

文章编号: 1000-4734(2022) 05-0640-09

高温高压静水压条件下岩石纵波、横波速度和泊松比的实验研究

畅宇飞^{1,2}, 刘永刚^{1*}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了研究高温高压静水压条件下的岩石的弹性物理参数, 利用自行研发的高温高压静水压(气压)装置, 结合超声脉冲反射法对 4 块典型灰岩样品进行了高温(25~400 °C)高压静水压(0~300 MPa)的纵波、横波的速度测量, 并对所测岩石的泊松比进行了计算。实验结果表明, 在常温高压下, 当气体围压小于 200 MPa 时, 岩石的纵波和横波速度呈非线性快速增加, 当围压大于 200 MPa 时, 波速近似呈线性缓慢增加; 当气体围压小于 200 MPa 时, 岩石的泊松比增加较快, 围压大于 200 MPa 时, 泊松比变化很小, 由此可推测所测实验灰岩样品的孔隙闭合压力大约为 200 MPa。恒压高温下, 当温度小于 300 °C 时, 围压限制了裂隙的热扩张, 纵波和横波近似呈线性缓慢变化, 泊松比表现为不变或者缓慢增加。当温度大于 300 °C 时, 300 MPa 的围压已不能限制温度导致的裂隙扩张, 岩石纵波和横波速度降低, 泊松比略微降低。

关键词: 灰岩; 高温高压; 气体静水压; 双模换能器; 纵、横波速度; 泊松比

中图分类号: P31

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.058

第一作者: 畅宇飞, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 固体地球物理学专业. E-mail: chang_yufei0415@163.com

Experimental study on P- and S-wave velocities and Poisson's ratios of rocks under high temperature and high hydrostatic pressure

CHANG Yu-fei^{1,2}, LIU Yong-gang^{1*}

(1. Key Laboratory of High-temperature and High-pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the elastic physical parameters of the rocks under high temperature and high hydrostatic pressure, in this paper, we used the self-designed experimental facility (high temperature and high hydrostatic pressure of gas) to have measured P- and S-wave velocities of four limestone samples under temperatures (25–400°C) and hydrostatic pressures (0–300 MPa) by means of ultrasonic pulse reflection method, and calculated the Poisson's ratios of the rocks. The experimental results indicate that under room temperature and high pressure, with the increase of pressure, the P- and S-wave velocities of rocks are non-linearly and rapidly increased when the gas confining pressure is less than 200 MPa, but then they are approximated linearly increased when the gas confining pressure is higher than 200 MPa. In particular, the Poisson's ratios of rocks are rapidly increased when the gas confining pressure is less than 200 MPa, however, they are limitedly changed when the confining pressure is greater than 200 MPa. Therefore, it can be inferred that the pore closing pressure of the limestone samples in this experiment is about 200 MPa. Under constant pressure and high temperature which is less than 300°C, the confining pressure had limited the thermal expansion of the fracture, the P- and S-wave velocities of rocks are changed linearly and slowly, and the Poisson's ratios of rocks are generally constant or slightly increased. Under constant pressure and high temperature which is greater than 300 °C, the confining pressure of 300 MPa

收稿日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41873075)

* 通讯作者, E-mail: liuyonggang@vip.gyig.ac.cn

can no longer limit the crack expansion caused by temperature, the P- and S-wave velocities of rocks are decreased, and the Poisson's ratios are slightly decreased.

Keywords: Limestone; High temperature and high pressure; Hydrostatic pressure of gas; Dual module transducer; P- and S-wave velocities; Poisson's ratio

高温高压下岩石物性的研究是人们探索地球内部物质组成和结构的重要手段,也是解释地球物理勘探资料的重要依据^[1]。岩石在高温高压条件下弹性波速度的实验研究,已成为地球物理学家研究地球内部结构的重要手段。目前,高温高压下岩石矿物纵波速度 v_p 与温度、压力、裂隙、各向异性、脱水熔融等的关系的研究已有很多^[2-10],而对横波速度 v_s 的研究则相对较少。同时,为了避免传压介质差应力对弹性参数的影响,岩石矿物等材料在静水压条件下的波速测量也有一些研究。宋伟^[11]利用固-液传压介质组合(叶蜡石+甘油),在大压机上测量了高压静水压条件下金属铝的纵波速度。王志刚^[12]在大压机上设计了一套铜管+氧化铝堵头的液体密封组装,实现了金属铍高压静水压下的纵波速度测量。耿乃光等^[13]利用高压静水压(油压)装置,测量了岩石常温高压(0~400 MPa)静水压下的波速。Steveninck^[14]利用高压装置(气压),对岩石 0~20 MPa 静水压下的纵波和横波速度进行了测量。Ji 等^[15]以及 Wang 和 Ji^[16]使用高压静水压(油压)装置,在常温下实现了 10~850 MPa 条件下岩石纵波和横波速度测量。显然,相比于液压油传压介质,气体传压介质具有最好的静水压特性,其优异的化学惰性也相对可以实现更高温度条件下的样品测量。但是由于气体压缩非常困难且危险系数很高,因此岩石高温(25~400 °C)高压(0~300 MPa)完全静水压(气压)条件下的弹性波速度的测量,特别是纵波与横波速度的同时原位测量(双模弹性波换能器)的研究至今少有报道。

