

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.077

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 酸性环境下砂岩腐蚀的渗流特性

霍润科<sup>1a,1b</sup>, 钱美婷<sup>1a</sup>, 李曙光<sup>2</sup>, 熊爱华<sup>1a</sup>, 丁凡<sup>1a</sup>, 张茹萍<sup>1a</sup>

(1. 西安建筑科技大学 a. 土木工程学院; b. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 西安 710055;

2. 中铁二十局集团有限公司 高原隧道施工技术及装备研发中心, 西安 710016)

**摘要:**为拓展酸性介质与砂岩之间的细观特性研究,基于数字岩心模型和格子 Boltzmann 方程,开展砂岩受酸腐蚀过程的加速模拟试验,分析不同酸性环境下受酸腐蚀砂岩的渗流特性。通过 CT 扫描设备探究受酸腐蚀砂岩内部矿物组成的结构变化;利用 Image J 和 Avizo 可视化图像处理软件建立了受酸腐蚀砂岩的数字岩心,结合格子 Boltzmann 方程构建出砂岩受酸腐蚀过程中的渗流模型,分析砂岩受酸腐蚀过程中内部孔隙结构和渗流特性的变化规律。研究表明:CT 扫描试验可展示砂岩内部的矿物组成及孔隙分布,反映酸性溶液对砂岩的腐蚀程度;渗透深度随孔隙率的增大而增大,变化速率先快后慢,最后趋于稳定,说明基于 Boltzmann 方程构建的渗流模型对模拟砂岩受酸腐蚀过程具有较好的适用性。

**关键词:**数字岩心;孔隙率;格子 Boltzmann 方程;渗流模型

**中图分类号:** TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)06-0001-09

## Seepage characteristics of sandstone subjected to acid corrosion

HUO Runke<sup>1a,1b</sup>, QIAN Meiting<sup>1a</sup>, LI Shuguang<sup>2</sup>, XIONG Aihua<sup>1a</sup>, DING Fan<sup>1a</sup>, ZHANG Ruping<sup>1a</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Shaanxi Key Lab of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. R & D Center of Plateau Tunnel Construction Technology and Equipment, China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710016, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the microscopic characteristics between the acid medium and the sandstone, based on the digital core model and the lattice Boltzmann equation, this paper carried out an simulation test of the acid corrosion process of the sandstone, and analyzed the seepage characteristics of the sandstone under different acidic environmental circumstances. Firstly, the structural changes of the internal mineral components of the acid-corroded sandstone were studied by CT scanning equipment. Then, the seepage model of the sandstone subjected to acid corrosion was constructed by combining the digital core of acid-corroded sandstone which is established by the visual image processing software Image J, Avizo and the lattice Boltzmann theoretical equation. The change rules of the internal pore structure and seepage characteristics of sandstone in the process of acid corrosion were analyzed. Results show that the mineral composition and pore distribution of sandstone and the corrosion degree of the sandstone by acidic solution

**收稿日期:** 2020-05-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(41172237); 中铁二十局集团有限公司 2020 年度科技研发项目(YF2000SD01A)

**作者简介:** 霍润科(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程、环境岩土工程研究, E-mail: huorkdq@xauat.edu.cn。

**Received:** 2020-05-07

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 41172237); Research Project of China Railway 20th Bureau Group Co. Ltd. (No. YF2000SD01A)

**Author brief:** HUO Runke (1963-), professor, doctoral supervisor, main research interests: tunnel and underground engineering, environmental geotechnical engineering, E-mail: huorkdq@xauat.edu.cn.

could be revealed by CT scan tests. The penetration depth increases with the increase of porosity. The rate of increase is first fast and then slow when the porosity is large, and finally tends to be stable. It indicates that the seepage model based on Boltzmann equation has good applicability for simulating the acid corrosion process of sandstone.

**Keywords:** digital core; porosity; lattice Boltzmann equation; seepage model

随着现代工业的迅速发展,酸性环境污染已经成为工程建设中不容忽视的破坏因素,作为一种边坡工程中常见的非均质材料,砂岩内部含有大量随机分布的微裂隙、孔洞、界面等缺陷,这些不连续的缺陷构成了砂岩多相复合的结构特征,从而影响砂岩的宏观物理性质,使其力学性能呈现各向异性、非线性弹性和时效性<sup>[1]</sup>。随着 CT 技术的快速发展,其应用范围逐渐拓宽,学者们开始利用 CT 扫描技术探究受酸腐蚀砂岩截面的物质组成、孔隙结构等岩心参数,分析酸性环境变化对砂岩腐蚀过程的影响。

