

中国大陆科学钻探主孔 100 ~ 2000m 岩石弹性波速度：对地震深反射的约束*

金振民¹ 欧新功² 徐海军³ H. Kern⁴ 金淑燕¹ 侯光久¹

JIN ZhenMin¹, OU XinGong², XU HaiJun³, H. Kern⁴, JIN ShuYan¹ and HOU GuangJiu¹

1. 中国地质大学, 武汉 430074

2. 中国科学院地球化学研究所, 广州 510640

3. 中国地质大学研究生院, 武汉 430074

1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. Graduate School of China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Kiel University, Kiel 24098, Germany

2003-08-20 收稿, 2003-11-30 改回.

Jin ZM, Ou XG, Xu HJ, Kern H, Jin SY and Hou GJ. 2004. Elastic wave velocities of the 2000m depth at Chinese Continental Scientific Drilling: Constraints on deep seismic reflection. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1) 81 – 96

Abstract The elastic wave velocities of 700 samples from main hole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) have been performed in the conditions of room temperature and pressure. The continuous section of seismic velocities (V_p and V_s) from 100m to 2000m was constructed, which provides an important petrophysical data for interpretation of geophysical model. Fresh eclogite yields the biggest compressional wave velocity (7.86km/s), and gneiss has smaller velocity (5.53 ~ 5.71km/s). Seismic velocity of eclogite significantly decreases with increase of retrogressive metamorphism. Overall average V_p velocity of main hole of 2000m rock is 6.2km/s which is correspondent to conclusion with high velocity zone (6.2 ~ 6.3km/s) of the upper crust in Dabie-Sulu orogenic belt inferred from geophysical methods. Most rocks at the main hole have pronounced seismic anisotropy. The velocity of V_p and V_s with water-saturated rock increases by a factor of 19% and 10%, respectively. Conversely, anisotropy of V_p and V_s with water-saturated rock reduces 3% ~ 4%. Reflective coefficient (R_c) of different lithological boundaries is main factor producing seismic reflection. The lithological boundary between rutile-bearing eclogite and gneiss has the biggest reflective coefficient (0.24 ~ 0.31). Anisotropy and reflective strength is enhanced by mylonitic gneiss and foliated eclogite in ductile shear zone. Anisotropy and shear wave splitting of gneiss and eclogite are caused by the foliation of rocks, as confirmed by laboratory measurements under simulated in situ condition at high pressure and high temperature. Micro-cracks of rocks is closely related to in situ velocity variation. Velocities (V_p and V_s) water-saturated rocks may represent in situ seismic velocity at main hole of the CCSD. The measurements of elastic wave velocities give an important constraints on the genesis of seismic reflector for this area.

Key words Ultrahigh-pressure rock, Elastic wave velocity, Anisotropy, Seismic reflector, CCSD, Donghai

摘要 在常温常压条件对中国大陆科学钻 CCSD 主孔岩心的 700 样品进行了弹性波速度测量, 并建立了主孔 2000m 的波速 (V_p 和 V_s) 连续剖面, 为检验地球物理模型的合理解释提供了岩石物理学方面的宝贵资料。主孔中新鲜榴辉岩纵波速度 (V_p) 最大 (7.86km/s), 正副片麻岩波速最小, 又分别为 5.53km/s 和 5.71km/s, 榴辉岩的波速随着退变质作用的增强而明显减小。主孔 2000m 总平均 V_p 速度为 6.2km/s, 它与地球物理探测方法获得的大别-苏鲁造山带上地壳具有 6.2 ~ 6.3km/s

* 本文为国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716500)和国家重大科学工程项目“中国大陆科学钻探工程”的联合资助成果。

第一作者简介: 金振民, 男, 1941 年生, 教授, 主要从事岩石流变学、岩石物理学和高温高压实验研究, E-mail: zmjin@cug.edu.cn

高速层结论是一致的。大部分岩石具有明显地震波各向异性。水饱和度使岩石纵波(V_p)速度和剪切波速度(V_s)分别增加19%和6%,而使 V_p 的各向异性降低3%~4%。不同岩性界面的反射系数(R_C)是产生地震反射的主要原因。金红石榴辉岩与片麻岩之间具有很高的反射系数(0.24~0.31)。韧性剪切带中糜棱岩化片麻岩和面理化榴辉岩使岩石各向异性和反射强度明显增加。岩石微裂隙与主孔原位波速变化有密切关系。饱水岩石速度(V_p 和 V_s)可以代表CCSD主孔原位状态的地震波速度。上述成果为本区地震反射体成因提供了重要的岩石物理性质约束。

关键词 超高压岩石;弹性波速度;各向异性;地震反射体;中国大陆科学钻探;东海

中图法分类号 P315.31

1 引言

中国大陆科学钻探工程是旨在利用现代深部钻探技术和地球物理遥测方法,在具有全球地学意义的苏鲁超高压变质带——东海县毛北村实施井深为5000m的中国第一口科学钻探,这口科学深钻的施工,对解决地学界所关注的大陆碰撞造山带超高压岩石折返动力学机制和检验深部地球物理探测成果具有重要科学意义(许志琴,1995;Xu *et al.*, 1998)。钻孔岩心的岩石物理性质研究是大陆科学钻工程的重要组成部分(杨晓松等,1998)。岩石物理学是岩石学和物理学之间的交叉边缘学科,它是通过专门实验手段研究地壳和地幔岩石在地球不同深度环境下(即不同温度、压力、流体含量等)的物理性质(如:弹性波速度、密度、孔隙度、渗透率、热导率、电磁性等)及与成分、结构构造变化关系(Schön, 1996),从物理学角度阐明地球深部物质动力学过程,为深部地球物理探测成果的合理解释提供岩石物性的约束。尤其是近十几年来深部地球物理探测(如地震反射、折射和大地电磁测量等)为认识地球深部物质赋存状态及深部构造动力学过程开辟了新途径。然而,由于地球深部物质存在状态及其环境变化的复杂性,使现今地球物理成果的推断具有不确定性。因此迫切需要一个纽带将地球物理成果与实验岩石物理研究结合起来,以检验和完善地球物理推断的地质-岩石学模型,提高人们对地表地球物理成果合理解释的能力。因此大陆科学钻探工程、实验岩石物理学和地球物理学相结合,为标定地球物理参数和建立比较完善地球物理模型提供一条有效途径。

前苏联科拉半岛SG-3和德国KTB深钻为大陆科学钻探岩石物理性质研究提供了一些借鉴和经验(Emmeimman *et al.*, 1997; Berckhemer *et al.*, 1997; Kazansky *et al.*, 1997; Hugenges *et al.*, 1997)。然而有关超高压变质岩地区深部岩石物性系统研究的成果报导还很少。国外一些学者曾经对幔源包体和变质地体榴辉岩的纵波速度进行了实验研究(Kumazawa *et al.*, 1971; Rao *et al.*, 1974; Maghgnani *et al.*, 1974; Babuska *et al.*, 1978)。Fountain *et al.*(1994)在压力0.6GPa条件下测定了挪威Bergen Arc地区榴辉岩的纵波速度,认为榴辉岩可能是该区下地壳深地震反射的载体。Kern *et al.*(1999, 2002)分别对大别山和苏鲁地表出露超高压岩石的纵波和剪切波速度,密度及各向异性进行了研究。高

山等(1977, 2001)和赵志丹等(2001)对大别山榴辉岩弹性波速度和泊松比进行了初步研究,并探讨了大别山下地壳物质组成,莫霍性质和壳-幔物质交换作用。余钦范等(2002)对CCSD钻孔周围地表岩石物性进行了实验研究。本文研究的主要目的是(1)第一次展示CCSD钻孔100~2000m岩心纵波(V_p)和剪切波(V_s)速度的系统资料;(2)探讨了岩石弹性波速度和各向异性对地震深反射的约束作用;(3)分析了地震波各向异性的可能影响因素。

2 地质背景和地球物理探测概况

苏鲁地体是大别-苏鲁超高压变质带的东延部分,地体位于NNE向郯庐断裂以东,北部边界为烟台-五莲断裂与中朝克拉通相邻,南部边界为嘉山-响水断裂与扬子克拉通相邻。据Zhang等(1995)研究,可进一步划分为北部超高压变质带(UHP带)和南部高压变质带(HP带)。东海地区位于苏鲁超高压变质带的西南部位。区内出露主要岩石为花岗岩片麻岩,表壳岩系(包括黑云斜长片麻岩,黑云二长片麻岩,角闪斜长片麻岩以及片岩类岩石),第四纪更新世碧玄岩、白垩纪盆地沉积和未变质花岗岩(刘福来等,2003)。东海地区主要构造特征以5条复杂韧性剪切带,将超高压变质岩块划分为5个岩片区。韧性剪切带走向大体为NE,倾向SE。区内广泛出露形态不一的榴辉岩、橄榄岩和斜长角闪岩团块和透镜体,其中以毛北,青龙山超高压榴辉岩体和芝麻坊和许沟超基性岩体最为著名。CCSD钻孔位于韧性剪节带C岩片区的毛北榴辉岩体。本区榴辉岩和片麻岩中已发现有柯石英,最近在毛北榴辉岩中发现了金刚石(徐树桐,2003)。有关东海地区构造和岩石单元划分详见许志琴等(2004)文章(本专辑)。

1996~2002年期间围绕大陆科学钻工程选址和施工需要,在苏鲁地区进行深地震反射、重磁、三维地震,井中VSP和大地电磁等综合地球物理探测工作,获得丰富深部地球物理资料,并建立了本区精细地球物理模型。例如DH₂线和DH₄线交叉的二维地震反射调查表明,在以CCSD钻孔为中心的周围地区上部地壳充满倾斜地震强反射体和上拱反射弧,它们可能与一系列高速榴辉岩、韧性剪带和破碎带有密切关系(杨文采等,1999, 2002)。上述地球物理探测成果为岩石物性的研究提供十分宝贵的对比资料。

3 样品采集和测试方法

3.1 样品采集和岩石类型

本次研究样品取自 CCSD 主孔 100 ~ 2000m 区间的岩心。每间隔 5 米取一块岩心,共取得两个方向的岩心样共计 700 块,分别用于地震波速度、密度、热导率、孔隙率等 7 种岩石物理性质参数的测定。对 21 块具有代表性样品进行岩石学、矿物学、地球化学和变形矿物组构和显微构造研究。部分样品取自东海地表出露超高压岩石和 CCSD 主孔附近原江苏第六地质队施工的一部分钻孔岩心(ZK1001, ZK2304, ZK7101) 该钻孔样品由许志琴等采集)以供对比研究之用。主孔岩心的样品数量和相应岩石类型分布特征见表 1。就整体而言,CCSD 主孔 2000m 范围不同类型超高压榴辉岩累计

厚度超过 1000 米,其余以片麻岩类为主(累积厚度为 900 米左右)和超基性橄榄岩(80 ~ 90 米)。此外,含有少量兰晶石石英岩、硬玉石英岩和石英片岩等。

