

1.0 GPa、高温下岩石熔融玻璃的弹性波速测量及其地球物理意义

蒋玺^{1,2}, 谢鸿森¹, 周文戈¹, 刘丛强¹, 刘永刚¹, 范大伟^{1,2}, 万方^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学研究室 贵州 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院 北京 100039

Jiang Xi^{1,2}, Xie Hongsen¹, Zhou Wenge¹, Liu Congqiang¹, Liu Yonggang¹, Fan Dawei^{1,2}, Wan Fang^{1,2}

1. *The Division of the Earth's Interior Materials and Fluid Interaction Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*

Jiang Xi, Xie Hongsen, Zhou Wenge, et al. Measurement of elastic wave velocities in rock glasses up to 900°C at 1.0 GPa and their geophysical implications. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 158-164

Abstract: At 1.0 GPa, compressional and shear wave velocities (v_p and v_s) of seven types of glass are measured as functions of temperature up to 900 °C and 730 °C, respectively. Experimental runs indicated that, with elevating temperature under high pressure, the compression of glass is responsible for the decrease of travel time in the sample and the glasses show little change in height during cooling process. When the temperatures are lower than the glass transition temperatures (T_g), it is found that the temperature derivatives of velocities of the glasses are between $-0.2 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ and $-0.7 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ for v_p and almost $-0.1 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ for v_s , respectively. At higher temperature ($T > T_g$), v_p of the glasses decrease quickly with temperature derivatives between $-0.8 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ and $-3.6 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. According to the change in temperature derivatives of v_p , the glass transition temperatures are determined to be between 584 °C and 654 °C. Using the Voigt-Reuss-Hill (VRH) average method, it is calculated that the wave velocities of the lower crustal rocks decrease with increase in glass content. Because of this, we suggest that the low velocity layer in lower crust is a function of the glass contents in rocks, which results in the decrease in the wave velocity of rocks in lower crust.

Key words: high temperature and high pressure; glass; wave velocity; low velocity layer

摘要: 利用超声波反射法,在1.0 GPa、最高温度分别达900 °C和730 °C条件下,测量了岩石成分从酸性到基性的7种熔融玻璃的纵波波速(v_p)和横波波速(v_s)随温度的变化。实验过程证明,高压下升温过程中样品被压缩导致了样品中弹性波走时减少,而降温过程中样品长度基本保持不变。结果显示,1.0 GPa下,随实验温度升高,不同成分玻璃的 v_p 首先以 $-0.2 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 到 $-0.7 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 不等的速率缓慢降低,而其 v_s 多以 $-0.1 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 速率随温度升高而降低。当温度高于玻璃转变温度(T_g)后,玻璃的 v_p 开始以 $-0.8 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 到 $-3.6 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 不等的速率快速下降。根据玻璃 v_p 随

收稿日期:2007-01-05;修回日期:2007-01-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2005CB724400);国家自然科学基金项目(40574036);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJXC2-SW-N20)

作者简介:蒋玺(1977—),男,博士研究生,从事地球深部物质研究。E-mail: xjiang235@163.com

温度变化速率的改变, 拟合出这几种玻璃的转变温度从 584 °C 到 654 °C。由实验获得的玻璃波速, 利用 Voigt-Reuss-Hill (VRH) 平均计算出下地壳岩石中玻璃的存在将降低岩石的波速, 并由此为下地壳低速层提出一种新的解释, 即非晶质体的存在可能在下地壳形成地震波低速层。

关键词: 高温高压; 玻璃; 弹性波速; 地壳低速层

中图分类号: P31; P52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2007)03-0158-07

