

引用本文:何晓雁,周 曜,刘平源,等. 基于灰色理论的 CBC 单面冻融后抗压强度与孔结构参数关系研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3):1-9.

HE Xiaoyan, ZHOU Yao, LIU Pingyuan, et al. Relationship between compressive strength and pore structure of CBC after single side freeze-thaw based on grey theory[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3):1-9.

DOI:10.19815/j.jace.2021.10067

基于灰色理论的 CBC 单面冻融后抗压强度与孔结构参数关系研究

何晓雁^{1,2}, 周 曜^{1,2}, 刘平源^{1,2}, 张天晓^{1,2}

(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)

摘要:通过对水泥基材料(CBC)进行以 NaCl 溶液为冻融介质的单面冻融试验,探究 CBC 抗压强度及含气量、气泡间距系数、气泡比表面积、气泡平均弦长、气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率等微观孔结构参数随冻融循环次数增加的变化规律,并运用灰色理论对抗压强度与各孔结构参数的内在联系进行分析。利用灰色相对关联度筛选出微观孔结构参数中与抗压强度关联最大的参数,对其进行了相关模拟和预测,并建立宏观性能与微观孔结构参数间的定量关系。结果表明:随冻融循环次数增加,CBC 抗压强度逐渐降低,冻融循环后期下降速率加快;试验过程中试件内部含气量、气泡间距系数、气泡平均弦长逐渐增大,而气泡比表面积逐渐减小;灰色 Verhulst 模型相较于 GM(1,1)模型更适用于气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率的模拟;采用灰靶决策模型定义的综合孔结构参数与抗压强度关联性更强,基于综合孔结构参数建立的模型精度更高。

关键词:水泥基复合材料;孔结构参数;灰色理论;单面冻融;抗压强度

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)03-0001-09

Relationship between compressive strength and pore structure of CBC after single side freeze-thaw based on grey theory

HE Xiaoyan^{1,2}, ZHOU Yao^{1,2}, LIU Pingyuan^{1,2}, ZHANG Tianxiao^{1,2}

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

Abstract: Through the single-side freeze-thaw test of cement-based composite materials (CBC) with NaCl solution as the freeze-thaw medium, the compressive strength and micro-pore structure parameters of CBC, such as air content, bubble spacing coefficient, bubble specific surface area, bubble average chord length and chord length frequency with bubble chord length larger than 20 μm , were investigated with the increase of freeze-thaw cycles. The internal relationship between compressive strength and pore structure parameters was analyzed by grey theory. The parameters

收稿日期:2021-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(11862022);内蒙古自治区自然科学基金项目(2020LH05008);内蒙古自治区教育厅项目(NJZY19080)

作者简介:何晓雁(1970-),女,副教授,硕士生导师,E-mail:2732108278@qq.com。

with the greatest correlation with compressive strength among the microscopic pore structure parameters were screened by grey relative correlation degree, and the related simulation and prediction were carried out, and the quantitative relationship between macroscopic properties and microscopic pore structure parameters was established. The results show that with the increase of freeze-thaw cycles, the compressive strength of CBC decreases gradually, and the rate of decline in the later stage of freeze-thaw cycles increases. During the test, the internal air content, bubble spacing coefficient and average chord length of bubbles gradually increase, while the specific surface area of bubbles gradually decrease. Compared with the GM (1,1) model, the grey Verhulst model is more suitable for the simulation of the chord length frequency of the bubble string larger than 20 μm . The comprehensive pore structure parameters defined by the grey target decision model have a stronger correlation with the compressive strength, and the model based on the comprehensive pore structure parameters has higher accuracy.

Key words: cement based composite material; pore structure parameter; grey theory; single side freeze-thaw; compressive strength

0 引言

水泥基材料(CBC)是以硅酸盐水泥和多种工业废渣为胶凝体系、以高强集料和纤维为增强项,通过添加高效减水剂,在低水胶比条件下制备的高强度、良好流动性能和优异耐久性性能的新型复合材料^[1-3]。

中国北方地区气候寒冷,近年来因除冰盐、融雪剂的大量使用,导致混凝土结构容易发生盐冻破坏^[4-5]。在该环境中,混凝土的性能会发生很大程度退化,严重影响建筑的安全性、耐久性。因此,研究混凝土材料冻融循环后的宏观性能及微观损伤,具有重要学术意义和工程价值。杨才千等^[6]提出了适用性和拟合度较好的冻融循环损伤指数模型,反映了乙烯醇纤维快凝混凝土的冻融损伤演化过程,其抗压强度等力学性能随着冻融循环次数增加不断劣化。徐存东等^[7]对混凝土进行了室内快速冻融试验,分别设置了 NaCl 溶液、Na₂SO₄ 溶液和水溶液 3 种冻融介质,发现对其性能影响最大的为 NaCl 溶液,其次为 Na₂SO₄ 溶液,最后为水溶液,并以动弹性模量为损伤变量建立混凝土抗压强度、抗折强度与损伤度的相关模型。Tian 等^[8]对含有粉煤灰的混凝土在冻融循环和硫酸盐侵蚀耦合作用下的损伤进行了研究,发现含有 10% 粉煤灰的混凝土具有更好的抗冻抗侵蚀能力,且所有试验组经历了该耦合作用后,内部微孔和毛细管孔的比例明显下降,大孔数量有着较大幅度的提升。安雪^[9]对以聚乙烯醇纤维为增韧材料、以沙漠砂为细集料的高韧性水泥基复合材料进行了单面冻融试验研究,将细骨料中的腾格里沙漠砂和毛乌素沙漠砂作为变量,研究发现