本区榴辉岩种类多,结构构造复杂。按矿物成分和构造特征划分有:新鲜块状金红石榴辉岩、新鲜面理化(条带状)多硅白云母榴辉岩、角闪石化榴辉岩(即退变质榴辉岩,角闪石矿物含量达 30% ~ 40%), 强退变质榴辉岩(角闪石含量达 70% 以上,即石榴石角闪岩),。后两者榴辉岩具有明显面理和条带状构造。正片麻岩类主要包括含榴二长片麻岩,花岗岩片麻岩和黑云二长片麻岩。副片麻岩类包括绿帘黑云斜长片麻岩,含榴斜长片麻岩和黑云角闪斜长片麻岩等。石榴石橄榄岩中橄榄岩大部分都蚀变为蛇纹石,石榴石常见有蚀变反应边(Kelyphytite rim)。本次研究代表性岩石类型和矿物组成见表 2。

表 1 岩石物理性质测试样品的岩石类型分布情况表

Table 1 Rock types for the measured samples of petrophysical properties

岩石类型	含金红石榴辉岩	白云母榴辉岩	角闪石化榴辉岩	强退变质榴辉岩	蛇纹岩化石榴石橄榄岩	正片麻岩	副片麻岩
岩石代号	RuEc	PhEc	AmEc	ReEc	GtPe	OrGn	PaGn
样品数量	23	40	30	88	14	67	90
岩石厚度(m)	115	200	150	440	70	335	450
岩石类型比例(%)	6.5	11.4	8.5	25	4.0	19.0	25.6

注:正副片麻岩中包括多层韧性剪切带、糜棱岩化片麻岩和面理化榴辉岩夹层。

表 2 本次研究的 CCSD 主孔部分的岩性和矿物组成

Table 2 Lithology and mineral composition of core samples from CCSD main hole

样品深度(m)	岩石名称	矿物组成(%)
096	620.70 蛇纹石化石榴橄榄岩	Ser 65, Ol 25, Grt 7, Py 3
103	655.78 蛇纹石化石榴橄榄岩	Ser 60, Ol 35, Grt 5
105	663.90 蛇纹石化石榴橄榄岩	Ser 55, Ol 35, Grt 8, Py 2
110	687.90 含金红石多硅白云母榴辉岩	Grt 24, Omp 48, Ph 18, Qtz 5, Ru 3, Mt 2
111	695.12 含多硅白云母金红石石英榴辉岩	Grt 40, Omp 33, Qtz 15, Ru 5, Ph 2, Bi 2, Hb 1, Ap 1, Mt 1
112	697.37 含黄铁矿金红石多硅白云母榴辉岩	Grt 50, Omp 20, Qtz 10, Ru 5, Ph 7, Bi 3, Hb 1, Ap 1, Mt 3
116	714.45 角闪石化含黄铁矿多硅白云母金红石石英榴辉岩	Grt 57, Omp 20, Qtz 13, Ru 4, Ph 2, Bi 1, Hb 2, Ap 1, Mt 3
176	975.94 多硅白云母金红石榴辉岩	Grt 45, Omp 10, Qtz 25, Ph 18, Rut 2
123	743.00 绿帘黑云角闪岩(强退变质榴辉岩)	Hb 58, Qtz 20, Bi 10, Ep 5, Pl 5, Ap 1, Mt 1
162	922.16 角闪石化退变质榴辉岩	Grt 10, Omp 12, Hb 40, Qtz 20, Pl 5, Bi 5, Ap 2, Ep 1, Mt 5
202	1095.40 强退变质榴辉岩(糜棱岩化)含石英斜长黑云绿帘角闪岩	Hb 25, Pl 25, Bi 20, Qtz 18, Ep 10, Ap 1, Sp 1
184	1014.80 含石榴石二云斜长片麻岩	Pl 40, Qtz 35, Ph 15, Bi 5, Grt 2, Sp 1, Mt 2
193	1053.50 含石榴石绿泥多硅白云母斜长片麻岩	Pl 40, Qtz 40, Ph 10, Bi 1, Hb 1, Grt 2, Kf 4, Mt 2
195	1061.85 长英质片麻岩	Pl 40, Qtz 40, Ph 8, Kf 9, Mt 3
220	1178.87 含石榴石长英质片麻岩	Pl 35, Qtz 35, Ph 7, Kf 22, Mt 1
141	834.10 绿帘黑云角闪斜长片麻岩	Pl 42, Qtz 30, Bi 10, Ep 5, Hb 3, Kf 7, Ap 1, Sp 1, Mt 1
149	878.50 石榴绿帘角闪黑云斜长片麻岩	Pl 40, Qtz 34, Bi 10, Ep 5, Hb 5, Grt 5, Ap 1
203	1099.19 绿帘黑云斜长片麻岩	Pl 35, Qtz 30, Bi 15, Ep 15, Hb 3, Sp 2
221	1184.90 黑云二长片麻岩	Pl 40, Qtz 25, Bi 10, Ep 5, Kf 20
146	863.56 (糜棱岩化)绿帘角闪黑云斜长片麻岩	Pl 40, Qtz 30, Bi 15, Ep 5, Hb 10
214	1148.68 绿帘黑云斜长片麻岩	Pl 45, Qtz 40, Bi 10, Ep 5

注:Ol 橄榄石, Grt 石榴石, Py 辉石, Ser 蛇纹石, Omp 绿辉石, Ph 多硅白云母, Ru 金红石, Mt 磁铁矿, Qtz 石英, Bi 黑云母, Hb 角闪石, Ap 磷灰石, Pl 斜长石, Ep 绿帘石, Kf 钾长石。

3.2 样品制备和测试方法

本次样品弹性波速度测定以常温常压测试方法为主, 高温高压测试方法为辅。

常温常压测定弹性波速度样品的制备和测量原理简述如下:

CCSD 主孔岩心原始直径 90~95mm, 每 5m 采集一块直径(Φ)为 90~95mm, 长度(L)为 70~80mm 圆柱体岩心。在现场实验室制成规格为 $\Phi 25\text{mm} \times L 20 \sim 50\text{mm}$ 的小圆柱体, 小圆柱体样品钻取方向一般是平行和垂直钻孔岩心的原始方向。当岩石变形面理比较发育时, 则分别沿平行面理和垂直面理方向分别钻取两个样品, 样品端面经磨平和高度抛光之后供测试使用。本次测试仪器采用中国科学技术大学施行觉教授科研小组研制的透射法超声波速度测量仪。该仪器具有系统稳定, 数据可靠, 全波列数字自动记录特点。采样频率为 40MHz; 采集间距时间为 0.025 μs ; 脉冲仪最大输出电压可达 150V; 换能器(500K-1MHz)的波形振幅好, 频带宽, 有利于衰减 Q 值的计算。波速测量精度高, 绝对误差 $dV = 20\text{m/s}$, 相对误差 $dV = 0.5\%$ 。常温常压测试条件又分为自然干燥条件和饱水条件, 后者是指样品在测量之前在水

中浸泡 72 小时。在上述两种条件下对全部样品进行弹性波速度测量, 分别获得干燥岩石 V_p , V_s 及各向异性和饱水状态 (Water-Saturated) $W - V_p$, $W - V_s$ 及其各向异性。

高温高压样品测试工作是在德国基尔(Kiel)大学实验室完成的(Kern *et al.*, 2002)。实验仪器及测量程序详见 Kern 有关文章(Kern *et al.*, 1999)。样品严格按野外手标本尺度进行构造定向, 规定 X 为平行面理和线理方向, Y 为垂直线理方向, Z 为垂直面理方向, 制成 43mm 立方体。测量温度为 200 $^{\circ}\text{C}$ ~600 $^{\circ}\text{C}$, 围压为 0.1~600MPa。该装置最大优点是同时可以测定三方向上 V_p 值和六方向 V_s 值。温度误差小于 5 $^{\circ}\text{C}$, 时间测量精度为 5ns, 误差小于 $\pm 5\%$ 。

4 主孔(100~2000m)不同岩石类型的弹性波速度

4.1 主孔不同岩石类型分布

根据岩石矿物组成、结构构造特征和岩石物理性质测试需要, 把主孔 2000m 岩心的主要岩石类型组合划分为 4 大区段(表 3)和 7 种岩石类型(表 4 和岩性柱状图 1-a)。

表 3 CCSD 主孔 2000 米不同条件下不同深度地震波(V_p , V_s)分布特征

Table 3 Seismic velocity (V_p , V_s) of different condition and of different depth from 2000m core samples of CCSD main hole

测试条件		深度范围	分段统计				主孔 2000 米		
			100~600m	600~1200m	1200~1600m	1600~2000m	最大值	最小值	平均值
自然干燥条件	水平	纵波	5.99	5.70	4.49	5.20	8.21	3.08	5.49
		横波	3.71	3.22	2.60	3.13	5.75	1.89	3.23
	垂向	纵波	6.08	5.02	3.81	5.29	8.25	2.34	5.16
		横波	3.90	3.08	2.54	3.15	5.98	1.98	3.22
	平均	纵波	6.03	5.36	4.15	5.25	8.23	2.71	5.33
		横波	3.81	3.15	2.57	3.14	5.86	1.94	3.23
饱水条件	水平	纵波	6.69	6.41	5.63	6.21	8.39	4.91	6.32
		横波	3.71	3.48	2.99	3.37	4.74	2.50	3.44
	垂向	纵波	6.61	5.95	5.36	6.21	8.32	4.48	6.08
		横波	3.69	3.24	2.88	3.38	4.64	2.22	3.33
	平均	纵波	6.65	6.18	5.50	6.21	8.35	4.69	6.20
		横波	3.70	3.36	2.94	3.37	4.69	2.36	3.38

表 4 饱水条件下不同岩石类型地震波 V_p 和泊松比分布特征

Table 4 Seismic velocity and poisson ratio of different rock types at water-saturated condition

岩石分类	V_p 分布范围	平均值	泊松比	样品数
RuEc 含黄铁矿金红石榴辉岩类	8.35~7.50	7.86 \pm 0.27	0.29	44
PhEc 多硅白云母榴辉岩类	7.67~6.83	7.19 \pm 0.23	0.28	76
AmEc 角闪石化榴辉岩(退变榴辉岩)	7.10~6.02	6.63 \pm 0.34	0.29	56
ReEc 强退变榴辉岩(角闪岩)类	6.75~5.14	6.20 \pm 0.34	0.28	174
GrPe 蛇纹石化石榴石橄榄岩类	6.66~5.96	6.21 \pm 0.21	0.33	28
OrGn 长英质片麻岩类	6.16~4.96	5.53 \pm 0.26	0.29	128
PaGn 黑云斜长片麻岩类	6.85~5.00	5.71 \pm 0.30	0.28	176
总计(平均)	8.35~4.96	6.20 \pm 0.73	-	682

