

中文引用格式:张洪硕,高科,于健康,等. 煤矿综放采空区岩块自由堆积 PNM 重构分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 153-162.

英文引用格式:ZHANG Hongshuo, GAO Ke, YU Jiankang, et al. Reconstruction and analysis of PNM for free accumulation of rock blocks in fully mechanized top-coal caving goaf of coal mines[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 153-162.

煤矿综放采空区岩块自由堆积 PNM 重构分析^{*}

张洪硕^{1,2}, 高科^{** 1,2}教授, 于健康^{1,2}教授, 李启文^{1,2}

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;

2 辽宁工程技术大学 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.1508

基金项目:国家自然科学基金资助(52074148, 52274205, 52474225)。

【摘要】 为准确描述煤矿综放采空区内部自由堆积岩块状态及孔隙空间特性,引入孔隙网络模型(PNM),开展固定空间内岩块自由堆积切片试验和图像处理,利用 OpenPNM 和 PoreSpy 等开源包提取孔隙网络信息,三维可视化重构和定量表征孔隙网络模型,分析重构模型拓扑结构的几何特性和统计特征。结果表明:随着固定空间内自由堆积岩块块度的增加,孔喉尺寸明显增大,平均直径由 2.46 和 1.41 mm 分别增至 3.85 和 2.73 mm,与喉道长度的相关性较弱,其中孔喉数目由 3 146 和 6 428 分别减少至 1 043 和 2 225,孔隙配位数集中在 2~5,峰值为 2,孔隙空间所占比例增大,多孔介质连通性增强;各拓扑性质参数整体上近似呈现正偏态分布,波峰偏左且数据集中值较小;计算两点相关函数得出原始图像数据和重建模型的孔隙度相对误差均在 2.5% 以内。

【关键词】 煤矿综放采空区; 岩块自由堆积; 孔隙网络模型(PNM)重构; 切片试验; 图像处理; 标记分水岭分割(SNOW)算法; 提取孔隙网络(PNE)

Reconstruction and analysis of PNM for free accumulation of rock blocks in fully mechanized top-coal caving goaf of coal mines

ZHANG Hongshuo^{1,2}, GAO Ke^{1,2}, YU Jiankang^{1,2}, LI Qiwen^{1,2}

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: To accurately characterize freely accumulated rock blocks and pore space properties in fully mechanized top-coal caving goafs, a PNM was introduced. Slice tests of free rock block accumulation in fixed space and corresponding image processing were conducted. Pore network information was extracted using Open-source libraries like OpenPNM and PoreSpy, followed by 3D visual reconstruction and quantitative characterization of PNM to analyze topological geometric and statistical features of the reconstructed model. Results show that with increasing freely accumulated rock block size in fixed space, pore-throat size increases significantly; the average diameters of pores and throats rise from 2.46 mm and

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0153-10; 收稿日期:2024-12-10; 修稿日期:2025-12-22

** 通信作者:高科(1983—),男,山东莱芜人,博士,教授,主要从事灾变计算与智能通风方面的研究。E-mail:gaoke@Intu.edu.cn。

1.41 mm to 3.85 mm and 2.73 mm, respectively, with weak correlation to throat length. The numbers of pores and throats decrease from 3 146 and 6 428 to 1 043 and 2 225, respectively, and the pore coordination numbers concentrate between 2 and 5 (peak at 2). The proportion of pore space increases, and the connectivity of porous media is enhanced. The topological property parameters are approximately positively skewed distribution as a whole, with the peak shewed to the left and the concentrated values in the dataset being relatively small. Two-point correlation function calculations reveal that the relative errors of porosity between the original image data and the reconstructed model are less than 2.5%.

Keywords: fully mechanized top-coal caving goaf of coal mines; free accumulation of rock blocks; pore network model (PNM) reconstruction; slice test; image processing; sub-network of an over-segmented watershed (SNOW); pore network extraction (PNE)

0 引言

我国煤矿不断向大规模深井开采方向发展,导致通风环境与灾害风险日益复杂^[1-2]。厚煤层综放开采后,采空区内部封闭空间具有特殊性,人员无法直接进入,本质上属于三维多连通多尺度的复杂多孔介质,孔隙孔洞和夹缝交错,尺寸范围变化复杂,分布不均匀,内部岩块间大孔洞遍布甚至超过几米,内部气体流场仍为黑盒问题。对此,GAO Ke 等^[3]优化煤矿综放采空区二域流场理论,根据上覆岩层受采动影响周期性动态连续变化,将岩块垮落区域分为自由堆积-缝洞域和破碎重压-缝隙域,后者又可分为过渡子域和多孔介质域。其孔隙尺度的划分主要取决于气体流通的主通道,在破碎重压阶段,岩块紧密接触且被压实,孔隙连通性较差,气体通过岩块间细小缝隙通道流动,属于小孔隙尺度,可基于多孔介质 Darcy 渗流理论及其扩展,在孔隙尺度表征单元体 (Representative Elementary Volume, REV) 上开展数值模拟^[4];而自由堆积阶段,不规则岩块的状态复杂,岩块和孔洞尺寸范围变化大,气体流动路径复杂多变,岩块内部渗透系数几乎为 0,自由堆积形成的大孔洞和破碎煤岩体间形成的缝隙才是气体流通的主通道,岩块尺寸增大扩充气体流通的有效通道,属于大孔隙尺度。气体从工作面漏风渗入^[5],非线性流场复杂多变,无法仅用 REV 表征。采空区孔隙空间结构复杂且动态变化影响气体渗流场,成为遗煤自然发火和瓦斯爆炸等热动力灾害的主要动因^[6]。

煤矿综放采空区气体流动行为和输运机制与多孔介质结构特性参数的关联性极大^[7-8],因此,提取孔隙网络 (Pore Network Extraction, PNE) 并开展三维孔隙网络模型 (Pore Network Modeling, PNM) 重构与分析具有重要意义。马海锐^[9]通过扫描获取透