0 引言

地球内部岩石熔融或部分熔融产生的岩浆熔体的运移、结晶以及与岩石相互作用, 导致地球内部物质发生迁移和分异, 是地球物质演化的重要过程之一, 也是地球保持其活力的最基本因素之一。因此, 对岩浆熔体的物理性质的研究可为认识岩石圈的结构与演化提供重要的实验依据^[1]。由于岩石高温熔体的淬火玻璃与相同成分的熔体在结构上基本一致^[2-3], 所以在不同温度压力条件下进行岩石熔融玻璃的物性分析和测量, 已成为研究岩浆熔体的重要手段。为此, 超声波速测量作为一种重要的物性研究方法已被用于玻璃弹性性质研究。例如, Pan 等测量了室温下 0.01~1.0 GPa 压力范围内天然玄武岩玻璃的弹性波速, 并修正了天然样品中裂隙、气泡及结晶矿物对玻璃波速的影响^[4]。Meister 等在室温、压力 0~0.8 GPa 范围内测量了 SiO₂ 含量(质量分数)从 49%~100% 的 6 种岩石熔融玻璃的弹性波速, 并外推实验结果至上地幔温压状态, 讨论了上地幔岩石中玄武岩玻璃存在对其地震波速度结构的影响^[5]。利用布里渊散射方法, 在高于 1 000 °C 条件下, Xu 等对水白玻璃^[6]和 K₂Si₄O₉ 玻璃^[7]以及 Askarpour 等对透辉石玻璃、钙长石玻璃和钙铝榴石玻璃^[8]进行了常压下弹性波速随温度变化的测量, 讨论了临界温度、软化温度等温度特征点对玻璃波速的影响。然而, 在前人的研究中, 有关高温同时高压条件下岩石熔融玻璃弹性波速测量的研究却非常少见。虽然 Matsushima 在温度、压力分别达 900 °C 和 2.0 GPa 条件下, 测量了岩石玻璃的弹性波速, 并发现在低于玻璃转变温度 (T_g) 时, 玻璃的弹性波速随温度升高而异常升高^[9]。但是, 他的实验只采用了黑曜岩、玄武岩玻璃及含玻璃质的方辉安山岩三种样品。为了了解更多岩石熔融玻璃高温高压下的弹性性质, 我们分别在 1.0 和 2.0 GPa、最高温度达 1 000 °C 条件下, 测量了岩石成分从酸性到基性的 7 种岩石熔融玻璃的 v_p 和 v_s 。在前面的

工作中^[10], 我们讨论了 2.0 GPa 下、室温至 1 000 °C 时岩石熔融玻璃弹性波速随温度的变化, 并计算出在二辉橄榄岩中如果有超过 20% 的玄武岩玻璃存在, 将会在上地幔形成地震波低速层。本文将讨论 1.0 GPa、室温至最高 900 °C 条件下岩石熔融玻璃弹性波速随温度的变化, 并讨论如果地壳内部存在非晶态物质对壳内地震波速度结构的影响。

1 样品及实验

1.1 样品

实验样品为从酸性到基性的 7 种岩石(主要化学成分见表 1)的熔体淬火玻璃。玻璃制备在中国科学院地球化学研究所 YJ-3000t 大腔体高压装置上完成。在 1.0 GPa 下, 将装入石墨加热管的岩石粉末加热到 1 400~1 550 °C, 然后快速冷却为熔融玻璃。除片麻岩、流纹岩等 SiO₂ 含量高的岩石中有极少量 (<3%) 未熔尽的小石英颗粒外, 其余样品几乎全为非晶质体。详细的玻璃制备过程及样品分析参见文献^[11]。

1.2 样品组装及实验方法

高温高压下岩石熔融玻璃的弹性波速测量实验在中国科学院地球化学研究所 YJ-3000t 大腔体高压装置上完成。详细弹性波速测量装置介绍参见文献^[12]。样品组装如图 1。实验过程中, 首先以 0.01 GPa/min 速率加压到 2.0 GPa, 然后恒定压力并以 ~5 °C/min 加温到实验最高温度, 温度稳定 10 min 后开始以同样速率降温, 降温过程中进行弹性波走时测量, 每个测量温度点稳定 15 min 后进行走时测量直到室温, 然后以 0.01 GPa/min 将实验压力降低到 1.0 GPa, 并以同样的方式进行 1.0 GPa 下的走时随温度的变化测量直到实验结束。玻璃样品弹性波速测量采用脉冲反射法和反射-透射法。如图 1, 当温度较低时(约 <800 °C), 直接由样品上、下界面超声波反射信号的走时 (T_1 和 T_2) 以及样品高度 (H), 根据公式 $v = 2H / (T_2 - T_1)$ 即可计算出