在利用岩石弹性波速度反演地球内部结构时,在相同温压条件下,不同的岩石类型可能具有相同的纵波速度,因此依据实验室测得的岩石的纵波速度来反演地球内部结构存在多解性。泊松比是由 v_p/v_s 的比值计算得到,相比于 v_p 或 v_s ,泊松比能够更加严格地对地球内部岩石类型进行约束^[17-18]。到目前为止,虽然对于高温高压条件下横波速度以及泊松比也有少数人研究过^[19-20],但是岩石在完全静水压(气体)条件下的高温高压波速和泊松比的研究却很少有人涉及。

为了实现岩石在高温高压完全静水压条件下纵波、横波速度和泊松比的研究,我们首先自主研发了高温高压静水压(气体)弹性波速度测量装置和双模弹性波换能器,在此基础上选取了 4 块典型的灰岩样品,对其高温高压完全静水压条件下弹性波速度及泊松比进行了实验研究。

1 实验样品与装置

1.1 实验样品

实验样品为采自四川汉源地区的灰岩样品。样品新鲜未风化,无明显的裂隙,以方解石为主,含有微量的粘土矿物,灰白色,粉晶结构。为了提高样品的测试精度,对所采集的全部岩石样品进行了室内精细处理,高精度的抛磨加工,以确保岩样外形尺寸的测量精度。在取芯机上取直径和长度分别为 22 mm 和 9 mm 的圆柱体,利用高精度磨床对样品两个端面进行平行度的加工。之后使用不同目数(1000、2000、5000、7000、10000)的金刚石研磨纸分别将样品抛光为镜面光洁度,制成直径和长度分别为 22 mm 和 7.4 mm 的两端面不平行度最大不超过 0.04 mm、端面不平整度误差最大不超过 0.02 mm 的待测样品。用水和酒精清洗后放入 100 °C 的烘箱中烘烤 72 h 以去除样品表面的吸附水。

1.2 实验装置

实验在中国科学院地球化学研究所地球内部物质高温高压重点实验室高压水热釜的基础上,自行研发了一套高温高压静水压弹性波速度测量平台。实验装置包括加压加温平台和弹性波测量平台。加

压加温平台中,使用氩气作为传压介质,可以为样品提供优异的高压静水压环境。系统的设计压力最高可达 400 MPa,测量误差为 1 MPa。使用高精度加温炉对高压釜体进行整体加热(外加热),以实现对釜内样品的加温,温度可达 1000 °C,使用 NiCr-NiSi 型热电偶对高压釜体的温度进行实时测量,误差为 2 °C。

弹性波测量平台包括声缓冲棒、双模弹性波换能器、样品密封套、信号激发器和示波器等。

为了选择强度高、声波衰减小的缓冲棒,实验中测试了不同金属材料的声波衰减特性,最终选择了 T304 不锈钢材料作为声波缓冲棒。因为高压釜尺寸的限制以及实验中为了增大声波的信噪比,将缓冲棒的两个端面在高精度磨床上进行磨平并使用不同目数的金刚石研磨纸抛光至镜面光洁度。缓冲棒最终的尺寸为长度 300 mm、直径 23 mm。

为了制作出信噪比大、波形好、信号振幅大的“真双模”换能器,本文选用 PZT(锆钛酸铅压电陶瓷片)材料,在金刚石线切割机上沿着 36° 的角度切厚度为 0.8 mm,边长为 6 mm×8 mm 的薄片,在高精度磨床上分别用 500、1000、2000 和 3000 目砂轮进行磨平抛光。将导电银胶均匀地涂满在压电片的一个表面(通过多次地实验和对比,胶水厚度太薄或者太厚,对导电银胶的导电性和换能器的波形影响很大,胶水厚度大约 1 mm 为宜),将带有绝缘涂层且两端抛光的铜线埋在导电胶中,放入 180 °C 的马弗炉中加热 1.5 h 进行固化。胶水凝固之后取出,待冷却之后,用万用表测量导电胶与铜线的导电性。

使用绝缘胶将制作的 PZT 粘贴在磨平抛光的 T304 不锈钢缓冲棒的一个端面。绝缘胶选用具有耐高温高压性能的环氧树脂有机胶,为了消除胶水对弹性波信号的影响,用绝缘胶粘压电片与缓冲棒时,要保证胶水层足够的薄且均匀(手动油压机垂直加压以实现更紧密的耦合),待胶水完全固化(室温 24 h)。

制作的双模换能器具有耐高温高压性能,可同时激发和接受纵波、横波信号。纵波的中心频率约为 5 MHz,横波为 2.6 MHz 左右。为了检验常温常压下换能器的工作性能,将磨平抛光后长度 15.5 mm,直径 23 mm 的圆柱形叶蜡石样品耦合在缓冲棒的另一端,利用反射法同时地测量缓冲棒和样品的纵波横波速度。波形如图 1 所示,缓冲棒纵波的信号振幅可达到 7 V,横波约为 2 V,样品纵波的信号振幅约 2 V,横波约 0.8 V,且波形是很规则的正弦函数。通过计算,得到了缓冲棒的纵波速度为 5.94 km/s,横波速度为 3.30 km/s,与 Nowacki 和 Kassprzyk^[21]测量的纵波速度 5.95 km/s 大体相当。叶蜡石样品的纵波速度为 6.31 km/s,横波速度为 3.71 km/s。

