

文章编号: 1007-9629(2024)08-0701-10

基于分形理论的古建筑青砖冻融损伤研究

吴安利^{1,2,3,*}, 刘坤¹, 郝负洪^{1,2,3}, 吴日根¹, 宣姣羽¹

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 研究了冻融循环作用下青砖的表观形貌、质量损失率、相对动弹性模量、抗压强度及孔结构的变化规律, 并结合分形理论建立了分形维数与抗压强度、孔隙率及抗冻性能的关系。结果表明: 随着经历冻融循环次数的增加, 青砖表面的小孔劣化为大孔, 然后逐渐延伸形成裂缝, 导致质量损失率不断增加, 相对动弹性模量和抗压强度均呈下降趋势; 经历冻融循环后青砖内部孔具有明显的分形特征, 其分形维数在 2.964 2~2.982 7 之间; 经历冻融循环后青砖的分形维数与抗压强度呈正相关, 与孔隙率呈负相关, 与抗冻性能具有高度的相关性; 分形维数可用于评价青砖微观孔结构的变化, 也可以反映经历冻融循环后孔结构对青砖宏观性能的影响; 研究结果可以为寒冷地区古建筑青砖的保护及耐久性损伤研究提供理论依据。

关键词: 古建筑青砖; 冻融循环; 分形维数; 孔结构; 损伤

中图分类号: TU522.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.005

Freeze-Thaw Damage of Ancient Architectural Blue Bricks Based on Fractal Theory

WU Anli^{1,2,3,*}, LIU Kun¹, HAO Yunhong^{1,2,3}, WU Rigen¹, XUAN Jiaoyu¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Research Center of Structure Inspection, Appraisal and Safety Assessment, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The apparent morphology, mass loss rate, relative dynamic elastic modulus, compressive strength and pore structure of blue bricks after freeze-thaw cycle were studied. The relationship between fractal dimension and compressive strength, porosity and frost resistance was established based on fractal theory. The results show that with the increase of freeze-thaw cycles, the small pores on the surface of the blue brick deteriorate into large pores and gradually extend into cracks, resulting in an increase in the mass loss rate, and a decrease in the relative dynamic elastic modulus and compressive strength. After freeze-thaw cycle, the internal pores of the blue brick have obvious fractal characteristics, and the fractal dimension is distributed between 2.964 2 and 2.982 7. The fractal dimension of blue brick after freeze-thaw cycle is positively correlated to compressive strength and negatively correlated to porosity, and its fractal dimension is also highly correlated with frost resistance. The fractal dimension can be used to evaluate the microscopic pore structure change of the blue brick, and can also reflect the influence of the complexity of the pore structure on the macroscopic properties of the blue brick after freeze-thaw cycle. The research results provide a basis for the protection and durability damage of ancient architectural blue bricks in cold regions.

Key words: ancient architectural blue brick; freeze-thaw cycle; fractal dimension; pore structure; damage

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2024-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12272190); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20220017, JY20230098); 内蒙古自治区草原英才项目

第一作者(通讯作者): 吴安利(1971—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 内蒙古工业大学副教授, 硕士生导师, 硕士. E-mail: m13948113028@163.com

古建筑是文化遗产的重要组成部分,是中华传统文化的重要代表.青砖是古建筑中使用数量较多、范围较广的材料,在漫长的岁月里经历了自然环境的侵蚀和人为破坏.冻融是导致寒冷地区古建筑青砖耐久性下降的重要原因之一.在寒冷环境的长期作用下^[1],古建筑结构的有效截面减小,承载力下降,其整体安全性和使用性受到了严重影响^[2-3].研究古青砖的冻融劣化机理,可以为古建筑的评估和保护修缮工作提供科学依据.

国内外学者研究了古青砖的物理力学性能^[4]、化学组成^[5]、矿物组成^[6]和修复方式^[7]等,研究成果主要集中在冻融^[8]、盐-冻^[9]和荷载-冻融^[10]等工况下青砖的冻融损伤.在宏观损伤方面,主要研究了冻融作用下青砖的质量、抗压强度、表观硬度和吸水率等性能^[4,8],探究了其内在的损伤机制及评价模型.在微、细观损伤方面,主要研究了材料孔隙的变化特征.结果表明,冻融后青砖的孔隙率升高,内部孔结构逐步由密实连结状态转为疏松颗粒分布状态,微观孔结构遭到了严重的破坏^[10-13].目前的研究多是通过建立多孔材料冻融过程中的数学模型来讨论冻融循环作用对砖石的破坏,认为砖的饱水程度与其冻害性能密切相关^[14].同时还考虑了砖的矿物组成和微结构对古建筑青砖抗冻性能和耐硫酸盐腐蚀性能的影响^[15].现有研究表明,孔结构是影响青砖宏观冻融损伤的关键因素^[16].

近年来,许多学者通过分形理论对材料孔结构的变化进行分析^[17-20],发现分形维数与材料的宏观性能密切相关^[21-24].通过引入分形理论来分析冻融后青砖孔结构的演化规律,可以在已有试验的基础上,直观地描述青砖的孔结构,深入探究冻融后青砖内在的破坏机理.

本文分析了冻融循环作用下青砖的宏观性能损伤及其孔隙率和孔径分布的变化特征;通过引入分形理论,建立了分形维数与抗压强度、孔隙率及抗冻性能的关系,探究了青砖宏观破坏和微观结构演化的关系,研究结果可以为寒冷地区古建筑青砖的保护及耐久性损伤研究提供理论依据.

