**文章编号:**1007-9629(2022)02-0124-07

# 模袋混凝土干湿-冻融侵蚀孔结构的分形特征

孙浩然1, 邹春霞1,\*, 薛慧君1, 赵 泉2, 武 军2

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古呼和浩特 010018;2.内蒙古河套灌区乌拉特灌域管理局,内蒙古巴彦淖尔 014400)

摘要:为探究干湿-冻融循环作用下模袋混凝土损伤特征,基于扫描电镜(SEM),结合差分盒维数法,计算得到了其分形维数的微观损伤演化特征;又基于核磁共振试验(NMR)的T2谱计算了孔隙体积的分形维数,发现孔隙结构具有分形特征,并推导了孔隙度、渗透率与分形维数之间的数学关系;进一步,结合分形理论,以相对动弹性模量为损伤指标,建立了基于小波变换回归估计的模袋混凝土干湿-冻融损伤模型.所建立的损伤模型能够很好地表征渗透率与相对动弹性模量之间的函数关系,说明分形维数能够作为损伤参量用以评估模袋混凝土的抗干湿-冻融性能.分形维数将模袋混凝土的微观特征进行了量化,建立了其微观和宏观损伤的联系,研究结果可为模袋混凝土衬砌干湿-冻融损伤定量描述提供依据.

关键词:分形维数;模袋混凝土;干湿-冻融循环;扫描电镜;核磁共振;小波变换 中图分类号:TU528.01 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.003

## Fractal Characteristics of Dry-Wet and Freeze-Thaw Erosion Pore Structure of Mold-Bag Concrete

SUN Haoran<sup>1</sup>, ZOU Chunxia<sup>1,\*</sup>, XUE Huijun<sup>1</sup>, ZHAO Quan<sup>2</sup>, WU Jun<sup>2</sup>

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Urad Irrigation Management Bureau, Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, Bayannaoer 014400, China)

**Abstract:** In order to explore the damage characteristics of mold-bag concrete under dry-wet and freeze-thaw cycles, based on the scanning electron microscope(SEM) test, the fractal dimension of the damage evolution characteristics was calculated by the box-counting methods. The fractal dimension of the pore volume was calculated by the nuclear magnetic resonance(NMR) test. The mathematical relationship was established between the porosity, permeability, and the fractal dimension. Furthermore, based on the fractal theory, using relative dynamic elastic modulus as damage index, the dry-wet and freeze-thaw damage model of concrete based on wavelet transform regression estimation can characterize the functional relationship between permeability and relative dynamic elastic modulus. It shows that the fractal dimension can be used as a damage parameter to evaluate the dry-wet and freeze-thaw resistance of concrete. The fractal dimension quantifies the microscopic characteristics of concrete and establishes the relationship between micro- and macro-damage. The results can provide a basis for the quantitative description of dry-wet and freeze-thaw damage of mold-bag concrete lining.

Key words: fractal dimension; mold-bag concrete; dry-wet and freeze-thaw cycle; SEM; NMR; wavelet transform

第一作者:孙浩然(1995—),男,天津静海人,内蒙古农业大学硕士生.E-mail:sunhaoran199508@163.com

通讯作者:邹春霞(1975—),女,内蒙古巴彦淖尔人,内蒙古农业大学教授,硕士生导师,博士.E-mail:anna-zcx@163.com

收稿日期:2020-10-31;修订日期:2021-01-20

基金项目:内蒙古自治区水利科研专项项目(NSK2016-S11);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2020BS05008);内蒙古农业大学引进 优秀博士人才科研启动资助项目(NDYB2018-40)

内蒙古河套灌区模袋混凝土衬砌常因季节性 冻融和干湿交替而引起局部和大面积开裂、破坏等 问题,严重影响其使用寿命和渠系建筑物的输水效 率.研究发现,干湿-冻融耦合作用所致混凝土表 面开裂、破坏等情况比单纯的冻融或干湿作用更为 严重.当混凝土的相对动弹性模量达到相同的损伤 度时,干湿-冻融耦合下损伤速率最快[1].这种损伤 关系不是两者的简单叠加,而是一种超叠加效应关 系,与混凝土组成和结构特征、干湿-冻融循环制 度等因素有关.混凝土材料是一种具有复杂结构的 复合材料体系,孔隙结构对其耐久性有着重要影 响.将扫描电镜(SEM)和核磁共振(NMR)技术应 用在混凝土工程中,有助于获得混凝土微观结构特 征,为深入研究混凝土损伤情况提供了一种有效途 径.而如何定量描述干湿-冻融耦合作用下的孔隙 状态变化规律是研究模袋混凝土耐久性能亟待解 决的问题.

