

基于激光刻蚀技术的孔隙介质渗透试验研究

张 卓, 张 准, 王 哲, 郭会荣, 张 菊, 吕万军

Experimental study on porous media penetration based on laser etching technology

ZHANG Zhuo, ZHANG Zhun, WANG Zhe, GUO Huirong, ZHANG Ju, and LYU Wanjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式

A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media

张东, 刘晓丽, 王恩志 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 35–42

多孔介质界面对重非水相液体迁移过程影响的图像法研究

Investigation on the influence of porous media interface on DNAPL migration based on image methods

刘汉乐, 郝胜瑶, 马建初 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 169–174

井内嵌入同轴多孔与固体圆柱地下水渗流流型分析

Flow pattern analysis around a solid cylinder with both porous and water rings in porous media

朱琳, 雷海燕, 马非, 戴传山 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 25–31

基于四参数随机生长法重构土体的格子玻尔兹曼微观渗流研究

Lattice Boltzmann meso-seepage research of reconstructed soil based on the quartet structure generation set

蔡沛辰, 阙云, 蒋振梁, 杨鹏飞 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 33–42

荒漠-湿地生态系统区盐渍土特征及空间变异性

Characteristics and spatial variability of saline soil in desert-wet ecosystem area, Gansu Province, China

魏玉涛, 刘德玉, 张伟, 喻生波, 吴耀坤 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 183–190

基于增温加热技术的淤泥真空预压现场试验研究

A field experimental study of sludge vacuum preloading based on the temperature increasing heating technology

程瑾, 曹凯, 吴玉涛, 金亚伟, 张勇, 张珍, 高天宇, 王小东 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 125–134



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311012

张卓, 张准, 王哲, 等. 基于激光刻蚀技术的孔隙介质渗透试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 14-21.
ZHANG Zhuo, ZHANG Zhun, WANG Zhe, et al. Experimental study on porous media penetration based on laser etching technology [J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 14-21.

基于激光刻蚀技术的孔隙介质渗透试验研究

张卓¹, 张准¹, 王哲¹, 郭会荣², 张菊², 吕万军¹

(1. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)
环境学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 渗透率在水资源管理、油气勘探与开采和地质灾害评估中具有重要作用。而目前渗透率研究多通过间接的方式探究渗透率的影响因素, 缺乏直观手段刻画多孔介质与渗透率的关系, 渗透率与多孔介质内部孔隙结构的关系尚不清晰。自主研发了一个可控孔隙空间属性的试验系统, 探究多孔介质渗透率与孔隙度、孔隙的水平或垂直分布、孔隙排列的规则性和椭圆孔隙长短轴比例的关系。结果表明, 多孔介质渗透率与孔隙度呈正相关关系, 且圆形颗粒多孔介质基本满足 Kozeny-Carman 方程; 而不同颗粒圆度及排列方式会造成显著的渗透率各向异性, 由于多孔介质颗粒横向排列导致流体经过更长的流动路径, 与流动方向一致的横向排列渗透率明显高于纵向排列的渗透率; 不规则排列的多孔介质渗透率要大于规则排列的多孔介质渗透率, 这是因为颗粒的不规则排列会导致在多孔介质中出现一些大的孔隙, 这些孔隙可以提供更大的通道, 促进流体的渗透, 另一种原因是不规则排列会增加多孔介质内的流动路径, 使得流体能使用更多的路径通过多孔介质; 长短轴长度之比为 1 的多孔介质渗透率最大。研究结果可为多孔介质渗透率演化及其孔隙空间属性关联性研究提供基础认识。

关键词: 多孔介质; 渗透率; 孔隙结构; Kozeny-Carman 方程; 变异性

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0014-08

Experimental study on porous media penetration based on laser etching technology

ZHANG Zhuo¹, ZHANG Zhun¹, WANG Zhe¹, GUO Huirong², ZHANG Ju², LYU Wanjun¹

(1. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Permeability plays a pivotal role in water resources management, oil and gas exploration and production, as well as geological hazard assessment. Previous studies primarily explore the influencing factors of permeability through indirect methods, and lacks direct means to describe the relationship between porous media and permeability, and the relationship between permeability and the internal pore structure of porous media is still unclear. This study developed an experimental system featuring controllable pore space properties to investigate the relationship between permeability in porous media and factors including porosity, the horizontal and vertical distribution of pores, the regularity of particle arrangements, and the aspect ratio of elliptical pores. The

收稿日期: 2023-11-08; 修订日期: 2024-01-23

投稿网址: www.swdzcgc.com

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(92058208); 国家自然科学基金青年基金项目(42306240)

