



# 矿业科学学报

## JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

高温作用下干热岩岩石物理实验及岩石物理建模研究

高万里, 赵惊涛, 王化伟

Rock physics experiment and rock physical modeling of hot dry rock under high temperature

引用本文:

高万里, 赵惊涛, 王化伟. 高温作用下干热岩岩石物理实验及岩石物理建模研究[J]. [矿业科学学报](#), 2023, 8(6): 758–767.

Gao Wanli, Zhao Jingtao, Wang Huawei. Rock physics experiment and rock physical modeling of hot dry rock under high temperature[J]. [Journal of Mining Science and Technology](#), 2023, 8(6): 758–767.

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. [雨汪井田超压含煤地层孔隙特征及孔隙体积模量演变规律](#)

引用本文: 车玉燕, 邹冠贵, 殷裁云, 等. 雨汪井田超压含煤地层孔隙特征及孔隙体积模量演变规律[J]. [矿业科学学报](#), 2022, 7(3): 275–285.

#### 2. [基于地质单元体的微动信号频散曲线反演](#)

引用本文: 赵红鹏, 何登科, 洪雨. 基于地质单元体的微动信号频散曲线反演[J]. [矿业科学学报](#), 2022, 7(6): 662–669.

#### 3. [滑动粗糙表面接触导热的影响因素研究](#)

引用本文: 刘雨薇, 李和言, 叶福浩, 等. 滑动粗糙表面接触导热的影响因素研究[J]. [矿业科学学报](#), 2019, 4(3): 246–253.

#### 4. [构造煤地球物理响应特征及成因分析——以晋城矿区赵庄煤矿为例](#)

引用本文: 邹冠贵, 李来春. 构造煤地球物理响应特征及成因分析——以晋城矿区赵庄煤矿为例[J]. [矿业科学学报](#), 2018, 3(5): 417–424.

#### 5. [煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究](#)

引用本文: 左进京, 杨仁树, 肖成龙, 等. 煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究[J]. [矿业科学学报](#), 2018, 3(4): 335–341.

高万里,赵惊涛,王化伟. 高温作用下干热岩岩石物理实验及岩石物理建模研究[J]. 矿业科学学报,2023,8(6):758-767. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2023.06.003

Gao Wanli,Zhao Jingtao,Wang Huawei. Rock physics experiment and rock physics modeling of hot dry rock under high temperature[J]. Journal of Mining Science and Technology,2023,8(6):758-767. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2023.06.003

## 高温作用下干热岩岩石物理实验 及岩石物理建模研究

高万里,赵惊涛,王化伟

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083

**摘要:**为探究干热岩储层物性参数随温度变化的规律,本文对青海共和盆地29块干热岩样品进行高温岩石物理实验,分析了样品速度、磁场强度、电阻率等物性参数随温度变化的规律。研究表明:①岩石样品随着温度升高,密度逐渐减小,但衰减幅度不足1%;②样品纵横波速度受温度变化的影响较大,在120~180℃之间大幅衰减,纵波速度下降约1500 m/s,横波速度下降约800 m/s;③在120℃时,磁场强度达到峰值,数值为室温下的7倍;④电阻率随温度升高呈现波动性变化,数值在10~25  $\Omega \cdot m$  范围内变化。基于实验结果,结合经典的Gassmann方程和流体替换模型,定量分析了孔隙度和温度对纵波速度的影响:当孔隙度为0.025时,样品纵波速度随着温度的升高下降约600 m/s,当孔隙度为0.1时,样品纵波速度随着温度的升高下降约1000 m/s。

**关键词:**岩石物理;干热岩;青海共和盆地;高温;岩石物理建模

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2023)06-0758-10

## Rock physics experiment and rock physical modeling of hot dry rock under high temperature

Gao Wanli,Zhao Jingtao,Wang Huawei

College of Geoscience and Surveying Engineering,China University of Mining and Technology-Beijing,Beijing 100083,China

**Abstract:** Currently, the investigation and monitoring of geothermal energy face significant challenges, and a lack of understanding regarding the variations in physical parameters of hot dry rock reservoirs with temperature is a crucial factor. In this study, 29 hot dry rock samples from the Gonghe Basin in Qinghai Province were subjected to high-temperature petrophysical experiments to analyze the changing patterns of physical parameters with temperature. Results show that: ①The density of rock samples gradually decreases with temperature, albeit with an attenuation range of less than 1%. ②The temperature change exerts a substantial influence on the P-wave velocity and S-wave velocity of the samples, resulting in significant attenuation between 120 °C and 180 °C, with respective reductions of approximately 1500 m/s and 800 m/s. ③A peak magnetic field intensity, seven times greater than at room temperature, is reached at 120 °C. ④The resistivity fluctuates with increasing temperature, whose values ranges from

收稿日期:2023-07-02 修回日期:2023-09-08

基金项目:国家重点研发计划(2020YFE0201300)

作者简介:高万里(1997—),男,河北石家庄人,博士研究生,主要从事地热温度场模拟、岩石物理等方面的研究工作。E-mail: gaowanli6666@163.com

通信作者:赵惊涛(1982—),男,河北邯郸人,教授,博士生导师,主要从事勘探地震、储层预测及地热探测等方面的教学与科研工作。E-mail: diffzjt@163.com

10 to 25  $\Omega \cdot \text{m}$ . Based on these experimental results and with the combination of the classical Gassmann equation and fluid substitution models, this study made a quantitative analysis on the impacts of porosity and temperature variations on longitudinal wave velocity. The outcomes indicate that a porosity of 0.025 resulted in a decrease of approximately 600 m/s in the longitudinal wave velocity with increasing temperature, whereas a porosity of 0.1 caused a decrease of approximately 1 000 m/s under the same conditions.