1 试验

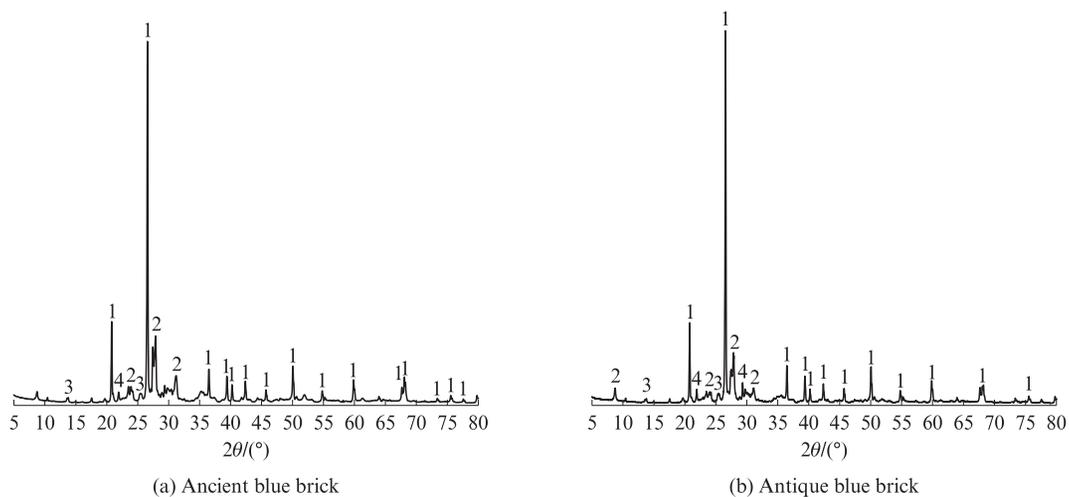
1.1 试验材料

由于古青砖十分珍贵且较难获取,故选取内蒙古呼和浩特市出售的仿古青砖作为试验材料,其主要原料为黏土,制作工艺和制作流程与古青砖相近.通过对比仿古青砖与内蒙古中部隆盛庄古镇古青砖的物理力学性能及矿物组成(质量分数)(见表1),发现古青砖与仿古青砖的密度、吸水率、孔隙率和抗压强度相近,且两者的矿物组成极其相似,都是以石英为主,同时还含有少量的钠长石、钙长石和钾长石等(见图1).因此,可利用仿古青砖代替古青砖进行古建筑青砖冻融循环作用下的损伤劣化性能研究.

表1 古青砖与仿古青砖的物理力学性能对比

Table 1 Comparison of physical and mechanical properties of ancient blue brick and antique blue brick

Type	Density/(g·cm ⁻³)	Water absorption(by mass)/%	Porosity(by volume)/%	Compressive strength/MPa
Ancient blue brick	1.62	18.94	9.51	7.73
Antique blue brick	1.74	17.42	6.24	11.23



1—Quartz; 2—Albite; 3—Potash feldspar; 4—Anorthite

图1 青砖的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of blue bricks

1.2 试验方法

冻融循环试验依据 WW/T 0049—2014《文物建筑维修基本材料 青砖》进行,试验设备采用 MNSY-2400L 型模拟自然环境下工程材料耐久性损伤试验系统.首先,将青砖试块置于 10~20 °C 水中浸泡 24 h,完成饱水后取出,用湿布擦去表面水分后放入试验箱中,试块间隔大于 20 mm,在 -15~-20 °C 下冰冻 3 h;然后,取出青砖,放入 10~20 °C 水中融化 2 h,即完成 1 次冻融循环.冻融循环次数(N)设定:0、15、30、45、60、75、90 次,共分为 7 组,每组 5 个试块,试块尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm.每经历 15 次冻融循环后测量 1 次试块的质量(m)、相对动弹性模量(E_r)和抗压强度(f_c).

采用上海纽迈牌 MesoMR-60S 型核磁共振仪测试青砖的孔结构,磁场强度为 (0.50 ± 0.08) T,仪器主频率为 21.3 MHz,仪器恒温 32 °C,磁体扫描范围 0~60 mm.采用钻头直径为 56 mm 的取芯机对青砖试块钻芯取样,再使用切割机将钻取的青砖圆柱体切割成 $\phi 50 \times 50$ mm 的青砖核磁试块.先将试块置于负压真空饱水仪中进行 24 h 真空负压饱水处理,然后用抹布擦拭试块表面,最后用塑料薄膜将试块包裹,以避免水分蒸发.