早期数字岩心技术多选用数值建模方法,主要基于电镜的二维扫描图,通过随机法或过程模拟等数值模拟算法实现三维重构<sup>[2]</sup>。Øren 等<sup>[3]</sup>提出过程模拟法,考虑岩石基质的粒径分布,模拟真实岩心形成的过程,重现岩石真实的传导性质和几何属性; Hazlett 在 Metropolis 和 Kirkpatrick 模拟退火算法的基础上,将目标函数定义为重建介质与模拟介质性质差值的平方和,通过体系更新,使其逐渐稳定,从而实现数字岩心; Okabe 等<sup>[4]</sup>提出多点地质统计法,巧妙运用地质信息,利用二维岩心薄片,解决数字岩心重构过程中的连通性难题,随后孙建孟等<sup>[5-7]</sup>开展孔隙网络流动模拟研究。在 Berea<sup>[8-10]</sup> 数字岩心的理论上,刘洋等<sup>[11]</sup>将数字岩心技术应用于研究低渗储层岩石的渗流机理,分析流体在油湿和水湿两种环境下的饱和状态,并判断其饱和度的区别;孙泽<sup>[12]</sup>在 Berea 构建的砂岩孔隙网络模型的基础上利用 CT 扫描技术对致密岩样进行数字岩心重建,提取孔隙度、孔喉大小、连通系数等岩心数据及孔隙空间分布状态图;李江涛等<sup>[13]</sup>利用格子方程模拟页岩气宏观尺度的渗流模型,解释滑脱效应和气井产量与地层能量之间产生的联系;Qiu 等<sup>[14]</sup>、何雅玲等<sup>[15]</sup>通过对孔隙网络的三维动态模型进行微干扰测试,研究流动状态下润湿度及孔隙率对毛管数的影响规律;唐明明等<sup>[16]</sup>利用数字岩心和格子玻尔兹曼建立了致密砂岩的驱替模型,对比不同注入条件下驱替参数的变化及驱替过程的影响。

综上所述,数字岩心孔隙网络模型主要应用于微观渗流特性的研究,而对于酸性环境下岩石的腐

蚀研究几乎尚未涉及。笔者从孔隙角度出发,选用砂岩作为试验对象,分析其在不同浓度的酸性条件下孔隙率及渗流特性的变化规律。

## 1 试验方案

选用陕西省某水利工程中矿物成分含量已知的长石砂岩作为试验研究对象,砂岩的矿物组成以石英(58%)和长石(11%)为主,填隙碎屑中包含方解石(5%)、硅质岩屑(6%)、硅铁质胶结物(7%)、云母(3%)、灰质岩屑(2%)、黏土杂基(3%)、绿泥石(1%)等矿物,偶尔会出现帘石、磷灰石等重矿物(4%),颗粒之间的胶结类型主要呈现为孔隙式胶结。从砂岩岩块中钻取两组  $h = 100 \text{ mm}$ 、 $\Phi = 50 \text{ mm}$  的标准圆柱体试样,采用全浸法分别浸泡在 pH 值为 1、3 两种浓度的硫酸溶液中,为了加快酸腐蚀进程,每隔 30 d 更换一次硫酸溶液。每组试验配备多个容器作对照分析,确保试验的准确性。室内模拟砂岩受酸腐蚀的加速试验如图 1 所示。

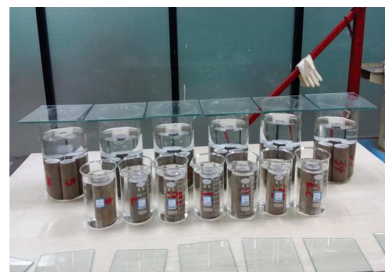


图 1 室内模拟砂岩的酸腐蚀加速试验

Fig. 1 Acid corrosion acceleration test of simulated sandstone in laboratory

浸泡 180 d 后,岩样表面及酸性溶液中不再出现明显化学腐蚀现象,从两组酸性溶液中取出岩样,烘干后沿纵向 1/2 处横切开,可看出岩样横截面出现明显的腐蚀区和未腐蚀区。考虑到岩样密度较大,CT 扫描试验过程中可能会影响 X 射线探测器对信号的接受,故屏蔽 X 射线,另一方面,在分析图像数据的过程中,岩样尺寸越大,图像的分辨率会降低,所以不宜选用尺寸过大的岩样进行岩心 CT 扫描试验。

从腐蚀岩样的腐蚀区和未腐蚀区选取 5 个不同

的位置钻取岩心试样,岩心尺寸为长 7 mm、直径 3.5 mm 的小圆柱体岩样,岩心试样及取样位置示意图如图 2 所示,分别用 S、X、C、B、Z 表示。

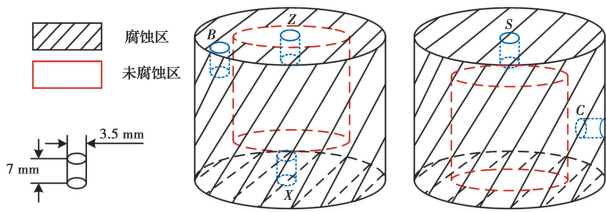


图 2 岩心试样及取样位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of core sample and sampling location

CT 扫描试验采用高分辨率三维 X 射线 CT 扫描设备(Zeiss Xradia 510 Versa),扫描过程中的试验参数分别为:90 kV 电压、7 W 功率、岩样与光源相距 15.015 mm、岩样与探测器相距 18.486 mm、1 s 曝光时间、1 h 总时长。CT 扫描结束后,每块岩心可获得 800 张像素为  $2\,025 \times 2\,025$  的二维切片图,CT 图像的分辨率为  $2.47 \mu\text{m}/\text{像素}$ ,格式为 BMP。

