

基于 Bi-PTI 模型的 CT 数字煤岩孔裂隙精准识别及阈值反演

郝晨光¹, 郭晓阳^{1,2}, 邓存宝¹, 张兴华¹, 赵博¹, 王荀^{1,3}

(1. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024; 2. 华阳新材料科技集团有限公司 博士后工作站, 山西 阳泉 045000; 3. 山西焦煤集团有限责任公司 博士后工作站, 山西 太原 030021)

摘要: 在 CT 数字煤岩研究领域, 灰度阈值选取直接影响空间结构重建的准确性。为使孔裂隙空间重构数据能更精准地表征真实结构, 提升煤岩微观渗流研究的可靠性, 建立了 CT 数字煤岩孔隙率与灰度阈值的映射关系, 采用灰度阈值分布规律定量分析了孔裂隙和基质骨架的发育特征; 构建了识别孔裂隙结构的 Biphasic Pore Threshold Inversion 灰度阈值模型 (Bi-PTI 模型), 对不同变质煤 CT 扫描数据的孔裂隙最佳灰度阈值进行了数值反演, 将模型计算获得的孔隙率与压汞测试值进行对比; 基于最佳灰度阈值反演结果重建了孔裂隙空间结构, 通过空间结构参数和拓扑结构参数与 Otsu 模型、MP-Otsu 模型进行了对比分析。研究结果表明: CT 数字煤岩孔隙率随灰度阈值的增加呈非对称 S 型分布, 且具有指数增加-对数上升的分段特征; Bi-PTI 模型能够较好地反映孔隙率与灰度阈值的映射关系, 表征孔裂隙和基质骨架的发育特征; 通过 Otsu 模型计算的孔隙率高达 70% 以上, MP-Otsu 模型计算的孔隙率受矿物含量影响较大, 而 Bi-PTI 模型在 0.40%~16.22%, 更接近压汞实测数据; Bi-PTI 模型可以弥补因孔裂隙过度识别导致的空间重构缺陷, 实现小尺度孔裂隙空间结构的精准识别; Otsu 模型极易忽略部分孔隙拓扑结构, MP-Otsu 模型对低矿物含量煤体的拓扑结构重建效果不佳, 而 Bi-PTI 模型对缺陷位置拓扑特征具有较好的识别能力, 能够真实还原孔裂隙拓扑体系的孔喉丰度和连通特性。

关键词: 数字煤岩; 煤孔裂隙; Bi-PTI 模型; 空间结构; 拓扑特征

中图分类号: TQ531 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)04-1516-11

Precise identification and threshold inversion of pores and fissures in CT digital coal rock based on Bi-PTI model

HAO Chenguang¹, GUO Xiaoyang^{1,2}, DENG Cunbao¹, ZHANG Xinghua¹, ZHAO Bo¹, WANG Xun^{1,3}

(1. School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Postdoctoral Workstation, Huayang New Material Technology Group Co., Ltd., Yangquan 045000, China; 3. Postdoctoral Workstation, Shanxi Coking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030021, China)

Abstract: In the research area of the CT digital coal petrography, the selection of gray threshold directly affects the accuracy of spatial structure remodeling. To allow the pores and fissures space remodeling data to more accurately represent the real structure and improve the reliability of research on microscopic seepage of coal rock, the mapping relation between

收稿日期: 2022-04-27 修回日期: 2022-07-07 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0602

基金项目: 山西省基础研究计划青年资助项目 (20210302124483); 山西省高等学校科技创新资助项目 (2021L052)

作者简介: 郝晨光 (1997—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生。E-mail: haochenguang1463@link.tyut.edu.cn

通讯作者: 郭晓阳 (1990—), 男, 山西太原人, 讲师, 博士 (后)。E-mail: guoxiaoyang@tyut.edu.cn

引用格式: 郝晨光, 郭晓阳, 邓存宝, 等. 基于 Bi-PTI 模型的 CT 数字煤岩孔裂隙精准识别及阈值反演 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1516~1526.

HAO Chenguang, GUO Xiaoyang, DENG Cunbao, et al. Precise identification and threshold inversion of pores and fissures in CT digital coal rock based on Bi-PTI model [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1516~1526.



移动阅读

the CT digital coal rock porosity and gray threshold is established. Also, the distribution rule of gray threshold is adopted to conduct a quantitative analysis of the development features of pore, fissure and matrix. The Bi-PTI (Biphasic Pore Threshold Inversion) model is established for the identification of pore and fissure structures. The value inversion of the optimal gray threshold of pore and fissure based on the CT scanning data of metamorphic coal, and the comparison of porosity obtained with the model against the mercury injection test value are conducted. On the basis of the optimal gray threshold inversion results, the spatial structure of pore and fissure is remodeled and compared with the Otsu model through the parameters of spatial structure and topological structure. Research results indicate that the porosity based on the CT digital coal petrography is in asymmetrical S-shaped distribution as the threshold value increases, with the features of exponential increase and logarithmic climb at different sections. The Bi-PTI model can fairly reflect the mapping relation between porosity and gray threshold, and represent the development features of pore, fissure and matrix. The porosity calculated through the Otsu model is as high as over 70%, the porosity calculated by the MP-Otsu model is greatly affected by the mineral content while that calculated with the Bi-PTI model ranges from 0.40% to 16.22%, more close to the mercury injection test data. The Otsu model is most likely to neglect the topological structure with partial pores and fissures. The MP-Otsu model is not effective for constructing the topology of coal samples with low mineral content, while the Bi-PTI model can better identify the topological features in the locations of the defect and faithfully restore the pore throat abundance and connectivity in the pore and fissure topology.

Key words: digital coal rock; coal pores and fissures; Bi-PTI model; spatial structure; topological attributes

煤是一种天然多孔介质,具备生烃储气双重性质。煤孔隙微细观空间结构特征与煤层瓦斯的赋存、运移密切相关^[1-2],决定了瓦斯抽采的难易程度,是抽采技术取得突破的关键科学内涵^[3-4]。近年来,X-ray CT扫描技术广泛应用于数字煤岩分析,成为表征煤孔隙精细结构和研究瓦斯微尺度渗流的有效手段。王登科等^[5]利用工业CT扫描技术对受载煤样内部裂隙动态发展特征和分形规律开展了研究;王刚等^[6]利用CT三维重构技术模拟了温度对孔隙结构变形的影响;李兆霖等^[7]基于CT扫描系统研发了真三轴加载实验设备,获取了应力环境中岩体内部裂纹形态的演化特征;JU Yang 等^[8-11]通过胶结颗粒CT数字模型对非均质砂砾岩的水力压裂机理进行了数值模拟。

CT数字煤岩孔隙和基质骨架由灰度值进行识别,其阈值选取会直接影响孔隙空间结构三维重建的准确性^[12]。基于此,诸多学者对灰度阈值选取方法展开了深入探索,主要包括视觉判别^[13]、经验选取^[14]和模型反演3种方法。视觉判别法和经验选取法受主观影响严重,不能作为灰度阈值选取的有效方法。模型反演法则能一定程度上减小主观判断造成的阈值选取误差,逐渐成为热点研究领域^[15-18]。TAUD等^[19]基于DTM模型提出了根据灰度阈值识别孔隙的方法;毛灵涛等^[20]运用DTM模型在无需设定阈值的情况下求出煤芯CT图像的孔隙率;尹建强等^[21]利用煤样CT图像对比分析了迭代阈值模型、Otsu阈值模型、全局阈值模型、最大熵阈值模型和交叉熵阈值模型的矿物识别效果,结果表明最大熵阈值模型效

