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.0454-5648.20250759

综 合 评 述

多病害作用下的混凝土耐久性劣化过程预测模型研究进展

刘清风[1]，孟昭铮[1,2]

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，海洋工程全国重点实验室，上海 200240，中国；
2. 荷兰代尔夫特理工大学，南荷兰省 代尔夫特 2628 CN，荷兰)

摘 要：近年来，混凝土耐久性劣化问题在土木工程和材料科学领域引起广泛关注，尤其在复杂环境和多种病害耦合作用下，混凝土结构的长期服役性能面临严峻挑战。为深入揭示混凝土耐久性劣化机理并建立科学合理的预测方法，各类数值模型相继被提出，以探究混凝土劣化过程中涉及的多尺度、多物理场耦合机制，以及不同物理化学过程相互作用等关键科学问题。为了全面梳理相关研究脉络与发展趋势，本文将围绕多病害作用下混凝土耐久性劣化预测模型，系统综述该领域的研究进展。本文首先从“化学过程主导”和“物理过程主导”的多病害耦合机制两个角度展开综述：在化学驱动方面，重点分析了氯离子侵蚀与碳化、硫酸盐侵蚀、钙溶蚀之间的典型耦合机制，总结了离子侵蚀、竞争吸附及孔隙结构演化对劣化加速的影响；在物理驱动方面，主要讨论了冻融循环与荷载开裂作用下氯离子侵蚀过程，揭示其与氯离子侵蚀共同作用下的加速劣化机理。在此基础上，本文总结了现有混凝土耐久性预测模型的研究进展与不足，并归纳了当前领域的主要挑战与机遇，包括：1) 材料非均质性与微观结构演化的精准表征；2) 多尺度、多物理场耦合模型框架的完善；3) 基于长期服役性能的预测与可靠性评估方法。最后，本文展望了未来研究方向，并建议结合先进算法深化多病害多尺度劣化机理认识，从而构建更加精准、高效且适应复杂服役环境的耐久性预测模型，以期为混凝土结构的全寿命周期性能评估与耐久性设计提供理论支撑。

关键词：混凝土耐久性；多病害耦合；劣化机理；多离子传输；数值模型
中图分类号：TU528　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0454–5648(2026)02–0811–10
网络出版时间：2026–01–21

混凝土因其优异的力学性能和广泛的工程应用，成为现代土木工程领域最重要的建筑材料之一。然而在复杂环境因素和多种病害类型的长期作用下，混凝土耐久性面临严峻挑战。更为严重的是，混凝土结构在滨海高盐、寒区冻融、盐渍土和工业大气等实际服役环境中往往同时受到氯离子侵蚀、碳化[1]、硫酸盐侵蚀[2]、冻融循环[3]、荷载开裂等多种病害的共同影响[4]。这些耐久性病害往往同时出现，耦合作用下机理复杂多变，增加了耐久性劣化过程的预测难度。随着计算机技术的快速发展，基于混凝土材料微观结构及物理化学反应的精细化建模逐渐成熟，数值模型也成为耐久性预测的重要工具[5]。尽管相关研究取得进展，多病害耦合作用下混凝土耐久性劣化预测模型研究尚处于探索阶段。如何以数学模型与数值方法实现多病害耦合作用下的耐久性能预测，仍是当前的重要挑战。

近年来，“多病害”逐渐成为混凝土耐久性研究的重要概念，强调多种劣化机制在同一体系内的相互耦合过程；而“多因素”主要指外部环境条件的多样性及其驱动作用。两者既有区别又相互关联：外部因素可诱发或加速多病害过程，而多病害耦合又会影响材料对环境作用的响应(图 1)。本文将以多病害耦合规律为主线，并结合多因素环境条件，构建更具整体性的混凝土耐久性劣化分析预测框架。

