第 54 卷第 2 期
2026 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 2
February，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250177

荷载–离子–温度共同作用下地下混凝土损伤程度分析与预测

杨 斌[1]，李 悦[1]，林 辉[1]，李 伟[2]，乔天龙[2]

(1. 北京工业大学建筑工程学院，桥梁工程安全与韧性全国重点实验室，北京 100124；2. 北京建工新型建材有限责任公司，北京，100166)

摘 要：针对地下混凝土服役条件复杂、使用寿命难以准确预测的现状，本研究设计了荷载–离子–温度共同作用下的加速试验，揭示了三因素共同作用下混凝土的损伤劣化规律，通过熵权法构建了混凝土损伤度的评价体系，基于信息熵理论客观量化破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量变化等指标对损伤度的贡献，结合 4 种不同的灰色一阶单变量理论模型通过累加生成与参数优化实现了小样本数据下混凝土寿命的高精度预测。结果表明：荷载–离子–温度共同作用下混凝土损伤指标呈“早期增长、且适度升温后早期性能更优、但升温后劣化提前”的规律；对损伤程度影响从大至小的指标分别是破坏荷载(80%～90%)、动弹性模量(5%～8%)、回弹值(1%～6%)、超声波波速(1%～4%)、质量变化(＜1%)；基于精度最高的优化离散灰色模型预测了荷载–离子–温度共同作用下混凝土的服役寿命。

关键词：混凝土；损伤程度；多因素共同作用；寿命预测
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0653–13
网络出版时间：2026–01–30

随着城市化进程的推进和地下空间的深入利用，地铁隧道、地下连续墙、管廊和桩基等地下混凝土结构长期面临复杂多变的服役环境。如地下水压力和土压力会引发混凝土内部微裂缝的扩展，并为离子渗透提供通道[1]；而地下水中的侵蚀性离子会与水泥的水化产物反应，进而导致结构破坏[2, 3]；同时地下的高温高湿环境也会加速混凝土的性能退化[4]。在荷载作用、离子侵蚀及温度变化的共同作用下，显著加剧了混凝土材料的劣化进程，导致耐久性下降甚至提前失效。据统计，全球范围内因耐久性不足导致的混凝土结构的维修费用已超过工程总投资的 40%[5]。然而，已有的混凝土耐久性研究中大部分是单因素侵蚀[6–8]，或者多种因素的叠加作用[9]，这与混凝土实际服役的环境吻合度较低，但目前关于多种因素共同作用的研究较少。因此，开展荷载–离子–温度共同作用下混凝土的耐久性评价与寿命预测研究，对保障地下工程安全运营、降低全生命周期成本具有重要意义。

近年来，众多学者对混凝土耐久性的评价方法与寿命预测展开研究。如 Shi 等[10]基于熵权法评价了混凝土在冻融循环和硫酸盐侵蚀耦合作用下的损伤情况；覃源等[11]通过熵权法建立了不同冻融循环次数下混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、质量等耐久性指标的评价方法，并基于人工神经网络进行寿命预测。刘国华等[12]基于层次分析法探究了强度、保护层厚度、电阻率等因素对混凝土耐久性的影响，并通过灰色理论进行寿命预测。El-Mir 等[13]通过多准则优化法评价了混凝土的耐久性，并通过拟合多元回归模型预测了耐久性最优的配合比。Gong 等[14]通过 FOTP-GM(1,1)方法预测了纤维混凝土在不同工况的最大服役寿命，发现其在硫酸盐环境和冻融循环耦合作用下劣化最快。上述学者的研究印证了通过数学模型方法预测混凝土耐久性是可行的。

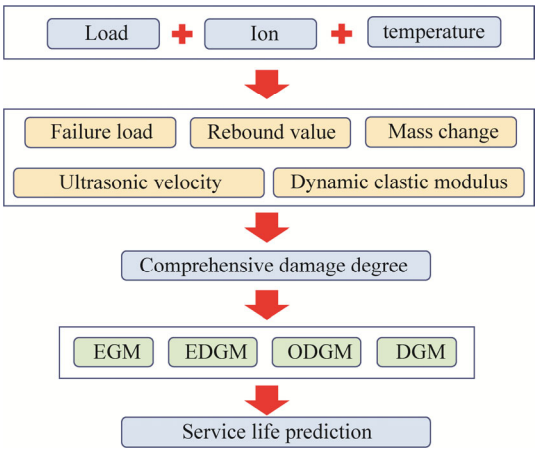
同时，关于混凝土服役寿命的评价指标方面，众多学者基于无损检测的方法评价混凝土损伤度的变化。如 Tao 等[15]研究了超声波波速、动弹性模量、质量变化对冻融循环条件下混凝土耐久性的影响；

收稿日期：2025–03–15。　修订日期：2025–04–09。
基金项目：北京市自然科学基金项目(24JL003)；国家自然科学基金–联合基金项目(U2368207)；国家自然科学基金项目(52308229)。
第一作者：杨 斌(1997—)，男，博士研究生。
通信作者：李 悦(1972—)，男，博士，教授。

Received date: 2025–03–15.　**Revised date:** 2025–04–09.
First author: YANG Bin (1997–), male, Doctoral candidate.
E-mail: yangbin186@emails.bjut.edu.cn
Correspondent author: LI Yue (1972–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: liyue@bjut.edu.cn

Jena 等[16]研究了混凝土的回弹值、强度、超声波波速等指标对耐久性的影响。聂彦锋等[17]研究了混凝土在硫酸盐侵蚀下超声波波速、回弹值、质量变化等指标的变化。上述学者的研究均印证了通过破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量变化等指标评价混凝土的损伤程度是可行的。

因此，针对上述问题，本研究测试了混凝土试块在荷载–离子–温度共同作用时破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量等指标的变化，通过 X 射线计算机断层成像(X-CT)测试解释了孔隙结构的变化，并基于熵权法建立了损伤度的综合评价体系，采用 4 种灰色一阶单变量模型[GM(1,1)]分析了混凝土在荷载–离子–温度共同作用下的经时演变规律，基于精度最高的模型预测不同服役工况下混凝土的最大使用寿命，为地下混凝土材料的优化设计和寿命评估提供了科学依据，本工作的技术路线图如图 1 所示。



Note: EGM, EDGM, ODGM and DGM represent even grey model, even discrete grey model, optimized discrete grey model and discrete grey model, respectively.

图 1 技术路线图

Fig. 1 Technical roadmap

1 实验

1.1 原材料和配合比

胶凝材料为 P.O 42.5 水泥、II级粉煤灰、S95 级矿粉，细骨料为细度模数为 2.5 的河砂，粗骨料为 5～25 mm 的碎石，减水剂为 AN400 聚羧酸减水剂。其中，胶凝材料的化学组分如表 1 所示。配合比源于北京市某地下连续墙实体工程中，如表 2 所示。

1.2 方法

1.2.1 实验条件 本工作研究了荷载、离子侵蚀、温度这 3 种因素共同作用对混凝土损伤的影响，多因素共同作用的工况分为 4 种，如表 3 所示，其中荷载作用是通过在试块上叠放配重块实现，选用的荷载大小是破坏荷载(F_{max})的 20%。为了降低破坏荷载，在 400 mm×100 mm×100 mm 的试块中部切开一个宽度为 10 mm、深度为 50 mm 的矩形缺口。该缺口处于试块的受压区域，目的是为了让试块从受拉区破坏，降低破坏荷载。将试块置于压力机后进行四点加载得到的破坏荷载大小为 5.5 kN。因此按照破坏荷载的 20%对试块进行加载，即每个试块上添加 110 kg 的配重块模拟荷载作用，如图 2 所示。

离子侵蚀作用选用的溶液分别为 3% (质量分数，下同)的 NaCl 溶液和 5%的 Na_2SO_4 溶液，这是因为北京市地下水中氯离子和硫酸根离子浓度的比例约为 3 : 5[18, 19]。溶液温度设置为 20 ℃和 50 ℃。此外，对于这 2 种溶液的温度，每天均通过校准过的数显温度计进行检测，确保溶液温度符合要求。通过上述方法，使混凝土试块同时受到荷载–离子–温度的共同作用。

1.2.2 测试方法 为了评价混凝土试块的损伤情况，综合考虑了“宏观性能–微观结构”、“表层劣化–内部损伤”、“化学侵蚀–物理劣化”等多种因素协同作用的影响，测试了各组试块的破坏荷载、超声

表 1 胶凝材料的化学组分

Table 1 Chemical composition of cementitious materials

w/%

Materials	CaO	SiO_2	Al_2O_3	SO_3	MgO	Fe_2O_3	Other
Cement	62.05	18.04	6.32	4.18	3.80	3.12	2.49
Fly ash	2.97	48.12	38.98	0.88	0.60	4.44	4.01
Mineral powder	40.80	27.65	16.71	2.77	7.56	1.07	3.44

w is mass fraction.

