

Research Progress on Permeability of Porous Media

Jiannan Gong¹, Qili Wang^{1*}, Nana Yang², Mingquan Yu¹

¹School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu

²School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi

Email: *wqlcumt@126.com

Received: Sep. 6th, 2019; accepted: Sep. 22nd, 2019; published: Sep. 29th, 2019

Abstract

The permeability of porous media characterizes the difficulty of fluid flow in porous media. It has an important influence on the flow of fluid in a porous medium. This paper reviews the methods, models, results and applications of porous media permeability studies in recent years, especially the recent research hotspots, the application development of fractal theory in porous media permeability research. The results show that the permeability of porous media is determined by the combination of porosity, tortuosity, pore radius, fractal dimension, specific surface area and fluid properties. It is not a single-valued function of a parameter, but a composite function that interacts with many parameters. Fractal theory plays an important role in describing the permeability of porous media with irregular and fractal features.

Keywords

Porous Media, Permeability, Pore Structure, Fractal Theory

多孔介质渗透性能的研究进展

巩剑南¹, 王启立^{1*}, 杨娜娜², 于鸣泉¹

¹中国矿业大学化工学院, 江苏 徐州

²西安科技大学化工学院, 陕西 西安

Email: *wqlcumt@126.com

收稿日期: 2019年9月6日; 录用日期: 2019年9月22日; 发布日期: 2019年9月29日

摘 要

多孔介质的渗透性能表征了流体在多孔介质内流动的难易程度, 对流体在多孔介质内的流动过程具有重

*通讯作者。

要影响。本文回顾了近年来多孔介质渗透性能研究的方法、模型、成果和应用，尤其阐述了近年来的研究热点，分形理论在多孔介质渗透性能研究中的应用进展。研究表明，多孔介质的渗透性能由孔隙率、迂曲度、孔隙半径、分形维数、比表面积以及流体性质等共同决定，并不是某一参数的单值函数，而是由众多参数共同作用的复合函数。分形理论在描述不规则、具有分形特征的多孔介质渗透性能方面发挥了重要作用。

关键词

多孔介质，渗透性能，孔隙结构，分形理论

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着碳素行业的不断发展，多孔介质的应用也越来越广泛，发挥的作用也越来越突出，多孔介质渗透性能方面的理论也有了更加深层次的研究。此外，社会工业的需要以及科学技术的进一步发展也要求着多孔介质渗透性能方面的理论不断完善和拓展。为了计算和模拟的简便，在日常的应用和模拟计算中，我们常把多孔介质看做一个连续的介质，借助经验公式，进一步确定各个函数关系中的物性参数，这必然会得出较大误差的物性参数。一直以来国内外许多学者投入了大量人力和物力研究多孔介质渗透性能参数，多孔介质渗透性能方面的研究，不但有着非常重要的实际工程应用价值，而且有着非常重要的理论研究价值。本文主要通过对多孔介质渗透性能的实验直接测量法、数显技术与无损技术、数值分析等的研究方法、格子模型、孔隙网络模型以及分形分析解模型等渗透性能研究模型以及分形理论在多孔介质中的应用等几个方面对多孔介质渗透性能的研究进展和成果进行综述。

2. 多孔介质渗透性能的研究方法

多孔介质的结构异常的复杂，具有排列随机、无序的特性，例如孔隙的大小与分布，这导致渗透性能的分形研究与渗透率研究速度非常慢，至今未能寻找到符合实际的方法将其准确表述出来。目前，多孔介质渗透率的研究方法有很多，但本质都是以达西定律为基础，即根据出口一侧的渗透量及所加水力梯度来换算得到渗透系数。现主要运用实验法[1]-[6]和数值分析[7]-[12]这两大类常规研究方法估算多孔介质渗透率。其中实验法包括实验直接测量法与借助数显技术与三维重构等技术来计算渗透率等参数。数值分析法主要包含数值分析与半分析法等。

2.1. 实验直接测量

多孔介质渗透率通常包含 2 种：一种是饱和多孔介质另一种是未饱和多孔介质的渗透率，目前最直接的实验测量的方法分为 2 种：一种是单向流动渗透率测量另一种是径向流动渗透率测量。而无论采取何种渗透率测量方式多孔介质的渗透率总是在误差范围内保持不变，这也从另一个层面说明渗透率和测量方法无关，而只和多孔介质本身固有的微观结构有关。

