

岩石地震波性质的实验与理论研究

王 勤

南京大学 地球科学系, 南京 210093

摘 要: 岩石的地震波性质是解释地震观测资料的基础。本文首先以中国大陆超深钻主孔的榴辉岩为例, 将榴辉岩在高温高压(最大为 500 MPa 和 700 °C) 下观测矿物组成、晶格优选定向(LPO)、温度和压力对其地震波性质的影响。然后对岩石地震波性质数据库进行统计分析, 指出长英质岩石的波速与石英或长石的含量没有相关性; 从酸性岩、基性岩到超基性岩, 随着 SiO₂ 含量的降低和铁镁矿物含量的增高, 岩石波速逐渐增高, 云母和角闪石的 LPO 是陆壳地震波各项异性的主要来源; 波速与孔隙率的负相关受流体与压力的影响。

关 键 词: 地震波速; 各向异性; 混合律; 晶格优选定向; 榴辉岩

中图分类号: P589.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2007)02-0118-09

Experimental and Theoretical Study on Seismic Properties of Rocks

WANG Qin

Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Seismic properties of rocks are fundamental for interpreting seismic observations. As a case study, an eclogite from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project was collected to present an integrated study on seismic properties and microstructure of rocks. P-wave velocities of the eclogite were measured at pressures up to 500 MPa and temperatures up to 700 °C. The experimental results are compared with the calculated seismic velocities and anisotropy to investigate the effects of modal composition, lattice-preferred orientations (LPO) of minerals, pressure and temperature on seismic properties of eclogites. The statistical analysis on the Database of Rock Seismic Properties indicates that for felsic rocks there is no correlation between velocities and contents of quartz or feldspar. In general, seismic velocities of rocks increase with the decreasing SiO₂ content and increasing volume fraction of mafic minerals. The seismic anisotropy of continental crust is mainly controlled by the LPO of mica and hornblende. Pore fluids and pressure will affect the negative correlation between porosity and seismic velocities of rocks.

Key words: seismic velocity; anisotropy; mixture rule; lattice-preferred orientation; eclogite

岩石的地震波性质(V_P 、 V_S 、波速各向异性和 S 波分裂等)是根据地震观测资料建立地壳和上地幔结构、成分和动力学模型的基础^[1~4]。40 余年来的高温高压实验研究积累了丰富的矿物^[5~8]和岩石^[9~12]的弹性参数和波速数据;且以弹性理论为基础,根据岩石的矿物组成、矿物的晶格优选定向、弹性参数和密度可以直接计算岩石在一定温压条件下的地震波速和各向异性^[13~15]。近年来将岩石的地

震波各向异性、显微构造与区域变形历史联系在一起,为研究构造演化提供了新的手段^[16,17]。

本文结合岩石弹性波速的实验测量与理论计算,研究岩石的地震波性质及其在地震资料解释中的应用。以中国大陆超深钻主孔榴辉岩样品为例,通过对比榴辉岩的理论波速和高温高压测量结果,定量研究矿物组成、晶格优选定向、温度和压力对榴辉岩地震波性质的影响,总结了主要矿物和岩石的地

收稿日期:2006-10-08 收到,2007-01-23 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40502022,40399140);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介:王勤(1974—),女,副教授,博士,主要研究岩石的地震波性质及深部构造的地球物理解释。E-mail: qwang@nju.edu.cn. 获第 11 届侯德封矿物岩石地球化学青年科学家奖。

震波性质,讨论地震资料解释中需注意的几个问题。

1 榴辉岩的地震波性质

作为下地壳和上地幔的重要岩石类型,榴辉岩常常表现为高密度、高波速和低各向异性,但是折返过程中的退变质作用会改变榴辉岩的矿物组成和显微构造,并影响其地震波性质^[18~22]。因此,有必要将岩石的显微组结构与波速测量联系起来,定量研究榴辉岩在不同条件下的地震波性质,提供解释板块会聚边界地震资料的可靠依据。

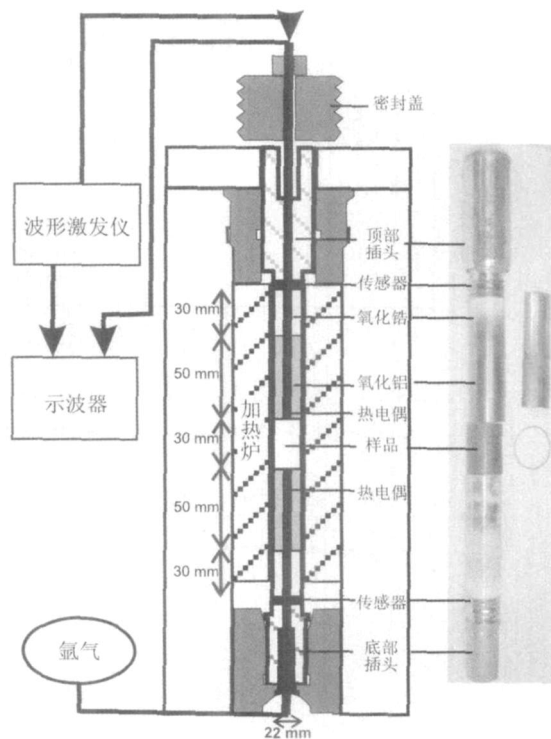
大别-苏鲁造山带是世界上规模最大、保存最好的超高压变质带,含微粒金刚石或柯石英的榴辉岩、长英质片麻岩、大理岩等超高压变质岩曾俯冲至 100 km 以下并快速折返^[23~25]。榴辉岩 B270 采自位于苏鲁超高压变质带的中国大陆超深钻主孔 547.2 m 处。样品新鲜,主要由石榴子石和绿辉石组成,含少量石英和金红石。绿辉石发育近水平的南北向拉伸线理,榴辉岩面理走向近南北向,向东倾约 60°。

1.1 高温高压波速测量

榴辉岩的波速测量在瑞士苏黎世联邦理工大学 (ETHZ) 岩石变形实验室完成。实验用的 Paterson 波速测量仪用氩气作为压力介质,最大围压 500 MPa 下可达 700 °C(样品直径为 22 mm)或 950 °C(样品直径为 15 mm)。样品上下两端和加热炉的上、中、下都有热电偶控制温度,样品的最大温差小于 5 °C,500 MPa 下的压力误差小于 1 MPa^[26,27](图 1)。榴辉岩样品为直径 22 mm,长 30 mm 的圆柱体,两端磨平后的平行误差小于 10 μm,在 120 °C 下干燥 24 h 备用。为保证信号质量,先将电极插头、压电传感器及由氧化铬和氧化铝组成的缓冲棒组装在一起,实验时再与岩样一起用不锈钢管固定,放入加热炉。波速测量使用脉冲传播法^[9],频率为 1 MHz。使用已知弹性参数的合成蓝宝石进行了仪器的 V_P 校正,测量的 V_P 精度为 $\pm 1\%$ 。

