

利用人造岩石样品开展地震岩石物理实验研究的新进展

丁拼搏^{1,2*}, 魏建新^{1,2}, 狄帮让^{1,2}, 李向阳^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, dingpinbo@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-04-15

国家自然科学基金(41804105)、国家科技重大专项(2017ZX05018-005)资助

摘要 人造岩石样品被用于油气勘探开发诸多环节中, 在岩石物理学、岩石力学、油层物理等领域中取得了广泛应用。做为天然岩石的补充和有效替代样品, 人造岩石在科学研究和工程应用中发挥着重要作用, 为理解和分析复杂地层中油气赋存和运移、地球物理响应、物理化学机制等方面发挥重要作用。本文介绍了胶结法、烧结法、冷压法和热压法、3D打印技术、降温加压法等人造岩石样品的实验工艺, 总结了针对复杂油气储层开展人造砂岩、双孔隙岩石、人造页岩、人造碳酸盐岩、天然气水合物模拟等实验方法, 以及应用人造岩石样品开展地震波散射机制、地震各向异性、地震波衰减、震电效应、波致流机制、页岩脆性和甜点、水合物声电和力学等实验研究的进展。通过对人造岩石样品研究现状及发展趋势的总结表明, 人造岩石样品与天然岩石具有越来越高的相似性, 针对砂岩、含裂缝岩石、页岩、碳酸盐岩及天然气水合物等多种非常规储层的岩石类型, 可以模拟孔隙度、渗透率、孔隙特征、矿物组分、流体饱和状态、微观结构等多种复杂岩石特征, 参数可控的人造岩石样品可以实现单一物理量的变化, 开展流体渗流、弹性性质、电磁学性质、力学性质等多方面的研究, 定量的表征孔隙流体运移、弹性波传播、电场磁场、岩石破裂等多种物理化学过程中的机制, 为降低油气勘探开发中的多解性、提高油气勘探开发精度提供支撑。利用人造岩石样品与天然岩石相结合开展研究可更好地揭示岩石物性对岩石物理特征的影响, 但仍然存在一些问题。岩石力学性质与岩石孔隙结构、岩石矿物成分、岩石颗粒粒径、胶结方式和胶结强度等都有关, 目前人造岩石在这方面的模拟还不太理想。同时, 随着非常规复杂储层逐渐成为了目前油气勘探开发的主要目标, 储层岩石的物性特征更加复杂, 对人造岩石样品的模拟精度提出了更高的要求。与天然岩石相比, 人造岩石样品有一些固有的不足, 如孔隙结构相对比较单一、胶结方式和强度与天然岩石有差异、孔隙度和渗透率相对较高等, 因此还需要在实验工艺上进一步提高人造岩石与天然岩石的相似程度。

关键词 人造岩石; 岩石物理; 人造砂岩; 裂缝介质; 人造页岩; 天然气水合物; 波致流; 各向异性; 脆性

Progresses of rock physics laboratory study based on synthetic rock samples

DING Pinbo^{1,2}, WEI Jianxin^{1,2}, DI Bangrang^{1,2}, LI Xiang-yang^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 丁拼搏, 魏建新, 狄帮让, 李向阳. 利用人造岩石样品开展地震岩石物理实验研究的新进展. 石油科学通报, 2021, 04: 576-594

DING Pinbo, WEI Jianxin, DI Bangrang, LI Xiang-yang. Progresses of rock physics laboratory study based on synthetic rock samples. Petroleum Science Bulletin, 2021, 04: 576-594. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.040

2 CNPC Key Laboratory of Geophysical Exploration, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Synthetic rock samples are widely used during oil exploration and production in rock physics, rock mechanics and petrophysics to simulate natural rock in the case of the lack of adequate natural rock samples or an alternative solution mimicking natural rock characteristics. Hence, the synthetic rock samples can help to investigate hydrocarbon accumulation and migration, geophysical characteristics and the physical and chemical mechanisms in reservoir rocks. We review the experimental methodologies used to construct synthetic rock samples including cementation, sintering, cold/hot pressing, 3D printing and the cooling-pressing process. Based on these methodologies, synthetic samples are used to mimic sandstone, fractured porous rocks, shales, carbonates and gas hydrate. Synthetic rock samples can be used in experiments on seismic scattering, anisotropy, attenuation, seismo-electric effects, wave-induced fluid flow mechanism, shale brittleness and sweet point analysis, elastic/electric/mechanic properties of gas hydrate, etc. Synthetic rock samples present more and more similarity to natural rocks in pore structure, porosity, permeability, pore characteristics, mineral components, fluid saturation, micro-structure, etc. When focusing on unconventional reservoir rocks, such as tight sandstone, fractured rocks, shales, carbonates and gas hydrate, synthetic rocks with controlled parameters can provide samples with a single variable to investigate fluid flow, elastic properties, electromagnetism properties, mechanical properties. These can be used to quantitatively characterize the fluid flow transportation, elastic wave propagation, electromagnetism field, rock failure and other physical or chemical mechanisms, hence help to reduce the ambiguity and improve the accuracy in hydrocarbon exploration and production. Together with natural rocks, using synthetic rocks can reveal the effects of rock properties on rock physics characteristics. However, the application of synthetic rocks for rock mechanics laboratory study still has some limitations. The rock mechanics properties related to pore structure, mineral components, grain size, cementation, etc., synthetic rocks are not yet reliable enough to simulate natural rock mechanics characteristics. Meanwhile, the main targets for petroleum exploration and production are becoming unconventional reservoirs with more complex reservoir properties. Hence the feasibility and accuracy of simulating reservoir rocks with comprehensive complexities should be closely examined during laboratory study based on synthetic rocks. In general, synthetic rock still has some intrinsic drawbacks compared to natural rock (simple pore structure, different cementation, comparatively high porosity and permeability, etc.). Techniques for construction synthetic rock should be updated to improve the similarity between synthetic and natural rocks and to enhance the feasibility of using synthetic rock for laboratory study and industrial production.

Keywords synthetic rock; rock physics; synthetic sandstone; fractured media; synthetic shale; gas hydrate; wave-induced fluid flow; anisotropy; brittleness

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.040

0 前言

在岩石物理学、岩石力学、油层物理等油气勘探开发等领域的实验中,人工岩心是一种常用的实验样品^[1]。使用人工岩心主要由于以下两方面原因:

1) 在没有理想的天然岩石样品的情况下,人工岩心替代天然岩心开展实验测试和研究。如,由于从天然岩石中得到的样品不具有代表性^[2]、某些区块或层位没有取样、有些区域没有钻井因此无法提供岩心等原因^[3]。因此需要参照天然岩石制作出人工岩心来进行物理模拟,研究油气勘探和开发中遇到的问题。比如利用人工岩心模拟油气开发过程中的流体驱替,探索油气田勘探开发过程中流体在岩石内部的运移规律等,为下一步增强勘探开发效果和提高采收率给出指导性的意见。

2) 利用人工岩心提供参数可控的岩石样品,开展定量研究。天然岩石的性质是由多种岩性、物性和储层参数综合影响的,测试结果充满不确定性和多解性。

天然岩石矿物组分、孔隙结构、裂缝分布和形态、流体饱和状态等千差万别,岩性、物性、储层等参数无法确定且相互影响。人工岩心制作工艺可以达到岩心参数可控的目的,制作出单一变量的人工岩心,可以定量分析某一种单一因素对岩石性质的影响^[4]。

因此,国内外很多研究机构和学者都曾利用人工岩心研究油气田开发、地震勘探、岩石物理学中的问题。比如,1996年澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)和科廷大学的学者们研究了人工砂岩的制作技术,人工砂岩的物理参数和声学性质都与天然岩石一致^[5],模拟饱和多相流体油气藏的物理模型,并利用在该模型上采集的时移地震数据研究油气藏内部流体的变化^[6]。1995年阿莫科石油公司的学者Rathor在利用环氧胶结石英砂制作了含裂缝的石英砂岩。美国休斯顿大学的岩石物理实验室利用环氧树脂和硅橡胶模拟裂缝介质^[7]。英国南安普顿大学Tillotson等人在2011年研究了利用硅质胶结的人工砂岩制作含裂缝样品。国内也有很多石油企业,如大庆油田、胜利油田、

江汉油田,都利用人工砂岩来研究油气田开发过程中的遇到的问题^[8-9]。国内高校和科研院所也长期开展利用实验室制作的人工砂岩研究孔隙介质中的渗流规律和驱油机理^[10]、利用人工岩心研究低孔低渗油藏提高采收率的方法^[11]以及利用人工岩石开展岩石物理和地震物理模拟研究工作。

本文总结了近些年来实验地球物理领域的人工岩石样品实验工艺发展,介绍了利用人工岩心开展的模拟砂岩、双孔隙岩石、页岩、碳酸盐岩、水合物等多种储层类型的岩石,并综述了利用人工岩心开展的地震各向异性理论、地震波传播理论、多物理场耦合、页岩脆性和甜点等方面的研究进展。

1 人造岩心的实验工艺发展

1.1 环氧树脂、有机玻璃、铝等

为模拟岩石的速度、结构和各向异性等特征,早期用一些工业材料做为替代材料制作人工样品。Ass'Ad等^[12]在1992年用环氧树脂作为基质用硅橡胶片模拟裂缝研究了裂缝密度对于横波各向异性的影响。2001年,贺振华等^[13]利用环氧树脂板和黄铜板制作了定向排列裂缝物理模型,近似模拟横向各向同性(Transverse isotropy)介质中波的传播,研究了裂缝对地震波速度和振幅的影响。魏建新等^[14]在2002年用环氧树脂做基质,用硅橡胶薄片近似模拟裂缝,制作出了一批具有不同裂缝密度的模型,研究了裂缝密度对于横波速度和各向异性系数的影响。由于硅橡胶材料中纵波的速度较低、横波速度可以忽略,因此可以模拟液体或者弱介质填充的裂缝,但由于样品中没有孔隙和真实流体,因此忽略了地震波传播过程中产生的流体流动机制。曹均等^[15]于2003年利用环氧树脂板和铜箔制作了裂缝物理模型,研究了裂缝密度和裂缝张开度对地震波传播的影响,样品中没有准确的裂缝形态,而是近似地将裂缝看作具有横向无限展布的特征。总体而言,这类方法在当时为模拟岩石的速度、各向异性、非均质性等特征提供了研究途径,但所选用的材料与岩石相差较大,不能模拟岩石这种孔隙介质,近年来逐渐被更新的工艺所取代。

1.2 胶结法

利用环氧树脂胶结矿物颗粒的方法是一种较为成熟的工艺,制作出的人工岩石性质稳定,且可重复性强,是目前应用较为广泛的方法。在实验室中采用环

氧树脂胶结石英砂,利用压机进行压制,根据设计的变量参数,采用不同的成分和配比,制作出具有不同性能的人工岩石。通过改变矿物颗粒与环氧树脂的配比、添加多种矿物或者泥质成分、改变压机的压制压力等,可以实现不同参数系列的人工岩石样品。Rathore等^[16]在1995年利用环氧树脂胶结石英砂制作了含裂缝的双孔隙模型,实验结果表明Hudson理论对于含水条件下的纵波各向异性计算低于实验测量值,同时证明了孔隙流体流动机制对地震波的传播有着重要的影响。王子振等^[17]采用天然岩屑颗粒作为骨架,环氧树脂做为胶结剂,在骨架中嵌入易溶于水的无机盐颗粒和金属薄片,固结成形后分别采用蒸馏水、酸或碱液将嵌在骨架中的无机盐颗粒和金属片溶蚀,形成溶孔和裂隙,形成具备多重孔隙结构的人造岩石。熊钰等^[18]选用与储层粒径分布相似的河沙作为骨架颗粒,加入一定量的地层水以控制岩心胶结程度,制作弱胶结高渗疏松砂岩样品,人造岩石的润湿性符合河流沉积砂岩特征,在孔隙度、渗透率、胶结方式和胶结指数等参数与天然岩石具有较高的相似性。目前胶结法工艺已经较为成熟,利用环氧树脂和矿物颗粒混合压制的人造样品可以具备特定的孔隙度和速度等参数,但孔隙结构较为单一,颗粒间由环氧树脂填充也容易导致流体饱和较困难或者存在不均匀性。