混凝土作为一种典型的多相复合材料，其劣化过程往往源于复杂的外部环境和内部作用机理，不同病害往往通过截然不同的驱动机制促使混凝土耐久性能退化，有些主要受化学反应控制，例如水泥水化、离子反应和沉淀溶解等[6, 7]；而另一些则以物理作用为主导，如温度循环、应力集中和裂缝扩展等[8, 9]。因此，厘清各类病害的发生过程和作用机理，并阐明不同病害之间的相互作用关系，是建立

收稿日期：2025–10–15。　修订日期：2025–11–22。
基金项目：国家优秀青年科学基金项目(52222805)；国家自然科学基金面上项目(52478264)；重庆市杰出青年科学基金项目(cstb2024nscq-jqX0007)。
第一作者：刘清风(1986—)，男，博士，教授。

Received date: 2025–10–15.　**Revised date:** 2025–11–22.
First author: LIU Qing-feng (1986–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: liuqf@sjtu.edu.cn

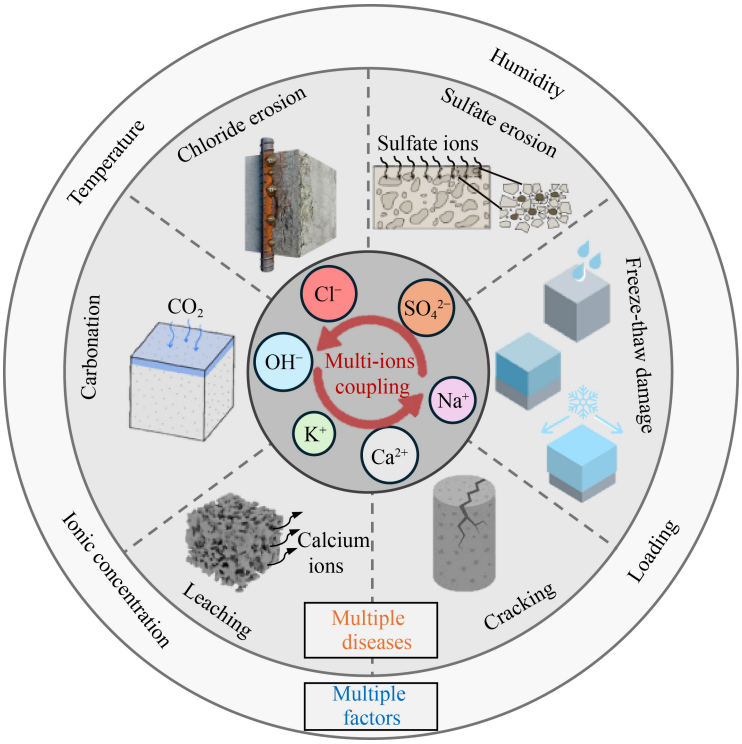


图 1　主要耐久性病害与外界因素种类示意图

Fig. 1　Major concrete durability degradation and influencing factors

多病害耐久性数值预测模型的关键。一般而言，混凝土的耐久性劣化病害基本可分为 2 类：一类是化学过程主导下的耐久性病害，如最常见的氯离子侵蚀、硫酸盐腐蚀、碳化以及钙溶蚀；另一类是物理过程主导下的耐久性病害，如温度变化引起的冻融破坏和荷载开裂导致的有害介质渗透。值得一提的是，根据相关机构和学者的研究报告[10–13]，氯盐侵蚀被认为是速度最快、危害最大的耐久性病害之一，最易受到其他病害的影响，造成“1+1>2”的放大效应，已被广泛认为是混凝土结构耐久性退化的主要诱因。

基于混凝土耐久性研究领域的最新进展，本文将以氯离子侵蚀为核心对象，以碳化、硫酸盐侵蚀、钙溶蚀、冻融、荷载开裂等耐久性病害的耦合影响为主要切入点，针对不同病害劣化特征，系统总结多病害共同作用下混凝土耐久性劣化机理及相关数值预测模型构建思路。随后，本文还将讨论存在的挑战，并展望未来研究方向，以期为该领域的进一步研究提供思路和参考。

