

0.6~2.0 GPa 压力下部分熔融角闪辉长岩的纵波波速

蒋玺¹ 安邦^{1,2} 唐波¹ 黄扬^{1,2}

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 研究生院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 利用超声波透射-反射法, 测量了 0.6~2.0 GPa、最高 1 085℃ 条件下角闪辉长岩的纵波波速 (v_p), 详细统计了部分熔融阶段实验产物组分的体积百分含量, 利用矿物含量和弹性参数, 计算了角闪辉长岩的纵波波速。实验测量和理论计算显示了较一致的 v_p-t 关系, 即高压下角闪辉长岩的 v_p 随温度升高先缓慢降低, 在温度约 800~900℃ 后转而大幅下降。实验产物显示, 样品在温度达 812℃ (0.6 GPa)、865℃ (1.0 GPa) 和 919℃ (2.0 GPa) 后发生矿物脱水和部分熔融, 熔体含量随温度升高显著增加。熔体是导致高温阶段岩石 v_p 快速降低的主要原因。在初熔阶段 v_p 随熔体增加而降低尤为显著, 可能是初熔时矿物脱水生成的自由水及含水量高的熔体, 以微细熔体薄膜浸润矿物边界或裂隙所导致。

关键词: 高温高压; 角闪辉长岩; 相变; 纵波波速; 部分熔融

中图分类号: P589; P588.12⁺⁴

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)04-0505-10

P-wave velocities of partially molten bojite at pressures of 0.6~2.0 GPa

JIANG Xi¹, AN Bang^{1,2}, TANG Bo¹ and HUANG Yang^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Graduate School of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: With ultrasonic wave transmission-reflection combined method, measurement of compressional wave velocities (v_p) of bojite was carried out up to 1 085℃ at the pressure of 0.6 GPa, 1.0 GPa and 2.0 GPa respectively. Based on investigating the partially molten products, the authors calculated the v_p of bojite at different pressures and temperatures with volume percentages and elastic parameters of minerals and melt. The calculations show the same v_p-t correlations with experiment runs, which indicate that at first v_p decreases slowly with increasing temperature, and then decreases quickly above about 800℃ to 900℃ at different pressures. The investigations of the products indicate that bojite is dehydrated and partially molten when the temperature is higher than 812℃ at 0.6 GPa, 865℃ at 1.0 GPa and 919℃ at 2.0 GPa respectively. It is believed that partial melting is responsible for quick decrease of v_p at high temperature. There is more quick decrease of v_p of bojite when volume percentages of melt are lower than about 2%. It is thus held that water and melt with low viscosity result in the sharp decrease of v_p , because it is easy for them to move into the microfissures in nature rock at the beginning of dehydration and partial melting.

Key words: high temperature and high pressure; bojite; phase transformation; compressional wave velocity; partial melting

收稿日期: 2013-01-28; 修订日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(40804019); 矿床地球化学国家重点实验室开放研究基金(201013); 贵州省科学技术基金(黔科合J字[2008]2251号)

作者简介: 蒋玺(1977-), 男, 博士, 副教授, 从事实验岩石学研究, E-mail: xjiang235@163.com

高温高压下岩石(矿物)物性原位测量是人们探索地球内部物质组成和结构的重要手段,也是对地球物理探测信息进行物质解释的重要依据(谢鸿森, 1997; 王雁宾, 2006)。辉长岩是中下地壳的重要岩石类型,其相变和物性研究对了解中下地壳物质结构、地球物理性质及地球动力学过程具有重要意义。为此,前人从弹性性质(Ou *et al.*, 2003; Bai *et al.*, 2003; 陈志等, 2009)、电学性质(Wang *et al.*, 2002)、流变学性质(桑祖南等, 2001)以及相平衡(王岳军等, 1998)等方面对辉长岩进行了许多高温高压实验研究,探讨了辉长岩及其演化在岩石圈结构和物质演化中扮演的重要角色。

弹性波速测量作为一种重要的物性研究手段,被用于辉长岩的高温高压实验研究。Ou 等(2003)在最高 0.6 GPa 和 600°C 条件下测量了辉长岩的波速,结合岩石中矿物晶格优选方位(LPO),认为下地壳可能存在作为地震深反射载体的大规模层状辉长岩体。在更大压力范围(0.5~4.0 GPa)内,陈志等(2009)测量了 100~300°C 条件下辉长岩的波速和品质因子,探讨了其对地震孕育和地震波低速层的意义。Bai 等(2003)在 1~2 GPa、室温至 1 100°C 条件下测量了辉长岩的纵波波速(v_p)和电导率,观测岩石中发生的相变和部分熔融,结合微观导电机制,探讨了下地壳-上地幔低速高导层的形成机制。同时,利用岩石中各组分的含量和弹性参数进行高温高压下岩石弹性波速的理论计算,不仅是检验高温高压实验测量结果的有效手段,也是一种重要的地震波结构研究方法(Gao *et al.*, 2000; Ji *et al.*, 2003; 蒋玺等, 2008)。蒋玺等(2008)开展了 1.0 GPa、最高 1 100°C 条件下角闪石斜长片麻岩的 v_p 实验测量和理论计算对比研究,获得一致的 v_p-t 关系,结合实验和计算结果探讨了石英 α - β 相变和部分熔融对岩石 v_p 的影响。

部分熔融是一种重要的地质作用,孕育了许多深部地质过程,高温高压部分熔融状态下岩石的波速测量则是了解这些深部地质过程的重要手段(杨晓松等, 1998; Muller and Massonne, 2001; Aizawa *et al.*, 2002)。然而,前人对辉长岩的弹性波速研究多开展于低温低压(Ou *et al.*, 2003)和低温高压(陈志等, 2009),无法观测到岩石部分熔融对其波速的影响。Bai 等(2003)的高温高压研究中,未对实验中间产物进行矿物含量统计,以致难以准确揭示整个部分熔融过程中熔体和 v_p 的变化关系。

