

基于 Wiener 随机过程再生混凝土盐冻寿命预测

曹芙波¹,张嘉仪¹,张利凯²,李敦³,黄强⁴,赵波⁴,彭理渊⁵,田金亮¹,王晨霞^{1*}

(1.内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古包头 014010; 2.山东锦华建设集团有限公司,山东日照 276800; 3.中建一局集团第五建筑有限公司,北京 100020; 4.内蒙古煤矿设计研究院有限责任公司,内蒙古呼和浩特 010010; 5.内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司,内蒙古鄂尔多斯 010300)

摘要:为研究盐冻环境对再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)力学性能的影响,以强度等级、冻融循环次数和侵蚀盐种类为试验变量,结合宏观试验和微观试验,分析盐冻循环后 RAC 和普通混凝土(normal aggregate concrete, NAC)的宏观性能劣化机理。基于盐冻循环试验下 RAC 的相对动弹性模量,采用 Wiener 随机过程进行建模并分析可靠度的变化规律,预测 RAC 在盐冻环境下的使用寿命。结果表明:RAC 的抗盐冻性劣于 NAC,并且 RAC 的强度等级越高抗盐冻性能越好;3.7%质量分数的 Na₂SO₄ 溶液组在盐冻循环 60 次前抗盐冻性较好,相对动弹性模量损失率仅为 1.72%,90 次盐冻循环后 RAC 因损伤累积导致抗盐冻性迅速下降,相对动弹性模量损失率达 17.16%;微观分析发现,盐冻循环后,RAC 强度等级越低,盐冻后内部结构越松散,裂缝宽度越大。依据 Wiener 随机过程所建模型分析可知,RC50-C 模型可靠度持续时间最长,在华北地区抗冻耐久性寿命预估可达 53 a。

关键词:再生混凝土;盐冻循环;耐久性;Wiener 随机过程;寿命预测

中图分类号:TU375

文献标志码:A

引用格式:曹芙波,张嘉仪,张利凯,等.基于 Wiener 随机过程再生混凝土盐冻寿命预测[J].山东大学学报(工学版),2026,56(1):80-88.

CAO Fubo, ZHANG Jiayi, ZHANG Likai, et al. Life prediction of recycled aggregate concrete in salt freezing based on Wiener random process[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1):80-88.

Life prediction of recycled aggregate concrete in salt freezing based on Wiener random process

CAO Fubo¹, ZHANG Jiayi¹, ZHANG Likai², LI Dun³, HUANG Qiang⁴, ZHAO Bo⁴, PENG Liyuan⁵, TIAN Jinliang¹, WANG Chenxia^{1*}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Shandong Jinhua Construction Group Co., Ltd., Rizhao 276800, Shandong, China; 3. China Construction First Group Fifth Engineering Construction Co., Ltd., Beijing 100020, China; 4. Inner Mongolia Coal Mine Design & Research Institute Limited Liability Company, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 5. Xuejiawan Power Supply Branch Company, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Erdos 010300, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to study the effect of salt freezing environment on the mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC), the strength grade, the number of freeze-thaw cycles and the eroded salt type were used as test variables, and the macroscopic and microscopic tests were combined. The deterioration mechanism of RAC and normal aggregate concrete (NAC) after salt freezing cycle was analyzed. Based on the relative dynamic elastic modulus of RAC under salt freezing cycle test, the Wiener random process was used to model and analyze the change rule of reliability, and the service life of RAC in salt freezing environment was predicted. The results showed that the salt freezing resistance of RAC was worse than that of NAC, and the higher the strength grade of RAC, the better the salt freezing resistance. The loss rate of dynamic elastic modulus of 3.7% mass fraction Na₂SO₄ group was only 1.72% before 60 salt freezing cycles, and the loss rate of dynamic elastic modulus of RAC decreased rapidly after 90 salt freezing cycles due to the damage accumulation of salt freezing resistance, reaching 17.16%. Microscopic analysis found that after

收稿日期:2024-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52368024,51868061);内蒙古自然科学基金资助项目(2024MS05028, 2022LHMS05011)

第一作者简介:曹芙波(1976—),男,湖南衡阳人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为固废资源化及组合结构。E-mail:caofubo@139.com

*通信作者简介:王晨霞(1977—),女,内蒙古集宁人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为再生混凝土及其耐久性。

E-mail:wangchenxia77@139.com

the salt freezing cycle, the lower the RAC strength rating, the looser the internal structure was after salt freezing, and the larger the crack width. According to the model analysis of Wiener random process, the reliability duration of RC50-C model was the longest, and the estimated value of frost resistance durability life in North China could reach 53 years.

Keywords: recycled aggregate concrete; salt freezing cycle; durability; Wiener random process; life prediction

0 引言

现代化建设产生大量建筑和拆除废弃物,将建筑和拆除废弃物回收利用制备再生粗骨料 (recycled coarse aggregate, RCA) 是生产可持续建筑材料的一种可行方法,有利于节约并降低天然砂石的过度需求^[1-2]。对于我国内蒙古地区,大量盐碱地以及严寒气候使得服役于此环境下的构筑物受到盐侵蚀和冻融的双重破坏,导致混凝土的服役寿命大大缩减^[3]。因此,研究再生混凝土 (recycled aggregate concrete, RAC) 在盐冻作用下的力学性能具有重要意义。

