

湖南道县辉长岩包体的组构与波速 各向异性研究及其意义^{*}

孔 华^{1 2)} 金振民¹⁾ 马 芳³⁾ 欧新功¹⁾

(1)中国地质大学地球科学学院 ,武汉 ;
(2)中南工业大学地质系 ,长沙 (3)北京大学地质学系)

摘 要 辉长岩包体的主要造岩矿物斜长石、单斜辉石的组构测定结果表明 :条带状辉长岩的斜长石组构为结晶 *b* 轴的优选定向 ,推测其成因是在重力作用占主导并伴有低应力的情况下形成的。宏观呈块状的辉长岩 ,在微观组构上仍有定向线理存在。经由组构、岩石密度、矿物组成计算得到的理论波速各向异性与实测波速得到的一致 ,从而表明地震波的各向异性对矿物组构的强烈依赖性。推测道县辉长岩包体的波速各向异性反映了下地壳地震波的一般特征。其组构特征反映了该区中、新生代下地壳的变形特征。

关键词 辉长岩包体 组构 波速各向异性

湘南宁远—道县—新田一带出露众多的中生代末的玄武岩 ,其 K-Ar 同位素年龄为 132 ~ 151 Ma^[1] ,它们或多或少的带有深源岩石包体 ,其中道县虎子岩玄武岩中的包体不仅数量较多 ,而且种类齐全 ,个体较大 ,既有尖晶石二辉橄榄岩、橄榄岩等上地幔包体 ,也有辉长岩、麻粒岩、片麻岩等中下地壳包体 ,因而是研究深部壳-幔物质组成及其演化的理想地区。前人对该区辉长岩包体从岩石学、岩石化学、地球化学及同位素年代学等方面进行了大量的研究^[1~4] ,本文重点对辉长岩包体的组构进行了研究。

1 样品岩石矿物学特征

辉长岩包体呈椭圆形 ,直径达 4 ~ 20cm ,灰黑色 ,块状构造及条带状构造 ,中粗粒辉长结构及镶嵌结构。矿物组成为斜长石 (50% ~ 45%) + 单斜辉石 (30% ~ 35%) + 斜方辉石 (10% ~ 5%) + 橄榄石 (5%) ± 角闪石 (3%) + 尖晶石 (2% ~ 5%) 。斜长石条板状 ,粒径 2 ~ 4mm ,钠长及卡钠复合双晶发育 ,双晶纹弯曲扭折十分明显 ,*An* = 65% ,为拉长石。单斜辉石柱状晶形 ,粒径 0.6 ~ 1.5mm ,{110}解理延长方向具明显定向。尖晶石为镁铁尖晶石 ,镜下绿色 ,与幔源包体中的褐色尖晶石不同 ,它呈 2 种形式产出 ,一为不规则粒状分布于辉石中间 ,一为指纹状与辉石成交生体 (intergrowth) 。在条带状辉长岩的样品中 ,长石具较明显定向 ,其中含大量的细小针柱状且多平行于长石解理或双晶纹方向的包体。

^{*} 本文受原地矿部华南重大项目 (9501109) 及中南工业大学青年科学研究基金共同资助
第一作者 孔 华 ,男 ,1968 年 9 月生 ,副教授 ,从事构造地质学研究 ,邮编 410083

2 辉长岩包体的组织结构特征及地震波速测定

2.1 矿物结构

已知下地壳岩石的主要造岩矿物为斜长石、辉石及少量角闪石。它们的光学主轴与结晶轴方向的关系分别为单斜辉石： $N_m // b, N_g \wedge c = 38^\circ \sim 48^\circ, N_p \wedge a = 22^\circ \sim 32^\circ$ ；斜方辉石： $N_m // a, N_p // b, N_g // c^{[5]}$ ，因此，只要在费氏旋转台上测出各光学主轴，就可根据它们之间的关系得到各结晶轴的方位。其中斜长石的结构测定用 BPW 图解法^[6]。

本次研究测定了样品中主要造岩矿物的结构，样品选择不具条带构造的 97DT 和条带状构造的样品 97Hu20，前者矿物组成中含角闪石。样品 97DT 切片方向为 XY 片，线理 X 由矿物的延长方向确定，97Hu20 切片为垂直于面理方向的 XZ 片，X 为线理。斜长石的结构：从图 1 可以看出其 a、b、c 轴的形态基本一致。现以 97Hu20 为例，a 轴极密在中心点附近与面理有较小角度，b 轴为一大圆环带，极密部在 Z 轴附近，近于垂直线理，c 轴无明显极密部。这种结构型式与高级变质岩和攀西地区产于晚古生代裂谷环境下的层状辉长岩的结构相似^①，推测包体在重力条件下形成层分分层，同时在壳幔边界因应力作用，物质会发生塑性流动，从而使长石结构产生明显的优选定向。