为了对高温高压部分熔融状态下岩石的 v_p 与熔体的关系有一个更全面、更详尽的认识,本次工作在 0.6~2.0 GPa、室温至最高 1 085°C 条件下测量了角闪辉长岩的 v_p ,并详细统计了部分熔融阶段实验产物的矿物组成和含量,然后根据组分含量和弹性参数计算了不同温度压力条件下岩石的 v_p ,最后,利用实验测量和理论计算结果综合探讨了高温高压下岩石中发生的各种物相变化对其 v_p 的影响。

1 样品与实验方法

1.1 实验样品

实验样品角闪辉长岩采自安徽铜官山,岩石呈深灰色,致密块状构造,肉眼观察无明显裂隙和孔隙。岩石矿物组成及其体积百分含量为:主要矿物斜长石(49.3%)、单斜辉石(21.4%)和角闪石(19.4%);次要矿物绿泥石(4.4%)、黑云母(2.9%)、不透明矿物(1.5%)及石英(1.1%)。岩石呈自形-半自形粒状结构,斜长石和单斜辉石自形程度高,斜长石多呈柱状,粒径 0.3~1.0 mm 不等,多数介于 0.4~0.7 mm 之间。单斜辉石呈短柱状或粒状,粒径多介于 0.5~1.0 mm 之间。角闪石自形程度较低,多呈半自形柱状或他形,粒径多在 0.3~0.7 mm 之间。其他次要矿物多呈他形粒状充填于主要矿物颗粒之间(样品显微照片见图 1)。岩石及主要矿物化学成分见表 1。

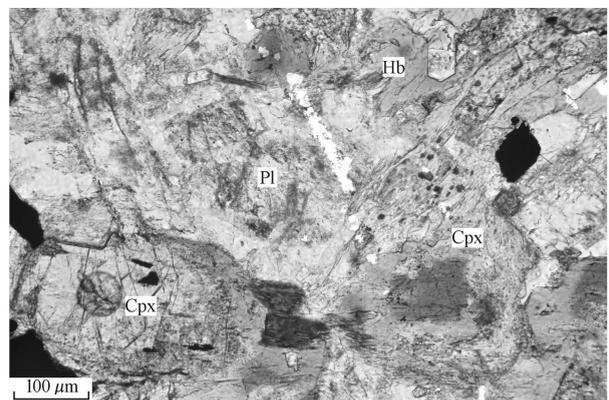


图 1 原岩显微照片(单偏光)

Fig. 1 Micrograph of the bojtite (plainlight)

Pl—斜长石; Cpx—单斜辉石; Hb—角闪石

Pl—plagioclase; Cpx—clinopyroxene; Hb—hornblende

1.2 实验方法

高温高压弹性波速测量及取样实验在中国科学院地球化学研究所深部物质与流体作用地球化学实

表 1 实验样品主要化学成分

 $w_B/\%$

Table 1 Chemical compositions of bojite and main minerals

	岩石	主要矿物					
		斜长石(6)	标准差	辉石(4)	标准差	角闪石(4)	标准差
SiO ₂	48.92	52.15	3.45	50.38	0.59	45.74	2.65
Al ₂ O ₃	17.65	28.50	2.04	3.49	1.37	7.76	2.07
TFe ₂ O ₃	9.04	0.60	0.20	9.64	0.52	14.60	0.40
MgO	7.66	0.05	0.05	14.92	0.77	13.59	1.03
CaO	10.04	12.88	2.76	19.57	0.50	11.17	0.13
Na ₂ O	2.51	3.79	1.68	0.21	0.17	0.81	0.46
K ₂ O	1.03	0.25	0.10	0.02	0.02	0.79	0.21
MnO	0.15	0.01	0.01	0.23	0.03	0.24	0.02
TiO ₂	0.26	0.04	0.01	0.86	0.23	2.05	0.80
P ₂ O ₅	0.11	—	—	—	—	—	—
烧失量	2.69	—	—	—	—	—	—
总量	100.06	98.26	0.34	99.32	0.38	97.76	0.49

注: 角闪辉长岩化学成分为湿法分析结果, 主要矿物成分为电子探针分析结果, 矿物名称后括号内为探针测试点数, 分析均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。

验室 YJ3000t 紧装式六面顶高压装置上完成, 弹性波速测量系统详细介绍见文献 Xie 等(1993)。实验样品组装如图 2。相比于以前的工作(蒋玺等, 2008), 本次样品组装做了如下改进: ① 将岩石样品柱直径从原来的 10 mm 减小到 8.5 mm; ② 用厚 1 mm 的 Al₂O₃ 环将不锈钢加热片与传压介质叶蜡石块和岩石样品隔开。这样, 不但降低了高温下岩石样品中的温度梯度, 也防止了高温时样品和叶蜡石脱水对不锈钢加热片的影响。

样品高温高压下的 v_p 测量采用脉冲透射-反射法(Liu *et al.*, 2002)。如图 2, T 为穿过整个样品块的超声波透射信号走时, T_1 和 T_2 分别为超声波信号在样品上、下界面反射后的走时, 由公式 $t = T -$

$T_1/2 - T_2/2$ 可计算出纵波在样品中的走时 t , 最后, 利用样品高度 h , 由 $v_p = h/t$ 得出样品的纵波波速。 v_p 测量结束后, 按照相同的样品组装和实验过程进行连续取样实验。获得的中间产物中矿物含量统计采用显微薄片计点法(Ji *et al.*, 2003), 即对中间产物的显微薄片进行等距逐点连续扫描, 最后以薄片每种成分的扫描点数统计出其体积百分含量。具体的实验方法和实验过程详细介绍见文献(蒋玺等, 2008)。

2 实验结果

2.1 v_p 测量结果

恒定 0.6、1.0 和 2.0 GPa 压力下, 角闪辉长岩的 v_p-t 关系如图 3。0.6 GPa 时, 从室温到 755°C, 岩石 v_p 缓慢降低 5.7%, 从 755°C 继续升温到 1024°C, v_p 则快速降低了 44.7%。在 1.0 GPa 下, 室温到 808°C, 岩石 v_p 降低了 8.1%, 从 808°C 到 1028°C, v_p 快速降低了 40.8%。2.0 GPa 下, 岩石 v_p 从室温到 861°C 缓慢降低 6.1%, 从 861°C 升温到 1085°C, v_p 快速降低了 27.6%。

