

文章编号: 1000-5773(2002)03-0176-07

2.0 GPa、室温至 1200 °C 条件下斜长角闪岩的纵波速度及其衰减

岳兰秀^{1,2}, 谢鸿森¹, 刘丛强¹, 吴丰昌¹

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用 YJ-3000 t 压力机, 在 2.0 GPa、室温至 1200 °C 条件下, 测量了新疆库地地区斜长角闪岩的纵波速度(v_p)和力学品质因子(Q 值)。实验结果表明: 斜长角闪岩的 v_p 和 Q 值随温度的升高而降低, 在升温的初始阶段, v_p 和 Q 值随温度下降的幅度较小, 随着温度的升高其下降的幅度逐渐增大; 由于斜长角闪岩的各向异性, 导致了在三个方向上 v_p 随温度而下降的幅度显著增大时的温度不同, 其中 x 和 y 方向为 812 °C, z 方向为 673 °C。而在各方向上的 Q 值随温度下降的幅度显著增大时的温度相差不大, 约为 812 °C。观察回收的实验产物表明: 当温度大于 647 °C 时, 产物中开始出现熔体, v_p 在 x 和 y 方向上的下降幅度没有明显的变化, 而在 z 方向上的下降幅度增大; 此时熔体对 Q 值的影响不大。当温度大于 812 °C 时, 产物中的熔体含量明显增多, v_p 和 Q 值下降的幅度都显著增大。据此认为, 部分熔融是弹性波速度减小和衰减增大的主要原因。

关键词: 斜长角闪岩; 高温高压; 部分熔融; 纵波速度; 衰减**中图分类号:** P584; TU459.3**文献标识码:** A

1 引言

弹性波速度及其衰减是岩石重要的物理性质, 对岩石的弹性波速度(v_p)和力学品质因子(Q)的研究已经有很长的历史了^[1~4], 然而前人的研究或是在相对较低的温度和压力条件下进行的^[5,6], 或是侧重于弹性波速度的研究^[7,8], 例如对岩石部分熔融过程中的弹性研究就体现了这一特点, 许多学者只是侧重于研究岩石部分熔融过程中的弹性波速度的变化^[9~12], 却没有研究这一过程中的衰减特征。另一方面, 前人的研究大多没有详细讨论岩石部分熔融程度与弹性波速度变化的定量关系。为了深化岩石在部分熔融过程中的弹性研究, 我们在 2.0 GPa 和室温至 1200 °C 条件下, 测量了斜长角闪岩的 v_p 和 Q 值, 并讨论了在部分熔融过程中 v_p 和 Q 值随温度的变化规律。

2 实验样品

实验所选用的岩石为新疆库地地区的斜长角闪岩。岩石为青灰色、致密块状、面理发育, 主要矿物成分为斜长石、角闪石、云母和少量的楣石, 岩石的化学成分见表 1。

实验样品沿平行线理方向(x), 垂直线理方向(y)和垂直面理方向(z)三个方向制成直径为 12 mm、

收稿日期: 2002-01-16; 修回日期: 2002-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(10032040, 49902020)

作者简介: 岳兰秀(1972—), 女, 博士研究生。

高为 32.5 mm 的圆柱体,为使样品和压砧之间有很好的声偶合,对圆柱体岩石样品的上、下两个端面进行抛光。为了进一步研究实验后岩石样品的结构、矿物组合与弹性波速度和衰减的关系,在与弹性波速度测量相同的实验条件下,利用相同的样品组装方法进行了取样实验,实验样品采用沿 x 方向的样品。

表 1 斜长角闪岩主要成分分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of the starting material(mass fraction) (%)

No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁺	P ₂ O ₅	CO ₂	Total
005	47.09	0.72	16.51	3.05	5.75	0.19	7.80	11.10	2.67	1.44	2.25	0.40	1.00	99.97

Note: Data are determined by the conventional wet chemical analysis in Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science.

