

# 斜方辉石筛状反应边的成因机制及其对岩石圈地幔性质转变的意义

王永锋, 章军锋

(中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 本文利用电子背散射衍射 (EBSD) 技术对河北张家口大麻坪汉诺坝玄武岩橄榄岩捕虏体中斜方辉石与玄武岩反应结构的显微构造进行了详细研究。研究结果表明: ① 其反应边具有复杂的多层筛状结构特征, 包括玄武岩层、富橄榄石层以及橄榄石和单斜辉石共生层; ② 由外至内, 橄榄石的  $Mg$  值逐渐升高, 而单斜辉石的  $Mg$  值变化不大; ③ 反应边结构中的单斜辉石与斜方辉石残斑之间存在很好的结晶学拓扑关系, 即  $(100)_{\text{opx}} // (100)_{\text{cpx}}$ ,  $(010)_{\text{opx}} // (010)_{\text{cpx}}$ ,  $(001)_{\text{opx}} // (001)_{\text{cpx}}$ ; ④ 橄榄石的结晶学取向无序且与斜方辉石和单斜辉石均无关。这个反应过程可以用贫硅熔体先与斜方辉石反应形成单斜辉石, 并导致熔体富硅, 从而橄榄石从反应熔体中结晶出来合理地解释。相对富硅熔体与橄榄岩的反应, 贫硅熔体与橄榄岩的反应过程由于筛状反应边的存在可能更容易进行, 筛状结构反应边可以为熔体在橄榄岩中沿颗粒边界运移提供通道, 并使橄榄岩主要组成矿物发生细粒化和岩石结构变得松散, 可以有效保证熔体上升过程中对橄榄岩的持续侵蚀和破坏, 从而可能导致岩石圈地幔性质的迅速转变。

**关键词:** 熔体-橄榄岩反应, 筛状反应边, EBSD, 结晶学拓扑关系, 岩石圈地幔性质转变

中图分类号: P578.954

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)05-0604-09

## The reaction mechanism of sieve-textured orthopyroxene: implications for lithospheric mantle rejuvenation

WANG Yong-feng and ZHANG Jun-feng

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** An electronic backscattered diffraction (EBSD) study of the sieve-textured reaction rim between orthopyroxene and basalt in the Hannuoba mantle xenoliths was conducted in Damaping area, Hebei Province. Some conclusions have been reached: ① The reaction rim has a complex multi-layer structure composed of a basalt layer, an olivine-rich layer and an intergrowth layer of olivine and clinopyroxene; ② The  $Mg^{\#}$  of the olivine grains in the reaction rim increases toward the orthopyroxene grain while the  $Mg^{\#}$  of the clinopyroxene grains in the reaction rim remains stable; ③ There is a well-defined crystallographic topotactic relationship between orthopyroxene and clinopyroxene, i.e.,  $(100)_{\text{opx}} // (100)_{\text{cpx}}$ ,  $(010)_{\text{opx}} // (010)_{\text{cpx}}$ ,  $(001)_{\text{opx}} // (001)_{\text{cpx}}$ ; ④ The crystallographic distribution of olivine grains is nearly at random and shows no relationship with orthopyroxene and clinopyroxene. This sieve-textured reaction rim can be interpreted as the result of a multistage reaction process. In the first step, the orthopyroxene reacts with the melt to form clinopyroxene which made the reaction melt more silicic. As the melt gets saturated with silica, olivine precipitates from the reaction melt. Comparing to the reaction between a silica-saturated melt and a peridotite, the reaction between a silica-understaturated

收稿日期: 2013-08-01; 修订日期: 2013-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90714005, 41172070); 教育部和国家外国专家局高等学校学科创新引智计划(B07039)

作者简介: 王永锋(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事壳幔岩石的流变学研究, E-mail: yfwang@cug.edu.cn; 通讯作者: 章军锋(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事壳幔岩石的高温高压实验研究, E-mail: jfzhang@cug.edu.cn

melt and a peridotite is probably easier to proceed due to the formation of sieve-textured reaction rims. The sieve-textured reaction rims provide a feasible channel for the migration of the melt along otherwise closed grain boundaries at high pressure, weaken the surrounding peridotite through the reduction of mineral grain size, and maintain a continuous erosion and destruction of the peridotite during the upward migration of the melt. This process may lead to a quick rejuvenation of lithospheric mantle.

**Key words:** melt-peridotite reaction; sieve-textured reaction rim; EBSD; crystallographic topotaxy; rejuvenation of lithospheric mantle

玄武岩是地幔部分熔融的产物,一般认为拉斑玄武岩是地幔在相对浅部(<30 km)条件下经历程度较高部分熔融(>10%)形成的,而碱性玄武岩是地幔在相对深部环境下经程度较低部分熔融形成的(Kushiro, 1996)。碱性玄武岩在由地幔深部快速喷发至地表的过程中往往携带大量岩石圈地幔橄榄岩捕虏体,这些橄榄岩捕虏体代表早期地幔部分熔融后的固体残余组分或岩石圈地幔与熔体或流体交代反应后的产物(Kelemen *et al.*, 1992; Rudnick *et al.*, 2004)。

最新的一些研究表明,橄榄岩捕虏体中熔体和橄榄岩反应的现象比较常见,被认为是岩石圈地幔性质转变和克拉通岩石圈地幔破坏的关键(Zhang, 2005; 张宏福, 2006, 2009)。熔体与橄榄岩反应方式主要有两种:一种是富硅(silica saturated)熔体与橄榄岩反应,通过消耗橄榄石形成斜方辉石和单斜辉石,富硅熔体一般认为是俯冲和拆沉作用所带来的壳源熔体(Gao *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005, 2008, 2010; Xu *et al.*, 2008);另一种是贫硅(silica undersaturated)熔体与橄榄岩反应,通过消耗斜方辉石形成橄榄石,贫硅熔体一般被认为是软流圈来源(Xu *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2005; Tang *et al.*, 2006; Russell *et al.*, 2012),主要包括碳酸岩和玄武岩熔体。目前对这两种不同的熔体-橄榄岩反应的研究主要是产物矿物组成和地球化学特征方面的研究,而显微结构和反应动力学过程探讨较少。