腾格里沙漠砂组的抗冻性能更加优异,并基于相对动弹性模量和抗压强度,预测了高韧性水泥基复合材料实际环境中的使用寿命。赵燕茹等^[10]研究了混凝土在单面冻融试验下不同的玄武岩纤维掺量及冻融循环次数对其抗冻性能的影响,并提出了基于孔结构的复合因素抗压强度模型。Zhu 等^[11]研究了自密实混凝土在经历了冻融循环后的三轴机械性能,得出随着冻融循环次数的增加,三轴荷载下混凝土的宏观断裂逐渐向轴向压缩方向扩散,由一处断裂向多处断裂转变,同时峰值偏差应力随限制压力的增加而增加。占宝剑^[12]对海工混凝土的抗盐冻性能进行了研究,用损伤值 ω 来定量分析混凝土在海水冻融环境下的损伤,并以灰色 GM(1,1) 模型对海水冻融混凝土的损伤程度进行预测,发现由该模型得到的预测值与试验值吻合良好。随着冻融循环后混凝土宏观性能研究的深入,越来越多的学者尝试将混凝土的宏观性能与微观孔隙结构的演变联系起来。Zhou 等^[13]基于多重回归法和灰色理论,分析了混凝土中孔结构残余强度、抗冻指数的相关性,将道路混凝土在干湿循环、装载、冻融下的微观孔结构损伤与宏观性能劣化建立了良好的联系。薛翠真等^[14]通过压汞法和电镜等技术发现,冻融过程中混凝土内部结构逐渐疏松,孔结构不断劣化,导致试件内部裂纹不断产生、发展、连通直至破坏,使其宏观性能呈现出大幅下降的趋势。许多学者也倾向于找到混凝土内部微观结构影响宏观性能的原因。但已有研究^[15-17]中,仅将内部孔结构参数中的最优影响因素与宏观性能进行联系,而忽略了其他次要参数对其造成的影响,导致提出的模型精度不够。

快冻法采用全浸没式试验方式,与路面混凝土的实际受冻有极大差别。相比而言,单面冻融法则适用于测定混凝土材料在大气环境中且与盐接触条件下的抗冻性能,能更好地反映路面受冻状况^[18]。因此本文采用单面冻融试验,研究了 CBC 在 NaCl 溶液中冻融前后结构内部孔结构变化规律,利用灰色相对关联度,筛选出微观孔结构参数中与抗压强度关联最大的参数,对其进行相关模拟和预测,并基于此建立宏观性能与微观孔结构参数间的定量关系。为了提高模型精度,基于 5 个孔结构参数,采用灰靶决策模型计算综合效果测度函数,并将其定义为综合孔结构参数,最后与抗压强度拟合建立了相关模型。

1 试验材料及方法

1.1 原材料及 CBC 配合比

水泥采用 P.O42.5;石英砂粒径范围为 0.225~0.45 mm;天然河砂粒径范围为 0.15~4.75 mm;水采用自来水;硅灰中 SiO₂ 质量分数大于 95%;粉煤灰采用 II 级粉煤灰;玄武岩纤维抗拉强度为 4 256 MPa;减水剂采用聚羧酸 JSM-1 型高效减水剂,减水率为 30%~35%。

本试验中 CBC 的水胶比为 0.18,砂胶比为 1.2,粉煤灰替代率为 40%,天然砂替代率为 33%。具体配合比如表 1 所示。

表 1 CBC 配合比
Table 1 CBC mix proportion kg·m⁻³

水泥	粉煤灰	硅灰	石英砂	天然砂	玄武岩纤维	水	减水剂
450	300	150	724	356	4	162	9

1.2 试验方法

单面冻融试验采用北京数智意隆仪器有限公司生产的混凝土单边冻融机,根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2019)中相关规定进行,冻融介质为浓度 6% 的 NaCl 溶液,设置 3 块平行试件,尺寸为 150 mm×110 mm×70 mm,除测试面和与测试面相平行的顶面外,四周均用环氧树脂进行密封,将试件进行 7 d 预吸水处理,随后放入试件盒内进行单面冻融试验,最大冻融循环次数为 160 次。