水混凝土连续切片图像,使用 Avizo 软件进行灰度调节、滤波处理以及阈值分割等图像处理,解决模拟退火算法三维重构中存在的聚类分割问题,减少过多的孤立孔隙。解朝阳等^[10]用最大球算法建立试样三维重构模型表征单元体,分析球棍模型的孔隙网络空间特征参数,得到孔喉半径、孔隙配位数等近似服从正态分布规律。吴鑫等^[11]通过中值滤波和数学形态学变换改进分水岭分割算法对噪声敏感的缺陷,避免“过分割”问题,实现煤岩裂隙网络重构。

综合上述,煤矿综放采空区岩块的自由堆积状态仍不能准确模拟和描述,无合理方法重构该区域的 PNM,仍不能从本质上探究该区域孔隙骨架的拓扑结构,因此,文中开展固定空间内岩块自由堆积切片试验和图像处理,基于标记分水岭分割算法 (Sub-Network of an Over-segmented Watershed, SNOW) 提取三维孔隙网络,以期实现三维可视化 PNM 重构与定量表征,并分析重构模型的特性。

1 煤矿综放采空区 PNM

PNM 是用来描述流体在多孔介质中输送行为的管网模型,替代将多孔材料视为体积平均的连续体,把孔隙空间离散为多组相互联通的孔隙和喉道^[12]。OpenPNM 是基于 Python 的开源包^[13],用来建立非均匀材料的单相或多相物理行为模拟。GAO Ke 等^[3]以“O”型垮落压实分布特征为理论依据,建立煤矿综放采空区垮落介质的非均匀二维 PNM,创新性地将 OpenPNM 结合 Stokes flow 算法单相流动模拟采空区气体,得到压力场和速度场分布特征。PNM 将 2 个相邻位置视为实际连接的孔隙和喉道,更接近真实的空间结构。文中用“球棍模型” (Spheres and Cylinders) 来描述,如图 1 所示,该组件由喉道 ij 和相邻孔隙 i 和 j 的一半组成, d_{ij} 、 d_i 、 d_j 为喉道 ij 、孔隙 i 、孔隙 j 的直径, m ; L_{ij} 、 L_i 、 L_j 为喉道 ij 、

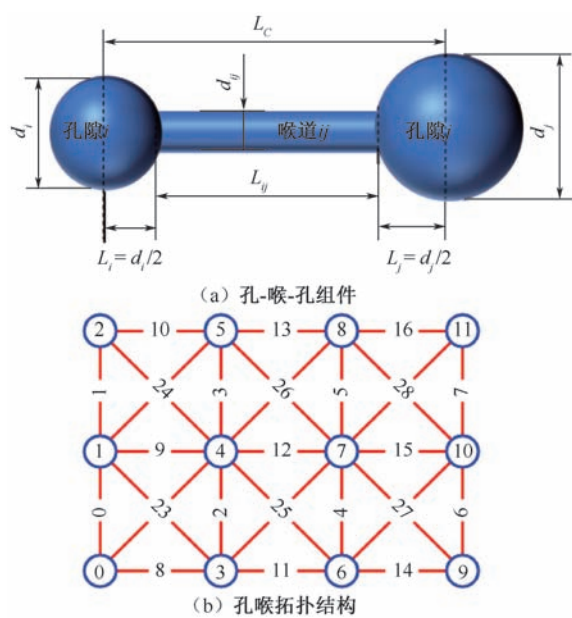


图 1 PNM 拓扑结构
Fig. 1 PNM topology

孔隙*i*、孔隙*j*的长度,*m*; *L_c* 为组件的长度, *m*。PNM 遵循孔喉净流量守恒方程, 将渗流简化为压力管道流问题, 如下式:

$$q_i = \sum_{j=1}^{n_i} g_{ij}(p_j - p_i) = 0$$

(1)

式中: *q_i* 为通过孔隙*i* 的净流量, *m*³/*s*; *n_i* 为孔隙*i* 的配位数, 个; *g_{ij}* 为孔隙*i*、*j* 之间流动的渗透系数 (也称传导系数), *m*³/(*Pa* · *s*); *p_i*、*p_j* 为相邻孔隙中的压力, *Pa*。

2 岩块切片试验

2.1 切片试验方法

为得到深度模拟煤矿综放采空区岩块自由堆积特性且富含内部三维孔隙空间特征信息的图像数据, 开展不同粒径岩石块在固定空间内的自由堆积模拟和切片试验。以岩块尺寸为 15~20 mm 为代表, 切片试验流程如图 2 所示。