1.3 烧结法

烧结法是常用的制作高孔隙度多孔样品的方法,可以制作孔隙发育、渗透率较好的样品。Plona^[19]利用玻璃微珠颗粒烧制而成的人工多孔样品开展了实验测试,首次实验证实了Biot理论中关于慢纵波的理论预测,是利用人造岩石样品开展岩石物理实验观测、推动理论发展的最著名的实验研究案例之一。玻璃微珠在加热至熔点后转化为熔融状态,并相互粘接,在温度降低时重新结晶,但烧结过程较难控制烧结温度和烧结时长等参数,因而较难制作参数可控、定量的样品。Tillotson等^[20]利用CNPC物探重点实验室制作的烧结双孔隙样品,研究了含裂缝介质中流体对横波各向异性的影响。Ding等^[21]提出了一种参数可控的人工岩心实验新方法,结合无机非金属材料科学中的工艺,利用沉积岩中常见的石英、长石、方解石、黏土等矿物成分,制作出的人工岩石样品与天然岩石具有类似的矿物组分、孔隙结构和力学特性等。该工艺具有几个特点:首先,实验工艺中引入了无机非金属材料工艺中的球磨流程,保证了矿物颗粒的充分和均匀混合;其次,矿物颗粒中的高岭土、长石等成分在加热至接

近其熔点后变为熔融状态,自发地充填在石英砂等矿物颗粒的间隙中,在温度降低后重新结晶,使得坯体产生很强的胶结,达到与天然沉积环境中温压条件下固结成岩相类似的效果;第三,高温煅烧过程中发生的一系列物理化学变化,导致坯体发生较大的体积收缩,或者坯体产生局部应力集中,都容易导致坯体开裂。

总体而言,利用烧结法制作的人工岩石样品具有较为稳固的骨架,且孔隙连通性较好,可以充分饱和流体开展岩石物理实验,但烧结过程不容易控制,矿物组分和烧结温度等参数的影响较难控制,烧结法制作的样品通常具有较高的孔隙度,较难模拟低孔渗岩石的物性参数。

1.4 冷压法与热压法

为了模拟低孔渗岩石,需要在制作过程中采用高压制作工艺降低制品的孔隙度和渗透率。利用冷压或者热压工艺可制作致密岩石样品,如致密砂岩和页岩等低孔渗样品。Altowairqi等^[22]利用压实的人造页岩样品分析了黏土矿物、非黏土矿物和TOC等矿物组分变化对岩石速度的影响开展了分析。Husseiny等^[23]利用冷压法将粗糙和细粒的方解石颗粒混合物制作成微晶灰质碳酸盐岩样品。Luan等^[24]采用了一种冷压的技术在常温下对有机质和黏土等矿物的混合物进行压实,形成了一种冷压法制作含有有机质人工页岩的方法,但制作的人造页岩样品的纵横波速度和各向异性参数与天然页岩相比均偏小。Xie等^[25]认为产生这种差异的原因是冷压法没有把天然页岩成岩环境中的成岩温度等因素考虑进去,而成岩温度在页岩成岩过程中对有机质和黏土矿物的性质都有着重要的影响。因此,提出了一种基于热压法的人造有机页岩实验方法。在冷压法和热压法制作过程中,高压制作工艺会使得矿物颗粒沿着水平方向(垂向加压)产生定向排列,岩石样品通常具有非常强的各向异性。另外,在压制时模具内部压力分布不均匀,样品脱模后可能会存在不同位置致密程度有差异的现象,从而导致样品具有一定的非均匀性,可以采用较大的宽高比(模具水平方向内径较大,垂直高度较小)的模具,可以降低这种影响。

1.5 3D打印技术

3D打印是增材制造(AM)的俗称,是一种快速成型的技术,以数字模型为基础,将专用的金属材料、非金属材料等可粘合材料,通过逐层打印的方式构建实体物体。经过几十年的发展,这种技术常被用于模

具制造或者零部件加工,并在很多领域都取得了应用。目前,3D打印仍面临着很多限制,比如打印材料不能模拟大部分日常生活中或者工业中各种各样的材料。

在地球科学领域,几年来有一些利用3D打印制作人工岩石样品的研究。Ishutov等^[26]介绍了一种3D打印制作高孔隙度高渗透率砂岩样品的方法,利用微米CT把砂岩样品进行扫描和重构,利用数字岩心技术分析孔隙度和渗透率,借助3D打印机逐层打印出重构后的岩石和孔隙结构,利用氦气孔隙度测定仪、核磁共振分析孔隙尺寸,利用薄片和扫描电镜观察孔隙结构,表征3D打印岩样的孔隙结构特征并与天然砂岩样品进行对比,由于CT扫描分辨率和3D打印精度的限制,选用的天然样品为孔隙度为29%、渗透率为2200 mD的爱达荷灰色砂岩。Huang等^[27]利用3D打印技术制作了一组含定向排列的“薄币型裂缝”人造岩石样品,用于打印的材料选用的是热塑材料,具有较低的速度和密度,其中纵波速度为2167 m/s,横波速度为885 m/s,密度为1.04 g/cc。打印出岩石基质的孔隙度为6%,密度为0.98 g/cc,含薄币型裂缝样品的孔隙度为24%,密度为0.79 g/cc。Fereshtenejad等^[28]针对现有3D打印样品的强度和延展性都不高的弱点,通过分析打印方式、层厚、胶结、温度等参数对打印样品的应力应变等影响,制作的打印样品在较低压力的单轴压缩试验中具有与天然岩石类似的力学性质。Kong等^[29]利用3D打印开展了岩石力学实验,通过比较实验前后样品孔隙结构和孔隙尺寸等微观结构,并于与天然岩石样品的实验结果进行了对比分析。Song等^[30]选用石英砂、石膏粉、硅微粉做为原材料,利用3D打印技术制作了人造岩石样品(图1),具有与天然岩石相似的性质,可以模拟高孔隙度和高渗透率的砂岩。

目前利用3D打印开展了很多模拟天然岩石力学性质和孔隙结构的探索,而3D打印样品在弹性性质上与天然岩石还有较大差异。另一方面,目前利用3D打印技术对均匀性较好的高孔高渗砂岩样品开展了一些研究,但还不能有效模拟具有复杂矿物组分、低孔隙度低渗透率的致密砂岩,以及碳酸盐岩、页岩等复杂油气储层岩石类型,这些都对3D打印原材料、工艺和精度等技术提出了更高要求。

1.6 降温加压法

在人工生成天然气水合物的实验室模拟中,主要通过天然气的混合物进行降温和加压来实现的。在水合物实验模拟过程中,先将反应釜通过低温浴槽

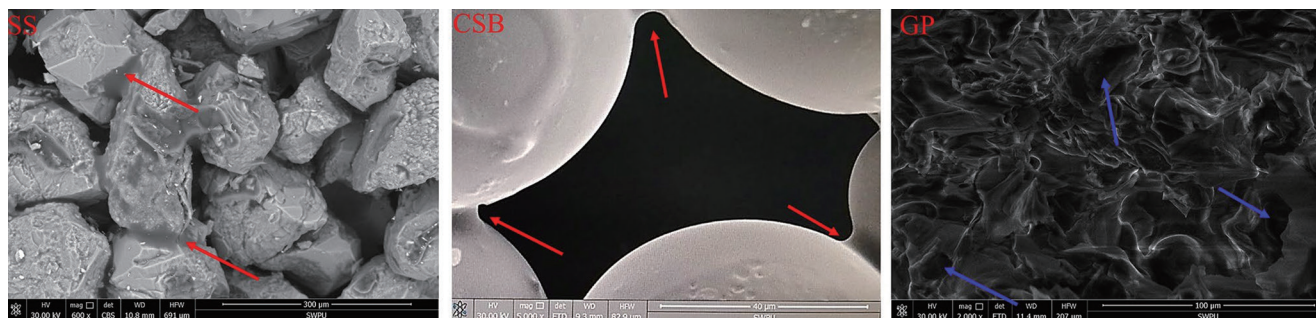


图1 不同材料制作的3D打印人造岩石样品中材料颗粒的连接类型(据参考文献[30])

Fig. 1 The different bonding form of 3D-Printed rock analogs based on different methodologies (according to [30])

把温度降低(如降至4℃),再通过加压气阀缓慢向反应釜中通入甲烷气体,反应釜内压力逐渐升高至实验所需压力(如6 MPa),天然气在低温高压环境下逐渐溶于水,并缓慢的生成水合物,直到反应釜中气压稳定(如稳定约24 h),则水合物生成结束。Wu等^[31]利用Ottawa砂为原料使用润湿压制法制作骨架,模拟了水合物生成填充孔隙及水合物分解过程,讨论了温度、压力等参数对生成水合物含量的影响,分析了水合物生成和分解过程中岩样的力学性质变化。Miyazaki等^[32]把材料放入模具中压制成砂-水混合物,通过对样品进行烘干得到不同含水量的骨架样品,最后把样品放入低温环境中冷冻成地层骨架岩样。该实验选用了Toyoura砂、7号石英砂和8号石英砂3类不同规格的砂粒为材料,不同砂粒材料的粒径和颗粒形状有差异,模拟了不同类型地层骨架。Hyodo等^[33]首先利用干燥砂和水混合得到一定的饱和度和密度,然后把湿砂逐层铺进模具并压实,把模具放置在低温环境中冻结后脱模,在调节好压力和温度后逐渐将甲烷气注入并生成水合物。现有实验工艺中,既有利用人造岩石样品近似地代替水合物地层骨架开展饱水和饱气实验,也有在砂-水混合物中生成天然气水合物的开展实验模拟。目前较少考虑到目标区域天然气水合物地层的复杂物性和地质条件,与实际水合物地层的相似性还有待提高。

2 不同类型储层的人造岩石样品

2.1 人造砂岩

砂岩的弹性参数主要受矿物成分、泥质含量、孔隙度和含水饱和度等参数的影响,这些参数对储层预测和油藏开发具有重要意义。通常的研究工作是利用露头或者井中取芯的天然砂岩样品开展岩石物理参数

的测试和分析,获得岩石的弹性参数。然而,在开展针对砂岩的研究中,天然砂岩的矿物组分、孔隙度、泥质含量、胶结方式等往往千差万别,岩石速度的变化规律受很多参数的综合影响,难以针对单一参数分析其与弹性参数变化规律的关系。因此,针对天然砂岩中的孔隙度、孔隙结构、流体饱和度、黏土含量等单一因素开展了人工岩心制作和岩石物理定量分析,验证理论模型预测结果的准确性,为厘清砂岩储层物性参数和储层特征的岩石物理特征提供了基础^[34]。

人造砂岩在石油勘探开发等领域很早就有着广泛的应用^[35]。人造砂岩制作技术主要有利用环氧树脂胶结石英砂、磷酸铝胶结石英砂以及玻璃微珠烧结法。其中,环氧树脂胶结石英砂方法易于操作,制作出的人造砂岩性质稳定,可重复性强,成为应用最广泛的方法。采用环氧树脂胶结石英砂,用大型压机进行压制,根据所需参数采用不同的成分和配比,制作出人工砂岩并进行了参数测试分析。通过改变石英砂与环氧树脂配比、添加其他矿物或者泥质、改变压机的压制压力等方法,得到不同系列的具有可控参数的砂岩样品。利用人造砂岩样品,可研究矿物成分、泥质含量、孔隙度和流体饱和度等单一参数对砂岩弹性参数的影响(图2)。如,Li等^[36]利用富含黏土矿物的人造岩石样品,分析了不同类型黏土及其含量对含水岩石弹性模量的影响。实验结果表明,饱水后富含蒙脱石矿物的岩石样品中横波模量有显著降低的现象,而富含高岭土矿物的岩石样品的横波模量降低不明显。实验分析认为,黏土矿物表面颗粒的润湿性造成的表面能降低是造成富含高岭土矿物和蒙脱石矿物岩石中横波剪切模量发生饱水后弱化的机制,而蒙脱石吸水后产生的结构松散是导致富含蒙脱石样品剪切模量显著降低的首要原因。

