

# 大别山地区岩石高压弹性波速及其对岩石圈组成和壳-幔循环的限制\*

赵志丹<sup>1\*\*</sup> 谢鸿森<sup>1</sup> 周文戈<sup>1</sup> N. I. Christensen<sup>2</sup> 张泽明<sup>3</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所地球动力学高温高压开放实验室, 贵阳 550002;

2. Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin, Madison, WI 53706, USA;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

**摘要** 在室温和等静水压下测定了大别超高压变质带榴辉岩和麻粒岩至 1 GPa 压力下的 P 波和 S 波速度. 研究表明,超高压榴辉岩具有高密度( $3.3 \sim 3.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )、高波速和弱的各向异性(1.4% ~ 2.6%),麻粒岩呈现了低的密度( $2.8 \sim 3.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )和波速、高的 Poisson 比(0.28 ~ 0.29),高压榴辉岩具有最强的各向异性(6.1% ~ 8.4%). 岩石波速同深地震测深剖面对比表明,大别造山带下地壳可能存在榴辉岩,但是数量应很少,而上地幔具有同超高压榴辉岩或者蛇纹石化/含水纯橄岩相似的地震波速度. 推测地壳物质以榴辉岩的形式,通过拆沉作用进入地幔,少部分榴辉岩折返回地壳.

**关键词** 大别山 榴辉岩 弹性波速 各向异性 Poisson 比

在高温高压下研究岩石和矿物的物理性质并同深部岩石圈地球物理探测获得的资料进行对比,来了解地球内部的组成和状态是目前进行深部研究的一种重要方法. 榴辉岩是经受了高压超高压变质的高密度岩石,对其弹性特征的研究有助于了解深部岩石圈的结构和组成、探讨高压超高压岩石在壳-幔循环中的作用. 对榴辉岩的弹性波速进行系统的测定和研究只有近年来才有报道,如 Fountain 等在压力达 0.6 GPa 条件下测定了挪威 Bergen Arcs 地区 13 个榴辉岩的纵波速度<sup>[1]</sup>,高山等<sup>[2]</sup>和 Kern 等<sup>[3]</sup>测定了大别山地区 7 个榴辉岩和其他各类岩石共 30 个样品的高温高压(至 0.6 GPa 和 600°C)地震波速,Zhao 等测定了压力至 5 GPa 的 10 个榴辉岩的纵波速度<sup>[4]</sup>. 本研究选择大别山地区的榴辉岩和麻粒岩样品进行了静水压力至 1 GPa 条件下 3 个方向的 P 波和 S 波速度的测定,并详细探讨了榴辉岩的弹性特征及其对下地壳与上地幔组成和壳-幔循环的限制.

## 1 样品和实验

### 1.1 样品

近年来,大别高压超高压变质带在变质地质学、岩石学和矿物学等方面不断取得新进展<sup>[5]</sup>. 该带被进一步划分为超高压带、高压带、麻粒岩带<sup>[6]</sup>. 我们对湖北、安徽和河南境内大

2000-01-20 收稿,2000-03-30 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:49672142)

\*\* 现在地址:中国地质大学(北京)地学院,北京 100083

别山地区主要变质带的重点露头进行了野外考察并采集了样品。本文的实验样品分别采自超高压变质带、高压变质带和麻粒岩区(表1)。其中超高压岩石为柯石英榴辉岩,  $\text{SiO}_2$  含量为 41.27% ~ 50.21%; 高压带岩石除 LW965 是蛇纹石化纯橄岩外, 其他为榴辉岩或榴闪岩,  $\text{SiO}_2$  含量为 43.38% ~ 47.78%; 麻粒岩采自惠兰山, 2 个样品  $\text{SiO}_2$  含量分别是 50.13% 和 43.46%。

## 1.2 实验

选择无裂隙和无岩脉穿插与后期蚀变的新鲜岩石作为样品, 实验前进行了薄片鉴定(表1)和岩石化学分析。密度和波速测定均在美国 Wisconsin 大学(Madison 分校)地质与地球物理系完成。每个样品按岩石组构在 3 个相互垂直的方向上( $X$  方向平行于线理,  $Y$  方向垂直于线理,  $Z$  方向垂直于面理)分别钻取 1 个圆柱岩芯, 加工成直径为 2.54 cm, 长约 5 cm 的圆柱体, 圆柱体两端面抛光并相互平行, 通过对质量和体积精确测定得到其密度。用铜片包裹焊接封闭, 以防止传压介质高压油进入样品, 再将样品置于橡胶中, 与油进一步隔绝。纵波速度( $V_P$ )和横波速度( $V_S$ )用脉冲透射法测定, 测量误差低于 1%。实验技术和方法详见文献[7]。测量在室温和等静水压下完成, 最高压力是 1.0 GPa(相当于约 35 km 深度), 每个圆柱体获得了 10 个  $V_P$  和 10 个  $V_S$  数据, 每个样品 3 个圆柱, 共获得 30 个  $V_P$  和 30 个  $V_S$  数据。