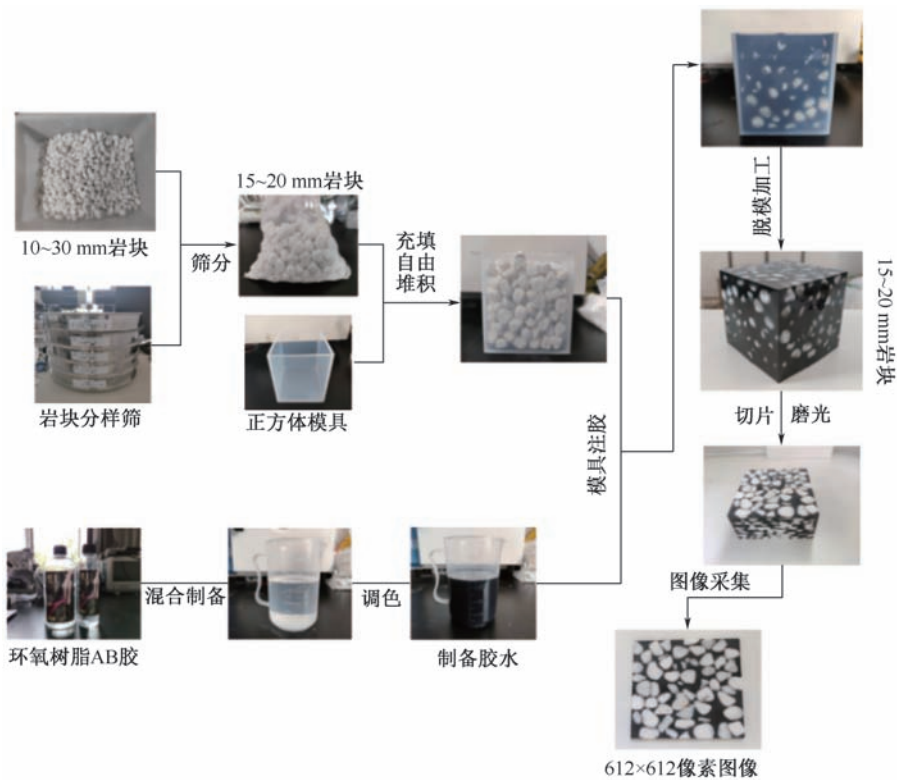


图 2 岩块切片试验流程
Fig. 2 Process of rock block slicing test

- 1) 岩块预处理。为获得岩块和孔隙间对比度明显的图像, 材料选择平均粒径在 10~30 mm 的白色小岩石块, 用岩块分样筛选器按直径 5 mm 块度间隔筛选混合材料, 得到块度尺寸为 10~15、15~20、20~25 和 25~30 mm 的 4 组试验原料。
- 2) 岩块自由堆积充填。准备 4 个相同内尺寸为 102 mm×102 mm×102 mm 的高透规则立方体模具, 将 4 组材料分别倒入模具中, 摇晃模具使岩块实

现自由堆积。

3) 模型制作。将环氧树脂胶水 A 胶(树脂主剂)、B 胶(固化剂)2 组分按照合适体积比混合置于量杯中,缓慢搅拌并消除气泡。为形成黑白对比,向胶水中注入黑色素并搅拌均匀。将制备好的胶水缓慢引流至 4 组模具内部至没过岩块,摇匀并消除气泡。

4) 注胶脱模。将模型静置 48 h 以上达到固化状态,分层多次向模具中注入胶水防止出现炸胶现象。制作完成后,脱模形成 4 个正方体试验品。

5) 试验品切片。考虑模具几何空间影响导致试验品表面孔隙度相对于内部较大而不够准确,用金刚砂线切割机切割表面,使其尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,并以 5 mm 厚度切片,由于实际切割损耗和试验条件限制,最终成功获得 4 组尺寸为 100 mm×100 mm 各 9 次切片,使用全自动数控磨床抛光打磨切面至光滑平整。

6) 图像采集。使用数码高清摄录一体机采集 4 组材料 9 次切片的正反两面图像,得到每组 18 张图像数据,为最大限度保留切片图像信息,使用 Fast Stone Capture 软件来捕捉采集固定域,最终得到 4 组 18 张像素为 612×612、厚度为 1 个像素的二维切片试验图像数据。

2.2 图像处理

利用 Matlab 软件进行图像处理,得到用于孔隙网络提取的二维图像数据,如图 3 所示,直观展示出图像处理后的黑色孔隙像素(0)和白色岩块像素(255)的黑白对比和轮廓特征信息。

1) 灰度处理。将红绿蓝三原色切片试验图像转化为二维灰度图像。

2) 中值滤波降噪。将图像中每个像素灰度值

替换为某邻域内的中值,其数学原理如下:

$$g(x,y) = \text{median} \{f(x+a,y+b) | (a,b) \in \Omega\} \tag{2}$$

式中: $g(x,y)$ 为滤波后图像在坐标 (x,y) 处的像素值; $f(x+a,y+b)$ 为原始图像在坐标 $(x+a,y+b)$ 处的像素值; a,b 为相对中心点 (x,y) 的偏移量; $(a,b) \in \Omega$ 为二维邻域窗口; median 为中值滤波函数。

3) 阈值分割与二值化。将切片试验图像按给定灰度值分为黑色(0)和白色(255)2 类区域。使用大津阈值分割法(Otsu's Thresholding, OTSU)选取最佳分割阈值 T ,即选择使类间方差 $\sigma_w^2(t)$ 最大的 t 值,如下式:

$$\sigma_w^2(t) = w_0(t)w_1(t)((\mu_0(t) - \mu_1(t)))^2 \tag{3}$$

$$T = \text{argmax}_t \sigma_w^2(t), t \in [0, G - 1] \tag{4}$$

式中: $\sigma_w^2(t)$ 为类间方差; t 为阈值; $w_{0(t)}, w_{1(t)}$ 分别为阈值 t 以下、以上的像素权重; $\mu_{0(t)}, \mu_{1(t)}$ 分别为阈值 t 以下、以上的像素均值; T 为最优阈值; G 为图像灰度级总数。

