

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 104—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

2024 - 12 - 27 发布

2024 - 12 - 28 实施

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
4 原理	2
5 测试系统	2
6 样品准备	2
7 反演流程	3
8 计算方法	3
9 准确度	5
10 试验报告	5

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化标准的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本标准起草单位：中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院西北分院、中国石油大学（北京）、甘肃工程地质研究院、成都理工大学、中国石油集团玉门油田分公司、北京城建勘测设计研究院有限责任公司。

本标准主要起草人：潘树新、赵建国、李 闯、张 宇、韩兵兵、曲永强、邓继新、刘欣泽、李 智、闫博鸿、丰 超、闫秀懿、田 雷、李慧珍、王若君。

本文件为首次发布。

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试验及孔隙结构参数估计的原理、测试系统、样品制备、反演过程、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测定及孔隙结构参数的估计。

2 规范性引用文件

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

NB/T 11044-2022
SY/T 6103-2019
DB13/T 5951-2024

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

孔隙纵横比 pore aspect ratio

孔隙纵横比定义为孔隙的宽度与孔隙直径之比，其值为0~1。

3.2

裂隙密度 crack density

在岩石或土壤中存在的裂隙数量与单位体积的比率。

3.3

硬孔 stiff pore

硬孔（又称为刚性孔隙）：指在岩石中较为坚硬、不易被压缩的部分。

3.4

软孔 soft pore

软孔（又称为易压缩孔隙）：指在岩石中较为柔软、易被压缩的部分。

3.5

高频岩石物理实验 High-frequency petrophysical experiments

高频岩石物理实验是指在实验室条件下，利用高频信号（如超声波或更高频率的电磁波）对岩石样品进行物理性质测试的实验。

3.6

单重孔隙裂隙密度 Single-pore fracture density

在某一岩层或岩体中，单位体积内孔隙和裂隙所占的面积或体积的比例，或者单位长度内孔隙和裂隙的数量。

3.7

多重孔隙裂隙密度 Multipore fissure density

多重孔隙裂隙密度是指在某一岩层或地质体中,同时存在多种类型的孔隙和裂隙,这些孔隙和裂隙在单位体积或单位面积内的数量、大小、形状和分布的综合反映。

4 原理

本标准提出了一种基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演策略,通过多个假想降压过程实现累积裂隙密度的准确计算,并将基于DEM和MT的经典D-Z(David-Zimmerman)模型推广到KT和SCA中,结合超声实验(高频岩石物理实验)测试系统所测量的实验数据和等效介质理论建立了一套完整的提取孔隙结构参数的流程。

5 测试系统

5.1 超声实验测试系统

超声实验测试系统见图1,该系统宜包括下列内容:

- 电脑-系统自动化控制、波形读取、数据处理;
- 电子控制模块,包括示波器、信号发生器、温度、压力等控制;
- 温压容器和岩芯,加持部分提供围压、孔压、温度等实验条件。

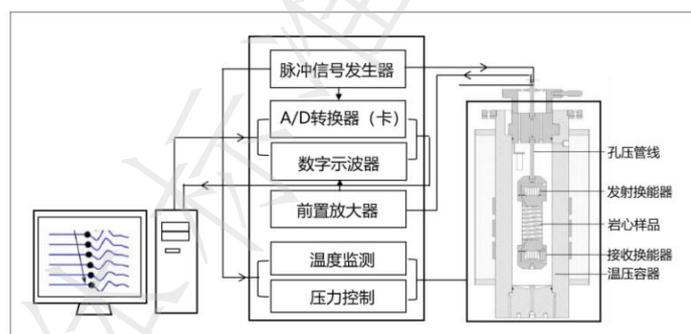


图1 超声实验测试系统图

5.2 测试条件

- 测试样品应由胶套包裹,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。围压测试条件宜为5MPa~40MPa,压力间隔为5MPa,采用降压测量方式,每个压力点稳定40min后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;
- 实验的流体条件应为干燥、25%、50%和92%等4个含油饱和度状态,样品饱和度由覆压饱和装置和称重法测量,流体饱和度和误差应为 $\pm 2\%$ 。

5.3 测试流程应按下列步骤执行:

- 电脑端实验操作软件中录入岩芯基本信息;
- 装填岩心样品,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

样品准备应按下列步骤执行：

- a) 地层取芯岩样应在低温条件下采用线切割方式切割成长度为40mm~55mm、直径为25mm和38mm的柱塞样；
- b) 样品长度需满足为超声波波长的10倍。柱塞样品应进行端面磨平，两端面的倾角误差应为 $\pm 2^\circ$ ；
- c) 对标准柱塞样品应进行洗油处理，宜采用索氏抽提器分馏洗油法，以沸点 39.75° 的二氯甲烷作为萃取剂，洗油周期为20天；
- d) 洗油后样品应在 40°C 恒温干燥箱中干燥24小时，干燥后用保鲜膜包裹置于装有干燥剂的低温箱中以zhengfuyi保存。