分形理论作为研究物质不规则性和复杂现象的 学科,与混凝土内部复杂的孔隙结构变化具有良好 的契合性.近年来,许多学者尝试应用分形理论来研 究混凝土孔结构变化.余志龙等<sup>[2]</sup>应用SEM研究发 现分形维数能够表征混凝土的微观结构;樊水龙<sup>[3]</sup>研 究了在干湿循环下蚀变花岗岩的损伤程度与分形维 数之间的关系,通过分形理论将SEM图像从定性分 析变为定量描述.张超谟等<sup>(4)</sup>进行了基于核磁共振 T<sub>2</sub> 谱分布的储层岩石孔隙分形结构的研究.Jin 等<sup>[5]</sup>基于 分形理论发现气泡分布对混凝土抗冻性有重要影响. 分形理论在混凝土工程中的应用显示出分形维数具 有表征混凝土孔隙结构变化的能力.

本文总结前人的研究成果,将分形维数作为固 定参数构建模袋混凝土干湿-冻融损伤模型.以分形 维数的方法表征其内部损伤,探究不同维度下分形 维数间的关联性.基于Coates模型<sup>[6]</sup>,计算出混凝土 孔隙度、渗透率与分形维数间的数学关系.结合小波 变换的回归估计,得到相对动弹性模量与渗透率的 回归方程,提出以相对动弹性模量和分形维数为损 伤指标的干湿-冻融损伤模型.

## 1 试验

#### 1.1 试验材料

水泥采用蒙西P·O 42.5R 硅酸盐水泥;细骨料 和粗骨料均取自巴彦淖尔市乌拉特前旗九公里料 场;粉煤灰采用包头电厂的Ⅱ级粉煤灰;硅粉采用巴 彦淖尔市乌拉特前旗玉石加工厂的固体废弃料,经 研磨处理后满足混凝土试验要求;外加剂采用 YE-NGX 萘系高效减水剂;拌和水采用普通自来水; 干湿-冻融循环用水取自巴彦淖尔市乌拉特前旗的 黄河水.模袋混凝土的配合比见表1.

表1 模袋混凝土的配合比 Table 1 Mix proportion of mold-bag concrete

							kg/m <sup>3</sup>
Concrete	Cement	Fly ash	Silica fume	Coarse aggregate	Fine aggregate	Water	Admixture
JZS	410.0	0	0	910.0	847.0	205.0	12.3
F10S8	336.2	41.0	32.8	910.0	847.0	205.0	12.3
F20S4	311.6	82.0	16.4	910.0	847.0	205.0	12.3

#### 1.2 试验方法

干湿-冻融循环试验试件为标准养护后的 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体.根据内蒙古 河套灌区气候特征和农业灌溉规律,选择干湿-冻融 循环制度为5次干湿循环、25次冻融循环为1次干 湿-冻融循环.首先,将试件放入(55±5)℃烘箱中烘 干11h后冷却1h,然后置于黄河水中浸泡12h为1 个干湿循环.5次干湿循环后,将试块放入快速冻融 机中进行25次冻融循环,此为1个干湿-冻融循环. 重复做8次干湿-冻融循环,每次干湿-冻融循环结 束后测量试件的相对动弹性模量.分别在0、3、5、8次 干湿-冻融循环结束时,测定混凝土微观结构形貌和 孔隙特征.采用S-4800型扫描电子显微镜观测试件 微观结构形貌,不同干湿-冻融循环次数(*n*)的SEM 样品取自模袋混凝土内部的同一位置.采用 MesoMR23-60型核磁共振仪分析混凝土孔隙特征, 用金刚钻取芯机钻芯取样,尺寸为φ48×50 mm,真 空饱水后开展核磁共振试验.

