

基于熵权法的混凝土耐久性评价及寿命预测

覃 源¹, 吕 杲¹, 关 科², 周 恒³

(1. 西安理工大学, 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘 要:以纳子峡水利枢纽工程为背景,进行了粉煤灰、纤维素纤维双掺混凝土硫酸盐干湿循环试验。基于熵权法建立了可以综合反映混凝土质量、抗压强度和抗劈拉强度的耐久性指标耐久性值(D),分析了硫酸钠溶液质量分数和粉煤灰掺量对 D 值的影响,并构建了 Grey Models—Back Propagation(GM-BP)神经网络,用以揭示混凝土 D 值的时变规律,得到了不同条件下混凝土的预期寿命。结果表明: D 值可以反映出硫酸钠溶液质量分数和粉煤灰掺量对混凝土耐久性的影响。180 d 时,混凝土 D 值损失在 10%(质量分数)内与硫酸钠溶液质量分数成正比;粉煤灰最佳掺量在 10%掺量梯度下为 20%;在数据量较小时,GM-BP 神经网络相比于 GM 模型可以更加精确地预测混凝土在盐侵—干湿循环下 D 值的时变规律。

关键词:混凝土;硫酸盐侵蚀;耐久性;熵权法;寿命预测

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)05-1344-11

网络出版时间: 2023-02-08



Durability Assessment and Life Prediction of Concrete by Entropy Weight Method

QIN Yuan¹, LV Gao¹, GUAN Ke², ZHOU Heng³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shanghai Survey and Design Institute Corporation Limited, Shanghai 100084, China;

3. Power China Northwest of Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: Wet-dry cycles of fly ash (FA) and cellulose fiber double-doped concrete with sulphate in Nazi Gorge water conservancy pivot project were investigated. The durability value (D), a durability index that can comprehensively reflect the mass, compressive strength and splitting strength of concrete were established based on an entropy weight method. The effects of sulphate mass fraction and fly ash admixture on the D were analyzed. A grey model-back propagation (GM-BP) neural network was constructed to reveal the time-varying law of the D . The results show that the D can reflect the effects of sodium sulphate mass fraction and fly ash admixture on the durability of concrete. At 180 day, the D loss is proportional to sodium sulphate solution mass fraction within 10% (mass fraction). The GM-BP neural network can predict the time-varying law of the D under salt intrusion-wet and dry cycles more accurately than the GM.

Keywords: concrete; sulphate attack; durability; entropy weight method; life prediction

中国西部盐渍地区存在广泛的硫酸盐环境,纳子峡水利枢纽所在地区地下水硫酸盐含量可达 4 200 mg/L^[1]。盐类侵蚀导致的建筑物耐久性劣化会造成巨大的经济损失、资源浪费和安全问题。近年迅速发展的抽水蓄能电站也面临同样的问题,巨大的蒸发量不仅造成盐类在蓄水上库中富集,还导

致水位频繁变化。处于水位变动区的混凝土会遭受硫酸盐和干湿循环耦合侵蚀,其破坏机理十分复杂,成为水工混凝土耐久性最为薄弱的地方^[2]。杨永敢等^[3]揭示了混凝土的劣化机理,认为硫酸盐与干湿循环耦合作用下混凝土的劣化表现为硫酸钠晶体结晶析出的物理侵蚀和腐蚀性产物膨胀产生的化

收稿日期: 2022-08-26。 修订日期: 2022-09-22。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079109); 国家自然科学基金项目(52279139); 陕西省科技创新团队(2022TD-01)。

第一作者: 覃 源(1983—),男,博士,教授。

Received date: 2022-08-26. Revised date: 2022-09-22.

First author: QIN Yuan (1983—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: qinyuan@xaut.edu.cn

学侵蚀。朱效宏^[4]等发现硫酸盐易侵蚀 C-(A)-S-H 凝胶中 $[\text{AlO}_4]$ 桥氧四面体,邵玉等^[5]发现干湿循环使得界面区孔隙率增大^[6],这可能是干湿循环加速硫酸盐侵蚀的原因之一。此外,刘鹏强等^[7]通过试验发现干湿循环制度也会对侵蚀过程产生显著影响。经过长期探索,研究人员发现掺入粉煤灰^[8-9]、纤维^[10-11]等可以有效提升混凝土抗硫酸盐侵蚀的性能。纤维素纤维是新型混凝土专用纤维,可以细化混凝土微结构,限制裂纹萌生^[12]。有研究表明将二者同时掺入相比于单掺可以更显著地提升混凝土性能^[13-14],纳子峡水利枢纽采用粉煤灰、纤维素纤维双掺混凝土取得了良好的效果^[15]。

为了设计耐用的混凝土结构,研究人员广泛讨论了混凝土耐久性的测试方法和理论,提出了质量^[16]、抗压强度^[17]、抗劈拉强度^[18]和膨胀率^[19]等多种耐久性评价指标。其中抗压强度应用最为广泛,但也并不能全面反映混凝土耐久性能。一方面,当采用抗压强度作为评价混凝土性能的一般指标时,往往无法准确测量耐久性方面材料性能的基本参数^[20],即使在评价相同抗压强度等级的混凝土^[21-22]时, CO_2 渗透率和氯化物扩散系数等指标也可能呈现出显著不同的结果。另一方面,采用单一耐久性指标也常常与其他评价指标发生矛盾。如在相同试验环境中,采用抗压强度指标和抗劈拉强度指标评价混凝土耐久性也会得到不同的结果^[13]。并且当混凝土暴露在不同的环境时,采用的耐久性指标也应有所区别^[23]。耐久性指标的分歧反映出耐久性评价复杂性的同时,也说明当前的评价体系并不完善。

混凝土寿命预测是耐久性研究的一个重要目的。在此方面,国内外学者先后建立了多种模型,考虑了混凝土自身因素^[24]、广泛的环境因素^[25-27]和不同的工况^[28]等各种因素。但由于混凝土所处环境复杂多变,导致直接建立多因素的预测模型较为复杂且适用性不强^[29]。人工神经网络具有自学习^[30]的特点,无需事先给出各因素之间的数学关系便可进行拟合运算,适用于混凝土领域的非线性问题,目前已在混凝土配合比设计^[31-32]、损伤程度识别^[33]、力学参数^[34]和耐久性^[35]预测等各个方面得到了广泛应用,其中 BP 神经网络具有结构简单和鲁棒性强的特点^[36],是目前应用最广泛的人工神经网络之一。Huang 等^[37]采用 BP 神经网络训练和测试了 151 组玻璃钢筋混凝土拉出试验数据,结果表明 BP 神经网络在通用性方面比目前可用的数学模型更具优

势。此外,人工神经网络与其他算法的结合也是目前的研究热点之一^[38-40]。

针对以上问题,本工作拟开展粉煤灰、纤维素纤维双掺混凝土盐侵—干湿循环试验,测量混凝土的质量、抗压强度和抗劈拉强度 3 个典型耐久性指标,并基于熵权法建立盐侵—干湿循环下混凝土耐久性综合评价体系,讨论硫酸钠溶液质量分数和粉煤灰掺量对混凝土耐久性的影响,通过 Grey Models—Back Propagation(GM-BP)神经网络揭示混凝土耐久性时变规律,进行混凝土寿命预测,以期为粉煤灰、纤维素纤维双掺混凝土在实际工程中的应用提供参考。