表 1 实验样品的产地和矿物组成

岩带	样品号	产地	岩石名称	矿物组成 <sup>a)</sup>
超高压带	SH967	潜山双河	榴辉岩	40 grt, 25 hbl, 10 cpx, 10 ep, 10 ms, 5(rt, zo, ap)
	SM961	太湖石马	柯石英榴辉岩	40 grt, 55 omp, 5(rt, mgs, hbl, qtz)
	WM962	潜山五庙	柯石英榴辉岩	45 grt, 45 cpx, 10(hbl, ms, mgs, ep, rt, qtz)
	BM961	英山巴茅街	柯石英榴辉岩	35 grt, 25 cpx, 15 hbl, 10 pl, 5 ms, 5 qtz, 5(ap, rt)
高压带	GQ961	黄陂高桥	榴辉(闪)岩	35 grt, 40 hbl, 10 gln, 10 cc, 5(ms, qtz, mt)
	XD962	大悟熊店	榴辉岩	45 grt, 35 cpx, 10 hbl, 5 ep, 3 qtz, 2(rt, ms, ap, spn)
	XD966	大悟熊店	榴辉岩	38 grt, 30 cpx, 20 hbl, 7 ep, 3 qtz, 2(rt, ap, cc)
	XH961	大悟宣化店	榴辉岩	25 grt, 35 tr, 20 zo, 10 cpx, 5 ms, 5(rt, mt)
	QJ961	新县千斤河棚	榴辉(闪)岩	35 grt, 45 hbl, 10 qtz, 3 pl, 5 spn, 1 mt, 1 ep
	LW965	大悟吕王	蛇纹石化纯橄岩	93 sep, 5 mt, 2 ol
	麻粒岩区	HL963	罗田惠兰山	黑云二辉麻粒岩
HL969		罗田惠兰山	角闪二辉麻粒岩	45 pl, 40 cpx, 5 opx, 5 hbl, 3 bi, 2(mt, qtz)

a) ap = 磷灰石; bi = 黑云母; cc = 方解石; cpx = 单斜辉石; ep = 绿帘石; gln = 蓝闪石; grt = 石榴石; hbl = 角闪石; mgs = 菱镁矿; ms = 白云母; mt = 磁铁矿; ol = 橄榄石; omp = 绿辉石; opx = 斜方辉石; pl = 斜长石; qtz = 石英; rt = 金红石; sep = 蛇纹石; spn = 榍石; tr = 透闪石; zo = 黝帘石

## 2 实验结果

图 1 是样品 XH961 的波速-压力关系图, 代表了 12 个实验样品的基本特征。波速随压力增大表现出前后两段特征, 其中前一段是在低压范围内( $< 0.2$  GPa),  $V_P$  和  $V_S$  快速增大, 后一段是在 0.2 ~ 1.0 GPa 范围内, 波速增加缓慢, 并且呈现出线性增大趋势。前一段代表岩石中微裂隙依然存在, 约 0.2 GPa 以后的线性趋势表明岩石中微裂隙已经闭合, 体现了各种岩石的本质特征。将样品在 0.2 ~ 1.0 GPa 内的波速进行线性回归得到直线的截距和斜率, 分别是岩石在 0 GPa 时的速度和速度对压力的偏微商( $\partial V_P/\partial P$  和  $\partial V_S/\partial P$ )。根据每个样品在 3 个方向的结果, 计算样品的平均密度、1.0 GPa 时的平均速度、0.2 ~ 1.0 GPa 范围内 Poisson 比和  $V_P$  各向异性的平均值, 结果列于表 2 中。