常规砂岩储层模拟工艺已经较为常用,目前人造砂岩需要针对致密砂岩的低孔隙度、低渗透率、复杂

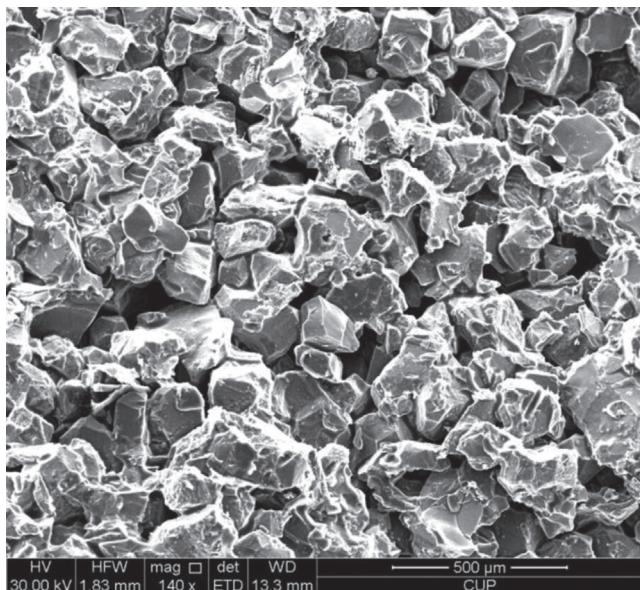


图2 高孔隙度人造实验样品的SEM照片(据参考文献[34])
Fig. 2 SEM image shows the pore structure of synthetic sandstone with high porosity(according to [34])

孔隙结构、泥质成分和含量、含气性等特征,提高制作工艺和模拟精度,以满足非常规致密气储层勘探和开发的需求。

2.2 含裂缝的双孔隙岩石

目前裂缝型油气藏已经成为非常重要的油气藏类型,是油气勘探开发的重点目标。裂缝广泛分布于碳酸盐岩、致密砂岩、泥岩、火成岩、古潜山变质岩及页岩中。特别是对于碳酸盐岩、致密砂岩和页岩等低孔低渗岩石来说,裂缝成为油气的主要运移通道和储存空间。裂缝型油气藏在我国的大庆、胜利、长庆、四川等各个主要的油气田中均有发现,已成为我国油气增产的重要油气藏类型。地下裂缝的分布、发育程度及几何形态等信息对于研究油气藏勘探与开发、地下流体储集和运移、页岩气压裂监测等都有着重要的作用。但是,天然岩石中裂缝分布和形态复杂,裂缝参数(如裂缝密度、裂缝张开度、裂缝长度等)无法准确测定,裂缝介质岩石物理实验中常借助人造岩样来研究裂缝参数对裂缝介质弹性参数的影响。

在多数文献中裂隙模拟实验所用的裂隙模型主要用片状材料和各向异性工业材料构成,这两类模型不能定量给出相关的裂隙参数,而工业材料的各向异性量与裂隙引起的各向异性量有较大的差异。为了更精确对裂缝介质开展模拟和实验,需要构建基质孔隙-裂缝同时存在的双孔隙样品,并实现裂缝参数的可控和流体的饱和。Rathor等^[16]1995年制作了一组人工

多孔砂岩,其中含有定向排列的薄片状裂缝。该组实验样品用环氧树脂胶结石英砂的方法,并在其中嵌入薄片状铝片,用盐酸腐蚀的方法将铝片析出,得到具有孔隙和裂缝的人工砂岩。该实验证实了Thomsen理论提出的等径孔隙背景中含裂缝的双孔隙介质中流体流动机制,流体在裂缝-裂缝-裂缝-等径孔隙之间的流动对地震波的速度和各向异性有着重要影响。该实验首次实现了双孔隙介质人工岩样,是利用人造岩石样品开展岩石物理实验观测、推动理论发展的又一实验研究经典案例。Tillotson等^[20]2011年利用CNPC物探重点实验室制作的含裂缝人造样品进行横波分裂的观测。随后,开展了利用硅质胶结的含裂缝人工砂岩样品的制作工艺研制,利用硅酸钠与石英砂作为基质,在人工岩心中嵌入铝片并将其酸化腐蚀而析出的方法制作出了人工岩心^[37],并开展了一系列研究。王耀等^[38]在2011年尝试用环氧树脂胶结石英砂的方式制作双孔隙人工样品。Ding等^[21]基于前人关于含裂缝物理模型的制作流程,引入无机非金属材料学中的无机多孔材料制备的方法,采用石英砂、高岭土、长石、硅酸钠等材料作为原料,最终探索出了一套基于高温烧结法的含可控裂缝人工砂岩的制作技术。利用该技术制作出与天然岩石具有相似的矿物成分、孔隙结构和胶结方式的双孔隙人工岩样,利用SEM扫描电镜表征人工岩样的微观的孔隙和裂缝形态,证明人工岩样具有与天然岩石类似的孔隙结构,裂缝的形态清晰稳定符合实验的要求。利用X光CT扫描岩石内部,得到表征裂缝形态和分布的三维图像(图3)。岩样中含有的裂缝具有可控的裂缝参数,因此可以按照实验要求制作出含有一定裂缝参数的岩样以进行特定的研究。基于该方法制作出的岩心被应用到裂缝介质各向异性岩石物理实验、声-电耦合(震电效应)实验等多个领域^[39-40]。由于天然岩石中裂缝具有明显的多尺度性,而人造岩石和实验中裂缝尺度变化范围较小,实验模拟工艺尚不足以完全反映岩石中复杂裂缝系统的特征。人造岩石中毫米级尺度的裂缝反映的是地层中的宏观裂缝,对致密砂岩、页岩中的微米级颗粒尺度微裂缝尚不能直接模拟,需要借助于等效介质理论进行推广。

2.3 人造页岩

近年来,页岩的岩石物理和岩石力学实验取得了一系列的研究成果。尽管如此,由于页岩矿物组分复杂、物性变化较大、各向异性较强、有机质含量及其成熟度差异大等原因,对页岩岩石物理的定量研究仍是重要的课题。另一方面,由于天然页岩样品取芯困

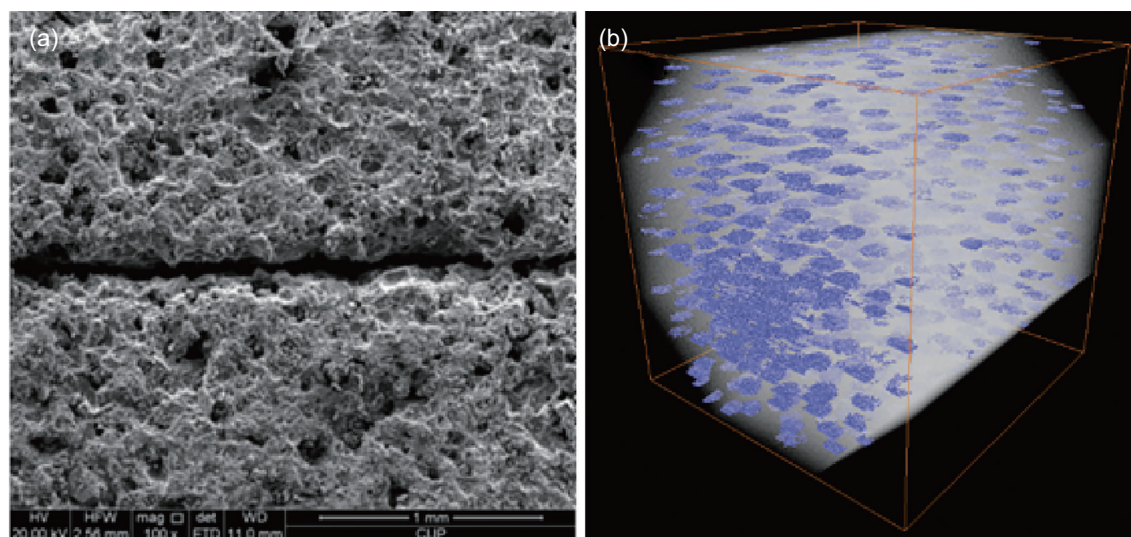


图3 (a)利用高温烧结法制作出的含可控裂缝双孔隙人工岩样的SEM扫描电镜照片和(b)CT成像图片(据参考文献[41]修改)
 Fig. 3 (a)The SEM image and (b) X-ray CT image show the pores and fracture distribution in synthetic rock with controlled fracture geometries based on sintering process (modified after[41])

难、非均质性强、岩石物性差异性强、化学和机械特性不稳定等特点,针对页岩的实验大都基于统计特征开展分析,较难以开展有效的系统性研究。针对上述问题,制作参数可控的人造页岩样品,研究单一因素变化的影响,是一种可行的技术。Kaarsberg^[42]首次开展了人工页岩的合成,并利用X射线衍射(XRD)实验方法获得页岩中黏土的定向排列程度,分析其与页岩各向异性的关系。Revil等^[43]利用压结法制作了沙-黏土混合物并分析了不同参数对岩石性质的影响。Luan等^[44]利用石英砂、黏土矿物、铁粉等材料制作人造页岩样品,并针对页岩的各向异性 and 脆性等特征开展了研究(图4)。Xie等^[25]进一步发展了该工艺,针对有机质页岩的特点,建立了一套基于热压法构建人造有机页岩的实验工艺,在矿物组分、成岩环境、物理性质、微观结构、油藏性质及均匀性等方面都与天然页岩具有很高的相似性。利用参数可控的人造页岩,可以建立富有机质页岩中干酪根含量与页岩弹性性质之间的关系。但由于人造页岩主要依靠A/B胶将矿物颗粒粘接成型,岩石的力学性质和破裂受粘接剂的影响较大,因此仅限于应用人造页岩模拟天然页岩的矿物组分、微观结构等特征,以研究页岩的各向异性、弹性模量等参数的变化规律。

2.4 人造碳酸盐岩

碳酸盐岩储层是世界上油气储量最大的油气藏类型,我国的四川盆地、塔里木盆地等均属于碳酸盐岩储层。相对于常规储层,碳酸盐岩的孔渗较低且非均

质性较强,储层物性(孔隙度、渗透率、饱和度)等与地球物理性质(密度、速度、电阻率等)之间的关系复杂,使得碳酸盐岩储层勘探和开发难度较大。碳酸盐岩的孔隙结构复杂多变,孔隙类型、孔隙尺寸变化较大,孔隙的非均质性强,获得地球物理参数和储层物性之间的关系较为困难。为了建立碳酸盐岩物性与岩石物理参数之间的关系,利用参数可控的人造样品是一种可行的实验方法。如Wang等^[45]利用天然碳酸盐岩矿粉和环氧树脂制作固体基质,薄片状硅橡胶模拟饱水的次生孔隙,不同直径的发泡聚苯乙烯颗粒模拟干燥球形孔隙。通过对样品的纵横波速度测试结果进行分析,并与等效介质理论预测结果进行对比,表明次生孔隙对碳酸盐岩速度变化具有重要影响,孔隙纵横比较大的样品具有较高的速度。Husseiny等^[23]利用冷压法将粗糙和细粒的方解石颗粒混合物制作成微晶灰质碳酸盐岩样品(图5),并研究了CO₂注入造成的影响。Fedrizzi等^[46]利用方解石、石英砂和粘接剂制作人造碳酸盐岩样品,并且分析了人造岩石样品的孔隙度、渗透率、纵横波速度等随着粘接剂含量的变化。实验结果与天然碳酸盐岩样品进行了对比表明,人造样品在岩石物理特征上与天然岩石样品具有相似性。现有工艺大致都选用碳酸盐岩中常见的方解石、石英等矿物颗粒,并采用各种材料制作或者模拟碳酸盐岩的非均质孔隙结构特征,尤其是次生孔隙特征。但是,碳酸盐岩孔隙结构多样、尺度变化范围较大,除了颗粒尺度的晶间孔隙、粒间孔隙、溶蚀孔缝外,还有宏观的裂缝、溶洞等储集体类型,目前人造样品还不足