**Key words:** petrophysics; hot dry rocks; Qinghai Gonghe Basin; high temperature; petrophysical modeling

地热能作为一种储存在深部地层的能源形式,具有稳定性高、利用效率高、安全性好、综合利用、清洁环保等优势。随着20世纪70年代美国<sup>[1]</sup>率先开展地热研究以来,国内外科技人员<sup>[2-3]</sup>对地热勘探进行了大量的研究,但由于受干热岩储层的埋深和高温高压的影响,导致地球物理方法在勘探和监测时存在大量困难,尤其是深部高温对岩石物理性质的影响,制约了干热岩能源的开采和利用。

为了研究岩石物性参数与温度变化之间的关系, Ledésert 等<sup>[4]</sup>研究了菱铁矿在高温作用下的导电特性,发现温度越高,岩石导电率越高。Bauer 等<sup>[5]</sup>研究了高温对花岗岩物理性质的影响,分析了不同矿物组分的花岗岩在受热后物理性质的变化。Johnston 等<sup>[6]</sup>对三种岩石研究了不同加热速率下温度对品质因子  $Q$  值的影响。赵志丹等<sup>[7]</sup>在高温高压的环境下测试了花岗岩纵波速度,发现随着温度升高纵波速度减小。为了更好地测试岩石在高温状态下的力学特性,马啸等<sup>[8]</sup>研制了能够进行实时高温真三轴试验的力学试验系统,并对花岗岩进行了实时高温真三轴试验。此外,黄真萍等<sup>[9]</sup>、孟陆波等<sup>[10]</sup>、孙强等<sup>[11]</sup>、闫治国等<sup>[12]</sup>、何国梁等<sup>[13]</sup>分别对不同类型岩石进行了常规单轴/三轴力学压缩试验,研究了抗压强度、弹性模量、泊松比、峰值应变等岩石力学特性随温度变化的规律。苏承东等<sup>[14]</sup>研究了 400 ~ 1 000  $^{\circ}\text{C}$  高温对细砂岩力学性质的影响,发现高温作用下细砂样品内部矿物成分发生了变化,加热到 600  $^{\circ}\text{C}$  后细砂样品中的石英含量增加。Liu 等<sup>[15]</sup>对莺歌海盆地内岩石样品进行了高温高压实验,研究了样品纵横波速度的变化。毛竹等<sup>[16]</sup>总结了岩石样品物理弹性和波速测量的关键科学问题和挑战。薛卉等<sup>[17]</sup>研究了二氧化碳基增强型地热系统核心及邻近区域中超临界二氧化碳 ( $\text{ScCO}_2$ ) 作用对岩石力学性能的影响。畅宇飞等<sup>[18]</sup>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  $^{\circ}\text{C}$ ) 高压静水压 (0 ~

300 MPa) 的纵横波速度测量。Peng 等<sup>[19]</sup>通过岩石物理实验测试了干热岩样品纵横波速度,利用岩石物理建模建立了孔隙度与横波速度的关系。孙川翔等<sup>[20]</sup>以四川盆地威荣和永川地区下志留统龙马溪组深层页岩为研究对象,开展了 120  $^{\circ}\text{C}$ 、70 MPa 的岩石物理实验。

在地热勘探中,研究储层的流体状态和温度因素对地震波速度的影响是任务之一。Gassmann 方程通常用来研究地震波速与流体状态的关系。Gassmann<sup>[21]</sup>建立了弹性波在多孔介质中传播的模型(Gassmann 方程)。Biot<sup>[22-25]</sup>在 1956—1962 年间通过一系列实验研究,发展了流体饱和和孔隙介质的弹性波动力学理论(Biot 理论)。而后, Dvorkin 等<sup>[26]</sup>在 Biot 理论的模型中引入了喷射流动机制,提出了 Bisq 模型。Diallo 等<sup>[27]</sup>在 Bisq 模型基础上进行了简化和改进,使其更符合实际情况。Yan 等<sup>[28]</sup>研究了孔隙的几何形状对 Gassmann 流体替换方程的影响。Si 等<sup>[29]</sup>研究了在常压和高围压情况下,含水饱和度对气水饱和砂岩纵横波速度的影响。刘欣欣等<sup>[30]</sup>研究了孔隙充填和颗粒支撑两种分布模式,重点关注了水合物地层的微观孔隙结构和水合物的剪切性质。Zhao 等<sup>[31]</sup>通过评估 Gassmann 理论与各种基于夹杂的有效介质理论的一致性,研究了椭圆孔隙之间的弹性作用对多孔弹性的影响。孟大江等<sup>[32]</sup>利用 Gassmann 方程研究了天然气水合物横波预测的方法,结果与实测资料吻合度较高,具有较好的建模效果。

综上所述,研究人员针对高温岩石物理实验和岩石物理建模进行了大量工作。但是针对深部高温干热岩的研究成果较少,对于干热岩样品物性参数随温度变化的规律认识不足,地热的勘探监测难度较大。

本文选取了青海共和盆地干热岩样品为研究对象,开展了高温岩石物理实验,获取了样品的密度、纵横波速度、磁场强度和电阻率等参数随温度变化的趋势,分析了高温作用对干热岩样品物理性质及岩石机理的影响。在此基础上,基于

Gassmann 方程进行流体替换,研究了孔隙度和温度对纵横波速度的影响。

## 1 实验材料和实验方法

### 1.1 实验材料

实验采用的干热岩样品来源于青海共和盆地。岩石样品严格按照《工程岩体试验方法:GBT 50266—2013》、《岩石试验方法:GB/T 40961—2021》等国家标准的规定,根据实验要求将样品制

成7块直径为 $(38\pm 1)$  mm、高为 $(50\pm 1)$  mm的圆柱,岩性为二长花岗岩和闪长岩;22块直径为 $(38\pm 1)$  mm、高为 $(60\pm 1)$  mm的圆柱。其中,砂岩属于新近系的临夏组和咸水河组,砂砾岩属于新近系咸水河组。其余样本为中晚三叠世花岗岩,采自沟后水库、龙羊峡大坝和当家寺附近。花岗岩为块状构造,中细粒结晶结构和细粒结晶结构,含有大量的角闪石、黑云母等矿物。表1为实验编号与试样编号的对照表,图1为青海共和盆地的岩石样品。

表1 实验编号与试样编号对照表

Table 1 Comparison table between test number and sample number

实验编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
试样编号	砂岩1	砂岩2	20-19,1-2	20-19,1-,1	地表2	沟后1	沟后1(2)	1井	2井	2井2
实验编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
试样编号	3井2	4井	4井2	5井1	5井2	沟后5	沟后5(2)	6井1	6井1(2)	6井2
实验编号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
试样编号	沟后6	沟后6(2)	7井1	7井1(2)	7井2	7井2(2)	7井3	7井3(2)	3井1	



