者认为早期的单斜辉石在 $p \geq 2.5 \text{ GPa}$ 和 $T = 927 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下含有稳定的 Ca—Eskola 组分或富硅组分, 压力降低导致二氧化硅呈针状体出溶. 因此可以将这种出溶结构作为母岩曾经经历超高压变质作用的证据. Gayk 等^[18] 和 Katayama 等^[19] 分别在德国 Münchberg 地块高压麻粒岩和哈萨克斯坦 Kokchetav 地块超高压榴辉岩中也发现了单斜辉石中存在针状石英出溶体. 他们计算出早期单斜辉石中含有 $10 \text{ mol}\% \text{ Ca—Eskola}$ 组分, 并认为该组分的稳定性随压力降低而降低, 从而导致石英出溶. Tsai 等^[16]、苏文等^[20] 则通过岩石学的研究也认为

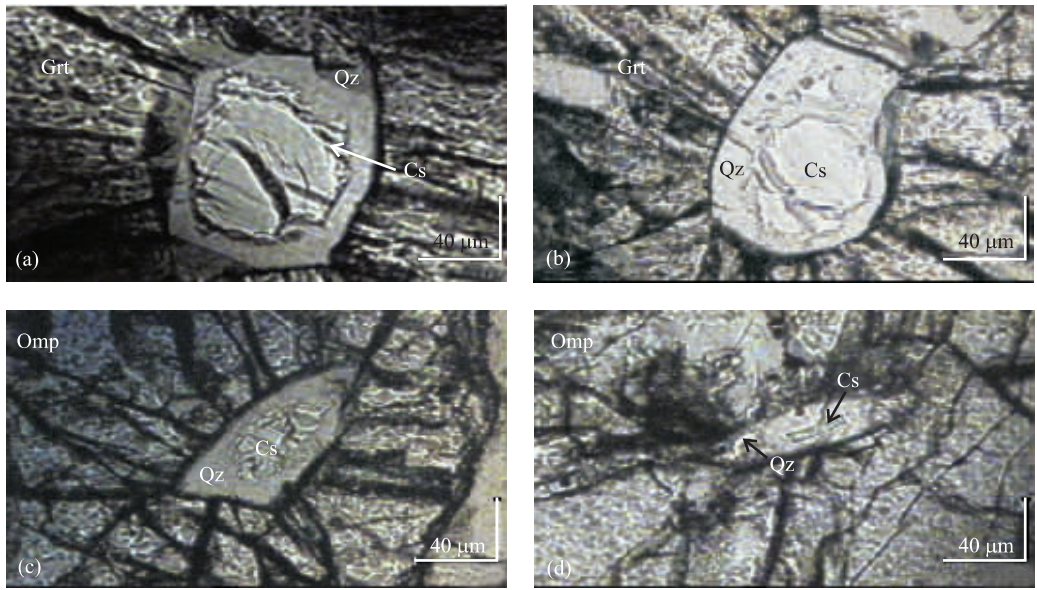


图 1 大别山榴辉岩绿辉石、石榴石中柯石英包体显微照片(透射光模式)

Fig. 1 Micrograph of coesite inclusions in omphacite and garnet from eclogites, Southern Dabie, Central China
a, c. HHW-1, 榴辉岩, 黄花屋; b, d. SM-3, 榴辉岩, 石马. Qz. 石英; Cs. 柯石英; Omp. 绿辉石; Grt. 石榴石

针状石英出溶体为母岩遭受过超高压变质的标志, 从而证明北大别山也有超高压榴辉岩存在. 因此详细研究榴辉岩中的柯石英包体和石英出溶体特征对研究大别山的构造变形变质历史和折返过程可能具有重要的理论意义.

本文研究的主要目的是: (1)对柯石英向石英相变过程中的拉曼光谱进行系统对比; (2)利用拉曼光谱学和费氏台方法对榴辉岩绿辉石中石英出溶体进行拉曼光谱特征研究和石英出溶长轴方向与主晶绿辉石之间拓扑关系研究; (3)通过以上的实验研究探讨石英出溶体能否作为超高压变质作用的标志.