1 实验

以粉煤灰、纤维素纤维双掺混凝土盐侵—干湿循环试验为基础,参考相关文献^[12]并依据纳子峡水利枢纽工程,确定纤维素纤维最优掺量为 0.9 kg/m^3 。据此,本次试验固定纤维素纤维掺量为 0.9 kg/m^3 ,改变粉煤灰掺量,探究粉煤灰与纤维素纤维共同作用下混凝土的抗盐侵—干湿循环性能。试验分为 2 组。第 1 组改变硫酸钠溶液质量分数,编号为 FA0S2、FA0S5 和 FA0S10,表示试件粉煤灰掺量为 0,硫酸钠溶液质量分数分别为 2%、5%和 10%。第 2 组改变粉煤灰掺量,编号为 FA0S5、FA10S5、FA20S5 和 FA30S5,表示试件粉煤灰掺量(质量分数)分别为 0、10%、20%和 30%,硫酸钠溶液质量分数为 5%。混凝土配合比设计如表 1 所示。每种配比制作 3 组平行试件,分析结果时剔除异常值并以其平均值作为试验结果。试件制作完成 1 d 后拆模并在标准环境下养护 28 d。试件养护完成后于自然环境下静置 30 d,随后进行盐侵—干湿循环试验。干湿循环制度为:1) 将试件置于硫酸钠溶液中浸泡 11 h;2) 取出试件自然风干 1 h;3) 将试件放入温度为 $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘干机烘干 11 h;4) 自然冷却 1 h。完成以上步骤为 1 次循环,循环周期为 1 d,每隔 15 d 测量 1 次试件数据,包括质量、抗压强度和抗劈拉强度。循环达到 180 d 时结束试验。

2 基于熵权法的混凝土耐久性评价

混凝土在实际环境中遭受盐侵—干湿循环耦合作用后,多个指标均会发生变化。所以想要全面地评价混凝土耐久性就需要综合考虑多种指标对其的影响,但各个指标对混凝土耐久性的影响并不相同。这意味着将各个指标简单地叠加并不科学,需要以权

重反映其对混凝土耐久性的影响。因此定义混凝土耐久性综合评价指标“耐久性值(D)”，采用易成等^[41]提出的综合评价公式计算，如式(1)所示。

$$D = q_1 S_1 + q_2 S_2 + \cdots + q_n S_n = \sum_{i=1}^n q_i S_i \quad (1)$$

式中： q_i 为混凝土第 i 个耐久性指标的权重； S_i 为混

凝土第 i 个耐久性指标标准化后的样本值。

D 值反映了各个耐久性指标对混凝土耐久性的影响，计算 D 值时，各耐久性指标对耐久性的影响由权重反映，因此权重直接影响混凝土耐久性综合评价结果的准确性，是建立耐久性综合评价体系的关键。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mixture proportion of concrete

Group	Water-cement ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						
		Water	Cement	Fly ash	Fine aggregates	Coarse aggregates	Water reducing agents	Fibre
FA0	0.45	170	380	0	800	1 040	11.2	0.9
FA10	0.45	170	342	38	800	1 040	11.2	0.9
FA20	0.45	170	304	76	800	1 040	11.2	0.9
FA30	0.45	170	266	114	800	1 040	11.2	0.9

朱红光等^[42]采用二元比较模糊决策分析法确定了相应环境下耐久性影响因素的权重，并通过对比复杂环境下不同配合比混凝土的预测寿命，验证了模型的适用性，具有很大参考价值，但由于确定评价指标的权重时工作量较大，在试验条件受限时具有一定局限性。因而本研究采用在工程、经济等各领域得到广泛应用的熵权法来对各指标进行赋权。熵是热力学中的物理概念，是体系混乱度或无序度的度量。作为一种客观赋权法，熵权法借鉴了热力学中熵的概念，通过信息熵可以客观地提取混凝土原始数据蕴含的信息，从而确定混凝土在盐侵—干湿循环耦合作用下的质量、抗压强度和抗劈拉强度等耐久性指标在 D 值计算过程中的权重。

2.1 耐久性指标权重的计算步骤

结合熵权法相关理论和混凝土耐久性评价过程，制定了如下步骤计算混凝土耐久性指标的权重：

1) 构建初始耐久性指标矩阵 $A=(a_{ij})_{mn}$, ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)。 a_{ij} 表示第 j 个耐久性指标下第 i 个评价对象的样本值。式中： m 为混凝土各耐久性指标下评价对象的个数； n 表示混凝土耐久性指标的个数。

2) 进行指标标准化，消除不同耐久性指标间的量纲差异，采用式(2)计算标准耐久性指标矩阵 $X=(x_{ij})_{mn}$ 。 x_{ij} 表示第 j 个耐久性指标下第 i 个评价对象的标准样本值。

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{1j}}, (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

3) 计算比重矩阵 $P=(p_{ij})_{mn}$ 。 p_{ij} 表示混凝土第 j 个耐久性指标下第 i 个评价对象的样本值占该指标

的比重，并将其作为计算信息熵时的概率。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

4) 计算混凝土各耐久性指标的信息熵矩阵 $E=(e_j)$ 。 e_j 表示第 j 个耐久性指标的信息熵。

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} I_{ij}, j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中： $I_{ij}=-\ln p_{ij}$ ，表示混凝土第 j 个耐久性指标下第 i 个评价对象的信息量。耐久性指标的 p_{ij} 越大，其不确定性越小，所含信息量也就越小。

$\sum_{i=1}^m p_{ij} I_{ij}$ 的最大值为 $\ln m$ ，故计算 e_j 时除以常数 $\ln m$ 使 e_j 范围落在 $[0, 1]$ 之间。

5) 计算权重矩阵 $W=(w_j)$ ， w_j 表示混凝土第 j 个耐久性指标的权重。

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中： $d_j=1-e_j$ ，表示混凝土第 j 个耐久性指标的信息效用值。耐久性指标的信息熵越大，携带信息量越少，信息效用值越小。

2.2 耐久性综合评价指标的确定

选取质量、抗压强度和抗劈拉强度作为混凝土耐久性指标，13 组不同循环龄期试件作为评价对象。值得注意的是耐久性指标需要能正确反映出 D 值的实际意义(D 值越大，混凝土耐久性能越好)。因此选取与 D 值变化规律具有一致性的质量，而非较为常用的质量损失作为耐久性指标。以 FA0S5 组数据为例计算不同耐久性指标的权重，初始数据如表 2 所示，计算过程如下：

