

⑦

716-721

## 黑云二长片麻岩——榴辉岩相变的纵波速度\*

周文戈 谢鸿森<sup>✓</sup> 郭捷 许祖鸣

P588.345

(中国科学院地球化学研究所, 高温高压地球动力学开放研究实验室, 贵阳 550002)

**摘要** 利用 YJ-3000t 压力机的弹性波速度测量装置在 4.5 GPa, 25~1360℃ 条件下测量了黑云二长片麻岩的纵波速度, 发现随温度升高, 岩石的纵波速度经历了缓慢下降-逐渐升高-缓慢下降的复杂过程, 详细观察相同条件下的实验产物证实黑云二长片麻岩向榴辉岩的转变是岩石纵波速度随温度升高而升高这一异常现象的主要原因, 讨论了岩石中矿物相变与岩石纵波速度变化的关系, 这一实验结果为初步了解陆陆俯冲过程中, 俯冲陆壳的弹性波速度结构演化提供了高温高压实验资料。

**关键词** 相变 纵波速度 黑云二长片麻岩 榴辉岩

相变是地球深部广泛发生的地质过程<sup>[1,2]</sup>, 它包括含水矿物脱水、固-固相变、变质反应及岩石部分熔融等, 已有学者在高温高压下研究了含水矿物脱水、固-固相变及岩石部分熔融过程中的弹性波速度<sup>[3-12]</sup>, 实测变质作用过程中的弹性波速度并不多见, Ringwood 利用单矿物弹性波速度资料讨论了从辉长石转变为榴辉岩后弹性波速度的变化, 进而探讨了莫霍面的性质<sup>[13]</sup>, Kern 等讨论了角闪岩相岩石转变为麻粒岩相岩石后弹性波速度变化, 并据此认为下地壳主要为麻粒岩相岩石<sup>[14]</sup>, 宋茂双等在 2.0~5.0 GPa 条件下测定了碱性橄榄玄武岩的纵波速度, 发现在 3.5~5.0 GPa, 520~855℃ 条件下, 随温度升高, 碱性橄榄玄武岩的纵波速度反而增大, 他们认为这是因为碱性橄榄玄武岩已经开始向榴辉岩转变造成的<sup>[15]</sup>, 本文在 4.5 GPa, 25~1360℃ 条件下测定了黑云二长片麻岩的纵波速度, 发现  $T=360\sim 915^\circ\text{C}$  时, 黑云二长片麻岩的纵波速度随温度升高而增大, 详细的实验产物鉴定表明, 黑云二长片麻岩向榴辉岩相岩石转变是岩石纵波速度随温度升高而增大的主要原因。

## 1 实验样品

实验样品为采集于云南哀牢山造山带水塘村的糜棱岩化黑云二长片麻岩, 样品青灰色, 致密块状, 糜棱结构, 主要组成矿物为石英(25%~35%)、斜长石(27%~38%)、钾长石(12%~17%)、黑云母(5%~12%), 次要矿物为磁铁矿(<3%)、磷灰石(<1%)、榍石(<1%)和锆石(<1%)。将岩石沿 X(平行线理, 平行面理)、Y(垂直线理, 平行面理)和 Z(垂直面理)3 个方向加工成 3 个高 32.5 mm, 直径 12 mm 的圆柱体, 3 个方向岩石的矿物含量略有差别, 其中 Z 方向岩石的黑云母含量较少, 主要矿物的电子探针分析结果见表 1。

1999-06-23 收稿, 1999-12-27 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 49774235)和高温高压地球动力学开放研究实验室基金资助项目

