



中华人民共和国国家标准

GB/T 38531—2020

微束分析 致密岩石微纳米级孔隙结构 计算机层析成像(CT)分析方法

Microbeam analysis—Computed tomography (CT) method for micro-and
nano-pore structure analysis in tight rock samples

2020-03-06 发布

2021-02-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 I

引言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 方法概述 3

5 设备、器材与测试条件..... 3

6 测试步骤 4

7 数据处理 5

8 分析报告 6

附录 A（资料性附录） 致密岩石微纳米级孔隙结构计算机层析成像分析报告格式示例 8

附录 B（资料性附录） 不确定度影响因素及典型样品多家实验室对比结果 12

参考文献 15

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国微束分析标准化技术委员会(SAC/TC 38)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、中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院、中国石油天然气股份有限公司杭州地质研究院、中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所、中国石油大学(华东)、数岩科技(厦门)股份有限公司。

本标准主要起草人:吴松涛、王晓琦、朱如凯、包有书、薛华庆、张文涛、金旭、崔景伟、周尚文、陈薇、杨永飞、赵天鹏。



引 言

致密岩石是全球非常规油气勘探的重要领域。致密岩石蕴含丰富的化石能源,潜力大,但孔隙结构复杂,表征难度大。计算机层析成像(CT)已成为致密岩石有效性评价的重要手段,其获得的微观孔隙结构与定量结果成为致密岩石储集性能评价的关键参数。为适应我国非常规储层评价试验技术发展需要,特制定本标准,以规范计算机层析成像技术在致密岩石微纳米级孔隙结构评价中的应用。



微束分析 致密岩石微纳米级孔隙结构 计算机层析成像(CT)分析方法

1 范围

本标准规定了计算机层析成像(CT)技术用于致密岩石微纳米级孔隙结构成像的术语和定义、分析方法、技术要求、数据处理、分析报告内容与不确定度分析。

本标准适用于泥页岩、致密碳酸盐岩、致密砂岩、煤岩等岩石的微纳米级 CT 分析,其他地质样品也可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 17589 X 射线计算机断层摄影装置质量保证检测规范
- GB/T 27025 检测和校准实验室能力的通用要求
- GB/T 29034 无损检测 工业计算机层析成像(CT)指南
- GB/T 29070 无损检测 工业计算机层析成像(CT)检测 通用要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

X 射线穿透率 X-ray penetration rate

经试样吸收后,X 光强度与未经试样吸收时光强度的比值。

3.2

分辨率 pixel resolution

单个像素点代表的试样上的实际尺寸。

3.3

伪影 artifact

扫描重构后的样品图像中,非随机性出现的非样品本身所具有的特征。

注:包括环状伪影和线状伪影。

3.4

孔隙 pore

岩石中未被固体物质充填的空间。

注:包括溶洞与裂缝。

3.5

孔隙度 porosity

试样中孔隙总体积与试样总体积的比值。计算见式(1):

