

文章编号: 0253-3782(2002)04-0436-05

研究简报

## 蛇纹石化辉石岩纵波速度的高温高压 实验研究及其地质意义\*

刘巍<sup>1)</sup> 杜建国<sup>1)</sup> 白利平<sup>1)</sup>  
谢鸿森<sup>2)</sup> 郭捷<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心  
2) 中国贵阳 550002 中国科学院地球化学研究所

**关键词** 高温高压实验 纵波速度 蛇纹石脱水作用 岩石结构

**中图分类号:** P315.8 **文献标识码:** A

高温高压下弹性波速测量是研究地球深部物质状态、性质和运动等问题的一种重要手段. 现今人们认为, 脱水是引起地球内部地震波速度异常的主要原因之一(Kern, 1982; Ito, 1990; Christensen, 1989; Popp, Kern, 1993; 宋茂双等, 1996; 周文戈, 1998; 赵志丹等, 1996). 地球物理、地球化学和岩石学等资料表明, 云母、闪石和蛇纹石等含水矿物的脱水作用是地球深部水的主要来源(Ulmer, Tromsdorff, 1995; Ito, Tatsumi, 1995; Newton, 1989). 蛇纹石是地幔的主要矿物——橄榄石和辉石的主要蚀变矿物, 含H<sub>2</sub>O量达13%(wt), 远远高于其它含水矿物. 在高温高压条件下, 对蛇纹石的脱水作用和相变已有详细研究(Liu, 1986; Ulmer, Tromsdorff, 1995), 但在脱水过程中就位测量岩石弹性波速的实验却不多. Popp和Kern(1993)在0.2 GPa、20℃~750℃条件下测量了蛇纹岩的弹性波速, 发现纵波速度( $v_p$ )在大约500℃、横波速度( $v_s$ )在680℃开始发生大幅度下降. 宋茂双等(1996)在2.0~5.0 GPa和温度达1500℃范围内测量了P波速度, 探讨了温度、压力、相变和蛇纹石脱水作用对碱性橄榄玄武岩波速的影响, 认为在压力小于3.0 GPa条件下, 蛇纹石脱水是导致玄武岩波速下降的主要原因. 上述研究仅仅观察到了波速的变化, 但没有对蛇纹石在升温和升压过程中的变化进行分析. 为了更好地将弹性波速的变化与蛇纹石的反应变化对应起来分析实验结果, 本研究在1.0 GPa、室温至960℃就位测量蛇纹石化辉石岩纵波速度的过程中, 在不同温度处, 特别是波速突变点处取样, 并详细分析了使弹性波速发生异常变化的原因.

### 1 样品和方法

实验样品是蛇纹石化辉石岩、细粒残余块状构造, 沿矿物颗粒边缘和内部裂缝蛇纹石化严重, 大部分颗粒仅存假象. 其化学组成和CIPW结果列于表1. 其矿物组成是: 蛇纹石(70%) + 辉石(17%) + 橄榄石(8%) + 白云石(2%) + 钛铁氧化物(2%~3%).

岩石纵波速度测量实验是在中国科学院地球化学研究所地球深部物质实验室YJ-3000 t压力机上的弹性波速测量系统内进行的, 有关实验设备和实验技术的描述详见谢鸿森等(1993)文章. 高温高压下岩石弹性波速测量采用的方法是脉冲透射-反射法, 测量误差为2%(Liu *et al.*, 2000). 与文献中装置不同的是, 本研究为了降低样品室中的温度梯度和压力梯度采用了新的样品组装方式, 样品被切制成直径为12 mm、长8 mm的圆柱, 样品上下用叶腊石柱(直径12 mm、长度12 mm)做缓冲棒. 谢鸿森(1997)经测量认为, 高压腔体内中心纵向长度8 mm区域可近似为等温区. 在样品与叶腊石接触的上下底面垫有圆形不锈钢片(厚

\* 国家自然科学基金(10032040 和 49874013)资助项目.  
2001-06-22 收到初稿, 2002-01-18 收到修改稿并决定采用.