为研究岩石的地震波各向异性,沿 B270 的 X、Y、Z 三个方向(X 平行拉伸线理,Y 平行面理但垂直于拉伸线理,Z 垂直于面理)分别钻取了岩样。P 波各向异性 $A(V_P) = (V_{P_{\max}} - V_{P_{\min}}) / V_m \times 100\%$,其中 V_m 是沿三个方向的平均波速, $V_{P_{\max}}$ 和 $V_{P_{\min}}$ 分别为样品的最快和最慢 P 波速度。如图 2a 所示,随着压力的升高,榴辉岩中的孔隙和微裂隙逐渐关闭, V_P 由非线性地快速升高逐渐过渡到线性地缓慢升高。波速随围压的变化可用以下公式拟合^[21]:

$$V_P = \begin{cases} a(\ln p)^2 + b \ln p + c & (p \leq p_c) \\ V_0 + Dp & (p \geq p_c) \end{cases} \quad (1)$$



据文献[26,27]修改

modified after [26, 27]

图 1 Paterson 波速测量仪的结构图

Fig. 1 Sketch of the Paterson gas medium apparatus equipped for measurements of seismic properties

其中, a 和 b 是描述临界压力 p_c 之下孔隙关闭的两个参数, c 等于一个压力单位 (1 MPa) 下的岩石波速, V_0 是无孔隙岩石在零压力下的波速, D 是岩石波速的本征压力梯度, V_0 和 D 反映了岩石的纯弹性性质,可用来外延解释深部地震观测资料(图 3)。榴辉岩 B270 的 $A(V_P)$ 在低压下变化很大,而在约 400 MPa 以上随着孔隙的关闭趋于一常数,大约为 1.5 % (图 2b),反映了岩石组构对地震波各向异性的贡献,与前人的观测结果一致^[18~21]。

在高温实验时,为了防止岩石产生热裂隙,压力的增幅为 1 MPa/°C,达到 500 MPa 后缓慢升温至 700 °C。将 V_P 校正到 500 MPa,发现随着温度的升高 V_P 线性降低,但沿 X、Y 和 Z 方向的 V_P 温度偏导数有显著差异,垂直面理方向的波速降低更快,同时 $A(V_P)$ 随温度升高而呈线性增加(图 4)。因此,受显微组构和矿物弹性各向异性的影响,榴辉岩在不同方向的热膨胀率不同,温度对深部岩石地震波各向异性的作用不可忽略。表 1 列出了榴辉岩 B270 的 V_P - p 和 V_P - T 实验曲线回归结果,与观测值的误差小于 1 %。根据这些参数可计算样品在任一温压条件下的波速,与地震观测资料直接对比。

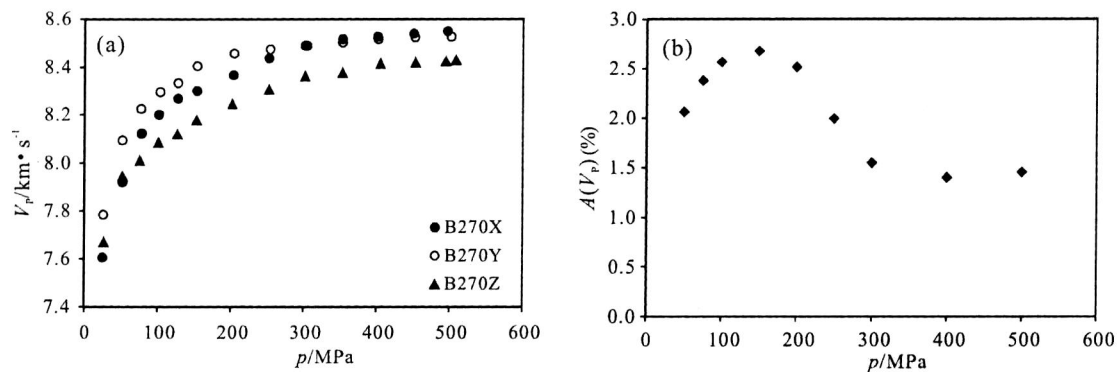


图 2 室温下榴辉岩 B270 的 P 波速度和各向异性随压力的变化

Fig. 2 (a) P-wave velocities and (b) anisotropy of eclogite B270 as a function of pressure at room temperature

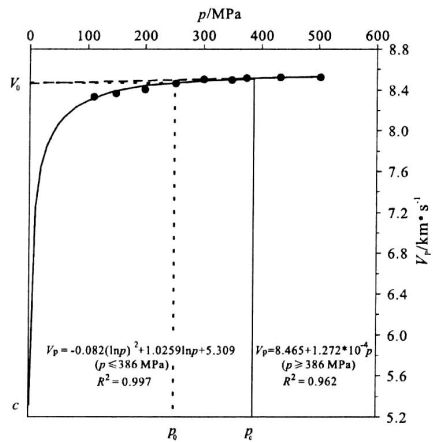


图 3 室温下榴辉岩 B270 沿 Y 方向的 V_p - p 实验曲线回归结果

Fig. 3 Regression results of laboratory-derived V_p - p curve for eclogite B270 along Y direction at room temperature

表 1 榴辉岩 B270 实测 V_p 的拟合结果

Sample	p_c / MPa	$V_p = a(\ln p)^2 + b \ln p + c \ (p \leq p_c)$			$V_p = V_0 + Dp \ (p \geq p_c)$		dV_p/dt / $10^{-4} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$
		a	b	c	V_0	D	
		/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-2}$	/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	/ $10^{-4} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$	
B270X	365	- 0.0547	0.8409	5.463	8.436	2.297	- 2.857
B270 Y	386	- 0.082	1.0259	5.309	8.465	1.272	- 3.568
B270Z	398	- 0.0172	0.4217	6.499	8.333	1.889	- 7.060
Mean	365	- 0.0538	0.7951	5.658	8.400	2.068	- 4.495

1.2 使用广义混合律计算平均波速

一个理想弹性体在一定应力(σ_{ij}) 下产生的应变(ϵ_{ij}) 遵循胡克定律^[28] :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} , \tag{2}$$

