

# 高温高压下蛇纹岩脱水的 弹性特征及其意义

谢鸿森 周文戈 李玉文 郭捷 许祖鸣

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

[摘要] 为了了解蛇纹石在脱水过程中的弹性性质, 在 1.0GPa 和同时加热条件下, 利用脉冲透射法对采自云南双沟街的蛇纹岩进行了超声测量. 实验发现, 当温度升高至 640℃时, 蛇纹岩的超声波纵波速度随温度的升高而急剧下降. 温度继续升高(700℃以上), 样品在高压腔中爆炸. 通过对超声波速下降时和样品发生爆炸前的超声波波形的比较发现, 随温度升高超声波振幅有了明显的增大. 实验产物的鉴定并与前人相关实验结果比较表明, 蛇纹岩在高压高温下波速的突然下降和振幅增大与样品中蛇纹石发生脱水反应有关. 目前还不能准确解释超声波振幅增大的原因, 但上述现象的发现为探讨深部地质灾害的成因并对其进行监测提供了一个新的线索.

[关键词] 高温高压, 蛇纹岩, 超声波速度, 超声波振幅.

## 1 引言

实验研究发现, 在可能被大洋板块俯冲作用带入下地壳和上地幔的多种含水矿物(如绿泥石、滑石、云母、蛇纹石等)中, 蛇纹石具有最高的稳定压力和稳定温度, 由此推断蛇纹石的脱水作用可能是俯冲带之下地幔部分熔融作用所需自由水的主要来源<sup>[1]</sup>. 为此, 研究蛇纹石高压下的脱水作用, 观测脱水作用过程中地球物理参数的变化, 已成为板块俯冲带研究的重要内容, 引起了许多实验地球科学家的注意. 他们或直接使用蛇纹石、蛇纹石化玄武岩作为样品, 或在 MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 体系的实验研究中都对蛇纹石的高压脱水作用与俯冲带的关系进行了讨论<sup>[2-8]</sup>. 宋茂双等通过蛇纹石高温高压下电导率的变化, 提供了测定蛇纹石脱水温度的新方法<sup>9</sup>. 然而有关蛇纹石脱水过程中的弹性性质的研究并不多见<sup>[5]</sup>. 为此, 本研究采用蛇纹岩作为实验样品进行高压高温下的超声波速度的测量, 重点对蛇纹岩脱水前后的超声波形的变化进行了观测.

[收稿日期] 1999-12-05 收到, 2000-05-02 收到修定稿.

[基金项目] 国家自然科学基金项目(49774235, 49772111)和高温高压地球动力学开放研究实验室资助项目.

[作者简介] 谢鸿森, 男, 1937 年出生, 研究员, 博士生导师, 长期从事地球深部物质的实验研究.

## 2 实验样品与实验方法

实验样品是采集于云南双沟街的蛇纹岩, 为黑色致密块状, 由 95%(体积百分比)的蛇纹石和约 5%(体积百分比)的钛铁氧化物及少量粘土矿物组成<sup>[10]</sup>. 蛇纹石在显微镜下呈纤维状集合体, 经 X-射线粉晶分析主要为叶蛇纹石. 将蛇纹石磨制加工成直径为 12mm, 高 33mm 的圆柱体样品, 组装在叶蜡石传压介质中, 待实验中使用.

实验是在 YJ-3000t 压力机静态超高压大腔体设备上进行的. 实验样品的组装方式和超声波纵波速度的测量方法已作过报道<sup>[11]</sup>. 实验中使用 TDS-784A 数字示波器记录超声波的走时, 其精度为 0.01 $\mu$ s. 用位移传感器实测样品长度, 并在超声波形发生明显变化时予以记录. 实验共进行 3 次, 均在压力为 1.0 GPa 进行. 实验开始, 先以 4 $\times$ 10<sup>5</sup> Pa/s 的升压速率使样品室压力升高至 1.0 GPa, 待压力稳定 10 min 后开始加热. 以 20  $^{\circ}$ C/s 的升温速率升温, 温度升至所需温度后, 恒温 5 min 后进行纵波走时测量和超声波形的观察. 以此升温方法直到温度高达致使样品发生爆炸并从高压腔中喷出时, 立即停止加热, 实验结束.