抗压强度试验按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)中相关规定进行,设置 3 块平行试件,每经历 32 次冻融循环对试件的抗压强度进行一次测试,加载速率为 1.2~1.4 MPa·s⁻¹。

微观孔结构试验采用丹麦生产的 RapidAir457 孔结构分析仪测定,将 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件切割成厚度为 1~2 cm 的试样,每组试验取 3 个试样,经过研磨、涂黑、烘干、涂锌、刮层后放入仪器中,每经历 32 次冻融循环测定一次 CBC 试样的含气量、气泡间距系数、气泡比表面积、气泡平均弦长。

2 试验结果及分析

2.1 抗压强度试验结果及分析

对经历不同单面冻融循环次数的 CBC 进行抗压强度试验,结果如图 1 所示。随着冻融循环次数增加,CBC 抗压强度逐渐降低,在冻融循环后期 CBC 抗压强度下降速率加快,代表其宏观性能在迅速劣化,在经历 160 次冻融循环后,强度损失率达到了 35.4%。这是由于随着冻融循环次数增加,氯盐不断侵入 CBC,氯离子首先会与水泥的水化产物 Ca(OH)₂ 发生化学反应,生成 CaCl₂,水泥熟料中的 3CaO·Al₂O₃(C₃A)会持续与 CaCl₂ 结合成较为稳定的化合物 C₃A·CaCl₂·10H₂O,俗称 Friedel 复盐,主要化学反应为

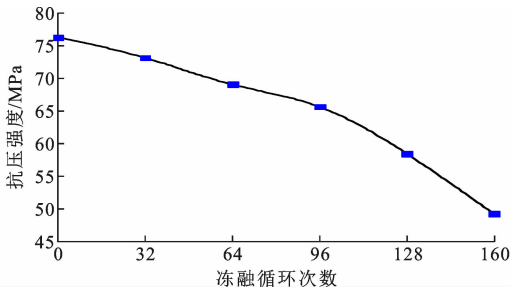
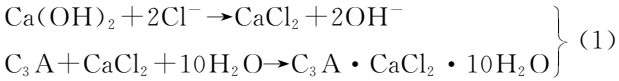


图 1 CBC 在不同冻融循环次数下的抗压强度
Fig. 1 Compressive strength of CBC under different freeze-thaw cycles

随着冻融循环次数的进一步增多,混凝土内部损伤应力逐渐增大至超过混凝土内部张力,发生混凝土内部结构松弛,出现微裂纹并进一步扩展,最终使混凝土结构遭到破坏。盐类腐蚀和冻融循环二者的共同作用更是加速了 CBC 的性能劣化和强度损失。

2.2 孔结构试验结果及分析

对经历不同冻融循环次数的 CBC 进行微观孔结构试验,结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随冻融循环次数增加,在冻胀

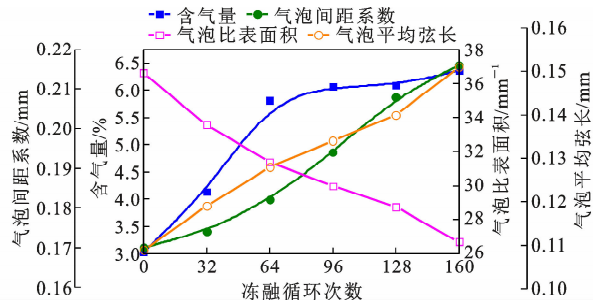


图2 CBC在不同冻融循环次数下的孔结构参数变化曲线

Fig. 2 Variation curves of pore structure parameters of CBC under different freeze-thaw cycles

应力及膨胀产物的膨胀应力作用下,基体内部孔隙及微裂缝逐渐扩展连通,内部结构逐渐趋于疏松,CBC含气量逐渐增加,且具有明显分界点,64次冻融循环前,含气量增长较快,此后含气量增长速率减缓。冻融循环次数与气泡间距系数呈正相关关系,随冻融循环次数增加,间距较小的微孔逐渐连通演变为间距较大的孔隙,冻融初期气泡间距系数增长速率较小,后期逐渐增大,表明试验早期CBC内部连通孔隙及大孔数量较少,NaCl溶液较难进入基体内部,后期连通孔隙及大孔增多,较多NaCl溶液进入基体内部,CBC劣化速率增加。CBC气泡比表面积随冻融循环次数增加逐渐减小,材料硬化后,气泡将以孔隙的形式存在于基体内部,气泡比表面积大小反映气泡表面粗糙程度与填充能力,气泡比表面积减小,气泡粗糙度降低,填充能力减弱,内部结构不再致密。气泡平均弦长随冻融循环次数增加逐渐增大,表明CBC基体内部大孔数量逐渐增多,孔结构不断劣化。

