



石榴子石热状态方程参数对弹性压力计计算结果的约束

李博^{1*}

1、中国科学院地球化学研究所

*E-mail: fenberlee@163.com

变质作用过程的 P - T - t 轨迹研究是正确理解地质动力学过程（如板块的俯冲——折返过程），元素迁移循环等的首要步骤之一。估算岩石所经历的温度压力条件的传统方法主要基于变质岩中各矿物相之间的平衡关系或主量/微量元素在不同矿物间的分配等(Holland 和 Powell, 2011; De Capitani 和 Petrakakis, 2010)。但这一方法存在的主要问题有：矿物在变质过程中，峰期变质条件的矿物组合很容易被后期变质作用所掩盖，或者造成一些矿物相的缺失（特别是重结晶变质岩石），而无法准确地估算峰期变质条件(Korsakov 等., 2009; Jamtveit 等., 2016)。此外，在多期变质作用中，如果错误地使用继承矿物相来估算峰期变质温压条件，会将变质地质过程的研究引向歧路。

近年来，一种新型的，基于矿物与其内部矿物包裹体之间物理平衡理论的地质压力估算方法——弹性压力计——开始被用于估算变质岩的压力并引起了地质学家的广泛关注(Cisneros 等., 2020; Johnson 等., 2020; Kohn, 2014)。其理论基础简单来说就是母体矿物与其内部矿物包裹体之间存在着弹性性质差异，矿物包裹体在被捕获时，与母体矿物具有相同的压力条件，但在经历折返，出露于地表的过程中，因其与母体矿物之间的热状态方程参数值不同而产生“剩余”压力(P_{inc})。通过一定的测试方法（如拉曼光谱）可以估算该剩余压力，再结合两种矿物的热状态方程参数，便可估算矿物包裹体在不同温度下的捕获压力(P_e) (Gonzalez 等., 2019; Angel 等., 2015)。这对于估算来自地球深部且富含矿物包裹体的矿物（如金刚石，其中含有大量的石榴子石、橄榄石等包体）的来源压力具有重要的意义。

此外，石榴子石作为普遍存在于各种类型变质岩中的矿物，其所含的矿物包裹体非常丰富（如石英，长石，锆石，金红石等等）。因此，运用石榴子石-矿物包裹体弹性压力计来估算变质岩的变质压力能够与传统地质压力计互为长短，具有深远的科学意义。但石榴子石的组分非常复杂且多变，已有研究表明不同成分的石榴子石其热状态方程参数存在显著差异，如果在弹性压力计的应用中，统一采用某一固定成分的石榴子石来估算其变质压力，其估算结果可能会大大偏离真实值(Milani 等., 2015)。所以准确获得不同石榴子石成分的热状态方程参数是保证弹性压力计的压力估算值精确度的前提。

镁铝、铁铝、钙铝榴石作为天然产出的石榴子石中含量最多的三个端元成分，



其相互之间形成的固溶体的热弹性性质对于石榴子石相关的弹性压力计的计算精度等问题具有重要的研究意义。本文通过金刚石压腔高温高压装置,结合同步辐射 X 射线单晶衍射实验技术,对实验合成的镁铝、铁铝、钙铝榴石及其之间所形成的固溶体系列样品进行了热状态方程的研究,并得到了相应的热状态方程参数。本文的研究结果表明石榴子石的各状态方程参数的误差对压力计算结果具有不同程度的影响,其中热膨胀系数的影响最大,并且在更高的温度条件下,热膨胀系数所造成的压力计算结果的差异也逐渐增大。

此外,比较两种不同矿物组合的弹性压力计(石榴子石-石英弹性压力计以及金刚石-石榴子石弹性压力计)发现,石榴子石的热状态方程参数在金刚石-石榴子石弹性压力计中的影响更为显著。另外,对于弹性压力计的应用,石榴子石的组分差异也会产生不同的计算结果,而在金刚石-石榴子石弹性压力计中不同组分所引起的差异则更为显著。根据前人对变质岩 P-T 条件研究中以及金刚石包体中的石榴子石组分,通过选取成分相近的石榴子石进行压力的估算,得到了与前人传统压力计结果非常接近的估算压力。这表明,本实验得到的石榴子石热状态方程参数应用于弹性压力计时,可以与传统压力计相互验证,互相补充。特别是当一些变质岩中难以找到合适的矿物相组合以用作传统压力计的时候,根据本文实验结果建立的弹性压力计不失为压力估算的一种选择。

参考文献:

- [1] Angel R J, Alvaro M, Nestola F, et al. Diamond thermoelastic properties and implications for determining the pressure of formation of diamond-inclusion systems[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, 56: 211-220.
- [2] Cisneros M, Ashley K T, Bodnar R J. Evaluation and application of the quartz-inclusions-in-epidote mineral barometer[J]. *American Mineralogist*, 2020, 105: 1140-1151.
- [3] De Capitani C, Petrakakis K. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software[J]. *American Mineralogist*, 2010, 95: 1006-1016.
- [4] Gonzalez J P, Thomas J B, Baldwin S L, et al. Quartz-in-garnet and Ti-in-quartz thermobarometry: Methodology and first application to a quartzofeldspathic gneiss from eastern Papua New Guinea[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2019, 37: 1193-1208.
- [5] Holland T, Powell R. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29: 333-383.
- [6] Jamtveit B, Austrheim H, Putnis A. Disequilibrium metamorphism of stressed lithosphere[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 1-13.
- [7] Johnson T A, Cottle J M, Larson K P. Delineation of multiple metamorphic events in the Himalayan Kathmandu Complex, central Nepal[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2020, 00: 1-30.
- [8] Kohn M J. “Thermobarometry”: Calibration of spectroscopic barometers and thermometers for mineral inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 388:



187-196.

- [9] Korsakov A V, Perraki M, Zhukov V P, et al. Is quartz a potential indicator of ultrahigh-pressure metamorphism? Laser Raman spectroscopy of quartz inclusions in ultrahigh-pressure garnets[J]. European Journal of Mineralogy, 2009, 21: 1313-1323.