0.1 mm), 以利于反射波的识别。

实验过程中, 首先以  $4 \times 10^6$  Pa/s 的速率升压至 1.0 GPa. 稳定 10 分钟后, 以  $1^\circ\text{C}/\text{s}$  的速率升温至所需温度, 恒温 10 分钟后进行纵波速度测量, 然后依次反复升温并测量纵波速度. 直到  $960^\circ\text{C}$ 、恒温 120 分钟后, 这时波速随恒温时间的延长而逐渐趋于不变, 而后将样品淬火、缓慢降压、取样并做出这个样品的波速-温度关系曲线. 然后以同样的样品组装, 使用另外 3 个样品以同样的实验程序在波速发生较大变化的温度点  $540^\circ\text{C}$ 、 $720^\circ\text{C}$  和  $910^\circ\text{C}$  处获取实验产物。

## 2 结果

图 1 给出了在 1.0 GPa 压力, 室温至  $540^\circ\text{C}$ 、 $720^\circ\text{C}$ 、 $910^\circ\text{C}$  和  $960^\circ\text{C}$  条件下, 蛇纹石化辉石岩的纵波速度随温度变化的曲线. 尽管各条曲线的测量值之间存在着偏差, 但它们的变化趋势比较一致. 在 1.0 GPa 条件下, 纵波速度随温度升高的变化趋势(以室温至  $960^\circ\text{C}$  曲线为例)是: 室温至  $520^\circ\text{C}$  时,  $v_p$  随温度升高从  $6.4 \text{ km/s}$  呈线性降低到  $6.2 \text{ km/s}$ ; 当  $520^\circ\text{C} < T < 670^\circ\text{C}$ ,  $v_p$  随温度升高迅速降低; 当  $T = 670^\circ\text{C}$  时,  $v_p$  达到最小值  $5.4 \text{ km/s}$ , 与室温时初始值  $6.4 \text{ km/s}$  相比降低了约 15%; 当  $670^\circ\text{C} < T < 785^\circ\text{C}$  时,  $v_p$  随温度升高逐渐变大, 在  $785^\circ\text{C}$  时达到最高; 当  $T > 785^\circ\text{C}$ ,  $v_p$  再次迅速下降, 直至实验结束 ( $960^\circ\text{C}$ ) 时降到  $5.0 \text{ km/s}$ .

在压力恒定条件下, 蛇纹岩的  $v_p$  随温度的变化趋势特征为: 缓慢下降 → 快速下降 → 快速上升 → 再次快速下降. 与由温度升高所引起的岩石内部的一系列结构变化密切相关。

在不同温度淬火后, 将叶腊石从压机上刚取出时, 可清楚地观察到有水呈小气泡状沿加热片快速渗出, 同时在上下压砧的底面和顶面用手能够摸到冷凝的水珠. 将 4 个淬火产物沿中部垂

直, 并磨制成电子探针分析用光薄片. 经光学显微镜分析, 发现不同温度下岩石内部结构发生了明显的变化: 在  $540^\circ\text{C}$  时所取得的产物中(图 2b), 有约 30% 的蛇纹石脱水; 在  $720^\circ\text{C}$  时, 有 80% 的蛇纹石脱水, 生成细粒集合体, 颗粒大小约为  $5 \sim 20 \mu\text{m}$ , 充填于残余的橄榄石和辉石边缘及解理缝内, 白云石的颗粒边缘已发生分解反应(图 2c). 在  $910^\circ\text{C}$  和  $960^\circ\text{C}$  的薄片内, 已无法识别出白云石(图 2d); 橄榄石颗粒的反应边明显(图 2f), 在正交偏光显微镜下, 边缘干涉色与中心的干涉色不同(图 2d). 经电子探针分析表明, 细粒集合体的组成矿物是镁橄榄石和顽火辉石(图 2e); 从中心到边缘, 在残余的橄榄石颗粒中,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$  的含量增大; 在残余的辉石颗粒中,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{TiO}_2$  的含量增大; 辉石由古铜辉石趋于向顽火辉石转变; 橄榄石由贵橄榄石趋于向镁橄榄石转变(图 2e).