表 1 合成玻璃的几种岩石的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of rocks for synthesizing glasses

岩石名称	编号	w _B /%													Total
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	
玄武岩	10082	48.36	14.47	6.63	4.51	6.58	8.59	3.28	1.48	0.16	2.35	0.78	0.15	2.57	99.58
安山岩	10017	56.00	15.98	4.49	3.60	3.38	5.89	4.38	2.58	0.17	1.69	0.54	0.02	1.27	99.99
片麻岩	Ly974	79.35	9.00	2.29	1.30	0.56	3.93	0.33	0.17	0.03	0.74	0.30	—	1.56	99.56
英安岩	Q96-4	63.86	15.90	3.77	0.97	1.47	2.82	3.32	2.81	0.06	0.62	0.21	1.74	1.93	99.48
流纹岩	Q96-7	76.96	12.93	0.67	0.25	0.36	0.45	2.30	3.78	0.06	0.17	0.01	0.36	1.19	99.49
斜长角闪岩	T95-19	61.99	17.82	5.46	3.54	2.70	1.90	1.32	2.49	0.19	0.84	0.26	—	0.69	99.20
辉石岩	Zp978	47.70	12.53	4.83	2.67	6.83	12.54	0.94	6.12	0.16	0.75	1.17	2.52	0.45	99.21

注: 岩石化学成分采用湿法分析获得; 除样品 Ly974 在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室分析外, 其余样品均在湖北地矿所分析中心完成。

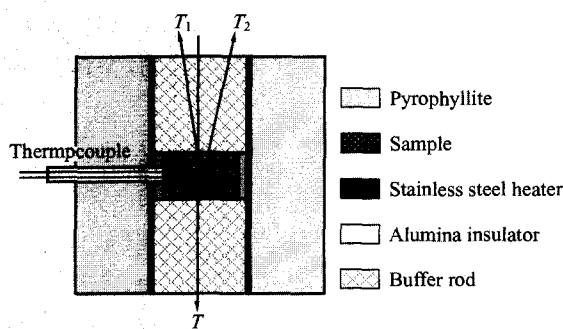


图 1 样品组装及波速测量示意图
Fig. 1 Schematic representation of sample assembly and velocities measurement

超声波在样品中的传播速度。随实验温度升高(约 >800 °C), 下界面反射信号逐渐变弱, 此时就通过测量超声波透射走时(T), 用反射-透射联合法进行波速测量^[13]。实验采用的 TDS784A 型数字示波器(美国 Tektronix 公司)走时测量精度可达 2 ns, 而纵波和横波在样品中经过一次反射后的走时一般分别在 2 μs 和 3.5 μs 左右, 考虑到样品在高温高压过程中高度变化的影响, 我们估计 v_p 和 v_s 测量误差分别 <1.5% 和 <1.0%。为了增加缓冲棒与样品间的声阻抗差, 在样品两端垫上厚度为 0.1 mm 的铅片。纵波波速测量缓冲棒用经过 800 °C 焙烧的叶蜡石, 横波波速测量缓冲棒用铝棒, 并用 1 mm 厚的叶蜡石将其与压砧面隔开。

1.3 弹性波速测量

在 Matsushima 的实验中, 他发现高压下当温度低于约 600 °C 时, 玻璃的弹性波速随温度的升高而升高, 而高于此温度时, 波速则随温度升高而降低, 并认为此温度为玻璃的转变温度^[9]。虽然 Xu 等对 K₂Si₄O₉ 玻璃的常压高温实验也发现, 在玻璃转变温度以下, K₂Si₄O₉ 玻璃的 v_p、v_s 随温度升高略有升高^[7], 但其升高远不及 Matsushima 的实验结

果明显。而且在 Xu 等对水白玻璃^[6] 和 Askarpour 等对透辉石玻璃、钙长石玻璃和钙铝榴石玻璃^[8] 的研究中, 他们都发现常压下玻璃的波速随温度升高而单调降低。所以我们认为 Matsushima 的实验中观察到的波速随温度升高而升高现象与压力有关。

