

# 汉诺坝地区下地壳与壳-幔过渡带 岩石波速实验研究\*

樊祺诚<sup>1,2</sup> 隋建立<sup>1,2</sup> 张宏福<sup>1</sup> 翟明国<sup>1</sup> 谢鸿森<sup>3</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

**摘要** 通过对汉诺坝新生代玄武岩中镁铁质麻粒岩相斜长辉石岩、榴辉岩相石榴辉石岩和辉石岩捕虏体, 以及普通的太古代地体麻粒岩, 进行高温高压下的波速测定和研究表明: 高  $V_p$  (7.0~8.0 km/s) 镁铁质捕虏体揭示现今下地壳和壳-幔过渡带组成特征, 为幔源岩浆底侵导致地壳垂向增生和壳-幔过渡带形成提供了新证据; 低  $V_p$  (<7.0 km/s) 太古代地体麻粒岩, 乃早期下地壳或上部下地壳的特点.

**关键词** 下地壳及壳-幔过渡带 镁铁质捕虏体 波速 汉诺坝地区

近年来在汉诺坝新生代玄武岩中发现岩浆底侵成因镁铁质麻粒岩/麻粒岩相、榴辉岩相捕虏体的研究, 对现今下地壳和壳-幔过渡带提供了全新的认识<sup>[1-6]</sup>. 本文通过高温高压下麻粒岩相、榴辉岩相和辉石岩捕虏体纵波速度测定和原位波速计算, 同时对比研究了邻区太古代克拉通地体麻粒岩, 揭示现今下地壳与壳-幔过渡带的组成特征.

## 1 岩石样品和实验方案

汉诺坝麻粒岩相和榴辉岩相捕虏体, 是中生代

晚期幔源岩浆底侵于壳-幔边界形成后被新生代火山快速携至地表, 基本上保存了原岩的特点, 故最能代表现今下地壳和壳-幔过渡带的岩石组成. 现今下地壳镁铁质麻粒岩/麻粒岩相捕虏体以辉石+斜长石组合的斜长辉石岩为主, 其他中酸性或长英质捕虏体极少<sup>[2-3]</sup>. 榴辉岩相捕虏体以辉石+石榴石组合的石榴辉石岩为代表, 与尖晶石橄榄岩、辉石岩等混合组成壳-幔过渡带. 斜长辉石麻粒岩是最普通的太古代地体麻粒岩. 本次实验选取的代表性实验样品列于表1, 其中具典型的斜长石与辉石互层状堆

表1 实验样品岩性、矿物组成与主要化学成分<sup>a)</sup>

层位	样号	岩石名称	矿物组合	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Mg'	密度
现今	HD71	麻粒岩	pl <sub>15</sub> cp <sub>x45</sub> op <sub>x40</sub>	50.79	9.01	10.71		11.33	15.64	72.2	3.17
下地壳	DM9856	相斜长	pl <sub>35</sub> cp <sub>x40</sub> op <sub>x25</sub>	51.33	13.82	7.65		12.45	11.30	72.5	3.11
	DM9855	二辉岩	pl <sub>45</sub> cp <sub>x30</sub> op <sub>x25</sub>	51.93	15.18	5.55	1.88	8.97	11.97	76.9	3.07
壳-幔 过 渡 带	WD951	榴辉岩相	ol <sub>15</sub> cp <sub>x45</sub> gt <sub>40</sub>	46.98	11.7	4.11	1.69	12.89	18.67	85.6	3.24
	WD958	石榴辉石岩	ol <sub>20</sub> cp <sub>x40</sub> gt <sub>40</sub>	45.39	13.45	5.09	0.88	10.31	21.90	87.7	3.30
	DA-61	黑色二辉岩	cp <sub>x35</sub> op <sub>x65</sub>	49.94	4.23	9.93	2.16	6.63	24.57	80.1	3.27
	DM9843	绿色二辉岩	cp <sub>x10</sub> op <sub>x90</sub>	52.50	5.70	5.92	2.20	4.34	28.00	87.8	3.29
早期 下地壳	MJ9806	斜长辉石 麻粒岩	Pl <sub>60</sub> cp <sub>x40</sub>	50.55	12.35	9.81	7.03	8.91	4.61	38.8	2.93

a) 除 MJ9806 采自怀安蔓菁沟, 其余样品均采自汉诺坝; 密度采用静水力学方法, 在室温 1 大气压条件下测定;  $Mg' = 100 Mg / (Mg + Fe^{2+})$ ; 分析者: 中国科学院地质与地球物理研究所 (HD-71 和 DM9856 的全岩化学成分由矿物化学成分及体积百分比求得)

2002-01-24 收稿, 2002-03-28 收修改稿

\* 中国科学院知识创新工程(批准号: KZCX1-07)和国家自然科学基金(编号: 49772112)资助项目

E-mail: qcfan@public3.bta.net.cn

晶结构的 DM9855 制作了互为倒置的 DM9855a(上层辉石下层斜长石)和 DM9855b(上层斜长石下层辉石)2 个样品. 镁铁质捕虏体的最大特点是富  $Mg'$  (变化于 72~88), 而太古代地体麻粒岩的  $Mg'$  仅为 39, 显示两者化学组成上的显著差别.