总体上, 不同压力下角闪辉长岩的 v_p 随温度升高均先缓慢降低, 达到一定温度(0.6 GPa 时约 810°C、1.0 GPa 时约 850°C 和 2.0 GPa 时约 920°C) 后快速下降, 这种 v_p-t 关系与前人对斜长角闪岩(Aizawa *et al.*, 2002)和辉长岩(Bai *et al.*, 2003)的实验结果基本一致。与辉长岩 v_p 测量结果(Bai *et al.*,

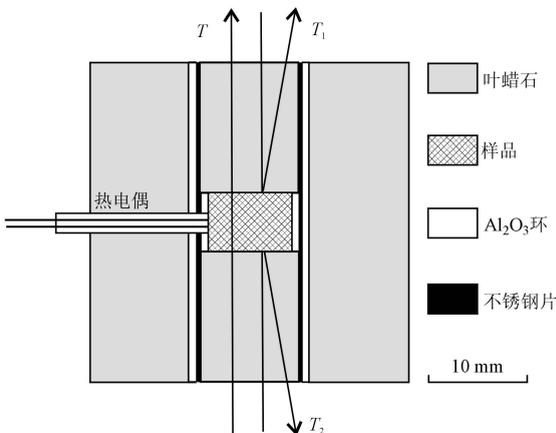


图 2 样品组装示意图

Fig. 2 Sample assembly viewed in cross section

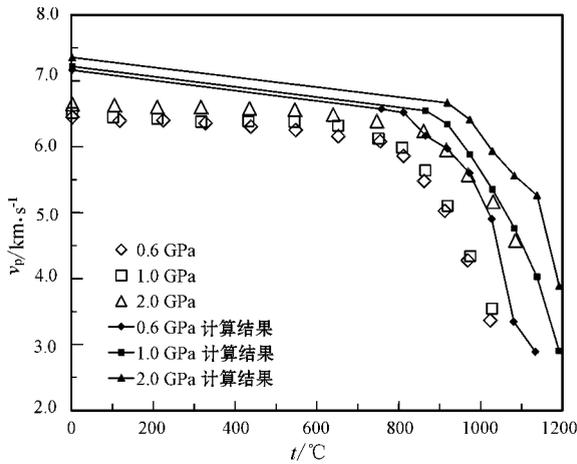


图 3 不同压力下角闪辉长岩的 v_p - t 关系

Fig. 3 v_p - t relationships of bojiite at three fixed confining pressures of 0.6, 1.0 and 2.0 GPa

2003)相比,本次样品的 v_p 测量值在低温阶段低约 10%, 高温阶段的 v_p 快速下降则较辉长岩显著得多。

笔者认为这些差异主要与岩石样品的矿物组成有关。本次实验采用的角闪辉长岩中角闪石含量达 19%, 高的角闪石含量一方面降低了辉长岩的波速, 另一方面高温时角闪石脱水形成的自由水会引发岩石部分熔融, 所以导致高温条件下 v_p 下降较辉长岩显著。

2.2 实验产物观测

恒压 0.6、1.0 和 2.0 GPa, 不同温度条件下实验产物中各种组分体积百分含量统计结果见表 2。

0.6 GPa 时, 758°C 的产物中矿物组合与原岩基本一致。到 812°C 观察到实验产物中出现极少量熔体, 多呈封闭囊状或管状分布于角闪石与斜长石和石英接触面(图 4a、4b)。随温度不断升高, 岩石部分熔融越来越显著, 熔体主要分布于含水矿物(角闪石、绿泥石和黑云母)与斜长石和石英接合部位, 且熔体逐步由封闭囊状和管状向连通薄膜状演化(图 4c)。温度继续升高, 熔体几乎全部连通, 残余矿物则呈孤岛状分布于熔体中(图 4d)。高温高压下含水

表 2 不同压力和温度条件下角闪辉长岩中组分体积百分含量

$v_B/\%$

Table 2 Volume percentage of minerals and melt in bojiite at varied temperatures and confining pressures of 0.6 GPa, 1.0 GPa and 2.0 GPa, respectively

状态	Pl	Cpx	Hb	Chl	Bt	Ti-Fe	Q	Gt	Melt
常态	49.3	21.4	19.4	4.4	2.9	1.5	1.1		
0.6 GPa									
758°C	50.2	19.6	19.2	4.7	2.3	2.5	1.4		
812°C	50.8	20.9	20.5	2.1	1.9	2.7	0.9		0.2
866°C	48.2	24.7	19.9	0	0.2	2.3	0.4		4.3
919°C	48.4	27.1	16.7	0	0	0.9	0.2		6.7
973°C	45.1	30.5	10.4	0	0	1.5	0.6		11.9
1 027°C	34.7	36.8	2.1	0	0	1.4	0.2		24.8
1 081°C	1.4	25.6	0	0	0	0	0		73.0
1 134°C	0	<5.0	0	0	0	0	0		>95.0
1.0 GPa									
865°C	50.3	23.4	19.5	2.5	1.1	1.9	1.0		0.3
919°C	49.7	20.4	21.1	0.9	0.7	3.1	2.1	0.1	1.9
974°C	47.8	25.1	16.4	0	0	2.2	0.6	0.1	7.8
1 029°C	41.1	27.3	12.8	0	0	1.3	1.4	0.3	15.9
1 083°C	31.8	33.1	4.8	0	0	1.0	0.3	1.1	27.9
1 138°C	21.2	31.3	0	0	0	0.2	0	0	47.3
1 192°C	0	<6.0	0	0	0	0	0	0	>94.0
2.0 GPa									
919°C	49.7	20.4	18.8	4.3	2.1	2.5	2.1	0	0.1
974°C	49.8	20.5	20.4	1.9	0.9	2.5	0.8	0.8	2.4
1 029°C	41.8	27.9	14.8	0	0	1.4	1.1	4.1	8.8
1 083°C	39.4	36.8	6.6	0	0	1.1	0.3	1.2	14.6
1 138°C	31.8	36.7	0.5	0	0	2.3	0.1	8.1	20.5
1 192°C	8.1	22.6	0	0	0	1.1	0	14.3	53.9