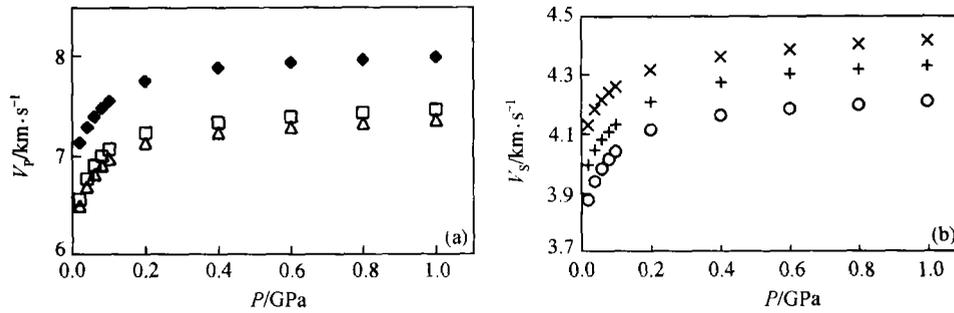


图 1 大别山榴辉岩(样品 XH961)纵波速度(a)和横波速度(b)随压力变化图

(a) ◆为 X, □为 Y, △为 Z; (b) ×为 X, +为 Y, ○为 Z

表 2 大别山地区岩石弹性波速及有关参数

样品号	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	$V_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$		$\frac{\partial V_p}{\partial P}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(\text{GPa})^{-1}$	$V_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$		$\frac{\partial V_s}{\partial P}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(\text{GPa})^{-1}$	Poisson 比 <sup>a)</sup>	$A\cdot V_p/\%$ <sup>b)</sup>
		$P=0\text{ GPa}$	$P=1\text{ GPa}$		$P=0\text{ GPa}$	$P=1\text{ GPa}$			
超高压带									
SH967	3.501	7.796	8.125	0.363	4.433	4.546	0.127	0.268	1.441
SM961	3.591	8.106	8.219	0.123	4.528	4.570	0.046	0.275	2.563
WM962	3.475	8.077	8.256	0.196	4.644	4.739	0.103	0.254	1.759
BM961	3.314	7.177	7.590	0.446	4.139	4.211	0.074	0.271	2.370
高压带									
GQ961	3.453	7.420	7.726	0.332	4.301	4.428	0.137	0.253	6.272
XD962	3.445	7.583	7.879	0.319	4.391	4.436	0.050	0.261	6.122
XD966	3.101	6.999	7.355	0.393	4.278	4.417	0.155	0.212	6.372
XH961	3.270	7.357	7.606	0.271	4.204	4.315	0.123	0.261	8.415
QJ961	3.073	6.523	6.772	0.256	3.787	3.919	0.146	0.243	7.882
LW965	2.618	5.847	6.058	0.225	2.951	2.978	0.028	0.371	2.410
麻粒岩区									
HL963	2.848	6.050	6.356	0.334	3.389	3.498	0.118	0.279	3.058
HL969	3.108	6.625	6.878	0.271	3.632	3.689	0.062	0.294	3.077

a) 样品在 0.2~1.0 GPa 压力范围内的 Poisson 比平均值; b) 样品在 0.2~1.0 GPa 范围内纵波各向异性的平均值

## 2.1 密度和波速

采自大别山不同变质带的岩石具有明显不同的密度和波速,而且 12 个岩石的  $V_p$  和  $V_s$  同密度均有较好的线性关系(图 2)。超高压榴辉岩为高密度高波速,麻粒岩则为相对低的密度和波速,而高压榴辉岩介于以上两者之间(表 2)。波速的大小主要是由矿物单晶的弹性特征和矿物含量决定的,超高压榴辉岩同高压榴辉(闪)岩相比,含有更多的高密度高波速的矿物(石榴石、绿辉石),而组成麻粒岩的主要是斜长石和辉石。因此上述成分相近的岩石( $\text{SiO}_2$  含量为 41wt%~51wt%),遭受变质作用程度愈高,其岩石的密度和波速愈大。样品 LW965 是蛇纹石化纯橄岩,在 1 GPa 时,其  $V_p$  和  $V_s$ (表 2)较之新鲜纯橄岩(分别为 8.4 和 4.8  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )<sup>[8]</sup>降低了约 28%~38%,表明蛇纹石化可以导致橄榄石地幔的地震波速降低。实验样品  $V_p$  和  $V_s$  对压力的偏微商分别为 0.123~0.446 和 0.028~0.155  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(\text{GPa})^{-1}$ 。上述结果同已有的测定结果<sup>[1-4]</sup>和统计结果<sup>[8-10]</sup>非常一致。