$$P = V_p / V_s \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$



式中：

P ——孔隙度；

V_p ——孔隙总体积；

V_s ——试样总体积。

3.6

形状因子 shape factor

目标图像特征的数学描述。计算见式(2)：

$$G = \frac{A}{P^2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

G ——形状因子；

A ——孔隙截面面积,单位为平方米(m^2)；

P ——孔隙截面形状的周长,单位为米(m)。

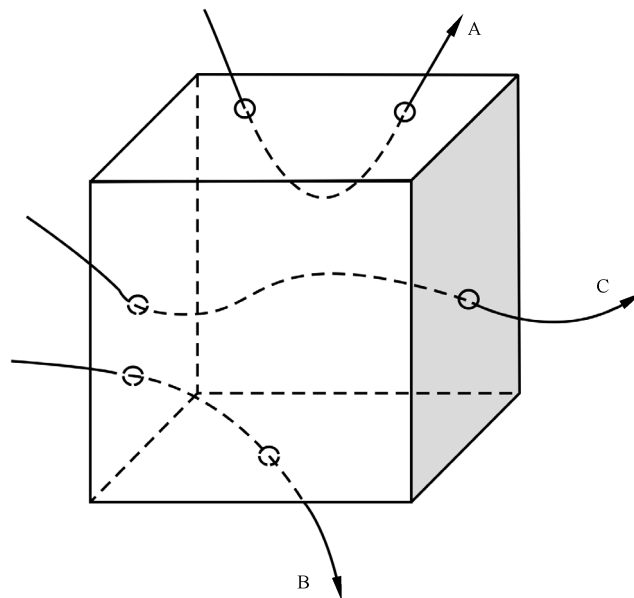
3.7

孔隙连通域 pore connectivity part

连通域 connectivity part

试样中相互连通的孔隙范围。

注：连通域分为三类(如图 1 所示),A 类连通域指有孔隙像素落在且仅落在一个模型边界上的连通域;B 类连通域指有孔隙像素落在相邻模型边界上,且不为 A 类连通的连通域;C 类连通域指有孔隙像素落在相对的模型边界上的连通域^[1]。



说明：

A ——A 类连通域；

B ——B 类连通域；

C ——C 类连通域。

图 1 活连通域分类示意图(以正立方体为例)

3.8

孔隙连通率 pore connectivity ratio

连通域的孔隙体积与总孔隙体积的比值^[1]。计算见式(3)：

$$P = V_{P-Connected} / V_{P-Total} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：
P —— 孔隙连通率；
V_{P-Connected} —— 连通域的孔隙体积；
V_{P-Total} —— 总孔隙体积。

4 方法概述

致密岩石微纳米级孔隙结构计算机层析成像分析,利用 X 射线微聚焦器件将 X 射线源发射的 X 射线聚焦,穿透样品,通过数据探测传输系统采集样品吸收后的 X 光信号,对试样进行 360°扫描,以特定算法,利用重构软件,求解出每个空间位置点的 X 光吸收系数,并以灰度显示试样中不同组分,获得试样孔隙结构及相关数据。

5 设备、器材与测试条件

5.1 X 射线 CT 扫描仪



5.1.1 设备校准

X 射线 CT 扫描仪应按照 GB/T 29070 的规定进行校准。

5.1.2 射线源

能够发射稳定的 X 射线光源,射线源 X 射线强度应满足对样品具有平均 50%以上的穿透率。

5.1.3 试样台

试样台能够相对于射线源和探测器做垂直、水平移动,并可沿垂直轴向 360°旋转。试样台垂直及水平移动最小步长应小于或等于 0.01 mm,沿垂直轴向旋转角度最小步长应小于或等于 0.01°。

5.1.4 探测器

能够接收 X 射线并成像,扫描图像能够转化为数字信号并存储于存储器。探测器视野应满足对直径不小于 50 μm 致密储层样品的二维成像,探测器像素点尺寸小于 0.5 μm。

5.1.5 仪器外表面 X 射线强度

X 射线源开启及工作时,仪器外表面的每一点 X 射线强度应小于 1 μSv/h。

5.2 软件系统

软件系统应具备以下功能：

- a) 调节并控制 X 射线源功率、探测器曝光时间、射线源、样品台及探测器位置、样品扫描角度,并能按照设定的扫描条件自动变换角度,扫描并存储试样投影图像。
- b) 按照固定算法对投影图像计算得到二维切片,具有重构、预览、去除伪影、中心偏移及图像增强等功能。
- c) 对二维切片进行三维模型分析,具有图像滤波功能,可计算孔隙度、孔隙直径、连通率等参数。

5.3 仪器工作环境

环境条件应符合 GB/T 27025、GB/T 29070 规定。

5.4 辅助材料

金颗粒:球形,直径 200 nm~1 μ m,纯度不低于 90%。

6 测试步骤

6.1 试样制备与标记

将试样制备为圆柱状,试样直径应根据扫描分辨率确定,确保试样在 360°扫描过程中,试样图像应在探测器的接收范围之内。

在分辨率优于 50 nm 的高分辨扫描时,应在试样边缘放置标记用金颗粒,并记录信息。

6.2 测试参数设置

6.2.1 扫描模式设置

X 射线源开机后,经 X 射线源与探测器预热,得到稳定的 X 射线,根据试样化学成分、最小感兴趣区与成像分辨率的关系,选定扫描模式。煤岩低密度试样宜采用相位衬度扫描模式,其余岩石试样宜采用吸收衬度扫描模式。