表 2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix proportion

kg/m^3

Cement	Fly ash	Mineral powder	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	Water reducer
270	91	54	863	935	166	6.64

表 3　荷载–离子–温度共同作用的试验工况

Table 3　"Load–ion–temperature" interaction test conditions

Samples No.	Load	Ion conditions	Temperature/℃
G1	$0.2F_{max}$	3%NaCl	20
G2	$0.2F_{max}$	3%NaCl	50
G3	$0.2F_{max}$	5%Na_2SO_4	20
G4	$0.2F_{max}$	5%Na_2SO_4	50

F_{max} is the failure load.

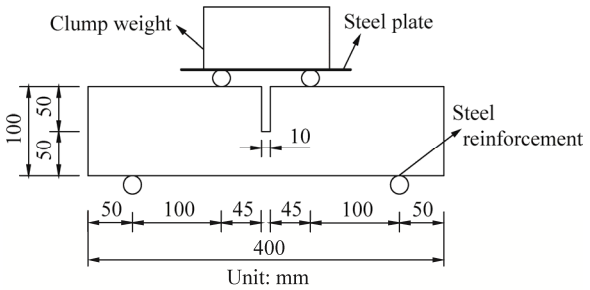


图 2　加载示意图

Fig. 2　Loading diagram

波波速、动弹性模量、回弹值、质量变化。测试龄期按养护 28 d 以后的时间开始计算，分别为 0、30、60、90、120、150、180 d 这 7 个龄期，其中破坏荷载每个龄期测试 3 个试块取平均值，超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量变化每次也是测试 3 个试块，但不同龄期下均用这 3 个试块测试取平均值，每组共 24 个试块。此外，基于 CT 计算机断层扫描系统测试了混凝土样品的孔隙率和孔隙分布。

破坏荷载的测试方法是参照 GB/T50081—2009《普通混凝土力学性能试验方法标准》[20]，将试块置于压力机(型号为 DYE-2000)的支座上，试块上方的钢制双点加荷头作用在试件跨度的 2 个三分点上，加载速度为 0.05 MPa/s。动弹性模量是参照 GB/T50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》[21]，将试块置于泡沫塑料垫上，并将激振换能器的测杆置于长边侧面中线的 1/2 处，将接收换能器的测杆置于长边侧面中线距端面 5 mm 处，共振仪(型号为 DT-20)的输出频率范围为 100～20000 Hz。超声波波速和回弹值测试是参照 CECS02—2005《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》[22]，其中超声波波速测试仪(型号为 NM-4A)的发射电压为 500 V，采样周期为 0.4 μs，每次测试时均在换能器上均匀涂抹超声波耦合剂确保信号稳定传输；回弹值测试时将回弹仪(型号为 HT-225A)的轴线垂直于混凝土测试面，选用浇筑方向的侧面进行测试。质量变化通过高精度电子秤(型号为 ACS-10)进行测试，测试前先清除表面水分和附着物，每个试块重复测量 3 次取平均值。X-CT 测试的样品尺寸为 30 mm 的立方体，CT 测试设备(型号为 NanoVoxel-4000)沿水平剖面逐层扫描，X 射线的加速电压为 150 kV，管电流为 140 μA。

2　结果与讨论

2.1　实验结果

基于 GB/T51355—2019《既有混凝土结构耐久性评定标准》[23]，由环境作用造成的结构性能劣化定义为耐久性损伤。这一损伤包含了宏观性能退化和微观结构破坏，众多学者采用损伤度评价混凝土的腐蚀劣化程度[24, 25]。因此，本工作中也采用损伤度评价混凝土在荷载–离子–温度共同作用下性能演变规律，其计算公式如式(1)所示。

$$D_t = \frac{y_t - y_0}{y_0} \tag{1}$$

式中：D_t 指第 t 天的损伤度；y_0 指第 0 天的测试值；y_t 指第 t 天的测试值；t 为天数，t=30, 60, 90, 120, 150, 180 d。

各指标的损伤度随龄期的变化如图 3 所示，其中超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量变化对应图 3 中的左轴，破坏荷载对应图 3 中的右轴。由图 3 可见，在 4 种不同的条件下，混凝土的损伤度均呈先上升后下降的趋势，同一条件下的破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量变化的趋势是相近的，这是因为超声波波速能反映材料内部微观结构和基体密实度的变化，从而影响混凝土的力学性能，导致破坏荷载同步变化。基于弹性力学理论可知，动弹性模量与超声波波速的平方呈正相关，是衡量混凝土的刚度和抵抗变形能力的指标，因此其变化趋势与破坏荷载相近；其次，混凝土在浸泡初期由于侵蚀性离子与水化产物反应填充孔隙，导致密实度和质量均增加，从而提高了破坏荷载。此外，回弹值可以反映混凝土表层的劣化情况，也能直观地评价混凝土的损伤程度。

然而，4 种条件下损伤度衰减的转折点并不一致。G1 组在 150 d 内的破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值和质量均持续增长，180 d 以后逐渐降低。对于 G2 组，其破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值和质量在 120 d 内均大于 G1 且持续增长。G3 与 G4 组均是硫酸盐侵蚀，在 90 d 以内各项损伤度指标均有提高，90 d 以后逐渐下降，这是因为硫酸盐会与水泥中的铝酸三钙和氢氧化钙反应生成钙矾石和石膏，但由于钙矾石含 32 个结晶

水，体积膨胀率大，石膏的存在也会促进钙矾石的生成，同时在硫酸盐环境下生成的钙矾石和石膏的膨胀显著大于 G1 组由于氯盐产生的 Friedel 盐的膨胀[26, 27]，因此 G3 损伤度衰减的起点早于 G1 组。同时 G4 组在 50 ℃的环境下，硫酸盐的反应速率加快，同时适度升温可能促进了水泥颗粒的二次水化生成额外的 C-S-H 凝胶[28]，因此 180 d 内 G4 的破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、质量、回弹值均高于 G3。

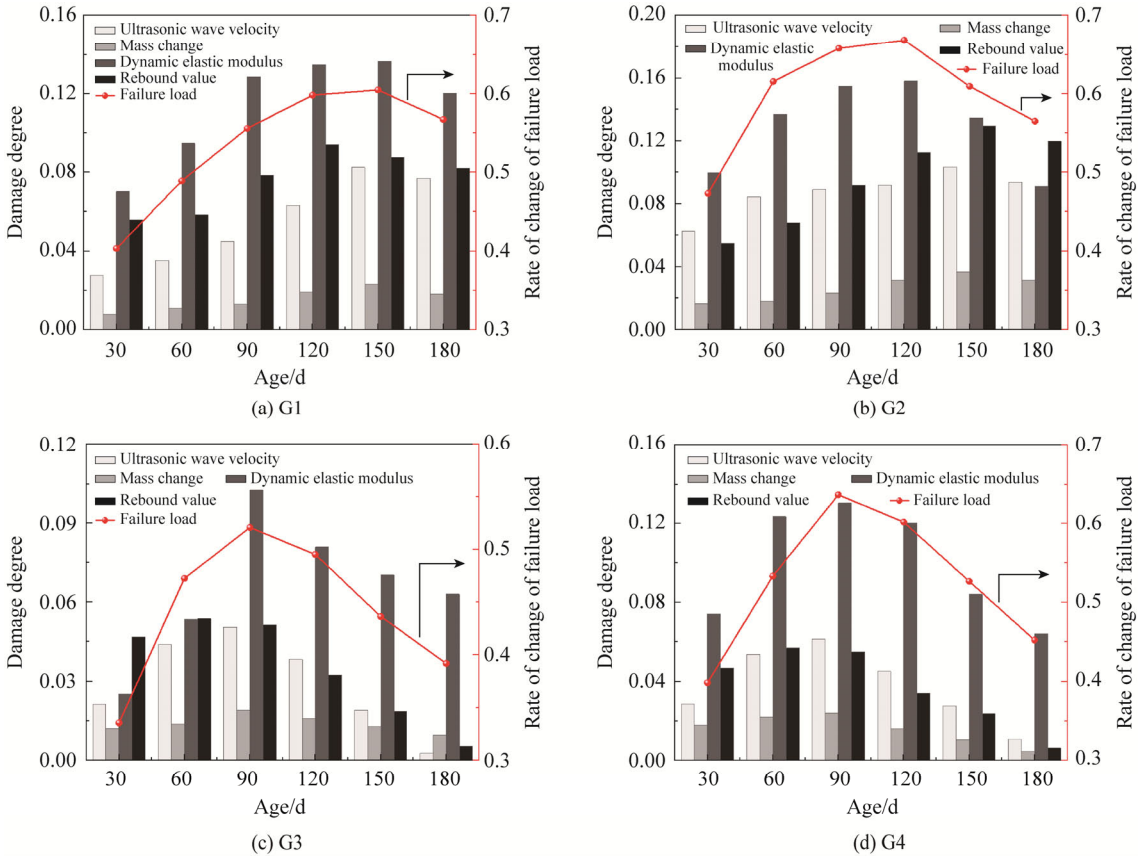


图 3 不同工况下混凝土的损伤情况

Fig. 3 Damage of concrete under different working conditions

为了探明其内部微结构在早期和后期变化，对 G1 和 G2 组 0、90、180 d 的混凝土样品进行了三维重构，孔隙重构的流程如图 4 所示。首先利用 Avizo 可视化软件对二维切片图像处理，基于中值滤波算法降低图像的噪声，再通过阈值分隔得到二进制图像，将所有孔隙图像叠加后得到三维孔隙模型。