为了验证双模弹性波换能器波速测量的准确性,将制作的双模换能器分别粘贴在长度分别为 21 mm 和 86 mm 的玻璃缓冲棒(标准样品)上。使用反射法、透射法(两根玻璃棒端面直接贴合且接触

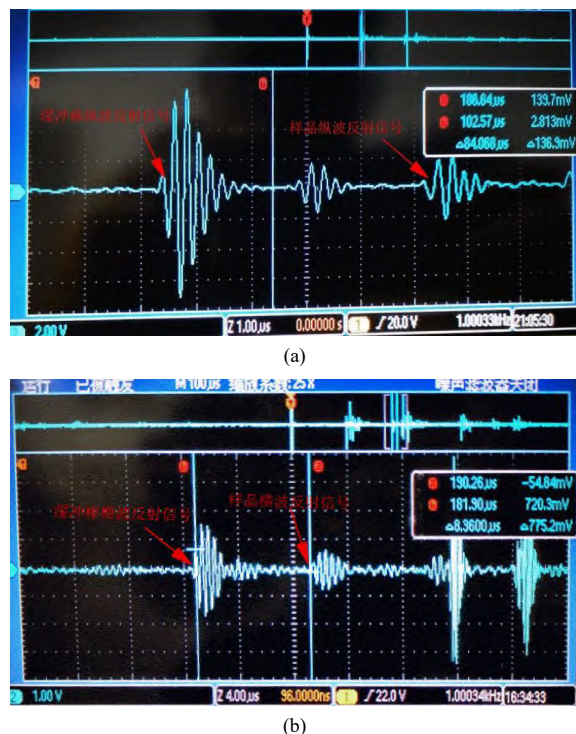


图 1 钢缓冲棒与样品的纵波 (a) 和横波 (b) 反射信号
Fig. 1. The reflection-signals of compressional (a) and shear (b) waves of steel buffer rod and sample.

面不涂抹任何的耦合剂)分别计算出玻璃的声速, 信号如图 2 所示。通过计算得到, 反射法测得 2 根玻璃棒的纵波速度分别为 5.71 km/s 和 5.72 km/s, 横波速度分别为 3.57 km/s 和 3.58 km/s; 透射法测得玻璃棒的纵波、横波速度分别为 5.71 km/s 和 3.58 km/s。由此可见, 利用反射法和透射法测量玻璃棒的纵波、横波速度基本相同, 误差在可控范围内, 与前人测量结果大体一致, 由此表明本实验制作的双模换能器测量的纵波、横波速度是准确和可靠的。通过对换能器波形的观察, 发现制作的每个换能器(共制作了 5 个换能器)主波后紧跟着一个能量较小的波。对于这种现象, 魏建新和狄帮让^[22]认为是由于 PZT 的径向振动引起的, 在换能器制作过程中很难消除。此外, 能量较小的波与主波是分离的, 对于主波没有影响, 不影响主波的读取时间。

为了隔离样品与传压介质, 实现高压下干样品的测量, 使用微锥角内孔的聚四氟乙烯密封帽+内锥角密封环对样品进行高温高压条件下的密封。密封帽使用聚四氟乙烯棒(聚四氟乙烯具有耐高温、易变形以及高温高压下不会破裂等特点, 可作为优秀的传压介质和密封材料)在车床上加工而成, 尺寸为内径 21.8 mm, 外径 24.2 mm, 内高 28 mm, 外高 30 mm, 壁厚 1.2 mm。内锥角密封环使用 T304 钢棒在车床上加工而成, 尺寸为内径最大处 24.2mm, 外径 25.8 mm, 高度 8 mm, 角度为 3°。密封环的作用是将套入缓冲棒部分的聚四氟乙烯密封帽箍住, 阻止聚四氟乙烯密封帽在高温高压条件下发生变形, 进而达到更好的密封效果。将密封环的形状制作成内锥形的目的一方面是套入密封环的过程比较容易, 不会刮伤聚四氟乙烯密封帽, 另一方面是在聚四氟乙烯套入的过程, 会越挤越紧, 密封效果会更好。为了达到更好的密封效果, 密封环的尺寸略小于密封帽, 所以装入的过程需借手动油压机。样品密封如图 3 所示。接收到钢缓冲棒