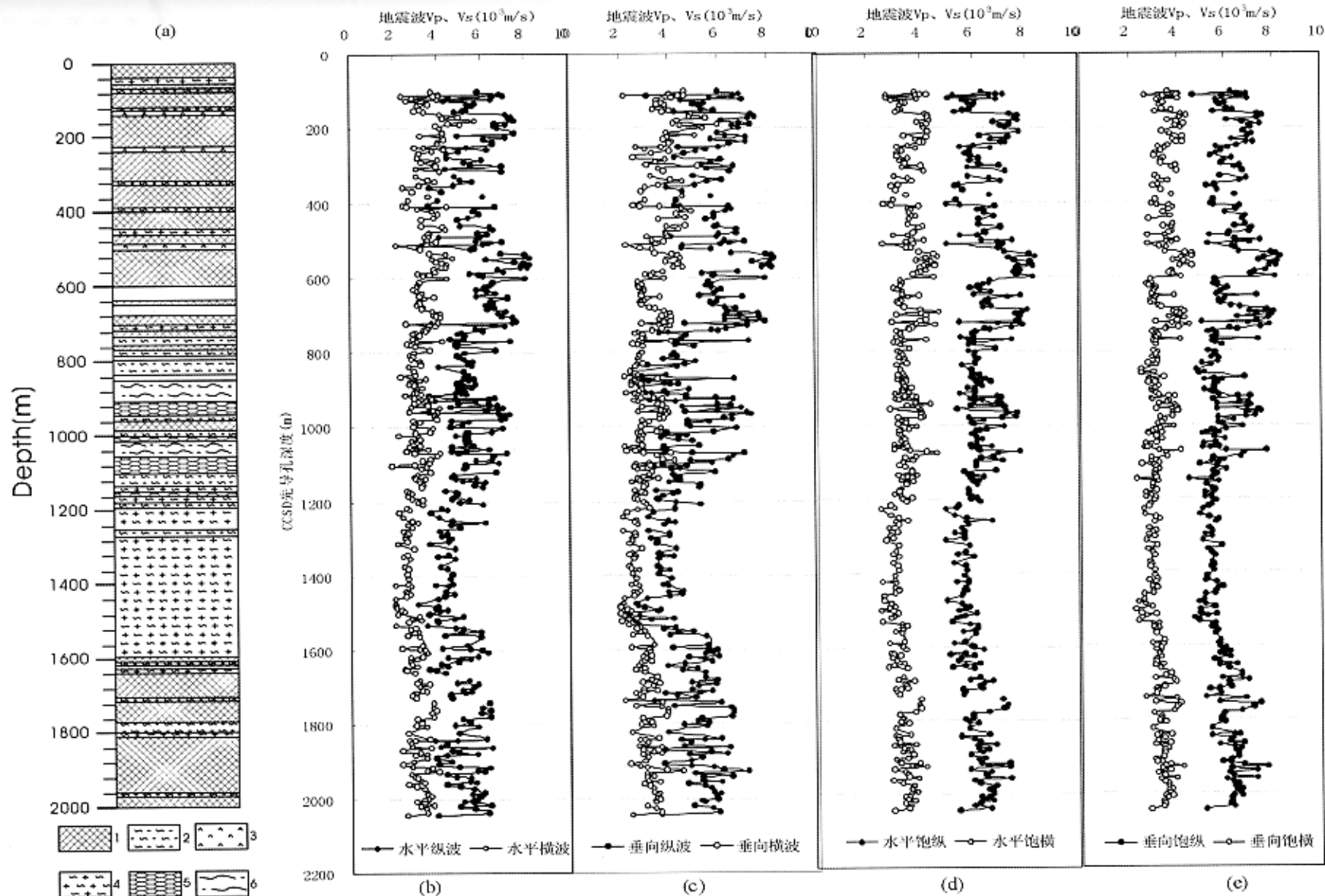


图 1 CCSD主孔(1002000m)主孔地震波速度与岩性对应关系图

0~2000m 岩性柱状图 1. 榴辉岩; 2. 黑云斜长片麻岩; 3. 强退变质榴辉岩; 4. 长英质片麻岩; 5. 面理化榴辉岩; 6. 糜棱岩化片麻岩

Fig.1 The relationship of seismic wave velocity to lithology from 1002000m cores of CCSD main hole

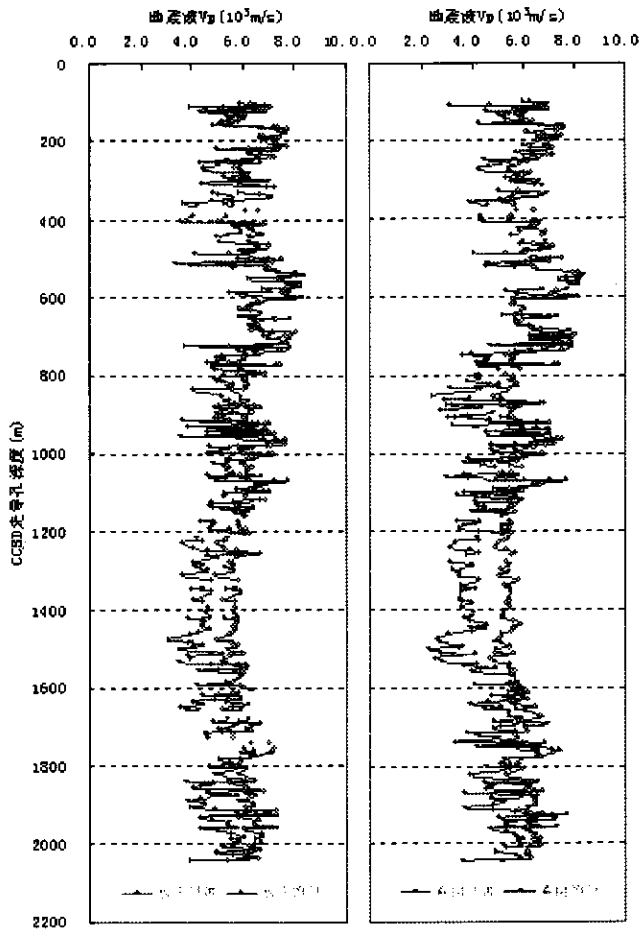


图2 CCSD 主孔 2000 米地震纵波速度在饱水前后随深度变化剖面图

Fig.2 Variation section of seismic wave velocity with the depth from 100 ~ 2000m cores of CCSD main hole at dry and water-saturated conditions

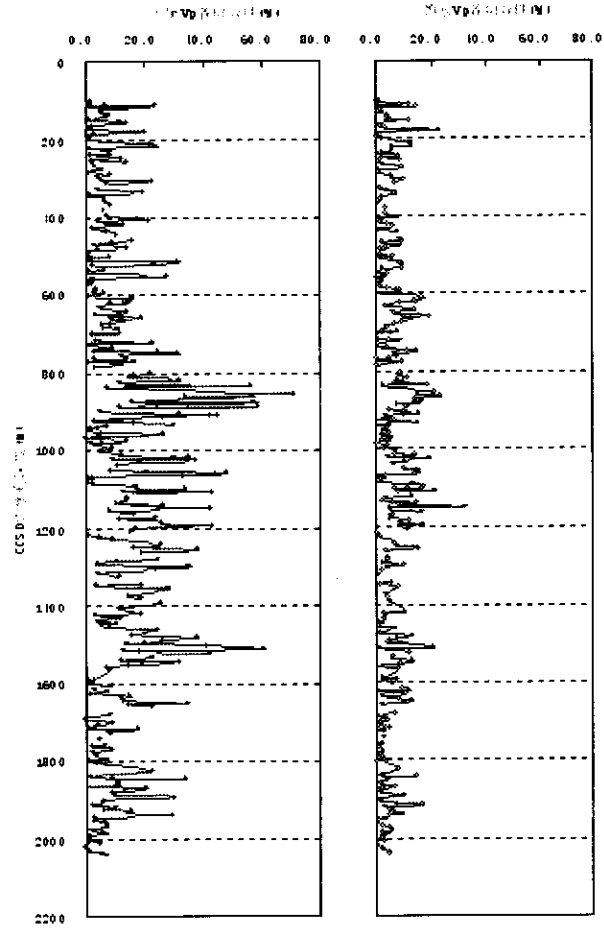


图3 CCSD 主孔 2000 米岩石地震波 (V_p) 各向异性在饱水前后随深度的变化关系

Fig.3 Anisotropy of seismic wave velocity (V_p) from 100 ~ 2000m cores of CCSD main hole at dry and water-saturated conditions

(1) 100 ~ 600m, 以榴辉岩为主, 夹有不同厚度的薄层副片麻岩;

(2) 600 ~ 1200m, 以榴辉岩和副片麻岩互层为主, 该层顶部出现 80 ~ 90m 厚的蛇纹石化石榴石橄榄岩夹薄层榴辉岩。在 830 ~ 920m 和 1000 ~ 1100m 之间副片麻岩中发育有韧性剪切带, 出现糜棱岩化片麻岩;

(3) 1200 ~ 1600m 以正片麻岩(花岗质片麻岩和黑云二长片麻岩)为主;

(4) 1600 ~ 2000m, 与第一区段相似, 以榴辉岩为主夹有少量副片麻岩层。以下主要介绍常温常压条件岩石弹性波速度测试成果。

4.2 干燥条件岩石弹性波速度

干燥条件弹性波速度是指从钻孔获取岩心在自然条件下晾干 1 ~ 2 个月之后, 再进行弹性波速度测量。干燥条件不同取向岩石 V_p 和 V_s 速度随岩性垂向变化见图 1-b, c。弹

性波速度变化总体趋势是上、下两区段高(V_p 5.99 ~ 6.08 km/s; V_s 3.1 ~ 3.9 km/s), 中间低(V_p 为 4.15 ~ 5.70 km/s; V_s 为 2.57 ~ 3.22 km/s), 局部速度较高, 与四个区段岩性组合变化的趋势是一致的。不同区段内的 V_p 和 V_s 速度值变化见表 3。

4.3 饱水条件岩石弹性波速度

饱水条件岩石弹性波速度是指自然条件凉干样品后在水中饱和 72 小时后进行波速测量的值。饱水条件不同取向岩石的 V_p 和 V_s 速度随岩性垂向变化见图 1-(d), (e)。弹性波速度变化总体趋势与干燥条件岩石弹性波速度变化趋势十分类似。然而不论是 V_p 或 V_s , 饱水条件岩石弹性波速度都比干燥条件弹性波速度有明显的增加(图 2)。通过对 700 个样品测量结果统计表明: 在饱水之后岩石的 V_p 速度平均增加 19%; V_s 速度平均增加 6%。不同岩石在饱水之后的弹性

