

文章编号:1007-9629(2025)06-0526-10

严寒区浮石混凝土分级评价与孔结构响应阈值

王萧萧^{1,2}, 董培森¹, 闫长旺^{3,*}, 刘曙光^{3,4}, 张菊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 内蒙古自治区土木工程专业绿色建造与智能运维重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 4. 内蒙古工业大学 生态型建筑材料与装配式结构内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:基于浮石混凝土(PAC)的孔隙率、孔径分布和分形维数计算增益系数(Y_{gp})、损伤系数(C_{gp})。利用阈值指标分类法得到PAC的水化程度、损伤程度各阶段临界点,根据分级评价和宏观性能确定PAC孔结构的增益阈值与损伤阈值。结果表明: $0.947 < Y_{gp} \leq 1.000$ 为充分水化、 $0.927 < Y_{gp} \leq 0.947$ 为一般水化、 $0.912 \leq Y_{gp} \leq 0.927$ 为不良水化; $1.00 \leq C_{gp} \leq 1.07$ 为轻微损伤、 $1.07 < C_{gp} \leq 1.16$ 为中度损伤、 $1.16 < C_{gp} \leq 1.51$ 为严重损伤。该研究为严寒区浮石混凝土水化程度和损伤程度的分级、定量评价提供了方法。

关键词:浮石混凝土;养护阶段;冻融循环;孔隙预测;阈值分析

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.06.005

Classification Evaluation and Response Threshold of Pore Structure of Pumice Concrete in Cold Regions

WANG Xiaoxiao^{1,2}, DONG Peisen¹, YAN Changwang^{3,*}, LIU Shuguang^{3,4}, ZHANG Ju¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Operation and Maintenance of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 4. Inner Mongolia Engineering Research Center for Ecological Building Materials and Prefabricated Structures, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Gain coefficient (Y_{gp}) and damage coefficient (C_{gp}) were calculated based on the porosity, pore size distribution and fractal dimension of pumice concrete. The critical points of hydration degree and damage degree were obtained through the classification of threshold index, and the gain threshold and damage threshold were determined according to the classification evaluation and macro performance. The results show that $0.947 < Y_{gp} \leq 1.000$ indicates adequate hydration, $0.927 < Y_{gp} \leq 0.947$ indicates average hydration, and $0.912 \leq Y_{gp} \leq 0.927$ indicates poor hydration. $1.00 \leq C_{gp} \leq 1.07$ indicates minor injury, $1.07 < C_{gp} \leq 1.16$ indicates moderate injury, and $1.16 < C_{gp} \leq 1.51$ indicates severe injury. This work provides a method for grading and quantitative evaluation of hydration degree and damage degree of pumice concrete in cold regions.

Key words: pumice concrete; curing phase; freeze-thaw cycle; pore prediction; threshold analysis

浮石混凝土(PAC)具有良好的力学性能(28 d 立方体抗压强度达到44.90 MPa)^[1]和抗冻性能(冻融

收稿日期:2024-09-12;修订日期:2024-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52469023,52068059,52368036);内蒙古科技计划项目(2022YFDZ0023,2023YFDZ0049);中央引导地方科技发展资金2022ZY0160;鄂尔多斯市重点研发计划(YF20232358);呼伦贝尔市“科技兴市”行动重点项目(2023HZXX007)

第一作者:王萧萧(1987—),女,山东济宁人,内蒙古工业大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:wxiaoxiao.good@163.com

通讯作者:闫长旺(1978—),男,内蒙古包头人,内蒙古工业大学教授,博士生导师,博士。E-mail:yew20031013@126.com

循环达到200次)^[2],现已应用于桥梁^[3]和渠道衬砌^[4]工程中。PAC孔结构的演变与宏观性能有直接相关性^[5],特别是遭受冻融循环时,其孔隙结构的劣化会导致使用寿命缩短^[6]。为减缓工程环境对力学性能带来的影响,须获取PAC的工作状态,从而科学评估其水化程度和损伤程度^[7],这对PAC在工程中安全应用具有重要意义。

国内外学者开展了PAC基本力学性能^[8]和耐久性能^[9]的相关研究,主要是对宏观性能^[10]、微观机理^[11]和强度发育模型^[12]、寿命预测模型^[13]等方面进行了试验、理论研究。Wang等^[14-15]研究发现:在养护阶段,PAC中空隙由大毛细孔、非毛细孔逐渐演化为凝胶孔与小毛细孔,改善了基本力学性能;在冻融阶段,PAC内部孔隙的膨胀和裂缝的衍生使得凝胶孔、小毛细孔劣化为大毛细孔与非毛细孔,致使孔隙率增大、孔隙结构变得复杂、分形维数提高,混凝土承载能力衰退。高鑫等^[16]基于孔结构的演变,利用灰色模型建立PAC的冻融损伤模型,发现不同应力损伤度下模型的平均相对误差均低于4.5%。Wang等^[17]结合疲劳损伤力学理论,以不同孔隙溶液结冰规律量化静水压力,建立了PAC冻融损伤预测模型,其试验值与预测值吻合度较好。PAC的水化程度和损伤程度存在临界值,且不同临界状态下的宏观性能各有不同。目前研究对PAC基本力学性能、相对动弹性模量进行了评估,但是对其水化程度和损伤程度的定量分级研究偏少。

本文采用阈值指标分类法(TITAN)^[18]对严寒区PAC养护阶段和冻融阶段的水化程度、损伤程度进行了研究;分析了不同养护龄期、冻融循环次数下试样的宏观性能、孔隙率、孔径分布和分形维数的动态演变规律;并结合水化程度、损伤程度的临界点,确定了PAC孔结构的增益阈值、损伤阈值。为养护阶段和冻融阶段PAC水化程度和损伤程度的分级、定量评价提供了方法和依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

浮石产自和林格尔县,堆积密度为810 kg/m³,表观密度为1 690 kg/m³,吸水率¹⁾为17.60%,筒压强度为2.77 MPa;水泥为冀东P·O 42.5普通硅酸盐水泥;河砂细度模数为2.6,堆积密度为1 590 kg/m³,表观密度为2 450 kg/m³;粉煤灰为Ⅰ级粉煤灰;选用RSD-8型高效减水剂,其减水率为20%;拌和水为自