表 1 黑云二长片麻岩主要矿物探针分析结果<sup>a)</sup>

矿物	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Σ
Pl	64.36	23.69	0.03	4.43	0.11	0.14	0.04	6.80	0.17	0.01	0.13	99.91
Or	67.55	19.59	0	0.05	0	0.01	0.02	1.43	10.77	0.05	0	99.47
Bi	35.47	16.48	2.50	0.02	8.96	22.60	0.65	0.03	9.10	0.06	0	95.87

a) 中国科学院地球化学研究所工明再分析,加速电压 20 kV,电子束电流  $220 \times 10^{-7}$  A,电子束直径  $5 \mu$ ; Pl 为斜长石,Or 为钾长石,Bi 为黑云母

## 2 实验方法

岩石纵波速度测量是在中国科学院地球化学研究所地球深部物质实验室 YJ-3000t 压力机上进行的.实验方法与谢鸿森等所述方法基本相同<sup>[16]</sup>.高压腔体的温度和压力校正实验前进行.样品室的温度标定采用 Pt<sub>90</sub>Rh<sub>10</sub>-Rt 热电偶进行,温度测量误差小于  $\pm 5^\circ\text{C}$ ,温度测量结果未经过压力校正.样品室压力采用铜熔融曲线及石英-柯石英相变方法标定<sup>[17]</sup>,压力测量误差小于 1%.实验过程中,首先以  $4 \times 10^5$  Pa/s 的速率升压至 4.5 GPa,稳定 10 min 后,以  $10^\circ\text{C}/\text{s}$  的速率升温至所需温度,恒温 35 min,再进行纵波速度测定,以此反复至纵波速度测量结束.然后利用 X 方向的岩石样品以相同的样品组装,相同的实验程序,在相同压力不同温度点上获取观察岩石相变的实验样品.实验过程中未控制氧逸度.所测岩石纵波速度为非平衡相变条件下的纵波速度.

## 3 实验结果

图 1 表示了 4.5 GPa 室温至 1360°C 条件下黑云二长片麻岩 X, Y 和 Z 3 个方向的纵波速度 ( $V_p$ ) 随温度的变化趋势.这一变化趋势可以分为 AB, BC 和 CD 3 段:在 AB 段(室温至 630°C),黑云二长片麻岩 X, Y 和 Z 三个方向的纵波速度随温度升高而缓慢下降,其温度系数  $\left(\left(\frac{\partial V_p}{\partial T}\right)_p\right)$  为负值 ( $-9.32 \times 10^{-5} \sim -14.66 \times 10^{-5} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) (表 2). X 和 Y 方向岩石 BC 段的温度区间为 630 ~ 915°C, Z 方向岩石 BC 段的温度区间为 630 ~ 1030°C. BC 段主要特征是岩石纵波速度随温度增大而增大.这是一般固体物质中不常见的现象<sup>[5]</sup>. BC 段的温度系数为正 ( $8.45 \times 10^{-4} \sim 10.95 \times 10^{-4} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) (表 2). 更高温度下为 CD 段,这一温度段岩石的纵波速度再次逐渐下降,其温度系数为负 ( $-4.22 \times 10^{-5} \sim -17.73 \times 10^{-5} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

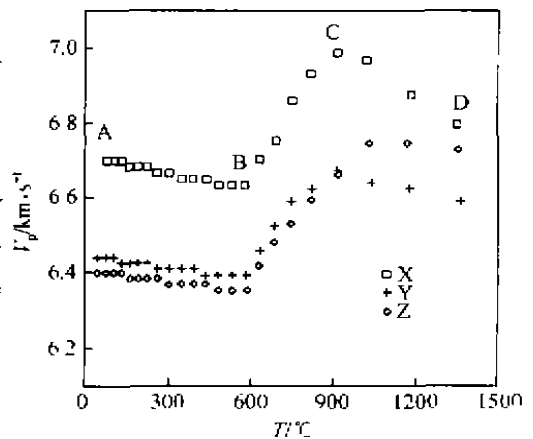


图 1 4.5 GPa, 室温至 1360°C 条件下黑云二长片麻岩纵波速度随温度的变化趋势

相同压力不同温度点 X 方向岩石实验产物的薄片观察、X 光粉晶衍射鉴定及电子探针分析表明,对应于岩石纵波速度变化的 3 个阶段,岩石中的矿物发生了不同的变化(表 3). 在 AB 段,  $T < 600^\circ\text{C}$ , 岩石中的矿物未发生变化. 而  $T = 600^\circ\text{C}$  时岩石中的黑云母已经开始脱水,同时