波速度增加幅度有所不同。以 V_p 速度为例：正片麻岩 V_p 速度增加 33.64%，副片麻岩增加 26.34%，榴辉岩增加 10% 左右，蛇纹岩化石榴石橄榄岩饱水前后的弹性波速度变化不大。通常认为，干燥条件下岩石弹性波速度不是原位状态下的速度。因为岩心从地下获得之后含许多微裂隙，因此要使岩石恢复到原位的温度和压力条件，可以采用高温高压实验方法消除微裂隙对波速的影响。由于现场实验室只能进行常温常压的波速测量。干燥条件下岩石通常不含流体（主要是水），与天然状态下含有流体岩石有明显差别。因此，岩心在饱水之后，可以在一定程度上消除微裂隙影响。当围压小 200MPa 时（即 < 6km），本次测得的岩石地震波数据与地球物理原位资料有较好可比性。主孔不同区段内饱水岩石 V_p 和 V_s 速度变化见表 3。第 1 和第 4 区段的 V_p 和 V_s 速度分别为 6.21 ~ 6.65km/s 和 3.37 ~ 3.70km/s；第 2 和第 3 区段的 V_p 和 V_s 分别为 5.50 ~ 6.18km/s，2.04 ~ 3.36km/s。饱水条件下不同类型岩石的 V_p 速度和泊松比特征见表 4。从表 4 可见，榴辉岩波速度最大，片麻岩波速最小，退变质榴辉岩或石榴石角闪石波速居于两者之中。由于石榴石橄榄岩的蛇纹石化关系，它不具有标准地幔橄榄岩波速特征。特别值得注意的是，榴辉岩随着金属矿物含量增加和退变质作用增强（即角闪石矿物含量增加），榴辉岩的波速有明显的变化，其波速变化一般趋势是（由大到小）：含黄铁矿金红石榴辉岩 → 金红石榴辉岩 → 榴辉岩 → 多硅白云母榴辉岩 → 退变质榴辉岩 → 强退变质榴辉岩（即石榴石角闪岩）。根据 100 ~ 2000m 范围内 682 个样品的测试结果表明，100 ~ 2000m 之间的 V_p 速度为 4.96 ~ 8.35km/s，总平均 V_p 速度为 6.20 ± 0.33km/s，这个数值与地球物理推断的平均速度十分相似。

4.4 岩石弹性波速度的各向异性

岩石和矿物的各向异性是指不同结晶学方向和矿物晶格优选方向（LPO）或矿物形态优选方位（SPO）上物理性质（如弹性、力学强度、热导率、导电率等）不同，其差异程度称谓各向异性。弹性波通过不均匀介质时，会产生地震波各向异性和剪切波分裂现象。地震波各向异性是面理化构造岩在岩石物理性质上的表现。地震波各向异性计算公式为（Brich, 1961）：

$$A = [(V_{\max} - V_{\min}) / V_{\text{mean}}] \times 100\%$$

其中： V_{\max} 为最大波速值， V_{\min} 为最小波速值， V_{mean} 为平均波速值 $(V_{\max} + V_{\min}) / 2$ ， A (%) 为各向异性值。本次研究纵波 (V_p) 各向异性包括两种形式：

(1) 实测岩石 V_p 速度在水平方向和垂直方向上传播的差异程度 (A_1)；(2) 实测岩心 V_p 速度在平行面理和垂直面理方向上传播的差异程度 (A_2)。前者反映地震波在该区地理方位上的传播差异，对地球物理资料解释有重要意义；后者反映岩石变形的结构构造对地震波传播速度的影响，有助于了解地震波各向异性。干燥岩石和饱水岩石的 V_p 速度各向异性 (A_1 和 A_2) 随钻孔岩性深度变化趋势见图 3。

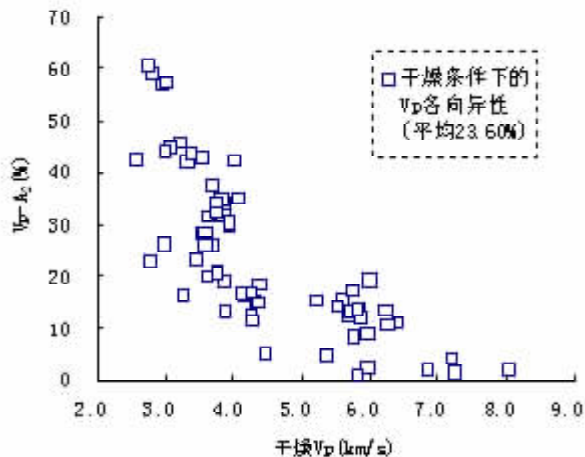


图 4 干燥条件岩石纵波各向异性随 VP 变化关系

Fig. 4 Variation of VP-anisotropy with compressional wave velocity at dry condition

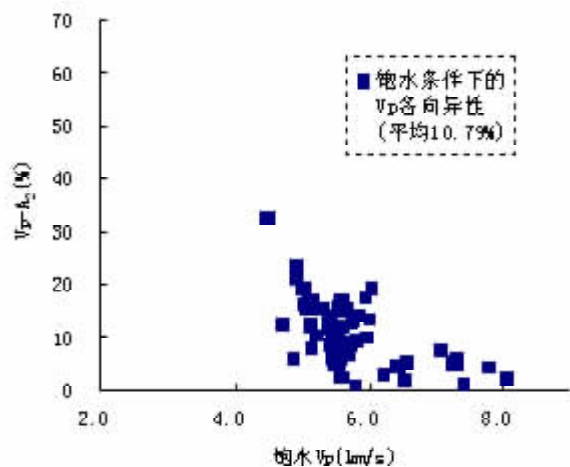


图 5 饱水条件纵波各向异性随 V_p 的变化关系

Fig. 5 Variation of V_p -anisotropy with compressional wave velocity at water-saturated condition

从图 3 可见主孔 100 ~ 2000m 岩石的纵波 (V_p) 速度的各向异性变化有如下 5 个特征 (1) 干燥和饱水 V_p 各向异性变化总体趋势是上下两区段 (即第 1 和第 4 区段) 低，中间高，恰好与干燥和饱水的 V_p 速度变化趋势相反的 (图 2)；(2) 干燥条件下在水平方向岩石 V_p 速度比在垂直方向上传播快，它可能与本区深部变形面理产状倾角较缓 (10 ~ 30°) 有关；(3) 榴辉岩 V_p 速度各向异性值 (2% ~ 15%) 明显比片麻岩 V_p 速度各向异性值 (15% ~ 60%) 低；面理化退变质榴辉岩 V_p 各向异性明显比块状榴辉岩 V_p 各向异性值高 (图 4)；(4) 对面理发育岩石而言，饱水后岩石 V_p 速度明显增大

(图2);而各向异性(A₂)却明显降低(图3和图5)。饱水后岩石V_p的各向异性一般比饱水前岩石V_p的各向异性减少50%左右;(5)在830~890m、1000~1100m和1435~1525m深度发育有韧性剪切带,V_p速度各向异性值变化最大(40%~60%),特别在糜棱岩化片麻岩中,其各向异性(A₂)有明显增高。

5 高温高压条件岩石地震波速度

上述常温常压条件下岩石地震波速测量成果只能提供近地表环境下的弹性波性质。因此考虑岩石在原位条件(in situ)的状态,即把岩石恢复到一定温度和压力条件下进行测试是十分必要的。由于主孔岩石的高温高压条件下波速测试中工作正在进行,本文仅报导CCSD钻孔周围地表岩石和部分浅孔岩石的高温高压波速测试成果,以供比较研究。在室温(20°C)和围压600MPa条件下地表和浅孔不同岩石类型的弹性波速度参数见表5。根据主孔岩石常温常压波速资料(表4)和岩石高温高压波速资料(表5)比较可见,后者榴辉岩、片麻岩和橄榄岩的V_p速度分别于高于前者V_p速度的表5 600MPa条件下岩石的密度、弹性波速度和泊松比

Table 5 Density, elastic wave velocity and poisson ratio of rocks at 600MPa

样品号	岩石名称	密度(ρ)	平均V _p (km/s)	A-V _p (%)	平均V _s (km/s)	A-V _s (%)	V _p /V _s	泊松比(σ)
TF98-06	石榴石片麻岩	2.69	6.08	6.10	3.57	3.69	1.70	0.237
MB98-02	带条状榴辉岩	3.59	8.57	1.04	4.90	1.10	1.75	0.257
MB98-03	富绿辉石榴辉岩	3.47	8.33	1.28	4.71	3.40	1.77	0.264
MB98-04	条带细粒榴辉岩	3.52	8.48	1.08	4.80	2.90	1.77	0.264
MB98-08	退变榴辉岩	3.51	8.38	2.36	4.76	1.37	1.76	0.262
MB98-19	石榴石岩	3.62	8.64	2.00	4.93	1.35	1.75	0.259
ZK101(140m)	蛇纹岩	2.97	5.84	11.82	3.25	12.42	1.79	0.277
ZK101(180m)	石榴石橄榄岩	3.26	7.46	1.07	4.28	2.18	1.74	0.254
ZK7501(25m)	榴辉岩	3.46	7.63	3.01	4.35	3.18	1.75	0.259
ZK2034(124m)	黑云斜长片麻岩	2.78	6.13	3.12	3.62	3.39	1.69	0.233

据 Kern *et al.* (2002)

表6 东海地区典型岩石地震波速度的温度和压力系数

Table 6 Pressure and temperature derivatives of P-ans S-wave velocity of typical rocks of Donghai area

岩石名称	样品号	密度 ρ (g/cm ³)	初始速度 (V ₀) (kms ⁻¹)		压力偏导数 (20°C) (10 ⁻⁴ kms ⁻¹ MPa ⁻¹)		温度偏导数 (600MPa) (-10 ⁻⁴ kms ⁻¹ °C ⁻¹)		密度偏导数 (600MPa) (10 ⁻⁴ gcm ⁻³ MPa ⁻¹)	
			V _{p0}	V _{s0}	dV _p /dP	dV _s /dP	dV _p /dT	dV _s /dT	dp/dP	dp/dT
石榴石片麻岩	TF98-06	2.65	5.64	3.37	7.71	3.61	1.52	-0.02	0.67	-0.52
带条状榴辉岩	MB98-02	3.57	8.39	4.85	3.24	0.98	2.34	1.25	0.26	-0.80
富绿辉石榴辉岩	MB98-03	3.45	8.10	4.64	4.02	1.34	1.51	0.64	0.32	-0.72
条带细粒榴辉岩	MB98-04	3.50	8.26	4.72	3.75	1.32	1.28	0.47	0.27	-0.76
退变榴辉岩	MB98-08	3.49	8.17	4.69	3.72	1.22	1.29	0.89	0.37	-0.74
石榴石岩	MB98-19	3.61	8.38	4.85	4.46	1.39	0.32	-0.46	0.27	-0.76
蛇纹岩	ZK101(140m)	2.78	6.23	3.33	3.50	0.45	0.99	0.96	1.27	-0.33
石榴石橄榄岩	ZK101(180m)	3.26	7.58	4.33	3.07	0.86	0.96	0.91	0.38	-0.68
榴辉岩	ZK7501(25m)	3.40	7.41	4.44	3.83	1.59	0.93	0.41	0.40	-0.70
黑云斜长片麻岩	ZK2034(124m)	2.79	6.12	3.67	3.11	1.02	0.96	0.95	0.52	-0.65

注:TF-驼峰地区;MB-毛北地区;ZK-毛北钻孔。(据 Kern *et al.*, 2002)