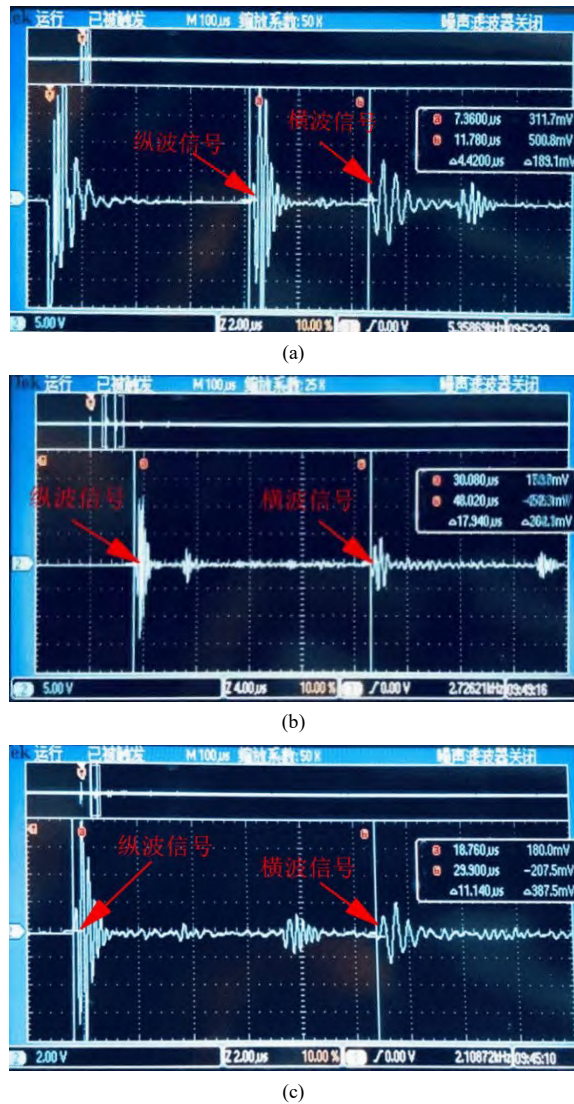


图 2 玻璃棒的反射 (a) (b) 和透射 (c) 信号
Fig. 2. The reflection (a, b) and transmission (c) signals of the glass rob.



图 3 样品密封图
Fig. 3. Diagram for sample seal.

反射信号的纵波信号振幅约为 4 V, 横波约为 2 V, 接收到灰岩样品反射信号的纵波信号振幅约为 2 V, 横波约为 0.8 V, 具有良好的信号强度和信噪比, 满足实验的要求。

此外, 氩气无色无味, 实验过程中以及实验结束后很难检查出样品在高温高压静水压条件下密封效果是否良好。为了验证样品的密封效果, 检查实验过程中是否存在泄露, 密封之前在样品表面放一滴水珠, 实验结束后, 如果样品表面和聚四氟乙烯密封帽壁上可见小水珠, 则表明微锥角内孔的聚四氟乙烯密封帽+内锥角密封环的密封方式对样品的密封效果很好。

实验使用 Panametrics 5077 超声发射接收仪作为声波激励源, 用 DPO-2024B 数字示波器记录声波的走时, 走时精度为 0.01 μs 。采用脉冲波反射法测量岩石的纵波与横波的走时。首先将压力缓慢从常压分别加到 100、150、200、250 和 300 MPa, 为了保证压力的均匀性, 每个压力测量点保压 30 min, 然后分别记录各个压力点的纵波和横波走时。将压力稳定保持在 300 MPa, 以 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率将温度分别升至 100、150、200、250、300、350 和 400 $^{\circ}\text{C}$, 为了使样品充分受热均匀和减少高压釜体内外的温度差, 每个温度点恒温 60 min, 之后记录每个温度点的纵波和横波走时。那么, 波在样品中的传播时间 t :

$$t=(t_2-t_1)/2 \quad (1)$$

其中, t_1 为波通过缓冲棒反射回来的时间, t_2 为波通过缓冲棒和样品反射回来的时间 (波的行程为样品与缓冲棒长度之和的 2 倍)。

那么, 样品的波速 v :

$$v=l/t \quad (2)$$

其中 l 为样品的长度。考虑到实验过程中最高静水压力 (300 MPa) 远小于灰岩的体积模量 ($>36 \text{ GPa}^{[20,23-24]}$), 因此实验过程中样品长度变化极小, 在声速的计算时暂不做考虑。

2 实验结果

2.1 波形随温度压力的变化

岩石在常温高压下的纵波、横波信号波形图如图 4 所示。缓冲棒与样品的反射信号同向, 起跳点相互对应, 可以通过读取波峰或者波谷之间的时间差作为纵波、横波信号在样品中的走时。值得说明的是, 由于缓冲棒的长度太长, 波的衰减较大, 所以样品的反射信号较弱, 但可以准确地读出超声波的走时。随着压力的增加, 纵波和横波的走时逐渐减小, 且低压段减小的速率大于高压段, 对应的岩石的波速则是低压段岩石波速增加较快, 高压段岩石