已有国内外学者分别对冻融和盐离子侵蚀单独作用下 RAC 的力学性能进行了试验研究。试验结果表明,RAC 的抗冻融和耐盐侵蚀性能主要受以下宏观因素影响:骨料取代率^[4]、水灰比^[5]、RAC 类型^[6]、矿物掺合料^[7]以及骨料特性^[8]。从微观层面看,再生骨料因其表面存在的旧砂浆形成了被广泛认定为最薄弱的界面过渡区,界面结构的高孔隙率导致 RAC 的力学性能显著低于普通混凝土 (normal aggregate concrete, NAC)^[9]。文献[10]研究表明,在盐侵蚀和冻融的共同作用下,盐离子的存在提高了混凝土的吸水饱和度,导致混凝土遭受更严重的冻融损伤,在盐溶液中混凝土的抗冻性比在水溶液中更差。目前对盐冻循环作用下 NAC 的性能研究已经相对成熟,而对 RAC 的相关研究尚不够成熟。已有研究成果显示,盐冻循环会加剧混凝土试件表面的剥蚀现象,增加剥落量,内部损伤和强度损失逐渐加剧,通过扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察,盐冻循环后的混凝土结构变得疏松,孔隙和裂纹变得更加显著,整体密实度降低,宏观力学性能劣化^[11];并且盐冻循环过程中混凝土微观结构的演化可以通过 CT 技术进行量化,以相对 CT 值为损伤变量建立损伤模型,能较好地反映混凝土的冻融损伤程度,且 Weibull 函数能较好地描述损伤演化过程^[12]。

关于混凝土寿命预测方面,研究者通过 Wiener 模型对混凝土的耐久性进行定性分析,并取得显著效果。文献[13]通过 Wiener 随机过程建立盐渍土环境下混凝土服役寿命预测模型,定量表征混凝土损伤劣化规律;文献[14]通过宏观结合微观评价指

标,并利用 Wiener 随机过程进行建模,得到不同强度混凝土的预测寿命;文献[15]通过将抗压强度损失率、质量损失率、相对动弹性模量损失率作为退化参数,依据 Wiener 随机过程建立混凝土寿命预测模型,得出相对动弹性模量对混凝土损伤劣化最敏感的结论,所以采用相对动弹性模量为退化指标最为可靠。然而,将 Wiener 随机过程应用于盐冻作用下 RAC 寿命预测尚不多见。

本研究以混凝土强度等级、侵蚀盐类型以及冻融循环次数为变量对 RAC 和 NAC 的抗盐冻性能进行试验,同时结合 SEM 和 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 对盐冻循环作用下 RAC 内部结构形貌、物相进行分析,并进一步通过 Wiener 随机过程建立盐冻环境下 RAC 服役寿命预测模型,以期对内蒙古盐碱地区混凝土结构服役状态评价和寿命预测提供理论支撑。

1 试验

1.1 试验材料

本试验水泥采用蒙西牌 P·O42.5 水泥;外加剂为聚羧酸高效引气减水剂;细骨料选用细度模数为 2.78 的天然河砂;拌合用水采用城市自来水;NaCl、Na₂SO₄ 采用分析纯级化学试剂;RCA 和天然粗骨料 (natural coarse aggregate, NCA) 均采用 4.75~31.50 mm 的连续级配,粗骨料级配曲线如图 1 所示。粗骨料的性能指标如表 1 所示。

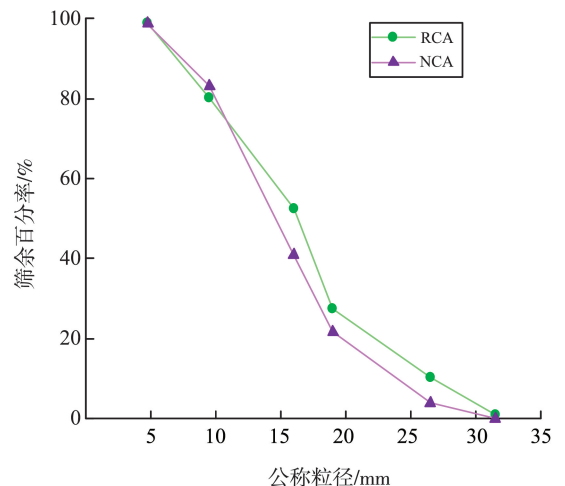


图 1 粗骨料级配曲线

Fig.1 Grade curve of coarse aggregate

表1 粗骨料性能指标
Table 1 Performance index of coarse aggregate

类别	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压碎指标/ %	针片状 含量/%	含泥率/%	吸水率/%	
						10 min	24 h
NCA	2 735	1 516	9.5	1.3	1.2	0.60	1.80
RCA	2 653	1 293	13.5	8.5	3.3	4.23	5.39

1.2 配合比及试件设计

混凝土强度等级为 C30、C40、C50,冻融介质为质量浓度 3.7% 的 NaCl、Na₂SO₄ 溶液,冻融循环 0、30、60、90 次。设计 5 组共 60 块 100 mm×100 mm×

100 mm 的立方体试件用于立方体抗压强度测试,设计 5 组共 15 块 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件用于质量损失率及相对动弹性模量测试。混凝土的配比设计如表 2 所示。

表2 混凝土配合比
Table 2 Concrete mix ratio

试件编号	强度等级	每 m ³ 混凝土中各材料用量/kg						高效引气 减水剂/%	含气率/%
		NCA	RCA	水泥	砂	水	附加水		
NC40-C	C40	1 017	0	447	721	175	0	0.01	5.1
RC30-C	C30	0	1 134	335	756	165	47.96	0.01	5.1
RC40-C	C40	0	1 067	423	711	165	45.13	0.01	5.1
RC40-S	C40	0	1 067	423	711	165	45.13	0.01	5.1
RC50-C	C50	0	1 021	498	685	165	42.32	0.01	5.2

注:NC40-C、RC40-C 和 RC40-S 中,NC 和 RC 分别表示 NAC 和 RAC, C 表示 NaCl 溶液,S 表示 Na₂SO₄ 溶液,40 表示混凝土强度等级为 C40。

1.3 试验方案

盐冻循环试验及相对动弹性模量的测试参照文献[16]中的快冻法进行。根据文献[17]对不同冻融循环次数下混凝土的质量、立方体抗压强度进行测试。采用 SEM 和 XRD 对盐冻循环前后 RAC 的微观形貌和腐蚀产物进行分析。