1) 根据初始数据，构建初始耐久性指标矩阵，如式(6)所示：

$$A = \begin{bmatrix} 2.368 & 52.29 & 2.04 \\ 2.372 & 53.37 & 2.06 \\ 2.380 & 51.15 & 2.09 \\ 2.381 & 53.57 & 2.16 \\ 2.395 & 55.16 & 2.23 \\ 2.403 & 54.26 & 2.23 \\ 2.408 & 53.10 & 2.18 \\ 2.409 & 50.53 & 2.07 \\ 2.397 & 44.96 & 2.04 \\ 2.387 & 44.88 & 1.95 \\ 2.379 & 40.41 & 1.87 \\ 2.367 & 39.49 & 1.69 \\ 2.341 & 37.98 & 1.50 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) 根据初始耐久性指标矩阵 A , 采用式(2)进行标准化操作, 形成标准耐久性指标矩阵 X , 如式(7)所示:

$$X = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 \\ 1.001 & 7 & 1.020 & 7 & 1.007 & 0 \\ 1.004 & 8 & 0.978 & 3 & 1.023 & 7 \\ 1.005 & 2 & 1.024 & 5 & 1.058 & 2 \\ 1.011 & 1 & 1.055 & 0 & 1.090 & 7 \\ 1.014 & 5 & 1.037 & 7 & 1.092 & 3 \\ 1.016 & 9 & 1.015 & 7 & 1.069 & 2 \\ 1.017 & 3 & 0.966 & 4 & 1.014 & 2 \\ 1.012 & 1 & 0.859 & 8 & 0.997 & 1 \\ 1.007 & 9 & 0.858 & 3 & 0.954 & 5 \\ 1.004 & 5 & 0.772 & 9 & 0.916 & 3 \\ 0.999 & 4 & 0.755 & 2 & 0.829 & 2 \\ 0.988 & 0 & 0.726 & 3 & 0.734 & 3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 采用式(3)计算质量、抗压强度和抗劈拉强度 3 个耐久性指标下不同评价对象的比重, 比重矩阵 P 如式(8)所示:

$$P = \begin{bmatrix} 0.076 & 4 & 0.082 & 8 & 0.078 & 2 \\ 0.076 & 6 & 0.084 & 6 & 0.078 & 8 \\ 0.076 & 8 & 0.081 & 0 & 0.080 & 1 \\ 0.076 & 8 & 0.084 & 9 & 0.082 & 8 \\ 0.077 & 3 & 0.087 & 4 & 0.085 & 3 \\ 0.077 & 5 & 0.086 & 0 & 0.085 & 4 \\ 0.077 & 7 & 0.084 & 1 & 0.083 & 6 \\ 0.077 & 8 & 0.080 & 1 & 0.079 & 3 \\ 0.077 & 4 & 0.071 & 2 & 0.078 & 0 \\ 0.077 & 0 & 0.071 & 1 & 0.074 & 7 \\ 0.076 & 8 & 0.064 & 0 & 0.071 & 7 \\ 0.076 & 4 & 0.062 & 6 & 0.064 & 8 \\ 0.075 & 5 & 0.060 & 2 & 0.057 & 4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

4) 采用式(4)分别计算质量、抗压强度和抗劈拉强度 3 个耐久性指标的信息熵, 信息熵矩阵 E 如式(9)所示:

$$E = (0.999 \ 9 \ 0.997 \ 0 \ 0.997 \ 8) \quad (9)$$

5) 采用式(5)分别计算质量、抗压强度和抗劈拉强度 3 个耐久性指标的权重, 权重矩阵 W 如式(10)所示:

$$W = (0.002 \ 3 \ 0.582 \ 9 \ 0.414 \ 8) \quad (10)$$

表 2 FA0S5 组试件数据表

Table 2 Experimental data table of FA0S5 group

Wet and dry cycles/d	Mass/kg	Compressive strength/MPa	Split tensile strength/MPa
0	2.368	52.29	2.04
15	2.372	53.37	2.06
30	2.380	51.15	2.09
45	2.381	53.57	2.16
60	2.395	55.16	2.23
75	2.403	54.26	2.23
90	2.408	53.10	2.18
105	2.409	50.53	2.07
120	2.397	44.96	2.04
135	2.387	44.88	1.95
150	2.379	40.41	1.87
165	2.367	39.49	1.69
180	2.341	37.98	1.50

同理可得其他各组试件质量、抗压强度和抗劈拉强度 3 个耐久性指标所占权重, 结果如表 3 所示。由于粉煤灰掺量和硫酸钠溶液质量分数的变化, 使得混凝土的性质和环境发生变化, 而各耐久性指标的变化规律本身就存在着区别, 这就导致各耐久性指标的权重也会随之调整。

表 3 耐久性指标权重(w_j)表

Table 3 Durability indicators weight (w_j)

Group	Mass	Compressive strength	Split tensile strength
FA0S5	0.002 3	0.582 9	0.414 8
FA10S5	0.003 2	0.397 9	0.598 9
FA20S5	0.002 3	0.596 3	0.401 4
FA30S5	0.002 7	0.440 5	0.556 8
FA0S2	0.008 2	0.564 6	0.427 2
FA0S10	0.002 2	0.547 4	0.450 5

将混凝土各耐久性指标的权重和标准化后的样本值代入式(1)可得耐久性综合评价指标 D 值, 各组试件的 D 值计算结果如表 4 所示。

表 4 D 值计算结果Table 4 Calculation result of D

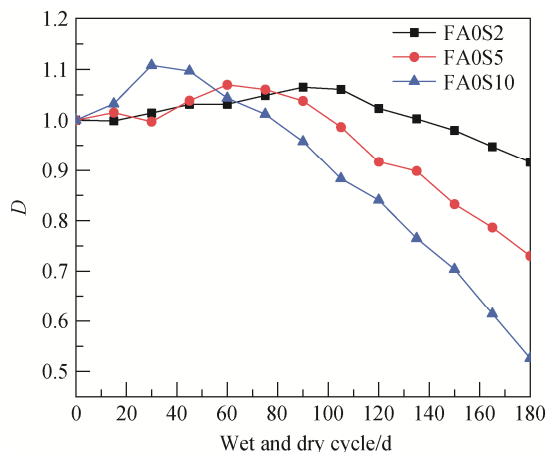
Wet and dry cycles/d	FA0S5	FA10S5	FA20S5	FA30S5	FA0S2	FA0S10
0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
15	1.015 0	1.016 7	1.054 7	1.022 9	0.998 5	1.032 4
30	0.997 2	1.049 7	1.081 2	1.046 2	1.014 0	1.108 0
45	1.038 4	1.072 6	1.124 6	1.086 8	1.031 0	1.096 6
60	1.069 7	1.075 6	1.138 2	1.083 7	1.031 5	1.043 3
75	1.060 3	1.080 4	1.119 9	1.071 1	1.048 6	1.011 7
90	1.037 9	1.028 7	1.073 1	1.029 5	1.064 8	0.957 6
105	0.986 4	1.016 1	1.019 1	1.023 3	1.060 6	0.883 5
120	0.917 1	0.972 5	0.965 1	0.960 1	1.023 2	0.840 7
135	0.898 6	0.938 3	0.943 4	0.924 2	1.002 4	0.765 0
150	0.832 9	0.882 6	0.887 4	0.842 3	0.979 7	0.703 9
165	0.786 5	0.832 6	0.830 0	0.805 3	0.947 5	0.614 2
180	0.730 2	0.779 1	0.792 6	0.733 6	0.916 4	0.526 2

D is durability calculated in Formula (1).