## 2.2 波速各向异性

岩石波速各向异性 (Anisotropy) 定义为  $A(\%) = [(V_{\text{最大}} - V_{\text{最小}}) / V_{\text{平均}}] \times 100\%$ , 表示由于存在矿物晶格优选方位而导致的波速在 3 个方向上速度的差异. 对超高压榴辉岩纵波各向异性 ( $A - V_P$ ) 的测定结果 (1.441% ~ 2.563%, 表 2) 同已有测定结果 3%<sup>[1]</sup> 和 1.95% ~ 2.07%<sup>[2]</sup>、统计结果 0.9% ~ 2.7%<sup>[9]</sup> 十分吻合, 超高压榴辉岩如此弱的各向异性, 是变质岩中的最低值. 超高压榴辉岩主要由石榴石 (35% ~ 45%) 和绿辉石 (10% ~ 55%) 组成, 其中石榴石属等轴晶系, 各向同性, 因此超高压榴辉岩的各向异性是由单斜晶系的绿辉石单晶的各向异性决定的. 高压榴辉岩  $A - V_P$  明显高于超高压榴辉岩, 主要由于它们多数已退变质成榴闪岩, 含有较多的角闪石, 其各向异性更接近于斜长角闪岩的特征<sup>[9]</sup>.

## 2.3 Poisson 比

Poisson 比是鉴别不同种类岩石弹性特征的一个重要参数<sup>[8]</sup>, 它同时包含了纵波和横波的信息, 例如镁铁质岩石在递进变质作用中, 尽管岩石的  $V_P$  和  $V_S$  逐渐增大, 但 Poisson 比的变化则不同: 绿片岩相/角闪岩相 (0.26) — 麻粒岩相 (0.28) — 榴辉岩相 (0.27)<sup>[8]</sup>. 本次实验样品的 Poisson 比均随压力增大而变大, 在 0.2 ~ 1.0 GPa 压力范围内则趋于恒定, 其平均值分别是: 蛇纹石化纯橄岩最高 (0.371), 麻粒岩次之 (0.279 ~ 0.294), 超高压榴辉岩 (0.254 ~ 0.275) 和高压榴辉岩 (0.212 ~ 0.261) 较低. 其中超高压榴辉岩测定值同统计结果<sup>[8,10]</sup> 一致, 而高压榴辉岩的 Poisson 比很低, 同花岗片麻岩接近<sup>[8]</sup>, 值得进一步研究. 另一重要结果是, 蛇纹石化可以大大提高纯橄岩的 Poisson 比.

## 3 讨论

横穿大别造山带的深地震测深剖面建立了大别山和邻区地壳的基本结构和二维密度、P 波、S 波和 Poisson 比模型<sup>[11,12]</sup>, 为应用岩石波速探讨大别山地区下地壳和上地幔的组成提供了基础资料.

### 3.1 大别山下地壳的组成

大别造山带地壳在 3 km 深度以下就开始显示高速的特征. 下地壳  $V_P$  为 6.9 ~ 7.0  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ , Poisson 比为 0.272 ~ 0.282, 明显高于南部的扬子地台 (6.8  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$  和 0.265) 与北部的华北地台 (6.7  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$  和 0.265). 这一高速下地壳被认为同超高压岩石有关<sup>[11]</sup>, Zhao 等计算出是含有 11.6% 的榴辉岩引起的<sup>[4]</sup>. 在下地壳温压条件下, 岩石为麻粒岩相. 将我们测得的 1 GPa 时麻粒岩和榴辉岩的速度, 应用榴辉岩和麻粒岩的温度系数<sup>[2]</sup> 进行温度校正 (校正中认为大别山为平均热流, 35 km 深度的温度约为 550°C), 计算出样品在 35 km 深度的速度和 Poisson 比, 连同大别山, 华北和扬子地台下地壳的参数, 都表示在纵波 Poisson 比关系图中 (图 3), 应用同样方法将高山等测定的<sup>[2]</sup> 和 Christensen 统计的<sup>[6]</sup> 基性麻粒岩结果也分别投点于图 3 中. 图中结果表明, 我们测定的麻粒岩和榴辉岩同大别山下地壳的 P 波和 Poisson 比均有差