## 3 实验结果

根据实验测量得出的走时和样品长度, 计算出纵波速度, 绘出 1.0 GPa 压力下蛇纹岩纵波速度 ( $V_p$ ) 随温度的变化曲线(图 1). 可以看出, 3 次实验有较好的重复性: 在加热温度较低时, 蛇纹岩的纵波速度 ( $V_p$ ) 随温度的升高至 300  $^{\circ}$ C 以上,  $V_p$  有增大的现象. 当温度升高到 640  $^{\circ}$ C 左右, 样品的纵波速度发生突然下降. 温度继续升高至 700  $^{\circ}$ C 以上样品发生爆炸. 样品发生爆炸时除有巨大响声外, 还观测到有雾状物质从样品室中喷出. 对实验后样品的观察和鉴定表明, 在样品室中心大约有三分之一的样品在爆炸过程中喷失. 实验过程中观察并记录的超声波波形表明, 在纵波速度发生突然下降的同时, 超声波的

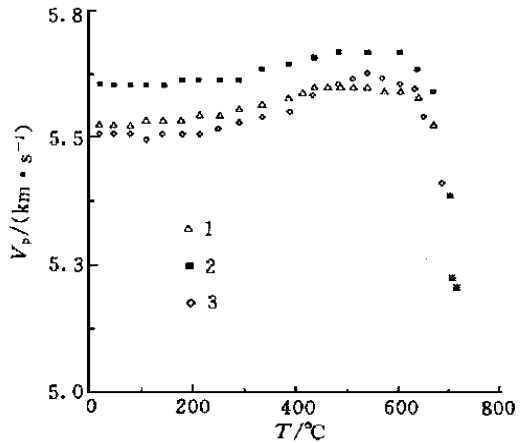


图 1 1.0GPa 压力下蛇纹岩的纵波速度 ( $V_p$ ) 随温度的变化 (1,2,3 表示 1—3 次实验, “\*” 表示实验样品爆炸)

Fig.1 Velocity ( $V_p$ ) of serpentinite vs temperature at 1.0 GPa

振幅明显增大. 图 2(a)为实验 1 加热过程中温度为 644  $^{\circ}$ C 和 708  $^{\circ}$ C 时记录的超声波波形, 图 2(b)为实验 2 加热过程中温度为 641  $^{\circ}$ C 和 705  $^{\circ}$ C 时记录的超声波波形, 图 2(c)为实验 3 加热过程中温度为 636  $^{\circ}$ C 和 738  $^{\circ}$ C 时记录的超声波波形. 由这 3 个图可以看出, 样品爆炸时的超声波波峰值明显地高出了蛇纹石脱水前的超声波波峰.

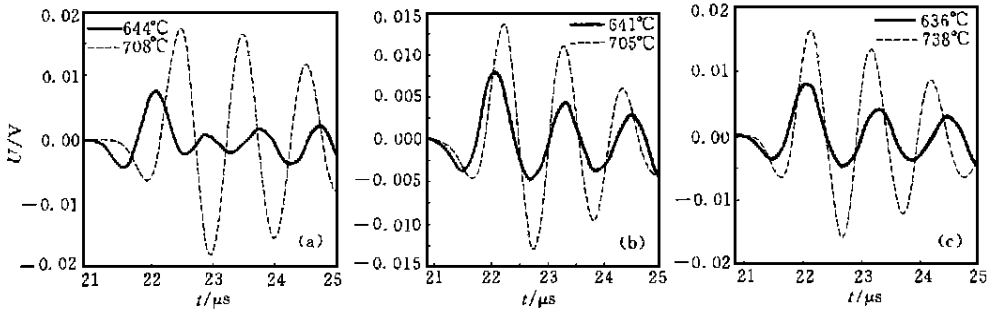


图2 1.0 GPa条件下,蛇纹岩脱水前后的超声波形的振幅比较

实线表示蛇纹石脱水前的超声波形,虚线表示蛇纹石脱水后的超声波形,图例中的数字表示记录波形的温度。

(a) 第一次实验;(b) 第二次实验;(c) 第三次实验。

Fig.2 Compared the amplitude of ultrasonic wave forms of serpentine before dehydration with that after dehydration at 1.0 GPa