1 实验研究样品

本次研究采用样品分别来自以下 2 个地区:

(1)大别山榴辉岩. HHW-1, SM-3, GH-4, RP-28 样品分别取自南大别山黄花屋、石马、港河和双河的榴辉岩. 榴辉岩为灰绿色, 中粗粒等粒结构, 面理比较发育. 主要由石榴石(45%~50%)、绿辉石(40%~50%)及少量的石英、金红石和多硅白云母组成. 前 3 块样品为含柯石英榴辉岩, 本次研究对它们进行了柯石英包体的拉曼光谱学测试. 柯石英包体在镜下以高于石英的突起, 较低的干涉色和包体周围的放射状裂纹为鉴定特征. 图 1 所示为大别山地区榴辉岩中的柯石英残余包体, 包体中心突起

较高部分为柯石英, 包体边部为相变石英. 柯石英的寄主矿物分别为绿辉石、石榴石. 包体大小为 10~50 μm , 平均 30 μm . RP-28 则为绿辉石中含石英出溶体的大别山双河榴辉岩, 样品中未出现柯石英包体.

(2)瑞士 Arami 地区. 样品 A99 取自瑞士阿尔卑斯 Arami 地区超高压地体石榴石二辉橄榄岩. 石榴石呈红紫色, 内部发育大量针状金红石出溶体和微小定向排列的自形一半自形钙镁闪石—浅闪石晶体, 常伴随斜方辉石—尖晶石后成合晶或菱镁矿、磷灰石和 Fe—Ni 硫化物. 苹果绿色单斜辉石呈包体或片状发育于石榴石内部及边缘^[23]. 本次研究样品石榴石颗粒 2.4 cm×1.5 cm, 内部含有 0.5 cm×1.1 cm透辉石包体, 包体内发育大量定向排列石英出溶体(如图 2d).

2 实验条件和方法

激光拉曼光谱(laser raman spectrum, 简称 LRM)是一种光对分子的联合散射光谱, 也是提供分子成分(不是元素成分)和分子配位体结构信息的光谱. 它作为红外光谱学的互补技术, 不但能提供矿物分子基团结构单元及配位体对称性信息, 同时对矿物中离子的有序—无序占位、缺位、缺陷等精细结构反映灵敏, 可以说, 拉曼光谱首先是一种“指纹”光谱, 使每一种物质对应其特定的光谱, 因此可以区分

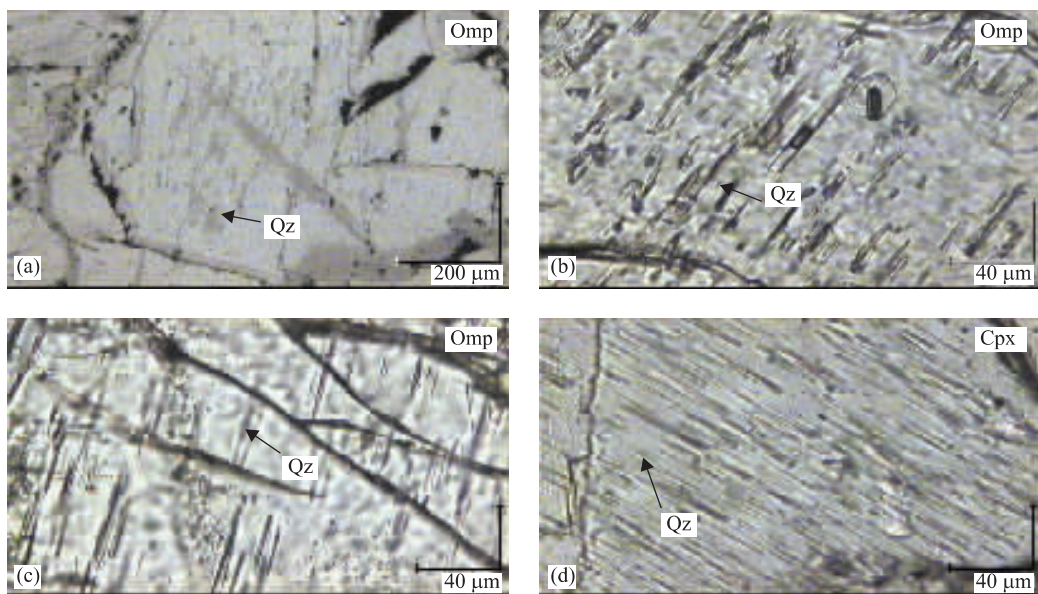


图 2 榴辉岩单斜辉石中石英出溶体显微照片

Fig. 2 Micrograph of quartz exsolutions in clinopyroxenes of eclogites

a, b, c 为南大别山双河榴辉岩(RP-28); d 为瑞士 Arami 石榴石二辉橄榄岩中石榴石的单斜辉石 Cpx 包体(A99); a 为反射光模式, b, c, d 为透射光模式

