

天然榴辉岩造岩矿物的热状态方程研究及其地质意义

许金贵¹ 张东舟² 范大伟^{1*} Dera, Przemyslaw² 史锋³ 周文戈¹

1 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550081; 2 University of Hawaii Honolulu 96822;

3 中国地质大学(武汉) 武汉 430074

榴辉岩是最重要的超高压变质岩, 主要由玄武岩或者辉长岩在板片俯冲过程中经(超)高压变质形成(Ringwood, 1982)。榴辉岩是组成俯冲板片的重要岩石类型, 具有一些特殊的物理化学性质, 例如榴辉岩的密度比其他地幔岩石(如橄榄岩)的密度大得多, 因此在板片俯冲过程中榴辉岩扮演着至关重要的角色(Anderson, 2006)。此外, 金伯利岩以及金刚石包裹体中的榴辉岩型矿物组合显示榴辉岩也是地球上地幔的重要岩石(Jacob, 2004)。尽管对于榴辉岩在上地幔的含量以及分布还存在较大争议, 但是榴辉岩通常被认为是造成上地幔某些局部密度异常的最主要原因(Kaban et al., 2016)。因此, 正确估算榴辉岩在地球内部高温高压条件下的密度是构建合理的地球矿物学模型以及正确认识俯冲板片动力学过程的基础。为了更精确地模拟榴辉岩在地球内部的密度, 准确获得榴辉岩主要造岩矿物的热状态方程参数是十分必要的。

榴辉岩的主要造岩矿物为镁铝-铁铝-钙铝三端元石榴子石以及富 Na 的单斜辉石(绿辉石)。高压变质带以及金伯利岩或金刚石包裹体中的天然榴辉岩型石榴子石主要为镁铝榴石(Pyrr)、铁铝榴石(Alm)以及钙铝榴石(Grs)组成的三端元固溶体石榴子石, 其他端元的石榴子石如锰铝榴石(Sps)、钙铁榴石(Adr)等的含量非常少。榴辉岩的另一种主要造岩矿物——绿辉石, 主要是透辉石和硬玉组成的固溶体辉石, 通常含有较少含量的其他辉石组分, 例如, 霓石(Ae)、钙铁辉石(Hd)。

截至目前, 前人已对石榴子石的热状态方程进行了大量的研究。但是这些研究多集中在对单端元石榴子石的研究, 对于二端元以上的多端元石榴子石的状态方程研究还很缺乏, 其中尤其缺乏对镁铝-铁铝-钙铝三端元石榴子石进行系统的热状态方程研究。此外, 从已有的研究结果可知, 石榴子石的组分变化对其热状态方程参数具有重要影响。另外, 关于绿辉石的状态方程研究多集中在常温高压状态方程, 仅有一例关于绿辉石热状态方程的研究, 其最高压力也较低(10 GPa)。因此, 现有的关于石榴子石和绿辉石的热状态方程研究结果还不足以精确合理地模拟榴辉岩在地球内部温压条件下的密度。为此, 很有必要在高温高压条件下, 系统地对榴辉岩主要造岩矿物——三端元石榴子石和绿辉石的热状态方程研究进行研究。

本文采用大别-苏鲁(超)高压变质带天然榴辉岩中的石榴子石和绿辉石单晶作为实验样品。初步选取了两个不同组分的石榴子石和两个绿辉石样品进行热状态方程研究。石榴子石样品包括低 Fe ($\text{Prp}_{28}\text{Alm}_{38}\text{Grs}_{33}\text{Sps}_1$) 和高 Fe ($\text{Prp}_{14}\text{Alm}_{62}\text{Grs}_{19}\text{Adr}_3\text{Sps}_2$) 石榴子石; 绿辉石样品包括低 Fe ($\text{Quad}_{57}\text{Jd}_{42}\text{Ae}_1$, Quad 表示钙镁铁质辉石) 和高 Fe ($\text{Quad}_{53}\text{Jd}_{27}\text{Ae}_{20}$) 绿辉石。利用外电阻加热金刚石压腔(DAC)结合同步辐射单晶 X 射线衍射实验技术, 在 0-24 GPa 和 300-700 K 的温压范围内采集了实验样品的单晶衍射数据。DAC 的压砧面直径为 500 μm , 金属 Re 片预压厚度为 50 μm , 在压痕中心上打一个 300 μm 的小孔, 用作样品腔。使用惰性气体 Ne 做传压介质, 利用 Au 的状态方程来标定实验压力。实验在美国阿贡国家实验室先进光子源(APS) 13-BM-C 实验站完成, 衍射实验 X 射线光斑大小为 $15 \times 20 \mu\text{m}$, 波长 0.4340 \AA 。MAR165 CCD 探测器用于采集衍射数据, LaB_6 粉末用作衍射标定物。利用 ATREX/RSV 软件对单晶衍射数据进行了分析与处理, 获得了样品在实验温度、压力范围内的晶胞参数值。

实验数据处理结果显示, 石榴子石和绿辉石样品在实验温度、压力范围内没有发生任何相变。利用高温三阶 Birch-Murnaghan 状态方程对石榴子石和绿辉石的压力-体积-温度数据进行了拟合, 得到

热弹性参数包括体积模量 (K_{T0})、体积模量的压力导数 (K'_{T0})、温度导数 ($(\partial K_T/\partial T)_P$) 和热膨胀系数 (α_T)。

利用所得到的热弹性参数, 结合石榴子石和绿辉石的化学组分, 计算了低 Fe 和高 Fe 含量的榴辉岩在俯冲洋壳以及上地幔温度、压力条件下的密度-深度曲线, 并且和地震学反演得到的地幔密度模型进行了对比。结果显示, 在上地幔的温度压力范围内, 榴辉岩具有比正常上地幔显著高的密度, 能促进俯冲板片进入地幔过渡带, 而且 Fe 含量越高越有利于板片俯冲进入深部地幔。此外, 相比于高 Fe 含量的榴辉岩, 低 Fe 含量的榴辉岩更适合用于解释上地幔局部地区的高密度异常。

参考文献

- Anderson, D. L. (2006). Speculations on the nature and cause of mantle heterogeneity. *Tectonophysics*, 416(1), 7-22.
- Jacob, D. E. (2004). Nature and origin of eclogite xenoliths from kimberlites. *Lithos*, 77(1), 295-316.
- Kaban, M. K. et al. (2016). Three-dimensional density model of the upper mantle in the Middle East: Interaction of diverse tectonic processes. *Journal of Geophysical Research*, 121(7), 5349-5364.
- Ringwood, A. E. (1982). Phase transformations and differentiation in subducted lithosphere: implications for mantle dynamics, basalt petrogenesis, and crustal evolution. *The Journal of Geology*, 90, 611-643.