在我们的实验中, 在 2.0 GPa 下加热时, 样品中的弹性波走时随温度升高而减少直到约 600 °C, 然后走时才开始随温度升高而增加。如图 2 所示, 假设实验过程中样品高度不变, 这表现为样品的弹性波速随温度升高而升高, 超过此温度后波速则开始随温度升高而降低。这与 Matsushima 的实验情况一致。然而, 在降温过程中我们发现样品的弹性波速随温度降低则单调升高。而且, 当实验压力从 2.0 GPa 降低到 1.0 GPa 再进行走时测量时, 则发现升温 and 降温过程中样品的走时基本一致。同时, 实验完成后对样品的观察发现, 经过高温高压过程,

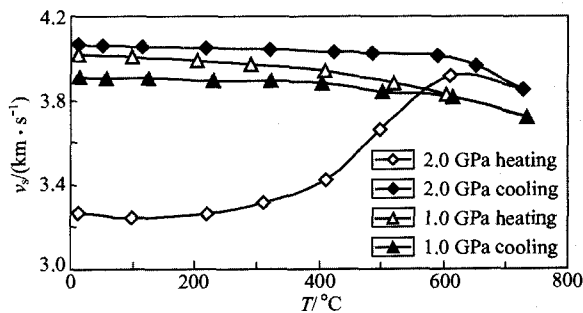


图 2 假设高温高压过程中样品长度不变时样品 Q96-4 中横波波速随温度压力的变化
Fig. 2 Temperature effect on v_s of Q96-4 at 1.0 and 2.0 GPa on the assumption that length of sample is invariable with temperature and pressure

样品的波速首先在 2.0 GPa 下随温度升高而升高到约 600 °C, 接着降低; 然后波速又随温度降低而单调升高。当实验压力从 2.0 GPa 降低到 1.0 GPa 后, 升温 and 降温过程中波速均表现为随温度升高而单调降低

实验样品已被压短 3%~5%, 说明在 2.0 GPa 下样品已基本被压实, 所以在 1.0 GPa 下升温 and 降温过程中样品的长度无明显变化。由此我们认为 2.0 GPa 下升温过程中样品弹性波走时减少主要是因为高温高压下样品被压缩引起, 而在降温过程中样品长度几乎不变。所以我们根据降温过程中样品的弹性波走时和实验后的样品高度来确定玻璃样品的弹性波速度。

2 实验结果

1.0 GPa 下各种岩石熔融玻璃的 v_p 、 v_s 随温度的变化如图 3。从图中可看出, 1.0 GPa、室温下岩石熔融玻璃的 v_p 随岩石样品中 SiO_2 含量的增加, 由玄武岩玻璃(10082)的 $6.95 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到片麻岩玻璃(Ly974)的 $5.65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 v_s 在常温高压下随原岩成分的变化并不明显, 最高为英安岩玻璃(Q96-4)的 $3.74 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 最低为流纹岩玻璃(Q96-7)的 $3.59 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在加温过程中, 各种玻璃的 v_p 、 v_s 首先随温度升高缓慢降低, 当温度升高到约 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 后, 波速随温度升高下降速率明显增大。我们也由此 v_p - T 斜率的变化来确定各种玻璃的转变温度 T_g (如图 4)。

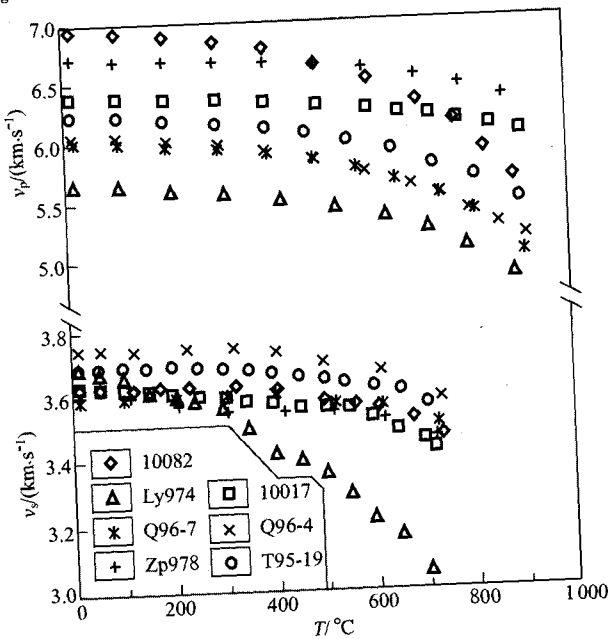


图 3 1.0 GPa 下各种岩石熔融玻璃 v_p 和 v_s 随温度的变化
Fig. 3 Temperature effects on wave velocities of rock glasses at 1.0 GPa