玄武岩与橄榄岩反应通常形成围绕矿物边部的筛状反应边结构,但对其成因机制一直有较大争议(Shaw and Edgar, 1997; Shaw and Dingwell, 2008; 杜星星等, 2010)。本文主要从显微构造角度研究了来自河北大麻坪汉诺坝橄榄岩包体中斜方辉石的筛状反应边结构,探讨了其形成机制,并通过和富硅熔体-橄榄岩反应边显微结构特征对比探讨了筛状反

应边对岩石圈地幔性质转变的地球动力学意义。

## 1 地质背景和分析样品

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,自18亿年华北克拉通形成之后至古生代,一直保持相对稳定,并存在相对冷的、巨厚的岩石圈根(200 km左右),但自中生代以来遭受了强烈的活化改造,在华北东部产生了大规模构造活动、岩浆作用、地震活动和成矿作用,岩石圈厚度被减薄至60~80 km,同时具有异常高的地表热流值(>60 mW/m<sup>2</sup>),而西部的鄂尔多斯块体则保留了稳定克拉通的特征(Menzies *et al.*, 1993; 吴福元等, 2008; 郑永飞等, 2009)。华北克拉通是目前国际上公认大陆岩石圈深部再循环的最佳实例之一。

汉诺坝新生代玄武岩出露于华北克拉通中部造山带的北缘,常见各种下地壳和地幔捕虏体,包括镁铁质和长英质麻粒岩、尖晶石二辉橄榄岩和(石榴)辉石岩(Rudnick *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005)。汉诺坝玄武岩地幔捕虏体中熔体-橄榄岩反应现象很常见,前人研究中受关心和研究程度较高的是含石榴辉石岩的橄榄岩复合包体,岩石学和地球化学研究结果表明其可能代表了壳源富硅质熔体与橄榄岩反应的产物,被认为是克拉通地幔成分富集化和克拉通活化的产物(Rudnick *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005, 2010)。而玄武岩与橄榄岩捕虏体之间的反应以围绕橄榄岩矿物橄榄石、辉石和尖晶石周围的筛状反应边现象为主要特征。其中斜方辉石的反应边结构较为复杂,被认为对解释玄武岩与橄榄岩反应机制最为关键(Shaw and Dingwell, 2008)。本文的主要研究对象是来自华北张家口大麻坪的汉诺坝玄武岩尖晶石二辉橄榄岩捕虏体中典型斜方辉石与玄武岩的反应边结构(图1a)。