## 4 讨 论

根据前人实验得出的蛇纹石相图,可以判断本实验中蛇纹石在1.0 GPa压力和640℃左右时纵波速度的突然降低是因蛇纹石的脱水反应引起的,所以推断1.0 GPa压力下蛇纹石的脱水温度为640℃。前人大量实验结果表明,在同一压力下,所测定的蛇纹石的脱水温度范围较大,1.0 GPa压力下的脱水温度范围为560—800℃<sup>[1-4]</sup>,这是不同实验所使用样品在成分上的差别造成的。蛇纹石的类型不同其脱水温度也不同,叶蛇纹石比利蛇纹石和纤蛇纹石的脱水温度高<sup>[3]</sup>,所以在含叶蛇纹石较高的样品中测量得出的脱水温度较高。如宋茂双等用电导率法测定蛇纹石脱水温度的实验中,样品中叶蛇纹石占比例很高(98%),1.0 GPa压力下获得的脱水温度高达674℃<sup>[9]</sup>。实验样品中其他组分的存在也对脱水温度的测量结果有影响,如Ulmer和Trommsdorff的实验样品中含有一定数量的氢氧化镁石,1.0 GPa压力下获得蛇纹石的脱水温度为620℃<sup>[1]</sup>。1.0 GPa压力下蛇纹石的脱水反应可分为两步:首先,蛇纹石脱水生成橄榄石+滑石+水,然后,橄榄石+滑石→顽火辉石+水<sup>[2,3]</sup>。实际上后一步的反应又可以分解为两个反应:滑石→顽火辉石+SiO<sub>2</sub>+水,橄榄石+SiO<sub>2</sub>→顽火辉石。Ulmer和Trommsdorff实验中使用的蛇纹石样品中含有氢氧化镁石,可能是引起脱水温度降低的原因。本实验样品中含叶蛇纹石比例较高(95%),实验得出的脱水温度与前人结果比较,在中等偏高的范围(表1)。

固体物质加热至一定温度时超声波速度发生突然降低,称之为声软化现象。这种现象在常压和高压实验中均有发现。声软化现象可能是高温条件下样品强度降低引起的<sup>[12]</sup>。与以往实验不同,本实验中样品主要由蛇纹石组成,而且蛇纹石在高压下发生声软化的温度与前人测定的相同压力下蛇纹石的脱水温度相当,尽管蛇纹石脱水分解形成的橄榄石、顽火辉石的纵波速度比蛇纹石的纵波速度高<sup>[13,14]</sup>,但同条件下水的弹性波速度却比蛇纹石的弹性波速度低<sup>[13]</sup>,由于水对实验样品纵波速度的影响比橄榄石和顽火辉

石对实验样品的影响大, 造成了测得的蛇纹岩纵波速度大幅度减低, 所以我们初步推断蛇纹石的脱水反应造成声软化现象的发生.

表 1 在 1.0 GPa 压力下蛇纹石脱水温度的实验结果比较

Table 1 Experimental results of dehydration temperature for serpentine at 1.0 GPa

实验者	样品中蛇纹石成分	样品中其他成分	实验方法	蛇纹石脱水温度(°C)
宋茂双等 <sup>[9]</sup>	叶蛇纹石占 98%	少量滑石	电导率	674
本研究	叶蛇纹石占 95%	5% 钛铁氧化物	纵波波速	640
Ulmer P and Trommsdorff V <sup>[4]</sup>	叶蛇纹石	氢氧镁石	相变	620

目前我们还无法直接观察到高温高压下蛇纹石脱水过程中样品状态的变化, 但根据前人关于脱水反应机理的研究结果, 可以对实验过程中样品的状态变化作出如下分析: 在蛇纹石脱水反应中样品不仅产生了大量的自由水, 而且矿物粒度变小. 水在高温高压下处于超临界态, 超临界水具有低的粘度和强的流动性, 极易与矿物颗粒亲合, 结果使样品成为一种细粒化的物质, 从而使样品的强度突然降低, 具体表现为弹性波速度的快速下降. 这种细粒化物质在别的含水体系的实验中(如滑石脱水实验)也曾观察到过<sup>[16]</sup>.