来水;按照水泥、水、粉煤灰、砂、浮石质量比为1.00:0.41:0.23:2.10:1.60配制PAC,水灰比为0.33,减水剂掺量为水质量的2.1%。

1.2 试验方法

1.2.1 抗压强度试验

按照JGJ/T 12—2019《轻骨料混凝土应用技术标准》进行抗压强度试验,试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,取标准养护7、14、21、28 d的PAC试件进行抗压强度测试。

1.2.2 快速冻融试验

依据GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行冻融循环试验,试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,冻融循环次数为*N*。以每50次冻融循环后PAC试件的抗压强度、质量损失率MLR、相对动弹性模量*E*,作为冻融损伤的宏观性能指标。

1.2.3 孔结构试验

采用MesoMR-60S型核磁共振仪(NMR)测试PAC孔结构。分别取7、14、21、28 d龄期和冻融循环0、50、100、150次的 $\phi 50 \times 50$ mm圆柱体试件。利用孔隙内部液态水的横向弛豫时间*T*₂,将孔隙内部的氢原子转换得到孔结构参数^[19]。

2 结果与讨论

2.1 养护阶段PAC性能分析

2.1.1 养护阶段PAC的宏观性能

图1为养护阶段PAC试件的抗压强度和孔隙率。由图1可知:(1)随着养护龄期的延长,试件28 d时的抗压强度较7 d时增长了37.40%。这是由于,水化过程中浮石骨料的固化水可以释放到基质中去,与水泥中的粉煤灰发生火山灰反应,从而改善PAC的抗压强度^[20]。(2)孔隙率的变化规律则相反,当养护龄期达到28 d时试件孔隙率较7 d时下降了29.90%。这是因为水化产物填充了骨料孔隙以及骨料与水泥基体间的空隙^[21]。不同龄期下PAC试件的抗压强度可按式(1)进行预测,式中斜率即为硬化速率,用以表征不同龄期下PAC的水化程度^[22]。

$$\sigma_{c,a} = \begin{cases} 3.540t, & 0 \leq t \leq 7 \\ 23.26 + 0.576(t - 7), & 7 < t \leq 14 \\ 28.11 + 0.436(t - 14), & 14 < t \leq 21 \\ 30.97 + 0.150(t - 21), & 21 < t \leq 28 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{c,a}$ 为抗压强度预测值,MPa;*t*为养护试件龄期,d。

1) 文中涉及的吸水率、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比。

由式(1)可知:养护龄期为0~7 d时PAC具有最大硬化速率3.54 MPa/d,分别为7~14、14~21、21~28 d硬化速率的6.15、8.12、23.60倍,符合PAC抗压强度增长规律。另外,本研究对比了研石混合骨料混凝土(T-1)^[23]和机制砂混凝土(T-2)^[24]的试验参数,见图2,发现本文预测值与文献中试验值的误差均低于8.69%。

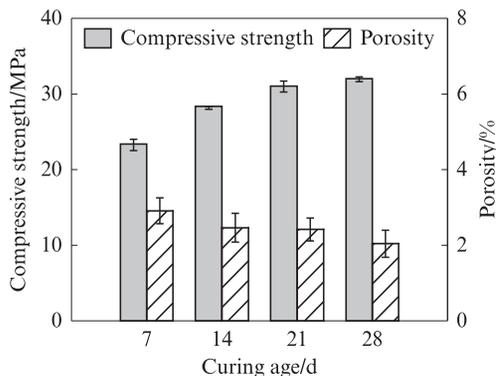


图1 养护阶段PAC试件的抗压强度和孔隙率
Fig. 1 Compressive strength and porosity of PAC specimens in curing phase

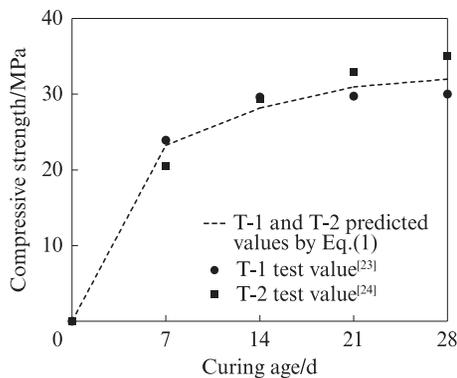


图2 养护阶段PAC试件抗压强度的试验值与预测值
Fig. 2 Experimental and predicted values for compressive strength of PAC specimens in curing phase

2.1.2 养护阶段PAC的孔结构

PAC孔隙一般按照孔径(r)大小划分为凝胶孔($r \leq 10$ nm)、小毛细孔($10 \text{ nm} < r \leq 100$ nm)、大毛细孔($100 \text{ nm} < r \leq 1000$ nm)、非毛细孔($r > 1000$ nm)^[25]。图3为养护阶段PAC试件的孔径分布情况。由图3可见:养护阶段PAC试件孔径分布曲线为三峰结构;随着养护龄期的延长,试件中凝胶孔的孔径占比无明显变化;峰1对应小毛细孔的孔径占比,在28 d时较7、14、21 d时分别增加了18.78%、12.37%、5.65%;随着养护龄期的延长,受水化作用的影响,峰2对应的大毛细孔孔径占比呈下降趋势,其28 d时较7、14、21 d时分别降低了23.10%、22.49%、11.26%;峰3处非毛细孔的孔径占比在28 d时较7、14、21 d时

分别降低了37.70%、22.25%、15.27%。这是因为浮石骨料具有明确的孔结构特征和高比表面积,可为水泥水化提供场所,浮石骨料和混凝土基体的孔壁被填充并向内部延伸^[5],大毛细孔、非毛细孔向小毛细孔、凝胶孔演变,与Wang等^[14]的研究结论吻合。

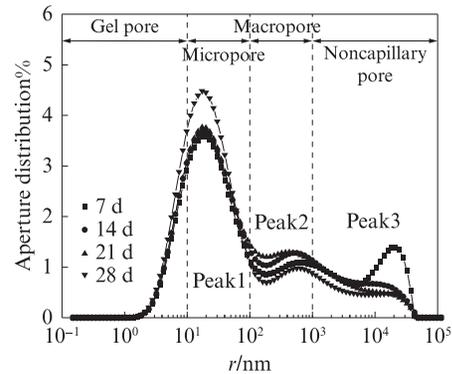


图3 养护阶段PAC试件的孔径分布
Fig. 3 Pore size distribution of PAC specimens in curing phase

2.1.3 养护阶段PAC的分形维数

分形维数(D)用来表征孔结构的复杂程度, D 越大孔隙分布越复杂^[26],其计算式为:

$$\lg S_v = (3 - D) \left(\lg \frac{T_2}{T_{2\max}} \right) \quad (2)$$

式中: S_v 为弛豫时间小于 T_2 的累积孔径占比,%; $T_{2\max}$ 为最大弛豫时间。

利用式(2)计算出不同龄期PAC中各孔隙的 D (见表1),其范围在2.06~2.96,符合分形理论^[27]。随着龄期延长,凝胶孔的 D 趋于稳定;小毛细孔的 D 呈下降状态,在7~14 d时小毛细孔的孔径占比有最大降幅,为23.68%;大毛细孔、非毛细孔的 D 呈上升趋势,在7~14 d的孔径占比有最大降幅,分别为15.37%和24.16%。总的来说,养护阶段 $r > 100$ nm的孔隙呈现出较强的分形特征^[12]。这是由于大毛细孔和非毛细孔逐渐被细化,提高了PAC孔隙的复杂性,使 D 表现出不同规律^[28]。