捕虏体的温压估算结果表明, 汉诺坝地区下地壳和壳-幔过渡带分别相当于 33~40 和 40~45 km<sup>[1,6]</sup>. 世界上克拉通地区出露的地体麻粒岩一般形成于较低的温压环境 ( $T < 850^{\circ}C$ ,  $P$  为 0.5~1.0 GPa), 而通过幔源岩浆增生的下地壳则具有相对高的平衡温压条件 ( $T > 900^{\circ}C$  和  $P > 1.0$  GPa)<sup>[7]</sup>. 为探索现今下地壳和壳-幔过渡带的波速特点, 本次实验根据地质温压计获得的样品原位平衡温压条件进行相应的高温高压下波速测定, 将代表早期下地壳的地体麻粒岩、现今下地壳的麻粒岩相斜长二辉岩、壳-幔过渡带的榴辉岩相石榴辉石岩及辉石岩捕虏体的实验压力上限分别选定为 0.9, 1.2, 1.4 和 1.6 GPa, 有别于以往常规条件下 (一般  $P \leq 1$  GPa) 的波速测定.

## 2 实验方法

高温高压实验在中国科学院地球化学研究所地球深部物质实验室完成, 实验装置见文献[8]. 实验样品加工成长 33 mm、直径为 12 mm 的圆柱体. 实验前进行高压腔体的温度和压力校正. 样品室的温度标定采用 Pt<sub>90</sub>Rh<sub>10</sub>-Pt 热电偶进行, 温度测量误差小于  $\pm 5^{\circ}C$ , 温度测量结果未经压力校正. 样品室压力采用铜的高温熔融曲线及石英-柯石英相变方法标定, 压力测量误差小于 1%. 实验过程中, 首先以 0.01 GPa/min 的速率升压至所需压力, 待稳定 10 min 后, 以 5^{\circ}C/s 的速率升温至所需温度, 恒温 35 min, 再进行纵波速度测定, 以此反复直至纵波速度测量结束. 实验过程中未控制氧逸度. 实验均在一个方向上进行, 未考虑高温高压下岩石波速的各向异性特征.

## 3 实验结果和讨论

### 3.1 室温下纵波速度与压力的关系

室温下样品波速与压力的关系如图 1 所示, 可以看出不同样品在恒定的压力条件下波速的变化. 当实验压力小于 0.2 GPa 时, 样品  $V_p$  值随压力升高急剧增加, 表明样品内部裂隙闭合的过程<sup>[9]</sup>. 当实验压力大于 0.2 GPa 时, 3 组样品裂隙均趋于闭合,  $V_p$  值均随压力升高而逐渐增加, 呈现较好的线性关系.

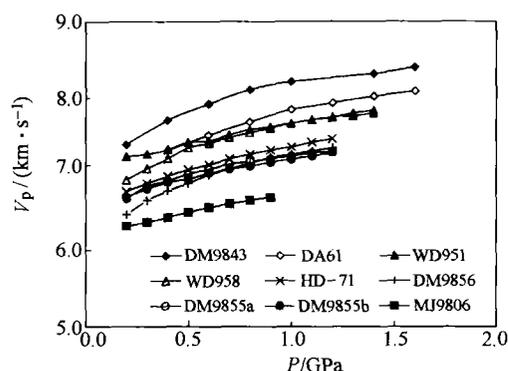


图 1 室温下样品纵波速度随压力的变化

### 3.2 恒压下纵波速度与温度的关系

恒压下纵波速度与温度的关系结果如图 2 所示. 总体上, 在一定的压力条件下, 实验样品均显示出波速随温度升高而降低的趋势. 壳-幔过渡带样品中的 2 个榴辉岩相石榴辉石岩在 400~500^{\circ}C 左右波速下降较快, 又以 WD951 最显著; 另外 2 个辉石岩样品的波速最高, 随温度升高波速呈逐渐降低的趋势, 没有显示波速的明显转折. 4 个下地壳麻粒岩相斜长二辉岩在 400^{\circ}C 时有一明显的转折点 (其中辉石含量较高的样品 HD-71 的转折点温度略高, 约 450^{\circ}C), 低于 400^{\circ}C 时波速降低非常缓慢, 高于 400^{\circ}C 时波速急剧下降. 地体麻粒岩 (MJ9806) 的波速转折点约在 750^{\circ}C, 低于 750^{\circ}C 波速随温度的变化幅度很小, 高于 750^{\circ}C 时波速才发生较明显的下降.

