

马霄一, 李呈呈, 白俊, 等. 超高温高压岩石物理实验研究 [J]. 石油物探, 2025, 64(5): 816-825

MA Xiaoyi, LI Chengcheng, BAI Jun, et al. Experimental study of rock physics under ultrahigh temperature and high pressure conditions [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(5): 816-825

超高温高压岩石物理实验研究

马霄一, 李呈呈, 白俊, 王欢

(中石化石油物探技术研究院有限公司, 江苏南京 211103)

摘要: 随着石油勘探与开发技术的进步, 尤其是材料、控制等技术的进步, 岩石物理实验研究逐渐向超高温高压的地表深层原位发展。提出了一套适用于地表深层原位实验研究的超高温高压岩石地震弹性参数测量系统。该系统利用传统压机和石墨管实现了对温压的控制, 具备了快速加载超高温高压的能力, 可用于超高温高压条件下的岩石物理实验研究。利用所提出的岩石弹性参数测量系统对 10 块岩石样品进行了测试, 获得了超深层储层条件 (温度: ~250 °C, 围压: ~300 MPa) 下岩石样品的纵横波速度。同时, 在较大范围的压力、温度域上拟合了实验数据, 分析了弹性波速度的温度和压力依赖性, 刻画了速度-温压的协变关系。结果表明, 速度随着温度和压力的增高分别呈现对数减小和对数增加, 且纵波拟合系数对孔隙类型具有明显的指向性。

关键词: 高温高压; 协变; 速度; 岩石物理; 孔隙类型

中图分类号: TE; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-1441(2025)05-0816-10

DOI: [10.12431/issn.1000-1441.2024.0010](https://doi.org/10.12431/issn.1000-1441.2024.0010)

Experimental study of rock physics under ultrahigh temperature and high pressure conditions

MA Xiaoyi, LI Chengcheng, BAI Jun, WANG Huan

(SINOPEC Geophysical Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: With the advancement of petroleum exploration and development technologies, especially with respect to materials and control, the experimental study of rock physics is moving towards in-situ deep surface layers under ultrahigh temperature and high pressure. This paper presents a seismic elastic parameter measurement system for ultrahigh-temperature and high-pressure rocks. This system utilizes traditional presses and graphite tubes to achieve temperature and pressure control, and has the ability to quickly load ultrahigh temperature and high pressure, so it can be used for experimental study of rock physics under ultrahigh temperature and high pressure conditions. With this system, 10 rock samples were tested to obtain the elastic parameters such as acoustic velocity under ultradeep reservoir conditions (temperature ~250 °C, pressure ~300 MPa). Moreover, the experimental data were fitted over a wide range of pressure and temperature domains, the temperature-pressure dependence of elastic wave velocity was analyzed, and the covariant relationship between velocity and temperature-pressure was characterized. The results indicate that the velocity decreases and increases logarithmically with the increase of temperature and pressure respectively, and the longitudinal wave fitting coefficient has a clear directional effect on the pore type.

Keywords: HTHP, covariant, velocity, rock physics, pore type

岩石是构成地球的最重要的原材料, 也是一种多相体, 主要由固体的岩石骨架和流动的孔隙流体组

成^[1-2]。受地球结构和动力学性质的影响, 岩石具有不同于其他材料的诸多特殊特征 (如多相多孔介质、高

收稿日期(Received): 2024-01-08; 接收日期(Accepted): 2024-10-09。

第一作者简介: 马霄一 (1986—), 男, 博士, 主要从事岩石物理实验的研究工作。E-mail: ma_xiaoyi@sina.com

基金项目: 中石化复杂储层岩石物理应用基础研究 (II 期) — 济阳坳陷 (P24096) 资助。

This research is financially supported by the Basic Research on the Application of Rock Physics in Complex Reservoirs of Sinopec (Phase II) — Jiyang Depression (Grant No. P24096).

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

温高压环境、长期温压作用等),由此发展了一门以研究岩石物理性质为主的科学—岩石物理学^[3]。

从学理层面而言,油气勘探开发的理论基础是岩石物性的不同,对岩石样本进行实验研究在一定程度上直接与地球物理研究成果的正确性和准确性相关。随着地震勘探不断向深层推进,联系储层性质和地震属性的地震岩石物理分析技术也在不断发展,实验室的岩石物理研究逐渐向更高压力、更高温度方向发展。在超过 200 °C 的高温 and 150 MPa 的压力环境下,地下深层、超深层岩石的密度和塑性等物理性质会发生明显变化,而现有勘探地震学的理论方法是基于常温常压介质条件下的假定,已有实验表明温度和压力对岩石动静态弹性模量影响甚大,目前超声岩石物理实验受设备温度上限(170 °C)制约,无法开展超高温高压条件下的地震岩石物理测量,因此超高温高压对岩石弹性性质的作用机理不明,无法准确地反映地下的实际情况,造成超深层复杂油气藏的岩石物理机制认识不清,储层预测理论基础不强^[4]。