#### 2 理论方法

#### 2.1 SEM分形维数计算方法

通过 SEM 得到模袋混凝土干湿-冻融的微观图 像,一方面可以直接观察其表面的结构和形态特征, 另一方面可以利用分形维数将定性描述转为定量分 析,以便揭示其损伤演变规律.计算图像分形维数的 方法较多,如差分盒维数法、灰度插值法、双毯法 等<sup>[7,8]</sup>.本研究选择差分盒维数法对经历不同干湿-冻 融循环次数试件的 SEM 图像进行分形分析.运用

将式(3)两边取对数得到近似分形几何算式:

2.3 基于小波变换的回归估计方法

结果与讨论

3.1 SEM 微观结构形貌的分形特性

3

 $\log S_{\rm V} = (3 - D_{\rm V}) \log T_2 + (D_{\rm V} - 3) \log T_{2\rm max}$  (4)

回归估计是在2组随机变量中找出关联,因此不存

在理想的、均匀分布的变量空间.在大多数情况下需要

对这种关联形式进行假定,即建立回归模型.小波变换

能够对时间(空间)频率进行局部化,通过伸缩平移运算

对信号逐步进行多尺度细化,最终达到高频处时间细 分、低频处频率细分的能自动适应时频信号分析的要求.

模袋混凝土的SEM图见图1.由图1可见:干湿-

冻融循环前试件微观结构呈鳞片状,存在部分不均

匀孔隙结构,但过渡较为均匀,此时有水化产物生

成;随着干湿-冻融循环次数n的增加,混凝土表面鳞 片消失,团絮状的粉煤灰受黄河水中硫酸根离子侵

蚀也逐渐消失,混凝土发生纤维化,表面由平整变得

不平整,裂隙增多;特别是在干湿-冻融循环8次后,

纤维状产物变细,局部发生断裂,表明干湿-冻融循

环对模袋混凝土造成不可逆的损伤.纤维状产物经 能谱(EDS)分析(见图2)发现含有Ca、Fe、Al和Si等 元素,证明该产物是钙矾石(AFt)<sup>[12]</sup>.进一步,通过X

射线衍射(XRD)分析(见图3)发现其主要成分为水

化硅酸钙(C-S-H)凝胶、SiO2和AFt.

Matlab软件计算 SEM 图像的分形维数,首先运用Otus 法®计算出图像的最佳阈值,然后对图像进行二值化处 理,将图像转化为只含有0和1的矩阵.SEM图像的像素 尺寸逐渐减小,其对应的盒子累积个数相应增加.当盒 子边长 $\varepsilon$ 趋于0时,理论上盒子个数 $N(\varepsilon)$ 趋于无穷.对 $\varepsilon$  $\pi N(\epsilon)$ 分别取对数,求出 ln  $N(\epsilon)$ 对 ln  $\epsilon$ 的斜率,其斜率的 负值便是该分形图像的计盒维数D<sub>s</sub>,计算式如下<sup>[10]</sup>:

$$D_{\rm s} = -\lim_{\epsilon \to 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon} \tag{1}$$

#### 2.2 NMR分形维数计算方法

通过NMR得到模袋混凝土的微观孔隙结构特 征,针对其特征参数计算得到的分形维数可定量反 映孔隙结构状态.本研究根据NMR的T2谱曲线特点 推导出分形维数算法,并依据该算法分析不同孔隙 结构的分形特征.混凝土中孔隙数目N满足下式[11]:

$$N = \int_{r}^{r_{\text{max}}} P(r) dr = \alpha r^{-D_{\text{v}}}$$
(2)

式中:r为孔隙半径;rmax为孔隙半径最大值;P(r)为孔 隙分布密度函数;α为修正因子;Dv为孔隙体积的分 形维数.

此时核磁共振 T₂谱的分形算式为:

$$S_{\rm V} = \left(\frac{T_{\rm 2max}}{T_2}\right)^{D_{\rm V}-3} \tag{3}$$

式中:T2为弛豫时间;T2max为最大弛豫时间;Sv为横向弛 豫时间小于T。时孔隙累积体积占总孔隙体积的比值.



(a) n=0 times



(b) n=3 times





图1 模袋混凝土的 SEM 图 Fig. 1 SEM micrographs of mold-bag concrete



Fig. 2 EDS spectrum of fibrous products



SiO<sub>2</sub>

图3 纤维状产物的XRD图谱 Fig. 3 XRD pattern of fibrous products

模袋混凝土的 SEM 二值化图像见图 4. 利用图 4 得到二值化阈值及分形维数 D<sub>s</sub>,结果见表 2. 由表 2 可见:SEM 图像的分形维数精度 R<sup>2</sup>较高,能够较好 地反映图像的非线性程度.