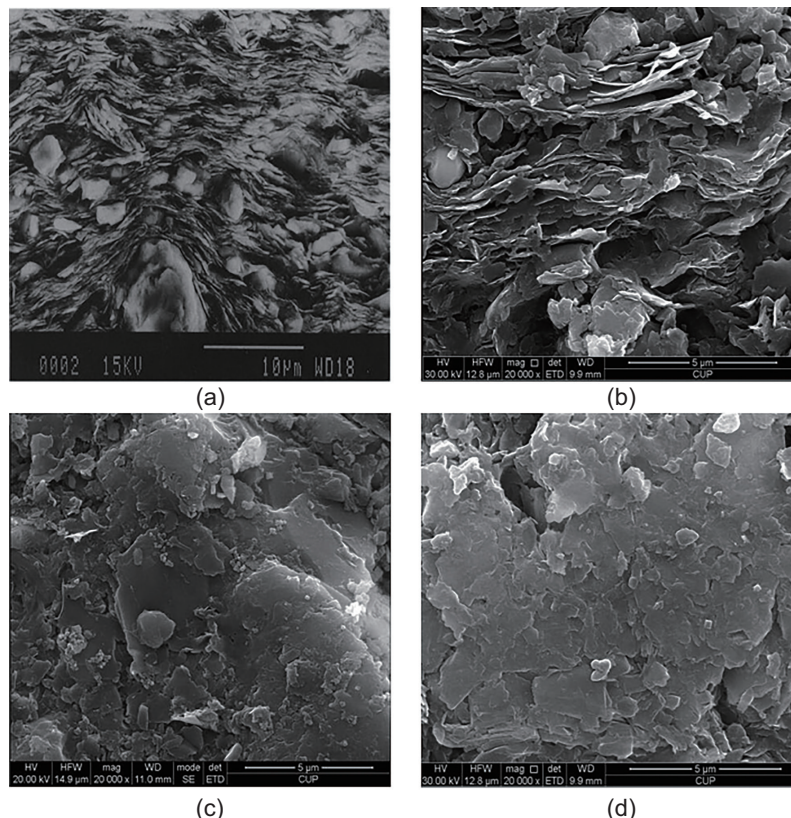


图4 人造页岩与天然页岩的SEM扫描电镜图片对比。其中(a)和(b)分别为天然页岩和人造页岩的垂直于页理的电镜照片，(c)和(d)分别为天然页岩和人造页岩的平行于页理的电镜照片(据参考文献^[44]修改)

Fig. 4 SEM images show the comparison of synthetic shale and natural shale. (a) nature shale, perpendicular to layers, (b) synthetic shale, perpendicular to layers, (c) natural shale, parallel to layers, (d) synthetic shale, parallel to layers (modified after^[44])

以模拟碳酸盐储层的多种储集空间类型的特征。

2.5 天然气水合物

天然气水合物广泛分布在大陆、岛屿的斜坡地带、活动和被动大陆边缘的隆起处、极地大陆架以及海洋和一些内陆湖的深水环境。天然气水合物赋存量巨大，对生态环境具有重要影响，也是潜在的清洁能源，但勘探开发难度大。我国的天然气水合物主要储存在南海地区和高原冻土区域，研究水合物地层的地球物理性质，是将来有可能实现的大规模的水合物勘探和开发的基础。自然界中的天然气水合物赋存类型多样，但水合物取样、保存和实验测试均对温度、压力条件具有较高的要求，天然岩心获取困难且成本高昂，国内外针对水合物的实验测试常常采用人造岩心来代替天然岩心，并在实验室内开展水合物生成和分解过程的实验测试。

早期模拟天然气水合物地层主要针对其未固结、高孔隙等特征，比如，赵群等^[47]为模拟天然气水合

物地层选用亚圆形纯石英砂体、玻璃微珠、纯高岭土粉和环氧树脂，烧结成孔隙度高于50%的多孔砂岩样品，所模拟的岩石具有胶结脆弱、高孔隙性和非固结特点。随后，逐渐形成了在实验室控制温压条件而生成水合物的工艺，如顾轶东等^[48]选用一定粒径的沙子，用水饱和，然后放入高压反应釜中，采用直接降温的方法，将温度降低到0℃以下，水结冰视为水合物生成，得到了纵横波速度与孔隙度变化规律。美国乔治亚州理工学院建立了一套可以对水合物进行三轴试验测量水合物声波速度的实验装置，Yun等^[49]通过该装置对粉砂、黏土等样品进行水合物生成及三轴试验，表明含水合物沉积物的应力应变行为是粒径、围压和水合物的复杂函数。业渝光等^[50]使用莫来石烧制而成的人工岩心，定量控制了不同孔隙度，将人工岩心放入反应釜中，充填天然气，得到了纵横波速度与饱和度的关系，但是莫来石的人工岩心与天然岩心的弹性参数差距较大。Prist等^[51]对均匀的细颗粒松散砂采用过量水法和过量气法生成的不同饱和度的水合物。

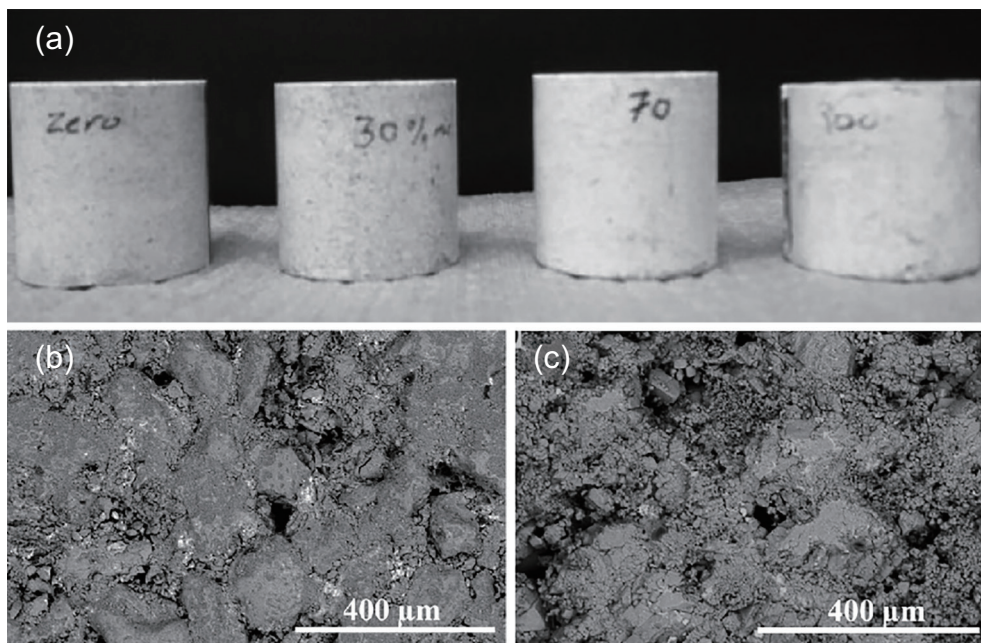


图5 人造碳酸盐岩样品(a)、人造样品SEM图片(b)与天然碳酸盐岩SEM图片(c)对比(据参考文献[23]修改)

Fig. 5 Synthetic carbonate rock samples (a), the SEM images of synthetic rock (b) and natural rock (c) (modified after[23])

周伟华^[52]采用水合物生成装置,在反应釜中充填满石英砂,分别使用过量水法和过量气法,并降低温度,得到不同方式生成的水合物。

目前实验室合成天然气水合物工艺较为成熟,在化工、岩石力学、岩石电学等方面开展了很多重要的研究,但也存在一些不足之处:首先,实验模拟所用材料较为单一,用于生成天然气水合物的砂-水混合物与实际地层物性差异较大;其次,目前针对水合物实验模拟主要服务于地质调查和工程开发,对水合物地层地球物理特征及其受地层物性(地层孔隙度、水合物饱和度等)的影响还需要开展更深入细致的实验研究。

3 基于人造岩样的岩石物理实验研究

3.1 地震波散射机制

随着油气勘探目标的复杂性越来越高,对地球物理勘探精度的要求也越来越高。如,我国四川盆地和塔里木盆地等地区发育的碳酸盐岩储层具有明显的非均质性,储层的非均质尺度变化范围跨度大,小到矿物颗粒尺度大到断层、缝洞储集体。因此,对地球物理勘探而言,深入研究地震波场在非均匀介质中的散射机制,可有利于认识非均质储层中地震波的传播规律、提高非均匀储层地球物理预测效果。Yin等^[53]通

过实验测量了非均匀样品的动态速度和静态杨氏模量,环氧树脂浇筑的均匀样块中含有不同尺度的玻璃珠,模拟低速背景介质中嵌入高速散射体的非均匀介质。Liu等^[54]制作了不同非均质体尺度的人造样品,均匀各向同性背景介质用环氧树脂制作,每块样品中嵌入了硅橡胶制作的不同尺度、一定数量的球形体,通过波形和速度的分析,表明弹性波在非均匀介质中传播速度随着非均质体尺度的增大而增大,波的传播速度存在从等效介质速度到散射速度的转换,随着非均质体尺度的增加,波速从散射速度向射线速度转换,转换点和波长尺度与非均质体尺度的比值有关。这些实验为观测非均质体散射造成速度、衰减特征提供了实验依据,通过实验中控制非均质体的数量、大小、形状等参数,可以量化的研究非均质散射的规律。实际地层中的非均质现象非常普遍,因此研究非均质性产生的地震波散射机制对速度、衰减等传播特征的影响是非常有必要的。现有的研究大多在均匀背景介质中潜入形状特定的包裹体,因此是对地下介质中的非均质体一种简单近似。实际地下介质中非均质体的类型多样,复杂矿物组分的非均匀骨架、非均匀孔隙结构、多相流体饱和、裂缝、溶洞、透镜体等地质特征都是不同类型的非均质体,都会导致地震波的散射,因此还需要针对这些复杂地质条件开展更符合实际的实验模拟和研究。

3.2 裂缝介质地震各向异性

在造成各向异性的诸多地质特征中,裂缝是最常见最重要的原因,也是油气藏勘探开发中最关键的一个因素。岩石中的裂缝受地应力的控制而呈平行排列,会形成很强的各向异性^[55-56]。地震波传播过程中速度、衰减的各向异性特征受裂缝和流体的影响,因此可以从地震资料中可以提取各向异性信息用于反演裂缝储层的裂缝发育程度和分布情况。等效介质理论可建立裂缝参数与岩石弹性之间的关系,是描述地震波在裂缝介质中传播规律的基础。等效介质理论需要实验数据的验证,但通常难以直接用天然岩石开展岩石物理实验。由于天然岩石中裂缝分布和形态比较复杂,裂缝参数(如裂缝密度、裂缝张开度、裂缝长度等)是无法定量。裂缝介质岩石物理实验常借助人造样品来研究裂缝参数对裂缝介质弹性性质的影响。其中,一类裂缝岩石样品是利用无裂缝的天然岩石,在实验室中通过加压或者加温的方式产生破裂,进而开展裂缝介质实验研究,如Peacock等^[57]将大理石样品加压产生破裂用于研究Hudson理论的精确性,Wang等^[58]将花岗岩加温致裂开展实验研究,这类实验样品的裂缝参数是不可控、不完全定量的。另一类,是含可控裂缝的实验样品,其中的裂缝参数定量、可控,是更常用的一种实验方法,并开展了很多重要的实验研究。

Assad等^[12]用环氧树脂内嵌入硅橡胶片模拟裂缝介质,研究了裂缝密度对于横波各向异性的影响。Rathor等^[16]利用环氧树脂胶结石英砂制作了含裂缝的双孔隙模型,实验表明Hudson理论对于含水条件下的纵波各向异性计算低于实验测量值,同时证明了孔隙流体流动对地震波的传播有着重要的影响。Tillotson等^[20]研究了含裂缝介质中流体对横波各向异性的影响。Ding等^[21]利用含可控裂缝的双孔隙岩石样品开展了实验测试,并与等效介质理论进行了对比,分析了裂缝密度对纵横波速度及各向异性的影响。实验结果表明Hudson理论对纵波速度预测值稍微高于实验测量值,对于纵波各向异性的理论计算结果偏低,随着裂缝密度的增加,Hudson理论对纵波各向异性的计算结果与实验测量值之间的差异逐渐增高。Amalokwu等^[59]2015年利用硅质胶结的含裂缝人工砂岩开展了实验测试,同时分析了含裂缝介质和部分饱和流体对地震波传播的影响,分析了含水饱和度与纵波速度各向异性的关系,发现在含水饱和度较高时,沿着裂缝法线方向速度升高比沿着裂缝平面方向的更明显,故而使得纵波各向异性随着含水饱和度的升高有降低的趋