表 1 实验样品的化学组成和 CIPW 计算结果\*

初始物的化学组成		CIPW 标准矿物计算结果	
化学成分	含量	标准矿物	含量
$\text{SiO}_2$	41.6%	Or	1.11%
$\text{TiO}_2$	0.11%	Ab	3.15%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.88%	An	2.78%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	9.56%	Di	15.61%
$\text{MgO}$	31.25%	En	17.78%
$\text{CaO}$	3.99%	Fs	2.77%
$\text{Na}_2\text{O}$	0.48%	Fo	45.31%
$\text{K}_2\text{O}$	0.16%	Fa	7.53%
$\text{MnO}$	0.09%	Mt	2.55%
烧失	10.44%	Ilm	0.15%
合计	98.56%	合计	98.74%

\* 中国科学院地球化学研究所(贵阳)全岩化学分析实验室分析。

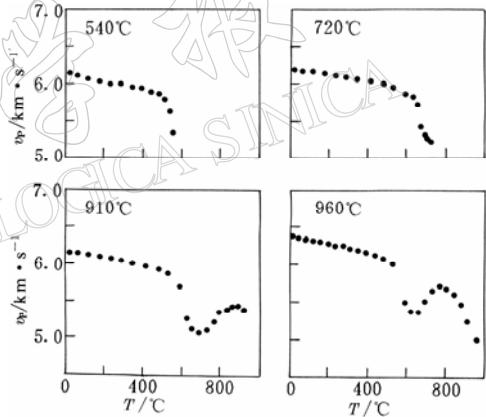


图 1 在 1.0 GPa、不同温度条件下蛇纹石化辉石岩  $v_p$ - $T$  变化趋势

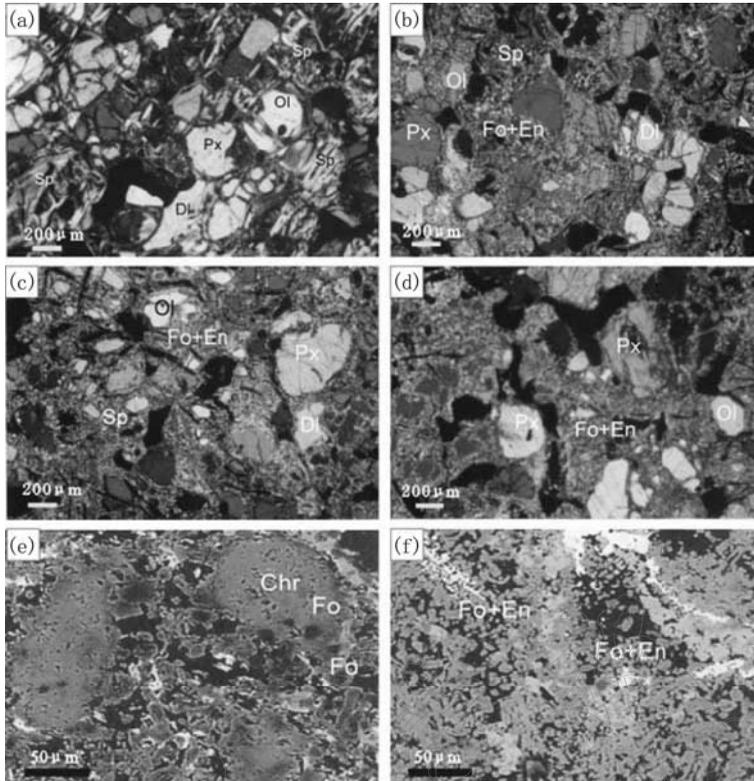


图2 蛇纹石化辉石岩初始样品与实验产物的显微图象和电子探针背散射图象

- (a) 实验样品蛇纹石化辉石岩; (b) 1.0 GPa、540℃时, 约30%蛇纹石(Sp)脱水; (c) 1.0 GPa、710℃时, 约80%蛇纹石脱水生成细粒集合体, 白云石(Dl)的颗粒边缘已发生反应; (d) 1.0 GPa、910℃, 残余的橄榄石(Ol)和辉石(Px)颗粒反应边结构明显. (b)、(c)、(d)中存在大量的细粒集合体, 粒度约5~20 μm, 随温度升高和脱水程度增加而增多; (e) 1.0 GPa、960℃, 残余橄榄石(Ol)颗粒中心向边缘的灰度变化反映其成分的变化, 从中心向边缘由贵橄榄石(Chr)向镁橄榄石(Fo)转变; (f) 1.0 GPa、960℃. 蛇纹石脱水后生成的细粒集合体由镁橄榄石(Fo)和顽火辉石(En)组成