3 实验方法

实验是在中国科学院地球化学研究所地球深部物质实验室 YJ-3000 t 压机上的紧装式六面顶高压装置上完成的,实验系统的详细介绍见文献[13],实验装置见图 1。换能器的谐振频率为 1.0 MHz,采样时间间隔为 0.1 μ s,利用示波器记录被测样品的波形。通过测量碳化钨的走时^[14],求出弹性波通过样品的时间 t ,用电感位移计记录岩石被压缩的距离 Δl ,利用公式: $v = (l_0 - \Delta l) / t$ 即可求出弹性波速度,其中 l_0 为样品的原始长度。

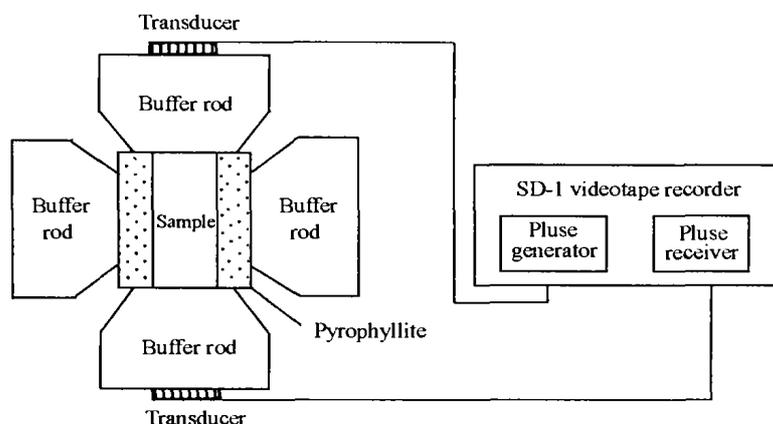


图 1 弹性波速度及其衰减的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental assembly for velocity and attenuation measurements

弹性波衰减的测量采用频谱振幅比法^[15,16]。其基本原理就是利用低衰减(高 Q 值)的样品作为参考样品(一般用纯铝),根据实验样品和参考样品的振幅比与频率的关系,来计算岩石的力学品质因子,从而可以求出弹性波的衰减。

实验以 0.4 MPa/s 的速率升压至所需压力,稳定 10 min 后,测量样品的弹性波速度,同时记录弹性波谱。当压力为 2.0 GPa 时进行加温,测量在恒定压力、不同温度条件下的弹性波速度及其衰减,一般以 20 °C/s 的速率升温至所需温度,恒温 10 min,再进行弹性波速度的测量和记录波谱,以此反复至实验结束。

波速和衰减的测量结束后,进行取样实验,在 2.0 GPa 压力条件下,分别取不同的温度进行熔融实验,实验时压力快速升高到 2.0 GPa,在不同的温度阶段,恒温 3~5 h,将实验产物磨制成光薄片,在光学显微镜下利用目测法测量岩石中各种矿物和熔体的体积分数。

4 实验结果

2.0 GPa、不同温度条件下岩石的矿物组成见表 2,图 2 表示斜长角闪岩的纵波速度随温度的变化规律,图 3 表示岩石的品质因子(Q 值)随温度的变化规律。

表 2 2.0 GPa、不同温度条件下斜长角闪岩的矿物成分的体积分数

Table 2 The volume fraction of minerals in amphibolite at 2.0 GPa and different temperatures (%)

T/(°C)	Pl	Horn	Bi	Sp	Py	Gt	Melt	Ti+Fe
1202	30.2	40.4	3.6	2.5	3.4	0.8	18.3	0.5
1130	31.8	43.8	5.7	1.9	2.3	0.5	13.5	0.3
1051	31.3	51.7	5.0	2.1	1.1	0.9	6.7	0.6
922	34.1	51.6	8.1	2.1	0.9	0.4	3.5	0.3
796	36.1	50.5	9.1	1.4	0.5	0.3	2.2	0.3
647	35.9	51.8	6.4	2.5	0.2	0.1	1.2	0.1
567	39.8	53.3	4.3	1.1	0.5			0.5
513	36.0	51.9	8.1	2.7	0.3			0.4
247	34.9	46.5	14.5	2.6				0.6
212	34.4	55.4	5.6	3.7				
Room Tem.	40.9	38.6	19.1	1.1				

Note: Pl is the plagioclase; Horn is the hornblende; Bi is the biotite; Sp is the spinelline; Py is the pyroxene; Gt is the garnet.