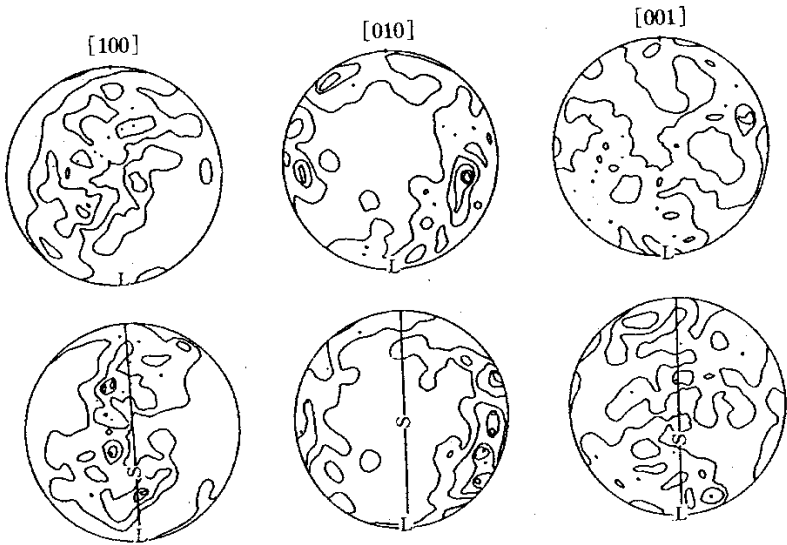


图 1 辉长岩中斜长石的优选方位

(下半球投影，等值线 1% 3% 5% 7%)

Fig.1 Preferred orientation of plagioclase [100] [010] [001] in gabbro xenolith

上为块状辉长岩(95 颗)；下为条带状辉长岩(98 颗)；S - 面理；L - 线理

单斜辉石的结构 块状辉长岩的 a、b、c 轴极密显著，其中 a 轴极密位于线理附近(X 轴)，b、c 轴极密垂直于线理且分别位于 Z 轴和 Y 轴附近，b、c 轴有 2 组极密，代表了 2 组差

① 欧新功，1998，内部资料

异滑动面,这可能说明辉长岩的变形作用主要是一种压扁作用。条带状辉长岩的单斜辉石的组构 b 轴在 Y 轴极密, a 、 c 轴无极密趋向。

2.2 计算波速

以矿物的实际含量加权得到的全岩合成波速(表 1、图 2)块状辉长岩的 V_p 最大值在 Y 轴附近,最小值在 X 轴附近,而条带状辉长岩的 V_p 最大值在 X 轴,最小值在 Z 轴。 V_s 变化规律与 V_p 一致,剪切波快波和慢波的最小值在 Z 轴方向,最大值在面理附近,剪切波的分裂在 X 方向最为明显,最小值与 Z 轴有 40° 交角,2 类辉长岩的合成波速大小非常接近。

表 1 辉长岩包体的计算波速参数
Table 1 Calculated velocity of gabbro xenolith

样品	矿物 含量/(%)	$V_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{s1}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{s2}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta V_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
97DT	斜长石(60)	$A=3.95\%$	$A=4.55\%$	$A=3.42\%$	$A=183.33\%$	$A=3.15\%$
	单斜长岩石(25)	$V_{\text{max}}=7.48$	$V_{\text{max}}=4.27$	$V_{\text{max}}=4.16$	$\Delta V_{\text{max}}=0.23$	$V_{\text{max}}=4.19$
	斜方辉石(15)	$V_{\text{min}}=7.19$	$V_{\text{min}}=4.08$	$V_{\text{min}}=4.02$	$V_{\text{min}}=0.01$	$V_{\text{min}}=4.06$
97Hu20	斜长石(65)	$A=4.25\%$	$A=4.8\%$	$A=3.21\%$	$A=200\%$	$A=3.53\%$
	单斜辉石(20)	$V_{\text{max}}=7.45$	$V_{\text{max}}=4.27$	$V_{\text{max}}=4.12$	$\Delta V_{\text{max}}=0.24$	$V_{\text{max}}=4.175$
	斜长辉(15)	$V_{\text{min}}=7.14$	$V_{\text{min}}=4.07$	$V_{\text{min}}=3.99$	$V_{\text{min}}=0$	$V_{\text{min}}=4.03$