常压高温下超声测量研究认为, 随温度升高超声波能量衰减增大, 使接收到的超声波振幅减小<sup>[17, 18]</sup>. 然而本实验中, 当蛇纹岩脱水时, 超声波振幅不但没有减少反而发生明显增大. 这可能是由于蛇纹石的脱水使样品高度细粒化的同时也使样品均匀程度提高, 由矿物颗粒界面和微裂隙造成的声波反射减小, 超声波的透射率增大, 结果造成了振幅的增大. 对上述实验现象的物理机制还有待深入研究.

本实验中纵波波速突然下降和超声波振幅增大的现象都发生在样品即将发生爆炸之前. 样品爆炸是内部压力大于外部压力的结果, 也是样品中能量的突然释放. 因此本实验中随温度升高所表现的上述弹性特征也可以看作蛇纹石脱水反应引起样品内压升高和内部能量高度聚集的外部表征. 从总体上来说, 火山和地震的发生也有类似能量聚集和内压升高的过程. 在地球深处局部能量聚集的过程中是否会出现地震波速度的突然降低和振幅的突然增大? 这是今后地震观测中值得注意的问题. 如果这种现象存在, 是否能建立新的监测方法? 这是本实验给我们的主要启迪.

张月明高工对实验进行了指导, 侯渭研究员与笔者进行了有益的讨论并提出宝贵的建议, 同时得到院长特别基金资助, 在此一并致谢.

## 参 考 文 献

- [1] Ulmer P, Trommsdorff V. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism. *Science*, 1995, 268: 858—861.
- [2] Liu L. Phase transformations in serpentine at high pressure and temperature and implications for subducting lithosphere. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1986, 42: 255—262.
- [3] Tatsumi Y. Migration of fluid phase and genesis of basalt magmas in subduction zones. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94: 4697—4707.
- [4] Kitahara S, Takenouchi S, Kennedy G C. Phase relations in the system MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, at high temperature and pressure. *Am. J. Sci.*, 1966, 264(5): 223—233.

