文章编号：1000-5773(2003)02-0095-06

六面顶压机高温高压弹性波速测量装置样品室温度梯度的校正*

刘 巍[1]，杜建国[1]，于 泳[2]，白利平[1]，王传远[1]

（1. 中国地震局分析预报中心，北京 100036；
2. 中国地震局地质研究所，北京 100029）

摘要：大腔体六面顶压机波速测量装置的样品室内存在着较大的温度梯度。根据实验观测的样品室内的温度分布数据和在一定温度条件下波速随温度升高呈线性变化的特征，运用理论分析和计算相结合的方法对样品的弹性波速进行了校正。以斜长角闪岩为例，对其实验测量的纵波速度(v_P)进行了校正，并与原来的数据作了对比：波速校正量绝对值随着温度的升高逐渐增大；在 2.0 GPa、530 ℃时，样品 X 和样品 Y 校正后的 v_P 比未校正的 v_P 分别减小了 0.270 km/s(3.3%)和 0.118 km/s(1.5%)。这种方法明显地提高了波速测量结果的精度，有助于更准确地进行地球物理资料的解释。

关键词：高温高压实验；弹性波速测量；温度梯度校正；走时
中图分类号：O521$^+$.3 **文献标识码**：A

1 引 言

高温高压下岩石、矿物的弹性波速实验研究成果为地球物理资料的解释提供了重要的依据。中国科学院贵阳地球化学研究所的 YJ-3000t 压机上的六面顶高压波速测量装置所达到的压力(0.1～5.5 GPa)和温度(室温～1600 ℃)范围在同类测量方法中居于领先地位[1]，但在实验过程中样品室存在着明显的温度梯度[2]，这影响了弹性波速度测量结果的精度，而精度较差的实验波速数据大大限制了其在地震波资料解释上的运用。因此，减小实验数据的误差，获取更为可靠的弹性波速数据是非常必要的。然而，解决温度梯度问题一直是高温高压装置和技术上的难点。我们依据实测的样品室温度分布，利用趋势拟合和积分计算的方法校正了大腔体六面顶高温高压腔体中温度梯度对弹性波速的影响，并以斜长角闪岩为例对其 2.0 GPa 压力下波速随温度变化的实验测量结果进行了校正。

2 实验装置和波速测量方法

实验装置的详细介绍见文献[1]。样品为直径(12±0.05) mm、长(32±0.05) mm 的圆柱体，样品外为不锈钢箔加热器，组装在传压介质叶蜡石粉压块的中心直孔中。发射和接收换能器分别粘接在高压腔体的上、下顶砧背面的中心部位，与样品在同一条轴线上，发射和接收换能器分别与声波检测仪的发射和接收系统连接。为了使换能器正常工作，上、下顶砧外的钢套中有冷却水通过，以保证换能器正常工作。

* **收稿日期**：2002-10-18；**修回日期**：2003-01-20
基金项目：国家自然科学基金(10032040)
作者简介：刘 巍(1974—)，女，博士研究生.

高温高压下岩石弹性波速度的测量采用超声脉冲透射法，其基本原理是用高温高压下测量到的实验样品的长度除以超声波穿过样品所用的时间，即可得到弹性波速度[1]。

3 样品室内温度分布

实验装置中体积较小的柱状样品两端与体积较大的碳化钨顶砧紧密相连[1]，由于碳化钨是热的良导体，而且其中有循环水，所以与其接触的样品顶端和底端温度较样品中部低，形成很大的温度梯度[2]。采用图 1(a)的组装方式，测量了 2.0 GPa 压力下高压腔体内的温度分布。从样品中心向两端依次插入热电偶，一只在样品中心，上方三只，距中心的距离依次为 2.98、7.08 和 10.16 mm，下方三只，距中心的距离依次为 4.46、8.28 和 10.66 mm。根据得到的热电偶测温数据作出了高压腔体内的温度分布和温度分布的拟合二项式曲线，见图 1(b)中的 c_1 至 c_{10} 十条曲线，纵坐标代表温度，横坐标代表样品轴向距离，横坐标原点表示样品轴向的中点。表 1 给出了对 2.0 GPa 压力下样品内 10 条温度分布曲线(图 1(b))进行多项式拟合的系数和 R^2。从温度分布曲线可以看出：样品室内的温度梯度是相当大的，并随着温度的升高而增大；高压腔体内样品中心处的温度是最高的，样品纵向的温度从中心处的最高依次向两侧快速降低。由此可见，如果在样品中心放置一个热电偶，直接测得的波速是透射波通过存在极大温度梯度的样品时的波速，这极大地影响了弹性波速测量值的准确性。