2 结果与分析

2.1 表观形貌

图 2 为青砖表观形貌的变化.由图 2 可知:冻融

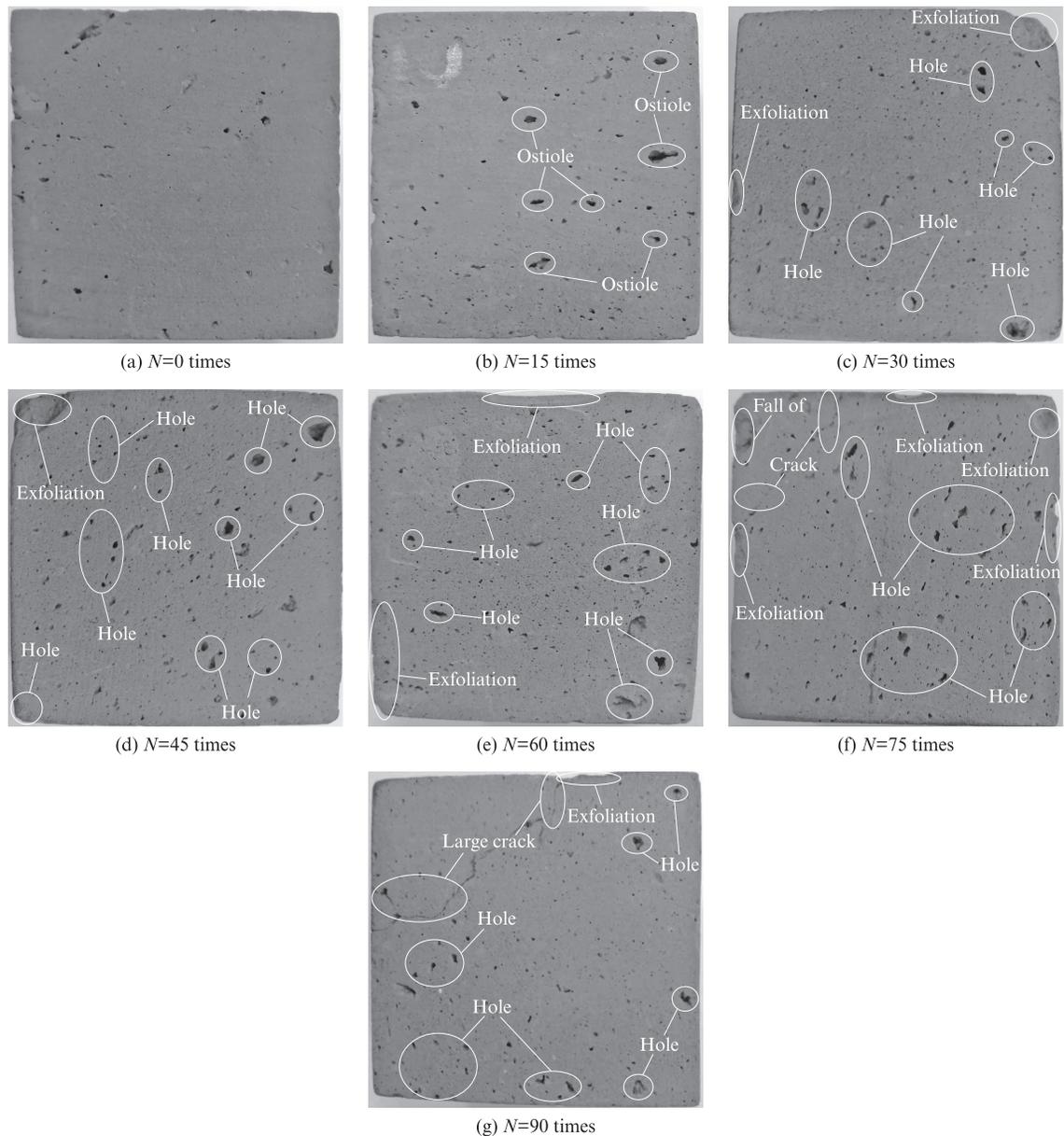


图 2 青砖表观形貌的变化
Fig. 2 Changes of appearance of blue brick

前青砖表面的孔洞较少,随着经历冻融循环次数的增加,青砖表面的孔洞逐渐增多,表面和边缘粉化剥落,尤其是在棱角部位;当 $N=30$ 次时,青砖表面出现粉化,棱角处有轻微剥落现象,这是由于青砖边缘较中心区域更易受到冻融循环作用,因而更容易发生冻融损伤;当 $N=60$ 次时,青砖表面的孔洞逐渐增多,表面酥碱、棱角边缘剥落并出现蜂窝麻面;当 $N=90$ 次时,青砖表面出现了宽度较大的裂缝,这是由于冻融循环过程中青砖内部的小孔逐渐发展成为微裂缝,并且在膨胀压的作用下不断扩展,直至出现显著

的膨胀变形,造成了青砖棱角的缺失及边缘的剥落.

2.2 质量损失率及单位面积质量损失率

通过引用张道明等^[25]冻融循环下古青砖的平均质量损失作为对照组(control group)数据,计算其质量损失率和单位面积质量损失率.表2为青砖与古青砖的质量损失对比.由表2可知:随着经历冻融循环次数的增加,2种青砖的质量损失和质量损失率均逐渐增加,单位面积质量损失和单位面积质量损失率均呈上升趋势,说明以仿古青砖的单位面积质量损失率能较好地表征青砖的冻融损伤程度.

表2 青砖与古青砖的质量损失对比

Table 2 Comparison results of mass loss of blue brick and ancient blue brick^[25]

N/ times	Mass loss/g		Mass loss rate/%		Mass loss per unit area/(g·cm ⁻²)		Mass loss rate per unit area/%	
	Antique brick	Control group	Antique brick	Control group	Antique brick	Control group	Antique brick	Control group
0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.564	0.013	0.270 0	0.290 0	0.022 56	0.000 18	0.500	0.135
30	0.328	0.020	0.427 1	0.600 0	0.013 12	0.000 27	0.291	0.207
45	0.667	0.027	0.746 0	0.780 0	0.026 68	0.000 36	0.592	0.280
60	1.035	0.027	1.242 0	0.890 0	0.041 40	0.000 36	0.919	0.280
75	0.781	0.043	1.622 0	1.270 0	0.031 24	0.000 58	0.693	0.445
90	1.132		2.158 0		0.045 28		1.000	

2.3 相对动弹性模量

相对动弹性模量的大小反映了冻融循环作用下青砖内部的损伤程度,内部损伤程度越大,相对动弹性模量的值越小.图3为青砖相对动弹性模量的变化.由图3可知:随着经历冻融循环次数的增加,青砖的相对动弹性模量逐渐降低,且下降速率先慢后快再变缓;当 $N=90$ 次时,青砖内部出现了明显的冻融损伤, $E_r=72.63\%$,较冻融前下降了27.37%.经历冻融循环作用后,青砖相对动弹性模量的变化与张雅

文等^[4]的研究结果较为相似,2种青砖的相对动弹性模量降低速率均是先快后慢.这是由于青砖相对动弹性模量的变化与自身的密实度密切相关,冻融后青砖的内部结构发生了改变,材料内部的密实度逐渐降低,需要更大的作用力才能使内部损伤增大,故青砖相对动弹性模量的损失速率逐渐变缓.

2.4 抗压强度

图4为青砖试块受压试验的破坏形态.由图4可见,青砖试块受压时出现了贯穿上下的裂缝.