注:各向导性值 $A=\frac{V_{\text{max}}-V_{\text{min}}}{V_{\text{mean}}}\%$

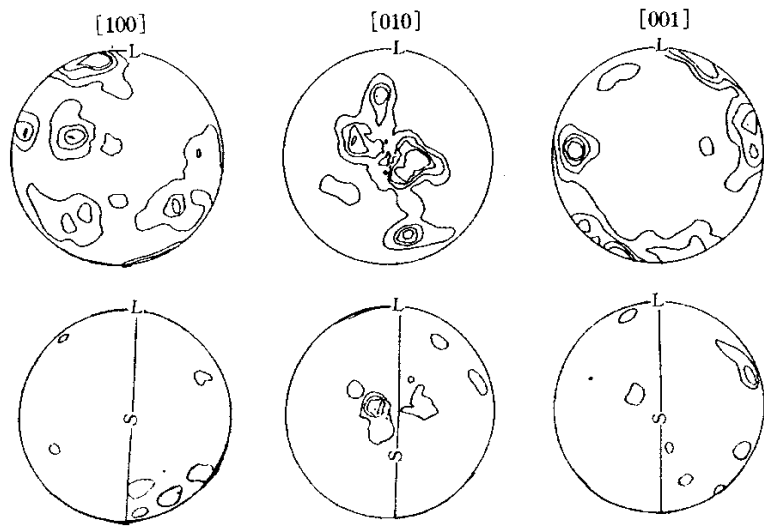


图 2 辉长岩中单斜辉石的优选方位
(下半球投影,等值线 1% 3% 5% 7%)

Fig.2 Preferred orientation of clino-pyroxene[100][010][001] in gabbro xenolith
上为块状辉长岩(81 颗);下为条带状辉长岩(36 颗);S-面理;L-线理

它们的泊松比值分别为 0.268725、0.268726,落在下地壳基性组成的范围之内^[12]。在单矿岩

(以斜长石 = 100%)的波速图解上(图 3), V_p 最大值在面理面上,垂直于线理,即 Y 轴方向,最小值垂直于线理,即 Z 轴方向, V_s 最大值在线理附近,最小值垂直于线理。可见条带状辉长岩的各向异性明显地比块状辉长岩大。合成波速与单矿岩的波速差异表明辉石对波速各向异性有较大影响,它使各向异性明显降低。并使波速的极密位置发生改变。如条带状辉长岩的 V_p 极大值在图 2 中位于 X 轴,而在图 3 中则位于 Y 轴。