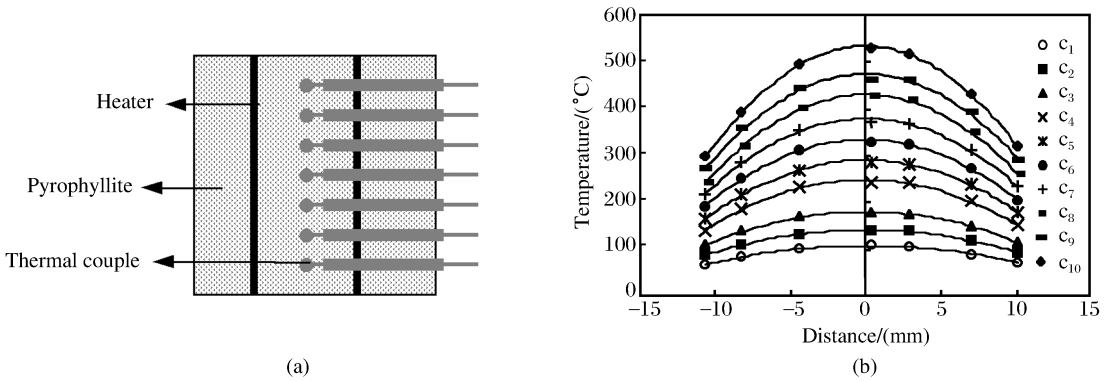


图 1 样品室温度分布测量(a)和温度分布及拟合曲线(b)示意图(横坐标代表样品轴向长度)

Fig. 1 Temperature measurement (a) and distribution (b) in the sample cell

(Abscissa represents vertical axis of sample. c1, c2,…c10 indicate ten curves of squares fitting)

4 校正方法

大量资料表明，在压力一定时，随着温度逐渐升高，弹性波速呈线性缓慢下降[3~6]；当温度继续升高，岩石内部矿物发生的脱水和部分熔融反应将导致波速非线性急剧下降[7~16]。Tatsumi 等[17]在 1.0 GPa、800 ℃测量麻粒岩和角闪岩弹性波速的实验中，给出了二者纵波速度随温度变化的线性关系分别为 $v_P=-6.13\times10^{-4}T+8.18$ (km/s)和 $v_P=-2.82\times10^{-4}T+7.60$ (km/s)，其中 T 表示温度。Kern 等[4,5]在高温高压的条件下测量了取自南意大利 Calabria 地块的 14 种岩石样品和西班牙南部 Sierra Alpujata 地块的超基性岩石样品的弹性波速，并得到了波速随温度呈线性变化的系数 dv_P/dT。一般地，如果样品的组成矿物中没有含水矿物，也没有在低温时发生相变的矿物时，那么在室温至 500～800 ℃样品的弹性波速随温度升高呈直线变化，即 $v_P=kT+v_{P0}$，k 为样品波速随温度变化的系数 dv_P/dT，v_{P0} 为常数。

假设在一定的温度范围内，岩石样品内部不存在温度梯度时的弹性波速 v_{Pr} 和通过实验得到的存在温度梯度时的波速 v_{Pe} 随温度的变化关系分别为

$$v_{\mathrm{Pr}} = k_{\mathrm{r}} T + v_{\mathrm{P0r}} \tag{1}$$

$$v_{\mathrm{Pe}} = k_{\mathrm{e}} T + v_{\mathrm{P0e}} \tag{2}$$

k_{r} 和 k_{e} 分别为波速随温度变化的系数,T 为样品轴向中点处的温度,v_{P0r} 和 v_{P0e} 为常数。在室温条件下样品首先被加压到预定压力,那么在预定压力和室温 T_{R} 条件下,即当样品内部不存在温度梯度时,(1)式与(2)式相等

$$v_{\mathrm{Pr}}(T_{\mathrm{R}}) = v_{\mathrm{Pe}}(T_{\mathrm{R}}) \tag{3}$$

则

$$v_{\mathrm{P0r}} = (k_{\mathrm{e}} - k_{\mathrm{r}}) T_{\mathrm{R}} + v_{\mathrm{P0e}} \tag{4}$$