2.3 硫酸钠溶液质量分数对混凝土 D 值的影响

由于对相关指标进行了标准化, 所以得到的 D 值与初始值呈倍数关系。如在 2%硫酸钠溶液(质量分数, 下同)下循环 180 d 后试件 D 值为 0.916 4, 即表示 180 d 时的试件 D 值为初始值的 0.916 4 倍。

第 1 组(FA0S2、FA0S5、FA0S10) D 值变化如图 1 所示。

图 1 不同质量分数硫酸钠溶液下 D 值变化Fig. 1 D of FA0 in different sodium sulphate mass fraction

随着盐侵-干湿循环次数的增加, 试件 D 值呈现出先增后降的趋势; 随着硫酸钠溶液质量分数的增加, 试件 D 值的变化趋于剧烈, 表现为变化速率提高, 峰值出现时间提前, 峰值增加, 180 d D 值下降。第 1 组(FA0S2、FA0S5、FA0S10) D 值特征如表 5 所示。

硫酸钠溶液质量分数为 2%时, 试件 D 值变化速率最慢, 变化幅度最小; 循环初期, 试件 D

表 5 第 1 组 D 值特征Table 5 Characteristics of D for Group 1

Group	Peak of D		D of 180 d	Standard deviation of D
	Time/d	Value		
FA0S2	90	1.064 8	0.916 4	0.042 8
FA0S5	60	1.069 7	0.730 2	0.109 8
FA0S10	30	1.108 0	0.526 2	0.188 5

值不断提升, 循环至 90 d 时, D 值达到峰值 1.064 8; 之后 D 值开始下降, 但仍大于初始值, 大约循环至 135 d 时, D 值为 1; 循环至 180 d 时试验结束, 此时试件 D 值为 0.916 4, 整个侵蚀过程 D 值标准差为 0.042 8。而在硫酸钠溶液质量分数为 10%时, D 值变化最为剧烈, 经过 30 d 循环便达到 D 峰值 1.108 0, 经过大约 75 d 循环, D 值便降为初始值, 至 180 d 循环结束时, D 值仅为 0.526 2, 整个侵蚀过程 D 值标准差为 0.188 5。硫酸钠溶液质量分数为 5%时, D 值变化趋势与上述两组一致, 变化幅度处于二者之间。

对于试件耐久性峰值相对于初始值的提升值, 在 10%硫酸钠溶液中循环的试件为 5%的 1.55 倍, 为 2%的 1.67 倍。对于试件 180 d D 值相对于初始值的损失值, 在 10%硫酸钠溶液中循环的试件为 5%的 1.76 倍, 为 2%的 5.67 倍。绘制试件 180 d 耐久性损失值与硫酸钠溶液质量分数关系图, 如图 2 所示。由于试验数据不足, 故在试验相似的条件, 整理了王海龙、程汉斌等的工作, 引入 $A^{[18]}$ 、 $B^{[43]}$ 点作为补充。随着硫酸钠溶液质量分数的增加, 试件 180 d D 损失值不断增长, 但增长速率先

增加后下降,符合过高质量分数的硫酸钠溶液反而可能会降低侵蚀速率的试验规律^[23, 44],具有一定参考价值。

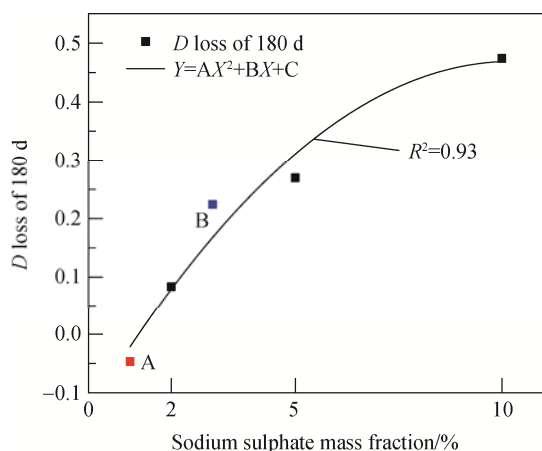


图 2 不同质量分数硫酸钠溶液下 180 d 耐久性损失值
Fig. 2 D loss of 180 d in different sodium sulphate mass fraction

出现该现象主要由以下的原因所致:在盐侵-干湿循环初期,混凝土表层开始渗入硫酸钠溶液,产生的硫酸钠晶体将水以结晶的形式固定在混凝土内部^[45],导致了混凝土质量的增加,并且硫酸根离子以及钙离子和含铝相极易向混凝土试件内部的孔隙、裂缝以及界面过渡区移动^[3],从而导致腐蚀产物聚集在这些位置填补了混凝土孔隙,同时水泥自然水化使得内部逐渐密实^[46],使得混凝土性能出现提升;随着循环的进行,生成的膨胀性产物在填满混凝土孔隙后在试件内部产生拉应力^[47],与此同时混凝土内部的水化 C-S-H 凝胶被 SO_4^{2-} 不断消耗^[18],混凝土黏结性降低,两者的共同作用使得混凝土开裂,裂缝的增加又使得试件被进一步侵蚀^[43],导致混凝土性能下降。硫酸盐溶液质量分数越高其与混凝土的作用越剧烈^[48],也使得混凝土性能变化得越剧烈,表现为 D 值标准差增大,变化幅度增加。180 d 耐久性损失值增长速率的变化则可能是溶液质量分数和侵蚀产物的变化综合引起的^[43]。

2.4 粉煤灰掺量对混凝土 D 值的影响

第 2 组(FA0S5、FA10S5、FA20S5、FA30S5) D 值变化如图 3 所示。

各粉煤灰掺量混凝土 D 值均大致经历 2 个阶段:1) FA0S5、FA10S5、FA20S5、FA30S5 D 值分别于 60、75、60、45 d 盐侵-干湿循环后上升至峰值 1.069 7、1.080 4、1.138 2、1.086 8;2) 达到峰值后,4 种混凝土 D 值开始下降,在经过 180 次盐侵-干湿循环后 D 值分别为 0.730 2、0.779 1、

0.792 6、0.733 6。整个循环过程中 D 值平均值分别为 0.951 6、0.980 4、1.002 3、0.971 5, D 值特征如表 6 所示。由此可知,掺入粉煤灰可以提高混凝土在盐侵-干湿循环下的耐久性,但掺量不宜过高,本次试验中最佳掺量为 20%。文献[49]对比混凝土相对动弹性模量得到了类似结果。

