文章编号：1000-5773(2005)04-0293-06

4.0 GPa压力下纯橄岩弹性纵波速度和衰减的实验研究*

刘 巍[1,2]，杜建国[1]，谢鸿森[3]，周文戈[3]，郭 捷[3]

(1. 中国地震局地震预测研究所，北京 100036；
2. Mineral Physics Institute, State University of New York at Stony Brook, New York 11794, USA；
3. 中国科学院地球化学研究所，贵州贵阳 550002)

摘要：应用超声波透射法和超声波频谱振幅比法、在4.0 GPa压力条件下、测量了弹性纵波通过纯橄岩的波速(v_P)和品质因子值(Q_P，用于表征衰减)随压力的变化，并分析了纯橄岩内部结构的变化对波速和衰减的影响。在实验压力范围内(≤4.0 GPa)，随压力升高，纯橄岩的纵波速度逐渐增大：从7.6 km/s(0.4 GPa)逐渐增大至8.5 km/s(4.0 GPa)，升高了11.8%，低压时的增大幅度大于高压时的增大幅度。纯橄岩的品质因子值呈两段式线性变化：从低压区间到高压区间品质因子值的增大幅度明显变小(0.4～2.4 GPa压力范围内Q_P增大了358.5%，2.4～4.0 GPa压力范围内Q_P仅升高了7.6%)。纯橄岩的品质因子从54(0.4 GPa)升高至266.4(4.0 GPa)，增大幅度达393.3%。在相对低压(0.4～2.4 GPa)条件下，纵波通过纯橄岩的速度增大、衰减降低主要是由于样品内的孔隙和微裂纹大量闭合，岩石密度增大，纵波在通过样品内孔隙和裂缝时损失的机械能降低，因此纵波通过纯橄岩的能量增大(即衰减降低)，波速升高；当围压较高(2.4～4.0 GPa)时，纯橄岩内大部分裂纹已经闭合，而且矿物颗粒边界接触紧密。岩石内部的裂纹和颗粒之间由于摩擦滑动而损失的能量也变少，所以在高压时纯橄岩的波速和衰减的变化幅度变缓，但波速仍呈线性增大，而品质因子值(衰减)随压力升高几乎趋于不变。

关键词：高压；纵波速度；衰减；品质因子
中图分类号：P584 **文献标识码**：A

1 引 言

高压下岩石性质的研究是探索地球内部奥秘的一个重要手段，有着非常重要的地球动力学意义。纵波是震源振动的基本形式之一，弹性波在岩石中传播时与岩石相互作用，使穿透波中携带了大量反映岩石特性的各种信息，研究高压条件下纵波通过壳幔岩石的波速和衰减对地震学研究是非常有意义的。以往人们对弹性波速度研究得比较多(具体综述详见参考文献[1])，而对衰减的实验研究比较薄弱，但实验压力大多低于1.0 GPa[2~7]，只有岳兰秀等(2002)[8]和Liu等(2003)曾获得过2.0 GPa压力以上的衰减数据[9]，他们的样品分别是斜长角闪石和辉石岩。纯橄岩的主要组成矿物橄榄石是上地幔的主要矿物相，目前还没有关于此类样品的实验报道，因此需要开展这方面的高压实验研究。本研究应用超声波透射法和超声波频谱振幅比法在4.0 GPa(相当于上地幔120 km)压力条件下，测量了弹性纵波通过纯橄岩的波速和品质因子值随压力的变化，并探讨了高压下弹性纵波速度和衰减变化的原因。

* **收稿日期**：2004-11-01；**修回日期**：2005-01-07
基金项目：国家自然科学基金重大项目(10299040)；青年地震联合基金(603007)
作者简介：刘 巍(1974－)，女，博士，主要从事地球深部物质物理性质的研究. E-mail: veiliu@hotmail.com

2 样品和方法

实验样品为纯橄岩，采自新疆库地纯橄岩体。纯橄岩呈绿色，致密块状，密度为3.25 g/cm^3，由橄榄石(91%)、单斜辉石(5%)、蛇纹石(2%)、角闪石(1%)和暗色矿物(1%)组成，其化学组成列于表1中。实验前将纯橄岩样品加工成高为(32±0.05) mm，直径为(12±0.05) mm的圆柱，然后用丙酮浸泡以除去油污，放于恒温烘箱中备用。

表1 实验样品的化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical composition of samples (mass fraction) (%)

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3+FeO	MnO	P_2O_5	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Loss	Total
43.95	0.05	1.06	8.25	0.34	0.26	41.04	2.83	0.39	0.13	0.70	99.00

Note: Analyzed by Mineral Analysis Center in Institute of Geochemistry, CAS.