第一作者: 张卓(2000—), 男, 硕士研究生, 从事天然气水合物模拟实验研究。E-mail: zzhuo@cug.edu.cn

通讯作者: 吕万军(1972—), 男, 博士, 教授, 从事天然气水合物实验与测试研究。E-mail: luwanjuncug@126.com

experimental results demonstrate a positive correlation between permeability and porosity in porous media. Circular porous media generally adhere to the Kozeny-Carman equation, while variations in particle circularities and arrangements lead to pronounced permeability anisotropy. Due to the transverse arrangement of porous media leading to the fluid with a long flow path, permeability in horizontally arranged pores aligned with the flow direction is significantly higher than that in vertically arranged pores. Irregularly arranged porous media exhibit higher permeability compared to regularly arranged porous media, because 1) the irregular arrangement of the particles can lead to some large pores in the porous media that can provide large channels to facilitate the penetration of the fluid; 2) the irregular arrangement increases the flow path within the porous medium, leading to more fluid paths in the porous medium. Porous media with an aspect ratio of 1 for the long and short axes exhibits the highest permeability. The findings of this study provide essential insights into the evolution of penetration rates in porous media and their relationship with pore space properties.

Keywords: porous media; permeability; pore structure; Kozeny-Carman equation; variability

多孔介质渗透率对于水资源管理、石油和天然气勘探开采、地质灾害评估以及环境科学等领域具有显著影响^[1-3]。了解和预测渗透率有助于优化资源利用、提高生产效率、减轻自然灾害风险、保护环境,并在工程领域中确保安全和可持续发展^[4-5]。

孔隙结构是影响多孔介质渗透率演化的内在因素,探究渗透率演化及其与孔隙结构关联性一直是渗透率研究领域的热点话题之一。国内外众多学者利用理论测试、实验研究和数值模拟探究了多孔介质渗透率与孔隙度、孔隙形状、孔隙尺寸和孔隙连通性等参数之间的关系。Joseph 等^[6]制作了 4 种不同类型的片状多孔介质,每种片状多孔介质的孔隙率通过图像分析技术确定,绝对渗透率通过达西定律估计,结果发现随着片状多孔介质中孔隙和孔喉数量的增加,孔隙率如预期增加,渗透率增加了约一个数量级。王世芳等^[7]基于分形理论与技术研究了牛顿流体在多孔介质中的球向渗流问题,分析了多孔介质的微结构参数对球向渗透率的影响,结果表明球向渗透率随孔隙度的增加而增加。多孔介质的内部结构如孔径、孔隙形状等对多孔介质也有很大的影响。在孔隙度相同时,孔径成为影响多孔介质的因素之一。宋永臣等^[8]发现多孔介质的渗透率与孔隙度之间不存在线性关系,在相同孔隙度的情况下孔径越大多孔介质的渗透率越大。孔隙形状对多孔介质渗透率也有较大影响。谢颖颖^[9]利用多松弛格子 Boltzmann 模型研究孔隙尺度下非牛顿流体流动,且将微观结构理想化为圆形、方形和三角形组成的 3 种多孔介质形状,结果发现相同孔隙率下,多孔介质渗透率受到其微观结构排列的影响,其中方形排列相比圆形排列下的渗透率低,三角形排列最低。Torskaya 等^[10]在新的沉积算法的基础

上构建了 4 组晶粒堆,分别是通过显微 CT 扫描识别的精确角晶粒形状、拟合到角晶粒上的椭球体、体积比等于原始角晶粒的球体、表面积比等于原始角晶粒的球体,结果表明,绝对渗透率受颗粒形状变化影响很大,且其中的球体形状晶粒堆计算渗透率与基于 Kozeny-Carman 的预测渗透率非常吻合^[11]。此外,各向异性也是多孔介质渗透率大小的影响因素之一。李滔等^[12]发现孔隙尺度各向异性影响多孔介质中孔隙长轴的取向性及流体流动路径,沿各向异性因子大的方向迂曲度小、流体流动消耗能量小,迂曲度与各向异性的强相关是各向异性影响渗透率的根本原因。GAO 等^[13]利用使用晶格玻尔兹曼法和 X 射线计算机断层扫描技术,仿真了 2 种多孔介质并计算其渗透率,模拟结果表明,对于气体扩散层其在 1 个方向上的渗透率可能比其他 2 个方向的渗透率高 1 个数量级。Clavaud 等^[14]通过 X 射线层析成像监测测定了砂岩、石灰岩和火山岩的渗透率,结果表明对于砂岩,渗透率各向异性与层理相关性密切。除这些因素以外,孔喉也与渗透率密切相关。Lala 等^[15]建立了一种储集层岩石孔喉半径与渗透率关系的模型,发现孔喉尺寸分布与渗透率有关,孔喉半径为 35 μm 时与渗透率相关最密切。整体而言,目前渗透率研究多通过间接的方式探究渗透率的影响因素,缺乏直观手段刻画多孔介质与渗透率的关系,渗透率与多孔介质内部孔隙结构的关系尚不清晰。