表 2 4.5 GPa, 25~1 360℃条件下黑云二长片麻岩纵波速度不同变化阶段的温度系数(单位:  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1}$ )

岩石	AB段	BC段	CD段
X方向	$-1.46579 \times 10^{-4}$	$1.09502 \times 10^{-5}$	$-1.77274 \times 10^{-4}$
Y方向	$-9.45658 \times 10^{-5}$	$8.47542 \times 10^{-4}$	$-4.22268 \times 10^{-5}$
Z方向	$-9.32257 \times 10^{-5}$	$8.58245 \times 10^{-4}$	$-5.588421 \times 10^{-5}$

出现柯石英(X光粉晶衍射鉴定)。在BC段,随温度升高,残留的黑云母减少,新生成的石榴石增加,柯石英的含量逐渐增加(图2(a))。光学显微镜下已脱水的黑云母形态模糊(图2(b)),背散射电子像则清楚地观察到了黑云母脱水形成的石榴石(图2(c))。新生成的石榴石及高温下其他矿物的成分见表4。CD段矿物组成又有了新变化。T=1 100℃时出现透长石及熔体。之后,随温度升高熔体含量逐渐增高,至1 250℃熔体含量达5 vol%,黑云母消失。

表 3 实验产物的矿物组成

样品号	压力/GPa	温度/℃	矿物组成 <sup>a)</sup>
1	$1.0 \times 10^{-4}$	25	Bi + Pl + Or + Q + Mt + Ap + Zi
2	4.5	300	Bi + Pl + Or + Q + Mt + Ap
3	4.5	450	Bi + Pl + Or + Q + Mt + Ap
4	4.5	600	Bi + Pl + Or + Q + Mt + Gt + Coe
5	4.5	715	Bi + Pl + Or + Q + Mt + Gt + Coe
6	4.5	860	Bi + Pl + Or + Q + Mt + Gt + Coe
7	4.5	1 100	Bi + Pl + San + Or + Q + Mt + Gt + Coe + Melt
8	4.5	1 185	Bi + Pl + San + Or + Q + Mt + Gt + Coe + Melt
9	4.5	1 250	Pl + San + Or + Q + Mt + Gt + Coe + Melt