依据径向流动测量的方法，可得出径向流动达西方程：

$$v_r = -\frac{K}{u} \frac{dP}{dr} \quad (1)$$

式中, P 、 r 和 v_r 分别表示为压力、圆心半径和流动速度。 v_r 是半径 r 的函数。

假设流量连续, 对式(1)积分, 则径向流动测量的方法得到的渗透率关系式如式(2), 该式较好的说明了多孔介质的渗透率还与流体的性质有关。

$$K = \frac{\mu Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi h \Delta P} \quad (2)$$

式中, r_1 、 r_2 、 h 、 ΔP 、 Q 、 μ 、 K 分别表示为: 样品内径、样品外径、样品厚度、内外径压差、流量、动力粘度、渗透率。

实验直接测量的结果一般表示为包含有一个或者多个经验常数的函数表达式。其中经验常数也叫做拟合常数, 通常无实际的物理意义, 并且由实验的精度和人为确定, 缺乏准确性和一致性。比如雷树业 [13] 等在研究颗粒床层的渗流规律时, 在试验中得到了颗粒床层渗透率的经验表达式如式(3), 该式含有三个无实际意义物理参数(也叫经验参数), 且该只适用于 $d = 0.1 \sim 0.45 \text{ mm}$, 具有一定的局限性。

$$K = 1.72 \times 10^4 d^{1.465} \varnothing^{4.69} \quad (3)$$

式中, d 和 \varnothing 分别表示颗粒直径以及孔隙度。该式中 3 经验常数依次为: 1.72×10^4 、1.465、4.69。渗透率与颗粒直径的 1.465 次方成正比, 与孔隙率的 4.69 次方成正比, 说明渗透率由颗粒直径与孔隙率共同决定。

Adler 和 Thovert [14] 在研究多孔介质玻璃粒子时, 借助数值模拟的方法, 总结了实际玻璃粒子的经验关系式:

$$K = 0.117 r_e^2 \varnothing^{4.57} \quad (4)$$

式中, r_e 为玻璃粒子等效半径。该式仅适用于玻璃粒子且 $0.4 < \varnothing < 0.79$ 。该式也包含 3 个经验常数分别为 0.117、2 与 4.57。这些经验常数蕴含的实际物理意义是目前研究的难题还有待进学者们更进一步研究。

此外, 伴随着工业科学技术的日益完善, 数显技术与无损检测技术也日趋成熟, 利用技术手段较为真实的测量多孔介质渗透率以研究渗透性能的仪器有: 核磁共振成像仪(MRI)和 X 射线层析成像仪(X-CT)等[15]-[26]。MRI 技术研究多孔介质渗透性能的性能要优于 X-CT。它是借助傅里叶变换重构等方法再利用多孔介质材料的弛豫时间与核磁共振信息不同, 进而在计算机上成像。MRI 技术可测量材料的孔隙率、孔径和饱和度分布等, 还可检测孔隙、流体与材料骨架之间的相互作用。

渗透率-孔隙率的关系也可用经典的 KC 方程[27]来表示:

$$K = \frac{\varnothing^3}{c(1-\varnothing)^2 S^2} \quad (5)$$

式中, c 和 S 分别代表 Kozeny 常数以及比表面积。该式较好的说明了渗透率由孔隙结构参数共同作用且渗透率的大小不是随着某个结构参数简单的递增或递减变化。

通常我们规定迂曲度 τ 为流体流经实际长比直线长, 假设考虑弯曲毛细管迂曲度 τ , 则渗透率-孔隙率的 KC 方程可进一步表示为:

$$K = \frac{\varnothing^3}{k(1-\varnothing)^2 S^2} = \frac{\varnothing^3}{36k(1-\varnothing)^2} d^2 \quad (6)$$

式中, $k = c\tau^2$ 亦被叫做 Kozeny 常数, d 为球形颗粒的半径。Kaviany [28] 认为假如 $\tau = 1.414$ 时, c 的值为 2.5, 即 KC 常数大约为 5。Carman 依据实验数据得出: 当 $k = 5$ 时, KC 方程得出的渗透率与实验测得结果具有很好的一致性。但也具有局限性, 不同的多孔介质有不同的 KC 方程。