注: Pl—斜长石, Cpx—单斜辉石, Hb—角闪石, Chl—绿泥石, Bt—黑云母, Ti-Fe—不透明矿物, Q—石英, Gt—石榴子石, Melt—熔体。

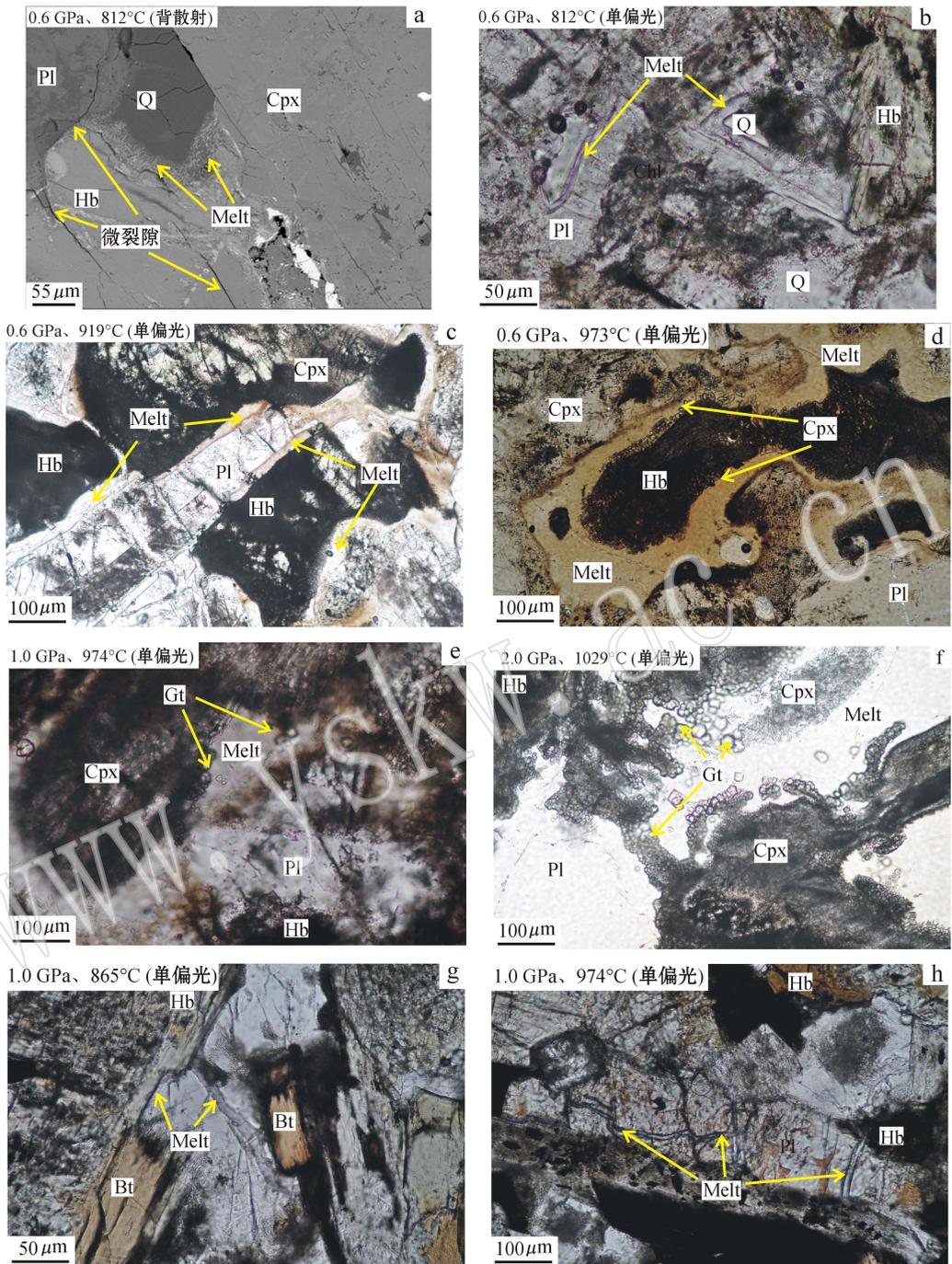


图 4 不同状态下实验产物中出熔熔体和矿物相变的显微照片

Fig. 4 Micrographs of melt and run products at different pressures and temperatures

矿物脱水常对岩石部分熔融起诱发作用(Zhou *et al.*, 2005; 马瑞等, 2009), 因此, 实验产物中含水矿物与熔体接触带常有脱水反应生成的小颗粒新生矿物(单斜辉石)出现(图 4d)。而当温度升高到 1 027°C 以上, 熔融加剧导致新生单斜辉石也被大量熔融。所以, 0.6 GPa 下从 812°C 到 1 134°C, 实验产

物中组分总体变化为: 熔体从少量出现到含量达 95% 以上, 其形态从封闭囊状和管状到完全连通; 斜长石、角闪石、绿泥石、黑云母、不透明矿物和石英由于脱水和部分熔融作用, 含量逐渐降低直到消失; 单斜辉石含量由于有新生部分加入, 随温度升高不断增加, 直到 $t > 1 027^\circ\text{C}$ 后, 岩石部分熔融加剧又导致