我国岩石物理研究始于 20 世纪 80 年代初,相对来说研究基础比较薄弱,且主要侧重于岩石本身的物理性质的研究。王大兴等^[5]通过模拟地层温压条件下的岩石弹性参数,用频谱振幅比法计算品质因子 Q 值。巴晶等^[6-8]提出了双重孔隙介质波传播理论,并利用相关模型进行了含气饱和度反演。国内的许多油田和科研实验室都购置了国外技术前沿的岩石物理科研设备,用以开展岩石物理实验研究,并已经取得了不少的科研成果。比如成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室采购的地层条件下岩石物性参数测试系统(MTS 物性测试系统)^[9];中国地质大学(北京)的地下信息探测技术与仪器测井实验室采购了 CMM-C 型超高温高压岩心多参数测量系统^[10];中国石油大学(华东)采购了 JA98-n 型声电联测仪,该设备可以用于测量超高温高压条件下不同直径柱状岩样的电阻率、声波参数^[11];长江大学的油气资源与勘探技术教育部重点实验室引进了 Autolab-1000 型超高温高压岩心检测设备,该设备可以模拟地层条件下频率域复电阻率参数、声波以及超低渗透率(最低可至 10 nD, 1 nD=0.001 mD, 1 mD $\approx 0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 的实验测试^[12]。但目前大多数设备的温度、压力参数普遍小于 150 °C 和 200 MPa,缺少对深层乃至超深层的原位环境模拟能力。国内 2021 年引进的 AutoLab1500-HPHT 超高温高压岩石物理设备基本满足了万米深度条

件下油气储层的温压条件,但由于温压加载时间很长,且采用的波导管采集技术不够成熟,实验效率有待提高^[13]。

综上所述,随着油气勘探主要目标由构造油气藏转向岩性和隐蔽性油气藏,面对越来越高的油气储层预测的精度要求,开展岩石在原地地层条件下的岩石物理实验研究日益重要。国内的超高温高压研究主要针对陆上深部构造下物质的物理性质,且相关设备都是基于此开发的,而针对深层地震勘探的地表深层岩石弹性参数的原位实验研究非常少。本文使用传统压机和石墨管实现对温压的控制,温度可达到 250 °C,围压可达到 300 MPa。在地表深层温压范围内,完成一系列的弹性参数实验,开展弹性波速度的温压依赖性研究,为深层岩石物理多参数建模、深层储层预测以及提高勘探开发效益提供指导依据。

1 实验背景与方法

对于地球科学来说,超高温高压实验必须考虑温压条件与地球内部深度之间的对应关系,图 1a 展示了通常采用的针对标准地球模型的温度-压强-深度关系。根据已开发的油气藏数据统计,地表深层原位岩石的温压范围如图 1b 所示^[14]。本文使用的超高温高压设备包括 5 大核心体系,即高压腔、外部施压装置、传导介质、加热装置和冷却装置。实验中,高温(温度)和高压(压强)是两个关键参数,其中高压的产生和维持主要基于牛顿力学原理,即 $P=F/A$, 此处 P , F , A 分别表示压强、压力和有效面积,其压力产生的方法是利用压机平台将可控压力作用于样品上;温度产生的方法是利用电流通过石墨管产生大量热量,利用外部的冷水循环随时带走热量,通过电流强度和冷水循环控制温度。为了保证样品附近均匀的压强和恒定的温度,又需要特定的固态叶腊石作为传导介质。

实验在单轴应变压力腔上完成,样品周边包裹石墨管,采用超声波岩石弹性参数测量,结合超高温高压(温度: ~ 350 °C, 围压: ~ 350 MPa) 的快速加载方式,有效提供深层地层的原位测试环境(图 2)。因为是超高温环境,样品不能直接接触声波探头,需要增加上、下刚玉柱,大大缩短了样品放置的可调节长度,根据测试器皿的尺寸限制,样品尺寸范围为直径 19.8 mm, 长度为 20 ~ 28 mm。图 3 展示了样品的安装过程,其较一般超声测试困难,需要将提前准备好的石墨管及

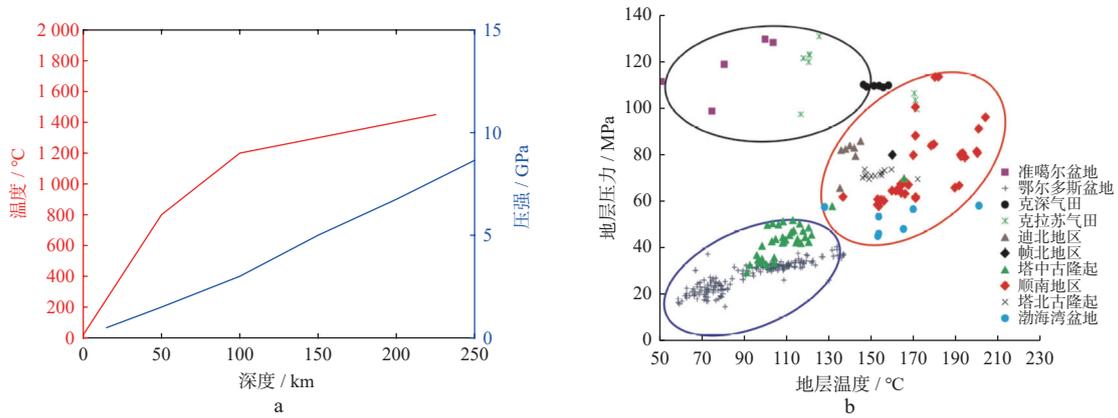
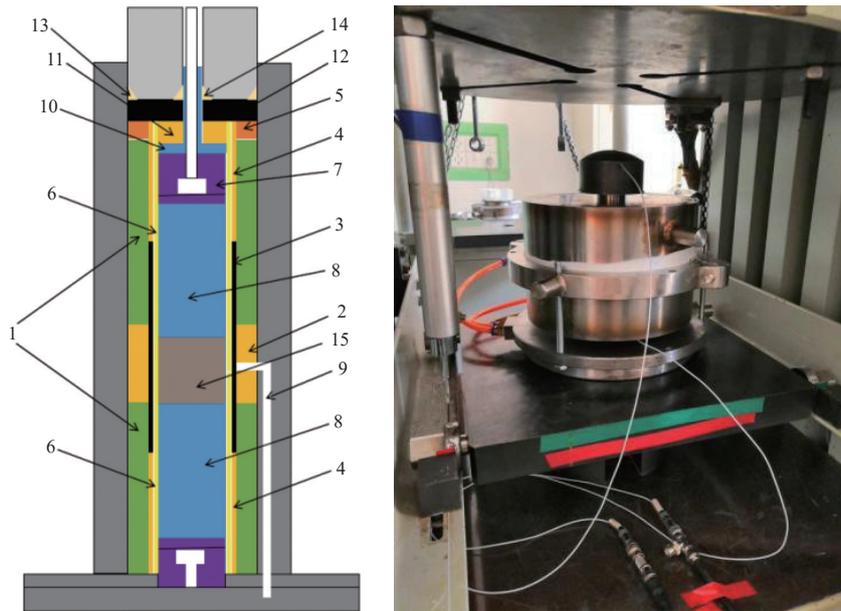