气泡弦长频率为所测区域内气孔各弦长区段气泡数目占气泡总数目的百分比,可由光学法得到,不同冻融循环次数下CBC的气泡最大频率弦长坐标点如图3所示。由图3(a)、(b)可知,CBC在冻融前期的气泡最大频率弦长均为 $20\text{ }\mu\text{m}$,弦长频率与冻融循环次数呈负相关关系,但气泡弦长大于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的弦长频率略微增大,表明弦长较大气泡数量在逐渐增多。由图3(c)、(d)可知,CBC气泡最大频率弦长随冻融循环次数增加而增大,分别为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 和 $140\text{ }\mu\text{m}$,同时气泡弦长大于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的弦长频率从 83.57% 增大到 86.17% ,且对数正态分布方差持续变小,曲线更加平缓,表明CBC在冻融循环过程中,内部孔隙逐渐粗化,且孔径分布逐渐变得均匀,弦长小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 孔隙所占频率逐渐降低。

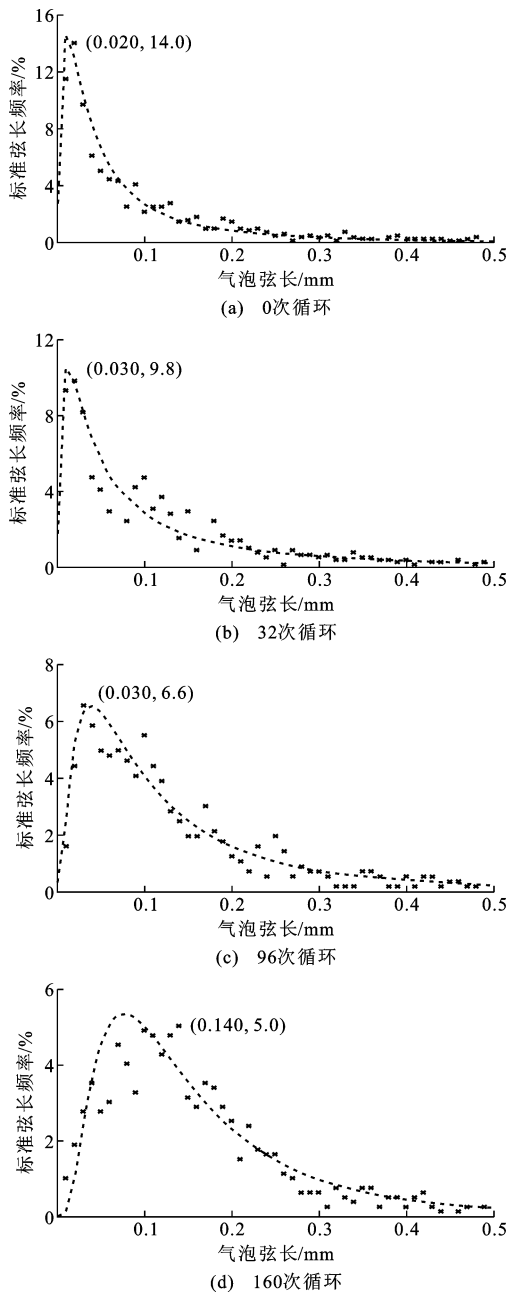


图3 CBC气泡弦长频率对数正态分布曲线

Fig. 3 Lognormal distribution curve of CBC bubble chord length frequency

3 灰色理论分析

3.1 抗压强度与微观孔结构参数关联性分析

灰色关联度分析法是通过研究比较方案与正理想方案数据曲线之间形状的相似性确定灰色关联度值,灰色关联度值越大说明比较方案越接近于正理想解,比较方案越优,但是一般的灰色关联度分析法没有考虑比较方案与负理想解的形状差异性。相对关联度分析法则不仅考虑比较方案与正理想解之间的形状相似性,而且考虑了比较方案与负理想解形

状之间的差异性。比较方案与正理想解形状越相似,与负理想解形状差异越大,则比较方案的相对关联度值越大^[19]。本文欲建立 CBC 微观孔结构参数与抗压强度的定量关系,故采用相对关联度分析 CBC 抗压强度与微观孔结构参数的相关性。

通过灰色理论计算,可得到不同序列的相对关联度,如图 4 所示,其中序列 1 为抗压强度,序列 2 为含气量,序列 3 为气泡间距系数,序列 4 为气泡比表面积,序列 5 为气泡平均弦长,序列 6 为气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率。

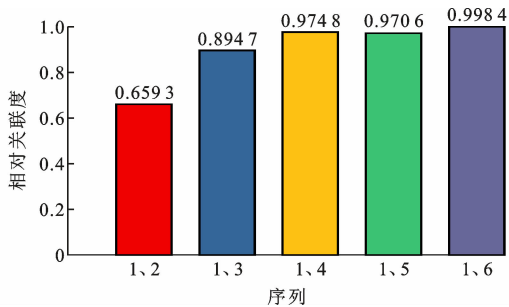


图 4 抗压强度与不同序列微观孔结构参数的相对关联度

Fig. 4 Relative correlation between compressive strength and microstructure parameters of different sequences