6.2.2 试样旋转中心调节

将试样固定在试样台上,打开射线源及探测器,预览试样二维投射图像,并沿 X 方向(射线源与探测器连线方向)、Y 方向(水平面内垂直于射线源与探测器连线方向)及 Z 方向(竖直方向)调整试样位置,使试样图像处于探测器视野之内,调整试样轴心与试样台旋转轴心重合,保证试样在 360°旋转扫描过程中,扫描图像不会超出探测器视野。调节流程符合 GB/T 29034、GB/T 29070 和 GB 17589 的要求。

6.2.3 试样 X 射线穿透率调节

将试样移出视野,扫描单张空白图像,再将试样移入,获取试样单张扫描图像,试样图像各像素点的灰度数值除以空白图像各点的灰度数值,得到 X 射线穿透率。调整 X 射线源电压、束流及曝光时间数值,使得试样的 X 射线平均穿透率在 25%~40%之间。记录参数。

6.2.4 投影图像数量选定

设定投影图像数量,宜不少于 1 200 张,试验过程中可根据实际情况灵活调整扫描张数,记录扫描参数。

6.3 数据采集

6.3.1 背底采集

按照设定好的扫描条件,将试样移出 X 射线视域,依据 6.2.3 确定的参数采集背底。

6.3.2 试样成像数据采集

背底采集完成后,将试样移回 X 射线视域,采用相同的扫描参数采集试样 X 射线成像数据。试样旋转 360°,采集 X 射线成像数据。

6.3.3 图像漂移消除的数据采集

采用与 6.3.2 相同的扫描参数,根据仪器性能采集特定张数(以 15 张~20 张为宜)的试样 360°X 射线成像数据。

7 数据处理

7.1 背底扣除

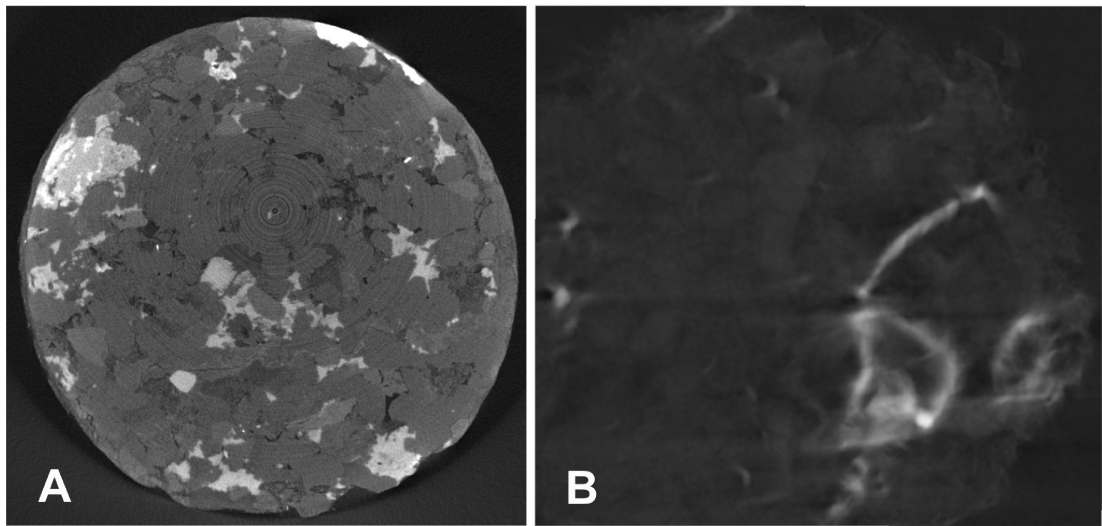
利用 6.3.2 采集的试样成像数据减去 6.3.1 采集的背底数据,消除背底。

7.2 图像漂移消除

利用 6.3.3 数据消除试样扫描过程中物理偏移的影响。

7.3 图像重构

选择两个或两个以上角度的投影图像,逐步调节转轴中心偏移量,进行预重构^[2]。参考面图像中矿物轮廓、孔隙边缘清晰时,确定转轴中心偏移量,进行图像重构,并检查图像质量。重构后图像应无环状或线状伪影(见图 2),样品边缘轮廓无重影,特征矿物晶形明显,孔隙边缘清晰,否则需重新重构或者重新采集。



