引用格式：薛新，葛绍祥，魏雨函，等. 基于分形理论的多孔材料设计及表征研究进展[J]. 材料工程，2026，54(5)：200-212.
XUE Xin，GE Shaoxiang，WEI Yuhan，et al. Research progress in design and characterization of porous materials based on fractal theory[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(5)：200-212.

基于分形理论的多孔材料设计及表征研究进展

薛　新，葛绍祥，魏雨函，廖　娟*
（福州大学 机械工程及自动化学院，福州 350116）

摘要：多孔材料内部空腔的复杂性、孔隙分布的随机性以及孔径的多尺度性对孔隙细观结构的定量表征带来困难。分形理论因其在表征复杂结构自相似性和多尺度性方面的独特优势，近年受到广泛关注。本文综述了分形理论在多孔材料领域的研究发展历程，分析了不同尺度下多孔材料单一和多重分形特征的提取与表征方法，对基于多重分形优化的先进工程材料应用案例进行了归纳，重点讨论了分形理论在多孔材料力学性能、传热性能和渗透性能表征研究中的进展，指出基于分形理论指导多孔材料优化设计及性能表征过程中，主要存在细观结构-宏观多功能特性之间的关联物理机制不明确、预测/优化模型算法效率和精度低的问题，对分形理论在多孔材料未来的研究发展和潜在的工程应用前景，如考虑跨尺度效应、多物理场耦合分析、机器学习优化策略等进行了展望。

关键词：多孔材料；分形维数；特征提取；分形结构设计；多功能特性
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000349　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000349
中图分类号：TB383　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)05-0200-13

Research progress in design and characterization of porous materials based on fractal theory

XUE Xin，GE Shaoxiang，WEI Yuhan，LIAO Juan*
（School of Mechanical Engineering and Automation，Fuzhou University，Fuzhou 350116，China）

Abstract：The complexity of cavities，randomness of pore distribution，and multi-scale of pore size in porous materials make it difficult to quantitatively characterize pore microstructure. In recent years，fractal theory attracts more attention because of its unique advantages in portraying the self-similarity and multi-scale of complex structures. This paper reviews the development roadmap of fractal theory and its applications on porous materials，analyzes the single and multi-fractal feature extraction and characterization methods for porous materials at different scales，summarizes some advanced engineering material applications based on multifractal optimization，and discusses the research progress in the applications of fractal theory to the characterization of mechanical，thermal and permeability properties of porous materials. During the optimization design and performance characterization process of porous materials based on fractal theory，the main issues and shortcomings including the ambiguity of correlation mechanism between micro structure and macro multi-functional characteristics，and low efficiency and accuracy for prediction models and/or optimization algorithm are pointed out. The development trend and potential engineering applications of fractal theory such as the consideration of cross-scale effect，multi-physics coupling analysis，and optimization strategy based on machine learning are prospected.

Key words：porous material；fractal dimension；feature extraction；fractal structure design；multi-functional characteristic

多孔材料是一类利用孔隙结构获得物理性能和力学性能等指标优化的功能结构一体化材料[1]。相较于普通的密实材料，其具有孔隙率高[2]、比表面积大[3]、传输性能优异[4]以及结构轻量化[5]等特点，在航

天航空、隔热防护、减振降噪、电磁屏蔽等领域得到广泛的应用[6-9]。大量研究表明，孔隙所占的相对体积分数以及孔隙分布特点对多孔材料的宏观性能产生不同程度的影响[10-12]。因此，通过研究材料孔隙细观结构来实现多孔材料宏观性能的表征与预测具有可行性。然而，受限于内部空腔的复杂性、孔隙分布的随机性以及孔径多尺度特性，多孔材料孔隙结构的定量表征仍存在难点。为了突破多孔材料孔隙结构难以定量表征的困境，具有刻画复杂结构自相似性和多尺度性独特优势的分形理论被研究人员所重视。近年来，有关分形理论在多孔材料结构设计以及性能表征方面的研究备受关注。在复合材料结构优化领域，通过将典型的分形结构（如 Koch 曲线、Menger 海绵、Sierpinski 地毯等）引入孔隙结构优化中，在实现材料轻量化的同时获得了更好的力学性能[13-14]。在电化学领域，分形理论被应用于优化电催化流场，从而改善了多孔聚合物燃料电池反应的均匀性，提高了电池的最大功率密度[15]。在多孔材料宏观性能表征领域，通过建立分形维数（D）与孔隙参数的相关模型可定量表征孔隙结构的复杂程度，为探索多孔材料细观孔隙结构-宏观多功能特性的关联机制搭建桥梁[16-18]。目前，多孔材料的分形相关研究主要分为两类，一类是针对无序孔隙的多孔材料（如多孔陶瓷、纤维材料、多孔混凝土、金属泡沫等），通过提取其孔隙结构的微观分形特征，从而建立分形维数与材料宏观性能间的联系，为多孔材料的宏观性能研究提供新的视角；另一类是针对具有规则孔隙的多孔材料（如蜂窝材料、点阵材料），通过引入分形结构设计，实现结构轻量化，提高材料强度。因此，分形理论的发展对于新型多孔材料的结构优化及性能表征都具有重大的现实意义。本文围绕分形理论在多孔材料结构设计和性能表征方面的研究进展，首先总结了多孔材料分形特征的提取和表征，然后介绍了基于多重分形优化的先进工程材料应用实例，最后重点讨论了分形理论在多孔材料力学性能、传热性能以及渗透性能研究方面的应用进展，以期为新型多孔材料功能定制化及宏观性能的表征拓展新的思路。

1　分形理论基础

1.1　分形概述

在传统欧几里得几何学中，研究对象具有规则和光滑的几何形状，其大小可以准确测量，并且拓扑维数均为整数。然而，将研究范围拓展到自然中具有粗糙形状的几何对象，如粗糙表面、曲折海岸线、山脉及岛屿轮廓等，欧几里得整数拓扑维数不能准确描述和区分这类空间对象的复杂程度[19]。因此，研究人员将目光投向几何对象的复杂边界轮廓，试图寻找边界轮廓与几何实体间的联系。

分形理论概念雏形最早由法国数学家 Mandelbrot 等提出，用于计算有关海岸线的自相似性及其长度，具有自相似性、标度不变性、分数维和局部随机性与整体确定性共存这四种特征[20]。“分形”一词源于拉丁语“*fractus*”，意为不规则的、分数的、支离破碎的物体，它指的是没有特征长度的图形、构造以及现象的总称[20]。分形理论跳出了整数拓扑维数的传统局限，引入非整数的分形维数的视角和数学方法研究客观事物，更加趋近复杂系统的真实属性与状态的描述。凭借能够定量表征物体复杂性的独特优势，分形理论从早期的地质学领域层岩孔隙结构研究[21]逐渐拓展至多孔材料宏观性能表征领域，成为探索多孔材料细观结构-宏观多功能特性之间关联机制的强大工具，其发展历史如图 1 所示。

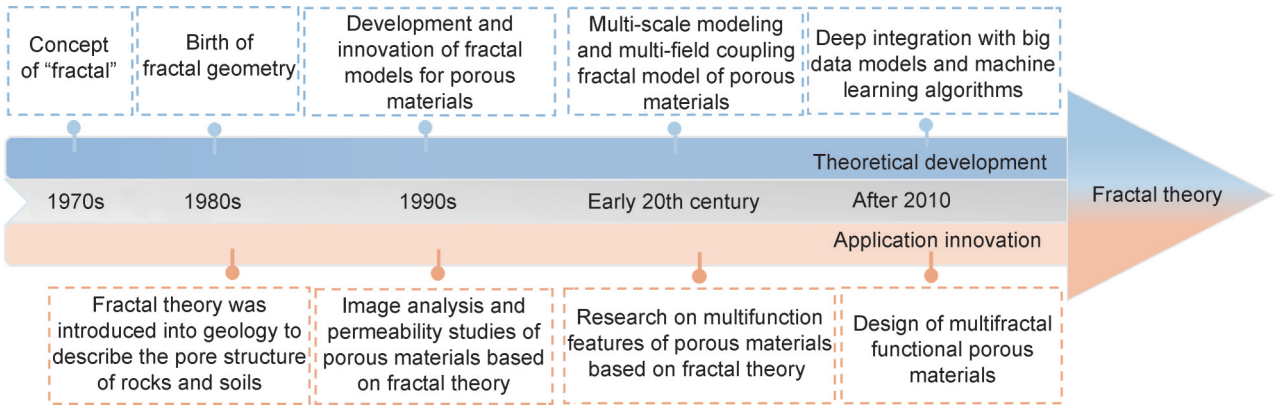


图 1　分形理论在多孔材料领域的发展历程

Fig.1　Development history of fractal theory in field of porous materials

1.2 多孔材料分形特征的提取与表征

分形维数是分形对象、过程与数据的唯一且最重要的特征参数[22]，用它来定量描述分形结构的自相似程度、不规则程度或破碎程度，其数值可超过纯粹几何图形整数维的限制。多孔介质内部孔隙的孔径分布横跨微观尺度、介观尺度以及宏观尺度，其孔隙结构与粗糙表面形貌都展现出明显的分形特征。基于分形维数定量表征多孔材料的孔隙结构时，首先需要对多孔材料的分形特征进行提取和处理（多尺度孔隙结构观测技术如表1[23]所示），随后结合分形算法计算孔隙分形维数，从而定量表征孔隙结构的复杂程度。