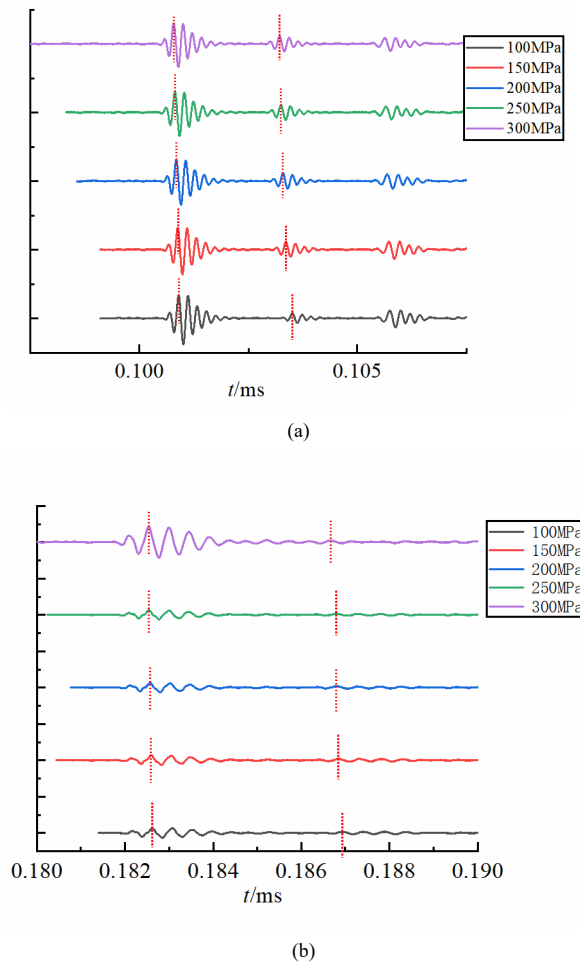


图 4 纵波 (a) 和横波 (b) 波形与压力的变化关系
Fig. 4. Variations of compressional (a) and shear (b) wave forms under high pressure.

的波速增加的较慢。已有大量的实验结果表明, 恒压高温条件下, 随着温度的升高岩石横波速度略有减小, 在波形图上很难体现走时的变化, 因此不做展示。

2.2 波速随温度压力的变化

如图 5 所示, 在常温高压下, 灰岩的 v_p 和 v_s 随着压力的升高而增加, v_p 、 v_s 的变化趋势相似且 v_p 的变化幅度大于 v_s , 变化趋势与张尔华等^[25]和李杨^[26]相同, 满足 Ji 等^[27,28]的波速-压力公式。 v_p 、 v_s 变化范围分别为 5.44~5.94 km/s、3.32~3.59 km/s, 在低压阶段, 波速呈非线性快速增加, 压力继续升高时, 变化幅度降低。在恒压高温下, 如图 6 所示, 灰岩的 v_p 、 v_s 随着温度的升高而降低。 v_p 、 v_s 变化范围分别为 5.73~5.94 km/s 和 3.42~3.52 km/s, v_p 、 v_s 的变化趋势基本相似, 在低温阶段, 变化不明显, 随着温度继续升高, 波速变化较快。

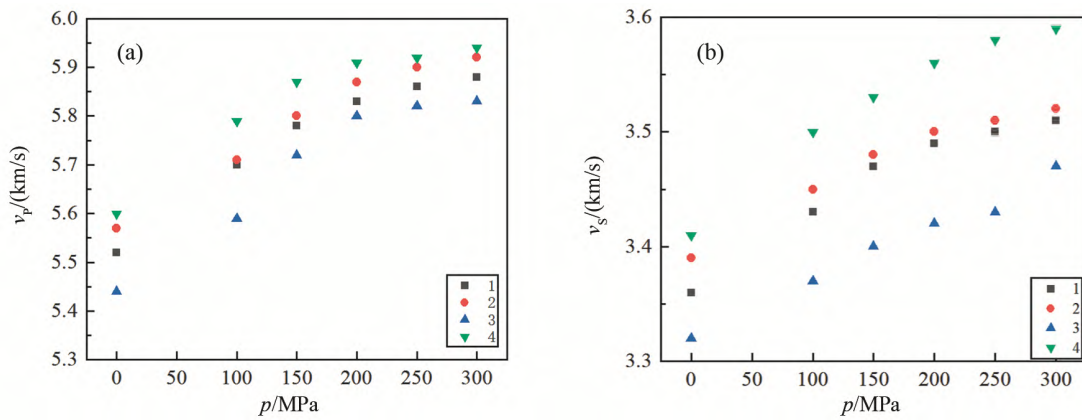


图 5 纵波 (a) 和横波 (b) 波速与压力的变化关系

Fig. 5. Variations of compressional (a) and shear (b) wave velocities under high pressure.

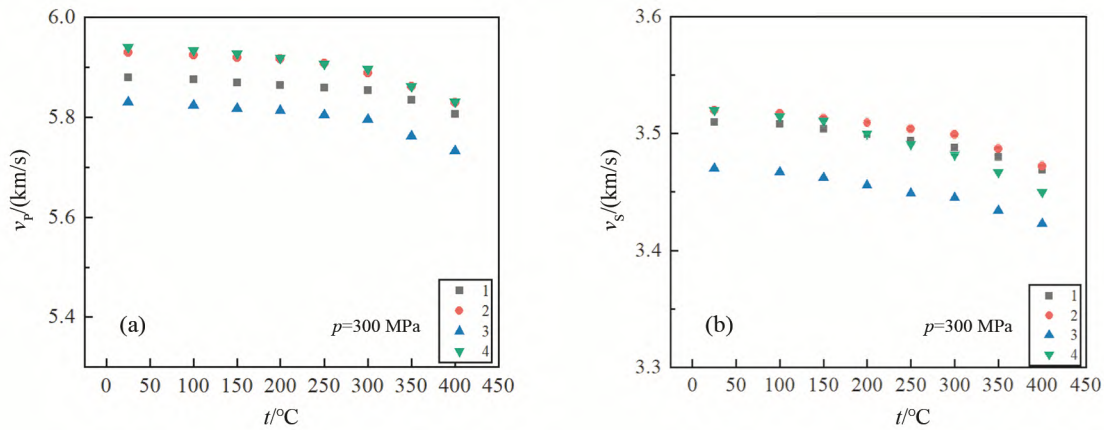


图 6 纵波 (a) 和横波 (b) 速度与温度的变化关系

Fig. 6. Variations of compressional (a) and shear (b) wave velocities under high temperature.