8.8%, 9.2%和18%左右;而前者片麻岩和榴辉岩V_p速度的各向异性(A_{VP})分别高于后者各向异性的30%和8%左右。不同类型岩石的弹性波速度随着压力增加而增大,随着温度增加而降低。现以毛北面理化榴辉岩(样品MB98-08)为例简述如下。当围压低于200MPa时,弹性波速度V_p和V_s随压力增加呈非线性关系明显增大;当围压>200MPa至600MPa时,由于岩石中原有微裂隙趋向于闭合和岩石致密化,V_p和V_s速度随压力增大呈线性关系缓慢增加(图6-a)。岩石V_p和V_s随温度升高(20°→600°C)而逐渐降低(图6-b)。根据图6-a和图6-b曲线斜率可以分别求得压力和温度对弹性波速度变化的影响系数,即dV/dP和dV/dT。东海地区地表和浅孔典型岩石的地震波速度的压力和温度影响系数见表6。温度和压力是影响地震波速度的重要因素。利用岩石波速的温度和压力影响系数,根据地温梯度可以计算不同深度岩石的波速,并建立相应的速度结构剖面,它对岩石圈地震速度模型的建立具有重要的约束意义。本次研究获得的V_p和V_s压力影响系数分别为0.5~8×10⁻⁴km/s·MPa和0.40~4.5×10⁻⁴km/s·MPa;V_p和V_s的温度影响系数分别为0.32~2.69×10⁻⁴km/s·MPa和0.41~1.36×10⁻⁴km/s·MPa。

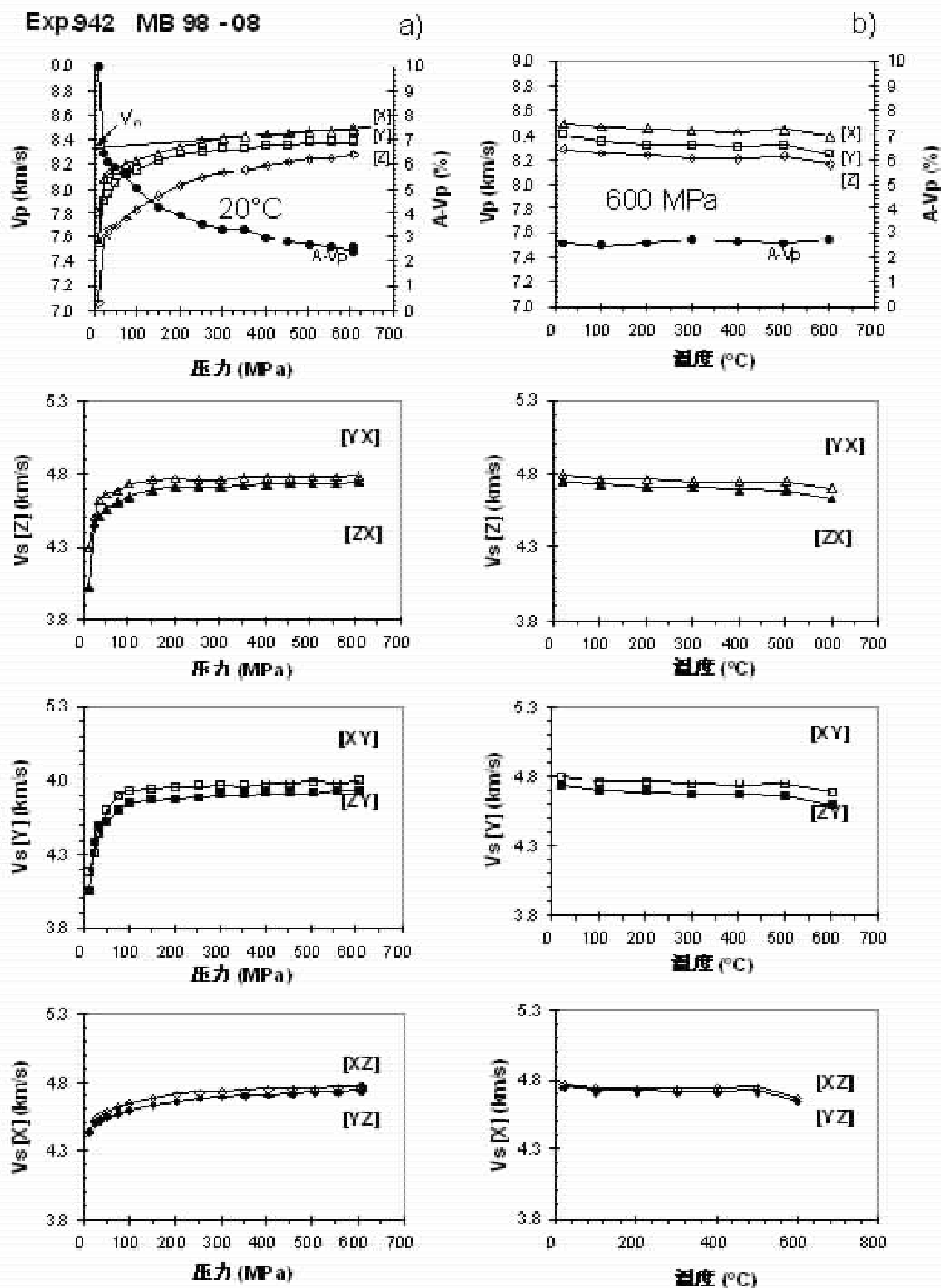


图6 东海榴辉岩样品 MB98-08 的地震波速度及其各向异性随温度和压力的变化关系

Fig.6 Directional dependence of P-, S-wave velocity and anisotropy in eclogite MB98-08 from Mabei of Donghai area.

(a) P-and S-wave velocity as a function of pressure at room temperature and (b) as a function of temperature at 600MPa confining pressure for three structural directions X, Y, and Z. (Kevn 和 Jin *et al.*, 2002)

表7 CCSD 主孔 2000 米不同岩石界面间的反射系数

Table 7 Reflection coefficient at lithological boundaries of different rocks from 2000 cores of CCSD main hole

波阻抗	RuEc	PhEc	AmEc	ReEc	PaGn	OrGn	GtPe
含黄铁矿金红石榴辉岩类	27.85	0.07	0.13	0.19	0.27	0.31	0.21
多硅白云母榴辉岩类	-0.07	反	0.06	0.13	0.21	0.24	0.14
角闪石榴辉岩(退变榴辉岩)	-0.13	-0.06	射	0.07	0.15	0.19	0.08
强退变榴辉岩(角闪岩)类	-0.19	-0.13	-0.07	系	0.08	0.12	0.02
蛇纹石化石榴石橄榄岩类	-0.27	-0.21	-0.15	-0.08	数	0.04	-0.07
长英质片麻岩类	-0.31	-0.24	-0.19	-0.12	-0.04		-0.10
黑云斜长片麻岩类	-0.21	-0.14	-0.08	-0.02	0.07	0.10	

注:表中第一行数字为对应介质的波阻抗,单位 $\text{g}/\text{cm}^3 \times \text{km}/\text{s}$,其它数字为不同岩石接触界面所能产生的反射系数。岩性代号同第三章。

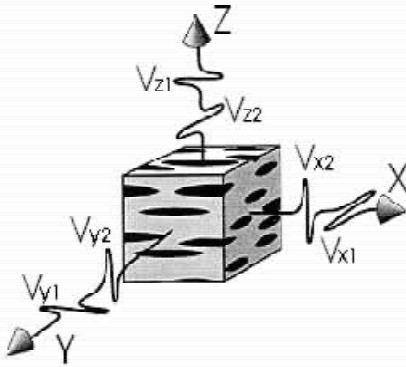


图7 剪切波分裂示意图

X 为平行面理和线理方向, Y 为面理面内垂直线理方向, Z 为垂直面理方向

Fig. 7 Simplified diagram of shear wave splitting

特别值得指出的是,当剪切波通过各向异性介质传播时会分裂成两个相互垂直的剪切波,这种现象称谓剪切波分裂(Shear wave splitting)(Kern *et al.*, 1990),它是传播介质不均匀性的一个重要标志(图7)。剪切波分裂用两个方向上剪切波速度的差异程度(ΔA)表示,对应 x, y, z 方向的剪切波分裂各向异性值分别为:

$$\Delta A(x) = \{ (V_{xy} - V_{xz}) / V_{xy} \} \times 100\%$$

$$\Delta A(y) = \{ (V_{yx} - V_{yz}) / V_{yx} \} \times 100\%$$

$$\Delta A(z) = \{ (V_{zx} - V_{zy}) / V_{zx} \} \times 100\%$$

不论是 V_p 速度或是 V_s 速度,它们的各向异性与岩石变形面理和线理有密切关系。弹性波速度在平行于面理和线理方向传播明显大于垂直于面理和线理方向。毛北面理化榴辉岩(MB98-08)是地震波速度各向异性最典型例子。从图6-a可见,纵波速度(V_p)沿面理 X 和 Y 方向分别为 8.47km/s 和 8.38km/s,而沿垂直于面理的 Z 方向上为

8.28km/s。 V_p 各向异性达到 2.36%。在 X 方向剪切波速度各向异性 ΔA_{vs} 为 1.37%(图6-a)。不论是 ΔA_p 或者 ΔA_s ,随着压力和温度改变都有一定变化。相反,对于块状榴辉岩而言,弹性波速度的各向异性值很小。因此榴辉岩各向异性的大小是示踪岩石变形面理化程度的一个重要定量标志,它对定向分布高地震波速反射带的推断和揭示深部物质构造动力学过程有重要启示。因此,人们把地震波各向异性 and 剪切波分裂称谓“地震化石”(Seismic fossil)(Silver, 1996)。

6 岩石弹性波速度对地震深射的约束

自上个世纪 70 年代以来,全球各大洲相继开展了大量地震深反射研究,在大陆岩石圈中发现了丰富的反射模式(Mooney *et al.*, 1992; 杨文采, 1999; Zhao *et al.*, 1993; 吴宣志, 1997; 董树文等, 1998; Wang *et al.*, 2000; Yuan *et al.*, 2003; 刘福田等, 2003)。这种探测方法为认识地壳和上地幔深部物质结构存在型式和动力学过程开辟了全新途径,获得了巨大成功。然而,迄今为止人们对这些反射体成因及其影响因素还了解很少,因而对它的解释往往有不确定性和多解性。地震深反射成果的合理解释一直是困惑地球物理界一个大难题,其主要原因是:一方面对地球物理成果直接检验的证据很少;另一方面对反射图象缺乏介质性质的物理参数约束。目前地震学家认为深反射可能成因有 4 种(1)岩性成因—由速度和密度差异而引起波阻抗界面(Jones *et al.*, 1998; Kern, 1999, 2002);(2)裂隙成因(Pavlenkoba, 1992);(3)韧性剪切带成因(Passchier, 1986; Christensen *et al.*, 1989; Fountain *et al.*, 1982, 1994);(4)定向圈闭流体成因(Jones *et al.*, 1982)。

目前中国大陆科学钻探孔区(东海县西南部)已进行了系统的地球物理调查。二维地震(特别是 DH_1 和 DH_2 测线)调查表明,在超高压变质岩出露区上地壳出现一系列倾斜