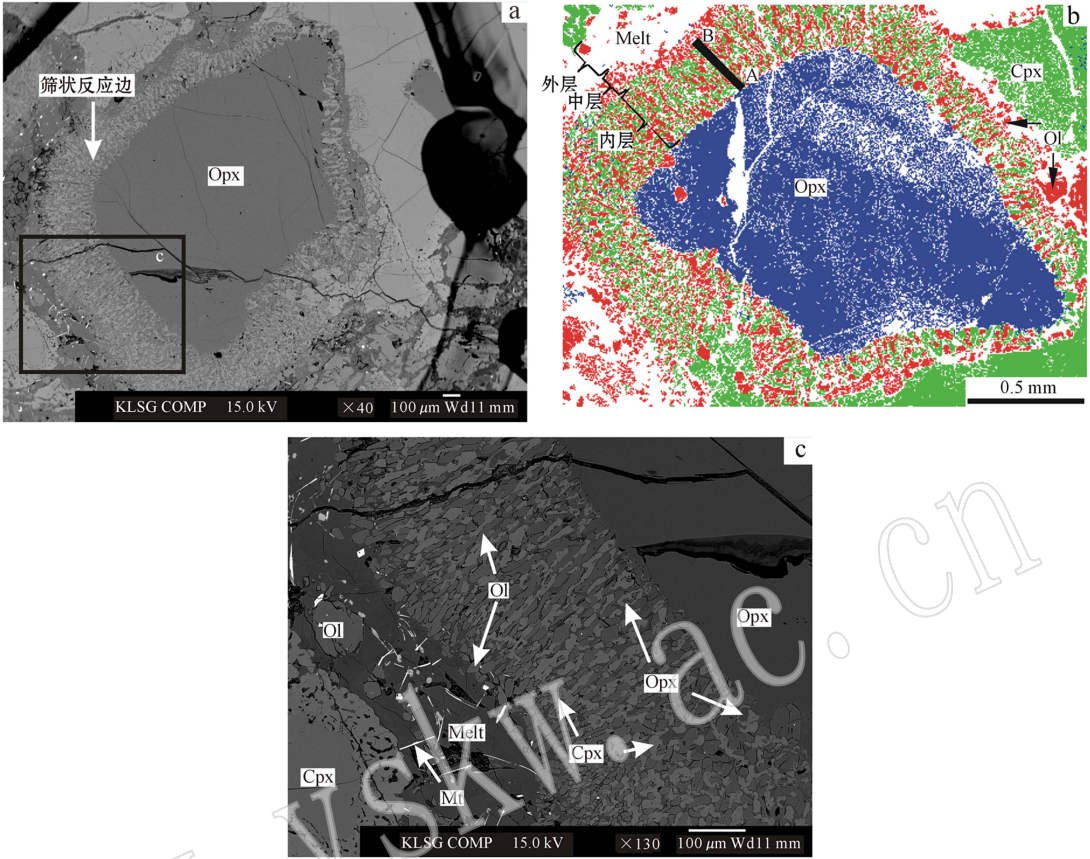


图 1 斜方辉石与玄武岩反应的反应边矿物组成特征

Fig. 1 Textural and mineralogical characteristics of the reaction zone between orthopyroxene prophyroclast and basaltic melt  
a—电子背散射图像; b—对应图像 a 的 EBSD 面扫相图, 相同颜色代表相同的矿物相, 蓝色为斜方辉石 (Opx), 绿色为单斜辉石 (Cpx), 红色为橄榄石 (Ol), 斜方辉石的反应边明显可分为 3 层; c—图像 a 的左下角局部放大。反应边的外层为玄武岩熔体 (Melt) [含橄榄石和磁铁矿 (Mt) 斑晶], 中层为富橄榄石层, 内层为以橄榄石和单斜辉石交生为主的层, 间杂少量斜方辉石和熔体, 斜方辉石主要位于单斜辉石内部  
a—backscattered electron (BSE) image; b—EBSD phase map of the corresponding area in Fig. 1a, showing that the orthopyroxene reaction zone is composed of three layers. Blue, orthopyroxene (Opx); green, clinopyroxene (Cpx); red, olivine (Ol); c—close-up of the area in Fig. 1a as outlined by the black rectangle. The outer layer (away from the orthopyroxene prophyroclast) of the reaction zone is made of basaltic melt (Melt) with phenocrysts of olivine and magnetite (Mt). The intermediate layer is an olivine-rich layer. The inner layer is dominated by the intergrowth of olivine and clinopyroxene plus minor melt and orthopyroxene (mostly inside clinopyroxene)

2 分析方法

矿物的主量元素成分分析是在国家海洋局海底科学重点实验室利用 JXA-8100 型电子探针完成。电子探针分析条件为加速电压 15 kV, 束流 20 nA, 计时 20 s, 束斑 5  $\mu\text{m}$ 。

样品的显微构造特征利用扫描电子显微镜背散射 (BSE) 成像技术进行分析, 并利用电子背散射衍射 (EBSD) 技术测定了橄榄石、斜方辉石和单斜辉石的结晶学方位。所采用的仪器为中国地质大学地质过

程与矿产资源国家重点实验室的 Quanta 450 场发射扫描电子显微镜, 并配有一个 HKL 公司的 Nordlys II 型 EBSD 探头, 可以精确测定矿物的结晶学方位 (空间分辨率 1  $\mu\text{m}$ , 角度分辨率优于 1 $^\circ$ )。在 EBSD 测试过程中, 样品台倾斜至与水平面成 70 $^\circ$  角, 分析条件为加速电压 20 kV, 束斑 6  $\mu\text{m}$  以及工作距离 23 ~ 25 mm。采用自动模式测试了样品的相图和晶体取向图, 人机交互手动模式测量反应边局部的橄榄石、单斜辉石和斜方辉石的晶格取向数据, 并利用 HKL Mambo 程序对数据进行了后期处理分析。详细分析方法参见徐海军等 (2007) 或 Zhang 等 (2011)。

### 3 结果

#### 3.1 岩相学和矿物化学特征

对汉诺坝玄武岩地幔捕虏体中斜方辉石与玄武岩反应边结构的 EBSD 相图(图 1b)和扫描电镜背散射电子图像(图 1c)研究表明,斜方辉石的反应边具有复杂多层结构,由外至中间的大颗粒斜方辉石残斑可分为 3 层,最外层为与捕虏体外部玄武岩相联通的碱性玄武岩(外层),其中含相对自形的等粒状橄榄石斑晶(粒径几十至  $100\ \mu\text{m}$ )及针状磁铁矿斑晶(长度几十至  $100\ \mu\text{m}$ );往内为一层厚度较薄的富橄榄石玄武岩层(中层),橄榄石自形程度较差(粒径  $10\sim 20\ \mu\text{m}$  左右);紧靠斜方辉石残斑的为相对较厚的多矿物交生层(内层),主要由橄榄石和单斜辉石颗粒组成(粒径  $10\sim 20\ \mu\text{m}$  左右),局部可见垂直斜方辉石颗粒边界的定向生长,另有少量细粒斜方辉石和残余熔体间杂其中,斜方辉石主要出现在单斜辉石颗粒内部(图 1c)。反应边所围绕的大颗粒斜方辉石残斑成分是均一和无环带的,颗粒边部与内层接触界面一般为锯齿状,颗粒边界整体为浑圆状,有时可见内凹的港湾边界(图 1a, 1b)。

对斜方辉石反应边内层交生的橄榄石和单斜辉石的电子探针化学成分分析研究表明,由内层向中层(图 1b 中 A—B),橄榄石中的  $\text{MgO}$  含量逐渐降低,而  $\text{FeO}$  含量逐渐升高(图 2a),对应橄榄石的  $\text{Mg}^\#$  值 [ $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) \times 100$ ] 由 88 降低至 85(图 2c),而单斜辉石中  $\text{FeO}$  含量基本不变,  $\text{MgO}$  含量略有下降,而  $\text{CaO}$  含量略有升高(图 2b),对应单斜辉石的  $\text{Mg}^\#$  值变化基本不大,除靠近斜方辉石的区域  $\text{Mg}^\#$  值略高(92),其他均为 91 左右(图 2c)。

#### 3.2 结晶学拓扑关系

对岩相学分析相同的区域进行 EBSD 方位取向图(图 3)研究表明,反应边所围绕的大颗粒斜方辉石残斑基本维持了一个完整的单晶,颗粒内部颜色(浅绿色)接近均一即晶格取向一致,说明没有重结晶和强晶内塑性变形。与此相对应的反应边部中层和内层的颜色斑驳,表明出现了多种矿物或者很多颗粒取向。外层玄武岩没有晶体结构,无法被 EBSD 标定,在方位取向图中主要表现为空白。