2.3 泊松比随温度压力的变化

岩石泊松比是岩石的一个重要的物理参数, 由 v_s 和 v_p 确定。相对于单独的 v_s 和 v_p , 泊松比 μ 能更好地限制岩石的岩石类型和组成^[16-18]。根据实验测量出的 v_s 和 v_p , 泊松比 μ 的计算公式:

$$\mu = [1 - (v_p^2 / v_s^2 - 1)^{-1}] / 2 \tag{3}$$

如图 7a 所示, 常温高压条件下, 泊松比随压力升高而增加。泊松比变化范围为 0.183~0.238, 平均值为 0.21。与唐杰等^[20]泊松比相当 (0.22), 大于孟庆山和汪稔^[24]的测量值 0.19, 小于 Herbert^[29]的测量值 0.26。本实验与前人实验结果存在差异, 原因是孟庆山和汪稔的样品为中风化和强风化灰岩, Herbert 选择的灰岩样品为生物沉积、泥质含量多。本实验的样品为碳酸钙沉积, 以方解石为主, 只含有微量的粘土矿物, 成分很纯。在低压阶段, 泊松比呈非线性快速增加, 压力继续升高时, 泊松比变化幅度很小。在恒压高温下, 如图 7b 所示, 泊松比随温度的升高变化不明显。温度较低时, 泊松比基本保持不变, 温度大于 300 °C 时, 泊松比略微降低。

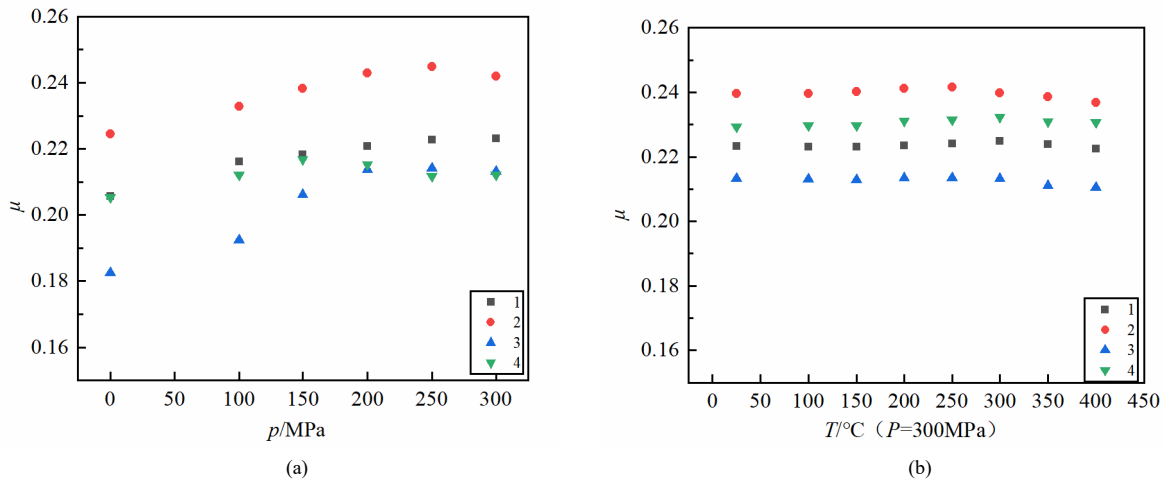


图 7 泊松比与压力 (a) 和温度 (b) 的变化关系

Fig. 7. Variations of Poisson's ratios under high pressures (a) and high temperatures (b).

3 讨论

从实验结果可以判断, 在常温下, 当围压增加时, 岩石的波速与泊松比总的趋势是增加的。在升压的初始阶段, 岩石的纵波与横波的变化趋势呈非线性快速增加, 在围压大于 200 MPa 时, 波速的变化幅度越来越小, 这与前人的研究结果基本一致^[30-33]。导致岩石波速不规则变化的主要原因是岩石内部微裂隙作用的结果, 在压力小于 200 MPa, 岩石内部的微裂隙大量闭合, 波速快速增加; 当围压大于 200 MPa 时, 岩石中大部分裂隙基本发生闭合, 此时反映的是岩石矿物集合体的弹性性质, 因此波速随着压力的升高较为缓慢。常温高压下, 泊松比随着压力升高而增加, 是由于体积模量增高值大于剪切模量的增高值, 造成了剪切模量相对减小、泊松比增加。压力小于 200 MPa 时, 灰岩的泊松比值呈不规则快速增加, 泊松比在低压阶段不规律的变化是由岩石内部的孔隙^[34]以及内部孔隙瓦解造成的^[33]。当压力大于 200 MPa 时, 泊松比变化较缓慢, 基本保持不变或略微降低, 与前人的实验结果类似^[18,19,30,35]。在升压初始阶段, 岩石中含有大量的微裂隙, 压力升高时, 岩石只是微裂隙大量闭合, 岩石并没有发生破坏, 泊松比非线性快速增加。随着压力的继续升高, 裂隙基本已经闭合, 岩石成为致密的弹性体, 岩石的泊松比变化不大, 基本稳定。由波速和泊松比的变化规律可推测出本实验样品的孔隙闭合压力大约为 200 MPa。

