

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 001—2024

高频岩石物理实验及孔隙结构参数估计方法

High-frequency petrophysical experiments and pore structure parameter estimation method

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2024 - 7 - 20 发布

2024 - 10 - 01 实施

中关村绿色矿山产业联盟发布 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

 3.1 孔隙结构 1

 3.2 孔隙纵横比 1

 3.3 裂隙密度 1

4 原理 1

5 仪器设备 1

 5.1 超声实验测试系统及流程见图 1 1

 5.2 测试系统 2

 5.3 测试过程及条件 2

 5.4 测试流程应按下列步骤进行 2

6 样品准备 2

7 测试步骤 2

8 反演流程 2

 8.1 基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演流程图 2 3

 8.2 基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演应按下列步骤进行 3

9 计算方法 3

10 准确度 4

 10.1 重复性 4

 10.2 再现性 4

 10.3 试验报告 4

前 言

本文件按照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》的规定起草。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟标准工作委员会归口。

本文件起草单位：中国石油大学（北京）、中国石油勘探开发研究院西北分院

本文件主要起草人：赵建国、李闯、张宇、李智、肖增佳等。

高频岩石物理实验及孔隙结构参数估计方法

1 范围

本文件规定了高频岩石物理实验及孔隙结构参数估计方法的原理、仪器设备、处理流程、计算方法、准确度和测试报告等。

本文件适用于高频岩石物理实验及孔隙结构估计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 4756 石油液体手工取样法

GB/T 6682 分析实验室用水规格和实验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 孔隙结构

岩石内的孔隙和喉道类型、大小、分布及其相互联通关系。

3.2 孔隙纵横比

描述多孔岩石微观孔隙结构特征的重要参数。

3.3 裂隙密度

在岩石或土壤中存在的裂隙数量与单位体积的比率。

4 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方法进行了改进，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。

5 仪器设备

5.1 超声实验测试系统及流程见图 1

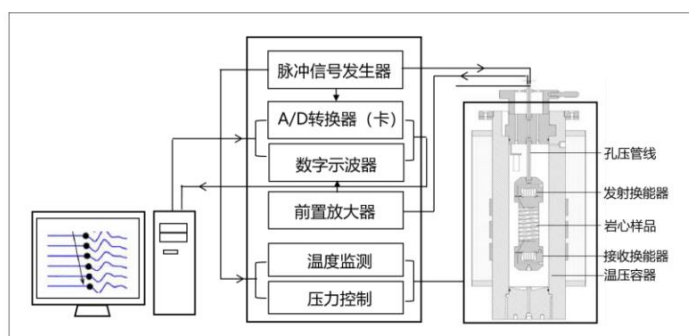


图1 超声实验设备示意图

5.2 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；右侧部分为温压力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。

5.3 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，样品饱和度由覆压饱和装置和称重法进行控制，流体饱和度误差为 $\pm 2\%$ 。

5.4 测试流程应按下列步骤进行

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

6 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。

7 测试步骤

- 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，该振动穿透样品到达接收换能器并在示波器上显示出来；
- 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 $\Delta t = t_0 - t_{sys}$ ；
- 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；
- 改变压力并重复上述步骤，获得不同压力下的纵、横波速度。

8 反演流程

8.1 基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演流程图 2

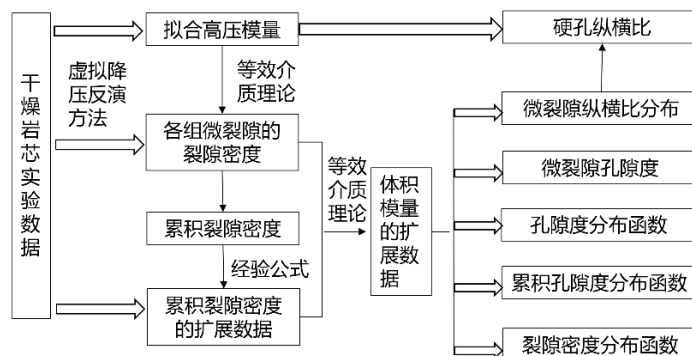


图2 基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演流程图

8.2 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：

8.2.1 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；

8.2.2 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；

8.2.3 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。

- 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；
- 利用 Voigt Reuss Hill 平均公式计算等效矿物基质模量；
- 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。