1　混凝土多病害耦合劣化预测模型

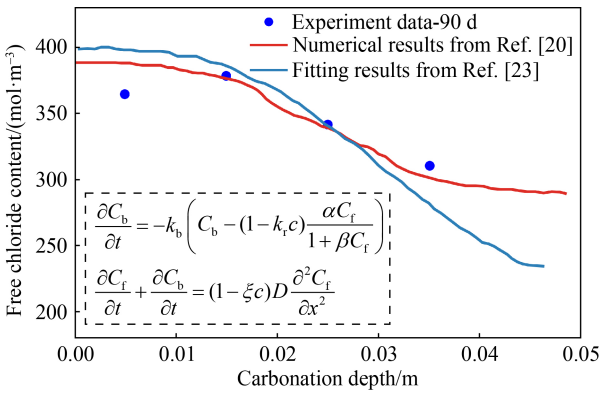
1.1　化学过程主导的多病害耦合机制

在化学过程主导的混凝土耐久性劣化中，氯盐侵蚀速度最快、危害最大，且最易受到后续其他化学病害的影响，形成放大效应。而不同物质的传输、反应及吸附行为相互交织、耦合机理复杂，同时碳化、硫酸盐侵蚀、钙溶蚀等劣化过程又都会显著改变混凝土内部化学环境，多种化学反应并行引起关键参数高度时变，进一步加剧了劣化机理分析与预测模型构建的难度。本小节将重点围绕氯离子侵蚀与碳化、硫酸盐侵蚀以及钙溶蚀之间的典型耦合作用机理展开综述，梳理当前数值预测模型研究的进展，分析不同模型的优势与不足，并探讨其对混凝土长期服役性能预测的启示。

1.1.1　碳化与氯离子侵蚀共同作用机理　碳化对氯离子侵蚀具有双重影响。一方面，碳化会破坏 Friedel’s 盐结构，从而释放结合氯离子，加速氯离子侵蚀[14]；另一方面，在普通硅酸盐水泥体系中，碳化会生成 $CaCO_3$，降低混凝土孔隙率，从而抑制氯离子侵蚀[15]。因此，如何定量表征这一双重效应仍是混凝土耐久性损伤预测领域的关键挑战之一。此前已有多种表征碳化过程的指标被提出，包括 $CaCO_3$ 含量[16]、碳化程度[17]、碳化深度[18]以及碳化速率[19]，以量化碳化对混凝土耐久性的影响。

Shen 等[20]首次把碳化速率写入氯离子结合效应表达式中，实现了碳化导致氯离子释放过程的直接定量表征，并推导出整合碳化速率的氯离子传输方程。图 2 展示了该模型控制方程及其预测结果与

实验测量数据的对比。控制方程中 C_b 表示结合氯离子浓度，C_f 表示自由氯离子浓度，ξ 表示氯离子扩散对混凝土孔隙率的影响，D 表示碳化前氯离子初始扩散系数。由图 2 可见，模型预测曲线与实验数据趋势一致且数值吻合。尤其在碳化锋面位置(约 0.035 m)，氯离子浓度预测结果要优于基于实验数据的拟合结果，表明所提出模型能更准确地反映碳化作用下氯离子在混凝土中的扩散行为。研究还发现，碳化对结合氯离子释放的负面影响占主导地位，且完全碳化区结合氯离子含量逐渐增加。由此可以看出，精确的数值模型能够清晰地计算区分未碳化区、碳化进行区和完全碳化区之间的边界，为钢筋混凝土结构的长期服役性能预测提供更可靠的工具[21]。该模型也被应用于研究海洋环境下非饱和混凝土碳化和氯离子侵蚀问题，并分析了温度、湿度和二氧化碳浓度对混凝土劣化过程的影响[17]。除此之外，Tong 等[22]从碳化沉积物对孔隙填充的角度入手，建立了碳化作用下混凝土孔径分布和渗透速率预测模型。在分析了不同温度下碳化对孔径分布及渗透速率的影响后，他们发现碳化时饱和度的变化可改变碳化沉积物在孔隙结构中的填充位置，且凝胶孔在混凝土孔隙结构中起着关键作用，这使得毛细孔连通性降低速率高于整体孔隙结构的降低速率[23]。



C_b represents binding chloride concentration; C_f represents the free chloride concentration; ξ represents the impact of concrete porosity; D represents the initial chloride diffusion coefficient; c represents the relative carbonation rate; k_b represents the rate constant for the reaction of binding process; k_r represents the influence coefficient of debounding degree; t represents time.