势(图6)。帅达等^[60]利用人造裂缝样品对比分析了等效介质理论中裂缝密度的适用性,通过对几种经典理论模型预测结果的对比分析表明,发现当裂隙密度小于12%时,Hudson理论和线性滑动理论对纵波速度各向异性的预测与实测值更吻合;当裂隙密度小于6%时,各向异性自治理论和NIA理论对横波速度各向异性的预测与实测值更吻合。

这类实验中使用含可控裂缝的人造岩石样品,为深入研究裂缝介质地震波传播规律提供了基础。需要说明的是,实验样品中裂缝形态是“薄币状”的短圆柱体,这种裂缝形态和等效介质理论中对裂缝形态的简化相一致,实验结果可以直接与等效介质理论进行对比分析。实际岩石中裂缝的形态特征更为复杂(如粗糙裂缝壁、交叉裂缝等),实验中的可控裂缝是一种较为理想的裂缝形态,在今后的研究中应当针对更复杂的裂缝形态开展研究。

3.3 地震波衰减

地震波衰减特征是油气藏地震勘探中的有效参数。Q值是地下介质衰减特征最重要的表征参数,并且对提高地震资料分辨率、提高地震勘探精度具有重要的作用。地下岩石的衰减特征与岩石的岩性物性参数、孔隙流体赋存状态、地层环境等有关。为了有效的针对某个单一变量开展定性及定量研究,可在实验室制作人造样品,开展地震衰减定量模拟和测试分析。

地震波衰减与非均质散射、流体流动等因素均有关系,关于这些方面的实验研究在其他几个小节中讨

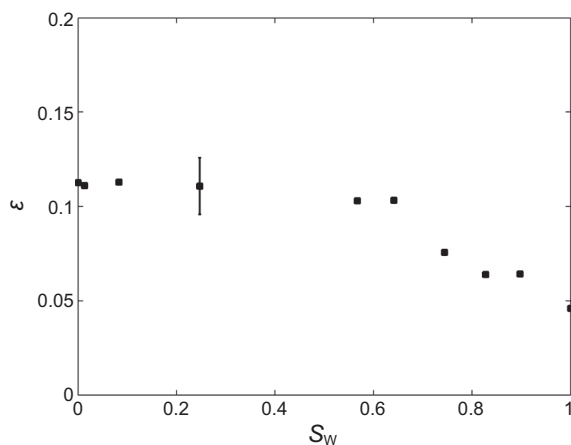


图6 利用人造双孔隙样品研究裂缝介质纵波各向异性与含水饱和度的定量关系(据参考文献[59])

Fig. 6 The quantitatively relationship between P- wave anisotropy parameter with water saturation in fractured media based on synthetic rock with controlled fracture geometries (according to [59])

论, 本小节主要介绍利用人造样品模拟地层衰减特征方面的工作。如, 王国庆^[61]针对不同复合材料的衰减特性进行了分析, 尝试利用不同衰减材料针对多种地质特征的地层衰减特征开展模拟。经过实验分析, 形成了环氧树脂与聚硫橡胶混合材料模拟黄土塬近地表, 环氧树脂与硅橡胶混合材料做为沙漠近地表模拟材料, 衰减混合材料中添加固体颗粒做为平原非均质低速带的模拟材料。高峰^[62-64]等提出了一种地层衰减定量模拟的方法, 基于复合材料模拟地层衰减特征, 形成了复合材料配比与物理参数之间的关系(图7), 结果表明模型参数与实验设计参数一致性较好, 模拟的精度高, 人造样品的频谱衰减特征与野外地层相比具有一致性。地震波衰减特征除了与岩石物性和地质结构有关, 还与孔隙流体有关。司文朋等^[65]制作了一批部分饱和和砂岩储层样品, 利用人造样品模拟了高孔隙度常规砂岩、低孔隙度致密砂岩两类岩石样品, 每类样品都是不同含气饱和度的气—水双相饱和, 通过对不同类型岩石的AVO特征和叠前同步反演结果的分析, 表明了利用AVO特征分辨储层高、中、低含气饱和度的有效性, 反演结果显示密度和纵横波速度比可分别用于指示高孔渗岩石的含气饱和度和低孔渗岩石的含气饱和度。需要注意的是, 衰减的影响因素多、测试难度大, 除了样品自身的岩性、物性参数之外, 测试条件、耦合条件、估算方法等均会对衰减测试结果产生较大影响。模拟岩石的结构特征和速度相对比较精确, 但定量模拟地震波衰减特征较为困难, 还需要今后继续提高实验工艺。

3.4 震电效应

含流体多孔岩石中弹性波场与电磁波场之间存在着能量转换, 即震电效应。地震波在含流体岩石中传播时产生的压力梯度造成孔隙流体流动, 对孔隙中固-液界面双电层产生扰动导致可自由移动电荷和固定电荷发生相对位移, 从而产生第一类震电效应。当地震波传播过程中遇到电化学性质或者弹性性质的分界面, 原有电荷平衡受到扰动导致电荷分布的不对称性, 形成界面电磁场, 进而产生第二类震电效应。由此可见, 震电效应对油气储层的孔隙度、渗透率等关键参数较为敏感, 结合地震波场和震电效应可以更深入地认识储层特性。Chen等^[66]制作了含流体的孔隙介质, 以分析由于地震波传播造成的孔隙介质内部产生的第一类震电效应和由于不同砂岩层界面产生的第二类震电效应, 通过实验还表明了震电转换现象还对砂层中的油—水分界面比较敏感, 说明利用震电效应可以成为有效识别储层流体分布状态的有效方法。Zhu等^[39]利用CNPC物探重点实验室提供的人造含裂缝岩石样品开展了震电测量(20~90 kHz), 结果显示震电转换除了跟孔隙度有关还跟渗透率相关, 震电信号对渗透率各向异性较为敏感, 为直接通过震电测量得到地层渗透率提供了理论可行性, 为利用动电效应实现井下测量地层渗透率奠定了基础。Peng等^[67]利用人工砂岩材料测试了震电波场, 详细讨论了岩石单界面、楔形体界面、孔洞界面等不同类型的震电界面响应特征(图8), 分析地质结构特征对震电界面响应的影响, 实验结果

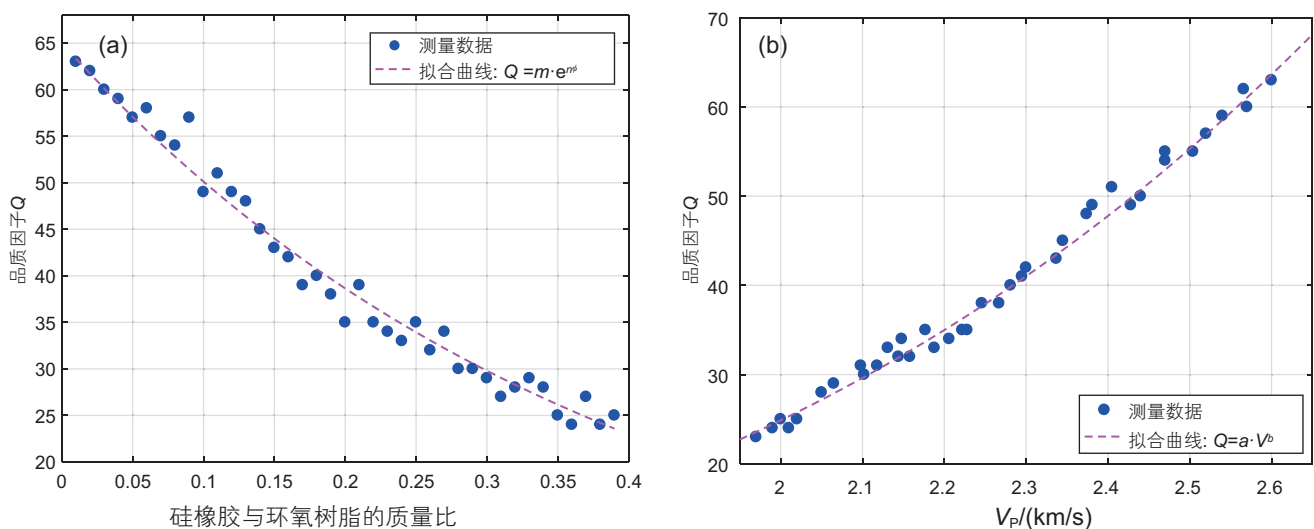


图7 硅橡胶-环氧树脂复合材料的质量比与 Q 值的关系(a)及 $Q-V_p$ 的关系(b)(据参考文献[62])

Fig. 7 The relationship between the mass ratio of silicone rubber to epoxy with Q factor (a) and the relationship between Q factor with V_p (b) (according to [62])

表明震电效应可用来研究震电界面响应和揭示地质结构信息。

利用人造岩石开展震电实验研究有如下优点：首先，由于震电现象对渗透率等参数较敏感，在实验室制作高孔隙度、高渗透率的人造岩石样品，可以更明显的观测到震电现象；其次，天然岩石中的干扰因素较多，而用于震电实验的人造岩石样品具有矿物组分较为单一、孔隙结构简单等特点，可以尽可能地减小其他因素干扰造成的影响。

3.5 波致流(WIFF)机制

地下多孔岩石中通常充填着不同类型的流体，地震波传播过程中在孔隙流体内产生压力梯度，使得流体在孔隙空间内发生流动，这种流体流动机制造成地震波的频散和衰减等现象，影响地震波传播的速度、

各向异性、衰减等。利用天然岩石开展流体饱和实验，测试储层岩石孔隙中不同流体赋存状态时的岩石物理特征，对指导油气勘探、油藏模拟等工作均具有直接的意义。不过，天然岩石物性较为复杂、变化较大，在开展理论对比时容易受过多因素共同作用而产生干扰，因此参数可控、影响因素较少的人造岩石样品被广泛用于开展实验观测和理论对比分析，比如前文提到的Plona利用玻璃珠烧结的多孔样品观测慢纵波和验证Biot理论。

除了孔隙流体的影响之外，近年来随着非常规油气藏勘探开发的需求，对复杂孔隙结构及裂缝介质中波致流机制的研究成为了热点问题。利用人造样品可以制作出孔隙度、孔隙结构、裂缝参数可控的实验样品，并开展定量的岩石物理分析。Ding等^[21]利用人造样品验证了Hudson理论的预测结果，理论预测结

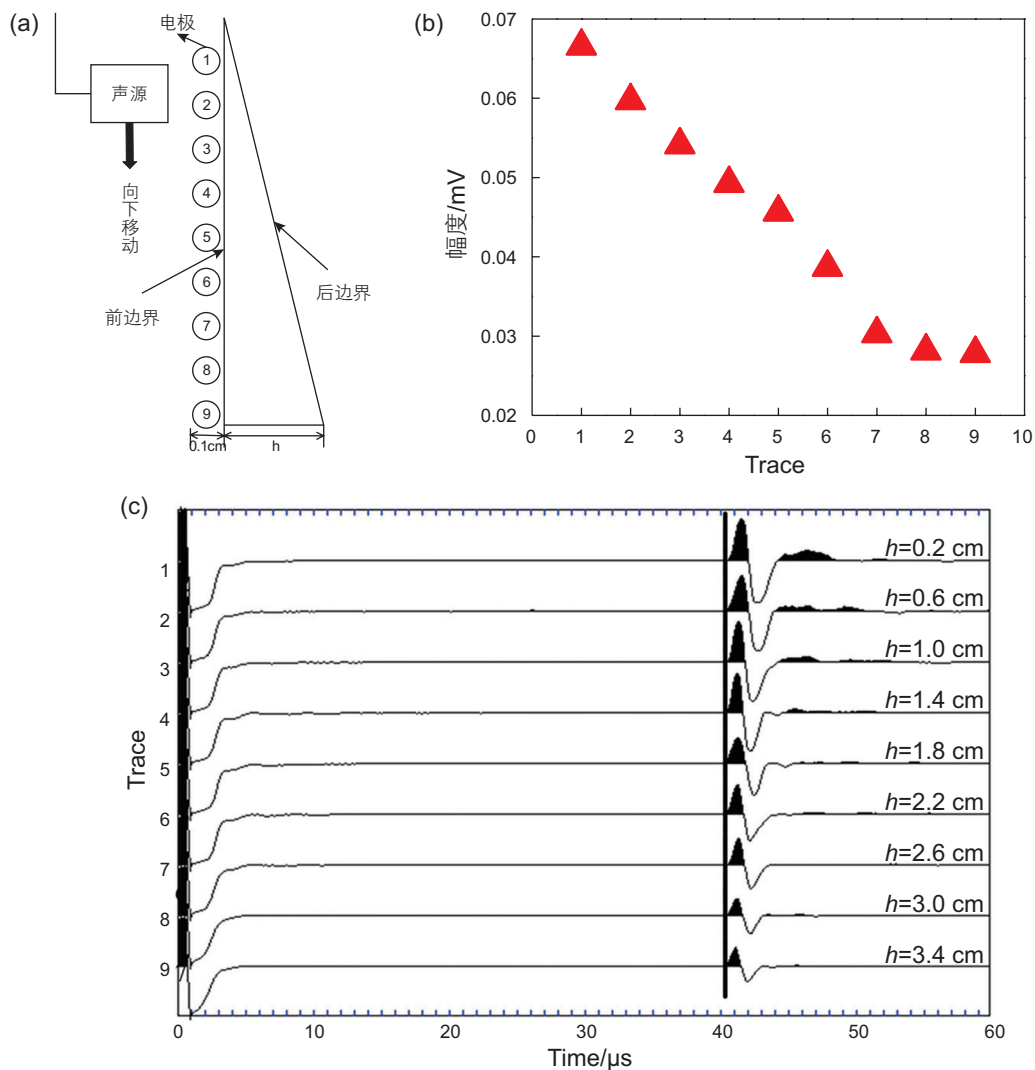


图 8 多孔介质的第二类震电效应 (据参考文献 [67] 修改)