由图 2 和图 3 可以看出, v_p 和 Q 值随温度的升高而降低,但在不同的温度阶段,其下降的速率不同,由各个方向上的 v_p 和 Q 值随温度的下降关系,可以求出其温度系数^[17],其值列于表 3。

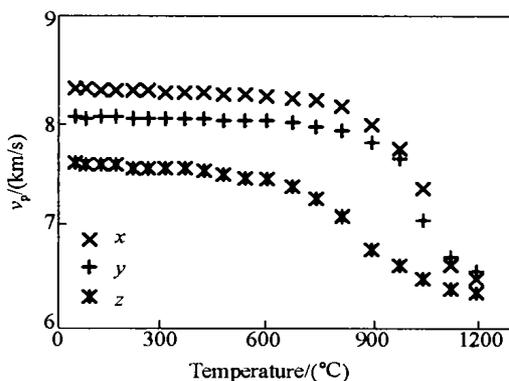


图 2 2.0 GPa 下斜长角闪岩的 v_p -温度曲线
Fig. 2 v_p versus temperature in amphibolite at 2.0 GPa

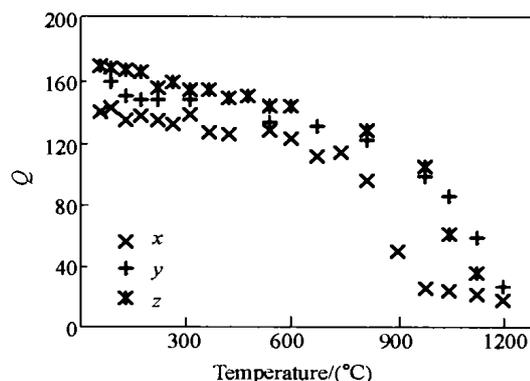


图 3 2.0 GPa 下斜长角闪岩的 Q 值-温度曲线
Fig. 3 Q versus temperature in amphibolite at 2.0 GPa

依据实验获得的 v_p 和 Q 的数据,结合显微镜下熔体含量的统计结果,作出了斜长角闪岩 x 方向的 v_p 和 Q 值随熔体(Melt)含量的变化规律(图 4 和图 5)。

表 3 2.0 GPa、不同温度阶段斜长角闪岩的温度系数

Table 3 The temperature coefficient in amphibolite at 2.0 GPa and different temperatures

Parameter	v_p		Q	
	$(\partial v_p / \partial T)_p$	$(\partial v_p / \partial T)_p$	$(\partial Q / \partial T)_p$	$(\partial Q / \partial T)_p$
$T / (^\circ\text{C})$	25~812	812~1200	25~812	812~1200
x	-0.0002	-0.0048	-0.0293	-0.1597
y	-0.0001	-0.0040	-0.0462	-0.2080
z	-0.0003 ^(a)	-0.0021 ^(b)	-0.0274 ^(a)	-0.2510 ^(b)

Note: (a) Expressing the temperature range from room temperature to 673 °C; (b) Expressing the temperature range from 673 °C to 1200 °C