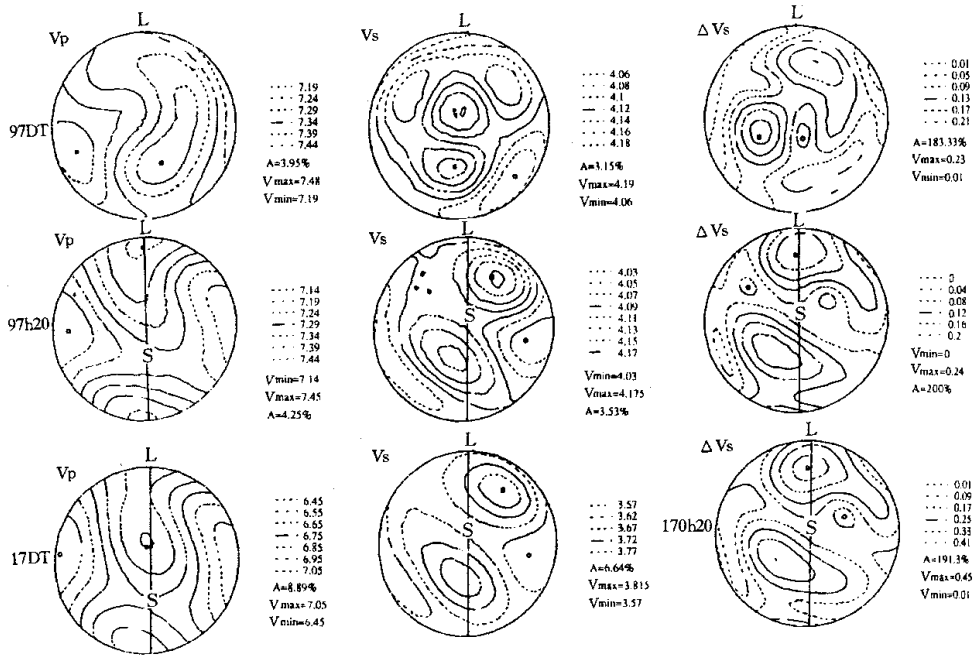


图 3 辉长岩的计算波速

Fig.3 Calculatded velocity of gabbro xenolith

上为块状辉长岩,中为条带状辉长岩,下为条带状辉长岩以斜长石为 100% 计算的波速;S - 面理;L - 线理

2.3 实测波速

本次研究同时选送了无条带辉长岩的样品做高温高压的波速测试,委托德国 Kiel 大学完成,样品 X 方向为依据矿物延长所确定的线理方向。测试数据及结果见图 4。

(1)实测波速 V_p 在 6.2 ~ 6.65 km/s 之间变化,从图 4a 可以看出: V_p 在 Y 轴方向最大, Z 轴方向次之, X 轴方向最小。纵波与压力呈正相关,在压力小于 300 MPa 时,波速随压力增大呈非线性增加,这是因为样品中的裂隙快速闭合的缘故;在 300 ~ 700 MPa 区间内,波速呈线性缓慢增加。图 4b 显示 V_p 与温度的变化呈负相关,温度增加, V_p 逐渐降低。其波速极值与从组构资料得出的合成波速一致。

(2)图 4a 中 V_p 在 P 小于 100 MPa 时与压力呈负相关,说明岩石裂隙的闭合降低了各向异性,在 100 ~ 700 MPa 区间内曲线达到稳态;图 4a、b 显示各向异性 A 随温度的变化不明

显。总体而言， $A=2\%$ 左右，与以斜长石组构资料计算的单矿岩的 $A-V_p$ 相比较要小得多，说明辉长岩中另一主要矿物辉石对各向异性影响也较大。

(3) 剪切波沿 X 轴方向的分裂最为明显，沿 Z 轴方向次之，沿 Y 轴方向几乎没有分裂。就是说在最大 V_p 方向几乎没有分裂，而在最小及中等 V_p 方向上则有不同程度的分裂，与已有实验研究结果一致^[8]。这表明岩石样品线理较明显而面理不清析，与实际情况吻合。

(4) 泊松比平均值随压力在 $0.295 \sim 0.300$ 之间变化，根据实测得到的温压梯度对样品进行生成环境下 ($P=500\text{MPa}$ ， $t=790^\circ\text{C}$) 的波速校正，公式：

$$V_p = V_{p0} + P(dV_p/dP)_t + t(dV_p/dt)_P,$$
$$V_s = V_{s0} + P(dV_s/dP)_t + t(dV_s/dt)_P,$$

其中， $V_{p0}=6.528\text{km/s}$ ， $dV_p/dP=1.98 \times 10^{-4}$ ， $dV_p/dt=-3.01 \times 10^{-4}$ ，
 $V_{s0}=3.5392\text{ km/s}$ ， $dV_s/dP=0.1843 \times 10^{-4}$ ， $dV_s/dt=-2.057 \times 10^{-4}$ 。

计算结果为 $V_p(\text{平均})=6.397\text{km/s}$ ， $V_s(\text{平均})=3.3865\text{km/s}$ ，泊松比 $=0.3053$ ，与 Christenson^[12] 报道的辉长岩的泊松比为 0.29 相一致。与从合成波速得出的泊松比之间的差异主要与矿物之间的反应有关，如辉石蚀变为角闪石，变质作用导致斜长石的去钙都会引发泊松比值的降低。

