2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2139-2151
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

范小根,刘卫华,司文朋,等.2026.饱水颗粒砂箱模型地震物理模拟方法研究.地球物理学进展,41(5):2139-2151,doi:10.6038/pg2026JJ0323.
FAN XiaoGen, LIU WeiHua, SI WenPeng, *et al*. 2026. Study on seismic physical simulation methods for saturated granular sandbox models. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2139-2151,doi:10.6038/pg2026JJ0323.

饱水颗粒砂箱模型地震物理模拟方法研究

Study on seismic physical simulation methods for saturated granular sandbox models

范小根[1,2],刘卫华[1,2,3*],司文朋[1,2],邢廷栋[1,2],王莹[1,2],焦艳艳[1,2]
FAN XiaoGen[1,2], LIU WeiHua[1,2,3*], SI WenPeng[1,2], XING TingDong[1,2], WANG Ying[1,2], JIAO YanYan[1,2]

1. 中石化石油物探技术研究院有限公司,南京 211103
2. 中国石化地球物理重点实验室,南京 211103
3. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083
1. *SINOPEC Geophysical Research Institute Co.,Ltd.,Nanjing* 211103,*China*
2. *Sinopec Key Laboratory of Geophysical Research,Nanjing* 211103,*China*
3. *School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing, Beijing* 100083,*China*

摘 要 针对砂箱-地震综合模拟实验中材料力学-声学性能协同适配的难题,本文通过多类型材料筛选与制模工艺优化,构建兼具构造变形能力与声波传导特性的实验模型,为综合物理模拟提供材料设计基础.不同材料的声学响应特征表明:(1)饱水颗粒模型通过消除孔隙气穴、抑制结构缺陷,降低声波能量耗散,提升透射波初至清晰度及振幅稳定性;(2)增大模型压实程度可强化颗粒间耦合作用、减弱模型内部非均匀性散射,改善声波信号穿透能力;(3)界面两侧材料粒径的差异驱动层间界面结构重组,形成声阻抗差异,增强反射波能量,提高模型界面的成像能力.实验证实,静置压实可降低饱水颗粒模型的声波衰减,粒径分异有利于形成层间高声阻抗差,两者协同增强反射能量与穿透能力,实现了厚度 > 10 cm 层状模型的清晰反射成像.该方法解决了松散介质力学变形与声学响应同步观测的技术瓶颈,为构造变形过程的地震波场演化研究提供了实验基础,对天然松散地质体的地震波传播机制模拟具有参考价值.

Abstract The integration of seismic physical simulation with structural analog modeling represents a significant frontier in experimental geophysics, yet it is hampered by a fundamental material science challenge. Traditional seismic models, fabricated from solidified polymers or resins, are static constructs that lack the dynamic, gravity-driven deformation processes inherent to natural tectonics. Conversely, structural analog models, which expertly simulate faulting and folding using loose granular materials like dry sand, are typically seismically opaque due to intense wave scattering and attenuation at grain-to-grain contacts filled with air. This study was initiated to develop and validate a novel methodological framework that bridges this divide. Its primary objective is to create a physical modeling system wherein the kinematic evolution of geologic structures and the concurrent seismic wavefield response can be observed simultaneously, thereby enabling a direct study of the interplay between tectonic processes and their seismic expression. To achieve this goal, we conducted a comprehensive investigation into the acoustic properties of potential modeling materials. A suite of standard samples, including paraffin-composite materials, mastic, and various water-saturated granular materials (e.g., quartz sand, glass microbeads, brown fused alumina), was prepared using different protocols. A key innovation was the development of an "underwater molding" technique for saturating granular materials, which was systematically compared against immersion and permeation methods. The acoustic characterization was performed using an ultrasonic transmission and reflection

收稿日期 2025-12-25; **修回日期** 2026-03-06. **投稿网址** http://www.progeophys.cn
基金项目 中石化科技部技术前瞻项目(P24247)资助.
第一作者简介 范小根,男,1988 年生,博士,工程师,主要从事地震物理模拟、构造物理模拟等方面研究.E-mail:fanxiaogenhao@126.com
***通讯作者** 刘卫华,男,1978 年生,高级工程师,主要从事岩石物理、波传播规律以及油气藏储层反演等方面的研究.
E-mail:liuwh.swty@sinopec.com

关键词 地震物理模拟;饱水颗粒模型;静置压实;声波透射;界面反射成像

testing system. We meticulously analyzed the transmitted waveforms' first-arrival clarity, amplitude stability, and frequency content, as well as the reflection energy and continuity from engineered interfaces within layered models. The research specifically focused on quantifying the effects of two critical parameters: (1) the settling time of the saturated granular pack, which governs gravitational compaction and pore-fluid homogenization, and (2) the particle-size contrast between adjacent layers, which controls the genesis of acoustic impedance contrasts. Our systematic experiments yielded several key findings. First, the underwater molding method proved superior in eliminating entrapped air within pore spaces, thereby producing transmitted signals with sharp first arrivals, high amplitude, and minimal post-signal coda, unlike the oscillatory and noisy signals from samples prepared by other methods. Second, the settling time was identified as a critical control on signal quality. Prolonged settling (up to 72 hours) dramatically enhanced high-frequency (450 ~ 600 kHz) content, suppressed low-frequency noise and reverberations, and sharpened the transmitted wavelet. This is attributed to compaction-driven enhancement of grain-contact stiffness and homogenization of the pore-fluid distribution. Third, for interface imaging, the mineralogical density difference between layers was found to be a less effective generator of reflection coefficients compared to particle-size contrast. A significant difference in grain size catalyzes the inter-fingering of fine and coarse grains at the boundary, creating a distinct, dense transition zone with a sharp porosity gradient and a sufficiently high acoustic impedance contrast to produce strong, continuous reflections in seismic profiles. Finally, in a practical demonstration, a multi-layered model over 10 cm thick, constructed with optimized particle-size contrasts and subjected to extended settling, yielded a reflection profile with markedly enhanced continuity, energy, and resolution of internal interfaces, confirming the synergistic effect of compaction and size differentiation. This research successfully establishes a robust and effective methodology for "seismo-tectonic" physical simulation using water-saturated granular materials. The method fundamentally resolves the long-standing trade-off between mechanical realism and acoustic transparency in analog modeling. By providing a material system that deforms under gravitational and boundary stresses while permitting high-quality seismic imaging, it opens new avenues for investigating the dynamic evolution of seismic wavefields throughout tectonic deformation processes, such as thrust faulting or extensional graben formation. The findings offer profound insights for interpreting seismic data from natural unconsolidated sequences, including subaqueous sediments and glacial tills, where similar granular and saturated conditions prevail.

Keywords Seismic physical modeling; Water-saturated granular models; Static compaction; Acoustic wave transmission; Interface reflection imaging

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0323

CSTR:32085.14.pg2026JJ0323

0 引 言

地震物理模拟实验基于相似性原理,将实际地质体按比例缩制成实验室物理模型,利用超声波检测技术模拟野外地震勘探过程.该方法通过分析超声波在不同介质中的传播响应,揭示复杂介质的地震波场传播规律,验证地震数据处理与解释方法的有效性,同时降低地球物理解释的多解性,为油气勘探提供重要支撑.该技术具有成本低、效率高、模型参数可控等优势,被广泛应用于地震观测系统优化、典型地质模型成像特征研究及波场传播机制分析等领域(郝守玲和赵群,2002;熊金良等,2006;赵群,2008;朱海龙等,2008; Gao *et al.*,2018;邢廷栋等,2021;司文朋,2022;司文朋等,2023).地震物理模拟实验的关键在于选用合适实验材料构建符合地质特征的物理模型.自然界地下结构普遍存在速度变化快、分布不均的特性,尤其多期构造叠加形成的破碎带,其速度场呈现高度非均质性.当前制模材料形成多体系协同发展的格局(李智宏等,2009;王莹,2022):环氧树脂凭借其优异的黏结性、耐磨性、力

学性以及化学稳定性特点,成为地震物理模型制作的常用主料,并通过掺杂改性以满足不同模型的制作需求.硅橡胶与环氧树脂共混体系通过配比优化可实现 1000 ~2600 m/s 的声速精准调控(魏建新和狄帮让,2006),其高流动特性可有效复现简单构造形态,经相似因子验证满足常规地质体模拟需求.针对高速地层模拟,硅微粉或矿石粉末的添加可使材料声速提高至 2850 m/s,同时增强超声波穿透性与模型稳定性(裴宇翀等,2016).环氧树脂-聚硫橡胶复合材料因具备低波速(~800 m/s)与强衰减特性,成为地震波吸收衰减机制研究的重要载体(高峰,2018).此外,利用复合吸水材料可构建含流体储层模型,为孔隙-裂缝介质波场响应研究提供技术支撑(刘东方等,2015).