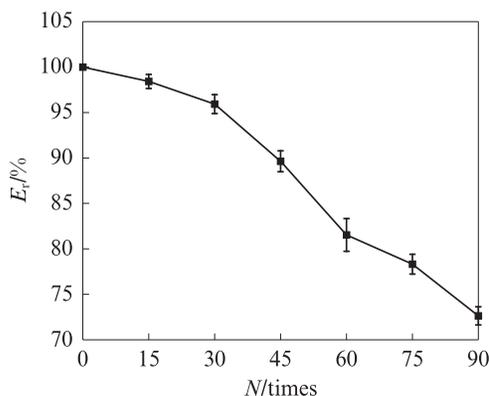


图3 经历不同冻融循环次数青砖相对动弹性模量的变化
Fig. 3 Changes of relative dynamic elastic modulus of blue brick with different freeze-thaw cycles

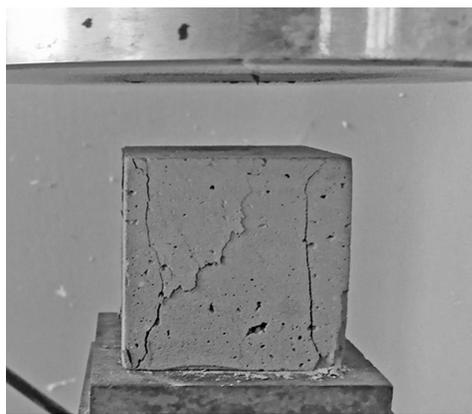


图4 青砖试块受压试验的破坏形态
Fig. 4 Failure morphology of blue brick block under pressure test

图5为青砖的抗压强度.由图5可见:随着经历冻融循环次数的增加,青砖的抗压强度和相对抗压强度均呈下降趋势;当 $N=30$ 次时,青砖的抗压强度和相对抗压强度均大幅下降,抗压强度下降到9.18 MPa,相对抗压强度下降到81.75%;当 $N=45$ 次时,青砖抗压强度和相对抗压强度的下降速率均增加;当 $N=90$ 次时,青砖的抗压强度为6.77 MPa,相对抗压强度下降到60.29%.根据郭国梁等^[3]的研究结果,仿古青砖与古青砖的抗压强度和相对抗压强度均随着经历冻融循环次数的增加不断降低,且降低趋势相近,说明以仿古青砖开展冻融后抗压强度的研究具有可靠性.

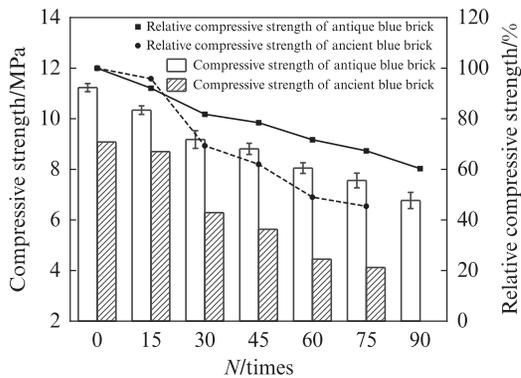


图5 青砖的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of blue brick

2.5 孔结构

2.5.1 T_2 谱的分布规律

T_2 谱分布能够反映孔隙的分布情况, T_2 值的大小能够代表孔隙的大小.图6为青砖的 T_2 谱.由图6可知:青砖冻融后的 T_2 谱分布曲线存在3个明显的峰值,第1波峰代表青砖内部的小孔,第2、3波峰分别代表青砖内部的中孔和大孔,并且第1波峰的信号幅度远高于第2、3波峰,表明青砖内部小孔的数量远高于中孔和大孔;随着经历冻融循环次数的增加,3个波峰的信号幅度不断升高,说明青砖内小孔、中孔和大孔的数量均逐渐增加.

T_2 谱峰面积的大小与其内部所含的流体数量成正比,冻融后青砖 T_2 谱面积的变化反映了青砖内部孔隙体积的变化.图7为青砖 T_2 谱的面积.由图7可见:3个峰的 T_2 谱面积均随着经历冻融循环次数的增加而增加,峰1的 T_2 谱面积增加速度最快且增加幅度最大,说明冻融后小孔的数量迅速增加;峰2、3的 T_2 谱面积缓慢增加,表明中孔和大孔的数量增加缓慢;经历90次冻融循环后,各峰的面积均有所增加,但峰1的 T_2 谱面积增加最多,说明小孔数量增加最多,表明冻融循环作用下的青砖主要以小孔损伤为主.

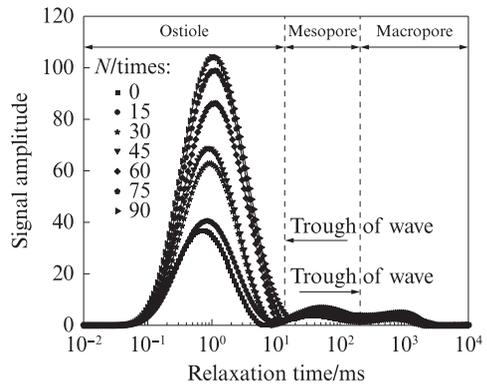


图6 青砖的 T_2 谱

Fig. 6 T_2 spectra of blue bricks

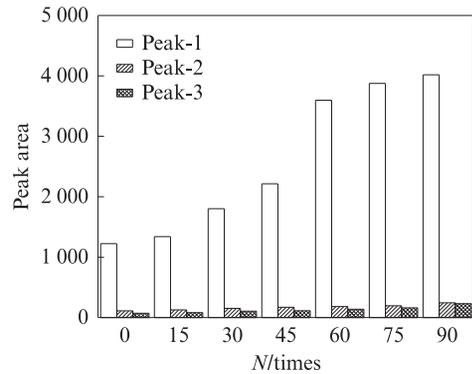


图7 青砖 T_2 谱的面积

Fig. 7 Area of T_2 spectra of blue brick

2.5.2 孔隙率

图8为青砖的孔隙率.由图8可见,青砖的平均孔隙率随着经历冻融循环次数的增加不断升高.将平均孔隙率上升过程划分为3个阶段:缓慢上升阶段、快速突变阶段和稳定增长阶段.第1阶段为0~15次冻融循环过程,由于初始冻融阶段孔隙率的变化不大,因此孔隙率上升缓慢.第2阶段为15~45次冻融循环过程,孔隙率先快速上升后缓慢上升,经历一定冻融循环次数后,青砖孔隙经过冻融作用的累积发生突变,平均孔隙率由冻融前的6.24%变为11.89%,增加了5.65%.第3阶段为45~90次冻融循