## 2 研究对象的建立

为了从获得的二维切片图像中完成数据重建,提取与孔隙结构相关的微观信息,需要通过无损的图像处理技术去除干扰信息,突出有效信息,并为下一步能够更精确地分割孔隙和骨架奠定基础。CT 扫描试验是通过 X 射线透过待测岩样,在岩样与空气接触的边缘区域,X 射线的衰减强度会表现出岩体到空气的过渡现象,不会出现明显的分界,通常会比较模糊,这对岩心孔隙和骨架的区分非常不利。利用图像切割消除边界伪影的影响,表征真实岩心的内部孔隙结构,文中截取体素为  $740 \times 740 \times 740$  的立方体区域进行图像处理。图像预处理方法主要包括亮度调整、对比度调整、图像锐化及降噪处理等,图像处理技术均基于 Image J 软件完成。

预处理前后的直方图对比图如图 3 所示。由图 3 可以看出,相较于原始图像,直方图的灰度值区域从  $[0, 80]$  扩展到  $[0, 130]$ ,频数峰值对应的灰度值从 48 平移至 75,边缘信息得到了强化,图像的整体质量得到了提高。

通过中值滤波对岩心图像实现降噪处理,可以在不损坏图像的前提下提高信噪比、衰减噪声,同时保留重要信息。然后采用迭代阈值法选取合适的分割阈值。计算步骤如下:

1) 首先确定一个初始阈值  $T$ ,通常选择像素的

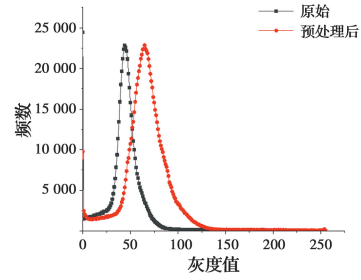


图 3 预处理前后的直方图对比图

Fig. 3 Histogram comparison before and after pretreatment

平均灰度值  $\mu$  作为初始阈值;

2) 通过阈值分割将图像分成  $G_1$  和  $G_2$  两部分,利用式(1)计算出  $G_1$  和  $G_2$  区域的平均灰度值  $\mu_1$  和  $\mu_2$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \sum_{i=0}^T p(i) \times i \\ \mu_2 &= \sum_{i=T+1}^{255} p(i) \times i \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $i$  为区域内的灰度值, $p(i)$  为灰度值的概率;

3) 利用式(2)确定新的阈值  $T'$ ,

$$T' = (\mu_1 + \mu_2) / 2 \quad (2)$$

4) 重复步骤 2) 和 3),直到  $T'$  不发生变化为止,此时的  $T'$  即为最终确定的分割阈值。

最终计算出岩心图像的分割阈值  $T' = 27$ ,二值化处理后得到的结果如图 4 所示,其中黑色代表孔隙,白色代表岩石骨架。将阈值分割后的 CT 图像导入 Avizo 软件中,利用 Volume Rendering 模块将孔隙结构可视化,通过 Edit New Label Field 模块对岩样的骨架和孔隙空间进行数据组合,三维重建后得到真实岩心的数字化表征,即数字岩心。其中 29-Z 岩样的三维数字岩心模型如图 5 所示。

## 3 渗流模型的构建

砂岩试样是一种含有大量孔隙的多孔介质,在三维数字岩心的基础上,利用格子 Boltzmann 模型可以将不规则的孔隙空间划分成规则的格子网络,将酸性溶液离散成一个个均匀分布的流体粒子,构建渗流模型描述离散粒子在真实岩心中的运动模式,简化数字岩心的空间计算,拓宽模型的研究意义,完成不同酸性环境下砂岩受酸腐蚀的渗流特性研究。

### 3.1 格子 Boltzmann 方程

格子 Boltzmann 是通过演化粒子间的分布函数,对宏观的运动特性进行描述的一种数值模拟方法,本文模拟对象为三维的数字岩心。因为砂岩的



孔隙率较低,二维的格子 Boltzmann 模型无法对其

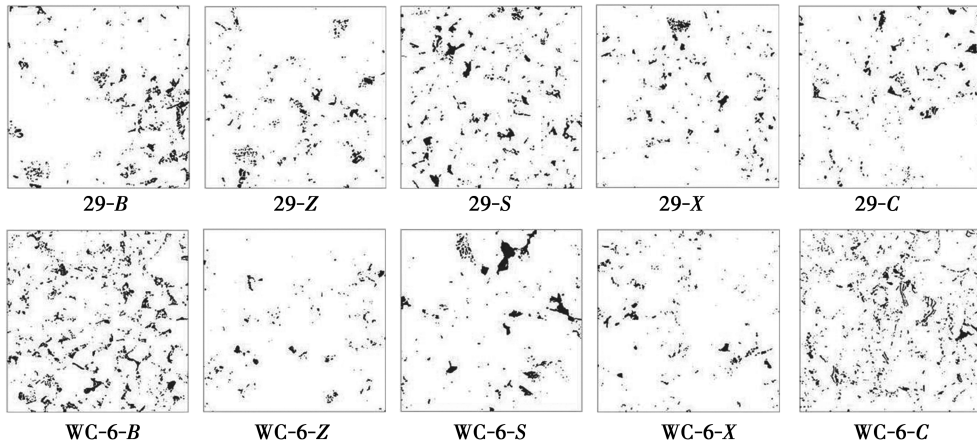
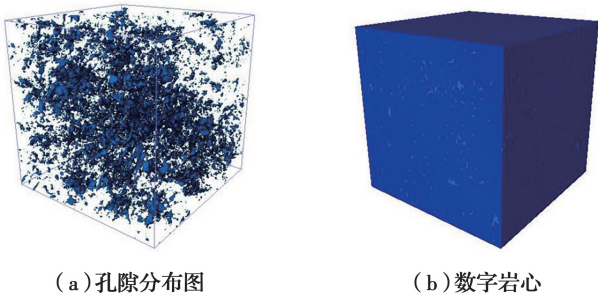