对 SEM 图中反映的损伤特征进一步定量分析, 干湿-冻融循环 8次后部分纤维状产物发生断裂,分 形维数随之增大.干湿-冻融循环作用后模袋混凝土



图 4 侯衮仳礙工的SEM \_\_\_\_\_ 但化图像 Fig. 4 SEM binary images of mold-bag concrete

表 2 SEM 二值化图像的分形维数结果 Table 2 Results of fractal dimension from SEM binary images

		JZS			F10S8		F20S4		
n/times	Binarization threshold	$D_{\rm S}$	$R^2$	Binarization threshold	$D_{\rm S}$	$R^2$	Binarization threshold	$D_{\rm S}$	$R^2$
0	0.5333	1.7463	0.999	0.4980	1.6824	0.998	0.3843	1.6803	0.998
3	0.5294	1.7588	0.998	0.4353	1.7435	0.998	0.3882	1.7023	0.999
5	0.4667	1.7612	0.998	0.427 5	1.7731	0.999	0.4078	1.7532	0.998
8	0.4549	1.7647	0.998	0.6078	1.7924	0.998	0.4118	1.7948	0.998

#### 3.2 模袋混凝土的孔隙结构及其分形特征

#### 3.2.1 核磁共振孔隙结构

核磁共振试验可得到干湿-冻融循环作用下模 袋混凝土的孔隙结构变化,T2谱图像中的弛豫时间 与孔隙半径呈正相关,孔隙数量与峰面积相关.T2谱 弛豫时间越长,则孔隙半径越大,孔隙水自由度越 大,束缚流体饱和度越小,反之相反<sup>[13]</sup>.弛豫时间和孔 隙参数的关系可利用下式表示:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \tag{5}$$

式中: ρ为与材料性质有关的弛豫强度; S为孔隙的表面积; V为孔隙体积.

根据核磁共振  $T_2$ 谱计算孔隙半径,将模袋混 凝土的孔径划分为 $< 0.1 \,\mu$ m、 $0.1 \sim 1 \,\mu$ m、 $1 \sim 10 \,\mu$ m、 $> 10 \,\mu$ m这4个部分,试件JZS、F10S8、F20S4各区间 的孔隙分布如图5所示.从图5可以看出:随着干湿-冻融循环次数的增加,微孔呈增多趋势; $0.1 \sim 1 \,\mu$ m孔 隙逐渐增多;而 $1 \sim 10 \,\mu$ m孔隙逐渐减少;试件F20S4 干湿-冻融循环8次后,在大孔区间(>10 μm)内首 次出现第3个波峰.

的微观维数发生了变化,即分形维数随着干湿-冻融

循环次数的不断增加而规律性增大,分形维数增大

定量地表征了模袋混凝土内部裂隙、孔隙、构造层理 等不规则性受干湿-冻融侵蚀作用趋于复杂化,混凝

土损伤加重,耐久性能下降.同时,不同配合比模袋 混凝土经历干湿-冻融循环作用后,其分形维数增加

幅度和速度与其组成成分和内部结构有关.

## 3.2.2 基于 NMR 技术的分形维数

将核磁共振 T<sub>2</sub>谱对应的孔隙半径作为试验数据 来计算孔隙体积的分形维数.在式(4)中,横向弛豫 时间 T<sub>2</sub>谱双曲线存在2个不同的直线阶段.因此可由 式(4)的斜率求得小于临界弛豫时间的分形维数 D<sub>Vmin</sub>和大于临界弛豫时间的分形维数D<sub>Vmax</sub>,结果如 表3所示.