然后将(4)式代入(1)式得

$$v_{\mathrm{Pr}} = k_{\mathrm{r}}(T - T_{\mathrm{R}}) + v_{\mathrm{P0e}} - k_{\mathrm{e}} T_{\mathrm{R}} \tag{5}$$

假设样品由均匀、等厚的薄层微元 $\mathrm{d}x$ 组成(图 2),由于样品内温度梯度的存在,这些薄层所处的温度是不同的,但每个薄层微元 $\mathrm{d}x$ 内部的温度是均匀分布的。x 轴与样品轴向平行,x_i 表示薄层微元距样品轴向中点的距离,那么 x_i 处的样品薄层微元对应的温度为 $T_i(x_i)$,见图2。根据超声波透射法测量弹性波速的原理,弹性波穿过每一薄层所需时间为

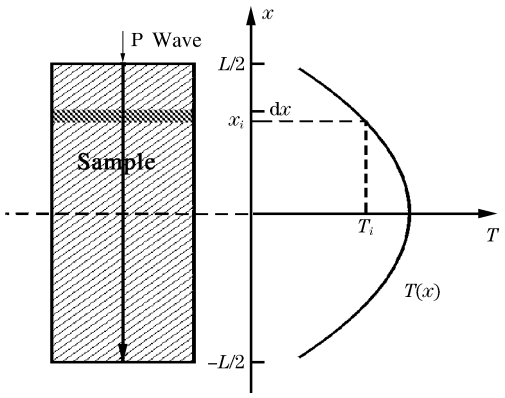


图 2　样品薄层微元和温度分布示意图

Fig. 2　Sample infinitesimal and temperature distribution

$$\mathrm{d}t = \mathrm{d}x / v_{\mathrm{Pr}} \tag{6}$$

实验测量时,弹性波穿过样品的时间 t_T 等于在 $[-L/2, L/2]$ 范围内弹性波穿过所有薄层微元的走时和,即

$$t_T = \int_{-L/2}^{L/2} \mathrm{d}x / v_{\mathrm{Pr}} \tag{7}$$

式中 L 为样品长度,通过实验测得的波速-温度拟合关系式(2)求出已知温度的波速,再用波速除样品长度 L,即可得到 t_T。将(5)式代入(7)式,同时 T 是 x 的函数

$$t_T = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\mathrm{d}x}{k_{\mathrm{r}}[T(x) - T_{\mathrm{R}}] + v_{\mathrm{P0e}} - k_{\mathrm{e}} T_{\mathrm{R}}} \tag{8}$$