2 试验结果及分析

2.1 盐冻循环后试件表面损伤

盐冻循环后 RAC 与 NAC 的表观损伤如图 2 所示。

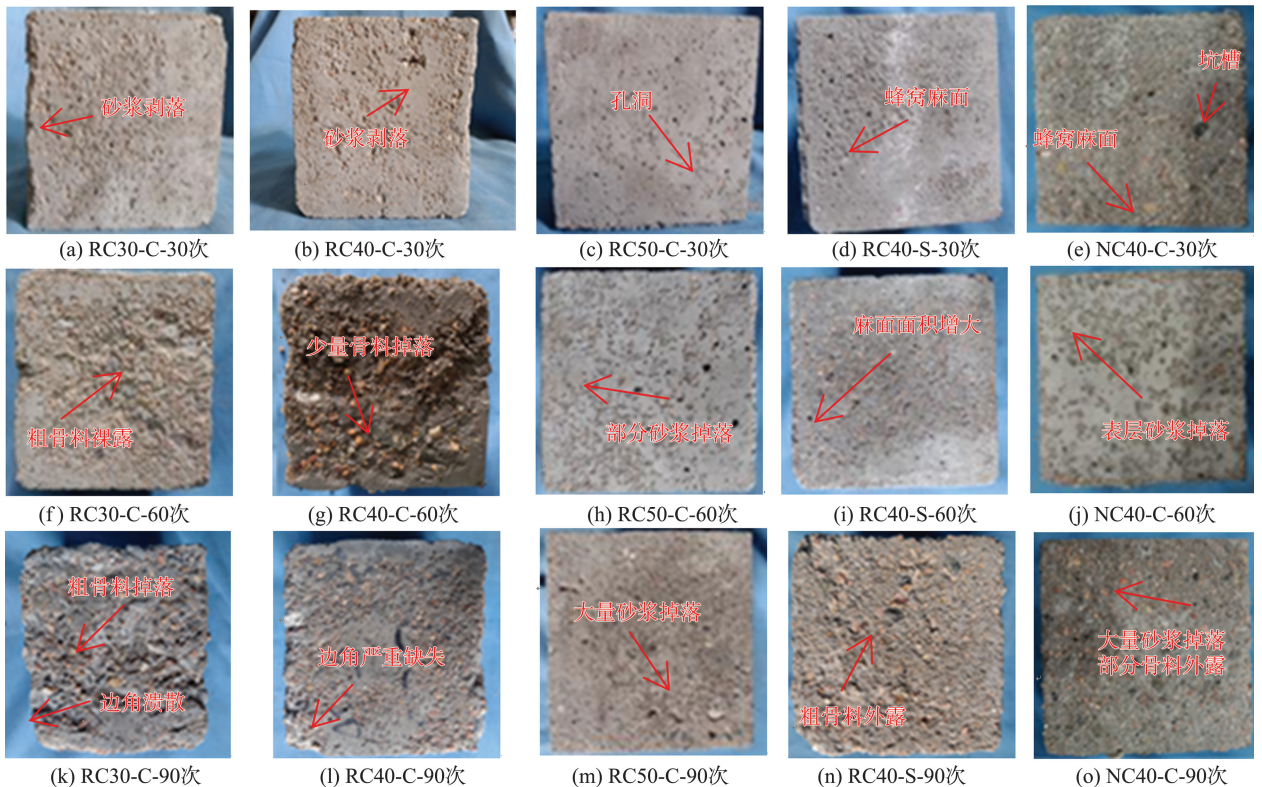


图2 盐冻循环后混凝土的表观损伤

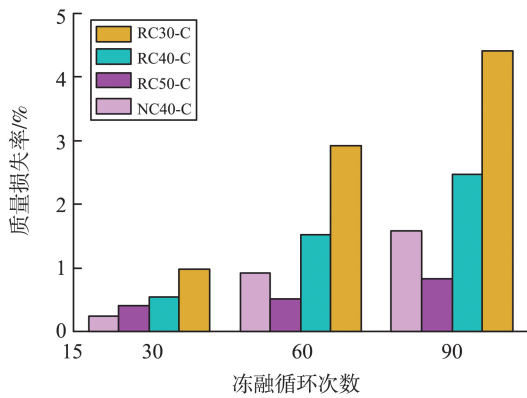
Fig.2 Apparent damage of concrete after salt freezing cycle

由图 2 可以看出:盐冻循环 30 次后,混凝土表面出现蜂窝麻面,部分试件表面砂浆剥落;盐冻循环 60 次后,麻面面积扩大,部分试件骨料裸露;盐冻循环 90 次后,多数试件骨料外露,有的开始掉落。其中,RC30-C 组在 90 次循环后砂浆脱落严重,骨料掉落,边角溃散;RC40-C 组骨料与砂浆分离,少量骨料掉落;RC50-C 组主要为砂浆脱落;RC40-S 和 NC40-C 组未见骨料掉落。0~60 次循环中,RC40-C 组损伤比 RC40-S 组严重,但 90 次后 RC40-S 组突然出现大面积破坏。

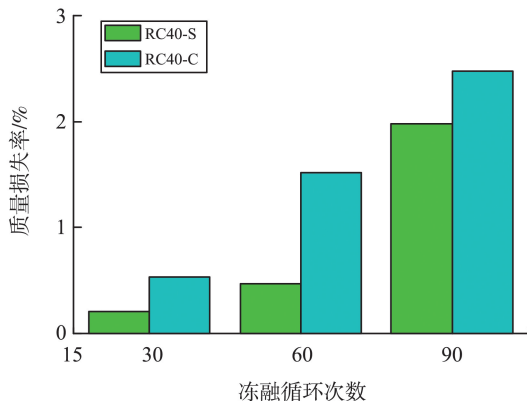
上述试验现象表明,提高 RAC 的强度等级能增强其抗盐冻性能,同时 NAC 在抗盐冻方面表现更佳;在盐冻循环后期相较于氯盐,硫酸盐对 RAC 的影响更严重。

