



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402905

引用格式:陶志金,董敏琪.寒区相变混凝土抗压强度与分形特性关联性分析[J].科学技术与工程,2025,25(6):2511-2520.

Tao Zhijin, Dong Minqi. Correlation analysis of compressive strength and fractal characteristics in cold region phase change concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2511-2520.

寒区相变混凝土抗压强度与分形特性关联性分析

陶志金¹, 董敏琪^{2*}

(1. 甘肃省公路航空旅游投资集团有限公司规划发展部, 兰州 730030; 2. 中国科学院西北生态环境资源
研究院冰冻圈科学与冻土工程重点实验室, 兰州 730030)

摘 要 利用相变材料和载体材料制备相变颗粒,替代混凝土骨料以制备相变混凝土是一种提升寒区混凝土耐久性的新型技术。为研究相变混凝土抗压强度与其孔隙特征之间的关联性,以正十四烷(n-tetradecane, C_{14})和膨胀珍珠岩(expanded perlite, EP)为原材料,制备一种水泥包封的新型相变颗粒(EPC₁₄),随后等体积替换混凝土细骨料制备相变混凝土(phase change concrete, PCC-EPC₁₄),对制备的相变混凝土开展 50、100、150、200 次冻融循环试验,然后采用单轴压缩试验与核磁共振试验测试相变混凝土的抗压强度与孔隙特征,最后利用分形理论计算相变混凝土的 NMR(nuclear magnetic resonance)分形维数,分析抗压强度与 NMR 分形维数之间的关系。结果表明:相变颗粒与混凝土细骨料的最优体积替代比约为 20%,此时,经历 200 次冻融循环后相变混凝土的 NMR 分形维数最大,孔隙度最小,抗压强度最大;此外,相变混凝土抗压强度与其 NMR 分形维数呈正比例关系,与弛豫时间信号面积呈反比例关系。

关键词 相变混凝土;分形特征;抗压强度;冻融循环

中图分类号 TU528.4;

文献标志码 A

Correlation Analysis of Compressive Strength and Fractal Characteristics in Cold Region Phase Change Concrete

TAO Zhi-jin¹, DONG Min-qi^{2*}

(1. Planning and Development Department, Gansu Provincial Highway Aviation Tourism Investment Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, China; 2. State Key Laboratory of Cryosphere Science and Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730030, China)

[Abstract] Utilizing phase change materials and carrier materials to prepare phase change particles, replacing concrete aggregates for the production of phase change concrete, represents a novel technique for enhancing the durability of concrete in cold regions. In order to investigate the correlation between the compressive strength of PCC and its pore characteristics, a novel type of phase change particles with cement-encapsulated, named EPC₁₄, was prepared by using n-tetradecane (C_{14}) and EP (expanded perlite) as raw materials. Subsequently, phase change concrete (PCC-EPC₁₄) was prepared by replacing fine aggregates at an equal volume. The PCC-EPC₁₄s underwent 50, 100, 150, and 200 freeze-thaw cycles. Then, uniaxial compression tests and nuclear magnetic resonance tests were used to test the compressive strength and pore characteristics of the PCC-EPC₁₄s. Finally, the fractal dimension of the PCC-EPC₁₄ was calculated using fractal theory, and the relationship between compressive strength and fractal dimension was analyzed. The results show that the optimal volume replacement ratio of phase change particles to fine aggregates is 20%. At this ratio, the PCC-EPC₁₄ (20%) exhibits the maximum NMR (nuclear magnetic resonance) fractal dimension, minimum porosity, and maximum compressive strength after 200 freeze-thaw cycles. Additionally, a proportional relationship is observed between compressive strength and NMR fractal dimension, while an inverse relationship is found with relaxation time signal area.

[Keywords] phase change concrete; fractal characteristics; compressive strength; freeze-thaw cycles

混凝土作为土木工程领域最广泛应用的建筑材料,其结构破坏时有发生。这种破坏通常由 3 种

主要原因引起,即钢筋腐蚀、冻融引起的损伤以及物理化学腐蚀^[1]。在这 3 种原因中,冻融损伤是导

收稿日期:2024-04-21; 修订日期:2024-12-13

基金项目:公航旅集团重点科技攻关项目(2021-A08)

第一作者:陶志金(1984—),男,汉族,陕西靖边人,硕士,高级工程师。研究方向:寒区交通工程新材料与新结构。E-mail:3494712627@qq.com。

* 通信作者:董敏琪(1998—),男,汉族,甘肃平凉人,博士研究生。研究方向:交通岩土数智化。E-mail:DMQH@my.swjtu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

致寒区混凝土结构破坏失效的主要因素,它将混凝土结构的寿命缩短至仅 20 年^[2],带来巨大的经济损失^[3]。因此,有必要研究提升寒区混凝土耐久性的方法。

混凝土发生冻融破坏需要 3 个先决条件:充足的孔隙水、混凝土内部连通的孔隙通道以及正负温度交替^[4]。基于这 3 个先决条件,存在 3 种提高混凝土抗冻融性能的措施:第一,通过添加引气剂、减水剂或调整水灰比等措施来优化混凝土内部孔隙结构,从而阻断孔隙连通性^[5-6];第二,在混凝土中加入橡胶屑等弹性体,为混凝土内部冰晶的冻胀提供充足的弹性空间^[7];第三,加入相变材料,通过相变材料吸热和放热特性减小混凝土内部温度的变化幅度^[8]。

相变材料主要分为有机相变材料和无机相变材料两类,有机相变材料主要包括石蜡和植物油,而无机相变材料主要是水和盐^[9]。水合盐在相变过程中存在显著的体积变化,且容易发生相分离,这些缺陷限制了水合盐在混凝土中的广泛应用^[10]。因此,诸多学者将有机相变材料(石蜡)掺入混凝土,以制备相变混凝土,从而提升寒区混凝土耐久性。然而,直接将石蜡掺入混凝土中会显著抑制水泥的水化反应^[11],降低混凝土强度。因此,将石蜡材料封装在多孔载体材料中,制备相变颗粒,用以替代混凝土骨料是一种制备相变混凝土的新思路。

