

DOI: 10.11858/gywlb.20261006

硬柱石的弹性波速及其对俯冲带速度异常的约束*

马俊生^{1,2}, 刘川江^{1,2}, 王多君^{1,2}, 蔡闹^{1,2}, 张瑞^{1,2}

(1. 中国科学院大学高压科学实验中心, 北京 100049;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

摘要: 硬柱石 (Lawsonite) 是俯冲带洋壳中的关键含水矿物, 其含水量可高达 11.5%, 体积分数可达 50%, 且有较宽的稳定区间。因此, 对硬柱石高压弹性性质的研究对认识俯冲带速度结构和深部水循环具有重要意义。以天然硬柱石矿物粉末为初始材料, 在 7 GPa、1073 K 的条件下热压 2 h, 得到了致密的多晶硬柱石。同时, 采用超声干涉法测量了硬柱石高达 8 GPa 的弹性波速和模量及其对压力的导数。研究发现, 硬柱石的弹性波速和模量随压力的增加而增大, 弹性模量及其压力导数为: $K_{50} = 120(1)$ GPa, $G_0 = 51(1)$ GPa, $K'_s = 5.7(1)$, $G' = 0.9(1)$ 。利用硬柱石的弹性特性, 结合前人研究结果, 建立了硬柱石榴辉岩模型, 结果表明, 硬柱石的存在可以为中等地温俯冲板片 (如 Nicaragua) 内部在 60~90 km 的速度异常提供合理解释。

关键词: 硬柱石; 弹性; 俯冲带; 高压

中图分类号: O521.2

文献标识码: A

水作为俯冲带中关键的物理化学“活化剂”, 主要赋存于角闪石、硬柱石等含水矿物中, 并随板块俯冲被携带至地球深部。含水矿物的存在形式及其脱水行为, 深刻控制着俯冲体系的物理化学性质, 也常被用于解释该区域常见的地震波速异常现象^[1-3]。这类异常尤其是低速异常的成因, 主要可以从矿物赋存与脱水过程两个角度综合理解: 一方面, 含水矿物本身通常具有比无水矿物更低的弹性波速, 例如蛇纹石化橄榄岩会显著降低纵波 (P) 和横波 (S) 速度; 另一方面, 含水矿物在高压高温条件下脱水释放流体, 可诱发地幔楔部分熔融来降低岩石波速^[4-7]。因此, 含水矿物的赋存与演化对理解俯冲带深部过程及相关地球物理异常具有关键作用。

硬柱石为俯冲带洋壳中的主要含水矿物, 其在硬柱石榴辉岩相中的体积分数占比可达 50%^[8], 在俯冲板片地温梯度下可稳定至约 300 公里深度^[1]; 硬柱石具有高达 11.5 wt.% 的含水量、极低的剪切模量以及较高的 V_p/V_s , 因而被认为是影响俯冲洋壳弹性结构与地震波速的关键矿物之一^[9]。传统观点多认为硬柱石稳定存在于冷乃至超冷俯冲体系中, 典型产于洋壳玄武岩及相关沉积-交代岩在高压低温条件下形成的硬柱石蓝片岩和硬柱石榴辉

* 收稿日期: 2026-01-08; 修回日期: 2026-02-08

基金项目: 国家自然科学基金 (42474132)

作者简介: 马俊生 (1998-), 男, 博士研究生, 主要从事高温高压岩石矿物弹性性质研究. E-mail:

majunsheng21@mailsucas.ac.cn

通讯作者: 蔡闹 (1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高温高压岩石矿物弹性性质研究. E-mail:

cainao@ucas.ac.cn

王多君 (1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事高温高压岩石矿物物理性质研究. E-mail:

duojunwang@ucas.ac.cn

岩相中^[10, 11], 常被用于解释俯冲板片顶面出现的低速层及高 V_p/V_s 异常^[12]。然而, 近年来对洋壳硬柱石榴辉岩化的研究显示^[13], 硬柱石同样可在中等热状态的俯冲带 2-3 GPa 的压力区间内稳定存在, 这表明硬柱石对板片速度结构的影响可能不仅限于冷的俯冲带, 其在相对较暖的俯冲体系中的作用或许被长期低估。在较温暖俯冲背景下, 硬柱石的存在仍可能显著改变洋壳的纵波速度 (V_p)、横波速度 (V_s) 以及 V_p/V_s 比值, 从而在地震层析成像中形成可识别的速度与高 V_p/V_s 异常带, 进而重塑我们对俯冲带波速结构的传统认识。以往的研究主要集中在硬柱石的状态方程研究^[14-16], 高温高压弹性波速测量仅有合成样品的测量, 缺少天然硬柱石的系统性高压弹性波速的测量^[12]。因此, 对天然硬柱石的高压弹性测量将对我们认识俯冲洋壳速度结构和内部水循环具有重要意义。

本研究采用硬柱石矿物粉末为初始物, 首先, 在 7 GPa、1073 K 条件下热压 2 小时得到致密的多晶硬柱石样品。然后, 利用超声干涉法确定硬柱石在室温下、压力高达 8 GPa 时的弹性波速 (V_p , V_s) 和模量 (体积模量 K_S , 剪切模量 G) 及其对压力的依赖性 (K'_S , G')。通过结合前人研究结果, 我们建立了硬柱石榴辉岩模型, 表明硬柱石对中等地温梯度下俯冲带地震速度的影响及其内部速度差异的可能原因。