同质异构物质(如柯石英和石英)。尤其是,光谱分析不会破坏样品,所以普通的双面磨光薄片就足够进行观察和鉴定。因此,利用 LRM 技术对高压变质岩中柯石英、金刚石和文石等的鉴定已经成为该仪器在岩石学研究应用中的典范。激光拉曼探针(LRM)作为一项新兴的非破坏性原位微区分析技术是 20 世纪 70 年代开始渗入地学领域的。我国在这方面起步较晚,但从 20 世纪 80 年代初起我国矿物学界已开始重视这一领域的工作,徐培苍等^[24,25]是我国最早对柯石英进行拉曼光谱研究的学者之一。

本次实验所使用仪器为中国地质大学国土资源部矿产资源定量预测及勘察评价开放研究实验室的 Renishaw RM-1000 型显微激光拉曼光谱仪。激发光源为氩离子激光,波长 514.5 nm。样品上的激光功率为 3.4 mW,激光光斑在 1.5 μm 左右,狭缝为 12.5 μm。所分析样品均为普通双面抛光薄片,主要研究石英出溶体以及柯石英向石英相变过程中的拉曼光谱学特征。

3 实验结果

3.1 柯石英向石英相变过程的拉曼光谱学特征

变质矿物包体由于记录了更早期的变质历史,且由于受到变斑晶包裹而保留下来,因此可以提供

特殊地体变质反应和生长历史的定性和定量信息^[26]。所以对超高压变质岩区的研究而言,包裹在主矿物中的残余包体对解释母岩矿物组合之前的变质记录起着尤为重要的作用。柯石英残余的主峰拉曼位移为 521 cm^{-1} ,石英的主峰拉曼位移则为 464 cm^{-1} ^[27~29]。笔者对 20 个柯石英残余包体从中心到边部进行了 45 个点位的系统拉曼光谱研究。现以港河榴辉岩(GH-4)石榴石中的柯石英包体为例进行说明(图 3a)。从包体中心向柯石英边部,到柯石英与相变石英的交界处,最后到包体中相变石英进行剖面式打点。现选取有代表性的 1, 4, 5 号点进行说明。柯石英残余的系列拉曼谱线表现特征为:在包体核部,柯石英与石英的主峰共存,但柯石英主峰 521 cm^{-1} 占主导地位。随着往边部推移,柯石英主峰逐渐减弱,到相变石英处则完全消失。与之相反,石英主峰(464 cm^{-1})的拉曼强度逐渐增强,直至最显著。即使在相变石英处也可出现柯石英的特征主峰(图 3c)。该现象在保存较好的柯石英残余包体中有重复性。

3.2 石英出溶体的拉曼光谱学特征

光学显微镜下观测表明,石英出溶体呈针状、棒状,大多在主晶绿辉石的核部出现,出溶体长度为 20~50 μm,宽 2~3 μm,近似平行于绿辉石解理缝方向排列(图 2)。在有石英出溶的绿辉石中,石英出

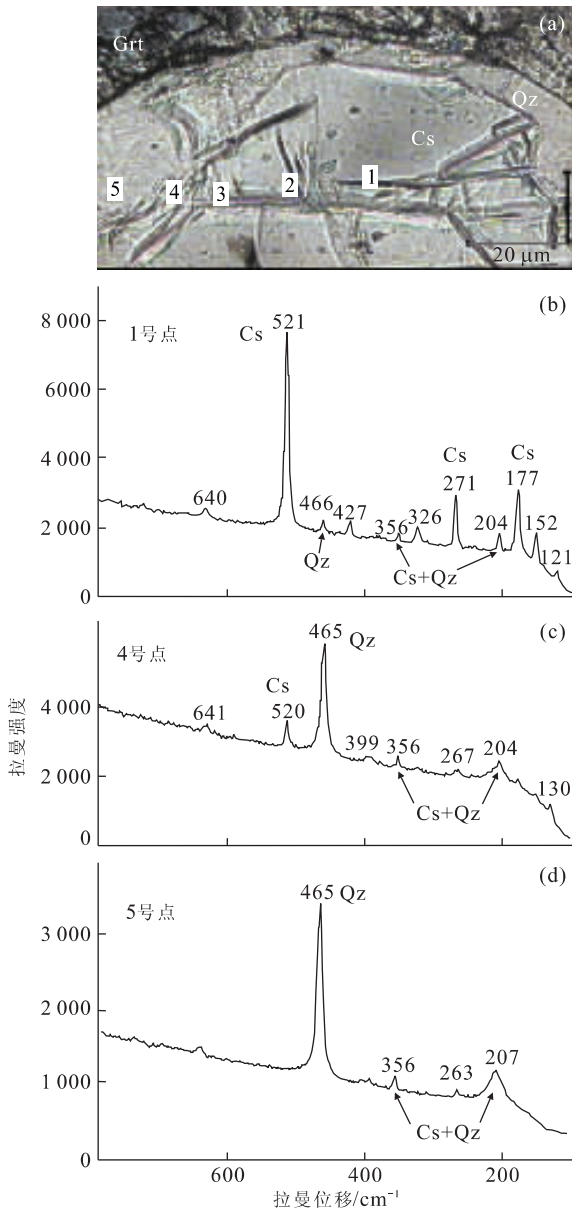


图 3 榴辉岩石榴石中柯石英向石英相变的拉曼图谱 (GH-4, 港河, 南大别山)