混凝土强度取决于其内部孔隙结构,许多学者对普通混凝土强度和孔隙结构之间的关系开展了大量研究^[12]。起初,孔隙度被认为是孔隙结构的唯一考虑因素。然而,室内试验结果表明,仅采用孔隙度预测混凝土抗压强度不够准确^[13]。因为孔隙结构特征除孔隙度外,还包括孔径、孔隙分布集度及孔隙连通性等其他特征。文献[13-14]表明,混凝土内部孔隙表现出分形特征,而孔隙分形特征可以通过分形维数量化,分形维数可以综合表示孔隙度、孔隙分布集度以及孔隙连通性^[9]。针对普通混凝土,采用分形维数预测混凝土抗压强度的效果优于孔隙度,但尚未发现相变混凝土与分形维数的关联性分析。

本文研究采用正十四烷(C_{14})作为相变材料,膨胀珍珠岩(expanded perlite, EP)为载体材料,制备相变颗粒。随后采用等体积替换混凝土细骨料的方式制备相变混凝土,体积替代比分别为:10%、20%、30%、40%,并对各种相变混凝土开展 50 次、100 次、150 次、200 次冻融循环试验。然后利用单轴压缩试验和核磁共振试验测试不同冻融循环次数下相变混凝土抗压强度与孔隙结构特征。最后,利用

分形理论计算相变混凝土核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)分形维数,并分析抗压强度与 NMR 分形维数之间的关系,确定相变颗粒与细骨料的最优体积替代率。本文研究制备一种新型复合相变颗粒用以制备相变混凝土,提高寒区混凝土结构服役寿命,以降低寒区混凝土结构运营和更新成本;同时分析不同冻融循环次数下相变混凝土宏观力学性能与微观孔隙特征之间的关系,为相变混凝土结构耐久性设计提供理论支撑。

1 试验方案

1.1 原材料

本次研究采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其化学成分如表 1 所示,物理性质如表 2 所示;细骨料为河砂,其表观密度为 $2\,670\text{ kg/m}^3$,细度模数为 2.95;粗骨料为机械破碎的碎石,颗粒级配为 5.5 ~ 31.5 mm,表观密度为 $2\,720\text{ kg/m}^3$;减水剂为 LC-HPC 聚羟基高性能减水剂;采用正十四烷(C_{14})作为相变材料,其纯度超过 99.5%,相变温度约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$;采用膨胀珍珠岩(EP)作为相变材料的载体材料,其颗粒级配为 1 ~ 2 mm。

表 1 试验水泥化学成分

成分	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量
质量分数/%	22.35	3.65	59.31	1.96	2.87	3.08

表 2 试验水泥物理性质

类型	初凝 时间/ min	终凝 时间/ min	7 d 抗压 强度/ MPa	28 d 抗压 强度/ MPa	7 d 抗折强 度/MPa	28 d 抗 折强度/ MPa
P·O 42.5	199	256	28.9	49.5	5.1	8.0

1.2 制备相变混凝土

本次研究采用相变颗粒(EPC₁₄)等体积替代混凝土细骨料以制备相变混凝土(PCC-EPC₁₄)。相变颗粒制备流程如下:①将相变材料(C_{14})与载体材料(EP)按照 2:1 的质量比混合加入在烧杯中,搅拌 1 h,然后静置 3 h 得到复合材料;②将复合材料快速冷冻 3 h,防止相变材料从载体材料中外漏;③采用水泥对冷冻后的复合材料包封,得到相变颗粒(EPC₁₄)。相变材料、载体材料与相变颗粒展示如图 1 所示。此外,对相变颗粒开展泄露试验,验证相变颗粒的物理稳定性,泄露试验过程及结果如图 2 所示。泄露试验结果表明,本次研究制备的相变颗粒内部的相变材料呈液态时,可以完全包封在载体材料内,具有优异的物理稳定性。

本次研究相变颗粒与细骨料的体积替代率分别为:10%、20%、30%和40%。制备的相变混凝土被分别标记为:PCC-EPC₁₄(10%)、PCC-EPC₁₄(20%)、PCC-EPC₁₄(30%)、PCC-EPC₁₄(40%);此