表1 多尺度孔隙结构的主要表征技术对比[23]

Table 1 Comparison of main characterization techniques of multi-scale pore structure[23]

Pore type	Characterization type	Measurement technique	Accuracy
Nanopore(1-1000 nm)	2D image observation	Atomic force microscope(AFM)	>0.1 nm
	2D image observation	Environmental scanning electron microscope(ESEM)	>1 nm
	2D image observation	Field emission scanning electron microscope(FESEM)	>1 nm
	2D image observation	Scanning electron microscope(SEM)	>6 nm
	3D reconstruction	Nano-CT	>50 nm
Micropore(1-1000 μm)	2D image observation	Optical microscope	>0.3 μm
	3D reconstruction	Micro-CT	>1 μm
Macropore(>1 mm)	3D reconstruction	Macro-CT	>0.6 mm
	Quantitative characterization	Nuclear magnetic resonance(NMR)	>8 nm
	Quantitative characterization	Gas adsorption	>1 nm
	Quantitative characterization	Mercury intrusion porosimetry(MIP)	>0.01 μm

微观尺度下的多孔材料分形特征主要表现在微孔结构的复杂性。由于多孔介质微观孔隙的孔径在纳米到亚微米级别（1～1000 nm）之间，难以直接观测，通常需要借助原子力显微镜[24]、场发射扫描电子显微镜[25]等成像技术。为了准确提取微观尺度下多孔材料孔隙截面的分形特征，常用结合图像灰度处理、黑白二值化处理、中值滤波以及边缘锐化等图像处理技术，将孔隙与固相进行区分，从而全面解析孔隙结构的分形特征。分形特征提取后通过计算分形维数实现孔隙结构非均质性的定量表征。计算多孔介质分形维数的方法繁多，常见的包括盒维法[26]、Sierpinski地毯法[27]、周长面积法[28]、小岛法[29]及功率谱密度法[30]等。由于盒维法简单高效、易于实现，在分析精度要求不高的情况下应用最为普遍，其分形维数的计算流程如图2所示。

介观尺度下的多孔材料分形特征涉及孔隙分布情况和孔隙结构的连通性。该尺度下多孔介质的孔隙孔径在微米到毫米级别（1～1000 μm）之间，通常采用扫描电子显微镜[31]、CT扫描[32]等成像技术来观测。由于介观孔隙对材料流体运输具有强化作用，因此多孔材料介观分形特征会直接影响多孔材料的传输性能。基于有效介质理论[33]，研究人员常通过建立孔隙分形模型进一步阐述介观孔隙对材料输流特性的影响。Dong等[34]建立了孔隙分形模型，应用于多相系统介电常数与导热系数的计算，实现了对多孔AlN/BN/SiOC复合材料介电常数和热导率的精准预测。Xi等[35]评估了多孔混凝土材料中的弹性模量和分子扩散率，证明了介观孔径分形特征对研究复杂孔隙结构的重要性。Zhang等[36]基于CT扫描技术重建了多孔FeS_2介观尺度分形模型，通过数值模拟方法研究了熔融电解质在多孔FeS_2电极内的耦合输运性能。

多孔材料的宏观孔隙尺寸通常在毫米级及以上，孔隙尺寸相对较大，常可通过裸眼或低倍显微镜观察。在宏观尺度下，多孔材料的分形特征不再局限于宏观孔隙的分布情况，而是着重于多孔材料内部细观孔隙（微观孔隙和介观孔隙）与宏观性能（如传输特性和渗透性能）的联系。以多孔材料的渗透性分形研究为例，Zhu等[37]研究了多孔混凝土微观孔结构对材料透气性的影响，揭示了孔隙表面分形维数与透气性的反比关系。Zhao等[38]研究了多孔煤样内部多尺度（纳米级与微米级）孔隙和裂缝对整体渗透率的作用，发现微尺度裂缝对渗透率的作用最为显著，而纳米级孔隙含量对总渗透率影响甚微。

近年来，现代工程应用对多孔材料结构轻量化和材料强度提出了更高的要求，推进了具有分形孔隙的多孔材料的设计与研发，如金属泡沫、烧结多孔陶瓷等。这类多孔材料的孔隙尺寸横跨多个尺度，少量的宏观孔隙确保了材料的机械稳定性与承载能力，其余

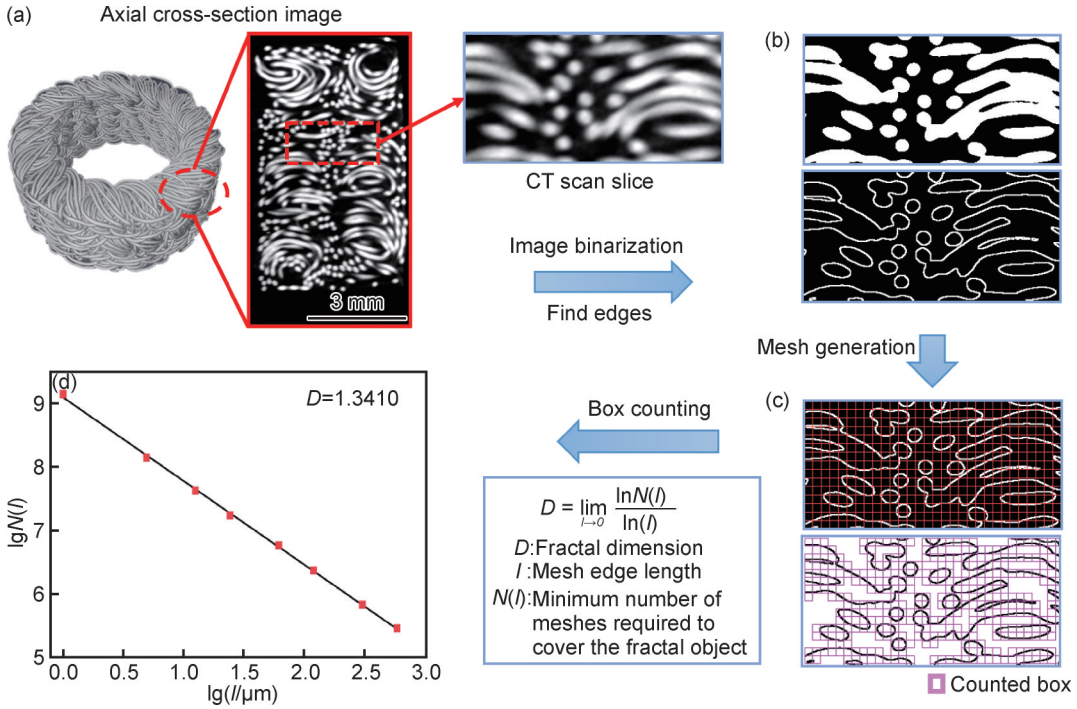


图 2　盒维法计算金属纤维截面孔隙分形维数流程

(a)从CT骨架中获取的局部孔隙截面图;(b)图像灰度和黑白二值化处理后提取孔隙轮廓;(c)分割网格覆盖孔隙轮廓;(d)盒维法计算分形维数

Fig.2　Flow chart of calculating fractal dimension of metal fiber cross section by box-counting method

(a)image of local pore cross sections obtained from CT skeleton;(b)extraction of pore edges after image grayscale and black and white binarization processing;(c)segmented mesh covering pore edges;(d)box-counting method to calculate fractal dimension