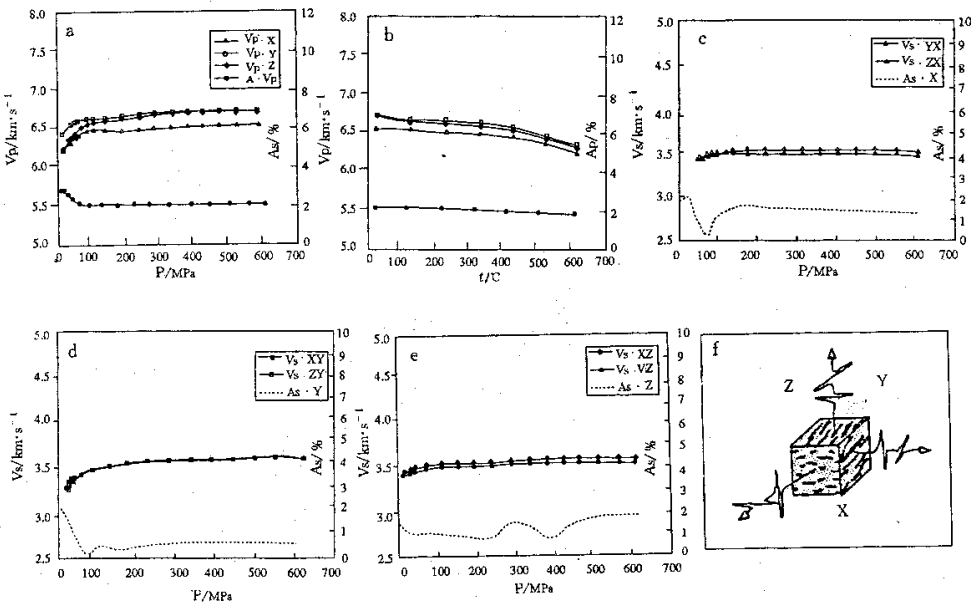


图 4 块状辉长岩(97DT 样)的实测波速及各向异性

Fig.4 Measured velocity and anisotropy of gabbro xenolith

a- V_p - P 图 b- V_p - t 图 c-沿 X 轴方向传播的 V_s - P 图 d-沿 Y 轴方向传播的 V_s - P 图；
e-沿 Z 轴方向传播的 V_s - P 图 f-剪切波分解示意图

(5)样品的变形:应变随压力增加而增加,在3个方向的应变变化趋势一致。

本次研究与测定中合成波速系统地高于实测波速,主要由于样品中存在裂隙以及样品本身的矿物组成、岩石结构有关,如块状辉长岩含3%的含水矿物角闪石,其中变质反应边结构也很发育,还有流体的存在也降低了波速,而理论波速则假设矿物之间为紧密堆积,矿物颗粒新鲜无变化。

3 结果与讨论

应用地震波速资料可以解释下地壳的强反射现象^[9,10],许多研究表明莫霍面是细致的层状转换带^[11,12],岩石的面理构造是地震波反射的良好载体。道县地区辉长岩包体是幔源岩浆底侵至下地壳的产物,岩石的宏观面理构造在微观上表现为矿物组构的优选定向,且实测波速同样显示岩石地震波的各向异性,因此,辉长岩包体的各向异性,可为地震深反射资料提供合理的解释。辉长岩是壳幔边界的重要组成部分,其特殊的条带状构造,会使地震波出现强反射现象。

辉长岩的各向异性值小于5%,比地幔岩小得多。岩石的组构与攀西裂谷中层状辉长岩大体相同,反映重力分异是条带状构造形成的主要原因。幔源岩浆在侵入地壳后也受到了构造应力作用,在宏观上表现为长石的双晶滑动和晶体扭折,在微观上则表现为矿物组构的优选定向。

对辉长岩包体的锆石 U-Pb 年龄研究表明,在晚古生代(314 Ma)^[13]下地壳范围内曾发生过变质作用,这可能导致辉长岩发生脱水相变形成麻粒岩。辉长岩的实验测定波速在6.5 km/s左右,而地球物理资料显示的下地壳波速在6.5~7.0 km/s,由于相变导致波速增大可能是这一现象的最好解释。而且相变产生的热流体上升运移,也使中地壳层次的层间滑动更容易发生,形成糜棱岩带^[14],这可能是该区中下地壳(11~16 km)层次广泛发育低速层($V_p = 6.09$ km/s)的原因之一。

4 地质意义

(1)辉长岩的组构研究表明,下地壳岩石的各向异性与岩石组构各向异性密切相关,主要造岩矿物的结晶轴优选定向,下地壳岩石受到了较强烈构造变形,条带状辉长岩的各向异性明显大于块状辉长岩,它的面理构造对地震波的反射具有明显的制约作用,这对利用地震资料判别深部地壳组成有重要意义。

(2)辉长岩底侵至下地壳后遭受了高温变质作用,并相变为麻粒岩,使得现在的折射地震波速大于实测波速。同时相变产生的高温高压水上移到中下地壳层次的构造软弱面,从而促进了低速层的形成。