孔隙结构分布决定核磁共振分形维数的大 小<sup>[14]</sup>.混凝土中微孔大多与比表面积相关,而中孔、 大孔更多与孔隙体积相关.从图5和表3可以看出, 与孔隙体积呈更多相关性的中孔、大孔分形维数逐 渐增加.孔隙水结冰融化的过程,相当于对孔壁不 断地加荷卸荷.混凝土内部的微孔逐渐增多且部分 孔隙转变为大孔隙,大孔隙内部大多为重力水,冻结 过程中率先结冰,使渗透压力和静水压力的冻胀作 用逐渐加大<sup>[15]</sup>.中孔、大孔分形维数的变化,反映了



图 5 试件 JZS、F10S8、F20S4 各区间孔隙分布 Fig. 5 Pore distribution in different intervals of JZS, F10S8, F20S4 specimens

表 3 基于核磁共振(NMR)计算的分形维数 Table 3 Fractal dimension calculated based on nuclear magnetic resonance method

	JZS			F10S8				F20S4				
n/ times	$D_{\mathrm{Vmin}}$	$R^2$	$D_{\mathrm{Vmax}}$	$R^2$	$D_{\mathrm{Vmin}}$	$R^2$	$D_{\mathrm{Vmax}}$	$R^2$	$D_{\mathrm{Vmin}}$	$R^2$	$D_{\mathrm{Vmax}}$	$R^2$
0	2.7600	0.89	2.6352	0.91	2.7700	0.86	2.6966	0.84	2.704 0	0.75	2.6980	0.90
3	1.8145	0.87	2.7058	0.91	1.4100	0.90	2.7577	0.89	1.4680	0.89	2.7100	0.90
5	1.6470	0.78	2.7620	0.89	0.7230	0.83	2.7719	0.76	0.8710	0.89	2.7200	0.90
8	0.0250	0.83	2.8040	0.90	0.2100	0.87	2.8448	0.87	0.2310	0.87	2.8250	0.83

干湿-冻融循环作用下模袋混凝土内部的损伤过 程.图6为欧式几何变换后不同维度下的分形维数. 由图6可见,经变换后SEM图像的分形维数与核磁 共振的分形维数相差不大,最大相差1.2%,平均差 距为0.8%.说明不同维度下的分形维数具有一定的 关联性.



### 3.3 体积孔隙度、渗透率与分形维数间的关系

欧式几何中n维物体在截面上相交为n-1维, 将欧式几何应用到分形几何中,分形体与截面相交, 相交后分形体减小1维.以D<sub>L</sub>、D<sub>s</sub>、D<sub>v</sub>分别从截线、平 面、空间上表示分形体的维数,得到了分形维数表示 的截线、平面、空间的数学关系<sup>[16]</sup>:

$$D_{\rm v} = D_{\rm s} + 1 = D_{\rm L} + 2 \tag{6}$$

根据式(1)、(4)及面孔隙度、体积孔隙度的物理 意义,得到分形维数与面孔隙度及体积孔隙度之间 的关系:

$$\tau = R\left(\frac{D_{\rm v}}{1+D_{\rm s}}\right)\omega\tag{7}$$

式中: τ 为体积孔隙度; R 为差维因子, 利用试验数据 回归拟合后得到 R=1.05; ω 为面孔隙度, 等于 SEM 图像内孔隙面积与检测平面面积的比值.

采用Coates模型<sup>[6]</sup>计算与混凝土水饱和度、孔隙 度相关的混凝土渗透率:

$$K = \left(\frac{\tau}{C}\right)^4 \left(\frac{F}{B}\right)^2 \tag{8}$$

式中:K为渗透率;C为调整系数;F为自由水饱和度; B为束缚水饱和度.

将式(7)代入式(8),得到渗透率与分形维数、面 孔隙度、水饱和度的关系:

$$K = \left(\frac{N\omega D_{\rm v}}{C + CD_{\rm s}}\right)^4 \left(\frac{F}{B}\right)^2 \tag{9}$$

将试验所得混凝土水饱和度、分形维数等数据 分别代入式(7)、(9),计算出混凝土的体积孔隙度和 渗透率,计算值与实测值的比较见表4、5.

表4、5显示,基于分形维数得到的体积孔隙度 和渗透率计算值与实测值相差不大,误差均在6% 左右,说明所建立的分形维数与混凝土体积孔隙度 和渗透率的数学模型是合理的.