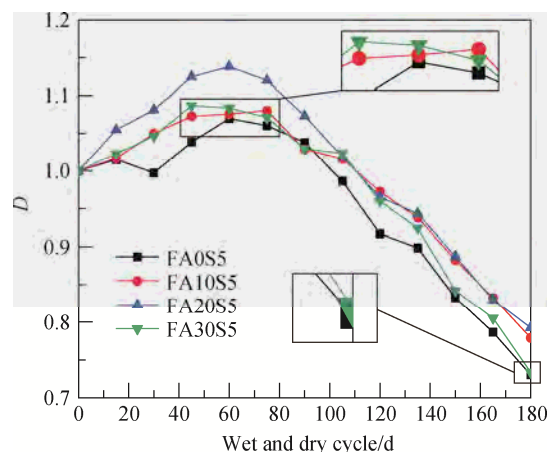


图 3 不同粉煤灰掺量下 D 值变化
Fig. 3 D of S5 with different fly ash contents

表 6 第 2 组 D 值特征
Table 6 Characteristics of D for Group 2

Group	Peak of D		D of 180 d	Mean of D
	Time/d	Value		
FA0S5	60	1.069 7	0.730 2	0.951 6
FA10S5	75	1.080 4	0.779 1	0.980 4
FA20S5	60	1.138 2	0.792 6	1.002 3
FA30S5	45	1.086 8	0.733 6	0.971 5

一方面,由于粉煤灰的形态效应和微集料效应,提高了混凝土的密实度,减少了混凝土与 SO_4^{2-} 的接触面积^[50]。另一方面,水泥的水化产物 C-H 与粉煤灰的活性成分发生火山灰反应,形成 C-S-H^[51],使得混凝土的孔结构得到改善,细化了孔隙,而微孔和中孔对混凝土的抗硫酸盐耐久性有利^[46]。在粉煤灰-水泥体系的反应进程中存在一个供需平衡关系,适当的粉煤灰掺量使得粉煤灰和水泥水化程度相当,一方面消耗水泥水化产生的 C-H,促进水泥水化,生成 C-S-H 凝胶,提升混凝土性能,另一方面又有足量的 C-H 使得粉煤灰继续水化^[52]。这使得二者的水化反应相互促进,孔隙被有序填充,结构逐渐密实,混凝土性能提升^[53]。过高的粉煤灰掺量虽能提升水泥水化反应,但由于水泥含量过少,大部分粉煤灰未能充分水化^[54],所以对混凝土性能提升有限,甚至产生负效应。

3 运用 GM-BP 神经网络的混凝土寿命预测

3.1 GM-BP 神经网络的构建

尽管 BP 神经网络在理论上可以逼近任何非线性函数,但在数据较少的情况下对数据整体的变化趋势把握较差,GM 模型则可以通过少量的、不完全的信息,对事物发展规律做出模糊性的长期描述。因此部分学者将二者结合,取长补短,进行组合预测,发现组合模型不仅克服了原始数据少、数据波动性大对预测精度的影响^[55],还具有收敛速度快、自适应性强的优点^[56]。在文献[13]的工作基础上将 GM 模型和 BP 神经网络串联组合,构建 GM-BP 神经网络用于混凝土寿命预测,以期达到更好的预测精度。

BP 神经网络由输入层、隐藏层和输出层组成。选取硫酸钠溶液质量分数、粉煤灰掺量、干湿循环周期和 GM 模型耐久性预测值作为神经网络输入层,纤维素纤维掺量为常量,不进行输入。在 BP 神经网络中,隐藏层主要起到提取输入数据的特征、计算和输出结果给输出层的作用,而单隐藏层便可以逼近任何闭区间上的连续函数,故根据需要选取 1 层隐藏层,根据试算结果,选取隐藏层神经元个数为 10;选取 D 值作为输出层。故 GM-BP 神经网络的拓扑结构为 4-10-1,如图 4 所示。

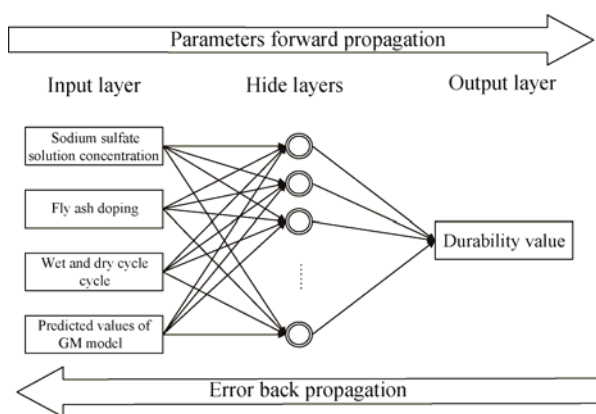


图 4 GM-BP 神经网络拓扑结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of network topology

采用 Matlab 搭建 BP 神经网络。在输入数据时,为了统一各参数单位,采用 Mapminmax 函数对样本数据进行归一化处理,函数表达式如式(11)所示

$$y = (y_{\max} - y_{\min}) \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min} \quad (11)$$

式中: $y_{\min} = -1$, $y_{\max} = 1$; $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为原始样本

的最大值和最小值, x 为归一化处理前的数据, y 为归一化处理后的数据。

为了防止出现过拟合,需要打乱归一化后的样本数据,选用可以随机打乱数字序列的 Randperm 函数。完成数据输入之后,采用 Newff 函数创建 BP 神经网络, Newff 函数为 Matlab 中人工神经网络的创建函数之一,可以创建 BP 神经网络,并默认按照 0.70:0.15:0.15 的比例将输入的样本数据重新划分为训练集、验证集和测试集。

为了反映人工神经网络输入与输出之间的映射关系,需要选择网络传递函数。BP 神经网络的特性要求传递函数必须连续可微,常用的传递函数有 Logsig 函数和 Tansig 函数,本文采用 Tansig 函数,表达式如式(12)所示。

$$y = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (12)$$

人工神经网络在训练过程中需要根据误差利用训练算法调节权值, Trainlm 算法是 BP 神经网络的训练算法之一,具有计算量小,在规模不大时收敛速度快等优点,故本工作采用 Trainlm 算法作为网络的训练算法。

3.2 D 值预测结果及分析

由于 GM-BP 神经网络的训练结果存在随机特性,故进行 10 次神经网络训练,以其中一次训练结果为例。网络在迭代 44 次后训练结束,均方误差为 1.52×10^{-4} ,训练梯度为 9.74×10^{-5} ,网络因泛化能力检查达到 6 次而停止训练。