2.2 质量损失

盐冻循环后试件的质量损失情况如图 3 所示。从图 3(a)可知,随着盐冻循环次数的增加,质量损失率呈上升趋势;RC40-C 组质量损失率大于 NC40-C 组。由图 3(b)可知,RC40-C 组和 RC40-S 组质量损失变化规律存在显著差异。



(a) 不同等级与类型的混凝土



(b) 不同类型的盐溶液

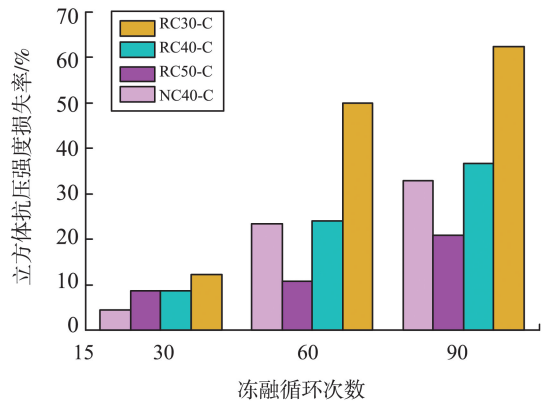
图 3 质量损失率
Fig.3 Mass loss rate

此外,在 90 次盐冻循环后,RC30-C 组损失率为

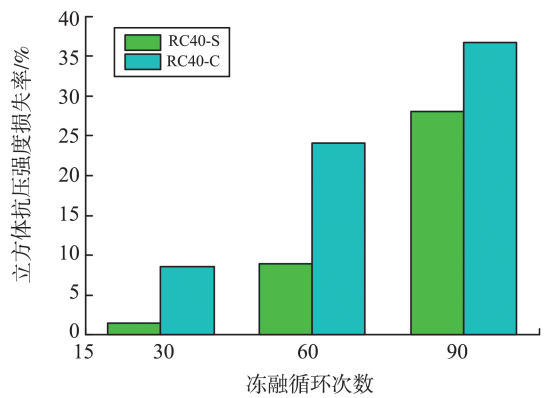
4.41%,RC50-C 组仅为 0.83%。这是由于 RC50-C 组较 RC30-C 组水灰比小,密实度高,RC50-C 组的抗渗性强于 RC30-C 组,导致其质量损失率较低。在 30~90 次盐冻循环过程中,RC40-C 组质量损失率要远高于 RC40-S 组。这主要是因为,在盐冻循环初期,氯盐的存在会降低混凝土孔隙中水的冰点,使得冻胀应力增大,加剧了冻融对混凝土的破坏作用^[18]。相比之下,硫酸盐侵蚀主要是通过与水泥水化产物发生化学反应,生成如钙矾石等膨胀性物质,膨胀性物质在一定程度上可以填充混凝土的微孔隙和微裂缝,从而在初期可能会提高混凝土的密实度,抑制冻融循环带来的质量损失^[19]。

2.3 立方体抗压强度损失

盐冻循环后 RAC 的立方体抗压强度损失情况如图 4 所示。



(a) 不同等级与类型的混凝土



(b) 不同类型的盐溶液

图 4 立方体抗压强度损失率

Fig.4 Rate of compressive strength loss of the cube

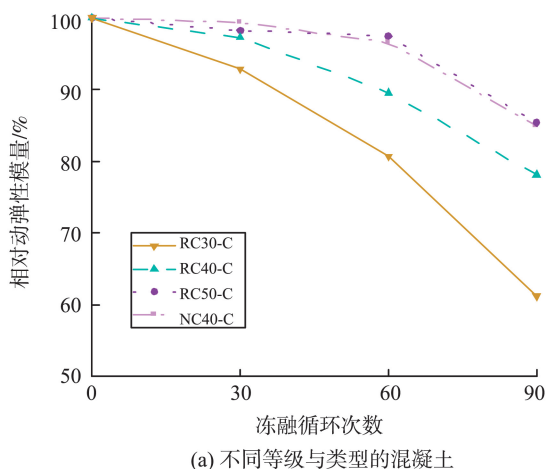
由图 4(a)可知,随着 RAC 强度等级的提升,抗压强度损失率降低,并且 RC40-C 组的损失率高于 NC40-C 组。其中,90 次盐冻循环后,RC50-C 组强度损失率为 20.93%,RC30-C 组强度损失率为 62.33%,约为 RC50-C 组的 3 倍,RC40-C 组与 RC50-C 组相差相对较小。这是因为随着 RAC 强度等级的提高,内部孔隙率降低,密实度提高,从而

减轻了破坏程度,强度损失率减小。

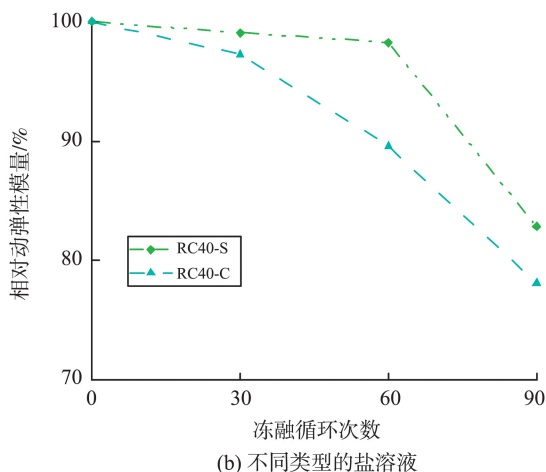
通过对比图4(b)中的RC40-C组和RC40-S组,RC40-C组在相邻30次盐冻循环之间损伤率的差值分别为8.60%、15.45%、12.66%,RC40-S组的差值分别为1.42%、7.53%、19.17%,可以看出,当盐冻循环达到90次时,相较于RC40-C组抗压强度损失率的均匀增加,RC40-S组发生陡增。这是因为在盐冻循环初期,氯盐侵蚀导致混凝土表面的破坏较为严重,后期氯盐的物理侵蚀占主导地位,但硫酸盐侵蚀使RAC内部产生膨胀性物质进而产生了膨胀应力,使RAC发生破坏。随着盐冻循环次数增加,损伤累积加剧,最终导致RAC强度的快速损失。这与文献[20]所述一致。