其中, C_{ijkl} 是刚度模量, $i, j, k, l = 1, 2$ 或 3。若弹

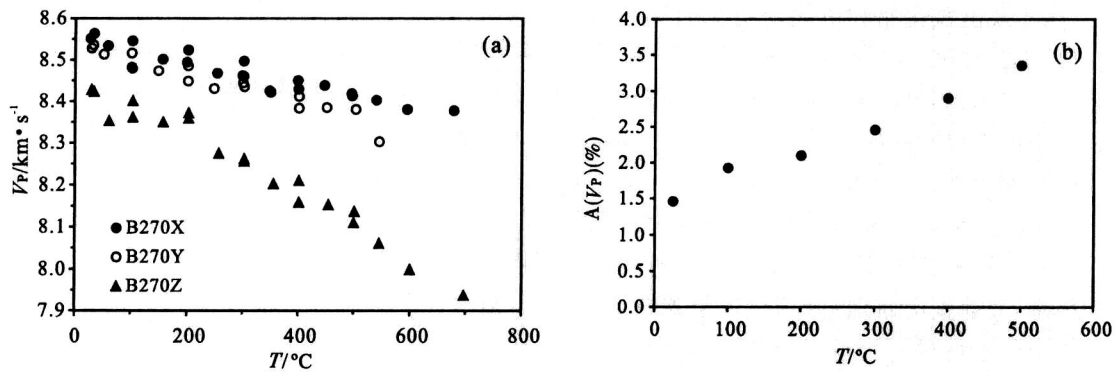


图 4 500 MPa 下榴辉岩 B270 的 P 波速度和各向异性随温度的变化

Fig. 4 (a) P-wave velocities and (b) anisotropy of eclogite B270 as a function of temperature at 500 MPa

性体没有旋转, $\sigma_{12} = \sigma_{21}, \sigma_{13} = \sigma_{31}, \sigma_{23} = \sigma_{32}, C_{ijkl}$ 可简化为一个 6×6 的刚度张量 C_{qr} 。如已知造岩矿物的 C_{qr} 和密度 ρ 的压力和温度的偏导数, 则可计算岩石在任意温压条件下的地震波速和各向异性^[13~15]。

由于理论计算中没有考虑孔隙和蚀变矿物的影响, 使用矿物弹性参数计算的岩石波速反映了无裂隙、无蚀变岩石的理想弹性性质, 大于低压下岩石的实际波速, 不能用来解释上地壳的地震观测结果。

如果忽略岩石的显微构造,在统计上多晶单相或多相岩石可视为各向同性的均质体,只需要两个独立的弹性模量即可描述其弹性性质^[29]。从单晶体的 C_{qr} 可计算单矿物集合体的弹性模量,例如体模量 K 和剪切模量 $G^{[11]}$ 。已知某成岩矿物 i 的弹性模量 (M_i) 和体积百分比 (f_i),可使用广义混合律计算多相岩石的弹性模量 (M_c)^[30,31]:

$$M_c = \left[\sum_{i=1}^N (f_i M_i^J) \right]^{1/J} \tag{3}$$

其中, M 为某一弹性模量, J 是反映岩石显微构造的常数,值的大小取决于岩石中矿物的几何形状、粒径分布以及各相的空间分布。 $J = 1$ 时为弹性力学中的 *Voigt* 平均 (M_V),对应于强相支撑体系; $J = -1$ 为 *Reuss* 平均 (M_R),对应于弱相支撑体系;*Hill* 平均 $M_H = (M_V + M_R) / 2$;当 $J \rightarrow 0$ 时,得到几何平均 (M_G), $M_G = \sqrt{M_V M_R}$ 。*Hill* 平均虽然没有严格的物理意义,但在地震资料解释中被广泛地使用。岩石的平均波速和泊松比 (σ) 为:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \tag{4}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{5}$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \right] \tag{6}$$

由于显微构造的差异,不同岩石需要使用不同的 J 值来计算高压下的平均波速。统计表明,最适合榴辉岩 V_p 的平均方法是 $RH^{[30]}$ 。榴辉岩 B270 含 77 % 石榴子石, 19 % 绿辉石和 4 % 石英,先用 *Reuss* 平均计算单矿物集合体的体模量 K_i 和剪切模量 G_i ,再由公式(3)用 *Hill* 平均计算岩石的体模量 K_c 和剪切模量 G_c (表 2),由公式(4)~(6)即可获得样品的平均波速和泊松比。因为计算时使用了常温常压下的矿物弹性参数^[6~8],所以计算得到的 V_p (8.33 km/s) 对应于 V_m-p 实验曲线回归得到的 V_0 (8.4 km/s),计算结果在实验误差范围内。 V_0 在 V_m-p 曲线上的投影压力 p_0 为 241 MPa,由于温度的升高会降低岩石波速,使用广义混合律可以简便地估算多相岩石在中下地壳范围内的平均波速。

1.3 EBSD 测量和三维波速分布

近年来已将电子背散射 (EBSD) 技术用于研究榴辉岩的显微组构和地震波性质^[17, 32~34]。榴辉岩 B270 的 EBSD 测量在法国 Montpellier 第二大学构造物理实验室完成。精细抛光的薄片倾斜 70° 放置于配有 EBSD 系统的扫描电镜 JEOL SEM 5600 内,工作电压为 17~18 kV,工作距离为 41 mm。使

表 2 计算榴辉岩 B270 的弹性模量
Table 2 Calculation of elastic moduli for eclogite B270

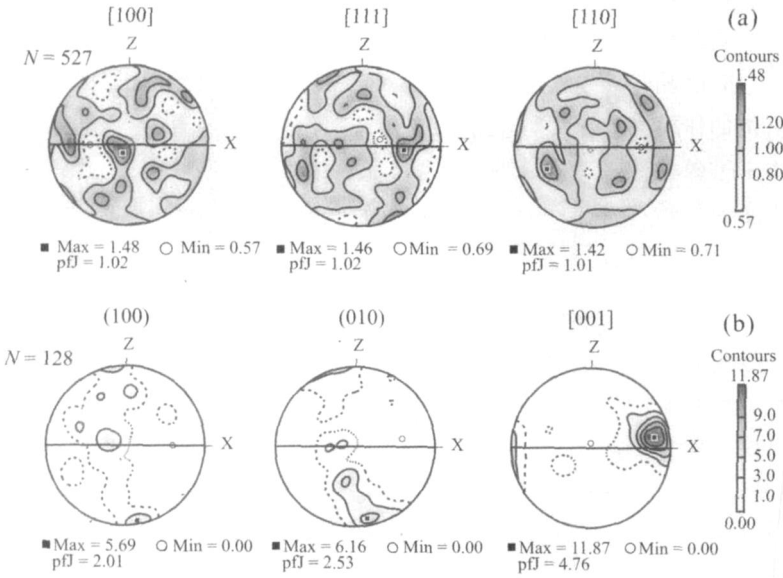
矿 物	$\rho / g \cdot cm^{-3}$	K_i	G_i
		K_R	G_R
石榴子石	4.131	176.83	95.88
绿辉石	3.327	127.96	77.69
石英	2.648	37.56	40.98
岩石	$\rho / g \cdot cm^{-3}$	K_c	G_c
		K_R	G_R
		144.84	87.32
B270 (77 % Grt, 19 % Omp, 4 % Qtz)	3.919	K_V	G_V
		161.97	90.23
		K_H	G_H
		153.41	88.77