(8)式中仅有 k_{r} 一个未知数,可通过迭代法解方程求出,然后代入(4)式和(1)式,就得到了校正后的样品波速随温度变化的关系。

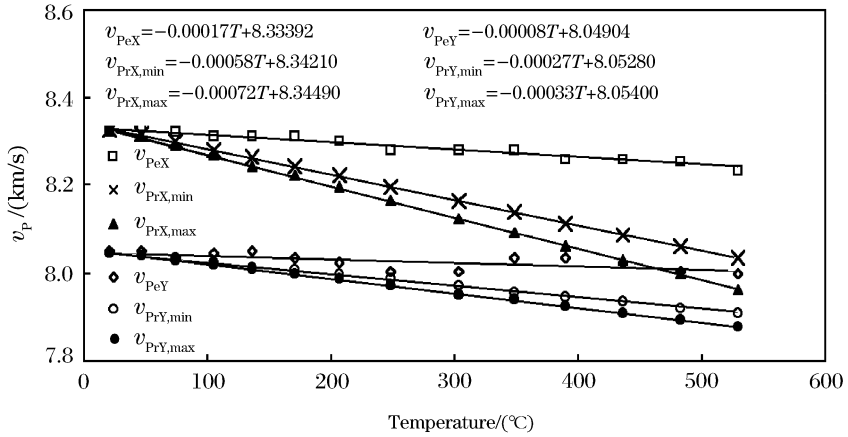
5　应用实例

图 3 中的 v_{PeX} 和 v_{PeY} 为 2.0 GPa 压力下室温～530 ℃斜长角闪岩样品 X 和 Y 纵波速度随温度的变化及其线性拟合方程[18]。实验样品按组构进行了定向切割,v_{PeX} 表示沿平行线理方向切割的样品 X 的纵波速度;样品 Y 是沿垂直线理方向切割的,v_{PeY} 表示样品 Y 的纵波速度。实验时首先在室温(T_{R} = 20 ℃)升高压力至 2.0 GPa、再恒定压力升高温度,然后在不同温度测量波速。在 2.0 GPa 时,样品 X 的长度为 27.96 mm,样品 Y 的长度为 27.83 mm,恒压升温过程中样品长度基本不变。

图 1(b)中的每一条温度分布曲线均可用于样品波速随温度变化关系的校正。以曲线系列 6 为例,样品中心最高温度约为 335.67 ℃。根据实验观测数据拟合的波速-温度线性方程(见图 3)$v_{\mathrm{PeX}} = -0.00017T + 8.33392$ (km/s),可以求出 335.67 ℃时样品 X 的实验波速 v_{PeX},然后用样品的长度除以波速就得到了实验时样品 X 中心为 335.67 ℃时弹性波在样品内部的走时

$$t_T = L / v_{\mathrm{PeX}} \tag{9}$$

样品 X 的长度 L 为 27.96 mm，将(9)式、$T(x)$方程(见表 1 系列 6)代入(8)式中，解方程求得校正后样品 X 纵波速度的温度系数 $k_{rX}=-0.00063$ km/(s·℃)。



(The formulas in the diagram are the results of linear regression; v_{PeX}: uncorrected v_P in sample X; v_{PeY}: uncorrected v_P in sample Y; $v_{PrX,max}$: maximum of corrected v_P in sample X; $v_{PrX,min}$: minimum of corrected v_P in sample X; $v_{PrY,max}$: maximum of corrected v_P in sample Y; $v_{PrY,min}$: minimum of corrected v_P in sample Y)

图 3 2.0GPa 压力下斜长角闪岩纵波速度校正前后的数据对比

Fig. 3 Comparison of v_P with correction and without correction in amphibolite at 2.0GPa

表 1 高压腔体内温度分布曲线(图 1(b))的多项式拟合和校正后的温度系数

Table 1 Fitting coefficients of the curves in Fig. 1(b) and the dv_P/dT after correction

No.	$T(x)=ax^2+bx+c$			R^2	$-dv_P/dT$/(m·s^{-1}·℃$^{-1}$)	
	a	b	c		k_{rX}	k_{rY}
1	−0.3455	−0.0295	109.29	0.9993	0.61	0.28
2	−0.4615	0.0283	142.61	0.9954	0.58	0.27
3	−0.6255	0.0184	182.00	0.9984	0.62	0.29
4	−0.9369	−0.0116	250.35	0.9955	0.72	0.33
5	−1.0767	0.0230	291.64	0.9978	0.67	0.31
6	−1.2315	−0.0455	335.67	0.9986	0.63	0.29
7	−1.3985	0.0149	380.82	0.9976	0.63	0.29
8	−1.6341	0.0246	431.8	0.9988	0.67	0.31
9	−1.7488	0.0538	475.58	0.9943	0.61	0.28
10	−2.0665	−0.0386	535.43	0.9990	0.68	0.31

样品 Y 的长度 L 为 27.83 mm，图 3 中波速-温度拟合直线的温度系数 k_e 为−0.00008 km/(s·℃)，v_{P0e}为 8.04904 km/s，我们运用相同的计算程序，求出了校正后的样品 Y 纵波速度的温度系数为 $k_{rY}=-0.00029$ km/(s·℃)以及其他测温系列的校正结果，见表 1。由于样品在一定压力下随温度的变化关系是固定的，因此，通过不同温度曲线校正后的结果应该是相同的。采用不同温度系列分别对斜长角闪岩 X 和斜长角闪岩 Y 的纵波速度进行校正(表 1)；10 个校正后的 k_{rX}在-5.8×10^{-4}～-7.2×10^{-4} km/(s·℃)之间，平均值为-6.42×10^{-4} km/(s·℃)，总体方差为 1.58×10^{-9} km/(s·℃)；10 个校