2.4 相对动弹性模量

盐冻循环前后RAC的相对动弹性模量试验结果如图5所示。



(a) 不同等级与类型的混凝土



(b) 不同类型的盐溶液

图5 相对动弹性模量

Fig.5 Relative dynamic modulus of elasticity

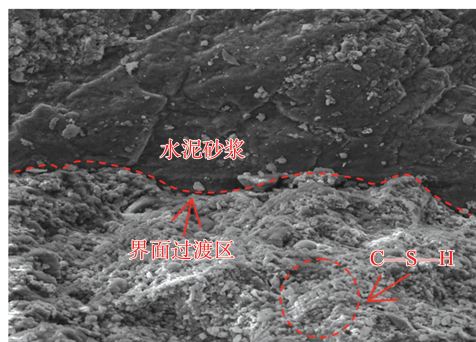
由图5(a)可知,与NC40-C组相比,RC40-C组的相对动弹性模量降低幅度更大,在30、60和90次盐冻循环后,其降低幅度分别是NC40-C组的4.39、3.03和1.45倍。

通过对比图5(b)发现,0~60次盐冻循环时,RC40-C组动弹性模量降低率高于RC40-S组;60~90次循环时,RC40-S组相对动弹性模量迅速降低,使得相对动弹性模量的降低率高于RC40-C组2.9%。这是由于在盐冻循环前期硫酸盐组处于损伤累积状态,对RAC的损伤并不严重,盐冻和硫酸盐侵蚀主要作用在混凝土的表面,内部仍然是密实状态,相对动弹性模量降低缓慢;在盐冻循环后期,损伤累积加大,内部出现了损伤,硫酸盐溶液扩散速率增大,并与水化产物反应生成更多膨胀性产物,使混凝土表面产生裂缝,与冻融剥落共同导致了相对动弹性模量迅速降低^[21]。

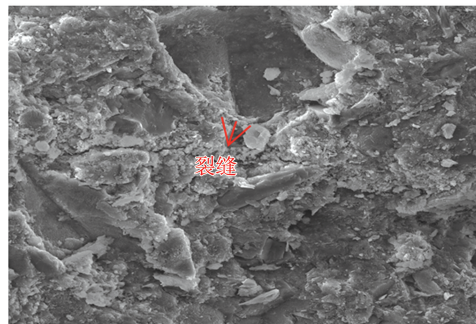
3 微观结构分析

选取盐冻循环90次的RAC进行相应的微观形貌及腐蚀产物分析。

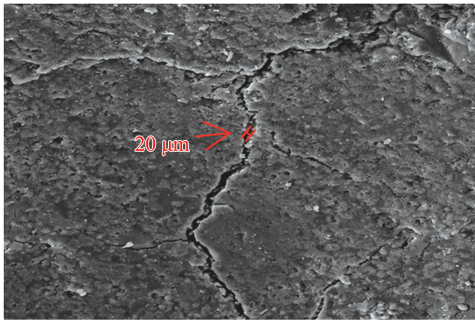
RAC在90次盐冻循环试验中微观形貌变化如图6所示。RC40-C在盐冻循环前内部的微观形态如图6(a)所示。由图6(a)可以看出,大量絮凝状水化产物C—S—H填充在其他颗粒之间。由图6(b)可以看出,经过90次循环后,RC40-C组内部孔隙数量增多,裂缝也变大变多。由图6(b)~6(d)可以看出,比较RC30-C、RC40-C和RC50-C组,RC50-C组内部裂缝宽度最窄约10 μm,而RC30-C组裂缝宽度超过20 μm,导致更严重的内部破坏。由图6(e)可以看出,RC40-S组在90次循环后出现大量针状钙矾石,引起内部膨胀和开裂。



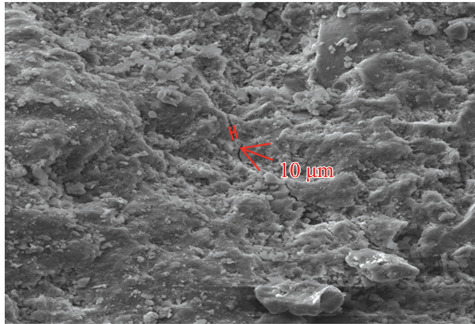
(a) RC40-C-0次(2 000×)



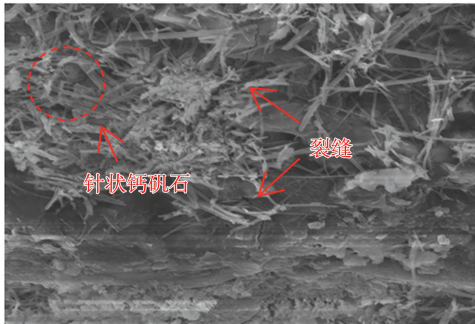
(b) RC40-C-90次(3 000×)



(c) RC30-C-90次 (2 000×)



(d) RC50-C-90次 (2 000×)



(e) RC40-S-90次 (5 000×)