将 GM-BP 神经网络预测值、GM 模型预测值^[13]和试验值进行比较,如图 5 所示。

计算预测值与试验值的平均绝对百分比误差 (MAPE)、最大误差、最小误差和线性回归方程 $Y=X$ 的决定系数(R^2),如表 7 所示。

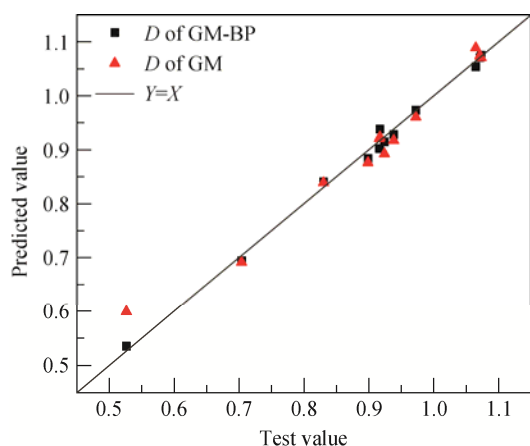
一方面,GM-BP 神经网络预测值的 MAPE 为 1.11,说明其预测值与试验值平均偏离 1.11%,相比于 GM 模型偏离程度减少了 55.42%,而 R^2 的提高说明其对 $Y=X$ 的拟合优度也有所增加。另一方面,GM-BP 神经网络相比于 GM 模型,使得预测值误差范围从 0.002 2~0.072 6 降低至 0.000 2~0.021 2,虽然所降低误差的绝对值较小,但相对值却较大。以上结果说明 GM-BP 神经网络相较于 GM 模型缩小了预测值的误差范围、降低了整体误差,预测结果更具优势。

3.3 混凝土寿命预测

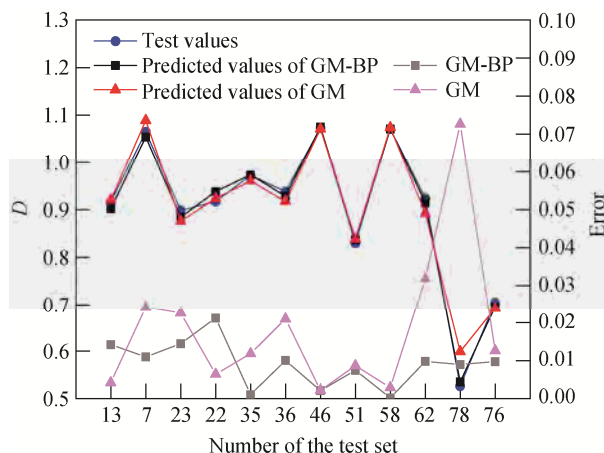
将训练好的神经网络储存后赋予 180 d 后的时

间序列得到预测 D 值, 类比抗压强度耐蚀系数, 认为 D 值下降至 0.75 时试件失效^[57], 得到预测寿命

值, 并与试验值和 GM 模型预测值进行比较, 如表 8 所示。



(a)



(b)

图 5 预测值与试验值对比图

Fig. 5 Comparison diagram of predicted value and real value of test set

表 7 数值评估表

Table 7 Numerical evaluations

Model	MAPE/%	Maximal.error	Minimal.error	R^2
GM-BP	1.11	0.021 2	0.000 2	0.99
GM	2.49	0.072 6	0.002 2	0.97

MAPE is mean absolute percentage error.

表 8 寿命预测值对比图

Table 8 Comparison diagram of life prediction values

Group	Test/d	GM-BP/d	GM/d
FA0S2	>180	285–300	285–300
FA0S5	165–180	165–180	165–180
FA0S10	135–150	135–150	120–135
FA10S5	>180	180–195	195–210
FA20S5	>180	195–210	195–210
FA30S5	165–180	165–180	180–195

在 180 d 盐侵–干湿循环周期内, GM-BP 神经网络的寿命预测值与试验值均在同一时间区间内, 而 GM 模型的寿命预测结果则在 FA0S10、FA30S5 组与试验值出现偏差。该结果说明 GM-BP 神经网络的预测模型相较 GM 模型在一定程度上可以更加精确地预测混凝土寿命。

通过对比混凝土寿命预测的结果发现, 在不掺入粉煤灰的情况下, FA0S2 组试件相比于 FA0S5 组、FA0S10 组预测寿命分别提升了大约 70%、110%, 说明硫酸盐溶液质量分数越大, 混凝土预测寿命越短; 在硫酸钠溶液质量分数同为 5% 的情况下, FA0S5、FA30S5 预测寿命最小, 时间区间相同, 均为 165~180 d; FA20S5 组预测寿命最大, 时间区间

为 195~210 d。说明掺入适量的粉煤灰有益于提升混凝土寿命, 但掺量不宜过大, 预测结果显示 20% 粉煤灰掺量试件预测寿命最长, 预测结果与试验结果相符。

3.4 模型可靠性验证

通过整理文献^[8], 得到了不同粉煤灰掺量(0、20%)混凝土在不同侵蚀方式下(冻融–干湿循环、冻融循环、干湿循环)的耐久性指标。在此基础上, 通过熵权法对不同组试件的 D 值进行了计算, 分别采用 GM-BP 神经网络和 GM 模型对不同条件下混凝土试件的 D 值进行预测, 得到了其预测寿命, 结果如表 9 所示。表中 A、B、AB 分别表示冻融循环、干湿循环、冻融–干湿循环, 0、20 分别表示粉煤灰掺量为 0、20%。

表 9 寿命预测值对比图

Table 9 Comparison diagram of life prediction values

Group	Test /d	GM-BP /d	GM /d
AB0	42–49	42–49	42–49
AB20	49–56	49–56	56–63
A0	48–60	48–60	48–60
A20	48–60	48–60	36–48
B0	160–200	160–200	160–200
B20	>240	240–280	240–280

对比寿命预测的结果可以发现, GM-BP 神经网络的寿命预测值与试验值均在同一时间区间, 而 GM 模型则在 AB20、A20 组与试验值出现偏差。此

结果再次说明 GM-BP 神经网络相较于 GM 模型可以更加准确地预测混凝土寿命, 验证了 GM-BP 神经网络在混凝土寿命预测方面的可靠性。

4 结论

基于熵权法综合考虑了质量、抗压强度和抗劈拉强度 3 个典型的耐久性指标, 建立了混凝土耐久性综合评价指标“ D 值”, 构建了耐久性综合评价体系, 分析了硫酸钠溶液质量分数和粉煤灰掺量对混凝土 D 值的影响, 建立 GM-BP 神经网络用于预测混凝土 D 值的变化规律, 得到了不同条件下混凝土的预期寿命。主要结论如下:

1) 基于熵权法提出了 D 值作为一种混凝土综合评价指标, 此指标综合考虑了质量、抗压强度和抗劈拉强度等多个指标对混凝土耐久性的影响, 为混凝土耐久性的综合评价提供了依据。

2) 分析了混凝土 D 值在不同质量分数硫酸钠溶液下干湿循环的变化规律, 结果表明硫酸钠溶液质量分数越高, D 值变化越剧烈, 并随着循环次数的增加, 呈现出先上升后下降的趋势。180 d 时, D 损失值在 10% 质量分数内与硫酸钠溶液质量分数成正比, 但增长速率先增加后下降。

3) 通过对比不同粉煤灰掺量混凝土在盐侵-干湿循环下的 D 值发现, D 值可以反映出粉煤灰对混凝土抗盐侵-干湿循环的有益作用。结果表明适量粉煤灰的掺入可以减轻盐侵-干湿循环对混凝土试件的侵蚀, 粉煤灰掺量梯度为 10% 时, 最佳掺量为 20%, 符合相关试验结果。

4) 建立了 GM-BP 神经网络用于盐侵-干湿循环下的混凝土寿命预测, 并验证了模型的可靠性。通过对比相关参数发现, 在数据量较小时, GM-BP 神经网络的预测结果相比于 GM 模型缩小了预测值的误差范围、降低了整体误差, 通过 GM-BP 神经网络得到的预测寿命与试验结果吻合度较高。

参考文献:

- [1] 马颖彪. 硫酸盐侵蚀条件下纤维素纤维混凝土力学性能试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
MA Yingbiao. Experimental study on the mechanical properties of cellulose fiber concrete under sulfate attack (in Chinese, dissertation). Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [2] 杨冬鹏. 北方地区水工混凝土的耐久性 & 寿命预测研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
Yang Dongpeng. Research on durability and life prediction of hydraulic concrete in the northern region (in Chinese, dissertation).

- Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [3] 杨永敢, 康子豪, 詹炳根, 等. 初始损伤混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(12): 1255–1261.
YANG Yonggan, KANG Zihao, ZHAN Binggen, et al. J Build Mater (in Chinese): 2022, 25(12): 1255–1261.
- [4] 朱效宏, 李青, 陈平, 等. 硫酸盐侵蚀条件下 C-(A)-S-H 组成-结构演化的量化分析[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(5): 901–909.
ZHU Xiaohong, LI Qing, CHEN Ping, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(5): 901–909.
- [5] HAN T, WANG X, LI D, et al. Damage and degradation mechanism for single intermittent cracked mortar specimens under a combination of chemical solutions and dry-wet cycles[J]. Constr Build Mater, 2019, 213: 567–581.
- [6] 邵玉. 基于界面特征的干湿循环—硫酸盐侵蚀耦合作用下的混凝土劣化研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
SHAO Yu. Study on deterioration of concrete under drying-wetting Cycles and Sulfate Attack Based on Interface (in Chinese, dissertation). Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [7] 刘鹏强. 不同干湿循环方式下混凝土硫酸盐侵蚀劣化特性试验研究[D]. 郑州大学, 2021.
LIU Pengqiang. Experimental study on the deterioration characteristics of concrete exposure to sulfate erosion under different drying-wetting conditions (in Chinese, dissertation). Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [8] 谢东升. 冻融—干湿循环作用下混凝土抗硫酸盐侵蚀评价方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
XIE Dongsheng. Research on the evaluation method of concrete resistance to sulfate erosion under freeze-thaw-dry-wet cycles (in Chinese, dissertation). Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [9] 谢友均, 陈小波, 马昆林, 等. 粉煤灰对水泥浆体的剪切变稀和剪切增稠作用[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(8): 1040–1046.
XIE Youjun, CHEN Xiaobo, MA Kunlin, et al. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(8): 1040–1046.
- [10] LIANG N, MAO J, YAN R, et al. Corrosion resistance of multiscale polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate attack[J]. Case Studies in Constr Mater, 2022, 16: e01065.
- [11] 韦天下, 林加剑, 施国栋, 等. 三轴循环加载下玄武岩纤维混凝土能量跌落系数及演化特征[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2173–2181.
WEI Tianxia, LIN Jiajian, SHI Guodong, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2173–2181.
- [12] 张文潇. 纤维素纤维混凝土耐久性、高温抗爆裂及徐变特性[D]. 南京: 东南大学, 2015.
ZHANG Wenxiao. Durability, high temperature burst resistance and creep properties of cellulose fiber concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2015.
- [13] 覃源, 关科, 马颖彪, 等. 硫酸盐干湿循环下纤维混凝土的耐久性 & 寿命[J]. 水力发电学报, 2021, 40(9): 141–150.
QIN Yuan, GUAN Ke, MA Yingbiao, et al. J Hydroelectr Eng (in Chinese), 2021, 40(9): 141–150.
- [14] 张围. 纳米填料和超细钢微丝复掺超高性能混凝土力学和智能性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZAHNG Wei. Mechanical and smart properties of ultra-high performance concrete with hybrid nano fillers and super-fine stainless wire (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of