用 CHANNEL + 软件对测量点的衍射条纹自动分析,得到矿物类型和描述其空间定向的欧拉角坐标 (ϕ_1, ϕ_2),误差小于 1°。图 5 为 B270 的石榴子石和绿辉石的晶格优选定向,石榴子石基本无序排列,而绿辉石的 [001] 轴近平行于线理方向, (010) 面的法线近垂直于面理。

图 6 为根据石榴子石^[7]和绿辉石^[8]的晶体弹性参数、体积百分比 (80 % 石榴子石, 20 % 绿辉石) 和 LPO 结果计算的 B270 的 P 波和 S 波速度、各向异性和 S 波分裂。计算使用了 D. Mainprice 的程序^[14],采用 *Hill* 平均方法。石榴子石的波速很高,各向异性很低(表 3),它的无序排列使榴辉岩的各向异性主要受绿辉石的 LPO 控制。由于绿辉石的 V_{pmax} 近平行于 [001] 轴,而样品中绿辉石的 [001] 轴近平行于线理方向(图 5),因此 B270 的 V_{pmax} 近平行于线理。虽然绿辉石表现出强烈的定向,但石榴子石的富集使 B270 的各向异性较低,计算的 $A(V_p)$ 只有 1 %,略小于高压下的实验结果,说明除了矿物的 LPO,成分层对榴辉岩的各向异性也有贡献。由于石英的颗粒数太少,也没有发育显著的 LPO,计算中忽略了低波速的石英,这可能导致图 6 中的 V_p (8.7~8.79 km/s) 略高于 V_m-p 实验曲线回归得到的 V_0 (8.4 km/s)。

2 常见岩石的地震波性质

文献[12]总结了常见矿物的三维波速分布和四十余年来的高温高压岩石波速测量结果,是迄今为止最全面的矿物岩石地震波性质数据库。岩石波速一般随围压的增加而升高,随温度的增加而降低,对主要岩石波速与温压的关系已有总结^[22],不再赘述。值得注意的是,当矿物相变时就不遵循这一规律。如常压下 α -石英在 573 °C 转变成 β -石英,相变过程中石英的 V_p 急剧下降,使石英岩的 V_p 在 550



下半球赤平投影,等值线为均一分布密度;X. 线理方向,Z. 垂直面理,
N. 数据点数,pfJ. 组构指数,描述矿物结晶轴的定向排列强度

The contours at multiples of a uniform distribution are plotted; X. lineation, Z. normal to the foliation, N. number of data points, pfJ. texture index

图5 EBSD 测定的榴辉岩 B270 石榴子石(a)和绿辉石(b)的晶格优选定向
Fig. 5 EBSD-measured lattice preferred orientations of omphacite and garnet from eclogite B270. Equal area projection, lower hemisphere

方晶系需要 5 个,而等轴晶系只需要 3 个。因为难以找到适合实验的单晶体,一些重要矿物的单晶体弹性参数尚未测定,如黑云母、绢云母、蛇纹石、绿泥石等。由于长石常以双晶的形式出现,在测量和计算时将其近似视为单斜晶系。

表 3 是 20 种主要成岩矿物在常温常压下的密度、地震波速度和各向异性,以及单矿物集合体的泊松比^[12, 35]。晶体的波速分布和对称性一致。单斜晶系的白云母沿(0001)面上的波速差异很小,在考虑其各向异性时常常被近似视为六方晶系, V_{Pmax} 和 V_{S1} 都平行于(0001)面, V_{Pmin} 垂直于(0001)面, $A(V_P)$ 达到 44 %。黑云母的地震波各向异性被认为近似于白云母,但泊松比高达 0.288。角闪石的 V_{Pmax} 平行于[001]轴, V_{Pmin} 平行于[100]轴, $A(V_P)$ 达到 24 %。上地幔的最主要矿物橄榄石的 V_{Pmax} 平行于[100]轴, V_{Pmin} 平行于[010]轴,最大的 S 波分裂沿[101]方向,在[100]方向观测不到 S 波分裂。

2.2 常见岩石的地震波性质

根据 40 余年来岩石波速的实验测量结果^[12],表 4 总结了主要岩石的密度,以及室温高压下的 V_P 、 V_S 、泊松比和 P 波各向异性。为了减少孔隙的影响并便于与深部地震资料对比,沉积岩的实验压力在 200 MPa,岩浆岩和变质岩的实验压力为 600 MPa。下地壳和上地幔包体中一些近等轴的孔隙即使在高压下也很难被关闭,而且裂隙间常常充填有玻璃质,使实测波速大大低于岩石的原位波速和理论波速,因此本文的统计中略去了包体的数据。

与表 3 对比,可知矿物组成是决定岩石波速的主要因素。石英、钾长石、斜长石的波速比较接近,因此长英质岩石的波速与石英或长石的含量没有相关性。从酸性岩、基性岩到超基性岩,随着 SiO_2 含量的降低和铁镁矿物含量的增大,岩石波速逐渐增高,反映了铁镁矿物对波速的控制作用。总体上,岩石 V_P 和 SiO_2 含量呈负相关,与 Fe_2O_3 +

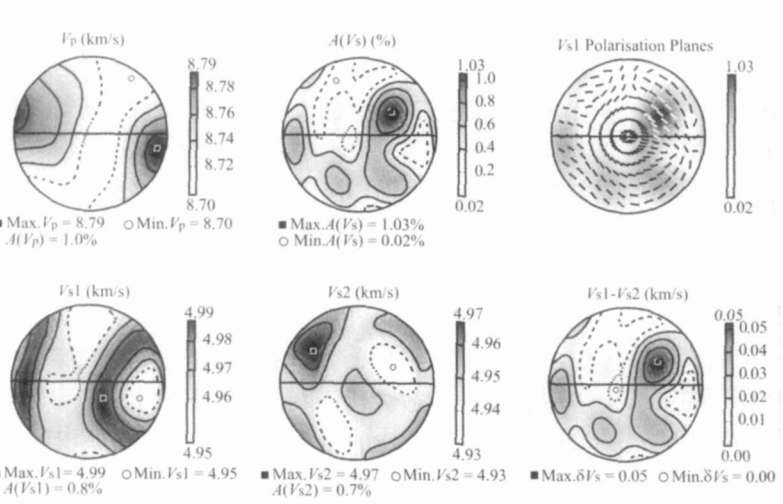


图6 榴辉岩 B270 的理论地震波速分布与各向异性

Fig. 6 Calculated seismic velocities and anisotropy of eclogite B270

~650 °C显著降低^[10]。

2.1 主要成岩矿物的地震波性质

矿物的地震波性质是理解多相岩石地震波性质的基础。所有的矿物都是弹性各向异性体,其独立的弹性系数随晶体对称性的增高而减小:三斜晶系需要 21 个独立的弹性系数,单斜晶系需要 13 个,斜方晶系需要 9 个,四方和三方晶系需要 6 或 7 个,六