a) Bi为黑云母,Pl为斜长石,Or为正长石,Q为石英,Mt为磁铁矿,Ap为磷灰石,Zi为锆石,Gt为石榴石,Coe为柯石英,San为透长石,Melt为熔体

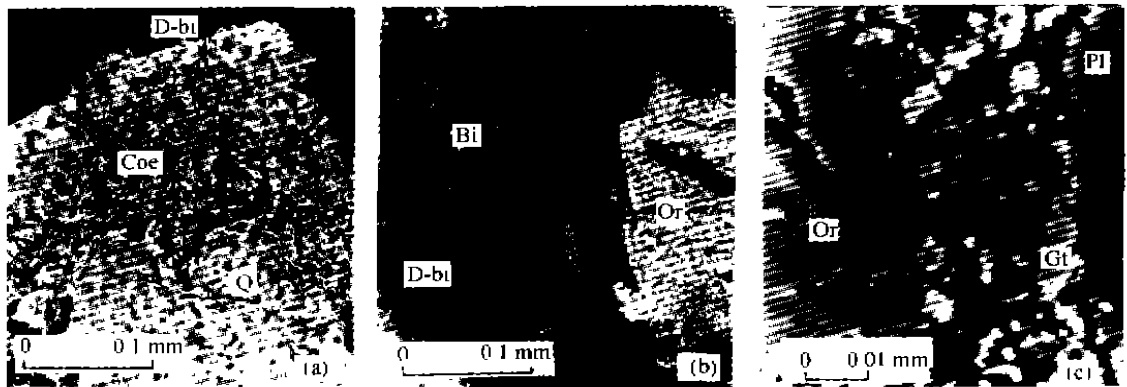


图 2 4.5 GPa, 860℃条件下实验产物的显微照片

(a) 新生成的柯石英(单偏光); (b) 残留的黑云母(单偏光); (c) 已脱水黑云母的背影散射电子像,可见新生的石榴石。Q为石英,Coe为柯石英,Bi为黑云母,D-bi为单偏光下已脱水的黑云母,Qr为正长石,Pl为斜长石,Gt为石榴石

## 4 讨论与结论

4.5 GPa条件下黑云二长片麻岩的纵波速度测量表明,在AB段( $T < 630\text{℃}$ ),岩石纵波速

表 4 实验产物主要矿物探针分析结果

矿物	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	总量
Pl <sup>a)</sup>	60.35	25.69	0	4.74	0.01	0	0.01	8.43	0.45	0	0.24	99.92
San <sup>a)</sup>	65.16	18.35	0.01	0.05	0.22	0	0.13	1.00	14.56	0	0	99.48
Bl <sup>b)</sup>	36.32	16.81	2.36	0.05	9.13	21.03	0.56	0.11	8.89	0.04	0	95.30
Grt <sup>a)</sup>	38.85	20.14	1.47	0.93	9.81	26.46	0.78	0.33	0.08	0.01	0.21	99.07
Melt <sup>a)</sup>	69.52	13.44	0.88	0.55	0.35	2.29	0.06	1.57	6.37	0.04	0.01	95.08

a) 4.5 GPa, 1250℃条件下实验产物中的矿物; b) 4.5 GPa, 600℃条件下实验产物中的矿物。分析条件见表 1。矿物代号同表 3。

度随温度升高而缓慢降低。这是结晶岩石常见的现象,说明当  $T = 600^\circ\text{C}$ , 岩石中石英转变为柯石英, 黑云母脱水反应产生的石榴石和水未对岩石纵波速度产生影响。这是因为柯石英、石榴石的水含量太低的缘故。

在 BC 段 ( $T = 630 \sim 915^\circ\text{C}$ ), 岩石纵波速度随温度升高而增大, 这是由于石榴石和柯石英对岩石纵波速度的影响大于水对岩石纵波速度的影响造成的。因为在这一温度段, 黑云母脱水反应继续进行, 新生石榴石和水的含量增多, 同时柯石英含量也增大。相对于岩石其他组份石英、斜长石、钾长石和黑云母而言, 柯石英和石榴石的纵波速度较高, 水的纵波速度较低(表 5), 石榴石和柯石英的出现有助于岩石纵波速度的提高, 而岩石中水的出现将会降低岩石的纵波速度。

表 5 矿物、水及榴辉岩和二辉橄榄岩的纵波速度

矿物或岩石	温度/℃	压力/GPa	$V_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
石英 <sup>[18]</sup>	25	$1.0 \times 10^{-4}$	6.05
石英 <sup>[19]</sup>	25	1.0	6.32
斜长石 <sup>[18]</sup>	25	$1.0 \times 10^{-4}$	6.61 ~ 6.65
斜长石 <sup>[19,20]</sup>	25	1.0	6.52 ~ 7.20
钾长石 <sup>[18]</sup>	25	$1.0 \times 10^{-4}$	5.57 ~ 5.93
钾长石 <sup>[20]</sup>	25	1.0	6.67
黑云母 <sup>[18]</sup>	25	$1.0 \times 10^{-4}$	6.08
柯石英 <sup>[21]</sup>	25	$1.0 \times 10^{-4}$	7.53 ~ 8.19
石榴石 <sup>[18]</sup>	25	$1.0 \times 10^{-4}$	9.33 ~ 7.70
石榴石 <sup>[22]</sup>	25	4.5	9.50
水 <sup>[23]</sup>	200	4.5	4.51
榴辉岩 <sup>[1]</sup>	25	4.5	7.17 ~ 10.17
二辉橄榄岩	850	2.0	8.51 ~ 9.12