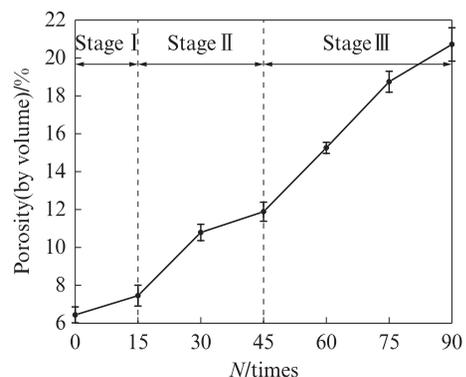


图8 青砖的孔隙率

Fig. 8 Porosity of blue brick

环过程,青砖内部孔隙吸收的水分趋于饱和,孔隙中的水分在低温时冻结成冰,冻胀力使得青砖内部孔隙体积膨胀,导致孔隙扩展、贯通.在常温水融化时,孔隙内冰融解成水,随着孔隙裂缝流动;当再次降温时,水冻结成冰,以此往复,导致孔隙率稳定增长.

2.5.3 孔径分布

参考吴中伟等^[26]对混凝土孔径大小的划分,孔径(r)在 $0.2\ \mu\text{m}$ 以下的毛细孔为无害、少害孔或有害孔,孔径在 $0.2\ \mu\text{m}$ 以上的为多害孔.图9为青砖的孔径分布.由图9可见:第1波峰处的孔径大小分布远远大于第2、3波峰处的孔径分布,青砖的孔径大小分布在 $3\times 10^{-4}\sim 300\ \mu\text{m}$ 之间;青砖的无害孔、少害孔和有害孔大部分在第1波峰范围内,多害孔主要分布在第2、3波峰内,无害孔、少害孔和有害孔的占比较大;3个波峰的峰值均随着经历冻融循环次数的增加逐渐升高,说明毛细孔和多害孔数量都呈递增趋势,表明在已有冻融循环的基础上,再次经历冻融循环后青砖内部所有孔隙的损伤劣化程度加剧.

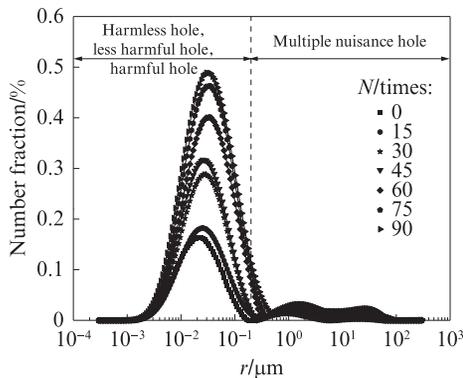


图9 青砖的孔径分布

Fig. 9 Pore distributions of blue bricks

图10为青砖孔隙半径分布的占比.由图10可见:孔径小于 $0.2\ \mu\text{m}$ 的无害孔、少害孔和有害孔的占比较高,占总孔隙量的 $84\%\sim 96\%$;孔径大于 $0.2\ \mu\text{m}$

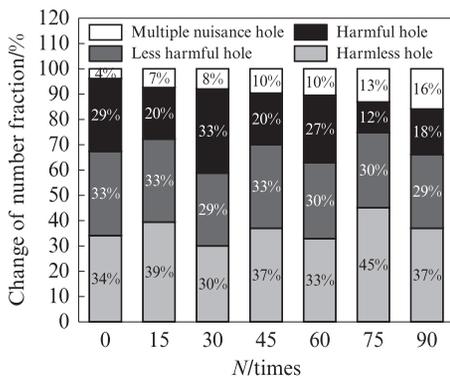


图10 青砖孔隙半径分布的占比

Fig. 10 Pore radius distribution ratios of blue bricks

的多害孔的占比较低,但随着经历冻融循环次数的增加,多害孔的占比逐渐增加,由4%增长到16%.随着经历冻融循环次数的增加,小孔径逐渐衍变成大孔径,大孔径继续受到冻融的作用,导致多害孔占比逐渐增加,冻融过程中青砖孔隙的孔径逐渐从毛细孔劣化为多害孔.

2.6 孔结构与抗压强度及抗冻性能关系

图11为青砖孔隙率与抗压强度的关系.由图11可见:青砖的抗压强度随着孔隙率的增加而减小,两者呈负相关,拟合系数 $R^2=0.9769$,说明孔隙率与抗压强度紧密关联;随着经历冻融循环次数的增加,孔隙率从6.24%上升到20.71%;青砖的抗压强度由11.23 MPa降低到6.77 MPa,降幅达到39.72%.孔隙率和抗压强度的变化表明,孔隙率越低,内部越密实,青砖的抗压强度和力学性能越好.随着经历冻融循环次数的增加,青砖的孔隙率不断增加,内部结构逐渐疏松,抗压强度逐渐降低.

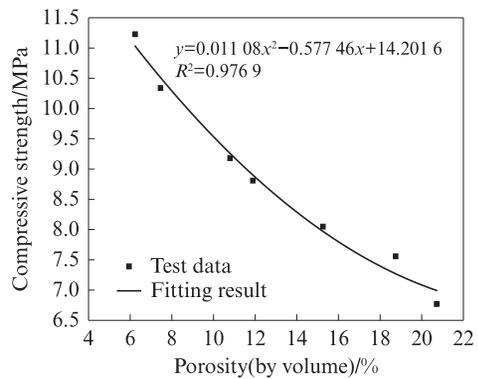


图11 青砖孔隙率与抗压强度的关系

Fig. 11 Relation between porosity and compressive strength of blue bricks

图12为青砖孔结构与抗冻性能的关系.

由图12(a)可见,青砖的质量损失率随着孔隙率的增加而增加,两者呈正相关,相关系数为0.9717.冻融循环过程中青砖内部孔隙发生了物理和化学变化,孔隙中的液态水变成固态冰,导致青砖内部的孔隙壁损伤增大,延伸至表面出现裂缝、剥落等现象,所以孔隙率的增长影响了青砖的质量损失率.