现有基于有机高分子材料固结技术构建的地震物理模型本质上是地质结构的"静态映射体"(司文朋等,2019),其建模过程受限于研究者对地质模式的先验认知及制模工艺精度.尽管高精度雕刻与 3D 打印技术显著提升了模型的几何保真度,但因缺乏地质动力学直接约束,此类模型仍难以准确重构复杂变形带(如山前冲断带)的空间展布特征,导致模拟波场响应及地震成像特征难以有效指导实际地震资料的构造解释.构造物理模拟通过再现地质动力学过程,解决复杂变形构造模式构建问题.采用砂箱实验、离心加载等手段,在重力场与边界力约束下再现断层发育、褶皱变形等地质动力学过程,实现模型构建从"人工预设"转向"自然演化"(贾东等,2023),保障了模型地质结构的合理性,尤其适用于复杂构造系统(如盐底辟、逆冲推覆带)的三维几何形态生成.然而,传统构造物理模型采用的松散颗粒材料(如干燥石英砂、玻璃微珠),其颗粒间孔隙被空气完全充填,引发剧烈声波衰减,无法直接获取模型复杂变形样式的地震波场数据.前人通过集成构造物理模拟与地震物理模拟的实验设计,初步验证了动态地震物理模拟的可行性(Sherlock and Evans, 2001; Krawczyk *et al.*,2013),但并未对影响模型成像效果的内在因素开展系统分析.

本文通过系统研究饱水颗粒介质的声学传播特性,阐明了影响超声波穿透效果的主要因素.基于颗粒材料粒径调控与制模工艺改进,成功实现了高信噪比界面反射波组的有效获取.该技术显著提升了砂箱物理模型的地震波模拟能力,为复杂构造变形带的地震物理模拟研究提供了实验方法支撑.

1　砂箱地震物理模型材料声学特征研究

1.1　实验材料选择与样品制备

开展构造变形与地震波传播的综合物理模拟实验,要求模型材料兼具力学与声学相似性,以满足砂箱地震物理模型的关键性能需求.为确保模型真实反映原型构造变形过程,依据构造物理模拟相似性原理,实验需选用与地质体流变特性相匹配的材料(Reber *et al.*,2020).研究初步选取了两类常用材料(Schellart and Strak,2016):塑性材料(石蜡、胶泥)与脆性材料(干燥石英砂、玻璃微珠等颗粒材料).针对地震物理模拟实验需求,材料需具备良好的超声波穿透能力以保障地震波在模型内部有效传播,同时需具有清晰的界面反射信号可分辨性,便于识别与分析模型内部结构界面产生的地震反射信号.为评估不同材料的声学响应特征,制作了 15 组标准试样,通过对比分析优选出适用于砂箱地震物理模型的制模材料与成型工艺.具体制样方法如下:

(1)塑性材料:以石蜡为基体材料,通过柱形模具制备标准试样.采用热风枪将石蜡加热至熔融态后,考虑制备具有不同声阻抗特性的制模材料,均匀掺入不同粒径石英砂及棕刚玉微颗粒,经机械搅拌形成均匀混合物后自然冷却固化.脱模后对试样端面进行精密打磨处理以保证表面平整度(图 1a、b,表 1).以胶泥为基体材料,将胶泥压实填充至不同规格的柱形模具中,脱模后获得基础样品;将掺有细粒石英砂的改性油泥填充至柱形模具,制成具备不同声学特征的对比试样(图 1c,表 1).

(2)脆性材料:针对松散颗粒材料的超声衰减特性,采用饱水法消除颗粒间孔隙空气影响.设计三种水饱和处理方案:①3-1 样品采用浸没饱水法,将干砂充填模具后直接浸水饱和;②3-2 样品通过表面喷淋渗透饱水;③3-3 样品实施水下原位成型.另选用彩色石英砂、玻璃微珠、棕刚玉以及不同粒径石英砂制备声学特征对比样,所有脆性样品成型尺寸均为 5 cm × 5 cm × 10 cm,饱水时间统一控制为 24 h(图 1d、f,表 1).

1.2　实验材料透射波响应特征

基于超声波透射法,利用超声测试系统对实验样品开展波场特征测试(图 1g),测试结果见表 1,分析不同实验材料的透射波响应特征,并分析影响材料超声波穿透性能的因素,最终筛选出适用于砂箱地震物理模拟实验的最佳制模材料及工艺组合.

表 1 试样材料、制样方法及测试参数

Table 1 Sample materials, preparation methods, and testing parameters

样品编号	材料	制样方法	密度/(g/cm³)	纵波速度/(m/s)
1-1	石蜡、120 目石英砂	熔融浇铸法	1.12	1927
1-2	石蜡,80~120 目石英砂	熔融浇铸法	1.17	1763
1-3	石蜡、100 目棕刚玉	熔融浇铸法	1.23	1801
2-1	纯净胶泥(1.5 cm 长)	压实脱模法	1.57	1481
2-2	胶泥、石英砂	压实脱模法	1.69	—
2-3	纯净胶泥(5 cm 长)	压实脱模法	1.57	—
3-1	100 目石英砂	浸没饱水法	2.40	1623
3-2	100 目石英砂	渗透饱水法	2.40	1796
3-3	100 目石英砂	水下成型法	2.40	1594
4-1	绿色石英砂	水下成型法	2.40	1534
4-2	玻璃微珠	水下成型法	2.23	1728
4-3	100 目棕刚玉	水下成型法	3.52	1569
4-4	20~40 目石英砂	水下成型法	2.40	1442
4-5	40~80 目石英砂	水下成型法	2.40	1557
4-6	80~120 目石英砂	水下成型法	2.40	1581

注:石蜡及胶泥相关材料采用水饱和法测试密度,石英砂等颗粒饱水密度通过公式 $\rho_{等效}=\rho_{颗粒}(1-\varphi)+\rho_{水}\varphi$ 计算获得.

以石蜡为基体的复合材料(图 2a)可获得质量较优的超声波透射信号,其波形具有清晰的初至相位和完整的振荡特征,初至时间的差异主要源于试样几何尺寸的差异.但与纯水介质的透射波形(图 2d)相比,该复合材料的信号振幅显著降低.值得注意的是,砂颗粒的粒径变化对信号质量具有显著影响:当掺入颗粒的目数降低(即粒径增大)时,粗颗粒在石蜡基质中的离散分布会形成大量声阻抗突变界面,引发超声波散射效应,导致透射波能量衰减加剧(图 2b、c).此外,在石蜡-矿砂复合体系冷却固结过程中,由于熔体内部温度场分布不均,矿物颗粒易发生迁移聚集,形成局部富集区域,这种固结缺陷使材料的声学非均质性明显增加.显然,石蜡基复合材料声学性能受多重因素制约,难以满足超声波检测对介质均质性与低衰减性的核心要求.

胶泥基复合材料作为超声波传播介质存在显著缺陷.当纯胶泥试样厚度为 1 cm 时(图 3a),其透射信号尚能呈现清晰的初至波和较为完整的波形特征;然而当试样厚度增加至 5 cm 时(图 3b),由于胶泥自身的高黏滞特性导致超声波在传播过程中被完全吸收衰减,接收端无法检测到任何有效信号.通过掺入粒径为 100 目的石英砂颗粒对胶泥进行改性后,即便维持试样厚度为 1 cm,超声波在介质内部的散射效应导致信号振幅严重衰减,亦难以获得有效信号(图 3c).此外,胶泥暴露空气中容易自然固化并形成微裂隙,会加剧声波能量耗散.上述实验结果表明,胶泥材料力学性质极不稳定,对声波强吸收的声学特性也与常规地震物理模型超声波传播介质所需的高透射性、低衰减性基本要求相悖,因此不适用于地震物理模型的制作.