图 4 岩心图像的二值化结果  
Fig. 4 Binary results of core images



(a) 孔隙分布图 (b) 数字岩心  
图 5 29-Z 岩样的三维数字岩心模型  
Fig. 5 3D digital core model of 29-Z sample

内部的孔隙结构进行准确地描述,所以选用三维的格子 Boltzmann 模型-D3Q19(图 6)对受酸腐蚀砂岩的孔隙空间实现数值模拟,初始孔隙率选用上表面和侧面 C 岩样孔隙率的平均值,即浸泡在 pH 值为 1 酸性溶液中的岩样孔隙率为 2.90%,浸泡在 pH 值为 3 酸性溶液中的岩样孔隙率为 2.30%。

图 3 中 D3 表示三维空间,Q19 表示将粒子划分

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

根据质量和能量守恒定律,格子上粒子的宏观密度  $\mu$  和宏观速度  $v$  分别为

$$\mu = \sum_{i=0}^{18} f_i$$

$$v = \frac{1}{\mu} \sum_{i=0}^{18} f_i e_i \quad (3)$$

$f_i^{eq}(x, t)$  是粒子平衡态的分布函数,每个速度矢量都对应着一个分布函数  $f_i (i=0, 1, 2, \dots, 18)$ , 计算式为

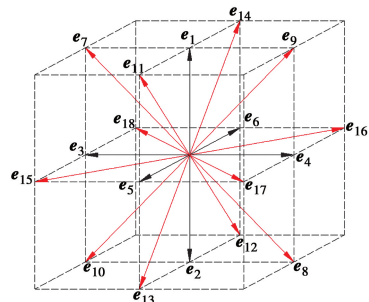


图 6 D3Q19 格子模型  
Fig. 6 D3Q19 grid model

成 19 个连续运动的速度方向,每一个速度方向都对应着各自的速度矢量  $e_i (i=0, 1, 2, \dots, 18)$ ,  $i=0$  时,表示静止速度; $i=1, \dots, 6$  时,表示  $1l_u/t_s$  的速度幅度; $i=7, \dots, 18$  时,表示  $\sqrt{2}l_u/t_s$  的速度幅度,  $l_u$  为单位格子的长度,  $t_s$  为格子的单位时间。

19 个速度矢量具体分量表达式为

$$f_i^{eq} = t_\sigma \mu \left[ 1 + \frac{e_i \cdot v}{c_N^2} + \frac{(e_i \cdot v)^2}{2c_N^4} - \frac{v^2}{2c_N^2} \right] \quad (4)$$

式中:  $t_\sigma$  为权系数,与速度矢量的长度有关,具体数值为

$$t_\sigma = \begin{cases} 1/3, & \sigma = 0 \\ 1/18, & \sigma = 1, \dots, 6 \\ 1/36, & \sigma = 7, \dots, 18 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $c_N$  为模拟声速,  $c_N^2 = c^2/3$ ,  $c$  为单位格子的速度幅度,  $c = 1l_u/t_s$ 。

解得

$$f_0^{\text{eq}} = \frac{1}{3}\mu - \frac{1}{2}\mu\omega^2, \quad i = 0 \quad (6)$$

$$f_i^{\text{eq}} = \frac{1}{18}\mu + \frac{1}{6}\mu\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{v} + \frac{1}{4}\mu(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{v})^2 - \frac{1}{12}\mu\omega^2, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (7)$$

$$f_i^{\text{eq}} = \frac{1}{36}\mu + \frac{1}{12}\mu\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{v} + \frac{1}{8}\mu(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{v})^2 - \frac{1}{24}\mu\omega^2, \quad i = 7, \dots, 18 \quad (8)$$

### 3.2 边界处理

选用 D3Q19 模型,数值模拟过程中,将岩石骨架与孔隙交界处设置无滑移的反弹边界,出入口均采用定压边界,设  $yz$  平面为孔隙流体的输入端,且流体沿  $y$  轴和  $z$  轴的速度分量均为 0,即  $v_y = v_z = 0$ ,则 D3Q19 模型的压力边界条件计算式为

$$v_x = \frac{\rho_0 - [f_0 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_{11} + f_{12} + \dots + f_{13} + f_{14} + 2(f_3 + f_7 + f_{10} + f_{15} + f_{18})]}{\mu_0} \quad (9)$$

$$f_4 = f_3 + \frac{1}{3}\mu_0 v_x \quad (10)$$

$$f_8 = f_7 + \frac{1}{2}(f_1 - f_2) - \frac{1}{6}\mu_0 v_x \quad (11)$$

$$f_9 = f_{10} - \frac{1}{2}(f_1 - f_2) - \frac{1}{6}\mu_0 v_x \quad (12)$$

$$f_{16} = f_{15} + \frac{1}{2}(f_5 - f_6) - \frac{1}{6}\mu_0 v_x \quad (13)$$

### 3.3 设定初始变量

建立的数字岩心是一个像素为  $740 \times 740 \times 740$  的立方体,其中  $x=0$  的  $yz$  平面为酸性溶液的注入

$$\left\{ \begin{array}{l} \underbrace{f_i(x + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t)}_{\text{流动}} = f_i(x, t) - \underbrace{\frac{[f_i(x, t) - f_i^{\text{eq}}(x, t)]}{\tau}}_{\text{碰撞}} \\ \mu(x, t + \Delta t) = \sum_i f_i(x, t + \Delta t) \\ \rho\omega(x, t + \Delta t) = \sum_i \mathbf{e}_i f_i(x, t + \Delta t) \end{array} \right. \quad (16)$$