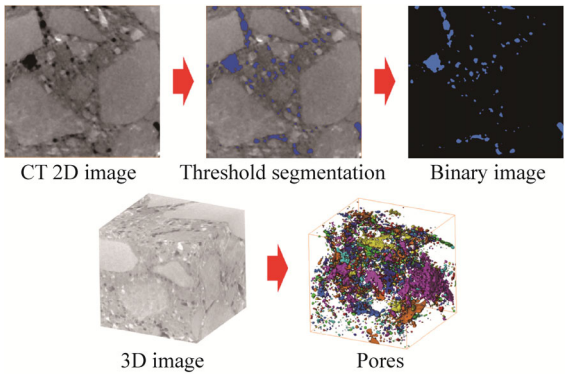


图 4 孔隙三维重构流程

Fig. 4 Pore three-dimensional reconstruction process

G1 和 G2 组 0、90、180 d 的孔隙结构如图 5 所示。基于孔隙统计得到的孔隙率如图 6b 所示。G1 在 0、90、180 d 的孔隙率分别为 2.28%、1.85%、1.55%，G2 在 0、90、180 d 的孔隙率分别为 2.30%、1.41%、1.59%，其中 G1 和 G2 在第 0 d 孔隙率有差异的原因是 0 d 时对 G1 和 G2 各取 1 个试块进行测试，0.02%的差异是由不同试块的误差导致的。此外，Ying 等[29]在研究中将孔隙对混凝土的影响程度按孔体积分为了 4 类：微孔(≤0.1 mm^3)、小孔(0.1～1.0 mm^3)、中孔(1～10 mm^3)、大孔(≥10 mm^3)，因此，对 G1 组的孔隙参照这一标准进行划分，结果如图 6c 所示。G1 组在早期的破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值和质量均持续增长，180 d 以后逐渐降低，这是因为混凝土在 $0.2F_{max}$、3%NaCl、20 ℃共同作用下反应速率较慢，氯离子与水泥中的铝酸三钙反应生成的 Friedel 盐填充了

孔隙[30–33]，并且主要是填充微孔(≤0.1 mm^3)和小孔(0.1～1.0 mm^3)，导致孔隙率降低。对于 G2 组，基于阿伦尼乌兹方程可知，温度每升高 10 ℃，反应速率约提高 2～3 倍[34]，同时 G2 组在 90 d 的孔隙率低于 G1，说明在 50 ℃下早期反应速率显著快于 G1 组，孔隙填充更加迅速，密实度提升，因此早期 G2 的破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、质量、回弹值均高于 G1。同时由于 G2 反应速率加快，孔隙在 120 d 时被填充密实，因此损伤度开始衰减的起点早于 G1 组。

2.2　基于熵权法的混凝土损伤度评价

2.2.1　熵权法的原理　　混凝土在荷载–离子–温度共同作用时，其破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量等指标均会发生变化，但各个指标对损伤度的影响程度并不一致，因此需要分析各个指标的权重，从而对混凝土的耐久性进行综合评判。

研究表明，熵权法广泛应用于多指标综合评价领域[35, 36]。熵权法是一种基于信息熵理论的客观赋权方法，其核心思想是：指标的离散程度越高，其携带的信息量越多，权重则更大。因此，可以将各个指标对混凝土损伤度的影响转换为权重，基于熵权法定义混凝土的综合损伤度，如式(2)所示。

$$CD=\sum_{j=1}^{n}x_jq_j=x_1q_1+x_2q_2+\cdots+x_nq_n \tag{2}$$

式中：CD 是混凝土的综合损伤度，是结合多个性能指标对混凝土损伤劣化程度的综合评价；n 是评价指标数；x_j 是评价损伤度的第 j 个指标；q_j 是第 j 个指标对应的权重。

熵权法的具体步骤如下：

1) 构造样本矩阵，混凝土损伤度样本矩阵形式为 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{mn}$，其中 a_{ij} 为第 j 个指标的第 i 个样本值，n 为损伤度指标个数，m 为各个指标下的样本数；

2) 样本矩阵标准化，不同指标的量纲和数值范围均不一致，进行标准化处理后可以消除不同指标之间的差异，统一评价的尺度。样本矩阵标准化后记为 $\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{mn}$，其计算方法如式(3)所示。

$$x_{ij}=\frac{a_{ij}}{a_{1j}}\ (i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n) \tag{3}$$

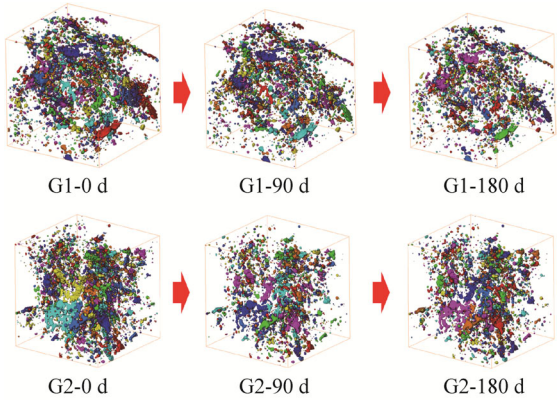
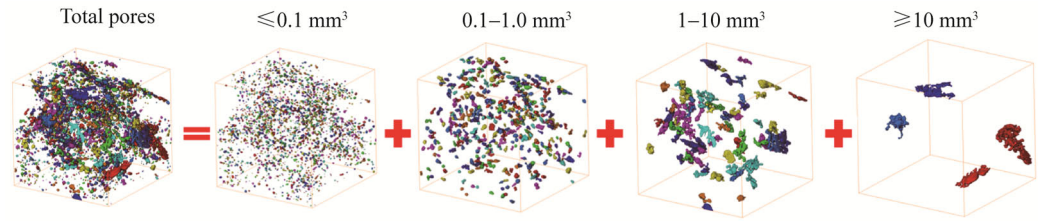
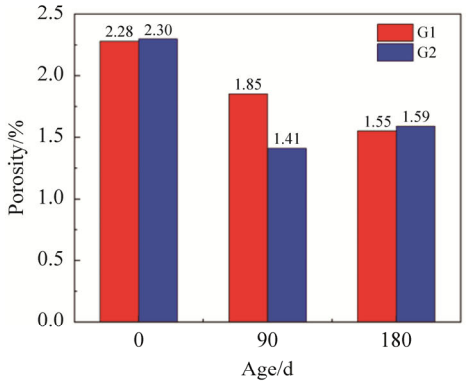


图 5　孔隙三维分布

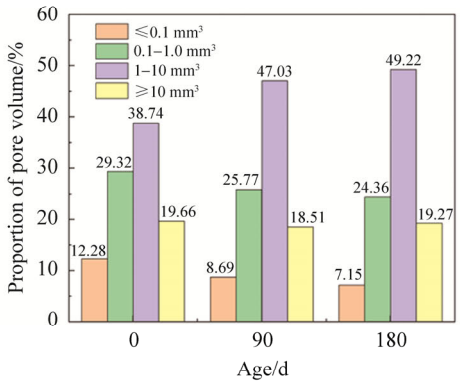
Fig. 5　Three-dimensional pore distribution



(a) Pore division



(b) Porosity



(c) Proportion of pore volume of G1

图 6　孔隙率与孔隙占比

Fig. 6　Porosity and pore volume proportion

3) 建立比重矩阵，比重矩阵用于评价第 j 个指标的第 i 个样本占该指标的比重，本质是将标准化后的数据转化为概率分布，从而量化各指标在不同样本中的相对重要性，为熵值计算提供基础，比重矩阵 $\boldsymbol{P}$ 的计算方法如式(4)所示。

$$\boldsymbol{P}_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

4) 信息熵计算，熵值 $\boldsymbol{E}=(e_j)$是用于量化第 j 个指标中样本的离散程度，当熵值越接近 0 时，样本分布则越离散，表明该指标在不同样本间的差异显著，具有较高的信息量，因此权重越大。熵值的计算方法如式(5)所示。

$$e_j=\frac{\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln p_{ij}}{\ln m}(j=1,2,\cdots,n) \tag{5}$$

基于信息熵，可以得到差异系数 d_j，如式(6)所示，差异系数与权重呈正相关。

$$d_j=1-e_j \tag{6}$$

5) 权重系数分配，各指标的权重系数 $\boldsymbol{Q}=(q_j)$可以通过差异系数转换得到，如式(7)所示。

$$q_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n}d_j}(j=1,2,\cdots,n) \tag{7}$$