表1 养护阶段PAC的分形维数
Table 1 Fractal dimension of PAC in curing phase

Age/d	Gel pore	Micropore	Macropore	Noncapillary pore
7	2.11	2.54	2.81	2.88
14	2.09	2.53	2.85	2.91
21	2.08	2.50	2.89	2.94
28	2.06	2.49	2.94	2.96

2.2 冻融阶段PAC性能分析

2.2.1 冻融阶段PAC的宏观性能

图4为冻融阶段PAC试件的抗压强度和孔隙

率。由图4可见,与未冻融时相比,经历150次冻融循环后,PAC试件抗压强度下降了30.52%,孔隙率由2.04%上升至5.58%。这是因为孔隙水结冰对孔隙壁产生冻胀压力,裂缝发生劣化、扩展,造成PAC力学性能下降和孔隙衍生^[29]。

表2为冻融阶段PAC试件的相对动弹性模量 E_r 和质量损失率MLR。由表2可见,在冻融循环结束后,试件 E_r 较0次冻融循环时的降幅为31.90%,MLR增幅为2.64%。综上可知, E_r 更加敏感且易于测量和分析,可作为评估PAC冻融损伤的指标^[30-31]。

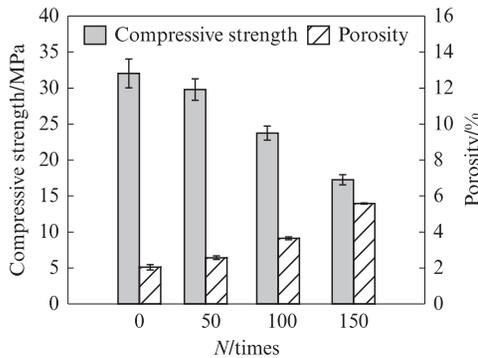


图4 冻融阶段PAC试件的抗压强度和孔隙率
Fig. 4 Compressive strength and porosity of PAC specimens in freeze-thaw phase

表2 冻融阶段PAC试件的相对动弹性模量和质量损失率
Table 2 E_r and MLR of PAC specimens in freeze-thaw phase

N/Times	E_r /%	MLR/%
0	100.00	0
50	92.36	0.88
100	81.91	1.51
150	68.06	2.65

2.2.2 冻融阶段PAC的孔结构

图5为冻融阶段PAC试件的孔径分布。由图5可见:冻融阶段PAC试件的孔径分布曲线也表现为三峰结构;经历150次冻融循环后,与0、50、100次相比,试件中凝胶孔的孔径占比无明显变化,小毛细孔的孔径占比分别降低了39.09%、36.24%、30.13%,大毛细孔的孔径占比分别提升了51.66%、44.66%、30.01%,非毛细孔的孔径占比分别提升了56.07%、39.07%、16.02%。这表明冻融阶段PAC孔结构的演化规律主要是小毛细孔向大毛细孔、非毛细孔扩展劣化。由于浮石是一种蜂窝状的多孔材料,因此PAC孔隙率更高且集中于小毛细孔部分。在冻融过程中,冻结区域会产生更多的微区,这些微区是静水压力形成的场所^[17]。其中 $r > 100$ nm的孔隙水优先结冰发生相变并出现冻胀,对未冻水的小毛细孔产

生挤压,迫使未冻水向相邻孔隙迁移形成静水压力^[11]。在静水压力的持续作用下,PAC内部出现微裂纹且不断衍生^[32],随着冻融循环次数的增加,小毛细孔逐渐扩张连通,向大毛细孔和非毛细孔演化。

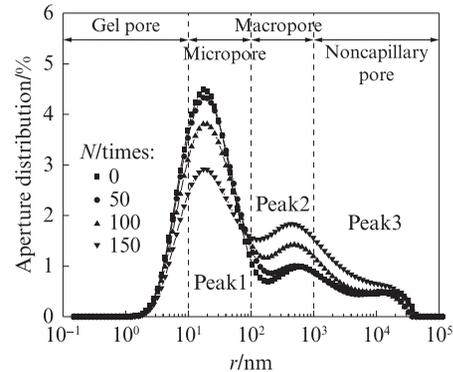


图5 冻融阶段PAC试件的孔径分布
Fig. 5 Pore size distribution of PAC specimens in freeze-thaw phase

2.2.3 冻融阶段PAC的分形维数

表3给出了冻融阶段PAC试件中不同孔隙的分形维数 D 与相对动弹性模量 E_r ,其中 D 的范围在2.05~2.96,符合Menger海绵模型^[33]。由表3可见:(1)在冻融阶段,PAC试件中凝胶孔的 D 处于稳定状态,小毛细孔的 D 略微上升。这是因为在小毛细孔向大毛细孔、非毛细孔演变的同时,水化产物可以填充大毛细孔、非毛细孔,从而修复其损伤^[34],使结构变得较为复杂。(2)经历100~150次冻融循环后,大毛细孔、非毛细孔的 D 显著下降,其孔径占比有最大增幅,分别为30.01%、16.02%。这表明冻融过程中, $r > 100$ nm的孔隙具有较强的分形特征,与Hou等^[35]的研究结论吻合。这是由于随着冻融循环次数的增加,孔结构的损伤导致各孔隙连通而演变为大毛细孔、非毛细孔。随着冻融循环次数的增加,凝胶孔、小毛细孔的 E_r 与 D 无明显线性关系,而大毛细孔和非毛细孔的 E_r 与 D 呈正相关。这是因为随着冻融循环的进行,PAC孔结构逐渐疏松并趋于简单,导致 D 随着 E_r 的降低而衰减^[7]。综上可得,PAC冻融损伤