Fig. 3 Raman spectrum showing phase transformation of coesite to quartz in garnet from eclogite

a 为柯石英包体的显微照片 (透射光模式) 及系统拉曼测试点位示意图; b, c, d 分别为 1, 4, 5 号拉曼测试点位的拉曼图谱

溶体可占主晶面积的 10%~30%。

在对柯石英包体从中心到边部的拉曼测试过程中, 发现相变石英处拉曼图谱中也可同时出现石英与柯石英的特征主峰。进一步对南大别山榴辉岩 (RP-28) 绿辉石中的针状石英出溶体进行拉曼光谱研究, 试图以类比的方法, 探明石英出溶体拉曼图谱中是否出现柯石英的特征谱峰。通过对 7 个石英出溶体进行 13 个点位的初步研究结果表明, 该出溶

体的拉曼图谱中仅出现石英 (464 cm^{-1}) 和主晶单斜辉石 (352 cm^{-1}) 的特征峰, 但没有出现超高压柯石英的特征峰 (图 4)。

3.3 晚于榴辉岩的脉状石英的拉曼光谱学特征

对南大别山五庙切穿超高压榴辉岩的石英脉 (Wu-5) 也进行了拉曼光谱学研究。野外穿插关系表明该石英脉晚于榴辉岩。同时也将南大别山榴辉岩和瑞士 Arami 地区的石英出溶体拉曼图谱与脉状石英的拉曼图谱进行比较, 结果表明, 三者的拉曼图谱信息一致, 即除主晶单斜辉石的特征主峰外, 仅出现石英的特征主峰, 没有超高压柯石英峰值的信息 (图 5)。

3.4 石英出溶体与绿辉石晶格方向拓扑关系

为查明石英出溶体长轴和主晶绿辉石之间的拓扑关系, 利用费氏台方法对双河榴辉岩样品 (RP-28) 12 个颗粒单斜辉石中的 80 条石英出溶体长轴方向进行测定 (图 6)。图 6 以绿辉石的结晶学 a, b, c 轴为基图, 三个轴分别对应绿辉石晶体 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 方向。投影结果表明, 石英出溶大致沿两个方向分布, 方向 I 平行于 (100) 裂理面, 而方向 II 则近于平行 (-101) 面。

4 讨论和结论

柯石英向石英相变的拉曼图谱表现出柯石英和石英中都有两者的特征峰共存, 从强度变化上看, 柯石英从核心到边部的主峰谱线强度逐渐减弱, 石英的谱线则相应增强。这说明柯石英中可能存在石英的微晶, 为柯石英早期相变产物; 柯石英向石英的相变是个连续的变化。根据柯石英向石英相变速率的实验研究^[30, 31], 柯石英包体在减压过程中能支撑住很高内压而保留下来, 这说明榴辉岩的折返速率很快, 后期水的影响很小。如果水活度增加, 会加速柯石英向石英的相变, 从而使柯石英难以保存。

榴辉岩绿辉石中石英出溶体的拉曼图谱中只有石英的特征峰和石英-柯石英的弱混合峰出现。将该图谱与晚于榴辉岩的脉状石英拉曼图谱进行比较, 脉状石英的图谱中也同样只出现石英的特征峰和石英柯石英的弱混合峰。石英出溶长轴方向与绿辉石晶格拓扑关系的研究表明出溶体石英主要沿绿辉石的 (100) 裂理面和 (-101) 面分布。对于上述现象有以下两种可能的解释:

(1) SiO_2 初始出溶体可能为柯石英, 但由于出

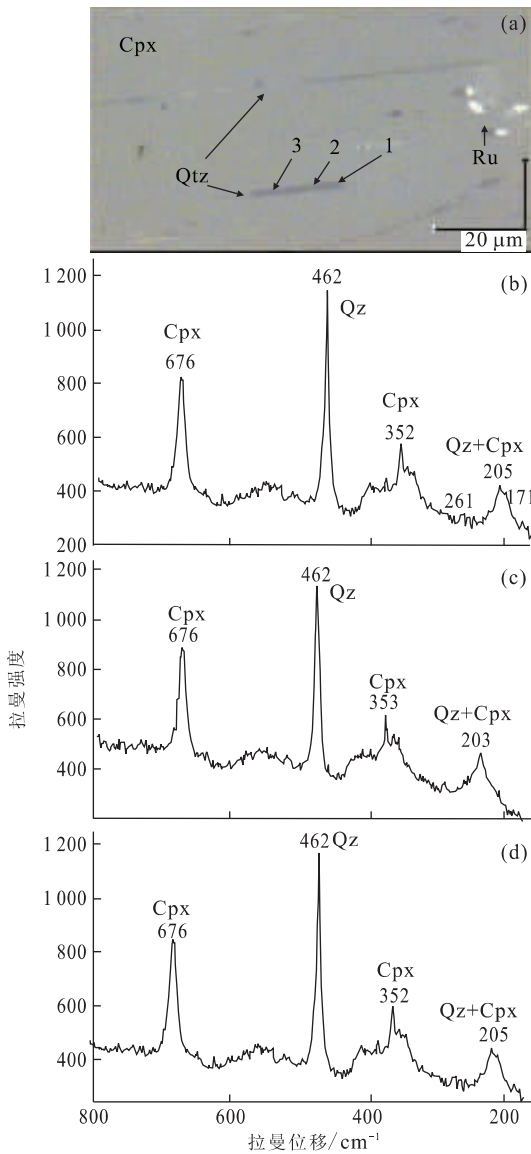


图 4 绿辉石中石英出溶体的拉曼图谱(RP-28,榴辉岩,双河)
 Fig. 4 Raman spectrum of quartz exsolutions in omphacite
 a 为石英出溶体的显微照片(反射光模式)及系统拉曼测试点位示意图;b, c, d 图分别为 1, 2, 3 号拉曼测试点位的拉曼图谱

溶时沿解理缝或裂理方向,而解理缝通常为结晶时应力最为薄弱的方向,因此在折返过程中柯石英已经全部退变为石英.最近,章军峰^①在美国加州大学(Riverside)进行榴辉岩高温高压流变学实验研究,在 3 GPa 围压和 1 200 K 条件下发现绿辉石中出现二氧化硅出溶,它说明至少可在 3 GPa 的条件下形成二氧化硅出溶体.

(2)二氧化硅出溶时的温压条件位于石英的稳定域,因而只有石英出溶体出现.

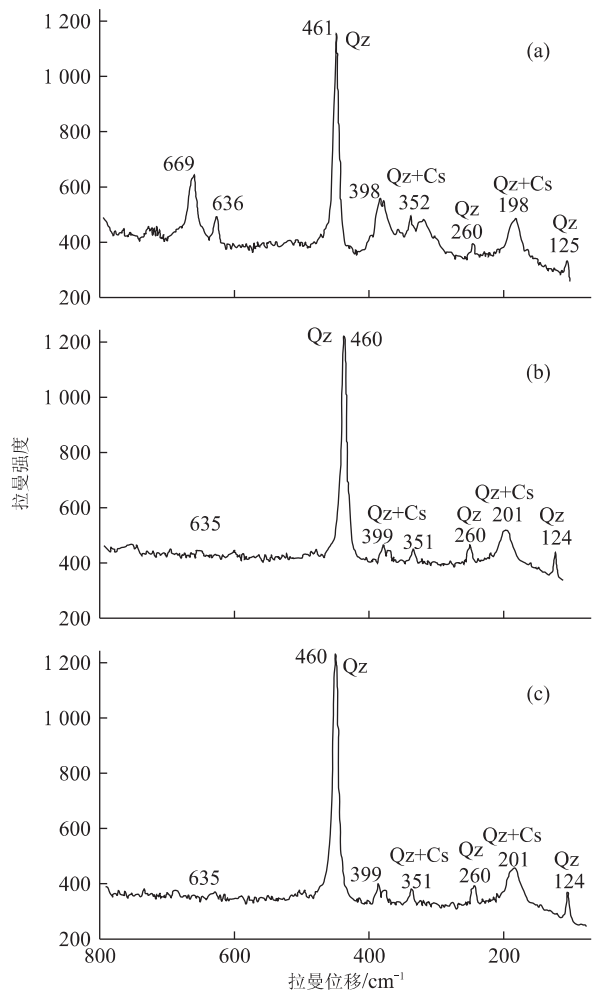


图 5 单斜辉石中石英出溶体与穿插超高压榴辉岩的后期石英脉的拉曼图谱对比

Fig. 5 Raman spectrum comparison between quartz exsolution in Cpx and later quartz vein cutting UHP eclogite

a. 中透辉石包体的石英出溶体拉曼图谱(A99,石榴石二辉橄榄岩,瑞士 Arami); b. 中石英出溶体拉曼图谱(RP28,榴辉岩,大别双河); c. 穿插超高压榴辉岩的后期石英脉拉曼图谱(Wu-5,大别五庙)