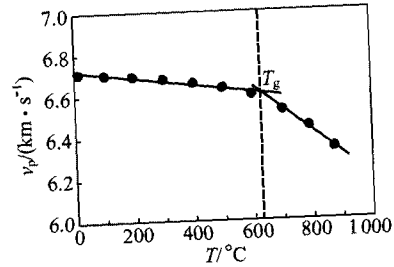


图 4 高温下根据样品 Zp978 的 v_p 随温度的变化确定其转变温度(T_g)

Fig. 4 Measurement on the glass transition temperature (T_g) for sample of Zp978 according to the variation of v_p with temperature

表 2 1.0 GPa 下岩石熔融玻璃的转变温度及其波速温度系数

Table 2 Transition temperature and temperature derivatives of velocities of rock glasses at 1.0 GPa

样品编号	玻璃转变温度 $T_g/^\circ\text{C}$	$\partial v/\partial T$ ($10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)		
		v_p		v_s
		$T < T_g$	$T > T_g$	$T < T_g$
10082	654	-0.7	-3.6	-0.1
10017	619	-0.2	-0.8	-0.2
Ly974	612	-0.4	-2.0	-0.8
Q96-4	593	-0.5	-2.1	-0.1
Q96-7	584	-0.4	-1.8	-0.1
T95-19	599	-0.4	-1.7	-0.1
Zp978	626	-0.2	-1.1	-0.1

从表 2 可看出, 当温度低于玻璃转变温度(T_g)时, 不同成分岩石熔融玻璃 v_p 的温度导数从 $-0.2 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 到 $-0.7 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。当温度高于玻璃转变温度后, 各种玻璃 v_p 的温度导数快速增大 4 倍以上, 分别达 $-0.8 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 到 $-3.6 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。总的来说, 玄武岩玻璃(10082)的 v_p 随温度的变化最为明显, 从 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $6.95 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $892 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $5.65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 而安山岩玻璃(10017)的 v_p 随温度变化最小, 从 $13 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $6.38 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $906 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $6.03 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。各种玻璃波速的温度导数与玻璃的成分没有明显的相关关系。由于实验中 v_s 测量温度较低, 所以我们只对 v_s 进行了转变温度以下的温度导数拟合, 从表中可看出, 除片麻岩玻璃(Ly974)外, 其他各种岩石熔融玻璃 v_s 的温度导数与成分的变化并不明显, 多为 $-0.1 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。而片麻岩玻璃(Ly974)的 v_s 随温度升高下降速率较大, 达到 $-0.8 \times 10^{-3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 其 v_s 也从 $14 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $3.69 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $705 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $3.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。片麻岩玻璃大的 v_s 温度系数可能与玻璃中高的