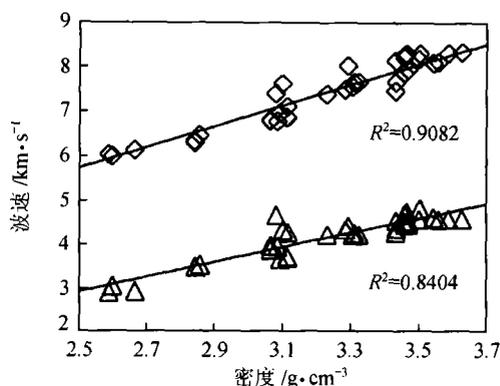


图 2 大别山岩石纵波和横波同密度关系图  
◇ 纵波速度, △ 横波速度

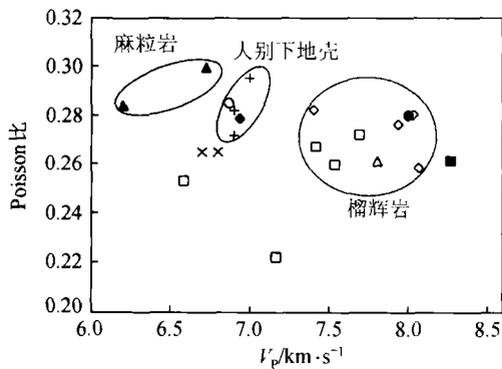


图 3 大别山地区下地壳和上地幔与岩石的 Poisson 比-纵波速度对比图(均已换算至 35 km 深度)

图例和数据来源:  $\diamond$  超高压榴辉岩, 本文;  $\square$  高压榴辉岩, 本文;  $\blacktriangle$  麻粒岩, 本文;  $\circ$  基性麻粒岩<sup>[8]</sup>;  $\blacklozenge$  基性麻粒岩<sup>[2]</sup>;  $\times$  华北和扬子地台地壳<sup>[12]</sup>;  $+$  大别山下地壳<sup>[12]</sup>;  $\bullet$  大别山上地幔<sup>[12]</sup>;  $\blacksquare$  纯橄岩<sup>[8]</sup>;  $\blacktriangle$  辉石岩<sup>[8]</sup>

别, 其中麻粒岩具有相对高的 Poisson 比和低的  $V_p$ , 而榴辉岩则有相对高的波速和低的 Poisson 比, 因此下地壳的组成可能由本文的黑云(角闪)麻粒岩和高压超高压榴辉岩 2 个端员共同组成, 即下地壳可能含有一些榴辉岩, 这同其他推测和计算一致<sup>[4,12]</sup>. 另一方面我们也看到, 高山等测定的惠兰山基性麻粒岩<sup>[2]</sup>和对全球基性麻粒岩统计值<sup>[9]</sup>却同大别山下地壳吻合很好(图 3), 因此大别山下地壳组成存在另一种可能, 即单独由基性麻粒岩组成, 下地壳可能不存在榴辉岩或含量很少.

### 3.2 大别山上地幔的组成

深地震测深结果表明, 大别造山带下方莫霍界面是一级间断面, 既莫霍面为地震学的地壳/上地幔分界. 上地幔顶部的  $V_p$  为  $7.9 \sim 8.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

(平均  $8.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $V_s$  为  $4.42 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , Poisson 比高于 0.28<sup>[11,12]</sup>. 将纯橄岩和辉石岩的波速<sup>[8]</sup>也分别换算到上地幔顶部(35 km)的温度和压力条件下, 并同大别山上地幔的  $V_p$  和 Poisson 比一起投点在图 3 中, 可以发现大别造山带的上地幔同超高压榴辉岩的地震波速特征比较吻合, 而纯橄岩和辉石岩虽波速相近但 Poisson 比低(0.261), 因此具有较低 Poisson 比的橄榄石或辉石为主的上地幔岩石组成模型同地震测深结果存在差别. 单从地震波速特征来看, 超高压榴辉岩是构成大别造山带上地幔的候选岩石之一. 前文提及, 蛇纹石化会提高纯橄岩的 Poisson 比, 而另外的研究表明<sup>[13]</sup>, 流体的存在也可以明显提高 Poisson 比, 因此含少量流体或者轻度蛇纹石化的纯橄岩也会具有大别山上地幔的地震波速特征. 无论是超高压榴辉岩, 还是含水或蛇纹石化纯橄岩的上地幔组成模型, 都需要得到进一步验证.