大量的介观、微观孔隙可以显著提高材料孔隙度,实现结构轻量化的同时也赋予材料功能化设计的空间。为了解决单一维度无法全面解析分形孔隙的多重分形特征,研究人员结合多重分形特征共同表征材料的整体性能,在多重分形理论领域做出了许多突破[39-40]。Duan等[41]发现与单一分形维度相比,多重分形维数与孔隙结构参数(孔隙度、孔隙分布及孔径大小等)存在更强的相关性。通过将多重分形维数结合到多元线性回归模型中,可以更有效地阐明多孔材料的非均质结构及其传输特性。Su等[42]对比了单重分形理论和多重分形理论在多尺度砂岩储层孔隙分形特征研究中的差异,发现多重分形分析能够更好地定量表征孔隙结构的异质性。

此外,多重分形算法的应用和创新逐渐成为分析多重分形特征的重要方法之一。在算法应用方面,Xi等[43]将二维多重分形互相关分析的算法模型应用于多孔纤维图像识别中,为分形孔隙图像分类与检测提供了参考。Kovalenko[44]引入梯度像素分形算法表征了纳米多孔材料孔隙结构的多重分形特征,有效提高了多重分形的分析质量。在算法创新方面,基于boosting机器学习算法的多重分形分析可以更加精确地表征各种沉积环境中的多孔介质微异质性和孔径分布范围[45],为油田勘探开发提供了新的思路。通过遗传算法优化纤维铺设并基于多重分形算法重构多尺度孔隙结构,有助于纤维多孔材料分形孔隙的实体建模[46]。上述研究为了解多孔材料分形特征的提取与表征技术提供了参考。

2　多孔材料的结构多重分形设计

自然界中复杂的生物结构一直是研究人员开发新型复合材料的灵感来源。近年来,基于规则多重分形理论的先进结构工程材料大量涌现,如图 3 所示[47-51]。以蛇形仿生分层结构的优化过程为例[47],其优越的力学性能得益于大多数生物特有的分层自相似结构特征,因此具有比传统实体材料更优异的吸能特性、易于实现结构轻量设计的独特优势。多重分形也称为多标度分形,可以被归类为随机多重分形。相较于金属泡沫、多孔陶瓷等具有随机多重分形特征的孔隙结构,蜂窝材料、点阵材料等规则多重分形孔隙结构应更简单、更具有实践意义,但却鲜有研究和工程应用报道。殷雅俊等[52]推测,规则多重分形与规则单重分形一样,是纯粹几何意义上的结构,具有理想性、抽象性、严格性和精确性。理想性和抽象性决定了其两面特征:一方面,它们是从自然界中抽象出来的;另一方面,它们又“远离”自然,在自然界中并不

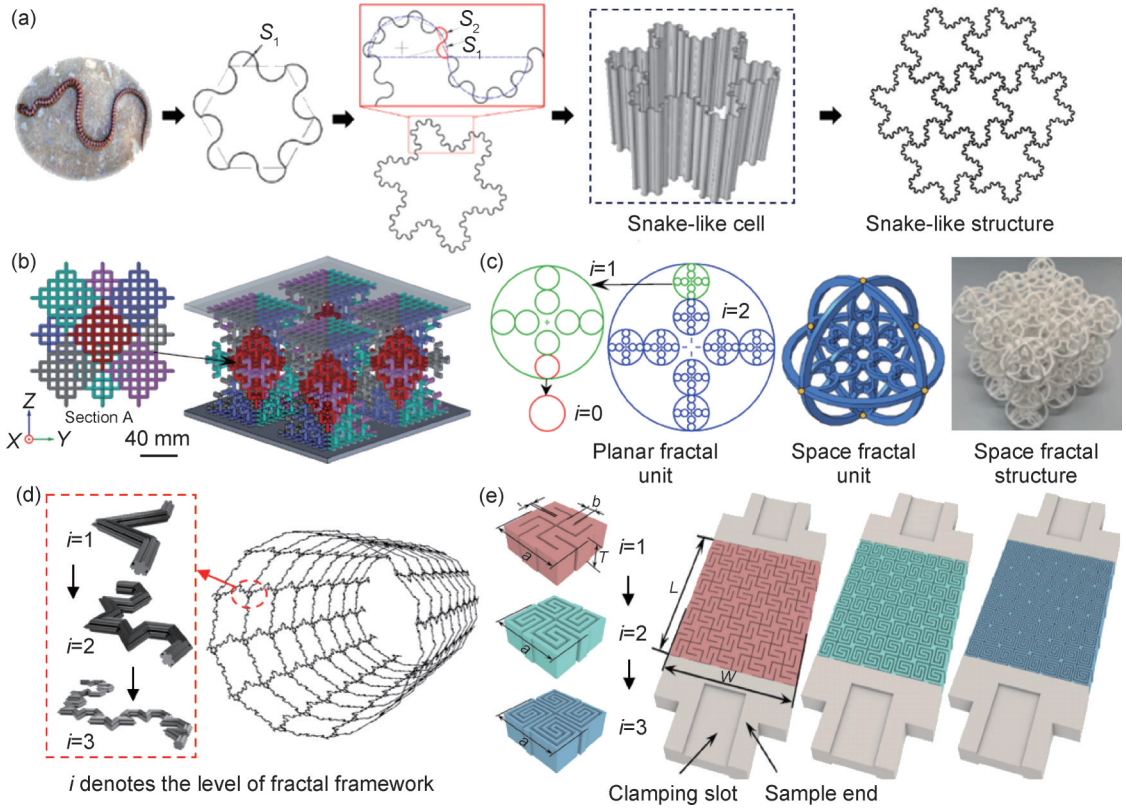


图3 基于规则多重分形理论的先进结构工程材料应用

(a)蛇形仿生形结构设计[47];(b)用于减振的三维交叉分形多胞点阵结构[48];(c)具有三维拉胀弹性功能的多维分形周期性结构[49];(d)用于结构增强元件的钛合金Koch曲线丝网[50];(e)具有超弹性特性的周期“刻纹”分形超材料[51]

Fig.3 Applications of structural engineering materials based on regular multifractal theory

(a)design of a snake-like bionic shape structure[47];(b)three-dimensional cross fractal multicell lattice structure for vibration reduction[48];(c)multi-dimensional fractal periodic structure with elastic function of three-dimensional expansion[49];(d)Koch curve wire mesh in titanium alloy for structural reinforcement elements[50];(e)periodic “textured” fractal metamaterials with superelasticity[51]

“真的”存在。这种理想性和抽象性使得它们很难引起众多学科领域研究人员的关注。严格性和精确性则意味着其是绝对精确的构造,不仅具有多重的精细结构,而且具有精确的几何和拓扑,必须满足严格的多重自相似性。这些苛刻的要求增加了规则多重分形的构造难度,但这并不削弱其在自然科学中的基础性地位。

随着近年周期性先进结构工程材料及其卓越性能的研究发展,规则多重分形理论及应用探索研究的科学价值逐渐引起学术界的广泛关注。图3(b)~(e)展示了用于减振的三维交叉分形多胞点阵结构[48]、具有三维拉胀弹性功能的多维分形周期性结构[49]、用于结构增强元件的钛合金Koch曲线丝网[50]和具有超弹性特性的周期“刻纹”分形超材料[51]等。研究表明,规则多重分形在实现结构工程材料的高能特性或优越力学性能方面起到了积极有效的作用。但是,其作用机制主要侧重单一的力学性能,如吸能效果或力学强度,而基于多重分形诱导的力学性能的增强机制缺少全面和详细的分析。

3 基于分形理论的多孔材料表征研究

3.1 力学性能

多孔材料内部孔隙分布与材料的力学性能和耐久性存在密切的联系。随着分形理论和多孔材料交叉研究的不断深入,人们更加倾向于探究孔隙分形特征与材料力学性能之间的联系,从而为多孔材料力学性能的表征与预测提供新的方法。近年来,基于分形理论的多孔材料力学性能表征研究主要包括金属多孔材料力学性能的预测、工程多孔材料强度的评估和分形孔隙对材料力学性能的影响。

