

团体标准编制说明

高频岩石物理实验及孔隙结构参数估计方法标准

High-frequency rock physics experiments and estimation of pore structure parameters

起草单位：中国石油大学（北京）

起草时间：2024年7月1日

一、工作简况

1. 任务来源

岩石的弹性性质受孔隙度、孔隙结构、矿物成分、及流体性质等多种因素的综合影响，其中孔隙结构是影响岩石特性的重要因素。由于岩石孔隙空间分布十分复杂，孔隙结构难以定量表征，因此需要借助理想的几何形状对复杂的孔隙结构进行近似处理，有必要系统研究孔隙结构参数估计，并借助高频岩石物理实验，但目前国内还缺乏相应的国家标准和行业标准，因此有必要提供专门的指导性标准。本文件的制定任务主要来源于自选课题，并得到了国家科技重大专项课题“下古生界—前寒武系地球物理勘探关键技术研究”和国家自然科学基金“针对碳酸盐岩储层的跨频段（从地震频率—超声频率）岩石物理实验与建模研究”以及“跨频段岩石物理实验与理论驱动的地震速度频散成像研究”的资助。

2022年7月20日，中关村绿色矿山产业联盟(以下简称中绿盟)发布了《关于征集2022年度团体标准项目的通知》。按照通知要求，项目组提交了《高频岩石物理实验及孔隙结构参数估计方法标准》的中绿盟团体标准提案表。2022年8月1日，经中绿盟研究决定，发布了《2022年度团体标准制订计划》。

2. 起草单位、参编单位

本文件起草单位：中国石油勘探开发研究院西北分院、中国石油大学（北京）

本文件起草单位：中国石油勘探开发研究院西北分院、中国石油大学（北京）

3. 主要起草人

文件的主要起草人：李闯、赵建国、张宇、李智、肖增佳、闫博鸿。

表1 主要起草人所做的主要工作

| 序号 | 姓名 | 工作单位 | 主要工作 |
|----|-----|-----------------|---------|
| 1 | 李闯 | 中国石油勘探开发研究院西北分院 | 项目总负责人 |
| 2 | 赵建国 | 中国石油大学（北京） | 项目主要负责人 |
| 3 | 张宇 | 中国石油大学（北京） | 负责理论分析 |
| 4 | 李智 | 中国石油大学（北京） | 负责室内实验 |
| 5 | 肖增佳 | 中国石油大学（北京） | 负责室内试验 |
| 6 | 闫博鸿 | 中国石油大学（北京） | 负责理论分析 |

二、制定标准的必要性和意义

岩石的弹性性质受孔隙度、孔隙结构、矿物成分及流体性质等多种因素的综合影响，其中孔隙结构是影响岩石特性的重要因素。由于岩石孔隙空间分布十分复杂，孔隙结构难以定量表征，所以在对孔隙参数估计的过程中，如何选取有效的模型进行孔隙参数估计十分重要，合理选取有效模型估计孔隙参数对岩石孔隙结构表征、流体饱和岩石速度预测以及孔间喷射

流效应的模拟具有十分重要的意义。

所以，本文件基于室内的岩石物理高频实验，提出一套适用于高频岩石物理实验及孔隙结构参数估计方法的技术标准，它可为孔隙结构参数的估计提供统一的技术依据和标准。

三、主要起草过程

1、前期准备

2022年12月-2023年4月，开展了前期研究与资料收集工作，包括经典岩石物理模型、等效介质理论、应力-应变高频岩石物理测量技术，探讨立项的必要性和结构要点，为本标准编制打下了良好基础。

2、标准立项

2023年8月，在中关村绿色矿山产业联盟的指导下，成立标准起草团队，标准起草团队就《高频岩石物理实验及孔隙结构参数估计方法》团体标准研制工作召开了专题会议，拟定了标准编制工作方案，对标准编制工作进行总体部署和任务分工，力求科学性和实用性。

3、确定标准编制原则

标准编制团队在充分研究国内现有的绿色矿山发展相关政策及要求，对比岩石物理实验相关标准，并在高频岩石物理实验的基础上，确定了本标准的编制原则。

4、标准起草过程

①立项。2023年7月，成立标准起草团队，召开专题会议，拟定了标准编制工作方案，对标准编制工作进行总体任务部属和任务分工，力求科学性和实用性。

②拟定初稿。2023年10月，标准起草团队在中国知网等网站广泛收集国内外有关低频岩石物理实验评价的法律法规、规章、相关政策文件、标准，以及网站报道，期刊论文等材料，并对其进行综合分析整理，搭建了标准编制的框架，完成了标准初稿。