由图 4 可得不同序列的相对关联度从大到小依次为:气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率、气泡比表面积、气泡平均弦长、气泡间距系数、含气量,因此确定影响 CBC 抗压强度的最优因素为气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率。气泡弦长大于 20 μm 的孔隙数量增多是导致材料内部有效承载面积减少的主要原因,对于 CBC 这样较为致密的混凝土材料来说,气泡弦长大于 20 μm 的孔隙会对材料力学性能产生损伤,从而影响 CBC 整体的宏观性能。

3.2 气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率的灰色模型模拟及预测

由前文所述,气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率对抗压强度影响最大,因此对其进行数据模拟。灰色理论常规预测模型为 GM(1,1)模型,且其适用性得到了较好的验证^[20-21],而灰色 Verhulst 模型通常用于描述生态系统演化^[22]。本文采用灰色 Verhulst 模型与 GM(1,1)模型的模拟数据进行对比,以选取更为合适的灰色预测模型。灰色 Verhulst 模型和 GM(1,1)模型的时间响应式分别为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{ax^{(1)}(0)}{bx^{(1)}(0) + [a - bx^{(1)}(0)]e^{ak}} \quad (2)$$

$$\hat{x}^{(1)}(k) = [x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a} \quad (3)$$

式中: a 为发展系数,反映 $\hat{x}^{(1)}$ 和 $\hat{x}^{(0)}$ 的发展态势; b 为灰色作用量。

通过式(2)、(3)计算得灰色 Verhulst 模型和 GM(1,1)模型对试验数据的模拟结果(图 5),并采用关联度进行检验。试验数据序列与两模型模拟数据序列的关联度分别为 0.995 2、0.995 1,根据检验等级参照表^[23]可知,两模型均达到了一级精度等级,为关联度合格模型,模型模拟值与实际值符合效果良好。运用两模型对试验数据进行预测,结果见表 2。可以看出,气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率运用 GM(1,1)模型在冻融循环次数达到 256 次时预测值大于 100%,这显然与实际情况不符,因此,灰色 Verhulst 模型更适用于气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率模拟。分析原因在于灰色 Verhulst 模型主要用来描述具有饱和状态系统的演化过程,气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率的变化过程具有饱和状态的演化特点,即冻融前期因为基体较为致密,气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率增长速率较小,在循环次数较多时,气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率增长速率逐渐加快,在冻融循环达到一定次数后,气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率达到饱和,增长速率降低,因此,采用灰色 Verhulst 模型对大于 20 μm 的气泡弦长频率变化过程进行模拟具有良好的效果。

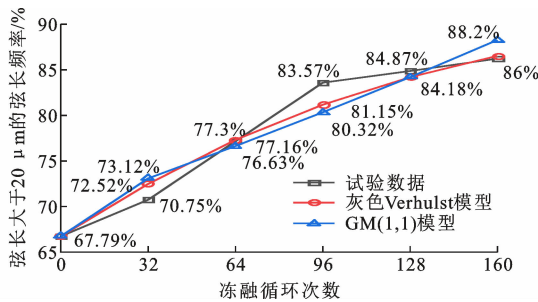


图 5 灰色 Verhulst 模型与 GM(1,1)模型验证图

Fig. 5 Validation diagram of grey Verhulst model and GM (1,1) model

由表 2 可得,在 288 次冻融循环之前,Verhulst 模型气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率增长速率较快,在 288 次冻融循环后,其增长速率逐渐减小,最终稳定在 92%左右。由此看出:一方面,试验到达 160 次循环停止后,若继续进行冻融试验,CBC 内部孔隙变化将继续演变;另一方面,冻融循环次数的持续增加,并不会使得气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率增加到 100%,即 CBC 基体内所有的孔隙弦长均不会大于 20 μm 。究其原因,在 CBC 冻融循环过程

表 2 灰色 Verhulst 模型与 GM(1,1)模型预测结果

Table 2 Prediction results of grey Verhulst model and GM(1,1) model

冻融循环次数	192	224	256	288	320	352	384	416
基于 Verhulst 模型大于 20 μm 气泡弦长频率占比预测值	0.895 6	0.905 3	0.912 4	0.917 6	0.921 4	0.924 1	0.926 1	0.927 5
基于 GM(1,1)模型大于 20 μm 气泡弦长频率占比预测值	0.924 7	0.969 1	1.015 7	1.064 5	1.115 7	1.169 3	1.225 5	1.284 4

中,CBC 基体内始终存在气泡弦长小于 20 μm 的孔隙,基体内不断出现微孔,微孔逐渐连通演变为大孔的动态过程在持续进行,当冻融循环次数达到 320 次之后,新生微孔隙数量与减少的微孔数量微(孔隙演变成大孔隙)达到了动态平衡。