7)若满足平衡条件,则输出计算结果;若不满足,重复步骤 3)~6);

8)最后求解受酸腐蚀砂岩的渗透深度  $L = \sum_i f_i(x + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t)$ 。

## 4 结果分析

### 4.1 CT 试验结果分析

通过高精度的 CT 扫描试验,获取真实的岩心

端, $x=740$  的  $yz$  平面为酸性溶液的流出端,其他 4 个平面均为砂岩骨架。假设在初始状态下,砂岩注入端的孔隙空间均被酸性溶液填满,酸性溶液在化学腐蚀的作用下沿着  $x$  方向渗流。基于数字岩心模型,结合格子 Boltzmann 方程,模拟砂岩内部  $\text{H}^+$  的渗流过程。其中格子模型的分辨率为  $2.47 \times 10^{-9}$  m,物理空间的模拟步长为  $1 \times 10^{-7}$  m,物理时间的模拟步长为  $1 \times 10^{-9}$  s,格子速度的特征值为  $1 \times 10^{-5}$ ,物理速度的特征值为  $1 \times 10^{-3}$  m/s。

D3Q19 模型中,粒子黏度  $\lambda$  的公式为

$$\lambda = (2\tau - 1)/6 \quad (14)$$

式中  $\tau$  为弛豫(松弛)时间。

粒子间压力  $P$  与宏观密度  $\mu$  的关系式为

$$P = c_s^2 \mu \quad (15)$$

### 3.4 模拟过程

1)读取数字岩心孔隙模型的数据,其中 0 为孔隙,1 为岩石骨架;

2)选用 D3Q19 模型划分孔隙网格,并设定弛豫(松弛)时间  $\tau$  及黏度参数  $\lambda$  等宏观物理参数;

3)计算各节点速度矢量的初始分布函数;

4)设定边界处理形式:对骨架与孔隙的交界处执行无滑移的反弹边界,出入口执行定压边界;

5)迭代粒子间碰撞和迁移的两个运动状态;

6)计算宏观变量,并判断模型是否满足平衡条件(式 16);

数据,直观描述了不同浓度酸性环境下砂岩受酸腐蚀的内部孔隙分布。从二维切片图(图 7)可以看出,砂岩的横断面紧密排列着很多矿物质,均具有不同程度的亮度表现,其中亮度高的为高密度区,亮度低的为低密度区。砂岩的矿物组成中,云母的密度最大,对应亮度最高的区域,分割阈值为  $T' = 150$ ;其次是石英和长石,密度小于云母,对应二维图像中的灰度区域,阈值范围为  $[40, 130]$ ,含量约为 73%;

亮度最低且接近黑色的区域对应密度最小的孔隙,分割阈值为  $T'=27$ 。CT 扫描试验中获取的切片图像可以展示非均质砂岩内部的矿物组成结构及孔隙空间的分布情况。

腐蚀区和未腐蚀区中钻取的岩样在二维图像中也表现出明显的差异性。未腐蚀区岩样的岩心图像

表现出矿物排列致密、孔隙含量较少的内部结构,而腐蚀区岩样的岩心图像则表现出矿物排列稀疏、孔隙含量较高的内部结构。这是由于酸性溶液对不同位置的腐蚀程度不同,以及矿物耐酸腐蚀能力的差异性所致。