表 3 常见矿物的地震波性质与密度

Table 3 Seismic properties and densities of common minerals

矿 物	ρ / g · cm ⁻³	晶系	V_P / km · s ⁻¹		$A(V_P)$ (%)	V_{S1} / km · s ⁻¹		V_{S2} / km · s ⁻¹		ΔV_{Smax} / km · s ⁻¹	泊松比
			max	min		max	min	max	min		
钠长石	2.620	三斜	7.4	5.2	30.9	4.4	3.0	3.5	2.5	1.4	0.283
斜长石	2.680	三斜	7.8	5.7	27.4	4.7	3.4	3.6	2.7	1.3	0.296
钾长石	2.560	单斜	8.1	5.1	37.4	4.8	2.8	3.6	2.3	1.9	0.290
石 英	2.648	三方	7.0	5.3	24.3	5.1	3.7	4.7	3.3	1.8	0.077
方解石	2.712	三方	7.7	5.6	27.6	4.7	2.9	3.8	2.5	2.2	0.320
角闪石	3.120	单斜	7.9	6.0	23.8	4.3	3.4	3.8	3.2	1.1	0.287
白云母	2.844	单斜	8.1	4.5	44.2	5.0	2.5	3.5	2.4	2.7	0.249
黑云母	3.050	单斜									0.288
绿帘石	3.400	单斜	8.4	6.7	19.9	5.0	3.5	4.6	3.4	1.4	0.258
透辉石	3.289	单斜	9.4	7.0	25.8	5.0	4.3	4.8	4.0	0.9	0.260
硬 玉	3.400	单斜	9.5	7.9	16.8	5.7	4.9	5.6	4.3	1.0	0.252
顽辉石	3.200	斜方	8.4	7.5	11.3	5.1	4.9	5.0	4.4	0.5	0.209
橄榄石(Forss)	3.311	斜方	10.0	7.7	22.9	5.6	4.9	4.9	4.4	1.0	0.246
	4.649	斜方	10.9	8.5	22.7	6.3	5.0	5.8	3.9	1.9	0.271
夕线石	4.649	斜方	10.9	8.5	22.7	6.3	5.0	5.8	3.9	1.9	0.271
尖晶石	3.578	等轴	10.6	8.9	16.3	6.6	5.2	6.6	4.2	2.3	0.268
锆 石	4.649	四方	8.9	7.4	17.1	5.0	3.8	4.0	3.0	1.4	0.294
黄铁矿	4.260	等轴	8.5	7.5	11.3	5.7	4.6	5.3	4.6	1.1	0.160
磁铁矿	5.206	等轴	7.4	7.3	2.3	4.3	4.1	4.3	4.1	0.2	0.262
铁铝榴石	4.160	等轴	8.6	8.5	0.9	4.8	4.7	4.8	4.7	0.1	0.274
钙铝榴石	3.560	等轴	9.4	9.2	2.2	5.6	5.4	5.6	5.4	0.3	0.247