3.3 气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率与综合孔结构参数对比

对气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率与 CBC 抗压强度进行数据拟合,得到曲线如图 6 所示。曲线判定系数 $R^2=0.796\ 35$,拟合结果不太理想,分析原因为抗压强度不仅受气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率影响,还在不同程度上受到其他孔结构参数的影响,因此抗压强度的单一最优影响因素模型的拟合预测相关系数较低。

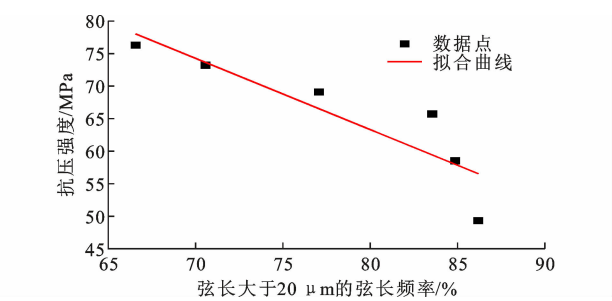


图 6 抗压强度与弦长大于 20 μm 的弦长频率拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of compressive strength and chord length frequency with chord length greater than 20 μm

综合分析,定义综合孔结构参数使其表征所有孔结构参数对抗压强度的影响,本文采用灰靶决策整合 5 个孔结构参数。灰色决策是在决策模型中含灰元或一般决策模型与灰色模型相结合的情况下进行的决策,综合各因素,以期得到综合评价混凝土内部孔结构的合理参数。

本文选定含气量、气泡间距系数、气泡比表面积、气泡平均弦长和大于 20 μm 的气泡弦长频率为决策目标。各目标的效果样本向量为 $\boldsymbol{U}^{(k)}$,目标序号 k 取 1~5, $\boldsymbol{U}^{(1)}=(0.58,0.79,1.11,1.16,1.16,1.21)$, $\boldsymbol{U}^{(2)}=(0.89,0.91,0.95,1.02,1.09,1.13)$, $\boldsymbol{U}^{(3)}=(1.18,1.08,1.01,0.96,0.92,0.85)$, $\boldsymbol{U}^{(4)}=(0.84,0.91,0.98,1.03,1.08,1.16)$, $\boldsymbol{U}^{(5)}=(0.85,$

$0.90,0.99,1.07,1.09,1.10)$ 。含气量、气泡间距系数、气泡平均弦长和大于 20 μm 的气泡弦长频率为成本型指标,即望小特性指标, k 目标下的决策灰靶设为 $u_{ij} \in [\min_i \min_j (u_{ij}^{(k)}), u_{i_0 j_0}^{(k)}]$,即 $u_{i_0 j_0}^{(k)}$ 为 k 目标效果临界值,则

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{i_0 j_0}^{(k)} - u_{ij}^{(k)}}{u_{i_0 j_0}^{(k)} - \min_i \min_j (u_{ij}^{(k)})} \tag{4}$$

称为成本型目标效果测度函数。

气泡比表面积为效益型指标(望大特性指标), k 目标下决策灰靶设为 $u_{ij} \in [u_{i_0 j_0}^{(k)}, \max_i \max_j (u_{ij}^{(k)})]$,即 $u_{i_0 j_0}^{(k)}$ 为 k 目标效果临界值,则

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{ij}^{(k)} - u_{i_0 j_0}^{(k)}}{\max_i \max_j (u_{ij}^{(k)}) - u_{i_0 j_0}^{(k)}} \tag{5}$$

称为效益型目标效果测度函数。

将 160 次冻融循环的含气量和比表面积作为目标效果临界值,其值分别为 1.21、0.85,计算得一致效果测度向量 $\boldsymbol{R}^{(k)}$, k 为目标序号,取 1~5, $\boldsymbol{R}^{(1)}=(1,0.67,0.16,0.08,0.08,0)$, $\boldsymbol{R}^{(2)}=(1,0.94,0.81,0.60,0.38,0.25)$, $\boldsymbol{R}^{(3)}=(1,0.70,0.48,0.33,0.21,0)$, $\boldsymbol{R}^{(4)}=(1,0.81,0.62,0.49,0.35,0.14)$, $\boldsymbol{R}^{(5)}=(1,0.86,0.61,0.39,0.32,0.31)$ 。

由一致效果测度向量计算综合效果测度向量得

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^5 \eta_k r_{ij}^{(k)} \tag{6}$$

式中: η_k 为 k 目标的决策权重。

应用第 3.1 节的相对关联度计算 η ,其公式为

$$\eta^{(l)} = \frac{\rho_{0m}^{(l)}}{\sum_{l=1}^5 \rho_{0m}^{(l)}} \tag{7}$$

式中: η 为权重; ρ_{0m} 为相对关联度; l 为相对关联度序号, l 取 1~5,如 1 代表序列 1 与序列 2 的相对关联度。

根据式(7)计算各孔结构参数权重,计算结果如表 3 所示。

计算得综合效果测度向量 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{r}_{ij}=(r_{11},r_{12},r_{13},r_{14},r_{15})=(1,0.80,0.56,0.39,0.28,0.15)$,其中 i 为事件序号,本文中始终为 1, j 为决策方案序号。