表3 冻融阶段PAC试件的 D 与 E_r
Table 3 D and E_r of PAC specimen in freeze-thaw phase

N/ times	E_r /%	D			
		Gel pore	Micropore	Macropore	Noncapillary pore
0	100.00	2.06	2.49	2.87	2.96
50	92.36	2.05	2.51	2.85	2.94
150	81.91	2.08	2.50	2.82	2.92
100	68.06	2.09	2.48	2.80	2.90

与大毛细孔和非毛细孔的演化密切相关,符合 Wang 等^[15]的研究结论。

2.3 PAC水化程度的临界点

2.3.1 相关性分析

表4为养护阶段PAC试件抗压强度与各类孔隙的相关性。根据表4中数据,通过线性拟合分析出各类孔隙与PAC抗压强度的相关性依次为:大毛细孔>非毛细孔>小毛细孔>凝胶孔。结合2.1.3,将大毛细孔、非毛细孔作为分析PAC水化程度的参照变量^[24,36]。

2.3.2 养护阶段PAC孔隙预测

三次样条插值法可以预测PAC各类孔隙的占比^[37]。假设 $x_k \in [a, b]$, x_k 为节点长度(养护阶段节点长度为龄期 t, d); $S(x_k) = y_k$, 其中 $k=0, 1, 2, \dots, n, y_k$

$$x_k - x_{k-1}M_{k-1} + 2(x_{k+1} - x_{k-1})M_k + (x_k - x_{k-1})M_{k+1} = 6 \left(\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} - \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \right) \quad (3)$$

式中: M 为三次样条插值函数的解。

将得到的 M 代入式(4),建立养护阶段PAC中

$$S(x_k) = \frac{M_{k+1} - M_k}{6(x_{k+1} - x_k)} (x - x_k)^3 + \frac{M_k}{2} (x - x_k)^2 + \left[\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} - \frac{x_{k+1} - x_k(2M_k + M_{k+1})}{6} \right] (x - x_k) + y_k \quad (4)$$

表5 养护阶段PAC孔隙预测模型表达式
Table 5 Expression of PAC pore prediction model in curing phase

Pore category	Model expression
Macropore	$y = \begin{cases} 1.638 \times 10^{-3}(x-7)^3 - 0.4288(x-7) + 20.39, & x \in [7, 14] \\ -3.088 \times 10^{-3}(x-14)^3 + 0.0393(x-14)^2 - 0.1536(x-14) + 18.03, & x \in (14, 21] \\ 1.450 \times 10^{-3}(x-21)^3 - 0.0348(x-21)^2 - 0.1219(x-21) + 17.67, & x \in (21, 28] \end{cases}$
Noncapillary pore	$y = \begin{cases} 2.688 \times 10^{-3}(x-7)^3 - 0.812(x-7) + 23.95, & x \in [7, 14] \\ -4.169 \times 10^{-3}(x-14)^3 + 0.0565(x-14)^2 - 0.417(x-14) + 19.19, & x \in (14, 21] \\ 1.481 \times 10^{-3}(x-21)^3 - 0.0311(x-21)^2 - 0.239(x-21) + 17.61, & x \in (21, 28] \end{cases}$

2.3.3 模型验证

基于表5中孔隙预测模型,得到PAC中大毛细孔、非毛细孔的孔径占比预测值,见图6。由图6可见,与试验值相比,预测值的误差为1.00%。为证明该模型的适用性,还收集了浮石混凝土(S-1、S-3)^[14,38]、风积砂混凝土(S-2)^[39]的试验参数,将其代入孔隙预测模型中进行对比分析(见图7),得到其误差范围为9.00%~24.03%。

2.3.4 养护阶段PAC的水化程度

在实际工程中,阈值指建筑或结构所能承受压力或其他相关参数的临界值,对于确保工程安全运行至关重要^[40]。本研究基于孔结构演变规律,提出了一种确定养护阶段和冻融阶段PAC阈值的方法^[41]。将养护阶段孔径占比的变化速率代入式(5),

表4 养护阶段PAC试件抗压强度与各类孔隙的相关性
Table 4 Correlation between compressive strength and pore category of PAC specimens in curing phase

Pore category	Correlation
Gel pore	0.7597
Micropore	0.7706
Macropore	0.9824
Noncapillary pore	0.9173

为 x_k 对应的孔径占比, %。 $S(x_k)$ 在区间 $[a, b]$ 上有二阶连续导数,是三次多项式。

构建孔隙预测模型的具体步骤概述如下:将养护龄期与大毛细孔和非毛细孔的孔径占比数据当作三次样条插值函数的已知点,并在模型建立过程中作为约束条件,如式(3)所示。

大毛细孔和非毛细孔的孔径占比的预测模型,具体表达式见表5。

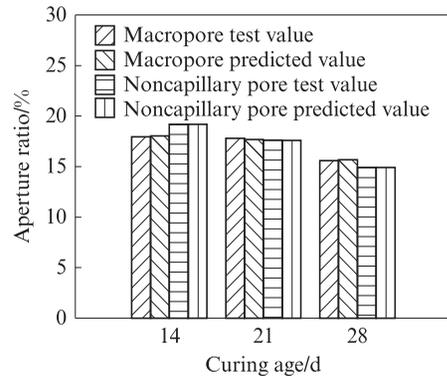


图6 养护阶段PAC孔径占比的试验值和预测值
Fig. 6 Test and predicted values of PAC aperture ratio in curing phase