在 CD 段 ( $T = 915 \sim 1180^\circ\text{C}$ ), 岩石纵波速度的缓慢降低可能是黑云母脱水反应的加剧, 柯石英含量的增加, 熔体的出现等多种因素影响的综合效应。Murase 和 Matsushima 等的实验证明, 0.5 ~ 2.0 GPa 条件下, 岩石中熔体的出现将大大减低岩石的弹性波速度<sup>[3-5]</sup>。尽管还没有学者报道熔体在 4.5 GPa 条件下的纵波速度值, 但是常压高温条件下熔体的纵波速度为

1) 赵志丹: 中国大别山、华北和青藏高原岩石弹性波速: 对岩石圈组成和壳-幔循环的启示。中国科学院地球化学研究所博士后研究报告, 1998。

2.53 ~ 2.96 km/s<sup>[24~26]</sup>, 因此我们倾向于认为在 915 ~ 1 180℃ 温度段, 岩石中水和熔体对纵波速度的影响大于石榴石和柯石英的影响, 因此, 岩石的纵波速度逐渐下降.

这里要指出的是 Z 方向岩石 CD 段的纵波速度下降的温度点(1 030℃)与 X 和 Y 方向岩石纵波速度下降的温度点(915℃)不同, 这可能是由于 X 和 Y 方向岩石与 Z 方向岩石的矿物组成有差别造成的.

从我们的实验结果来看, 在 4.5 GPa 条件下, 少量含水矿物脱水和少量石英转变为柯石英并没有对岩石纵波速度产生明显影响, 岩石纵波速度的变化将取决于岩石中所有矿物变化的综合效应. 因此, 在运用地球物理资料讨论实际地质问题时(如壳内低速层的成因), 应综合考虑各方面的影响.

另一方面, 目前的实验是在变质反应远未达到平衡的条件下进行的. 实验产物中还残留有大量的初始矿物, 所测得的黑云二长片麻岩向榴辉岩转变时的纵波速度(最高为 6.99 km/s)低于榴辉岩的纵波速度(10.17 ~ 7.17 km/s)<sup>1)</sup>, 也低于同条件下地幔岩(二辉橄榄岩)的纵波速度(9.45 ~ 9.63 km/s)(表 5). 所得实验结果还不能充分地运用于解释实际地质问题. 变质作用过程中的弹性波速度特征还有待于进一步研究. 尽管如此, 目前的实验仍给予我们有益的启示, 这就是: 如果用黑云二长片麻岩粗略地代表陆陆俯冲过程中陆壳的岩石成分, 那么, 在年轻的低地热陆陆俯冲带深部, 未能全部向榴辉岩相岩石转变的俯冲大陆地壳将有可能构成地幔中低速层的物质实体.