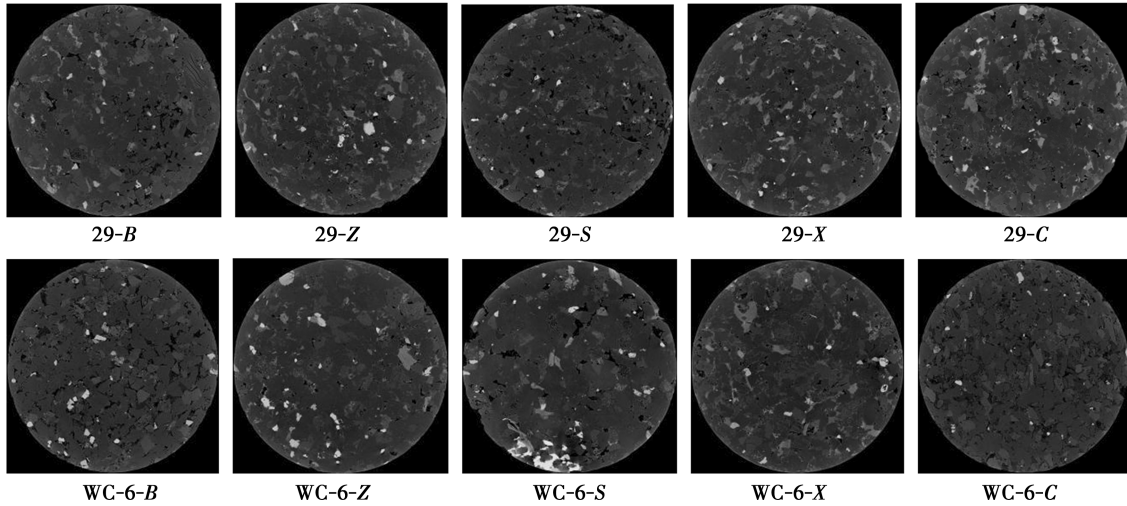


图 7 岩心切片的二维 CT 扫描图

Fig. 7 Two-dimensional CT scans of core sections

#### 4.2 基于数字岩心分析受酸腐蚀砂岩的孔隙率变化

砂岩孔隙率  $\alpha$  可表示为

$$\alpha = \frac{V_{\text{孔}}}{V_{\text{总}}} \times 100\% \quad (17)$$

式中:  $V_{\text{孔}}$  为砂岩内部孔隙的总体积;  $V_{\text{总}}$  为砂岩的表观体积。

编号为 29 的岩样是在 pH 值为 3 的硫酸溶液中浸泡 180 d 后的岩样,编号为 WC-6 的岩样是在 pH 值为 1 的硫酸溶液中浸泡 180 d 后的岩样,两种岩样上表面、下表面、侧面 C、侧面 B 和中间 5 个不同位置处孔隙率的对比如图 8 所示。从图 8 中可以看出,高浓度的酸性溶液对砂岩的腐蚀程度整体高于低浓度的酸性溶液,其中 29 号岩样上表面和侧面 C 位置的孔隙率最大,分别为 2.632% 和 2.658%,其次是下表面和侧面 B 两个位置的孔隙率为 2.065% 和 1.943%,最小孔隙率出现在中间位置,仅为 1.092%; WC-6 号岩样侧面 B 位置的孔隙率,为 4.253%,是腐蚀过程中出现的最大孔隙率,其次,上表面和侧面 C 两个位置的孔隙率均为 3.025%,然后是下表面的孔隙率,为 2.803%,最小孔隙率出现在中间位置,为 1.038%。

两块岩样的最小孔隙率均出现在中间位置,说

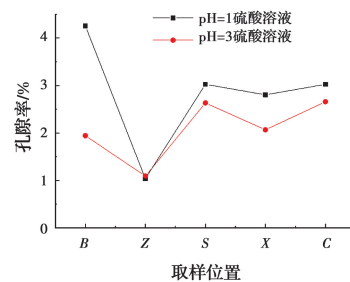


图 8 不同位置处岩心孔隙率的对比图

Fig. 8 Comparison of core porosity at different locations

明经过 180 d 的浸泡,两种浸泡溶液中的岩样均未被酸性溶液完全腐蚀,中间位置仍保持初始状态;酸性溶液的浓度不同,形成的腐蚀程度不同,在 pH 值为 1 的硫酸溶液中浸泡 180 d 的岩样,下表面位置形成的孔隙率为 2.803%,而在 pH 值为 3 的硫酸溶液中浸泡 180 d 的岩样,形成的孔隙率仅为 2.063%,酸性溶液的浓度越高,对该位置砂岩腐蚀形成的孔隙率越高;与酸性溶液发生直接接触的岩样和未发生完全接触的岩样之间会出现孔隙率差值,在 pH 值为 1 硫酸溶液中浸泡 180 d 的岩样,上表面和侧面 C 两个位置与下表面位置形成的孔隙率差值为 0.22%,在 pH 值为 3 的硫酸溶液中浸泡 180 d 的岩样,形成的孔隙率差值为 0.59%,酸性溶液的浓度越高,孔隙率差值越小;从图 7 中可以看

出,上表面位置的 WC-6-S 岩心试样中存在高密度矿物,对酸性溶液的渗透腐蚀形成阻碍,而侧面 B 位置的岩心试样颗粒间孔隙分布较均匀,腐蚀程度较强,所以在砂岩侧面 B 位置出现最大孔隙率的现象。

### 4.3 渗流模型结果分析

应用格子 Boltzmann 法构建酸腐蚀砂岩在酸性溶液中的渗流模型,计算出不同酸性环境下编号 WC-6 和 29 这两块岩样的渗透深度,上述两块砂岩的数字岩心均是基于 X 射线的 CT 扫描试验建立得到的,浓度不同的硫酸溶液在砂岩中的渗透深度随砂岩孔隙率的变化规律如图 9 所示。

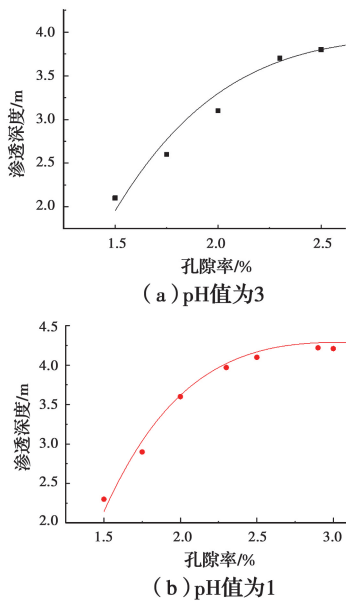


图 9 浓度不同的硫酸溶液中渗透深度随砂岩孔隙率的变化规律

Fig. 9 Permeability depth of sulfuric acid solution with different concentration varies with porosity of sandstone