其急剧减少。

恒压 1.0 GPa 和 2.0 GPa 下,实验产物中组分随温度的变化规律与 0.6 GPa 时基本一致。不同之处主要在于:1.0 GPa 时 样品初始熔融温度稍高于 0.6 GPa,从 865℃ 到 1 192℃,熔体含量从 0.3% 增加到 >94%。压力增加使含水矿物脱水反应中新生矿物除单斜辉石外,还有极少量的细粒石榴子石(图 4e)。2.0 GPa 时,初熔温度进一步升高, $t = 919^\circ\text{C}$ 时,仅观测到 0.1% 的熔体,到 1 192℃ 后,熔体含量达 53.9%。2.0 GPa 下新生矿物除单斜辉石外,石榴子石生长明显,其含量和粒度都比 1.0 GPa 时明显增大(图 4f)。电子探针结果显示,新生石榴子石成分变化较大,如 2.0 GPa、1 029℃ 时,其主要成分及含量 SiO_2 : 35.75% ~ 40.60%; Al_2O_3 : 18.83% ~ 25.06%; TFe_2O_3 : 12.95% ~ 21.31%; MgO : 1.50% ~ 12.77%; CaO : 8.65% ~ 22.76%。

3 v_p 理论计算

表 2 中的组分体积百分含量被用于计算高温高压下角闪辉长岩的纵波波速。首先,利用实验产物

中各种矿物的常态弹性参数(密度、体积模量和剪切模量),以及这些参数的温度和压力系数(表 3),计算出各种矿物在不同温度和压力条件下的弹性参数。然后根据矿物高温高压下的弹性参数和体积百分含量,利用 Voigt-Reuss-Hill (VRH) 平均模型(Bina and Helffrick, 1992)计算出不同温度压力条件下实验产物中固态部分的弹性参数,并由此计算出高温高压实验产物中固态部分的纵波波速。最后,根据不同压力和温度条件下熔体的体积百分含量,利用理论模型(Wyllie *et al.*, 1956):

$$1/v_p = \Phi/v_{\text{melt}} + (1 - \Phi)/v_{\text{solid}}$$

计算出实验中各取样点部分熔融状态下岩石的纵波波速,上式中 v_p 代表部分熔融岩石的纵波速度; Φ 为熔体体积百分含量; v_{melt} 和 v_{solid} 分别为部分熔融岩石中熔体和固态部分的纵波波速, v_{melt} 取值为 2.8 km/s (Bass, 1995; 蒋玺等, 2008)。波速理论计算时,除熔体外,实验产物中含量小于 5% (体积分数)的次要组分未作计算,其含量通过加权平均计入熔体和其他主要矿物体积百分含量。高温高压下角闪辉长岩的纵波波速计算结果见图 3。

表 3 主要矿物弹性参数
Table 3 Elastic parameters of main minerals

弹性参数	ρ (mg/mm^3)	α (10^{-6})	K (GPa)	$\partial K/\partial P$	$\partial K/\partial t$ (MPa/K)	G (GPa)	$\partial G/\partial P$	$\partial G/\partial t$ (MPa/K)
Pl	2.73	14.1	77.9	5	16	37.3	2	13
Cpx	3.47	33.3	115.8	5	16	64.6	2	13
Hb	3.15	23.8	93.3	5	16	49.3	2	13
Gt	3.78	18.5	147.3	5	15	92.7	1.5	13

注: ρ —密度, α —热膨胀系数, K —体积模量, $\partial K/\partial P$ —体积模量的压力系数, $\partial K/\partial t$ —体积模量的温度系数, G —剪切模量, $\partial G/\partial P$ —剪切模量的压力系数, $\partial G/\partial t$ —剪切模量的温度系数;不同矿物的 ρ 据 Smyth and McCormick (1995) 和 Bass (1995), α 据 Fe (1995), 其余弹性参数据 Bass (1995); 矿物弹性参数由电子探针测定的化学成分, 换算各种端员矿物的含量, 再根据含量和端员矿物弹性参数加权平均获得; K 和 G 的压力和温度系数为综合多种矿物结果。

4 讨论

4.1 实验测量和计算结果对比分析

由图 3 可看出,对于恒压下角闪辉长岩的 v_p - t 关系,计算结果显示了与实验测量很好的一致性,即 v_p 随温度升高先近线性缓慢降低,到一定温度(约 800~900℃)后,转而急剧下降。而对于岩石 v_p 的绝对值,低温阶段计算结果比实验结果高约 10%,到高温阶段,随熔体含量不断增加,两者波速差异明显

增大。岩石波速的理论计算,只关注主要矿物的体积百分含量和弹性参数,并未充分考虑天然岩石中的裂隙、蚀变、岩石结构特点以及次要矿物等因素对其弹性性质的影响,从而导致理论计算结果往往高于实验测量结果(Gao *et al.*, 2000; 蒋玺等, 2008),这可能也是角闪辉长岩低温阶段 v_p 计算结果比实验值高约 10% 的主要原因。对于部分熔融阶段,随熔体含量增加,理论计算与实验测量结果差异明显增大,笔者认为这与熔体的形态有关。因为在部分熔融岩石的 v_p 计算中,未考虑熔体的形态变化,研究表明,部分熔融岩石中熔体连通程度越高,熔体导致岩石波速降低越大(Murase and Kushiro, 1979;

周平等, 2006)。高温阶段温度升高不仅导致岩石中熔体含量增加, 熔体的连通程度也随之明显增加, 由此, 岩石中高的熔体含量和良好的熔体连通性综合影响导致实验测量的 v_p 明显低于计算结果。

4.2 v_p-t 分析

实验测量和理论计算结果都表明, 高温高压下岩石中的物相变化将显著影响岩石的纵波波速。0.6 GPa 下, 从室温到 758℃, 实验产物中矿物成分无明显变化, 此时温度是制约岩石波速的主要因素, 即 v_p 随温度升高近线性缓慢降低。当 $t > 812^\circ\text{C}$ 后, 实验产物中发生脱水和部分熔融, 自由水和熔体加入开始对岩石的波速产生显著影响。岩石这种物相上的变化对其 v_p 的影响作用远大于单纯的温度升高, 此时成分成为岩石波速的主要制约因素。而且, 温度进一步升高导致岩石部分熔融加剧, 熔体对岩石波速的控制作用更加显著。虽然角闪石脱水生成了波速较高的单斜辉石, 但新生辉石对岩石波速的影响远不及熔体显著。所以, 高温下熔体的出现成为控制 v_p-t 关系的主要因素, 即随温度升高, 岩石熔融程度加大, v_p 因此而急剧下降。