注:地震波速和各向异性来自单晶体的波速分布图^[12];泊松比为矿物集合体的 Hill 平均值^[35];斜长石的 $A_n = 53$

表 4 常见岩石的密度和地震波性质

Table 4 Densities and seismic properties of common rocks

类型	岩 性	N_1	ρ / g · cm ⁻³	V_P	V_S	V_P / V_S	泊松比	N_2	$A(V_P)$ (%)
沉积岩	砂岩	69	2.52 ± 0.12	5.11 ± 0.41	3.25 ± 0.26	1.57 ± 0.08	0.15 ± 0.06	29	3.9 ± 4.2
	粉砂岩	33	2.65 ± 0.04	4.86 ± 0.45	3.06 ± 0.21	1.58 ± 0.09	0.16 ± 0.06	21	6.8 ± 6.1
	页岩	14	2.60 ± 0.14	4.51 ± 0.58	2.74 ± 0.39	1.66 ± 0.14	0.20 ± 0.06	10	16.3 ± 9.8
	灰岩	44	2.67 ± 0.07	6.18 ± 0.36	3.33 ± 0.20	1.86 ± 0.11	0.29 ± 0.04	49	3.4 ± 2.7
	白云岩	8	2.85 ± 0.07	6.90 ± 0.12	3.84 ± 0.14	1.80 ± 0.05	0.28 ± 0.02	9	2.8 ± 1.6
岩浆岩	花岗岩-花岗闪长岩	38	2.71 ± 0.12	6.36 ± 0.21	3.66 ± 0.14	1.74 ± 0.07	0.25 ± 0.03	124	2.7 ± 2.6
	安山岩-闪长岩	15	2.81 ± 0.11	6.53 ± 0.32	3.73 ± 0.18	1.75 ± 0.06	0.26 ± 0.03	38	3.3 ± 2.8
	玄武岩(干)	21	2.88 ± 0.12	6.51 ± 0.43	3.67 ± 0.29	1.78 ± 0.06	0.27 ± 0.02	26	2.9 ± 2.4
	玄武岩(湿)	186	2.86 ± 0.11	6.26 ± 0.42	3.38 ± 0.27	1.85 ± 0.05	0.29 ± 0.02	35	2.0 ± 2.1
	辉长岩-辉绿岩(干)	66	2.98 ± 0.15	6.90 ± 0.34	3.84 ± 0.20	1.79 ± 0.06	0.27 ± 0.02	51	2.9 ± 3.1
	辉长岩-辉绿岩(湿)	146	2.92 ± 0.10	6.88 ± 0.46	3.79 ± 0.27	1.82 ± 0.06	0.28 ± 0.02	8	1.7 ± 1.8
	辉石岩	11	3.27 ± 0.05	8.00 ± 0.15	4.40 ± 0.09	1.82 ± 0.06	0.28 ± 0.02	15	3.4 ± 1.8
	橄榄岩	14	3.30 ± 0.04	8.23 ± 0.24	4.65 ± 0.14	1.77 ± 0.04	0.27 ± 0.01	72	6.0 ± 3.4
变质岩	石英岩	4	2.65 ± 0.03	6.05 ± 0.09	4.02 ± 0.04	1.51 ± 0.03	0.10 ± 0.03	31	4.8 ± 3.6
	变质杂砂岩	16	2.76 ± 0.09	6.34 ± 0.31	3.68 ± 0.13	1.73 ± 0.09	0.24 ± 0.04	26	6.7 ± 4.9
	板岩	4	2.80 ± 0.03	6.33 ± 0.22	3.39 ± 0.17	1.87 ± 0.05	0.30 ± 0.01	13	11.7 ± 7.5
	副片麻岩	39	2.75 ± 0.08	6.34 ± 0.29	3.65 ± 0.17	1.74 ± 0.07	0.25 ± 0.03	183	9.5 ± 5.5
	麻粒岩相变质泥岩	37	2.97 ± 0.18	6.84 ± 0.49	3.87 ± 0.25	1.77 ± 0.07	0.26 ± 0.03	38	13.0 ± 7.3
	大理岩	4	2.74 ± 0.16	6.88 ± 0.20	3.71 ± 0.30	1.86 ± 0.13	0.29 ± 0.04	20	6.7 ± 3.8
	花岗质片麻岩	56	2.72 ± 0.07	6.30 ± 0.20	3.64 ± 0.11	1.73 ± 0.05	0.25 ± 0.02	201	3.0 ± 1.9
	酸性麻粒岩	13	2.78 ± 0.08	6.55 ± 0.15	3.70 ± 0.10	1.77 ± 0.04	0.27 ± 0.02	14	1.9 ± 1.1
	中性片麻岩	11	2.88 ± 0.09	6.32 ± 0.26	3.67 ± 0.08	1.72 ± 0.06	0.24 ± 0.03	25	6.1 ± 4.9
	中性麻粒岩	10	2.87 ± 0.11	6.71 ± 0.22	3.69 ± 0.19	1.82 ± 0.09	0.28 ± 0.03	2	3.3 ± 1.7
	角闪岩	43	3.00 ± 0.10	6.84 ± 0.27	3.86 ± 0.16	1.77 ± 0.05	0.26 ± 0.02	137	8.1 ± 4.6
	基性麻粒岩	49	3.06 ± 0.16	7.08 ± 0.29	3.90 ± 0.16	1.81 ± 0.04	0.28 ± 0.02	40	2.6 ± 1.7
	榴辉岩	34	3.50 ± 0.07	8.26 ± 0.27	4.72 ± 0.12	1.75 ± 0.03	0.26 ± 0.01	60	2.4 ± 1.6
	角闪岩化榴辉岩	19	3.36 ± 0.16	7.57 ± 0.47	4.27 ± 0.25	1.78 ± 0.06	0.27 ± 0.02	21	5.6 ± 4.9
	蛇纹石化橄榄岩	22	3.09 ± 0.15	7.21 ± 0.50	3.80 ± 0.36	1.90 ± 0.10	0.31 ± 0.03	17	4.8 ± 2.6
	蛇纹岩	10	2.59 ± 0.12	5.80 ± 0.79	2.83 ± 0.52	2.06 ± 0.11	0.34 ± 0.02	14	9.7 ± 7.7

注: N_1 为密度、波速和泊松比的样品数; N_2 为 P 波各向异性的样品数

FeO + MgO 含量呈正相关。因为石英的 V_S 相对较高,岩石 V_S 与 SiO_2 含量的相关性并不明显,但与 Fe_2O_3 + FeO + MgO 含量呈正相关。

由于一些岩石波速相近,很难通过波速直接推断岩性。例如橄榄岩和榴辉岩的 V_P 都很高,但橄榄岩的 Fe_2O_3 + FeO + MgO 含量大大高于榴辉岩。虽然 SiO_2 含量变化不大,蛇纹石化橄榄岩和角闪岩化榴辉岩的波速都低于未蚀(退)变的原岩,分别与辉长岩和角闪岩相近。因此,结合 V_P / V_S 或泊松比可以有效约束地震资料的解释。常见岩石的泊松比为 0.25 ~ 0.26, 石英(泊松比 = 0.077)含量的提高将显著降低岩石的泊松比,砂岩、粉砂岩及石英岩的泊松比都很低,与灰岩、白云岩、大理岩很易区分。而蛇纹石化可显著提

高橄榄岩的泊松比,提供了确定受大洋俯冲带脱水影响的上地幔楔的途径。

矿物 LPO 是控制岩石地震波各向异性的主要因素,值得注意的是由于变形变质程度的不同,同一种岩石的各向异性变化范围很大。上地幔地震波各向异性主要来自橄榄石的 LPO,橄榄岩的平均 $A(V_P)$ 为 6%,纯橄岩可达到 8%。除橄榄岩外,岩浆岩的 $A(V_P)$ 一般小于 3%,但流动构造可提高其地震波各向异性。云母类矿物的各向异性很大,常常平行层理分布,造成富云母岩石(如沉积岩和片岩)的 V_{Pmax} 平行于层理, V_{Pmin} 垂直于层理方向^[36,37]。角闪石的[001]常平行拉伸线理分布,(100)平行面理,使角闪岩的 V_{Pmax} 平行线理方向, V_{Pmin} 垂直于面理方向^[38]。因此,中低级变质岩大多具有显著的各向异性,板岩、千枚岩、副片麻岩等岩石的各向异性可大于 10%,角闪岩的 $A(V_P)$ 为 8.1%左右。由于石榴子石各向异性很低,除麻粒岩相变质泥岩外,高级变质岩近于各向同性,导致下地壳的地震波各向异性较低。新鲜榴辉岩的平均 $A(V_P)$ 为 2.4%,但角闪岩相退变质作用将提高榴辉岩的地震波各向异性。总体上,云母和角闪石的 LPO 是陆壳地震波各向异性的主要来源。

2.3 波速-孔隙率

空气的波速远低于矿物波速,孔隙和微裂隙会显著降低岩石波速(图 2a)。干燥砂岩在 50 MPa 时的波速与孔隙率呈负相关,说明孔隙率是控制碎屑沉积岩波速的主要因素^[39]。因为粘土矿物的波速低于石英,富粘土矿物的粉砂岩和页岩的波速同时受到粘土含量的影响,随着粘土含量的增加,岩石的