金属多孔材料在生产加工及使役过程中常伴随着复杂的物理、化学及其他变化,其内部孔隙和表面形态产生变化并呈现出分形特征。通过提取孔隙分形特征并建立分形维数与力学性能的映射关系,有助于研究多孔金属内部孔隙分布变化对材料力学性能的影响。Pavlenkoz[53]研究了孔隙分形维数对钛合金压气机叶片强度的影响,发现通过分形维数可以有效

评估材料强度与耐久性，防止烧结成型工艺中叶片表层形成气孔。Wang 等[54]通过孔隙分形维数准确预测了多孔氧化铝的材料强度，该方法可适用于多孔陶瓷的强度检测。Chen 等[55]验证了分形理论预测多孔氧化铝结构强度的准确性，发现孔隙分形维数与材料抗压强度间呈现出明显的正相关，为评估多孔材料的孔隙结构和力学性能提供了实验依据。

在工程多孔材料强度评估领域，为了揭示混凝土多相孔隙结构对材料强度的影响，Han 等[56]基于 Menger 分形模型研究了不同孔隙区域分形特征的差异以及分形特征与材料强度的联系，通过比较分析混凝土的分形尺寸可以有效评估其抗压强度，该方法可用于混凝土实际探伤。Deng 等[57]基于分形理论研究了尾砂混凝土有害孔隙与材料强度的内在联系，结果表明，有害孔隙分形维数与材料强度间呈现明显的线性正相关，该抗压强度分形预测模型与实验值的最大预测误差为 2.09%，具有良好的预测精度。研究结果为混凝土抗压强度的无损评估提供了新的思路。Guo 等[58]定义了弹性波计算机断层扫描（elastic-wave computed tomography，EWCT）分形维数用于混凝土强度的评估，开发了具有多参数的混凝土人工神经网络（artificial neural network，ANN）强度预测模型。研究结果表明，EWCT 分形维数对 ANN 预测模型的权重贡献率为 23.15%，可作为混凝土检测的关键指标，相关数据为基于无损技术的大坝混凝土智能检测与监控奠定了基础。此外，在纤维多孔复合材料的损伤鉴定工作中，姜文等[59]基于碳纤维基复合树脂的冲击损伤 C 扫图像，开发了冲击损伤形貌的 Sierpinski 冲击后压缩（compression after impact，CAI）分形预测方法。CAI 预测结果表明，分形模型具有较好的预测精度，其最大预测误差为 3.2%。该分形模型不需要冲击能量作为输入参数，有助于实际工程应用中材料的损伤评估。

探究分形孔隙对材料力学性能的影响对功能多孔材料的研发具有参考价值。图 4 展示了分形理论在多孔材料力学性能表征中的典型应用[60-61]。Pérez 等[60]研究了多尺度孔隙结构对金属泡沫弹性压缩行为的影响，如图 4(a)所示。在后续研究中，他们引入了离散元方法重构了分形金属泡沫的孔隙模型，并结合有限元法评估了材料的力学行为[62]。Casnedi 等[61]引入混合分形单元（intermingled fractal units，IFU）用以拟和设计多孔陶瓷的力学性能，如图 4(b)所示，通过多孔陶瓷孔隙积累曲线对比发现，MIP 测试曲线（蓝直线 E1，E2）和 IFU 建模预测曲线（红点线 M1，M2）较为吻合。这表明 IFU 建模不仅可以重现多孔陶瓷的微观孔隙分布特点，还可以通过调节总孔隙度，设计孔隙微观结构（绿点线 F1～F8）的分形性质，从而分析和预测孔隙累积曲线。图 4(c)展示出 IFU 程序对不同孔隙度多孔陶瓷的杨氏模量均具有较好的预测精度（IFU 杨氏模量预测值均分布于黄色实验测试值区域内），有助于先进陶瓷生产工艺的定制化设计[61]。Casas 等[63]探索了制备工艺与分形孔隙率对多孔泡沫铝抗压强度的影响，研究表明，虽然渗透热处理工艺对孔隙率和相对密度影响较小，但避免了力学性能的急剧下降。此类具有分层孔隙率的多孔金属材料力学性能研究可以为特种铝合金的研发提供新的思路。

上述研究表明，分形理论为多孔材料的力学性能表征提供了新的视角，在不损坏材料的前提下实现材料的强度预测，有助于揭示孔隙结构复杂程度对材料力学性能的影响。然而，材料孔隙结构分形特征提取的全面性、分形算法的准确性仍是目前影响分形分析精度的关键因素。

3.2　传热性能

多孔材料有效热导率（effective thermal conductivity，ETC）的评估对于工程应用具有重要意义，因此在众多学科领域备受关注[64-66]。然而，受限于多孔材料孔隙结构的无序性和复杂性，长期以来多孔介质的传热性能主要依赖于实验测量或根据已有的经验公式关联[67]，并不能提供对多孔材料热传导机制的深刻理解。分形理论为揭示多尺度孔隙结构对材料传热性能的影响提供了新的视角。

多孔材料传热性能早期的分形表征侧重于单一分形特征与材料传热机理之间的联系，而目前的研究则转向了多孔材料的多尺度 ETC 理论建模。Shen 等[68]引入毛细管曲折度的分形维数来表征多尺度孔隙结构，开发了不饱和多孔介质 ETC 的广义模型，揭示了多尺度孔隙对 ETC 的显著影响。Xiao 等[69]实现了纤维孔隙结构的多尺度建模，开发了预测双向纤维多孔材料 ETC 的多重分形模型。Xu 等[70]考虑了多尺度结构和微尺度效应，建立了孔隙尺度分形模型来预测多尺度非饱和储层的 ETC，并揭示了介质内部的热传导机理。

除了分形 ETC 理论建模外，将分形思想引入多孔材料孔隙结构设计有助于改善材料传热性能。图 5 为分形孔隙设计在金属泡沫导热性能研究领域的相关应用[71-73]。在多孔复合相变材料传热研究领域，王晟琪等[71]将 Sierpinski 分形结构应用于泡沫材料传热特性研究，对比分析了具有不同孔隙结构的泡沫金属基相变材料在恒热流边界下的传热特性差异，如图 5(a)

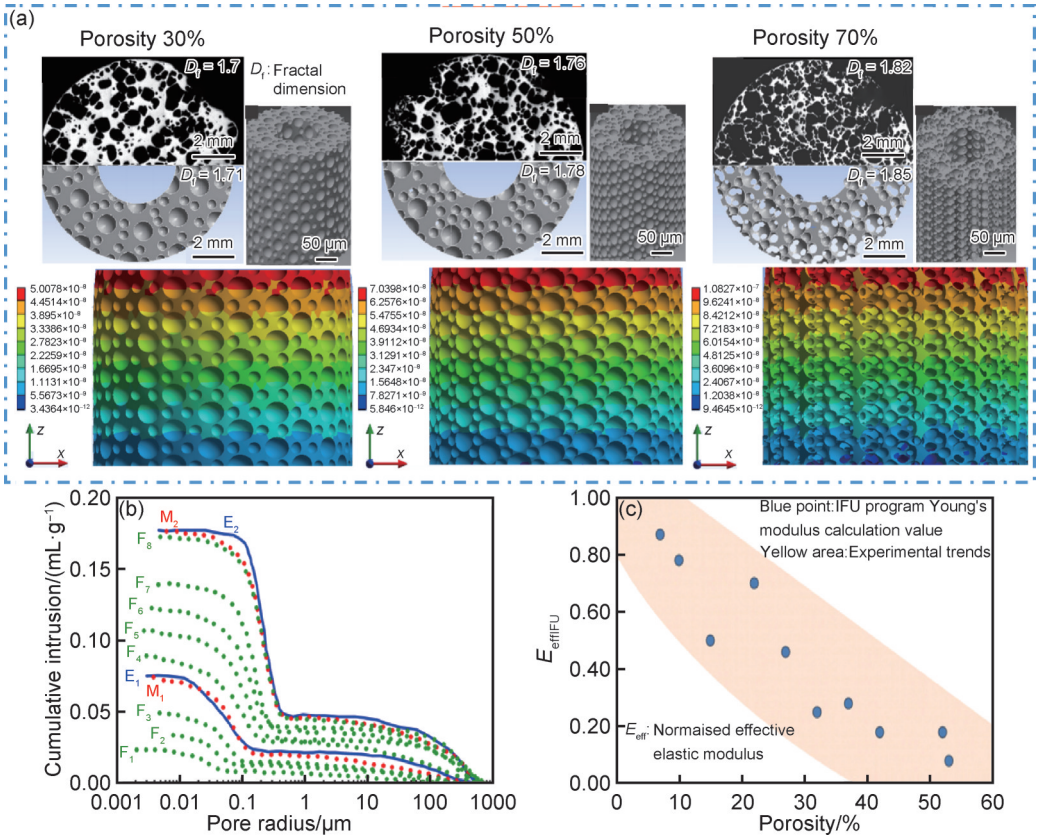


图4 分形理论在多孔材料力学性能表征中的应用

(a)Menger Sponge 分形模型、混凝土的多重分形特征以及抗压强度分形模型[60]；

(b),(c)基于IFU程序的多孔陶瓷孔隙积累曲线和杨氏模量计算误差[61]