计算PAC增益系数(Y_{gp})。假设初始 $Y_{gp}=1$,从而计算得到各阶段临界点(见图8)。

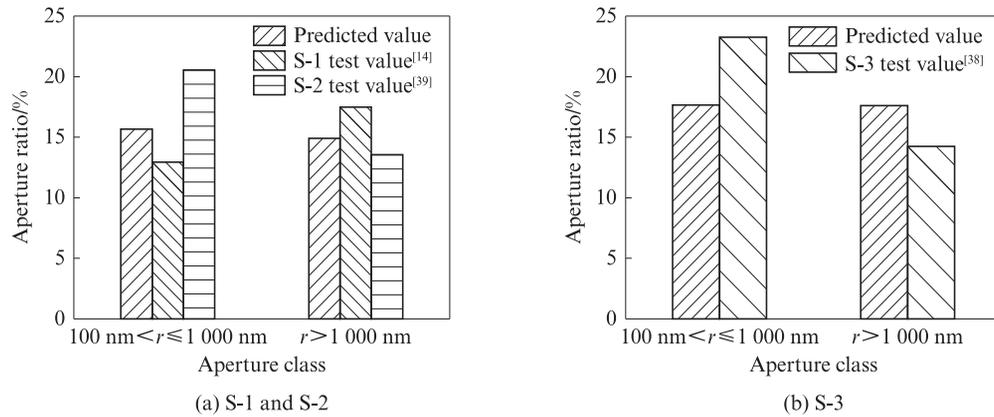


图7 养护阶段PAC孔径占比预测值与文献中试验值的对比

Fig. 7 Comparison between predicted and test values of PAC aperture ratio in curing phase

$$Y_{gp}(t) = \frac{Z_{Gel}(t)}{Z_{Gel}(t-1)} \cdot \frac{Z_{Mic}(t)}{Z_{Mic}(t-1)} \cdot \frac{Z_{Mac}(t)}{Z_{Mac}(t-1)} \cdot \frac{Z_{Non}(t)}{Z_{Non}(t-1)} \cdot \left(\frac{Z_z(t)}{Z_z(t-1)} \right)^4 \quad (5)$$

式中: $Z_{Gel}(t)$ 、 $Z_{Mic}(t)$ 、 $Z_{Mac}(t)$ 、 $Z_{Non}(t)$ 、 $Z_z(t)$ 分别为龄期 $t(t=7, 14, 21, 28)$ 时凝胶孔、小毛细孔、大毛细孔、非毛细孔的孔隙率和总孔隙率的增速; $Z_{Gel}(t-1)$ 、 $Z_{Mic}(t-1)$ 、 $Z_{Mac}(t-1)$ 、 $Z_{Non}(t-1)$ 、 $Z_z(t-1)$ 为龄期 $t-1$ 时凝胶孔、小毛细孔、大毛细孔、非毛细孔的孔隙率和总孔隙率的增速。

倍;14~28 d时水化作用减缓,限制PAC孔结构的进一步演变。

2.4 PAC孔结构损伤程度的临界点

2.4.1 冻融阶段PAC孔隙预测

与养护阶段类似,冻融阶段的节点长度为冻融循环次数 N ,将冻融阶段的参数作为三次样条插值函数已知点,得到冻融阶段PAC孔隙预测模型表达式,见表6。

2.4.2 模型验证

图9为模型预测值,其计算误差为6.60%,表明该预测模型有较高准确性。另外收集了浮石混凝土(F-1、F-3)^[15,42]和聚丙烯纤维混凝土(F-2)^[26]的试验参数,将其代入冻融阶段PAC孔隙预测模型中进行对比分析(见图10),得到试验值与预测值的误差范围为1.00%~19.90%。

2.4.3 冻融阶段PAC损伤程度

PAC的冻融破坏是各种孔隙相互演变的结果,将冻融阶段PAC孔隙的变化速率代入式(6),得到冻融阶段PAC损伤系数 C_{gp} 。假设初始 $C_{gp}=1$,从而得到各阶段临界点(见图11)。

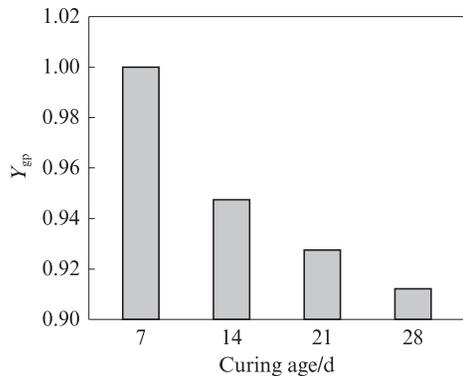


图8 养护阶段PAC的 Y_{gp}

Fig. 8 Y_{gp} of PAC in curing phase

基于TITAN并结合 Y_{gp} 各阶段的斜率分析可得:7~14 d时PAC试件水化程度最为充分, Y_{gp} 有最大斜率,分别为14~21 d和21~28 d时的2.47、5.20

表6 冻融阶段PAC孔隙预测模型表达式

Table 6 Expressions of PAC pore prediction model in freeze-thaw phase

Pore category	Model expression
Macropore	$y = \begin{cases} 4.32 \times 10^{-6} x^3 + 0.0344x + 17.25, & x \in [0, 50] \\ 1.688 \times 10^{-5} (x - 50)^3 - 0.648 \times 10^{-3} (x - 50)^2 + 2 \times 10^{-3} (x - 50) + 18.43, & x \in (50, 100] \\ -1.256 \times 10^{-5} (x - 100)^3 + 1.884 \times 10^{-3} (x - 100)^2 + 0.135(x - 100) + 19.02, & x \in (100, 150] \end{cases}$
Noncapillary pore	$y = \begin{cases} 7.83 \times 10^{-6} x^3 + 0.014x + 19.72, & x \in [0, 50] \\ -7.87 \times 10^{-6} (x - 50)^3 + 1.175 \times 10^{-3} (x - 50)^2 + 0.073(x - 50) + 21.40, & x \in (50, 100] \\ -3.73 \times 10^{-8} (x - 100)^3 - 0.56 \times 10^{-5} (x - 100)^2 + 0.131(x - 100) + 26.99, & x \in (100, 150] \end{cases}$