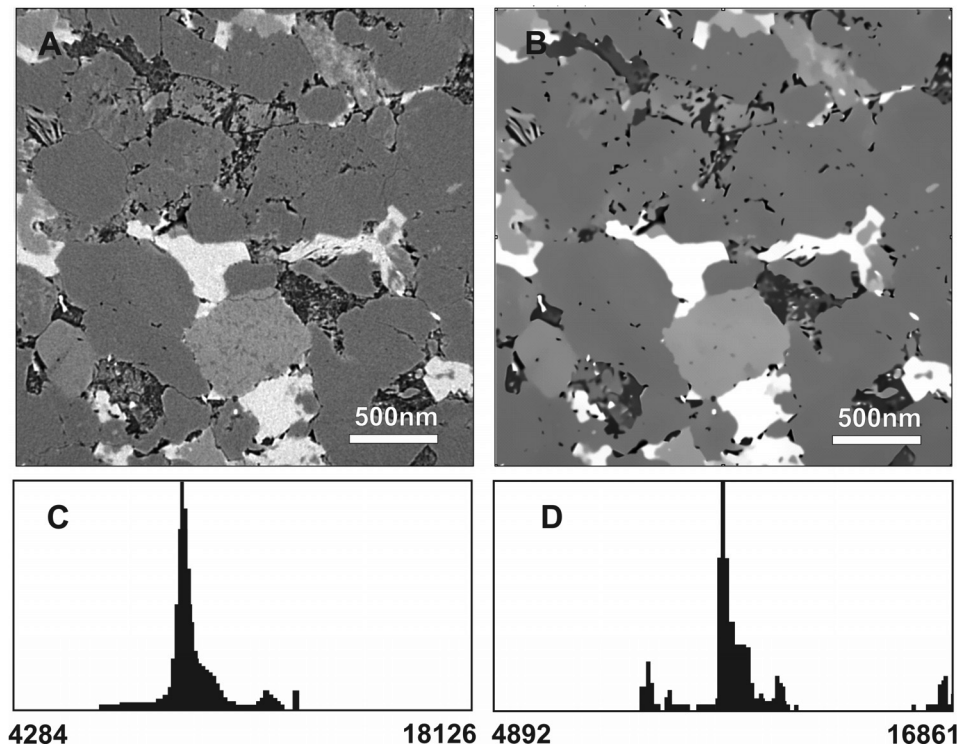
说明:
A —— 环状伪影;
B —— 线状伪影。

图 2 环状伪影与线状伪影图像举例

7.4 孔隙结构分析

7.4.1 图像滤波

利用三维分析软件,将 7.3 重建后的二维图像数据裁剪,宜选用非局部均值滤波(Non-Local Means)或高斯平滑算法进一步滤波与图像增强。滤波后,灰度分布直方图不同物质差异宜提高 10%以上,提高不同物质边界的清晰度(图 3),不宜采用使物质边界模糊的滤波算法^[3,4]。



说明：
A —— 重建后二维图像；
B —— 非局部均值滤波处理后图像；
C —— A 图对应的图像灰度分布直方图；
D —— B 图对应的图像灰度分布直方图。

图 3 图像滤波前后对比实例

7.4.2 孔隙识别与参数计算

利用阈值分割法、二维分割法、手动修正分割法等方法，确定岩石骨架与孔隙的灰度界限值，再根据灰度界限值对岩石骨架与孔隙进行识别^[3-7]。计算孔隙度、形状因子及连通率参数。同一个试样两次处理计算的孔隙度相对偏差不超过 10%；否则，应重新重构或者重新采集数据。

注：岩石包括孔隙与岩石骨架，其中岩石骨架组成较为复杂，以常见的砂岩为例，主体包括石英、钾长石、斜长石、黑云母等，同时还含有方解石、白云石、黄铁矿、绿泥石、蒙脱石、伊利石、伊蒙混层等矿物，不同矿物的密度及粒度均有明显差异，因此在岩石 CT 图像中，不同的矿物组成与含量在一定程度上影响了孔隙识别的精度，尤其是密度较低、粒径较小且经常充填孔隙的黏土矿物，对孔隙识别的影响最为明显，如图 3 B 可见孔隙内大多充填部分矿物，这些矿物与孔隙灰度切分的准确性直接影响了孔隙识别的精度。因此在对岩石样品进行孔隙识别时，在关注局部精细切分的前提下，应从图像灰度的整体分布范围进行考虑，保证孔隙识别的精度。