③实验论证。2023年7月-2023年11月，进行相应的岩石物理高频实验，在实验的基础上，选取合适的岩石物理模型进行孔隙结构参数的估计，对标准初稿进行内容填充和细节完善。

④内部研讨。2023年12月，标准起草团队就标准初稿召开了多次内部讨论会，对标准进行反复修改，形成了标准工作组讨论稿，并明确了标准化需求和标准研制重点方向。

⑤确定终稿。2023年12月-2024年5月，在相关讨论和修改的基础上，结合实验结果、数据统计、参数提取精度，最终确定了标准的终稿。

四、制定标准的原则

坚持高起点、严要求与适宜性、可操作性相结合原则。高起点即标准编制所涉及的原材料

料及产品技术指标，应不低于目前国内外相关行业标准规定的限量指标；严要求即标准的编制应严格遵循 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定及相关法律法规的要求；适宜性既要充分考虑到行业的发展现状与特点，又要有一个适宜的范围与程度，从而提高标准贯彻实施的可操作性。

五、与现行有关法律、法规和标准的关系。

本标准符合国家环保、安全生产等方面的相关法律；

本标准符合 GB/T 1.1-2020 中的规定；

本标准与其他相关标准化文件无冲突。

六、标准主要内容说明

本标准提出了适用于高频岩石物理实验及孔隙结构参数估计的技术要求，主要包括实验指标的测定及分级要求等内容，适用于利用室内实验和相关计算，对样品在高频条件下进行测定，并对孔隙结构参数进行有效提取。本标准中涉及的主要的技术指标和调研报告如下：

附件 1:《测量原理》；

附件 2:《仪器设备》；

附件 3:《样品准备》；

附件 4:《测试步骤》；

附件 5:《反演流程》；

七、贯彻标准的措施建议

1. 组织措施

在中关村绿色矿山产业联盟的组织协调下，以标准起草团队成员为主，成立标准宣贯小组。

2. 技术措施

组织撰写标准宣贯材料，组织标准宣贯培训，争取标准颁布实施后尽快在低频岩石物理实验中推广应用。

附件 1:

测量原理

目前用于提取岩石孔隙结构参数的经典方法为 D-Z 方法。该方法假设岩石由固体矿物基质、一组具有相同孔隙纵横比的硬孔和多组孔隙纵横比不同的软孔构成，并认为压力对固体矿物基质和硬孔的影响可以忽略不计；在此基础上，利用干燥岩石的超声实验数据（即速度-压力关系）反演岩石硬孔纵横比以及各组软孔的孔隙纵横比和体积百分比。D-Z 方法的关键点

在于，以累积裂隙密度为桥梁，借助等效介质理论将实验可测量的弹性模量与岩石微观孔隙结构参数联系起来。然而，D-Z 方法直接采用单重孔隙裂隙密度公式来实现多重孔隙岩石累积裂隙密度的计算，导致在许多情形下难以获得良好的反演精度。本标准对经典 D-Z 方法进行改进，并提出种基于等效介质理论的孔隙纵横比分布反演方法，通过多个假想降压过程实现了多重孔隙岩石累积裂隙密度的准确计算。

附件 2：

仪器设备

2.1 超声实验测试系统及流程见图 1

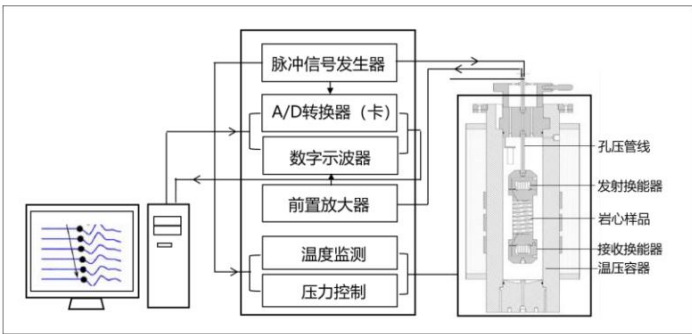


图1 超声实验设备示意图

2.2 测试系统

测试系统如图1所示，该系统主要包括：左侧部分为电脑-系统自动化控制、波形读取、数据处理；中间部分为电子控制模块包括示波器、信号发生器、温度、压力等控制；右侧部分为温压容器和岩芯加持部分提供围压、孔压、温度等实验条件，其中最关键的器件是产生声源和把声波转化电信号的超声换能器，其决定了工作主频、发射效力与接收灵敏度。

2.3 测试过程及条件

实验测试时样品由胶套包裹，两端安装超声换能器并固定在岩心夹持器上，整体置于装有液体（油）的围压容器中。实验可实现三轴变围压测量，由测试系统自动控制。实验的围压测试条件为5-40MPa，压力间隔为5MPa，采用降压测量的方式，每个压力点稳定40min后开始人工读取纵横波速度的初至时间，测试系统自动扣除声波探头对零时间。实验的流体条件为干燥、25%、50%和 92%等四个含油饱和度状态，样品饱和度和装置和称重法进行控制，流体饱和度误差为±2%。