图1 干热岩样品

Fig. 1 Hot dry rock samples

### 1.2 实验方法和实验流程

加热设备选用KSL-1100X-L型智能高温炉,其最高温度为 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ ,精确度为 $2\ ^\circ\text{C}$ 。首先,对29块样品进行分组,每组4块样品进行了标号、拍照、物理参数测试,然后对样品依次进行常温( $20\ ^\circ\text{C}$ )、 $40\ ^\circ\text{C}$ 、 $60\ ^\circ\text{C}$ 、 $80\ ^\circ\text{C}$ 、 $100\ ^\circ\text{C}$ 、 $120\ ^\circ\text{C}$ 、 $140\ ^\circ\text{C}$ 、 $160\ ^\circ\text{C}$ 、 $180\ ^\circ\text{C}$ 、 $200\ ^\circ\text{C}$ 、 $220\ ^\circ\text{C}$ 高温处理,加热过程按照 $5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 进行。待样品加热到目标温度后,进行

密度、纵横波速度、磁场强度、电阻率测试。

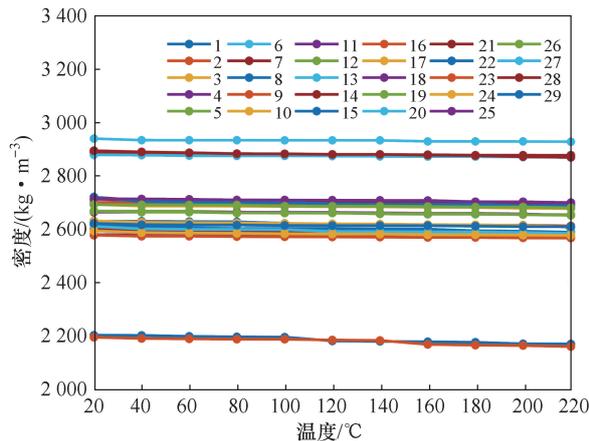
(1) 密度测试:采用精度为 $0.1\ \text{g}$ 的电子天平对样品各个温度梯度时的质量进行测量。

(2) 纵横波速测试:采用纵横波速度仪,将样品加热到指定温度时,水平放置样品,在样品的两端涂抹耦合剂,使纵横波波速仪与样品紧密接触;测试前调整仪器参数,测试时等波速值稳定后保存波形、波幅和传播时间等参数,根据试件长度和波

通过试样的时间即可得到波速值。

(3) 磁场强度测试:将试样加热到目标温度后,用质子螺旋磁力仪进行测试。

(4) 电阻率测试:采用四极法测量电阻率。在样品的两端垫两个铜片作为供电电极,同时在样品与铜片之间涂抹导电膏使其紧密接触,在供电电极和压力机的加压板之间放置绝缘板,测量两电极之间的距离,根据样品两端的电压、样品的横截面积、通过样品的电流和测量电极之间的距离便可得到样品的电阻率。试样连接好电极,并放置在加温炉中进行实时高温测试,用耐高温导线引出来进行实时高温测试。



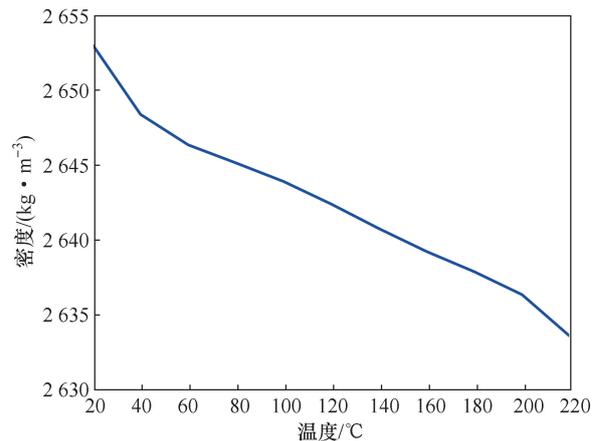
(a) 密度随温度变化曲线

## 2 结果与分析

### 2.1 温度对岩石密度的影响

岩石密度是岩石物理属性的重要指标之一。研究温度与岩石密度的关系对于理解岩石物理学至关重要。在干热岩研究中,岩石密度的测定可用于确定地层的密度、反演矿物含量等。

图2为干热岩样品密度与温度关系。由图2(a)可知,20~220°C温度对样品密度的影响较小,样品的密度衰减量较小。由图2(b)可知,20~100°C样品的密度下降幅度最大,下降数值约为15 kg/m<sup>3</sup>;100~220°C密度减小速率变缓,减小约10 kg/m<sup>3</sup>。



(b) 密度与温度多项式拟合

图2 干热岩样品密度与温度关系

Fig. 2 Density versus temperature for hot dry rock samples

### 2.2 温度对岩石纵横波波速的影响

在地热储层圈定过程中,地震勘探技术发挥着重要作用。岩石声波速度主要受到岩石本身的结构构造(密度、孔隙度、尺寸和内部裂隙发育)以及含水量、温度、压力和测试频率等外部因素的影响。

图3为干热岩样品横波速度与温度关系。由图3(a)可知,样品横波速度随温度升高而降低。由图3(b)可知,0~120°C样品横波速度减小的速率较慢;而120~160°C样品横波速度急剧减小,降低约1000 m/s;180~220°C样品横波速度呈现波动变化的趋势。

图4为干热岩样品纵波速度随温度变化的关系。可以观察到,样品纵波速度与横波速度的变化趋势相同,在140°C时发生大幅度衰减,减小了1500 m/s左右。

### 2.3 温度对岩石磁性的影响

岩石磁场是构成岩石圈磁场的基础。在干热岩

研究中,岩石圈磁场对于揭示干热岩的大地构造特征、资源潜力以及构造运动等问题具有重要的意义。

图5为干热岩样品磁场强度与温度关系。由图5(a)可知,随着温度的升高,样品的磁场强度先增大后减小。图5(b)显示,在40~120°C磁场强度随温度的升高逐渐增大,在120°C时磁场强度达到最大值;而当温度在120~200°C磁场强度开始逐渐减小,在200°C后磁场强度呈现波动变化。

### 2.4 温度对岩石电阻率的影响

岩石导电可以分为含水岩石和非含水岩石的导电。含水岩石中的导电主要是通过水分子中的离子进行的。非含水岩石的导电主要是通过岩石中的导电矿物质实现的。随着温度变化,润湿性、岩石粒径、黏土、地层水的矿化程度、微孔隙和孔隙尺寸分布等也会发生变化,从而导致电阻率的改变。