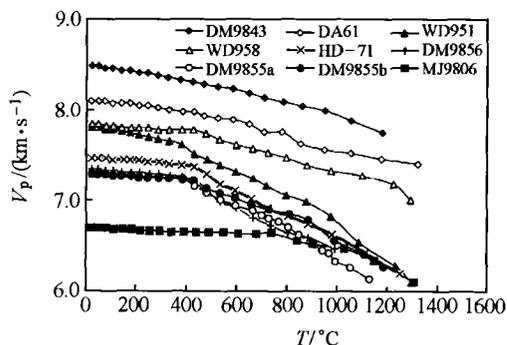


图 2 恒压下样品纵波速度随温度的变化

本次实验除了 2 个辉石岩, 其他样品均在不同温度点上出现波速转折, 称为声软化现象, 即随温度的升高波速明显下降. 声软化现象的原因可能是多方面的, 如相变、部分熔融、脱水等, 但对于麻粒岩相斜长二辉岩和榴辉岩相石榴辉石岩在 400~500^{\circ}C 条件下不大可能发生上述情况 (如相变和部分熔融), 也不存在脱水情况, 因为岩石中没有含水矿物. 所以最可能与热裂隙的产生有关, 但这要比以往实验中波速转

折温度(约 800℃)低得多<sup>[10~12]</sup>, 只有地体麻粒岩与以往的情况相似. 除了化学与矿物组成上的差别外, 本次采用的镁铁质捕虏体实验压力(1.2~1.6 GPa)明显高于以往麻粒岩的实验压力( $\leq 1$  GPa), 可能是导致前者在较低温度点发生波速转折的主要原因.

#### 4 原位波速的计算

岩石纵波速度是温度和压力的函数, 因此常温、常压下测量的波速不代表真实的样品原位波速. 为此, Kern 等<sup>[9,11]</sup>发展并完善了岩石原位波速的计算方法. 根据大量的实验结果, 他提出波速与温度和压力为简单的线性关系, 符合积分公式

$$V(z) = V(0) + \int_0^z \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \frac{dp}{dz} + \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \frac{dT}{dz} \right] dz, \quad (1)$$

其中  $V(0)$  是一个实测波速值,  $V(z)$  是给定温度和压力体条件( $z$ )下计算的波速, 即原位波速计算值. 根据 Kern 原始公式和实验依据, 我们可以获得实用简化公式为

$$V_1 = V_0 + dV/dP \cdot \Delta p + dV/dT \cdot \Delta T, \quad (2)$$

上式中  $V_0$  理论上可以有很多选择, 为了便于统一表示, 本文采用 0℃, 0 MPa 时的纵波速度.  $dV/dP$  和  $dV/dT$  分别是纵波速度的温度系数和压力系数, 是试验测量值.  $\Delta T$  和  $\Delta p$  分别是温度和压力的变化范围, 数值上等于样品的原位温度和压力.  $V_1$  为样品的原位纵波速度计算值.

实验计算结果显示, 汉诺坝捕虏体样品纵波速度与温度和压力的关系不完全是线性的, 尤其是在

高温和低压阶段. Kern 等<sup>[9,11]</sup>也在试验中发现了类似现象, 并给出了几种可能的解释, 一如我们在上文所作的解释. 实际上, 线性假设还有待于进一步的验证, 由于暂时没有新的方法, Kern 的原位波速计算不失为一种有益的探索.