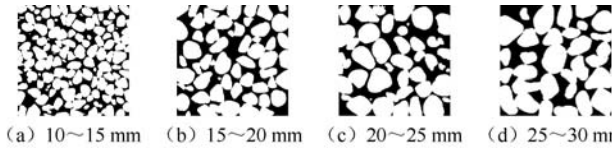


图 3 不同块度尺寸的切片试验图像处理

Fig. 3 Image processing of slice test with different block sizes

3 基于 SNOW 算法的 PNM 重构

3.1 提取和筛选二维孔隙网络图像

孔隙空间的 SNOW 算法对从层析成像图像中 PNE 具有优势^[14-15]。将处理后的图像数据转化为算法所能识别的布尔格式,True(1)为孔隙空间,而

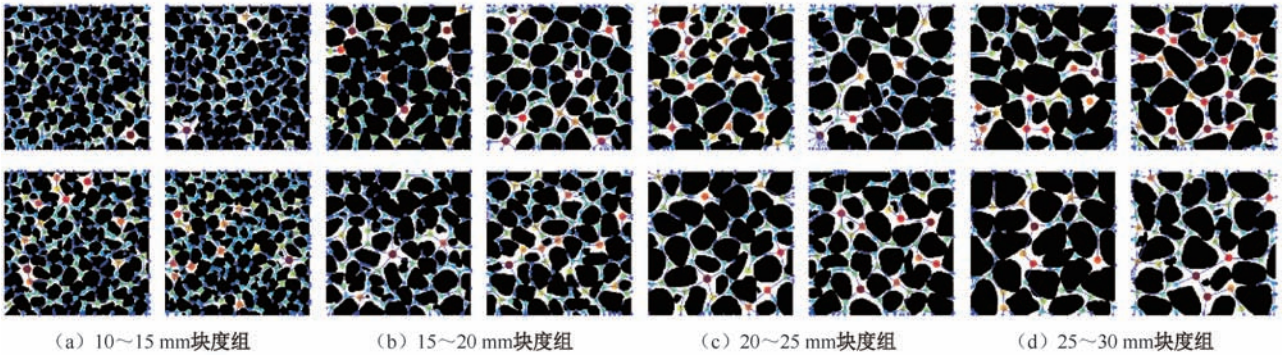


图 4 不同块度尺寸切片试验图像的二维孔隙网络标记

Fig. 4 2D pore network labeling of slice test images with different block sizes

岩块固体为 False(0),使用预定义函数 snow2 提取二维孔隙网络。图 4 为每组 4 张切片图像提取的二维孔隙网络标记图,展示 SNOW 算法在二维切片图像上的提取效果和原理。

孔隙度是表征岩块自由堆积特性和孔隙空间拓扑结构性质的关键参数。经处理后的二维切片图像孔隙度、三维孔隙空间的绝对孔隙度如下式。考虑对模型重建的影响,去掉每组偏离平均孔隙度的极端值,最终保留每组 13 张二维切片图像数据。

$$\eta = N_{p0} / (N_{p0} + N_{p1}) \quad (5)$$

$$P_{abs} = V_{pt} / V_b \quad (6)$$

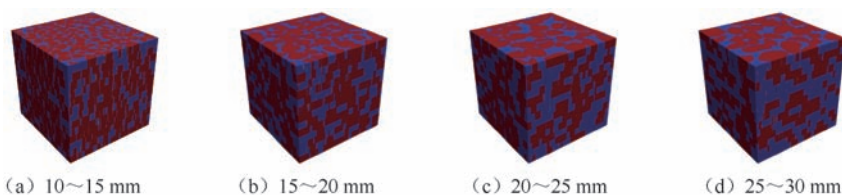


图 5 不同块度尺寸二维切片图像的三维堆叠

Fig. 5 3D stacking of 2D sliced images with different rock block sizes

3.3 基于 SNOW 算法提取三维孔隙网络

SNOW 算法使用基于标准标记的分水岭分割函数识别孔隙,关键在于找到 1 组合适的初始标记,在图像处理距离变换中找到真正对应于孔隙中心的峰值,确保分水岭不被过度分割,结合 Python 软件的相关开源库(OpenPNM、PoreSpy、Scipy、Scikit-image 等),具体操作如下:

1) 预处理距离图。用 distance_transform_edt 预定义函数得到孔隙空间的欧几里得距离变换图,再使用高斯滤波器平滑图像,当高斯核标准差 $\sigma=0.4$ 时,局部最大值数量下降效果最好,表明平滑减少虚假峰值且保留重要峰值。

2) 消除鞍点和高原处峰值。调用 find_peaks 预定义函数找到峰值,再调用预定义函数 trim_saddle_points 去除鞍点和伪峰,防止被误识为分水岭线。

3) 合并临近峰值。移除距离其他峰值比距离固体更近的峰值,调用 trim_nearby_peaks 预定义函数滤除剩余杂散峰值。

4) 划分孔隙区域。前 3 个步骤创建 1 组标记,用于传递给算法进行精准分割,调用 regions = skimage.segmentation.watershed(image = -dt, markers=peaks, mask=dt>0),regions 是算法将图像分割成不同富含孔隙信息的子区域数据。反转距离图

式中: η 为二维图像孔隙率,%; N_{p0} 为灰度值 0 的黑色孔隙像素点数目,个; N_{p1} 为灰度值 255 的白色固体岩块像素点数目,个; P_{abs} 为三维孔隙空间的绝对孔隙度,%; V_{pt} 为介质空间内所有孔隙的体积, m^3 ; V_b 外观总体积, m^3 。

3.2 图像三维空间堆叠

使用 2D 连续切片试验图像合成 3D 空间堆叠图像,用 ImageJ 软件调整二维图像序列,沿着 Z 轴方向对齐按次序分别在空间连续堆叠 47 次,最终形成像素为 $612 \times 612 \times 611$ 的三维图像,如图 5 所示,建立 4 组不同块度尺寸的三维可视化图像。

像将峰值变成谷值,则最低值点首先被标记,markers 是经过峰值处理后的标记点,mask=dt>0 指定算法分割区域为距离变换图像中所有非零孔隙区域。

3.4 三维 PNM 重构

调用孔隙空间的网络提取函数 net = ps.networks.regions_to_network(regions * im, voxel_size = 1.63×10^{-4}),其中 voxel_size 为体素尺寸,返回的 net 包含所有孔隙和喉道状态等网络拓扑结构信息;region * im 将孔隙区域的标记映射到图像中,确保只有孔隙空间在 PNM 中包含。调用函数 network_from_porespy 将提取的三维孔隙网络数据可视化为实际的 PNM,用 Geometry 模块的“球棍模型”描述孔喉,PNM 的拓扑性质参数和物理状态参数等相关值可直接由 OpenPNM 统计生成,或将一些属性标签添加至构建好的 PNM 中。调用 check_network_health 预定义函数检查重构 PNM 的拓扑结构健康状况,返回病态孔喉索引,保留有效孔喉,调用 trim 修剪函数去除异常孔喉,h[‘disconnected_pores’]为若干断开连接孔隙和孤立孔隙,得到有效 PNM。