图 1 标准地球模型的温度-压强-深度关系 (a) 和统计出的地表深层原位岩石的温压范围^[14](b)

Fig. 1 Temperature-pressure-depth crossplot from standard earth model(a) and the statistical temperature-pressure range(b) of in-situ deep surface rocks^[14]



注: 1.上、下氧化铝外套; 2.叶蜡石外套; 3.石墨管; 4.上、下导电铜套; 5.导电铜环; 6.上、下叶蜡石内套; 7.上、下换能器; 8.上、下刚玉柱; 9.热电偶; 10.T型钢管护套; 11.叶蜡石柱; 12.铅垫; 13.外铜三角密封圈; 14.内铜三角密封圈; 15.样品。

图 2 超高温高压岩石地震弹性参数测量系统示意及实物

Fig. 2 Schematic and physical seismic elastic parameter measurement system for ultrahigh-temperature and high-pressure rocks



图 3 样品安装过程

Fig. 3 Sample installation steps

相关配件组装耦合。实验前,样品在烘箱中放置 2 d 以去除样品中孔隙和表面的水分;之后称重、组装配件并将其置入样品腔中。实验采用先加压再加温的方式,这样可以避免温压耦合作用下的岩石物理综合响应。由于在低压条件下,样品中的孔隙呈现出非线性的快速减小,弹性波波速变化幅度很大,故在不同的压力区间设置不同的测量间隔。当压力低于 150 MPa 时,测量间隔为 25 MPa,当压力高于 150 MPa 时,测量间隔为 50 MPa。分别利用岩石物理测量仪对样品的位移 $L(p)$ 以及超声测试系统对样品的速度同时进行测量。位移采样精度为 16 bit,测量精度为 0.01%;速度测量采用超声波脉冲透射技术,超声波换能器为 1 MHz 的铌酸锂晶体 (LiNbO_3),超声波的采样精度为 12 bit,测量精度 1.00%。

2 实验样品与物性参数

实验中使用的 10 块碳酸盐岩样品来自川东北仁和场地区灯影组(图 4),其中 6 块自地表采集(样品编号为 $S_1 \sim S_6$),4 块来自马深 1 井(样品编号为 $S_7 \sim S_{10}$)。

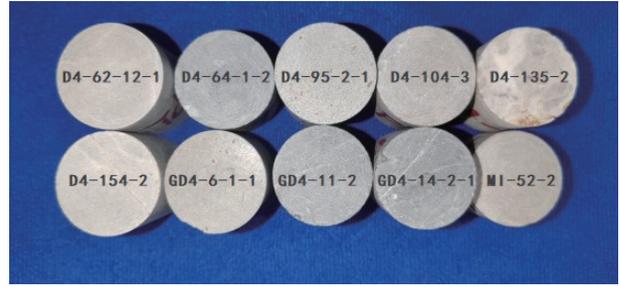


图 4 岩心样本

Fig. 4 Core samples

岩石物性整体上具有以下规律:元坝-仁和场地区处于古裂隙边缘高能相带,灯影组优质储层主要受丘滩相带控制,地震资料解释元坝西侧处于古裂隙边缘高能相带,是优质储层发育最有利区,预测仁和场发育台内丘滩高能相带,优质储层发育。岩样的矿物成分主要是白云岩,占比 80% 以上,10 块碳酸盐岩样品的孔隙度范围为 0.27% ~ 16.42%,渗透率范围为 0.02 ~ 11.73 mD,岩石密度范围为 2.58 ~ 2.82 g/cm^3 。样品呈圆柱体,直径是 19.8 mm,长度范围为 20.1 ~ 27.9 mm。表 1 总结了 10 块样品的尺寸以及物理属性。孔隙度和渗透率由 AP-608 自动孔渗仪测得。

表 1 碳酸盐岩样品的尺寸和物理属性

Table 1 Size and physical properties of carbonate rock samples

样品号	样品编号	直径/mm	长度/mm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙度, %	渗透率/mD	深度/m
D4-62-12-1	S_1	19.8	23.2	2.76	2.65	1.14	0
D4-64-1-2	S_2	19.8	27.3	2.78	0.69	0.02	0
D4-95-2-1	S_3	19.8	20.1	2.68	16.42	11.73	0
D4-104-3	S_4	19.8	27.9	2.58	2.96	1.34	0
D4-135-2	S_5	19.8	25.3	2.79	2.93	2.71	0
D4-154-2	S_6	19.8	24.7	2.75	2.02	1.13	0
MI-6-1-1	S_7	19.8	26.9	2.72	13.61	8.29	7134
MI-11-2	S_8	19.8	24.6	2.82	0.27	0.02	7545
MI-14-2-1	S_9	19.8	23.2	2.78	2.71	0.91	7715
MI-52-2	S_{10}	19.8	24.6	2.82	0.29	0.04	8055