Fig.4 Application of fractal theory in characterization of porous material mechanical properties

(a)Menger Sponge fractal model, multifractal features and compressive strength fractal model of concrete[60]; (b), (c)pore cumulative curves and calculation error of Young's modulus in porous ceramics based on IFU program[61]

所示，研究发现，热流边界上的孔隙会影响相变材料的传热速率，且分形体的分形级数越高，孔隙分布规律对其传热性能的影响程度越大，此研究结果为相变潜热储能材料的开发提供了实验依据。刘爽爽等[74]基于渗流理论和分形理论开展了 Mo-ZrO_2 多孔陶瓷通导相分形维数的计算，有效预测了材料导热性能的梯度变化。为精确预测碳纤维相变材料的有效热导率，Song 等[75]基于典型的 Sierpinski 地毯结构构建了分形预测模型。验证结果表明，该模型对 3 类相变材料的 ETC 预测相对误差均低于 11%，其精度显著优于传统的 QP 与 Maxwell-Eucken 模型。此外，Chen 等[72]将分形理论与热电类比原理相结合，提出预测颗粒固相多孔复合材料固流导热系数的新方法，研究结果表明，分形模型的预测精度优于传统的串联、并联等理论模型，如图 5(b)所示，在固流导热系数小于 10 的范围内，分形模型的平均相对误差控制在 10% 以内，与其他预测模型相比，其预测精度的最大提高幅度可达 20% 以上。

在金属泡沫相变材料的温度动态响应和凝固前沿演变方面，Yu 等[73]定量分析了分形维数和孔隙率对金属泡沫凝固行为的影响，图 5(c)为分形维数对金属泡沫凝固前端区域以及温度分布的影响，分形维数的减小有利于相变材料与金属基体间的间隙热传递，图 5(d)对比了分形维数对材料凝固性能的影响，发现曲线斜率与材料能量转换效率相关，研究表明，材料散热主要集中在放电初期，分形维数较低的金属泡沫动态放电热较大，当金属泡沫相变材料的分形维数小于 1.5 时可获得较好的凝固性能，有助于提升潜热存储装置热转换效率。Xu 等[76]引入分形网格来描述金属泡沫的多尺度孔隙结构，开展了分形金属泡沫中熔融传热的数值研究，结果表明，分形维数较小的分形金属泡沫提供了更快的热流路径，分形维数的适当降低有助于改善金属泡沫的熔融换热。此研究结果为航空航天以及高端装备领域高温导热材料的开发提供了参考。

目前，基于分形理论的多孔介质传热性能研究表明，分形理论为孔隙内部的传热机理研究提供了新的

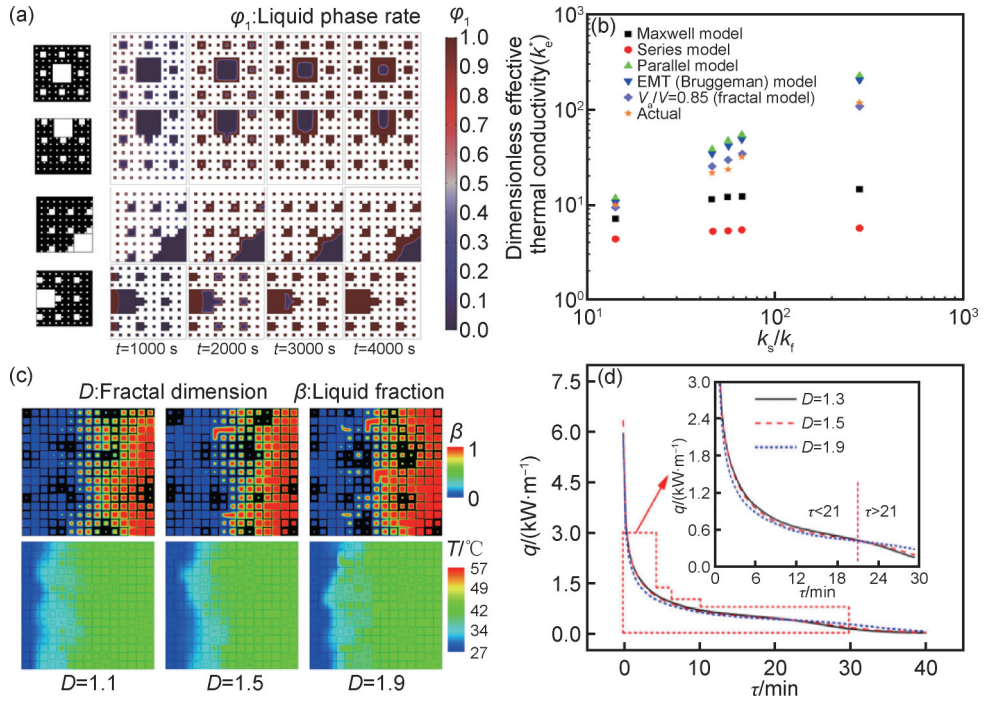


图 5　分形孔隙设计对金属泡沫导热性能的影响

(a)四种 Sierpinski 分形孔隙结构下相变材料两相分布[71];(b)孔隙度 $\varphi = 0.17$ 时分形模型与其他模型对固流导热系数比的计算结果对比[72];(c),(d)分形维数对液体分数演变、瞬态温度分布以及材料凝固性能的影响[73]

Fig.5　Effect of fractal pore design on heat-conducting property of metal foam

(a)two-phase distribution of phase change materials in four Sierpinski fractal pore structures[71];(b)comparison of calculated fluid-solid heat-conduction coefficients ratio by using fractal model and other models when porosity φ is 0.17[72];(c),(d)effects of fractal dimension on evolution of liquid fraction, temperature distribution and solidification performance of metal foam[73]

视角,特别是针对具有分形孔隙的多孔材料传热性能表征,通过孔隙分形维数可以更好地揭示不同尺度孔隙对材料导热能力的作用程度。然而,当前的传热分形研究侧重于孔隙分形特征与单一传热性能的联系,对热流边界和作用力场等环境因素的讨论不够深入。

3.3　渗透性能

多孔材料内部联通孔隙网络具有高比表面积的特点,对孔隙内部的流体运动具有强化作用,在吸附[77]、过滤[78]等工程领域得到了广泛的应用。在多孔材料渗透性能研究中,孔隙网络内流体的运动路径可视为一束弯曲的毛细管,通过分形维数、分形渗透率等分形参数,可定量表征多尺度孔隙结构与材料渗透能力间的关系。

致密砂岩、页岩油藏等地质多孔结构通常包含多种类型的分形孔隙,其孔隙结构内流体的流动机理具有多种传输机制。为了进一步揭示多尺度孔隙对材料渗流机理的影响,近年来,多孔材料输流特性的多重分形研究吸引了学术界的目光。图 6 为分形理论在多孔材料渗透性能表征中的应用[79-80]。Yang 等[79]将代表性单元面积(representative elementary area, REA)尺度页岩矩阵网格模型和分形锥形微管束模型相结合,如图 6(a)所示,开发了一种预测多孔页岩基质等效渗透率的数值模拟方法,揭示了多尺度孔隙对介质渗透性的影响。Du 等[81]推导了水合沉积物多孔介质的渗透率分形预测模型,发现在水合物饱和度范围内分形渗透模型都具有良好的预测精度,其精度误差可保持在±10%。Cheng 等[82]基于三维页岩孔隙的多尺度建模研究了不同尺度下的孔隙参数对渗透率的影响,发现砂岩的孔径分布主要集中在介观尺度,介观孔隙半径与整体渗透率相关性最强。为了揭示多孔煤内部分形孔隙的液体流动特性,Wang 等[83]引入分形维数因子建立了多孔煤渗透率分形预测模型,研究结果表明,分形模型对煤样渗透率的预测精度优于常规 SDR 模型,在 HP-5-3 样本的渗透率研究中,分形模型总错误率是 SDR 模型的 0.16 倍。因此,基于分形理论的预测模型有助于表征复杂孔隙结构和预测多孔煤的渗透率。