1 实验方法

1.1 样品制备

初始样品为天然硬柱石矿物粉末, 并在干燥箱中 (393 K) 充分干燥。将烘干后的样品粉末 (5-10 μm) 装入 Au 的样品仓当中去, 利用中国科学院大学高压科学实验中心 1000 吨 Walker 型高压实验装置进行硬柱石样品的热压合成。热压实验是使用 14/8 组装 (14 mm 边长的八面体/截角边长为 8 mm 的碳化钨压砧) 并在 ~7 GPa、1073 K 条件下热压 2 小时, 实验组装以及标压与 Ma 等人相同^[17]。利用阿基米德浸入法 (基于固体在液体中所受浮力等于其排开液体重量的原理), 测得热压样品的密度为 3.097(10) g/cm^3 , 随后, 将热压后的样品上下两面抛光至镜面, 制备出高度为 1.238 mm、直径为 3.0 mm 的圆柱形样品 (图 1(a)所示), 便于后续超声实验测量。利用中国科学院大学的扫描电子显微镜 (图 1(b)所示)、拉曼光谱 (图 1(c)所示) 以及 X 射线衍射光谱 (图 1(d)所示) 进行分析, 分析表明样品为单一硬柱石相, 背散射图像中亮色为样品在铝箔上抛光所残留的少量金属杂质 (1%~3%), 对整体弹性波速测量的影响可以忽略。基于能谱测定得到硬柱石化学式为: $\text{Ca}_{0.945}\text{Al}_{1.973}\text{Fe}_{0.021}\text{Si}_{2.032}\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 通过化学式计算得到硬柱石约含 11.5 wt.% 的水, 拉曼光谱表明硬柱石 OH 的振动峰的存在及硬柱石结构的完整性, 其中蓝色曲线为硬柱石标准峰^[18], X 射线衍射分析结果显示, 硬柱石的衍射谱图中未出现杂相峰, 其中红色曲线为硬柱石标准峰^[19], 同时基于衍射谱得到样品的晶胞体积为 675.7(2) \AA^3 。

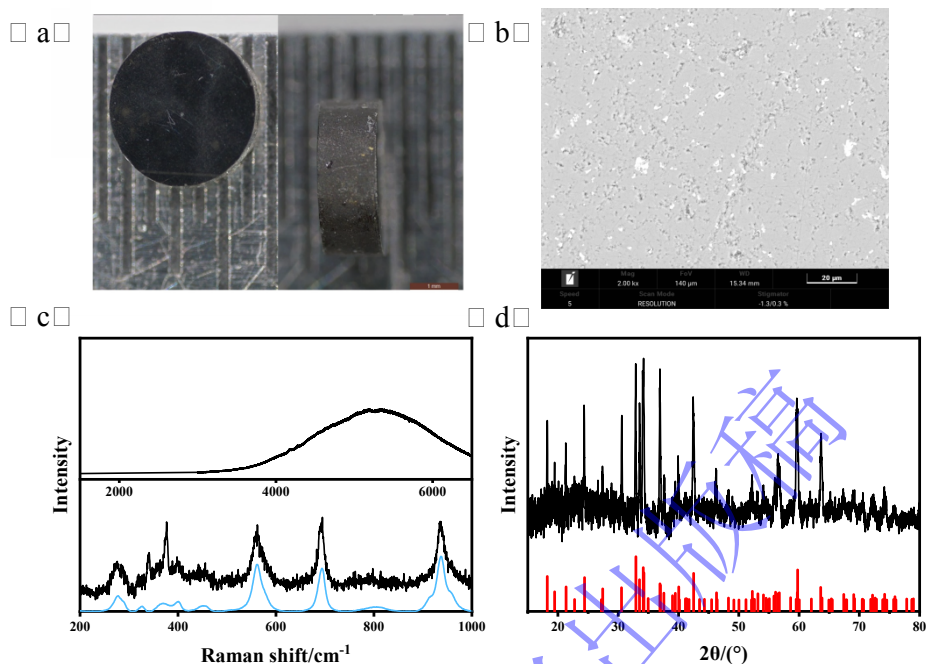


图 1 (a)热压实验样品的几何外形展示(背景中直尺一小格代表 0.5mm 长度);(b)硬柱石背散射电子显微镜图,图中亮点为抛光残留碎片,暗色为孔隙;(c)硬柱石在 200-1000cm⁻¹、2000-6000cm⁻¹ 范围内拉曼光谱(黑色)及其标准峰(蓝色)^[18]; (d)硬柱石 X 射线衍射谱(黑色)及标准卡片(红色)^[19]

Fig.1 (a) Geometry of the hot-pressed lawsonite sample (the scale in the background has a spacing of 0.5 mm per division); (b) backscattered electron (BSE) image of lawsonite, where bright spots correspond to residual polishing fragments and dark areas indicate pores; (c) Raman spectra of lawsonite in the ranges 200–1000cm⁻¹ and 2000–6000cm⁻¹ (black) together with the standard spectrum (blue)^[18]; (d) The X-ray diffraction spectrum of lawsonite (black) and the corresponding reference pattern (red)^[19]

1.2 超声实验

在 1000 吨 Walker 型高压实验装置中使用超声波干涉法进行声学测量。样品组装采用 14/8 型组装方式,如图 2(a)所示。安装在碳化钨压砧截角上的双模 LiNbO₃ 换能器 (P 波 50 MHz, S 波 30 MHz) 用作超声信号的发射器和接收器,与碳化钨压砧的背面接触的致密的氧化铝用作缓冲棒,声波信号传播路径如图中箭头所示,样品和缓冲棒的走时通过脉冲回波重叠法测定(图 2(b)所示)。同时氧化铝缓冲棒还用作原位压力标记,根据 Wang 等^[20]的方法通过氧化铝缓冲棒的走时来确定样品的压力,其压力误差为 0.18 GPa,即