2.2.2 熵权法分析混凝土综合损伤度 基于 2.1 节的试验结果，采用熵权法分析了 0、30、60、90、120、150、180 d 龄期时的抗折强度、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量变化对混凝土损伤度的影响。损伤度大于 1 时表明其性能增强，损伤度越小则说明其损伤越严重。根据 2.2.1 节的原理，本节以 G3 组的条件为例，分析了混凝土在 0.2F_{max}、5%Na_2SO_4、20 ℃条件下混凝土综合损伤度的评价方法，计算过程如下：

1) 构造样本矩阵，根据破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量这 5 个指标的原始数据构造样本矩阵：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}5.535 & 4.673 & 27.44 & 33.27 & 9.657\\ 7.392 & 4.772 & 28.13 & 34.83 & 9.774\\ 8.151 & 4.878 & 28.91 & 35.06 & 9.790\\ 8.418 & 4.909 & 30.26 & 34.98 & 9.840\\ 8.276 & 4.852 & 29.66 & 34.35 & 9.811\\ 7.951 & 4.762 & 29.37 & 33.89 & 9.781\\ 7.704 & 4.685 & 29.17 & 33.45 & 9.752\end{bmatrix} \tag{8}$$

2) 样本矩阵标准化：

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}1.000\,0 & 1.000\,0 & 1.000\,0 & 1.000\,0 & 1.000\,0\\ 1.335\,5 & 1.021\,2 & 1.025\,1 & 1.046\,9 & 1.012\,1\\ 1.472\,6 & 1.043\,9 & 1.053\,6 & 1.053\,8 & 1.013\,8\\ 1.520\,9 & 1.050\,5 & 1.102\,8 & 1.051\,4 & 1.019\,0\\ 1.495\,2 & 1.038\,3 & 1.080\,9 & 1.032\,5 & 1.015\,9\\ 1.436\,5 & 1.019\,0 & 1.070\,3 & 1.018\,6 & 1.012\,8\\ 1.391\,9 & 1.002\,6 & 1.063\,0 & 1.005\,4 & 1.009\,8\end{bmatrix} \tag{9}$$

3) 建立比重矩阵：

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}0.103\,6 & 0.139\,4 & 0.135\,2 & 0.138\,7 & 0.141\,2\\ 0.138\,4 & 0.142\,3 & 0.138\,6 & 0.145\,2 & 0.142\,9\\ 0.152\,6 & 0.145\,5 & 0.142\,5 & 0.146\,2 & 0.143\,1\\ 0.157\,6 & 0.146\,4 & 0.149\,1 & 0.145\,9 & 0.143\,8\\ 0.154\,9 & 0.144\,7 & 0.146\,2 & 0.143\,2 & 0.143\,4\\ 0.148\,8 & 0.142\,0 & 0.144\,7 & 0.141\,3 & 0.143\,0\\ 0.144\,2 & 0.139\,7 & 0.143\,7 & 0.139\,5 & 0.142\,6\end{bmatrix} \tag{10}$$

4) 信息熵计算：

$$\boldsymbol{E}=[0.996\,03\quad 0.999\,92\quad 0.999\,76\quad 0.999\,90\quad 0.999\,99]^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

5) 权重系数分配：

$$\boldsymbol{Q}=[0.902\,43\quad 0.018\,77\quad 0.053\,77\quad 0.023\,26\quad 0.001\,77]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

6) 得到综合损伤度：

$$\mathbf{CD}=[1.000\,0\quad 1.305\,6\quad 1.431\,5\quad 1.398\,5\quad 1.357\,2]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

同理，采用相同的计算方法可以得到其他各组的损伤度指标的权重系数，如图 7 所示。混凝土在荷载–离子–温度共同作用时，对损伤度影响最大的指标是破坏荷载(80%～90%)；其次是动弹性模量(5%～8%)、回弹值(1%～6%)、超声波波速(1%～4%)、质量变化(＜1%)。

这是因为侵蚀导致的基体损伤和裂缝扩展会显著降低破坏荷载，同时其受到动弹性模量、超声波波速、回弹值、质量变化的综合影响。其次是动弹性模量的影响，因为在混凝土材料侵蚀后导致的基体膨胀和裂缝变化会显著影响材料的刚度，而动弹性模量则是反映混凝土刚度的指标。回弹值和超声波波速均是间接评价混凝土承载能力的指标，回弹值主要反映混凝土表面的硬度，这与其内部结构变化可能不完全一致；超声波波速下降后材料性能不会立即发生变化，具有一定的滞后性，因此影响较

少。影响最小的是质量变化，因为随着侵蚀的进行，侵蚀性产物沉积会导致质量增长，但侵蚀后混凝土的表面剥落与内部物质的溶出会导致质量降低，这两种因素可能相互抵消，并且产物导致的质量变化相对于混凝土试块整体的质量是较小的，因此质量对混凝土损伤的影响程度是最低的。

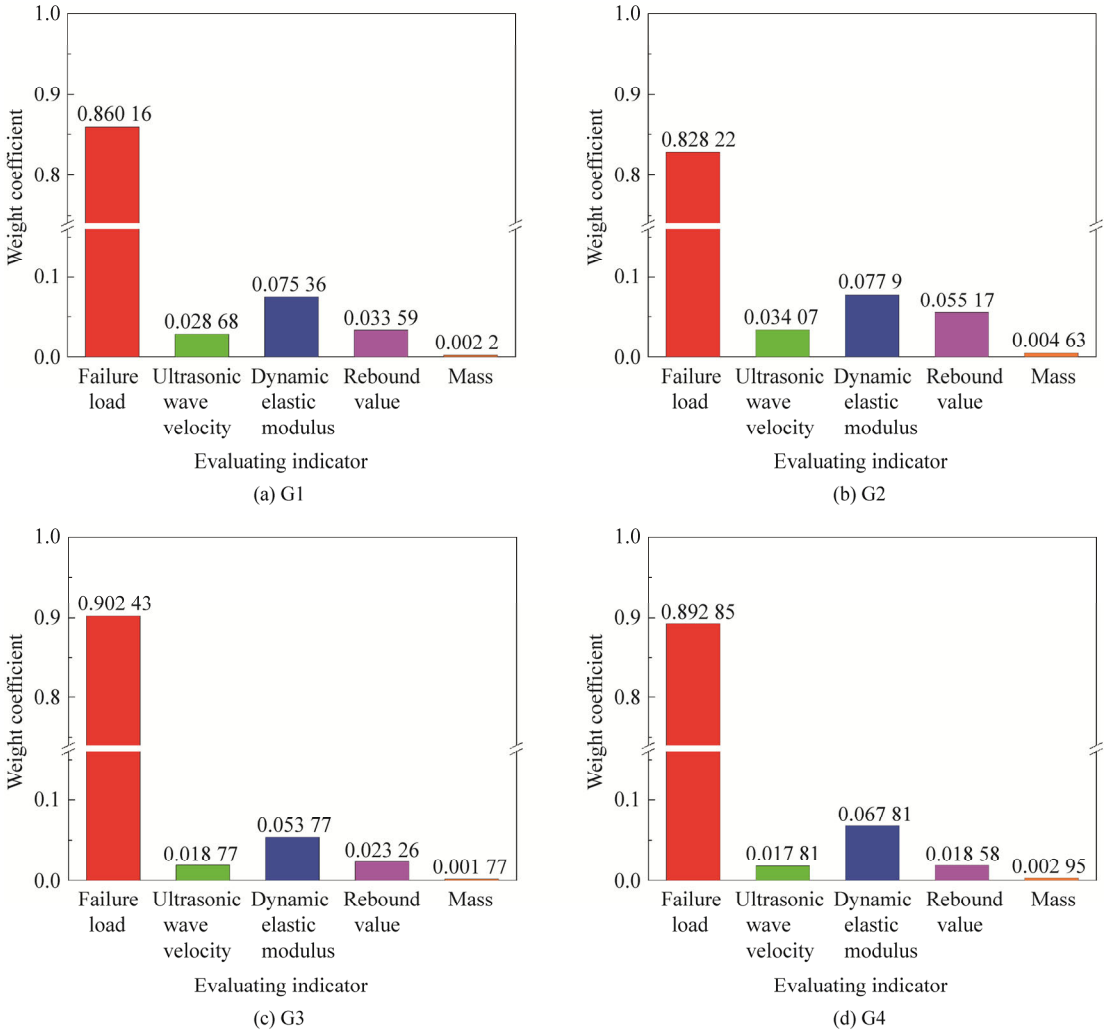


图 7　各组的综合损伤度指标权重

Fig. 7　Comprehensive damage degree index weight of each group

同理，其他各组的损伤度计算结果如表 4 所示。在荷载–离子–温度共同作用下，混凝土的损伤度呈现“早期均增长，但适度升温后早期性能更优，同时升温后劣化提前”的规律。各组的综合损伤度的变化趋势与超声波波速、动弹性模量等指标的趋势是相似的，其中与破坏荷载的规律是最接近的。这是因为混凝土在侵蚀环境下的性能退化的本质是化学–力学共同作用的结果，破坏荷载、动弹性模量、超声波波速、回弹值、质量等指标变化的原因均是由混凝土内部孔隙率、裂纹数量、界面粘结性的变化导致的，如图 8 所示。在侵蚀初期，由氯盐侵蚀产生的 Friedel 盐和由硫酸盐侵蚀产生的钙矾石填充在混凝土内部，孔隙更加密实，导致破坏荷载、动弹性模量、超声波波速、回弹值、质量等指标同步增长；在侵蚀后期，侵蚀产物膨胀导致裂纹产生，降低承载能力，因此损伤度指标同步下降。