为解译反应边与残余斜方辉石大颗粒之间可能的晶格拓扑关系,进一步选择了数个反应边局部区

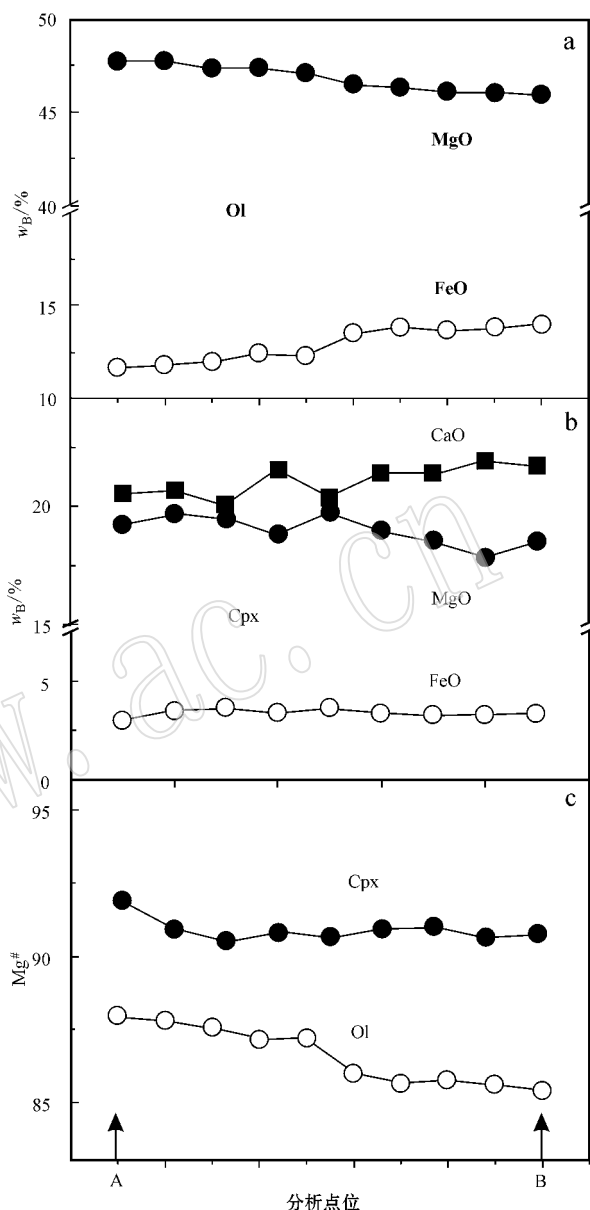


图 2 斜方辉石反应边内层中橄榄石和单斜辉石主要化学成分和  $\text{Mg}$  值变化(A 和 B 对应图 1b 中 A 和 B 的位置)

Fig. 2 Variation of chemical compositions and  $\text{Mg}$ -number of olivine and clinopyroxene along profile A-B (as indicated in Fig. 1b) in the inner layer of the orthopyroxene reaction zone

域进行了手动 EBSD 分析和斜方辉石、单斜辉石及橄榄石晶格取向的对比。图 4a 是其中的一个典型区域,本文一共手动测量了反应区中 33 个单斜辉石和 67 个橄榄石颗粒的取向以及 1 个斜方辉石残斑的方位。它们的结晶学取向方位对比结果表明:① 33 个单斜辉石仅出现了两种互为双晶的结晶学取向



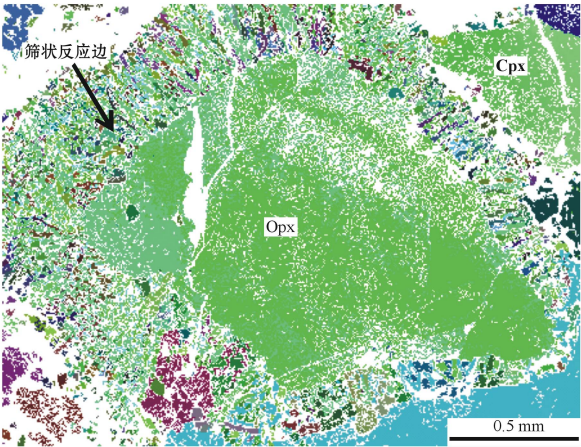


图 3 EBSD 面扫获得的斜方辉石筛状反应边的晶格取向方位图

Fig. 3 EBSD orientation map of the sieve-textured orthopyroxene reaction zone

不同颜色代表斜方辉石、橄榄石和单斜辉石的不同晶格取向，空白为 EBSD 无法标定的测量点，如熔体、裂隙、颗粒边界等  
Each pixel in this map is color-coded with respect to the Euler angles (orientation) of indexed minerals (orthopyroxene, olivine and clinopyroxene). Data are on a grid with a 5  $\mu\text{m}$  spacing. White pixels are measurements that were not successfully indexed by EBSD. They are usually melts, fractures and grain boundaries

(图 4d);② 所有反应边中的单斜辉石均与斜方辉石残斑具有很强的结晶学拓扑关系,即 $(100)_{\text{Opx}}// (100)_{\text{Cpx}}, (010)_{\text{Opx}}// (010)_{\text{Cpx}}, (001)_{\text{Opx}}// (001)_{\text{Cpx}}$ (图 4c, 4d);③ 67 个橄榄石之间主要显示了相对发散的分布特征,而且,没有显示与交生的单斜辉石或残余斜方辉石之间的任何结晶学上的联系(图 4a)。

