

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

苏鲁超高压变质岩中地震波速随围压的变化规律

嵇少丞^{1,2)}, 王茜¹⁾, Denis MARCOTTE¹⁾, 许志琴³⁾, 夏斌²⁾,

Jacques MARTIGNOLE¹⁾, Matthew SALISBURY⁴⁾

1) 加拿大蒙特利尔综合工学院民用、地质与采矿工程系, 蒙特利尔, H3C 3A7

2) 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 510640

3) 中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京, 100037

4) 加拿大地质调查局(大西洋) Bedford 海洋研究所, Dartmouth, B2Y 4A2

内容提要:我们在 10~800 MPa 的静水压力下测量了中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔岩心和采自苏鲁地区地表露头上的共 68 块典型超高压变质岩试样的地震波速, 并建立了波速和围压的定量关系, 成功地解释了描述这一定量关系方程中 4 个参数的物理意义。笔者相信, 本文将为超高压变质岩地区以及新老俯冲带地震波资料的解释提供必不可少的理论和实验支撑。

关键词: 岩石地震波性质; 超高压变质岩; 苏鲁造山带; 中国大陆科学钻探

1946 年, P. W. Bridgman 因对高压下岩石物理性质的开创性研究, 获得了诺贝尔物理学奖。此后 60 年来, 人类对岩石的力学性质特别是弹性地震波在岩石中传播速度和各向异性的研究有了长足的进展(综述见 Ji et al., 2002), 为现代地震学奠定了坚实的理论基础。

地震波速及其各向异性是目前探索地球内部物质成分、结构和物理状态最有效的方法。地震资料的解释离不开实验数据的外延和内插。所以, 确定各种典型岩石中波速随围压、温度的变化规律, 对于地震资料的解释尤为重要。本研究的主要目的就是为苏鲁地区超高压变质岩建立波速与围压之间的定量关系。

1 岩石标本

本研究共使用了 68 块标本, 其中 31 块来自中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔 10~700 m 段和 3000~4600 m 段的岩心, 37 块采自苏鲁地区超高压变质岩地表露头。各岩心标本的样号、岩性和密度列于表 1。如图 1 所示, 超基性岩包括橄榄岩和蛇纹岩, 以 $\text{SiO}_2 < 46.5\%$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 < 2\%$ 为特征, 绝大多数的

长英质正副片麻岩以 $\text{SiO}_2 > 70\%$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10.5\% \sim 13.5\%$ 为特征, 只有样号为 703-29 和 178-6-6 的两块标本属于中性岩。榴辉岩和退变榴辉岩具有与变辉长岩和角闪岩相似的化学成分: $\text{SiO}_2 = 41.8\% \sim 59.0\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.6\% \sim 22.3\%$ 。除大理岩外, 所有测定波速的样品都显示 MgO 随 SiO_2 和 Na_2O 增加而减小的趋势。除橄榄岩、蛇纹岩和大理岩外, 其他所有岩石的 CaO 含量随 SiO_2 的增加而减少。从超基性岩到长英质岩, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量随 SiO_2 的增加而逐渐增加。此外, 在长英质正副片麻岩和基性岩石包括角闪岩、变辉长岩、榴辉岩和退变榴辉岩中, CaO 含量随 MgO 含量增加而增加。

图 2 是苏鲁超高压变质岩的密度分布直方图, 榴辉岩的平均密度 ($\bar{\rho} = 3.50 \text{ g/cm}^3$) 明显要比其他围岩——正副片麻岩 ($\bar{\rho} = 2.66 \text{ g/cm}^3$)、大理岩 ($\bar{\rho} = 2.86 \text{ g/cm}^3$)、角闪岩 ($\bar{\rho} = 2.99 \text{ g/cm}^3$)、变辉长岩 ($\bar{\rho} = 3.02 \text{ g/cm}^3$)、橄榄岩 ($\bar{\rho} = 3.18 \text{ g/cm}^3$)、蛇纹岩 ($\bar{\rho} = 2.58 \text{ g/cm}^3$) 高得多。变辉长岩和角闪岩具相似的密度, 橄榄岩和退变榴辉岩的密度也很接近。折返过程中的退变作用导致从榴辉岩 ($\bar{\rho} = 3.50 \text{ g/cm}^3$) 到退变榴辉岩 ($\bar{\rho} = 3.35 \text{ g/cm}^3$) 再到角闪岩 ($\bar{\rho} = 2.99$

注: 本文为中国国家杰出青年科学基金(B类)、科技部“973”项目(编号 2003CB716500)、中国科学院杰出海外青年学者基金和加拿大自然科学和工程研究基金联合资助的成果。

收稿日期: 2006-11-14; 改回日期: 2006-11-21; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 嵇少丞, 男, 1960 年生。留法博士, 加拿大蒙特利尔综合工学院教授, 中国科学院广州地球化学研究所和中国国土资源部大陆动力学实验室客座教授, 主要从事地球材料流变学、岩石物理和深部构造方面的研究。Email: sjj@polymtl.ca。