果最好,迭代阈值模型次之,交叉熵阈值模型最差,Otsu阈值模型和全局阈值模型均优于交叉熵阈值模型;王刚等^[22]探究了Otsu阈值模型在孔隙分割过程中的失效机制,并对该模型进行了改进。虽然,目前CT数字煤岩孔隙阈值模型研究进展颇丰,但均忽略了不同扫描切片间煤岩体结构的差异,重构数据仍不能与真实结构进行互证,模型普适性较差,重构结果存在很大偏差,难以实现煤岩微细尺度空间结构的精准分析。

因此,笔者采用X-ray μCT扫描技术获取5种不同变质煤的灰度值分布特征,通过BiDoseResp校准函数构建了煤微细观孔隙Bi-PTI灰度阈值模型。基于该模型对不同灰度阈值映射的孔隙率数据进行拟合,结合压汞测试反演最佳CT灰度阈值,并与Otsu模型和MP-Otsu模型孔隙分割结果进行精度对比。研究内容旨在实现CT数字煤岩孔隙与基质的精准分割,使其三维重构数据能更准确地表征真实结构,提升煤岩微细观渗流研究的可靠性。

1 煤样与实验

1.1 煤样制备

实验煤样分别取自鄂尔多斯盆地和沁水盆地的5个矿区,包括羊场湾矿褐煤(YCW)、斜沟矿气煤(XG)、胜利矿肥煤(SL)、沙曲一矿焦煤(SQY)、阳煤一矿无烟煤(YMY)。原生样品均采用刻槽法取自各矿掘进工作面新鲜煤壁,并加工成5 mm×5 mm×10 mm的长方体块状原煤,先后开展X-ray μCT扫描实验和

压汞实验,加工后的煤样如图1所示。

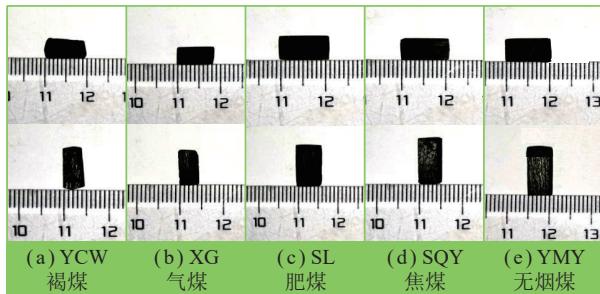


图1 实验样品

Fig.1 Experimental samples

1.2 X-ray μCT 扫描实验

X射线在穿透不同密度物质时,会产生不同的衰减效应,体现为不同组分对应的扫描图像灰度值不同。基于该原理能够区分并重建煤孔裂隙和基质骨架的三维空间结构。笔者采用 nanoVoxel-4000 系列高分辨率X射线计算机断层扫描仪对煤体孔隙结构进行扫描,实验中仪器的测试电压120 kV,测试电流为50 μA,曝光时间1 000 ms,扫描模式为局部扫描,分辨率0.5 μm,扫描时间52 min,并采用非局域均值滤波(Non-local Mean)对CT图像进行降噪处理,如图2所示。

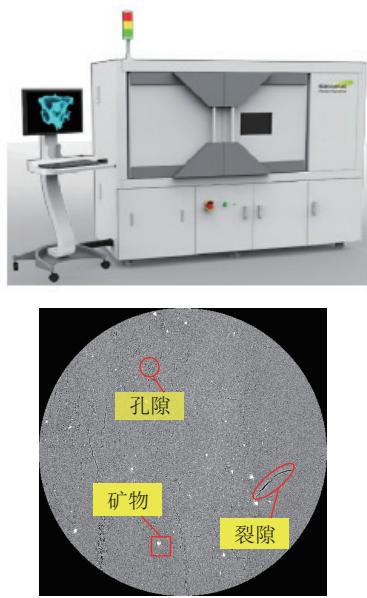


图2 X-ray μCT 扫描实验

Fig.2 X-ray μCT scanning experiment

1.3 压汞实验

压汞实验采用美国 Micromeritics AutoporeIV9500 高性能全自动压汞仪,如图3所示。测试范围为500~1 000 μm,最大进汞压力228 MPa。测试样品为X-ray μCT扫描后的块状煤样。



图3 压汞实验

Fig.3 Mercury intrusion experiment

2 Bi-PTI 灰度阈值模型

2.1 孔隙率与灰度阈值的映射规律

基于CT扫描的煤岩微观结构可以通过扫描图像灰度值定量反映,本文CT灰度图像的每个像素格式为16 bit,灰度范围在0~65 535,不同灰度范围对应煤体的不同结构组成,通常分为孔裂隙和基质骨架。最佳灰度阈值是区分这2种结构的临界值,小于灰度阈值识别为孔裂隙,大于灰度阈值则识别为基质骨架。设 T_m 为图像灰度阈值,CT图像各结构空间占比用式(1)计算:

$$\phi(T_m) = \frac{V_p}{V_c} = \frac{1}{Ns^2d} \sum_{T_i=0}^{T_m} n_i s^2 d = \sum_{T_i=0}^{T_m} p(T_i) \quad (1)$$

则煤岩孔隙率可以表示为

$$\Phi(T_m) = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^M \phi_j(T_m) \quad (2)$$

式中, $\phi(T_m)$ 为单张CT切片的孔隙率; V_p 为孔隙体积; V_c 为煤岩体积; $p(T_i)=n_i/N$, n_i 为灰度等于 T_i 时的像素数量; N 为CT图像总像素数量; s 为单个像素的大小; d 为扫描间隔; $\Phi(T_m)$ 为煤岩孔隙率; M 为CT切片数量; $\phi_j(T_m)$ 为第 j 张煤岩体CT切片的孔隙率。

基于式(1)~(2)编制Matlab程序,导入CT扫描参数,计算不同灰度阈值对应的煤岩孔隙率,可得到孔隙率与灰度阈值之间的映射曲线,如图4所示。分析发现,CT数字煤岩孔隙率与灰度阈值间具有显著的映射关系。映射曲线呈非中心对称S型分布,且具有分段特征:①在阶段Ⅰ,孔隙率随灰度阈值呈指数上升;②在阶段Ⅱ,呈对数上升,最后趋于平缓;③指数上升阶段Ⅰ和对数上升阶段Ⅱ的拐点曲率不同;④不同煤样的灰度阈值-孔隙率曲线所对应的阶段Ⅰ和阶段Ⅱ的阈值均值不同。不同煤岩CT扫描数据体中,阶段Ⅰ和阶段Ⅱ的曲线极值不变,但转换阈值 $T_{m,0}$ 和拐点曲率差异明显。