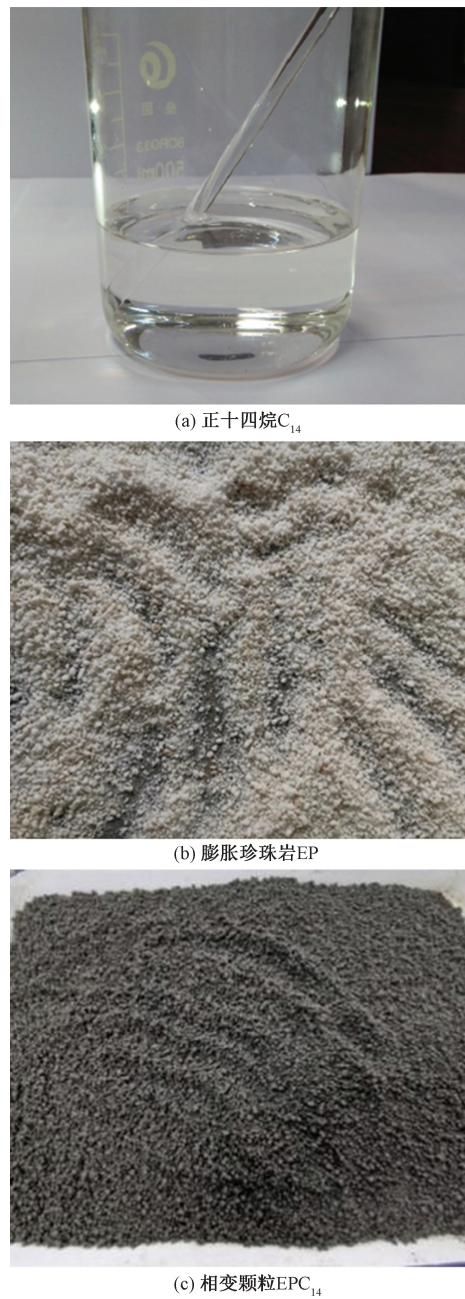


图1 相变颗粒原材料与实物

Fig.1 Raw materials and substances of phase-change particles

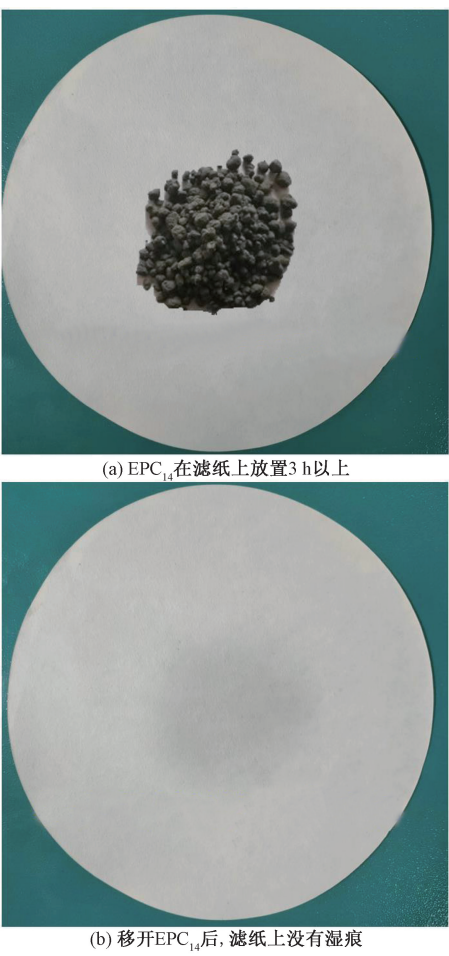


图2 泄露试验过程及结果

Fig.2 Leakage test process and results

外,设置普通混凝土,即PCC-EPC₁₄(0%)为对照组,对制备的各类混凝土标准养护到规定时间后开展相关试验。各类混凝土的配合比如表3所示。

1.3 试验设备与试验方法

本次研究采用快速冻融试验、单轴压缩试验及核磁共振试验分析寒区相变混凝土力学性质与微孔结构关系。具体地,采用快速冻融试验机对相变混凝土试样开展快速冻融试验;通过单轴压缩试验测试不同冻融循环次数相变混凝土的抗压强度;利用核磁共振仪测试不同冻融循环次数相变混凝土的孔隙特征。相变混凝土制备及相关试验设备如图3所示。

表3 混凝土配合比						
Table 3 Concrete mix proportion						
类型	EPC ₁₄ /(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	细骨料/(kg·m ⁻³)	粗骨料/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	水灰比
PCC-EPC ₁₄ (0%)	0	370	739.50	1 155.95	185	5.55
PCC-EPC ₁₄ (10%)	36.15	370	665.14	1 155.95	185	5.55
PCC-EPC ₁₄ (20%)	72.30	370	591.24	1 155.95	185	5.55
PCC-EPC ₁₄ (30%)	108.45	370	517.33	1 155.95	185	5.55
PCC-EPC ₁₄ (40%)	144.60	370	443.43	1 155.95	185	5.55



图3 试验设备

Fig. 3 Experimental equipment

2 单轴抗压强度试验结果分析

不同冻融循环次数及不同相变颗粒掺量下相变混凝土抗压强度变化如图4所示。①相变混凝土抗压强度随相变颗粒掺量增加逐渐减小,但减小幅度较小;0次冻融循环时,PCC-EPC₁₄(0%)的抗压强度为39.54 MPa,PCC-EPC₁₄(40%)的抗压强度为35.72 MPa,减小幅度为9.66%,相关研究表明,直接将相变材料掺入混凝土严重降低混凝土强度,减小幅度可达50%左右^[15]。因此,本次研究制备的相变颗粒可以大幅提高混凝土强度;②相变混凝土抗压强度随冻融循环次数增加逐渐减小,200次冻融循环后,相变混凝土抗压强度减小幅度依次为PCC-EPC₁₄(0%)58.12%、PCC-EPC₁₄(40%)33.82%、PCC-EPC₁₄(10%)26.99%、PCC-EPC₁₄(30%)19.13%、PCC-EPC₁₄(20%)13.18%,可知相变混凝土比普通混凝土具有更小的抗压强度衰减幅度;③相比其他3种相变混凝土,PCC-EPC₁₄(40%)具有更高的衰减幅度,主要原因为相变颗粒自身具有较高的孔隙率,相变颗粒掺量较大时在混凝土内部形成相变颗粒的点接触,进一步形成混凝土内部的连通孔隙,有利于冻融循环过程中混凝土内部水分迁移,造成更大的抗压强度衰减幅度;④200次冻融循环后,PCC-EPC₁₄(0%)、PCC-EPC₁₄(10%)、PCC-EPC₁₄(20%)、PCC-EPC₁₄(30%)、PCC-EPC₁₄(40%)的抗压强度分别为16.56、28.73、33.54、30.73、23.64 MPa,可见掺入相变颗粒能有效地提升寒区混凝土冻融耐久性,且200次冻融循环后,PCC-EPC₁₄(20%)具有最大的抗压强度,即相变颗粒的最优细骨料体积替代率为20%。