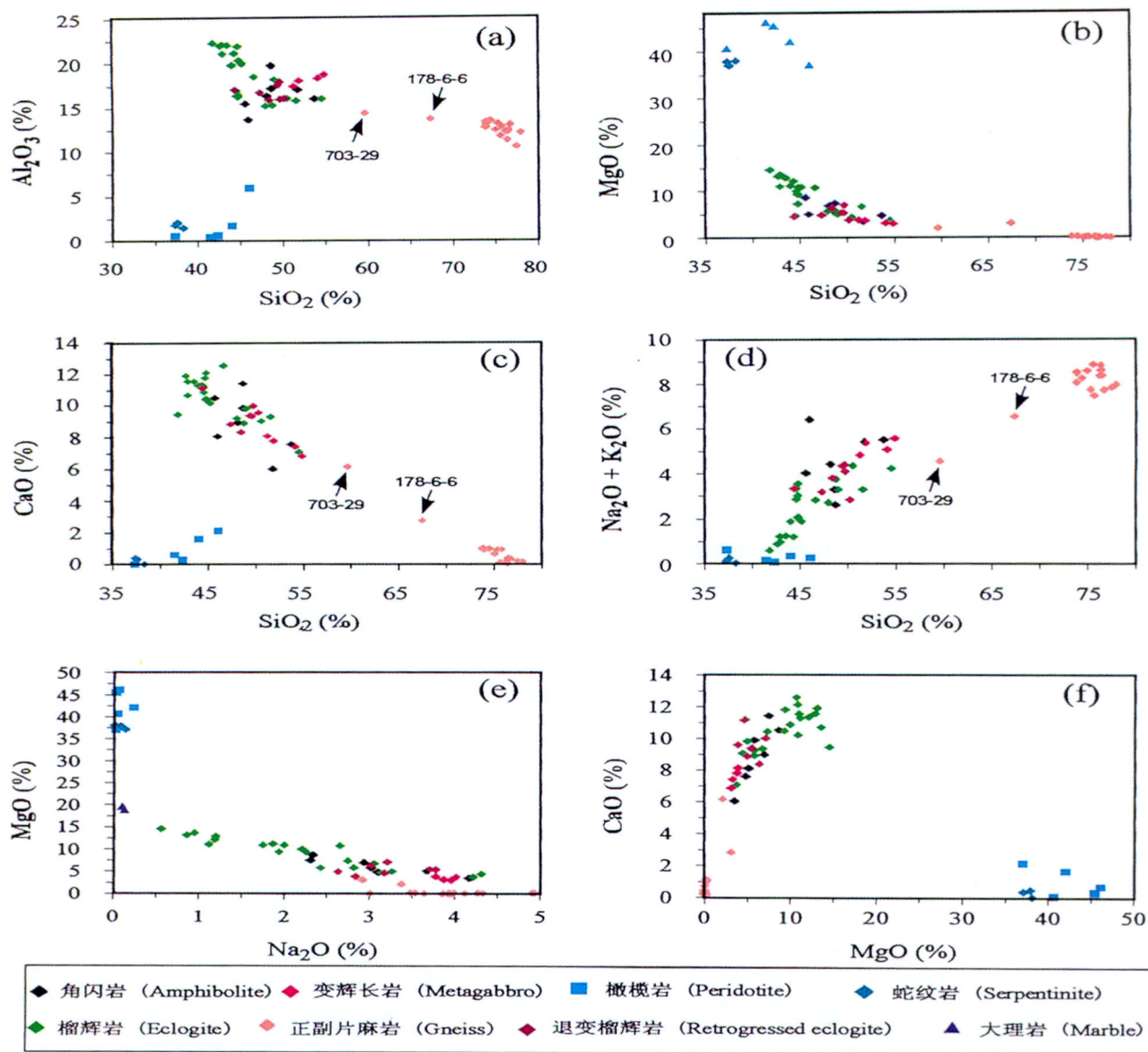


图 1 苏鲁超高压变质岩的主要元素投影图

Fig. 1 Plots of the major element contents for Sulu UHP metamorphic rocks

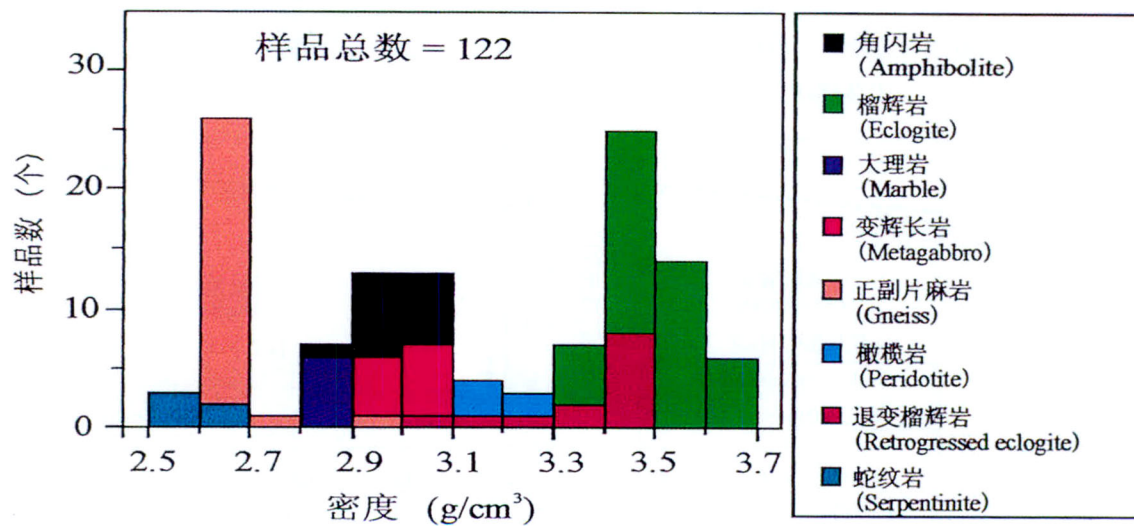


图 2 苏鲁超高压变质岩的密度分布直方图

Fig. 2 Histogram of density distribution for Sulu UHP metamorphic rocks

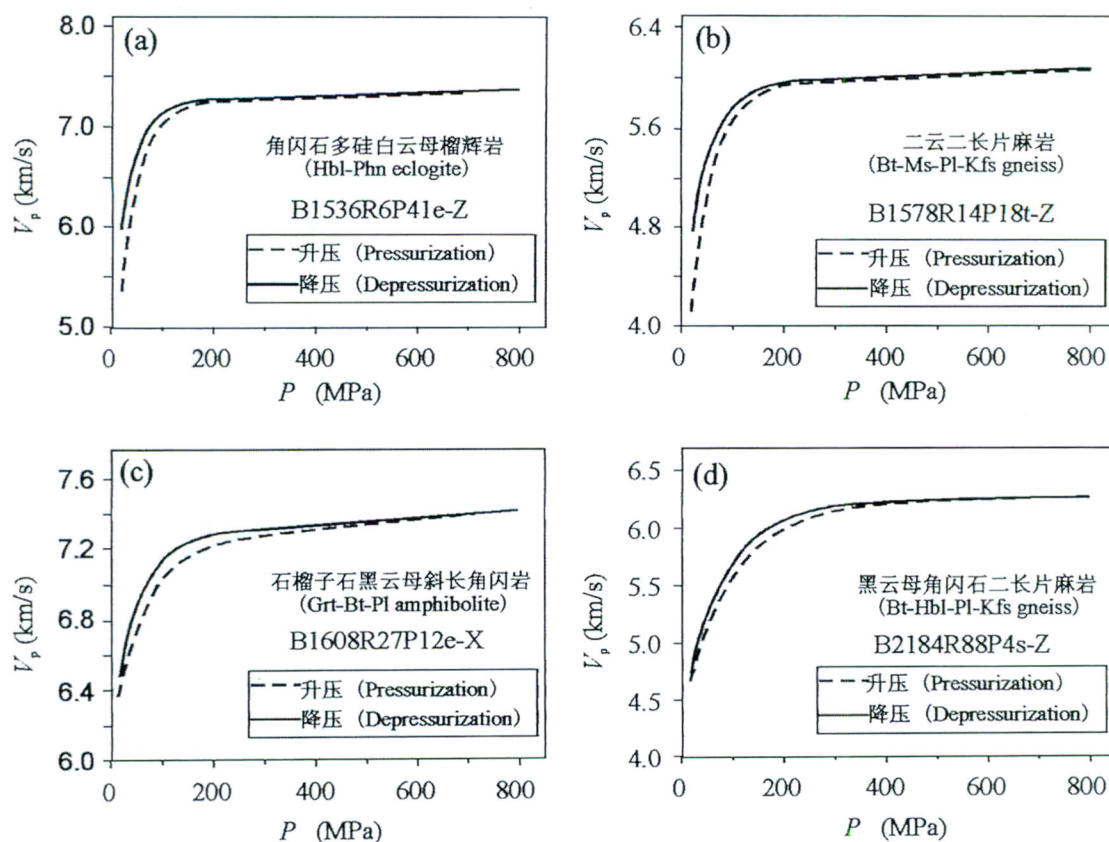


图 3 CCSD 主孔 3000~4600m 段代表性岩芯试样的 P 波速度与压力的变化关系

Fig. 3 V_p - P curves for representative core samples from the depth interval of 3000~4600 m in the CCSD main hole