4 讨论

4.1 斜方辉石筛状反应边的形成机制

无论是在汉诺坝橄榄岩捕虏体(杜星星等, 2010)还是世界上其他典型地幔捕虏体(Carpenter *et al.*, 2002; Shaw *et al.*, 2006; Su *et al.*, 2011)中,玄武岩与橄榄岩反应所形成的矿物(斜方辉石、单斜辉石和尖晶石)边部的筛状反应边结构都是比较常见的现象。对其形成机制的主要争议在于其究竟是玄武岩上升过程中反应形成的(Shaw *et al.*, 2006),还是地球深部条件下地幔橄榄岩微量部分熔融(Franz and Wirth, 1997; Carpenter *et al.*, 2002),或者富钾熔体对地幔交代作用的产物(Bonadiman *et al.*, 2005)。Shaw 和 Dingwell(2008)通过常压高温

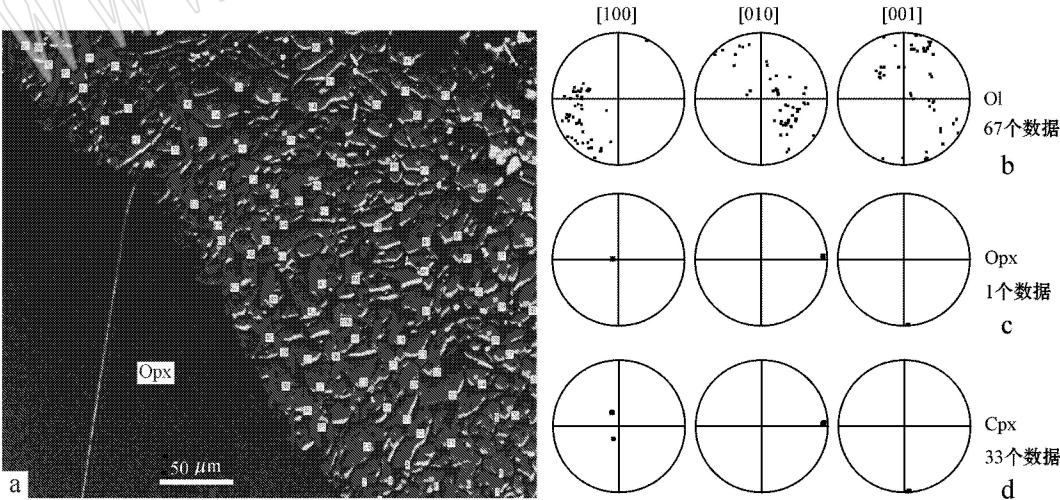


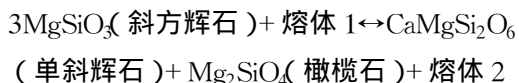
图 4 斜方辉石反应边内层中橄榄石和单斜辉石与斜方辉石之间的晶格取向拓扑关系

Fig. 4 Crystallographic topotactic relationship between olivine, clinopyroxene and orthopyroxene for the inner layer of the orthopyroxene reaction zone

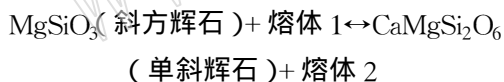
a—分析区的电子背散射图像和手动分析点位; b—橄榄石的晶格取向, 67 个数据; c—斜方辉石的晶格取向, 1 个数据; d—单斜辉石的晶格取向, 33 个数据  
a—BSE image showing the analyzed area and the measurement points; b—crystallographic orientation of olivine, 67 data points; c—crystallographic orientation of orthopyroxene porphyroclast, 1 data point; d—crystallographic orientation of clinopyroxene, 33 data points

(1 156℃和1 200℃)合成白榴岩和天然橄榄岩反应的实验,说明上述反应是可以在近地表条件下形成筛状反应边结构的,并认为斜方辉石是形成筛状反应边结构的关键矿物,正是由于斜方辉石的不一致溶解(incongruent dissolution,即部分物质溶解,部分物质形成新的固体相)形成橄榄石和相对富硅和富碱性熔体,富硅和富碱性熔体在橄榄岩中进一步迁移导致单斜辉石和尖晶石发生完全溶解直至饱和和新的单斜辉石、尖晶石析出。

本文的精细显微构造研究结果并不支持斜方辉石发生不一致溶解的解释。从反应边矿物结构来看,该反应可以写成如下形式:



反应边中新生成的单斜辉石与大颗粒斜方辉石残斑具有非常好的结晶学拓扑关系,空间分布上,斜方辉石小颗粒残余多见于反应边新生单斜辉石颗粒的内部,说明单斜辉石是直接交代斜方辉石形成的;而橄榄石颗粒具有无序晶格取向,且与斜方辉石大颗粒之间没有任何结晶学上的联系,说明橄榄石颗粒很可能是从反应熔体中结晶出来的。因此斜方辉石筛状反应边结构的形成机制可以看作以下两个不同的过程,首先是斜方辉石和初始贫硅熔体反应形成单斜辉石:



这个反应过程可以更合理地解释斜方辉石与新生的单斜辉石之间的结晶学拓扑关系,以及反应边中单斜辉石的成分变化不大的原因。相对熔体 1,由于消耗了  $\text{CaO} + \text{SiO}_2$ ,熔体 2 向富硅和富碱性方向转化,这个反应可能是远大于斜方辉石中离子扩散速率的快速过程(斜方辉石边部无成分扩散条带),可以造成接触带局部熔体中的硅过饱和,使橄榄石成核并结晶析出:



作为相对富镁贫硅矿物,橄榄石的结晶析出会导致熔体 3 相对熔体 2 更富硅、富铁和富碱性。越是远离熔体和斜方辉石的接触边界,熔体中结晶出来的橄榄石的 Mg 值会越低(图 2)。残余熔体的化学成分则向接近橄榄岩初始熔融的熔体化学成分(富硅、富 K、富 Na)方向演化(Schiano *et al.*, 1998)。玄武岩中磁铁矿的析出说明该反应可能形