图 6 90 次盐冻循环作用下 RAC 的微观形貌

Fig.6 The micro-morphology of RAC under the action of 90 salt freezing cycles

为了进一步了解不同强度等级下 RAC 在 NaCl 溶液及 RC40 混凝土在 Na₂SO₄ 溶液中冻融循环 90 次形成的腐蚀产物,采用 XRD 进行分析,90 次盐冻循环后各组再生混凝土 XRD 图谱如图 7 所示。

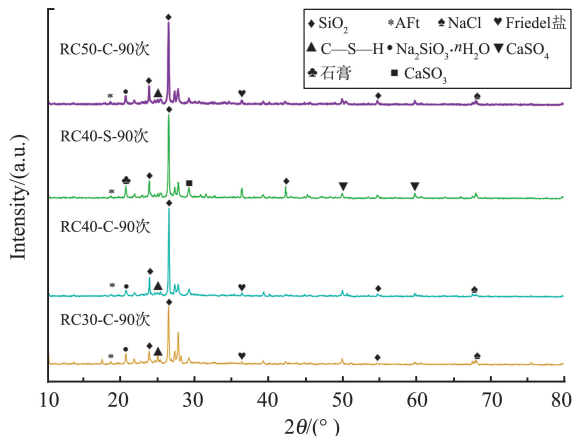


图 7 90 次盐冻循环后各组再生混凝土 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of each group of recycled concrete after 90 salt freezing cycles

由图 7 可见,不同强度等级 RAC 中生成的产物大致相同,侵蚀产物主要有 Friedel 盐及 AFt,RC40-S 组侵蚀产物主要有石膏及 AFt,化学反应式为

$$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaCl}_2+10\text{H}_2\text{O}\rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O},$$

$$\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SO}_4+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}+2\text{NaOH}$$

$$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}+3(\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})+20\text{H}_2\text{O}\rightarrow$$

$$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}.$$

由图 7 可见,不同强度等级 RAC 腐蚀产物的衍射峰高度不同,在 X 射线衍射图谱中,于 Friedel 盐(衍射峰 36.5°)、AFt(衍射峰 18.7°)、CaCO₃(衍射峰 29.3°)和石膏(衍射峰 20.7°)附近均出现了明显的特征衍射峰。随着 RAC 强度等级的提高,Friedel 盐、AFt、石膏的衍射峰降低。主要原因是强度等级越高,RAC 内部越密实,在一定程度上减缓了产物的生成,提高了 RAC 的抗盐冻性能。

4 基于 Wiener 随机过程 RAC 盐冻寿命预测

Wiener 过程是一种连续时间随机过程,常用于模拟具有随机波动特性的过程。在混凝土寿命预测中,Wiener 过程可以用来描述混凝土性能随时间的随机退化过程^[22]。在本试验中,基于盐冻循环试验下混凝土的相对动弹性模量,通过 Wiener 模型预测混凝土抗盐冻性能的退化趋势,公式为

$$X(t)=\alpha t+\beta B(t), \quad (1)$$

式中, α 为漂移参数, β 为扩散系数, t 为时间, $X(t)$ 为混凝土退化量, $B(t)$ 为标准的 Wiener 过程。

设定混凝土的耐久性退化指标失效阈值为 D_f ($D_f>0$)。根据文献[16],当冻融循环试件的相对动弹性模量损失率达到 40%时,认为混凝土被冻融破坏,因此本研究取 $D_f=0.4$ 。混凝土的寿命 T 计算公式为

$$T=\inf\{t|X(t)>D_f\}。 \quad (2)$$

经过推导可以得出混凝土在耐久性能达到 D_f 时的可靠度和概率密度函数为

$$R(t)=\Phi\left(\frac{D_f-\alpha\cdot t}{\beta\sqrt{t}}\right)-\exp\left(\frac{2\alpha D_f}{\beta^2}\right)\Phi\left(\frac{-D_f-\alpha\cdot t}{\beta\sqrt{t}}\right), \quad (3)$$

$$f(t)=\frac{D_f}{\sqrt{2\pi\beta^2 t^3}}\exp\left[-\frac{(D_f-\alpha\cdot t)^2}{2\beta^2 t}\right], \quad (4)$$

式中 Φ 代表标准正态分布函数。

依据上式,计算得到混凝土 Wiener 退化过程的似然函数

$$L(\alpha, \beta^2) = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\beta^2 \pi \Delta t_{ij}}} \exp \left[-\frac{(\Delta X_{ij} - \alpha \Delta t_{ij})^2}{2\beta^2 \Delta t_{ij}} \right]. \quad (5)$$

对式(5)双侧同时取对数,求得 α, β^2 的一阶偏导数,并令其为0,可得 α, β 的函数式为

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m X_{in}}{\sum_{i=1}^m t_{in}}, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\Delta X_{ij}}{\Delta t_{ij}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^m X_{in} \right)^2}{\sum_{i=1}^m t_{in}} \right], \quad (7)$$

式中: X_{in} 为第*i*个试块在*n*次冻融循环次数下相对动弹性模量退化量; ΔX_{ij} 为试件*j*在相邻时刻的耐久性退化量, $\Delta X_{ij} = X_{ij} - X_{(i-1)j}$; Δt_{ij} 为试件*j*的测量间隔时间, $\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{(i-1)j}$ 。

通过利用式(6)和(7),可以计算出每组试件的参数,具体结果见表3。

表3 Wiener模型的参数值

Table 3 Parameter values of Wiener model

编号	α	β
RC30-C	3.626×10^{-3}	4.143×10^{-3}
RC40-C	1.946×10^{-3}	2.373×10^{-3}
RC50-C	1.046×10^{-3}	1.592×10^{-3}
RC40-S	1.099×10^{-3}	1.861×10^{-3}
NC40-C	1.062×10^{-3}	1.373×10^{-3}