## 参 考 文 献

- 1 谢鸿森. 地球深部物质科学导论. 北京: 科学出版社, 1997. 1
- 2 Vaucher P, Spakman W, Wortel M J R. Numerical tests on the seismic visibility of metastable minerals in subduction zones. *Earth and Planetary Science Letter*, 1999, 170: 335
- 3 Murase T, Kushiro I. Compressional wave velocity in partially molten peridotite at high pressure. *Carnegie Inst Wash YB*, 1979, 78: 559
- 4 Murase T, Fukuyama H. Shear wave velocity in partially molten peridotite at high pressure. *Carnegie Inst Wash YB*, 1980, 79: 307
- 5 Matsushima S. Partial melting of rocks observed by the sound velocity method and the possibility of a quasidry low velocity zone in the upper mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1989, 55: 306
- 6 Ito K. Effects of H<sub>2</sub>O on elastic wave velocities in ultrabasic rocks at 900℃ under 1 GPa. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1990, 61: 260
- 7 Popp T, Kern H. Thermal dehydration reactions characterized by combined measurements of electrical conductivity and elastic velocities. *Ear Plan Sci Lett*, 1993, 120: 43
- 8 Mueller H J. Modeling the lower crust by simulation of the in situ condition and example for the Saxonian Erzgebirge. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1995, 92(1): 3
- 9 赵志丹, 高山, 骆庭川, 等. 秦岭和华北地区地壳低速层的成因探讨——岩石高温高压波速实验证据. *地球物理学报*, 1996, 39: 642
- 10 杨树锋, 陈汉林, 姜毓双, 等. 高温高压下华南 I 型和 S 型花岗岩的弹性波速特征及其地质意义. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(1): 33
- 11 张友南, 马 琳. 深部地壳镁铁质岩石波速的研究. *地球物理学报*, 1997, 40: 221

1) 见 719 页脚注 1)

- 12 Muller H J, Raab S. Elastic wave velocities of granulite at experimental simulated partial melting conditions. *Phys Chem Earth*, 1997, 22(1-2): 93
- 13 Ringwood A E. 地幔的成分与岩石学. 杨美娥等译. 北京: 地震出版社, 1981. 8
- 14 Kern H, Burlini L, Aschchepkov I V. Fabric-related seismic anisotropy in upper-mantle xenoliths: evidence from measurements and calculations. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1996, 95: 195
- 15 宋茂双, 谢鸿森, 张月明, 等. 高温高压下碱性橄辉玄武岩的 P 波速度及其影响因素. *科学通报*, 1996, 41(18): 1 692
- 16 谢鸿森, 张月明, 徐惠刚, 等. 高温高压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(8): 861
- 17 Xu J, Zhang Y, Hou W, et al. Measurements of ultrasonic wave velocities at high temperature and high pressure for window glass, pyrophyllite, and kimberlite up to  $\pm 400^\circ\text{C}$  and 5.5 GPa. *High Temperature-High Pressure*, 1994, 26: 375
- 18 Bass J D. Elasticity of minerals, glasses, and melts. In: Ahrens T J ed. *Mineral Physics and Crystallography: A Handbook of Physical Constants*. Washington D C: American Geophysical Union, 1995, 45
- 19 Birch F. The velocity of compressional wave in rocks to 10 kilobars, Part I. *J Geophys Res*, 1960, 65(4): 1 083
- 20 Simmons G. Velocity of compressional waves in various materials at pressure to 10 kilobars. *J Geophys Res*, 1964, 69(6): 1 117
- 21 Weidner D J, Carleton H R. Elasticity of coesite. *J Geophys Res*, 1977, 82(8): 1 334
- 22 Chen G, Cooke Jr J A, Gwanmesia G D, et al. Elastic wave velocities of  $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ -pyrope garnet to 10 GPa. *American Mineralogist*, 1999, 84(3): 384
- 23 Wiryana S, Slutsky L J, Brown J M. The equation of state of water to  $200^\circ\text{C}$  and 3.5 GPa; model potentials and the experimental pressure scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 163(1-4): 123
- 24 Manghnani M H, Sato H, Rai C S. Ultrasonic velocity and attenuation measurements on basalt melts to  $1500^\circ\text{C}$ : role of composition and structure in the viscoelastic properties. *J Geophys Res*, 1986, 91(B4): 9 333
- 25 Secco R A, Manghnani M H, Liu T. Velocities and compressibilities of komatiitic melts. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(8): 1 397
- 26 Kress V C, Williams Q, Carmichael I S E. Ultrasonic investigation of melts in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(2): 283