成于浅部的相对氧化环境中,与 Shaw 和 Dingwell (2008)的实验结果相一致。

#### 4.2 对岩石圈地幔性质转变的地球动力学意义

无论是热-化学侵蚀模型、拆沉模型还是熔体橄榄岩反应模型均认为橄榄岩-熔体反应在克拉通破坏中起到了非常重要的作用,差别在于拆沉模型中认为这种反应是克拉通破坏的结果,而其他模型中认为它是克拉通破坏的起因。在拆沉模型中,榴辉岩拆沉进入地幔后由于其熔点较低,发生部分熔融,产生长英质(英云闪长-奥长花岗质或埃达克质)熔体(Barth *et al.*, 2002; Rapp *et al.*, 2003; Xiong, 2006)。埃达克质岩浆在上升过程中将与地幔橄榄岩反应产生辉石岩和石榴辉石岩源区,其部分熔融将产生具有辉石岩源区特征的玄武岩(Rapp *et al.*, 1999; Yaxley, 2000; Herzberg, 2006)。而在热-化学侵蚀模型和熔体-橄榄岩反应模型中,熔体-橄榄岩反应虽然也被认为会导致地幔向富集方向发展(Griffin *et al.*, 2008; Foley, 2008),但对其动力学过程的阐述一直不是很清楚,汉诺坝橄榄岩包体中玄武岩与橄榄岩反应边结构也许可以给我们一些这方面的启示。

实验岩石学研究表明,富硅熔体与橄榄岩反应形成石榴辉石岩+辉石岩+橄榄岩的序列组合,实验产物与华北克拉通上地幔复合包体的显微结构和火山岩成分具有很强的相似性(Rapp *et al.*, 1999; 王超等, 2010; Zhang *et al.*, 2012)。但是,富硅熔体与橄榄石和斜方辉石单晶反应的产物是靠近矿物边部一条很窄的隔绝熔体的致密斜方辉石或单斜辉石单矿物反应边(图 5a),而贫硅熔体与橄榄岩反应形成的是多晶、多矿物和熔体共同构成的筛状反应边。富硅熔体与橄榄岩的致密反应边会阻挡熔体与橄榄岩的进一步接触和熔体在橄榄岩中运移,从动力学角度而言是自我抑制的反应过程,因此熔体可能可以在地幔深部长期存在,但可以在构造运动(譬如深俯冲和拆沉作用)的协助下发生熔体的迁移和反应强化(Zhang *et al.*, 2012)。而贫硅熔体与橄榄岩形成筛状反应边,反应过程有利于熔体在原本致密的橄榄岩中运移,因此在动力学上是自我促进的反应过程,熔体可能会与地幔橄榄岩迅速发生反应而被消耗,导致很难在地幔深部长期存在。

虽然观察到的汉诺坝橄榄岩包体中玄武岩与橄榄岩反应边结构很可能是玄武岩上升过程中,在浅部相对氧化的环境下发生的,但目前并没有地质和

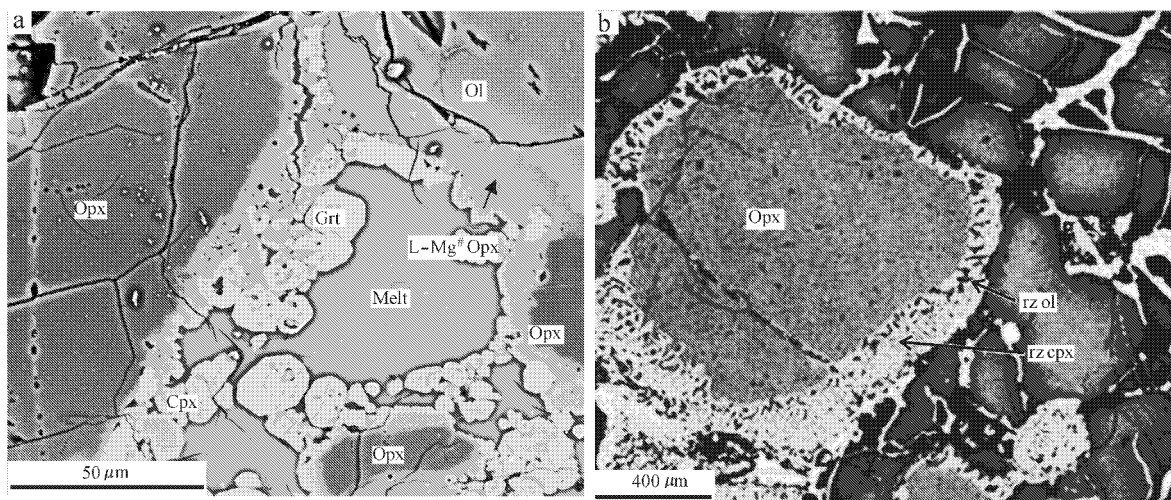


图 5 实验熔体-橄榄岩反应的反应边结构对比

Fig. 5 Comparison of reaction zones between silica-saturated and silica-undersaturated melts in experiments

a—麻粒岩部分熔融形成的富硅熔体 (Melt) 与橄榄岩反应形成围绕橄榄石 (Ol) 和斜方辉石 (Opx) 的致密低镁值斜方辉石 (L-Mg<sup>#</sup> Opx) 和单斜辉石 (Cpx) 反应边 (2 GPa, 1 300 °C, 48 h); b—贫硅熔体 (白榴岩) 与橄榄岩反应形成围绕斜方辉石的筛状反应边 (1 atm, 1 200 °C, 312 h), 图像来自 Shaw and Dingwell (2008) 中的 Fig. 4b, rz cpx—反应带中单斜辉石; rz ol—反应带中橄榄石

a—BSE image showing a dense narrow low-Mg orthopyroxene (L-Mg<sup>#</sup> Opx) reaction zone surrounding olivine (Ol) and clinopyroxene (Cpx) reaction zones surrounding orthopyroxene (Opx) from the reaction between a silica-rich melt (derived from partial melting of granulite) and a peridotite (2 GPa, 1 300 °C, 48 h); b—a sieve-textured orthopyroxene reaction zone formed by the reaction between a silica-undersaturated melt (leucite) and a peridotite (1 atm, 1 200 °C, 312 h) (after Fig. 4b in Shaw and Dingwell, 2008); rz cpx—cpx in the reaction zone; rz ol—olivine in the reaction zone