饱水颗粒材料的制样工艺显著影响超声波透射信号质量.浸没饱水法(图 4a)因试样快速浸水,水分急剧渗入导致试样内部应力不均,引发网状裂隙(宽度约 2 mm),并迅速被水填充,裂隙与周围基质间的显著声阻抗差异,但导致波形持续振荡,信号信噪比显著降低;渗透饱水法(图 4b)由于水分缓慢渗透无法完全驱替颗粒孔隙内的空气,残留气穴诱发超声波发生多重散射与反射,导致透射波能量分散,同时反射波与直达波相互叠加,造成波形振荡持续,信号有效信息被严重干扰.相比之下,水下成型法(图 4c)通过匀速筛落石英砂至充水模具,确保颗粒间隙被水完全填充,有效消除空气对声波的吸收衰减作用.该方法制备的试样透射信号表现出初至波前陡峭、振幅显著的特征,能量衰减微弱,波形持续时间短且无明显后续振荡,清晰反映了以透射波为主导的传播模式,表明介质内部散射效应得到有效抑制.其高保真信号特征(初至清晰、振幅稳定、衰减可控)充分满足了地震物理模型对介质均匀性与声学稳定性的核心要求.

实验表明,石蜡基与胶泥基材料因强衰减、非均质性等缺陷难以满足地震物理模型声学要求,而饱水颗粒材料,通过水下成型法可消除孔隙气穴与结构缺陷,实现透射信号高保真(初至清晰、振幅稳定、衰减可控),可作为物理模型构建的优选材料.

1.3 饱水颗粒材料透射信号影响因素分析

针对不同颗粒材料(表 6)的饱水模型声学特征测试结果极不稳定.系统对比不同静置时间下的透射波时域信号(图 5、图 6),研究发现饱水石英砂的静置时间对其内部超声波透射波的传播特性具有显著影响,延长静置时间能够有效改善超声波在介质中的传播信号质量.实验初期,样品静置时间较短,透射波初至信号清晰可辨,但有效信号持续时间较长,伴随明显的持续性振荡波动,且在有效信号之后出现持续的低频尾波(图 5a);对应的频谱分析结果(图 6a)显示,此时信号能量主要集中于低频段

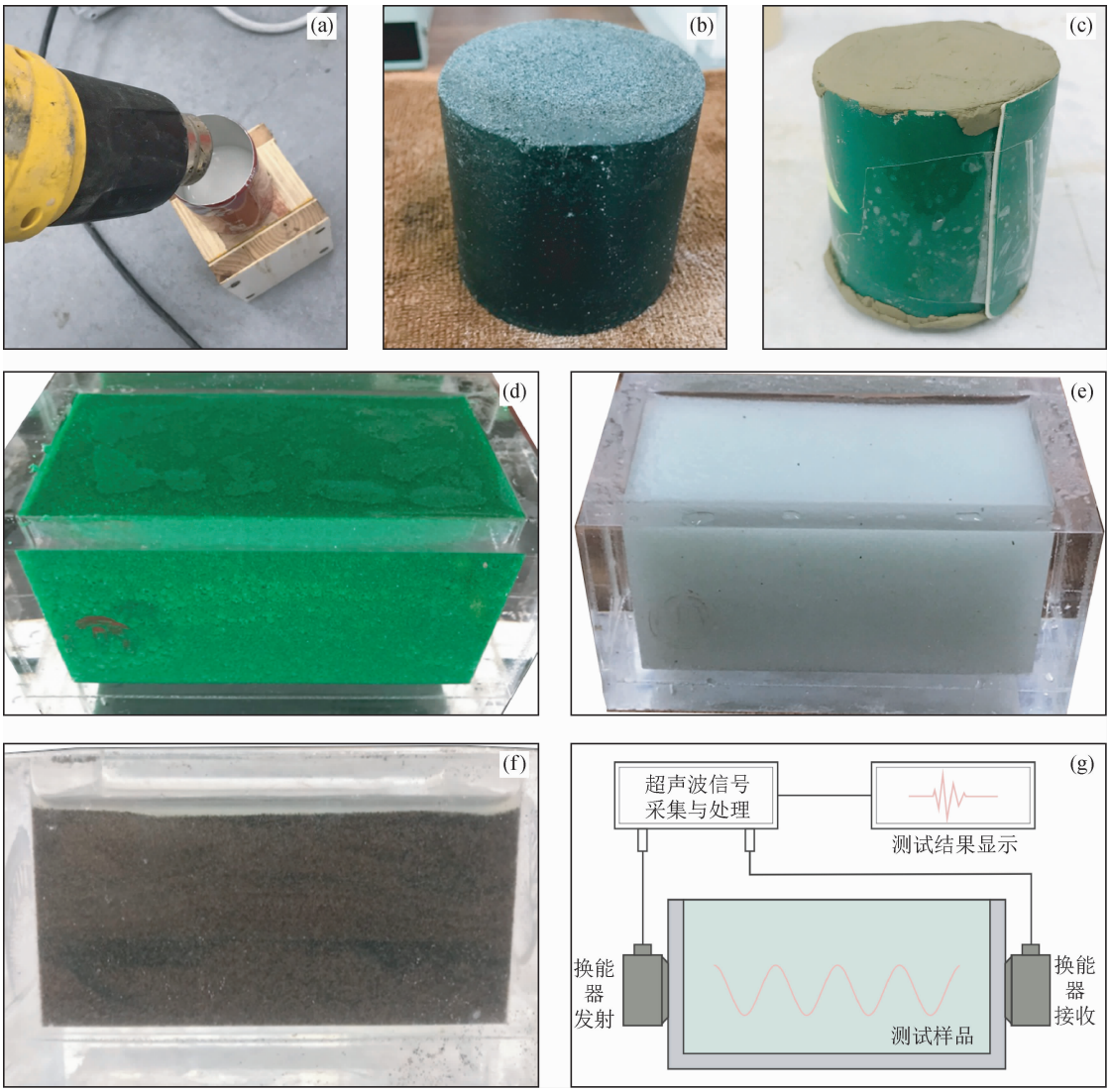


图 1　实验样品及测试方法

(a)石蜡试样制样方法;(b)棕刚玉-石蜡基复合试样;(c)胶泥试样;(d)饱水绿色石英砂试样;(e)饱水玻璃微珠试样;(f)饱水棕刚玉试样;(g)透射波测试方法.

Fig. 1　Experimental samples and testing methods

(a) Paraffin sample preparation method; (b) Alumina-paraffin composite sample; (c) Mastic sample; (d) Water-saturated green quartz sand sample; (e) Water-saturated glass microsphere sample; (f) Water-saturated brown fused alumina sample; (g) Experimental sample transmission wave characteristics testing method.

(60 kHz 与 150 kHz),高频成分(450 ~ 600 kHz)占比较低. 随着静置时间延长至 24 h,透射波信号质量呈现显著的改善,有效信号持续时间缩短,初至信号前沿陡峭度增加,低频尾波振幅减弱(图 5b);相应的频谱分析结果(图 6b)显示,透射波信号中高频成分显著提升. 当静置时间达到 72 h,透射波呈现出最佳状态,表现为初至尖锐的双周期高频振荡(450 ~ 600 kHz),低频尾波持续时间及能量进一步降低(图 5d);对应的频谱(图 6d)清晰表明高频成分占绝对主导地位. 时域与频域特征的系统性演变深刻揭示:在饱水石英砂介质中,有效的超声波透射信号主要由高频成分(450 ~ 600 kHz)承载;而观测到的低频振荡及持续性尾波,本质上源于颗粒介质内部复杂的物理相互作用过程,构成了主要的干扰噪声源.