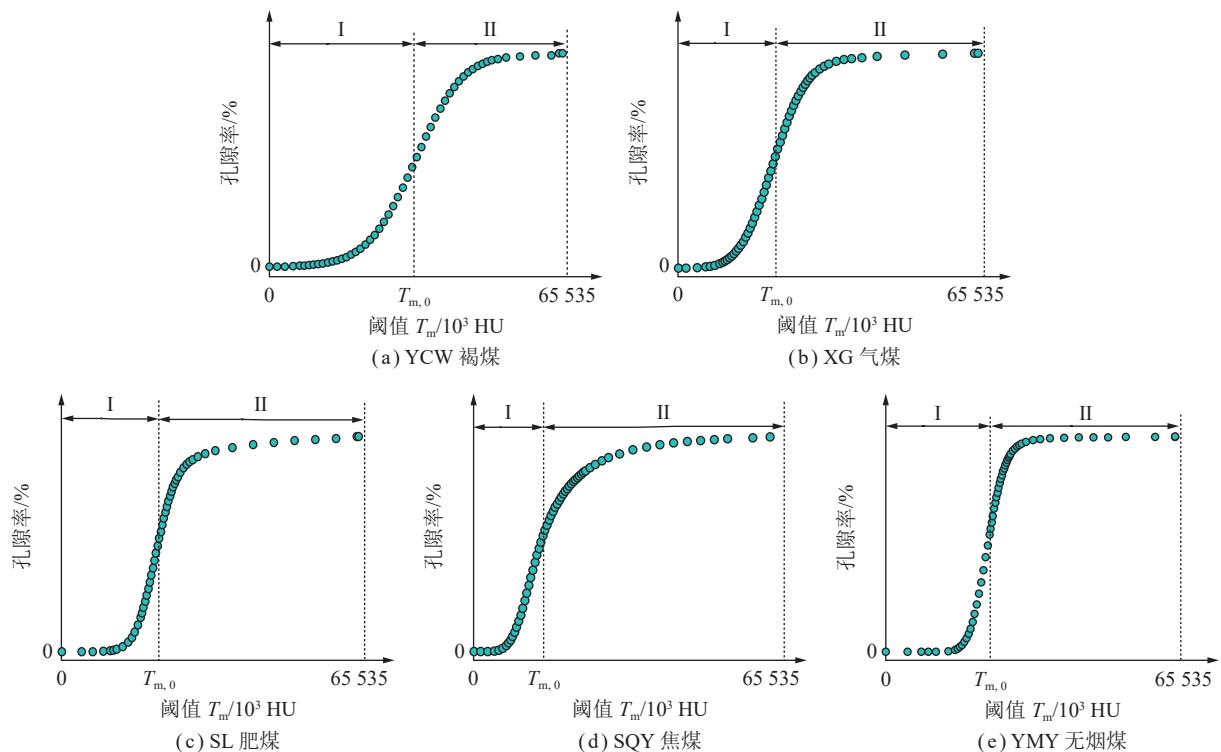


图 4 CT 数字媒体灰度阈值-孔隙率映射曲线

Fig.4 Grayscale threshold-porosity mapping curves of CT digital coal

2.2 数学模型构建

Logistic 模型和 BiDoseResp 模型常用于生物医药领域描述生物活性的剂量-效应关系^[23]。Logistic 模型公式为

$$Y = Y_B + \frac{Y_T - Y_B}{1 + 10^{(L_{av} - x)h}} \quad (3)$$

式中, Y 为生物活性随药物剂量变化的效应; x 为药物剂量; Y_B 和 Y_T 分别为生物活性随药物剂量变化的最小和最大效应; L_{av} 为药物剂量的均值; h 为曲线的斜率。

Logistic 模型具有严格中心对称的特点, 而 BiDoseResp 模型是 2 个 Logistic 模型 (c_1 和 c_2) 的加权组合, 具有非中心对称结构的灵活性, 公式为

$$Y = Y_B + (Y_T - Y_B) \left[\frac{\omega}{1 + 10^{(L_{av1} - x)h_1}} + \frac{1 - \omega}{1 + 10^{(L_{av2} - x)h_2}} \right] \quad (4)$$

式中, ω 为 c_1 和 c_2 两个 Logistic 模型的权重; L_{av1} 和 L_{av2} 分别为 c_1 和 c_2 模型自变量的均值; h_1 和 h_2 分别为 c_1 和 c_2 模型曲线的斜率。

CT 煤岩孔隙率与灰度阈值的映射关系符合 BiDoseResp 函数, 由于煤岩孔隙率极值分别为 0 和 1, 因此可将参数 Y_B 和 Y_T 分别设定为 0 和 1, 从而基于 BiDoseResp 函数, 构建表征 CT 数字煤岩孔隙率与灰度阈值映射关系的 Biphasic Pore Threshold Inversion 模型, 简称 Bi-PTI 模型:

$$\Phi(T_m) = \frac{\varpi}{1 + 10^{(\gamma_1 - T_m)\zeta_1}} + \frac{1 - \varpi}{1 + 10^{(\gamma_2 - T_m)\zeta_2}} \quad (5)$$

式中, $\Phi(T_m)$ 为煤样孔隙率, %; ϖ 为阈值权重; γ_1 、 γ_2 分别为孔裂隙和基质骨架的阈值均值, HU; ζ_1 、 ζ_2 分别为孔裂隙和基质骨架的灰度敏感系数。

在 CT 数字煤岩结构灰度图像中, Bi-PTI 模型函数曲线如图 5 所示, 其中, ζ_1 为指数上升阶段 I 拐点处斜率, 表示孔裂隙灰度敏感系数; ζ_2 为对数上升阶段 II 拐点处斜率, 表示基质骨架敏感系数; $\bar{T}_{m,I}$ 为指数上升阶段 I 灰度阈值均值; $\bar{T}_{m,II}$ 为对数上升阶段 II 灰度阈值均值。曲线由阈值权重点 A 划分为指数上升阶段 I 和对数上升阶段 II。

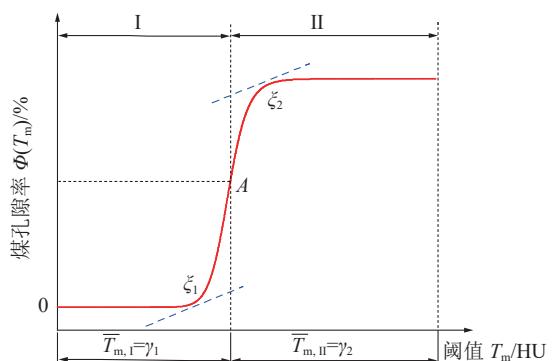


图 5 Bi-PTI 模型曲线

Fig.5 Bi-PTI model curve

2.3 模型物理内涵

基于5种不同变质煤的CT扫描数据,根据式(1)~(2)建立孔隙率与灰度阈值之间的映射关系,并采用Bi-PTI模型进行拟合,结果如图6所示(图6中, Φ_{mp} 为煤岩体经压汞实验测得的孔隙率; T_{mp} 为基于Bi-PTI模型反演出的最佳灰度阈值),拟合参数见表1。

结合图6和表1分析可知,各煤样CT数据体孔隙率与灰度阈值的Bi-PTI模型拟合相关系数 R^2 均超过0.99,表明该模型具有良好的拟合效果,能够准确反映孔隙率与灰度阈值间的映射关系。

CT数据体REV表征单元是探索孔裂隙精细结构特征的一种有效手段,通常用于地球物理领域的数字煤岩结构研究^[13]。采用Thermo Sientific Avizo软