SiO₂含量及极少量的小石英颗粒有关, 因为 SiO₂具有相比较高的剪切模量, 所以其横波对温度压力的变化更为敏感。

3 地球物理意义

图3显示了岩石熔融玻璃的纵波波速随成分变化明显, 但其均明显低于相同成分的结晶岩石。Matsushima称玻璃在高于临界温度以上时为超冷流体^[9]。Matsushima^[14]和Meister等^[5]均认为上地幔中这种超冷流体的存在将大大降低地幔岩石的弹性波速, 从而在上地幔形成“干”的地震波低速层。同样, 假如在地壳岩石中存在非晶质成分, 也势必会降低岩石的弹性波速度。根据实验获得的高温高压下各种岩石熔融玻璃弹性波速结果, 就可对岩石中玻璃质成分对岩石波速的影响进行讨论。以我国华北地区为例, 下地壳底部温度为450~750℃^[15], 下地壳岩石主要为斜长角闪岩和基性麻粒岩^[16]。为此, 利用Voigt-Reuss-Hill (VRH) 平均方法^[17], 对1.0 GPa, 550℃时各种岩石熔融玻璃对这两种岩石波速的影响进行计算如表3。结果显示, 在下地壳岩石中, 各种岩石熔融玻璃的存在将不同程度地降低岩石的弹性波速, 而且玻璃对岩石纵波波速的影响较横波波速更为明显。除玄武岩玻璃(10082)和辉石岩玻璃(Zp978)外, 平均其他5种中性到酸性岩石熔融玻璃的纵波速度, 再与岩石波速进行VRH计算得出, 10%(体积分数)中酸性玻璃的存

在将使斜长角闪岩和基性麻粒岩的纵波速度降低1.4%, 当岩石中玻璃的体积分数达到40%后, 两种岩石的纵波速度将降低分别达5.5%和5.7%。

地球物理探测证实, 在全球大陆地壳的不同深度广泛存在地震波低速层。例如在我国华北平原武清地区下地壳中约28 km深度分布了 v_p 为6.3 km/s的地震波低速层^[18]; 在我国青藏高原亚东到羊卓雍湖和莎马达到纳木湖地壳剖面约20~30 km深度, 均存在 v_p 约5.7 km/s的低速层, 其上下岩层 v_p 分别为达6.1 km/s和6.3 km/s^[19]。迄今, 人们已通过各种实验对地壳低速层成因进行了构造和物质组成方面的解释, 如韧性剪切、流体作用等引起的软弱层^[19,20], 富含石英的岩层^[21], 矿物脱水作用及岩石部分熔融^[22-24]等。下地壳主要由斜长角闪岩、辉长岩、麻粒岩等岩石类型组成, 它们均表现出高的纵波波速(>6.6 km/s)^[25]。所以, 由上面的计算推测, 假如在下地壳岩石中存在一定含量的玻璃质成分, 将降低岩石的弹性波速而形成低速层。从20世纪初开始, 学者们就在全球地壳内的大量韧性剪切活动带中, 陆续发现了许多非晶质体岩石, 一般称为假玄武岩玻璃, 但其成分多表现为中性^[26]。最新报道又有人在我国赣东北地区发现了一种新的天然玻璃质岩石, 成分显酸性, 疑为岩浆成因^[27]。所以, 虽然一般认为在漫长的地质历史时期, 地壳内岩浆有充分的时间冷却为全晶质体^[28]; 但我们认为, 这并不能排除在岩浆侵入的一定历史时期和一定区域内, 存在一定量的非晶质体的可能性。由此, 这些非

表3 1.0 GPa、550℃条件下斜长角闪岩和基性麻粒岩中不同含量玻璃对岩石波速的影响

Table 3 Variations of velocities in amphibolite and mafic granulite with different glass content at 1.0 GPa and 550℃

样品编号	波速 (km·s ⁻¹)	玻璃及玻璃含量		斜长角闪岩及玻璃含量				基性麻粒岩及玻璃含量				
		100%	0	10%	20%	30%	40%	0	10%	20%	30%	40%
10082	v_p	6.61	6.78	6.76	6.75	6.73	6.71	6.80	6.78	6.76	6.74	6.72
	v_s	3.59	3.76	3.74	3.73	3.71	3.69	3.79	3.77	3.75	3.73	3.71
10017	v_p	6.28	6.78	6.73	6.68	6.63	6.58	6.80	6.75	6.69	6.64	6.59
	v_s	3.53	3.76	3.74	3.71	3.69	3.67	3.79	3.76	3.74	3.71	3.68
Ly974	v_p	5.45	6.78	6.63	6.49	6.35	6.21	6.80	6.65	6.50	6.36	6.22
	v_s	3.30	3.76	3.71	3.66	3.62	3.57	3.79	3.74	3.69	3.64	3.59
Q96-4	v_p	5.84	6.78	6.68	6.58	6.48	6.39	6.80	6.70	6.60	6.50	6.40
	v_s	3.71	3.76	3.75	3.75	3.74	3.74	3.79	3.78	3.77	3.77	3.76
Q96-7	v_p	5.81	6.78	6.68	6.57	6.47	6.37	6.80	6.69	6.59	6.49	6.39
	v_s	3.58	3.76	3.74	3.72	3.71	3.69	3.79	3.77	3.75	3.73	3.70
T95-19	v_p	6.02	6.78	6.70	6.62	6.54	6.47	6.80	6.72	6.64	6.56	6.48
	v_s	3.65	3.76	3.75	3.74	3.73	3.72	3.79	3.78	3.76	3.75	3.73
Zp978	v_p	6.62	6.78	6.76	6.75	6.73	6.72	6.80	6.78	6.76	6.75	6.73
	v_s	3.55	3.76	3.74	3.72	3.70	3.67	3.79	3.77	3.74	3.72	3.69