7 反演流程

7.1 反演流程图

基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演流程见图2。

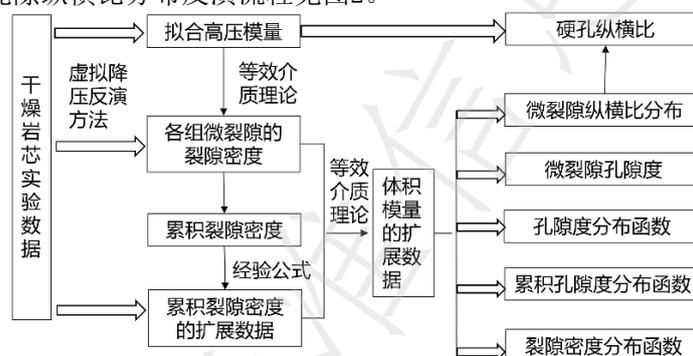


图2 基于虚拟降压的孔隙纵横比分布反演流程图

7.2 反演过程

反演过程应包括累积裂隙密度反演、微裂隙孔隙纵横比反演和硬孔纵横比反演。

7.3 累积裂隙密度反演

根据假想降压思路，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，可运用等效介质理论公式计算微裂隙的裂隙密度；

7.4 微裂孔隙纵横比反演

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；

7.5 硬孔纵横比反演

硬孔纵横比反演应基于高压状态下的实验数据实现。在高压条件下，干燥岩石可视为由等效矿物基质和单重硬孔构成的两相混合物，利用等效介质理论便可从高压数据中提取硬孔纵横比。硬孔纵横比反演应按下列流程执行：

- a) 利用高频岩石物理实验获取岩芯样品的总孔隙度、矿物组分及其含量、干燥岩石密度以及有效压力下的超声纵横波速度等基本信息，并根据反演得到的微裂隙的总孔隙度，计算硬孔的孔隙度；
- b) 利用 Voigt Reuss Hill 平均公式计算等效矿物基质模量；
- c) 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。

8 计算方法

8.1 微裂隙孔隙纵横比

微裂隙孔隙纵横比应按式 (1) 计算:

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

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;

8.2 微裂隙密度

KT 模型下的微裂隙密度应按式(2)计算:

$$\left(1 - \frac{K_{KT}^*}{K_b}\right) \frac{K_b + 4G_b/3}{K_{KT}^* + 4G_b/3} = \frac{16(1-\nu_b)(1+\nu_b)}{9(1-2\nu_b)} \Gamma \dots\dots\dots (1)$$

$$\left(1 - \frac{G_{KT}^*}{G_b}\right) \frac{G_b + 4\zeta_b/3}{G_{KT}^* + 4\zeta_b/3} = \frac{32(1-\nu_b)(5-\nu_b)}{45(2-\nu_b)} \Gamma$$

MT 模型下的微裂隙密度应按式 (3) 计算:

$$\frac{K_b}{K_{MT}^*} - 1 = \frac{16(1-\nu_b)(1+\nu_b)}{9(1-2\nu_b)} \Gamma \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{G_b}{G_{MT}^*} - 1 = \frac{32(1-\nu_b)(5-\nu_b)}{45(2-\nu_b)} \Gamma$$

DEM 模型下的微裂隙密度应按式 (4) 计算:

$$\frac{v_{DEM}^*}{v_b} = e^{-8\Gamma/5} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{K_{DEM}^*}{K_b} = \frac{(1-2\nu_b)e^{-16\Gamma/9}}{1-2\nu_b e^{-8\Gamma/5}}$$

SCA 模型下的微裂隙密度应按式 (5) 计算:

$$1 - \frac{K_{SCA}^*}{K_b} = \frac{16(1-\nu_{SCA}^*)(1+\nu_{SCA}^*)}{9(1-2\nu_{SCA}^*)} \Gamma \dots\dots\dots (4)$$

$$1 - \frac{G_{SCA}^*}{G_b} = \frac{32(1-\nu_{SCA}^*)(5-\nu_{SCA}^*)}{45(2-\nu_{SCA}^*)} \Gamma$$

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累积裂隙密度。

9 准确度

9.1 重复性

操作人员、操作仪器、操作条件和试验样品均不变的情况下，重复分析获得的任意两个结果的差值在±3%的 95%置信限内。

9.2 再现性

不同实验室的不同操作人员在使用本试验方法时，对同一样品分析获得的两个独立的重复结果的差值应在±7%的 95%置信限内。

10 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

实验项目 _____ 试验日期 _____

A-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

B-试验数据记录及处理

1、数据记录

2、数据处理

C-结论与建议