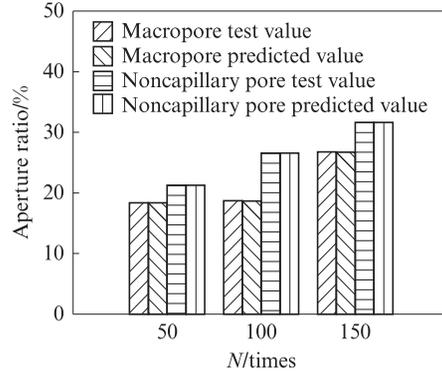


图9 冻融阶段PAC孔径占比的试验值和预测值

Fig. 9 Test and predicted values of PAC aperture ratio in freeze-thaw phase

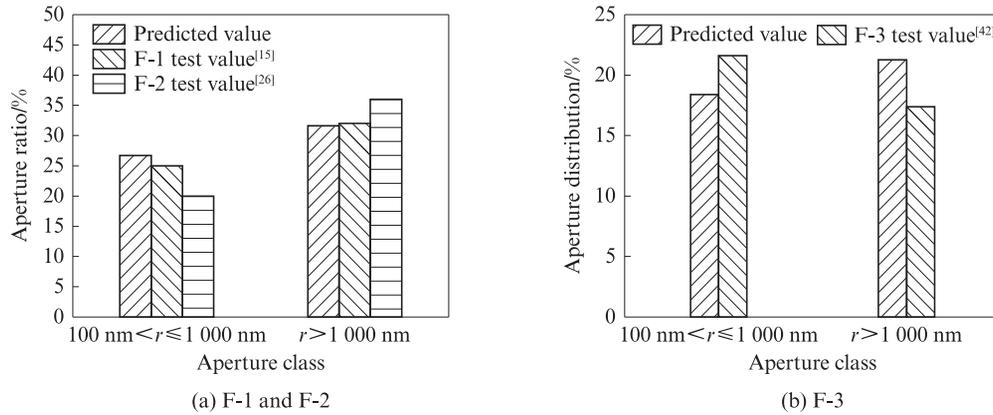


图10 冻融阶段PAC孔径占比预测值与文献中试验值的对比

Fig. 10 Comparison between predicted values and test values of PAC aperture ratio in freeze-thaw phase

$$C_{gp}(N) = \frac{K_{Gel}(N)}{K_{Gel}(N-1)} \cdot \frac{K_{Mic}(N)}{K_{Mic}(N-1)} \cdot \frac{K_{Mac}(N)}{K_{Mac}(N-1)} \cdot \frac{K_{Non}(N)}{K_{Non}(N-1)} \cdot \left(\frac{K_z(N)}{K_z(N-1)} \right)^4 \quad (6)$$

式中： $K_{Gel}(N)$ 、 $K_{Mic}(N)$ 、 $K_{Mac}(N)$ 、 $K_{Non}(N)$ 、 $K_z(N)$ 分别为经历 N 次 ($N=0, 50, 100, 150$) 冻融循环后凝胶孔、小毛细孔、大毛细孔、非毛细孔的孔隙率和总孔隙率的增速； $K_{Gel}(N-1)$ 、 $K_{Mic}(N-1)$ 、 $K_{Mac}(N-1)$ 、 $K_{Non}(N-1)$ 、 $K_z(N-1)$ 分别为经历 $N-1$ 次冻融循环后凝胶孔、小毛细孔、大毛细孔、非毛细孔的孔隙率和总孔隙率的增速。

基于 TITAN 并结合 C_{gp} 各阶段的斜率分析可得：经历 0~100 次冻融循环后，由于内部孔隙受冻胀力的影响，PAC 受到持续损伤；经历 100~150 次冻融循环后 PAC 内部冻胀最严重，因此该阶段 C_{gp} 上升趋势最为显著，其斜率是 0~50、50~100 次冻融循环时的 4.94、4.01 倍。

2.5 PAC 的分级评价

本研究的增益阈值为 PAC 养护期间水化程度的峰值，以养护龄期来表征，如果试件满足该阈值标准，则具有优异的水化程度。图 12 为 PAC 中增益系数 Y_{gp} 和硬化速率 φ 的关系。利用 Y_{gp} 的 4 个临界点并结合不同阶段 PAC 硬化程度，将水化程度划分为 3 个等级： $0.947 < Y_{gp} \leq 1.00$ 对应充分水化，此阶段 PAC 中大毛细孔、非毛细孔的孔径占比降幅分别为 15.37% 和 24.16%； $0.927 < Y_{gp} \leq 0.947$ 对应一般水化，大毛细孔、非毛细孔的孔径占比降幅分别为 16.43% 和 11.40%； $0.912 \leq Y_{gp} \leq 0.927$ 对应不良水化，大毛细孔、非毛细孔的孔径占比降幅分别为 11.26% 和 15.27%。PAC 的硬化速率在 7~14 d 内

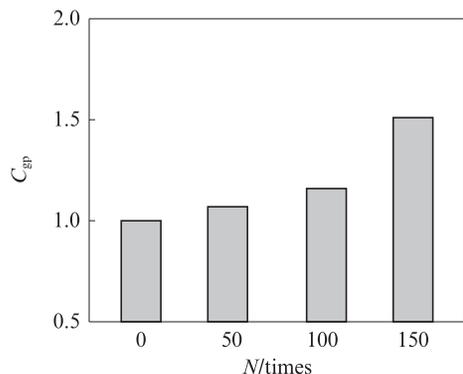


图11 冻融阶段PAC的 C_{gp}

Fig. 11 C_{gp} of PAC in freeze-thaw phase

得到显著提升,利用式(1)、(5)分别算出硬化速率和增益系数在10.5~14.0 d有最大斜率,从而得出水化程度在10.5~14.0 d达到峰值,因此10.5 d为PAC孔结构的增益阈值。利用孔隙预测模型计算10.5 d时大毛细孔、非毛细孔的孔径占比分别为18.96%、19.77%。

损伤阈值是材料抗冻性能的重要指标,本研究以冻融循环次数 N 来表征,当 N 超过阈值时,材料开始发生损伤。图13为PAC中 C_{gp} 和 E_r 的关系。利用 C_{gp} 的4个临界点将损伤程度划分为3个等级:1.00≤ C_{gp} ≤1.07为轻微损伤,大毛细孔、非毛细孔的孔径占比增幅分别为6.20%和7.24%;1.07< C_{gp} ≤1.16为中度损伤,大毛细孔、非毛细孔的孔径占比增幅分别为1.80%和19.98%;1.16< C_{gp} ≤1.51为严重损伤,大毛细孔、非毛细孔的孔径占比增幅分别为30.01%和16.02%。PAC的 E_r 在100~150次冻融循环内迅速衰减。利用式(6)计算出损伤系数在125~150次冻融循环后有最大斜率,从而得出损伤程度在经历125~150次冻融循环后达到峰值,因此125次冻融循

环为PAC孔结构的损伤阈值。利用预测模型计算此时大毛细孔、非毛细孔的孔径占比分别为23.38%、30.26%。

3 结论

(1)养护阶段浮石混凝土PAC孔结构充分发育,大毛细孔、非毛细孔的孔径占比在7.0~14.0 d有最大降幅15.37%和24.16%,相应的分形维数 D 得到提升。冻融阶段PAC孔结构逐渐劣化,大毛细孔、非毛细孔的孔径占比在100~150次冻融循环后有最大增幅,分别为30.01%和16.02%, D 呈下降趋势。