透射波信号质量随静置时间改善的时间依赖性,本质上是重力压实作用驱动颗粒介质从非平衡态向稳定态演化的直接物理体现. 压实作用对声波传播行为的影响主要表现在两个方面:(1)颗粒骨

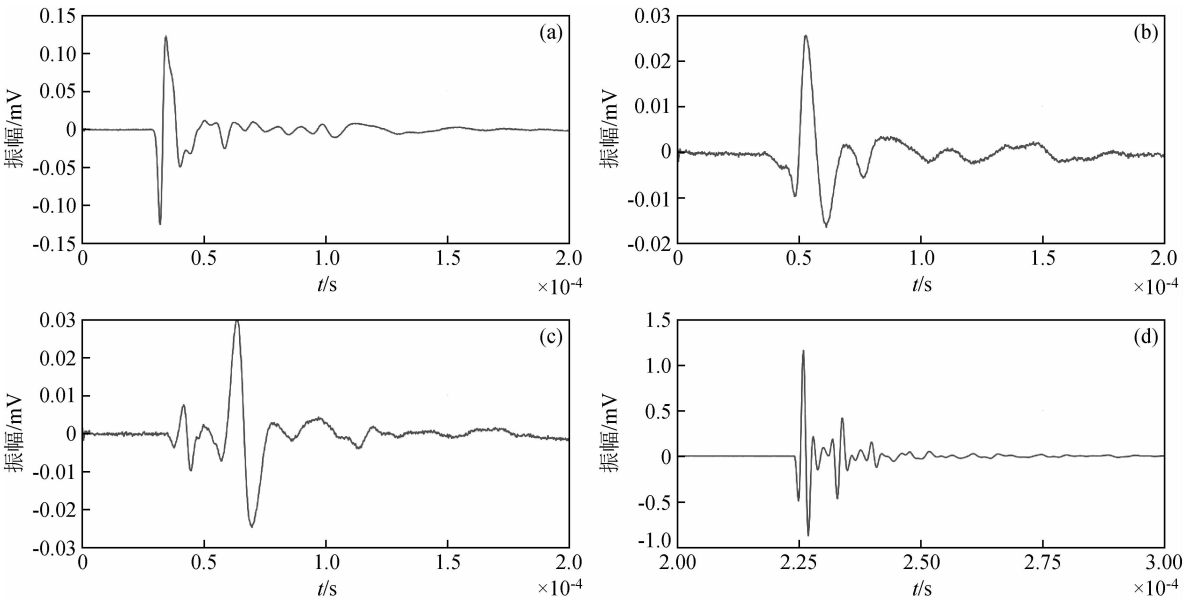


图 2 石蜡基材料与纯水透射波声波曲线

Fig. 2 Transmitted acoustic waveforms: paraffin matrix material and pure wate

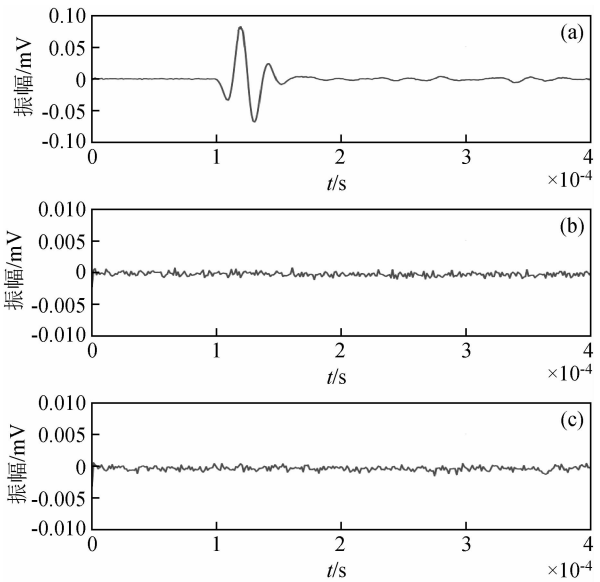


图 3 胶泥基材料透射波声波曲线

Fig. 3 Transmitted acoustic waveforms of mastic matrix material

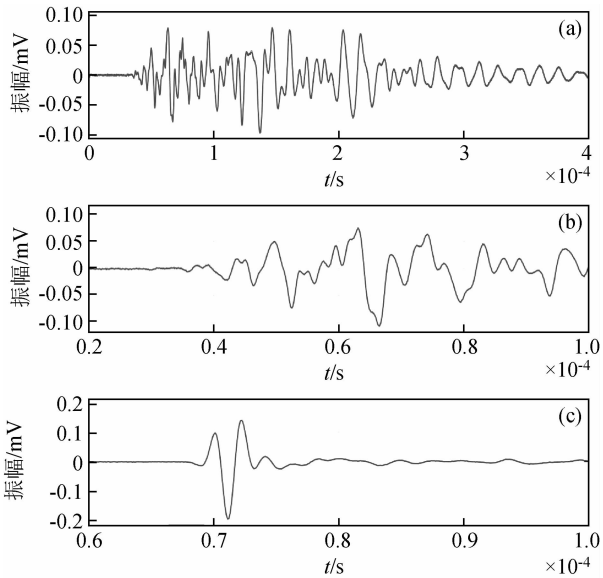


图 4 饱水颗粒材料透射波声波曲线

Fig. 4 Transmitted acoustic waveforms of water-saturated granular materials

架的压实与强化. 孔隙水的存在使得颗粒间的接触较为疏松,重力压实作用下,颗粒接触点因挤压而变得紧密,提高了接触刚度;同时,颗粒排列的优化促使固体骨架中直接传递声波的路径增多且更通畅. 由于高频声波(500 kHz)在饱水介质中的波长(约 3.2 mm)远大于石英砂颗粒的特征尺寸(约 0.15 mm),其传播主要依赖固体骨架的弹性波传递. 因此,骨架刚度的增强和固体路径的优化,显著提高了高频波的传播效率,减少了其在接触弱区和孔隙处的散射与衰减. 这直接解释了实验中随静置时间延长,高频信号能量显著提升以及初至信号变得尖锐的现象. (2)孔隙流体分布的均质化与低频耗散的抑制. 静

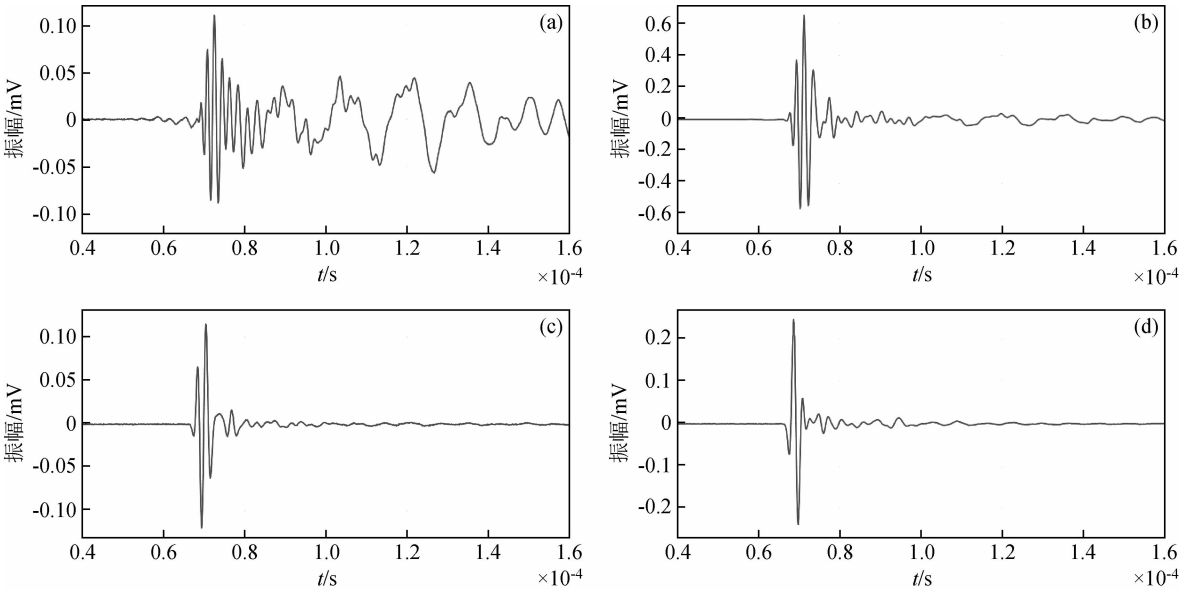


图 5　饱水颗粒材料不同静置时间透射波声波曲线

Fig. 5　Transmitted acoustic waveforms of different water-saturated granular materials