- Technology, 2020.
- [15] 马伟丽, 覃源, 刘海敏, 等. 纳子峡纤维素纤维混凝土面板坝服役期渗流特性分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(2): 894-900+950-951. MA Weili, QIN Yuan, LIU Haimin, et al. Chin J Appl Mech (in Chinese), 2020, 37(2): 894-900+950-951.
- [16] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性 & 损伤模型[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7): 855-864. LONG Guangcheng, YANG Zhenxiong, BAI Chaoneng, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(7): 855-864.
- [17] 赵卓, 邢锋, 曾力, 等. 地下水中侵蚀性二氧化碳作用下的混凝土耐久性试验[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(2): 224-229. ZHAO Zhuo, XING Feng, ZENG Li, et al. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(2): 224-229.
- [18] 王海龙, 董宜森, 孙晓燕, 等. 干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(7): 1255-1261. WANG Hailong, DONG Yisen, SUN Xiaoyan, et al. J Zhejiang Univ (Eng Sci) (in Chinese), 2012, 46(7): 1255-1261.
- [19] DILLARD R J, MURRAY C D, DESCHENES R A. Belitic calcium sulfoaluminate cement subjected to sulfate attack and sulfuric acid[J]. Constr Build Mater, 2022, 343: 128089.
- [20] WALLY G B, MAGALHÃES F C, PINTO DA SILVA FILHO L C. From prescriptive to performance-based: An overview of international trends in specifying durable concretes[J]. J Build Eng, 2022, 52: 104359.
- [21] SHAH V, BISHNOI S. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 178: 219-232.
- [22] WALLY G B, MAGALHÃES F C, JUNIOR F K S, et al. Estimating service life of reinforced concrete structures with binders containing silica fume and metakaolin under chloride environment: durability indicators and probabilistic assessment[J]. Mater Struct, 2021, 54(2): 1-16.
- [23] 方祥位, 申春妮, 杨德斌, 等. 混凝土硫酸盐侵蚀速度影响因素研究[J]. 建筑材料学报, 2007(1): 89-96. FANG Xiangwei, SHEN Chunni, YANG Debin, et al. J Build Mater (in Chinese), 2007(1): 89-96.
- [24] NIU D, ZHANG L, FU Q, et al. Critical conditions and life prediction of reinforcement corrosion in coral aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 238: 117685.
- [25] SHAO W, WANG Y, SHI D. Corrosion-fatigue life prediction of reinforced concrete square piles in marine environments[J]. Eng Failure Anal, 2022, 138: 106324.
- [26] 路承功, 魏智强, 乔宏霞, 等. 基于 Wiener 随机过程地下腐蚀环境中钢筋混凝土耐久性寿命预测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(7): 119-128. LU Chenggong, WEI Zhiqiang, QIAO Hongxia, et al. J Hunan Univ: Nat Sci (in Chinese), 2021, 48(7): 119-128.
- [27] 李北星, 蔡老虎. 基于灰色系统的混凝土酸化预测模型研究及应用[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(10): 1375-1380. LI Beixing, CAI Laohu. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(10): 1375-1380.
- [28] WU J, XU J, DIAO B, et al. Fatigue life prediction for the reinforced concrete (RC) beams under the actions of chloride attack and fatigue[J]. Eng Struct, 2021, 242: 112543.
- [29] ASTERIS P G, SKENTOU A D, BARDHAN A, et al. Predicting concrete compressive strength using hybrid ensembling of surrogate machine learning models[J]. Cem Concr Res, 2021, 145: 106449.
- [30] 龙旭, 毛明晖, 卢昶衡, 等. 基于人工神经网络的混凝土类材料 SHPB 动态压缩性能预测[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(5): 789-800. LONG Xu, MAO Minghui, LU Changheng, et al. J Nanjing Univ Aeronaut Astronaut (in Chinese), 2021, 53(5): 789-800.
- [31] 陈庆, 马瑞, 蒋正武, 等. 基于 GA-BP 神经网络的 UHPC 抗压强度预测与配合比设计[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 176-183+191. CHEN Qing, MA Rui, JIANG Zhengwu, et al. J Build Mater(in Chinese), 2020, 23(1): 176-183+191.
- [32] JI T, LIN T, LIN X. A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(7): 1399-1408.
- [33] 王岩, 张友桃, 胡鸿翔, 等. 基于声发射和人工神经网络的混凝土损伤程度识别[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 672-676. WANG Yan, ZHANG Youtao, HU Hongxiang, et al. J Build Mater(in Chinese), 2014, 17(4): 672-676.
- [34] TAM V W Y, BUTERA A, LE K N, et al. A prediction model for compressive strength of CO₂ concrete using regression analysis and artificial neural networks[J]. Constr Build Mater, 2022, 324: 126689.
- [35] AMIRI M, HATAMI F. Prediction of mechanical and durability characteristics of concrete including slag and recycled aggregate concrete with artificial neural networks (ANNs)[J]. Constr Build Mater, 2022, 325: 126839.
- [36] 毛晓敏, 张慧华, 纪晓磊, 等. 基于 XFEM 与 BP 神经网络的裂纹智能识别[J]. 应用力学学报, 2022, 39(6): 1158-1167. MAO Xiaomin, ZHANG Huihua, JI Xiaolei, et al. Chin J Appl Mech (in Chinese), 2022, 39(6): 1158-1167.
- [37] HUANG L, CHEN J, TAN X. BP-ANN based bond strength prediction for FRP reinforced concrete at high temperature[J]. Eng Struct, 2022, 257: 114026.
- [38] BI Y, CHEN C, HUANG X, et al. Discrimination method of biomass slagging tendency based on particle swarm optimization deep neural network (DNN)[J]. Energy, 2022: 125368.
- [39] ANJALI R, VENKATESAN G. Optimization of mechanical properties and composition of M-sand and pet particle added concrete using hybrid deep neural network-horse herd optimization algorithm[J]. Constr Build Mater, 2022, 347: 128334.
- [40] WEN Z, ZHOU R, SU H. MR and stacked GRUs neural network combined model and its application for deformation prediction of concrete dam[J]. Expert Systems Appl, 2022, 201: 117272.
- [41] 易成, 刘燕, 安新正. 混凝土耐久性评价体系的缺陷与解决途径[J]. 混凝土, 2008(11): 32-36. YI Cheng, LIU Yan, AN Xinzheng. Concrete (in Chinese), 2008(11): 32-36.
- [42] 朱红光, 范敬冲, 赵养基, 等. 复杂环境下混凝土耐久性评价模型[J]. 混凝土, 2017(12): 9-13. ZHU Hongguang, FAN Jingchong, ZHAO Yangji, et al. Concrete(in Chinese), 2017(12): 9-13.
- [43] 程汉斌. 硫酸盐侵蚀混凝土劣化规律与单轴受压本构关系研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019. CHEN Hanbin. Study on the deterioration law and the uniaxial compression constitutive relationship of concrete under sulfate attack (in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute Of Technology
- [44] LIU P, CHEN Y, YU Z, et al. Effect of sulfate solution concentration

- on the deterioration mechanism and physical properties of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 227: 116641.
- [45] YANG S, HAN M, CHEN X, et al. Influence of sulfate crystallization on bond-slip behavior between deformed rebar and concrete subjected to combined actions of dry-wet cycle and freeze-thaw cycle[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 345: 128368.
- [46] 宿晓萍. 吉林省西部地区盐渍土环境下混凝土耐久性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- SU Xiaoping. Research on the concrete durability odue to salinized soil in the western region of Jilin Province (in Chinese, dissertation). Changchun: Jilin University, 2013.
- [47] WEI Y, CHAI J, QIN Y, et al. Effect of fly ash on mechanical properties and microstructure of cellulose fiber-reinforced concrete under sulfate dry-wet cycle attack[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 302: 124207.
- [48] ZOU D, QIN S, LIU T, et al. Experimental and numerical study of the effects of solution concentration and temperature on concrete under external sulfate attack[J]. *Cem Concr Res*, 2021, 139: 106284.
- [49] 李阳, 王瑞骏, 闫菲, 等. 粉煤灰对混凝土抗冻及抗硫酸盐性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 219–226.
- LI Yang, WANG Ruijun, YAN Fei, et al. J Northwest Agricult Forestry Univ Sci Technol : Nat Sci (in Chinese), 2017, 45(2): 219–226.
- [50] IDIART A E, LÓPEZ C M, CAROL I. Modeling of drying shrinkage of concrete specimens at the meso-level[J]. *Mater Struct*, 2011, 44(2): 415–435.
- [51] 阎培渝. 粉煤灰在复合胶凝材料水化过程中的作用机理[J]. 硅酸盐学报, 2007(S1): 167–171.
- YAN Peiyu. J Chin Ceram Soc, 2007(S1): 167–171.
- [52] HAY R, OSTERTAG C P. New insights into therole of fly ash in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2021, 144: 106440.
- [53] 贾艳涛. 矿渣和粉煤灰水泥基材料的水化机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- JIA Yantao. Study on the hydration mechanism of slag and fly ash cement-based materials (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2005.
- [54] 屈锋. 盐冻环境下混凝土构件耐久性 & 寿命预测研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- QU Feng. Durability study and service life prediction of concrete specimens under salt frozen environment (in Chinese, dissertation). Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2014.
- [55] 余志武, 薛凯, 丁发兴. 灰色神经网络在混凝土结构徐变预测中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(2): 12–16.
- YU Zhiwu, XUE Kai, DING Faxing. J Railway Sci Eng (in Chinese), 2009, 6(2): 12–16.
- [56] 李晓芳. 大体积混凝土温升预测的非线性模型[J]. 混凝土, 2012(2): 127–129.
- LI Xiaofang. Concrete (in Chinese), 2012(2): 127–129.
- [57] 中国建筑科学研究院. GBT50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: 中华人民共和国国家标准, 2009: 175.