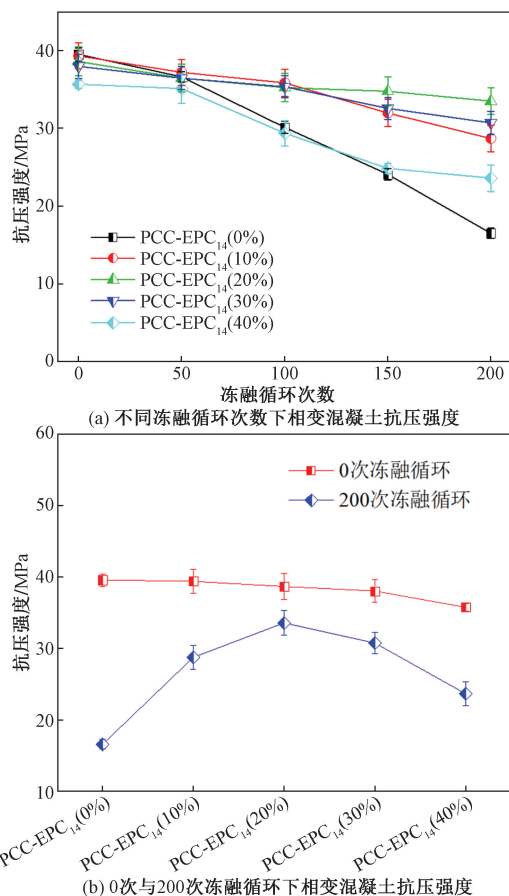


图4 相变混凝土抗压强度变化

Fig. 4 Variations in compressive strength of phase-change concrete

3 核磁共振试验结果分析

3.1 T_2 图谱

核磁共振试验通常被用来研究材料内部孔隙结构特征。本次研究利用核磁共振试验研究相变混凝土内部孔隙结构,实验结果通常用流体的弛豫时间来描述,弛豫时间可近似表达为

$$T_2 \approx \rho_2 \frac{V}{S} \quad (1)$$

式(1)中: T_2 为弛豫时间; ρ_2 为横向表面弛豫强度; V 为孔隙体积; S 为孔隙表面。

因此,孔隙半径 r 可以表达为

$$r \approx \rho_2 F_s T_2 \quad (2)$$

式(2)中: F_s 为无量纲的孔隙结构几何形状因子,本次研究假定内部孔隙结构为圆柱形,此时 F_s 取2;当 ρ_2 为5 nm/ms时,得到的混凝土弛豫时间在各个孔半径等级下都能很好地吻合^[11]。此外,相关学者依据孔隙半径大小,将混凝土内部孔隙划分为大孔($r > 1 \mu\text{m}$)、毛细孔($0.1 \mu\text{m} < r \leq 1 \mu\text{m}$)、过渡孔($0.01 \mu\text{m} < r \leq 0.1 \mu\text{m}$)和凝胶孔($r \leq 0.01 \mu\text{m}$)。

4 种类型^[16],本次研究也采用这种孔隙分类方法。

相变混凝土在 0 次和 200 次冻融循环下的弛豫时间图谱如图 5 所示。由图 5(a)可知,普通混凝土,即 PCC-EPC₁₄(0%),在 0 次冻融循环时弛豫时间主要在过渡孔区间内呈现单峰值,而相变混凝土分别在过渡孔和毛细孔两个区间内呈现双峰值,这种现象归因于相变颗粒自身为多孔材料,相变混凝土孔隙率随相变颗粒掺量的增加而增大。200 次冻融循环后,普通混凝土呈现贯通的三峰值,表明 200 次冻融循环后,普通混凝土内部孔隙

呈连通状态;而相变混凝土依然在过渡孔和毛细孔区间呈双峰值现象,但相比 0 次冻融循环,所有混凝土的信号峰值均向右移动,表明经过 200 次冻融循环后,混凝土内部孔隙半径呈现不同程度的增大现象。

3.2 孔隙度表征

弛豫时间信号幅值面积可以表征混凝土孔隙度^[9],图 6 为 0 次和 200 次冻融循环下相变混凝土弛豫时间信号面积。0 次冻融循环时,弛豫时间信号面积与相变颗粒掺量呈正比例关系,即孔隙度随

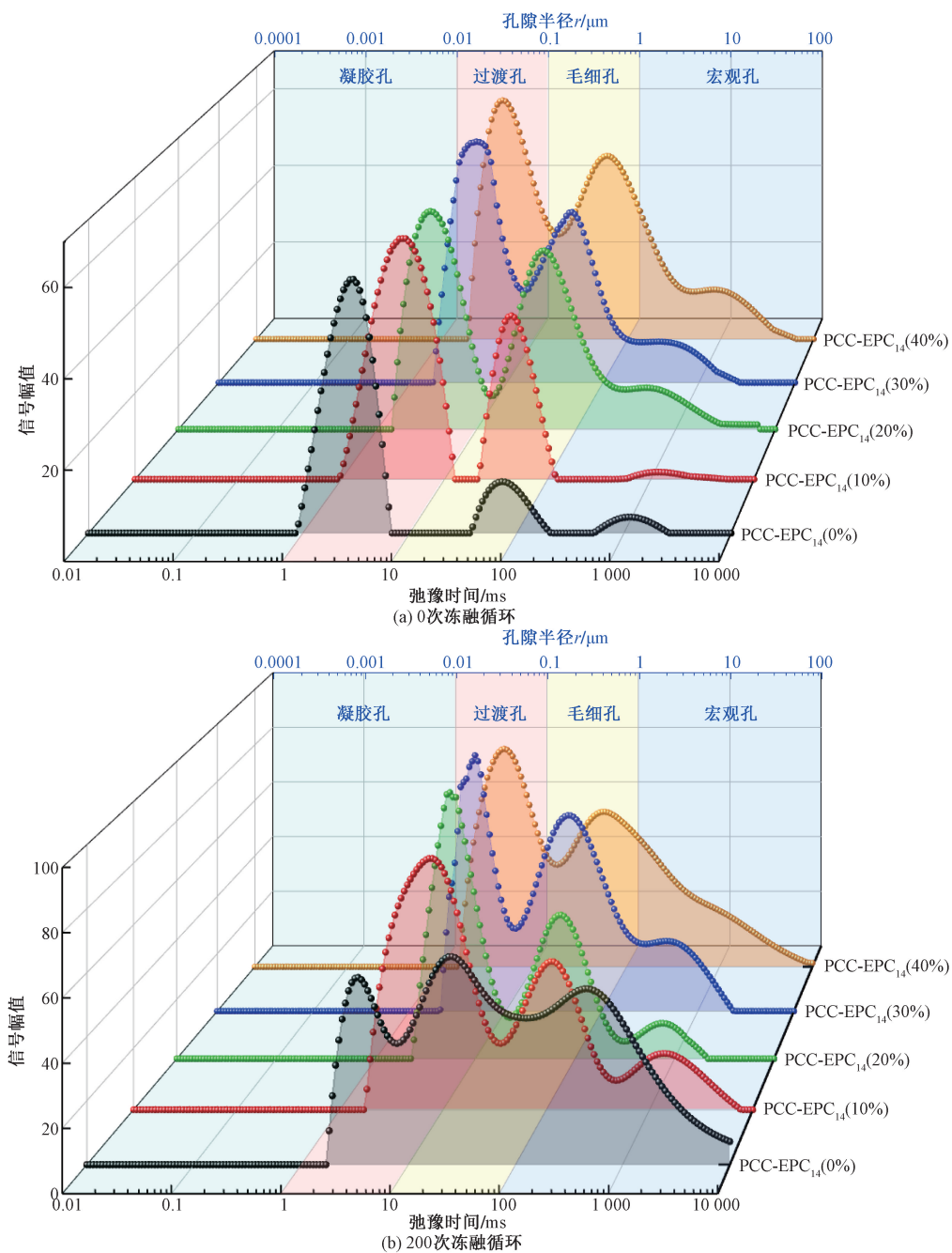


图 5 不同冻融循环次数下相变混凝土弛豫时间图谱

Fig. 5 Relaxation time spectrum of phase-change concrete under different freeze-thaw cycle counts