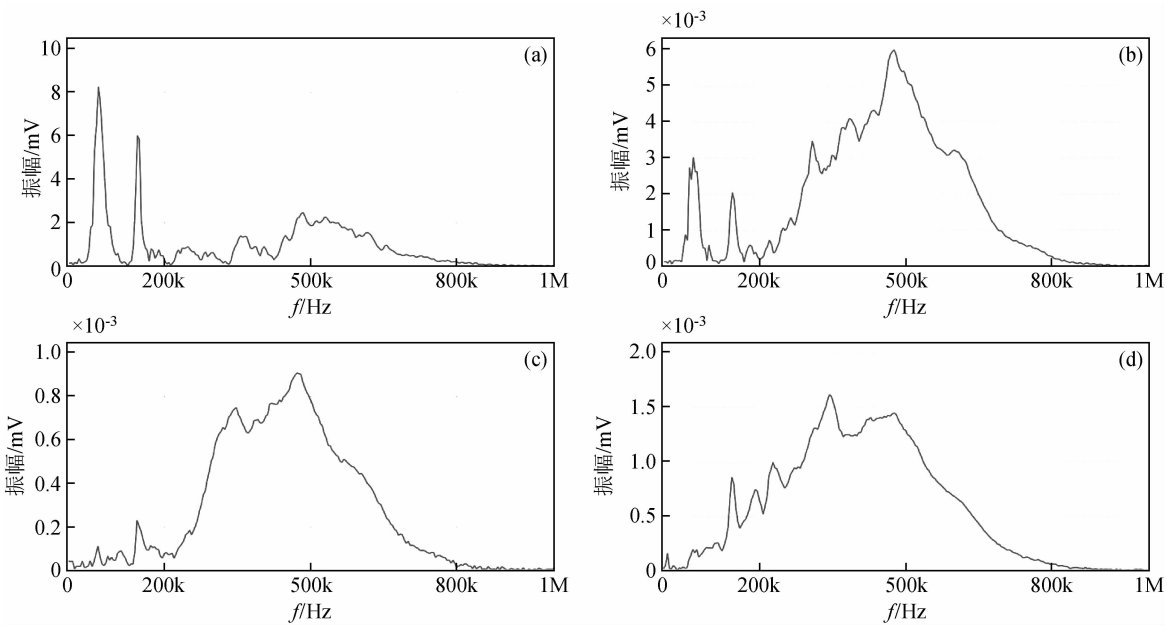


图 6　水饱和颗粒材料不同静置时间透射波频谱特征

Fig. 6　Spectral characteristics of transmitted waves in water-saturated granular materials at different settling duration

置初期,松散颗粒骨架与孔隙水的非均匀分布导致声波在大量固-液界面发生多重散射表现为强烈的低频振荡和尾波. 长期静置后,颗粒重排与压实使得孔隙结构趋于均质化,显著降低了固-液界面的散射强度,有效抑制了介质结构非均匀性相关的低频耗散机制. 直接导致了低频尾波振幅减弱、持续时间缩短及频谱中低频峰相对减弱的现象.

综上分析,增加静置时间的核心效应在于,通过重力压实作用同时优化了介质的固体骨架结构与孔隙流体分布:一方面显著增强了固体骨架的力学性能,从而有效促进了承载主要信息的高频信号(450 ~ 600 kHz)的传播效率;另一方面则通过均质

化孔隙流体,显著抑制了低频干扰噪声的产生与传播.因此,延长静置时间能够有效抑制低频噪声干扰,显著提升有效高频信号的信噪比.

2 层状饱水颗粒模型反射波响应特征及影响因素

地震剖面构造解释的核心在于系统追踪标志层的错断特征,从而识别并刻画地下构造变形带的几何形态与空间展布规律.因此,高精度反射界面的构建是砂箱地震物理模拟实验的关键前提.针对饱水颗粒介质模型,通过选用不同粒径及组分的材料构建层间界面(表2),开展反射波测试,以探究影响界面成像质量的主控因素.实验表明,颗粒密度对反射界面成像的影响有限,而相邻层位间的颗粒粒径差异与静置时间是决定反射信号强弱及界面清晰度的关键控制因素.

表2 水饱和颗粒介质层状模型参数

Table 2 The formula of sample materials and preparation methods

模型序号	模型结构	备注
NO.1	上层:棕刚玉层(厚度:3 cm;粒径:0.15 mm) 下层:石英砂层(厚度:3 cm;粒径:0.12 mm)	对比不同粒径组合反射界面成像特征
NO.2	上层:棕刚玉层(厚度:3 cm;粒径:0.15 mm) 下层:石英砂层(厚度:3 cm;粒径:0.25 mm)	
NO.3	上层:石英砂层(厚度:3 cm;粒径:0.25 mm) 下层:棕刚玉层(厚度:3 cm;粒径:0.15 mm)	对比不同静置时间反射界面成像特征
NO.4	上层:棕刚玉层(厚度:4 cm;粒径:0.15 mm) 中层:石英砂层(厚度:3 cm;粒径:0.25 mm) 下层:棕刚玉层(厚度:4 cm;粒径:0.15 mm)	多层模型反射界面成像效果

2.1 颗粒材料粒径对层状模型反射界面成像效果影响

实验采用石英砂(密度2.65 g/cm^3)与棕刚玉(密度3.96 g/cm^3)构建两种层状饱水颗粒模型(NO.1与NO.2),并对比其反射波偏移剖面特征(图7).模型NO.1中相邻层位的石英砂(粒径0.12 mm)与棕刚玉颗粒(粒径0.15 mm)粒径相近,尽管两者密度差异显著,但反射界面成像局部呈断续状,连续性较差,清晰度不足.相比之下,模型NO.2相邻层位的石英砂粒径为0.25 mm,棕刚玉粒径为0.15 mm,粒径差异显著,其反射剖面中层间界面表现为平直连续的同相轴,成像清晰度与分辨率显著提升.

对饱水颗粒材料的声波特性分析结果(图8)显示,不同矿物颗粒虽然具有显著差异的刚度特性,但在完全饱水状态下,其纵波速度差异却非常有限($\Delta V<100$ m/s).饱水状态下,不同矿物颗粒的声波速度之所以差异不明显,主要源于两方面因素:首先,孔隙水的存在显著降低了颗粒间的摩擦系数,使得颗粒骨架的接触状态变得松散;其次,由于孔隙水在颗粒介质中形成高度连通的网络结构,声波在传播过程中主要依赖于水相路径.在这种情况下,声波传播速度主要受控于孔隙水的弹性特性(约1500 m/s),而不同矿物颗粒的刚度差异对整体声速的影响被大幅削弱.基于水饱和颗粒介质15%孔隙度,结合实际样品测得的声波速度(表1)计算:

$$R=\frac{\rho_{棕刚玉}\cdot v_{棕刚玉}-\rho_{石英砂}\cdot v_{石英砂}}{\rho_{棕刚玉}\cdot v_{棕刚玉}+\rho_{石英砂}\cdot v_{石英砂}}\approx 0.18\ , \quad (1)$$

计算结果显示,当相邻层位仅存在矿物类型差异时,其界面反射系数仅为0.08,这一数值表明此类界面难以形成有效的声波反射.

当相邻层位颗粒材料的粒径差异显著时,在相同制模方法下,颗粒几何外观形态相似,则层内颗粒堆积模式趋于一致,其宏观物性参数(密度、波阻抗)差异较小.然而,层间界面处因粒径差异显著,细颗粒在重力作用下嵌入粗颗粒间隙,形成局部致密过渡带,孔隙结构由层内的均匀分布转变为界面处的显著变化(图9).尽管层内整体物性相近,但界面过渡带的物性突变可形成有效反射界面,其反射波在剖面上表现为连续、高振幅的同相轴.这一现象表明,对于饱水颗粒模型,粒径差异是实现高分辨率反射成像的关键机制,其作用在于调控层间界面的细-粗颗粒互嵌结构,而非单纯依赖层内物性参数差异.