随着人工智能的崛起,一些研究人员开始尝试将深度学习算法与分形理论相结合,以提高对多孔介质渗透性能的预测准确性。Zhang 等[84]开发了数字图像分析框架,以揭示碳酸盐岩渗透率随孔隙结构参数的变化趋势。参数灵敏度分析表明,随机森林算法与分

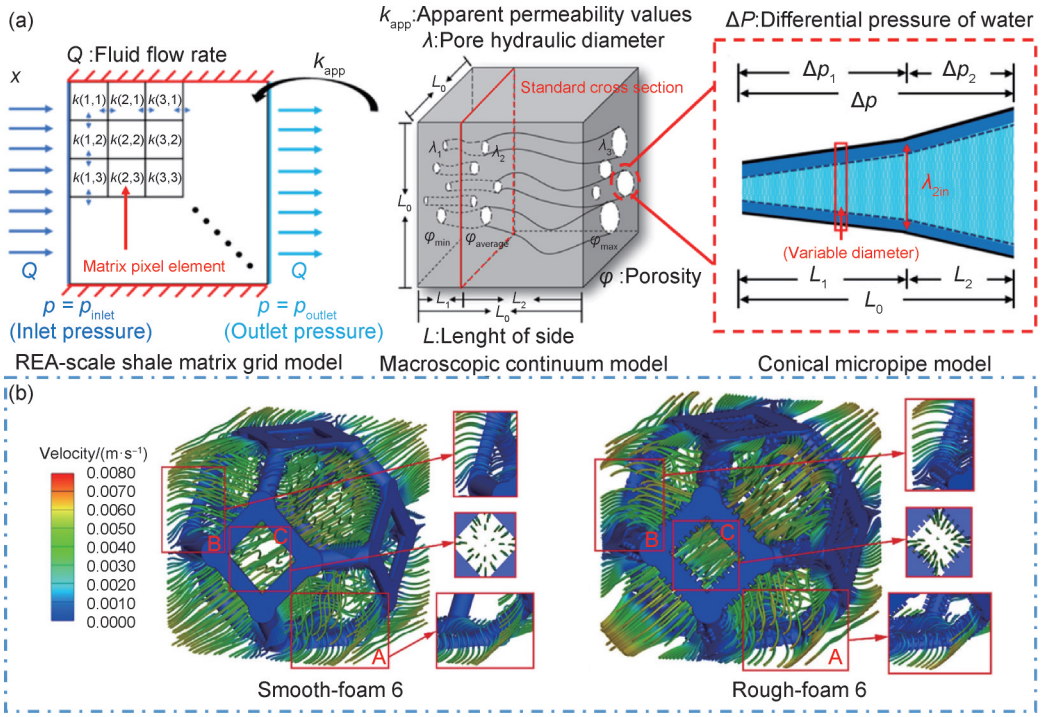


图 6 分形理论在多孔材料渗透性能表征中的应用

(a)REA 分形渗透模型[79];(b)光滑和粗糙开孔泡沫单元流线示意图[80]

Fig.6 Application of fractal theory in characterization of porous material permeability properties

(a)REA fractal permeability model[79];(b)schematic diagram of streamlines of smooth-foam and rough-foam elements[80]

形理论结合应用可提高渗透率的预测精度,为基于孔隙切片图像实现材料渗透率的精准预测提供了有效途径。

此外,部分学者致力于研究多孔材料孔隙连接界面的粗糙微结构与材料输流特性间的联系,尝试通过研究界面的分形特征来揭示材料渗透能力的变化情况。Xiao 等[80]研究了金属泡沫孔隙尺度上的输运现象,揭示了孔隙表面粗糙度对流体运动能力的影响,如图 6(b)所示,研究表明,金属泡沫表面的微粗糙度显著降低泡沫渗透率。此外,孔隙尺度模拟证明,渗透率降低的主要原因是流动扭曲度的增加以及流体输运与粗糙微表面之间的表面摩擦。Cousins 等[85]尝试利用门格尔海绵模型对质量分形多孔介质的孔隙-固相粗糙表面进行建模,揭示了表面粗糙度对材料渗透率的影响。

4 结束语

针对多孔材料孔隙结构难以定量表征以及孔隙细观结构与宏观多功能特性之间关联机制不明确等问题,本文分别从分形基础理论的发展历程、多孔材料分形特征的提取与表征、多重分形结构设计以及材料多功能特性表征研究等几个方面开展了系统的综述和发展趋势展望,重点关注力学性能(强度、冲击损伤等)、传热性能(传热效率、热传导机理等)、渗透性能(吸附、过滤等)等多孔材料典型多功能服役工况,对未来基于分形理论调控孔隙结构,实现多孔材料功能化设计及工程应用具有一定的指导意义。

未来的研究方向为:

(1)多孔材料的多尺度孔隙结构具有多重分形特征,不同维度下分形特征的表征手段存在差异,从单一分形维数维度无法全面描述多尺度结构的复杂程度,因此,多重分形理论的发展对多尺度孔隙结构的定量表征具有重大意义。未来可结合深度学习、机器视觉等算法模型进一步提高多重分形算法的分析精度,同时采用先进的孔隙结构观测手段实现多重分形特征的全面提取。

(2)基于多重分形设计对实现先进多孔材料的高能特性或优异力学性能具有积极有效的作用。然而,目前的多重分形结构优化的目标都侧重于材料力学性能的改善,且基于多重分形诱导的力学性能增强机制缺少全面的解析。采用图像几何分形设计方法与物理性能表征预测技术相结合的处理方法,如跨尺度效应、机器学习优化策略等多学科交叉融合,协同开展多重分形设计和应用指导是未来研究的方向和热点。

(3)在多孔材料性能表征方面,分形理论为探索多孔材料细观孔隙结构-宏观多功能特性的关联机制搭建桥梁。在力学性能表征领域,孔隙多重分形特征的全面提取和分形算法的准确性是影响多孔材料力学性能评估与预测的关键,如采用建立分形维度关联模型的方法优化分形力学模型。孔隙结构观测手段的更迭和多重分形算法的优化是今后重点突破的关键技术。在传热性能研究领域,当前传热性能的分形研究对于热环境边界和多尺度孔隙的讨论不够深刻,可考虑结合多尺度分形分析的方法构建分形热传导模型。探索复合热流边界、多场耦合作用与多尺度孔隙的耦合关系将会是未来的主攻方向。在渗透性能探索领域,粗糙表面、孔隙-固相边界的渗流行为对材料输流特性的影响尚不明确,可结合优化分形网格模型和多尺度渗透模型,量化各尺度孔隙对材料渗透性能的影响。分形理论与算法交叉结合是提高渗透率-孔隙参数分形模型分析和预测精度的发展趋势。

(4)尽管目前分形理论已经在多孔材料结构设计及表征研究中得到了全面的应用,然而,分形分析结果是基于唯象理论获得,受限于目前孔隙结构观测手段、图像处理技术以及分形特征提取方法等,分形分析的精度仍存在很大的提高空间,相关研究也未能深入实际工程应用领域。但是,这些不足并不能削弱其在自然科学中的基础性地位。因此,需要提高成像仪器的观测精度,加快多重分形理论的拓展深入以及促进大数据算法和多重分形理论的深度结合。

参考文献

[1] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
LIU P S. Introduction to porous materials[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.

[2] LI Y, GUO A, XU X, et al. Preparation and properties of highly elastic, lightweight, and thermally insulating SiO_2 fibrous porous materials[J]. Materials, 2022, 15(9): 3069.

[3] ZHANG R, QIAO J, ZHANG X, et al. Biomass-derived porous carbon for microwave absorption[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 289: 126437.

[4] 阚侃, 王珏, 付东, 等. 氮/氧共掺杂多孔碳纳米带的可控制备及储能特性[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 101-109.
KAN K, WANG J, FU D, et al. Synthesis and energy storage properties of N/O co-doped porous carbon nanoribbons[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8): 101-109.