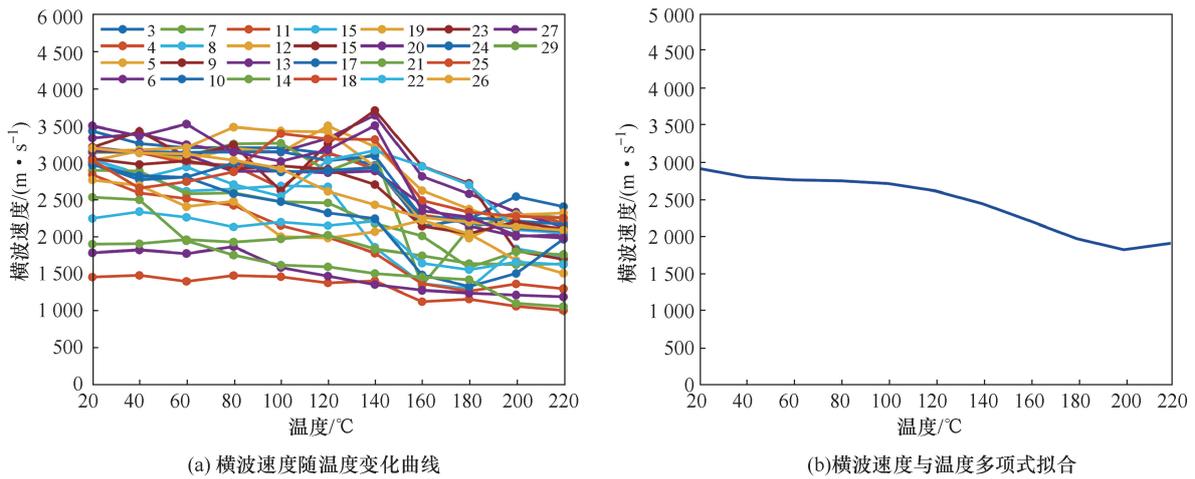


图3 干热岩样品横波速度与温度关系

Fig. 3 Transverse wave velocity versus temperature for hot dry rock samples

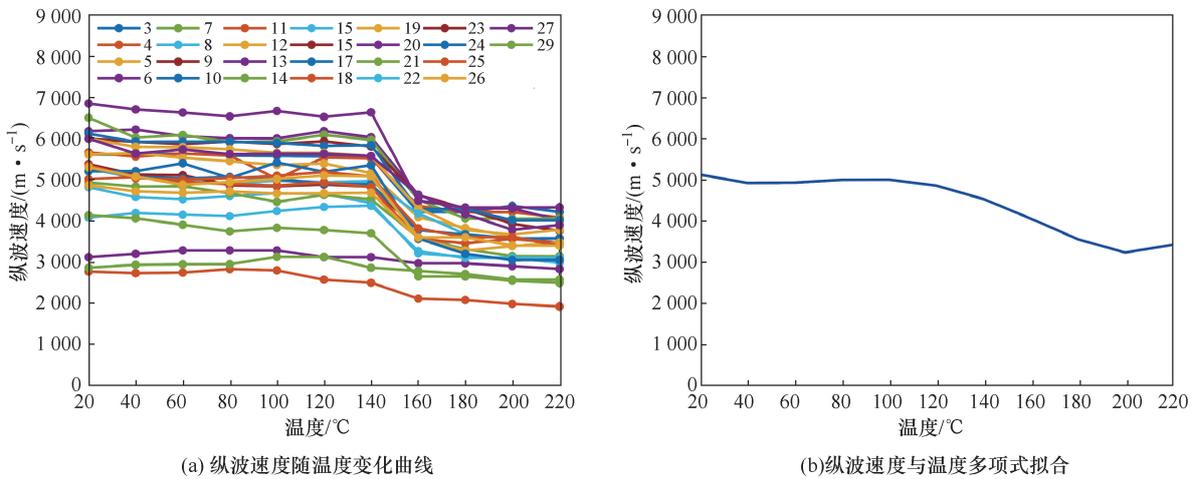


图4 干热岩样品纵波速度与温度关系

Fig. 4 Longitudinal velocity versus temperature for hot dry rock samples

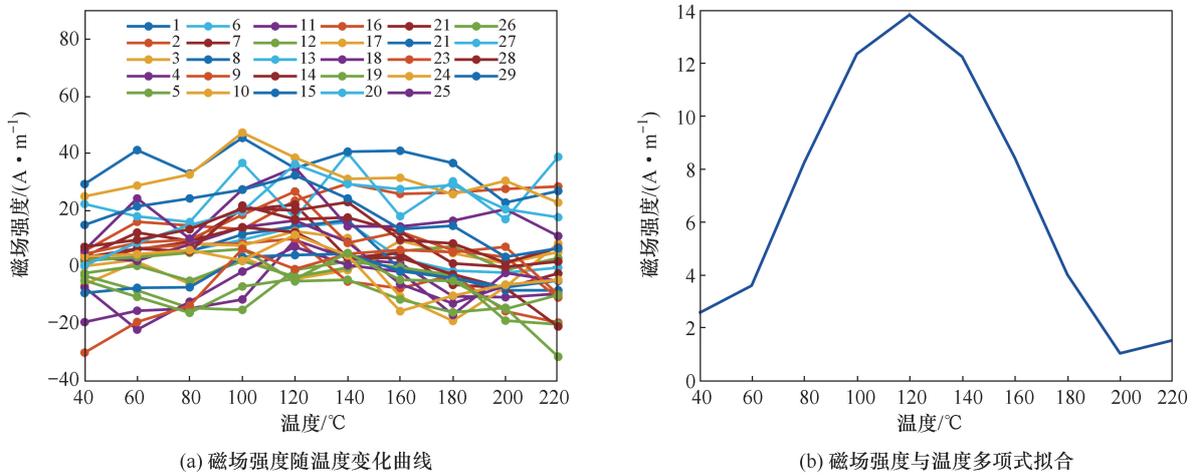


图5 干热岩样品磁场强度与温度关系

Fig. 5 Magnetic field strength versus temperature for hot dry rock samples

图6为干热岩样品电阻率与温度关系。由图6(a)可知,样品电阻率随温度升高先减小后增大。图6(b)