### 3 讨论

图1中4条 $v_p$ - $T$ 关系曲线在相同温度处的测量值存在着偏差, 这主要是由于实验装置的系统误差, 以及样品的不均一和各向异性(在0.6 GPa压力下, 蛇纹岩纵波速度的各向异性高达25%(Kern *et al.*, 1997))造成的. 但各条曲线具有一致的变化趋势. 这种特征说明, 由于温度升高所引起的岩石结构变化对波的传播具有重要作用. 岩石结构变化主要包括矿物组成、大小、裂缝、颗粒形状和颗粒边缘等.

当温度低于520℃时, 弹性波速随温度升高呈线性降低, 反映了由于温度升高引起的岩石和矿物热膨胀, 使岩石密度和强度下降, 同时岩石内部裂纹在较高的围压下不会张开, 故波速随温度升高呈线性缓慢下降. 但当温度大于520℃时,  $v_p$ 的非线性下降表明蛇纹石开始脱水. 光学显微镜和电子探针分析结果表明, 蛇纹石脱水过程伴随有热裂缝和细粒集合体产生(图2b), 使矿物组成发生了变化.

蛇纹石含有约13%(wt)的 $H_2O$ , 在高温高压下随脱水作用释放出来. 在720℃实验产物的光薄片, 80%的蛇纹石发生了分解; 通过电子探针分析, 在910℃时的实验产物薄片已找不到蛇纹石, 说明蛇纹石在500℃~910℃完全脱水(Ulmer, Tromsdorff, 1995), 生成了细粒集合体, 粒度有几个微米~几十个微米, 主要成分是镁橄榄石和顽火辉石. 本实验的温度和压力均超过水的临界压力(22 MPa)和临界温度(374℃), 因此, 蛇纹石脱出的水处于超临界状态. 超临界流体具有许多特殊的性质(Robert *et al.*, 1991), 如低密度、低粘度、易流动并易与矿物颗粒反应, 从而使波速降低. 随着温度升高, 流体膨胀所产生的热应力将

导致已有裂缝裂开, 并产生新裂缝. 细粒集合体的形成、孔隙体积的增加和孔隙形状的改变也引起了波速的下降. 周文戈(1998)在 1.0 GPa 压力下蛇纹岩脱水的超声测量研究中, 在大约 700°C 曾观察到蛇纹岩爆炸, 并从高压腔体中喷出, 可见内压之大. 当温度(640°C~780°C)较高时, 随着蛇纹石脱水量的快速增多, 样品内部流体压力迅速增大(Lebedev, Kern, 1999), 导致超临界流体急剧膨胀. 当流体压力大于围压时, 部分流体将沿加热片和压砧从样品室里逸出(在取淬火产物时已观察到了有水沿加热片和叶腊石的缝隙渗出的现象), 造成样品室内超临界流体量减少、流体压力降低, 最终导致裂缝闭合. 因此, 在 640°C~780°C 时, 蛇纹石纵波速度异常升高.