2.2. 数值分析及半分析方法

借助数值模拟技术来计算模拟多孔材料的渗透率，有 LBM 法、LG 法、有限元法等，在模拟的过程中，研究者们通常假定一个和要模拟的多孔材料孔隙结构参数相近的理想模型，再选取一个符合实际情况的算法，再借以经验公式、相关曲线图表参数在模拟软件中显示数值模拟结果，模型与符合实际的算法的选取都是该过程中的难点，模型与算法的选取差异，结果也大不相同，并且该结果只适用于该多孔材料且无法将模拟结果和多孔介质的渗透率、孔隙度等结构参数结合。

Adler 和 Mourzenko [29] [30]两人在研究多孔介质宏观输运特性这个问题时，利用数值上求解合适边界条件的方程问题得到了多孔材料的宏观运输特性，传导性的数值结果用因子 F (fraction factor)表示为 Archier's 定律三维表达式为式(7)。该式研究探索了多孔介质的宏观传质流动等问题，对多孔介质宏观输运具有一定的推动意义。

$$F = \alpha \varnothing^{-m} \quad (7)$$

式中， $m=1.27$ 、 $\alpha=1.64$ 。相对于不同的多孔介质材料 m 与 α 的值各不相同，比如熔融颗粒在 $0.02 \leq \varnothing \leq 0.20$ 时， $m=2.3$ ， $\alpha=3.3$ ；对于砂石，当 $0.05 \leq \varnothing \leq 0.30$ 时， $m=1.64$ ， $\alpha=0.80$ 。

3. 多孔介质渗透性能的研究模型

在油气开采领域，储集层渗透率对储集层评价和开发有着重要影响[31]。采用解析法[32]、实验法[33] [34] [35]和模拟法，学者们构建了许多种渗透率与孔隙结构参数的函数关系式，如式(8)。该式得出多孔介质渗透率主要与孔隙度、孔径大小和分形维数等有关，多孔介质的渗透性能不是某参数的单值函数而是一个较为复杂的复合函数，它由孔隙分形维数、迂曲度、孔隙半径等共同决定。

$$K_e = 2^{D_T-2} D_f^{n-1} \frac{n^2 \varnothing L^{1-D_T}}{(1+3n)D_T} \left(\frac{n}{D_T - nD_f} \right)^{n-1} \frac{(2 - D_f r_{\max}^{1+D_T})}{(D_T - nD_f + 3n)(1-\varnothing)} \left[1 - \left(\frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \right)^{(D_T/n) - D_f} \right]^{n-1} \quad (8)$$

式中， K_e 、 D_T 、 D_f 、 n 、 r 、 τ 、 λ_{\max} 依次分别为等效渗透率、迂曲度分形维数、孔隙面积分形维数、幂律指数、孔隙半径、迂曲度、最大孔隙直径。

现有渗透率模型存在较大差异，且只适用于各向同性、相对均质的多孔介质。然而这些参数在不同程度影响着物理规律的变化。因而，怎样构建适合实际真实情况的多孔介质模型，是目前研究的一个难点。目前只能认真分析这些因素的决定作用，才能构建出符合实际问题的真实模型。

如今发展应用于计算机模拟孔隙层次微观渗流较好的 2 种模型为：格子模型[36]和孔隙网络模型[37] [38]。其中网络模型因为应用广泛，研究的学者也更多。这 2 种模型在石油化工、水文工程和渗流力学等方面得到了较好的应用。

除过格子模型与孔隙网络模型还有理想模型、统计模型、图像重构模型、分形分析解模型等等，理想模型适用于前期的多孔介质的探究，这个模型与实际的真实情况不太相符，误差较大；统计模型具有与实际的真实孔隙有非常好的自相似性；图像重构模型为最接近真实孔隙结构的一种模型，它的优点是无损、精度高，缺点是价格昂贵；本节重点阐述分形分析解模型的使用。分形分析解渗透模型由于无经验常数，5 个参数均为有实际物理意义的参数，是目前较为被大多数学者承认的模型，应用较多，它的渗透率通用关系式如式(9)：

$$K = \frac{\pi}{128} \frac{L_0^{1-D_T}}{A} \frac{D_f}{3+D_T-D_f} \lambda_{\max}^{3+D_T} \quad (9)$$