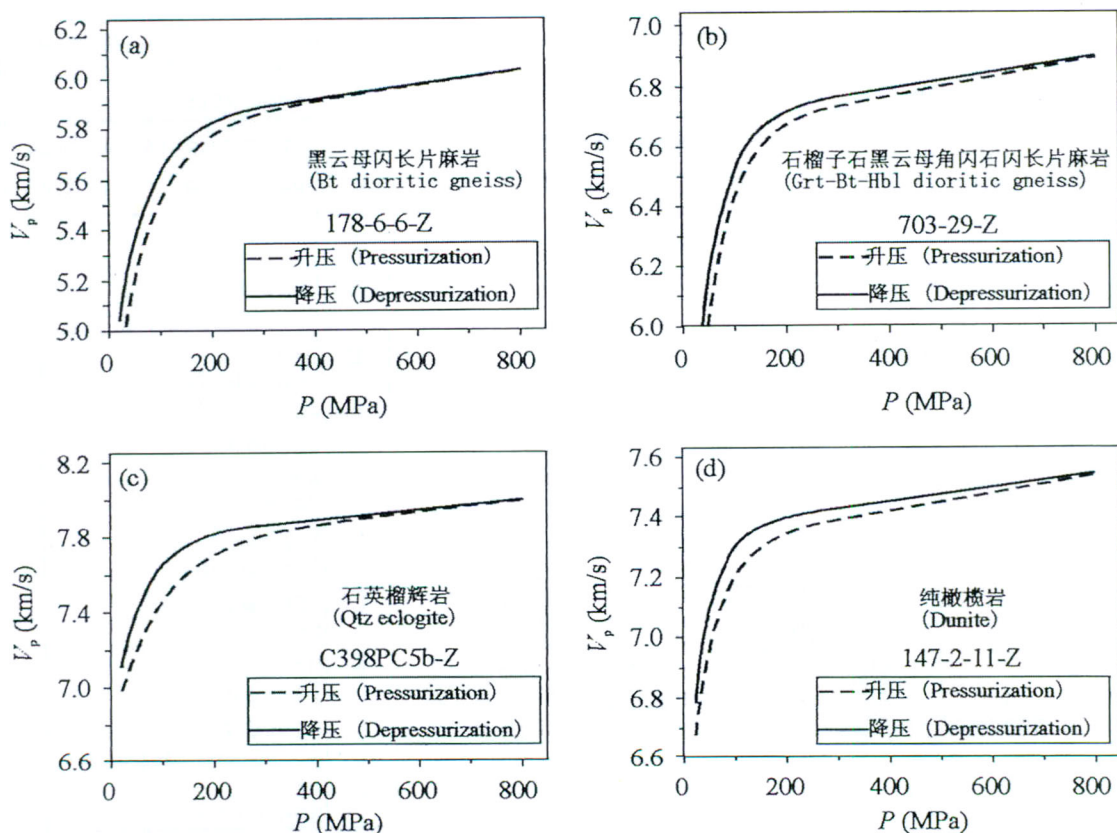


图 4 CCSD 主孔 10~700m 段代表性岩心试样的 P 波速度与压力的变化关系

Fig. 4 V_p - P curves for representative core samples from the depth interval of 10~700 m in the CCSD main hole

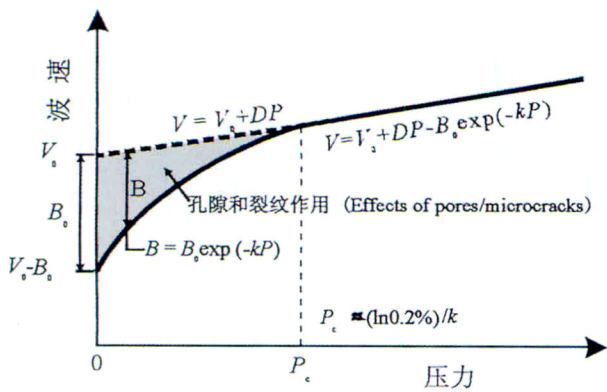


图 5 波速与压力定量关系式中各参数的物理意义

Fig. 5 Physical significance of each parameter in Eq. (8)

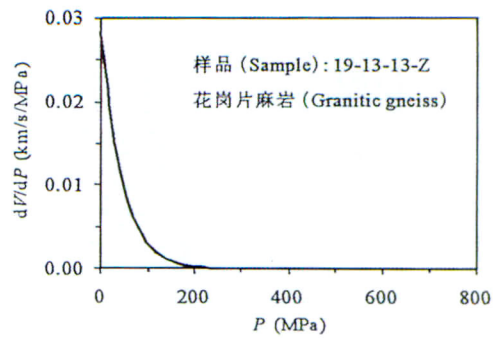


图 6 CCSD 主孔岩心试样 19-13-13-Z 的波速应力偏导数 (\$dV/dP\$) 随压力的变化关系

Fig. 6 Pressure derivative (\$dV/dP\$) versus pressure for core sample 19-13-13-Z from the CCSD main hole