Fig. 8 The seismoelectric interface response in porous wedge sample (modified after [67])

果与实验结果对比分析表明, Hudson理论中关于流体封闭在裂缝空间的高频假设条件, 造成了理论预测高估了纵波速度值, 对纵波各向异性的预测结果偏低。Amalokwu等^[68]研究了流体饱和度对横波分裂的影响, 实验结果表明横波分裂系数受裂缝和流体饱和的共同影响, 在含水饱和度较高时, 由于横波体积模量受到流体体积模量的影响, 含水饱和度的增加使得横波分裂系数降低。波致流机制造成体积模量的变化也是频变的, 从而导致横波分裂系数随着频率的变化。Ding等^[69]对比分析了不同等效介质理论的预测结果与实验结果的差异, 表明Chapman理论考虑了中等尺度流体流动机制的影响, 流体可以在不同孔隙空间或者裂缝—孔隙间流动, 这种考虑到频变的多尺度裂缝理论具有更精确的预测结果, 对纵波速度和各向异性都给出了更准确的估算。Ding等^[41]利用一组含不同直径裂缝的双孔隙样品测量了不同频率纵横波的速度和各向异性, 首次全面分析了多尺度裂缝介质中地震波的散

射机制和波致流机制(图9), 这两种机制都会引起地震波频散, 从而造成速度和各向异性的变化, 实验表明当波长 λ 与裂缝尺度 d 之比小于13, 散射机制起主导作用, 当波长 λ 与裂缝尺度 d 之比大于13, 则波致流机制起主导作用。散射机制主要针对裂缝造成的非均质性对岩石物理特征和地震波场的影响, 由此可利用叠后地震属性开展裂缝预测。波致流机制针对地震波传播过程中的流体流动造成的频散衰减等岩石物理特征和地震波场特征, 基于此可开展叠前裂缝预测和流体识别研究。

3.6 页岩脆性与甜点研究

页岩是典型的低孔、低渗岩石, 且页岩具有地质成因复杂、矿物组分多变、孔隙结构复杂等特点, 给页岩的岩石物理分析和地震属性评价提出了更高的要求。页岩气的经济开采需要依赖于水力压裂技术来实现, 而页岩弹性模量和脆性指数在水力压裂技术中起

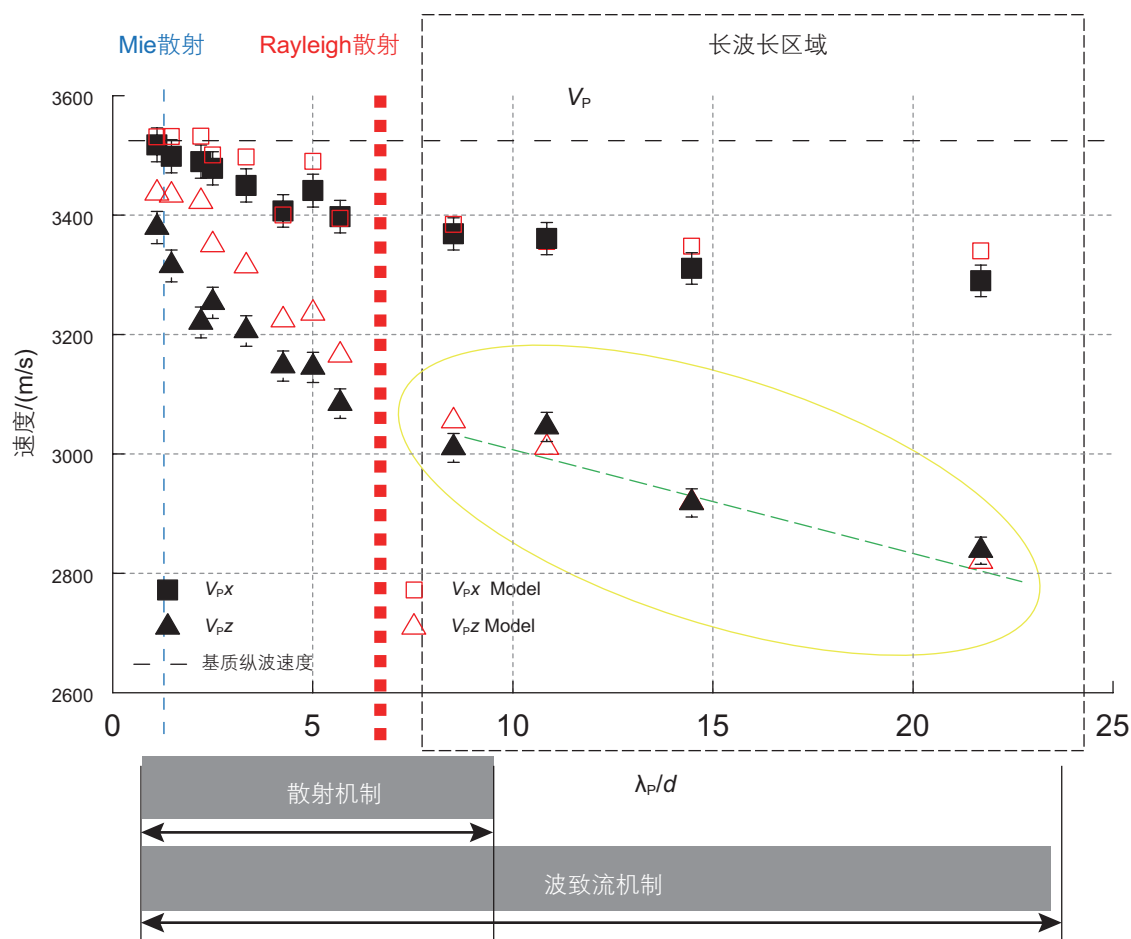


图9 利用人造双孔隙样品研究裂缝介质中地震波散射机制与波致流机制的影响(据参考文献[41]修改)

Fig. 9 The scattering effects and wave-induced fluid flow mechanism in fractured media based on synthetic rock with controlled fracture geometries (modified after[41])

到十分重要的作用。在地球物理学中主要应用基于弹性模量的脆性表征方法和基于矿物组成的脆性表征方法两大类，由于页岩弹性模量具有各向异性，使得岩石脆性评价的可信度和准确度较低。为定量的研究页岩的复杂物性参数、矿物组分、黏土等因素的影响，分析各向异性页岩中脆性系数和甜点评价指标，借助含单一变量的人造页岩样品，对各向异性页岩岩石物理特征及储层脆性评价进行深入研究，研究矿物组分、黏土、孔隙度等单一变量对页岩物性和弹性特征之间的定量关系，可为页岩油气勘探开发提供实验和理论依据，在页岩储层岩石物理特征表征及水力压裂等方面发挥作用。

Luan等^[44]针对人工页岩制作方法的可重复性特点、人工页岩的各向异性等方面做了详细的介绍。针对制作工艺及模拟材料都进行了较大改进，人工页岩样品的矿物组成成分、成岩压力、胶结程度、孔隙度、渗透率等参数均与天然页岩样品相似，最终制作出与真实页岩岩心相近的样品，有效提高了与模拟对象的相似程度。通过实验分析，发现随着黏土矿物的增加，纵、页岩的脆性与杨氏模量显著降低；有机质的增加使得页岩各向异性增加，杨氏模量及泊松比降低。Xie等^[25]发展了该方法，提出了一套基于热压技术的人工有机页岩的标准化建模流程及实验方法。为了模拟富含有机质页岩，选取了一种特殊的腐殖质做为替代干酪根的材料，替代材料与第三类干酪根的化学性质、弹性性质及元素组成等相类似，可以用于模拟富含干酪根等有机质的页岩。在此基础之上，制作了一组以干酪根含量做为单一变量的人工有机页岩样品，其中干

酪根含量变化范围从1%到15%，实验结果表明当干酪根含量低于10%时，纵横波速度与干酪根含量成反比，且接近于线性关系；当干酪根含量大于10%时，纵横波速度比较低(<1.7)可以作为高干酪根含量的指示因子。Gong等^[70]继续发展了该方法，制作出了一组不同高岭土含量的人造页岩，以研究黏土含量对页岩弹性性质及其各向异性的影响。研究表明，人造页岩的速度与黏土含量成反比，黏土的定向排列导致纵横波各向异性增大，随着黏土含量增加各向异性增强，杨氏模量表现出明显的各向异性且与黏土含量呈正相关(图10)。通过对比不同脆性系数计算方法得出，基于页岩矿物百分比的脆性表征方法无法考虑孔隙、温度和压力等因素的影响，无法表征页岩脆性的各向异性特征；其中基于杨氏模量和泊松比的岩石脆性表征方法对岩性变化的敏感性较好，且可以给出各向异性的脆性特征。

通过对比分析可以发现，人造岩石样品可以模拟天然页岩的矿物组分、微观结构和各向异性特征，可以分析某种单一因素造成的影响，不过由于天然页岩中岩石物理特征受多种因素综合影响，无法将人造页岩样品测试结果直接用于天然页岩勘探和开发，但其揭示的各向异性和脆性的规律可为天然页岩的岩石物理分析和甜点评价提供指导和借鉴。另一方面，人造页岩的分析目前主要针对动态岩石物理特征，由于人造页岩的力学性质受胶结剂的影响较大，因此对其静态岩石物理特征和岩石力学特征研究较少，能否用人造页岩反映天然页岩的岩石力学性质还有待商榷。需要指出的是，岩石动态弹性模量是高频测试的结果，