在恒压 300 MPa 条件下, 升温到 400 °C 的过程中, 岩石横波和纵波的速度近似呈线性略微降低, 降低幅度很小, 这与前人的研究结果类似^[30-32]。当温度继续升高时, 波速降低较快。泊松比表现为加温初始阶段, 泊松比不变或者稍微增加, 当温度继续升高时, 泊松比降低幅度较大, 验证了小范围温度变化并非主要因素, 与前人的研究成果基本一致^[19]。当温度升高时, 岩石会受热膨胀^[36-39], 岩石内部矿物颗粒之间不协调的变形会产生热应力^[40], 热应力会导致岩石原有裂隙扩张和产生新的裂隙。考

考虑到温度每升高 1 °C, 围压大约增加 1 MPa 就可以限制住裂纹的热扩张^[19,41-42], 所以恒压 300 MPa 下, 温度小于 300 °C时, 岩石的纵波和横波波速变化稍微降低, 但变化不明显, 泊松比不变或者稍微增加。这表明, 300 °C产生的热应力导致岩石裂隙的扩张, 已被 300 MPa 的围压限制住, 裂隙已经闭合, 在这个温度范围内, 岩石不会发生矿物的熔融、脱水和相变, 此时岩石是一个弹性体, 所以波速和泊松比的变化体现了岩石内在矿物的性质, 变化不明显。当温度大于 300 °C时, 300 MPa 的围压与 300 °C 的温度发生“抵消作用”, 此时围压已不能够完全限制岩石热应力导致裂隙的扩张, 所以当温度继续升高时, 裂隙发生扩张, 岩石的纵波、横波波速和泊松比缓慢降低。

4 结论

通过本次高温高压下对灰岩样品的研究, 我们发现, 在常温条件下, 围压小于 200 MPa 时, 灰岩纵波、横波速度和泊松比呈非线性快速增加; 当围压大于 200 MPa 时, 岩石表现出完全弹性性质, 纵波、横波速度随压力近似线性缓慢增加, 泊松比基本保持不变。由此可推测本实验中样品的孔隙闭合压力大约为 200 MPa。

此外, 在保持恒压 300 MPa 进行加温测量的实验过程中, 当温度小于 300 °C时, 纵波和横波近似呈线性缓慢变化, 泊松比不变或很缓慢增加, 可以推测是由于围压限制了裂隙的热扩张, 使得此时的岩石相当于一个完全弹性体; 当温度大于 300 °C时, 岩石纵波和横波速度和泊松比出现较为明显的降低, 可以推测 300 MPa 的围压已不能限制温度导致的裂隙扩张所带来的弹性模量减小。以上的弹性波声速所推测的高温高压下岩石裂隙的变化规律与前人的研究较为一致, 也说明了我们目前所采用的高温高压静压的超声波速度测量系统具有较好的可靠性和准确性, 为以后批量开展地球物理勘探所需的岩石弹性测量打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 王雁宾. 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, 2006, 13(2): 1~36.
- [2] Liu W, Du J G, Bai L P, et al. Compressional elastic wave velocities of serpentinized pyroxenite at high pressures and high temperatures and its geological significance[J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 15(4):456-461.
- [3] 蒋玺, 安邦, 唐波, 等. 0.6~2.0GPa 压力下部分熔融角闪辉长岩的纵波波速 [J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(4):505-514.
- [4] 刘斌. 不同温压下岩石弹性波速度、衰减及各向异性与组构的关系[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 247-257.
- [5] 陈志, 杜建国, 周文戈, 等. 0.5~4.0GPa、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, 2009, 23(5): 338-344.
- [6] Kern H. Elastic wave velocity in crustal and mantle rocks at high pressure and temperature: the role of the high-low quartz transition and of dehydration reactions[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1982, 29(1):12-23.
- [7] Scheu B, kern H, Spielar O, et al. Temperature dependence of elastic P-and S-wave velocities in porous Mt. Unzen dacite[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006, 153(1):136-147.
- [8] 蒋玺, 安邦, 唐波. 高温高压下辉长岩的部分熔融与弹性波速[J]. 地质科技情报, 2013, 32(2): 0001-0007.
- [9] Christensen N I. Compressional wave velocities in possible mantle rocks to pressures of 30 Kbar[J]. Journal of Geophysical research, 1974, 79(24):407-412.
- [10] Zhao Z D, Gao S, Luo T C, et al. Origin of the crustal low velocity layer of Qinling and north china: evidence from compressional wave velocity in rocks at high PT conditions[J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(2):251-259.
- [11] 宋伟. 六面顶压机中高温高压液态物质声速测量技术与应用研究[博士学位论文]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2012..
- [12] 王志刚. 六面顶压机加载下高温高压静水压声速测量技术及应用研究[博士学位论文]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2012.
- [13] 耿乃光, 郝晋升, 李纪汉, 等. 岩石的波速比与静水压的关系[J]. 地震学报, 1992, 14(4): 500-506.
- [14] Steveninck J V. Apparatus for simultaneous determination of longitudinal and shear wave velocities under pressure[J]. Journal of Scientific Instruments, 1967, 44: 379-381.
- [15] Ji S C, Wang Q, Matthew H, et al. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson's ratio[J]. Tectonophysics, 2008, 463(1): 15-30.