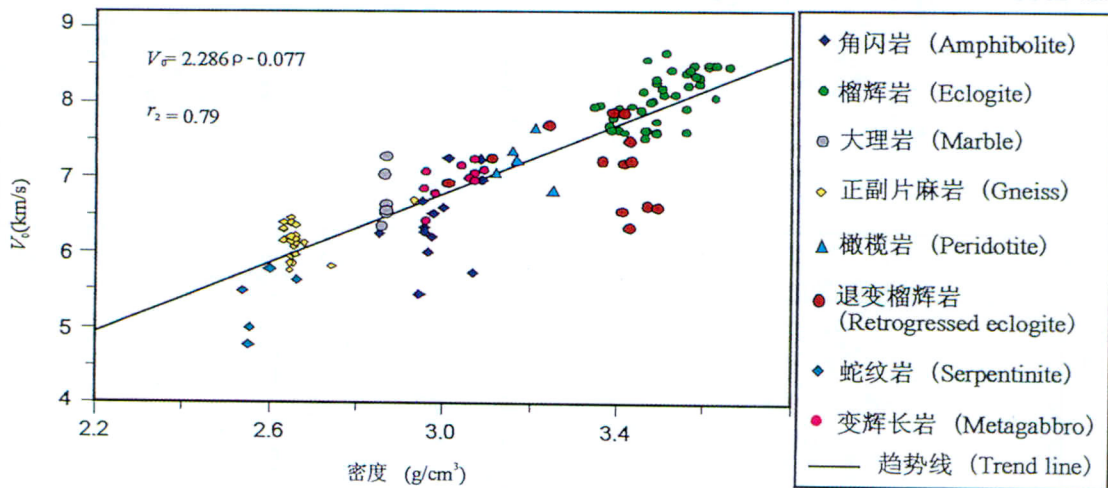


图 7 苏鲁超高压变质岩的 \$V_0\$ 和密度的变化关系

Fig. 7 Statistical properties of P-wave velocity for Sulu UHP metamorphic rocks

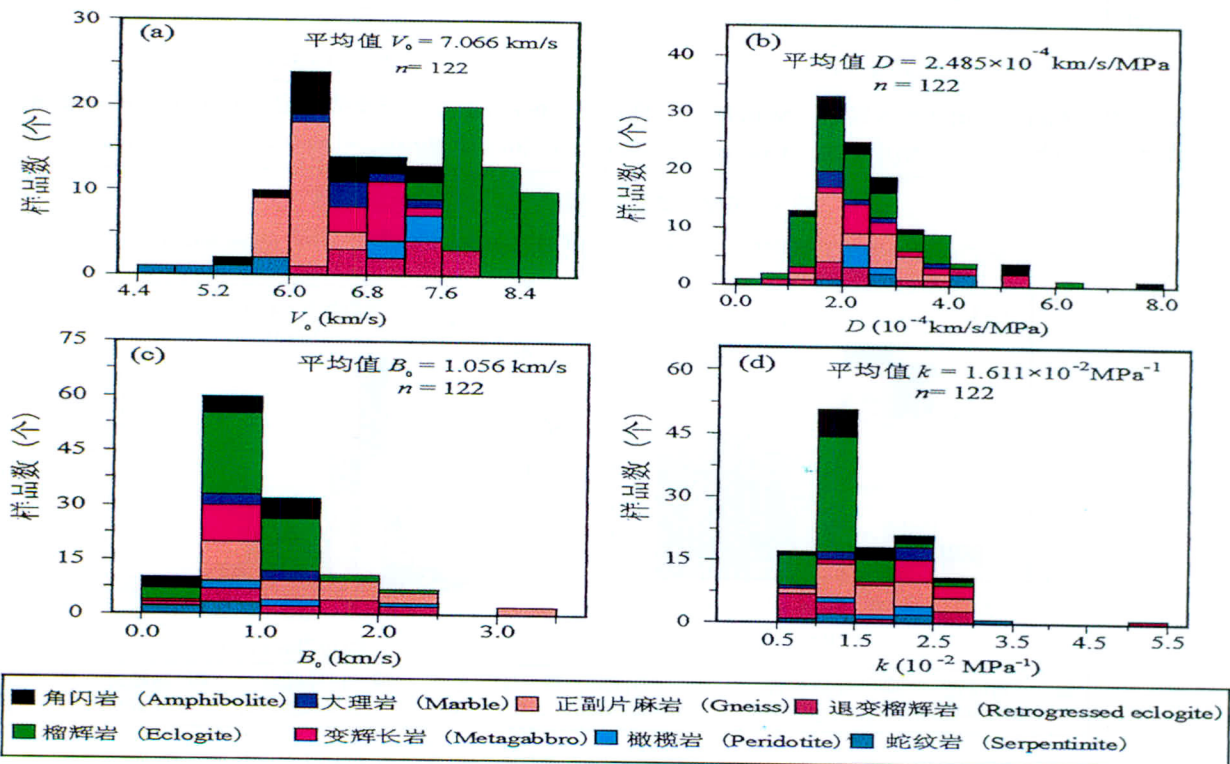


图 8 苏鲁超高压变质岩地震波性质的统计结果

Fig. 8 Relationship between \$V_0\$ and density for Sulu UHP metamorphic rocks

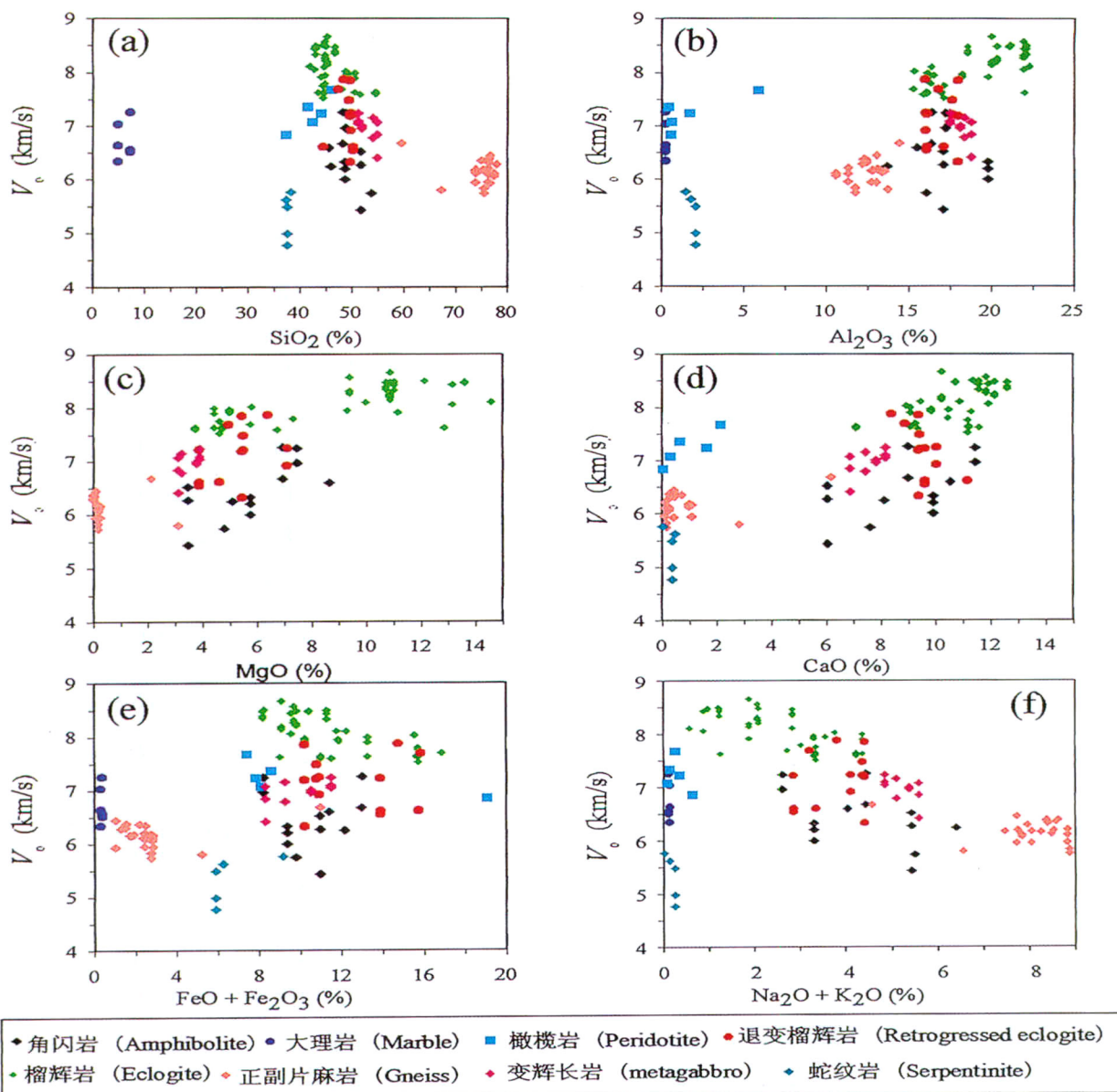


图 9 苏鲁超高压变质岩的 V_p 和化学成分的关系

Fig. 9 Relationship between V_p and chemical compositions for Sulu UHP metamorphic rocks