3 不同温压下的速度测试

常温下,当围压分别为 1, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300 MPa 时,测量 10 块样品在不同围压条件下的超声纵、横波速度(图 5a)。保持压力不变(压力维持在 300 MPa),继续加温,当温度分别为 25 $^{\circ}\text{C}$, 50 $^{\circ}\text{C}$,

100 $^{\circ}\text{C}$, 150 $^{\circ}\text{C}$, 200 $^{\circ}\text{C}$, 250 $^{\circ}\text{C}$ 时,测量 10 块样品在不同温度条件下的超声纵、横波速度(图 5b)。从图 5a 中可以看出纵、横波速度随着压力增加均有非常明显的增加,且在低围压下速度增加更为显著。经计算可得,纵波速度变化率范围为 7.11% ~ 44.10%,横波速度变化率范围为 16.74% ~ 25.84%,明显看出相对于横

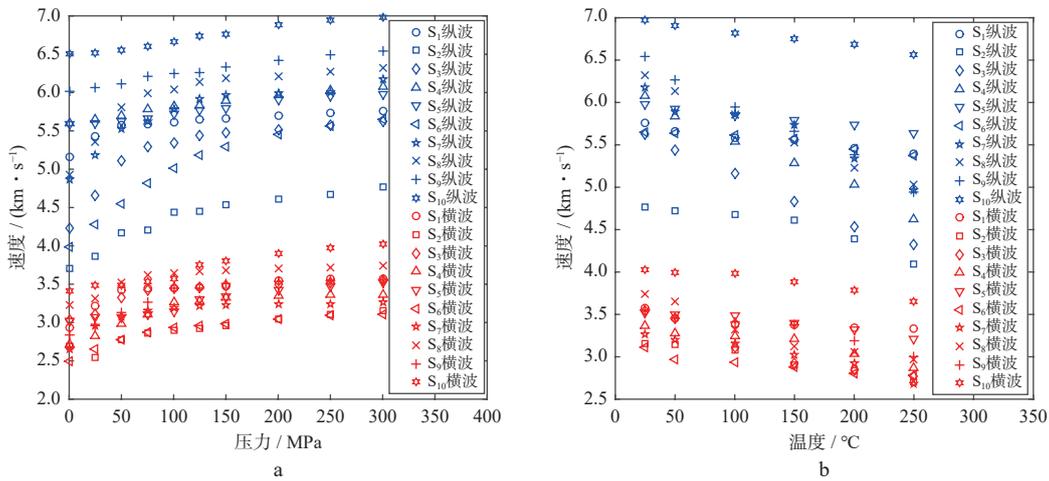


图 5 高温高压下岩石样品纵横波速度变化
a 速度随压力变化; b 速度随温度变化

Fig. 5 v_p and v_s variations of rock samples under HTHP

波,纵波对压力存在更高的敏感性。从图 5b 中可以看出,纵、横波速度随着温度增加均有明显的减小,且在整个温度区间变化相对平缓,纵波速度变化率范围为 4.86% ~ 23.87%,横波速度变化率范围为 8.75% ~ 21.94%,可以看出温度对于速度的变化影响稳定性更高,这对深层岩石的弹性模量主控因素由压力转变成温度提供了直接证据。

4 实验结果分析

4.1 速度的温压依赖性

实验结果显示,岩石样品速度的变化特征与前人

对结晶岩弹性波速测量结果类似^[15]。在低压域,速度随压力的升高而快速增加;在高压域,随压力的升高,速度的增速逐渐降低。对实验数据进行拟合发现,在压力全域上,速度遵循对数协变关系:

$$v(p) = a \ln(p) + c \tag{1}$$

式中: c 为 1 MPa 压力条件下的弹性波速度; p 为压力; a 为拟合系数。拟合结果表明公式 (1) 可以在全域上拟合实验数据,具体系数见表 2,表中 a_v, c_v 分别为纵波拟合对应的拟合系数和 1 MPa 压力条件下的纵波速度值, d_v, f_v 分别为横波拟合对应的拟合系数和速度值, R^2 为拟合方差。对公式 (1) 两边求导,得出 $\partial v(p)/\partial p =$

表 2 速度-压力协变关系的系数

Table 2 Coefficient of velocity-pressure covariant relationship

样品编号	孔隙度, %	$v_p(p)=a_v \ln(p)+c_v$			$v_s(p)=d_v \ln(p)+f_v$		
		$a_v/(km \cdot s^{-1} \cdot MPa^{-1})$	$c_v/(km \cdot s^{-1})$	R^2	$d_v/(km \cdot s^{-1} \cdot MPa^{-1})$	$f_v/(km \cdot s^{-1})$	R^2
S ₁	2.65	0.103	5.146	0.981	0.115	2.921	0.969
S ₂	0.69	0.128	5.607	0.924	0.091	3.433	0.903
S ₃	16.42	0.141	5.577	0.996	0.073	2.973	0.909
S ₄	2.96	0.176	3.636	0.962	0.083	2.563	0.924
S ₅	2.93	0.273	3.862	0.952	0.113	2.411	0.906
S ₆	2.02	0.261	4.124	0.936	0.092	3.009	0.973
S ₇	13.61	0.238	4.711	0.905	0.112	2.648	0.981
S ₈	2.71	0.292	3.976	0.925	0.127	2.831	0.912
S ₉	0.27	0.184	3.746	0.924	0.073	2.403	0.924
S ₁₀	0.29	0.121	5.426	0.916	0.091	2.941	0.919

a/p , 显示随着压力的增加其变化率逐渐减小^[16]。

随着温度的升高, 孔裂缝也在持续的增加, 由速度测量结果表明, 即使围压达到 300 MPa, 岩样中的孔裂缝也不能全部关闭, 从速度的变化可以推断岩样中

依旧残留相当多的孔隙, 这也侧面反映了深部储层可以成为优质储层的岩石物理基础。同理, 我们对实验数据进行温度全域上的拟合, 也得到了速度 v 与温度 T 的协变关系, 如表 3 所示。