北大别山由于没有发现含柯石英榴辉岩而一直被认作是非超高压岩区.近年来, Tsai 等^[16]、苏文等^[20]分别在北大别山榴辉岩和石榴辉石岩中发现了单斜辉石中的二氧化硅出溶体.张立飞等^②在新疆西天山超高压变质榴辉岩中也发现同样现象.他们认为该出溶结构是超高压变质的标志之一.上述学者根据前人的理论^[19,32]推测:过量的硅加入富钠的单斜辉石可以使辉石更加稳定,并使辉石在高压

②张立飞, David J Ellis, 姜立波, 等. 新疆西天山超高压变质榴辉岩. 大陆的深俯冲、拆离和减薄作用学术研讨会论文摘要, 2001.

①与加利福尼亚大学地质系(Riverside)章军峰的通讯交流, 2002.

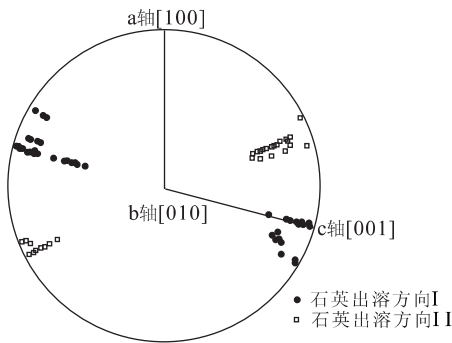


图 6 石英出溶长轴方向与绿辉石晶格方向的拓扑关系

Fig. 6 Topological relationship between the long-axis quartz of exsolutions and omphacite lattice direction

条件下的稳定域扩大,压力降低时导致石英的出溶。因此在变质峰期的单斜辉石中,Ca—Escola 成分通过退变质反应而分解成石英(出溶体形式): $2\text{Ca}_{0.5}\square_{0.5}\text{AlSi}_2\text{O}_6 \rightarrow \text{CaAl}_2\text{SiO}_6 + 3\text{SiO}_2$ 。从而说明俯冲岩石或表壳岩在高温高压条件下形成 Ca—Escola 单斜辉石,而含有空位的单斜辉石与上地幔深处俯冲板片物理—化学性质有重要联系^[19]。富存于单斜辉石中过量硅究竟是在何种温压条件下出溶,是在超高压变质峰期前,变质峰期还是变质峰期后?至今还没有实验岩石学的直接证据,也没有获得出溶体的特征性显微构造。例如 Mao^[33]的实验表明,硬玉—Ca Tschermak 单斜辉石在 4 GPa 和 1 100~1 700 °C 条件下至少可以溶解 7.5% 的过量 SiO_2 ,而且 SiO_2 含量在这种辉石中随压力增加而增加。前苏联学者 Khanukhova 等^[34]曾在温度 1200 °C 和围压 3.5 GPa 条件下,对 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 - \text{CaAl}_2\text{SiO}_6 - \text{SiO}_2$ 体系进行了实验,其实验亚固相产物为单斜辉石、石榴石和柯石英(或石英),固溶体中显示石英过剩现象。最近 Dobrzhinetskaya 等^[21]以阿尔卑斯 Arami 榴辉岩为例,根据石榴石—单斜辉石的 $\text{Fe}^{2+} - \text{Mg}$ 交换温度计和相应热力学数据计算,认为单斜辉石中石英出溶体是在最大高峰变质期(7.0 GPa 和 1 100 °C)形成。Zhu 等^[22]的研究表明,哈萨克斯坦 Kokchetav 地体(白云质大理岩)超硅单斜辉石中金云母和石英出溶体在 8 GPa(1 000 °C)条件下形成。但是上述前人成果都还难以回答下面几个重要问题:①石英从单斜辉石中出溶时过剩 SiO_2 的临界含量是多少?② SiO_2 最初出溶产物是柯石英,而后在低压条件下相变为石英,或是 SiO_2 直接以石英出溶体形成产出?③柯石英(或石英)出溶体和主晶单斜辉石的拓扑关系机理是什么?因此仅根据榴辉岩中

存在石英出溶体就证明石英出溶体是超高压变质作用的标志,还待于实验的进一步证实。笔者认为,需加强高温高压实验岩石学的研究,查明石英出溶体形成的温压条件和出溶机理以及有关影响因素,从而最终证明石英出溶体能否作为超高压变质作用的证据。