表 3 CBC 各孔结构参数权重

Table 3 Weight of structural parameters of each hole in CBC

序号	孔结构参数	权重
1	含气量	0.147
2	气泡间距系数	0.199
3	气泡比表面积	0.217
4	气泡平均弦长	0.216
5	大于 20 μm 的气泡弦长频率	0.222

结合本文研究背景,定义该综合效果测度向量为综合孔结构参数。在 0 次冻融循环 CBC 的孔结构基础上,指标评价价值 r_{11} 、 r_{12} 、 r_{13} 、 r_{14} 、 r_{15} 分别评估了经历 32、64、96、128、160 次冻融循环后 CBC 的内部损伤程度,0 次冻融循环的 CBC 综合孔结构参数为 1,综合孔结构参数越大,说明其内部越致密,综合性能越好。由于 $r_{11} > r_{12} > r_{13} > r_{14} > r_{15}$,表明随着冻融循环次数的增加,CBC 内部膨胀应力逐渐增大,导致原生微裂缝不断扩展直到互相连通,使得内部孔结构逐渐破坏,损伤程度开始累加。

对综合孔结构参数与抗压强度进行线性拟合,结果如图 7 所示。拟合曲线相关系数为 0.879 29,与气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率单一因素拟合曲线相关系数相比,得到了较大提升,说明综合孔结构参数拟合曲线与试验数据点有着较为良好的符合效果,更加符合试验规律,而多因素整合得到的综合孔结构参数比最优参数气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率更能全面地反映 CBC 内部状况,也更能评估其宏观性能,为冻融循环后的 CBC 宏观性能和微观孔结构研究作为参考。

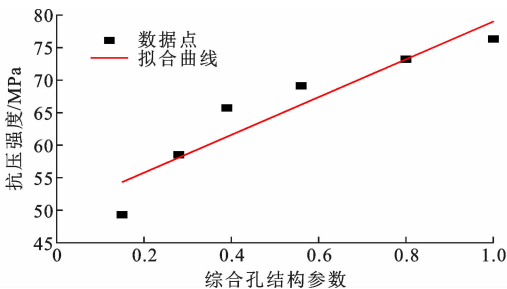


图 7 抗压强度与综合孔结构参数拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of compressive strength and comprehensive hole structural parameters

4 结 语

(1)随冻融循环次数增加,CBC 抗压强度逐渐降低,冻融循环后期下降速率加快;试验过程中试件内部含气量、气泡间距系数、气泡平均弦长逐渐增

大,而气泡比表面积逐渐减小。

(2)通过计算微观孔结构参数与 CBC 抗压强度的灰色相对关联度发现,气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率是抗压强度的最优影响因素,其次为气泡比表面积、气泡平均弦长、气泡间距系数、含气量。

(3)灰色 Verhulst 模型相较于 GM(1,1)模型更适用于模拟气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率,运用该模型进行预测发现,气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率逐渐增大而其增长速率逐渐减小,最终弦长频率稳定在 92%左右。

(4)运用灰靶决策模型定义综合孔结构参数,通过比较气泡弦长大于 20 μm 的弦长频率、综合孔结构参数与抗压强度线性拟合结果,得出基于综合孔结构参数所建立的模型精度更高。

参考文献:

References:

[1] 贾明皓,肖学良,钱 坤.玄武岩纤维及其增强水泥基复合材料研究进展[J].硅酸盐通报,2018,37(11):3467-3474.
JIA Minghao, XIAO Xueliang, QIAN Kun. Research progress in basalt fiber and its reinforced cement-based composites[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11): 3467-3474.

[2] 陆振乾,杨雅茹,荀 勇.纤维对水泥基复合材料性能影响研究进展[J].纺织学报,2021,42(4):177-183.
LU Zhenqian, YANG Yaru, XUN Yong. Research review of fiber effect on properties of cement-based composites[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(4): 177-183.

[3] 靳贺松,李福海,何肖云峰,等.聚丙烯纤维水泥基复合材料的抗冻性能研究[J].材料导报,2020,34(8):8071-8076,8082.
JIN Hesong, LI Fuhai, HE Xiaoyunfeng, et al. Research on frost resistance of polypropylene fiber cement-based composite material[J]. Materials Reports, 2020, 34(8): 8071-8076, 8082.

[4] 刘金亮,贾艳敏,王佳伟,等.季冻区盐冻作用下结构氯离子侵蚀耐久寿命预测[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(10):1625-1632.
LIU Jinliang, JIA Yanmin, WANG Jiawei, et al. Prediction of the durable life of prestressed concrete structures eroded by chloride ions under salt freezing in seasonally frozen areas[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(10): 1625-1632.