图 2　实验结果、文献[24]拟合结果与文献[20]数值结果的比较

Fig. 2　Comparison of experimental results, fitting results from reference [24], and numerical results from reference [20]

1.1.2　硫酸盐与氯离子侵蚀共同作用机理　　外部硫酸盐侵蚀与氯离子侵蚀的过程中存在竞争吸附关系[25, 26]。外部侵入混凝土的硫酸盐离子一方面会与水化铝酸钙相反应，生成膨胀产物，填充混凝土孔隙，从而抑制后续氯离子的侵入[27]；另一方面，硫酸盐离子可能导致先前结合的氯离子释放，并诱发膨胀裂缝，从而促进氯离子的进一步侵蚀[28, 29]。近年来，研究这一耦合侵蚀过程的数值模型可大致分为 2 类：第 1 类是基于热力学，该方法能够考虑水泥水化组分及沉淀产物的化学平衡[30]；第 2 类则是基于反应动力学，用于描述氯离子–硫酸盐耦合侵蚀过程中腐蚀产物的形成机制[31]。基于考虑多相–多离子的“双多模型”[6]，Meng 等[32]综合混凝土非均质性与多离子耦合作用，建立了硫氯耦合侵蚀过程中的化学–电化学耦合模型(图 3)。结果表明忽略多离子耦合效应可能会低估氯离子与硫酸盐离子之间的竞争结合吸附强度。尽管硫氯耦合侵蚀的数值模型已取得显著进展，但在实际工程环境中，硫酸盐侵蚀往往与钙溶蚀、非饱和传输等物理化学过程相互交织，进一步加剧混凝土的劣化[33]。因此该方向的深入研究不仅有助于揭示硫氯耦合侵蚀机理，也将提升盐渍环境下混凝土长期服役性能的预测准确性。

1.1.3　钙溶蚀与氯离子侵蚀共同作用机理　　在恶劣环境下，除了外界有害物质侵入混凝土外，水泥水化体系中的钙离子也可能发生溶出[34]。如图 4 所示，混凝土体系暴露于高浓度氯离子、低浓度钙离子环境中。从多尺度角度来看，氢氧化钙的溶解及 C–S–H 凝胶的脱钙作用在微观层面破坏了水化产物的结构稳定性，导致孔隙壁逐渐溶蚀、凝胶孔向毛细孔转化，孔隙结构发生粗化。随着微观孔隙的扩展和连通，细观尺度上的有效扩散通道数量增加，孔隙率及渗透性显著提升，从而加速外界氯离子等有害离子的侵蚀。在宏观层面，这一过程表现为混凝土整体致密性下降、氯离子侵入深度增加以及钢筋周围环境逐渐失去碱性保护，最终导致钢筋腐蚀风险显著提升[35]。Tang 等[36]研究了钙溶蚀对氯离子扩散性的影响，结果表明钙溶蚀不仅会提高氯离子的扩散速率，还会降低氯离子的结合能力。Zou 等[37]通过实验与数值模拟研究了混凝土在富含硫酸盐环境下的溶蚀现象，发现硫酸盐离子可加速钙离子的溶解。

值得一提的是，钙离子往往作为有害离子侵蚀与水泥水化产物物化反应的桥梁，在涉及钙离子的耐久性病害中，往往伴随多种离子的共同作用以及材料组分的演化。因此有学者采用能够综合考虑混凝土中多种离子在多组分固相体系中的传输、交换与反应过程的“双多模型”[38]对耦合钙溶蚀与氯离子侵蚀开展了数值模型工作[39]。结果表明，多离子