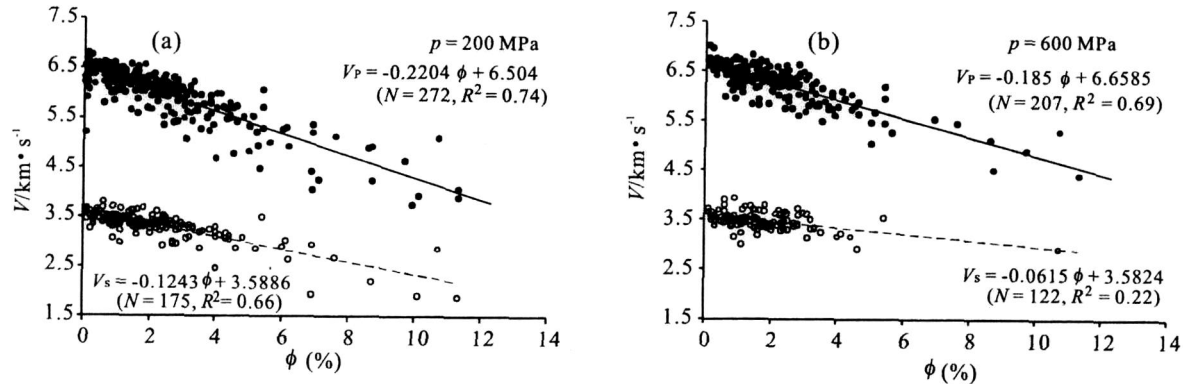
波速降低,但泊松比升高(表 4)。已知沉积岩 V_{P-p} 和 V_{S-p} 的关系,结合粘土含量与泊松比进行多元回归,可以为盆地勘探中寻找目标层提供重要依据。

孔隙为流体提供了通道,孔隙率对岩石波速的影响实际上与流体是密切相关的。一方面因为流体的波速大于空气的波速,流体含量的增加将提高岩石波速;另一方面流体不可压缩,孔隙流体降低了岩石的有效压力 ($p_{eff} = p - p_f$, p 是围压, p_f 是孔隙流体压)并使波速变慢。因此,同样实验条件下,干样和湿样的波速差随孔隙率的增加而增大,随着压力的增加而减小。表 4 列出了玄武岩和辉长岩-辉绿岩在 600 MPa 下干样和湿样的地震波性质,由于玄武岩的孔隙率比辉长岩-辉绿岩更大,玄武岩干样和湿样的波速差异也更大一些。图 7 为 200 MPa 和 600 MPa 下饱水玄武岩的波速与孔隙率的关系,随着孔隙的关闭,高压下孔隙率对波速的影响有所降低,而且与 V_S 的相关性较差。

3 讨论和结论

榴辉岩地震波性质的实验和理论研究表明,在根据地震资料推断深部构造和物质组成时,需综合考虑矿物组成、显微组构、压力、温度等因素对岩石地震波速度和各向异性的影响。使用广义混合律计算的岩石平均波速,及根据矿物 LPO 计算的岩石三维波速分布与高压下的波速测量结果基本一致,是研究深部地壳和上地幔地震波性质的有效手段。

与刚性的大洋岩石圈相比,富含长英质矿物的大陆岩石圈流变强度低,岩石组成更为复杂,这一差异导致广泛的陆内变形,也增加了地震资料的多解



N 是样品数,实线和虚线分别为 V_P (实心圆)和 V_S (空心圆)对孔隙率(ϕ)的最小方差回归线,数据文献[12]

N is the sample number; solid line and dashed line are the least squares fit to V_P data (solid circle) and V_S data (open circle), respectively, original data are from [12]

图 7 饱水玄武岩 200 MPa(a) 和 600 MPa(b)时的波速与孔隙率的相关性

Fig. 7 Dependence of p- and S-wave velocities on porosity of water-saturated basalts at confining pressure of 200 MPa and 600 MPa

性。根据岩石地震波数据库的统计分析结果,对地震资料的合理解释需综合考虑岩石的地震波性质、研究区的温压条件与构造历史,尤其要注意不同深度和构造背景下岩石变质程度(包括矿物组成和显微构造)的变化。在上地壳,孔隙和流体是控制岩石波速的主要因素,随深度的增加波速迅速增大,地震波各向异性很复杂,由微裂隙产生的地震波各向异性与区域应力场相关。在中下地壳,孔隙基本关闭,压力和温度的共同作用使波速的增长变缓,由矿物定向排列产生的地震波各向异性常常与韧性剪切带相关,但随深度的增加岩石的地震波各向异性可能发生变化。在地温梯度很大的构造活动区,高温可能使岩石波速随深度增加的速率略微降低,同时石英的 $\alpha\beta$ 相变可在富长英质的中地壳形成低速层,如西藏 INDEPTH II剖面^[40]。虽然上地幔的地震波各向异性主要由橄榄石的晶格优选定向决定,但在俯冲带和大陆造山带还应考虑榴辉岩的贡献。

致 谢:感谢嵇少丞教授和许志琴院士对本项研究的指导和帮助,以及 D. Mainprice 博士和 L. Burlini 博士对实验工作的支持。

参考文献 (References):