金淑燕教授在石英出溶体的费氏台测量方面给予了指导,笔者与加利福尼亚大学(Riverside) L F Dobrzhinetskaya 博士就石英出溶体机理进行了有益讨论,在此一并致以衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Coes L. A new dense crystalline silica [J]. Science, 1953, 118: 131.
- [2] Chopin C. Coesite and pure pyrope in high grade pelitic blueschists of the western Alps first record and some consequences [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1984, 86: 107—118.
- [3] Smith D C. Coesite in clinopyroxene in Caledonides and its implications for geodynamics [J]. Nature, 1984, 310: 641—644.
- [4] Xu Z Q. Etude tectonique et micotectonique de la chaine paleozoique et Triasique des Qinglings (China) [D]. Montpellier: Univ Sci Tch Langedoc, 1987.
- [5] Wang X M, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains, central China [J]. Geology, 1989, 17: 1085—1088.
- [6] Okay A I, Xu S, Sengor A G. Coesite from the Dabieshan eclogites, central China [J]. European Journal of Mineralogy, 1989, (1): 595—598.
- [7] 从柏林,王清晨. 大陆深俯冲作用研究引起的新思维 [J]. 自然科学进展, 2000, 10(9): 778—782.
CONG B L, WANG Q C. New thinking from the research of deep continental subduction [J]. Progress in Nature Science, 2000, 10(9): 778—782.
- [8] Xu S T, Okay A I, Sengor A G. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implications for tectonic setting [J]. Science, 1992, 256: 80—82.
- [9] Zhai M G, Cong B L, Zhang Q, et al. The northern Dabieshan terrane: a possible Andean-type arc [J]. International Geology Review, 1994, 36: 867—883.
- [10] Zhang R Y, Liou J G, Tsai C H. Petrogenesis of a high-temperature metamorphic terrane: a new tectonic interpretation for the north Dabieshan, central China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1996, 14: 319—333.

- [11] 王清晨, 从柏林. 大别山超高压岩的构造意义[J]. 中国科学(D辑), 1996, 39: 311—318.
WANG Q C, CONG B L. Tectonic significance of ultrahigh pressure rocks in Dabie Mountains [J]. Science in China (Series D), 1996, 39: 311—318.
- [12] 从柏林, 王清晨. 大别山—苏鲁超高压变质带研究的新进展[J]. 科学通报, 1999, 44(11): 1127—1141.
CONG B L, WANG Q C. New progress of the research in Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(11): 1127—1141.
- [13] 魏春景, 单振刚, 张立飞, 等. 北大别榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 科学通报, 1997, 42(170): 1832—1835.
WEI C J, SHAN Z G, ZHANG L F, et al. Confirmation of eclogite in northern Dabie and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(170): 1832—1835.
- [14] 刘贻灿, 徐树桐, 江来利, 等. 大别山北部镁铁—超镁铁质岩带的研究新进展[J]. 安徽地质, 1999, 9(4): 262—267.
LIU Y C, XU S T, JIANG L L, et al. New progress of the research of mafic and ultramafic rock belt in the north of Dabie mountains [J]. Geology of Anhui, 1999, 9(4): 262—267.
- [15] 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 北大别超高压变质带的确定及存在的问题[J]. 自然科学进展, 1999, 9(1): 14—23.
XU S T, LIU Y C, JIANG L L, et al. Confirmation of ultrahigh pressure belt of northern Dabie and the existed problems [J]. Progress in Nature Science, 1999, 9(1): 14—23.
- [16] Tsai C H, Liou J G. Eclogite-facies relics and inferred ultrahigh-pressure metamorphism in the North Dabie Complex, central-eastern China [J]. American Mineralogist, 2000, 85: 1—8.
- [17] Bakun-czubarow N. Quartz pseudomorphs after coesite and quartz exsolutions in eclogitic omphacites of the Złote Mountains in the Sudetes (SW Poland) [J]. Archiwum Mineralogiczne, 1992, 48: 3—25.
- [18] Gayk T, Kleinschrodt R, Langosch A, et al. Quartz exsolution in clinopyroxene of high-pressure granulite from the Munchberg Massif [J]. European Journal of Mineralogy, 1995, 7: 1221—1225.
- [19] Katayama I, Parkinson C D, Okamoto K, et al. Super-silicic clinopyroxene and silica exsolution in UHPM eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan [J]. American Mineralogist, 2000, 85: 1368—1374.
- [20] 苏文, 游振东, 王汝成, 等. 大别山北部石榴辉石岩透辉石中石英和单斜顽火辉石的出溶[J]. 科学通报, 2001, 46(10): 850—854.
SU W, YOU Z D, WANG R C, et al. The exsolution of clinoenstatite and quartz in diopside from garnet pyroxenite in northern Dabie [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(10): 850—854.
- [21] Dobrzhinetskaya L F, Schweinehage R, Massonne H J, et al. Silica precipitates in omphacite from eclogite at Alpe Arami, Switzerland; evidence of deep subduction [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2002, 20: 481—492.
- [22] Zhu Y F, Ogasawara Y. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene [J]. International Geology Review, 2002, 44: 831—836.
- [23] Dobrzhinetskaya L F, Green H W, Wang S. Alpe Arami: a peridotite massif from depths of more than 300 kilometers [J]. Science, 1996, 271: 1841—1845.
- [24] 徐培苍, 李如璧. 地学中的拉曼光谱 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
XU P C, LI R B. Raman spectroscopy in geosciences. Xi'an: Shaanxi Technology Publishing Company, 1996.
- [25] 徐培苍, 李如璧, 王志海, 等. 华中高压变质柯石英的拉曼光谱学研究[J]. 西北地质科学, 1992, 13: 111—120.
XU P C, LI R B, WANG Z H, et al. The Raman spectrum study of high pressure metamorphic coesite in central China [J]. Northwest Geoscience, 1992, 13: 111—120.
- [26] Tabata H, Yamauchi K, Maruyama S, et al. Tracing the extent of a UHP metamorphic terrance: mineral-inclusion study of zircons in gneisses from the Dabieshan [A]. In: Hacker B R, Liou J G, eds. When continents collide: geodynamics and geochemistry of ultrahigh-pressure rocks [C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998. 261—273.
- [27] Parkinson C D. Coesite inclusions and prograde compositional zonation of garnet in whiteschist of the HP-UHPM Kokchetav massif, Kazakhstan: a record of progressive UHP metamorphism [J]. Lithos, 2000, 52: 215—233.
- [28] Parkinson C D, Katayama I. Present-day ultrahigh-pressure conditions of coesite inclusions in zircon and garnet: evidence from laser Raman microspectroscopy [J]. Geology, 1999, 27: 979—982.
- [29] Boyer H, Smith D C, Chopin C, et al. Raman micro-