根据样品原位温压条件的估算值<sup>[2,6]</sup>, 原位波速计算结果列于表 2. 汉诺坝麻粒岩相斜长二辉岩在 1.0~1.2 GPa 下, 波速变化值为 7.17~7.29 km/s, 与世界上基性麻粒岩的  $P$  波速度(平均  $V_p = (7.2 \pm 0.2)$  km/s)相当<sup>[13]</sup>. 同样压力下, 波速随岩石中辉石含量增加而升高, 如 HD-71 的辉石含量 85%, 其  $P$  波速度高达 7.29 km/s. 榴辉岩相石榴单斜辉石岩的  $P$  波速度(7.31~7.78 km/s)比世界上榴辉岩的  $P$  波速度( $(8.1 \pm 0.2)$  km/s)略偏低<sup>[13]</sup>, 可能由于样品的石榴石退变质分解为辉石、长石、玻璃等所致. 二辉岩中绿色二辉岩的  $P$  波速度(8.28 km/s)和黑色二辉岩  $P$  波速度(7.71 km/s)或高或低于榴辉岩的  $P$  波速度. 实验结果表明, 壳-幔过渡带的波速已明显高于下地壳, 并向上地幔过渡. 地体麻粒岩的  $P$  波速度(6.57 km/s)介于世界上中性麻粒岩与镁铁质麻粒岩之间, 远低于镁铁质捕虏体麻粒岩相斜长二辉岩的  $P$  波速度(7.17~7.29 km/s), 反映早期下地壳与现今下地壳在组成上的差异. 必须指出, 在麻粒岩地体中不乏高压麻粒岩<sup>[14]</sup>或高  $V_p$  的麻粒岩<sup>[4]</sup>, 但它们都是早期下地壳演化的特殊产物, 已与早期下地壳组成特征相去甚远. 本文选择斜长辉石麻粒岩(MJ9806)是太古代克拉通地体麻粒岩中最普通的样品, 作为研究早期下地壳具有代表性.

表 2 样品的原位  $P$  波速度计算结果<sup>a)</sup>

	$V_0 / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$dV/dP$ $\times 10^{-4} / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	$dV/dT$ $\times 10^{-4} / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	$T / \text{°C}$	$p / \text{MPa}$	$V_1$ $/ (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
HD-71	6.694	6.69	-2.26	900	1200	7.29
DM9856	6.423	8.34	-2.43	900	1200	7.21
DM9855a	6.718	5.29	-1.67	900	1200	7.20
DM9855b	6.650	5.45	-1.52	900	1200	7.17
WD951	7.149	4.94	-5.50	1050	1500	7.31
WD958	6.912	7.16	-1.92	1050	1500	7.78
DA61	6.986	7.61	-4.01	1050	1500	7.71
DM9843	7.248	10.13	-4.64	1050	1500	8.28
MJ9806	6.213	5.51	-1.01	800	800	6.57

a)  $V_0$  不是实测波速, 是 0℃, 0 MPa 下的波速, 根据  $P$  波速度温度曲线和压力曲线的线性外推获得;  $dV/dP$  和  $dV/dT$  分别是  $P$  波速度温度曲线和压力曲线的线性部分斜率;  $T$ ,  $P$  是样品原位温度压力条件的估计值;  $V_1$  是样品的原位  $P$  波速度计算结果

总体上, 本文捕虏体样品具有高  $V_p$ , 可能与岩石的高  $Mg'$  (辉石、石榴石含量高)和相对高的实

验压力有关, 以往测定下地壳岩石波速的实验压力一般低于 1.0 GPa. 这客观反映了汉诺坝地区现今镁

铁质地壳和壳-幔过渡带的组成与波速特征.

## 5 讨论

探索下地壳和壳-幔过渡带的特征, 在岩石学研究基础上选择具代表性样品十分重要, 同时根据样品的原位平衡温压条件设计相应波速测定条件是波速实验的基础. 除了一个绿色二辉岩 ( $V_p = 8.28 \text{ km/s}$ ) 和地体麻粒岩 ( $V_p = 6.57 \text{ km/s}$ ) 外, 所有捕虏体样品的  $V_p$  均介于镁铁质麻粒岩或基性麻粒岩 ( $7.0 \sim 7.5 \text{ km/s}$ ) 和壳-幔过渡带或榴辉岩 ( $6.8 \sim 8.1 \text{ km/s}$ ) 之间<sup>[13,15]</sup>, 佐证了我国华北地区下地壳较普遍存在  $V_p > 7 \text{ km/s}$  的高速层的地球物理探测结果<sup>[16,17]</sup>. Bohlen<sup>[18]</sup> 曾设想有一个镁铁质层状下地壳, 捕虏体麻粒岩平衡压力一般大于地体麻粒岩, 故较典型的麻粒岩相地体应位于较高水平. 支持这一理论的证据之一是地震反射剖面显示地壳 30 km 深度以下的纵波速度大于  $7 \text{ km/s}$ , 表明下地壳存在密度较大的镁铁质物质<sup>[19]</sup>. 所以高  $V_p$  镁铁质捕虏体为现今下地壳和壳-幔过渡带存在提供了依据, 低  $V_p$  太古代地体麻粒岩, 推测为早期下地壳或上部下地壳, 从一侧面反映了汉诺坝地区下地壳的成因与演化. 实际上, 由于构造环境、演化历史和化学组成的不同, 全球下地壳纵波速度是变化很大的 ( $6.4 \sim 7.4 \text{ km/s}$ )<sup>[15]</sup>, 所以采取将古论今的方法研究现今下地壳势必得出错误的结论.