最终建立 4 组不同岩块块度尺寸的等效 PNM,可视化后如图 6 所示,直观展示利用 SNOW 算法 PNE 经过三维重构的模拟煤矿综放采空区岩块自由堆积状态下的 PNM,其拓扑结构的几何特征参数见表 1。

表 1 PNM 拓扑结构的几何特征参数
Table 1 Geometric characteristic parameters of PNM topology

岩块尺寸/ mm	孔隙数目 N_p /个	喉道数目 N_t /个	有效孔隙度 $P_{\text{eff}}/\%$	平均孔隙 直径 D_p /mm	平均喉道 直径 D_t /mm	平均喉道 长度 L_t /mm	平均配位 数 N_c /个
10~15	3146	6428	0.2951	2.46	1.41	4.43	4.09
15~20	1745	3618	0.3138	3.16	1.93	4.51	4.13
20~25	1322	2727	0.3168	3.49	2.37	4.67	4.15
25~30	1043	2225	0.3289	3.85	2.73	5.11	4.27

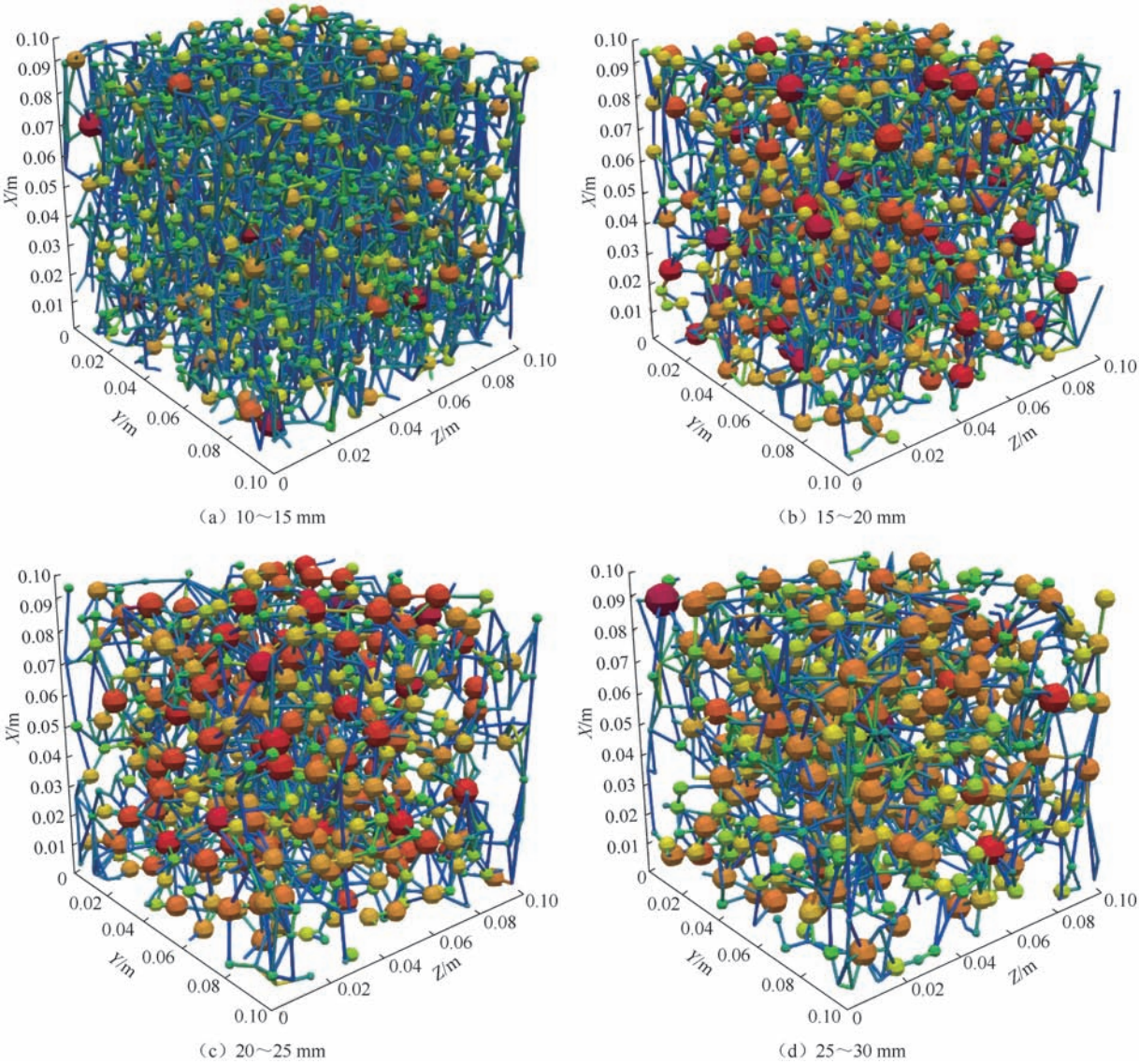


图 6 不同块度尺寸的重构 PNM
Fig. 6 Reconstructed PNM with different rock block sizes

4 PNM 特征分析

4.1 模型拓扑性质分析

统计 4 组三维 PNM 重构后的拓扑性质参数,绘制不同块度尺寸下模型的孔喉定量参数和几何特性参数分别如图 7、图 8 所示,各几何特性参数整体近

似呈现正偏态分布 (Positively Skewed Distribution, PSD),即大部分数据集中在分布的左侧(偏小值),大多分布在累积频率的 80%限制内。