图 9 中曲线为格子 Boltzmann 方程求解渗透深度数据点的拟合曲线,可以看出,浓度不同的硫酸溶液在砂岩中的渗透深度随砂岩孔隙率的变化规律基本保持一致,渗透深度随着孔隙率的增大而增大,变化速率先快后慢,最后趋于稳定。砂岩与酸性溶液接触的初始阶段,内部孔隙空间会发生剧烈的化学反应,导致酸性溶液的渗透深度增加较快;随后,酸性溶液中  $H^+$  的浓度降低,砂岩内部  $Na^+$ 、 $K^+$ 、

$Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  等阳离子逐渐被置换出来,形成胶结物,阻碍了酸性溶液对其进一步腐蚀,酸性溶液在岩样中渗透深度的增长速率逐渐放缓,最后趋于稳定。

### 4.4 格子模型的适用性验证

利用单轴压缩试验分别对自然状态下的未腐蚀岩样和在酸性环境下浸泡  $t$  天的腐蚀岩样施加外荷载  $P(t)$ ,岩样的受力荷载模型如图 10 所示。图中,  $\sigma(0)$  为自然状态下未腐蚀岩样的单轴抗压强度,MPa;  $\sigma(t)$  为酸性环境下浸泡  $t$  天后腐蚀岩样的单轴抗压强度,MPa;  $d(0)$ 、 $d(t)$  分别为砂岩受酸腐蚀前后的直径,mm;阴影部分为腐蚀区。假设砂岩试样为各向同性的均质体,扩散作用沿径向发展,腐蚀区的岩样骨架不承受荷载作用。

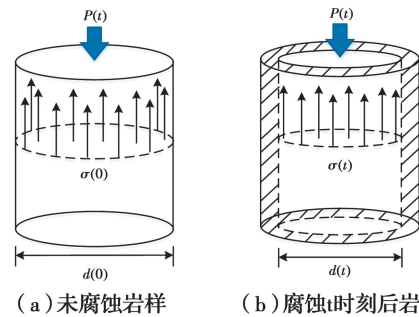


图 10 砂岩在外荷载作用下的物理力学模型

Fig. 10 Physical and mechanical model of sandstone under external load

单轴压缩过程中,砂岩承受的外荷载  $P(t)$  可以表示为<sup>[17]</sup>

$$P(t) = \frac{\pi}{4} \sigma(0) [d(0)]^2 = \frac{\pi}{4} \sigma(t) [d(t)]^2 \quad (14)$$

可得,

$$d(t) = \sqrt{\frac{\sigma(0)}{\sigma(t)}} d(0) \quad (15)$$

因此,受酸腐蚀岩样的渗透深度  $x(t)$  可表示为

$$x(t) = d(0) - d(t) = \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sigma(0)}{\sigma(t)}} \right] d(0) \quad (16)$$

砂岩试样的单轴压缩试验结果见表 1。

表 1 单轴压缩试验结果

Table 1 Uniaxial compression test results

岩样状态	浸泡溶液	峰值强度 $\sigma_c$ /MPa	$\frac{\sigma_n - \sigma_c}{\sigma_n} / \%$	峰值点轴向 应变 $\epsilon_c / 10^{-3}$	弹性模量 $E$ /GPa	$\frac{E_n - E}{E_n} / \%$
天然岩样		88.25		4.03	17.83	
浸泡 180 d	pH 值为 1 的 $H_2SO_4$	45.70	48.22	21.02	3.36	81.17
浸泡 180 d	pH 值为 3 的 $H_2SO_4$	54.39	38.37	13.17	6.68	62.54



将试验数据代入式(16)可得在 pH 值为 1、3 的硫酸溶液中浸泡 180 d 岩样的渗透深度分别为 4.54、3.96 mm。对比格子 Boltzmann 方程构建的数值模型计算的两种酸性环境下的渗透深度分别为 4.23、3.97 mm,发现计算渗透深度的模拟值和试验值基本保持一致,说明基于格子 Boltzmann 方程构建的数值模型对模拟砂岩受酸腐蚀过程的渗流特性具有较好的适用性。

## 5 结论

利用 CT 扫描试验和 Avizo 软件,对受酸腐蚀砂岩的内部孔隙结构进行可视化表征,建立数字岩心,分析砂岩受酸腐蚀过程中不同位置孔隙率的变化特征,结合格子 Boltzmann 模型和单轴压缩试验,探究受酸腐蚀砂岩的渗流特性及腐蚀过程中渗透深度的变化规律。得到以下结论:

1)高精度的 CT 图像中可通过灰度值的变化判断砂岩内部的物质组成,其中云母对应灰度值最高的区域,分割阈值为  $T' = 150$ ;石英和长石对应灰度区域,阈值范围为  $[40, 130]$ ,含量约为 73%;亮度最低且接近黑色的区域对应密度最小的孔隙,分割阈值为  $T' = 27$ ,从而展示非均质砂岩内部的矿物组成结构及孔隙空间的分布情况。