致谢:研究工作得到德国基尔(Kiel)大学 Kern H 教授的协助,中国地质大学(武汉)金淑燕副教授、关小平副教授给予了热情指导,与焦述强博士进行了有益探讨,谨此一并表示谢意。

参 考 文 献

- 1 黄国祥. 新田-宁远-道县一带玄武质火山岩的地球化学研究. 湖南地质, 1989, 8(3): 33 ~ 38.
- 2 王京彬. 道县虎子岩岩体及其包体的地球化学特征和构造意义. 湖南地质, 1991, 10(1): 52 ~ 58.
- 3 郭 锋, 吴有林, 范蔚铭等. 湖南省宁远-道县中生代玄武岩中辉长岩包体的岩石学初步研究. 大地构造与成矿学, 1996, 20(1): 38 ~ 45.
- 4 王方正, 李红丽, 朱勤文. 湘南火山岩深源包体及岩石圈岩石学模型. 地质科技情报, 1997, 16(3): 1 ~ 7.
- 5 北京大学地质系岩矿教研室. 光性矿物学. 北京: 地质出版社, 1979.
- 6 Wenk H R, Bunge H J, Jansen E & Pannetier J. Preferred Orientation of plagioclase-neutron diffraction and U-stage data. Tectonophysics, 1986, 126: 271 ~ 284.
- 7 Christensen N I. Poisson's ratio and crustal seismology. J Geophys. Res., 1996, 101(B-2): 3139 ~ 3156.
- 8 Kern H, Tubia J M. Pressure and temperature dependence of P- and S-wave velocities, seismic anisotropy and density of sheared rocks from the Sierra Alpujata massif. Earth Planet Sci. Lett., 1993, 119: 191 ~ 205.
- 9 Parsons T, Christensen N I, Wilshire H G. Velocities of southern Basin and Range xenoliths: Insights on the nature of lower crustal reflectivity and composition. Geology, 1993, 21(2): 129 ~ 132.
- 10 Suetnova E, Carbonell R, and Smithson S B. Magma in layering at Moho of the Basin and Range of Nevada. Geophysical Research Letters, 1993, 20(24): 2945 ~ 2948.
- 11 Braille L W and Chang C S. The Continental Mohorovicic Discontinuity: Results from Near Vertical and Wide-Angle Seismic Reflection Studies. In Reflection Seismology: A global perspective, edited by Barazangi M and Brown L, Geodynamics Series AGU, 1986, 13: 257 ~ 272.
- 12 Jarco W C M and Tompson G A. The Nature of the Mohorovicic Discontinuity. Earth Planet. Sci., 1989, 17: 475 ~ 506.
- 13 孔 华, 金振民, 林源贤. 道县玄武岩中麻粒岩包体的岩石特征及年代学研究. 长春科技大学学报, 2000, 30(2): 3 ~ 12.
- 14 Etheridge M A, Wall V J, Cox S F, et al. The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation. J. Metamorph. Geol., 1983, 1: 205 ~ 226.

Mineral Fabrics and Seismic Wave Anisotropy of Gabbro Xenoliths from Daoxian Alkaline Basalt, Hunan Province

Kong Hua¹⁾²⁾ Jin Zhenmin¹⁾ Ma Fang³⁾ Ou Xingong¹⁾

(1) China University of Geoscience, Wuhan;

2) Central-South University of Technology, Changsha; 3) Peking University, Beijing)

Abstract Seismic wave anisotropy of the lower-crust has become an important topic in recent years. We can get some information of the lower-crust by such geophysical methods as reflection and refraction, and some work on xenolith samples also gives us much beneficial information, including elastic velocity measurements and rock fabric measurements at U stage. In this paper, fabrics of main rock-forming minerals like plagioclase, clinopyroxene and orthopyroxene in two kinds of gabbro xenoliths have been studied. Fabric figures show that b axis of plagioclase has preferred orientation vertical to lineation. This shape is the same as the bedding gabbro intrusions in Late Paleozoic Panxi rift. Synthetic velocity calculated from fabrics, densities and rock components is consistent with the measurements in laboratory. This implies that anisotropy of the lower crust strongly depends on LPO of main minerals, which can be used to interpret strong reflection in seismic wave reflection of the lower crust.

Key words gabbro xenolith mineral fabric anisotropy elastic wave measurement