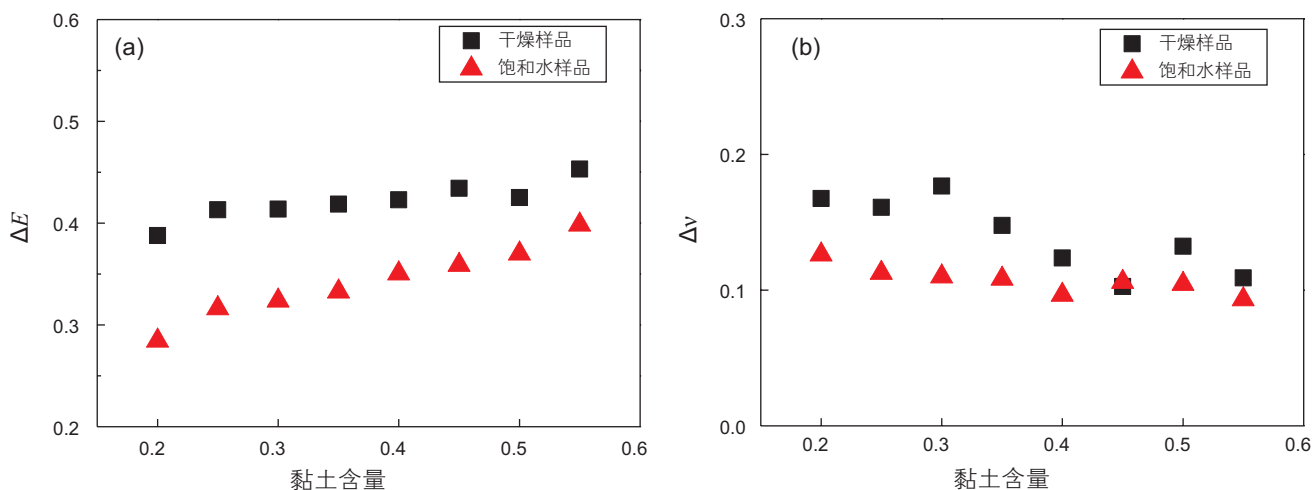


图10 利用人造页岩分析黏土含量对不同方向(a)杨氏模量和(b)泊松比的影响(据参考文献[70])

Fig. 10 The differences of Young's modulus (a) and Poisson ratio (b) along vertical direction and horizontal direction in synthetic shale samples with different clay contents (according to [70])

且力和形变与静态力学测试存在着量级上的差异,岩石的动态弹性参数与静态力学性质之间的差异是不可忽略的。

3.7 水合物声学电学实验

近年来,为服务天然气水合物富集区域的地质调查和开发,开展了一系列天然气水合物实验研究。模拟天然气水合物生成过程中的岩石物理特征,可为天然气水合物的地质调查和地层参数评价提供依据;模拟天然气水合物分解过程中的岩石物理特征,可服务于水合物开采地球物理监测。相比于对实际水合物地层开展研究,实验室中可以动态模拟和实时监测水合物生成和分解的过程中岩石物理性质和地球物理场的变化。Priest等^[71]测量了含水合物松散砂样品,得到刚刚生成少量水合物时,声波速度增加较快,纵横波速度比逐渐减小。Winter等^[72]测试了含有天然气水合物的中粒石英砂,发现含水合物的细粒沉积物的声波速度低于粗粒沉积物,水合物和冰等填充孔隙使得沉积物的剪切模量增强。郑明明^[73]研究了地层温度、压力、电阻率等物性的变化特征,分析了温度、压力、电阻率等的变化情况与水合物的分解,模拟了钻井液侵入过程中,造成电阻率的变化。王彩程等^[74]使用天然气水合物阻抗谱测试系统,将天然海砂放入反应釜中的方形反应器中,得到多孔介质中天然气水合物饱和度越小,复电阻率频散特征越显著。李彦龙等^[75]使用水合物电阻层析成像模拟装置,将洗净烘干后的沉积物样品,放入装置中,加入2.5%的NaCl溶液,通入甲烷气体并降温,表明水合物电阻率变化与排盐速度、水合物生成速率两者有关。杨志强等^[76]模拟实际

海域的温度压力条件,用直径约为40 mm、高度约为50 mm的圆柱状沉积物样品进行沉积物孔隙中天然气水合物的合成实验。得到了水合物饱和度与纵横波速度的关系。Lu等^[77]研究针对天然气水合物的电导率开展了研究,水合物的电导率低于海水和冰但高于地层中的砂,通过实验合成水合物并在水合物分解过程中开展电导率测量,分析在天然气水合物-盐水混合物中水的含量变化对电导率的影响,并利用低温冷冻电子扫描显微镜(Cryo-SEM)成像观测了水合物中物质成分分布状态特征(图11)。

4 总结与展望

人造岩石样品被广泛的应用于岩石物理学、岩石力学、油层物理等油气田勘探开发过程中的生产和科学研究中,在过去几十年中为理解和分析复杂地层介质中油气赋存和运移、地球物理响应、物理化学机制等方面发挥了重要作用。本文介绍了人造岩石样品的实验工艺,总结了针对复杂油气储层开展模拟的方法,以及应用人造岩石样品开展岩石物理实验的研究进展,通过对人造岩石样品研究现状及发展趋势的总结,得到以下认识:

1)人造岩石样品实验工艺取得了较大的发展,从早期利用环氧树脂、有机玻璃、铝等替代材料模拟岩石的结构,逐渐发展到利用与天然岩石类似的矿物材料,采用胶结、烧结、压结、3D打印等多种实验工艺,制作出与天然岩石类似的孔隙结构、孔渗特性、各向异性、弹性、力学性质等,人造岩石样品与天然岩石具有相似性。

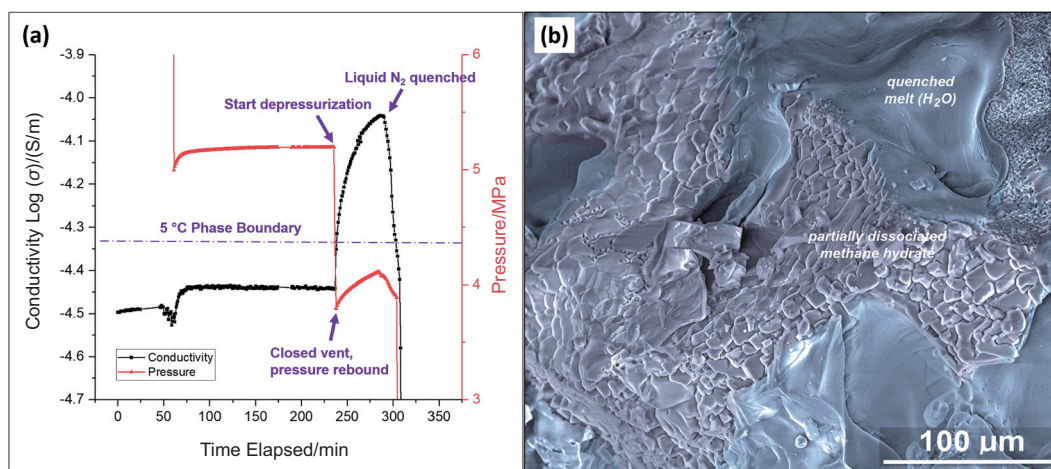


图11 水合物降压分解过程中电导率变化(a)和冷冻电镜照片中水合物和水的分布(b)(据参考文献[77])

Fig. 11 The conductivity changes with the gas hydrate decomposition process (a) and cryo-SEM image shows the distribution of brine and gas hydrate (b)(according to[77])

2)人造岩石样品的模拟对象逐渐从砂岩扩展到了含裂缝岩石、页岩、碳酸盐岩及天然气水合物等多种非常规储层的岩石类型,模拟参数从孔隙度、渗透率等参数发展到孔隙特征、矿物组分、流体饱和状态、微观结构等多种复杂岩石特征。

3)利用人造岩石样品开展了流体渗流、弹性性质、电磁学性质、力学性质等多方面的研究,定量的表征孔隙流体运移、弹性波传播、电场磁场、岩石破裂等多种物理化学过程中的机制。

4)人造岩石样品提供了已知的可控参数,可以实现单一物理量的变化,用于定量的表征复杂岩石中岩性、物性变化对岩石物理参数的影响,建立地球物理响应特征与单一变量之间的关系,为降低油气勘探开发中的多解性、提高油气勘探开发精度提供支撑。

5)利用人造岩石样品开展地震岩石物理实验是一种可行的方法,与天然岩石相结合可以更好地揭示岩石物性对岩石物理特征的影响。但用于岩石力学方面的研究还仍然存在一些问题,岩石力学性质与岩石孔隙结构、岩石矿物成分、岩石颗粒粒径、胶结方式和胶结强度等都有关,目前人造岩心在这方面的模拟还不太理想。

6)由于非常规复杂储层逐渐成为了目前油气勘探开发的主要目标,储层岩石的物性特征通常非常复杂,对人造岩石样品的模拟精度提出了更高的要求。与天然岩石相比,人造岩石样品有一些固有的不足,如孔隙结构相对比较单一、胶结方式和强度与天然岩石有差异、孔隙度和渗透率相对较高等,因此还需要在实验工艺上进一步提高人造岩石与天然岩石的相似程度。

参考文献

- [1] GELL E M, WALLEY S M, BRAITHWAITE C H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(9): 2949–2961.
- [2] 皮彦夫. 石英砂环氧树脂胶结人造岩心的技术与应用[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(28): 6998–7000+7010. [PI Y F. Technology and application of making artificial cores by the cementation of quartzite and colophony[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(28): 6998–7000+7010.]
- [3] 徐洪波, 孙良伟, 胡景新, 等. 砂岩储层全岩矿物模拟岩心的制作方法研究与评价[J]. *海洋石油*, 2009, 29(03): 19–25. [XU H B, SUN L W, HU J X, et al. Research and evaluation of the manufacturing methods of the mineral-wide simulated core in sandstone reservoir[J]. *Offshore Oil*, 2009, 29(3): 19–25.]
- [4] SHERLOCK D H, SIGGINS A F. The development of synthetic CIPS sandstones for geophysical research[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, Denver, Colorado, USA, October 10–15, 2004.
- [5] KUCHARSKI E, PRICE G, LI H, et al. Laboratory evaluation of CIPS cemented calcareous and silica sands[C]. *7th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Adelaide, Australia, July 1–5, 1996.
- [6] SHERLOCK D H, MCKENNA J, EVANS B J. Time-lapse monitoring of immiscible fluid-flow models[J]. *The Leading Edge*, 2001, 20(3): 300–307.
- [7] DE FIGUEIREDO J J S, SCHLEICHER J, STEWART R R, et al. Shear wave anisotropy from aligned inclusions: Ultrasonic frequency dependence of velocity and attenuation[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 193(1): 475–488.
- [8] 唐仁骥, 曾玉华, 姚风英. HNT人造岩样的制作和研究[J]. *石油钻采工艺*, 1998, 20(1): 98–102+110. [TANG R Q, ZENG Y H, YAO F Y. The manufacture and study of HNT artificial rock sample[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, 1998, 20(1): 98–102+110.]
- [9] 夏光华, 魏恒勇, 虞澎澎, 等. 大尺寸系列孔隙度高强人造岩芯的研制[J]. *人工晶体学报*, 2008, 37(01): 248–251+108. [XIA G H, WEI H Y, YU P P, et al. Preparation of large size porosity type high strength artificial cores[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2008, 37(1): 248–251+108.]
- [10] LI Y, NI H. Studies on the porous flow laws in the contact zone between water and polymer flooding in class II oil layers with large physical models[C]. *2009 International Forum on Porous Flow and Applications*, Wuhan, China, 2009.
- [11] WANG W, YUE X A, CHEN Y X. A laboratory feasibility study of surfactant-polymer combinational flooding in low permeability reservoirs[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2013, 34(5): 639–643.
- [12] ASSAD J M, TATHAM R H, MCDONALD J A. A physical model study of microcrack-induced anisotropy [J]. *Geophysics*, 1992, 57(12): 1562–1570.
- [13] 贺振华, 李亚林, 张帆, 等. 定向裂缝对地震波速度和振幅影响的比较——实验结果分析[J]. *物探化探计算技术*, 2001, 23(1): 1–5. [HE Z H, LI Y L, ZHANG F, et al. Different effects of vertically oriented fracture system on seismic velocities and wave amplitude[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2001, 23(1): 1–5.]
- [14] 魏建新. 不同裂缝密度的物理模型研究[J]. *石油物探*, 2002, 41(04): 433–438. [WEI J X. A physical model study of different crack