$$P = 249.7 \times \left(1 - \frac{t}{t_0}\right),$$

其中 P 是压力, t 为缓冲棒横波走时, t_0 对应为其在环境条件下横波

走时。实验后样品的长度为 1.233 mm,与实验前样品相比变化仅为 0.4%,表明实验过程中样品处于良好的静水压环境。

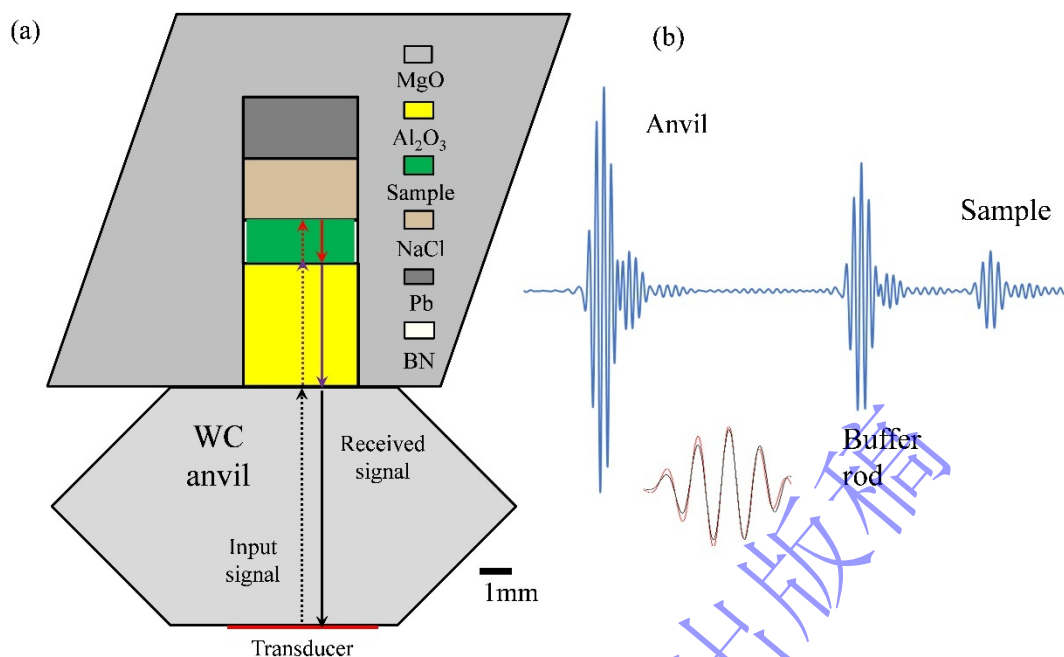


图 2 (a) 超声实验组装及超声信号传输、反射路径;(b)观测到的超声实验横波信号(图中“Anvil”表示在碳化钨锤头、Al₂O₃缓冲棒界面的反射信号,“Buffer rod”表示 Al₂O₃缓冲棒、样品界面的反射信号,“Sample”表示样品、NaCl 界面的反射信号;插图是“Buffer rod”与“Sample”信号重叠)

Fig.2 (a) Ultrasonic experimental assembly and schematic paths of ultrasonic transmission and reflections; (b) recorded shear-wave signals from the ultrasonic experiment (“Anvil” denotes the reflection at the interface between the WC anvil and the Al₂O₃ buffer rod, “Buffer rod” denotes the reflection at the interface between the Al₂O₃ buffer rod and the sample, and “Sample” denotes the reflection at the interface between the sample and NaCl; the inset shows the overlap of the “Buffer rod” and “Sample” signals)

2 实验结果

样品在压力下的密度通过 $\rho_0/\rho = (L/L_0)^3$ 计算得到, 其中L是 Cook 方法推导的样品长度^[21], “0” 表示环境压力。在压力低于 2 GPa 时获得的数据被省略, 因为它们主要受缓冲棒与样品机械耦合不良的影响。然后根据密度与体积的关系即 $\rho_0/\rho = V/V_0$ 得到样品体积随压力的变化关系, 通过 EoSFit7-GUI 程序^[22, 23]利用三阶 Birch-Murnaghan 状态方程 (BM-EoS) 对数据进行拟合, 在拟合过程中将 K'_0 固定为 5.7, 得到常温体积模量 K_0 为 118(2) GPa。其中 BM 方程为:

$$P = \frac{3K_0}{2} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{7}{3}} - \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{5}{3}} \right] \left\{ 1 + \frac{3}{4} (K'_0 - 4) \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right] \right\}$$

其中P为压力, K、K'与V分别为样品的体积模量、体积模量对压力的导数与样品的体积, “0” 代表环境条件。

基于室温 X 射线衍射谱得到硬柱石样品的晶胞体积为 675.7(2) Å³, 该值与前人针对硬柱石端元在常压室温条件下报道的晶胞体积(~674-676 Å³) 在误差范围内基本一致^[14-16, 24], 表明本研究样品的结构参数与典型硬柱石端元相吻合。如图 3 所示, 在 0-8 GPa 范围

内，硬柱石的 V/V_0 随压力单调减小，体积压缩达 5.5%。同时在整个实验压力范围内未见明显体积异常。在此基础上，为了便于与前人工作直接对比，我们将 K'_0 固定为 4 重新拟合，得到 K_0 为 123(2) GPa，该值与 Daniel 等^[14]报道的 123.9 GPa 非常接近，仅略低于 Chinnery 等^[15]的 125 GPa 以及 Cai 等^[16]的 128.7 GPa。总体来看，在相同假设下，本研究给出的 K_0 落在既有结果的合理范围之内。此前，我们根据超声实验将 K'_0 固定为 5.7，该值与 Ballaran 等^[24]报道的 5.6 接近，略高于 Chantel 等^[12]报道的 3.8，对应得到的 K_0 为 118(2) GPa 略低于两人给出的结果 122.1 GPa 以及 126.4 GPa。这种在不同拟合假设下 K_0 与 K'_0 之间的轻微偏差可以理解为 BM-EoS 拟合中两者之间常见的相关性与权衡所致，同时也反映了不同实验中压力标定、样品成分及测量误差等因素的综合影响。综合图 3 中曲线以及与前人等静力压缩实验在试验范围内的整体一致性，可见本实验中样品所处为近似静水压环境，观测到的体积变化可以视为硬柱石在常温高压条件下的弹性压缩行为。

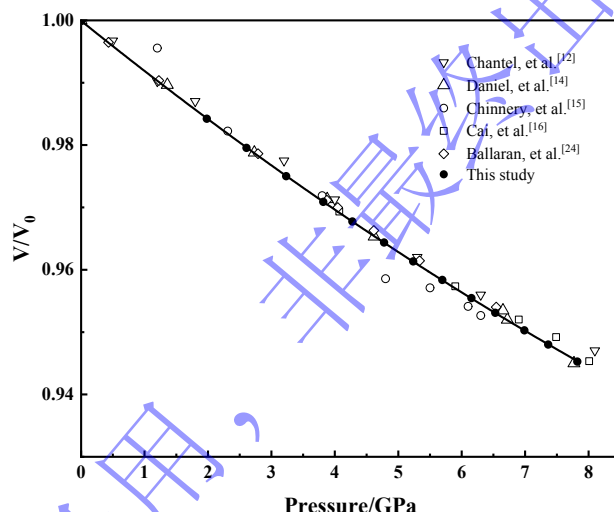


图 3 高压下硬柱石的晶胞体积随压力的变化及与前人研究的比较^[12, 14-16, 24]