表 4　各组的损伤度

Table 4　Damage degree of each group

Age/d	G1	G2	G3	G4
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
30	1.3550	1.4048	1.3056	1.3622
60	1.4310	1.5273	1.4315	1.4868
90	1.4918	1.5654	1.4777	1.5792
120	1.5299	1.5756	1.4527	1.5470
150	1.5361	1.5262	1.3985	1.4770
180	1.5020	1.4851	1.3572	1.4086

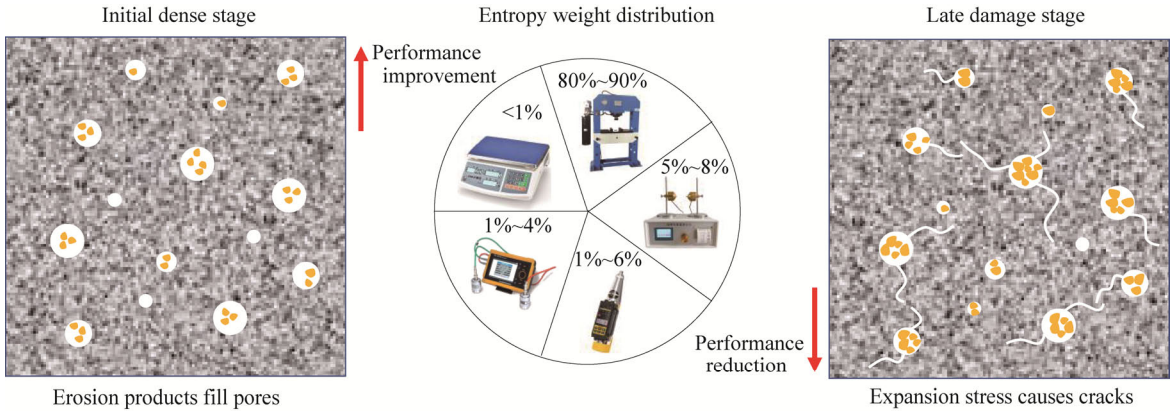


图 8 混凝土性能劣化机理

Fig. 8 Deterioration mechanism of concrete durability

2.3 基于 GM(1,1)的混凝土损伤度预测

2.3.1 GM(1,1)模型预测的原理 灰色系统理论因其在“小样本、贫信息”条件下的建模优势，被广泛应用于工程、环境、经济等领域的预测问题[37]。GM(1,1)模型作为灰色系统理论中的重要方法，通过累加生成将原始数据序列转化为具有函数规律的新序列，进而构建微分方程进行预测[38]。然而，传统GM(1,1)模型在复杂非线性系统中的预测精度常受限于其数学假设与建模方法。为此，有学者提出了多种改进的 GM(1,1)模型[35]，其中扩展灰色模型(EGM)、最优差分灰色模型(ODGM)、指数离散灰色模型(EDGM)和离散模型(DGM)这 4 类模型形式因其数学特性的差异，成为当前研究的热点。

混凝土在荷载–离子–温度共同作用时性能退化呈非线性的时序特征。传统的统计模型难以捕捉此类小样本数据的演化规律，而 GM(1,1)系列模型通过生成算子的动态调整，可有效挖掘隐含趋势。然而，不同模型形式对数据特征的适应性存在一定差异，需系统分析其数学本质与预测精度。因此，本工作基于灰色系统理论，聚焦 EGM、ODGM、EDGM、DGM 4 类 GM(1,1)模型，为荷载–离子–温度共同作用下混凝土损伤度预测提供理论依据，其计算步骤如下：

1) 数据累加生成，首先取 2.2 节中各组混凝土的综合损伤度 CD 作为初始序列 $\boldsymbol{U}^{(0)}$。

$$\boldsymbol{U}^{(0)}=\left[u_{(1)}^{(0)},u_{(2)}^{(0)},u_{(3)}^{(0)},\cdots,u_{(n)}^{(0)}\right] \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{U}^{(0)}$为初始序列，其元素 $u_{(i)}^{(0)}(i=1,2,\cdots,n)$为基于 CD 的实测值按时间顺序排列而成。然后对初始序列进行一阶累加得到累加生成序列 $\boldsymbol{U}^{(1)}$。

$$\boldsymbol{U}^{(1)}=\left[u_{(1)}^{(1)},u_{(2)}^{(1)},u_{(3)}^{(1)},\cdots,u_{(n)}^{(1)}\right] \tag{15}$$

累加的目的是弱化随机噪声，凸显数据的指数规律，其计算公式如式(16)所示。

$$u_{(k)}^{(1)}=\sum_{i=1}^{k}u_{(i)}^{(0)}(k=1,2,\cdots,n) \tag{16}$$

式中：k 为序列的位置索引，代表数据点在序列中的顺序位置。

此外，基于累加生成序列 $\boldsymbol{U}^{(1)}$计算紧邻值生成序列 $\boldsymbol{H}^{(1)}$，计算公式如式(17)所示。

$$\boldsymbol{H}_{(k)}^{(1)}=\frac{\left(u_{(k)}^{(1)}+u_{(k-1)}^{(1)}\right)}{2}(k=2,3,\cdots,n) \tag{17}$$

2) 构建微分方程。

$$\frac{\mathrm{d}u^{(1)}}{\mathrm{d}t}+cu^{(1)}=d \tag{18}$$

式中：t 是时间变量，代表混凝土龄期；c 是发展系数，反映序列变化速率；d 为灰色作用量，表征外部环境影响。

3) 参数求解，基于最小二乘法估计参数 $\hat{\alpha}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}$，$\boldsymbol{B}$ 为背景值矩阵，$\boldsymbol{Y}$ 为数据向量，对于 EGM、ODGM、EDGM 和 DGM 这 4 个不同的模型，参数的计算如表 5 所示。

4) 预测值还原，解得各个模型的参数后，代入时间响应式中，并通过累减生成即可得到原始序列的预测值。

$$\hat{U}_{(k)}^{(1)}=\left(u_{(1)}^{(0)}-\frac{d}{c}\right)f(c,k)+\frac{d}{c}(k=0,1,2,\cdots,n) \tag{19}$$

$$\hat{u}_{(k+1)}^{(0)}=\hat{u}_{(k+1)}^{(1)}-\hat{u}_{(k)}^{(1)}(k=1,2,\cdots,n) \tag{20}$$

2.3.2 混凝土损伤度预测 基于 2.2.2 节的分析结果可知，混凝土在荷载–离子–温度共同作用时在 90 d 之前对混凝土耐久性起到增强作用，后期逐渐衰减。因此，将表 4 中的 CD 值按照 2.3.1 节中的方法进行预测，为了提高预测精度，将 90 d 前和 90 d 后的数据分段进行预测，综合叠加后得到预测值，

如表 6 所示。由表 6 可知，4 种模型的预测值均较为接近，因此需要通过误差分析得到最优的模型。

表 5　不同预测模型的参数计算

Table 5　Parameter calculation of different prediction models

Predictive model	Parameters of the model			
	$\hat{\alpha}=[c,d]^{\mathrm{T}},\hat{\beta}=[\beta_1,\beta_2]^{\mathrm{T}}$	$\boldsymbol{B}$	$\boldsymbol{Y}$	$f(c,k)$
EGM	$\hat{\alpha}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}$	$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-h_{(2)}^{(1)} & -h_{(3)}^{(1)} & \cdots & -h_{(n)}^{(1)}\\ 1 & 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$	$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}u_{(2)}^{(0)} & u_{(3)}^{(0)} & \cdots & u_{(n)}^{(0)}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$	e^{-ck}
ODGM	$\hat{\alpha}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}$	$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-u_{(2)}^{(1)} & -u_{(3)}^{(1)} & \cdots & -u_{(n)}^{(1)}\\ 1 & 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$	$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}u_{(2)}^{(0)} & u_{(3)}^{(0)} & \cdots & u_{(n)}^{(0)}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$	$(1+c)^{-k}$
EDGM	$\hat{\alpha}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}$	$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-h_{(2)}^{(1)} & -h_{(3)}^{(1)} & \cdots & -h_{(n)}^{(1)}\\ 1 & 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$	$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}u_{(2)}^{(0)} & u_{(3)}^{(0)} & \cdots & u_{(n)}^{(0)}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$	$\left(\frac{1-0.5c}{1+0.5c}\right)^k$
DGM	$\hat{\beta}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}$	$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}u_{(2)}^{(1)} & u_{(3)}^{(1)} & \cdots & u_{(n-1)}^{(1)}\\ 1 & 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$	$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}u_{(2)}^{(1)} & u_{(3)}^{(1)} & \cdots & u_{(n)}^{(1)}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$	$\left(\frac{1-0.5c}{1+0.5c}\right)^k$

Note: EGM, EDGM, ODGM and DGM represent even grey model, even discrete grey model, optimized discrete grey model and discrete grey model, respectively; $\hat{\alpha}$ is the parameter vector of continuous grey model (EGM, ODGM, EDGM); $\hat{\beta}$ is the parameter vector of discrete grey model (DGM); c and d are the development coefficient and the constant term respectively; β_1 and β_2 are the coefficients of the discrete state term and the driving term, respectively; $\boldsymbol{B}$ is the background value matrix, $\boldsymbol{Y}$ is the data vector. $f(c,k)$ is a time response function; k is a time index; $u_{(k)}^{(0)}$ and $u_{(k)}^{(1)}$ denote the original sequence and the accumulated generating sequence, respectively; $h_{(k)}^{(1)}$ is the background value; e is a natural constant.