Richet 等(1994)经实验认为, 硅酸岩的熔融前效应开始于低于熔点几百度的温度, 引起热容、热膨胀系数和压缩率的异常变化, 最终导致岩石声波速度迅速下降. 910°C 和 960°C 的实验产物薄片分析结果显示, 残余的橄榄石和辉石颗粒的边缘和成分发生了很大的变化, 在光学显微镜下表现为边缘模糊, 干涉色与矿物中心不一致. 经电子探针分析表明由中心至边缘铁含量明显降低, 说明有铁氧化物沿边缘析出. 除了铁含量有变化, 其它氧化物也呈现出不同程度的有规律的变化. 这种岩石结构和成分的变化, 可能是矿物熔融前效应的一种表现形式, 也是  $v_p$  再次下降的主要原因.

在蛇纹石脱水过程中形成的镁橄榄石和顽火辉石是高密度物质, 具有较高的弹性波速, 但其呈细粒集合体出现, 矿物颗粒大小仅为微米级, 岩石内部残存的超临界流体充填在颗粒边界和裂缝内, 因此, 新生成的高密度矿物相并不能使  $v_p$  增大.

## 4 地质意义

板块俯冲可将一些含水矿物带入下地壳和上地幔中, 这些含水矿物如蛇纹石、云母和角闪石等的脱水作用对岩石圈形成、板块运动和地质灾害具有重要作用. 本研究的实验条件(1.0 GPa 压力、室温至 960°C)类似下地壳和上地幔上部的温度和压力, 脱水作用使岩石自身波速快速下降. 蛇纹石脱出的水变成超临界流体, 并与围岩相互作用, 使围岩的强度下降, 发生部分熔融(Ulmer, Tromsdorff, 1995), 也会导致波速降低. 由此, 脱水的直接作用和间接作用可用于解释这个层位内部的低速层.

在岩石摩擦时产生粘滑不稳定性事件中, 水是一个重要因素. 含水矿物脱出的水在温度和压力的作用下沿裂缝向上运移. 水的存在使岩石强度减弱. 它使接触处产生蠕变, 引起接触面积发生变化, 导致摩擦力与接触时间发生关系. 水的这种弱化作用形成了发生摩擦不稳定性条件. 在 2.0~9.0 GPa 的高温条件下, 已清楚观测到蛇纹石的声发射现象(Meade, Jeanslog, 1991). 周文戈(1998)在 1.0 GPa 压力条件下, 观察到蛇纹岩脱水过程中伴随有超声波振幅增大现象, 有时样品会发生爆炸, 这说明在脱水过程中岩石的内压和能量急剧增大. 这类似火山和地震发生之前的能量聚集和内压升高过程.

## 5 结论

1) 利用 YJ-3000 t 压力机, 在 1.0 GPa、室温至 960°C 就位测量了蛇纹石化辉石岩的纵波速度, 并在波速异常变化处获取了实验产物. 在恒压升温过程中, 波速从 6.4 km/s 降低到 5.0 km/s, 下降幅度达 22%, 并在 660°C~800°C 温度区间内,  $v_p$  异常增大.

2) 结合详细的薄片和电子探针鉴定结果, 分析了蛇纹石化辉石岩纵波速度变化的原因: 主要是由于高温高压下蛇纹石发生脱水作用引起了岩石内部结构的变化, 包括矿物颗粒组成、大小和形状以及矿物边缘的变化等.

3) 蛇纹石脱水作用在研究下地壳和上地幔的低速层、部分熔融以及地震的发生具有重要的作用. 高温高压实验中得到了周文戈副研究员、刘永刚博士和丁东业副研究员的帮助. 研究中白志民教授和朱井泉教授在观察、分析薄片方面给予了大量指导. 在此一并致谢.