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压力机上进行的[10]。样品室压力标定采用铜熔融曲线及石英-柯石英相变方法，压力误差小于±1%。采用TDS784A数字示波器记录波形时，采样频率为250 MHz，即采样间隔为4 ns。

纵波速度测量采用的是超声波脉冲透射法[10]。岩石弹性波衰减(品质因子)测量采用的是超声波脉冲频谱振幅比法，力图排除波在各界面上的反射、折射、几何扩散以及换能器与岩样耦合的影响，从而获得岩石声衰减的较可靠的估算值。频谱振幅比法的原理就是用低衰减(高Q值)的物质(一般用铝)作为标准样，根据实验样品和标准样的振幅比与频率的关系来计算岩石的品质因子(Q值)[4]，进而研究岩石弹性波衰减的原因及意义。实验时，标准样和实验样的几何形状、样品组装及实验过程要完全相同，且换能器与样品之间能很好的耦合，通过频谱比消除他们共同的影响因素。选用具有相同尺寸的标准样和实验样，分别标记为1和2，样品中透射波的振幅谱为

$$\begin{aligned} A_1(f) &= G_1(x)\exp[-\alpha_1(f)]\cdot\exp[i(2\pi ft - k_1x)] \\ A_2(f) &= G_2(x)\exp[-\alpha_2(f)]\cdot\exp[i(2\pi ft - k_2x)] \end{aligned} \tag{1}$$

式中：A为振幅，f为频率，$k=2\pi f/v$为波数，v为波速，$G(x)$是几何因子，包括各界面上的反射、折射等对波的作用。$\alpha(f)$为衰减系数，选用0.1～1 MHz的频率测量范围，α可看作是频率的线性函数[4,11]，可写成

$$\alpha(f)=\gamma f \tag{2}$$

式中：γ是常量，它与品质因子Q的关系可表达为

$$Q=\pi/\gamma v \tag{3}$$

标准样和测量样的傅里叶振幅比可表达为

$$\frac{A_1}{A_2}=\frac{G_1}{G_2}\exp[-(\gamma_1-\gamma_2)fx] \tag{4a}$$

或

$$\ln\frac{A_1}{A_2}=(\gamma_2-\gamma_1)fx+\ln\frac{G_1}{G_2} \tag{4b}$$

式中：x为岩样长度，因为标准样与被测岩样的几何形状相同，G_1/G_2可视为与频率无关。选用铝为标准样，其Q值约为15 000[12]，一般岩石Q值小于1 000，故公式(4a)或(4b)中取$\gamma_1\approx 0$，由此带来的误差不超过1%。利用实测(A_1/A_2)-f数据作线性拟合求斜率k，即可求出岩样的品质因子Q

$$Q=\pi x/kV, \quad \text{或 } Q=\pi t/k \tag{5}$$

式中：t为弹性波穿过样品的走时。

Q值测量的精确程度和灵敏度只能通过可重复性来判断。Liu等(2003)得到本装置测量品质因子的相对误差的绝对值在0.1%～21.9%之间，平均值为11%[9]，与Kim和Kern的测量结果10%[6]和11.3%[7]接近。

实验开始首先以4×10^{-4} GPa/s的速率升压，每升高0.2 GPa，恒压10 min，然后测量样品被压缩的长度和超声波穿过压砧和样品的走时，同时记录弹性波的波形，即振幅-时间曲线，直至升到实验预定压力4.0 GPa。