- [16] Wang Q, Ji S C. Poisson's ratios of crystalline rocks as a function of hydrostatic confining pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: 6167-6188.
- [17] Nikolas I. Christensen N I. Poisson's ratio and crustal seismology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 3139-3156.
- [18] Kern H. Elastic wave velocity in crustal and mantle rocks at high pressure and temperature: The role of the high-low quartz transition and of dehydration reactions[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1982, 29(1): 12-23.
- [19] 刘斌, 席道瑛, 葛宁洁, 等. 不同围压下岩石中泊松比的各向异性[J]. *地球物理学*, 2002, 45(6): 0880-0891.
- [20] 唐杰, 郭渊, 孙成禹, 等. 碳酸盐岩波速与弹性模量变化规律试验研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36 (5): 0062-66.
- [21] Nowacki K, Kasprzyk W. The sound velocity in an alloy steel at high temperature conditions[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2010, 31(1): 103-112.
- [22] 魏建新, 狄棒让. 地震物理模型超声测试技术中的几个问题[J]. *勘探地球物理进展*, 2003, 26(4): 294-300.
- [23] 刘欣欣, 印兴耀, 张峰. 一种碳酸盐岩储层横波速度估算方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37 (1): 0042-49.
- [24] 孟庆山, 汪稔. 碳酸盐岩的声波特性研究及其应用[J]. *中国岩溶*, 2005, 04: 344-348.
- [25] 张尔华, 鞠林波, 宋永忠等. 古城地区鹰山组碳酸盐岩储层地震岩石物理特性[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(5): 101-108.
- [26] 李杨. 碳酸盐岩岩石物理与与油气储层识别[硕士毕业论文[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [27] Ji S C, Wang Q, Shao T B, et al. S-wave velocities and anisotropy of typical rocks from Yunkai metamorphic complex and constraints on the composition of the crust beneath Southern China[J]. *Tectonophysics*, 2016, 686, 27-50.
- [28] Ji S C, Wang Q, Matthew H, et al. P-wave velocities and anisotropy of typical rocks from the Yunkai Mts. (Guangdong and Guangxi, China) and constraints on the composition of the crust beneath the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 131, 40-60.
- [29] Wang Herbert F. *Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology*[B]. Princeton :Princeton University Press, 2000.
- [30] Kern H, Wenk H P. Fabric related velocity anisotropy and shear wave splitting in rocks from Santa Rosa mylonite zone, California[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 11213-11223.
- [31] Barruol G, Kern H. Seismic anisotropy and shear-wave splitting in lower-crustal and upper-crustal rocks from the Ivrea Zone's experimental and calculated data[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1996, 95: 175-194.
- [32] 嵇少丞, Mainprice D. 晶格优选定向和下地壳地震波速度各向异性[J]. *地震地质*, 1989, 11(4): 15-23.
- [33] Wenk H R. *Preferred orientation in deformed metals and rocks: An introduction to modern texture analysis*[M]. London :Academic Press, 1985.
- [34] Christensen N I. Poisson's ratio and crustal seismology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 3139-3156.
- [35] 嵇少丞, 王茜, 孙圣思. 晶体岩石的地震波性质及其地质、地球物理意义[J]. *地质科学*, 2009, 44(4): 1113-1135.
- [36] Zhang W Q. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 98: 1297-1304.
- [37] Sun Q, Zhang W Q, Su T M, et al. Variation of Wave Velocity and Porosity of Sandstone after High Temperature Heating[J]. *Acta Geophysica*, 2016, 64(3): 633-648.
- [38] Zhang W Q, Qian H T, Sun Q, et al. .Experimental study of the effect of high temperature on primary wave velocity and microstructure of limestone[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(7): 5739-5748.
- [39] Kilic O. The influence of high temperatures on limestone P-wave velocity and Schmidt hammer strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, 43(6): 980-986.
- [40] Zhu S Y, Zhang W Q. Thermally induced variation of primary wave velocity in granite from Yantai: Experimental and modeling results[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 114: 320-326.
- [41] Kern H, Richter A. Temperature derivatives of compressional and shear wave velocities in crustal and mantle rocks at 6 kbar confining pressure[J]. *Journal of Geophysical research*, 1981, 49: 47-56.
- [42] 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与衰减的各向异性[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(3): 371-381.