2.2 压实作用对层状模型反射界面成像效果影响

通过对比层状饱水颗粒模型在不同静置时间下的叠后偏移深度剖面(PSDM)及单炮记录特征,结果表明静置时间对反射波场响应具有显著影响.初始未充分静置时,模型顶界面呈现由多个宽幅反射轴构成的强反射波组,导致层内界面反射被掩盖而呈现断续状特征,同时底界面反射能量微弱;充分静置后,顶界面反射轴数量明显减少且能量显著聚焦,反射波组厚度大幅减薄,有效消除了对深层界面的屏蔽效应,使层内界面反射连续性明显改善,底界面反射能量同步增强(图10).单炮及单道地震记录(图11)清晰揭示了模型随静置时间演化的反射特征:未静置模型的顶界面反射波呈现多相位、宽波形

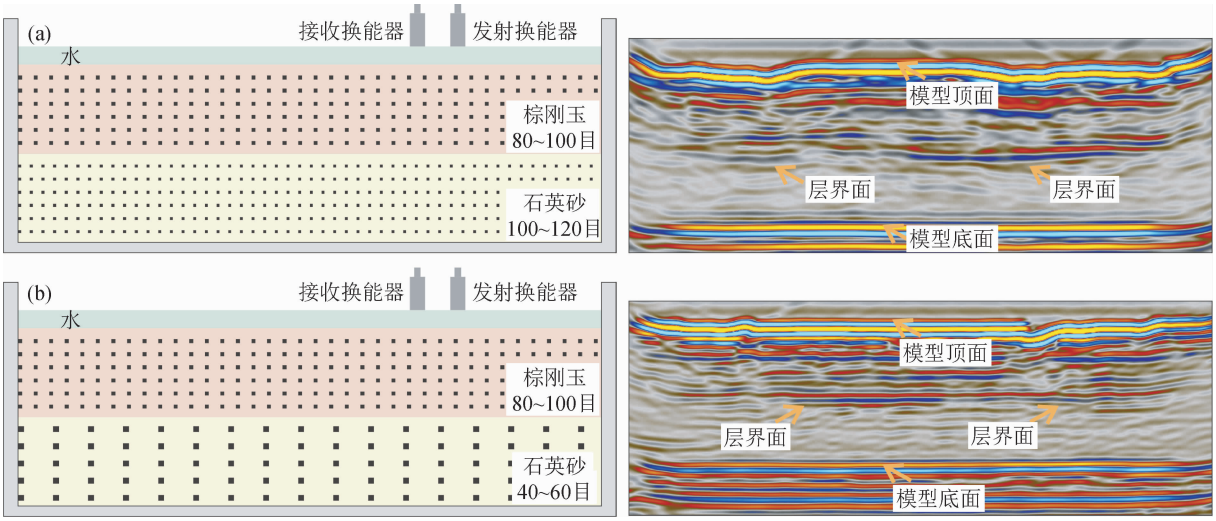


图 7　不同粒径饱水颗粒层状模型及其对应地震反射响应特征

Fig. 7　Layered models of water-saturated granular media with varied particle sizes and associated seismic reflection responses

特征,振幅能量分散;随着静置时间延长至 72 h,该反射波明显收敛为单一高振幅、波形尖锐且能量集中的同相轴,界面空间分辨率大幅提升. 同时,在模型内部层界面,未静置条件下反射信号受顶界面宽波形掩盖,同相轴断续难以识别,底界面的反射能量亦严重衰减;静置 72 h 后,内部层界面反射连续性得到显著改善,底界面反射能量衰减减弱,初至清晰可辨. 此外,近偏移距道集观测显示,未静置模型存在持续强振幅干扰带,其振幅与直达波相当,并掩盖中深层有效反射信号;而静置 72 h 后,该干扰带完全消失,直达波与反射波清晰分离,水层内部无残留混响,模型内部近道干扰信号亦消失.

上述实验现象的差异可归因于静置过程中饱水颗粒介质的沉积压实效应. 在重力主导的长期静置条件下,松散堆积的颗粒发生重排,孔隙水逐步排出,颗粒接触点密度显著增加,并形成更稳定的骨架

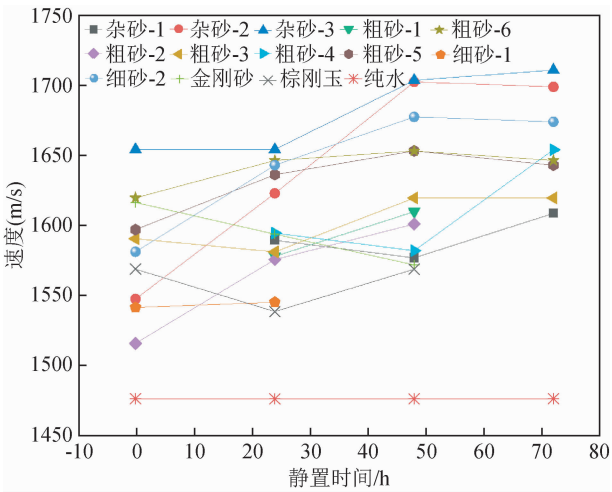


图 8　不同饱水颗粒材料透射波速度随静置时间的演变规律

Fig. 8　Evolution of transmitted wave velocity in water-saturated granular materials with settling time

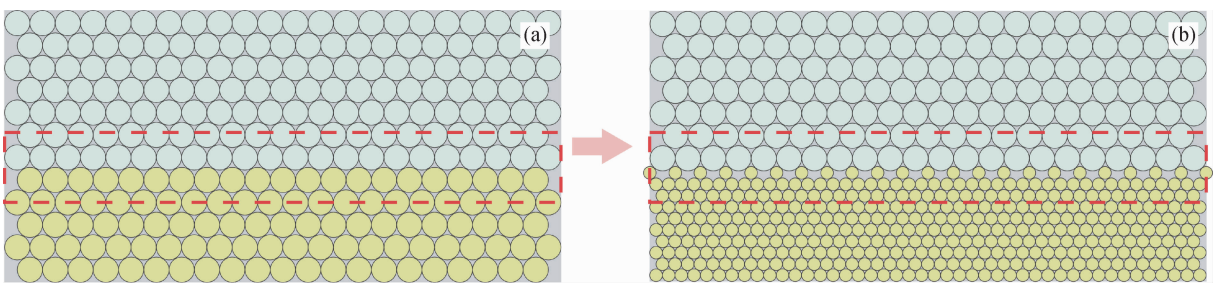


图 9　颗粒材料堆积结构对比:均一粒径层状模型(a)与显著粒径分异层状模型(b)

Fig. 9　Contrast of granular accumulation structures: uniform particle size layered model (a) vs. layered model with distinct particle size differentiation (b)

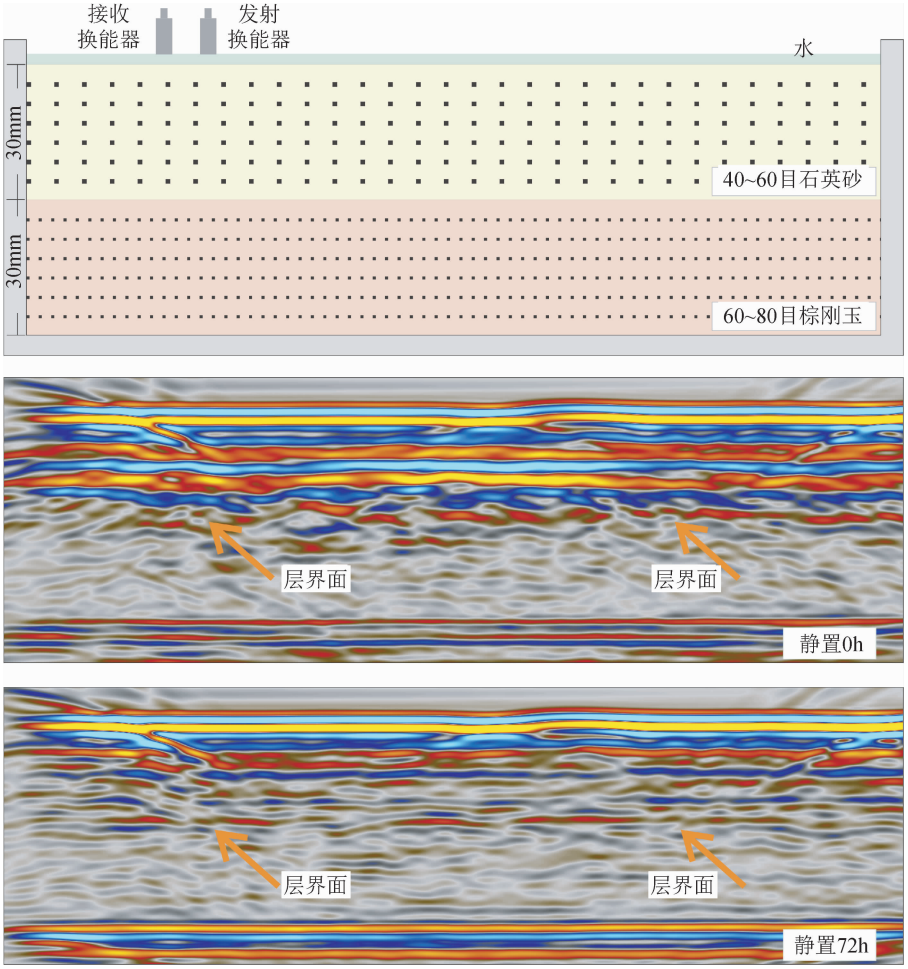


图 10 层状饱水颗粒材料模型地震反射响应随静置时间的演化规律

Fig. 10 Evolution of seismic reflection response in water-saturated granular layered models with settling time