[5] 孙驰, 汪健, 贺贺, 等. 选区激光熔化成形FeCrNi中熵合金点阵结构及其力学性能[J]. 材料工程, 2024, 52(1): 211-219.
SUN C, WANG J, HE H, et al. Lattice structures and mechanical properties of FeCrNi medium-entropy alloy prepared by selective laser melting[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(1): 211-219.

[6] RUBIO-AGUINAGA A, REGLERO-RUIZ J A, GARCÍA-GÓMEZ A, et al. Boron nitride-reinforced porous aramid composites with enhanced mechanical performance and thermal conductivity[J]. Composites Science and Technology, 2023, 242: 110211.

[7] 戴志伟, 吴亚东, 朱伟健, 等. 制备工艺对多孔Ti6Al4V微观结构和性能的影响[J]. 航空材料学报, 2023, 43(6): 36-43.
DAI Z W, WU Y D, ZHU W J, et al. Effects of preparation process on microstructure and properties of porous Ti6Al4V[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(6): 36-43.

[8] 李文智, 曹瑶琴, 何志平. 基于材料及结构的直升机噪声抑制技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2022, 42(2): 1-10.
LI W Z, CAO Y Q, HE Z P. Research progress of helicopter noise suppression technology based on materials/structures[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(2): 1-10.

[9] QU N, XU G, LIU Y, et al. Multi-scale design of metal-organic framework metamaterials for broad-band microwave absorption[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(18): 2402923.

[10] XIONG Y, HAN Z, QIN J, et al. Effects of porosity gradient pattern on mechanical performance of additive manufactured Ti-6Al-4V functionally graded porous structure[J]. Materials & Design, 2021, 208: 109911.

[11] CHEN C, MA J, LIU Y, et al. Compressive behavior and property prediction of gradient cellular structures fabricated by selective laser melting[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105853.

[12] SLÁMEČKA K, KASHIMBETOVA A, POKLUDA J, et al. Fatigue behaviour of titanium scaffolds with hierarchical porosity produced by material extrusion additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2023, 225: 111453.

[13] ZENG X, JING Q, SUN J, et al. Effect of fractal ceramic structure on mechanical properties of alumina ceramic-aluminum composites[J]. Materials, 2023, 16(6): 2296.

[14] KUSHWAHA B, DWIVEDI K, AMBEKAR R S, et al. Mechanical and acoustic behavior of 3D-printed hierarchical mathematical fractal menger sponge[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(4): 2001471.

[15] WU Y, XU L, ZHOU S, et al. Water management and mass transport of a fractal metal foam flow-field based polymer electrolyte fuel cell using operando neutron imaging[J]. Applied Energy, 2024, 364: 123204.

[16] 张韦, 刘超, 刘化威, 等. 基于孔体积分形维数的稻壳灰混凝土冻融损伤劣化机制[J]. 复合材料学报, 2023,40(8): 4733-4744.
ZHANG W, LIU C, LIU H W, et al. Freeze-thaw damage deterioration mechanism of rice husk ash concrete based on pore volume fractal dimension[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023,40(8): 4733-4744.

[17] THOMAS A, AGARWAL A K, KASHYAP Y S, et al. Quantifying pore characteristics in polymer glass-ceramics composite scaffolds using micro-tomography[J]. Journal of Materials Research, 2024, 39(8): 1258-1272.

[18] CHENG H, WANG F, YANG G, et al. Prediction of relative permeability from capillary pressure based on the fractal capillary bundle model[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239:

122093.
[19] AVNIR D, BIHAM O, LIDAR D, et al. Is the geometry of nature fractal [J]. Science, 1998, 279(5347): 39-40.
[20] MANDELBROT B B, AIZENMAN M. Fractals: form, chance, and dimension[J]. Physics Today, 1979, 32(5): 65-66.
[21] THOMPSON A. Fractals in rock physics[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1991, 19: 237-262.
[22] FEDER J. Fractals[M]. New York: Plenum Press, 1988.
[23] 汪贺, 师永民, 徐大卫, 等. 非常规储层孔隙结构表征技术及进展[J]. 油气地质与采收率, 2019,26(5): 21-30.
WANG H, SHI Y M, XU D W, et al. Unconventional reservoir pore structure characterization techniques and progress[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019,26(5): 21-30.
[24] LI Y, HONG C, WANG Z, et al. Fractal characteristics of biochars derived from penicillin V potassium residue pyrolysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2019, 141: 104636.
[25] GAUTAM S, PUROHIT S D, SINGH H, et al. Surface modification of PCL-gelatin-chitosan electrospun scaffold by nano-hydroxyapatite for bone tissue engineering [J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105237.
[26] TANG H P, WANG J Z, ZHU J L, et al. Fractal dimension of pore-structure of porous metal materials made by stainless steel powder[J]. Powder Technology, 2012, 217: 383-387.
[27] SONG W, WANG D, YAO J, et al. Multiscale image-based fractal characteristic of shale pore structure with implication to accurate prediction of gas permeability [J]. Fuel, 2019, 241: 522-532.
[28] FLORIO B J, FAWELL P D, SMALL M. The use of the perimeter-area method to calculate the fractal dimension of aggregates[J]. Powder Technology, 2019, 343: 551-559.
[29] ZHAO F, HU J, LIU T, et al. Study of the macro and micro characteristics of and their relationships in cemented backfill based on SEM[J]. Materials, 2023, 16(13): 4772.
[30] ZHANG C, GUAN P, ZHANG J, et al. Methodological study on the full-range pore structure and fractal characteristics of the tight reservoirs[J]. Minerals, 2023, 13(5): 587.
[31] MA H, SUN J, WU C, et al. Study on the pore and microstructure fractal characteristics of alkali-activated coal gangue-slag mortars[J]. Materials, 2020, 13(11): 2442.
[32] JIAO X Y, ZHANG W, LIU Y X, et al. The characterization of porosity and its relationship with externally solidified crystal in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy *via* a laboratory CT technique[J]. Materials Letters, 2023, 335: 133807.
[33] MORETTI L, DE STEFANO L, RENDINA I. Quantitative analysis of capillary condensation in fractal-like porous silicon nanostructures [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(2): 024309.
[34] DONG X, HU Y, YUAN M, et al. A new fractal design of porous AlN/BN/SiOC composites with low-*k* and high thermal conductivity[J]. Fractals, 2019, 27(7): 1950124.
[35] XI Y, LI W, LEI D, et al. The pore size-dependent fractality of porous structure in cement paste: analysis, modeling and applications[J]. Fractals, 2023, 31(8): 2340170.
[36] ZHANG X, WANG C, HE K, et al. Transport performance of molten salt electrolyte in a fractal porous FeS_2 electrode: mesoscale modeling and experimental characterization [J]. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(12): 14363-14371.
[37] ZHU J, ZHANG R, ZHANG Y, et al. The fractal characteristics of pore size distribution in cement-based materials and its effect on gas permeability[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 17191.
[38] ZHAO Z, NI X, CAO Y, et al. Application of fractal theory to predict the coal permeability of multi-scale pores and fractures[J]. Energy Reports, 2021, 7: 10-18.
[39] NIAN D, FU Z. Extended self-similarity based multi-fractal detrended fluctuation analysis: a novel multi-fractal quantifying method[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019, 67: 568-576.
[40] ZHANG N, WANG S, XUN X, et al. Pore structure and fractal characteristics of coal-measure sedimentary rocks using nuclear magnetic resonance (NMR) and mercury intrusion porosimetry (MIP)[J]. Energies, 2023, 16(9): 3812.
[41] DUAN R, XU Z, DONG Y, et al. Characterization and classification of pore structures in deeply buried carbonate rocks based on mono- and multifractal methods[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 203: 108606.
[42] SU P, XIA Z, WANG P, et al. Fractal and multifractal analysis of pore size distribution in low permeability reservoirs based on mercury intrusion porosimetry[J]. Energies, 2019, 12(7): 1337.
[43] XI C, ZHANG S, XIONG G, et al. Two-dimensional multifractal cross-correlation analysis [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2017, 96: 59-69.
[44] KOVALENKO A N. Fractal characterization of nano-structured materials [J]. Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 2019, 10(1): 42-49.
[45] LI G, HAN C, ZHANG Z, et al. Multifractal analysis of the heterogeneity of nanopores in tight reservoirs based on boosting machine learning algorithms [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1200913.
[46] YANG M D, LENG X L, KO T J. CAD modeling method of the electrospun membrane under multifractal dimension optimization control[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2023, 33(6): 063129.
[47] CHEN Y, JIN Z, KANG W, et al. 3D printed bio-inspired self-similar carbon fiber reinforced composite sandwich structures for energy absorption [J]. Composites Science and Technology, 2024, 248: 110453.
[48] VICCICA M, GALATI M, CALIGNANO F, et al. Design, additive manufacturing, and characterisation of a three-dimensional cross-based fractal structure for shock absorption[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 181: 110106.
[49] LIU Y, SHU D W, LU H, et al. 3D printable spatial fractal structures undergoing auxetic elasticity [J]. Extreme Mechanics Letters, 2024, 66: 102112.
[50] FARINA I, GOODALL R, HERNÁNDEZ-NAVA E, et al. Design, microstructure and mechanical characterization of Ti6Al4V reinforcing elements for cement composites with fractal

architecture[J]. Materials & Design, 2019, 172: 107758.