3　实验结果

3.1　纵波速度

图 1 表示了纯橄岩的纵波速度在室温下随压力变化的关系曲线,总体上,纵波速度随压力升高是逐渐增大的,但在低压处增大的幅度要大于高压时的增大幅度。在 1.0～2.0 GPa 压力以下时,波速增大较快;而当压力大于 2.0 GPa 时,波速增大幅度变缓。随压力升高,纯橄岩的纵波速度从 7.57 km/s(0.4 GPa)逐渐增大至 8.46 km/s(4.0 GPa),增大了 11.8%。运用对数方程可以很好地拟合整个压力范围内(0.4～4.0 GPa)波速与压力的关系:$v_P=0.42\ln p+7.86$($R^2=0.99$)。

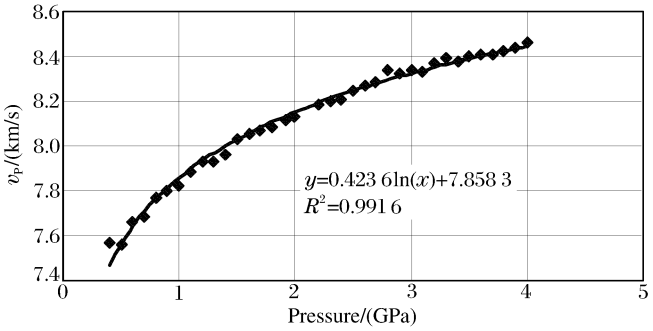
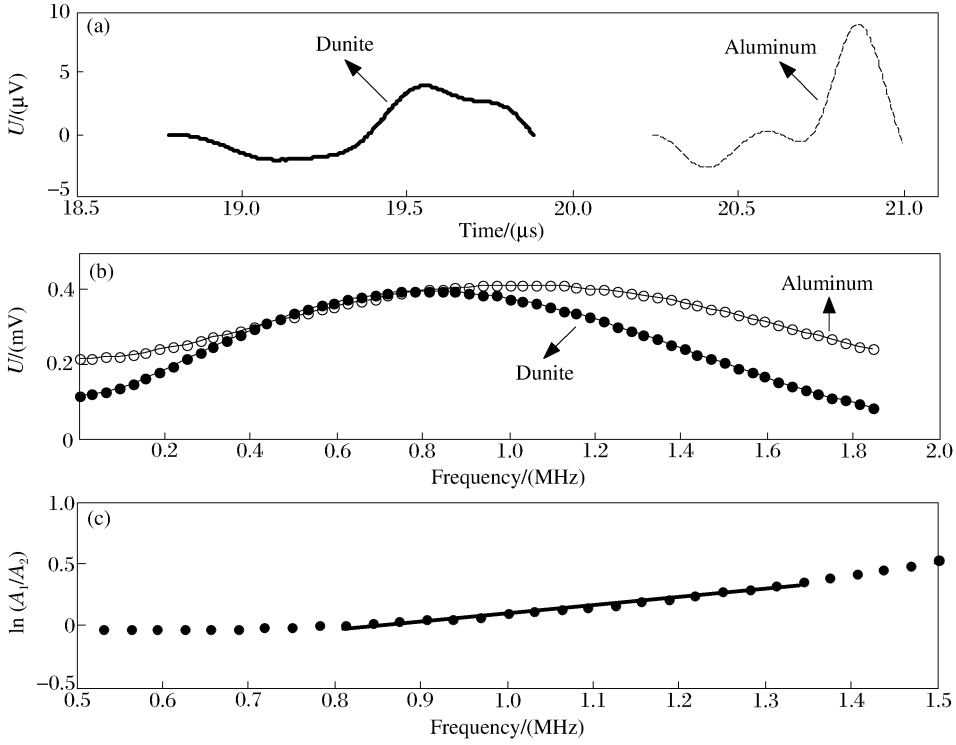


图 1　室温下纯橄岩的纵波速度随压力的变化

Fig. 1　v_P versus pressure at room temperature

3.2　纵波衰减

为了避免样品内反射波和折射波等引起波形畸变,本研究均截取纵波通过样品和标准物质铝的初至部分进行分析。图 2 给出了 0.4 GPa 压力下 P 波通过标准物质铝和纯橄岩的首达波、频谱和频谱比。根据图 2(c)中求得的斜率 k,代入公式(5)中,即可求出 0.4 GPa 压力下纯橄岩的 Q_P。类似地,可得到纯橄岩在不同压力下的品质因子值(图 3)。



(a) Pulse shapes. (b) Comparison of Fourier amplitudes as a function of frequency for the aluminum standard and for dunite. (c) Natural logarithm of the aluminum to rock amplitude ratios as a function of frequency, points are actual ratios, and the solid line is the linear fit to the data. The slope of this line is proportional to 1/Q.