实验证据表明这个过程不可以在上地幔深部相对还原条件下同样形成。筛状结构反应边对克拉通破坏动力学过程的意义在于: ① 为熔体在橄榄岩中沿颗粒边界运移提供了通道; ② 使橄榄岩主要组成矿物发生了细粒化和岩石结构变得松散, 可以有效保证熔体上升过程中对橄榄岩的持续侵蚀和破坏。因此, 软流圈贫硅熔体在侵入岩石圈地幔过程中可以通过与橄榄岩反应形成筛状反应边而沿颗粒边界迅速迁移, 消耗斜方辉石形成相对富铁的单斜辉石和橄榄石, 从而实现热-化学侵蚀或熔体-橄榄岩反应对岩石圈地幔性质的改造。当然, 贫硅熔体与橄榄岩的反应随反应熔体中硅含量的增加可能伴随强烈的脱气和脱水作用 (Russell *et al.*, 2012), 使熔体携带大量的上地幔和下地壳包体岩石通过底劈作用快速上升至地表, 从而在地幔中停留时间过短而可能无法对地幔成分进行大规模改造。合理解决和阐述这些科学问题还需要更进一步的细致高温高压实验研究工作。

## 5 结论

橄榄岩捕虏体中斜方辉石与玄武岩反应的反应边具有复杂的多层筛状结构, 单独根据矿物组合很难合理解释其成因机制。根据 EBSD 获得的反应边结构中的单斜辉石与斜方辉石残斑之间存在很好的结晶学拓扑关系, 而橄榄石的结晶学取向无序且与单斜和斜方辉石之间没有关联, 这个反应过程可以用贫硅熔体先与斜方辉石反应形成单斜辉石, 并导致反应熔体富硅, 从而橄榄石从反应熔体中结晶出来这个过程来解释, 这种解释可能要比先前认为的辉石不一致溶解过程更合理一些。通过与富硅熔体与橄榄岩的反应产物的显微构造对比, 进一步提出, 贫硅熔体与橄榄岩反应过程中在矿物颗粒边界所形成的筛状结构反应边可以为熔体在橄榄岩中沿颗粒边界运移提供通道, 并使橄榄岩主要组成矿物发生细粒化和岩石结构变得松散, 可以有效保证熔体上

升过程中对橄榄岩的持续侵蚀和破坏,从而可能导致岩石圈地幔性质的迅速转变。

## References

- Barth M G, Foley S F and Horn I. 2002. Partial melting in Archean subduction zones: constraints from experimentally determined trace element partition coefficients between eclogitic minerals and tonalitic melts under upper mantle conditions[ J ]. *Precambrian Research*, 113: 323~340.
- Bonadiman C, Beccaluva L, Coltorti M, *et al.* 2005. Kimberlitelike metasomatism and ' garnet signature ' in spinel-peridotite xenoliths from Sal, Cape Verde Archipelago: Relics of a subcontinental mantle domain within the Atlantic Ocean lithosphere? [ J ]. *Journal of Petrology*, 46: 2 465~2 493.
- Carpenter R L, Edgar A D and Thibault Y. 2002. Origin of spongy textures in clinopyroxene and spinel from mantle xenoliths, Hessian Depression, Germany[ J ]. *Mineralogy and Petrology*, 74: 149~162.
- Du Xingxing and Fan Qicheng. 2010. A preliminary study of the melt-xenolith interaction in Hannuoba basal[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29: 377~386( in Chinese with English abstract ).
- Foley S F. 2008. Rejuvenation and erosion of the cratonic lithosphere [ J ]. *Nature Geosciences*, 1: 503~510.
- Franz L and Wirth R. 1997. Thin intergranular melt films and melt pockets in spinel peridotite xenoliths from the Rhon area ( Germany ): Early stage of melt generation by grain boundary melting [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 129: 268~283.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [ J ]. *Nature*, 432: 892~897.
- Griffin W L, O'Reilly S Y, Afonso J C, *et al.* 2008. The composition and evolution of lithospheric mantle: A re-evaluation and its tectonic implication[ J ]. *Journal of Petrology*, 50: 1 185~1 204.
- Herzberg C. 2006. Petrology and thermal structure of the Hawaiian plume from Mauna Kea volcano[ J ]. *Nature*, 444: 605~609.
- Kelemen P B, Dick J B and Quick J E. 1992. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle[ J ]. *Nature*, 358: 635~640.
- Kushiro I. 1996. Partial melting of a fertile mantle peridotite at high pressures: An experimental study using aggregates of diamond[ A ]. Basu A and Hart S. *Earth Processes: Reading the Isotopic Code* [ C ]. AGU, Washington D C: Geophysical Monograph Series, 95: 109~122.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[ J ]. *Journal of Petrology*, 51: 537~571.
- Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, *et al.* 2008. Recycled lower continental crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in Eastern China[ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 2 349~2 376.
- Liu Y S, Gao S, Lee C T A, *et al.* 2005. Melt peridotite interactions: links between garnet pyroxenite and high Mg<sup>#</sup> signature of continental crust[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 234: 39~57.
- Menzies M A, Fan W M and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China[ A ]. Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, *et al.* *Magmatic Processes and Plate Tectonics* [ C ]. Geological Society Special Publication, 76: 71~78.
- Rapp R P, Shimizu N and Norman M D. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[ J ]. *Nature*, 425: 605~609.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, *et al.* 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[ J ]. *Chemical Geology*, 160: 335~356.
- Rudnick R L, Gao S, Ling W L, *et al.* 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton[ J ]. *Lithos*, 77: 609~637.
- Russell J K, Porritt L A, Lavallée Y, *et al.* 2012. Kimberlite ascent by assimilation-fuelled buoyancy[ J ]. *Nature*, 481: 352~356.
- Schiano P, Bourdon B, Clocchiatti R, *et al.* 1998. Low-degree partial melting trends recorded in upper mantle minerals[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 537~550.
- Shaw C S J and Dingwell D B. 2008. Experimental peridotite-melt reaction at one atmosphere: a textural and chemical study[ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155: 199~214.
- Shaw C S J and Edgar A D. 1997. Post-entrainment mineral-melt reactions in spinel peridotite xenoliths from Inver, Donegal, Ireland[ J ]. *Geological Magazine*, 134: 771~779.
- Shaw C S J, Heidelbach F and Dingwell D B. 2006. The origin of reaction textures in mantle peridotite xenoliths from Sal Island, Cape Verde: The case for " metasomatism " by the host lava[ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151: 681~697.
- Su B X, Zhang H F, Sakyi P A, *et al.* 2011. The origin of spongy texture in minerals of mantle xenoliths from the Western Qinling, central China[ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161: 465~482.
- Tang Y J, Zhang H F and Ying J F. 2006. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: Implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton[ J ]. *Chemical Geology*, 233: 309~327.
- Wang Chao, Jin Zhenmin, Gao Shan, *et al.* 2010. Eclogite-melt/peridotite reaction: experimental constraints on the destruction mecha-