1) 孔喉尺寸和定量特征分析。由图 7 可知:各组孔隙、喉道直径和喉道长度分布特征呈现波峰偏左,即在大尺寸岩块自由堆积多孔介质中,大部分孔

喉尺寸较小,大尺寸孔喉较少,随着固定空间内自由堆积岩块尺寸增加的影响,孔喉尺寸增加的幅度较大,相关性较强,而对喉道长度的影响不大。

由图 8 可知:随着介质中自由堆积岩块尺寸的增大,孔喉数目不断减少,其中 10~15 mm 块度组由 3 146 个孔隙和 6 428 个喉道组成,数目最多,其余 3 组的孔喉数目与该组相比有大幅度减少,25~30 mm 块度组仅由 1 043 个孔隙和 2 225 个喉道组成;孔隙和喉道平均直径由 2.46 mm 和 1.41 mm 分别增大至 3.85 mm 和 2.73 mm,平均喉道长度由 4.43 mm 增加至 5.11 mm,孔隙空间比例呈现不断变大趋

势。

2)孔隙空间连通性分析。岩块自由堆积孔隙空间的连通性可用孔隙配位数来表征。由图 7 可知:大部分孔隙配位数较小,极大配位数的孔隙所占比例极小,具体数值见表 2,大多集中在 2~5 之间,峰值均为 2。各组配位数为 1 的自端孔隙占比较少,均低于 6.5%,配位数为 2 的频数最高,平均配位数几乎不变。表明:介质中大多数孔隙都与 2~5 个周围孔隙相连,且随着自由堆积岩块尺寸的增加比例不断增加,各组自端孔隙比例明显减小,岩块尺寸变大使孔隙空间的连通性变好,介质孔隙度增高。

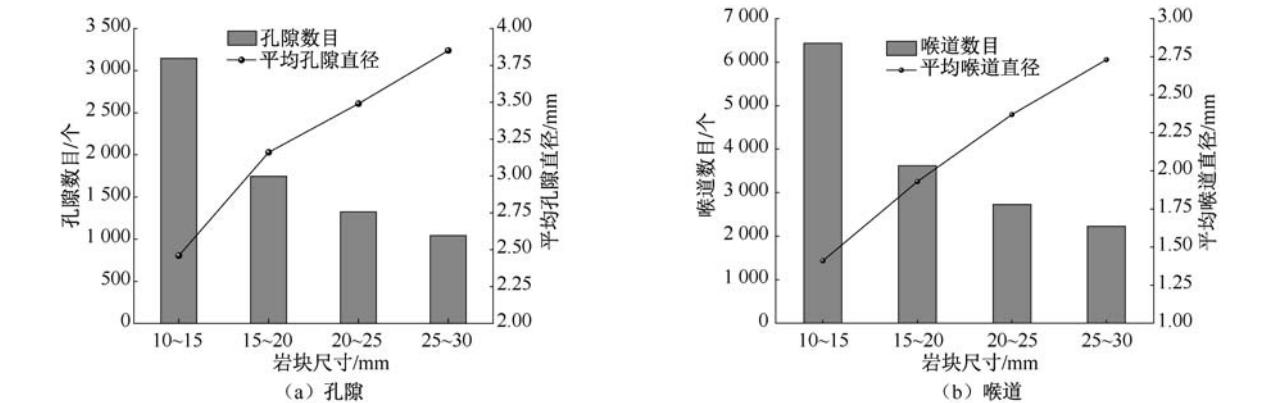


图 7 不同岩块尺寸下模型的孔喉定量特征

Fig. 7 Quantitative characteristics of pore and throat of model under different block sizes

表 2 孔隙配位数频数分布

Table 2 Frequency distribution of pore coordination numbers

岩块尺寸/ mm	配位数为 1 的频数占比/%	配位数为 2 的频数占比/%	配位数为 2~5 的频数占比/%	配位数>5 的频数占比/%	重构模型绝 对孔隙度/%	三维原始图 像孔隙度/%	孔隙度 误差/%
10~15	6.36	22.85	51.08	42.56	30.58	31.27	2.21
15~20	5.73	23.95	70.12	24.15	31.41	31.46	0.16
20~25	5.90	26.48	70.66	23.44	31.90	32.10	0.62
25~30	4.79	23.97	71.33	23.88	33.03	33.18	0.45

4.2 模型统计特性分析

多孔材料可以使用统计相关函数进行表征,来量化孔隙空间结构的随机分布特征^[16-17]。在多相介质中,定义第 k 相的相函数如下式:

$$Z^k(r) = \begin{cases} 1 & r \in V_k \\ 0 & r \notin V_k \end{cases} \quad (7)$$

若仅考虑岩块骨架和孔隙空间两相系统,如下式,2 点相关函数表示结构内部随机的 2 个点 x_1 和 x_2 位于同相位的概率,假设介质是均匀且各向同性的,仅取决于 2 个点的标量距离 $d = |x_2 - x_1|$,通常表示为 $S_2(d)$, d 在三维多孔介质图像信息中可表示为像素距离。SNOW 算法实现 PNM 重构过程中是以

孔隙相为研究对象,用 $\text{True}(1)$ 表示孔隙空间,即 $k=1$ 表示孔隙相,以 $S_2^1(x_1, x_2)$ 表示。

$$P = Z(r) = \begin{cases} 1 & r \in 1(\text{孔隙}) \\ 0 & r \notin 1(\text{固体岩块}) \end{cases} \quad (8)$$

$$S_2^k(x_1, x_2) = P\{Z^k(x_1), Z^k(x_2)\} \quad (9)$$

式中: r 为多相系统中任意点; V_k 为第 k 相包含的区域; $Z^k(r)$ 为相函数; P 为概率; x_1 和 x_2 为结构内部位于同相位且概率随机的 2 点。

调用基于傅立叶变换的 two_point_correlation 两点相关函数依次计算三维原始图像的值,得到孔隙相 2 点处于同相位的概率值随像素距离变化的曲线如图 9 所示。