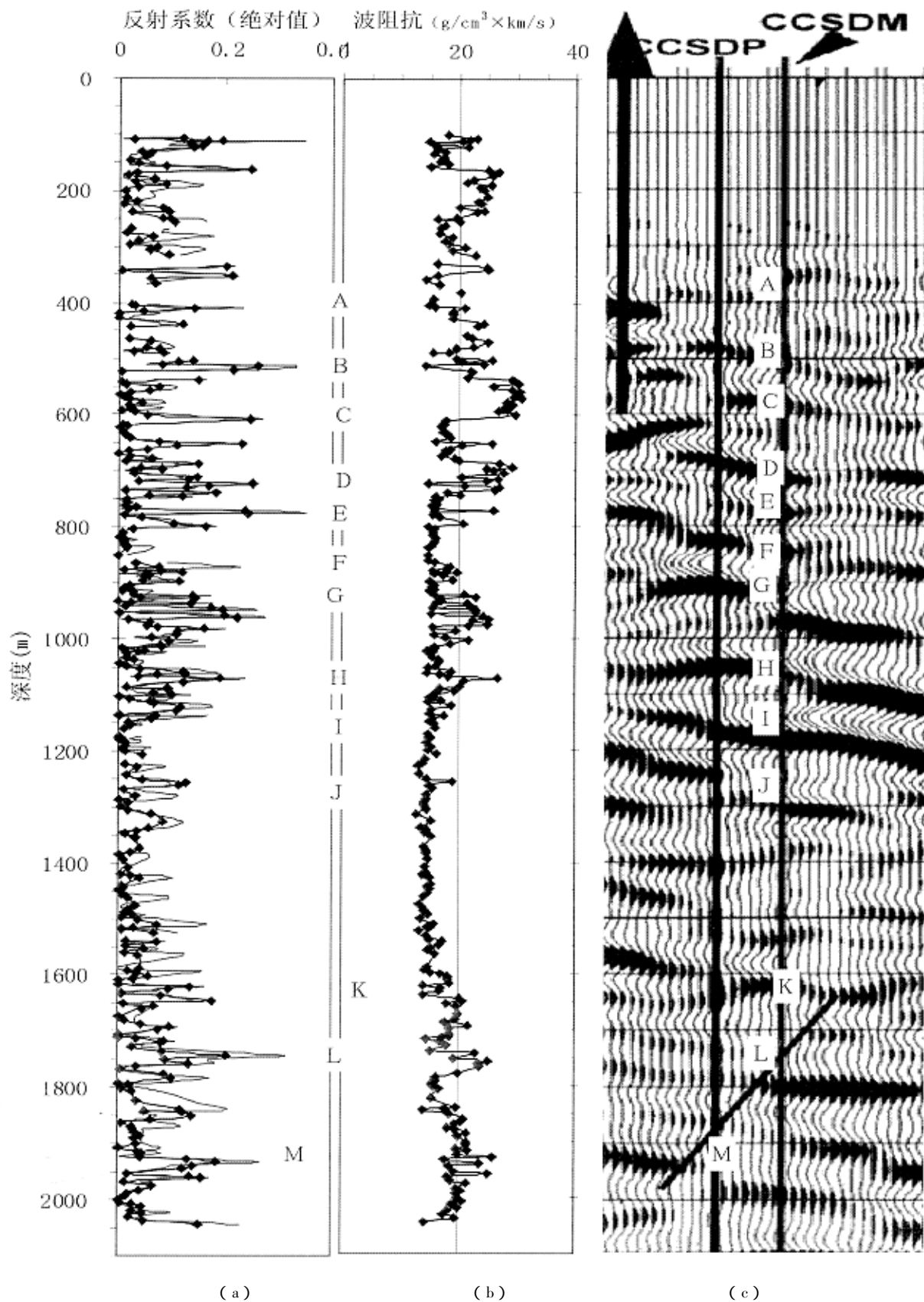


图8 CCSD 主孔 2000 米岩石的反射系数 (a)、波阻抗 (b)与地球物理反射剖面 (c, 据杨文采等 2002)对照图

Fig. 8 Comparison of reflection coefficients and impedances with seismic reflection profiling from 2000m cores of CCSD main hole

强反射体(杨文采等, 2002)。从图 8-c 反射剖面可见, A 至 M 的 13 个部位都出现向南东缓倾斜的定向排列反射体(层)。通过 DH_1 和 DH_2 测线交汇处的主孔(CCSD)的直接验证和岩心的物理性质研究, 为探索这些强反射体成因提供了千载难逢的机遇。

反射系数(reflective coefficient, R_C)是衡量不同岩性界面反射强度的重要定量参数, 它的计算公式为:

$$R_C = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)$$

其中 V_1 和 V_2 是入射波速度和反射波速度, ρ_1 和 ρ_2 是不同岩性界面两侧的密度, $\rho_1 V_1$ 和 $\rho_2 V_2$ 是岩性界面的波阻抗。按照上述公式, 计算了 2000m 中各大类岩石不同界面反射系数和波阻抗(表 7 和图 8-a、b)。通常认为当反射系数接近于 ± 0.1 时, 岩性界面可以产生比较强反射(Warner, 1990)。例如反射层 A 位于 375m 附近, 主要岩性是榴辉岩夹有副片麻岩, 反射系数大, 为 0.21 ~ 0.27。反射层 B 位于 500 米附近, 从图 8-a 可见, 它对应一个很大反射系数(0.19 ~ 0.27), 是一个明显的波阻抗界面, 该层是退变榴辉岩夹有新鲜榴辉岩。反射层 C 位于 575 米附近, 是一段特殊层位, 含有大量的钛铁矿金石榴辉岩, 是主孔 2000m 中 V_p 速度和密度最高层位, 该层底界与蛇纹石化石榴石橄榄岩接触, 波阻抗最大(27.85g/cm³ × km/s), 反射系数为 0.21。特别值得注意的是, 在 925m(G 层), 1075m(H 层)和 1175m(L 层)有非常清晰、比较厚的反射层(20 ~ 50m 厚度), 反射系数大于 0.20。这三层岩性分别是榴辉岩夹有副片麻岩和副片麻岩夹有榴辉岩, 并叠加有韧性剪切带, 发育一些糜棱岩化片麻岩和面理化榴辉岩, 一些黑云母、石英、斜长石、绿辉石和部分石榴石产生不同程度的矿物形态优选方位(SPO)和晶格优选方位(LPO)。陈意等(2004)对面理化榴辉岩中绿辉石、石榴石和糜棱岩化片麻岩中石英有限应变轴比统计和 Filinn 系数表明, 上述三个层位岩石经历了明显塑性变形。金淑燕等(1998)和马芳(1999)①分别对大别双河和东海毛北面理化绿辉石组构测定表明, 绿辉石有明显晶格优选方位, C 轴[001]极密位于页理面附近, 并近于平行线理 L。经测试结果表明, 块状榴辉岩 V_p 各向异性为 0.15% ~ 1.5%, 面理化榴辉岩 V_p 各向异性可达到 6% ~ 14%。普通片麻岩和糜棱岩化片麻岩(或糜棱岩)两者的 V_p 各向异性可以相差 30% 左右。定向排列绿辉石矿物可以使榴辉岩的 V_p 各向异性达到 4% ~ 6%。韧性剪切带中糜棱岩和强变形面理化榴辉岩不仅可以使地震波各向异性明显增加(Mauler *et al.*, 2000), 而且提高了反射强度, 充当了深地震反射载体作用(Passchier, 1986; 欧新功等, 2003)。国外一些学者研究结果也表明, 不少地区韧性剪切带糜棱岩和深部地壳断层带构造岩可以成为深地震反射载体(reflector)(Fountain *et al.*, 1984; Christensen *et al.*, 1989; Kern *et al.*, 1990; Ji *et al.*, 1993)。定向微裂隙对岩石各向异性和反射强度也有重要影响(Siegesmund *et al.*, 1991), 尤其是片麻岩和强退变

质榴辉岩表现更为明显。例如毛北条带状退变质榴辉岩(MB98-08)在常温常压条件下岩石中含有许多未闭合开放微裂隙, 因此榴辉岩 V_p 各向异性大于 10%(图 9); 当围压大于 200 至 600MPa 时, 由于开放裂隙已全部闭合(Kern, 1999), 榴辉岩 V_p 各向异性降至 4.2%, 它表明该样品中由微裂隙引起的各向异性达到 5.2% 左右, 而晶格优选方法引起的各向异性占 4.2% 左右。由此可见, 在不同围压条件下微裂隙和矿物晶格优选方位(LPO)对全岩各向异性和反射强度的贡献是不同的, 这就是主孔常温常压条件测定的岩石各向异性一般都比高温高压条件测定同样岩石各向异性要高得多的原因。

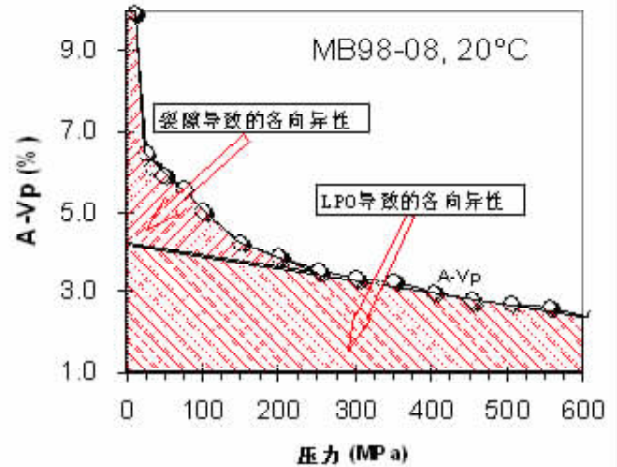


图 9 东海地表榴辉岩地震波各向异性与岩石微裂隙和 LPO 之间的关系(样品 MB98-08)

Fig. 9 The relationship of seismic anisotropy to micro-cracks and LPO of rocks from eclogite at exposed surface in Donghai area

7 讨论和结论

(1) 建立了 CCSD 主孔 2000m 岩石弹性波速度的连续剖面。

通过常温高压条件的测试和研究, 查明了主孔 2000m 范围内各类岩石的地震波速度(V_p 、 V_s 、饱水 V_p 、饱水 V_s)和相应岩石密度以及它们随岩性和深度变化关系。这是我国第一次通过大陆科学钻探技术取得了超高压岩石弹性波速度的系统资料, 从而为检验地质和地球物理模型提供了岩石物理学方面的宝贵资料。CCSD 主孔中新鲜榴辉岩地震纵波速度最大(平均 $V_p = 7.86$ km/s), 片麻岩波速最小(正副

① 马芳. 1999. 下地壳、上地幔岩石组构与波速各向异性, 中国地质大学(武汉)硕士论文

片麻岩的平均 V_p 分别为 5.53km/s 和 5.71km/s), 退变质榴辉岩界于上速之间。榴辉岩的 V_p 速度随退变质程度增强而降低。超基性岩(主要为蛇纹石化石榴石橄榄岩)平均 V_p 速度为 6.2km/s。从垂向分布来看,主孔 100 ~ 1200m 以榴辉岩为主,夹有片麻岩超基性岩;1200 ~ 2000m 以正片麻岩(花岗质片麻岩为主),夹有部分榴辉岩。上述两大区段的平均 V_p 速度分别为 6.37km/s 和 5.9km/s, 与地球物理探测的结果(6.4km/s 和 5.8km/s)相近。2000m 岩石总平均 V_p 速度为 6.2km/s, 绝大部分岩石都具有明显地震波各向异性。