因此,本文自主设计了一个可控空间属性的多孔介质试验系统,探究了不同孔隙度、颗粒大小与排列方式对渗透率的影响关系,以期多孔介质渗透率演化及其应用提供基础数据与有效参考。

1 试验方法

1.1 试验装置

试验系统整体如图 1 所示。试验系统包括样品、光源、反应釜、热电偶、显微镜摄像头、注射泵、压力传感器、阀门等。样品模型如图 1(b)所示,样品由 2 片 $49\text{ mm} \times 24\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的石英玻璃片组成,其中一片由激光镌刻机刻蚀成所需多孔介质模型,另一片在进出水口处设置半径 1 mm ,深度 2 mm 的圆柱形孔道充当水道,使用箱式炉烧制黏合石英玻璃片,样品面朝内。刻蚀的多孔介质模型长 42 mm ,宽 12.7 mm ,深 0.75 mm ,模拟多孔介质模型以及对应反应釜进出水口距离。反应釜由反应釜腔体、上法兰盖、下法兰盖、上压盖以及下底座组成。反应釜设置左右 2 个连接口,下底座上设置样品固定凹槽,样品通过螺栓固

定在上压盖与下底座之间,在样品的进出水端对应的上压盖处设置橡胶垫片防止漏液。上压盖以及上下法兰盖中间部分镂空,用于观察多孔介质饱水情况和液体通过状况。热电偶温度范围为 $-20 \sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$,设置在反应釜顶端。显微镜摄像头由天诺翔公司生产,用于观察多孔介质饱水情况。注射泵采用融合 4000-X 注射泵。注射器泵是一种小型正排量泵,用于逐渐转移精确体积的流体。该注射泵输出流量范围为 $0.000\text{ 1} \sim 170.5\text{ mL/min}$,注射泵精度达到 3.5% ,工作温度范围为 $4 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。压力传感器设置在反应釜进出口处并连接电脑,用于监测试验期间管线内压力。压力传感器为 omega 公司 PX409-USBH 型压力传感器,量程为 $0 \sim 1.72\text{ MPa}$ 。

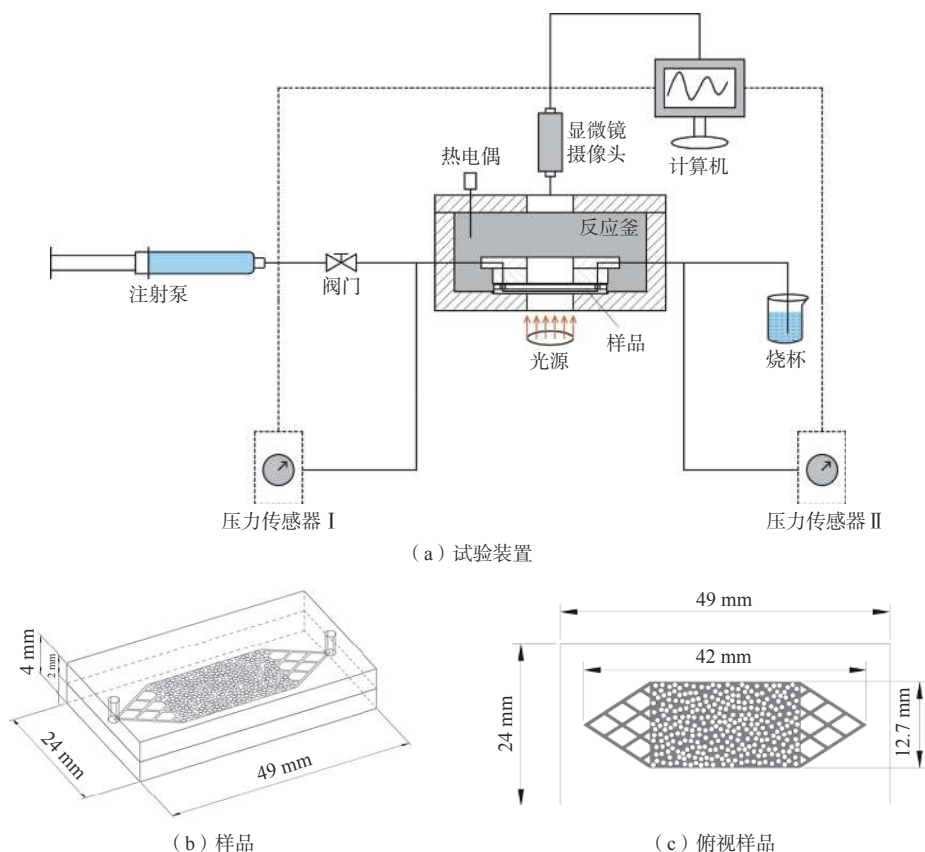


图 1 试验装置示意图、样品示意图以及样品俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device and sample, and top view of the sample