1.0 GPa 和 2.0 GPa 下, 随温度升高岩石中的物相变化对 v_p 的影响机制与 0.6 GPa 时相似。1.0 GPa 下, 角闪辉长岩在约 850℃ 开始脱水和部分熔融, 由此岩石 v_p-t 变化开始从温度控制转变为主要由成分控制, 即在此温度点岩石波速随温度升高由近线性缓慢降低转为快速下降。2.0 GPa 时, $t = 919^\circ\text{C}$ 的实验产物中观察到 0.1% 的熔体, 此温度也成为岩石 v_p-t 关系的“拐点”, 低于此温度, v_p 受温度控制而随其升高缓慢降低, $t > 919^\circ\text{C}$ 后, 岩石波速受熔融程度控制随温度升高而快速降低。与 0.6 GPa 相比, 1.0 GPa 和 2.0 GPa 的高温脱水反应新生矿物中, 出现了波速更高的石榴子石, 但由于含量较低, 而且其随温度升高含量增长也远不如熔体显著, 所以仍无法改变熔体对岩石波速的控制作用。

4.3 v_p 与熔体含量

图 5 显示了角闪辉长岩在高温高压部分熔融状态下 v_p 随熔体含量的变化关系。从图中可看出, 高压下岩石中熔体含量达一定程度(约 2%, 体积分数)后, 其 v_p 随熔体含量增加持续平稳降低。但在初熔阶段, 虽然实验产物中只统计到极少量熔体, 此时测量的岩石波速降低却非常明显。以 0.6 GPa 为例, 从实验产物无明显成分变化的 758℃, 到熔体含量 0.2% 的 812℃, 理论计算显示, 熔体和温度综合影响

导致岩石 v_p 从 6.57 km/s 降低到 6.52 km/s, 降幅 0.8%, 而实验测量的 v_p 则由 6.08 km/s 降低到 5.86 km/s, 降幅达 3.6%。Bai 等(2003)对辉长岩的研究也发现, 在温度低于 980℃(1.0 GPa) 和 1 000℃(2.0 GPa) 的实验产物中未出现熔融体, 但岩石 v_p 却在 $t > 800^\circ\text{C}$ (1.0 GPa) 和 $t > 850^\circ\text{C}$ (2.0 GPa) 时已开始大幅下降, 并认为是岩石中的黑云母脱水导致了此温度范围内岩石的波速降低。

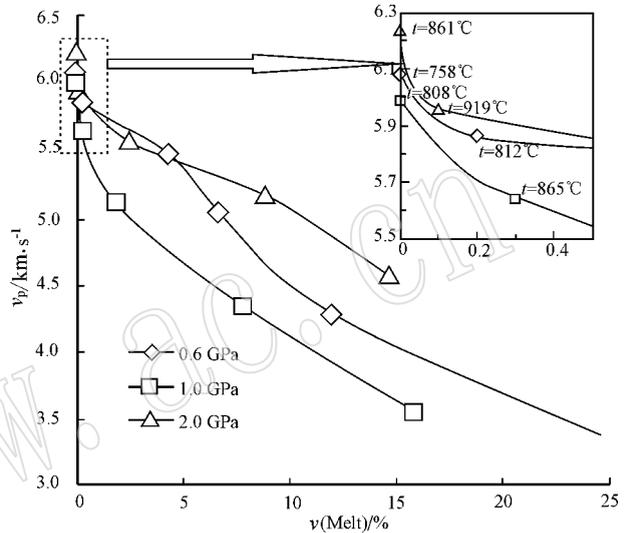


图 5 高温高压下岩石 v_p 与熔体含量的关系

Fig. 5 Effects of melts fractions on the v_p of bojite at high temperature and pressure

通过实验产物的背散射显微图像观察, 推测含水矿物脱水是角闪辉长岩初熔阶段波速大幅下降的主要原因。由于岩石中含水矿物的脱水反应要先于部分熔融并对其起诱发作用, 所以, 在样品初始熔融阶段, 虽然统计到的熔体含量很少, 但其实此时岩石中的含水矿物(角闪石、绿泥石和黑云母)已发生了显著的脱水反应, 在矿物颗粒边界生成了一定量的自由水。这些自由水粘度低, 流动性强, 在压力作用下一方面沿矿物颗粒边界或微细裂隙中浸润, 形成水薄膜, 一方面又不断诱发岩石的部分熔融而形成熔体(图 4a)。这些湿润矿物边界或微裂隙的水(熔体)薄膜具有较高的连通性, 能导致岩石波速显著下降。但在样品组分的显微统计中, 由于这些极细微的水(熔体)薄膜在熔体含量很低时不易观测, 未被统计计入实验产物的熔体含量中, 导致熔体统计含量低于实际含量, 因此出现实验产物中统计的熔体含量很低, 但测量的波速却显著降低。随温度进一步升高, 岩石部分熔融加剧, 原来细微的水(熔体)薄

膜逐渐增厚(图4h)而易于被统计计入熔体含量,此时统计的熔体含量更接近熔体实际含量,因此,当部分熔融达到一定程度(体积分约2%)后,岩石波速随熔体含量增加趋于平稳下降。