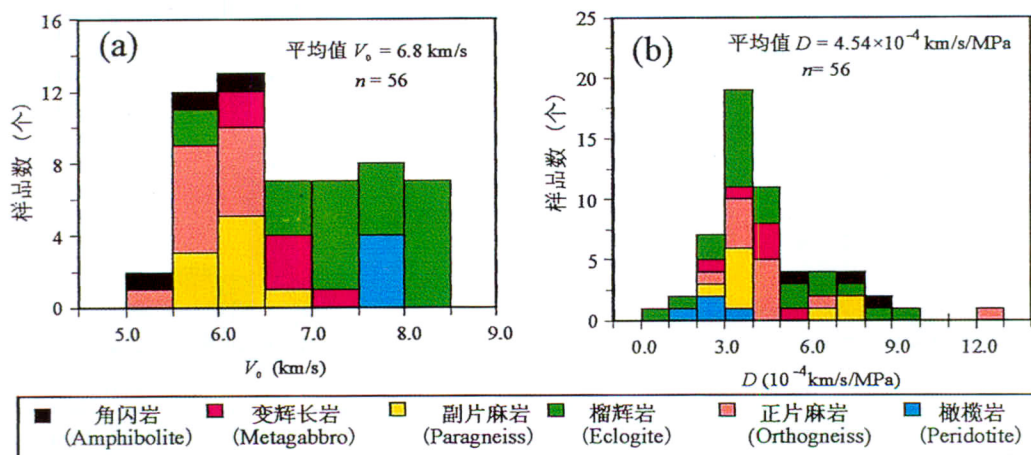


图 10 Kern 等 (1999, 2002) 报道的大别—苏鲁超高压变质岩地震波性质的统计结果

Fig. 10 P-wave properties of Dabie-Sulu UHP rock samples reported in Kern et al. (1999, 2002)

表 1 CCSD 岩心试样描述
Table 1 Description of CCSD core samples

CCSD 岩心号	深度 (m)	岩性	密度 (g/cm ³)
19-13-13	14.42	花岗片麻岩	2.64
26-10-17	23.00	花岗片麻岩	2.64
125-8-18	128.30	石英榴辉岩	3.38
125-15-18	131.00	石英榴辉岩	3.48
147-2-11	168.50	纯橄榄岩	3.16
150-3-20	177.00	二辉橄榄岩	3.12
151-14-16	184.00	石榴子石斜方辉橄岩	3.21
160-12-11	210.50	石榴子石斜方辉橄岩	3.17
166-42-43	227.00	金云母纯橄榄岩	3.25
703-29	242.00	石榴子石黑云母角 闪石闪长片麻岩	2.93
178-6-6	257.21	黑云母闪长片麻岩	2.74
203-5-15	284.53	角闪岩	3.07
210-15-21	299.68	花岗片麻岩	2.63
219-1-2	304.77	花岗片麻岩	2.63
315-1-11	422.50	多硅白云母榴辉岩	3.43
315-4-11	422.50	细粒多硅白云母榴辉岩	3.53
C397 PC 2a	679.90	退变多硅白云母石英榴辉岩	3.39
C398 PC 5b	683.50	石英榴辉岩	3.39
C399 PC c1	684.40	退变石英榴辉岩	3.24
B1536R6P41e	3019.63	角闪石多硅白云母榴辉岩	3.11
B1578R14P18t	3092.00	二云二长正片麻岩	2.65
B1608R27P12e	3211.97	石榴子石黑云母斜长石角闪岩	2.98
B1628R33P24	3254.50	角闪石磁铁矿长英质正片麻岩	2.65
B1651R37P41c	3297.21	角闪岩	3.00
B1694R49P7s	3393.86	长英质正片麻岩	2.63
B2068R61P20h	4072.78	黑云母斜长石角闪岩	2.85
B2078R63P9r	4078.86	长英质正片麻岩	2.63
B2168R85P2a	4249.05	黑云母角闪石二长副片麻岩	2.65
B2184R88P4s	4276.28	黑云母角闪石二长副片麻岩	2.66
B2242R100P16a	4385.74	角闪石黑云母二长副片麻岩	2.66
B2339R122P1f	4561.67	角闪石二长副片麻岩	2.65

g/cm³)密度持续减少,其主要原因是,随退变程度的增加,高密度的石榴子石和绿辉石逐步被较低密度的斜长石、角闪石、石英和云母所取代。

2 实验结果

高压实验是在加拿大 Dalhousie 大学静水压力装置中利用声波脉冲技术进行的(Ji et al., 1993a; Wang et al., 2005a, 2005b)。试样呈直径为 2.54 cm、长度 3~5 cm 的圆柱状。只要标本足够大,从每块标本钻取 3 个试样,分别为平行拉张线理的 X 方向,垂直挤压面理的 Z 方向,以及位于面理面上垂直线理的 Y 方向。声波发射和接收探头的频率为 1 MHz。为了防止试样浸油,我们用薄铜片包裹了试样。实验误差为±0.5%。

典型的 P 波随围压变化的曲线见图 3、4。在升

压过程中,波速随围岩先作迅速的非线性增加,然后在某一临界压力(P_c -up)之上再缓慢的近线性增加。在降压过程中,波速首先作缓慢的近线性减小,然后在某一临界压力(P_c -down)之下再作迅速的非线性减小。降压曲线总是位于升压曲线之上, P_c -up 总是高于 P_c -down。即使在线性区间内, V_p - P 曲线的斜率亦即波速的压力偏导(dV/dP)也总是在降压时小于升压时。上述现象称之为地震波速的滞后性(Birch, 1960; Ji and Salisbury, 1993; Guyer and Johnson, 1999),其量值可定义为在某给定压力下升压波速(V_{up})和降压波速(V_{down})之差: $\Delta V = V_{down} - V_{up}$ 。在无孔隙无裂纹的完全线弹性理想岩石中, $\Delta V = 0$;在有孔隙有裂纹的实际岩石中,则 $\Delta V > 0$ 。

岩石波速滞后性形成原因非常复杂,迄今尚无定论。不过在本研究中,绝热升温肯定不可能形成所观察到的滞后性,这是因为除非发生矿物相变、去水化以及部分熔融,温度对岩石弹性波速的影响甚小。在无裂纹无孔隙的单晶体和完整玻璃中并无波速滞后性。所以,波速滞后性必然是与孔隙及晶界相关的物理现象。我们认为以下 3 种机制可以形成所观察到的波速滞后性:① 孔隙的不可逆压缩:在高压下被压塌的孔隙即使外压减小了也不可能恢复到原先的大小和形状;② 微裂纹的不可逆闭合:在升压过程中闭合的微裂隙两壁彼此粘结起来,即使后来外压降低了,也不再重新张开;③ 岩石中颗粒接触条件的改善:天然岩石的颗粒边界或裂纹往往遭受蚀变并在其中形成低强度的蚀变矿物如绢云母和绿泥石。在挤压过程中,这些蚀变矿物起到了韧性润滑作用,有效地改善颗粒间的接触条件,从而提高了波速。

3 分析和结论

在无孔隙无裂纹的致密岩石中,波速 V 和围压 P 呈线性关系:

$$V(P) = V_0 + DP \quad (1)$$

其中 V_0 为零围压时该致密岩石的波速, D 为波速的压力偏导。式(1)反映岩石中矿物晶格的弹性体应变随外加静水压力增加而线性增加。式(1)仅能对高围压下波速和压力的关系予以描述,因为受高围压作用岩石中几乎所有的裂纹和孔隙都已闭合。

然而,在低围压下岩石的波速受孔隙度,特别是裂纹的几何形态影响很大。有孔隙和裂纹的岩石的波速总是小于无孔隙和裂纹的岩石。现在,我们将某给定围压下,上述两种状态下波速之差定义为波速