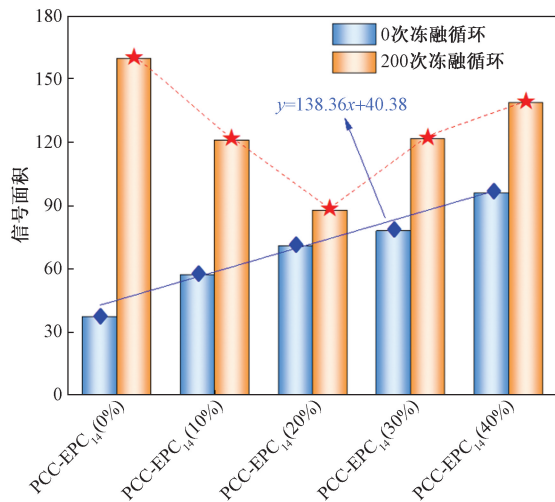


图6 弛豫时间信号面积
Fig. 6 Relaxation time signal area

相变颗粒掺量呈线性增长趋势;200次冻融循环后,所有混凝土弛豫时间信号面积均呈增大现象,弛豫时间信号面积由大到小依次为:PCC-EPC₁₄(0%)、PCC-EPC₁₄(40%)、PCC-EPC₁₄(30%)、PCC-EPC₁₄(10%)、PCC-EPC₁₄(20%)。表明相变颗粒可以大幅减小寒区混凝土内部孔隙度,提高寒区混凝土冻融耐久性,但过量的掺入相变颗粒会造成混凝土内部存在较多的初始连通孔隙,有利于冻融过程中混凝土内部水分迁移,不利于抵抗寒区冻融破坏。

相关研究表明,毛细孔和宏观孔是影响混凝土力学性能的主要因素^[9]。图7为0次和200次冻融循环下相变混凝土毛细孔和宏观孔区间弛豫时间信号面积。0次冻融循环时,混凝土毛细孔和宏观孔信号面积随相变颗粒掺量的增加线性增长,这与总信号面积变化趋势相似;200次冻融循环后,PCC-EPC₁₄(20%)依然具有最小的毛细孔和宏观孔信号面积。因此,从孔隙度方面表明,相变颗粒的最优细骨料体积替代率为20%,PCC-EPC₁₄(20%)具有最优的寒区耐久性。

4 分形特征

混凝土微孔结构决定混凝土宏观力学性能^[17-18],核磁共振(NMR)分形维数可以很好地表征混凝土孔隙特征。因为NMR分形维数可以很好地解释混凝土孔隙结构的复杂性,较小的NMR分形维数通常表示孔隙排列复杂且不规则^[19]。此外,NMR分形维数直接反映了孔隙的连通性和空间分布特征^[13],NMR分形维数越小,表示混凝土内部孔隙集成度高,孔隙间连通性好,连通的微孔有利于混凝土在外荷载作用下产生损伤。相反,较大的NMR分形维数表明孔隙的分布是分散孤立的,在外

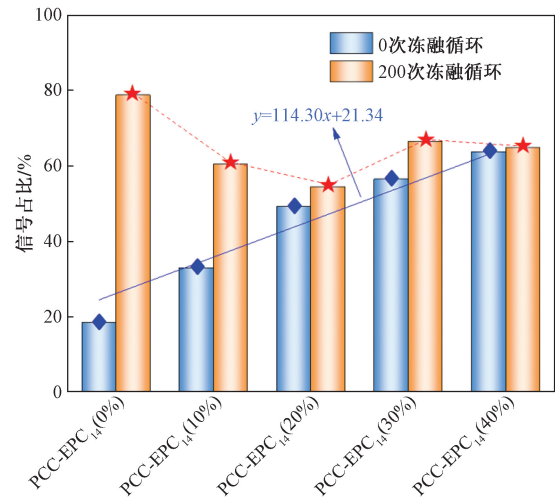


图7 毛细孔和宏观孔弛豫时间信号面积占比
Fig. 7 Ratio of relaxation time signal area between capillary and macropore

荷载作用下不易产生损伤。相关研究也表明,NMR孔隙分形维数与孔隙度呈反比关系,即混凝土内部孔隙度越小,NMR分形维数越大。因此,NMR分形维数是一个可以代表孔隙度与孔隙分布特征的综合指标,其计算公式为

$$\lg S_v(<r) = (3-D)\lg T_2 + (D-3)\lg T_{2,\max} \quad (3)$$

式(3)中: S_v 为孔隙体积分数; $<r$ 表示小于某一半径的所有孔隙的体积分数; r 可取值 $0 \sim r_{\max}$; D 为NMR分形维数; $T_{2,\max}$ 为最大弛豫时间。

相关研究表明,毛细孔和宏观孔是影响混凝土力学性能的主要因素^[9]。因此本次研究分析了毛细孔和宏观孔NMR分形特征,0次冻融循环下相变混凝土毛细孔和宏观孔NMR分形特征如图8所示,200次冻融循环下如图9所示,相变混凝土毛细孔和宏观孔NMR分形维数如表4所示。在0次冻融

表4 不同冻融循环次数下相变混凝土的NMR分形维数
Table 4 NMR fractal dimension of phase-change concrete under different freeze-thaw cycle counts