显示,样品电阻率的趋势与磁场强度相反。样品电阻率在80 °C时达到最低值,高于80 °C后电阻率逐渐增大。

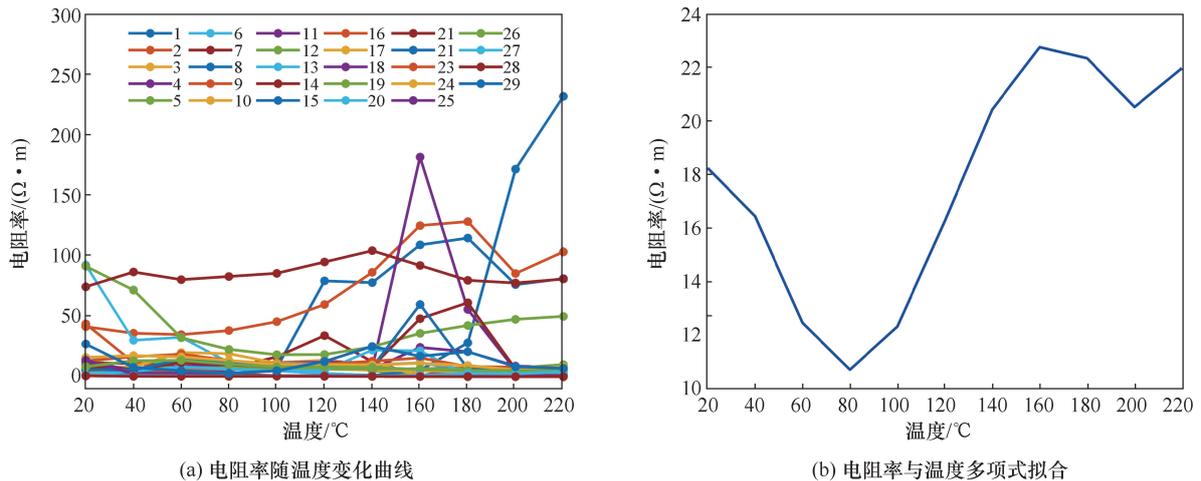


图6 干热岩样品电阻率与温度关系

Fig. 6 Resistivity versus temperature for hot dry rock samples

### 3 干热岩岩石机理研究

高温干热岩岩石机理涉及热学性质、物理性质、化学反应和热液运移等,这些因素相互作用共同影响高温干热岩岩石体的力学行为。

干热岩样品的密度随着温度升高而减小,这主要受物理因素和化学因素的影响。物理因素是指随着温度逐渐升高,岩石内部水分开始蒸发,导致岩石质量减小。化学因素是指岩石内部矿物成分发生变化,从而影响岩石密度。在0~220  $^{\circ}C$ ,岩石样品晶体不会转变为非晶体,岩石的化学变化需要通过微观观察。

干热岩样品的纵横波速度随着温度升高而减小。在温度升高初期(0~120  $^{\circ}C$ ),岩石样品内部矿物颗粒膨胀,使得岩石内部孔隙增大,同时一部分水分也蒸发,导致纵横波速度缓慢减小。随着温度持续升高(120~180  $^{\circ}C$ ),岩石样品内部膨胀,应力继续增大,使得原有裂缝扩大并产生新裂缝。同时,小孔隙逐渐扩张,形成中等或大型孔隙,最终发展为裂缝。这些变化使得岩石结构发生改变,导致纵横波速度大幅度降低。当温度超过180  $^{\circ}C$ 时,岩石热膨胀增加相对缓慢,因此纵横波速度降低趋势相对减缓。

干热岩样品的磁场强度随温度升高先增大,在120  $^{\circ}C$ 达到最大值。在120~220  $^{\circ}C$ ,高温使得岩石内部磁极分子排列变得混乱,从而磁性降低。同时,岩石内部的裂缝扩大和新裂缝的产生,使岩石磁阻增加,磁导率降低,从而导致样品周围磁感应强度减小。

干热岩样品的电阻率随着温度变化的原因主

要分为两个方面:一是,在温度升高初期,岩石内部晶体由于热胀现象对样品内部的孔隙进行填充,导致导电性增大,电阻率减小。二是,随着温度持续升高,岩石内部热胀现象更加明显,裂缝开始迅速生长并与已有裂缝相连,导致导电性减弱和电阻率升高。同时,岩石内部的水分也会被蒸发殆尽,进一步导致岩石的电阻率增大。

### 4 Gassmann 流体替换

干热岩储层三维地震勘探的主要难点在于确定干热岩储层岩石物性随温度变化的规律。本文利用 Gassmann 方程计算青海共和盆地 26 个岩石样品流体状态下的纵波速度。通过设置不同的孔隙度和改变温度梯度的方法,探究孔隙度和温度对岩石样品纵波速度的影响。

#### 4.1 方法原理

流体替换可以研究储层在不同条件下纵横波速度和密度的变化,而 Gassmann 方程是实现流体替换的基础。在各向同性介质中,地震速度取决于岩石的弹性模量和密度,因此流体替换的计算主要涉及岩石的弹性模量(包括体积模量和剪切模量)和密度的变化。而 Gassmann 方程的实现需要对模型进行简化,并建立以下基本假设条件:①岩石(基质和骨架)宏观上是均质的;②所有孔隙互相连通;③所有孔隙都充满流体(气体、液体或气液混合物);④所研究的岩石-流体系统是封闭的(不排液);⑤孔隙流体对固体骨架没有软化或硬化的作用;⑥实验中流体均为水,不考虑温度变化对水的影响。

利用测量的岩石骨架速度,计算骨架的体积模量和剪切模量:

$$\begin{cases} K_{dry} = \rho_{dry} \left( v_p^2 - \frac{4}{3} v_s^2 \right) \\ \mu_{dry} = \rho_{dry} v_s^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $K_{dry}$  为干岩石体积模量;  $\rho_{dry}$  为干岩石骨架密度;  $\mu_{dry}$  为干岩石剪切模量;  $v_p$  为纵波速度;  $v_s$  为横波速度。

将  $K_{dry}$  代入 Gassmann 方程,求解饱和岩石的有效体积模量  $K_{sat}$  为

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{\left( 1 - \frac{K_{dry}}{K_o} \right)^2}{\frac{K_{dry}}{K_o^2} + \frac{\phi}{K_{fl}} + \frac{1 - \phi}{K_o}} \quad (2)$$