1.2 试验材料

本研究采用 Auto CAD 2016 随机方法生成了 18 组多孔介质样品,具有不同的孔隙率和颗粒排列方式。各样品编号及样品特征见表 1。

多孔介质确定的孔隙度是将已知大小的黑色颗粒随机放置在白色方形图像中实现。为了复制多样化的油气储层条件,多孔介质样品的孔隙率范围设定在 $0.3 \sim 0.5$ 之间,颗粒形状包括圆形和椭圆形。其中

圆形孔隙直径为 0.786 mm、0.393 ~ 0.786 mm, 椭圆长轴为 1.2 mm(长短轴比 2 : 1)、1.47 mm(长短轴比 3 : 1)、0.3 ~ 1.2 mm(长短轴比 2 : 1), 以此模拟不同类型的多孔介质, 如图 2 所示。本研究使用的多孔介质样品长 42 mm, 宽 12.7 mm, 各向异性比值为 1.76 : 1。椭圆颗粒多孔介质各向异性比值详见表 1。

表 1 样品特征及结构形态各向异性比
Table 1 Sample characteristics and structural morphological anisotropy ratio

编号	样品特征	结构形态各向异性比
A1	规则竖排等轴长椭圆, 孔隙度0.3(长短轴比2 : 1)	0.6 : 1.2=0.5
A2	规则竖排等轴长椭圆, 孔隙度0.4(长短轴比2 : 1)	0.6 : 1.2=0.5
A3	规则竖排等轴长椭圆, 孔隙度0.5(长短轴比2 : 1)	0.6 : 1.2=0.5
A4	规则横排等轴长椭圆, 孔隙度0.3(长短轴比2 : 1)	1.2 : 0.6=2.0
A5	规则横排等轴长椭圆, 孔隙度0.4(长短轴比2 : 1)	1.2 : 0.6=2.0
A6	规则横排等轴长椭圆, 孔隙度0.5(长短轴比2 : 1)	1.2 : 0.6=2.0
A7	不规则排列竖排变轴长椭圆, 孔隙度0.4(长短轴比2 : 1)	
A8	不规则排列横排变轴长椭圆, 孔隙度0.4(长短轴比2 : 1)	
A9	不规则排列竖排等轴长椭圆, 孔隙度0.4(长短轴比2 : 1)	
A10	不规则排列横排等轴长椭圆, 孔隙度0.4(长短轴比2 : 1)	
A11	规则排列等径圆, 孔隙度0.3	0.786 : 0.786=1.0
A12	规则排列等径圆, 孔隙度0.4	0.786 : 0.786=1.0
A13	规则排列等径圆, 孔隙度0.5	0.786 : 0.786=1.0
A14	不规则排列等径圆, 孔隙度0.3	
A15	不规则排列等径圆, 孔隙度0.4	
A16	不规则排列等径圆, 孔隙度0.5	
A17	规则横排等轴长椭圆, 孔隙度0.4(长短轴比3 : 1)	1.47 : 0.49=3.0
A18	规则竖排等轴长椭圆, 孔隙度0.4(长短轴比3 : 1)	0.49 : 1.47=0.3