- [1] Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view[J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 9761 - 9788.
- [2] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Rev. Geophys.*, 1995, 33: 267 - 309.
- [3] Gao S, Kern H, Liu Y, Jin S Y, Popp T, Jin Z M, Feng J, Sun M, Zhao Z. Measured and calculated seismic velocities and densities for granulites from xenolith occurrences and adjacent exposed lower crustal sections: a comparative study from the North China craton[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 18965 - 18976.
- [4] Park J, Levin V. Seismic anisotropy: tracing plate dynamics in the mantle[J]. *Science*, 2002, 296: 485 - 489.
- [5] Hearmon R F S. The elastic constants of crystals and other anisotropic materials [A]. Hellwege K H, Hellwege A M. *Landolt-Bornstein Tables*, III/18[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 1 - 154.
- [6] Bass J D. Elasticity of minerals, glasses and melts [A]. Ahrens T J. *Mineral Physics and Crystallography: A handbook of physical constants* [C]. Washington: American Geophysical Union, 1995: 45 - 63.
- [7] Chai M, Brown J M, Slutsky L J. The elastic constants of pyrope-grossular-almandine garnet to 20 GPa[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24: 523 - 526.
- [8] Bhagat S, Bass J D, Smyth, J. Single-crystal elastic properties of omphacite-C2/c by Brillouin spectroscopy[J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 6843 - 6848.
- [9] Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobar, Part 1[J]. *J. Geophys. Res.*, 1960, 65: 1083 - 1102.
- [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]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1982, 29: 12 - 23.
- [11] Christensen N I. Seismic velocities [A]. Carmichael R. S. *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals* [C]. Boca Raton, Florida, America: CRC Press Inc. 1989: 429 - 546.
- [12] Ji S C, Wang Q, Xia B. *Handbook of seismic properties of minerals, rocks and ores* [M]. Montreal: Polytechnic International Press, 2002: 630.
- [13] Crosson R S, Lin J W. Voigt and Reuss prediction of anisotropic elasticity of dunite[J]. *J. Geophys. Res.*, 1971, 76: 570 - 578.
- [14] Mainprice D. A Fortran program to calculate seismic anisotropy from the lattice preferred orientation of minerals[J]. *Computers and Geosciences*, 1990, 16: 385 - 393.
- [15] Mainprice D, Humbert M. Methods of calculating petrophysical properties from lattice preferred orientation data[J]. *Surveys in Geophysics*, 1994, 15: 575 - 592.
- [16] Xu Z Q, Wang Q, Ji S C, Chen J, Zeng L S, Yang J S, Chen F Y, Liang F H, Wenk H R. Petrofabrics and seismic properties of garnet peridotite from the UHP Sulu terrane (China): Implications for olivine deformation mechanism in a cold and dry subducting continental slab[J]. *Tectonophysics*, 2006, 421: 111 - 127.
- [17] 许志琴,王勤,陈方远,梁风华,唐哲民. 榴辉岩组构造运动学与大陆深俯冲——中国大陆科学钻探主孔榴辉岩的 EBSD 研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22: 1799 - 1809.
Xu Zhiqin, Wang Qin, Chen Fangyuan, Liang Fenghua, Tang Zheming. Fabric kinematics of eclogite and deep continental subduction: EBSD study of eclogite from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22: 1799 - 1809. (in Chinese with English abstract)
- [18] Manghnani M H, Ramanantsoandro R, Clark S P. Compressional and shear wave velocities in granulite facies rocks and eclogites to 10 kilobars[J]. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79: 5427 - 5445.
- [19] Kern H, Gao S, Jin Z, Popp T, Jin S. Petrophysical studies on rocks from the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, central China: Implications for the composition and delamination of the lower crust[J]. *Tectonophysics*, 1999, 301: 191 - 215.
- [20] Kern H, Jin Z, Gao S, Popp T, Xu Z Q. Physical properties of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Sulu terrain, eastern central China: Implications for the seismic structure at the Donghai (CCSD) drilling site[J]. *Tectono-*

- physics, 2002, 354: 315 - 330.
- [21] Wang Q, Ji S C, Salisbury M, Pan M, Xia B, Xu Z Q. Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections[J]. *Tectonophysics*, 2005, 398: 67 - 99.
- [22] Wang Q, Ji S C, Salisbury M, Xia B, Pan M, Xu Z Q. Shear wave properties and Poisson's ratios of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt, China: Implications for the crustal composition[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, doi:10.1029/2004JB003435.
- [23] Xu S T, Okay A I, Ji S, Sengör A M C, Su W, Liu Y, Jiang L. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 1992, 256: 5053, 80 - 82.
- [24] Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G, Rumble D, Shigenori M. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks[J]. *Rev. Miner.*, 1998, 37: 33 - 96.
- [25] Liu F L, Xu Z Q, Katayama I, Yang J S, Maruyama Sh, Liou J G. Mineral inclusions in Zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling project[J]. *Lithos*, 2001, 59: 199 - 215.
- [26] Burlini L, Arbaret L, Zeilinger G, Burg J P. High-temperature and pressure seismic properties of a lower crustal prograde shear zone from the Kohistan Arc Pakistan[A]. Bruhn D, Burlini L. High-Strain Zones: Structure and Physical Properties[C]. *Geol. Soc. Special Pub.*, 2005, 245: 187 - 202.
- [27] Ferri F, Burlini L, Cesare B, Sassi R. Seismic properties of lower crustal xenoliths from El Hoyazo (SE Spain): Experimental evidence up to partial melting[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 253: 239 - 253.
- [28] Nye J F. Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices[M]. London: Oxford University Press, Amen House, 1957: 82 - 92.
- [29] Hashin Z. Analysis of composite Materials - A survey[J]. *J. Appl. Mech.*, Transactions ASME, 1983, 50: 481 - 505.
- [30] Ji S C, Wang Q, Xia B. P-wave velocities of polymineralic rocks: comparison of theory and experiment and test of elastic mixture rules[J]. *Tectonophysics*, 2003, 366: 165 - 185.
- [31] Ji S C, Wang Q, Xia B, Marcotte D. Mechanical properties of multiphase materials and rocks: A phenomenological approach using generalized means[J]. *J. Struc. Geol.*, 2004, 26: 1377 - 1390.
- [32] Mauler A, Burlini L, Kunze K, Philippot P, Burg J P. P-wave anisotropy in eclogites and relationship to the omphacite crystallographic fabric[J]. *Phys. Chem. Earth*, 2000, A25: 119 - 126.
- [33] Bascou J, Barruol G, Vauchez A, Mainprice D, Egydio-Silva M. EBSD-measured lattice-preferred orientations and seismic properties of eclogites[J]. *Tectonophysics*, 2001, 342: 61 - 80.
- [34] Ji S C, Saruwatari K, Mainprice D, Wirth R, Xu Z Q, Xia B. Microstructures, petrofabrics and seismic properties of ultrahigh-pressure eclogites from the Sulu region, China: Implications for rheology of subducted continental crust and origin of mantle reflections[J]. *Tectonophysics*, 2003, 370: 49 - 76.
- [35] Christensen N I. Poisson's ratio and crustal seismology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 3139 - 3156.
- [36] Johnston J E, Christensen N I. Shear wave reflectivity, anisotropies, Poisson's ratios, and densities of a southern Appalachian Paleozoic sedimentary sequence[J]. *Tectonophysics*, 1992, 210: 1 - 20.
- [37] Godfrey N J, Christensen N I, Okaya D A. Anisotropy of schists: Contribution of crustal anisotropy to active source seismic experiments and shear wave splitting observations[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 27991 - 28007.
- [38] Siegesmund S, Takeshita T, Kern H. Anisotropy of Vp and Vs in an amphibolite of the deeper crust and its relationship to the mineralogical, microstructural and textural characteristics of the rock[J]. *Tectonophysics*, 1989, 157: 25 - 38.
- [39] Freund D. Ultrasonic compressional and shear velocities in dry clastic rocks as a function of porosity, clay content, and confining pressure[J]. *Geophys. J. Intern.*, 1992, 108: 125 - 135.
- [40] Mechie J, Sobolev S V, Ratschbacher L, Babeyko A Y, Bock G, Jones A G, Nelson K D, Solon K D, Brown L D, Zhao W. Precise temperature estimation in the Tibetan crust from seismic detection of the α - β quartz transition[J]. *Geology*, 2004, 32: 601 - 604.