降(B)。 B 是一个可以实测的物理量,在 $P=0$ 时, B 等于最大值 B_0 ,然后随着 P 的增加, B 逐渐减小,其衰减的速率和 B 值自身的大小成正比,这种关系可用下列数学式表示:

$$\frac{dB}{dP} = -kB \quad (2)$$

其中 k 是一正数,命名为波速衰减系数。由式(2)可以得出:

$$\ln \frac{B}{B_0} = -kP \quad (3)$$

或:

$$B = B_0 \exp(-kP) \quad (4)$$

自然界许多物理现象都具有负指数衰减的规律,例如:放射性衰减、温度冷却以及震动衰减等。 k 值是 B 随围压增加而衰减之速度快慢的标志。 k 值越大,则 B 值衰减得越快。或者说, k 值反映了岩石中裂纹长宽比(α)分布的情况。 $\alpha = a/b$, a 和 b 分别是裂纹长度和宽度。 α 大,则 k 值也大,反之亦然。当 $\alpha \rightarrow 1$,则 $k \rightarrow 0$,说明球状孔隙是非常难以闭合的。

当围压大于等于某一临界值 P_c , $B/B_0 \leq 0.2\%$,亦即孔隙和裂纹的效应变得可以忽略不计,这样 P_c 就可由下式算出:

$$P_c = \frac{\ln 0.002}{k} \approx -\frac{6.215}{k} \quad (5)$$

只要围压高于 P_c ,岩石就可看成是致密的固体,其波速随 P 增加呈线性增加。由式(5)可见,孔隙和裂纹的闭合压力 P_c 和衰减系数 k 成反比关系。因此, k 值是岩石中孔隙几何形状的统计度量。

另一有意义的特征值是半压力 $P_{1/2}$,即 $B = B_0/2$ 时的围压值:

$$\exp(-kP_{1/2}) = \frac{B}{B_0} = 0.5 \quad (6)$$

$$P_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \approx \frac{0.693}{k} \quad (7)$$

半压力的概念对应于放射性元素的半衰期。

岩石波速之所以随围压的增加而增加,不仅仅是由于围压导致了裂纹和孔隙闭合,而且也由于各造岩矿物晶格随围压提高而受到更大的压缩。所以,波速与围压的关系实际上是由等式(1)和(4)共同控制的。结合等式(1)和(4),我们获得:

$$V(P) = V_0 + DP - B_0 \exp(-kP) \quad (8)$$

式(8)的物理含义表示于图 5。 V_0 和 D 描述高压下($P > P_c$)波速与围压之间的线性关系。 B_0 和 k 是描述低压下($P < P_c$)波速-围压曲线形态的两个重要参数。 $V_0 - B_0$ 是零压力时岩石的波速。金振民等

(2004)发表的 CCSD 主孔 100~2000 m 段岩心试样在常压下测定的波速,实际上就对应于($V_0 - B_0$)值。仅从($V_0 - B_0$)值,无法导出式(8)内 4 个参数中的任何一个参数,因此常压下测定的数据不可能外延到地球深部。换句话说,只有同时确定式(8)中 V_0 、 D 、 B_0 和 k ,才算真正确定了岩石波速随围压或深度的定量关系。前人曾把式(8)作为经验公式使用(Eberhart-Phillips et al., 1989; Freund, 1992; Shapiro, 2003)。现在看来,该式完全可以从现存的理论直接推导而出,而且,式(8)中每个参数都具有明确的物理意义。

波速的压力偏导可从下式算出:

$$\frac{dV}{dP} = B + B_0 k \exp(-kP) \quad (9)$$

如图 6 所示,波速的压力偏导随围压的增加而迅速下降,指示岩石中长宽比较大的裂纹(如晶间裂纹、穿晶裂纹或扁长孔隙等)在围岩作用下迅速关闭。当压力高于 P_c 之后,波速的压力偏导逐渐变成一个常数 D 。

我们使用式(8)对所有实验测量的波速-压力曲线进行了回归分析,绝大多数试验结果与回归曲线的吻合度 $r^2 > 0.96$,表 2 列出了 36 块 CCSD 岩心钻样的 V_0 、 D 、 B_0 、 k 、 r^2 以及 P_c 和 $P_{1/2}$ 。由于降压时岩石处于更稳定的显微构造状态(Ji et al., 1993b; Wang et al., 2005a, 2005b),所以表 2 仅列出降压时波速-围压曲线的参数。使用式(8)的优越性很明显:① 今后在发表岩石地震物性的论文中不必一一列出每一压力下测量的波速,仅需发表 V_0 、 D 、 B_0 和 k 4 个参数即可,读者根据这些参数就可以自己计算出岩石波速随围压的变化,便于数据的外延和内插;② 便于对同类岩石的地震波性质进行统计分析或根据地震波性质对不同岩石进行系统分类;③ 有利于对不同试验室发表的数据进行对比研究。图 7 统计了 68 块(共 122 钻样)苏鲁超高压变质岩的地震波性质,其中也包括王勤博士论文(Wang et al., 2005a)中的数据以及我们对青岛仰口榴辉岩化辉长岩及长英质片麻岩的研究数据。如图 8 所示, V_0 和密度的关系可以表达为:

$$V_0 = 2.286\rho - 0.077 \quad (r^2 = 0.79) \quad (10)$$

榴辉岩的平均 V_0 值($\bar{V}_0 = 8.07$ km/s)明显高于该地区的其他岩石如蛇纹岩($\bar{V}_0 = 5.33$ km/s)、正副片麻岩($\bar{V}_0 = 6.15$ km/s)、大理岩($\bar{V}_0 = 6.73$ km/s)、变辉长岩($\bar{V}_0 = 6.95$ km/s)、角闪岩($\bar{V}_0 = 6.46$ km/s)、退变榴辉岩($\bar{V}_0 = 7.14$ km/s)、橄榄岩($\bar{V}_0 = 7.23$

表 2 在降压过程中测定的 CCSD 岩心试样的 P 波速度-压力曲线系数(λ 为传播方向)Table 2 Parameters of V_p - P curves measured during depressurization for CCSD core samples(λ is the propagation direction)