件对CT扫描数据进行处理,在REV表征单元内重建煤体微观结构,实现不同尺度孔裂隙和基质骨架结构的可视化。

图7为不同 γ_1 煤孔裂隙形状特征,分析发现,随着 γ_1 的增大,孔隙形状由较为规则的水滴形、长条形逐渐转变为不规则的坑洼凹凸形。可见 γ_1 与孔隙形状密切相关,且值越大形状越不规则。图8为不同 γ_2 煤基质骨架密度分布,其中灰度越大表示骨架密度越大^[24],对比可知,随着5种煤样 γ_2 的增加,基质骨架密度越大,因此 γ_2 可以反映出煤基质矿物含量,且值越大骨架密度越大,矿物含量越高。

图9为不同 ζ_1 和 ζ_2 煤孔裂隙和无机矿物空间形态,其中非连通孔裂隙被标记为不同颜色。对比图9(a)不难发现,随着 ζ_1 的增大,重构后的煤孔裂隙

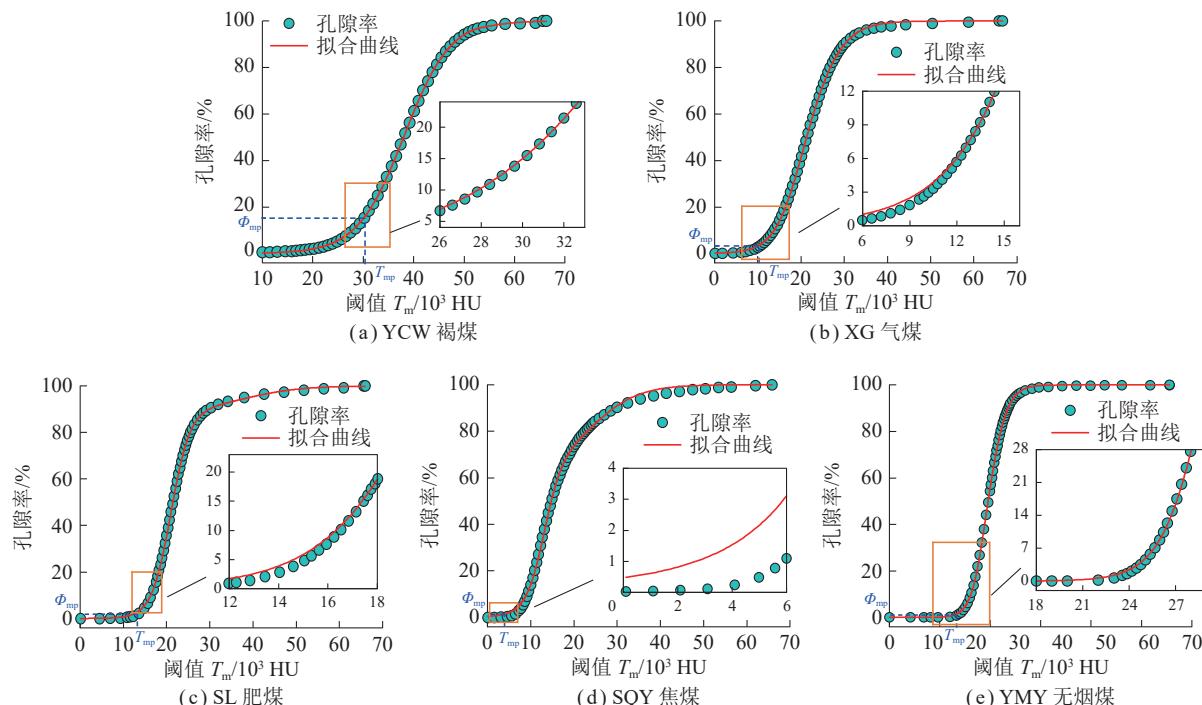


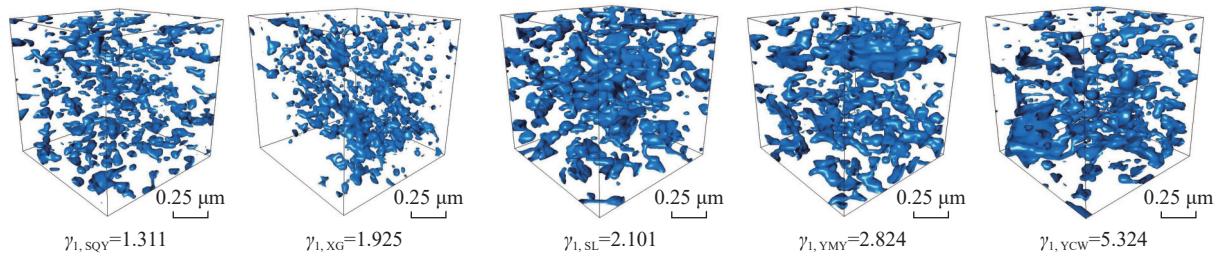
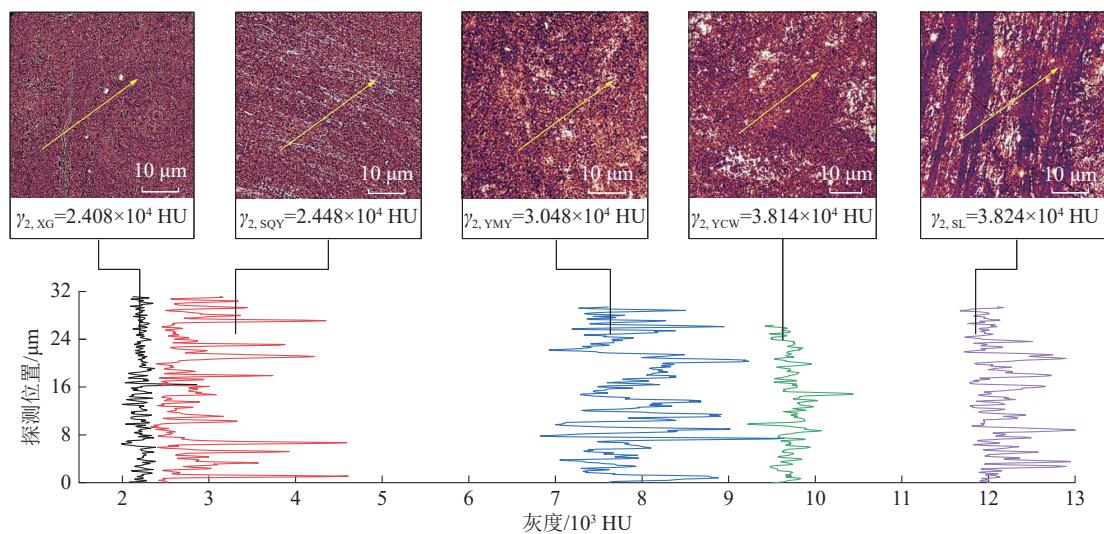
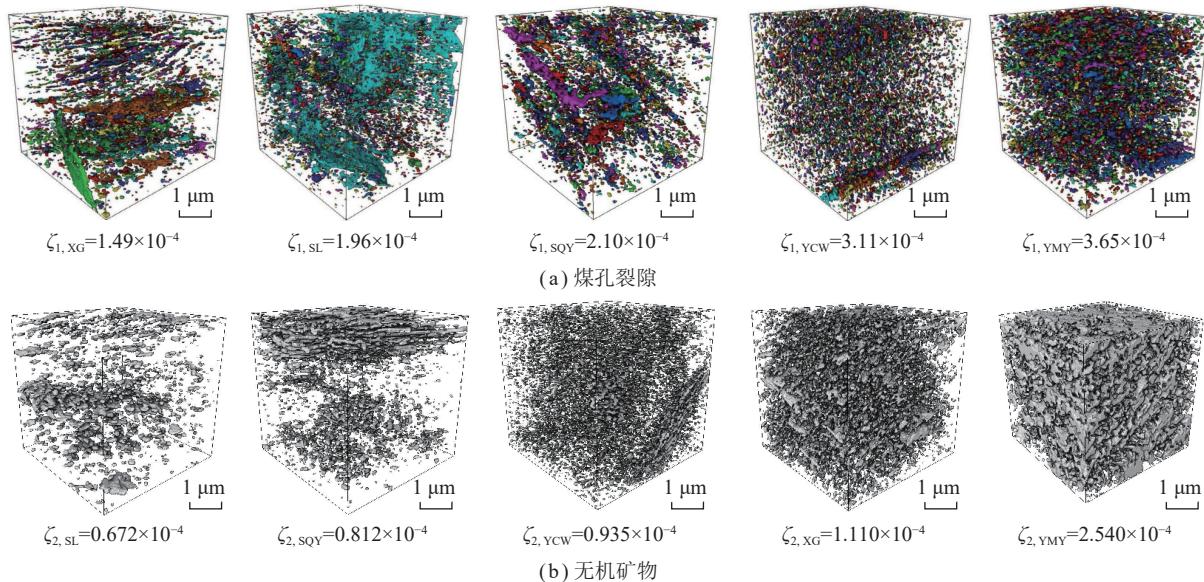
图6 孔隙率与灰度阈值的Bi-PTI模型拟合结果