将各组试件的参数填入式(3)以获得各自的可靠度函数,并对这些函数进行拟合,拟合结果见图8。

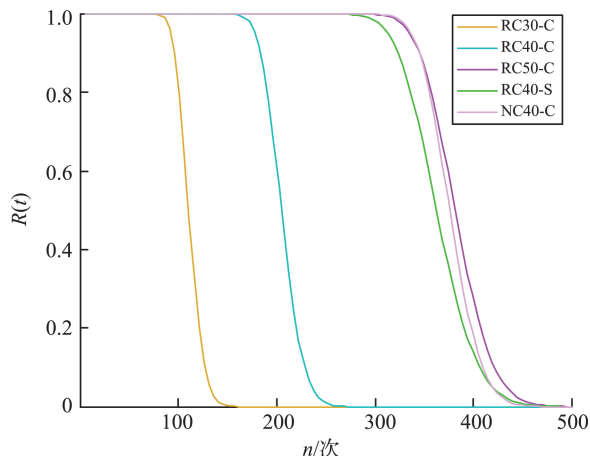


图8 可靠度曲线

Fig.8 Reliability curve

通过对图8综合分析可知,RAC的可靠度随着盐冻循环次数增加逐步降低,此过程可划分为3

个明显阶段。前期RAC的可靠度维持不变,数值为1.0。这一现象表明,尽管RAC在此期间承受了盐冻的侵蚀,但其性能并未遭受显著的负面影响。这反映出RAC具备一定的抗冻性能。然而,随着盐冻循环次数的增加,进入中期阶段,RAC的可靠度迅速降低。这一转变说明了RAC虽然仍具有一定的抗冻性,但随着盐冻损伤的持续累积,最终导致性能发生质的变化,从而引发结构的劣化。后期可靠度下降至0附近,此阶段RAC耐久性失效。在氯盐环境中,强度等级为C30、C40和C50的RAC和强度等级为C40的NAC分别在经历70、141、272和282次盐冻循环后开始出现可靠度下降的趋势,在此之后可靠度以更快的速率降低,分别大约在151、262、480和460次盐冻循环时可靠度降至0。在硫酸盐环境中,C40强度等级的RAC在242次盐冻循环附近开始出现可靠度下降的趋势,并在大约474次循环时,可靠度降至接近0的水平。以可靠度为0.6进行寿命预测^[23],可得RC30-C、RC40-C、RC50-C、RC40-S和NC40-C组试件的预测寿命分别为盐冻循环106、196、373、353和368次左右。

据调研,我国东北、西北、华北年平均冻融循环次数分别为120、118、84次^[24]。研究结果显示,室内经历1次冻融循环的效果相当于室外经历大约12次。因此,定义混凝土的抗冻耐久性寿命为^[25]

$$t = \frac{12n_E}{n_a}, \quad (8)$$

式中: t 为混凝土抗盐冻耐久年限, $a; n_E$ 为混凝土在可靠度0.6时的盐冻循环次数; n_a 为不同地区的年平均盐冻次数。

根据式(8)计算得到内蒙古自治区RAC和NAC的抗冻耐久性寿命,如表4所示。

表4 抗冻耐久性寿命预测

Table 4 Life span prediction of freezing resistance durability

地区	t/a				
	RC30-C	RC40-C	RC50-C	RC40-S	NC40-C
东北	10.60	19.60	37.30	35.30	36.80
西北	10.78	19.93	37.93	35.90	37.40
华北	15.14	28.00	53.29	50.43	52.60

5 结论

(1) RAC的强度等级提升,其抵御盐冻破坏的能力也随之增强,且RAC受多种复杂因素的影响,各个力学性能指标的损失均超过NAC。

(2) 由于RC40-S组存在损伤累积的过程,使

得盐冻循环前期 RAC 力学性能损失较慢,经历 30 次盐冻循环,RC40-C 组质量、立方体抗压强度和动弹模损失率分别是 RC40-S 的 2.50、6.15 和 3.00 倍左右,90 次盐冻循环后迅速下降。

(3) 通过 SEM 和 XRD,对混凝土试样进行微观分析,90 次盐冻循环后氯盐组和硫酸盐组的 RAC 由于生成产物的不同,以致于呈现出不同的劣化规律。

(4) 盐冻环境下,RAC 动弹性模量退化分 3 个阶段:可靠度为 1.0,可靠度急剧下降,可靠度为 0。其对内蒙古盐碱地区的 RAC 的寿命预测结果显示,RC50-C 组混凝土在华北地区抗冻耐久性寿命预估值可达 53 a。

参考文献:

- [1] ZHENG R J, ZHANG F B, WANG D C, et al. Basic mechanical properties of geopolymer recycled concrete with iron ore tailings sand [J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 114: 114331.
- [2] ZHANG F B, LI X L, WANG D C. Mechanical behavior of self-compacting recycled concrete reinforced with recycled disposable medical mask fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 429: 136314.
- [3] 王晨霞,王金旭,王宇飞,等. 硅灰对再生混凝土抗盐冻性能及微观结构的影响 [J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(6): 171-177.
WANG Chenxia, WANG Jinxu, WANG Yufei, et al. Effect of silica fume on the salt frost resistance and microstructure of recycled concrete [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, 41(6): 171-177.
- [4] LI M, CAO F B, WANG C X, et al. Probabilistic fatigue life and damage mechanisms of recycled coarse aggregate concrete under flexural loading [J]. *Journal of Building Engineering*, 2025: 114683.
- [5] LIN Y J, FENG X, ZHANG Z P. Microscopic simulation of thermo-mechanical behaviors in recycled concrete under freeze-thaw action [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 409: 133892.
- [6] 李秋义,王忠星,岳公冰,等. 氯盐侵蚀对再生混凝土多重界面显微结构的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(1): 27-32.
LI Qiuyi, WANG Zhongxing, YUE Gongbing, et al. Effect of chloride salt erosion on multiple interface microstructure of recycled concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(1): 27-32.
- [7] BAI W F, SONG Z, YUAN C Y, et al. Study on mechanical properties and damage mechanism of recycled concrete containing silica fume in freeze-thaw environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 375: 130872.
- [8] KAZMI S M S, MUNIR M J, WU Y F, et al. Effect of different aggregate treatment techniques on the freeze-thaw and sulfate resistance of recycled aggregate concrete [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 178: 103126.
- [9] 李恒,郭庆军,王家滨,等. 再生混凝土界面结构及耐久性综述 [J]. *材料导报*, 2020, 34(13): 13050-13057.
LI Heng, GUO Qingjun, WANG Jiabin, et al. Meso-/micro-structure of interfacial transition zone and durability of recycled aggregate concrete: a review [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(13): 13050-13057.
- [10] 冯博,刘青,钱永久. 高性能混凝土在氯盐侵蚀和冻融循环作用下的耐久性分析 [J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(5): 1083-1089.
FENG Bo, LIU Qing, QIAN Yongjiu. Durability analysis of high-performance concrete under chloride salt erosion and freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2023, 58(5): 1083-1089.
- [11] 姚韦靖,刘雨珊,王婷雅,等. 橡胶/混凝土盐冻循环后性能劣化及微观结构 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(12): 4294-4304.
YAO Weijing, LIU Yushan, WANG Tingya, et al. Performance degradation and microscopic structure of rubber / concrete after salt freeze-thaw cycles [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(12): 4294-4304.
- [12] CHEN S J, REN J X, LI Y G, et al. Macroscopic and mesoscopic deterioration behaviors of concrete under the coupling effect of chlorine salt erosion and freezing-thawing cycle [J]. *Materials*, 2021, 14(21): 6471.
- [13] 张学鹏,张戎令,王小平,等. 基于 Wiener 过程理论的盐渍土中混凝土损伤演化及寿命预测 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(11): 1192-1199.
ZHANG Xuepeng, ZHANG Rongling, WANG Xiaoping, et al. Damage evolution and life prediction of concrete in saline soil based on Wiener process theory [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(11): 1192-1199.
- [14] 路承功,乔宏霞,魏智强,等. 盐渍土地区混凝土加速损伤劣化机理及基于 Wiener 过程可靠性分析 [J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(2): 265-272.
LU Chengong, QIAO Hongxia, WEI Zhiqiang, et al. Accelerated damage and deterioration mechanism of concrete in saline soil area and reliability analysis based on Wiener process [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(2): 265-272.
- [15] 董伟,王雪松,计亚静,等. 碳化-盐冻作用下风积沙混凝土损伤劣化机理及寿命预测 [J]. *建筑材料学报*,

- 2023, 26(6): 623-630.
- DONG Wei, WANG Xuesong, JI Yajing, et al. Damage deterioration mechanism and life prediction of aeolian sand concrete under carbonation and salt freezing [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(6): 623-630.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2024[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024: 26-27.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 121-126.
- [18] 张田梅, 孙全胜. 冻融与混合氯盐作用下混凝土抗冻性试验研究[J]. *世界地震工程*, 2016, 32(4): 105-110.
- ZHANG Tianmei, SUN Quansheng. Experimental research on frost resistance of concrete with cyclic freeze-thaw subjoining mixed chloride [J]. *World Earthquake Engineering*, 2016, 32(4): 105-110.
- [19] 肖前慧, 李阳阳, 邱继生, 等. 冻融与硫酸盐侵蚀耦合作用下不同骨料取代率再生混凝土损伤研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(4): 101-107.
- XIAO Qianhui, LI Yangyang, QIU Jisheng, et al. Damage of recycled concrete with different aggregate substitution rates under the coupling action of freeze-thaw and sulfate erosion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(4): 101-107.
- [20] 甘磊, 刘源, 沈振中, 等. 硫酸盐侵蚀和冻融循环作用下混凝土损伤演化规律[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(11): 134-141.
- GAN Lei, LIU Yuan, SHEN Zhenzhong, et al. Damage evolution law of concrete under sulfate attack and freeze-thaw cycle [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 51(11): 134-141.
- [21] 席红兵, 李柏生. 硫酸盐—冻融共同作用下隧道衬砌支护喷射混凝土劣化性能研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(7): 1219-1226.
- XI Hongbing, LI Baisheng. Deterioration performance of tunnel lining support concrete under sulfate-freeze-thaw interaction [J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(7): 1219-1226.
- [22] 乔宏霞, 朱彬荣, 路承功, 等. 基于Wiener随机过程的混凝土加速寿命试验[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(6): 1023-1027.
- QIAO Hongxia, ZHU Binrong, LU Chenggong, et al. Accelerated life test of concrete based on Wiener stochastic process [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(6): 1023-1027.
- [23] 吴多明, 汪金满, 王鑫, 等. 玻璃粉/硅粉复掺对混凝土腐蚀环境下耐久性的影响[J]. *兰州理工大学学报*, 2022, 48(3): 27-34.
- WU Duoming, WANG Jinman, WANG Xin, et al. Effect of glass powder/silica fume mixture on durability of concrete under corrosive environment [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2022, 48(3): 27-34.
- [24] 李金玉, 彭小平, 邓正刚, 等. 混凝土抗冻性的量化设计[J]. *混凝土*, 2000(12): 61-65.
- LI Jinyu, PENG Xiaoping, DENG Zhenggang, et al. Quantitative design on the frost-resistance of concrete [J]. *Concrete*, 2000(12): 61-65.
- [25] 王晨霞, 刘路, 曹芙波, 等. 冻融循环后再生混凝土力学性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12): 193-202.
- WANG Chenxia, LIU Lu, CAO Fubo, et al. Experimental study on mechanical properties of recycled concrete after freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(12): 193-202.

(编辑:郭少华)