4.4 岩石初熔温度

一般认为岩石部分熔融是从其中含水矿物的脱水作用开始的。本次实验样品中,主要含水矿物为角闪石。研究表明,当压力从0.6 GPa增加到2.0 GPa,角闪石脱水温度从约600℃逐渐升高到750℃以上(顾芷娟等,1995;Iwamori,1998;杨晓松等,1998)。关于角闪石脱水导致岩石部分熔融的实验,不同学者得出了不同的初熔温度。高平(1997)根据高压下岩石电导率随温度的变化,测定斜长角闪岩在0.5 GPa和0.65 GPa时的初熔温度为650~750℃;Aizawa等(2002)通过弹性波速测量发现,1.0 GPa压力下斜长角闪岩在700℃便开始发生部分熔融;Zhou等(2005)的部分熔融实验证明,角闪石的脱水导致了斜长角闪岩在2.0 GPa下850℃时开始发生部分熔融。对于少含含水矿物的辉长岩,其初熔温度则相比较,如Bai等(2003)的研究得出含含水矿物(黑云母)约8%的辉长岩,在1.0 GPa和2.0 GPa下的初熔温度分别为980℃和1000℃;王岳军等(1998)的实验也证明,含角闪石(5%)和绿泥石(5%)的辉长岩在压力大于1.5 GPa条件下,初熔温度一般高于1000℃。本次实验得出角闪辉长岩的初始熔融温度为:0.6 GPa下812℃、1.0 GPa下865℃和2.0 GPa下919℃。实验采用的角闪辉长岩含较多含水矿物(约25%),导致其不同压力下的初熔温度明显低于辉长岩而高于斜长角闪岩,证明了含水矿物脱水对岩石部分熔融的诱导和促进作用。

4.5 地质意义

一般认为,波速低于周围岩石3%~5%的地质体即可形成地震波低速层(体)(Christensen and Mooney,1995),其广泛分布于全球地壳的不同深度范围内。虽然壳内低速层(体)的成因机制存在诸多解释,但高温下矿物脱水及岩石部分熔融作为其重要成因已被许多实验研究证实(顾芷娟等,1995;杨晓松等,1998;Muller and Massonne,2001;Bai *et al.*,2003)。以本次研究1.0 GPa压力条件为例,其对应深度为约30~35 km的中下地壳。研究表明,在具高地热流值的地区(如构造活动带),地热增温率可达30℃/1000 m(顾芷娟等,1995;Christensen and Mooney,1995;杨晓松等,1998),因此,在中下

地壳岩石温度可达900℃以上,已达到图3中角闪辉长岩的波速“软化”温度。在图3中,1.0 GPa下温度从808℃升高到865℃,出现约0.3%的熔体,此时 v_p 降低了5.8%,达到低速层(体)的形成条件。同时,由于实验条件限制,本次实验在样品高温相变时的波速测量中,一般每个温度点稳定时间为30 min,无法获得相平衡状态下的岩石实验产物及波速。而Zhou等(2005)的研究显示,恒定2.0 GPa和850℃条件下,恒温时间从12 h增加到200 h,斜长角闪岩中熔体体积含量从0.5%增加到5%。因此,在漫长的地质演化过程中,在温度达到波速“软化”温度条件下,角闪辉长岩将发生比模拟实验在程度上高得多的脱水和部分熔融,从而引起岩石波速快速降低。由此可以推测,至少在高地温梯度地区,角闪辉长岩中含水矿物脱水及其引发的岩石部分熔融可在中下地壳形成地震波低速层(体)。

5 结论

不同压力下角闪辉长岩 v_p 随温度变化的测量结果显示,在恒定0.6、1.0和2.0 GPa时,样品的 v_p 首先随温度升高缓慢降低,在温度分别达约810、850和920℃后快速下降。岩石波速的理论计算结果显示了与实验测量一致的 v_p-t 趋势。实验产物观测显示,在高温下岩石中发生了含水矿物(角闪石、绿泥石和黑云母)的脱水作用,并由此诱发岩石部分熔融。高温时岩石中水和熔体的出现,是岩石波速快速降低的主要原因,而且随熔体含量增加,熔体形态由封闭囊状或管状向连通的薄膜状演化,岩石波速下降更加显著。研究结果证实,在具高地热增温率的地区,含水矿物脱水及由此引发的岩石部分熔融作用是中下地壳地震波低速层的重要形成机制。

致谢 衷心感谢中国科学院地球化学研究所深部物质与流体作用地球化学实验室在实验中给予的大力支持。

References

- Aizawa Y, Ito K and Tatsumi Y. 2002. Compressional wave velocity of granite and amphibolite up to melting temperatures at 1 GPa[J]. *Tectonophysics*, 351: 255~261.
- Bai Liping, Du Jianguo, Liu Wei, *et al.* 2003. Experimental studies of