Fig.6 Bi-PTI model fitting results of porosity and gray threshold

表1 Bi-PTI模型拟合参数

Table 1 Fitting parameters based on Bi-PTI model

煤样	$\gamma_1/10^4 \text{HU}$	$\gamma_2/10^4 \text{HU}$	$\zeta_1/10^{-4}$	$\zeta_2/10^{-4}$	σ	R^2
YCW褐煤	5.324	3.814	3.110	0.935	0.435	0.999 90
XG气煤	1.925	2.408	1.490	1.110	0.506	0.999 81
SL肥煤	2.101	3.824	1.960	0.672	0.893	0.999 82
SQY焦煤	1.311	2.448	2.100	0.812	0.654	0.998 74
YMY无烟煤	2.824	3.048	3.650	2.540	0.334	0.999 96

图 7 不同 γ_1 煤孔裂隙形状特征Fig.7 Shape characteristics of coal pores and fractures with different γ_1 values图 8 不同 γ_2 煤基质骨架密度分布Fig.8 Skeletal density distribution of coal matrix with different γ_2 values图 9 不同 ζ_1 和 ζ_2 煤孔裂隙和无机矿物空间形态Fig.9 Spatial morphology of coal pores and inorganic minerals with different ζ_1 and ζ_2 values

愈发丰富, 可见, 灰度敏感系数 ζ_1 能够反映孔裂隙丰富程度; 由图 9(b)可知, 随着 ζ_2 升高, 基质骨架在形

和结构上趋于复杂, 故敏感系数 ζ_2 可以反映出基质骨架形状的复杂情况, 且值越大越复杂。

3 模型验证

Otsu 阈值模型以聚类分析为核心,于1979年由日本学者大津提出^[25]。近年来,王刚等^[22]通过引入3种权重因子,对该模型进行了改进,并提出了MP-Otsu 阈值模型,成为主流的数字孔隙识别方法。为了验证Bi-PTI 模型对CT 数字煤岩孔隙识别的可靠性,基于最佳灰度阈值反演与Otsu 模型、MP-Otsu 模型进行识别精度对比。

最佳灰度阈值反演方法:①将各煤样Bi-PTI 模型拟合参数,以及由压汞实验测得的孔隙率(孔径大于0.5 μm)代入式(5),反演Bi-PTI 模型最佳灰度阈值;②根据Otsu 模型和MP-Otsu 模型函数(参见文献[22, 25],此处不再赘述),利用CT 数据计算各煤样模型参数,导入Matlab 程序反演CT 数字孔隙最佳灰度阈值;③采用分水岭算法识别并提取各煤样CT 数据的连通孔隙^[6],并计算得到孔隙率和平均孔容。各模型最佳灰度阈值反演结果见表2。

表2 各模型最佳灰度阈值反演结果对比

Table 2 Comparison of the best gray threshold inversion results of each model

煤样	最佳灰度阈值/HU			孔隙率/%			平均孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)				
	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	压汞法	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	压汞法
YCW褐煤	36 461	30 851	30 463	72.49	17.81	16.22	16.31	0.351 0	0.167 0	0.155 2	0.144 7
XG气煤	12 883	11 814	10 768	19.02	7.13	4.17	4.20	0.264 0	0.090 6	0.035 4	0.037 5
SL肥煤	14 135	13 275	12 923	8.77	2.55	2.32	2.49	0.075 8	0.024 2	0.022 9	0.019 8
SQY焦煤	7 727	5 081	4 255	74.43	4.47	1.60	1.67	0.046 2	0.035 5	0.031 5	0.036 1
YMY无烟煤	23 665	21 875	21 559	15.74	0.50	0.44	0.48	0.073 4	0.022 7	0.019 0	0.019 6

对比表2 分析发现,利用Otsu 阈值模型识别的煤样孔隙率高达70%以上,平均孔容高达0.04 cm³/g以上;利用MP-Otsu 阈值模型识别的YCW 褐煤、SL 肥煤和YMY 无烟煤的孔隙率和平均孔容与实验数据较为接近,但对于矿物含量相对较少的XG 气煤和SQY 焦煤,孔隙率和平均孔容与实验数据存在较大的偏差,因此孔隙重建结果不能反映真实结构。而Bi-PTI 模型识别的煤样孔隙率为0.44%~16.22%,平均孔容为0.019~0.155 cm³/g,比Otsu 模型分别降低了73.55%~97.85%、23.16%~74.11%,比MP-Otsu 模型分别降低了8.93%~64.21%、5.37%~60.93%,与压汞实测孔隙率较为接近,使孔隙空间重构更能准确体现客观规律,提升重构模型的实用价值。

4 煤孔隙识别效果

4.1 煤孔隙空间结构

本文根据孔隙率随单元尺寸的变化规律,选取表征单元REV 尺寸为200 pix×200 pix×200 pix,物理尺寸为20 μm×20 μm×20 μm。根据Otsu 模型、MP-Otsu 模型和Bi-PTI 模型反演的最佳灰度阈值,通过Avizo 软件分别在REV 单元内重建5种煤样的孔隙空间结构,结果如图10 所示。其中不同孔隙标记为不同颜色,相同颜色表示连通孔隙或单一孔隙。