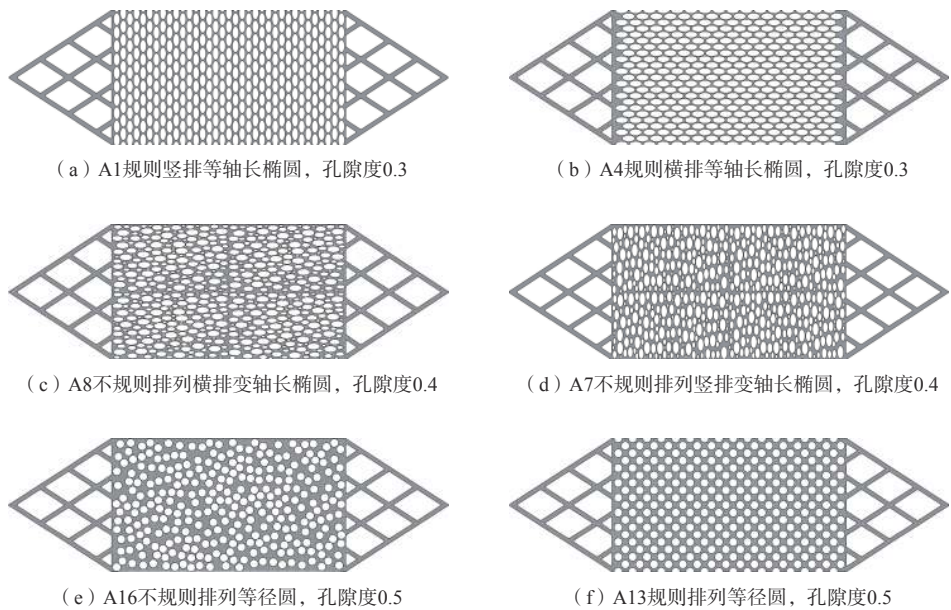


图 2 本试验设计的部分多孔介质试样图

Fig. 2 Porous medium sample designed in the experiment

1.3 试验步骤

利用紫外激光打标机根据 CAD 2016 生成的多孔介质刻蚀玻璃试样, 将注射泵、阀门、反应釜通过不锈钢管线顺次连接, 将压力传感器接入电脑, 打开压

力检测软件, 设置好量程, 记录频率等数据, 开始记录压力。待一切运行稳定后, 打开注射泵, 流量分别设置为 2.5, 5.0 mL/min, 多孔介质试样两端压力稳定后记录两端压差。试验过程中, 使用空调将整体温度控

制在 20 ℃。

利用稳态法计算多孔介质渗透率时,首先需要确定流体流动状态是否为层流,计算流体雷诺数^[16]:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

式中: Re ——雷诺数;

ρ ——流体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

v ——流体流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

d ——当量直径/m;

μ ——流体的动力黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

如表 2, 试验中, 渗透率测试的 2 种流量计算出的雷诺数均体现通过多孔介质的是层流。因此, 可利用达西定律计算渗透率^[17]:

$$K = \frac{Q \mu L}{A \Delta P} \quad (2)$$

式中: K ——绝对渗透率/ m^2 ;

Q ——渗流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

L ——样品长度/m;

ΔP ——样品两端压差/Pa;

A ——样品截面积/ m^2 。

表 2 雷诺数计算数据

Table 2 Reynolds number calculation

试验组	流量/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	密度/($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	流速/($10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	当量直径/(10^{-3} m)	黏度/($10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$)	雷诺数
流量1	2.5	1	1.458	1.253	1.01	18.12
流量2	5.0	1	2.916	1.253	1.01	36.24

2 结果

2.1 渗透率与孔隙度关系

表 3 显示圆形颗粒多孔介质试样渗透率随孔隙度的变化关系, 同一颗粒排列形式下的多孔介质试样随着孔隙度的增加而增加, 但并不是简单的线性关系。Kozeny-Carman 方程普遍用于描述渗透率与孔隙度的关系^[17-18]:

$$K = \frac{D^2}{180} \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} \quad (3)$$

式中: D ——等径多孔介质颗粒的直径/m;

φ ——等径多孔介质的孔隙度。

表 3 多孔介质渗透率与孔隙度关系

Table 3 Relationship between the permeability and porosity of porous media

多孔介质 孔隙度	绝对渗透率/ μm^2			
	规则排列 等径圆	不规则排列 等径圆	规则横排 等轴长椭圆	规则竖排 等轴长椭圆
0.3	32.62	30.86	39.72	36.80
0.4	81.56	57.67	78.83	73.53
0.5	83.24	107.81	85.12	78.53

理论上在等径多孔介质孔隙度相差不大的条件下, 绝对渗透率与颗粒直径的平方成正比, 但实际上测量值与 Kozeny-Carman 方程预测值相差较大。

通常, Kozeny-Carman 方程是一个经验公式, 它根据多孔介质的形态特征和物理性质, 通过对多孔介质的渗透性、孔隙率、比表面积等参数进行统计建模得到。它只适用于一定范围内的孔隙度和颗粒直径, 并

且不考虑介质形状和排列方式等因素的影响。因此, 在使用该公式时应该谨慎, 根据实际情况进行修正和调整^[19]。对于规则排列等径圆多孔介质, Kozeny-Carman 公式需要修正为:

$$K = \frac{D^{1.66}}{180} \frac{\varphi^{2.42}}{(1-\varphi)^{1.42}} \quad (4)$$

对于不规则排列等径圆多孔介质, Kozeny-Carman 公式需要修正为:

$$K = \frac{D^{1.584}}{180} \frac{\varphi^{1.92}}{(1-\varphi)^{0.92}} \quad (5)$$

修正后的 Kozeny-Carman 方程预测值与试验数据匹配良好, 预测值与试验值误差均在 5% 以内, 见图 3。

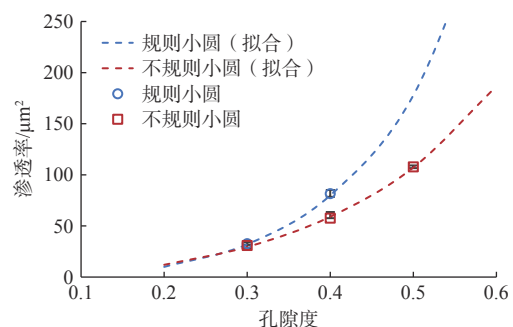


图 3 等径圆形多孔介质渗透率与孔隙度的试验关系和拟合曲线
Fig. 3 Experimental relationship between the permeability and porosity of equal-diameter circular porous media