正后的 k_{rY} 在 $-2.7\times10^{-4}\sim-3.3\times10^{-4}$ km/(s·℃)之间,平均值为 -2.96×10^{-4} km/(s·℃),总体方差为 3.04×10^{-10} km/(s·℃)。显然,校正结果是很一致的,并分别与 Kern 等[6]和 Tatsumi 等[17]对角闪石类岩石的测量结果 -6.00×10^{-4} km/(s·℃)和 -2.82×10^{-4} km/(s·℃)是很接近的,这说明了该方法的可重复性和准确性。根据校正后的温度系数对斜长角闪岩的波速进行了校正并与未校正的数据进行了对比(图 3),可明显看出,随着实验温度升高,纵波速度的校正量逐渐增大,在 530 ℃时,样品 X 和样品 Y 校正后的 v_P 比未校正的 v_P 分别减小了 0.270 和 0.118 km/s,校正量达 3.3%和 1.5%。

6　结　论

本研究根据在一定温度条件下(实验温度<500～800 ℃)波速随温度升高呈线性变化的特征,结合多支热电偶实测的 2.0 GPa 压力下样品内部温度分布曲线,对弹性波穿过不同温度的样品薄层微元的走时进行积分,结合已知的实验测量数据,通过解方程的方法对 YJ-3000t 压机上的六面顶砧高压波速测量装置内样品室的温度梯度进行了校正。并以斜长角闪岩为例,对沿不同方向切制的样品 X 和样品 Y 的实验测量(2.0 GPa 压力下、室温～530 ℃范围内)的纵波速度进行了 10 次校正,10 次校正结果非常接近。将校正后的波速数据与校正前的数据进行了比较,发现:校正量随着温度的升高而增大,在 530 ℃时,样品 X 和样品 Y 校正后的 v_P 比未校正的 v_P 分别减小了 0.270 和 0.118 km/s,校正量达到 3.3%和 1.5%。这种方法明显地提高了波速测量结果的精度,为地震波的地质反演和物质解释提供了更为可靠的实验基础。

在本文中引用了周文戈副研究员实验观测到的高温高压条件下样品室内的温度梯度分布数据和岳兰秀博士在 2.0 GPa 压力下测量的斜长角闪岩纵波速度随温度变化的数据,在此深表谢意。

References:

[1] Xie H S, Zhang Y M, Xu H G, et al. A New Method of Measuring the Elastic Wave Velocity of Rocks and Minerals at High Pressures and High Temperatures and Its Significance [J]. Science in China, 1993, 36B(10): 1276－1280.

[2] Xie H S. Introduction to Material Science of the Earth Interior [M]. Beijing: Science Press, 1997. 50. (in Chinese)
谢鸿森. 地球物质科学导论 [M]. 北京:科学出版社, 1997. 50.

[3] Ito K, Tatsumi Y. Measurement of Elastic Wave Velocities in Granulite and Amphibolite Having Identical H_2O-Free Bulk Compositions up to 850 ℃ at 1 GPa [J]. Earth Planet Sci Lett, 1995, 133: 255－264.

[4] Kern H, Schenk V. Elastic Wave Velocity in Rocks from a Lower Crustal Section in Northern Alabria(Italy) [J]. Phys Earth Planet Inter, 1985, 40: 147－160.

[5] Kern H, Tubia J M. Pressure and Temperature Dependence of P-and S-Wave Velocities, Seismic Anisotropy And Density of Sheared Rocks from the Alpujata Massif(Ronda Peridotites, Southern Spain) [J]. Earth Planet Sci Lett, 1993, 119: 191－205.

[6] Kern H, Liu B, Popp T. Relationship between Anisotropy of P and S Wave Velocities And Anisotropy of Attenuation in Serpentinite and Amphibolite [J]. J Geophys Res, 1997, 102(B2): 3051－3065.