注: 玻璃含量为其在岩石中的体积分数(%); 结果通过玻璃和岩石波速的VRH平均获得; 高温高压下斜长角闪岩和基性麻粒岩的 v_p 和 v_s 利用文献^[16]中的常态下岩石波速及其压力和温度导数计算得出。

晶质体的存在也为壳内地震波低速层提供了一种新的可能的解释, 即如果在下地壳岩石中含有非晶质成分达到一定含量后, 便可形成地震波低速层。

References:

- [1] Xie Hongsen. An introduction to material science in the Earth's interior [M]. Beijing: Science Press, 1997; 194-214 (in Chinese).
- [2] Daniel R, Neuville, Bjorn O M. Role of aluminium in the silicate network; in situ high-temperature study of glasses and melts on the join $\text{SiO}_2\text{-NaAlO}_2$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(10):1727-1737.
- [3] Bjorn M. Haploandnesitic melts at magmatic temperatures; in situ, high-temperature structure and properties of melts along the join $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9\text{-K}_2(\text{KAl})_4\text{O}_9$ to 1 236 °C at atmospheric pressure [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(19):3665-3685.
- [4] Pan Y C, Christensen N I, Batiza R, et al. Velocities of a natural mid-ocean ridge basalt glass [J]. *Tectonophysics*, 1998, 290:171-180.
- [5] Meister R, Robertson E C, Were R W, et al. Elastic moduli of rock glasses under pressure to 8 kilobars and geophysical implications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(B11): 6461-6470.
- [6] Xu J A, Manghnani M H. Brillouin-scattering studies of a sodium silicate glass in solid and melt conditions at temperature up to 1 000 °C [J]. *Physical Review B*, 1992, 45:640-645.
- [7] Xu J A, Manghnani M H, Richet P. Brillouin-scattering studies of $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ glass and melt up to 1 000 °C [J]. *Physical Review B*, 1992, 46: 9213-9215.
- [8] Askarpour V, Manghnani M H, Richet P. Elastic properties of diopside, anorthite, and grossular glasses and liquids; a Brillouin scattering study up to 1 400 K [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(B10):17683-17689.
- [9] Matsushima S. Compressional and shear wave velocities of igneous rocks and volcanic glasses to 900 °C and 20 kbar [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75: 257-271.
- [10] Jiang X, Zhou W G, Liu C Q, et al. Compressional and shear wave velocities of rock glasses up to 2.0 GPa and 1 000 °C [J]. *Journal of Physics: Conference Series* (in press).
- [11] Jiang X, Zhou W G, Xie H S, et al. High-pressure preparations for rock glasses and their elastic properties [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2007 (in press).
- [12] Xie H S, Zhang Y M, Xu H G. 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*, 1993, 36(10):1276-1280.
- [13] Liu Y G, Xie H S, Zhou W G, et al. A method for experimental determination of compressional velocities in rocks and minerals at high pressure and high temperature [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, 14: 1-5.
- [14] Matsushima S. Partial melting of rocks observed by the sound velocity method and the possibility of a quasi-dry low velocity zone in the upper mantle [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 1989, 55:306-312.
- [15] Zang Shaoxian, Liu Yonggang, Ning Jieyuan. Thermal structure of the lithosphere in north China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(1): 56-66 (in Chinese).
- [16] Kern H, Gao S, Liu Q. Seismic properties and densities of middle and lower crustal rocks exposed along the North China Geoscience Transect [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 139: 439-455.
- [17] Bina C R, Helffrick G R. Calculation of elastic properties from thermodynamic equation of state principles [J]. *Annual Review Earth and Planetary Sciences*, 1992, 20: 527-552.
- [18] Gao Wenxue, Ma Jin. Seismo-geological background and earthquake hazard in Beijing Area [M]. Beijing: Seismological Press, 1993; 1-452 (in Chinese).
- [19] Gu Zhijuan, Pan Yusheng, Zhou Yong, et al. The physics properties of crustal low velocity layer in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2000, 19: 30-33 (in Chinese).
- [20] Yang Zhuen, Wu Zongxu. Tectonic thickening by ductile shearing: a mode of low velocity and high conductivity layer in crust [M] // Annual Chinese Geophysics Society. Beijing: Seismological Press, 1994 (in Chinese).
- [21] Zandt G, Velasco A A, Beck S. Composition and thickness of the southern Altiplano crust, Bolivia [J]. *Geology*, 1994, 22: 1003-1006.
- [22] Gu Zhijuan, Guo Caihua, Li Biao, et al. Study on origin of crustal low velocity and high conductivity layer [J]. *Science in China: Series B*, 1995, 25(1): 108-112 (in Chinese).
- [23] Zhao Zhidan, Gao Shan, Luo Tingchuan, et al. Origin of crustal low velocity layer of Qinling and north China: evidence from laboratory measurement of P-wave velocity in rocks at high pT condition [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 39(5): 642-652 (in Chinese).
- [24] Aizawa Y, Ito K, Tatsumi Y. Compressional wave velocity of granite and amphibolite up to melting temperatures at 1 GPa [J]. *Tectonophysics*, 2002, 351: 255-261.
- [25] Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (B7): 9761-9788.
- [26] Liu Jianmin, Dong Shuwen. Advance and the status quo of the research on pseudotachylites [J]. *Geological Review*, 2001, 47(1): 64-69 (in Chinese).
- [27] Lu Long, Ouyang Kegui, Fu Heqin, et al. A type of peculiar glassy rock [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 25(3): 288-290 (in Chinese).