2.2 渗透率与颗粒排列形式

孔隙度会影响渗透率, 颗粒排列形式也会影响其渗透率^[20-23]。3 种样品型号多孔介质渗透率随颗粒排

列形式变化的情况见表 4。对比数据可以看出, 在孔隙度和孔隙形状、大小均一致的情况下, 排列不规则的多孔介质比同类型排列规则的多孔介质渗透率大。

表 4 多孔介质渗透率与颗粒排列形式关系
Table 4 Relationship between porous media permeability and particle arrangement

多孔介质颗粒排列方式	绝对渗透率/ μm^2		
	等径圆, 孔隙度0.5	竖排等轴长椭圆, 孔隙度0.4	横排等轴长椭圆, 孔隙度0.4
规则	83.24	73.53	78.83
不规则	107.81	93.24	87.16

多孔介质中颗粒长短轴之比也是影响渗透率的因素之一。本次选取 5 组试验进行对照, 分别是: A17 为规则横排等轴长椭圆(长短轴比为 3 : 1), 孔隙度为 0.4; A5 为规则横排等轴长椭圆(长短轴比为 2 : 1), 孔隙度为 0.4; A12 为规则排列等径圆(长短轴比 1 : 1), 孔隙度为 0.4; A2 为规则竖排等轴长椭圆(长短轴比

为 2 : 1), 孔隙度为 0.4; A18 为规则竖排等轴长椭圆(长短轴比为 3 : 1), 孔隙度为 0.4。由表 5 可以看出, 在其他条件均相同的情况下, 不管椭圆是横向排列还是竖向排列, 长短轴之比越接近 1, 其多孔介质渗透率越大。

表 5 等轴长椭圆多孔介质渗透率与颗粒长短轴之比
Table 5 The relationship between the permeability of equiaxial elliptical porous media and the ratio of the particle's major to minor axes

多孔介质颗粒长短轴之比	绝对渗透率/ μm^2	
	规则竖排等轴长椭圆	规则横排等轴长椭圆
3 : 1	58.30	77.64
2 : 1	73.53	78.83
1 : 1	81.56	81.56

颗粒横竖排列也会对渗透率造成影响, 见表 6。对于规则样品, 横向排列的多孔介质样品的渗透率比纵向排列的多孔介质样品高。对于不规则排列的多孔介质, 横向排列和纵向排列的渗透率差别不大。

表 6 椭圆多孔介质渗透率与颗粒横竖排列关系
Table 6 Relationship between the permeability of elliptical porous media and the horizontal and vertical arrangement of particles

多孔介质颗粒排列方式	绝对渗透率/ μm^2					
	规则排列等轴长椭圆			不规则排列等轴长椭圆		不规则排列变轴长椭圆
	孔隙度0.3, 长短轴比为2 : 1	孔隙度0.4, 长短轴比为2 : 1	孔隙度0.5, 长短轴比为2 : 1	孔隙度0.4, 长短轴比为3 : 1	孔隙度0.4, 长短轴比为2 : 1	孔隙度0.4, 长短轴比为2 : 1
横	39.72	78.83	85.12	77.64	87.16	65.16
竖	36.80	73.53	78.53	58.30	93.24	71.79

3 讨论

大多情况下, Kozeny-Carman 方程用于描述球体或椭球体多孔介质的渗透率与孔隙度的关系, 而本试验使用的激光刻蚀机只能将多孔介质刻蚀成圆柱体, 所以这可能是本文的渗透率与孔隙度不满足原始 Kozeny-Carman 方程的原因之一。

不规则排列多孔介质的渗透率大是因为孔隙分布是随机的, 这导致在多孔介质中出现一些大的孔隙, 这些孔隙可以提供更大的通道促进流体的渗透^[24]。此外, 不规则排列会增加多孔介质内的流动路径, 使得流体能使用更多的路径通过多孔介质, 从而增加渗透率^[25]。然而, 不规则性也可能导致一些狭窄的通道和死角, 这些地方会增加流体的阻力, 减少渗透率^[26], 在本次试验中选取的不规则图形通过人工干预避开了死角等问题, 所以渗透率略大于规则排列多孔介质。而规则排列的多孔介质, 孔隙之间的距离和分布比较均匀, 流体在通过孔隙时形成了比较均匀的流动

通道^[27], 但同时也会出现部分孔隙之间形成的“瓶颈”, 这些瓶颈会阻碍流体的通过, 从而降低多孔介质渗透率^[28-30]。

颗粒的横竖排列也会对渗透率造成影响(表 6)。首先, 对于规则样品, 颗粒横向排列的多孔介质样品的渗透率比纵向排列的多孔介质样品高。这是因为在纵向排列的情况下, 流体必须穿过更多的孔隙才能到达出口, 这导致在孔隙形状、大小相同的情况下, 增加了流体流动路径的长度(假设流体按最短路径经过孔隙, 相同横向位移情况下流体在竖向排列多孔介质中会历经更长的纵向位移), 因此会受到更多的阻力。另一个原因是本试验多孔介质样品是矩形, 在模拟相同孔隙度的多孔介质时, 纵向排列的平均孔隙比横向排列的平均孔隙小, 会更容易被堵塞或阻碍流体流动, 导致纵向排列的渗透率变小。