式中， L_0 为分形孔隙或颗粒正方形单元的边长； $A = L_0^2$ ；渗透率 K 是多孔介质分形维数(D_T 和 D_f)和材料结构的函数； λ_{\max} 为最大孔隙直径。

由于多孔材料的 L_0 和 A 在实际中比较难计算, 因此我们可简化式(9)得到式(10),

$$K = \frac{(\pi D_f)^{(1-D_f)/2} [4(2-D_f)]^{(1+D_f)/2}}{128(3+D_f-D_f)} \left(\frac{\varnothing}{1-\varnothing} \right)^{(1+D_f)/2} \lambda_{\max}^2 \quad (10)$$

从式(10)中可得出多孔介质渗透率仅是孔隙率、分形维数及最大孔隙半径的函数, 这三个参数均匀实际的物理意义, 且较好的解决了式(9)中 L_0 和 A 难计算的问题, 可适用于大多数场合。

4. 分形理论在多孔介质渗透性能中的应用现状

Mandelbrot [39]在 20 世纪 70 年代提出了分形的思想, 随之在 20 世纪 80 年代 Mandelbrot 又创立了分形几何理论, 大量研究显示[39] [40] [41] [42]不规则复杂的物体或者人工合成的材料就具有分形特征, 因此分形几何理论被在能源资源与环境、油气藏地热、地下水利用、材料工程等诸多领域广泛使用, 而这些领域都与多孔材料的渗透和微结构相关。因多孔材料微结构较为复杂, 它的孔隙与材料形貌、孔径大小与孔隙分布等都呈现不规则性和分形的特点, 因而借助传统的理论来研究多孔介质渗透性能比较麻烦且效果不是很符合实际情况。然而, 分形几何给学者研究和解决复杂科学问题提供了新的途径, 因而分形理论在国内外研究多孔介质渗透性能方面受到了很好的重视, 并取得了巨大的研究进展。

Adler [43]在 1980 年就开始对分形物体的运输机理采用几何逾渗模型进行研究, 后来他分析了多孔介质中的渗流运输特性, 研究了孔隙度与分形参数等和渗透率的定量关系式, 得出了渗透率如式(11), 这为今后的多孔介质渗流运输的研究提供了理论层面的参考。

$$K = K(\varnothing, D_f, \dots) \quad (11)$$

Chang 和 Yortsos 是最开始提出将分形理论与多孔介质渗透率结合的学者, 为研究裂隙渗流, 他们提出裂隙介质的渗透率模型如式(12):

$$K = (aV_s/G)mr^{d_f-d_E-\theta} \quad (12)$$

对于一些多孔纤维织物, 如普通纤维织物, 双向纤维织物等, Yu 等[44]通过分形解析的方法得到了渗透率分析解模型, 如图 1 所示。该模型很好的与实验结果相拟合, 验证了此分形解析的方法适合这四类多孔介质。

在我国郁伯铭、陈永平、施明恒等学者为分形理论在多孔介质上的应用做出了重要的阐述[45] [46]。陈永平与施明恒为研究三相渗透率模型, 以土壤作做为试验载体, 利用分形理论对 Taylor 公式进行了改善, 提出了多孔介质渗透率的表达式, 并对提出的多孔介质渗透率表达式进行了检验, 得到土壤渗透率的分形模型如式(13), 有效填充与推动了对三相分形多孔介质渗透性能方面的研究。

$$K = Bab(F/c)^{2/d_s} r^{-2(d_m-d_s)/d_s} \frac{\delta^{2+b} [1-g(1-cX^{D_f-1})^{3/2}]^2}{(2+b) [g(1-cX^{D_f-1})^{3/2}]^2} \quad (13)$$

式中, $X, g, a, b, c, \delta, B, d_s, d_m, F, r$ 分别代表尺度、几何因子、比例常数、颗粒粒径分布分形维度数、拟合常数、最大颗粒直径、比例常数、谱维数、孔隙质量分形维数、比例因子、单元边长。

5. 总结

1) 现有渗透率模型中大都含有无实际意义的参数, 或是该渗透率模型只定性而没定量分析多孔介质渗透率与孔隙结构参数之间的函数关系, 亦或是该渗透率模型只符合有序规则多孔材料, 不符合无序混