由图12(b)可见,相对动弹性模量随着孔隙率的增加而减少,两者呈负相关,相关系数为0.9552.冻融循环作用下青砖内部孔隙产生冻胀力,导致内部出现大量孔隙甚至产生裂纹,所以孔隙率的增加会影响青砖的相对动弹性模量.

综合来看,抗冻性能中质量损失率较相对动弹性模量与孔隙率的关联性更强.因此,青砖微观孔隙率的变化更能反映宏观抗冻性中质量损失率的变化.

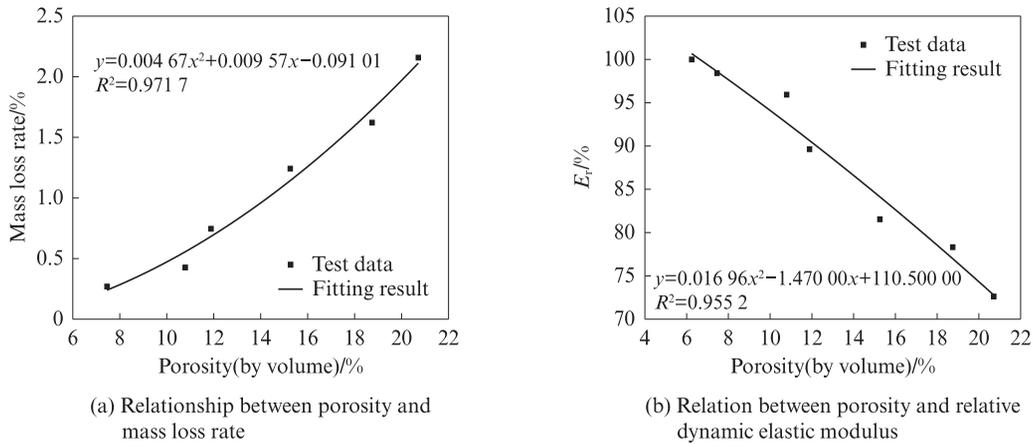


图12 青砖孔结构与抗冻性能的关系
Fig. 12 Relationship between pore structure and frost resistance of blue brick

3 基于分形理论的青砖孔结构冻融损伤研究

3.1 孔体积分形维数计算

分形维数能够描述孔的结构特征,在一定程度上反映材料孔结构的疏密变化.孔体积分形维数(D ,以下简称分形维数),可以表征青砖孔体积空间的复杂程度.根据盒维数计算方法,青砖分形维数的计算如下^[27]:

$$\lg u = (3 - D) \left(\lg \frac{r}{r_{\max}} \right) \quad (1)$$

式中: u 为孔隙的体积分数; r_{\max} 为青砖内部最大孔隙的半径, μm .

设 $\lg u = y, \lg \frac{r}{r_{\max}} = x$,通过建立线性回归方程,计算出青砖的分形维数,结果见表3.其中, R^2 为相关系数.由表3可见:青砖的分形维数随着经历冻融循环次数的增加而减小.由于孔隙内渗透水压力和冻胀力的共同作用,使得内部小孔劣化为大孔,导致孔隙尺寸变得单一,孔径大小的分布趋向均匀,表明青砖内部孔结构分布逐渐简化.当青砖的分形维数越大时,其孔结构分布越复杂.

表3 青砖的分形维数及相关系数

Table 3 Fractal dimension and correlation coefficient of blue brick

N/times	D	R^2
0	2.982 7	0.962 2
15	2.980 1	0.973 5
30	2.979 5	0.973 4
45	2.974 6	0.992 1
60	2.969 7	0.932 6
75	2.966 6	0.989 4
90	2.964 2	0.964 8

3.2 分形维数与抗压强度及孔隙率的关系

图13为青砖分形维数与抗压强度的关系.由图13可见:分形维数与抗压强度呈正相关,相关系数为0.906 9,表明青砖内部的孔结构越复杂,其抗压强度越大.随着经历冻融循环次数的增加,青砖内部孔隙的劣化损伤程度加重,孔径不断增大且种类逐渐减少,青砖内部的结构逐渐疏松.当孔隙内壁承受的膨胀应力达到极限应力时,内部孔隙结构由于拉应力的作用产生微裂纹,导致抗压强度和分形维数均降低.

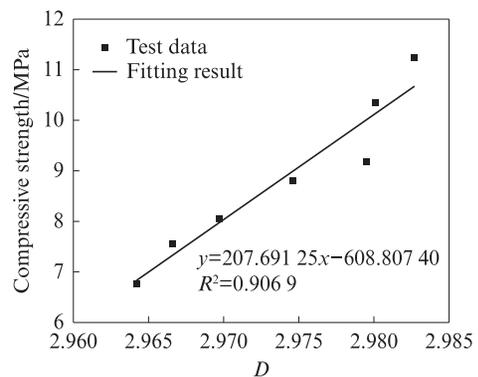


图13 青砖分形维数与抗压强度的关系

Fig. 13 Relation between fractal dimension and compressive strength of blue brick

图14为青砖分形维数与孔隙率的关系.由图14可见:青砖的分形维数与孔隙率呈负相关,相关系数为0.958 8,说明孔结构分布越复杂,青砖的孔隙率越小.随着经历冻融循环次数的增加,青砖内部孔隙的劣化损伤加重,导致其孔隙率不断增加.由于孔隙内部结构直接影响孔隙率的变化,而孔隙内部空间结构又与分形维数高度相关.因此,分形维数与青砖的孔隙率关系密切相关.根据拟合相关系数的高低,孔隙率较抗压强度与分形维数的关联性更强.虽然孔