9 计算方法

用式（1）计算微裂隙孔隙纵横比：

$$\alpha^0(p) = \frac{3}{4\pi} \int_0^p \frac{1/K_D(P') - 1/K_D^h}{\bar{\Gamma}(P')} dP' \dots\dots\dots (1)$$

式中：

α^0 ——微裂隙的初始纵横比；

K_D ——干燥岩石的弹性模量；

K_D^h ——干燥岩石的高压模量

P' ——闭合压力

$\bar{\Gamma}$ ——纵横比大于张开状态下的微裂隙最小纵横比的所有累积裂隙密度；

用式(2)分别计算 KT 模型下的微裂隙密度:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{K_{KT}^*}{K_b}\right) \frac{K_b + 4G_b/3}{K_{KT}^* + 4G_b/3} &= \frac{16(1-\nu_b)(1+\nu_b)}{9(1-2\nu_b)} \Gamma \dots\dots\dots (2) \\ \left(1 - \frac{G_{KT}^*}{G_b}\right) \frac{G_b + 4\zeta_b/3}{G_{KT}^* + 4\zeta_b/3} &= \frac{32(1-\nu_b)(5-\nu_b)}{45(2-\nu_b)} \Gamma \end{aligned}$$

用式(3)分别计算 MT 模型下的微裂隙密度:

$$\begin{aligned} \frac{K_b}{K_{MT}^*} - 1 &= \frac{16(1-\nu_b)(1+\nu_b)}{9(1-2\nu_b)} \Gamma \dots\dots\dots (3) \\ \frac{G_b}{G_{MT}^*} - 1 &= \frac{32(1-\nu_b)(5-\nu_b)}{45(2-\nu_b)} \Gamma \end{aligned}$$

用式(4)分别计算 DEM 模型下的微裂隙密度:

$$\begin{aligned} \frac{\nu_{DEM}^*}{\nu_b} &= e^{-8\Gamma/5} \dots\dots\dots (4) \\ \frac{K_{DEM}^*}{K_b} &= \frac{(1-2\nu_b)e^{-16\Gamma/9}}{1-2\nu_b e^{-8\Gamma/5}} \end{aligned}$$

用式(5)分别计算 SCA 模型下的微裂隙密度:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{K_{SCA}^*}{K_b} &= \frac{16(1-\nu_{SCA}^*)(1+\nu_{SCA}^*)}{9(1-2\nu_{SCA}^*)} \Gamma \dots\dots\dots (5) \\ 1 - \frac{G_{SCA}^*}{G_b} &= \frac{32(1-\nu_{SCA}^*)(5-\nu_{SCA}^*)}{45(2-\nu_{SCA}^*)} \Gamma \end{aligned}$$

K_b ——背景基质的体积模量;

G_b ——背景基质的剪切模量;

ν_b ——背景基质的泊松比;

$\bar{\Gamma}$ ——纵横比大于张开状态下的微裂隙最小纵横比的所有累积裂隙密度;

10 准确度

10.1 重复性

同一操作人员使用同一操作仪器在同一操作条件下对同一样品重复分析获得的结果中,任意两个结果的差值应在 $\pm 3\%$ 的95%置信限内。

10.2 再现性

不同试验室的不同操作人员在正常和正确使用本试验方法时,对同一样品分析获得的两个独立的重复结果的差值应在 $\pm 7\%$ 的 95%置信限内。

11 试验报告

试验报告见附录A, 并应包括下列信息:

a) 样品基本信息: 长度、直径、密度等;

- b) 试验条件：温度、压力、流体性质、饱和度等；
- c) 样品制备、样品安装、测试步骤；
- d) 样品处理和测定过程中的异常现象。

附录 A

试验报告模板

实验项目 _____ 试验日期 _____

一、试验内容

1、试验目的
2、试验内容和原理

3、试验仪器设备

4、试验步骤

二、试验数据记录及处理

1、数据记录

2、数据处理

--

三、结论与建议

--