乱的多孔材料。将分形理论和方法引入渗透率模型研究中将有助于解决传统理论不能解决的问题，并且有助于更深层次理解渗透率模型。

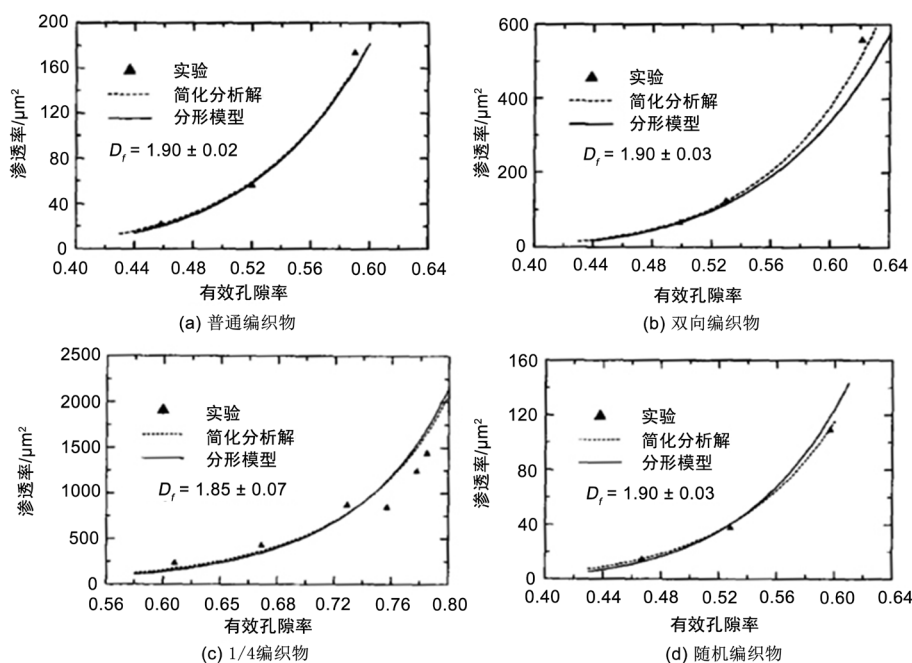


Figure 1. Comparison of experimental measurements, traditional analytical solutions, and fractal models [47]

图 1. 实验测量、传统分析解以及分形模型比较[47]

2) 多孔材料内部看不见摸不着，实际的多孔介质孔隙结构不规则且比较复杂，模拟实验或模拟的过程中采用各种假设得到的渗透率公式也各不相同，并且采用传统的模型研究多孔介质的渗透性能将会与实际相比误差较大，因此将多孔介质渗透率的研究方法与三维重构、3D 打印等技术的结合将是今后的一个热门。

3) 对于两相多孔介质，目前已获得渗透率分形分析解模型，并把分形研究从理论应用转变到实际应用层面，这有助于多孔介质渗透性能的进一步研究。

4) 三相多孔介质的渗透率，主要采用实验与数值模拟的方法研究，而迄今为止未见到采用传统的方法理论得到分析解以及采用分形分析解模型的相关报道，三相多孔介质渗透率的分形分析解将是今后研究渗透的一个方向。

基金项目

中央高校基本科研业务费专项资金资助(2019GF02)。

参考文献

- [1] Sasaki, A., Aiba, S. and Fukuda, H. (1987) A Study on the Thermophysical Properties of a Soil. *Journal of Heat Transfer*, **109**, 232-237. <https://doi.org/10.1115/1.3248048>
- [2] Jeong, N. (2010) Advanced Study about the Permeability for Micro-Porous Structures Using the Lattice Boltzmann Method. *Transport in Porous Media*, **83**, 271-288. <https://doi.org/10.1007/s11242-009-9438-6>
- [3] 何映颀. 纳米孔隙对页岩气吸附扩散的分子模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [4] 胡冉, 陈益峰, 万嘉敏, 等. 超临界 CO₂-水两相流与 CO₂ 毛细捕获: 微观孔隙模型实验与数值模拟研究[J]. 力学