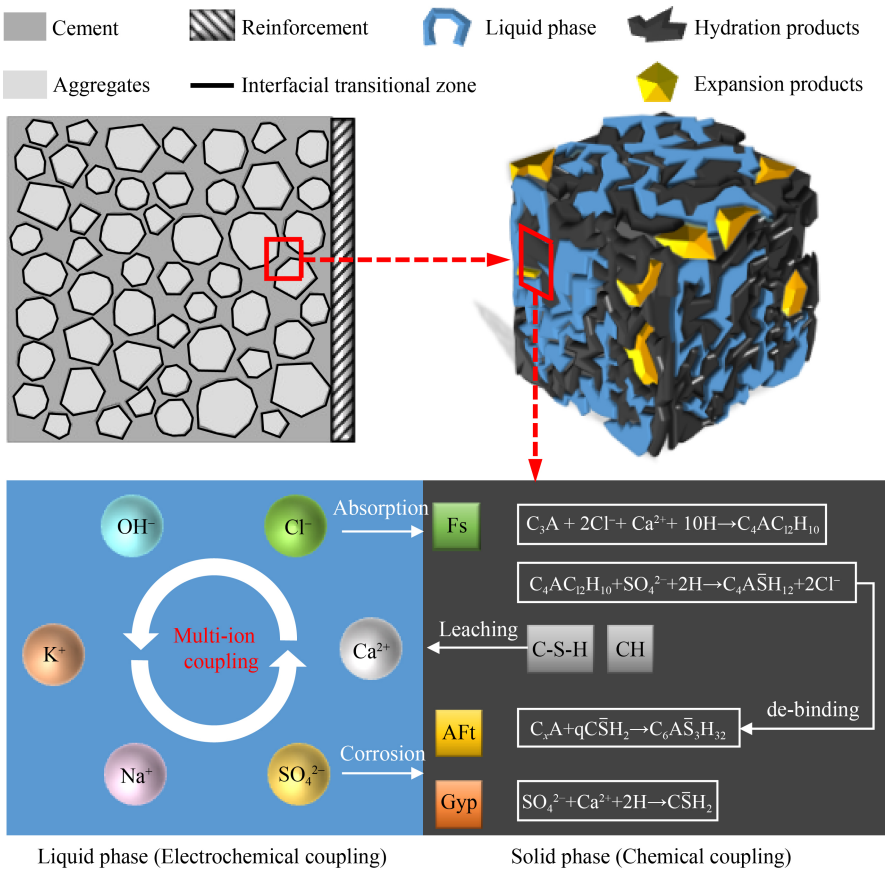


图 3 硫氯耦合侵蚀化学–电化学耦合模型示意图(改编自文献[32])

Fig. 3 Schematic diagram of chemical and electrochemical coupling model for combined sulfate–chloride attack (adapted from literature [32])