混凝土试样		毛细孔和宏观孔		
		K	D	R^2
0次冻融循环	PCC-EPC ₁₄ (0%)	0.085	2.915	0.543
	PCC-EPC ₁₄ (10%)	0.094	2.906	0.672
	PCC-EPC ₁₄ (20%)	0.110	2.890	0.823
	PCC-EPC ₁₄ (30%)	0.122	2.878	0.849
	PCC-EPC ₁₄ (40%)	0.136	2.864	0.855
200次冻融循环	PCC-EPC ₁₄ (0%)	0.208	2.792	0.907
	PCC-EPC ₁₄ (10%)	0.181	2.819	0.894
	PCC-EPC ₁₄ (20%)	0.148	2.852	0.900
	PCC-EPC ₁₄ (30%)	0.155	2.845	0.885
	PCC-EPC ₁₄ (40%)	0.196	2.804	0.879

注: K 为拟合曲线斜率。

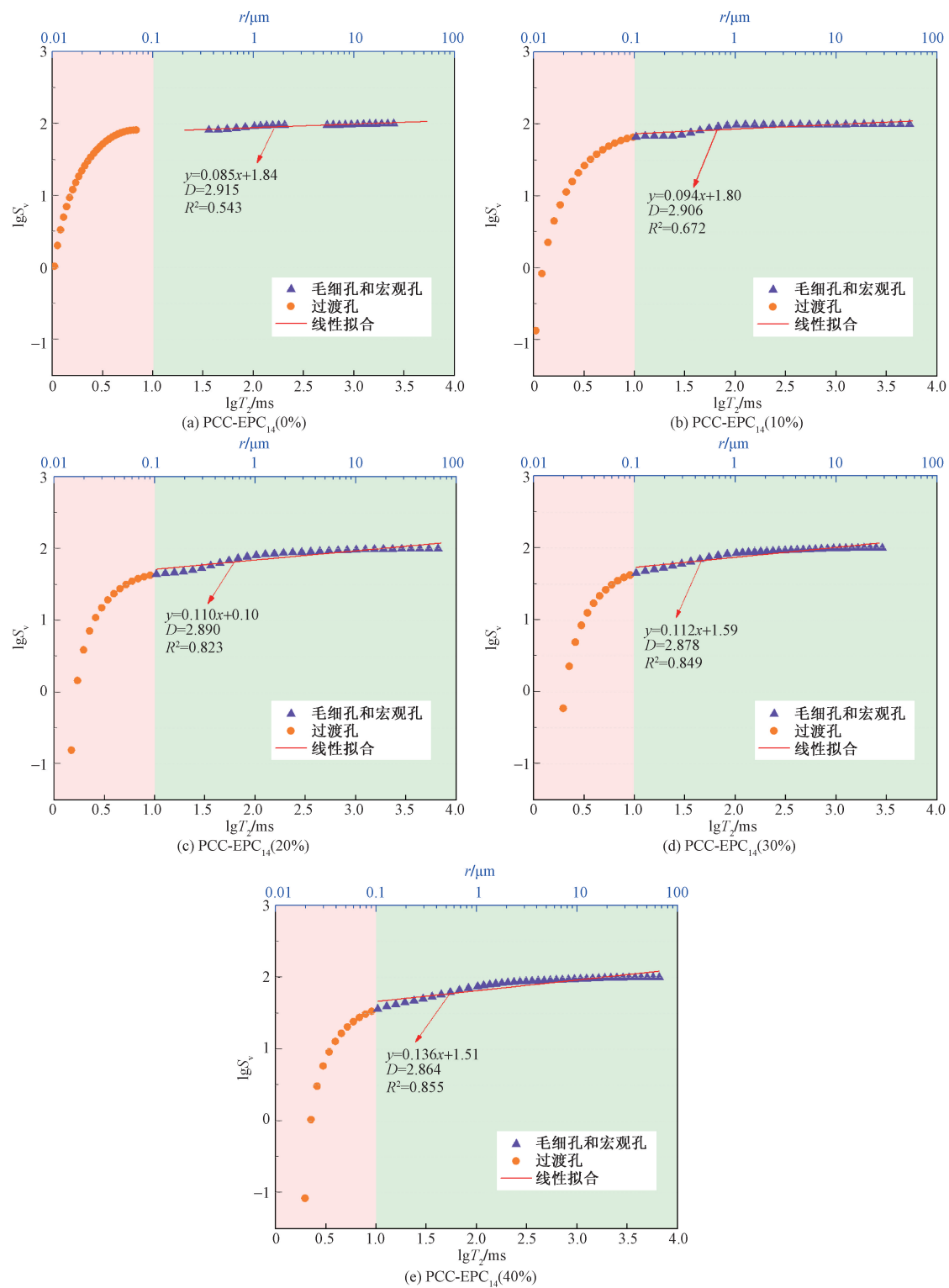


图 8 0 次冻融循环下相变混凝土分形特征

Fig. 8 Fractal characteristics of phase-change concrete under 0 freeze-thaw cycles

循环时,随着相变颗粒含量的增加,毛细孔和宏观孔 NMR 分形维数呈下降趋势,导致相变混凝土孔隙度增大,孔隙结构的集成度增加,宏观表现为抗压强度随相变颗粒掺量的增加逐渐降低。200 次冻融循环后,PCC-EPC₁₄(0%)具有最小的 NMR 分形

维数,表明 PCC-EPC₁₄(0%)具有最大的孔隙度,且孔隙集成度高,宏观表现为抗压强度最小;相反 PCC-EPC₁₄(20%)具有最大的毛细孔和宏观孔 NMR 分形维数,表明 PCC-EPC₁₄(20%)具有最小的孔隙度和孔隙集成度,宏观表现为抗压强度最大。