对于不规则排列的多孔介质, 这一规律恰好相反。由于不规则排列多孔介质的孔隙分布本身就不够均匀, 所以横向排列和纵向排列的渗透率差别不

大。对于同一类型的多孔介质, 竖向排列的多孔介质样品的渗透率比横向排列的多孔介质样品的渗透率更容易受到孔隙度的影响。这是因为在纵向排列的多孔介质中, 单位长度内流体会穿过更多的孔隙, 而变化孔隙度会导致这些孔隙大小发生较大的变化, 从而导致渗透率变化较大。因此, 在相同的孔隙度条件下, 纵向排列的多孔介质会更容易受到孔隙度的影响, 渗透率的变化会更加明显。

4 结论

(1) 多孔介质渗透率与孔隙度之间不是线性关系, 圆形颗粒多孔介质渗透率与孔隙度基本满足修正的 Kozeny-Carman 公式。对于不规则排列等径圆孔隙度从 0.3 增加到 0.5 时, 渗透率从 $30.86 \mu\text{m}^2$ 增加到 $107.81 \mu\text{m}^2$, 而对于规则排列等径圆孔隙度从 0.3 增加到 0.4 时, 渗透率从 $32.62 \mu\text{m}^2$ 增加到 $81.56 \mu\text{m}^2$ 。

(2) 渗透率受多孔介质颗粒排列规则性影响。在孔隙度和孔隙形状、大小均一致的情况下, 颗粒排列不规则的多孔介质要比同类型排列规则的多孔介质渗透率大。多孔介质的渗透率受颗粒长短轴之比的影响, 试验结果表明长短轴之比越靠近 1, 其渗透率越大。对于规则竖排等轴长椭圆, 颗粒长短轴比从 3:1 减小到 1:1 时, 渗透率从 $58.30 \mu\text{m}^2$ 增加到 $81.56 \mu\text{m}^2$, 而规则横排等轴长椭圆, 颗粒长短轴比从 3:1 减小到 1:1 时, 渗透率从 $77.64 \mu\text{m}^2$ 增加到 $81.56 \mu\text{m}^2$ 。

(3) 对于规则样品, 由于在纵向排列的情况下, 流体必须穿过更多的孔隙才能到达出口, 造成流体阻力变大, 因此颗粒横向排列的多孔介质样品的渗透率比纵向排列的多孔介质样品高。颗粒竖向排列的多孔介质样品的渗透率比横向排列的多孔介质样品的渗透率更容易受到孔隙度的影响。

参考文献 (References):

- [1] BERG C F. Permeability description by characteristic length, tortuosity, constriction and porosity[J]. *Transport in Porous Media*, 2014, 103(3): 381–400.
- [2] 徐含英, 姜振蛟, 许天福, 等. 基于单井注抽试验的增强型地热系统储层近井渗透率原位测试方法研究[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(4): 50–58. [XU Hanying, JIANG Zhenjiao, XU Tianfu, et al. Single well injection withdraw (SWIW) - based tracer test approach for in-situ permeability estimation in an enhanced geothermal system[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(4): 50–58. (in Chinese with English abstract)]
- [3] GENG Shaoyang, HE Xing, ZHU Runhua, et al. , A new permeability model for smooth fractures filled with spherical proppants[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130220.
- [4] CAI Jianchao, HU Xiangyun. Fractal theory in porous media and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [5] YU Boming, XU Peng. Transport physics of fractal porous media[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [6] JOSEPH J, SIVA KUMAR GUNDA N, MITRA S K. On-chip porous media: Porosity and permeability measurements[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 99: 274–283.
- [7] 王世芳, 吴涛, 夏坤. 多孔介质球向渗流的渗透率分形模型 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(1): 45–49. [WANG Shifang, WU Tao, XIA Kun. The fractal permeability model for spherical seepage in the porous media[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2020, 54(1): 45–49. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 宋永臣, 黄兴, 刘瑜, 等. 含甲烷水合物多孔介质渗透性的实验研究 [J]. 热科学与技术, 2010, 9(1): 51–57. [SONG Yongchen, HUANG Xing, LIU Yu, et al. Experimental study of permeability of porous medium containing methane hydrate[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2010, 9(1): 51–57. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 谢颖颖. 利用格子 Boltzmann 方法预测多孔介质中非牛顿流体的渗透率 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020. [XIE Yingying. A study on the lattice Boltzmann models for predicting effective permeability of non-Newtonian fluid in porous media[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [10] TORSKAYA T, SHABRO V, TORRES-VERDÍN C, et al. Grain shape effects on permeability, formation factor, and capillary pressure from pore-scale modeling[J]. *Transport in Porous Media*, 2014, 102(1): 71–90.
- [11] POULET T, SHELDON H, KELKA U, et al. Impact of permeability anisotropy misalignment on flow rates predicted by hydrogeological models[J]. *Hydrogeology Journal*, 2023, 31(8): 2129–2137.
- [12] 李滔, 李闽, 荆雪琪, 等. 孔隙尺度各向异性与孔隙分布非均质性对多孔介质渗透率的影响机理 [J]. *石油*