图 2　0.4 GPa 压力下 P 波穿过标准物质铝和样品的首达波、频谱和频谱比

Fig. 2　First arrival, frequency-spectra, and spectra ratios of P waves in the aluminum standard and in dunite at 0.4 GPa

纯橄岩的品质因子值随压力升高是逐渐增大的，由于衰减系数与品质因子值成反比，因此实验结果说明样品的衰减随压力增大而减小(图 3)。在整个实验压力范围内，纯橄岩的品质因子值呈两段式线性变化：在低压段(0.4～2.4 GPa)Q_P 从 54 增大至 247.6，升高了 358.5%；在高压段(2.4～4.0 GPa)Q_P 从 247.6 增大至 266.4，仅升高了 7.6%。纯橄岩从低压段到高压段品质因子值的增大幅度明显变小。在整个实验升压范围内，纯橄岩的品质因子从 54(0.4 GPa)升高至 266.4(4.0 GPa)，增大幅度达 393.3%。

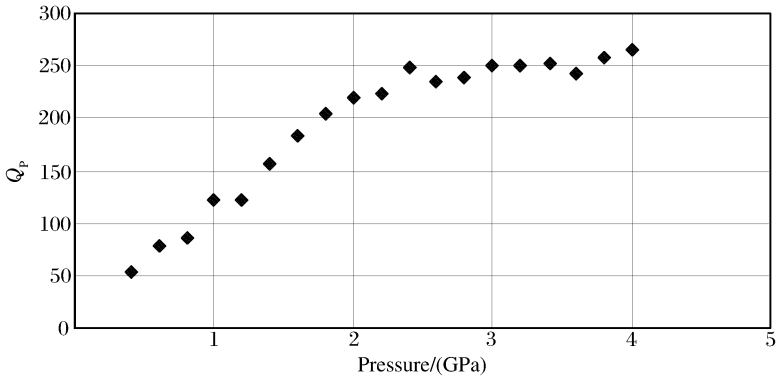


图 3 室温下纯橄岩的品质因子值随压力的变化

Fig. 3 Q_P versus pressure at room temperature

4 讨 论

弹性波速和衰减(与品质因子 Q_P 成反比)分别反映了岩石的弹性性质和非弹性性质。在本实验压力范围内(≤4.0 GPa)且室温条件下，纯橄岩的矿物组成和化学成分没有变化，因此，压力增高时，岩石内部结构的变化是影响弹性波在岩石介质中传播的主要因素。从实验结果中可以清楚看出，纵波通过纯橄岩的波速和 Q_P 随压力升高而增大：纯橄岩纵波速度从 7.6 km/s(0.4 GPa)逐渐增大至 8.5 km/s(4.0 GPa)，增大了 11.8%；品质因子从 54(0.4 GPa)增大至 266.4(4.0 GPa)，增大了 393.3%。因此，对于岩石物理状态的变化，测量衰减比测量波速要灵敏得多。

岩石中的孔隙按其形状可以分成孔洞和裂纹两类：孔洞往往是等维球形，或近于球形，其纵横比 α 较高，约为 1；裂纹是指狭长的裂缝，其纵横比远远小于 1。纵横比越低的孔隙其闭合所需的压力越低，反之亦然。压力升高使岩石内裂纹闭合、部分孔洞坍塌以及部分孔洞体积缩小，最终导致孔隙度降低。Gao 等(2000)认为岩石中纵横比低的孔隙在 0.2～0.3 GPa 压力时闭合[13]，而 Christensen(1974)认为一些孔隙在 1.0 GPa 压力以下不能完全闭合[14]。