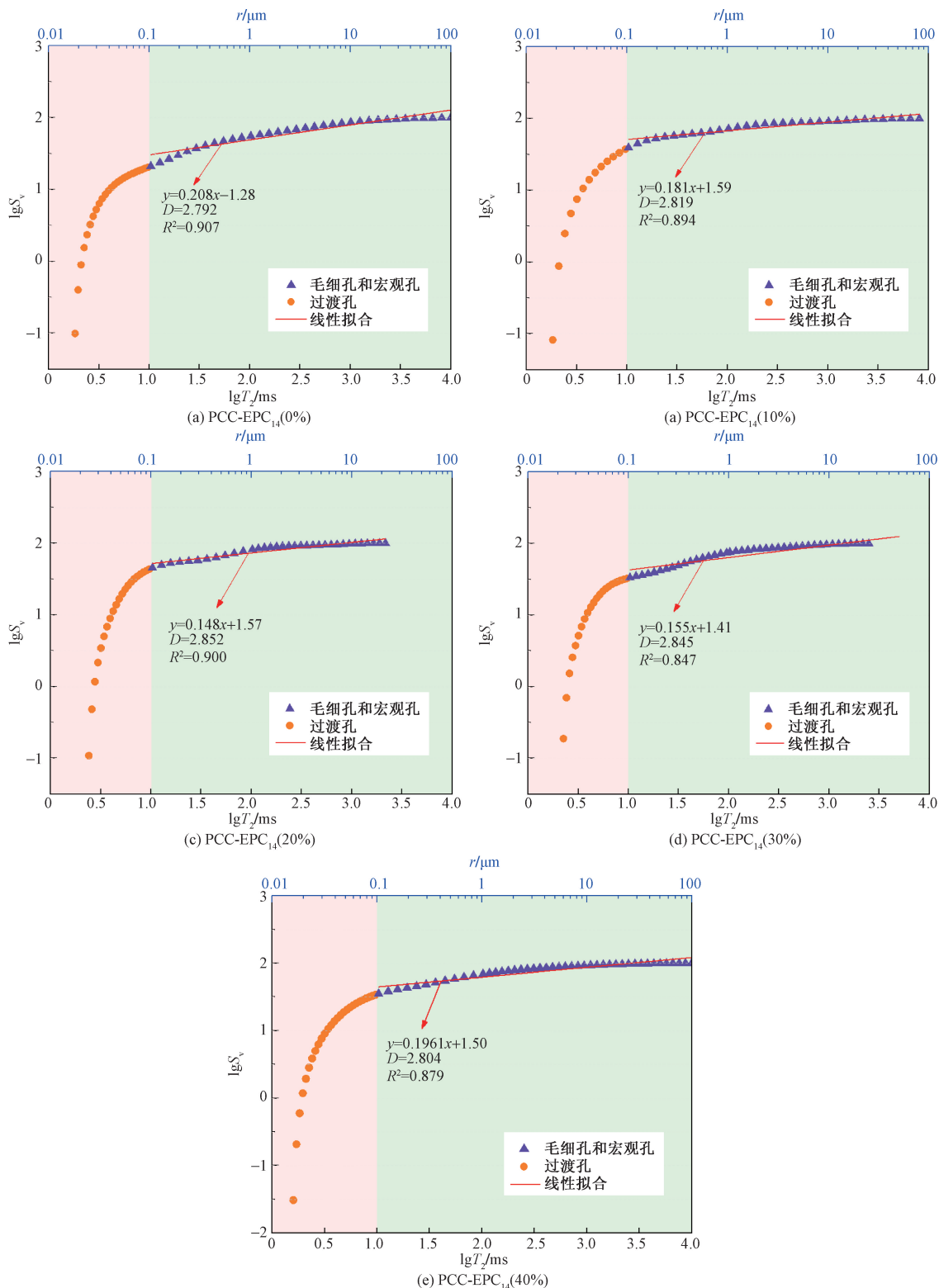


图9 200次冻融循环下相变混凝土分形特征

Fig. 9 Fractal characteristics of phase-change concrete under 200 freeze-thaw cycles

5 分形特性与抗压强度关联性分析

5.1 NMR 弛豫时间信号面积与抗压强度关系

NMR 弛豫时间信号面积与抗压强度关系如

图 10 所示,其中图 10(a)为弛豫时间信号总面积与抗压强度关系,图 10(b)为毛细孔和宏观孔区间信号面积与抗压强度关系。随着信号面积的增大,抗压强度逐渐减小,信号面积与抗压强度呈反比例关

系。对比图 10(a) 和图 10(b), 毛细孔和宏观孔信号面积线性拟合相关系数大于信号总面积, 证明了毛细孔和宏观孔是影响混凝土力学性能的主要因素。

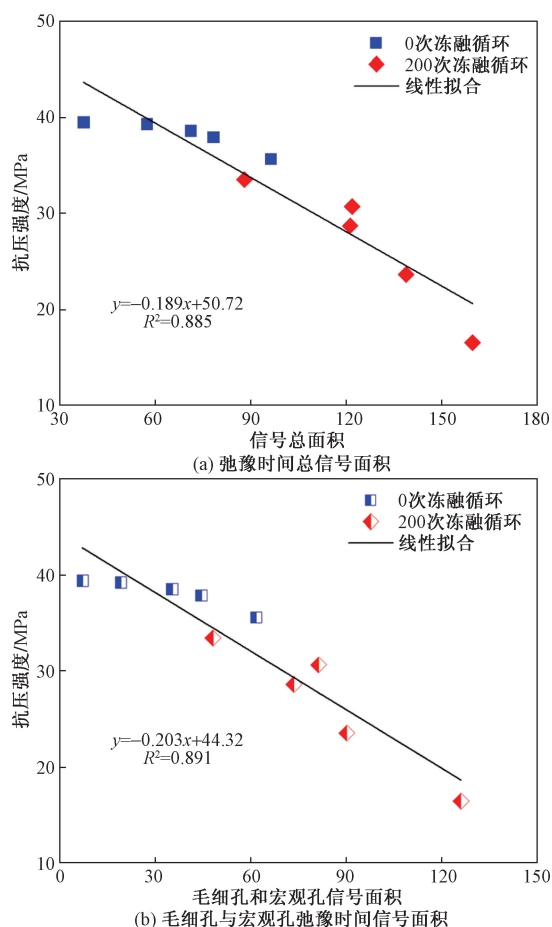


图 10 抗压强度与弛豫时间信号面积关系

Fig. 10 Relationship between compressive strength and relaxation time signal area

5.2 抗压强度与 NMR 分形维数关系

图 11 为抗压强度与 NMR 分形维数关系, 相变混凝土 NMR 分形维数越大, 孔隙度越小, 且孔隙集成度小, 连通性差, 在外荷载作用下不易产生损伤, 表现为抗压强度大。这一研究结论与普通混凝土抗压强度与 NMR 分形维数的关系一致^[13,20]。