[7] Lebedev E B, Kern H. The Effect of Hydration and Dehydration Reactions on Wave Velocities in Basalts [J]. Tectonophysics, 1999, 308: 331－340.

[8] Matsushima S. Partial Melting of Rocks Observed by the Sound Velocity Method and the Possibility of a Quasi-Dry Low Velocity Zone in the Upper Mantle [J]. Phys Earth Planet Inter, 1989, 55: 306－312.

[9] Ito K. Effects of H_2O on Elastic Wave Velocities in Ultrabasic Rocks at 900 ℃ under 1 GPa [J]. Phys Earth Planet Inter, 1990, 61: 260－268.

[10] Kern H. 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]. Phys Earth Planet Inter, 1982, 29: 12－23.

[11] Popp T, Kern H. Thermal Dehydration Reactions Characterised by Combined Measurements of Electrical Conduc-

tivity and Elastic Wave Velocities [J]. Earth Planet Sci Lett, 1993, 120: 43－57.

[12] Zhao Z D, Gao S, Luo T C, 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 p-T Conditions [J]. Acta Geophysica Sinica, 1996, 39(5): 637－652. (in Chinese)
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——岩石高温高压实验证据 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 637－652.

[13] Zhou W G, Xie H S, Zhao Z D, et al. Effect of the Phase Transition on the Compressional Wave Velocity for a Trachybasalt at High Temperature and High Pressure [J]. Chin Sci Bull, 1999, 44(15): 1415－1418.

[14] Yue L X, Xie H S, Liu C Q, et al. Compressional Velocity and Attenuation in Amphibolite at 2.0 GPa and up to 1200 ℃ [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(3): 176－182. (in Chinese)
岳兰秀, 谢鸿森, 刘丛强, 等. 2.0 GPa、室温至 1200 ℃条件下斜长角闪岩的纵波速度及其衰减 [J]. 高压物理学报, 2002, 16(3): 176－182.

[15] Liu W, Du J G, Bai L P, et al. Compressional Elastic Wave Velocities of Serpentinized Olivine-Bearing Pyroxenite up to 960 ℃ at 1.0 GPa [J]. J Phys(Condensed Matter), 2002, 14: 11355－11358.

[16] Liu W, Du J G, Bai L P, et al. Compressional Elastic Wave Velocities of Serpentinized Pyroxenite at High Pressures and High Temperatures and Its Geological Significance [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 15(4): 456－461.

[17] Tatsumi Y, Ito K, Goto A. Elastic Wave Velocites in Isochemical Granulite and Amphibolite: Origin of a Low-Velocity Layer at the Slab/Mantle Wedge Interface [J]. Geophys Res Lett, 1994, 21(1): 17－20.

[18] Yue L X. The Study of Seismic Velocity and Attenuation of Eclogite and Amphibolite at High Temperature and High Pressure [D]. Guiyang: Master Thesis of Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2001. 18. (in Chinese)
岳兰秀. 高温高压下榴辉岩和斜长角闪岩的弹性波速和衰减的研究 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2001. 18.

Correction of Temperature Gradient in Sample Cell of Pulse Transmission Experimental Setup on Multi-Anvil High Pressure Apparatus

LIU Wei[1], DU Jian-Guo[1], YU Yong[2], BAI Li-Ping[1], WANG Chuan-Yuan[1]

(1. *Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing* 100036, *China*;
2. *Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: There is a remarkable temperature gradient in the sample cell in the pulse transmission experimental setup on a multi-anvil high pressure apparatus. The elastic wave velocity was corrected by combination of experiment, theory analysis, and computation in terms of the experimental data on temperature distribution in the sample and the linear decrease of temperature dependence of elastic wave velocities in rocks at a given temperature range. The experimental v_P in amphibolite was corrected by this method and compared with the v_P without correction: the absolute correction value turned greater as the temperature increased; at 530 ℃, the greatest correction of velocities in the sample X and sample Y were up to －0.270 km/s and －0.118 km/s with the decreases of 3.3% and 1.5%, respectively. This method improves the accuracy of v_P measurement in high pressure and temperature experiments, which is useful to interpret geophysical data by combining the experimental results.

Key words: high pressure and temperature experiment; elastic wave velocity measurement; temperature gradient; travel time