(2) 对大别-苏鲁造山带上地壳速度结构的约束。

根据相关的地质断面、地震折射探测资料和地球化学采样综合分析结果表明,中国东部大陆地壳平均速结构模型如下(高山等,1998;Gao *et al.*,1997):上地壳(0 ~ 14km), $V_p = 6.0$ km/s;中地壳(14 ~ 24km), $V_p = 6.4$ km/s;下地壳(24 ~ 37km) $V_p = 6.8$ km/s。最近 Wang 等(2002)通过地震折射探测研究表明,大别造山带南北两侧的扬子克拉通和华北克拉通平均地壳厚度为 35km,两者具有十分相似的地壳(V_p)速度结构:上地壳 6.0 ± 0.2 km/s,中地壳 6.5 ± 0.1 km/s 和下地壳 6.8 ± 0.1 km/s;然而大别造山带上地壳在 3 ~ 4km 深度以下显示高速将征,出现高速层(6.2 ~ 6.3 km/s),它明显高于中国东部、扬子克拉通和华北克拉通上地壳速度 6.0km/s。刘福田等(2003)和杨文采(1999)分别对大别造山带和北苏鲁地震反射和折射研究表明,在上述两个造山带上地壳中也发现 6.2km/s 高速层。这些地球物理探测资料充分表明,大别-苏鲁造山带地壳速度结构的突出特征是上地壳具有 6.2 ~ 6.3km/s 的高速层,而中、下地壳的速度与扬子克拉通和华北克拉通中、下地壳速度结构大体类似。通过 CCSD 主孔揭示,2000m 岩心主要由榴辉岩、退变质榴辉岩、正副片麻岩和橄榄岩组成。对 700 个样品 V_p 速度测量结果表明,主孔 2000m 岩心平均 V_p 速度为 6.20km/s,它与地球物理探测的上地壳 6.2 ~ 6.3km/s 高速层是接近的。通过科学钻探直接验证和岩石弹性波速度测试研究,证明了地球物理的推断,即大别-苏鲁造山带上地壳的高速层是由于碰撞后伸展作用导致超高压榴辉岩从中下地壳折返到上地壳浅部或地表,从而使上地壳速度有明显增加。Wang *et al.*(2000)认为在大别造山带超高压岩石出露地区,9km 深度之下的中下地壳速度与扬子克拉通和华北克拉通的中下地壳速度没有明显差别。因此,超高压岩石主要集中在上地壳 9km 范围。最近我们对距 CCSD 孔位 30km 处平明山更新世碧玄岩中包体进行了研究,一直没有发现榴辉岩包体,初步认为大陆深俯过程中形成超高压岩片,一部分由于高密度岩石引起重力不稳定性而拆沉到地幔中去,而碧玄岩携带上地幔橄榄岩包体向上经历 50 ~ 55km 路程中并没有捕获到超高压榴辉岩残留体,它说明本区另一部分榴辉岩在中生代晚期(碰撞后)通过构造作用方式已折返到上地壳 10km 范围或部分出露地表(金振民等,

2003)。我们的认识与 Wang(2000)的地球物理推断是一致的。由此可见,CCSD 继续向 5000m 钻进的过程中仍然会出现榴辉岩、片麻岩和橄榄岩组合岩层。

(3) 地震反射体是岩性差异、韧性剪切带和微裂隙的综合产物。

不同岩性界面的弹性波速度和密度差异是造成本区地震强反射体的主要原因。根据不同岩石类型界面反射系数计算表明,金红石榴辉岩与正片麻岩之间产生最大反射系数(0.31);其次是强退变榴辉岩夹在新鲜榴辉岩之间可产生相当高的反射系数(0.27);新鲜榴辉岩与副片麻岩之间的反射系数为 0.24;低密度低波速的正副片麻岩之间(如果没有韧性剪切作用叠加的话)仅产生很弱反射系数 0.02。上述不同岩性之间的反射系数为合理解释本区地球物理深地震反射剖面提供了重要约束参数。韧性剪切带中糜棱岩和透入式应变组构(面理和线理),对提高地震波各向异性 and 反射强度起着反射载体作用。在不同温度和压力条件下定向微裂隙和矿物晶格优选方位对地震波各向异性的影响程度是不同的。特别是在 <200Mpa 的低围压条件下,微裂隙对地震深反射和各向异性影响是一个不忽视的因素。除此之外,要注意片状矿物(如黑云母、多硅白云母、纤蛇纹石或蛇纹石)定向排列和破碎带及其流体对地震反射体和多向异体的约束作用。

(4) 水饱和度对超高压岩石弹性波速度和各向异性有重要影响。

国内外不少学者关于流体和水饱和度对岩石地震波速影响问题已经做了不同程度研究,然而对水饱和之后岩石弹性波速度变化机制至今尚没有统一的认识(Holl *et al.*,1997;Knigh,1990;施行觉等,1995;史谓等,2003)。特别是对低孔隙率超高压变岩来说,有关水饱和度对岩石波速影响研究成果报导很少。如果流体(水或 NaCl 流体等)在孔隙中均匀分布的话,根据 Biot 理论和 Gassmann 方程(Biot,1956),孔隙流体使岩石的纵波速度 V_p 增加,而剪切波速度 V_s 略有下降。如果作为广义的流体(熔体)在花岗岩类和橄榄岩中呈三连点和颗粒边界薄膜均匀分布的话,高温熔体会使部分熔融状态岩石的纵波速度和剪切波速度分别降低 5% 和 10% 左右(Murase *et al.*,1979,1980;Jin *et al.*,1994)。岩石在饱水之后, V_p 速度平均增加 19%, V_s 速度增加 6%。不同岩石在饱水之后波速增加幅度不同,其中以片麻岩波速增加最大(33%),榴辉岩(10%),蛇纹石化石榴石橄榄岩饱水前后速度变化不大。饱水之后样品的地震波各向异性有明显降低(一般是 3% ~ 4% 左右)。为什么低孔隙率超高压变质岩在饱水后的波速有如此明显变化,目前还不清楚。我们初步认为,部分榴辉岩和片麻岩由于退变质和构造作用形成一些微裂隙,岩石饱水之后微裂隙被水部分充填,裂隙水和孔隙水的加入增大了岩石有效体积模量,从而改变岩石的纵波速度。由于水的剪切模量基本上为零或很小,饱水水前后的剪切模量变化很小,因此剪切波

速度变化幅度比较小。有关这个问题,我们将通过高温高压实验,进一步检验在高温高压条件下水对超高压岩石波速度影响与常温常压条件究竟有什么区别。我们认为,在CCSD主孔5000m深度范围内(即相当于围压135MPa),岩石中裂隙水和孔隙水对超高压岩石波速度的影响是不可忽视的。在常温常压条件下岩石饱水波速是比较接近岩石原位状态的波速。

需要强调指出是,造成地震强反射因素还涉及其他岩石物理性质(例如,电导率、孔隙率、渗透率等)以及破碎带和流体作用。有关这方面工作,我们正在进行综合整理和研究之中。

感谢大陆科学钻探工程项目首席科学家许志琴院士对岩石物理实验室研究工作的指导和支持。德国Kiel大学H. Kern教授曾来CCSD现场岩石物理实验室进行指导和交流经验;中国科技大学施行觉教授在地震波测量仪器的研制方面给予大力支持;在地球物理成果和岩石物性资料如何结合的问题上,我们与杨文采教授进行了有益讨论;参加中国大陆科学钻探工程项目岩石物理现场实验室部分测试工作人员还有王璐、罗震宇、宋衍茹、王永锋、余日东、陈意,在此我们向他们表示诚挚感谢。

References

- Babuska V, Fiala J, Mayson DJ, Lieberman R C. 1978. Elastic properties of eclogite rocks from the Bohemian massif. *Studia Geophysica et Geodetic*, 22: 348–361
- Berckheemer A, Rauen A, Winter H, Kern H. 1997. Petrophysical properties of the 9–km deep crustal section at KTB. *J. Geophys. Res.*, 102(B8): 18337–18362
- Biot M A. 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid I. low frequency range. *J. Acoustic. Soc. Am.*, 28(2): 168–178
- Brich F. 1961. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kbars. *J. Geophys. Res.*, 66: 2199–2224
- Chen Y, Jin ZM, Ou XG, Jin SY and Xu HJ. 2004. Deformation features of gneiss and UHP eclogite from ductile shear zone and its relation with seismic velocity anisotropy: Evidences from core samples at depth of 680~1200m of CCSD. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 97–108 (in Chinese with English abstract)
- Christensen N L. 1989. Reflectivity and seismic properties of the deep continental crust. *J. Geophys. Res.*, 94: 17795–17804
- Chunyang Wang, Rongsheng zeng, Mooney W D, Hacker B R. 2000. A crustal model of the ultrahigh-pressure Dabie shan orogenic belt, China, derived from deep seismic refraction profiling. *J. Geophys. Res.*, 105(B5): 10857–10869
- Dong Shuwen, Wu Xuanzhi, Gao Rui. 1998. On the crust velocity levels and dynamics of the Dabie shan orogenic belt. *Chinese J. Geophys.*, 41(3): 349–361 (in Chinese with English abstract)
- Emmeimman R, Lauterjung L. 1997. The German continental deep drilling program KTB: Overview and major results. *J. Geophys. Res.*, 102(B8): 18179–18201
- Fountain D M, Boundy T M, Austrheim H. 1994. Eclogite facies Shear zone – deep crustal reflector? *Tectonophysics*, 232: 411–424
- Fountain D M, Hurich C A, Smithson S B. 1984. Seismic reflectivity of mylonite zone in the crust. *Geology*, 12: 195–198
- Gao Sha, Jin Zheming, Jin Shuyan, Xu Ziqin, Dong Shuwen. 1997. Preliminary study on seismic velocities and density of ultrahigh-pressure eclogite from Dabie shan: Implication for composition of deep crust and Moho characters. *Chinese Science Bulletin*, 42(8): 862–866 (in Chinese)
- Gao Shan, Liu Yongsheng. 1999. Deep structures and composition of continental crust. In: Zheng Y-F ed. *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 168–201 (in Chinese)
- Holl A, Althaus E, Lempp C. 1997. The petrophysical behavior of crustal rocks under the influence of fluids. *Tectonophysics*, 275: 253–260
- Huenges E, Erizinger J, Kuck J. 1997. The permeable crust: Geohydraulic properties down to 9101 m depth. *J. Geophys. Res.*, 102(B8): 18255–18266
- Jin Zhenmin, Green W H, Zhou Yi. 1994. Melt topology in partially molten peridotite during ductile deformation. *Nature*, 372: 164–167
- Jin Shuyan, Jiao Shuqiang. 1998. Fabric measurements of omphacite from ultrahigh-pressure eclogite and rheological significances. *Earth Science*, 23(1): 37–40 (in Chinese with English abstract)
- Jin shuyan. 1997. Seismic anisotropy of continental lithosphere and its dynamical significances. In: Zhan Bingxi(ed.). *Modern methods for the lithospheric study*. Beijing: Publishing House of Atomic Energy, 79–88 (in Chinese)
- Jin Zhenmin, Yu Ridong, Yang Wencai and Ou Xingong. 2003. Mantle – derived xenoliths of peridotite from Pingmingshan, Donghai County, Jiangsu province and their implications for deep structures. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 451–462 (in Chinese with English abstract)
- Jones K A, Warner M R, Morgan R P. 1996. Coincident normal-incidence and wide-angle reflection from the Moho: evidence for crustal seismic anisotropy. *Tectonophysics*, 264(1–4): 205–217
- Jones T, Hur A. 1982. Seismic velocity and anisotropy in mylonites and reflectivity of deep crust fault zones. *Geology*, 10: 260–263
- Kern H, Shao Gao, Zhenmin Jin, Popp T, Shuyan Jin. 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, Wenk H B. 1990. Fabric-related velocity anisotropy and shear-wave splitting in rocks from the Santo Rosa mylonite zone, California. *J. Geophys. Res.*, 95: 11213–11223