- 学报, 2017, 49(3):638-648.
- [5] Lee, S.L. and Yang, J.H. (1997) Modeling of Darcy-Forchheimer Drag for Fluid Flow across a Bank of Circular Cylinders. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40**, 3149-3155. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(96\)00347-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(96)00347-X)
- [6] Koponen, A., Kataja, M. and Timonen, J. (1997) Permeability and Effective Porosity of Porous Media. *Physical Review E*, **56**, 3319-3325. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.56.3319>
- [7] 王启立. 石墨多孔介质成孔逾渗机理及渗透率研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [8] Levec, J., Sáez, A.E. and Carbonell, R.G. (2010) The Hydrodynamics of Trickle Flow in Packed Beds. Part II: Experimental Observations. *AIChE Journal*, **32**, 369-380. <https://doi.org/10.1002/aic.690320303>
- [9] Wang, T.J., Wu, C.H. and Lee, L.J. (2010) In-Plane Permeability Measurement and Analysis in Liquid Composite Molding. *Polymer Composites*, **15**, 278-288. <https://doi.org/10.1002/pc.750150406>
- [10] Chen, Z.Q., Cheng, P. and Zhao, T.S. (2000) An Experimental Study of Two Phase Flow and Boiling Heat Transfer in Bi-Dispersed Porous Channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **27**, 293-302. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(00\)00110-X](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(00)00110-X)
- [11] Lee, Q.F. (2002) Fluid Flow through Packed Columns of Cooked Wood Chips.
- [12] Mcgregor, R. (2010) The Effect of Rate of Flow on Rate of Dyeing II—The Mechanism of Fluid Flow through Textiles and its Significance in Dyeing. *Coloration Technology*, **81**, 429-438. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1965.tb02615.x>
- [13] 雷树业. 颗粒床孔隙率与渗透率的关系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(5): 76-79.
- [14] Adler, P.M. and Thovert, J.F. (1998) Real Porous Media: Local Geometry and Macroscopic Properties. *Applied Mechanics Reviews*, **51**, 537-585. <https://doi.org/10.1115/1.3099022>
- [15] Al-Raoush, R. and Alshibli, K.A. (2006) Distribution of Local Void Ratio in Porous Media Systems from 3D X-Ray Microtomography Images. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **361**, 441-456. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.05.043>
- [16] Mostaghimi, P., Blunt, M.J. and Bijeljic, B. (2013) Computations of Absolute Permeability on Micro-CT Images. *Mathematical Geosciences*, **45**, 103-125. <https://doi.org/10.1007/s11004-012-9431-4>
- [17] Raeini, A.Q., Blunt, M.J. and Bijeljic, B. (2014) Direct Simulations of Two-Phase Flow on Micro-CT Images of Porous Media and Upscaling of Pore-Scale Forces. *Advances in Water Resources*, **74**, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.08.012>
- [18] 冯周, 刘瑞林, 应海玲, 等. 岩心 CT 扫描图像分割计算缝洞孔隙度与测井资料处理结果对比研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(4): 100-104.
- [19] 宋晓夏, 唐跃刚, 李伟, 等. 基于显微 CT 的构造煤渗流孔精细表征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 435-440.
- [20] 谢淑云, 何治亮, 钱一雄, 等. 基于岩石 CT 图像的碳酸盐岩三维孔隙组构的多重分形特征研究[J]. 地质学刊, 2015, 39(1): 46-54.
- [21] 姚艳斌, 刘大猛, 蔡益栋, 等. 基于 NMR 和 X-CT 的煤的孔裂隙精细定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(11): 1598-1607.
- [22] 王宇, 李晓, 阙介民, 等. 基于 CT 图像灰度水平的孔隙率计算及应用[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 357-365.
- [23] 李建胜, 王东, 康天合. 基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构算法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1703-1708.
- [24] 吕洪志, 陆云龙, 崔云江, 等. 改进的孔隙模型评价流体性质与裂缝孔隙度[J]. 应用声学, 2016, 35(4): 351-356.
- [25] Hirono, T., Takahashi, M. and Nakashima, S. (2003) *In Situ* Visualization of Fluid Flow Image within Deformed Rock by X-Ray CT. *Engineering Geology*, **70**, 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00074-7)
- [26] Pierret, A., Capowiez, Y., Belzunces, L. and Moran, C.J. (2002) 3D Reconstruction and Quantification of Macropores Using X-Ray Computed Tomography and Image Analysis. *Geoderma*, **106**, 247-271. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00127-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00127-6)
- [27] Carman, P.C. (1939) Permeability of Saturated Sands, Soils and Clays. *Journal of Agricultural Science*, **29**, 262-273. <https://doi.org/10.1017/S0021859600051789>
- [28] Kaviani, M. (1995) Principles of Heat Transfer in Porous Media. Springer Press, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4254-3>
- [29] Mourzenko, V.V., Thovert, J.F. and Adler, P.M. (2018) Conductivity and Transmissivity of a Single Fracture. *Transport in Porous Media*, **123**, 235-256. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1037-y>
- [30] Mourzenko, V.V., Thovert, J.F. and Adler, P.M. (1999) Percolation and Conductivity of Self-Affine Fractures. *Physi-*