[51] ZHANG Z, JIANG H, BEDNARCYK B A, et al. Greek key inspired fractal metamaterials with superior stretchability for tunable wave propagation[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(21): 2300981.

[52] 殷雅俊, 李颖, 杨帆, 等. 多重胞元和规则多重分形[J]. 应用数学和力学, 2010, 31(1): 51-60.
YIN Y J, LI Y, YANG F, et al. Multiple cell elements and regular multifractals[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(1): 51-60.

[53] PAVLENKOZ D V. Effect of porosity parameters on the strength of gas turbine compressor blades made of titanium alloys [J]. Strength of Materials, 2019, 51(6): 887-899.

[54] WANG X, CHEN C, WANG Y. Fractal analysis of porous alumina and its relationships with the pore structure and mechanical properties[J]. Fractal and Fractional, 2022, 6(8): 460.

[55] CHEN C, DING X, WANG Y, et al. Fractal dimension analysis of structure and bending strength of porous alumina prepared using starch and carbon fiber as pore-forming agents[J]. Fractal and Fractional, 2022, 6(10): 574.

[56] HAN X, WANG B, FENG J. Relationship between fractal feature and compressive strength of concrete based on MIP[J]. Construction and Building Materials, 2022, 322: 126504.

[57] DENG H, DUAN T, TIAN G, et al. Research on strength prediction model and microscopic analysis of mechanical characteristics of cemented tailings backfill under fractal theory[J]. Minerals, 2021, 11(8): 886.

[58] GUO J, XU Y, HU S, et al. Dam concrete quality evaluation and prediction model based on fractal characteristics of elastic-wave computed tomography[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 4224-4235.

[59] 姜文, 樊红星, 姚卫星, 等. 基于损伤分形维数的树脂基复合材料冲击后压缩强度预测方法[J]. 复合材料科学与工程, 2023(3): 11-17.
JIANG W, FAN H X, YAO W X, et al. Prediction method of compressive strength after impact for fiber reinforced plastic composite based on the fractal dimension of impact damage[J]. Composites Science and Engineering, 2023(3): 11-17.

[60] PÉREZ L, LASCANO S, AGUILAR C, et al. Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy[J]. Materials & Design, 2015, 83: 276-283.

[61] CASNEDI L, LICHERI R, BRUN M, et al. From nature geometry to material design: advanced fractal nature analysis for predicting experimental elastic properties [J]. Ceramics International, 2020, 46(15): 23947-23955.

[62] REYES C, BÉJAR L, CARRANZA J C, et al. DEM-FEM combination for modeling and simulation of fractal metallic foams [J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105054.

[63] CASAS B Y, CARRANZA J C, BÉJAR L, et al. Production of aluminum foams with hierarchical porosity by a combination of two different manufacturing methods[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 831: 154780.

[64] GE J, QI L, TIAN W, et al. Hierarchical evaluation of effective thermal conductivities of needled composites[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 192: 111077.

[65] HU Y, ZHANG M, QUAN B, et al. Polyethylene glycol infiltrated biomass-derived porous carbon phase change composites for efficient thermal energy storage[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 7(2): 68.

[66] LUO M, WANG C, ZHAO J, et al. Characteristics of effective thermal conductivity of porous materials considering thermal radiation: a pore-level analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122597.

[67] KAVIANY M. Principles of heat transfer in porous media[M]. New York: Springer, 1991.

[68] SHEN Y, XU P, QIU S, et al. A generalized thermal conductivity model for unsaturated porous media with fractal geometry[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 152: 119540.

[69] XIAO T, GUO J, YANG X, et al. On the modelling of heat and fluid transport in fibrous porous media: analytical fractal models for permeability and thermal conductivity[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 172: 107270.

[70] XU P, MENG J, WANG J, et al. Fractal pore-scale model for effective thermal conductivity of multiscale unsaturated porous media[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(20): 15626-15636.

[71] 王晟琪, 郑佳宜, 余延顺. 孔隙分布对分形泡沫金属基相变材料传热特性的影响[J]. 化工进展, 2018, 37(9): 3540-3546.
WANG S Q, ZHENG J Y, YU Y S. Influence of pore structure on the heat transfer characteristics of fractal metal foam filled with phase change material[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(9): 3540-3546.

[72] CHEN W, WANG Y, WANG D, et al. Predicting the effective thermal conductivity of porous building materials using improved Menger sponge fractal structure[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 184: 107985.

[73] YU C, HUANG Y, ZHANG C. Role of metal foam in solidification performance for a latent heat storage unit[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(3): 2110-2125.

[74] 刘爽爽, 齐素慈, 曹学文, 等. 基于微观结构分形表征的钼-氧化锆导电导热性能[J]. 有色金属工程, 2022, 12(11): 15-22.
LIU S S, QI S C, CAO X W, et al. Electrical and thermal conductivity for Mo-ZrO_2 cermet by fractal characterization of microstructure[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11): 15-22.

[75] SONG Y, ZHANG N, YUAN Y, et al. Prediction of the solid effective thermal conductivity of fatty acid/carbon material composite phase change materials based on fractal theory[J]. Energy, 2019, 170: 752-762.

[76] XU H, YAO F, ZHANG C. Numerical study on melting heat transfer in fractal metal foam [J]. Fractals, 2019, 27(6): 1950106.

[77] NAKANISHI Y, HARA Y, MIYAMOTO R, et al. Highly porous melamine-formaldehyde monoliths with controlled hierarchical porosity toward application as a metal scavenger[J]. Materials

Advances, 2021, 2(8): 2604-2608.
[78] HU R, CHEN Y, ZHANG C, et al. Porous monoliths from polyimide: synthesis, modifications and applications[J]. Progress in Materials Science, 2024, 144: 101284.
[79] YANG Y, LONG W, YANG J, et al. A coupled model for upscaling water flow in a shale matrix system from pore scale to representative elementary area scale[J]. ACS Omega, 2024, 9(5): 5215-5223.
[80] XIAO T, GUO J, LIU G, et al. An analytical fractal model for permeability in isotropic open-cell metal foam with surface roughness[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 126: 105473.
[81] DU P, ZHAO C, PENG P, et al. Fractal characterization of permeability prediction model in hydrate-bearing porous media[J]. Chemical Engineering Science, 2020, 218: 115576.
[82] CHENG Y, LUO X, HOU B, et al. Pore structure and permeability characterization of tight sandstone reservoirs: from a multiscale perspective[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(13): 9185-9196.
[83] WANG Z, QIN Y, SHEN J, et al. A novel permeability prediction model for coal based on dynamic transformation of pores in multiple scales[J]. Energy, 2022, 257: 124710.
[84] ZHANG Z, CAI Z. Permeability prediction of carbonate rocks based on digital image analysis and rock typing using random forest algorithm[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(14): 11271-11284.
[85] COUSINS T A, GHANBARIAN B, DAIGLE H. Three-dimensional lattice Boltzmann simulations of single-phase permeability in random fractal porous media with rough pore-solid interface[J]. Transport in Porous Media, 2018, 122(3): 527-546.

基金项目:国家自然科学基金项目(12272094);福建省自然科学基金项目(2024J01244)
收稿日期:2024-05-14;**录用日期**:2024-06-19
通讯作者:廖娟(1984—),女,教授,博士,研究方向为轻量化材料成形及性能表征,联系地址:福建省福州地区大学城学园路2号福州大学机械学院北506B(350116),E-mail:jliao@fzu.edu.cn

(本文责编:王 晶)