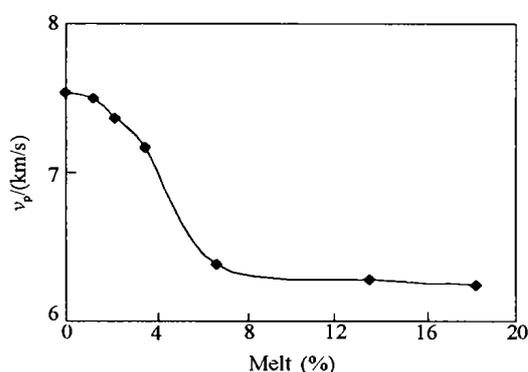


图 4 2.0 GPa 下斜长角闪岩的 v_p -Melt 曲线
Fig. 4 v_p versus Melt in amphibolite at 2.0 GPa

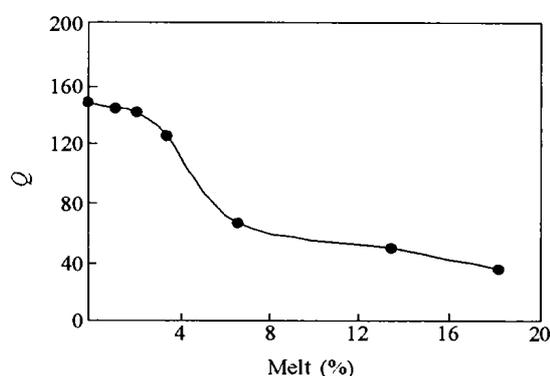


图 5 2.0 GPa 下斜长角闪岩的 Q -Melt 曲线
Fig. 5 Q versus Melt in amphibolite at 2.0 GPa

5 讨 论

由图 2 可以看出,在 2.0 GPa 压力下,斜长角闪岩的 v_p 随温度的增加而减小,且在三个方向上具有各向异性,表现为 $v_{p,x} > v_{p,y} > v_{p,z}$,这与前人的实验结果一致,刘斌等的测量结果显示^[18],岩石的组构是影响弹性波速度各向异性的主要因素,赵志丹等认为^[19],各向异性主要由两个因素引起,一是岩石中的矿物含量及矿物单晶的各向异性,二是岩石中矿物定向排列形成的宏观线理和面理。斜长角闪岩强的各向异性是由于其中角闪石含量较高,而角闪石单晶不仅波速较高,而且各向异性也很强。

由于斜长角闪岩的各向异性,导致了在三个方向上 v_p 随温度变化的趋势有所不同(图 2)。在 x 方向上,当温度低于 812 °C 时, v_p 随温度下降的幅度较小;当温度大于 812 °C 时, v_p 随温度下降的幅度显著增大。在 y 方向上, v_p 显著下降时的温度约为 812 °C。而在 z 方向上, v_p 显著下降的温度约为 673 °C。不同方向上 v_p 的温度系数列于表 3。

v_p 随温度先缓慢下降、随后快速下降的变化趋势表明,在升温的初始阶段,温度是影响 v_p 下降的主要因素,由实验产物的观察也可以看到,此时岩石的矿物成分基本保持不变;随着温度的升高, v_p 急剧下降,此时影响 v_p 变化的因素很多^[20~22],实验产物的薄片鉴定结果表明,当温度为 647 °C 时,斜长石减少,有少量的黑云母通过脱水反应转变为石榴石,并且开始出现熔体。相对于斜长石来说,石榴石是高波速的矿物,熔体是低波速的物质,但是由于生成的石榴石的量很少,对波速的影响不大,所以 v_p 下降

仍缓慢。当温度大于 796 °C 时,熔体的含量远大于石榴石的含量, v_p 快速下降,说明此时熔体是影响 v_p 下降的主要因素。由图 4 也可以说明,随着熔体含量的增加, v_p 先缓慢降低,当熔体的含量介于 2% 和 8% 之间时,下降的速率突然增大;当熔体含量继续增大,大于 8% 时, v_p 下降的速率又变小,说明熔体含量的增加对波速的影响减弱。