(2)养护过程中,7.0~14.0 d对应充分水化阶段,硬化速率在此阶段得到显著提升,水化程度在10.5~14.0 d达到峰值,10.5 d为PAC孔结构的增益阈值,此时大毛细孔、非毛细孔的孔径占比分别为18.96%、19.77%。

(3)在冻融阶段,经历100~150冻融循环后试件呈严重损伤状态,相对动弹性模量迅速衰减。损伤程度在125~150次冻融循环后达到峰值,125次冻融循环为PAC孔结构的损伤阈值,此时大毛细孔、非毛细孔的孔径占比分别为23.38%、30.26%。

(4)本研究为严寒区PAC水工建筑和构筑物提供了一套水化程度和损伤程度的评估系统,基于孔结构进行分级评价和阈值计算,对PAC养护阶段和冻融阶段进行了定量定性的评价,可及时发现PAC在工作中的问题缺陷,为工程正常运行或加固维护提供理论依据。

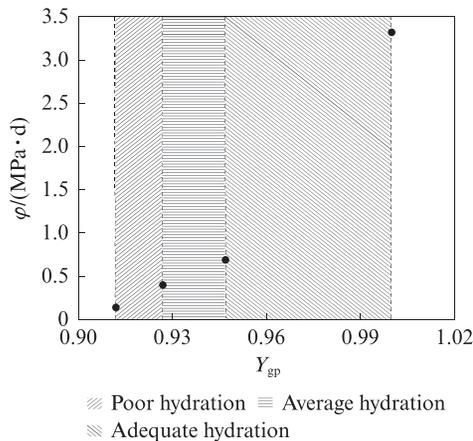


图12 Y_{gp} 和硬化速率关系

Fig. 12 Relationship between Y_{gp} and hardening rate

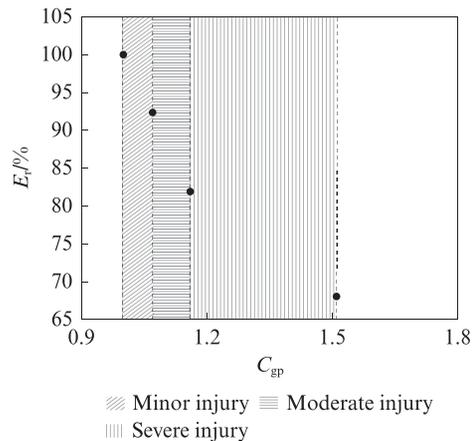


图13 C_{gp} 和相对动弹性模量的关系

Fig. 13 Relation between C_{gp} and relative dynamic elastic modulus

参考文献:

[1] PINARCI İ, KOCAK Y. Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder [J]. Construction and Building Materials, 2022, 335: 127528.

[2] 董伟,申向东,赵占彪,等. 风积沙轻骨料混凝土冻融损伤及寿命预测研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1009-1015.
DONG Wei, SHEN Xiangdong, ZHAO Zhanbiao, et al. Study of the freezing-thawing damage and life prediction of aeolian lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1009-1015. (in Chinese)

[3] 张高展,郭凯正,程华强,等. 轻集料用于超高性能混凝土的研究进展[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(8): 886-896, 905.
ZHANG Gaozhan, GUO Kaizheng, CHENG Huaqiang, et al. Lightweight aggregate in ultra-high performance concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(8): 886-896, 905. (in Chinese)

[4] 董伟,申向东,郭克贞,等. 轻骨料混凝土在寒区渠道衬砌中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 74-78.
DONG Wei, SHEN Xiangdong, GUO Kezhen, et al.

- Application of lightweight aggregate concrete in canal lining in cold regions[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(2):74-78. (in Chinese)
- [5] LIU K Z, YU R, SHUI Z H, et al. Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for ultra-high performance concrete (UHPC) based on appropriate application of porous pumice[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 214:369-381.
- [6] 王海龙,申向东,王萧萧.碳纤维改善浮石混凝土力学特性的试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(2):232-236.
WANG Hailong, SHEN Xiangdong, WANG Xiaoxiao. Study of carbon fiber improved pumice concrete mechanical properties [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(2):232-236. (in Chinese)
- [7] XIAO J Z, LÜ Z Y, DUAN Z H, et al. Pore structure characteristics modulation and its effect on concrete properties: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 397: 132430.
- [8] FU X, ZHAO G, WANG M M, et al. Comprehensive evaluation method for structural behavior of concrete dams in cold regions[J]. *Engineering Structures*, 2023, 278:115435.
- [9] MA H X, YU H F, DA B, et al. Study on failure mechanism of concrete subjected to freeze-thaw condition in airport deicers[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 313:125202.
- [10] WANG X X, FENG R G, LI J, et al. Wear characteristics and degradation mechanism of natural pumice concrete under ice friction during ice flood season[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 341:127742.
- [11] 王萧萧,申向东,王海龙,等.天然浮石混凝土孔溶液结冰规律的研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(6):130-135.
WANG Xiaoxiao, SHEN Xiangdong, WANG Hailong, et al. Research on icing law of pore solution in natural pumice concrete [J]. *Materials Review*, 2017, 31(6):130-135. (in Chinese)
- [12] HAN X, WANG B M, FENG J J. Relationship between fractal feature and compressive strength of concrete based on MIP[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 322:126504.
- [13] 王萧萧,刘畅,尹立强,等.天然浮石混凝土冻融损伤及寿命预测模型[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(1):98-105.
WANG Xiaoxiao, LIU Chang, YIN Liqiang, et al. Freeze-thaw damage and life prediction model of natural pumice concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(1):98-105. (in Chinese)
- [14] WANG X X, LI D X, BAI R, et al. Evolution of the pore structure of pumice aggregate concrete and the effect on compressive strength [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2023, 62(1):20230112.
- [15] WANG X X, DONG Y F, JING L, et al. Evolution and damage threshold of pores for natural pumice concrete under freeze-thaw cycles[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2023, 76(5):245-260.
- [16] 高矗,孔祥振,申向东.基于GM(1,1)的应力损伤轻骨料混凝土抗冻性评估[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(4):184-190.
GAO Chu, KONG Xiangzhen, SHEN Xiangdong. Freeze-thaw resistance evaluation of lightweight aggregate concrete with stress damage based on GM(1,1)[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(4):184-190. (in Chinese)
- [17] WANG X X, WU Y, SHEN X D, et al. An experimental study of a freeze-thaw damage model of natural pumice concrete[J]. *Powder Technology*, 2018, 339:651-658.
- [18] 段运,杨子江,王起才,等.负温环境下混凝土孔结构与强度和渗透性的关系[J]. *材料导报*, 2022, 36(15):72-77.
DUAN Yun, YANG Zijiang, WANG Qicai, et al. Pore structure of concrete at negative temperature curing in relation to strength and penetration[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(15):72-77. (in Chinese)
- [19] ZHANG C, FU J X, SONG W D, et al. High-volume ultrafine fly ash-cement slurry mechanical properties and strength development model establishment[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 277:122350.
- [20] ERDEM S, DAWSON A R, THOM N H. Impact load-induced micro-structural damage and micro-structure associated mechanical response of concrete made with different surface roughness and porosity aggregates [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(2):291-305.
- [21] 蓝绍玺,李红云,董喜平.纤维掺量对浮石轻骨料混凝土气孔分维数与抗冻耐久性的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(12): 4246-4251.
LAN Shaoheng, LI Hongyun, DONG Xiping. Effect of fiber dosage on pore structure fractal dimension and frost-thaw durability of light-weight aggregate concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(12):4246-4251. (in Chinese)
- [22] RAHIMI M Z, ZHAO R G, SADOZAI S, et al. Research on the influence of curing strategies on the compressive strength and hardening behaviour of concrete prepared with ordinary Portland cement[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e02045.
- [23] 李温,王海龙,张佳豪,等.研石混合骨料混凝土力学特性及孔隙结构试验研究[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2023, 53(3): 121-127.
LI Wen, WANG Hailong, ZHANG Jiahao, et al. Experimental study on mechanical properties and pore structure of gangue mixed aggregate concrete [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2023, 53(3):121-127. (in Chinese)
- [24] 张淑云,陈秘,周杰,等.孔隙特征对机制砂自密实轻骨料混凝土强度的影响规律[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(11): 4539-4546.
ZHANG Shuyun, CHEN Mi, ZHOU Jie, et al. The influence of pore characteristics on the strength of manufactured sand self-compacting lightweight aggregate concrete [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(11):4539-4546. (in Chinese)
- [25] WANG X X, LIU C, LIU S G, et al. Compressive strength of pile foundation concrete in permafrost environment in China[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247:118431.
- [26] LI D, NIU D T, FU Q, et al. Fractal characteristics of pore structure of hybrid basalt-polypropylene fibre-reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 109:103555.