样品号	岩性	λ	ρ	V_0	D	B_0	k	r^2	P_c	$P_{1/2}$
			(g/cm ³)	(km/s)	($\times 10^{-4}$ km/s/MPa)	(km/s)	($\times 10^{-2}$ MPa ⁻¹)			
19-13-13	花岗片麻岩	Z	2.640	6.186	2.548	1.273	2.241	0.997	277	31
26-10-17	花岗片麻岩	Z	2.640	6.172	2.871	0.932	2.988	0.995	208	23
125-8-18	石英榴辉岩	Z	3.380	7.694	3.188	2.174	2.559	0.979	243	27
125-15-18	石英榴辉岩	Z	3.480	8.024	3.669	1.106	1.814	0.912	343	38
147-2-11	纯橄榄岩	Z	3.160	7.356	2.408	0.947	2.495	0.989	249	28
150-3-20	二辉橄榄岩	Z	3.120	7.070	2.152	1.455	1.528	0.996	407	45
151-14-16	石榴子石斜方辉橄岩	Z	3.210	7.670	2.580	1.150	1.487	0.923	418	47
160-12-11	石榴子石斜方辉橄岩	Z	3.170	7.229	2.441	2.049	3.137	0.972	198	22
166-42-43	角闪石纯橄岩	Z	3.250	6.835	2.114	0.932	2.139	0.966	291	32
703-29	石榴子石黑云母角闪石闪长片麻岩	Z	2.930	6.685	2.721	1.436	1.988	0.995	313	35
178-6-6	黑云母闪长片麻岩	Z	2.740	5.814	2.729	1.072	1.599	0.995	389	43
203-5-15	角闪岩	Z	3.070	5.746	3.088	1.479	1.732	0.988	359	40
210-15-21	花岗片麻岩	Z	2.630	6.157	1.902	0.597	2.029	0.993	306	34
219-1-2	花岗片麻岩	Z	2.630	6.290	2.528	1.586	2.171	0.996	286	32
315-1-11	多硅白云母榴辉岩	Z	3.430	7.952	1.637	1.220	1.682	0.988	369	41
315-4-11	细粒多硅白云母榴辉岩	Z	3.530	8.107	2.007	1.068	2.358	0.959	264	29
C397 PC 2a	退变多硅白云母石英榴辉岩	Z	3.390	7.879	2.455	0.964	2.870	0.997	217	24
C398 PC 5b	石英榴辉岩	Z	3.390	7.796	2.691	0.971	1.746	0.945	356	40
C399 PC c1	退变石英榴辉岩	Z	3.240	7.695	2.428	1.658	1.786	0.990	348	39
B1536R6P41e	角闪石多硅白云母榴辉岩	X	3.11	7.250	1.383	2.302	2.881	0.996	216	24
B1536R6P41e	角闪石多硅白云母榴辉岩	Z	3.01	6.924	2.053	2.003	2.820	0.998	220	25
B1578R14P18t	二云二长正片麻岩	X	2.65	6.452	1.855	3.373	2.214	0.996	281	31
B1578R14P18t	二云二长正片麻岩	Z	2.65	5.944	1.527	1.885	2.286	0.996	272	30
B1608R27P12e	石榴子石黑云母斜长石角闪岩	X	3.01	7.259	1.676	1.132	1.798	0.923	346	39
B1608R27P12e	石榴子石黑云母斜长石角闪岩	Z	2.95	6.670	2.108	0.879	1.620	0.999	384	43
B1628R33P24	角闪石磁铁矿长英质正片麻岩	Y	2.65	6.375	2.329	2.394	2.654	0.999	234	26
B1628R33P24	角闪石磁铁矿长英质正片麻岩	Z	2.65	6.381	1.516	1.057	1.553	0.995	400	45
B1651R37P41c	角闪岩	Z	3.00	6.592	1.708	0.691	2.483	0.981	250	28
B1694R49P7s	长英质正片麻岩	Z	2.63	6.394	1.710	1.500	0.739	0.871	841	94
B2068R61P20h	黑云母斜长石角闪岩	Z	2.85	6.244	1.313	0.890	2.843	0.998	219	24
B2078R63P9r	长英质正片麻岩	Z	2.63	6.315	1.932	3.449	3.012	0.997	206	23
B2168R85P2a	黑云母角闪石二长副片麻岩	Z	2.65	6.129	1.870	2.171	2.522	0.978	246	27
B2184R88P4s	黑云母角闪石二长副片麻岩	X	2.66	5.954	1.739	2.203	2.149	0.997	289	32
B2184R88P4s	黑云母角闪石二长副片麻岩	Z	2.66	6.170	1.264	1.782	1.088	0.951	571	64
B2242R100P16a	角闪石黑云母二长副片麻岩	X	2.66	6.357	1.970	1.545	1.592	0.998	390	44
B2339R122P1f	角闪石二长副片麻岩	Z	2.65	6.193	1.779	0.902	1.173	0.951	530	59

表 3 苏鲁超高压变质岩地震波性质的统计结果

Table 3 Statistical results of P-wave properties for Sulu UHP metamorphic rocks

岩性	样品数	ρ	V_0	D	B_0	k	P_c	$P_{1/2}$
		(g/cm ³)	(km/s)	($\times 10^{-4}$ km/s/MPa)	(km/s)	($\times 10^{-2}$ MPa ⁻¹)	(MPa)	(MPa)
角闪岩	14	2.99	6.460	3.021	0.885	1.556	444	50
榴辉岩	42	3.50	8.074	2.276	0.932	1.270	529	59
大理岩	6	2.86	6.731	2.400	1.048	1.685	422	47
变辉长岩	11	3.02	6.949	2.417	0.723	2.453	282	32
正副片麻岩	26	2.66	6.154	2.303	1.419	1.771	401	49
橄榄岩	5	3.18	7.232	2.339	1.307	2.157	313	35
退变榴辉岩	13	3.35	7.143	2.871	1.330	1.512	504	56
蛇纹岩	5	2.58	5.328	3.089	0.475	1.556	466	52
总计	122	3.12	7.066	2.485	1.056	1.611	450	50

km/s)。蛇纹石化的橄榄岩与退变榴辉岩具有相似的值, 变辉长岩与角闪岩也具有类似的情况, 所以仅根据地震波速资料不可能将它们区别开来。

V_0 是岩石的内在性质, 与其化学成分具一定的相关性(图 9)。榴辉岩比退变榴辉岩、变辉长岩和角闪岩略显 SiO_2 亏损, 但其 V_0 却相差很大。在与俯冲相关的变质过程中, 角闪岩和变辉长岩先部分转变, 然后彻底转变成榴辉岩, 虽然在此过程中, 主量元素成分变化不大, 但波速和密度却有了大幅增加。相反, 在折返过程中, 榴辉岩会逐步退变成角闪岩, 从而造成 V_p 和 ρ 的减小。榴辉岩中那些在折返过程中由于流体渗透所形成的退变带将构成地震波的低速带, 在退变带与两侧榴辉岩接触边界上将造成地震波的反射。

蛇纹岩是橄榄岩蚀变的产物, 两者具相似的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量, 但完全不同的 V_0 值(图 9)。从长英质正副片麻岩到角闪岩和变辉长岩, 再到退变榴辉岩, 最后到榴辉岩, V_0 随 Al_2O_3 、 MgO 和 CaO 含量的增加而增加(图 9b、c、d), 但随 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量的增加而减小(图 9f)。

波速的压力偏导(D)是将试验室数据和地球内部岩石地震波资料联系起来的一个重要参数。据 D 值, 苏鲁超高压变质岩可分为两类(图 8b, 表 3): 角闪岩、退变榴辉岩和蛇纹岩作为退变产物, 具有较高的 D 值($2.9 \times 10^{-4} \sim 3.1 \times 10^{-4}$ km/s/MPa), 而正副片麻岩、大理岩、榴辉岩化的变辉长岩、榴辉岩和橄榄岩具较低的 D 值($2.3 \times 10^{-4} \sim 2.4 \times 10^{-4}$ km/s/MPa)。波速的压力偏导似乎和岩石化学成分没有直接的关系, 而更多地取决于岩石中退变矿物如蛇纹石、角闪石和云母的含量。 D 随退变矿物的含量增加而增加。