同样,部分熔融也显著地影响弹性波的衰减,由图 3 可以看出,在 2.0 GPa 压力条件下,岩石的 Q 值随温度的升高而减小,与纵波速度随温度的变化规律相似,而且也表现出各向异性的特征,但其各向异性的表现与波速的不同,即 $Q_x > Q_y > Q_z$,这与前人的研究结果相当一致^[23,24],说明衰减的各向异性的机制与波速的不同。刘斌等认为,高压下 Q 值的各向异性反映了压实后矿物集合体的特性^[15],是受各方向的晶体弹性模量的强弱影响的。

由于斜长角闪岩的各向异性特征,也导致了在各方向上 Q 值随温度下降的形式不同,但是由于影响弹性波衰减的因素很多^[16],包括裂隙边界和颗粒接触面之间的库仑摩擦、颗粒边界的位错、孔洞的粘性剪切松弛和流体流动等,各种因素综合作用的结果,导致 Q 值随温度下降的幅度显著增大时的温度相差不大,大约在 812 °C,其前后随温度变化的温度系数见表 3。

Q 值随温度先缓慢下降、随后快速下降的变化趋势表明,在升温的初始阶段,温度是影响弹性波衰减的主要因素,由实验产物的观察也可以看到,在温度低于 647 °C 时,岩石的矿物成分基本保持不变,矿物成分对衰减的影响不大。随着温度的升高, Q 值下降的幅度增大,用显微镜进行的矿物鉴定结果显示,此时岩石中的熔体成分快速增加,表明熔体是导致弹性波快速衰减的主要因素,熔体对衰减的影响与波速不同,其主要机制为熔体的流动^[25]、射流^[26]以及散射^[27]等。由熔体含量与 Q 的变化关系也可以看出(图 5),随熔体含量的增加,衰减增大,当熔体含量小于 2% 时, Q 值缓慢下降,当熔体含量介于 2% ~ 8% 之间时, Q 值快速下降,当熔体含量大于 8% 时,下降的速率又变小,说明熔体含量的增加对衰减的影响变小。

6 结 论

在 2.0 GPa、室温至 1200 °C 条件下,研究了斜长角闪岩的 v_p 和 Q 值。结果表明, v_p 和 Q 值随温度的升高而降低。岩石在发生部分熔融以前, v_p 和 Q 值随温度的升高而降低的斜率很小;在部分熔融过程中, v_p 和 Q 值随温度的升高而快速下降,当熔融达到一定程度时,下降的速率又变小。说明部分熔融是弹性波速度减小和衰减增大的主要原因。熔体的含量与 v_p 和 Q 的关系也可以说明这一点,当熔体含量小于 2% 时, v_p 和 Q 值下降缓慢;当熔体含量介于 2% 和 8% 时,急剧下降;当熔体含量大于 8% 时,其下降的速率又变小。

感谢郭捷研究员、张月明高级工程师在实验过程中给予的帮助。

参 考 文 献:

- [1] Birch F. The Velocity of Compressional Waves in Rocks to 10 Kilobars [J]. J Geophys Res, 1960, 65: 1083—1102.
- [2] Gordon R B, Davis L A. Velocity and Attenuation of Seismic Waves in Imperfectly Elastic Rock [J]. J Geophys Res, 1968, 73: 3917—3935.
- [3] Jackson D D, Anderson D L. Physical Mechanisms of Seismic Wave Attenuation [J]. Rev Geophys Space Phys, 1970, 8: 1—63.
- [4] Christensen N I. Compressional Wave Velocities in Rocks at High Temperature and Pressure, Critical Thermal Gradients, and Crustal Low-Velocity Zones [J]. J Geophys Res, 1979, 84: 6849—6857.
- [5] Johnston D H, Toksoz M N. Ultrasonic P and S Wave Attenuation in Dry and Saturated Rocks under Pressure [J]. J Geophys Res, 1980, 85: 925—936.