- densities[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2002, 41(04): 433–438]
- [15] 曹均, 贺振华, 黄德济, 等. 裂缝储层地震波特征响应的物理模型实验研究[J]. *勘探地球物理进展*, 2003, 26(2): 88–93. [CAO J, HE Z H, HUANG D J, et al. Seismic responses to fractured reservoirs by physical modeling [J]. *Progress in exploration geophysics*, 2003, 26(2): 88–93.]
- [16] RATHORE J S, FJAER E, HOLT R M, et al. P- and S-wave anisotropy of a synthetic sandstone with controlled crack geometry [J]. *Geophysical Prospecting*, 1995, 43(6): 711–728.
- [17] 王子振, 王瑞和, 邱浩, 等. 一种多重孔隙结构人造岩心的制备新方法及其应用[J]. *石油物探*, 2015, 54(02): 150–156. [WANG Z Z, WANG R H, QIU H, et al. A new method for artificial core preparation with multiple pore structures and its application [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(02): 150–156.]
- [18] 熊钰, 王帅, 耿站立, 等. 弱胶结高渗疏松砂岩人造岩心制作新技术[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(03): 1474–1479. [XIONG Y, WANG S, GENG Z L, et al. A new technology of making weakly cemented and hypertonic artificial cores of unconsolidated sandstone[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(03): 1474–1479.]
- [19] PLONA T J. Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies [J]. *Applied Physics Letters*, 1980, 36(4): 259–261.
- [20] TILLOTSON P, CHAPMAN M, BEST A I, et al. Observations of fluid-dependent shear-wave splitting in synthetic porous rocks with aligned penny-shaped fractures[J]. *Geophysical Prospecting*, 2011, 59(1): 111–119.
- [21] DING P B, DI B R, WANG D, et al. P and S wave anisotropy in fractured media: Experimental research using synthetic samples [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, 109(0): 1–6.
- [22] ALTOWAIRQI Y, REZAEI R, EVANS B, et al. Shale elastic property relationships as a function of total organic carbon content using synthetic samples[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 133: 392–400.
- [23] HUSSEINY A E, VANORIO T. The effect of micrite content on the acoustic velocity of carbonate rocks [J]. *Geophysics*, 2015, 80(4): L45–L55.
- [24] LUAN X, DI B, WEI J, et al. Laboratory measurements of brittleness anisotropy in synthetic shale with different cementation[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014*. Denver, Colorado, October 26–31, 2014.
- [25] XIE J, CAO J, SCHMITT D R, et al. Effects of kerogen content on elastic properties-based on artificial organic-rich shale (AORS)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(12): 12660–12678.
- [26] ISHUTOV S, HASIUK F J, HARDING C, et al. 3D printing sandstone porosity models[J]. *Interpretation*, 2015, 3(3): SX49–SX61.
- [27] HUANG L, STEWART R R, DYAU R, et al. 3D-printed rock models: Elastic properties and the effects of penny-shaped inclusions with fluid substitution [J]. *Geophysics*, 2016, 81(6): D669–D677.
- [28] FERESHTEJAD S, SONG J J. Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(6): 2065–2074.
- [29] KONG L, OSTADHASSAN M, LI C, et al. Can 3-D printed gypsum samples replicate natural rocks? An experimental study [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(10): 3061–3074.
- [30] SONG R, WANG Y, ISHUTOV S, et al. A comprehensive experimental study on mechanical behavior, microstructure and transport properties of 3D-printed rock analogs [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5745–5765.
- [31] WU L, GROZIC J L. Laboratory analysis of carbon dioxide hydrate-bearing sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(4): 547–550.
- [32] MIYAZAKI K, MASUI A, SAKAMOTO Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B06102).
- [33] HYODO M, LI Y, YONEDA J, et al. Effects of dissociation on the shear strength and deformation behavior of methane hydrate-bearing sediments [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 52–62.
- [34] SI W, DI B, WEI J, 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.
- [35] 王军, 胡恒山, 徐小蓉, 等. 基于动电效应的岩芯渗透率实验测量[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(08): 1953–1960. [WANG J, HU H S, XU X R, et al. Experimental measurement study on rock permeability based on the electrokinetic effect[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(08): 1953–1960.]
- [36] LI D, WEI J, DI B, et al. Effect of fluid saturation on the shear modulus of artificial clay-rich tight sandstones [J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 222(1): 15–26.
- [37] TILLOTSON P, SOTHCOTT J, BEST A I, et al. Experimental verification of the fracture density and shear-wave splitting relationship using synthetic silica cemented sandstones with a controlled fracture geometry [J]. *Geophysical Prospecting*, 2012, 60(3): 516–525.
- [38] 王耀. 双孔隙介质的波场特性研究[M]. 北京: 中国石油大学(北京), 2011. [WANG Y. *Wave field characteristics in double-porosity medium*[M]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing).]

- [39] ZHU Z, TOKSÖZ M N, ZHAN X. Seismoelectric measurements in a porous quartz-sand sample with anisotropic permeability [J]. *Geophysical Prospecting*, 2015, 64(3): 700–713.
- [40] HAN T. Joint elastic-electrical properties of artificial porous sandstone with aligned fractures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(7): 3051–3058.
- [41] DING P, WANG D, LI X Y. An experimental study on scale-dependent velocity and anisotropy in fractured media Based on artificial rocks with controlled fracture geometries [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(7): 3149–3159.
- [42] KAARSBERG E A. Introductory studies of natural and artificial argillaceous aggregates by sound-propagation and X-ray diffraction methods [J]. *The Journal of Geology*, 1959, 67(4): 447–472.
- [43] REVIL A, GRAULS D, BRÉVART O. Mechanical compaction of sand/clay mixtures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B11): 2293.
- [44] LUAN X, DI B, WEI J, et al. Creation of synthetic samples for physical modelling of natural shale [J]. *Geophysical Prospecting*, 2016, 64(4): 898–914.
- [45] WANG Z, WANG R, WANG F, et al. Experiment study of pore structure effects on velocities in synthetic carbonate rocks [J]. *Geophysics*, 2015, 80(3): 207–219.
- [46] FEDRIZZI R M, CEIA M A R D, MISSÁGIA R M, et al. Artificial carbonate rocks: Synthesis and petrophysical characterization [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 163: 303–310.
- [47] 赵群, 郭建, 郝守玲, 等. 模拟天然气水合物的岩石物理特性模型实验[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(03): 649–655. [ZHAO Q, GUO J, HAO S L, et al. Experiments of physical modeling for petrophysical properties of natural gas hydrate[J]. *Chinese journal of geophysics*, 2005, 48(03): 649–655.]
- [48] 顾轶东, 林维正, 张剑, 等. 模拟岩芯中天然气水合物超声检测技术[J]. *声学技术*, 2006, 25(03): 218–221. [GU Y D, LIN W Z, ZHANG J, et al. Detection of nature gas hydrates in rocks using ultrasound[J]. *Technical acoustics*, 2006, 25(03): 218–221.]
- [49] YUN T S, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B04106).
- [50] 业淦光, 张剑, 胡高伟, 等. 天然气水合物饱和度与声学参数响应关系的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(04): 1156–1164. [YE Y G, ZHANG J, HU G W, et al. Experimental research on relationship between gas hydrate saturation and acoustic parameters[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(04): 1156–1164.]
- [51] PRIEST J A, REES E V L, CLAYTON C R I. Influence of gas hydrate morphology on the seismic velocities of sands [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 2009, 114(B11).
- [52] 周伟华. 天然气水合物岩心样品检测分析技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. [ZHOU W H. Study on detection and analysis technology of natural gas hydrate-bearing core samples[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.]
- [53] YIN H, MAVKO G, MUKERJI T, et al. Scale effects on dynamic wave propagation in heterogeneous media [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(23): 3163–3166.
- [54] LIU C, WEI J, DI B, et al. Experimental study of wave propagation in random media with different heterogeneity scales [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2017, 14(4): 878–887.
- [55] ZATSEPIN S V, CRAMPIN S. Modelling the compliance of crustal rock—I. Response of shear-wave splitting to differential stress [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 129(3): 477–494.
- [56] CHAPMAN M, ZATSEPIN S V, CRAMPIN S. Incorporating stress-sensitivity into dynamic poro-elasticity[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, Calgary, Alberta, Canada, August 6–11, 2000.
- [57] PEACOCK C S, McCANN C, SOTHCOTT J, Astin T R. Seismic velocities in fractured rocks: an experimental verification of Hudson's theory[J]. *Geophys Prospect*, 1994, 42(1): 27–80.
- [58] WANG X, GE H, WANG J, WANG D, CHEN H. Evaluation of the micro-cracks in shale from the stress sensitivity of ultrasonic velocities [J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49(12): 4929–4934.
- [59] AMALOKWU K, CHAPMAN M, BEST A I, et al. Water saturation effects on P-wave anisotropy in synthetic sandstone with aligned fractures [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 202(2): 1088–1095.
- [60] 帅达, 魏建新, 狄帮让, 等. 等效介质理论中裂缝密度的适用性研究 [J]. *地球物理学报*, 2019, 62(07): 2697–2710. [SHUAI D, WEI J X, DI B R, et al. Physical modeling of the influence of crack density on the accuracy of effective medium theory[J]. *Chinese journal of Geophysics*, 2019, 62(07): 2697–2710.]
- [61] 王国庆. 近地表衰减的模型实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2014. [WANG G Q. The experimental research of nearsurface attenuation use physical modeling[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2014.]
- [62] 高峰, 魏建新, 狄帮让, 等. 地层衰减定量模拟的地震物理模拟方法 [J]. *地球物理学报*, 2018, 61(12): 5019–5033. [GAO F, WEI J X, DI B R, et al. A method of seismic physical modeling for quantitative simulation of formation attenuation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(12): 5019–5033.]

- [63] GAO F, WEI J X, DI B R. Seismic physical modeling and quality factor [J]. *Applied Geophysics*, 2018, 15(1): 46–56.
- [64] GAO F, WEI J X, DI B R. Ultrasonic attenuation estimation based on time-frequency analysis [J]. *Applied Geophysics*, 2019, 16(4): 414–426.
- [65] 司文朋, 狄帮让, 魏建新. 部分饱和砂岩储层地震物理模拟及含气饱和度预测分析 [J]. *地球物理学报*, 2017, 60(4): 1547–1556. [SI W P, DI B R, WEI J X. Seismic physical modeling and gas saturation prediction of partially-saturated gas sand reservoir [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(4): 1547–1556.]
- [66] CHEN B, MU Y. Experimental studies of seismoelectric effects in fluid-saturated porous media [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2005, 2(3): 222–230.
- [67] PENG R, DI B, WEI J, et al. Experimental study of the seismoelectric interface response in wedge and cavity models [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 210(3): 1703–1720.
- [68] AMALOKWU K, CHAPMAN M, BEST A I, et al. Experimental observation of water saturation effects on shear wave splitting in synthetic rock with fractures aligned at oblique angles [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 200(1): 17–24.
- [69] DING P B, DI B R, WANG D, et al. Measurements of seismic anisotropy in synthetic rocks with controlled crack geometry and different crack densities [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2017, 174(5): 1907–1922.
- [70] GONG F, DI B R, WEI J X, et al. Experimental investigation of the effects of clay content and compaction stress on the elastic properties and anisotropy of dry and saturated synthetic shale [J]. *Geophysics*, 2018, 83(5): 195–208.
- [71] PRIEST J A, BEST A I, CLAYTON C R I. A laboratory investigation into the seismic velocities of methane gas hydrate-bearing sand [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B4).
- [72] WINTERS W J, WAITE W F, MASON D H, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56(1): 127–135.
- [73] 郑明明. 人造水合物岩心研制与实验研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2016. [ZHENG M. Development and experimental research of artificial hydrate-bearing cores [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.]
- [74] 王彩程, 邢兰昌, 陈强, 等. 含甲烷水合物多孔介质的复电阻率频散特性与模型 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(18): 46–54. [WANG C C, XING L C, CHEN Q, et al. Frequency dispersion characteristics and modeling of complex resistivity of porous medium containing methane hydrate [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(18): 46–54.]
- [75] 李彦龙, 孙海亮, 孟庆国, 等. 沉积物中天然气水合物生成过程的二维电阻层析成像观测 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(10): 132–138. [LI Y L, SUN H L, MENG Q G, et al. 2-D electrical resistivity tomography assessment of hydrate formation in sandy sediments [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(10): 132–138.]
- [76] 杨志强, 何涛, 朱贺, 等. 含甲烷水合物松散沉积物超声波性质的实验研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(02): 271–282. [YANG Z Q, HE T, ZHU H, LAN K, LU H L. Experimental study of the ultrasonic velocity of methane hydrate-bearing unconsolidated sediments [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(02): 271–282.]
- [77] LU R, STERN L A, DU FRANE W L, et al. The effect of brine on the electrical properties of methane hydrate [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(11): 10877–10892.

(责任编辑 唐跟阳 编辑 付娟娟)