2)腐蚀条件一致,腐蚀程度基本一致,反之,砂岩内部会出现大小不同的孔隙率差值,酸性溶液的浓度越高,形成的孔隙率差值越小。溶蚀砂岩的速率随酸性溶液浓度的增大而增大,pH 值为 1 的硫酸溶液溶蚀砂岩后,岩样下表面位置的孔隙率为 2.803%,pH 值为 3 的硫酸溶液溶蚀砂岩后,岩样下表面位置的孔隙率为 2.063%。

3)砂岩渗透深度随孔隙率的增大而增大,变化速率先快后慢,最后趋于稳定。pH 值为 1、3 的硫酸溶液的渗透深度分别为 4.23、3.97 mm,单轴压缩试验中渗透深度的试验值分别为 4.54、3.96 mm,说明基于 Boltzmann 方程构建的渗流模型对模拟砂岩受酸腐蚀过程具有较好的适用性。

### 参考文献:

[1] 夏磊,顾欢达. 酸雨对河道淤泥气泡混合土工程性质的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 76-84.  
XIA L, GU H D. Influence of acid rain on engineering properties of foamed light soil with river sludge [J].

Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2018, 40(6): 76-84. (in Chinese)

[2] 黄瑞, 咎成, 龙威, 等. 数字岩心三维可视化技术发展与应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(5): 186.  
HUANG R, ZAN C, LONG W, et al. Development and application of digital core 3D visualization technology [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(5): 186.

[3] ØREN P E, BAKKE S. Reconstruction of Berea sandstone and pore-scale modelling of wettability effects [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 39(3/4): 177-199.

[4] OKABE H, BLUNT M J. Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-point statistics [J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 70(6): 066135.

[5] 张挺, 卢德唐, 李道伦. 基于二维图像和多点统计方法的多孔介质三维重构研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(3): 271-277.  
ZHANG T, LU D T, LI D L. A method of reconstruction of porous media using a two-dimensional image and multiple-point statistics [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(3): 271-277. (in Chinese)

[6] 张丽, 孙建孟, 孙志强, 等. 多点地质统计学在三维岩心孔隙分布建模中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 105-109.  
ZHANG L, SUN J M, SUN Z Q, et al. Application of multiple-point geostatistics in 3D pore structure model reconstruction [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(2): 105-109. (in Chinese)

[7] 赵秀才. 数字岩心及孔隙网络模型重构方法研究[D]. 山东 青岛: 中国石油大学, 2009.  
ZHAO X C. Numerical rock construction and pore network extraction [D]. Qingdao, Shandong: China University of Petroleum, 2009.

[8] FAN D, PHAN A, STRIOLO A. Accurate permeability prediction in tight gas rocks via lattice Boltzmann simulations with an improved boundary condition [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 73: 103049.

[9] 朱益华, 陶果. 顺序指示模拟技术及其在 3D 数字岩心建模中的应用[J]. 测井技术, 2007, 31(2): 112-115.  
ZHU Y H, TAO G. Sequential indicator simulation



- technique and its application in 3D digital core modeling [J]. *Well Logging Technology*, 2007, 31(2): 112-115. (in Chinese)
- [10] ZHANG L, JING W L, YANG Y F, et al. The investigation of permeability calculation using digital core simulation technology [J]. *Energies*, 2019, 12(17): 3273.
- [11] 刘洋, 王春生, 孙启冀, 等. 低渗砂岩储层数字岩心构建及渗流模拟 [J]. *断块油气田*, 2017, 24(6): 817-821.
- LIU Y, WANG C S, SUN Q J, et al. Digital core construction and seepage simulation of low permeability sandstone reservoir [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2017, 24(6): 817-821. (in Chinese)
- [12] 孙泽. 基于三维 CT 扫描图像的致密砂岩孔隙数据提取方法 [J]. *华北科技学院学报*, 2020, 17(1): 6-13.
- SUN Z. A method of extracting pore data of tight sandstone based on 3D CT scanning image [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2020, 17(1): 6-13. (in Chinese)
- [13] 李江涛, 汪志明, 魏建光, 等. 基于格子玻尔兹曼和有限差分方法的页岩气升尺度渗流模拟 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(3): 144-151.
- LI J T, WANG Z M, WEI J G, et al. Percolating simulation of the shale gas upscaling based on lattice Boltzmann and finite difference methods [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(3): 144-151. (in Chinese)
- [14] QIU L, ZHOU G, ZHANG W Z, et al. Simulations on the micro-seepage rules of gas and water based on micro-CT/CFD and the related contrastive analysis [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(17): 1-19.
- [15] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- HE Y L, WANG Y, LI Q. Lattice Boltzmann method: theory and applications [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [16] 唐明明, 卢双舫, 辛盈, 等. 基于格子玻尔兹曼方法的致密砂岩驱替模拟 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(2): 10-19.
- TANG M M, LU S F, XIN Y, et al. Displacement of tight sandstone based on lattice Boltzmann method [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(2): 10-19.
- [17] 霍润科. 酸性环境下砂浆、砂岩材料的受酸腐蚀过程及其基本特性劣化规律的试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- HUO R K. Experimental research on progressive and deteriorative characteristics of sandstone and mortar materials subjected to hydrochloric acid corrosion [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.

(编辑 黄廷)