Fig.3 Pressure dependence of the unit-cell volume of lawsonite and comparison with previous studies^[12, 14-16, 24]

样品在不同压力下的速度是根据样品走时以及长度得到的，即 $V_{p,s} = 2L/t$ ，其中 $V_{p,s}$ 为样品的纵横波速度， L 为样品的长度， t 为样品的纵横波走时。绝热体积模量和剪切模量分别根据 $K_S = \rho(V_p^2 - 4V_s^2/3)$ 和 $G = \rho V_s^2$ 得到，其中 $V_{p,s}$ 为样品纵横波速度， ρ 为样品的密度。

同时利用有限应变方程^[25]拟合所有数据得到模量及其对压力的依赖性，即 $K_{S0} = 120(1)$

GPa, $G_0 = 51(1)$ GPa, $K'_S = 5.7(1)$, $G' = 0.9(1)$ ，这也与 Cook 方法得到的结果有较好的一

致性。图 4 展示了纵波和横波速度以及弹性模量随压力变化，图中黑色方块是根据 Cook 方法得到的，黑色实线是根据有限应变方程得到的，图 4(a)中样品纵波和横波速度随着压力均单调升高，在环境压力和温度下推导出的纵波和横波速度分别为 7.80 km/s 和 4.07 km/s。图 4(b)展示了绝热体积模量与剪切模量随压力变化，体积模量 K_S 和剪切模量 G 均随压力增加而增大。此外，本研究获得的 K_{S0} 以及 G_0 略低于 Chantel 等^[12]所报道的 126.4 GPa

以及 52.8 GPa, 但 K'_S 跟 G' 略高于其所报道的 3.8 跟 0.6, 这些差异可以归因于多方面因素的共同作用, 包括天然样品与合成样品在化学成分的差异以及实验的不确定性等因素的影响。

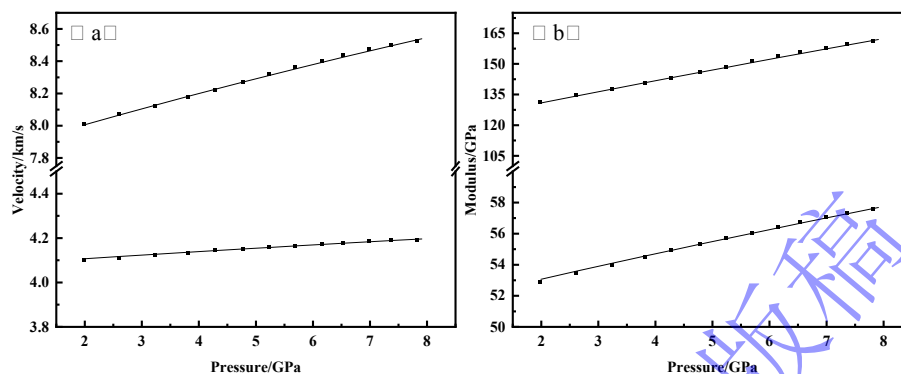


图 4 (a)硬柱石纵横波速度随压力变化关系(b)体积模量以及剪切模量随压力变化关系(图中黑色方块根据 Cook 方法得到的, 实线为有限应变拟合)

Fig.4 (a) P - and S -wave velocities of lawsonite as a function of pressure; (b) bulk and shear moduli of lawsonite as a function of pressure (Black squares denote data obtained using the Cook method, while the solid line represents the fitted finite strain curve)

3 讨论

如图 5 所示, 本研究得到的硬柱石纵横波速度略低于 Chantel 等^[12]的实验结果, 且差异随着压力的增大逐渐减小, 即速度随压力的变化率略高于他们的研究结果。这些差异可能源于化学试剂合成样品与天然样品之间的差异以及实验的不确定性。对比图中同时绘制的其他含水玄武岩的主要矿物(石英 (Qtz)/柯石英 (Coe)、石榴石 (Gar)、绿辉石 (Omp)、角闪石 (Amp) 等) 可以看到: 在含水矿物之间的对比中, 硬柱石在压力范围内整体表现为纵波相对较快、横波相对较慢且 V_P/V_S 显著偏高的矿物相, 其 V_P 普遍高于角闪石和石英, 在约 2.5 GPa 以上也超过柯石英; 而 V_S 则低于角闪石和柯石英, 仅在 2 GPa 以上略高于石英, V_P/V_S 始终明显高于角闪石与柯石英。与无水矿物相比, 在环境压力下石榴石和绿辉石的 V_P 高出硬柱石约 3%–9%, V_S 则高出约 17%–22%, 其 V_P/V_S 明显低于硬柱石, 仅略高于石英, 而石英的 V_P/V_S 在所有对比矿物中最低。综合来看, 硬柱石相对于角闪石等含水矿物表现为“更快的 V_P 、更慢的 V_S 和更高的 V_P/V_S ”, 相对于石榴石和绿辉石等无水矿物则体现为“整体偏慢但 V_P/V_S 极高”, 表明硬柱石可能是造成板片内部高 V_P/V_S 和速度变化的关键含水相。