- [27] 张文生,张建波,李建勇,等. 混凝土孔隙面分形特征与测试方法研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3):312-316.
ZHANG Wensheng, ZHANG Jianbo, LI Jianyong, et al. Research of pore area fractal characteristics of concrete and test method[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3):312-316. (in Chinese)
- [28] 张友志,甘德清,薛振林,等. 基于NMR技术的孔隙结构与充填体强度关联机制[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(4):121-128.
ZHANG Youzhi, GAN Deqing, XUE Zhenlin, et al. Correlation mechanism between pore structure and backfill strength based on NMR technology[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(4):121-128. (in Chinese)
- [29] 谢剑,司家伟,亢二聪,等. LNG储罐混凝土超低温冻融损伤演化规律研究[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(1):58-64.
XIE Jian, SI Jiawei, KANG Ercong, et al. Damage evolution law of LNG tank concrete subjected to cryogenic-temperature freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(1):58-64. (in Chinese)
- [30] GAN L, LIU Y, ZHANG Z L, et al. Dynamic mechanical properties of concrete with freeze-thaw damage under different low-temperature conditions[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80:107986.
- [31] 牛建刚,左付亮,王佳雷,等. 塑钢纤维轻骨料混凝土的冻融损伤模型[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2):235-240.
NIU Jiangan, ZUO Fuliang, WANG Jialei, et al. Freeze-thaw damage model of plastic-steel fiber lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):235-240. (in Chinese)
- [32] WANG R J, HU Z Y, LI Y, et al. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze-thaw environment [J]. Construction and Building Materials, 2022, 321:126371.
- [33] HAN X, WANG B M, FENG J J. Relationship between fractal feature and compressive strength of concrete based on MIP[J]. Construction and Building Materials, 2022, 322:126504.
- [34] AN M Z, WANG Y, YU Z R. Damage mechanisms of ultra-high-performance concrete under freeze-thaw cycling in salt solution considering the effect of rehydration[J]. Construction and Building Materials, 2019, 198:546-552.
- [35] HOU C, JIN X G, HE J. Investigation on the microscopic deterioration characteristics of anhydrite rock exposed to freeze-thaw cycles[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(4):04022013.
- [36] 刘鑫,申向东,薛慧君,等. 水泥固化砒砂岩强度与孔隙结构演变的灰熵关联分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24):125-133.
LIU Xin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Grey entropy analysis of strength and pore structure evolution of cement-solidified Pisha sandstone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24):125-133. (in Chinese)
- [37] LI T L, LIU M Y, LI R Y, et al. FBG-based online monitoring for uncertain loading-induced deformation of heavy-duty gantry machine tool base[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144:106864.
- [38] 刘倩,申向东,薛慧君,等. 基于核磁共振技术对不同粗骨料混凝土孔隙特征试验研究[J]. 功能材料, 2017, 48(10):10066-10070, 10076.
LIU Qian, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Experimental study on pore characteristics of different coarse aggregate concrete based on NMR technology[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(10):10066-10070, 10076. (in Chinese)
- [39] 刘倩,申向东,董瑞鑫,等. 孔隙结构对风积沙混凝土抗压强度影响规律的灰熵分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10):108-114.
LIU Qian, SHEN Xiangdong, DONG Ruixin, et al. Grey entropy analysis on effect of pore structure on compressive strength of aeolian sand concrete[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10):108-114. (in Chinese)
- [40] 左晓宝,邹帅,李向南,等. 氯盐环境下粉煤灰-混凝土中钢筋的锈蚀过程[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4):875-881.
ZUO Xiaobao, ZOU Shuai, LI Xiangnan, et al. Corrosion process of steel bar in fly ash-concrete under chloride environment [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):875-881. (in Chinese)
- [41] WANG Y, YANG W, GE Y, et al. Analysis of freeze-thaw damage and pore structure deterioration of mortar by low-field NMR[J]. Construction and Building Materials, 2022, 319:126097.
- [42] 杨晶. 基于核磁共振成像的混凝土冻融损伤特征[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(4):127.
YANG Jing. Freeze-thaw damage characteristics of concrete based on nuclear magnetic resonance imaging [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2020, 37(4):127. (in Chinese)