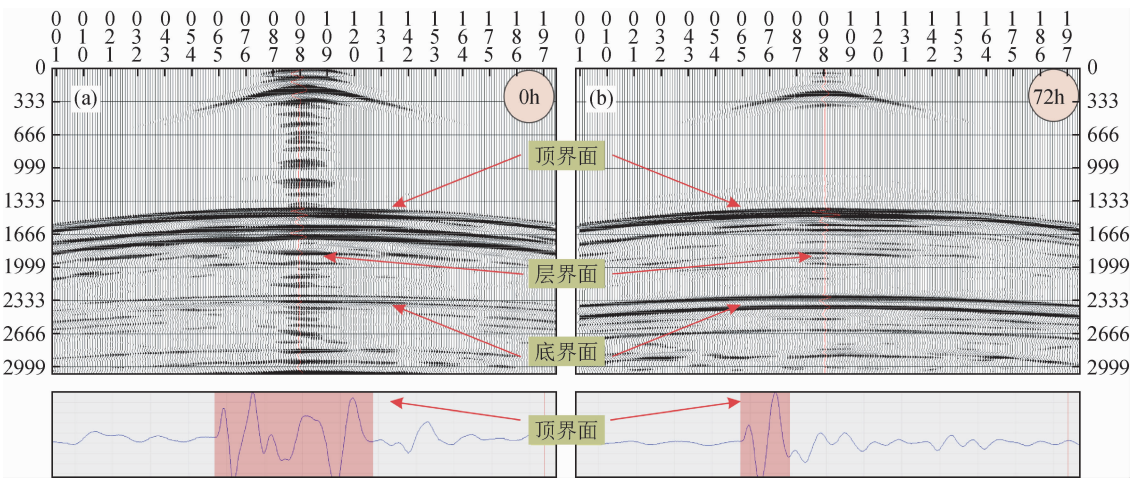


图 11 层状模型单炮与单道记录随静置时间的响应特征

Fig. 11 Single shot and trace records of layered models: response to settling time

结构. 这一过程从物理上优化了介质的波场传播特性,主要表现为:(1)压实作用增强了声波能量的穿透能力. 颗粒骨架刚度的提升降低了声波在介质内部的非弹性耗散,使得更多能量能够穿透至深部界面. 同时,压实后介质的均质化减少了由松散颗粒随机分布引发的散射干扰,深部反射信号的信噪比得

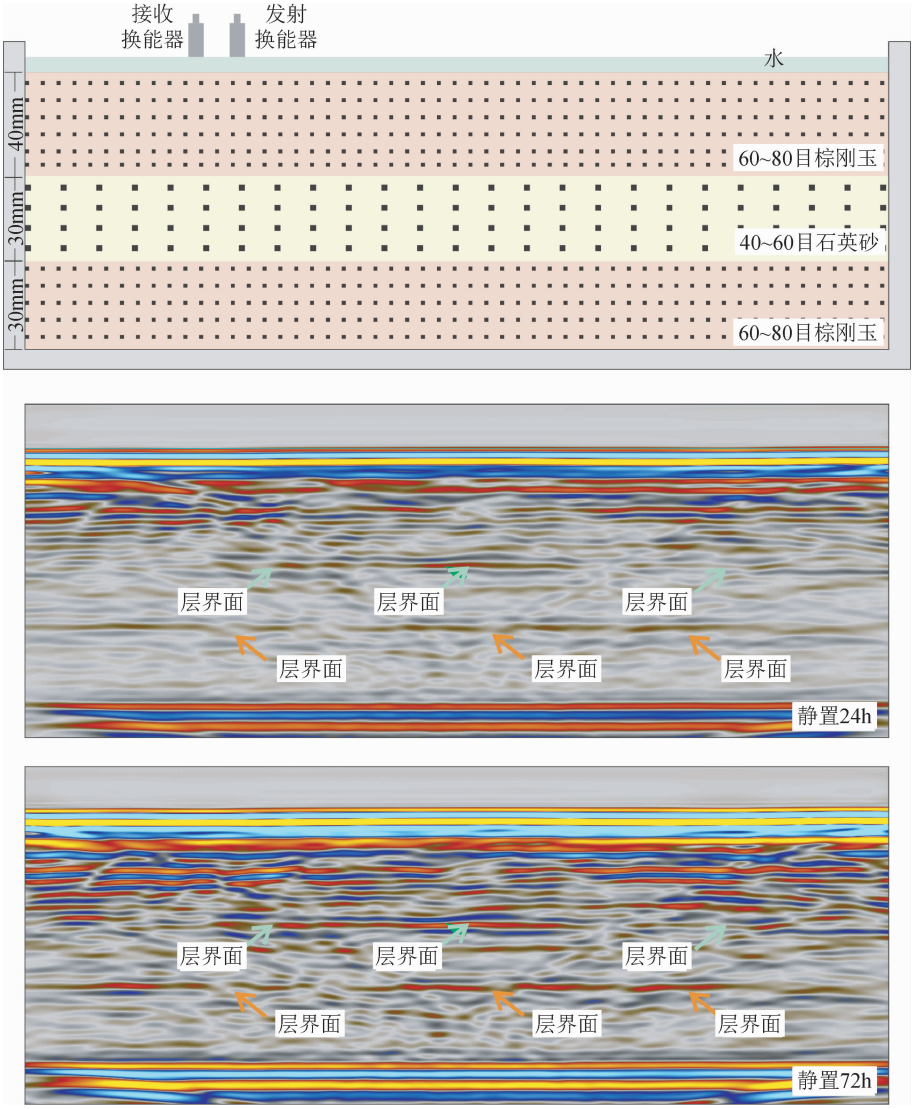


图 12　多层饱水颗粒模型反射剖面随静置时间的演变规律

Fig. 12　Evolution of seismic reflection profiles in multi-layered water-saturated granular models with settling time

以改善.(2)颗粒接触状态的改善锐化了波阻抗界面.模型顶部的颗粒层在压实过程中优先达到紧密接触状态,其与上层流体(水)的波阻抗差异被强化,形成明显的物性梯度带,促使顶界面反射波能量集中、波形收敛.对于层间界面,粒径差异驱动的颗粒分选效应使细-粗颗粒过渡带的孔隙结构呈现阶跃式变化,波阻抗对比度显著增强,模型内部层界面的反射可识别性随之提升.

综上分析,饱水颗粒层状模型反射界面的高精度成像由粒径差异与静置压实协同控制.粒径显著差异驱动细颗粒嵌入粗颗粒间隙,在界面处形成致密过渡带,产生显著声阻抗梯度,奠定反射界面基础.静置压实通过颗粒重排优化骨架结构,同步实现抑制散射干扰、增强声波穿透能力、锐化界面波阻抗差,从而系统性提升成像分辨率与深部探测能力.

2.3　砂箱地震物理模型实例与应用前景探讨

模型 NO.4 含三层结构(总厚度 10 cm,图 12),实验表明,未充分静置时,层间界面反射波振幅弱、同相轴连续性差,难以清晰刻画模型内部结构;经长期静置(72 h)压实后,层间反射波能量显著增强,同相轴连续性增强,模型各层界面空间展布特征可精确成像.这一结果验证了砂箱地震物理模拟技术在大尺度地质模型(如沉积盆地、层状岩体)地震响应特征研究中的适用性.