### 3.3 榴辉岩与壳-幔循环

榴辉岩是在拆沉作用(delamination)中被拆沉的地壳物质吗? 超高压变质作用是实现壳-幔循环的一种途径吗? 对超高压岩石的弹性波速和密度的研究, 为解释这些过程提供了实验证据.

榴辉岩相变质作用被认为可以发生在俯冲或碰撞增厚的大陆地壳的底部或上地幔中(深度可达 120 km), 在榴辉岩形成过程中, 伴随着密度和速度的增大, 本文在常温常压下测定的新鲜超高压榴辉岩的密度为  $3.4 \sim 3.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 明显高于其他地幔岩石(石榴石橄榄岩为  $3.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 辉石岩和纯橄岩为  $3.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )<sup>[9]</sup>, 也高于上地幔顶部的密度(大别山地区为  $3.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )<sup>[12]</sup>. Saxena 应用多种模型计算的地幔密度在 6 GPa ( $> 180 \text{ km}$ ) 时也仅为  $3.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ <sup>[14]</sup>. 因此超高压榴辉岩同上地幔之间的密度差值 ( $> 0.2 \sim 0.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), 可能导致俯冲至地幔深部的一定体积的超高压榴辉岩达到或超过下伏的地幔岩石所能承受的临界重量, 进而脱离其上部密度较小的俯冲陆壳, 拆沉进入更深的地幔, 并参与构成地幔源区, 这就是目前认为的拆沉作用模式, 并且已经得到了地球化学证据的支持<sup>[15,16]</sup>. 因此, 地壳物质是以高密度榴辉岩的形式被拆沉进入深部地幔的. 与拆沉的榴辉岩断裂并脱离后的俯冲陆壳夹带

少量超高压榴辉岩,因密度低于上地幔而受到浮力作用,快速折返至地壳内或通过其他构造过程暴露地表,构成了我们现在看到的榴辉岩.由此可以说,榴辉岩的形成包含了2个统一的过程,一部分形成后进入地幔,另一部分折返至地表,榴辉岩的形成代表了壳-幔循环过程.超高压岩石可能成为解释一些地球动力学问题的突破口.

### 参 考 文 献

- 1 Fountain D M, et al. Eclogite-facies shear zones-deep crustal reflectors? *Tectonophysics*, 1994, 232: 411
- 2 高山,等. 大别超高压榴辉岩高温高压下地震波速和密度的初步实验研究——对造山带地壳深部组成和莫霍面性质的启示. *科学通报*, 1997, 42(8): 862
- 3 Kern H, et al. 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*, 1999, 301: 191
- 4 Zhao Z, et al. Compressional wave velocities in eclogites of the Dabieshan, Central China to 5.0 GPa: A preliminary result. *The Review of High Pressure Science and Technology*, 1998, 7: 12
- 5 从柏林,等. 大别山-苏鲁超高压变质带研究的最新进展. *科学通报*, 1999, 44(11): 1127
- 6 游振东,等. 东秦岭大别超高压超高压变质带. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998. 7~12
- 7 Christensen N I. Measurements of dynamic properties of rock at elevated temperatures and pressures. In: Pincus H J, Hoskins E R, eds. Philadelphia, Pa: Measurements of Rock Properties at Elevated Pressures and Temperatures. American Society for Testing and Materials, 1985. 93~107
- 8 Christensen N I. Poisson's ratio and crustal seismology. *J Geophys Res*, 1996, 101(B2): 3139
- 9 Christensen N I, et al. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *J Geophys Res*, 1995, 100(B7): 9761
- 10 Rudnick R L, et al. Nature and composition of the continental crust: A lower crust perspective. *Reviews of Geophys*, 1995, 33(3): 267
- 11 王椿镛,等. 大别造山带的地壳结构研究. *中国科学*, 1997, 27(3): 221
- 12 王椿镛,等. 大别造山带地壳S波速度结构. *地球物理学报*, 40(3): 337
- 13 Christensen N I. Pore pressure and oceanic crustal seismic structure. *Geophys J R Astron Soc*, 1984, 79: 411
- 14 Saxena S K. Earth mineralogical model: Gibbs free energy minimization computation in the system MgO-FeO-SiO<sub>2</sub>. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60(13): 2379
- 15 Gao S, et al. How mafic is the lower continental crust? *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 101
- 16 李曙光,等. 大别山俯冲陆壳的再循环——地球化学证据. *中国科学, D辑*, 1997, 27(5): 412