2.4 测试流程应按下列步骤进行

- a) 电脑端实验操作软件中录入岩芯基本信息；
- b) 岩心样品装填，保证夹持器上样品端面与超声换能器耦合；
- c) 软件控制围压变化，控制增压/降压间隔与恒定时间；
- d) 拾取纵波和横波的波形初至时间，生成速度测试结果。

附件 3：

样品准备

地层取芯岩样在低温条件下采用线切割的方式切制成长度为 40mm-55mm 之间、直径为 25mm 和 38mm 的柱塞样。样品长度需满为超声波波长的 10 倍左右，样品过短可能引起矿物颗粒间的散射作用。制成的柱塞样品需进行端面磨平，保证两端面的倾角误差为 $\pm 2^\circ$ 。此外需对标准柱塞样品进行洗油处理，过程采用独特的索氏抽提器分馏洗油法，以二氯甲烷(沸点 39.75 $^\circ$)作为萃取剂，洗油周期为 20 天。洗油后样品在 40 $^\circ$ C 恒温干燥箱中干燥 24 小时后将样品用保鲜膜包裹置于装有干燥剂的低温箱中保存。

附件 4:

测试步骤

- 1、超声换能器的发射端和接收端分别放置在岩石样品两端，脉冲发生器激发电信号迫使发射换能器产生机械振动，该振动穿透过样品到达接收换能器并在示波器上显示出来；
- 2、在示波器上拾取波形的初至时间 t_0 ，结合换能器本身的对零时间 t_{sys} 计算超声波脉冲穿透岩石样品的时间 $\Delta t = t_0 - t_{sys}$ ；
- 3、用岩石样品的长度 L 除以时差 Δt ，计算得到速度 V ，样品的衰减信息，可以通过对比同样条件下超声波穿透完全弹性样品（铝）和岩石样品的振幅谱，利用谱比法得到；
- 4、改变压力并重复上述步骤，获得不同压力下的纵、横波速度。

附件 5:

反演流程

5.1 基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演流程图 2

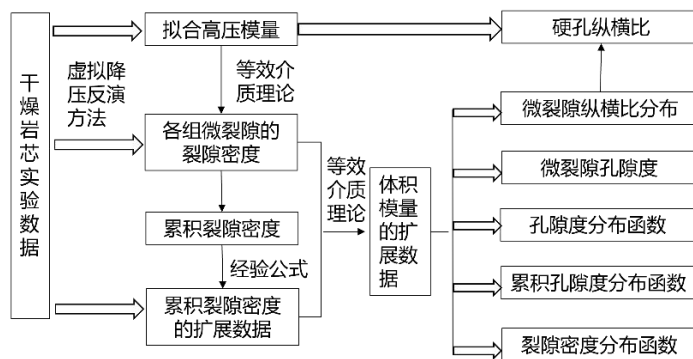


图2 基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演流程图

5.2 基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演应按下列步骤进行

基于虚拟降压的反演流程主要包括三部分：

5.2.1 累积裂隙密度反演

根据假想降压思路，我们将降压过程分为 N 个变化状态，在每个变化状态，干燥岩石均可视为单重孔隙结构，这样可以直接运用等效介质理论公式计算微裂隙的裂隙密度；

5.2.2 微裂隙孔隙纵横比反演

将已获得的裂隙密度通过公式计算得到微裂隙的初始孔隙纵横比分布，并结合等效介质理论，得到非零有效压力下的孔隙纵横比分布、微裂隙的初始裂隙密度分布函数、初始孔隙度分布函数、初始累积孔隙度分布函数和初始孔隙度，利用上述初始分布函数，进一步计算任意非零有效压力下的分布函数；

5.2.3 硬孔纵横比反演

硬孔纵横比反演是基于高压状态下的实验数据实现的。在高压条件下，干燥岩石可以视为由等效矿物基质和单重硬孔构成的两相混合物，此时利用等效介质理论便可以从高压数据中提取出硬孔纵横比。

- 1、利用高频岩石物理实验获取岩芯样品的基本信息，包括样品的总孔隙度、矿物组分及其含量、干燥岩石的密度以及各有效压力下的超声纵横波速度，并根据反演得到的微裂隙的总孔隙度，计算硬孔的孔隙度；
- 2、利用 Voigt Reuss Hill 平均公式计算等效矿物基质模量；
- 3、基于单重孔隙干燥岩石的等效介质理论公式，结合高压速度反演计算硬孔纵横比。