全球众多地学断面等地球物理探测资料揭示, 莫霍面并不都是一个截然的界面, 而是存在一个由基性、超基性岩浆底侵作用形成的过渡带<sup>[20]</sup>. Rudnick<sup>[21]</sup> 根据新生代火山中的捕虏体研究, 把莫霍面看成是壳-幔间岩性的过渡带, 即岩石学莫霍面, 同时发现大多数地区的下地壳是镁铁质的, 或至少地壳底部是镁铁质的. 近些年人工地震 COCORP 剖面、大地电磁测深及三维地震层析技术揭示出下地壳存在高速体和成层性及壳-幔过渡带. 地震反射获得的汉诺坝地区莫霍面深度约为  $42 \text{ km}$ <sup>[22]</sup>, 而由镁铁质捕虏体推导的本区岩石学莫霍面 ( $\sim 45 \text{ km}$ ) 略大于地震莫霍面<sup>[6]</sup>, 本文波速实验结果更加深了我们对岩浆底侵作用导致该区现今下地壳垂向增生和壳-幔过渡带形成的理解.

## 参 考 文 献

- 1 樊祺诚, 等. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. 科学通报, 1996, 41(3): 235
- 2 樊祺诚, 等. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球

- 化学. 科学通报, 1998, 43(2): 133
- 3 Chen S H, et al. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: Evidence from xenolith. *Lithos*, 2000, 56: 267
- 4 Gao S, et al. Measured and calculated seismic velocities and densities for granulites from xenolith occurrences and the adjacent exposed lower crustal sections: A comparative study from the North China craton. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(8B): 18965
- 5 Liu Y S, et al. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba Basalt, North China Craton: Implications for petrogenesis and lower crustal composition. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 2001, 65: 2589
- 6 樊祺诚, 等. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩——岩浆底侵作用新证据. 岩石学报, 2001, 17(1): 1
- 7 Rudnick R. Xenoliths-samples of the lower continental crust. In: Fountain D M, et al eds. *Continental Lower Crust*. Amsterdam-London-New York-Tokyo: Elsevier, 1992. 269
- 8 谢鸿森, 等. 高温高于条件下测量岩石矿物波速的新方法及其意义. 中国科学, B辑, 1993, 23: 861
- 9 Kern H, et al. Elastic velocities in rocks from a lower crustal section in southern Calabria (Italy). *Phys Earth Planet Inter*, 1985, 40: 147
- 10 Christensen N I, et al. Constitution of the lower continental crust based on experimental studies of velocities of in granulite. *Geol Soc Am Bull*, 1975, 86: 227
- 11 Kern H, et al. A model of velocity structure beneath Calabria, southern Italy, based on laboratory data. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 87: 325
- 12 邵济安, 等. 内蒙古东部早中生代壳幔过渡带-捕虏体岩石高温高压下弹性波速度实验证据. 中国科学, B辑, 2000, 30(增刊): 154
- 13 Rudnick R, et al. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Rev Geophys*, 1995, 33: 267
- 14 翟明国, 等. 中国华北太古宙高压麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学, 1992, B辑, 12: 1325
- 15 Holbrook W S, et al. The seismic velocity structure of the deep continental crust. In: Fountain D M, et al eds. *Continental Lower Crust*. Amsterdam-London-New York-Tokyo: Elsevier, 1992. 1
- 16 孙武城, 等. 华北东部地区地壳结构的初步研究. 地震地质, 1985, 7(3): 1
- 17 刘昌铨, 等. 江苏响水-内蒙古满都拉地学断面地震折射测深结果. 地震地质, 1991, 12: 193
- 18 Bohlen S R. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *J Geol*, 1987, 95: 617
- 19 Jackson I, et al. Measured and calculated elastic wave velocities for xenoliths from the lower crust and upper mantle. *Tectonophysics*, 1990, 173: 207
- 20 Fountain D M, et al. Exposed cross-sections through the continental crust: Implications for crustal structure, petrology and evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1981, 56: 263
- 21 Rudnick R W. Making continental crust. *Nature*, 1995, 375: 571
- 22 祝治平, 等. 北京-怀来-丰镇剖面地壳上地幔构造与速度结构研究. 地震学报, 1997, 19(5): 499