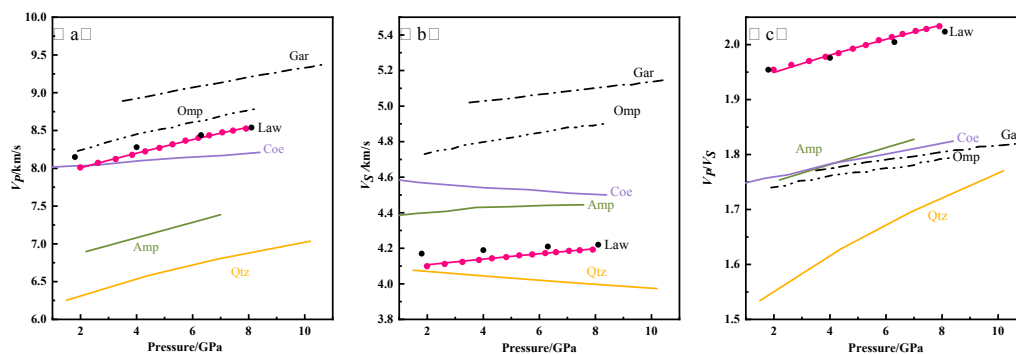


图5 室温下硬柱石及其他矿物随纵波速度(a)、横波速度(b)以及 V_p/V_s (c)随压力变化关系(图中红色数据来自本研究, 黑色数据点为前人结果, Gar: 石榴石^[26], Omp: 绿辉石^[27], Law: 硬柱石^[12], Coe: 柯石英^[28], Qtz: 石英^[29], Amp: 角闪石^[30])

Fig.5 Pressure dependence of P -wave velocity (a), S -wave velocity (b), and V_p/V_s (c) for lawsonite and other minerals at room temperature. (Red symbols represent data from this study. Black data points denote findings from prior research. Gar: garnet^[26]; Omp: omphacite^[27]; Law: lawsonite^[12]; Coe: coesite^[28]; Qtz: quartz^[29]; Amp: amphibole^[30])

在图6中, 我们基于 Schilling 等^[31]对含水硬柱石弹性参数温度导数的约束以及本研究获得的超声实验数据, 构建了硬柱石在高温高压条件下的波速模型, 以 0.5 GPa、100 K 为初始状态, 沿 3 K/km、6 K/km 和 9 K/km 三条理想化地温梯度计算了 V_p 、 V_s 随压力的变化, 并与一维 PREM 速度模型^[32]进行对比。在冷地温梯度 (3 K/km) 下, 硬柱石的 V_s 在整个压力范围内均显著低于 PREM, 对应最大负异常约-6%, 且随压力增加缓慢减弱, 而 V_p 在低压端即接近或略微超过 PREM, 因而 V_p/V_s 系统性高于 PREM, 呈现“慢 V_s +高 V_p/V_s ”的特征; 这种行为与 Chantel 等^[12]提出的“硬柱石可解释冷俯冲板片顶面低速层和高 V_p/V_s ”结论高度一致, 说明在极冷俯冲或超冷洋壳条件下, 硬柱石低剪切模量、易在冷俯冲板片中稳定存在的认识相一致。相比之下, 在 6 K/km、9 K/km 这类相对较暖的地温梯度下, 单矿物硬柱石的表现明显不同: 在约 2 GPa 附近 V_p 仍为弱负异常, 但随压力升高迅速转为正异常且幅度随深度逐步增强; V_s 的负异常幅度则随压力显著减弱, 在高压端高于 PREM, 使得 V_p/V_s 在浅部为正异常、随压力增加逐渐回落并逼近甚至略低于 PREM, 整体呈现出速度异常随深度由负转正、 V_p/V_s 由高转中甚至略低的“翻转”行为。这结果表明, 在中-高地温梯度下, 硬柱石可能不只是简单的“减速相”, 而是可能在剖面上表现出具有拐点特征的速度结构。

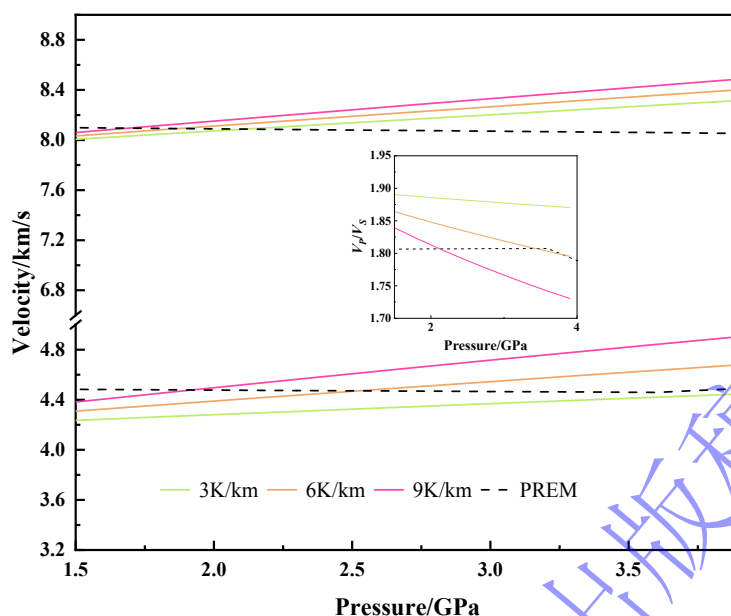


图6 沿不同理想化地温梯度条件下硬柱石纵横波速度以及 V_p/V_s 随压力的变化(实线)及其与 PREM 模型的对比(虚线)

Fig.6 Pressure dependence of P -wave velocity, S -wave velocity, and V_p/V_s of lawsonite along different idealized geothermal gradients (solid lines) and their comparison with the PREM model (dashed lines)

为进一步量化中等地温梯度下硬柱石的影响，我们结合 Hernandez-Urbe 等^[13]提出的热结构及相平衡约束进行分析，并在构建硬柱石榴辉岩模型时仅考虑主要矿物相，忽略体积分数极低的次要矿物相。图7展示了计算地温梯度与不同俯冲带热状态之间的关系以及硬柱石的稳定域：图中左右两侧彩色区域（蓝色与红色）分别对应日本东北（冷俯冲）和日本西南（暖俯冲）典型的地温梯度，它们限定大部分了洋壳板片可能的温度范围^[33]，图中黑色实线为硬柱石的稳定域^[34]。在中等地温梯度区域内，我们采用的地温轨迹（图中蓝色虚线）对应 Hernandez-Urbe 等^[13]计算的俯冲地温轨迹，我们将其视为与 Nicaragua 俯冲带热结构十分接近的一条代表性中等地温梯度^[35]，并在此基础上采用 Voigt-Reuss-Hill