- [ 5 ] Ito K. Effects of  $H_2O$  on elastic wave velocities in ultrabasic rocks at  $900^\circ C$  under 1 GPa. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1990, **61**: 260—268.
- [ 6 ] 赵志丹, 高山, 骆庭川等. 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. *地球物理学报*, 1996, **39**(5): 642—652.  
ZHAO Zhi-Dan, GAO Shan, LUO Ting-Chuan, et al. Origin of the crustal low velocity layer of Qinling and North China: evidence from laboratory measurement of P-wave velocity in rocks at high PT conditions. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 1996, **39**(5): 643—652.
- [ 7 ] 张友南, 马 瑾. 深部地壳镁铁质岩石波速的研究. *地球物理学报*, 1997, **40**(2): 221—230.  
ZHANG You-Nan, MA Jing. Investigation on compressional wave velocities of mafic rocks in deep crust. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 1997, **40**(2): 221—230.
- [ 8 ] 刘 斌, 葛宁洁, Kern H 等. 不同温压条件下蛇纹岩和角闪岩中波速与衰减的各向异性. *地球物理学报*, 1998, **41**(3): 371—382.  
LIU Bing, GE Ning-Jie, Kern H, et al. Velocities and attenuation of P- and S-waves and their anisotropies in serpentine and amphibolite under different P-T conditions. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 1998, **41**(3): 371—382.
- [ 9 ] SONG Mao-Shuang, XIE Hong-Sen, ZHENG Hai-Fei, et al. Determination of serpentine dehydration temperature at 1—5 GPa by the method of electrical conductivity. *Chinese Science Bulletin*, 1996, **41**(21): 1815—1819.
- [ 10 ] 张 旗, 张魁武, 李达周. 横断山区镁铁—超镁铁岩. 北京: 科学出版社, 1992. 21—48.  
ZHANG Qi, ZHANG Kui-Wu, LI Da-Zhou. Mafic-Ultramafic Rocks in Hengduan Mountains Region (in Chinese). Beijing: Science Press, 1992. 21—48.
- [ 11 ] XIE Hong-Sen, ZHANG Yue-Ming, XU Hui-Gang, et al. A new method of measurement for elastic wave velocities in minerals and rock at high T. and P. and its significance. *Science in China* (B), 1993, **36**(10): 1276—1280.
- [ 12 ] SONG Mao-Shuang, XIE Hong-Sen, ZHANG Yue-Ming, et al. P-wave velocities of alkaline olivine basalt at high pressure and temperature and its controlling factors. *Chinese Sciences Bulletin*, 1997, **42**(9): 761—764.
- [ 13 ] Li B, Gwanmesia G D, Liebermann R C. Sound velocities of olivine and beta polymorphs of  $Mg_2SiO_4$  at earth's transition zone pressures. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(17): 2259—2262.
- [ 14 ] Flesch L M, Li B, Liebermann R C. Sound velocities of polycrystalline  $MgSiO_3$ -orthopyroxene to 10 GPa at room temperature. *American Mineralogist*, 1998, **83**(5—6): 444—450.
- [ 15 ] Wiryana S, Slutsky L J, Brown J M. The equation of state of water to  $200^\circ C$  and 3.5 GPa: model potentials and the experimental pressure scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, **163**(1—4): 123—130.
- [ 16 ] 谢鸿森, 徐惠刚, 彭文世等. 高压下滑石的脱水实验研究. *矿物学报*, 1987, **7**(2): 128—131.  
XIE Hong-Sen, XU Hui-Gang, PENG Wen-Shi, et al. An experimental study on dehydration of talc under high pressure (in Chinese). *Acta Mineralogica Sinica*, 1987, **7**(2): 128—131.
- [ 17 ] Sato H, Sacks I S, Murase T, et al. Qp-melting temperature relation in peridotite at high pressure and temperature: attenuation mechanism and implications for the mechanical properties of upper mantle. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94** (B8): 10647—10661.
- [ 18 ] Schmeling H. Numerical models on the influence of partial melt on elastic, anelastic and electrical properties of rock Part I: elasticity and anelasticity. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1985, **41**: 34—57.

# THE ELASTIC CHARACTERISTICS OF SERPENTINITE DEHYDRATION AT HIGH TEMPERATURE-HIGH PRESSURE AND ITS SIGNIFICANCE

XIE HONG-SEN ZHOU WEN-GE LI YU-WEN GUO JIE XU ZU-MING

(*Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*)

[ **Abstract** ] To understand the elastic characteristics of serpentinite dehydration, the ultrasonic velocities of serpentinite from Shuanggoujie, Yunnan province, southwest China, were measured at 1.0 GPa and high temperature by the pulse transmission method. Meanwhile the wave forms were observed. The ultrasonic velocities of the serpentinite decreased sharply with increasing temperature as it is higher than 640 °C. At temperature higher than 700 °C, the experimental sample exploded in the chamber. The amplitude of the ultrasonic wave recorded as the ultrasonic velocity began to decrease was smaller than that obtained before the sample exploded. Comparing the present experiment with the previous ones, we believe that the drop of the ultrasonic velocity and the increase of its amplitude is related with the dehydration of the serpentine in the rock. The phenomenon of the amplitude's increase could not be explained exactly at present. Nevertheless, the new discovery may provide a clue for elucidating and predicting the disaster in the earth's interior.

[ **Key words** ] High temperature and high pressure, Serpentinite, Ultrasonic velocity, Ultrasonic amplitude.