表 3 速度-温度协变关系的系数

Table 3 Coefficient of velocity- temperature covariant relationship

样品编号	孔隙度, %	$v_p(T)=a_p \ln(T)+c_p$			$v_s(T)=d_s \ln(T)+f_s$		
		$a_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$	$c_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	R^2	$d_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$	$f_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	R^2
S ₁	2.65	-0.142	6.226	0.943	-0.097	3.863	0.947
S ₂	0.69	-0.181	6.919	0.939	-0.194	4.663	0.987
S ₃	16.42	-0.297	7.269	0.956	-0.118	3.860	0.928
S ₄	2.96	-0.271	5.465	0.923	-0.179	3.711	0.982
S ₅	2.93	-0.402	6.899	0.961	-0.133	3.526	0.963
S ₆	2.02	-0.505	7.344	0.933	-0.359	4.760	0.961
S ₇	13.61	-0.412	7.520	0.975	-0.166	3.826	0.973
S ₈	2.71	-0.408	7.219	0.924	-0.217	4.414	0.937
S ₉	0.27	-0.234	5.565	0.924	-0.087	3.166	0.935
S ₁₀	0.29	-0.246	7.037	0.962	-0.025	3.637	0.972

4.2 速度-温压协变关系的经验公式

前人对岩石弹性波速度与压力的关系开展了大量的研究^[17-19], 我们基于弹性波速度对介质中的温度和压力的依赖性采用公式 (1) 来描述弹性波与温压的关系。根据上述分析可知, 速度与温压之间存在良好的协变关系。压力方面, 纵波拟合系数大约为 0.1~0.3, 横波拟合系数大约为 0.07~0.13; 温度方面, 纵波拟合系数值大约为 0.15~-0.50, 横波拟合系数绝对值大约为 0.02~0.36。拟合函数说明在压力 300 MPa、温度 250 °C 条件下不存在明显的临界温压值, 即 $\partial V(p)/\partial p$ 不为常数 (但其值逐渐减少), 暗示样品变形并非全部由矿物晶格发生弹性压缩所致, 孔隙的压缩或粘土等矿物的塑性变形占有相当的比重。公式 (1) 能够很好地拟合岩样的实验数据 (R^2 介于 0.905~0.996 之间), 在高置信度条件下, 选择 S₁ 的实验数据展示拟合结果 (图 6)。蓝色对应压力条件下的数据, 其中菱形代表实验测试值, 虚线代表采用公式 (1) 进行拟合的趋势线; 红色对应温度条件下的数据, 其中菱形代表实验测试值, 虚线代表采用公式 (1) 进行拟合的趋势线。对于白云结晶岩样品, 孔隙主要为颗粒边界上的

低形态因子裂缝, 随着压力升高这类孔隙即可被关闭。因此在一定压力条件下能够观察到速度的线性特征, 由图 6a 可以发现, 压力大于 120 MPa 后, 纵波速度与压力有明显的线性关系。但从速度变化范围来看, 深层勘探中温度对于弹性波速度的影响已经超过压力的影响。

4.3 压力下速度-孔隙类型的协变关系

众所周知, 胶结、压实、溶解和白云石化等成岩作用控制着碳酸盐岩的岩石结构、孔隙度和孔隙形状等, 而这些参数又决定着岩石的弹性性质。定义或建立这些参数与弹性性质之间可靠的相关性相当困难, 因而难以反映其地震弹性性质在区域上的变化。基于此, 通过前文定义的拟合系数, 结合不同孔隙结构, 分析不同孔隙类型的埋深过程 (压力) 及其对地震岩石物理性质的影响。选取统一环境的露头样品 S₁~S₆, 3 种不同孔隙类型的岩样通过拟合系数与孔隙度交会分析, 发现纵波拟合系数随着孔隙类型逐渐增大, 从低到高依次是裂缝、裂缝+少量溶孔发育、大量溶孔发育, 这样纵波拟合系数对孔隙类型具有了明显的指向性, 体现出随着压力变化, 纵波速度受孔隙类