- probe (RMP) determinations of natural and synthetic coesite [J]. *Phys Chem Minerals*, 1985, 12: 45–48.
- [30] Mosenfelder J L, Bohlen S R. Kinetics of the coesite to quartz transformation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 153: 133–147.
- [31] 章军锋, 金振民. 高压变质岩中柯石英—石英相变动力学研究的评述[J]. *地质科技情报*. 1999, 18(3): 6–10.
- ZHANG J F, JIN Z M. Review on phase transformation of coesite-quartz from ultra-high pressure metamorphic rocks [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1999, 18(3): 6–10.
- [32] Angel R J, Gasparik T, Ross N L, et al. A silica-rich sodium pyroxene phase with six-coordinated silicon [J]. *Nature*, 1988, 335: 156–158.
- [33] Mao H K. The system jadeite (NaAlSi₂O₆)-anorthite (CaAl₂Si₂O₈) at high pressures [J]. *Carnegie Institute Year Book*, 1971, 69: 163–168.
- [34] Khanukhova L T, Zharikov V A. Excess silica in solid solutions of high-pressure clino-pyroxenes as shown by experimental study of the system CaMgSi₂O₆-CaAl₂Si₂O₈ at 35 kilobars and 1 200 °C [J]. *Doklady Earth Science*, 1976, 229: 170–172.

Raman Spectrum Study on Quartz Exsolution in Omphacite from Eclogite and Its Tectonic Significances

WANG Lu¹, JIN Zhen-min², HE Mou-chun³

(1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The studies on ultra-microstructure characteristic of quartz exsolution in eclogite and coesite in UHP eclogite of several localities are done with the appliance of laser Raman spectroscopy and U-stage. Research results show that the phase transformation of coesite-quartz in garnet and/or omphacite is a continuous process. Topological relationships are present between quartz exsolution in omphacite and its host mineral which shows orientations of two long axes of quartz exsolution parallel to (100) and (−101) of omphacite. At present, some of scholars suggest that the quartz exsolution in omphacite of eclogite is the evidence of UHP metamorphism. However, temperature and pressure condition and the exsolution mechanism of oriented needlelike quartz in omphacite still remain unclear. Therefore further study should be enhanced on experimental study on exsolution mechanism of super-silicate clinopyroxene, which could provide experimental quantitative constraint on quartz exsolution as UHP indicator.

Key words: ultrahigh pressure eclogite; coesite; quartz exsolution; Raman spectroscopy.