

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 161—2026

基于计算机断层扫描（CT）的煤样孔隙率 分析技术要求

Technical requirements for porosity analysis of coal samples based on computed tomography (CT)

2026 - 03 - 24 发布

2026 - 03 - 24 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 样品制备	1
5 CT 扫描	2
6 图像裁剪	2
7 图像降噪	2
8 深度学习	2
9 三维重建	3
10 表征单元体 (REV) 确定及孔隙率计算	3
11 安全注意事项	4
附录 A (资料性) 图像降噪方法	6
附录 B (资料性) 降噪效果评估方法	7
参考文献	8

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。

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。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：山东科技大学、中国矿业大学、中煤科工集团开采研究院有限公司。

本文件主要起草人：王刚、陈雪畅、刘江峰、孙晓冬、徐浩、类延辉、褚翔宇、刘浩、樊程、王衍海、秦相杰、韩冬阳、郑金叶。

本文件首次发布。

基于计算机断层扫描（CT）的煤样孔隙率分析技术要求

1 范围

本文件规定了基于计算机断层扫描（CT）的煤样孔隙率分析的样品制备、CT扫描、图像裁剪、图像降噪、深度学习、三维重建、表征单元体确定及孔隙率计算和安全注意事项等。

本文件适用于基于计算机断层扫描（CT）的煤样孔隙率分析。

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 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

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

对比度噪声比 contrast-to-noise ratio

目标区域与背景区域的平均灰度差值与两者噪声综合强度的比值。

3.2

训练集 training set

包含已标注孔裂隙信息，用于深度学习模型训练的数据集合。

3.3

表征单元体 representative elementary volume (REV)

孔裂隙结构参数随样本体积增加而趋于稳定时的最小样本体积。

3.4

体素 voxel

构成三维离散图像的最小体积单元。

4 样品制备

4.1 现场采集及运输

4.1.1 煤块尺寸不宜小于 300 mm×300 mm×300 mm，煤块外形应至少一侧相对平整。

4.1.2 煤块切下后应迅速用保鲜膜包裹，并运回煤样加工实验室。

4.2 取芯

4.2.1 取芯工作应在专门的取芯机的操作台上开展；样品直径宜为 5 mm。

4.2.2 取芯应选择煤块表面较为平整的一面固定，旋转摇杆取样。

4.2.3 钻取全程钻头应连接连续稳定的冷却水流。冷却水应沿钻头前端持续进入钻孔。冷却水宜采用常温清水、连续小流量供水方式，体积流量宜为 0.3 mL/s~3.0 mL/s。

4.2.4 取芯完成后的煤样应采用干燥处理，宜在 40℃~60℃的恒温干燥箱中进行，每间隔 2 h 测试煤样质量，连续两次称量变化率不大于 0.1%时停止干燥。干燥完成后的煤样应在干燥环境中冷却至室温，

并采用密封容器保存。

4.3 打磨加工

4.3.1 粗磨

粗磨宜使用200目~600目砂纸或研磨机抛光样品，应选择表面没有明显裂隙的煤样进行后续测试。

4.3.2 细磨

细磨过程应符合下列规定：

- a) 细磨应用 800 目~1500 目细砂纸打磨样品边缘；
- b) 在打磨样品过程中，应保持单侧磨制，并及时清理出现的粉尘，避免粉尘进入煤样内部；
- c) 整个过程应匀速稳定施压，避免对煤样产生机械冲击或瞬间载荷。

5 CT 扫描

5.1 扫描过程

CT扫描过程应按下列要求进行：

- a) 将实验煤样放置在 CT 扫描机的机械托盘上；
- b) 将煤样装入试件腔后，应采用蜂蜡或石蜡对试件进行定位，以防止试件在扫描过程中发生转动或位移；
- c) 对该状态下的煤岩试件进行 CT 扫描。