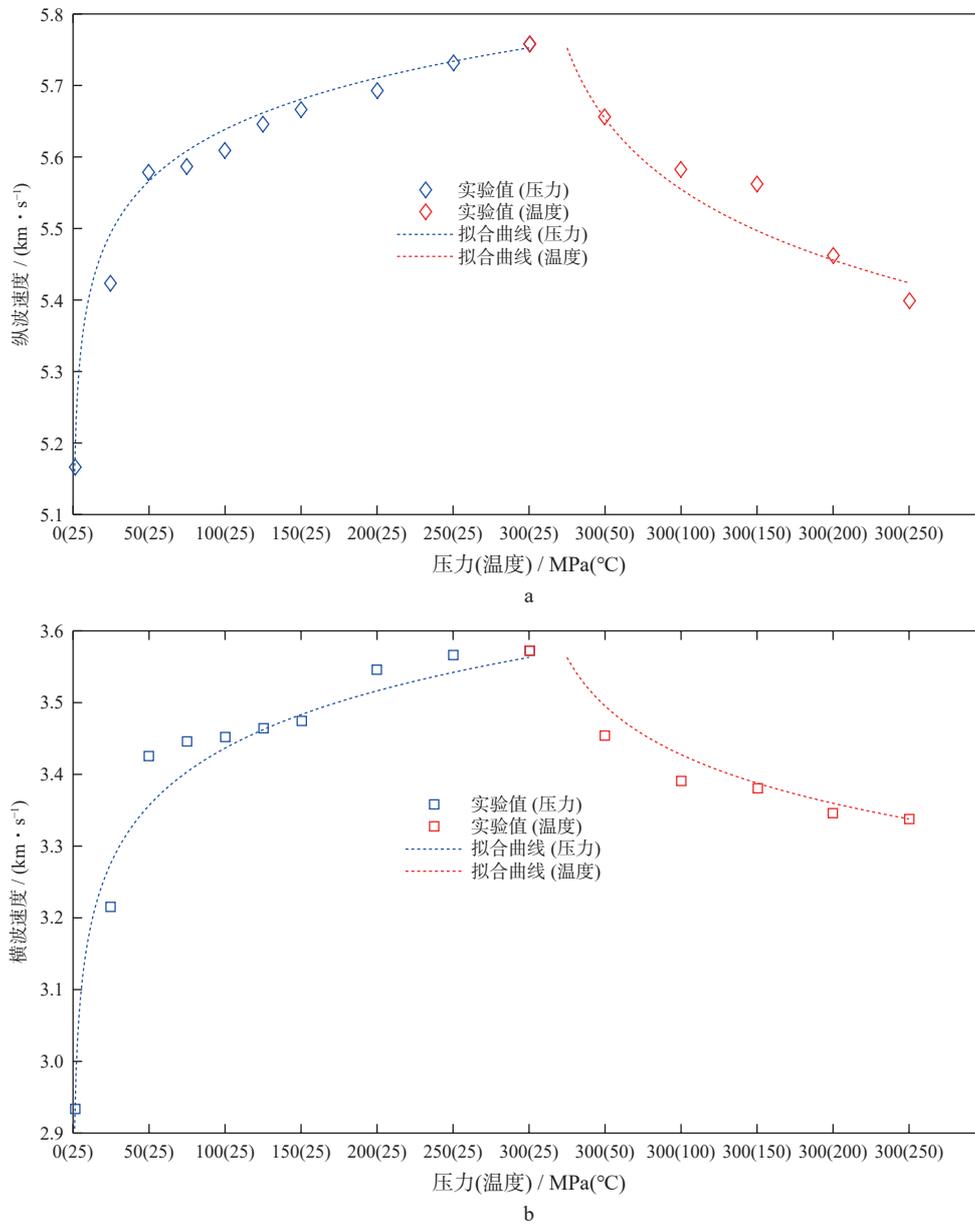


图 6 速度对温压的依赖关系

a 纵波速度; b 横波速度

Fig. 6 Dependence of velocity on temperature and pressure

型影响的物理特征。横波拟合系数基本集中在 0.1 附近, 无法分辨孔隙类型, 说明随压力变化横波速度对孔隙类型不敏感(图 7)。同时, 这种特性与孔隙度没有关系, 由图 7 可看出虽然大部分样品的孔隙度在 4% 以下, 但也存在一个高孔隙度, 然而并没有影响整体的协变关系, 这更加显示出拟合系数对于孔隙类型的指向具有主控地位。为进一步验证结论, 选取所有样品 $S_1 \sim S_{10}$, 包括 4 块深部的岩心, 进行纵横波拟合系数交会, 深部样品同样符合露头样品的速度-孔隙

类型协变关系。纵波拟合系数从 0.10 过渡到 0.30, 裂缝的范围为 0.10 ~ 0.13, 裂缝+少量溶孔的范围为 0.14 ~ 0.18, 大量溶孔的范围为 0.23 ~ 0.30; 横波拟合系数从 0.07 过渡到 0.13, 变化范围小于纵波拟合系数, 且不同类型孔隙的横波拟合系数存在数值重合(图 8)。

4.4 温度下速度-孔隙类型的协变关系

目前, 关于温度条件下的岩石物理响应实验讨论的比较少, 一般人认为温度对于孔隙的闭合影响远远小于压力, 但从前面的实验我们可以看到热应力

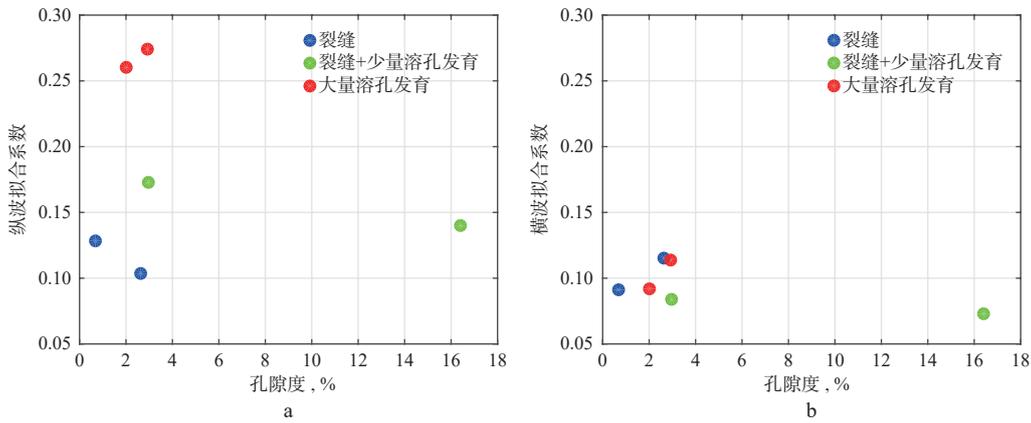


图 7 压力条件下不同类型孔隙的拟合系数
a 纵波拟合系数; b 横波拟合系数

Fig. 7 Fitting coefficients for different types of pores under pressure conditions