(VRH) 模型^[36]，其中硬柱石的弹性参数来自本研究测量，硬柱石弹性参数的温度导数以及其余组成矿物的弹性参数则采用文中前述前人的弹性结果^[26-31]，据此计算了在中等地温梯度下硬柱石榴辉岩组合弹性波速随压力的变化关系。

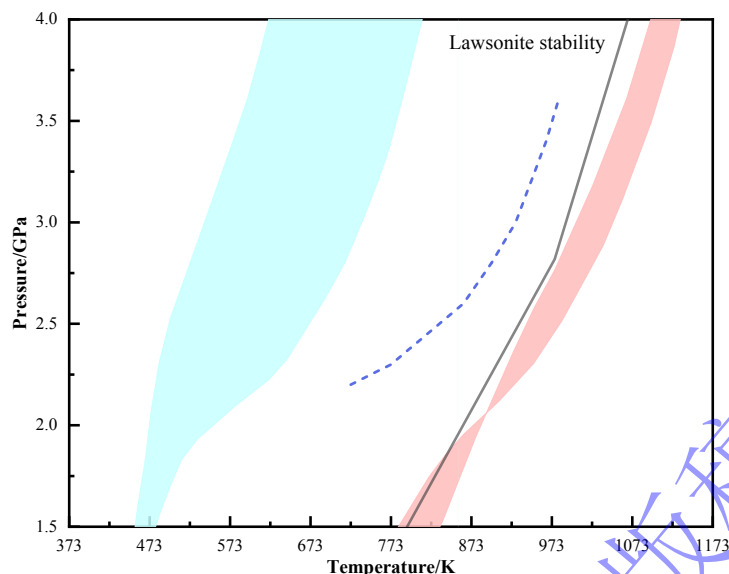


图 7 计算地温梯度与不同俯冲带热状态示意图(图中左右两侧蓝色以及红色区域分别对应日本东北(冷俯冲)和日本西南(暖俯冲)洋壳地温梯度范围^[33], 黑色实线为硬柱石的稳定域^[34], 蓝色曲线为本研究计算所用代表性地温梯度线^[35])

Fig.7 Schematic illustration of calculated geothermal gradients and thermal states of different subduction zones. (the blue and red shaded regions on the left and right represent the ranges of oceanic crust geotherms for NE Japan cold subduction and SW Japan warm subduction, respectively^[33], The black solid line denotes the stability field of lawsonite^[34], and the blue curve indicates the representative geothermal gradient adopted in this study^[35])

图 8 展示了沿俯冲地热计算的 P 和 S 速度剖面, 在 2-3 GPa 以内硬柱石榴辉岩组合的 V_p 和 V_s 随压力出现显著跃升, 且纵横波速度速度跳变为约 12% 和 15%, 从“相对偏慢”向“接近乃至快于 PREM 模型”的转变; 与此同时, V_p/V_s 在该区间内由偏高逐渐减小。根据 Dinc 等^[37]地震层析成像结果, Nicaragua 俯冲板片, 壳层在 60 km 深度处 V_p 大约为 7.6 ± 0.2 km/s, 并伴随 V_p/V_s 约为 1.9 ± 0.1 (V_s 约为 4.0 ± 0.3 km/s); 而在 80-100 km 深度, 板片壳层的 V_p 大致恢复到 8.1 ± 0.2 km/s, V_p/V_s 约为 1.8 ± 0.05 (V_s 约为 4.5 ± 0.2 km/s), 即沿板片走向存在一段显著的速度跳增并伴随 V_p/V_s 降低的区间。这与我们计算得到的速度剖面在整体趋势上有较好的一致性, 但在绝对波速值等仍存在一定差异, 这些差异很可能与模型所采用的温度场、弹性参数的选取以及层析成像分辨率等因素有关。区域尺度的层析成像也表明, Nicaragua 段低速、高 V_p/V_s 异常在约 60 km 最为显著, 并在 80-100 km 深度逐渐向相对正常或略快的速度结构和较低的 V_p/V_s 过渡。这种区域尺度上异常由“慢且高 V_p/V_s ”向“较快且较低 V_p/V_s ”渐变的特征, 与我们得到的硬柱石榴辉岩速度剖面在深度范围和异常形式有较好一致性。因此在中等地温俯冲带中, 硬柱石在 2-3 GPa 的稳定存在并伴随洋壳的榴辉岩化, 同时也会保留约 1-2 wt.% 的水继续俯冲, 可能是板片壳层内部速度跳变及 V_p/V_s 异常的重要矿物物理原因之一, 这为理解 Nicaragua 等中等地温俯冲带速度结构的复杂性提供了一个解释。在此基础上, 未来工作可进一步在高温高压条件下开展硬柱石弹性波速测量, 进一步约束硬柱石在更接近俯冲板片内部 P-T 条件的弹性性质; 同时也有必要将硬柱石与角闪石等其他含水矿物的弹性数据进行系统耦合, 构建更真实的多矿物含水岩石模型, 从而评估不同含水相组合对俯冲带速度结构的综合影响。