Kern 等(1999, 2002)测量了部分大别—苏鲁超高压变质岩的地震波速, 其结果总结于图 10。与我们的数据相比, 对于同一类型岩石来说, 他们的 V_0 值偏小, 而 D 值很偏大, 近乎是我们 D 值的两倍, 其原因如下: ① 在 Kern 的实验装置内围压是靠 6 个正棱台状活塞施加到无隔套的立方体岩石试样上的, 因此很难获得完全的静水压力状态。只要存在差应力, 哪怕就一点点, 其测量的 V_0 和 D 值必然偏小; ② 利用 Kern 的实验装置, 最大围压是 600 MPa。对于一些高强度岩石来说, 400~600 MPa 的围压并不足以关闭其中的孔隙和裂纹。所以, 使用 Kern 等(1999, 2002)的试验结果外延到地壳深处和上地幔不可避免地要高估地震波的速度。

B_0 是裂纹所致的波速降(图 8c)。苏鲁超高压变质岩的平均 B_0 为 1.1 km/s, 最小值为 0.5 km/s, 出现在蛇纹岩中; 最大值为 1.3~1.4 km/s, 出现在橄榄岩、退变榴辉岩和长英质片麻岩中。变辉长岩、角闪岩和榴辉岩、大理岩的平均 B_0 分别为 0.7、0.9 和 1.0 km/s。 B_0 是岩石中裂纹密度和几何形态的指示参数, 然而其定量关系目前尚未清楚, 今后有必要对此进行更进一步的研究。

波速衰减系数 k 控制波速-围压曲线非线性段的形状。苏鲁超高压变质岩 k 值的变化范围介于 1.3×10^{-2} MPa $^{-1}$ (榴辉岩)和 2.5×10^{-2} MPa $^{-1}$ (变辉长岩)之间, 平均值为 1.6×10^{-2} MPa $^{-1}$, 说明孔隙和裂纹在变辉长岩(青岛仰口)中最易关闭, 而在榴辉岩中最难闭合。退变榴辉岩、大理岩、正副片麻岩和橄榄岩的平均 k 值分别是 1.5×10^{-2} 、 1.7×10^{-2} 、 1.8×10^{-2} 和 2.2×10^{-2} MPa $^{-1}$ 。表 3 中还列出所有岩心试样的 P_c 和 $P_{1/2}$ 值。苏鲁超高压变质岩的平均 $P_{1/2}$ 仅为 50 MPa。对于同一试样, $P_{1/2}$ 比 P_c 要低得多, 说明长宽比大的裂纹比起长宽比小的孔隙对波速具有更大的影响, 但前者在压力作用下更容易关闭(Ji et al., 2006)。

致谢: 加拿大自然科学与工程委员会(NSERC)、中国自然科学基金委员会国家杰出青年基金(B类)和中国科学院杰出海外学者基金提供资助, 中国大陆科学钻探工程项目提供岩心标本。

参 考 文 献

- Birch F. 1960. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobar, Part 1. *Journal of Geophysical Research*, 65: 1083~1102.
- Eberhart-Phillips D, Han D H, Zoback M D. 1989. Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone. *Geophysics*, 54: 82~89.
- Freund D. 1992. Ultrasonic compressional and shear velocities in dry clastic rocks as a function of porosity, clay content, and confining pressure. *Geophysical Journal International*, 108: 125~135.
- Guyot R A, Johnson P A. 1999. Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials. *Physics Today*, April: 30~36.
- Ji S C, Salisbury M H, Hanmer S. 1993a. Petrofabric, P-wave anisotropy and seismic reflectivity of high-grade tectonites. *Tectonophysics*, 222: 195~226.
- Ji S C, Salisbury M H. 1993b. Shear-wave velocities, anisotropy and splitting in the high grade mylonites. *Tectonophysics*, 221: 453~473.
- Ji S C, Wang Q, Xia B. 2002. *Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks and Ores*. Polytechnic International Press, Montreal, 1~630.
- Ji S C, Gu Q, Xia B. 2006. Porosity dependence of mechanical

- properties of solid materials. *Journal of Material Science*, 41: 1757~1768.
- Jin Z M, Ou X G, Xu H J, Kern H, Jin S Y, Hou G J. 2004. Elastic wave velocities of the 2000 m depth at Chinese Continental Scientific Drilling: Constraints on deep seismic reflection. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 81~96.
- Kern H, Gao S, Jin Z, Popp T, Jin S. 1999. Petrophysical studies on rocks from the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, central China: implications for the composition and delamination of the lower crust. *Tectonophysics*, 301: 191~215.
- Kern H, Jin Z M, Gao S, Popp T, Xu Z Q. 2002. 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. *Tectonophysics*, 354: 315~330.
- Shapiro S A. 2003. Elastic piezosensitivity of porous and fractured rocks. *Geophysics*, 68: 482~486.
- Wang Q, Ji S C, Salisbury M H, Pan M B, Xia B, Xu Z Q. 2005a. 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. *Tectonophysics*, 398: 67~99.
- Wang Q, Ji S C, Salisbury M H, Xia B, Pan M B, Xu Z Q. 2005b. Shear wave properties and Poisson's ratios of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt: Implications for the crustal composition. *Journal of Geophysical Research*, 110: B08208, doi:10.1029/2004JB003435, 28pp.

Pressure-Dependence of P-Wave Velocities in Sulu UHP Metamorphic Rocks

JI Shaocheng^{1,2)}, WANG Qian¹⁾, Denis MARCOTTE¹⁾, XU Zhiqin³⁾, XIA Bin²⁾,
Jacques MARTIGNOLE¹⁾, Matthew SALISBURY⁴⁾

1) *Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, école Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada;* 2) *Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China;* 3) *Laboratory of Continental Geodynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China;* 4) *Geological Survey of Canada-Atlantic, Bedford Institute of Oceanography, P.O. Box 1006, Dartmouth, Nova Scotia, B2Y 4A2, Canada*

Abstract

We have experimentally determined the P-wave velocities of 68 typical UHP metamorphic rock samples among which 31 were collected from the CCSD (Chinese Continental Scientific Drilling) main hole and 37 from the surface outcrops in the Sulu orogenic belt (China) at ambient temperature and hydrostatic confining pressures up to 800 MPa. The velocity-pressure curves can be well described by a simple expression: $V(P) = V_0 + DP - B_0 \exp(-kP)$, where V_0 is the projected velocity at zero pressure if both porosity and cracks were absent; D is the intrinsic pressure derivative of velocity in the linear elastic regime; B_0 is the initial velocity drop caused by the presence of pores and cracks at zero pressure; and k is the decay constant of the velocity drop, which controls the shape of the velocity-pressure curves in the nonlinear poro-elastic regime. The above equation was used by previous workers as an empirical formula to describe the relationship between seismic velocity and confining pressure. Here we show that the equation can be directly derived on a rather general theoretical basis. The derivation has provided a clarification for the physical meaning of each parameter in the equation. It is suggested that henceforth the seismic velocities of rocks should be published in terms of these four parameters rather than using tedious tables to list each velocity at each pressure for each sample as done before. The statistical properties of P-wave velocities in the Sulu UHP rocks provide a complete set of basic information for the interpretation of field seismic data from the root zones of continental convergent orogenic belts and modern and ancient subduction zones.

Key words: seismic properties of rocks; UHP metamorphic rocks; Sulu orogenic belt; Chinese Continental Scientific Drilling