- [6] Kern H, Richter A. Temperature Derivatives of Compressional and Shear Wave Velocities in Crustal and Mantle Rocks at 6 kbar Confining Pressure [J]. *J Geophys*, 1981, 49(1):47—56.
- [7] 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 1400 °C and 5.5 GPa [J]. *High Temperature-High Pressure*, 1994, 26(4):375—384.
- [8] ZHOU Wen-ge, XIE Hong-sen, ZHAO Zhi-dan, et al. Phase Transition of Trachy-Basalt and Its Influence to Compressional Wave Velocities on High Temperature and High Pressure [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(4):424—427. (in Chinese)
周文戈, 谢鸿森, 赵志丹, 等. 高温、高压下粗面玄武岩相变对其纵波速度影响的研究 [J]. *科学通报*, 1999, 44(4): 424—427.
- [9] ZHANG You-nan, MA Jin. Investigation on Compressional Wave Velocities of Mafic Rocks in Deep Crust [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1997, 40:221—230. (in Chinese)
张友南, 马 谨. 深部地壳镁铁质岩石波速的研究 [J]. *地球物理学报*, 1997, 40:221—230.
- [10] BAI Wu-ming, MA Mai-ning, LIU Jiang-lin. Testing Study on Elastic Wave Velocities and Electrical Conductivity of Crustal Rocks. *Chinese Journal of Rock [J]. Mechanics and Engineering*, 2000, 19(suppl):899—904. (in Chinese)
白武明, 马麦宁, 柳江琳. 地壳岩石波速和电导率实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(增刊):899—904.
- [11] ZHAO Zhi-dan, GAO Shan, LUO Ting-chuan, et al. Origin of Crustal Low Velocity Later of Qinling and North China: Evidence Form Laboratory Measurement of P-Wave Velocity in Rocks at High *P-T* Conditions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 39(5):642—652. (in Chinese)
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 [J]. *地球物理学报*, 1996, 39(5):642—652.
- [12] Murase T, Kushiro I. Compressional Wave Velocity in Partially Molten Peridotite at High Pressure [J]. *Carnegie Inst Wash YB*, 1979, 78:559—562.
- [13] XIE Hong-sen, ZHANG Yue-ming, XU Hui-gang, et al. The New Measurement of Elastic Wave in Rock and Mineral and Its Significance [J]. *Science in China*, 1993, 23(8):861—864. (in Chinese)
谢鸿森, 张月明, 徐惠刚, 等. 高温超高压下测量岩石矿物弹性波速的新方法及其地学意义 [J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(8):861—864.
- [14] ZHOU Wen-ge, XIE Hong-sen, LIU Yong-gang, et al. Travel Time Measurement in Tungsten Carbide Anvil under High Pressure [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(3):171—175. (in Chinese)
周文戈, 谢鸿森, 刘永刚, 等. 高压下碳化钨压砧走时的测量 [J]. *高压物理学报*, 2000, 14(3):171—175.
- [15] LIU Bin, GE Ning-jie, Kern H, et al. Velocities and Attenuation of P-and S-waves and Their Anisotropies in Serpentinite and Amphibolite under Different *p-T* Conditions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41(3): 371—381. (in Chinese)
刘 斌, 葛宁洁, Kern H, 等. 不同温压条件下蛇纹岩和角闪岩中波速和衰减的各向异性 [J]. *地球物理学报*, 1998, 41(3):371—381.
- [16] Johnston D H, Tokson M N, Timur A. Attenuation of Seismic Waves in Dry and Saturated Rocks: II Mechanisms [J]. *Geophysics*, 1979, 44(4):691—711.
- [17] GONG Zi-zheng, HUA Jing-song, JING Fu-qian, et al. A New Measurement of Temperature Coefficient in Elastic Wave Velocity at High Pressure [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(4):241—246. (in Chinese)
龚自正, 华劲松, 经福谦, 等. 高压下声速温度系数的一种新算法 [J]. *高压物理学报*, 2000, 14(4):241—246.
- [18] LIU Bin. Relations of Elastic Wave Velocity and Attenuation and Their Anisotropies to the Fabric of Rocks under Different *p-T* Conditions [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(1):247—257. (in Chinese)
刘 斌. 不同温压下岩石弹性波速度、衰减及各向异性与结构的关系 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(1):247—257.
- [19] ZHAO Zhi-dan. The Velocity of the Rocks from Dabieshan, Huabei and Qingzang Parriae in Chinese: Its Implications for Crust-Mantle Recycling [D]. Beijing: China University of Geosciences, 1998. (in Chinese)
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 [D]. 北京:

中国地质大学, 1998.

- [20] ZHAO Zhi-dan, XIE Hong-sen, ZHOU Wen-ge, et al. Density and P-Wave Velocity of the Eclogite from Dabieshan and Its Implications for Crust-Mantle Recycling [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, 20(1):6-10. (in Chinese)
赵志丹, 谢鸿森, 周文戈, 等. 大别山榴辉岩的密度和波速及其对壳-幔循环的启示 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1):6-10.
- [21] Sato H, Manghnani M H. Ultrasonic Measurements of v_p and Q_p : Relaxation Spectrum of Complex Modulus on Basalt Melts [J]. Phys Earth Planet Inte., 1985, 41: 18-33.
- [22] XIE Hong-sen, ZHOU Wen-ge, LI Yu-wen, et al. The Elastic Characteristics of Serpentinits Dehydration at High Temperature-High Pressure and Its Significance [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(6):806-811. (in Chinese)
谢鸿森, 周文戈, 李玉文, 等. 高温高压下蛇纹岩脱水的弹性特征及其意义 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(6):806-811.
- [23] Kern H, Liu B, Popp T. Relationship between Anisotropy of P and S Wave Velocities and Anisotropy of Attenuation in Serpentine and Amphibolite [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B2):3051-3065.
- [24] Prasad M, Manghnani M H, Siegesmund S. Compressional Wave Velocity and Quality Factor Characteristics of Selected KTB Core Samples [J]. Scientific Drilling, 1994, 4: 227-231.
- [25] Biot M A. Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media [J]. J Appl Phys, 1962, 33(4): 1482-1498.
- [26] Mavko G M, Nur A. Wave Attenuation in Partially Saturated Rocks [J]. Geophysics, 1979, 44 (1): 161-178.
- [27] Yamakawa N. Scattering and Attenuation of Elastic Waves [J]. Geophys Mag, 1962, 31(1): 61-103.

COMPRESSSIONAL VELOCITY AND ATTENUATION IN AMPHIBOLITE AT 2.0GPa AND UP TO 1200°C

YUE Lan-xiu^{1, 2}, XIE Hong-sen¹, LIU Cong-qiang¹, WU Feng-chang¹

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Compressional wave velocity and attenuation in amphibolite collected from Kudi, Xinjiang Province were measured at high pressure (2.0 GPa) and high temperature (up to 1200 °C). The experimental results show that v_p and Q values decrease with the increase of temperature. At the beginning of increasing temperature, v_p decreases slowly, and then decreases rapidly with the higher temperature. Because of amphibolite's anisotropy, the temperature at which v_p decreases quickly in different directions is different. The temperature is 812 °C in x and y and 673 °C in z . However, the temperature at which Q decreases quickly is about 812 °C at the three directions. It can be concluded from the experimental results of minerals that as the temperature is higher than 647 °C, the melt appears. The scope of v_p decreasing with temperature in x and y directions is not various than before. It increases in z direction. However, the melt does not affect Q values. As the temperature is higher than 812 °C, the melt is more than before, v_p and Q values decrease more quickly. Therefore, partial melting is the main reason for elastic wave velocity decreasing and attenuation increasing.

Key words: amphibolite; high-temperature and high-pressure; partial melting; compressional velocity; attenuation