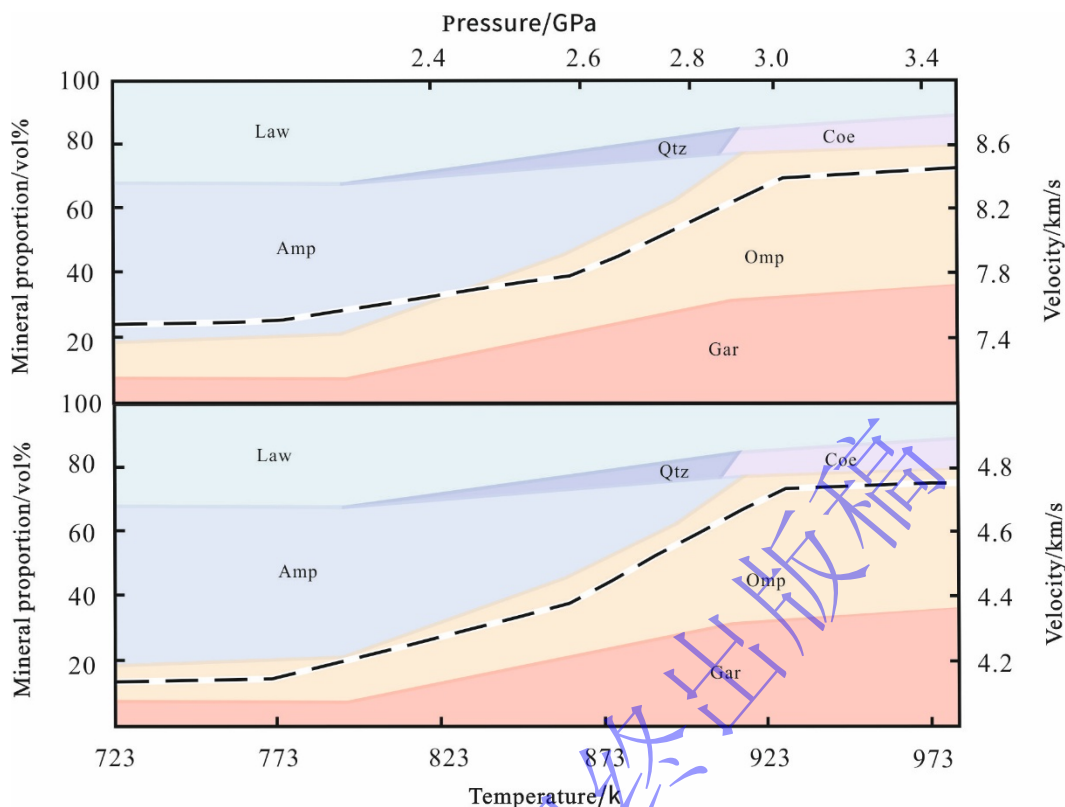


图8 沿俯冲地热计算的纵波和横波速度剖面(底图各矿物在相应P-T条件下的体积分数, 根据Hernandez-Uribe 等人研究结果^[13]修改)

Fig.8 Calculated P - and S -wave velocity profiles along the subduction geotherm. (the background shows the volume fractions of each mineral phase under the corresponding P - T conditions, modified after Hernandez-Uribe et al.^[13])

4 结 论

本研究利用超声干涉方法获得了硬柱石在高达 8 GPa 压力下的弹性波速。结果表明, 硬柱石的波速随压力单调增大, 相较于角闪石等含水矿物, 硬柱石表现出更高的 V_p 和更低的 V_s , 对应显著偏高的 V_p/V_s 。通过三阶有限应变拟合, 得到硬柱石的绝热体积模量 ($K_{S0} = 120(1)$ GPa)、剪切模量 ($G_0 = 51(1)$ GPa) 及其对压力的一阶导数 ($K'_S = 5.7(1)$, $G' = 0.9(1)$)。并采用三阶 Birch-Murnaghan 状态方程约束了等温体积模量 ($K_0 = 118(2)$ GPa) ($K'_0 = 5.7$)。在此基础上, 结合地震层析成像和矿物组成分析, 采用 Voigt-Reuss-Hill 模型并沿中等地温地温梯度构建了硬柱石榴辉岩组合波速模型, 结果表明, 在 Nicaragua 等中等地温俯冲带中, 硬柱石在 2-3 GPa 范围内稳定存在并伴随洋壳的榴辉岩化, 同时仍可保留约 1-2 wt.% 的水继续向更深部俯冲, 这很可能是板片壳层内部速度跳变及异常的重要原因之一。

参考文献:

- [1] SCHMIDT M W, POLI S. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 163(1-4): 361-379.

- [2] HACKER B R, ABERS G A, PEACOCK S M. Subduction factory 1. theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H₂O contents [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2003, 108(B1): 10.
- [3] OHTANI E, LITASOV K D. The effect of water on mantle phase transitions [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 62(1): 397-420.
- [4] 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): 807-811.
XIE H S, ZHOU W G, LI Y W, et al. The elastic characteristics of serpentine dehydration at high temperature-high pressure and its significance [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(6): 807-811.
- [5] 郑永飞, 陈仁旭, 徐峥, 等. 俯冲带中的水迁移 [J]. *中国科学:地球科学*. 2016, 46(3): 253-286.
ZHENG Y F, CHEN R X, XU Z, et al. The transport of water in subduction zones [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(3): 253-286.
- [6] 毛竹, 李新阳. 水对地幔矿物弹性性质的影响及其地球物理意义 [J]. *中国科学:地球科学*, 2016, 46(4): 411-429.
MAO Z, LI X Y. Effect of hydration on the elasticity of mantle minerals and its geophysical implications [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(4): 411-429.
- [7] 张逸凌, 刘雷, 杜建国. 高温高压下岩石波速研究进展 [J]. *地球物理学进展*, 2023, 38(5): 1999-2022.
ZHANG Y L, LIU L, DU J G. Research progress of rock wave velocity under high temperature and high pressure [J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(5): 1999-2022.
- [8] PAWLEY A R. The pressure and temperature stability limits of lawsonite: implications for H₂O recycling in subduction zones [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 118(1): 99-108.
- [9] O'BANNON E, BEAVERS C M, KUNZ M, et al. The high-pressure phase of lawsonite: a single crystal study of a key mantle hydrous phase [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(8): 6294-6305.
- [10] TSUJIMORI T, SISSON V, LIOU J, et al. Very-low-temperature record of the subduction process: a review of worldwide lawsonite eclogites [J]. *Lithos*, 2006, 92(3-4): 609-624.
- [11] TSUJIMORI T, ERNST W G. Lawsonite blueschists and lawsonite eclogites as proxies for palaeo-subduction zone processes: a review [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2013, 32(5): 437-454.
- [12] CHANTEL J, MOOKHERJEE M, FROST D J. The elasticity of lawsonite at high pressure and the origin of low velocity layers in subduction zones [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 349: 116-125.
- [13] HERNANDEZ-URIBE D, TSUJIMORI T. Progressive lawsonite eclogitization of the oceanic crust: implications for deep mass transfer in subduction zones [J]. *Geology*, 2023, 51(7): 678-682.
- [14] DANIEL I, FIQUET G, GILLET P, et al. P-V-T equation of state of lawsonite [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1999, 26(5): 406-414.
- [15] CHINNERY N, PAWLEY A R, CLARK S M. The equation of state of lawsonite to 7 GPa and 873 K, and calculation of its high pressure stability [J]. *American Mineralogist*, 2000, 85(7-8): 1001-1008.
- [16] CAI N, INOUE T, KIKEGAWA T. Thermal equation of state of lawsonite up to 10 GPa and 973 K [J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2015, 110(5): 235-240.
- [17] MA J, CAI N, WANG D. Elasticity of epidote at high pressure and its implications for the velocity anomaly in subduction zone [J]. *Geoscience Frontiers*, 2025, 16(1): 101933.
- [18] LE CLÉAC'H A, GILLET P. Ir and raman spectroscopic study of natural lawsonite [J]. *European Journal of Mineralogy*, 1990, 2(1): 43-54.
- [19] LIBOWITZKY E, ARMBRUSTER T. Low-temperature phase transitions and role of hydrogen bonds in lawsonite [J]. *American Mineralogist*, 1995, 80(11-12): 1277-1285.
- [20] WANG X, CHEN T, QI X, et al. Acoustic travel time gauges for in-situ determination of pressure and temperature in multi-anvil apparatus [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(6): 065901.
- [21] COOK R K. Variation of elastic constants and static strains with hydrostatic pressure; a method for calculation from ultrasonic measurements [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1957, 29(4): 445-449.