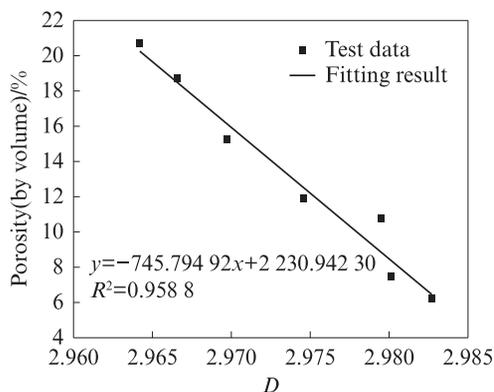
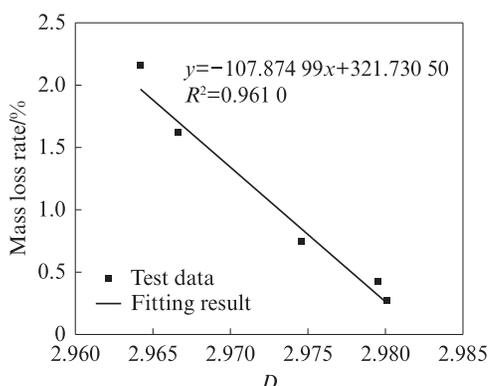
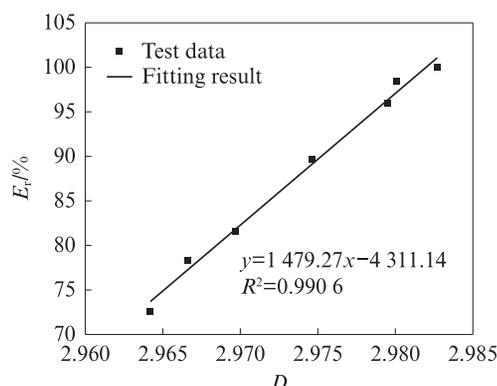


图14 青砖分形维数与孔隙率的关系

Fig. 14 Relation between fractal dimension and porosity of blue brick



(a) Relationship between fractal dimension and mass loss rate



(b) Relationship between fractal dimension and relative dynamic elastic modulus

图15 青砖分形维数与抗冻性能的关系

Fig. 15 Relationship between fractal dimension and frost resistance of blue bricks

由图15(b)可见,青砖分形维数与相对动弹性模量呈正相关,相关系数为0.9906.分形维数越大,青砖内部孔结构越复杂,其相对动弹性模量越大.由于冻融循环初期青砖内部小孔的占比较大,大孔的占比较少,材料内部较为密实,相对动弹性模量就比较大.经冻融循环后,孔隙经过冻胀力的作用,小孔隙逐渐劣化成大孔隙,甚至形成裂纹.大孔隙导致材料内部的黏结性变弱,内部损伤程度增大,导致相对动弹性模量降低.综合来看,孔隙结构的复杂程度是影响青砖宏观性能的重要因素.

4 结论

(1)冻融循环初期,青砖表面的孔洞逐渐增多且出现大量孔隙.随着经历冻融循环次数的增加,孔洞逐渐连接发展成为微小裂纹,然后扩展为裂缝,造成青砖表面剥落损伤加剧,外观劣化损伤现象明显.质量损失率逐渐上升,相对动弹性模量和相对抗压强度均呈下降趋势.经历90次冻融循环后,青砖的抗压强度下降到6.77 MPa.

隙内部结构是影响抗压强度的主要因素,但青砖原材料、烧制温度和烧制工艺等因素对抗压强度的大小有一定的影响,所以分形维数的变化能够间接反映青砖抗压强度的变化.

3.3 分形维数与抗冻性能关系

图15为青砖分形维数与抗冻性能的关系.

由图15(a)可知,冻融后青砖的分形维数与质量损失率呈负相关,相关系数为0.9610,表明孔结构越复杂,质量损失率越小.冻融循环过程中分形维数越大,青砖的孔隙率较低且内部孔径种类较多,其内部的孔隙连接越紧密,抵抗孔隙液体因固液相变产生的冻胀力的能力越大,青砖表面剥落越少,质量损失率就越小.

(2)冻融后青砖的 T_2 谱分布及峰面积变化幅度有所不同,但总体上呈不断增大的趋势,说明随着经历冻融循环次数的增加,青砖内部产生了新的孔隙,孔隙所占比例逐渐增大.经历90次冻融循环后,孔隙率变为20.71%,冻融后青砖的孔隙率与抗压强度呈负相关.青砖的孔隙率与其抗冻性能相关性较高,可通过冻融后青砖的微观孔隙率推断抗压强度和抗冻性能的变化.冻融后青砖的孔径大小分布在 $3 \times 10^{-4} \sim 300 \mu\text{m}$ 之间,随着经历冻融循环次数的增加,多害孔的占比逐渐增加,无害孔、少害孔和有害孔的占比逐渐减少.

(3)青砖具有明显的多重分形特征,分形维数在2.9642~2.9827之间,表明不同冻融阶段下青砖内部孔结构的复杂程度.随着经历冻融循环次数的增加,青砖的分形维数逐渐减小,青砖内部的无害孔、少害孔和有害孔的占比减少,多害孔的占比逐渐增多.青砖的分形维数与抗压强度的关系呈正相关、与孔隙率呈负相关,相关系数分别为0.9069和0.9588.分形维数还与青砖的抗冻性能具有较高的关联性,

说明孔隙结构的复杂程度是影响青砖宏观性能的重要因素。

参考文献:

- [1] 汤永净,邵振东.气候对中国古代塔砖材料性能劣化影响的研究[J].文物保护与考古科学,2012,24(3):33-39.
TANG Yongjing, SHAO Zhendong. The effect of climate on the deterioration of ancient tower bricks[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(3):33-39. (in Chinese)
- [2] SATHIPARAN N, RUMESHKUMAR U. Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 17:23-31.
- [3] 郭国梁,张道明,吕春,等.冻融循环对卜奎清真寺古青砖力学性能影响的试验研究[J].科学技术与工程,2021,21(20):8638-8643.
GUO Guoliang, ZHANG Daoming, LÜ Chun, et al. Experimental study on effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of ancient grey bricks in Pukui Muslim Temple[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20):8638-8643. (in Chinese)
- [4] 张雅文,赵黎明,张伟.冻融循环作用下饱水青砖力学性能劣化规律研究[J].水利与建筑工程学报,2022,20(2):198-203.
ZHANG Yawen, ZHAO Liming, ZHANG Wei. Degradation law of mechanical properties of water blue brick under a freeze-thaw cycle [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(2):198-203. (in Chinese)
- [5] 王炎松,伍小敏,吴光龙,等.基于仪器分析的古青砖表面品质影响因素[J].建筑材料学报,2021,24(4):851-857.
WANG Yansong, WU Xiaomin, WU Guanglong, et al. Factors influencing the surface quality of ancient blue bricks based on instrument analysis[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):851-857. (in Chinese)
- [6] 李斌,杜红秀,刘晓仙,等.山西明清古砖物理性能及成分分析[J].硅酸盐通报,2020,39(9):2944-2949,2963.
LI Bin, DU Hongxiu, LIU Xiaoxian, et al. Physical properties and composition analysis of ancient bricks of Ming and Qing dynasties in Shanxi province[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9):2944-2949, 2963. (in Chinese)
- [7] 高悦舒,沈星宇,王菊琳.古建筑青砖保护修复技术研究[J].砖瓦,2023(3):43-47,51.
GAO Yueshu, SHEN Xingyu, WANG Julin. Protection and restoration technology of ancient blue bricks[J]. Brick-Tile, 2023(3):43-47, 51. (in Chinese)
- [8] 郝负洪,何丹丹,吴日根,等.内蒙古中部隆盛庄古建筑青砖墙体冻害损伤研究[J].硅酸盐通报,2022,41(7):2438-2446.
HAO Yunhong, HE Dandan, WU Rigen, et al. Research on frost damage of ancient building blue brick wall of Longshengzhuang in Inner Mongolia[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(7):2438-2446. (in Chinese)
- [9] 刘笑.兰州市砖砌建筑外立面劣化规律与机理研究[D].兰州:兰州大学,2020.
- LIU Xiao. Research on the deterioration characteristics and mechanism of brick buildings facades in Lanzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese)
- [10] 赵鹏.荷载与环境作用下青砖及其砌体结构的损伤劣化规律与机理[D].南京:东南大学,2016.
ZHAO Peng. Deterioration mechanism of grey brick and masonry structures under the action of load and environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [11] 别治明.冻融循环下青砖砌体结构性损伤的演化规律[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(4):668-672.
BIE Zhiming. The evolution law of structural damage of blue brick masonry under a freeze-thaw cycle [J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science), 2020, 51(4):668-672. (in Chinese)
- [12] 刘科,刘霖,张永鹏.干湿/冻融循环作用下改良隔离墙的渗透性及孔隙结构[J].建筑材料学报,2022,25(5):545-550.
LIU Ke, LIU Lin, ZHANG Yongpeng. Permeability and pore structure of improved isolation wall under the action of dry-wet/freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5):545-550. (in Chinese)
- [13] 董伟,王雪松,计亚静,等.碳化-盐冻作用下风积沙混凝土损伤劣化机理及寿命预测[J].建筑材料学报,2023,26(6):623-630.
DONG Wei, WANG Xuesong, JI Yajing, et al. Damage deterioration mechanism and life prediction of aeolian sand concrete under carbonization and salt freezing [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):623-630. (in Chinese)
- [14] FENG C, ROLES S, JANSSEN H. Towards a more representative assessment of frost damage to porous building materials[J]. Building and Environment, 2019, 164:106343.
- [15] ELERT K, CULTRONE G, NAVARRO C R, et al. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings-influence of composition and microstructure [J]. International Journal of Sustainability in Higher Education, 2003, 4(2):91-99.
- [16] 李亚楠,谢华荣,夏畅畅,等.青砖含水量和孔隙结构对冻融劣化的影响实验研究[J].建筑节能,2022,50(9):18-22.
LI Yanan, XIE Huarong, XIA Changchang, et al. Experimental study on the influence of water content and pore structure of green bricks on freeze-thaw deterioration [J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(9):18-22. (in Chinese)
- [17] 张伟,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 Wei, LIU Chao, LIU Huawei, 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. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 孙浩然,邹春霞,薛慧君,等.模袋混凝土干湿-冻融侵蚀孔结构的分形特征[J].建筑材料学报,2022,25(2):124-130.

- SUN Haoran, ZOU Chunxia, XUE Huijun, et al. Fractal characteristics of dry-wet and freeze-thaw erosion pore structure of mold-bag concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):124-130. (in Chinese)
- [20] 吴倩云, 马芹永. 冻融循环作用下BSFC的抗冻性及损伤模型[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1169-1178.
WU Qianyun, MA Qinyong. Frost resistance and damage model of BSFC under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1169-1178. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] JIN S S, ZHENG G P, YU J. A micro freeze-thaw damage model of concrete with fractal dimension[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257:119434.
- [23] DOU W C, LIU L F, JIA L B, et al. Pore structure, fractal characteristics and permeability prediction of tight sandstones: A case study from Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123:104737.
- [24] 赵燕茹, 刘芳芳, 王磊, 等. 基于孔结构的单面冻后混凝土抗压强度模型研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1328-1336.
ZHAO Yanru, LIU Fangfang, WANG Lei, et al. Modeling of compressive strength of concrete based on pore structure under single-side freeze-thaw condition [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1328-1336. (in Chinese)
- [25] 张道明, 王丽, 郭国梁, 等. 冻融作用对古青砖宏观性能及微观结构劣化的影响[J]. 文物保护与考古科学, 2021, 33(4):9-15.
ZHANG Daoming, WANG Li, GUO Guoliang, et al. The effect of freeze-thaw action on the deterioration of macroscopic properties and microstructure of ancient green bricks[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2021, 33(4):9-15. (in Chinese)
- [26] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999:47-50.
WU Zhongwei, LIAN Huizhen. High performance concrete[M]. Beijing: China Railway Press, 1999:47-50. (in Chinese)
- [27] SHI Z J, GUO Q, XU Y Q, et al. Mass transfer characteristics, rheological behavior and fractal dimension of anammox granules: The roles of upflow velocity and temperature [J]. Bioresour Technol, 2017, 244:117-124.