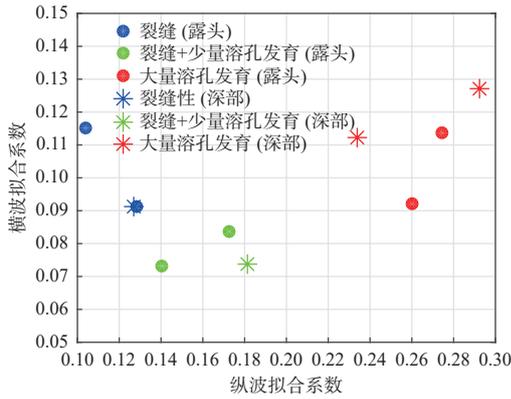


图 8 压力条件下深部与露头岩样的孔隙类型与拟合系数关系
Fig. 8 Relationship between pore types and fitting coefficients for deep and exposed rock samples under pressure conditions

导致的次生裂纹对速度的影响已经不能忽视,尤其针对高压环境,温度对于弹性波的速度影响甚至超过

了压力。依据前面的分析方法,对不同孔隙类型的温度-速度弹性实验的拟合系数进行交会。首先,还是选取统一环境的露头样品 $S_1 \sim S_6$, 3 种不同孔隙类型的岩样通过拟合系数与孔隙度交会,发现拟合系数绝对值随着孔隙类型变化规律与压力下速度-孔隙类型协变关系完全一致,纵波拟合系数具有对孔隙类型明显的指向性;而横波拟合系数对孔隙类型不敏感,但变化范围远远高于压力下的拟合系数(图 9)。同样,选取所有样品 $S_1 \sim S_{10}$, 包括 4 块深部的岩心,进行纵、横波拟合系数交会,发现深部样品同样符合露头样品的速度-孔隙类型协变关系。纵波拟合系数从-0.55 过渡到-0.10, 裂缝的范围为-0.25 ~ -0.10, 裂缝+少量溶孔的范围为-0.30 ~ -0.20, 大量溶孔的范围为-0.55 ~ -0.40; 横波拟合系数从-0.40 过渡到 0, 变化范围与纵波拟合系数大致相同,这与 4.3 节的分析结果有明显

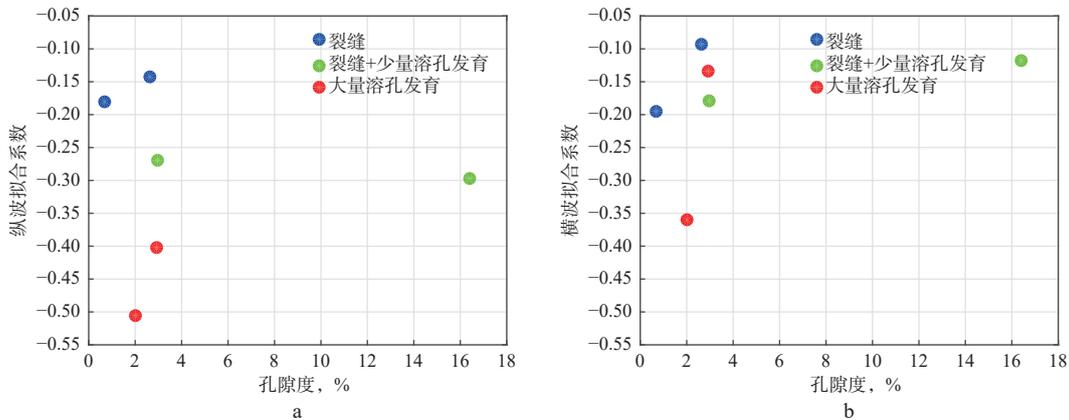


图 9 温度条件下不同类型孔隙的拟合系数
a 纵波拟合系数; b 横波拟合系数

Fig. 9 Fitting coefficients for different types of pores under temperature conditions

的差异,由此可见,温度、压力对于孔隙变化引起的横波协变关系是不同的(图 10)。

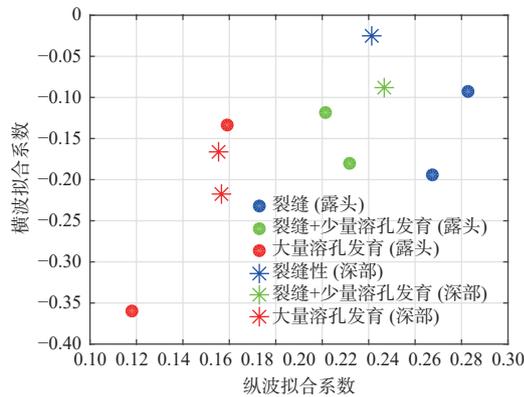


图 10 温度条件下深部与露头岩样的孔隙类型与拟合系数关系
Fig. 10 Relationship between pore types and fitting coefficients for deep and exposed rock samples under temperature conditions