- [22] GONZALEZ-PLATAS J, ALVARO M, NESTOLA F, et al. EosFit7-GUI: a new graphical user interface for equation of state calculations, analyses and teaching [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2016, 49(4): 1377-1382.
- [23] MILANI S, ANGEL R J, SCANDOLO L, et al. Thermo-elastic behavior of grossular garnet at high pressures and temperatures [J]. *American Mineralogist*, 2017, 102(4): 851-859.
- [24] BALLARAN T B, ANGEL R J. Equation of state and high-pressure phase transitions in lawsonite [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2003, 15(2): 241-246.
- [25] DAVIES G F, DZIEWONSKI A M. Homogeneity and constitution of the earth's lower mantle and outer core [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1975, 10(4): 336-343.
- [26] CHEN P, WANG D, CAI N, et al. The sound velocity of garnet at high pressure: implications for high velocity anomalies in cold subducting slabs [J]. *Tectonophysics*, 2023, 865: 230045.
- [27] ZHANG R, WANG D, CAI N, et al. Sound velocity of eclogite at high pressures and implications for detecting eclogitization in subduction zones [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2023, 136(5-6): 2019-2028.
- [28] CHEN T, LIEBERMANN R C, ZOU Y, et al. Tracking silica in Earth's upper mantle using new sound velocity data for coesite to 5.8 GPa and 1073 K [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(15): 7757-7765.
- [29] WANG J, MAO Z, JIANG F, et al. Elasticity of single-crystal quartz to 10 GPa [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2014, 42(3): 203-212.
- [30] ZHANG J, WANG D, CAI N, et al. Elastic properties of amphibole at high pressure: a new explanation of the low velocities anomaly in the mantle wedges [J]. *Tectonophysics*, 2023, 865: 230044.
- [31] SCHILLING F R, SINOGEIKIN S V, BASS J D. Single-crystal elastic properties of lawsonite and their variation with temperature [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 136(1-2): 107-118.
- [32] DZIEWONSKI A M, ANDERSON D L. Preliminary reference Earth model [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1981, 25(4): 297-356.
- [33] PEACOCK S M, WANG K. Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: examples from southwest and northeast japan [J]. *Science*, 1999, 286(5441): 937-939.
- [34] OKAMOTO K, MARUYAMA S. The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB+H₂O system [J]. *American Mineralogist*, 1999, 84(3): 362-373.
- [35] PEACOCK S M, KEKEN P E V, HOLLOWAY S D, et al. Thermal structure of the Costa Rica – Nicaragua subduction zone [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, 149(1-2): 187-200.
- [36] HILL R. The elastic behaviour of a crystalline aggregate [J]. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 1952, 65(5): 349-354.
- [37] DINC A N, RABBEL W, FLUEH E R, et al. Mantle wedge hydration in Nicaragua from local earthquake tomography [J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(1): 99-112.

Elastic Wave Velocities of Lawsonite and Its Implications for Seismic Velocity Anomalies in Subduction Zones

MA Junsheng^{1,2}, LIU Chuanjiang^{1,2}, WANG DuoJun^{1,2}, CAI Nao^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2}
(1. High Pressure Science Experiment Center, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing
100049, China;
2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing
100049, China)

Abstract: Lawsonite is a key hydrous mineral in subducting oceanic crust, with an H₂O content of up to 11.5 wt.% and volume fractions that can reach ~50 vol.%, and is stable over a wide pressure–temperature range. Constraining the high-pressure elastic properties of lawsonite is therefore essential for understanding seismic velocity structures in subduction zones and the deep-water cycle. In this study, dense polycrystalline lawsonite was synthesized by hot-pressing natural lawsonite powder at 7 GPa and 1073 K for 2 hours. Ultrasonic interferometry was then used to measure *P*- and *S*-wave velocities of lawsonite up to 8 GPa at room temperature, from which the elastic moduli and their pressure derivatives were determined. The results show that both elastic wave velocities and moduli increase with pressure, yielding $K_{S0} = 120(1)$ GPa, $G_0 = 51(1)$ GPa, $K'_S = 5.7(1)$, $G' = 0.9(1)$. Using these elastic properties, together with previous mineral-physics results, we constructed a lawsonite-bearing eclogite model, which indicates that the presence of lawsonite can provide a plausible explanation for the seismic velocity anomalies observed at depths of ~60–90 km within intermediate-temperature subducting slabs such as Nicaragua.

Keywords: lawsonite; elasticity; subduction zone; high pressure