- nism of the North China Craton[ J ]. Science China Earth Sciences , 53 : 797~809.
- Wu Fuyuan , Xu Yigang , Gao Shan , *et al.* 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[ J ]. Acta Petrologica Sinica , 24 : 1 145~1 174( in Chinese with English abstract ).
- Xiong X L. 2006. Trace element evidence for growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite[ J ]. Geology , 34 : 945~948.
- Xu Haijun , Jin Shuyan and Zheng Borang. 2007. The latest technique for petrofabric study-electron backscattered diffraction ( EBSD ) [ J ]. Modern Geology , 21( 2 ) : 213~225( in Chinese with English abstract ).
- Xu W L , Hergt J M , Gao S , *et al.* 2008. Interaction of adakitic melt-peridotite : Implications for the high-Mg<sup>#</sup> signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton[ J ]. Earth and Planetary Science Letters , 265 : 123~137.
- Xu Y G , Menzies M A , Thirlwall M F , *et al.* 2003. “ Reactive ” harzburgites from Huinan , NE China : Products of lithosphere asthenosphere interaction during lithospheric thinning ? [ J ]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 67 : 487~505.
- Yaxley G M. 2000. Experimental study of the phase and melting relations of homogeneous basalt plus peridotite mixtures and implications for the petrogenesis of flood basalts[ J ]. Contributions to Mineralogy and Petrology , 139 : 326~338.
- Zhang H F. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction : A case of Sino-Korean craton[ J ]. Earth and Planetary Science Letters , 237 : 768~780.
- Zhang Hongfu. 2006. Peridotite-melt interaction : an important mechanism for the compositional transformation of lithospheric mantle[ J ]. Earth Science Frontiers , 13 : 65~75( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Hongfu. 2009. Peridotite-melt interaction : a key point for the destruction of cratonic lithospheric mantle[ J ]. Chinese Science Bulletin , 54 : 3 417~3 437.
- Zhang J F , Wang C , Wang Y F. 2012. Experimental constraints on the destruction mechanism of the North China Craton[ J ]. Lithos , 149 : 91~99.
- Zhang J F , Xu H J , Liu Q , *et al.* 2011. Pyroxene exsolution topotaxy in majoritic garnet from 250 to 300 km depth[ J ]. Journal of Metamorphic Geology , 29 : 741~751.
- Zheng J P , Griffin W L , O 'Reilly S Y , *et al.* 2005. Late Mesozoic-Eocene mantle replacement beneath the eastern North China Craton : Evidence from the Paleozoic and Cenozoic peridotite xenoliths[ J ]. International Geology Review , 47 : 457~472.
- Zheng Yongfei and Wu Fuyuan. 2009. Growth and reworking of cratonic lithosphere[ J ]. Chinese Science Bulletin , 54 : 3 347~3 353.

## 附中文参考文献

- 杜星星 , 樊祺诚. 2010. 汉诺坝玄武岩中熔体-捕虏体相互作用初步研究[ J ]. 岩石矿物学杂志 , 29 : 377~386.
- 王超 , 金振民 , 高山 , 等. 2010. 华北克拉通岩石圈破坏的榴辉岩熔体-橄榄岩反应机制 : 实验约束[ J ]. 中国科学 , 40( 5 ) : 541~555.
- 吴福元 , 徐义刚 , 高山 , 等. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[ J ]. 岩石学报 , 24( 6 ) : 1 145~1 174.
- 徐海军 , 金淑燕 , 郑伯让. 2007. 岩石组构学研究的最新技术——电子背散射衍射( EBSD ) [ J ]. 现代地质 , 21( 2 ) : 213~225.
- 张宏福. 2009. 橄榄岩-熔体相互作用 : 克拉通型岩石圈地幔能够被破坏之关键[ J ]. 科学通报 , 54 : 2 008~2 026.
- 张宏福. 2006. 橄榄岩-熔体的相互作用 : 岩石圈地幔组成转变的重要方式[ J ]. 地学前缘 , 13 : 65~75.
- 郑永飞 , 吴福元. 2009. 克拉通的岩石圈生长和再造[ J ]. 科学通报 , 54( 14 ) : 1 945~1 949.