由图10 可以看出,对比基于3种模型重建的孔隙空间结构,孔隙颜色标记差异明显,表明Otsu

模型、MP-Otsu 模型和Bi-PTI 模型对数字煤岩孔隙识别具有不同的效果。其中,对于YCW 褐煤和SQY 焦煤,Otsu 模型几乎将整个REV 空间识别为同一连通孔隙,而Bi-PTI 模型则识别出多类孔隙,包括贯通性微裂缝。对于SL 肥煤,Otsu 模型在REV 单元中仅识别出2个大裂隙,而Bi-PTI 模型将其识别为更为精细的不同裂隙。这种孔隙过度识别情况也同样存在于XG 气煤和YMY 无烟煤。对于矿物含量较大的YCW 褐煤、SL 肥煤、YMY 无烟煤,MP-Otsu 模型孔隙识别效果与Bi-PTI 模型较为接近,而对于矿物含量较小的XG 气煤和SQY 焦煤,Bi-PTI 模型则可以识别出更丰富的孔隙。可见,Otsu 模型的过度识别使大量孔隙整合,MP-Otsu 模型的识别效果受煤样矿物含量影响较大,而Bi-PTI 模型则能弥补这些缺陷,更加精细地识别出小尺度连通或孤立孔隙,从而清晰完整地反映出煤体内部空间结构特征。

为了进一步比较2种模型对不同变质煤孔隙的识别效果,采用Avizo 软件中Label Analysis 模块标记并计算孔隙结构参数,结果见表3。分析表3 可知,基于Otsu 模型得到的煤孔隙空间结构参数与其他2种模型偏差较大。对于XG 气煤和SQY 焦煤,基于Bi-PTI 模型计算的孔隙最大等效半径、表面积和孔隙体积均显著低于MP-Otsu 模型,其中XG 气煤孔隙最大等效半径、最大表面积、最大孔隙体积降低幅度分别高达73.30%、82.34%、89.13%,而基于

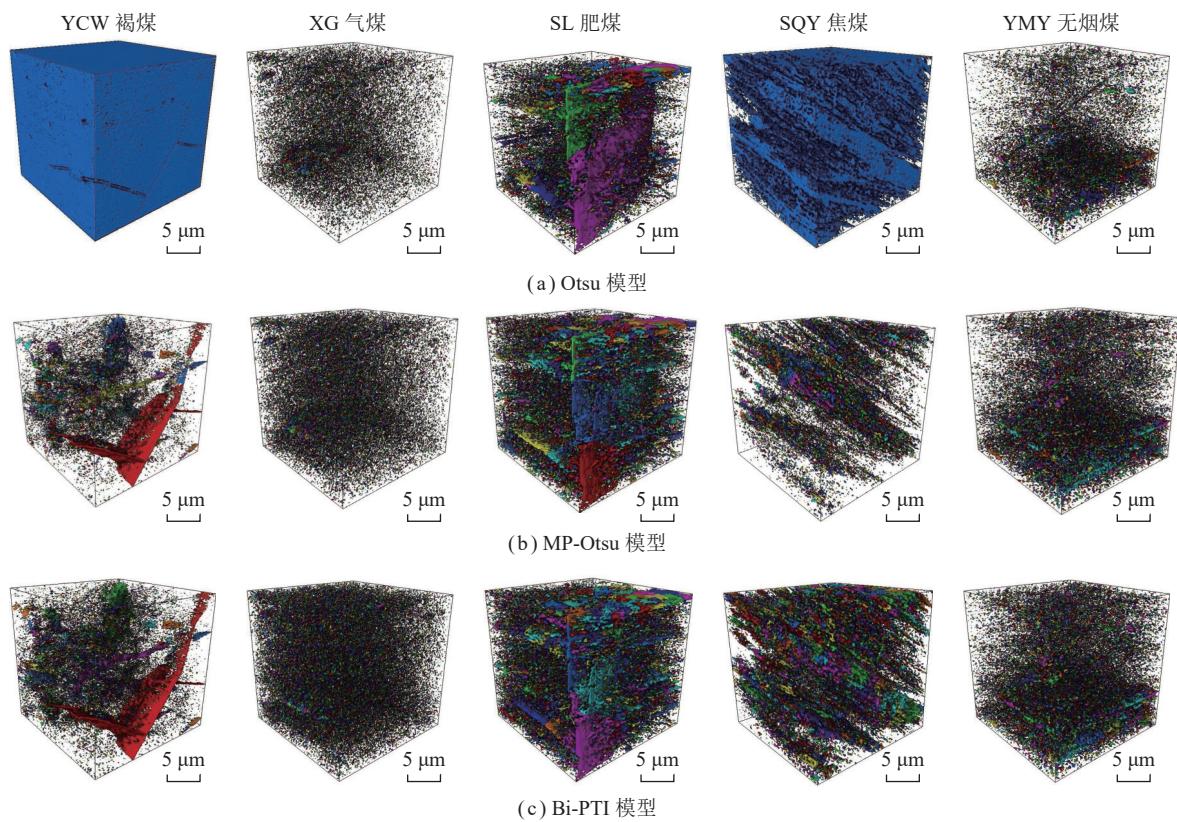


图 10 煤孔裂隙空间结构重建结果

Fig.10 Spatial structure reconstruction results of pores and fissures in coal

表 3 煤孔裂隙空间结构参数

Table 3 Spatial structure parameters of pores and fissures in coal

煤样	最大等效半径/μm			最大表面积/ $10^5 \mu\text{m}^2$			最大孔隙体积/ $10^5 \mu\text{m}^3$			孔隙数目		
	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI
YCW褐煤	124.381	22.227	20.887	1.167	1.046	0.979	80.602	0.429	0.382	1	30 500	36 969
XG气煤	85.616	44.313	11.831	58.424	1.195	0.211	26.287	0.635	0.069	70 208	120 403	144 229
SL肥煤	99.263	48.702	45.569	10.212	1.883	1.842	5.121	1.081	1.053	71 055	88 793	89 832
SQY焦煤	109.893	78.875	53.984	2.232	1.712	1.510	72.263	0.643	0.590	1	48 125	69 072
YMY无烟煤	67.292	35.850	27.209	14.442	1.861	1.838	6.537	0.880	0.844	86 807	114 250	116 704

Bi-PTI 模型计算的孔隙数目却较 MP-Otsu 模型高 19.79%。这是由于 Otsu 模型和 MP-Otsu 模型对 CT 灰度图像的过度分割导致大量不连通孔裂隙被识别为同一连通体系, 因此孔裂隙空间结构参数计算值偏高, 煤样孔隙率偏大。由此可知, 基于 Bi-PTI 模型识别的孔裂隙空间结构参数更精准, 能够客观反映真实情况, 孔裂隙识别可靠性强。

4.2 煤孔隙拓扑结构

采用 Generate Pore Network Model 模块构建等效孔隙网络模型 (PNM), 如图 11 所示。PNM 模型反映了煤微观连通孔裂隙的空间拓扑结构特征, 图 11 中球体表示孔隙, 球体大小代表孔隙体积大小, 颜色由

浅到深表示孔隙等效直径逐渐增大; 灰色棒则表示连接孔隙的喉道, 棒的半径代表喉道的等效半径, 棒的长短表示喉道的长度。

由图 11 分析可知, 与 Otsu 模型、MP-Otsu 模型相比, 基于 Bi-PTI 模型阈值反演构建的 PNM 拓扑结构孔隙数量更多, 喉道更丰富, 连通性更复杂。其中, 在 YCW 褐煤、SQY 焦煤和 YMY 无烟煤的 PNM 拓扑结构中, Otsu 模型几乎完全忽略了贯通微裂隙下方的孔隙拓扑特征, 而 Bi-PTI 模型实现了对拓扑缺陷位置的精细识别。对于孔隙更为密集的 XG 气煤和 SL 肥煤, Bi-PTI 模型也在孔喉丰度和连通性方面体现出很好的 PNM 拓扑识别优势, 能够提升数字煤岩空间