式中,  $K_o$  为基质矿物颗粒的体积模量;  $K_{fl}$  为孔隙流体体积模量;  $\phi$  为孔隙度。

等效密度  $\rho_{sat}$  为

$$\rho_{sat} = \rho_{dry} + \phi \rho_{fl} = (1 - \phi) \rho_o + \phi \rho_{fl} \quad (3)$$

式中,  $\rho_o$  为基质密度;  $\rho_{fl}$  为孔隙流体密度。

饱和岩石有效剪切模量与干岩石体积模量保持一致,即

$$\mu_{sat} = \mu_{dry} \quad (4)$$

式中,  $\mu_{sat}$  为饱和岩石有效剪切模量。

利用式(2)至式(4)中的  $K_{sat}$ 、 $\rho_{sat}$ 、 $\mu_{sat}$ ,求取等效速度:

$$\begin{cases} v_{p等效} = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3} \mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \\ v_{s等效} = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \end{cases} \quad (5)$$

#### 4.2 温度对弹性模量的影响

图7为干热岩样品体积模量随温度变化曲线。由图7可知,20~120℃干热岩样品的体积模量在10~80 GPa之间;140~160℃干热岩样品的体积模量总体减小约20 GPa;160~220℃干热岩样品的体积模量变化较为平稳,保持在10~40 GPa之间。

图8为干热岩样品剪切模量随温度变化曲线。由图8可知,干热岩样品的剪切模量与体积模量的变化趋势相似。20~140℃干热岩样品的剪切模量在5~40 GPa内;140~160℃干热岩样品的剪切模量下降速度减慢,减小约25 GPa;160~180℃干热岩样品的剪切模量呈现小幅度减小,减小约5 GPa。

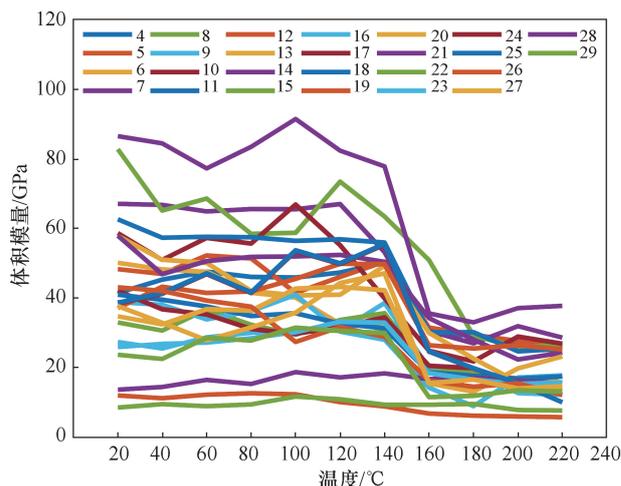


图7 干热岩样品体积模量随温度变化曲线

Fig. 7 Variation curve of bulk modulus of hot dry rock samples with temperature

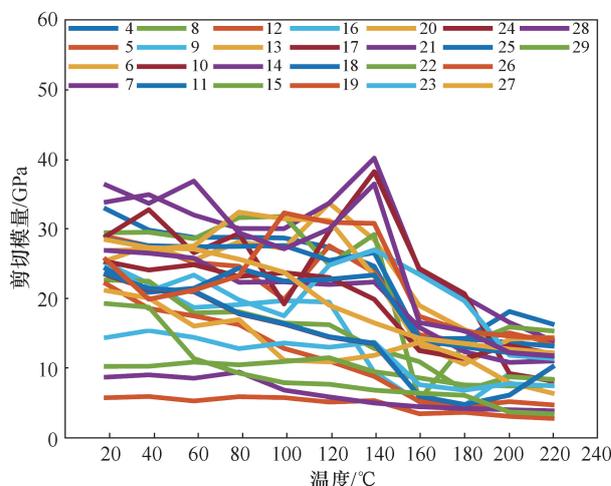


图8 干热岩样品剪切模量随温度变化曲线

Fig. 8 Variation curve of shear modulus with temperature for hot dry rock samples

#### 4.3 温度和流体替换对纵横波速度的影响

根据 Gassmann 方程,利用式(3)至式(5)对干热岩样品流体替换后的纵横波速度进行了预测。为了更加符合实际地质情况,设置岩石样品孔隙度  $\phi$  分别为 0.025、0.05、0.075、0.1。图9和图10为不同孔隙度情况下流体替换后的纵横波速度随温度变化的曲线。

流体状态下,干热岩样品的横波速度变化较小,一般在10~50 m/s之间。而不同孔隙度的干热岩样品,纵波速度的变化趋势不同:当孔隙度为0.025时,纵波速度下降约600 m/s;当孔隙度为0.1时,纵波速度下降约1 000 m/s。