- [28] Cong Bolin. Magmatic activity and igneous rock association [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979; 1-324 (in Chinese).
- [20] 杨主恩, 吴宗絮. 构造化的韧性剪切增厚——壳内低速高导层的成因模式[M]//中国地球物理学会年刊. 北京: 地震出版社, 1994.
- [22] 顾芷娟, 郭才华, 李彪, 等. 壳内低速高导层成因初步探讨[J]. 中国科学: B辑, 1995, 25(1): 108-112.
- [23] 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.
- [15] 臧绍先, 刘永刚, 宁杰远. 华北地区岩石圈热结构的研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 56-66.
- [26] 刘建民, 董树文. 假玄武岩玻璃的研究进展与现状[J]. 地质论评, 2001, 47(1): 64-69.
- [18] 高文学, 马瑾. 首都圈地震地质环境与地震灾害[M]. 北京: 地震出版社, 1993; 1-452.
- [27] 卢龙, 欧阳克贵, 符鹤琴, 等. 一种罕见的玻璃质岩石[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(3): 288-290.
- [19] 顾芷娟, 潘裕生, 周勇, 等. 青藏高原地壳低速层的物理性质[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19: 30-33.
- [28] 从柏林. 岩浆活动与火成岩组合[M]. 北京: 地质出版社, 1979; 1-324.

参考文献:

《地学前缘》征订启事

致《地学前缘》订户:

《地学前缘》自 2007 年起由天津全国非邮发报刊联合征订服务部负责征订工作(联订代号: 5198), 需要订购我刊的客户可直接与天津联合征订服务部联系。

联系地址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

邮政编码: 300385

电 话: 022-23962479, 022-23973378

传 真: 022-23973378

网 址: www.LHZD.com

E-mail: LHZD@public.tpt.tj.cn