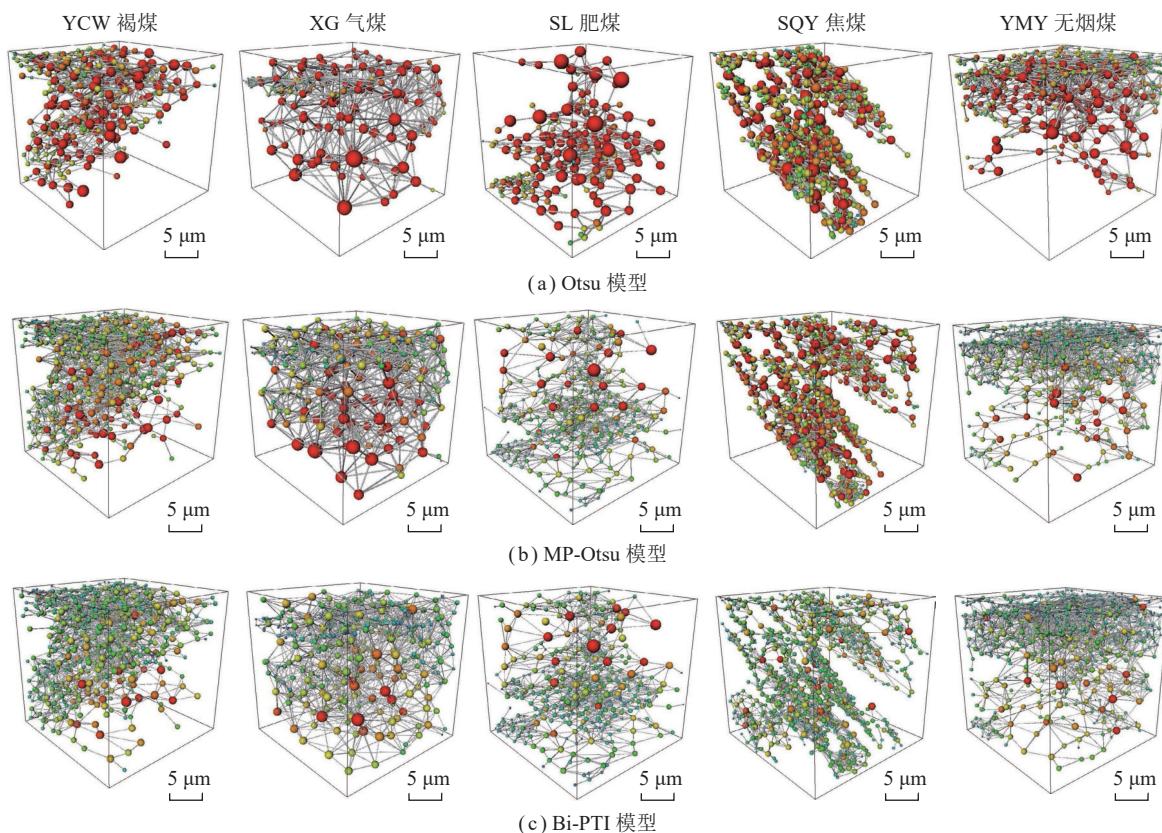


图 11 煤孔裂隙 PNM 拓扑结构重建结果

Fig.11 PNM topology structure reconstruction results of pores and fissures in coal

拓扑研究的可靠性。对于矿物含量较大的 YCW 褐煤、SL 肥煤和 YMY 无烟煤, 基于 MP-Otsu 模型构建的 PNM 拓扑结构与 Bi-PTI 模型较为接近; 而对于矿物含量较小的 XG 气煤和 SQY 焦煤, Bi-PTI 模型可以识别出孔隙更丰富、尺寸更精细的 PNM 拓扑结构。

通过 LabelAnalysis 模块提取各煤样 PNM 孔隙拓扑结构参数见表 4。分析可知, 基于 Bi-PTI 模型计算的等效孔隙半径、喉道半径、喉道长度均低于 Otsu 模型和 MP-Otsu 模型。其中, 孔隙等效半径分别降低了 63.92%~80.31%、9.49%~52.47%, 喉道等效半径分别降低了 85.34%~97.68%、8.47%~88.67%, 喉道等效长度分别降低了 50.33%~85.88%、5.65%~

38.06%。可见, 基于 Otsu 模型和 MP-Otsu 模型反演构建的 PNM 孔裂隙拓扑结构中, 过度识别导致孔隙和喉道等效尺寸偏大, 而 Bi-PTI 模型则更能清晰地识别孔隙和喉道拓扑尺寸的精细特征。配位数能够表征孔隙连通性的优劣程度, 基于 Bi-PTI 模型阈值反演的孔隙配位数比 Otsu 模型和 MP-Otsu 模型分别升高 12.84%~63.85%、2.99%~28.38%, 意味着 Bi-PTI 模型能够高度还原孔裂隙拓扑体系的连通性。

综上, 与 Otsu 模型和 MP-Otsu 模型相比, Bi-PTI 模型阈值反演在孔裂隙拓扑结构重建中, 能更真实地反映孔隙空间的对应关系和连通程度, 从而实现数字煤岩连通孔裂隙逾渗规律的精细表征和客观评价。

表 4 煤孔裂隙 PNM 拓扑结构参数

Table 4 PNM topological structure parameters of pores and fissures in coal

煤样	孔隙等效半径/μm			喉道等效半径/μm			喉道等效长度/μm			孔隙配位数		
	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI	Otsu	MP-Otsu	Bi-PTI
YCW褐煤	47.03	18.75	16.97	23.44	2.95	2.70	188.14	70.96	77.11	0.0379	0.0603	0.0621
XG气煤	82.54	33.59	20.44	58.32	24.91	3.24	170.25	136.54	84.57	0.0539	0.0749	0.0797
SL肥煤	78.60	20.78	18.67	70.47	2.11	1.92	214.06	114.38	101.49	0.0418	0.0511	0.0656
SQY焦煤	63.58	26.34	12.52	77.07	15.80	1.79	625.38	125.80	88.31	0.0296	0.0322	0.0334
YMY无烟煤	44.96	19.16	15.04	12.55	2.21	1.84	164.81	82.42	77.76	0.0425	0.0547	0.0660

5 结 论

(1) 针对 CT 数字煤岩分析技术, 阐明了孔隙率与灰度阈值之间的映射规律, 揭示了 2 者的映射曲线呈非对称 S 型分布且具有分段特征。基于 BiDoseResp 校准函数, 构建了 Bi-PTI 灰度阈值模型, 能够较好地拟合孔隙率与灰度阈值之间的映射关系, 其参数可以定量表征孔隙丰富程度和孔隙形状的规则程度, 以及基质骨架复杂程度和矿物含量。

(2) 采用高精度 X-ray μ CT 扫描技术获取了 5 种变质煤的数字结构, 并对比分析了 Bi-PTI 模型和 Otsu 模型的最佳阈值反演结果。研究发现 Otsu 模型计算的孔隙率高达 70% 以上, 而 Bi-PTI 模型在 0.44%~16.22%, 与压汞实测数据更为接近, 能够提升煤岩孔隙数字重构数据的真实性。