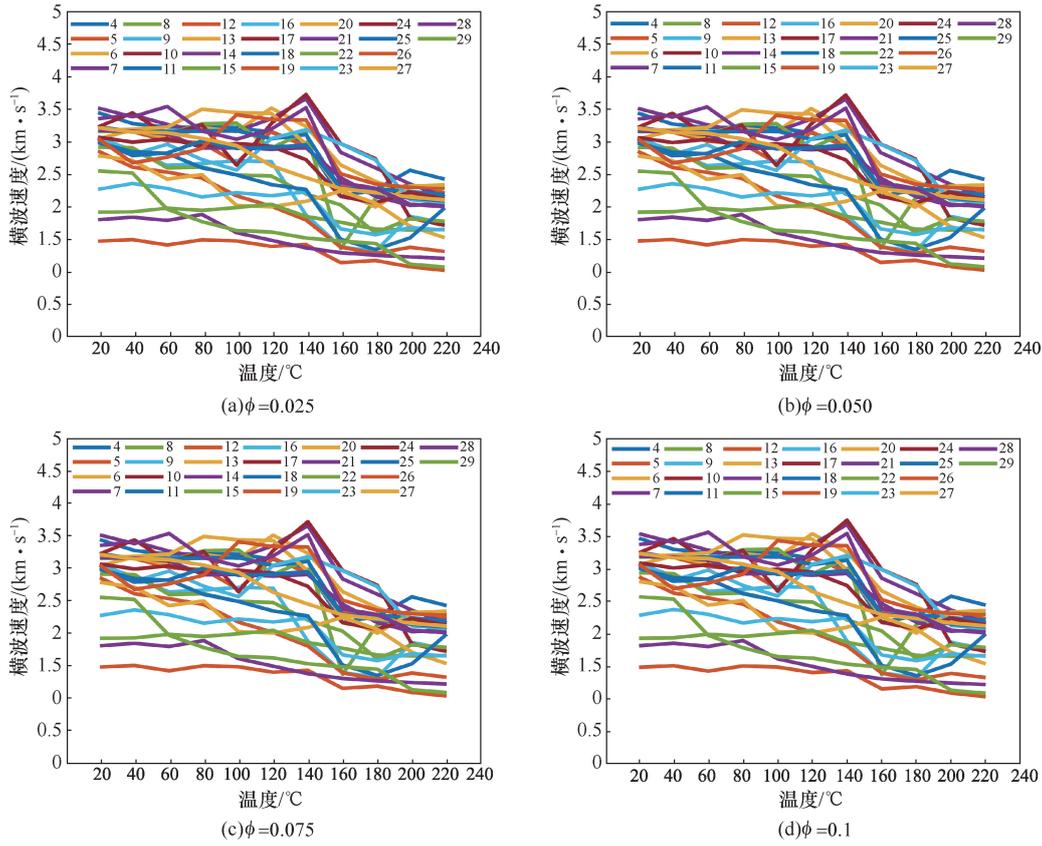


图9 不同孔隙度岩石横波速度随温度变化曲线

Fig. 9 Fluid replacement rock transverse wave velocity volume variation curve with temperature

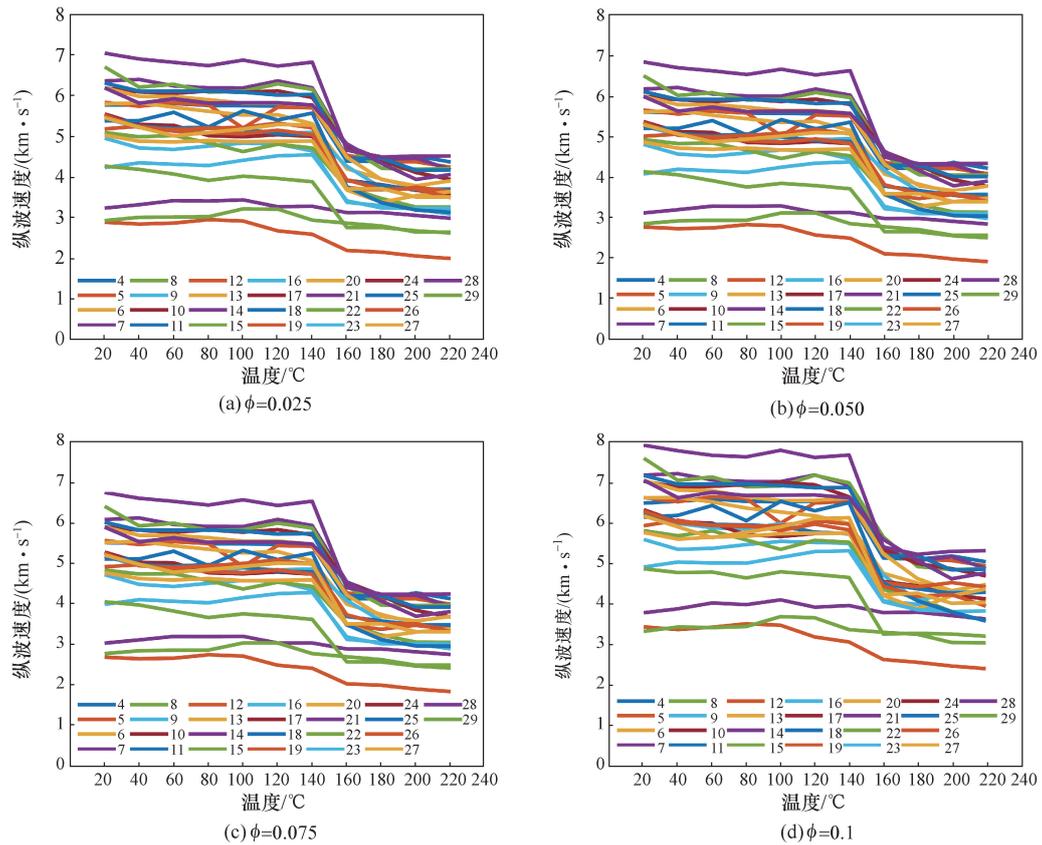


图10 不同孔隙度岩石纵波速度随温度变化曲线

Fig. 10 Variation of rock longitudinal velocity with temperature after fluid replacement

## 5 结 论

通过对青海共和盆地干热岩岩石样品的高温岩石物理实验和 Gassman 流体替换得到如下结论:

(1) 纵横波速度在升温初期减小幅度较小,但随温度逐渐升高减小速率增大,140 °C 时样品纵横波速度下降幅度最大。样品磁场强度随温度的升高先增大后减小,120 °C 时磁场强度达到最大值。样品电阻率随温度的升高出现 2 次拐点,分别在 80 °C 和 160 °C。

(2) 样品体积模量随着温度升高先增大后减小,最后呈现波动的变化;剪切模量与体积模量的变化趋势相似。

(3) 流体状态下,样品的横波速度变化较小,纵波速度下降 800 m/s,变化趋势与干岩石相似。孔隙度为 0.025 时,纵波速度下降 600 m/s;孔隙度为 0.1 时,纵波速度下降 1 000 m/s。