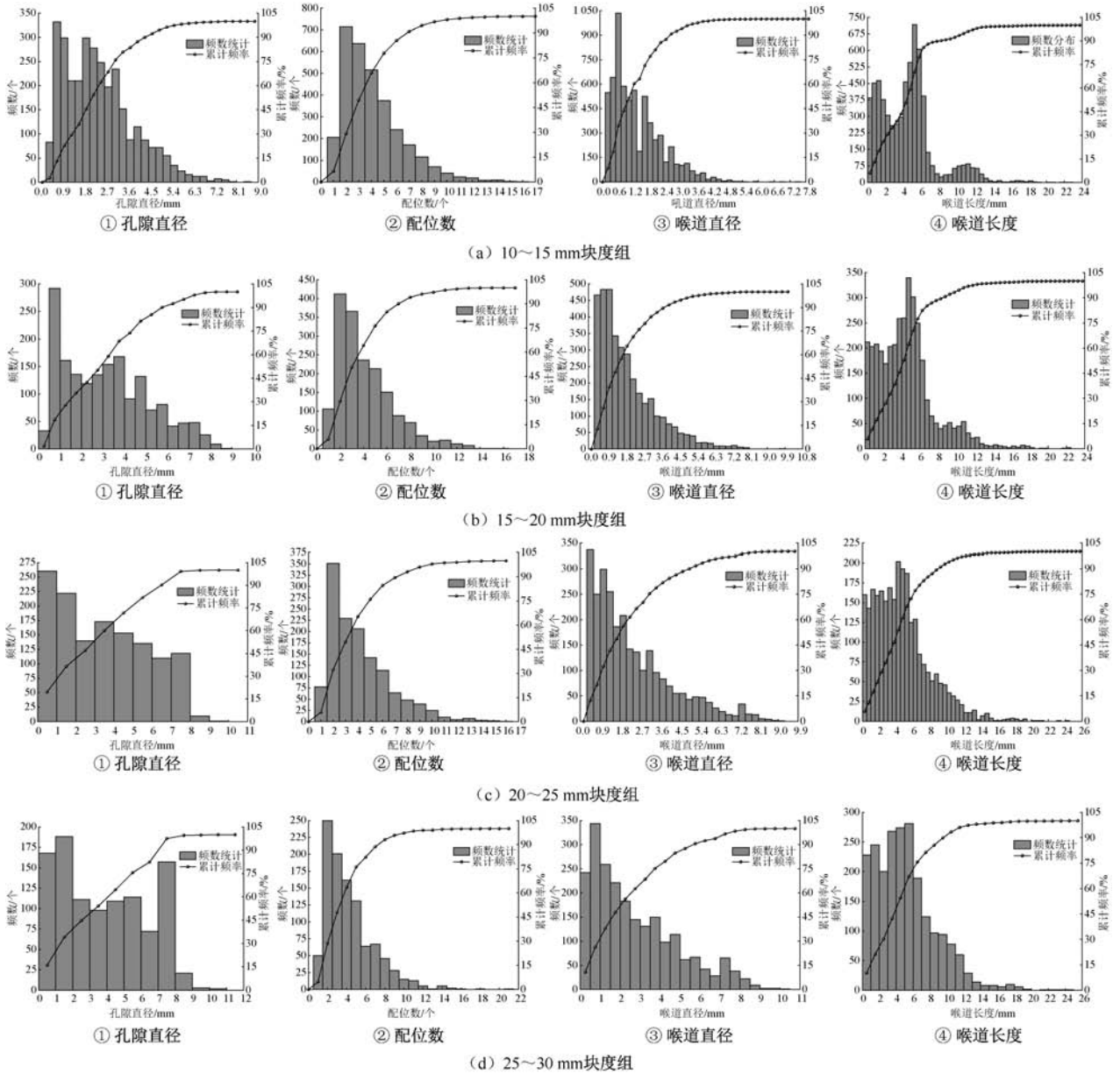


图 8 不同块度尺寸下模型的几何特性参数

Fig. 8 Geometric characteristic parameters of model under different rock block sizes

由图 9 可知:当 $d=0$ 时,2 点处于相同孔隙相,概率为 1,当 $d>150$ 时曲线保持稳定,数值趋于不

变,此处的概率值反映了整个图像的孔隙度,如图 9 中虚线标记和表 2 所示,原始图像孔隙度和重建模

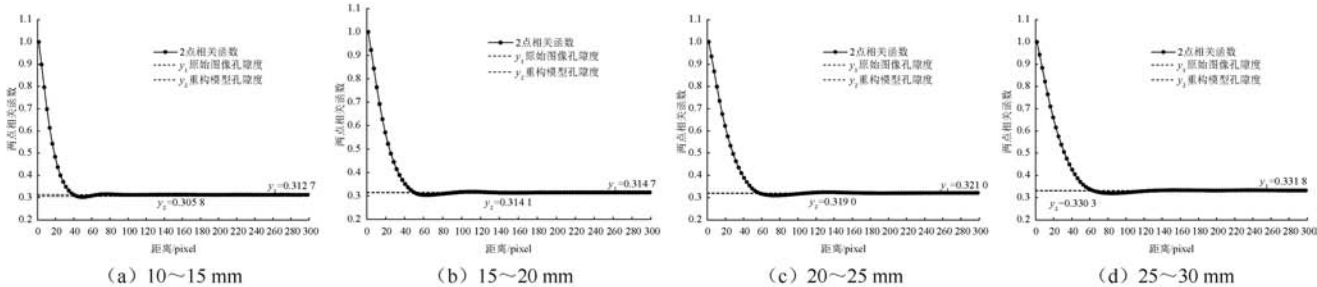


图 9 不同块度尺寸的 2 点相关函数

Fig. 9 Two-point correlation functions of different rock block sizes

型 P_{abs} 两者数值基本一致,相对误差均在 2.5% 以内,分析误差原因为在 PNE 时,用球棍模型来代表孔喉,且使用该几何模型计算体积占比,使得 PNM 重构后的 P_{abs} 略低于三维原始图像,然而原始的孔隙空间并不是规则的形状,孔喉不能完美填充孔隙空间,但该方法仍具备科学性,验证模拟煤矿综放采空区自由堆积状态下的 PNM 准确性。