表 6　各模型的预测值和试验值

Table 6　Predicted values and test values of each model

Sample No.	Model	Age/d						
		0	30	60	90	120	150	180
G1	Test value	1.000 00	1.355 00	1.430 98	1.491 84	1.529 89	1.536 11	1.502 04
	EGM	1.000 00	1.357 95	1.424 56	1.494 44	1.536 55	1.522 63	1.508 83
	EDGM	1.000 00	1.358 22	1.424 85	1.494 76	1.536 56	1.522 64	1.508 84
	ODGM	1.000 00	1.358 21	1.424 85	1.494 77	1.536 52	1.522 64	1.508 88
	DGM	1.000 00	1.358 23	1.424 86	1.494 75	1.536 61	1.522 64	1.508 79
G2	Test value	1.000 00	1.404 77	1.527 34	1.565 39	1.575 61	1.526 20	1.485 10
	EGM	1.000 00	1.420 03	1.497 41	1.579 00	1.574 37	1.528 42	1.483 80
	EDGM	1.000 00	1.420 37	1.497 79	1.579 42	1.574 48	1.528 52	1.483 90
	ODGM	1.000 00	1.420 16	1.497 77	1.579 63	1.574 48	1.528 52	1.483 90
	DGM	1.000 00	1.420 60	1.497 80	1.579 20	1.574 49	1.528 52	1.483 90
G3	Test value	1.000 00	1.305 63	1.431 49	1.477 75	1.452 75	1.398 50	1.357 22
	EGM	1.000 00	1.320 24	1.402 80	1.490 53	1.450 78	1.402 15	1.355 14
	EDGM	1.000 00	1.320 65	1.403 27	1.491 06	1.450 92	1.402 28	1.355 26
	ODGM	1.000 00	1.320 44	1.403 26	1.491 26	1.450 92	1.402 28	1.355 27
	DGM	1.000 00	1.320 88	1.403 29	1.490 85	1.450 93	1.402 28	1.355 26
G4	Test value	1.000 00	1.362 16	1.486 80	1.579 16	1.546 96	1.477 05	1.408 59
	EGM	1.000 00	1.368 74	1.472 70	1.584 56	1.546 97	1.476 20	1.408 67
	EDGM	1.000 00	1.369 37	1.473 43	1.585 40	1.547 24	1.476 45	1.408 90
	ODGM	1.000 00	1.369 33	1.473 43	1.585 44	1.547 24	1.476 45	1.408 90
	DGM	1.000 00	1.369 42	1.473 44	1.585 35	1.547 24	1.476 45	1.408 90

2.3.3　模型精度评估　在模型预测的过程中，选择合适的误差指标对于评估不同模型的优劣至关重要。不同的误差指标反映了模型不同的性能，如平均绝对误差(MAE)强调误差的平均水平，均方根误差(RMSE)对较大误差更加敏感，而平均绝对百分比误差(MAPE)更关注相对误差，决定系数(R^2)是衡量模型拟合程度的指标[35]。因此，本工作通过 MAE、MAPE、RMSE、R^2 这 4 个指标评价 EGM、ODGM、EDGM 和 DGM 模型的预测精度。各个误差的计算公式如式(21)～式(24)所示。

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|u_{(k)}^{(0)}-\hat{u}_{(k)}^{(0)}\right| \tag{21}$$

$$\mathrm{MAPE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{u_{(k)}^{(0)}-\hat{u}_{(k)}^{(0)}}{u_{(k)}^{(0)}}\right| \tag{22}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(u_{(k)}^{(0)}-\hat{u}_{(k)}^{(0)}\right)^2} \tag{23}$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(u_{(k)}^{(0)}-\hat{u}_{(k)}^{(0)}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(u_{(k)}^{(0)}-\bar{u}\right)^2} \tag{24}$$

式中：$\hat{u}_{(k)}^{(0)}$ 是模型的预测值；$\bar{u}$ 是原始数据的平均值。

各个模型的误差结果如表 7 所示，4 种模型的 R^2 均大于 0.97，同时 MAE、MAPE、RMSE 均小于 0.02，说明 4 种模型的预测精度均较高。为了定量分析出预测效果最好的模型，通过综合得分排序法确定最优模型[39]，如式(25)所示。

$$\mathrm{Socre}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\mathrm{Rank}_i \tag{25}$$

式中：Socre 是各模型的综合得分，其值越小说明排序越前，代表模型预测精度越高；m 是指模型评价指标的个数，共包含 MAE、MAPE、RMSE、R^2 4 个指标，因此 m=4；Rank_i 是指模型在第 i 个评价指标下的排序。

表 7 模型的误差分析

Table 7 Error analysis of the model

Model	MAE ($\times10^{-3}$)	MAPE ($\times10^{-4}$)	RMSE ($\times10^{-3}$)	R^2 ($\times10^{-2}$)
EGM	8.053 (1)	55.032 (1)	11.446 (4)	97.617 (3)
EDGM	8.132 (3)	55.587 (3)	11.440 (1)	97.619 (2)
ODGM	8.133 (4)	55.584 (2)	11.440 (1)	97.622 (1)
DGM	8.130 (2)	55.593 (4)	11.441 (3)	97.616 (4)

Note: The numbers in the brackets in the table are the ranking of the accuracy of the model under the corresponding errors; For example, for the MAE error, the accuracy of the four models from high to low is: EGM, DGM, EDGM, ODGM, so the ranking corresponds to 1, 2, 3, 4, respectively.

总得分越小时说明排序越前，此时模型精度越高。模型综合得分如图 9 所示，预测精度从高至低分别是：ODGM＞EGM=EDGM＞DGM。因此，在后续的研究中建议使用 ODGM 模型对荷载–离子–温度共同作用下的混凝土损伤度进行寿命预测。ODGM 模型的预测效果和相对误差如图 10 所示。

2.3.4 混凝土服役寿命评价 由于预测精度最高的是 ODGM 模型，因此，使用 ODGM 模型预测混凝土在荷载–离子–温度共同作用时的损伤劣化规律是较合适的。基于 ODGM 模型对 4 种工况 180 d 以后的损伤度进行预测，预测结果如图 11 所示。

研究表明，众多学者基于损伤度对混凝土的服役寿命进行评价，如 Zheng 等[35]通过 GM(1,1)模型

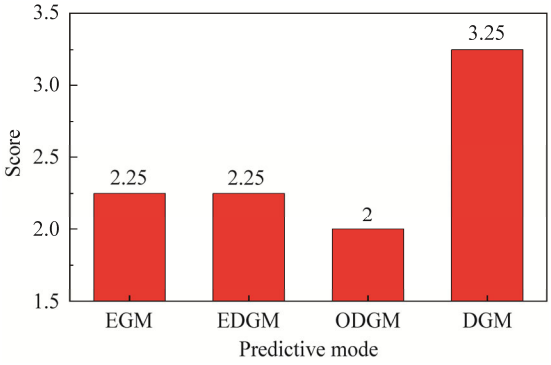
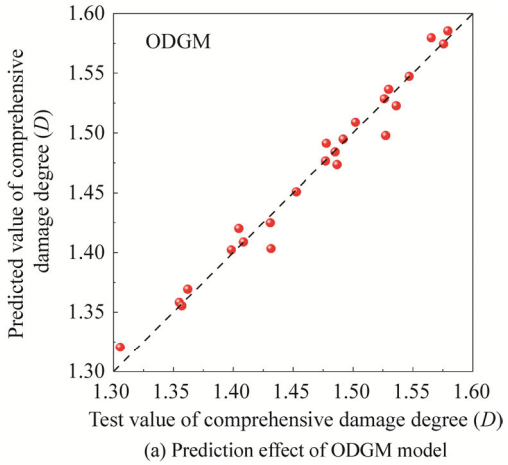
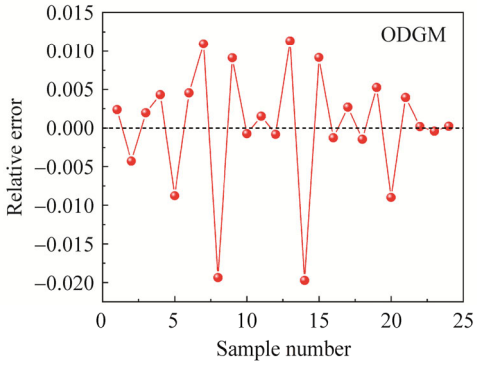


图 9 模型得分综合评价

Fig. 9 Comprehensive evaluation of model score



(a) Prediction effect of ODGM model



(b) Pelative error of ODGM model

Note: *D* represents the damage degree based on ODGM model.