8 分析报告

8.1 报告要求

报告内容应满足 GB/T 27025 的要求，包括基本信息、设备信息、样品信息、扫描参数与分析结果。具体可参见附录 A 实例。

8.2 报告内容

8.2.1 基本信息

包括实验室名称、报告编号、分析人、审核人、签发人与报告时间。

8.2.2 设备信息

包括设备型号、基本参数、采纳的标准规范。

8.2.3 样品信息

包括地区、层位、井号、深度、岩性、原编号与尺寸。

8.2.4 扫描参数

包括扫描模式、曝光时间、扫描张数。

8.2.5 分析结果

包括孔隙结构定量评价表及成果图件,其中孔隙结构定量评价表包括但不限于孔隙度、形状因子与孔隙连通率,成果图件包括但不限于原始扫描二维切片、孔隙识别二维切片、三维岩石模型图、三维孔隙模型图、孔隙直径分布直方图、孔隙数量分布直方图、孔隙体积分布直方图、孔隙面积分布直方图。二维切片图像应标注分辨率,宜采用“.tiff”“.png”等格式的二维图片。三维重构图像,可用于图形图像定量计算机分析,输出格式宜采用“.raw”标准格式。具体可参见附录 B 实例。

附 录 A
(资料性附录)

致密岩石微纳米级孔隙结构计算机层析成像分析报告格式示例

本附录给出了致密岩石微纳米级孔隙结构计算机层析成像分析报告示例,见图 A.1~图 A.6、表 A.1~表 A.5。

报告编号:

检测报告

Analysis Report

检测项目

Item

送样单位

Company

送样人

Liaison with

地区/井号

Location / Well

样品块数

Sample Count

报告页数

Page Count

检测人

Analyzed by

审核人

Checked by

签发人

Approved by

报告日期

Date

年

Y

月

M

日

D

单位名称

Laboratory Name

分析检测说明

1.执行标准:

2.使用仪器:

3.测试条件:

4.联系人:

5.通讯地址:

6.地 址:

7.邮 编:

8.电 话:

9.传 真:

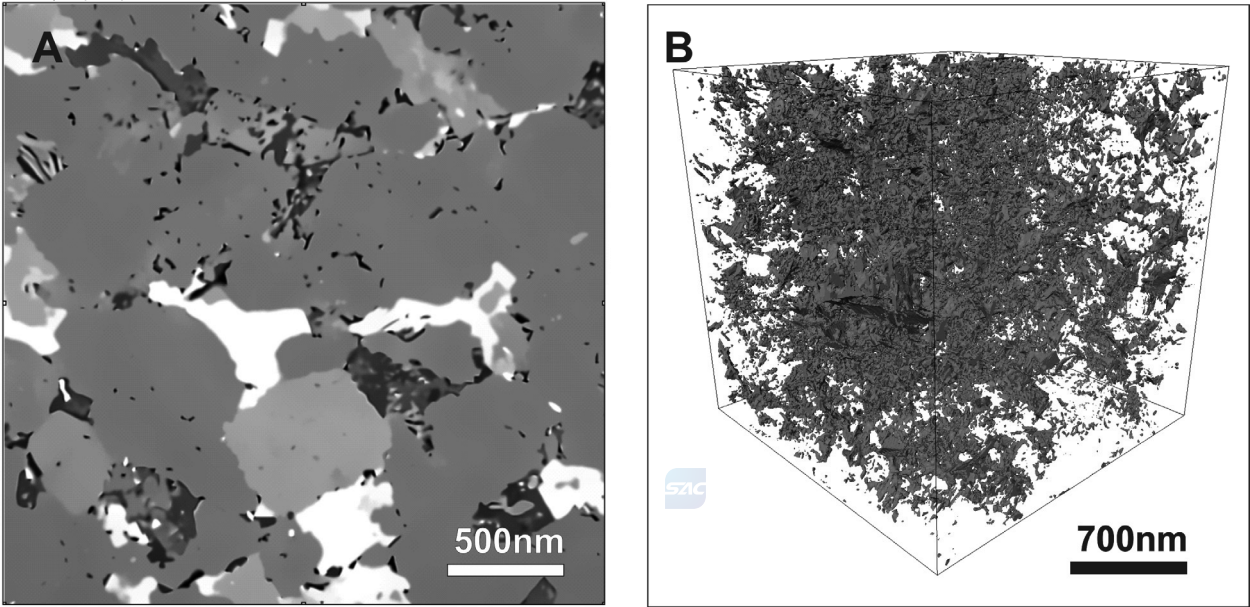
10.电子信箱:

图 A.1 检测报告基本信息实例

图 A.2 分析报告设备信息实例

表 A.1 检测报告中样品信息与扫描参数实例

分析号	原编号	地区	层位	井号	深度/ m	岩性	尺寸/ cm	扫描 模式	曝光时间/ s	扫描 张数



说明：
A —— 二维切片；
B —— 三维孔隙模型。

图 A.3 分析报告二维切片与三维孔隙模型图像实例

表 A.2 不同物质相像素点数量与体积统计表

物质相	像素点数量	体积/ μm^3
基质矿物		
孔隙		

表 A.3 孔隙度与连通率计算结果统计表

计算参数		计算结果/%
孔隙度		
孔隙连通率	A 类	
	B 类	
	C 类	

表 A.4 孔隙直径、数量、面积与体积分布统计表

序号	孔隙直径/ μm	面积/ μm^2	体积/ μm^3	形状因子
01				
02				
03				
04				
05				
06				
.....				

表 A.5 孔隙直径、数量、面积与体积分布统计表

孔隙直径/ μm	面积/ μm^2	体积/ μm^3	数量	面积百分比/%	体积百分比/%
0~0.1					
0.1~0.2					
0.2~0.5					
0.5~1					
1~2					
2~5					
5~10					
10~20					
20~50					
>50					