- 勘探与开发, 2019, 46(3): 569 – 579. [LI Tao, LI Min, JING Xueqi, et al. Influence mechanism of pore-scale anisotropy and pore distribution heterogeneity on permeability of porous media[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 569 – 579. (in Chinese with English abstract)]
- [13] GAO Yuan, ZHANG Xiaoxian, RAMA P, et al. Calculating the anisotropic permeability of porous media using the lattice boltzmann method and X-ray computed tomography[J]. *Transport in Porous Media*, 2012, 92(2): 457 – 472.
- [14] CLAVAUD J B, MAINEULT A, ZAMORA M, et al. Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2008, 113(B1): B01202.
- [15] LALA A M S, ELSAYED N A A. Controls of pore throat radius distribution on permeability (withdrawal of 10.1111/GFL. 12158, 2015) [J]. *Geofluids*, 2016, 16(5): 1058.
- [16] EGASHIRA R, FUJIKAWA T, YAGUCHI H, et al. Low Reynolds number flows in a microscopic and tapered tube with a permeability[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2019, 51(2): 025504.
- [17] ZHANG Zhun, LIU Lele, LU Wanjun, et al. Permeability of hydrate-bearing fine-grained sediments: Research status, challenges and perspectives[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 244: 104517.
- [18] REN Xingwei, ZHAO Yang, DENG Qinglu, et al. A relation of hydraulic conductivity—Void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation[J]. *Engineering Geology*, 2016, 213: 89 – 97.
- [19] 徐鹏, 郁伯铭. Kozeny-Carman 常数的分形分析 [C]. // 中国力学学会学术大会 2009 论文摘要集, 2009. [XU Peng, YU Boming. Fractal analysis of kozeny carman constants[C]//Abstract Collection of 2009 Papers of the Academic Conference of the Chinese Society of Mechanics, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [20] HU Yongquan, WANG Qiang, ZHAO Jinzhou, et al. A novel porous media permeability model based on fractal theory and ideal particle pore-space geometry assumption[J]. *Energies*, 2020, 13(3): 510.
- [21] WANG Xueqing, MIAO Zibo, YU Junjie, et al. Effects of arrangements of spherical particles in the sphere model on rock and soil porosity[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science 2015. Paris: Atlantis Press, 2015: 1468 – 1472.
- [22] ZHANG Sheng, YAN Han, TENG Jidong, et al. A mathematical model of tortuosity in soil considering particle arrangement[J]. *Vadose Zone Journal*, 2020, 19(1): e20004.
- [23] WANG Haiman, NI Wankui. Response and prediction of unsaturated permeability of loess to microstructure[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 12.
- [24] 蔡沛辰, 阙云, 蒋振梁, 等. 基于四参数随机生长法重构土体的格子玻尔兹曼细观渗流研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 33 – 42. [CAI Peichen, QUE Yun, JIANG Zhenliang, et al. Lattice Boltzmann meso-seepage research of reconstructed soil based on the quartet structure generation set[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 33 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [25] JUNGREUTHMAYER C, STEPPERT P, SEKOT G, et al. The 3D pore structure and fluid dynamics simulation of macroporous monoliths: High permeability due to alternating channel width[J]. *Journal of Chromatography A*, 2015, 1425: 141 – 149.
- [26] SADHUKHAN S, DUTTA T, TARAFDAR S. Simulation of diagenesis and permeability variation in two-dimensional rock structure[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(3): 1366 – 1375.
- [27] RODED R, AHARONOV E, HOLTZMAN R, et al. Reactive flow and homogenization in anisotropic media[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(12): e2020WR027518.
- [28] NI Hongyang, LIU Jiangfeng, LI Xiaozhao, et al. An improved fractal permeability model for porous geomaterials with complex pore structures and rough surfaces[J]. *Fractals*, 2022, 30(1): 2250002.
- [29] SAKAI Y, NAKAMURA C, KISHI T. Evaluation of mass transfer resistance of concrete based on representative pore size of permeation resistance[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 51: 40 – 46.
- [30] BAKER D R, BRUN F, MANCINI L, et al. The importance of pore throats in controlling the permeability of magmatic foams[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2019, 81(9): 54.

编辑: 张若琳