- Kern H, Zhenmin Jin, Shao Gao, Popp T, Zhiqin Xu. 2002. Physical properties of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Sulu terrain, eastern China: implications for the seismic structure of the Donghai (CCSD) drilling site. *Tectonophysics*, 354: 315–330
- Knigh R, Nolen-Hoeksema R. 1990. A laboratory study of the dependence elastic wave velocities on pore scale fluid distribution. *Geophys. Res. Lett.*, 17(10): 1529–1532
- Kozlovsky Y A. 1987. The super-deep well of the kola peninsula. Berlin: Springer
- Kumazawa M, Helmstaedt H, Masaki K. 1971. Elastic properties of eclogite xenoliths from Diatremes of the East Colorado plateau and their implication to the upper mantle structure. *J. Geophys. Res.*, 76(5): 1231–1247
- Liu Fulai, Zhang Zheming, Xu Zhiqin. 2003. Three-dimensional distribution of ultrahigh-pressure minerals in Sulu terrane. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 69–84 (in Chinese with English abstract)
- Liu Futian, Xu Peifen, Liu Jinsong. 2003. The crustal velocity structure of the continental deep subduction belt: study on the Eastern Dabie orogen by seismic wide-angle reflection/refraction. *Chinese J. Geophys.*, 46(3): 366–372 (in Chinese with English abstract)
- Maghnani M H, Ramananagtoandro R, Clark S P. 1974. Compressional and shear wave velocities in granulite facies rocks and eclogites to 10 Kbar. *J. Geophys. Res.*, 79(35): 5427–5446
- Mauler A, Burlini L, Kunze K, Philippot P. 2000. P-wave anisotropy in eclogite and relationship to the omphacite crystallographic fabric. *Phys. Chem. Earth (A)*, 25(2): 119–126
- Mooney W D, Meissner R. Multi-genetic regime of crustal reflectivity: a review of seismic reflection profiling, In: Fountain D M (ed.). *Continental Lower crust*. Berlin. Springer, 45–79
- Murase T, Kushiro I. 1979. Compressional wave velocity in partially molten peridotite at high pressures. *Carnegie Inst. Washington. Yearb.*, 78: 559–562
- Murase T, Fukuyama H. 1980. Shear wave velocity in partially molten peridotite at high pressures. *Carnegie Inst. Washington. Yearb.*, 79: 307–310
- Passchier C W. 1986. Mylonite in the continental crust and their role as seismic reflectors. *Geologie en Mijnbouw*, 65: 167–176
- Pavlenkoba NI. 1992. The kola superdeep drilling and the nature of seismic boundaries. *Terra Nova*, 4: 117–123
- Rao, M V M S, Ramana Y V, Gogte B S. 1974. Dependence of compressional velocity on the mineral chemistry of eclogite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 23: 15–20
- Shaocheng Ji, Salisbury H. 1993. Shear-wave velocities, anisotropy and splitting in high-grade mylonites. *Tectonophysics*, 221: 453–473
- Shi Ge, Shen Wenlue, Yang Dongquan. 2003. The relationship of elastic wave velocity with saturation and fluid distribution in pore space. *Chinese J. Geophys.*, 46(1): 138–142 (in Chinese with English abstract)
- Shi Xingjue, Xu Guoming. 1995. Experimental study on the effect of water-saturation on compressional and shear wave velocity and attenuation. *Chinese J. Geophys.*, 38 (supplement): 281–287 (in Chinese with English abstract)
- Siegesmund S, Kern H, Vollbrecht A. 1991. The effect of oriented microcracks on seismic velocities in an ultramylonite. *Tectonophysics*, 186: 241–251
- Silver P G. 1996. Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depth of Geology. *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, 24: 358–432
- Warner M. 1990. Absolute reflection coefficients from deep seismic reflections. *Tectonophysics*, 173: 15–23
- Wenjin Zhao. 1993. Deep seismic reflection evidences for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366: 557–559
- Wu Xuanzhi. 1997. Near vertical reflection method and its substance of deep reflection. In: Zhang Bingxi (ed.). *Modern methods for the lithospheric study*. Beijing: Publishing House of Atomic Energy, 37–46 (in Chinese)
- Xu Shutong, Liu Yican, Chen Guanbao, Lompagnoni F, Rofo E, He Mouchun, Liu Huifang. 2003. New discovery of diamonds of eclogite from Sulu area. *Chinese Science Bulletin*, 48(10): 1069–1075 (in Chinese)
- Xu Zhiqin, Yang Wencai, Zhang Zeming. 1998. Scientific significance and site-selection of the first Chinese Continental Scientific Deep Drillhole. *Continental Dynamics*, 3: 1–3
- Yang Wencai, Cheng Zhenyan, Chen Guojie. 1999. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (I): Deep seismic reflection. *Chinese J. Geophys.*, 42(1): 41–52 (in Chinese with English abstract)
- Yang Wencai, Zhang Chuhe, Zhu Guangmin. 2002. Calibration of seismic reflectors in Chinese Continental Drilling area. *Chinese J. Geophys.*, 45(3): 370–384 (in Chinese with English abstract)
- Yang Xiaosong, Jin Zhenmin. 1998. The Significance of the studies on petrophysical property measurements in continental scientific drilling. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 338–346 (in Chinese with English abstract)
- Yu Qingfan, Yao Changli, Meng Xiaohong. 2002. Petrophysical properties at site of continental scientific Drilling, Northern Jianshu province. *Chinese J. Geophys.*, 45(1): 93–100 (in Chinese with English abstract)
- Yuan Xuecheng, Klemperer S, Teng Wenbang, Liu Laixiang, Chetwin E. 2003. Crustal structure and exhumation of the Dabie shan ultrahigh-pressure orogen, eastern China, from seismic reflection profiling. *Geology*, 31(5): 435–438
- Zhang Z M, You Z D, Han Y J, Song L K. 1995. Petrology metamorphic process and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt, east-central China. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 306–325
- Zhao Zhidan, Xie Hongsheng, Zhou Wenge. 2001. Density and seismic velocity of eclogite from Dabie shan and implications for cycle of crust-mantle. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(1): 52–57 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈意, 金振民, 欧新功, 金淑燕, 徐海军. 2004. 韧性剪切带中片麻岩和超高压榴辉岩变形特征及其与地震波速各向异性的关系: 来自中国大陆科学钻探 (CCSD) 680 ~ 1200 米岩心的证据. 岩石学报, 20(1) 97 - 108
- 董树文, 吴宣志, 高锐. 1998. 大别造山带地壳速度结构与动力学. 地球物理学报, 41(3) 349 - 361
- 高山, 金振民, Kern H, 金淑燕, 许志琴, 董树文, 杨天楠. 1997. 大别山超高压榴辉岩高温高压下地震波速和密度的初步研究——对造山带地壳深部组成和莫霍性质的启示. 科学通报, 42(8): 862 - 806
- 高山, 刘勇胜. 1999. 大陆地壳深部结构与组成. 见: 郑永红主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 168 - 201
- 金淑燕, 焦述强. 1998. 超高压榴辉岩中绿辉岩组构测定及其流变学意义. 地球科学, 23(1) 37 - 40
- 金淑燕. 1997. 大陆岩石圈各向异性和动力学意义. 见: 张炳熹, 洪大卫, 吴宣志主编. 岩石圈研究的现代方法. 北京: 原子能出版社, 79 - 32
- 金振民, 余日东, 杨文采, 欧新功. 2003. 江苏东海县幔源橄榄岩包体及其深部构造意义. 地质学报, 77(4): 451 - 462
- 刘福来, 张泽明, 许志琴. 2003. 苏鲁地体超高压矿物的三维空间分布. 地质学报, 77(1) 69 - 84
- 刘福田, 徐佩芳, 刘劲松, 尹周勋, 秦建业, 张炎秉, 张成科, 赵金红. 2003. 大别深俯冲带的地壳速度结构——东大别造山带深地震宽角反射/折射研究. 地球物理学报, 46(3) 366 - 372
- 欧新功, 金振民, 金淑燕, Kern H, 2003. 下地壳地震深反射的可能载体: 来自层状辉长岩结构和高温高压波速实验的证据. 科学通报, 48(4) 388 - 394
- 施行觉, 徐果明. 1995. 含水饱和度对纵横波速度和衰减影响的实验研究. 地球物理学报, 38(增刊) 281 - 287
- 史诒, 沈文略, 杨东全. 2003. 岩石弹性波速度和饱和度、孔隙流体分布的关系. 地球物理学报, 46(1) 138 - 142
- 吴宣志. 1997. 近垂直反射方法及其深反射的实质. 见: 张炳熹, 洪大卫, 吴宣志主编. 岩石圈研究的现代方法. 北京: 原子能出版社, 37 - 44
- 徐树桐, 刘贻灿, 陈冠宝, Lompagnoni F, Rofo E, 何谋春, 刘惠芳. 2003. 苏鲁地区榴辉岩中新发现的微粒金刚石. 科学通报, 48(10) 1069 - 1075
- 许志琴. 1995. 中国大陆科学钻探面临解决的关键地球科学问题. 地球学报, 1: 101 - 106
- 杨文采, 程振金, 陈国九. 1999. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(1) 深反射地震. 地球物理学报, 42(1) 41 - 52
- 杨文采, 张春贺, 朱光明. 2002. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体. 地球物理学报, 45(3) 370 - 384
- 杨晓松, 金振民. 1998. 大陆科学钻探中岩石物理性质研究的意义. 地学前缘, 5(4) 338 - 346
- 余钦范, 姚长利, 孟小红. 2002. 苏北大陆科学钻探靶区岩石物理性质. 地球物理学报, 45(1) 93 - 100
- 赵志丹, 谢鸿森, 周文戈. 2001. 大别山榴辉岩的密度和波速及其对壳-幔循环的启示. 矿物岩石地球化学通讯, 20(1) 52 - 57