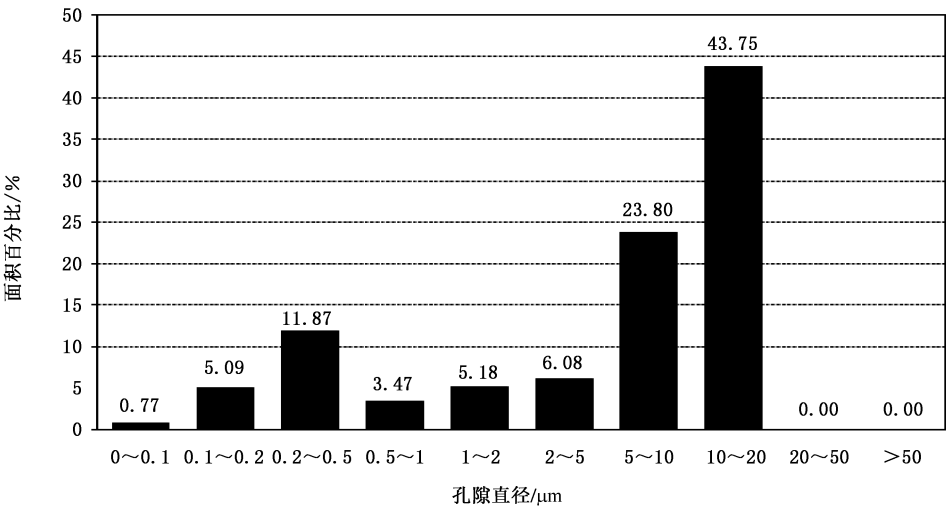


图 A.4 分析报告——孔隙面积分布直方图实例

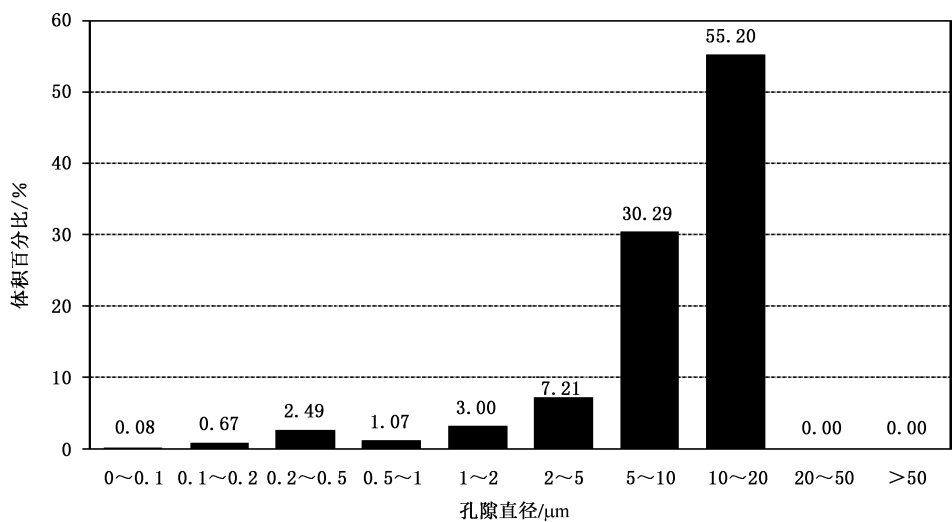


图 A.5 分析报告——孔隙体积分布直方图实例

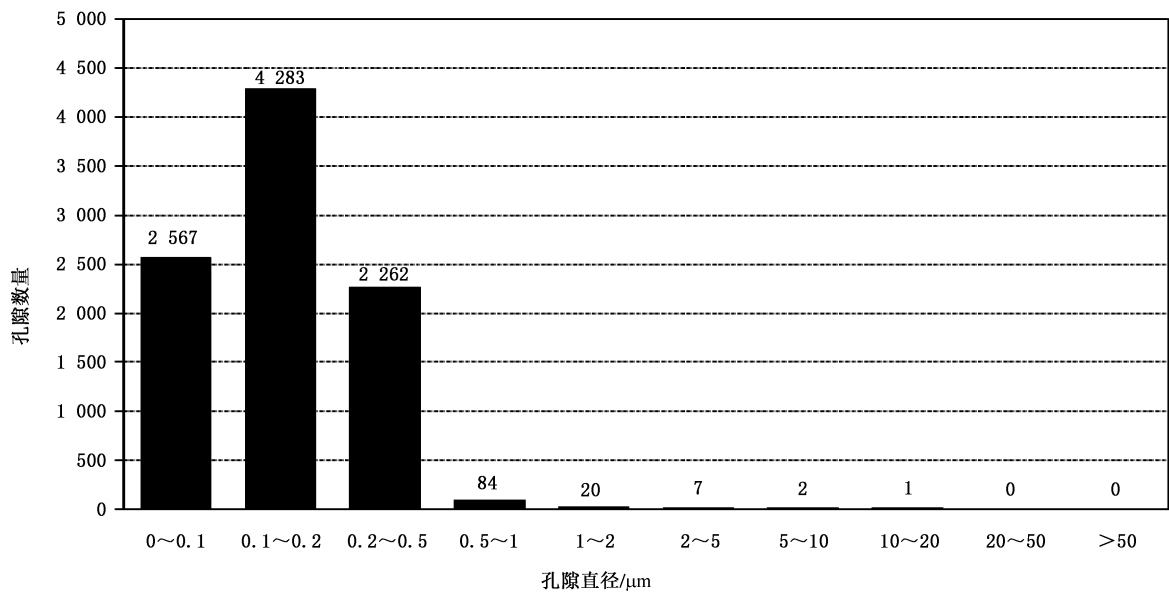


图 A.6 分析报告——孔隙数量分布直方图实例



附 录 B
(资料性附录)

不确定度影响因素及典型样品多家实验室对比结果

B.1 影响不确定度的主要因素

包括：

- a) 试样的不均匀性(例如矿物组成复杂、孔隙结构差异大)；
- b) 试样的粗糙度(例如形状不规则)；
- c) 射线源的不稳定性(例如电压、束流、能量)；
- d) 探测器老化(例如稳定度、分辨率、校正、污染、坏点)；
- e) 扫描参数设置不当(例如电压、分辨率、曝光时间、X 射线穿透率)；
- f) 孔隙识别误差(例如孔隙与矿物基质)；
- g) 图像处理不当(例如滤波、平滑不当)；
- h) 基本校正误差(例如没有公认的表格、数据)。

B.2 多家单位典型样品分析结果比对

针对典型的致密砂岩与页岩样品,选择行业内具有多年分析经验的、技术较成熟的四家实验室开展孔隙结构分析,四家单位按照 7.4.1 与 7.4.2 计算了孔隙度、孔隙连通率、孔隙直径分布,分析结果具有较好的一致性,孔隙度计算相对偏差小于 10%,具体见表 B.1~表 B.3。