6 结论

(1) 本次研究制备了一种新型相变颗粒用以替代混凝土细骨料, 制备相变混凝土; 相比普通混凝土, 相变混凝土具有明显的寒区耐久性优势, 且相变颗粒的最优细骨料体积替代率为 20%, 此时, 相变混凝土经过 200 次冻融循环后, 其抗压强度最大。

(2) 0 次冻融循环下, 相变混凝土弛豫时间信号面积随相变颗粒掺量逐渐增大, NMR 分形维数随相

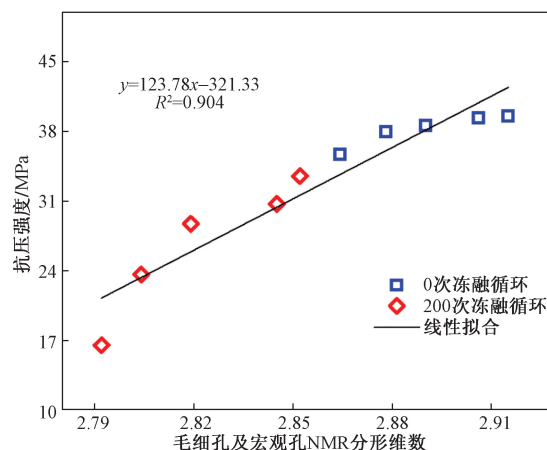


图 11 抗压强度与 NMR 分形维数关系

Fig. 11 Relationship between compressive strength and NMR fractal dimension

变颗粒掺量逐渐减小; 200 次冻融循环后, 细骨料替代率为 20% 的相变混凝土具有最大的 NMR 分形维数, 最小的弛豫时间信号面积, 宏观表现为最大的抗压强度。

(3) 与普通混凝土抗压强度与 NMR 分形维数的关系类似, 相变混凝土抗压强度与 NMR 分形维数呈正比例关系, 与弛豫时间信号面积呈反比例关系。

本次研究制备的相变颗粒可以有效降低寒区混凝土结构冻融损伤, 并有助相关学者理解混凝土宏观力学性能与微观孔隙结构之间的关系。然而, 本次研究制备的相变颗粒局限于室内小样本制备, 对物理性能稳定的相变颗粒大批量制备工艺亟待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Rong X, Li L, Zheng S, et al. Freeze-thaw damage model for concrete considering a nonuniform temperature field [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 72. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106747.
- [2] Zheng X, Wang Y, Zhang S, et al. Research progress of the thermophysical and mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2022, 330. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127254.
- [3] 汪尧, 黎圣君, 叶敏, 等. 冻融循环下混凝土微观结构演化及力学损伤特性研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 5853-5874.
Wang Yao, Li Shengjun, Ye Min, et al. Review of meso-structural evolution and mechanical damage characteristic of concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 5853-5874.
- [4] Gong F, Ren M, Maekawa K. Simulation of spatially non-uniform frost damage in RC beams under various exposure and confining conditions [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 859-870.

- [5] 李辉, 陈锋, 匡渝阳, 等. 外掺剂对泡沫混凝土影响及冻融-循环破坏研究[J]. 混凝土, 2023(5): 115-120, 123.
Li Hui, Chen Feng, Kuang Yuyang, et al. Study on the effect of admixture on foam concrete and its freeze-thaw-cycle failure[J]. Concrete, 2023(5): 115-120, 123.
- [6] 苟耀虎, 余弦, 范承宁, 等. 渗透结晶型混凝土的抗冻性能研究[J]. 混凝土, 2023(11): 80-83.
Gou Yaohu, Yu Xian, Fan Chengning, et al. Effect of capillary crystalline material additives on frost resistance of concrete[J]. Concrete, 2023(11): 80-83.
- [7] 李琦, 徐飞, 郑贺民, 等. 冻融循环作用下橡胶混凝土蠕变特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3261-3268.
Li Qi, Xu Fei, Zheng Hemin, et al. Experimental study on creep characteristics of rubber concrete under freeze-thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 3261-3268.
- [8] 王军. 相变控温混凝土的理论基础研究和制备[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
Wang Jun. Study on the basic theories and preparation of phase change and temperature self-control concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [9] Dong M, Li S, Yu B, et al. Experimental investigation on the freeze-thaw durability of a phase change concrete in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 218. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.104102.
- [10] Wu Y, Wang T. Preparation and characterization of hydrated salts/silica composite as shape-stabilized phase change material via sol-gel process[J]. Thermochimica Acta, 2014, 591: 10-15.
- [11] Yu B, Li S, Zhu H, et al. A composite phase change material for improving the freeze-thaw resistance performance of cement mortars[J]. Construction and Building Materials, 2023, 387. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131657.
- [12] Jambor J. Pore structure and strength development of cement composites[J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(6): 948-954.
- [13] Jin S, Zhang J, Han S. Fractal analysis of relation between strength and pore structure of hardened mortar[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 1-7.
- [14] Ji X, Chan S Y N, Feng N. Fractal model for simulating the space-filling process of cement hydrates and fractal dimensions of pore structure of cement-based materials[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(11): 1691-1699.
- [15] Bentz D P, Turpin R. Potential applications of phase change materials in concrete technology[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(7): 527-532.
- [16] 于蕾, 张君, 张金喜, 等. 水泥混凝土宏观性能与孔结构量化关系模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(11): 1459-1464.
Yu Lei, Zhang Jun, Zhang Jinxi, et al. Quantitative relation model between macro performance and pore structure of cement concrete[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(11): 1459-1464.
- [17] Cui S, Liu P, Cui E, et al. Experimental study on mechanical property and pore structure of concrete for shotcrete use in a hot-dry environment of high geothermal tunnels[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 124-135.
- [18] Islam M I, Talukder M K, Islam M M, et al. Macrophage activation syndrome in paediatric rheumatic diseases[J]. Mymensingh Medical Journal, 2017, 26(2): 356-363.
- [19] Zhang L, Zhou J. Fractal characteristics of pore structure of hardened cement paste prepared by pressurized compact molding[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119856.
- [20] Zarnaghi V N, Fouroghi-Asl A, Nourani V, et al. On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 557-564.