本研究方法的核心特性体现在对可变形层状模型内部界面的刻画能力.基于饱水颗粒材料静置压实形成的稳定波阻抗界面,可构建厚度超过 10 cm 的大型物理模型,实现反射波高精度成像;未来可通过解析层间反射界面的错断特征,开展山前带逆冲推覆构造、拉张裂谷等大尺度构造变形的构造-地震综合物理模拟探索研究,为复杂构造带地震波场响应特征的研究提供支撑.然而受限于松散介质的物理特性,该方法对微小尺度破碎带的识别方面存在局限,颗粒间的弱连接导致破碎带与基岩带物性差异较小,难以通过地震反射直接辨识.此外,松散颗粒模型的地震物理模拟技术在海底松散沉积层的地震波传播、冰川堆积体内部结构探测等领域具有显著的应用潜力.

3 结 论

针对静态地震物理模拟建模过程缺少地质动力学约束、而构造物理模型又受限于材料强声波衰减无法有效实现地震成像的核心问题,本文创新性地提出饱水颗粒介质的砂箱-地震综合模拟方法.通过材料声学特性筛选、制模工艺优化及波场传播机制解析,取得以下认识与进展:

(1)采用水下成型法制备的饱水颗粒介质,可有效消除孔隙气穴与结构缺陷,显著降低超声波能量耗散,获得初至清晰、振幅稳定、衰减可控的高保真透射信号,解决了松散颗粒材料强衰减难题,为动态构造物理模型的地震波场响应研究提供了可行的声学载体.

(2)实现饱水颗粒层状模型地震成像的关键在于提升其声波穿透能力与界面反射能力:充分的静置压实显著降低了模型内部的非弹性耗散与散射,增强了声波能量的穿透深度,为获取深部界面的有效反射信号奠定了基础;层间颗粒粒径显著差异驱动界面处细-粗颗粒互嵌,形成局部孔隙结构突变的物性梯度带,从而产生足够的声阻抗差异,为形成有效反射界面提供了物理基础.

(3)饱水颗粒砂箱地震物理模拟方法解决了松散介质力学变形与声学响应同步观测的技术瓶颈,实现了大尺度物理模型的清晰反射成像,为研究构造变形过程中地震波场的动态演化提供了实验基础.饱水颗粒介质与天然松散地质体(如海底松散沉积层、冰川堆积体)的物理相似性,使得该方法在相关领域的地震波传播机制研究中具有重要的借鉴价值.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Gao F. 2018. The experimental research on attenuation characteristics of near-surface low-velocity layer [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Petroleum, Beijing.

Gao F, Wei J X, Di B R. 2018. Seismic physical modeling and quality factor. Applied Geophysics, 15(1): 46-56.

Hao S L, Zhao Q. 2002. Application and development of seismic physical model technology. Progress in Exploration Geophysics (in Chinese), 25(2): 34-43.

Jia D, Yang S F, Yin H W, *et al*. 2023. Physical modelling experiments of fold-thrust belts: a review based on previous and new experimental models. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 97(9): 2896-2913.

Krawczyk C M, Buddensiek M L, Oncken O, *et al*. 2013. Seismic imaging of sandbox experiments - laboratory hardware setup and first reflection seismic sections. Solid Earth, 4(1): 93-104.

Li Z H, Zhu H L, Zhao Q, *et al*. 2009. Study and materialization of new seismic physical model building materials. Progress in Geophysics (in Chinese), 24(2): 408-417, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.006.

Liu D F, Zhao Q, Xue S G, *et al*. 2015. Exploration of the reservoir fluid geological model material in seismic physical model. Progress in Geophysics (in Chinese), 30(2): 636-640, doi: 10.6038/pg20150221.

Pei Y C, Yang Q Y, Zhao Q, *et al*. 2016. Research on silica micro-powders modified 3-D seismic physical model materials. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(1): 455-460, doi: 10.6038/pg20160154.

Reber J E, Cooke M L, Dooley T P. 2020. What model material to use? A review on rock analogs for structural geology and tectonics. Earth-Science Reviews, 202: 103107, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103107.

Schellart W P, Strak V. 2016. A review of analogue modelling of geodynamic processes: approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. Journal of Geodynamics, 100: 7-32.

Sherlock D H, Evans B J. 2001. The development of seismic reflection sandbox modeling. AAPG Bulletin, 85(9): 1645-1659.

Si W P, Xue S G, Ma L W, *et al*. 2019. Physical modeling and analysis of the characteristics of the seismic response of strike-slip faults and the associated fracture-dissolution reservoirs in the Shunbei area. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 58(6): 911-919.

Si W P. 2022. Advances and future directions in seismic physical modeling. China Petroleum and Chemical Standard and Quality (in Chinese), 42(13): 196-198.

Si W P, Lü C, Wang Y. 2023. Seismic physical modeling analysis of the influence of sand scale and depth on AVO characteristics. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(3): 1161-1168, doi: 10.6038/pg2023GG0401.

Wang Y. 2022. Potential polymer materials for seismic physical modeling. China Petroleum and Chemical Standard and Quality (in Chinese), 42(15): 132-134.

Wei J X, Di B R. 2006. Properties of materials forming the 3-D geological model in seismic physical model. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 45(6): 586-590.

Xing T D, Xue S G, Li X W, *et al*. 2021. Physical modeling of seismic response for the coal seams of Yan'an Formation in loess tableland of North China. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 49(6): 87-94.

Xiong J L, Di B R, Yue Y, *et al*. 2006. Analysis of acquisition footprints based on seismic physical simulation. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 41(5): 493-497.

Zhao Q. 2008. Study of fracture-cave reservoirs from rugged topography with physical modeling technology [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.

Zhu H L, Li Z H, Zhao Q. 2008. Study of crosswell seismic physical modeling. Progress in Geophysics (in Chinese), 23(6): 1833-1840.

附中文参考文献

高峰. 2018. 近地表低速层衰减特征的实验研究[博士论文]. 北京: 中国石油大学(北京).

郝守玲, 赵群. 2002. 地震物理模型技术的应用与发展. 勘探地球物理进展, 25(2): 34-43.

贾东, 杨树锋, 尹宏伟, 等. 2023. 褶皱冲断带物理模拟实验研究进展. 地质学报, 97(9): 2896-2913.

李智宏, 朱海龙, 赵群, 等. 2009. 地震物理模型材料研制与应用研究. 地球物理学进展, 24(2): 408-417, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.006.

刘东方, 赵群, 薛诗桂, 等. 2015. 地震物理模型中储层流体地质模型材料的探索. 地球物理学进展, 30(2): 636-640, doi: 10.6038/pg20150221.

裴宇翀, 杨勤勇, 赵群, 等. 2016. 硅微粉改性新型三维地震物理模型材料特性研究. 地球物理学进展, 31(1): 455-460, doi: 10.6038/pg20160154.

司文朋, 薛诗桂, 马灵伟, 等. 2019. 顺北走滑断裂-断溶体物理模拟及地震响应特征分析. 石油物探, 58(6): 911-919.

司文朋. 2022. 地震物理模拟技术应用现状及发展方向分析. 中国石油和化工标准与质量, 42(13): 196-198.

司文朋, 闾晨, 王莹. 2023. 砂体尺度及埋深对 AVO 特征影响规律的地震物理模拟研究. 地球物理学进展, 38(3): 1161-1168, doi: 10.6038/pg2023GG0401.

王莹. 2022. 可用于地震物理模型制作的潜在高分子材料. 中国石油和化工标准与质量, 42(15): 132-134.

魏建新, 狄帮让. 2006. 地震物理模型中三维地质模型材料特性研究. 石油物探, 45(6): 586-590.

邢廷栋, 薛诗桂, 黎小伟, 等. 2021. 黄土塬区延安组煤层地震响应特征物理模拟研究. 煤田地质与勘探, 49(6): 87-94.

熊金良, 狄帮让, 岳英, 等. 2006. 基于地震物理模拟的采集脚印分析. 石油地球物理勘探, 41(5): 493-497.

赵群. 2008. 面向起伏地表和缝洞储层的物理模拟技术研究[博士论文]. 成都: 成都理工大学.

朱海龙, 李智宏, 赵群. 2008. 井间地震物理模拟研究. 地球物理学进展, 23(6): 1833-1840.