表 4 体积孔隙度计算值与实测值的比较 Table 4 Comparison of calculated and measured volume porosity

						0/0	
n/times —	J	ZS	F1	.0S8	F20S4		
	Theoretical	Experimental	Theoretical	Experimental	Theoretical	Experimental	
0	0.060	0.064	0.068	0.072	0.093	0.098	
3	0.113	0.120	0.128	0.136	0.117	0.124	
5	0.360	0.381	0.364	0.385	0.349	0.369	
8	0.448	0.474	0.453	0.480	0.488	0.516	

#### 表 5 渗透率计算值与实测值的比较 Table 5 Comparison of calculated and measured permeability

JZS F10S8 F20S4 n/times Theoretical Experimental Theoretical Experimental Theoretical Experimental 4.13 $\times 10^{-5}$  $6.61 \times 10^{-5}$  $5.00 \times 10^{-4}$ 0 0 0 0 3 0.00640.00500.00700.0060 0.02700.0240 5 0.4250 0.3945 0.2150 0.1990 0.3800 0.3530 8 0.4790 0.4556 0.3996 0.3790 0.7280 0.6910

#### 3.4 基于小波变换的回归估计

本研究选择干湿-冻融循环下模袋混凝土的相 对动弹性模量和渗透率进行回归估计.借助Matlab 软件的小波工具对相对动弹性模量所对应的渗透率 进行小波分解,分解水平(level)为3,进行4层分解, 得到细节系数和近似函数.细节系数包含了试验过 程中由于噪声或仪器本身引起的误差.试验测得的 模袋混凝土相对动弹性模量见表6.

表 6 模袋混凝土相对动弹性模量 Table 6 Relative dynamic elastic modulus of mold-bag concrete

			70
n/times	JZS	F10S8	F20S4
0	100.00	100.00	100.00
3	82.27	81.47	79.06
5	76.22	68.89	70.36
8	64.68	62.75	51.16

依据近似函数,建立基于小波变换的回归方程:

$$y = A e^{\frac{-(x-56.17)^2}{375.38}} - 0.03$$
(10)

式中:y为渗透率;x为相对动弹性模量;A为相关 系数。

将式(9)代入式(10),得到相对动弹性模量和分 形维数、饱和度之间的关系:

$$\left(\frac{N\omega D_{\rm V}}{C+CD_{\rm S}}\right)^4 \left(\frac{F}{B}\right)^2 = A \,{\rm e}^{\frac{-(x-56.17)^2}{375.38}} - 0.03$$
 (11)

将基于小波变换回归估计建立的相对动弹性模 量与渗透率的回归方程(式(11))和试验结果进行比 较,如图7所示.由图7可见,该回归方程与试验结果 基本吻合,说明依据分形理论,以相对动弹性模量为 损伤指标建立的干湿-冻融损伤模型是合理的.



Fig. 7 Comparison between regression equation and experimental results

## 4 结论

(1)分形维数可以定量描述不同干湿-冻融循环次数下模袋混凝土的微观损伤情况.结合扫描电镜和核磁共振试验结果,分形维数随着模袋混凝土干湿-冻融循环次数的增加而增大,表明模袋混凝土的损伤程度体现为分形维数的增大.

(2)基于核磁共振 T<sub>2</sub>谱,建立了横向弛豫时间的 分形公式,根据 T<sub>2</sub>谱分布特征计算出的分形维数 D<sub>v</sub> 能够表征干湿-冻融循环下模袋混凝土内部孔隙的 演变规律.并将不同维度下的分形维数通过欧式几 何的概念建立联系,发现扫描电镜下二维图像的分

129

 $\mu m^2$ 

形维数与核磁共振下三维孔隙结构的分析维数具有 很高的关联性,其平均差距为0.8%.

(3)利用分形理论将不同试验结果联系起来,建 立了模袋混凝土体积孔隙度、渗透率与分形维数的 数学关系,计算值与试验结果基本吻合,可以预测混 凝土的孔隙度和渗透率.

(4)引入小波变换的回归估计,建立了相对动弹 性模量与渗透率的回归方程,推导出以分形理论为 基础的损伤模型,为深入研究模袋混凝土干湿-冻融 损伤机理奠定了基础.