Walsh(1966)提出了岩石内部摩擦能量损失理论，他认为弹性波传播时产生的应力会引起细小裂缝的相对运动，这种发生在颗粒边界和裂缝表面的相对运动将产生热量，引起岩石骨架弛豫和能量损失[15]。Murphy(1982)也认为摩擦滑动是裂缝引起弹性波衰减的主要原因[16]。颗粒边界或裂纹表面之间接触不紧密时，接触面之间有相对运动，摩擦将把部分机械能转变成热能，引起能量耗散；当颗粒边界之间或裂纹表面之间接触十分紧密时，接触面咬合在一起，摩擦将机械能从一边传递到另一边，损失很小。

当实验压力逐渐升高时(0.4～2.4 GPa)，纯橄岩样品内低纵横比的微裂纹开始闭合，岩石密度增大，纵波在通过样品内孔隙和裂缝时损失的机械能降低，因此纵波通过纯橄岩的能量增大(即衰减降低)，波速升高；当围压较高(2.4～4.0 GPa)时，纯橄岩内大部分裂纹已经闭合，并且矿物颗粒边界接触紧密，岩石内部的裂纹和颗粒之间由于摩擦滑动而损失的能量也变少，因此高压下弹性波通过岩石的波速和衰减变化主要表征了岩石组成矿物自身的弹性性质的变化。在高压时纯橄岩的波速和衰减的变化幅度变缓，但波速仍呈线性增大，而衰减值随压力的变化几乎趋于一条直线，这说明纯橄岩在压力大于 2.5 GPa 时，纵波穿过纯橄岩时压力变化对衰减的影响很小。

5 结　论

(1) 在实验压力范围内(≤4.0 GPa),纵波速度随压力升高是逐渐增大的,但在低压处增大的幅度要大于高压时的增大幅度。随压力升高,纯橄岩的纵波速度从 7.57 km/s(0.4 GPa)逐渐增大至 8.46 km/s(4.0 GPa),增大了 11.8%。运用对数方程可以很好地拟合整个压力范围内(0.4～4.0 GPa)波速与压力的关系:$v_P=0.42\ \ln p+7.86$($R^2=0.99$);

(2) 在实验压力范围内(≤4.0 GPa),纯橄岩的品质因子值呈两段式线性变化:从低压区间到高压区间品质因子值的增大幅度明显变小(0.4～2.4 GPa 压力范围内 Q_P 增大了 358.5%;2.4～4.0 GPa 压力范围内 Q_P 仅升高了 7.6%)。在整个实验升压范围,纯橄岩的品质因子从 54(0.4 GPa)升高至 266.4(4.0 GPa),增大幅度达 393.3%。这说明低压时弹性波的衰减远远高于高压时弹性波的衰减;

(3) 在相对低压(0.4～2.4 GPa)条件下,纯橄岩样品内低纵横比的微裂纹大量闭合,岩石密度增大,纵波在通过样品内孔隙和裂缝时损失的机械能降低,因此纵波通过纯橄岩的能量增大(即衰减降低),波速升高;当围压较高时(2.4～4.0 GPa),纯橄岩内大部分裂纹已经闭合,并且矿物颗粒边界接触紧密,岩石内部的裂纹和颗粒之间由于摩擦滑动而损失的能量也变少。在高压时纯橄岩的波速和衰减的变化幅度变缓,但波速仍呈线性增大,而衰减值随压力升高变化较小。

在实验测量和数据处理过程中得到了岳兰秀博士的大力帮助,在此深表谢意。

References:

[1] Xie H S,Zhou W G,Zhao Z D,et al. The Measurement of Elastic Velocities in Rocks at High Pressures and High Temperatures [J]. Earth Science Frontier,1998,5(4):329－337. (in Chinese)
谢鸿森,周文戈,赵志丹,等. 高温高压条件下岩石弹性波速测量 [J]. 地学前缘,1998,5(4):329－337.

[2] Tan B H,Jackson I,Gerald J D F. Shear Wave Dispersion and Attenuation in Fine-Grained Synthetic Olivine Aggregates:Preliminary Results [J]. Geophys Res Lett,2004,24(9):1055－1058.

[3] Jackson I,Faul U H,Gerald J D F,et al. Shear Wave Attenuation and Dispersion in Melt-Bearing Olivine Polycrystals(1):Specimen Fabrication and Mechanical Testing [J]. J Geophy Res,2004,109:B06201.