## 参考文献

- [1] Kelkar S, WoldeGabriel G, Rehfeldt K. Lessons learned from the pioneering hot dry rock project at Fenton Hill, USA[J]. *Geothermics*, 2016, 63:5-14.
- [2] 蔺文静,王凤元,甘浩男,等. 福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 28-34.  
Lin Wenjing, Wang Fengyuan, Gan Haonan, et al. Site selection and development prospect of a hot dry rock resource project in Zhangzhou geothermal field, Fujian province[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19):28-34.
- [3] 徐立. 江苏地区地热资源综合利用研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [4] Ledésert B, Joffre J, Amblès A, et al. Organic matter in the Soultz HDR granitic thermal exchanger (France): natural tracer of fluid circulations between the basement and its sedimentary cover[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1996, 70(3/4):235-253.
- [5] Bauer S, Johnson B. Effects of slow uniform heating on the physical properties of the westerly and charcoal granites [C]. 20th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Austin, Texas, 1979.
- [6] Johnston D H, Toksöz M N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1980, 85 ( B2 ): 937-942.
- [7] 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.  
Zhao Zhidan, Gao Shan, Luo Tingchuan, et al. Origin of the crustal low velocity layer of Qinling and North China evidence from laboratory measurement of p-wave velocity in rocks at high pt conditions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 39(5):642-652.
- [8] 马啸,马东东,胡大伟,等. 实时高温真三轴试验系统的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(8):1605-1614.  
Ma Xiao, Ma Dongdong, Hu Dawei, et al. A real-time high-temperature true triaxial test system and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(8):1605-1614.
- [9] 黄真萍,张义,吴伟达. 遇水冷却的高温大理岩力学与波动特性分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(2):367-375.  
Huang Zhenping, Zhang Yi, Wu Weida. Analysis of mechanical and wave properties of heat-treated marble by water cooling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2):367-375.
- [10] 孟陆波,李天斌,徐进,等. 高温作用下围压对页岩力学特性影响的试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(11):1829-1833.  
Meng Lubo, Li Tianbin, Xu Jin, et al. Experimental study on influence of confining pressure on shale mechanical properties under high temperature condition [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(11):1829-1833.
- [11] 孙强,张志镇,薛雷,等. 岩石高温相变与物理力学性质变化[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(5):935-942.  
Sun Qiang, Zhang Zhizhen, Xue Lei, et al. Physico-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5):935-942.
- [12] 闫治国,朱合华,邓涛,等. 三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(11):2010-2014.  
Yan Zhiguo, Zhu Hehua, Deng Tao, et al. Experimental study on longitudinal wave characteristics of tuff, granite and breccia after high temperature [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11):2010-2014.
- [13] 何国梁,吴刚,黄醒春,等. 砂岩高温前后超声特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(4):779-784.  
He Guoliang, Wu Gang, Huang Xingchun, et al. Experimental study on ultrasonic properties of sandstone before and after high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4):779-784.

- [14] 苏承东,韦四江,秦本东,等. 高温对细砂岩力学性质影响机制的试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(3):623-630.  
Su Chengdong, Wei Sijiang, Qin Bendong, et al. Experimental study of influence mechanism of high temperature on mechanical properties of fine-grained sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(3):623-630.
- [15] Liu Z C, Du X D, Zhu Z Y, et al. Wave velocity in sandstone and mudstone under high temperature and overpressure in yinggehai basin[J]. Energies,2022,15(7):2615.
- [16] 毛竹,刘兆东,张友君,等. 实验矿物物理的发展现状与趋势:2. 弹性和波速[J]. 地球科学,2022,47(8):2729-2743.  
Mao Zhu, Liu Zhaodong, Zhang Youjun, et al. Recent progress and perspective of experimental mineral physics:2. elasticity and sound velocity[J]. Earth Science, 2022,47(8):2729-2743.
- [17] 薛卉,舒彪,陈君洁,等. 高温高压下超临界二氧化碳作用对花岗岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(2):377-384.  
Xue Hui, Shu Biao, Chen Junjie, et al. Mechanical properties of granite after reaction with ScCO<sub>2</sub> at high temperature and high pressure[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(2):377-384.
- [18] 畅宇飞,刘永刚. 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[J]. 矿物学报, 2022,42(5):640-648.  
Chang Yufei, Liu Yonggang. Experimental study on P-and S-wave velocities and Poisson's ratios of rocks under high temperature and high hydrostatic pressure[J]. Acta Mineralogica Sinica,2022,42(5):640-648.
- [19] Peng H J, Zhao J T, Cui R. Predicting the temperature field of hot dry rocks by the seismic inversion method [J]. Energies,2023,16(4):1865.
- [20] 孙川翔,聂海宽,苏海琨,等. 温压耦合作用下四川盆地深层龙马溪组页岩孔渗和岩石力学特征[J]. 石油勘探与开发,2023,50(1):77-88.  
Sun Chuanxiang, Nie Haikuan, Su Haikun, et al. Porosity, permeability and rock mechanics of Lower Silurian Longmaxi Formation deep shale under temperature-pressure coupling in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023,50(1):77-88.
- [21] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. Geophysics,1951,16(4):673-685.
- [22] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956,28(2):168-178.
- [23] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. higher frequency range [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956,28(2):179-191.
- [24] Biot M A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media [J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1962,34(9A):1254-1264.
- [25] Biot M A. Generalized boundary condition for multiple scatter in acoustic reflection[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1968,44(6):1616-1622.
- [26] Dvorkin J, Nur A. Dynamic poroelasticity: a unified model with the squirt and the Biot mechanisms [J]. Geophysics,1993,58(4):524-533.
- [27] Diallo M S, Appel E. Acoustic wave propagation in saturated porous media: reformulation of the Biot/Squirt flow theory[J]. Journal of Applied Geophysics,2000, 44(4):313-325.
- [28] Yan F Y, Han D H. Effect of pore geometry on Gassmann fluid substitution[J]. Geophysical Prospecting, 2016,64(6):1575-1587.
- [29] Si W P, Di B R, Wei J X, et al. Experimental study of water saturation effect on acoustic velocity of sandstones[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2016,33:37-43.
- [30] 刘欣欣,印兴耀,栾锡武. 天然气水合物地层岩石物理模型构建[J]. 中国科学:地球科学,2018,48(9):1248-1266.  
Liu Xinxin, Yin Xingyao, Luan Xiwu. Seismic rock physical modelling for gas hydrate-bearing sediments[J]. Scientia Sinica:Terrae,2018,48(9):1248-1266.
- [31] Zhao L X, Cao C H, Yao Q L, et al. Gassmann consistency for different inclusion-based effective medium theories: implications for elastic interactions and poroelasticity [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,2020,125(3):e2019JB018328.
- [32] 孟大江,文鹏飞,张如伟,等. 天然气水合物横波速度等效介质模型预测方法[J]. 石油地球物理勘探,2020,55(1):117-125,8.  
Meng Dajiang, Wen Pengfei, Zhang Ruwei, et al. Gas hydrate S-wave velocity prediction method based on effective medium model[J]. Oil Geophysical Prospecting,2020,55(1):117-125,8.

(责任编辑:陈骏)