- electrical conductivities and P-wave velocities of gabbro at high pressures and high temperatures [J]. *Science in China : Series D*, 46(9): 895~908.
- Bass J D. 1995. Elasticity of minerals, glasses, and melts [A]. Ahrens T J. *Mineral Physics and Crystallography : A Handbook of Physical Constants* [C]. AGU Reference Shelf 2. Washington DC : American Geophysics Union, 45~63.
- Bina C R and Helffrick G R. 1992. Calculation of elastic properties from thermodynamic equation of state principle [J]. *Annual Review Earth and Planetary Sciences*, 20 : 527~552.
- Chen Zhi, Du Jianguo, Zhou Wenge, *et al.* 2009. Wave velocity and attenuation characteristics of gabbro at 100~300°C and 0.5~4.0 GPa [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 23(5): 338~344 (in Chinese with English abstract).
- Christensen N I and Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust : A global view [J]. *Journal of Geophysics Research*, 100(B7): 9 761~9 788.
- Fei Y W. 1995. Crystallographic data for minerals [A]. Ahrens T J. *Mineral Physics and Crystallography : A Handbook of Physical Constants* [C]. AGU Reference Shelf 2. Washington D C : American Geophysics Union, 29~44.
- Gao Ping. 1997. Study on the origin of low velocity and high conductivity layer (body) in North China [J]. *Earthquake Research in China*, 13(3): 223~232 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Kern H, Liu Yongsheng, *et al.* 2000. Measured and calculated seismic velocities and densities for granulites from xenolith occurrences and adjacent exposed lower crustal sections : A comparative study from the North China craton [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B8): 18 965~18 976.
- Gu Zhijuan, Guo Caihua, Li Biao, *et al.* 1995. Primary studies on the genesis of the low-velocity and highly conductive layers in the crust [J]. *Science in China, Series B*, 25(1): 108~112 (in Chinese).
- Iwamori H. 1998. Transportation of H₂O and melting in subduction zones [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 160 : 65~80.
- Ji Shaocheng, Wang Qin and Xia Bin. 2003. P-wave velocities of polyminerals rocks : Comparison of theory and experiment and test of elastic mixture rule [J]. *Tectonophysics*, 366 : 165~185.
- Jiang Xi, Zhou Wenge, Liu Congqiang, *et al.* 2008. Compressional wave velocity for hornblende plagiogneiss at 1.0 GPa and up to 1 100°C : Measured and calculated results [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2 441~2 446 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yonggang, Xie Hongsen, Zhou Wenge, *et al.* 2002. A method for experimental determination of compressional velocities in rocks and minerals at high pressure and high temperature [J]. *Journal Physics : Condens. Matter.*, 14 : 1~5.
- Ma Rui, Zhang Gang and Wang Ying. 2009. An experimental study of the characteristics of diorite melt composition under different degree of melting [J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 155~157 (in Chinese with English abstract).
- Muller H J and Massonne H J. 2001. Experimental high pressure investigation of partial melting in natural rocks and their influence on v_p and v_s [J]. *Physics Chemistry of Earth (A)*, 26(4~5): 325~332.
- Murase T and Kushiro I. 1979. Compressional wave velocity in partially molten peridotite at high pressure [J]. *Carnegie. Inst. Wash. Y B*, 78 : 559~562.
- Ou Xingong, Jin Zhenmin, Jin Shuyan, *et al.* 2003. Possible seismic reflector in the lower crust : Evidence from fabrics and experiments of seismic velocity on layered gabbro at high temperature and high pressure [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(9): 914~920.
- Sang Zunan, Zhou Yongsheng, He Changrong, *et al.* 2001. An experimental study on the brittle-plastic transition in gabbro [J]. *Journal of Geomechanics*, 7(2): 130~138 (in Chinese with English abstract).
- Smyth J R and McCormick T C. 1995. Crystallographic data for minerals [A]. Ahrens T J. *Mineral Physics and Crystallography : A Handbook of Physical Constants* [C]. AGU Reference Shelf 2. Washington D C : American Geophysics Union, 1~17.
- Wang DuoJun, Liu Congqiang, Li Heping, *et al.* 2002. Impedance spectra of hot, dry gabbro at high temperature and pressure [J]. *Progress in Natural Science*, 12(5): 397~400.
- Wang Yanbin. 2006. Combining the large-volume press with synchrotron radiation : applications to in-situ studies of Earth materials under high pressure and temperature [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 1~36 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Han Yinwen, Lin Ke, *et al.* 1998. An experimental study on partial melting of gabbro at high pressure [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 71~82 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie M R J, Gregory A R and Gardner L W. 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. *Geophysics*, 21(1): 41~70.
- Xie Hongsen, Zhang Yueming and Xu Huiang. 1993. A new of method of elastic-wave velocities in minerals and rocks at high-temperature and high-pressure and its significance [J]. *Science in China : Series B*, 36(10): 1 276~1 280.
- Xie Hongsen. 1997. An Introduction to Material Science in the Earth's Interior [M]. Beijing : Science Press, 1~70 (in Chinese).
- Yang Xiaosong and Jin Zhenming. 1998. The low velocity zone resulted from crustal partial melting and its significance [J]. *Progress in Geophysics*, 13(3): 38~45 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Ping, Yang Xiaosong and Wang DuoJun. 2006. The morphology of melt and its influence on petrophysics and mechanics [J]. *Progress in Geophysics*, 21(3): 790~797 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenge, Xie Hongsen, Liu Yonggang, *et al.* 2005. Dehydration melting of solid amphibolite at 2.0 GPa : Effects of time and temperature [J]. *Science in China : Series D*, 48(8): 1 120~1 133.

附中文参考文献

- 陈 志, 杜建国, 周文戈, 等. 2009. 0.5~4.0 GPa, 100~300°C 条件下辉长岩弹性波速及衰减特征[J]. 高压物理学报, 23(5): 338~344.
- 高 平. 1997. 中国华北地区壳内低速高导层(体)成因模式的探讨[J]. 中国地震, 13(3): 223~232.
- 顾芷娟, 郭才华, 李 彪, 等. 1995. 壳内低速高导层成因初步探讨[J]. 中国科学(B辑), 25(1): 108~112.
- 蒋 玺, 周文戈, 刘丛强, 等. 2008. 1.0 GPa 和常温至 1100°C 条件下角闪石斜长片麻岩的 v_p 变化: 实验测量与理论计算[J]. 岩石学报, 24(10): 2441~2446.
- 马 瑞, 张 刚, 王 英. 2009. 高温高压条件下闪长岩部分熔融产物的反常现象[J]. 地学前缘, 16(1): 155~157.
- 桑祖南, 周永胜, 何昌荣, 等. 2001. 辉长岩脆-塑性转化及其影响因素的高温高压实验研究[J]. 地质力学学报, 7(2): 130~138.
- 王雁宾. 2006. 地球内部物质物性的原位高温高压研究: 大体积压机与同步辐射源的结合[J]. 地学前缘, 13(2): 1~36.
- 王岳军, 韩吟文, 林 舸, 等. 1998. 辉长岩的高压部分熔融实验研究[J]. 岩石学报, 14(1): 71~82.
- 谢鸿森. 1997. 地球深部物质科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1~70.
- 杨晓松, 金振民. 1998. 壳内部分熔融低速层及其研究意义[J]. 地球物理学进展, 13(3): 38~45.
- 周 平, 杨晓松, 王多君. 2006. 熔体形态学及其对岩石物理和力学性质的影响[J]. 地球物理学进展, 21(3): 790~797.

www.yskw.ac.cn