## 参 考 文 献

宋茂双, 谢鸿森, 张月明, 等. 1996. 高温高压下碱性橄榄玄武岩的 P 波速度及其影响因素[J]. 科学通报, 41(18): 1 692~1 694

- 谢鸿森, 张月明, 徐惠刚, 等. 1993. 高温高压下测量岩石矿物波速的新方法及其意义[J]. 中国科学(B辑), **23**: 861~864
- 谢鸿森. 1997. 地球深部物质科学导论[M]. 北京: 科学出版社. 50
- 赵志丹, 高山, 骆庭川, 等. 1996. 秦岭和华北地区地壳低速层的成因探讨——岩石高温高压波速实验证据[J]. 地球物理学报, **39**(5): 642~651
- 周文戈. 1998. 高温高压下岩石弹性波速度测量及地质应用[R]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所博士后研究报告, 11~12
- Christensen N I. 1989. Reflectivity and seismic properties of the deep continental crust[J]. *J Geophys Res*, **94**: 17 795~17 804
- Ito K, Tatsumi Y. 1995. Measurement of elastic wave velocities in granulite and amphibolite having identical H<sub>2</sub>O-free bulk compositions up to 850 °C at 1 Gpa[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **133**: 255~264
- Ito K. 1990. Effects of H<sub>2</sub>O on elastic wave velocities in ultrabasic rocks at 900 °C under 1 Gpa[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **61**: 260~268
- Kern H. 1982. Elastic wave velocity in crustal and mantle rocks at high pressure and temperature: the role of the high-low quartz transition and of dehydration reactions[J]. *Physics Earth Planet Inter*, **29**: 12~23
- Kern H, Liu B, Popp T. 1997. Relationship between anisotropy of P and S wave velocities and anisotropy of attenuation in serpentinite and amphibolite[J] *J Geophys Res*, **102**(B2): 3 051~3 065
- Lebedev E B, Kern H. 1999. The effect of hydration and dehydration reactions on wave velocities in basalts[J]. *Tectonophysics*, **308**: 331~340
- Liu Y, Xie H, Guo J, et al. 2000. A new method for experimental determination of compressional velocities in rocks and minerals at high-pressure[J]. *Chin Phys Lett*, **17**(12): 924~926
- Liu L. 1986. Phase transformations in serpentine at high pressure and temperature and implications for subducting lithosphere[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **42**: 255~262
- Meade C, Jeanlog R. 1991. Deep-focus earthquakes and recycling of water into the earth's mantle[J]. *Science*, **252**: 68~72
- Newton R C. 1989. Metamorphic fluids in the deep crust[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **17**: 385~412
- Popp T, Kern H. 1993. Thermal dehydration reactions characterised by combined measurements of electrical conductivity and elastic velocities[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **120**: 43~57
- Richet P, Ingrin J, Mysen B O, et al. 1994. Premelting effects in minerals: an experimental study[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **121**: 589~600
- Robert W S, Thomos B S, Anthony A C. 1991. Supercritical water: A medium of chemistry[J]. *Chemistry and Engineering News*, **11**: 26~39
- Ulmer P, Tromsdorff V. 1995. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism[J]. *Science*, **268**: 858~861

## COMPRESSIONAL ELASTIC WAVE VELOCITIES OF SERPENTINIZED PYROXENITE AT HIGH PRESSURES AND HIGH TEMPERATURES AND ITS GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

Liu Wei<sup>1)</sup> Du Jianguo<sup>1)</sup> Bai Liping<sup>1)</sup> Xie Hongsen<sup>2)</sup> Guo Jie<sup>2)</sup>

1) Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China

2) Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

**Key words:** high pressures and high temperatures experiment; compressional wave velocity; dehydration of serpentine; rock fabric