

高温高压下上地幔及俯冲带典型矿物稳定性及热弹性研究

范大伟 许金贵 周文戈 谢鸿森

中国科学院地球化学研究所地球内部物质高温高压院重点实验室 贵阳 550081

国内外进行矿物的 PV (压力和体积) 状态方程的研究很普遍, 对于 PVT (压力、体积和温度) 状态方程的研究则相对较少, 主要因为 PVT 状态方程的研究需要在高压原位条件下同时保持高压腔体中温度场均匀且恒定, 在实验上的实施难度较大。PVT 状态方程的研究能够获得矿物在不同温度和压力条件下的密度、波速、热膨胀系数、体弹模量的温度和压力导数等物理量。这些重要的物性参数不仅可以为地震波的反演和地球深部精细物质结构模型的建立提供重要的实验数据, 也能够为深入了解矿物在地球深部的稳定性以及元素的赋存状态和物质循环提供基础。为此, 开展了上地幔及俯冲带主要矿物 (石榴子石和辉石) 的稳定性及 PVT 状态方程研究。

主要研究成果如下:

(1) 在国内率先搭建了一套具有普适性、与国际技术水平相当且能稳定运行的同步辐射微区电阻加温装置。

高温高压实验技术的发展是高压实验研究的基础, 发展和完善高温高压实验测量技术是顺利完成相关实验的基础和根本。矿物 PVT 状态方程研究需要在同时高温高压条件下进行原位 X 射线衍射测量。但国内绝大部分的金刚石压腔实验是在常温高压条件下完成的, 只有极少数实验是在同时高温高压条件下完成的, 而且实验的温度和压力值较低 ($<600\text{ K}$ 和 $<20\text{ GPa}$)。此外, 国内同步辐射 X 射线衍射装置上还没有集成微区电阻加热实验技术, 因此, 严重阻碍了国内 PVT 状态方程的研究。鉴于此, 通过对国内现有的微区电阻加温技术进行了优化改进, 改进了微电炉的设计, 同时降低了微区电阻加温的散热率, 在国内率先将微区电阻加热技术集成于同步辐射 X 射线衍射装置, 从而为矿物 PVT 状态的深入研究提供了技术支撑。此装置所能达到的温度和压力条件及稳定运行时间都与国际上的实验技术水平相当。

(2) 初步明确了组分及微量水对石榴子石和辉石族矿物稳定性及 PVT 状态方程的影响。

对于石榴子石族矿物, 系统研究了二端元系列 (镁铝-铁铝榴石、锰铝-铁铝榴石, 钙铝-钙铁榴石等) 以及含水石榴子石矿物的高温高压热弹性性质, 首次获得了二端元系列石榴子石矿物的热弹性参数值随组分的变化规律, 以及石榴子石含水对其热弹性参数值的影响。其中组分变化对二端元石榴子石矿物体弹模量值的影响较大, 并且其体弹模量值随组分变化呈现规律性的变化趋势 (依次增大或减小); 但是, 组分变化对二端元石榴子石矿物热膨胀系数值和体弹模量的导数值的影响较小, 并且其热膨胀系数值和体弹模量的温度导数值与组分之间也无规律性的变化趋势; 另外, 石榴子石含水会对其体弹模量及其压力导数值产生较大的影响, 但对其热膨胀系数值及体弹模量的温度导数值则未有明显的影响。同时, 石榴子石含水会明显减小其在高温高压条件下的密度值, 通过与 PREM 密度模型对比后表明, 上地幔矿物 (橄榄石、辉石以及石榴子石等) 应该含有微量结构水, 并且水含量在某些特殊条件下甚至能达到几百 ppm。

对于辉石族矿物, 利用国际上先进的同步辐射高温高压单晶 X 射线衍射实验技术, 针对单斜辉石和斜方辉石均进行了较为详细的高温高压相变及热弹性性质研究, 研究发现: 辉石族矿物 (特别是斜方辉石矿物) 组分变化明显影响其相变压力和高压相的结构, 比如富 Fe 斜方辉石的第二个高压相具有斜方晶系 Pbcn 空间群, 而贫 Fe 斜方辉石则具有斜方晶系 Pca21 空间群等; 同时, 辉石族矿物含有微量水及其他微量元素 (如 Al, Ni 和 Cr 等) 也会对其相变造成较大的影响, 比如相比于含 Fe 斜方辉

石，含微量 Al 的斜方辉石具有更大的相变压力，并且含 Al 斜方辉石具有明显大得多的含水量等；另外，从密度角度考虑，辉石族矿物有利于板片进入到 410km 以下的深度；在 660km 界面，亚稳相辉石的密度都远低于 PREM 地幔的密度，将抑制板片向下俯冲，有利于板片的停滞。