5 结 论

1) 构建不同尺寸的自由堆积岩块宏观 PNM,该模型可精准表征采空区冒落岩块的自由堆积特性,明确大尺寸岩块主导堆积体承载骨架的关键

作用。

2) 定量分析模型结构特征参数表明:岩块尺寸的增加直接影响孔隙、喉道的直径和数量变化,而对于喉道长度的影响程度较小,孔隙配位数集中分布在 2~5 之间,共同导致了有效通道扩充和稀疏孔隙形成,各参数直接影响煤矿综放采空区岩块自由堆积介质的渗透性,孔喉尺寸越大,孔喉数量越少,孔喉比越小,配位数越大,相互连通性越强,更有利于气体渗透。

3) SNOW 算法在提取和重构三维 PNM 上具备显著优势,孔隙度误差在 2.5% 以内,未来将致力于构建煤矿综放采空区整体的孔隙空间模型。

参 考 文 献

- [1] 高飞,梁宁,贾喆,等. 基于 SSA-RBF 神经网络的煤自然发火预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8): 128-137.
GAO Fei, LIANG Ning, JIA Zhe, et al. Prediction model of coal spontaneous combustion based on SSA-RBF neural network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 128-137.
- [2] 王永军,郑倩,张河猛,等. 采空区地下遗煤燃烧-地表碳通量相关性分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 161-167.
WANG Yongjun, ZHENG Qian, ZHANG Hemeng, et al. Correlation analysis between combustion of underground residual coal and surface carbon flux in goaf[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 161-167.
- [3] GAO Ke, LI Qiwen, SHI Lianzeng, et al. Study of the flow field and permeability characteristics in the goaf using the OpenPNM package[J]. Archives of Mining Sciences, 2024, 69(1): 51-66.
- [4] 梁运涛,张腾飞,王树刚,等. 采空区孔隙率非均质模型及其流场分布模拟[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1 203-1 207.
LIANG Yuntao, ZHANG Tengfei, WANG Shugang, et al. Heterogeneous model of porosity in gobs and its airflow field distribution[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1 203-1 207.
- [5] SHI Lianzeng, GAO Ke, LIU Yujiao, et al. Effect of the periodic air leakage on spontaneous combustion in the gob of coal mine[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 55: DOI:10.1016/j.csite.2024.104082.
- [6] 高科,张瑶,石连增,等. 岩块尺度对采空区煤自燃区域的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(6): 126-132.
GAO Ke, ZHANG Yao, SHI Lianzeng, et al. Study on the influence of rock block scale on coal spontaneous combustion area in goaf[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(6): 126-132.
- [7] LIU Dameng, QIU Feng, LIU Ning, et al. Pore structure characterization and its significance for gas adsorption in coals: a comprehensive review[J]. Unconventional Resources, 2022, 2: 139-157.
- [8] YANG Yongfei, WANG Ke, ZHANG Lei, et al. Pore-scale simulation of shale oil flow based on pore network model[J]. Fuel, 2019, 251: 683-692.
- [9] 马海锐. 基于模拟退火算法的透水混凝土孔隙结构三维重构研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
MA Hairui. Three-dimensional reconstruction of porous structure of pervious concrete based on simulated annealing algorithm[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [10] 解朝阳,张巍,姚东方,等. 基于最大球算法定量表征土体空间孔隙网络[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 60-68.
XIE Chaoyang, ZHANG Wei, YAO Dongfang, et al. Quantitative characterization of spatial pore network of soils based on maximal-balls algorithm[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 60-68.

[11] 吴鑫, 彭雅雯, 晏巧, 等. 改进分水岭算法的煤岩孔隙重构及渗流模拟[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 144-149.
WU Xin, PENG Yawen, YAN Qiao, et al. Reconstruction of coal pore network based on improved watershed algorithm and seepage simulation[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(9): 144-149.

[12] BLUNT M J. Flow in porous media-pore network models and multiphase flow[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2001, 6(3): 197-207.

[13] GOSTICK J, AGHIGHI M, HINEBAUGH J, et al. OpenPNM: a pore network modeling package[J]. Computing in Science & Engineering, 2016, 18(4): 60-74.

[14] GOSTICK J T, KHAN Z A, TRANTER T G, et al. PoreSpy: a python toolkit for quantitative analysis of porous media images[J]. Journal of Open Source Software, 2019, 4(37): DOI: 10.21105/joss.01296.

[15] GOSTICK J T. Versatile and efficient pore network extraction method using marker-based watershed segmentation[J]. Physical Review E, 2017, 96(2): DOI: 10.1103/PhysRevE.96.

[16] 蒋金洋, 吴浩天, 王凤娟, 等. 基于深度卷积生成对抗网络的多孔材料微结构跨维度重构及传输性能表征[J]. 工程力学, 2025, 42(12): 34-46.
JIANG Jinyang, WU Haotian, WANG Fengjuan, et al. Cross-dimensional reconstruction of microstructures and transport properties characterization of porous materials via deep convolutional generative adversarial network[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(12): 34-46.

[17] 宋帅兵, 张通. 各向异性多孔介质数字岩心模型重构通用算法[J]. 地球物理学报, 2023, 66(11): 4 765-4 780.
SONG Shuaibing, ZHANG Tong. General algorithm for reconstructing digital core model of anisotropic porous media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(11): 4 765-4 780.

作者简介: 张洪硕 (2000—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为煤矿采空区多孔介质。E-mail: 1914785247@ qq. com。