注：检测操作应按照 GB/T 29070 执行。CT 扫描应在符合 GB 18871 要求的环境下进行。

5.2 二维图像生成

二维图像生成应符合下列要求：

- a) X射线在 0° ~ 360° 范围内对试件进行旋转扫描。投影角度步长或投影数量应满足图像重建要求，投影数量不应少于 1000 视角。探测器记录各角度的衰减信号，生成正弦图；
- b) 通过滤波反投影算法将正弦图转换为横断面灰度图像序列；
- c) 每个像素的灰度值反映被扫描煤样局部的物质密度。

6 图像裁剪

6.1 图像裁剪可裁剪掉原图像宽度和高度方向各 5%~10%的区域。

6.2 裁剪后的图像序列尺寸应保持一致，并记录最终的有效分析区域尺寸。

7 图像降噪

7.1 降噪方法

7.1.1 常用降噪方法可包括高斯滤波、中值滤波和均值滤波，宜根据图像噪声特征选用一种方法，见附录 A。

7.1.2 灰度值随机波动的噪声，宜采用高斯滤波；煤 CT 图像中矿物分布不均匀，引入椒盐噪声、脉冲噪声时，宜采用中值滤波；CT 扫描分辨率较低且噪声强度较低时，宜采用均值滤波。

7.2 降噪效果评估

抑制噪声的同时，孔隙边界位置、连通关系及孔径分布等关键结构特征不应发生显著改变，并通过信噪比或对比度噪声比等指标对降噪效果定量评估，见附录 B。

8 深度学习

8.1 通用流程

基于以卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）为代表的深度学习方法的孔裂隙分割流程应包括训练集构建、模型训练、预测分割及效果评估与优化等步骤。

8.2 训练集构建

8.2.1 从预处理后的 CT 图像序列中, 选取涵盖煤基质、常见矿物及不同尺度孔裂隙特征的二维切片图像作为初始训练集。所选切片应具有明显的灰度梯度变化。

8.2.2 对训练集图像应进行精确的孔裂隙标注, 生成对应的分割标签或掩膜。标注应准确界定孔裂隙与基质区域的边界。

8.2.3 标注完成后, 将原始图像与对应的分割标签组合, 构成用于模型训练的样本对。

8.3 数据集划分

8.3.1 数据集划分应按构建的训练样本确定。宜将样本按 70%~80%划分为训练集、10%~15%划分为验证集、10%~15%划分为测试集。

8.3.2 测试集不应参与模型训练和模型选择, 仅用于最终模型的独立性能评估。

8.4 模型训练与初始分割

8.4.1 选择合适的基于卷积神经网络的 U-Net 等深度学习模型, 并将已划分的数据集中的训练集和验证集用于模型训练与性能监控。

8.4.2 利用训练子集对模型训练, 通过调整模型参数使其学习孔裂隙特征。训练过程中宜使用验证子集监控模型性能, 防止过拟合。

8.4.3 将达到预期性能的训练后模型应用于整个 CT 图像序列, 进行孔裂隙的初始自动分割, 生成初始二值分割结果。

8.5 分割评价指标

为提高评价的科学性, 应采用交并比（Intersection over Union, IoU）、Dice系数等重叠度指标作为主要评价依据, 更准确反映模型对孔裂隙区域的识别质量。

8.6 分割效果评估与模型优化

8.6.1 对初始分割结果进行视觉检查和定量评估, 识别分割孔裂隙误判、边界模糊等不理想区域。

8.6.2 对于分割效果不理想的区域, 应将其作为增补样本, 重新进行精细标注。

8.6.3 将增补的标注样本与初始训练集合并, 构成优化后的训练集, 对基于卷积神经网络的深度学习模型进行增量训练或重新训练。

8.6.4 使用优化后的模型对原始图像进行再次预测, 以获得更精确的孔裂隙分割结果。此评估-优化流程可迭代进行, 直至分割结果满足后续分析的精度要求。

9 三维重建

9.1 三维堆叠与插值

将分割后的二值图像序列沿Z轴堆叠, 宜采用最邻近插值进行空间重构。

9.2 体渲染

应利用光线投射算法模拟光线穿透体数据, 根据透明度与颜色映射生成立体效果。

10 表征单元体 (REV) 确定及孔隙率计算

10.1 分析区域设置

选取三维图像数据的几何中心体素点为基准, 设置初始分析立方体区域, 边长 L_0 应满足下列要求:

$$L_0 \geq 10\Delta x \dots\dots\dots (1)$$

式中:

L_0 ——为初始分析立方体边长;

Δx ——为CT图像像素的实际空间尺寸。

注： L_0 与 Δx 应采用相同长度单位。鉴于不同CT设备空间分辨率差异较大，本文件不对其具体单位作统一规定。

10.2 迭代计算流程

迭代计算应按下列流程进行：

按 $10 \leq k \leq 20$ 的固定步长 $\Delta L = k \cdot \Delta x$ 扩展立方体边长，第 n 次迭代边长：

$$L_n = L_0 + n \cdot \Delta L \dots\dots\dots (2)$$

终止条件： L_n 达到原始图像最短边尺寸的80%。

10.3 孔隙率计算

对每个尺寸为 L_n 的立方体子区域，按式（3）计算孔隙率 ϕ_n ：

$$\phi_n = \left(\frac{V_{pore,n}}{V_{total,n}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$V_{pore,n}$ ——为子区域内标记为孔隙的体素总数；

$V_{total,n}$ ——为子区域内煤基质与孔隙的体素总数。

10.4 REV 判定标准

10.4.1 稳定性判据

当连续四个尺度下，相邻两次迭代得到的孔隙率差值的绝对值均不大于0.5%时，视为满足稳定性判据。其计算如下：

$$|\phi_{n+1} - \phi_n| \leq 0.5\% \dots\dots\dots (4)$$

$$|\phi_{n+2} - \phi_{n+1}| \leq 0.5\% \dots\dots\dots (5)$$

$$|\phi_{n+3} - \phi_{n+2}| \leq 0.5\% \dots\dots\dots (6)$$

式中：

ϕ_n 、 ϕ_{n+1} 、 ϕ_{n+2} 、 ϕ_{n+3} ——为连续四个尺度下计算得到的孔隙率(%)。

满足公式（4）~（6）时，判定孔隙率已在尺度上趋于稳定。

10.4.2 统计判据

在当前尺度 L_n 下，计算不宜少于5个不同移动立方体位置的孔隙率，并求得该尺度的变异系数。若变异系数不大于5%，则视为满足统计判据。变异系数计算式如下：

$$C_v = \frac{\sigma_\phi}{\bar{\phi}} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