图 10 ODGM 模型的预测效果和相对误差

Fig. 10 Prediction effect and relative error of ODGM model

基于损伤度预测了混凝土在冻融–硫酸盐耦合作用下的服役寿命，其根据试验条件确定的服役寿命临界值为 0.75；Zhang 等[40]通过 GM–GA–BP 模型基于损伤度值预测了混凝土在冻融–硫酸盐耦合作用下的服役寿命；Du 等[41]通过 ARIMA 模型基于损伤度预测了混凝土在硫酸盐干湿循环作用的服役寿命。因此，本工作基于上述学者的研究，当混凝土的腐蚀劣化程度达到 75%时，可以认为混凝土发生破坏。因此，将损伤度降低至 0.75 时对应的龄期定

义为混凝土在该工况下的最大服役寿命。由图 11 可见，在荷载–离子–温度共同作用下，G1 的服役寿命最长，可达 82 个月，其次是 G2 和 G3，分别是 29 个月和 24 个月，服役寿命最短的是 G4，仅有 20 个月。从 20 ℃升高至 50 ℃后，G2 的寿命比 G1 降低了 64.63%，G4 的寿命比 G3 降低了 16.67%。说明混凝土材料在 0.2F_{max}、3%NaCl、20 ℃的条件下服役寿命是较长的，但是在氯盐环境下温度提高后会显著降低服役寿命。而混凝土材料在 0.2F_{max}、5%Na_2SO_4、50 ℃的条件下的腐蚀劣化是最快的，虽然温度对于早期性能有一定的提升作用，但在后期“温度–化学反应–荷载”的协同作用下会加速混凝土的破坏。

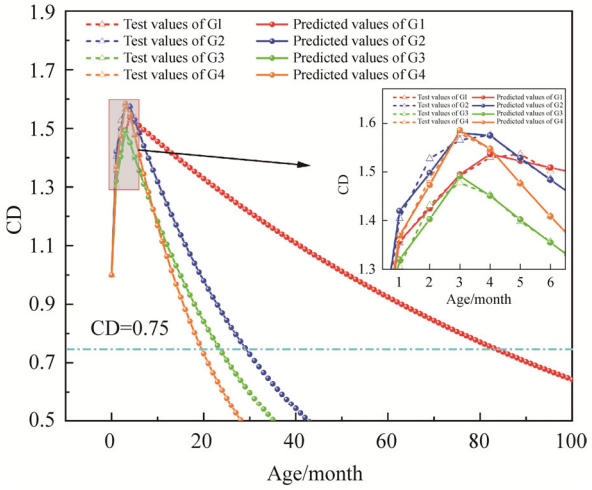


图 11　服役寿命评价

Fig. 11　Service life evaluation

3　结论

本工作通过长期试验探究了荷载–离子–温度共同作用下地下混凝土的破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量的演变规律，基于熵权法构建了耐久性综合评价体系，结合 4 种 GM(1,1)模型预测了混凝土的服役寿命。主要结论如下：

1) 混凝土在荷载–离子–温度共同作用时，破坏荷载、超声波波速、动弹性模量、回弹值、质量均呈先增长后降低的趋势，但是各种环境作用下损伤的转折点不一致。此外，氯盐侵蚀环境下其水化产物主要填充微孔(≤0.1 mm^3)和小孔(0.1～1.0 mm^3)，在早期 50 ℃的环境下的混凝土比 20 ℃下孔隙更加密实。

2) 基于熵权法定义了混凝土在荷载–离子–温度共同作用下的综合损伤度，发现综合损伤度的规律与试验结果吻合较好。通过熵值法量化了各指标对损伤的程度：破坏荷载(80%～90%)、动弹性模量(5%～8%)、回弹值(1%～6%)、超声波波速(1%～4%)、质量变化(＜1%)。

3) 基于 GM(1,1)模型预测了荷载–离子–温度共同作用下混凝土的服役寿命，4 种模型的精度存在一定的差异，预测精度从高至低为 ODMG>EGM=EDGM>DGM。因此，建议采用 ODGM 模型预测荷载–离子–温度共同作用下混凝土的服役寿命，从而获得更精确的结果。

4) 在 0.2F_{max}、3%NaCl、20 ℃，0.2F_{max}、3%NaCl、50 ℃，0.2F_{max}、5%Na_2SO_4、20 ℃，0.2F_{max}、5%Na_2SO_4、50 ℃ 4 种环境下，混凝土的服役寿命分别为 82 个月、29 个月、24 个月、20 个月。从 20 ℃升高至 50 ℃后，G2 的寿命比 G1 降低了 64.63%，G4 的寿命比 G3 降低了 16.67%。

参考文献：

[1] YOO J H, LEE H S, ISMAIL M A. An analytical study on the water penetration and diffusion into concrete under water pressure[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(1): 99–108.

[2] HUANG J L, CHEN R X, ZHOU Y, et al. Molecular design and experiment of ion transport inhibitors towards concrete sustainability[J]. Cem Concr Compos, 2022, 133: 104710.

[3] YANG H T, LIU J H, WU L P, et al. Influence of reswollen superabsorbent polymers on the corrosion behavior of steel fibers in cracked mortars exposed to NaCl solutions[J]. Constr Build Mater, 2021, 299: 124283.

[4] CHANG S M, OH S K, SEO D S, et al. Characteristics of humidity-temperature changing in the below-grade concrete structure by applying waterproofing materials on the exterior wall[J]. Adv Mater Sci Eng, 2015, 2015: 959502.

[5] TIAN X, ZHU N K. Durability prediction method of concrete soil based on deep belief network[J]. Adv Civ Eng, 2022, 2022: 4338306.

[6] GALAN I, BALDERMANN A, KUSTERLE W, et al. Durability of shotcrete for underground support–Review and update[J]. Constr Build Mater, 2019, 202: 465–493.

[7] TAN B B, QU L, XIA Y, et al. Experimental study on improving the impermeability of concrete under high-pressure water environments using a polymer coating[J]. Appl Sci, 2024, 14(18): 8507.

[8] WANG Y K, FAN X, WU R, et al. Experimental study on long-term impermeability of recycled aggregate concrete mixed with crystalline admixture and waste glass powder[J]. J Clean Prod, 2024, 458: 142551.

[9] HAN J D, LIU W Q, WANG S G, et al. Carbonation reaction and microstructural changes of metro-tunnel segment concrete coupled with static and fatigue load[J]. J Mater Civ Eng, 2017, 29(2): 04016216.

[10] SHI H W, WANG H Y, XUE S F, et al. Durability evaluation of iron tailings concrete under freeze-thaw cycles and sulfate erosion based on entropy weighting method[J]. Constr Build Mater, 2024, 443: 137747.

[11] 覃源, 吕杲, 关科, 等. 基于熵权法的混凝土耐久性评价及寿命预测[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1344–1354.
QIN Yuan, LV Gao, GUAN Ke, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(5):