[4] Toksöz M N,Jackson D H,Timur A. Attenuation of Seismic Waves in Dry and Saturated Rocks(Ⅰ):Laboratory Measurements [J]. Geophysics,1979,44:681－690.

[5] Johnston D H,Toksöz M N. Ultrasonic P and S Wave Attenuation in Dry and Saturated Rocks under Pressure [J]. J Geophys Res,1980,85(B2):925－936.

[6] Kim D O,Katahara K W,Manghnani M H,et al. Velocity and Attenuation Anisotropy in Deep-Sea Carbonate Sediments [J]. J Geophys Res,1983,88(B3):2337－2343.

[7] 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,1997,102:3051－3065.

[8] Yue L X,Xie H S,Liu C Q,et al. Compressional Velocity and Attenuation in Amphibolite at 2.0 GPa and up to 1 200 ℃ [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 1 200 ℃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.

[9] Liu W,Du J G,Bai L P,et al. Ultrasonic P Wave Velocity and Attenuation in Pyroxene under 3.0 GPa up to 1 170 ℃ [J]. China Phys Lett,2003,20(1):164－166.

[10] 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.

[11] Jackson D D, Anderson D L. Physical Mechanisms of Seismic Wave Attenuation [J]. Rev Geophys Space Phys, 1970, 8: 1－63.

[12] Mcdonal F J, Angona F A, Mills R L, et al. Attenuation of Shear and Compressional Waves in Pierre Shale [J]. Geophys, 1958, 23: 421－439.

[13] Gao S, Kern H, Liu Y S, et al. Measured and Calculated Seismic Velocities and Densities for Granulites from Zenolith Occurrences and Adjacent Exposed Lower Crustal Sections: A Comparative Study from the North China Craton [J]. J Geophy Res, 2000, 105(B8): 18965－18976.

[14] Christensen N I. Compressional Wave Velocities in Possible Mantle Rocks to Pressures of 30 kbar [J]. J Geophys Res, 1974, 79(24): 407－412.

[15] Walsh J B. Seismic Wave Attenuation in Rocks due to Friction [J]. J Geophys Res, 1966, 71: 2591－2599.

[16] Murphy W F. Effects of Partial Water Saturation on Attenuation in Massilon Sandstone and Vycor Porous Glass [J]. J Acoust Soc Am, 1982, 71: 1458－1468.

Elastic P Wave Velocity and Attenuation in Dunite up to 4.0 GPa

LIU Wei[1,2], DU Jian-Guo[1], XIE Hong-Sen[3], ZHOU Wen-Ge[3], GUO Jie[3]

(1. *Institute of Earthquake Sciences, China Earthquake Administration, Beijing* 100036, *China*;
2. *Mineral Physics Institute, State University of New York at Stony Brook, New York* 11794, *USA*;
3. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002, *China*)

Abstract: Elastic P wave velocity (v_P) and quality factor value (Q_P, on behalf of attenuation) of dunite are determined using ultrasonic pulse transmission and spectral ratio methods in a multi-anvil apparatus up to 4.0 GPa at room temperature. During the experimental pressure range (0.4～4.0 GPa), v_P and Q_P increase about 11.8% (from 7.6 km/s to 8.5 km/s) and 393.3% (from 54 to 266.4). The experimental results show that v_P and Q_P are pressure dependent and a greater rising rate at the lower pressures than that at higher pressures: the increase rate of Q_p at 0.4～2.4 GPa is 358.5%, while only 7.6% at 2.4～4.0 GPa. At the lower pressures, the pores with low aspect ratio in rocks are easy to close, and almost all of them would close with the pressure increasing. As a result, the samples show the internal inherent elasticity of the whole constituent minerals themselves and the increasing rate of v_P turns lower at the higher pressures. As the pressure rising (0.4～2.4 GPa), Q_P of dunite increases because the energy loss in the pores and between the surfaces of cracks and the mineral boundaries is reduced due to the porosity decreasing and the mineral boundaries contact more tightly. While at higher pressures (2.4～4.0 GPa), most microcracks in dunite have been closed and mineral grains are compacted very tightly, as a result the internal frictional energy loss due to the relative motion at the grain boundaries and across crack surfaces became less, which results in small change of elastic wave attenuation in dunite.

Key words: high pressure; P wave velocity; attenuation; quality factor