式中：

C_v ——为变异系数；

σ_ϕ ——为孔隙率标准差；

$\bar{\phi}$ ——为对应位置孔隙率的平均值(%)。

10.4.3 同时满足稳定性判据和统计判据的最小 L_n 为REV尺寸。

10.4.4 最终孔隙率确定

应取REV尺寸 L_n 内所有位置孔隙率的算术平均值 ϕ_{REV} 作为煤样的孔隙率。

11 安全注意事项

11.1 样品运输与储存安全

11.1.1 煤样在运输过程中应采用密封袋、保鲜膜等进行密封包装，并采用缓冲材料防震，防止因震动

导致煤样破损或结构改变。

11.1.2 运输与短期储存期间应避免煤样暴露于潮湿环境或直接日晒，防止水分显著流失或吸入。

11.2 机械与电气安全

11.2.1 人员操作取芯机、研磨机、抛光机、CT 扫描仪等设备前，应检查其电源接线、接地保护是否完好可靠，确保用电安全。

11.2.2 人员在样品取芯、打磨过程中应佩戴防尘口罩。

11.2.3 操作人员应定期检查设备冷却系统管路连接处，确保无渗漏、堵塞，防止冷却液泄漏导致设备故障或实验室环境安全隐患。

11.2.4 人员操作机械设备时，应佩戴符合要求的个人防护装备。

11.2.5 人员在设备运行前应检查钻头夹持、冷却水管路等部件是否完好、固定牢靠。设备运行中身体部位不应靠近旋转或运动部件。

11.2.6 设备应按操作手册操作，遵守启动、运行、停机程序。发现异常声响、振动、异味或故障时，应立即停机断电，待故障排除后方可继续操作。

11.3 设备维护与校准

CT设备应定期进行性能校准与图像质量检测。

附录 A (资料性) 图像降噪方法

A.1 高斯滤波

对于灰度值随机波动的噪声，基于二维的高斯函数，得到高斯模板，再利用该模板扫描图像上其他像素点，新图像中模板中间的像素值为之前模板领域内的像素的加权平均值。

A.2 中值滤波

当煤 CT 图像中矿物分布不均匀时易引入椒盐噪声、脉冲噪声，可采用中值滤波进行降噪，用邻域像素灰度值的中值替代中心像素灰度值，可参考公式：

$$y = \text{Median}[x_1, x_2, \dots, x_n] = \begin{cases} x'_{(n+1)/2} & n \text{ 为奇数} \\ \left[\frac{x'_n + x'_{n/2+1}}{2} \right] / 2 & n \text{ 为偶数} \end{cases} \dots\dots\dots (\text{A. 1})$$

式中：

y ——为该区域中心点的灰度值；

x_1, x_2, \dots, x_n ——为邻域内不同点的灰度值。

A.3 均值滤波

当 CT 扫描分辨率较低且噪声强度较低时，可采用均值滤波，用邻域内的像素的平均值来代替原像素值。

附 录 B
(资料性)
降噪效果评估方法

B.1 信噪比

计算图像区域的平均灰度值 μ_{signal} 与灰度值标准差 σ_{noise} 之比:

$$SNR = \frac{\mu_{\text{signal}}}{\sigma_{\text{noise}}} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

SNR——为图像信噪比;

μ_{signal} ——为图像区域的平均灰度值;

σ_{noise} ——为图像区域的灰度值标准差。

降噪处理后, SNR值显著提高, 当SNR提升大于3时认为降噪完成。

B.2 对比度噪声比

分别在孔隙区域和相邻基质区域选取大小相近的感兴趣区域。计算两区域平均灰度值之差 $\Delta\mu$ 与两区域灰度值标准差的平方和的平方根之比:

$$\Delta\mu = |\mu_{\text{matrix}} - \mu_{\text{pore}}| \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

μ_{matrix} ——为基质区域平均灰度值;

μ_{pore} ——为孔隙区域平均灰度值。

$$CNR = \frac{\Delta\mu}{\sqrt{\sigma_{\text{matrix}}^2 + \sigma_{\text{pore}}^2}} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

σ_{matrix} ——为基质区域灰度值标准差;

σ_{pore} ——为孔隙区域灰度值标准差。

降噪处理后, CNR值显著提高, 当CNR提升大于3时认为降噪完成。

参 考 文 献

- [1] GB/T 23561.7-2009 煤和岩石物理力学性质测定方法 第7部分：单轴抗压强度测定及软化系数计算方法
- [2] GB/T 29070-2012 无损检测工业计算机层析成像（CT）检测通用要求
- [3] GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准
- [4] 胡咤咤, 张寻, 金毅, 等. 基于 μ CT和深度学习的煤裂隙智能提取方法[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(02): 55-66.
- [5] Liu Wei, Han Dongyang, Wang Gang, et al. Representative elementary volume evaluation of coal microstructure based on CT 3D reconstruction[J]. Fuel, 2023, 336: 126965.
- [6] Lv Wenbo, Jin Zhixin, Deng Cunbao, et al. Investigation of pore-fracture evolution in pre-acidified coal under NMP treatment by CT scanning[J]. Fuel, 2026, 404: 136185.
- [7] Lasnel Régis, Frouté Laura, Kovscek Anthony R., et al. Image processing and segmentation open source codes applied to FIB-SEM images of ultra-tight gas shales samples: Enhanced pore space representativeness and mineral identification[J]. Gas Science and Engineering, 2025, 138: 205610.
- [8] Tomita Yoya, Ichikawa Yasutaka, Hashizume Kengo, et al. Effect of gaussian smoothing filter size for CT-based attenuation correction on quantitative assessment of bone SPECT/CT: a phantom study[J]. Journal of Digital Imaging, 2023, 36(5): 2313-2321.