5 结论

随着地震勘探不断向深层推进,高温高压对岩石弹性性质的作用越来越受到关注。目前国内能开展超高温高压岩石物理实验研究的较少,本文利用石墨管和单轴应变压力机作为温压控制的方法,设计了超高温高压弹性波测试实验方法:首先,根据超高温高压岩石物理实验,获得碳酸盐温度($\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$),压力($\sim 300\text{ MPa}$)下的不同条件超声波速度;其次,在测试温压范围内,纵横波速度随着温压的增高分别呈现对数减小和对数增加,速度遵循 $\partial V(T)/\partial T=a/T$, $\partial V(p)/\partial p=a/p$ 的对数规律变化;最后,分析发现温压下速度与孔隙类型的协变关系具有明显的指向性,尤其是纵波。同时也证明了,样品中始终存在相当数量的孔隙,对超深层储层特征认识提供了实验基础。

参考文献 (References)

- [1] 马建斌. 基于 AutoScan- II 的岩石物理实验及储层参数研究 [D]. 武汉: 长江大学, 2013.
MA J B. Study on the rock physics and reservoir parameters based on the AutoScan- II Platform[D]. Wuhan: Yangtze University, 2013.
- [2] 刘浩杰. 地震岩石物理研究综述 [J]. 油气地球物理, 2009, 7(3): 1-8.
LIU H J. Summarization of seismic rock physics research[J]. Petroleum Geophysics, 2009, 7(3): 1-8.
- [3] 王炳章. 地震岩石物理学及其应用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
WANG B Z. Seismic rock physics and its applied research[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [4] 曹宏, 常德双, 胡少华, 等. 中国深层油气勘探地球物理技术与展望 [J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2250-2269.
CAO H, CHANG D S, HU S H, et al. Geophysical techniques and prospects for deep oil-gas exploration in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2250-2269.
- [5] 王大兴, 辛可锋, 李幼铭, 等. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 908-914.
WANG D X, XIN K F, LI Y M, et al. An experimental study of influence of water saturation on velocity and attenuation in sandstone under stratum conditions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 908-914.
- [6] 巴晶, 晏信飞, 陈志勇, 等. 非均质天然气藏的岩石物理模型及含气饱和度反演 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1696-1706.
BA J, YAN X F, CHEN Z Y, et al. Rock physics model and gas saturation inversion for heterogeneous gas reservoirs[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1696-1706.
- [7] 巴晶, CARCIONE J M, 曹宏, 等. 非饱和岩石中的纵波频散与衰减: 双重孔隙介质波传播方程 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 219-231.
BA J, CARCIONE J M, CAO H, et al. Velocity dispersion and attenuation of P waves in partially-saturated rocks: Wave propagation equations in double-porosity medium[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 219-231.
- [8] 巴晶. 双重孔隙介质波传播理论与地震响应实验分析 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(11): 1398-1409.
BA J. Wave propagation theory in double-porosity medium and experimental analysis on seismic response[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2010, 40(11): 1398-1409.
- [9] 郭志敏, 谭卫东. MTS 材料试验系统的升级改造 [C]//西南 MTS 材料与结构测试暨实验力学研讨会. 成都: 中国力学学会, 2010.
GUO Z M, TAN W D. Upgrading and transformation of MTS material testing system[C]//Southwest MTS Materials and Structural Testing and Experimental Mechanics Seminar. Chengdu, 2010.
- [10] 张开洪, 陈一健, 陈福焯, 等. 高温高压三轴向岩心多参数测量系统 [J]. 石油仪器, 1997, 11(2): 45-48.
ZHANG K H, CHEN Y J, CHEN F X, et al. A core measurement system to test petrophysical parameters simulating in-situ conditions[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 1997, 11(2): 45-48.
- [11] 王赞, 陈一健, 石建刚, 等. 高温高压岩电参数测量装置研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(4): 6-7.
WANG Z, CHEN Y J, SHI J G, et al. Research on electrical parameters of rocks measurement instrument used in high temperature and high pressure[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, 35(4): 6-7.
- [12] YANG J, FU L Y, ZHANG Y H, et al. Temperature- and pressure-dependent pore microstructures using static and dynamic moduli and their correlation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(7): 4073-4092.
- [13] 王志伟, 符力耘, 杨健, 等. AutoLab1500-HPHT 高温高压岩石物理设备功能简介和操作注意事项 [C]//第五届油气地球物理学学术年会论文集. 青岛: 中国地球物理学会油气地球物理专业委员会, 2023: 723-726.
WANG Z W, FU L Y, YANG J, et al. Introduction and operating precautions of rock physics equipment for AutoLab1500-HPHT[C]//5th Proceedings of the Academic Annual Conference on Oil and Gas Geo-

- physics. Qingdao: Committee on Petroleum Geophysics, Chinese Geophysical Society, 2023: 723-726.
- [14] 任战利, 祁凯, 杨桂林, 等. 沉积盆地深层热演化历史与油气关系研究现状及存在问题 [J]. *非常规油气*, 2020, 7(3): 1-7.
REN Z L, QI K, YANG G L, et al. Research status and existing problems of relationship between deep thermal evolution history and oil and gas in sedimentary basins [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2020, 7(3): 1-7.
- [15] WANG Q, JI S C, SALISBURY M H, et al. Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections [J]. *Tectonophysics*, 2005, 398(1/2): 67-99.
- [16] CASTAGNA J P, BACKUS M. Offset-dependent reflectivity-theory and practice of AVO analysis [M]. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 1993: 135-171.
- [17] BIRCH F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 1 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65(4): 1083-1102.
- [18] YANG X S, MA J, JIN Z M, et al. Partial melting and its implications for understanding the seismic velocity structure within the southern Tibetan crust [J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2003, 77(1): 64-71.
- [19] YANG X S, YANG Y, CHEN J Y. Pressure dependence of density, porosity, compressional wave velocity of fault rocks from the ruptures of the 2008 Wenchuan earthquake, China [J]. *Tectonophysics*, 2014, 619-620: 133-142.

(编辑: 朱文杰)