(3) Otsu 模型的过度识别导致大量孔隙被错误整合, 孔隙空间结构参数计算值普遍偏高; MP-Otsu 模型的识别效果受煤样矿物含量影响较大。Bi-PTI 模型能够弥补这些缺陷, 使孔隙空间重构参数更准确, 识别尺寸更细微, 从而实现小尺度孔隙空间结构的精准识别。

(4) Otsu 模型极易忽略部分孔隙拓扑结构; 对于低矿物含量煤样, MP-Otsu 模型对孔隙拓扑结构的识别存在较大偏差。Bi-PTI 模型能够精细识别缺陷位置的拓扑特征, 使孔隙、喉道等尺寸识别准确度最高提升 97.68%, 配位数最高提升 63.85%。Bi-PTI 模型实现了对拓扑体系孔喉丰度和连通特性的高度还原, 可以增强数字煤岩空间拓扑表征和逾渗规律评价的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297~322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297~322.
- [2] 桑树勋, 韩思杰, 刘世奇, 等. 高煤阶煤层气富集机理的深化研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 388~403.
SANG Shuxun, HAN Sijie, LIU Shiqi, et al. Comprehensive study on the enrichment mechanism of coalbed methane in high rank coal reservoirs[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 388~403.
- [3] 崔洪庆, 姚念岗. 不渗透断层与瓦斯灾害防治[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1486~1489.
CUI Hongqing, YAO Niangang. Impermeable faults and prevention of gas hazards[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1486~1489.
- [4] GUO Xiaoyang, DENG Cunbao, FAN Yongpeng, et al. Experimental research on leaf vein geometric characteristics of multibranch horizontal well for coalbed methane recovery[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(6): 2921~2935.
- [5] 王登科, 张航, 魏建平, 等. 基于工业 CT 扫描的瓦斯压力影响下含瓦斯煤裂隙动态演化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3550~3564.
WANG Dengke, ZHANG Hang, WEI Jianping, et al. Dynamic evolution characteristics of fractures in gas-bearing coal under the influence of gas pressure using industrial CT scanning technology[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3550~3564.
- [6] 王刚, 秦相杰, 江成浩, 等. 温度作用下 CT 三维重建煤体微观结构的渗流和变形模拟[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1750~1760.
WANG Gang, QIN Xiangjie, JIANG Chenghao, et al. Simulations of temperature effects on seepage and deformation of coal microstructure in 3D CT reconstructions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1750~1760.
- [7] 李兆霖, 王连国, 姜崇扬, 等. 基于实时 CT 扫描的岩石真三轴条件下三维破裂演化规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 937~949.
LI Zhaolin, WANG Lianguo, JIANG Chongyang, et al. Three-dimensional fracture evolution patterns of rocks under true triaxial conditions based on real-time CT scanning[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 937~949.
- [8] JU Yang, WANG Yongliang, DONG Hongyu, et al. Numerical analysis of the hydrofracturing behaviour of heterogeneous glutenite considering hydro-mechanical coupling effects based on bonded particle models[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, 42(13): 1493~1515.
- [9] JU Yang, XI Chaodong, ZHANG Yang, et al. Laboratory In Situ CT observation of the evolution of 3D fracture networks in coal subjected to confining pressures and axial compressive loads: A novel approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(11): 3361~3375.
- [10] JU Yang, XIE Heping, ZHENG Zemin, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(36): 5354~5365.
- [11] JU Yang, WANG Jinbo, GAO Feng, et al. Lattice-Boltzmann simulation of microscale CH_4 flow in porous rock subject to force-induced deformation[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(26): 3292~3303.
- [12] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微观孔喉结构[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 329~333.
BAI Bin, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Multi-scale method of Nano(Micro)-CT study on microscopic pore structure of tight sandstone of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 329~333.
- [13] 张青成, 左建民, 毛灵涛. 基于体视学原理的煤岩裂隙三维表征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1227~1232.
ZHANG Qingcheng, ZUO Jianmin, MAO Lingtao. Experimental study of three-dimensional characterization of coal fractures based on stereology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- ing, 2014, 33(6): 1227–1232.
- [14] 刘向君, 朱洪林, 梁利喜. 基于微CT技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1133–1140.
LIU Xiangjun, ZHU Honglin, LIANG Lixi. Digital rock physics of sandstone based on micro-CT technology, 2014, 57(4): 1133–1140.
- [15] 宋入党, 何凯凯, 吉小峰, 等. 基于CT扫描的煤中孔隙精细表征[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 41–49.
SONG Dangyu, HE Kaikai, JI Xiaofeng, et al. Fine characterization of pores and fractures in coal based on a CT scan[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(3): 41–49.
- [16] 王刚, 杨鑫祥, 张孝强, 等. 基于DTM阈值分割法的孔隙煤岩体瓦斯渗流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 119–129.
WANG Gang, YANG Xinxiang, ZHANG Xiaoqiang, et al. Numerical simulation of gas flow in pores and fissures of coal based on segmentation of DTM threshold[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(1): 119–129.
- [17] 马敏, 刘一斐, 刘亚楠. 基于改进半阈值迭代算法的ECT图像重建[J]. 计量学报, 2021, 42(5): 595–602.
MA Min, LIU Yifei, LIU Yanan. ECT image reconstruction based on improved half-threshold iterative algorithm[J]. *ACT Metrologica Sinica*, 2021, 42(5): 595–602.
- [18] 曾艳阳, 谢高森, 张建春. 基于截距直方图和Otsu融合的弱光图像分割[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 219–227.
ZENG Yanyang, XIE Gaosen, ZHANG Jianchun. Weak-Light image segmentation based on intercept histogram and Otsu fusion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(20): 219–227.
- [19] TAUD H, MARTINEZ-ANGELES R, PARROT J F, et al. Porosity estimation method by X-ray computed tomography[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2005, 47(3-4): 209–217.
- [20] 毛灵涛, 石鹏, 涂辉, 等. 基于CT图像单轴受载煤样损伤计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(1): 59–63.
MAO Lingtao, SHI Peng, TU Hui, et al. Coal damage calculation under uniaxial loading based on CT images[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2013, 32(1): 59–63.
- [21] 尹建强, 朱金波, 曾秋予, 等. X射线煤矸识别过程中图像分割精度研究[J]. 选煤技术, 2021(4): 24–29.
YIN Jianqiang, ZHU Jinbo, ZENG Qiuyu, et al. Study on accuracy of segmentation of images in refuse X-ray identification process[J]. *Coal Preparation Technology*, 2021(4): 24–29.
- [22] 王刚, 陈雪畅, 韩冬阳, 等. 基于改进Otsu的煤体CT图像阈值分割算法的研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 264–271.
WANG Gang, CHEN Xuechang, HAN Dongyang, et al. Research on threshold segmentation algorithm of coal CT images based on improved Otsu[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 264–271.
- [23] ROBERTO M. Fitting models to biological data using linear and non-linear regression: a practical guide to curve fitting[J]. *Statistics in Medicine*, 2005, 80(1): 101–101.
- [24] 王刚, 沈俊男, 褚翔宇, 等. 基于CT三维重建的高阶煤孔隙结构综合表征和分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2074–2080.
WANG Gang, SHEN Junnan, CHU Xiangyu, et al. Characterization and analysis of pores and fissures of high-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8): 2074–2080.
- [25] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62–66.