- cal Review E*, **59**, 4265-4284. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.59.4265>
- [31] Zheng, B. and Ju-Hua, L.I. (2015) A New Fractal Permeability Model for Porous Media Based on Kozeny-Carman Equation. *Journal of Natural Gas Geoscience*, **26**, 193-198.
- [32] Carman, P.C. (1937) Fluid Flow through Granular Beds. *Chemical Engineering Research and Design*, **75**, S32-S48. [https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2)
- [33] Rumpf, H. and Gupte, A.R. (1975) The Influence of Porosity and Grain Size Distribution on the permeability Equation of Porous Flow. *Nasa Sti/Recon Technical Report*, **75**, 367-375.
- [34] Pape, H., Clauser, C. and Iffland, J. (2000) Variation of Permeability with Porosity in Sandstone Diagenesis Interpreted with a Fractal Pore Space Model. *Pure Applied Geophysics*, **157**, 603-619. <https://doi.org/10.1007/PL00001110>
- [35] Rodriguez, E., Giacomelli, F. and Vazquez, A. (2004) Permeability-Porosity Relationship in RTM for Different Fiberglass and Natural Reinforcements. *Journal of Composite Materials*, **38**, 259-268. <https://doi.org/10.1177/0021998304039269>
- [36] Succi, S., Benzi, R., Cali, A. and Vergassola, M. (1992) The Lattice Boltzmann Equation. *Physics Reports*, **222**, 187-203.
- [37] Koplik, J., Redner, S. and Wilkinson, D. (1988) Transport and Dispersion in Random Networks with Percolation Disorder. *Physical Review A*, **37**, 2619-2636. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.37.2619>
- [38] Blunt, M. and King, P. (1991) Relative Permeabilities from Two- and Three-Dimensional Pore-Scale Network Modeling. *Transport in Porous Media*, **6**, 407-433. <https://doi.org/10.1007/BF00136349>
- [39] Mandelbrot, B.B. (1982) *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman Press, San Francisco, CA.
- [40] Perfect, E., Mclaughlin, N.B., Kay, B.D. and Topp, G.C. (1996) An Improved Fractal Equation for the Soil Water Retention Curve. *Water Resources Research*, **32**, 281-287. <https://doi.org/10.1029/95WR02970>
- [41] Hunt, A.G. (2004) Percolative Transport in Fractal Porous Media. *Chaos, Solitons & Fractals*, **19**, 309-325. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00044-4](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00044-4)
- [42] Adler, P.M. (1996) Transports in Fractal Porous Media. *Journal of Hydrology*, **187**, 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03096-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03096-X)
- [43] Adler, P.M. (1985) Transport Processes in Fractals—I. Conductivity and Permeability of a Leibniz Packing in the Lubrication Limit. *International Journal of Multiphase Flow*, **11**, 91-108. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(85\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(85)90007-2)
- [44] Yu, B. and Lee, L.J. (2000) A Simplified in-Plane Permeability Model for Textile Fabrics. *Polymer Composites*, **21**, 660-685. <https://doi.org/10.1002/pc.10221>
- [45] Pitchumani, R. and Ramakrishnan, B. (1999) A Fractal Geometry Model for Evaluating Permeabilities of Porous Preforms Used in Liquid Composite Molding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **42**, 2219-2232. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00261-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00261-0)
- [46] 陈永平, 施明恒. 基于分形理论的多孔介质渗透率的研究[J]. 清华大学学报, 2000, 40(12): 94-97.
- [47] 郁伯铭, 邹明清. 用分形—蒙特卡罗方法预测多孔介质的渗透率[J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34(8): 286-291.