#### 参考文献:

- [1] 刘燕,王泽坤,李忠献,等.冻融-干湿耦合循环下粉煤灰混凝 土损伤度分析[J].混凝土,2020(5):32-35,39.
   LIU Yan, WANG Zekun, LI Zhongxian, et al. Analysis of the damage degree of fly ash concrete under freeze-thaw-dry-wet coupling cycle[J]. Concrete, 2020(5):32-35, 39.(in Chinese)
- [2] 余志龙,赵利军,孟凡皓.基于MATLAB对混凝土SEM分形 维数的计算[J].水泥工程,2014(5):59-62.
  YU Zhilong, ZHAO Lijun, MENG Fanhao. Calculating SEM fractal dimension of concrete by MATLAB [J]. Cement Engineering, 2014(5):59-62.(in Chinese)
- [3] 樊水龙.基于SEM的干湿循环蚀变花岗岩分形特征与力学特 性演化规律[J].长江科学院院报,2020,37(3):102-107.
   FAN Shuilong. Evolution of fractal and mechanical properties of cyclic dry-wet altered granite based on SEM [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(3): 102-107.(in Chinese)
- 【4】 张超谟,陈振标,张占松,等.基于核磁共振T<sub>2</sub>谱分布的储层 岩石孔隙分形结构研究[J].石油天然气学报,2007,29(4):80-86, 166-167.
  ZHANG Chaomo, CHEN Zhenbiao, ZHANG Zhansong, et al. Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMR T<sub>2</sub> distribution[J].Journal of Oil and Gas Technology, 2007,29(4):80-86, 166-167.(in Chinese)
- [5] JIN S S, ZHANG J X, HUANG B S. Fractal analysis of effect of air void on freeze-thaw resistance of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47:126-130.
- [6] 薛慧君,申向东,邹春霞,等.基于NMR的风积沙混凝土冻融 孔隙演变研究[J].建筑材料学报,2019,22(2):199-205.
   XUE Huijun, SHEN Xiangdong, ZOU Chunxia, et al. Freeze-thaw pore evolution of aeolian sand concrete based on nuclear magnetic resonance[J].Journal of Building Materials,

2019, 22(2):199-205.(in Chinese)

- [7] 张乐.基于CT图像和改进的差分盒维数法的混凝土细观损伤 研究[D].西安:西安理工大学,2017.
   ZHANG Le. Research on concrete mesoscopic damage based on CT image and improved difference box dimension method[D].
   Xi'an;Xi'an University of Technology, 2017.(in Chinese)
- [8] 毛灵涛,连秀云,郝丽娜.基于数字体图像三维裂隙的分形计 算及应用[J].中国矿业大学学报,2014,43(6):1134-1139.
  MAO Lingtao, LIAN Xiuyun, HAO Lina. The fractal calculation of 3D cracks based on digital volumetric images and its application [J].Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(6):1134-1139.(in Chinese)
- [9] 申科,付厚利,秦哲,等.花岗岩电镜扫描图像二值化阈值对分 形维数影响的研究[J].地质与勘探,2019,55(1):87-94.
   SHEN Ke, FU Houli, QIN Zhe, et al. The influence of the binarization threshold on fractal dimension of SEM images for granite[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(1):87-94.(in Chinese)
- [10] ROLPH S. Fractal geometry: Mathematical foundations and applications[J]. Mathematical Gazette, 1990, 74(469):288-317.
- PFEIFER P, AVNIR D. Chemistry in noninteger dimensions between two and three. I. Fractal theory of heterogeneous surfaces
   J. Journal of Chemical Physics, 1983, 79(7):3558-3565.
- [12] JENNINGS H M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1):101-116.
- [13] 周科平,李杰林,许玉娟,等. 冻融循环条件下岩石核磁共振 特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4):731-737.
  ZHOU Keping, LI Jielin, XU Yujuan, et al. Experimental study on NMR characteristics in rock under freezing and thawing cycles
  [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4):731-737.(in Chinese)
- [14] 余旭东,康志宏,周磊,等.核磁共振技术在页岩孔隙表征中的 应用[J].煤炭技术,2018,37(5):129-131.
  YU Xudong, KANG Zhihong, ZHOU Lei, et al. Application of nuclear magnetic resonance in shale pore characterization[J].Coal Technology, 2018, 37 (5):129-131.(in Chinese)
- [15] 庞超明,王少华.泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响
  [J].建筑材料学报,2017,20(1):93-98.
  PANG Chaoming, WANG Shaohua. Void characterization and effect on properties of foam concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):93-98.(in Chinese)
- [16] 褚武扬.材料科学中的分形[M].北京:化学工业出版社,2004: 10-31.
  CHU Wuyang. Fractal theory in MSE[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:10-31.