1344–1354.
[12] 刘国华, 李志伟, 江峰, 等. 基于AHP-GM理论的预应力混凝土桥梁耐久性预测[J]. 山东交通科技, 2022(4): 110–112.
LIU Guohua, LI Zhiwei, JIANG Feng, et al. Shandong Jiaotong Keji, 2022(4): 110–112.
[13] EL-MIR A, FAYAD E, ASSAAD J J, et al. Multi-response optimization of semi-lightweight concrete incorporating expanded polystyrene beads[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8757.
[14] GONG L, LIANG Y T, YU X B, et al. Damage prediction of hydraulic concrete in severe cold region based on FOTP-GM (1, 1) model[J]. KSCE J Civ Eng, 2023, 27(7): 2993–3005.
[15] TAO J C, WANG X Z, YAO B, et al. Comparison of rheology and durability of geopolymer and Portland cement concrete at the same strength levels[J]. Constr Build Mater, 2025, 461: 139958.
[16] JENA B, ZADE N P, SARKAR P, et al. Sustainable integration of coal mine overburden as a substitute for natural sand in concrete to enhance its mechanical and durability properties[J]. Constr Build Mater, 2024, 411: 134488.
[17] 聂彦锋, 钱春香. 基于RST的混凝土硫酸盐侵蚀评价指标分析及损伤程度预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 594–598.
NIE Yanfeng, QIAN Chunxiang. J Southeast Univ Nat Sci Ed, 2013, 43(3): 594–598.
[18] 李炳华, 崔学慧, 朱亚雷, 等. 北京市朝阳区地下水化学特征及其变化规律[J]. 水资源保护, 2012, 28(5): 7–12.
LI Binghua, CUI Xuehui, ZHU Yalei, et al. Water Resour Prot, 2012, 28(5): 7–12.
[19] 李亚楠, 胡春春, 康莹, 等. 北京市东北部地区地下水水质状况及变化特征[J]. 广西水利水电, 2023(6): 38–44.
LI Yanan, HU Chunchun, KANG Ying, et al. Guangxi Water Resour Hydropower Eng, 2023(6): 38–44.
[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50081—2009 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50082—2024 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
[22] 中国建筑科学研究院. CECS02—2005 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51355—2019 既有混凝土结构耐久性评定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
[24] ZHANG W H, PI Y L, KONG W P, et al. Influence of damage degree on the degradation of concrete under freezing-thawing cycles[J]. Constr Build Mater, 2020, 260: 119903.
[25] 楚留声, 张鹏, 赫约西, 等. 盐冻耦合环境下再生砖粉ECC的耐久性研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(3): 1012–1020.
CHU Liusheng, ZHANG Peng, HE Yuexi, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2024, 43(3): 1012–1020.
[26] EVJU C, HANSEN S. Expansive properties of ettringite in a mixture of calcium aluminate cement, Portland cement and β-calcium sulfate hemihydrate[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(2): 257–261.
[27] TIAN B, COHEN M D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(1): 117–123.
[28] SUN F, PANG X Y, WEI J Q, et al. Stability of calcium silicate hydrates produced by alite hydration at high and ultrahigh temperatures[J]. Cem Concr Res, 2024, 179: 107469.
[29] YING H H, TIAN Z, LU Z, et al. Evaluation of the effect of RHA-FA content on the thermal response and pore structure of PCM aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2024, 440: 137483.
[30] SHI C J, HU X, WANG X G, et al. Effects of chloride ion binding on microstructure of cement pastes[J]. J Mater Civ Eng, 2017, 29: 04016183.
[31] LUO D M, ZHOU M, LI F, et al. Chloride ion transport in coral aggregate concrete subjected to coupled erosion by sulfate and chloride salts in drying-wetting cycles[J]. J Mater Res Technol, 2024, 30: 3251–3267.
[32] ZHANG M H, MA D N, CUI J Y, et al. Scouring erosion resistance of nano-marine concrete under the coupled effect of chloride attack and dry - wet cycles[J]. Constr Build Mater, 2024, 411: 134227.
[33] CHEN J J, LIU Q F, JIN W L, et al. Experiment and simulation on the coupled effects of calcium leaching and chloride transport in concrete under hydraulic pressure[J]. Cem Concr Compos, 2025, 155: 105834.
[34] KOHOUT J. Modified Arrhenius equation in materials science, chemistry and biology[J]. Molecules, 2021, 26(23): 7162.
[35] ZHENG C L, WAN S Y, ZONG Z H. Durability evaluation and lifetime prediction of recycled coarse aggregate self-compacting concrete after freeze-thaw and sulfate erosion coupling[J]. Mater Today Commun, 2024, 39: 109115.
[36] 沈世伟, 许君臣, 代树林, 等. 基于熵值赋权法的节理岩体隧道爆破质量可拓学评价[J]. 土木工程学报, 2013, 46(12): 118–126.
SHEN Shiwei, XU Junchen, DAI Shulin, et al. China Civ Eng J, 2013, 46(12): 118–126.
[37] 杨雪晴, 邓承继, 祝洪喜, 等. 基于灰色系统理论的高铝砖孔结构与强度的相关性[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(6): 887–892.
YANG Xueqing, DENG Chengji, ZHU Hongxi, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(6): 887–892.
[38] MAO S H, GAO M Y, WEN J H, et al. Generalized admissible region of class ratio for fractional accumulated GM(1, 1) model[J]. J Grey Syst, 2014, 26(3): 55–68.
[39] YANG B, LI Y, SHEN J L, et al. Analysis and prediction of compressive strength of calcium aluminate cement paste based on machine learning[J]. Arch Civ Mech Eng, 2024, 25(1): 19.
[40] ZHANG R L, ZHANG X P, XUE Y J, et al. Research on the durability degradation mechanism of early-age concrete and life prediction model under freeze-thaw-salt erosion coupling effect[J]. Structures, 2025, 71: 107986.
[41] DU T, QU P Y, CHEN Q, et al. Damage prediction of recycled aggregate concrete under a sulfate attack using the seasonal ARIMA model[J]. Case Stud Constr Mater, 2025, 22: e04583.

Prediction of Damage Degree of Underground Concrete Under Load–Ion–Temperature Interaction

YANG Bin[1], *LI Yue*[1], *LIN Hui*[1], *LI Wei*[2], *QIAO Tianlong*[2]
(1. Beijing University of Technology, National Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience, Beijing 100124, China;
2. Beijing Construction New Building Materials Co., Ltd., Beijing 100166, China)

Extended Abstract

Introduction　The underground concrete structure is in a complex and changeable service environment for a long time, and it is often affected by the combined effects of load, corrosive ions and temperature changes. There is a significant nonlinear coupling relationship among these three factors, which makes the concrete show a completely different damage evolution law from the single effect during the service process. Especially in the underground environment, chloride ions and sulfate ions will accelerate pore dissolution and micro-crack propagation, and temperature changes will vary the hydration rate and ion migration ability. Under external loads, the generation and propagation of microcracks further promote ion penetration and chemical erosion, resulting in a rapid degradation of material properties. Conventional durability tests are often difficult to quantitatively describe the damage law under the combined action of multiple factors, and it is difficult to accurately predict the service life of underground concrete. It is thus of great significance to reveal the deterioration mechanism and service life evaluation of underground concrete *via* constructing a method that can comprehensively reflect the damage degree of concrete under multi-factor coupling and realize a life prediction.

Methods　In the experiment, ordinary Portland cement was used to prepare concrete specimens, and the mix ratio of each group was kept consistent. The test was carried out under the accelerated conditions of simulated underground environment, and the service environment of different load, ion and temperature combinations was set up to investigate the damage evolution law under the coupling of three factors. During the test, the five indexes of concrete failure load, ultrasonic wave velocity, dynamic elastic modulus, rebound value and quality change were tested regularly. These indexes could reflect the mechanical properties, internal compactness, surface hardness and mass loss of concrete, respectively, as the important indexes for comprehensive evaluation of damage degree. In addition, the evaluation system of concrete damage degree was also established based on the entropy weight method, and the weight was automatically assigned by the dispersion of index changes, so that the damage degree evaluation could be more objective and comparable.

For the life prediction, four models were selected for comparison, including Even Grey Model (EGM), Even Discrete Grey Model (EDGM), Optimized Discrete Grey Model (ODGM) and Discrete Grey Model (DGM), based on the grey system theory. The grey model has a good prediction performance under the condition of small sample and weak information, and is suitable for durability research with limited test period and small data volume. The accuracy of the model could be improved by cumulative generation and parameter analysis, and the prediction performance of each model was evaluated by various error indexes, and the optimal model was selected for the life prediction.

Results and discussion　The damage degree of concrete under four different conditions firstly increases and then decreases. The failure load, ultrasonic wave velocity, dynamic elastic modulus, rebound value and mass change trend under the same conditions are similar. However, the turning points of damage attenuation under the four conditions are not consistent due to the difference of hydration reaction and internal pore structure. At 50 ℃, the faster early reaction rate can result in the faster pore filling, thus improving the compactness.

Based on the entropy weight method, the weight coefficient of each index to the damage degree of concrete is obtained. The influencing degree from large to small is failure load, dynamic elastic modulus, rebound value, ultrasonic wave velocity, and quality change. Also, the accuracy ranking of the four prediction models is obtained based on the comprehensive score ranking method. The prediction accuracy from high to low is ODGM > EGM = EDGM > DGM.

Conclusions　Under the combined action of load-ion-temperature, the failure load, ultrasonic wave velocity, dynamic elastic modulus, rebound value and mass of concrete all firstly increased and then decreased, but the turning points of damage under various environmental effects were inconsistent. In addition, the hydration products under chloride erosion environment were mainly filled with micropores (*i.e.*, ≤ 0.1 mm^3) and small pores (*i.e.*, 0.1–1.0 mm^3), and the pores of concrete at 50 ℃ in the early stage were more dense than those at 20 ℃. The damage degree of each index was quantified by the entropy method, *i.e.*, failure load (*i.e.*, 80%–90%), dynamic elastic modulus (*i.e.*, 5%–8%), rebound value (*i.e.*, 1%–6%), ultrasonic wave velocity (*i.e.*, 1%–4%), and mass change (*i.e.*, < 1%). The ODGM model had the highest accuracy in predicting the service life of concrete under the combined action of load-ion-temperature. The service life of concrete was 82 months, 29 months, 24 months and 20 months under the four environments (*i.e.*, 0.2Fmax, 3%NaCl, 20 ℃ and 0.2Fmax, 3%NaCl, 50 ℃ and 0.2Fmax, 5%Na_2SO_4, 20 ℃ and 0.2Fmax, 5%Na_2SO_4, 50 ℃), respectively.

Keywords　concrete; damage degree; multi-factor coupling; life prediction