[5] 姜文镗,刘清风.冻融循环下混凝土中氯离子传输研究进展[J].硅酸盐学报,2020,48(2):258-272.

- JIANG Wenqiang, LIU Qingfeng. Chloride transport in concrete subjected to freeze-thaw cycles — a short review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(2): 258-272.
- [6] 杨才千, 刘飞, 潘勇, 等. 冻融循环作用下聚乙烯醇纤维增强快硬混凝土的力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 334-339.
- YANG Caiqian, LIU Fei, PAN Yong, et al. Mechanical property of polyvinyl alcohol fiber reinforced fast-hardening concrete under freezing-thaw cycle effect [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 334-339.
- [7] 徐存东, 黄嵩, 李洪飞, 等. 盐冻作用下玄武岩纤维混凝土力学性能损伤研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 812-820.
- XU Cundong, HUANG Song, LI Hongfei, et al. Damage of mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete under salt freezing [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 812-820.
- [8] TIAN W, GAO F F. Damage and degradation of concrete under coupling action of freeze-thaw cycle and sulfate attack[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(9): 8032849.
- [9] 安雪. 单面冻融条件下沙漠砂制备高韧性水泥基复合材料盐冻性能研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- AN Xue. Study on salt freezing performance of high toughness cementitious composites prepared by desert sand under single-side freeze-thaw conditions [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- [10] 赵燕茹, 刘芳芳, 王磊, 等. 单面盐冻条件下基于孔结构的玄武岩纤维混凝土抗压强度模型[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12064-12069.
- ZHAO Yanru, LIU Fangfang, WANG Lei, et al. Modeling of the compressive strength of basalt fiber concrete based on pore structure under single-side freeze-thaw condition[J]. Materials Reports, 2020, 34(12): 12064-12069.
- [11] ZHU X Y, CHEN X D, ZHANG N, et al. Experimental and numerical research on triaxial mechanical behavior of self-compacting concrete subjected to freeze-thaw damage[J]. Construction and Building Materials, 2021, 288: 123110.
- [12] 占宝剑. 盐水侵蚀和冻融对混凝土性能的影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- ZHAN Baojian. Study on the effects of saltwater erosion and freezing-thawing on concrete performance [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [13] ZHOU S B, LIANG J L, XUAN W A, et al. The correlation between pore structure and macro durability performance of road concrete under loading and freeze-thaw and drying-wetting cycles[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 5015169.
- [14] 薛翠真, 申爱琴, 乔宏霞. 掺 CWCPM 混凝土的冻融损伤机理及演化模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 136-144.
- XUE Cuizhen, SHEN Aiqin, QIAO Hongxia. Freezing-thawing damage mechanism and evolution model of concrete mixed with CWCPM[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(3): 136-144.
- [15] 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, 1344.
- 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, 1344.
- [16] 赵燕茹, 王志慧, 王磊, 等. 冻融循环作用后 BFRC 宏观性能的灰熵法分析[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 45-53.
- ZHAO Yanru, WANG Zhihui, WANG Lei, et al. Grey entropy analysis of macro and micro properties of BFRC after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 45-53.
- [17] 韩恺. 玄武岩纤维水泥基复合材料力学性能及抗盐冻性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019.
- HAN Kai. Study on mechanical properties and salt frost resistance of basalt fiber cement matrix composites[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2019.
- [18] 邹汉文, 刘俊, 夏雨, 等. 混凝土抗冻性试验方法及评价指标[J]. 中国科技信息, 2018(14): 39-40.
- ZOU Hanwen, LIU Jun, XIA Yu, et al. Test method and evaluation index of concrete frost resistance[J]. China Science and Technology Information, 2018(14): 39-40.
- [19] 张天云, 杨瑞成, 陈奎. 基于相对关联度的工程选材决策模型及应用[J]. 工程设计学报, 2008, 15(2): 120-123.
- ZHANG Tianyun, YANG Ruicheng, CHEN Kui. Establishment and application of decision making model for engineering materials selection based on relative degree of incidence [J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(2): 120-123.

[20] 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.

[21] 张英姿,范颖芳,赵颖华. 受盐酸腐蚀混凝土抗压强度的灰色预测模型[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(4): 397-401.
ZHANG Yingzi, FAN Yingfang, ZHAO Yinghua. Grey prediction model for compressive strength of concrete corroded by hydrochloric acid[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4): 397-401.

[22] 张 闯,彭振斌,彭文祥. 优化的灰色离散 Verhulst 模型在基坑沉降预测中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(11): 3030-3036.
ZHANG Chuang, PENG Zhenbin, PENG Wenxiang. Application of optimized grey discrete Verhulst model in settlement prediction of foundation pit[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(11): 3030-3036.

[23] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2017.
LIU Sifeng. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2017.