表 B.1 致密岩石样品孔隙度计算结果对比表

岩性	类别	单位 1		单位 2		单位 3		单位 4	
		体积/ μm^3	体积百分比/%	体积/ μm^3	体积百分比/%	体积/ μm^3	体积百分比/%	体积/ μm^3	体积百分比/%
致密砂岩	物相	16 885 144	6.5	15 400 000	6.1	16 400 000	6.5	15 909 451	6.3
	孔隙	241 796 024	93.5	238 680 000	93.9	236 220 000	93.5	2 384 930 560	93.7
	基质矿物	A 类	12.5	A 类	11.4	A 类	—	A 类	12.0
		B 类	18.6	B 类	16.8	B 类	—	B 类	19.6
		C 类	25.2	C 类	26.2	C 类	—	C 类	23.2
	孔隙	85	0.4	79	0.3	89	0.4	99	0.4
页岩	基质矿物	24 155	99.6	24 395	99.7	24 024	99.6	24 069	99.6
	连通性	A 类	1.5	A 类	1.6	A 类	—	A 类	1.8
		B 类	5.2	B 类	4.9	B 类	—	B 类	5.6
		C 类	10.6	C 类	10.2	C 类	—	C 类	10.7

表 B.2 致密砂岩试样孔隙直径分布统计结果对比表

孔隙直径/ μm	单位 1			单位 2			单位 3			单位 4		
	数量	面积百分比/%	体积百分比/%	数量	面积百分比/%	体积百分比/%	数量	面积百分比/%	体积百分比/%	数量	面积百分比/%	体积百分比/%
0~1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1~2	9 876	0.6	0.2	7 116	0.5	0.1	8 419	0.1	0.4	26 027	6.3	0.4
2~5	22 389	9.0	4.0	18 014	9.3	4.0	17 320	2.0	5.1	31 981	13.0	4.4
5~10	6 054	13.1	8.2	5 568	15.0	9.3	4 221	4.0	6.9	6 033	16.8	8.2
10~20	873	12.0	9.3	850	14.2	10.9	540	3.8	5.1	765	13.5	9.2
20~50	133	16.7	16.3	179	28.5	27.8	114	14.5	13.8	107	14.1	16.2
50~100	15	16.1	16.9	10	11.3	12.5	15	36.8	21.4	14	9.2	14.4
>100	3	32.5	45.1	3	21.3	35.3	3	38.8	47.3	2	26.1	47.2

表 B.3 页岩样品孔隙直径分布统计结果对比表

孔隙直径/ μm	单位 1			单位 2			单位 3			单位 4		
	数量	面积百分比/%	体积百分比/%	数量	面积百分比/%	体积百分比/%	数量	面积百分比/%	体积百分比/%	数量	面积百分比/%	体积百分比/%
0~0.1	530	0.8	0.3	615	0.8	0.3	499	0.3	0.3	1 324	1.8	0.1
0.1~0.2	1 114	6.6	2.9	1 219	6.4	2.7	914	3.4	3.4	1 949	8.3	1.2
0.2~0.5	991	28.1	18.9	1 051	26.1	17.2	796	21.8	21.8	2 032	32.9	19.6
0.5~1	93	22.0	20.7	107	20.7	18.8	71	19.0	19.0	267	20.5	22.5
1~2	14	18.6	20.3	17	18.0	19.4	14	21.7	21.7	55	18.1	22.9
2~5	3	23.9	37.0	4	28.1	41.6	2	33.8	33.8	12	18.4	33.7
>5	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0

参 考 文 献

- [1] 孙亮,王晓琦,金旭,等. 微纳米孔隙空间三维表征与连通性定量分析[J]. 石油勘探与开发, 2016,43(3):490-498.
- [2] 曾更生. 医学图像重建入门[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [3] Y. Wang, C.L. Lin, J.D. Miller. Improved 3D image segmentation for X-ray tomographic analysis of packed particle beds[J]. Minerals Engineering, 2015,83: 185-191.
- [4] Zhixing Yi, Mian Lin, Wenbin Jiang, et al. Pore network extraction from pore space images of various porous media systems[J]. Water Resources Research, 2017,53, 1-22.
- [5] M.A. Knackstedt, C.H. Arns, A. Limaye, et al. Digital core laboratory: properties of reservoir core derived from 3D images[J]. SPE 87009.
- [6] G. Jin, C. Torres-Verdin, F. Radaelli, et al. Experimental validation of pore-level calculations of static and dynamic petrophysical properties of clastic rocks[J]. SPE 109547.
- [7] Naum Derzhi, Jack Dvorkin, Elizabeth Diaz, et al. Comparison of traditional and digital rock physics techniques to determine the elastic core parameters in Cretaceous formations, Abu Dhabi[J]. SPE 138586.
-