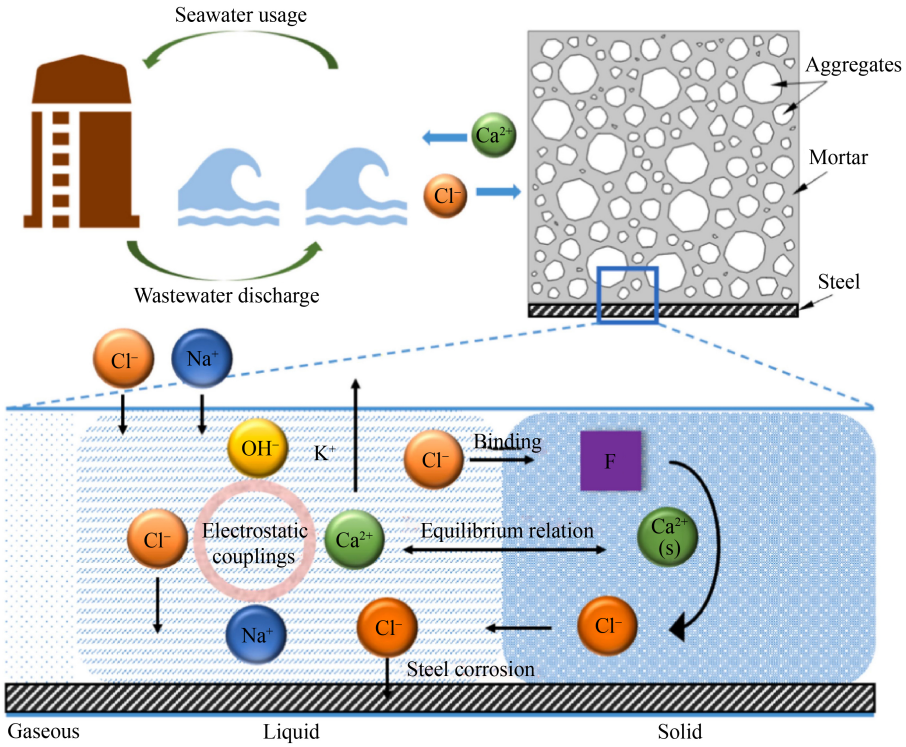


图 4 钙溶蚀与氯盐侵蚀下多离子耦合机制(改编自文献[39])

Fig. 4 Mechanisms of combined calcium leaching, chloride transport and multi-ion couplings attack (adapted from literature [39])

耦合效应所导致的静电势场在初期会促进钙溶蚀过程，而在后期则会对钙溶解产生一定的抑制作用。

1.2　物理过程主导的多病害耦合机制

物理过程主导的耐久性损伤会造成混凝土开裂和孔隙率上升等几何层面的显著变化，并与有害介质渗透相互影响，机理复杂且缺乏系统性表征方法。以冻融循环、荷载损伤为代表的物理类耐久性损伤过程会显著改变离子传输路径与速度，而盐类侵蚀又会加速裂缝扩展与孔隙劣化，形成负反馈循环，使多病害协同作用下的耐久性预测更具挑战。本小节将重点综述氯离子侵蚀与冻融损伤、荷载开裂共同作用机理，分析相关数值模型研究成果，并讨论现有方法的适用性与不足，为建立更精确的耐久性劣化预测模型提供参考。

1.2.1　冻融损伤与氯离子侵蚀共同作用机理　　对于建造在中高纬度海洋环境或融雪盐环境下的混凝土结构，它们极易受到冻融循环与氯离子侵蚀的协同作用，导致耐久性显著降低[40]。冻融损伤主要表现为孔隙损伤与微裂缝扩展，这不仅会显著改变氯离子传输路径与速度，且有害物质侵蚀又会进一步加速孔隙劣化与裂缝扩展[41]。此外，在超低温环境下，冻融循环还会引发 C–S–H 组分的不稳定性，进而导致混凝土力学性能劣化[42]。从孔隙结构演化的角度来看，Li 等[43]研究了氯离子扩散系数随冻融循环次数的变化，并提出了耦合加速系数，用于定量表征冻融损伤对氯离子扩散的促进效应。这一研究为深入理解冻融损伤与氯离子侵蚀的耦合机理提供了理论支持。在此基础上，Jiang 等[44]进一步引入时间相关的孔隙率变量，建立了冻融循环与氯离子侵蚀耦合劣化模型，从动力学角度揭示了混凝土在复杂环境中的服役性能退化规律。为提升模型预测精度，研究者还结合灰色关联分析与贝叶斯方法，对关键参数的影响及氯离子侵入规律进行了深入分析[45]。研究结果不仅加深了对多重劣化机制作用下混凝土耐久性的理解，还为复杂环境中混凝土结构的寿命预测提供了新的思路。本课题组进一步考虑了冻融循环(FTC)引起的裂缝扩展以及冻融循环导致的冻结效应，建立了耦合温度变化、盐溶液浓度和冻结速率的数值模型(图 5)[46, 47]。研究表明，尽管较高的盐浓度会降低孔隙内的冻结速率，但整体上仍然加剧了氯离子的渗透，从而进一步恶化混凝土的耐久性。这一发现为冻融环境下混凝土耐久性预测与防护措施的改进提供了一定的理论参考。

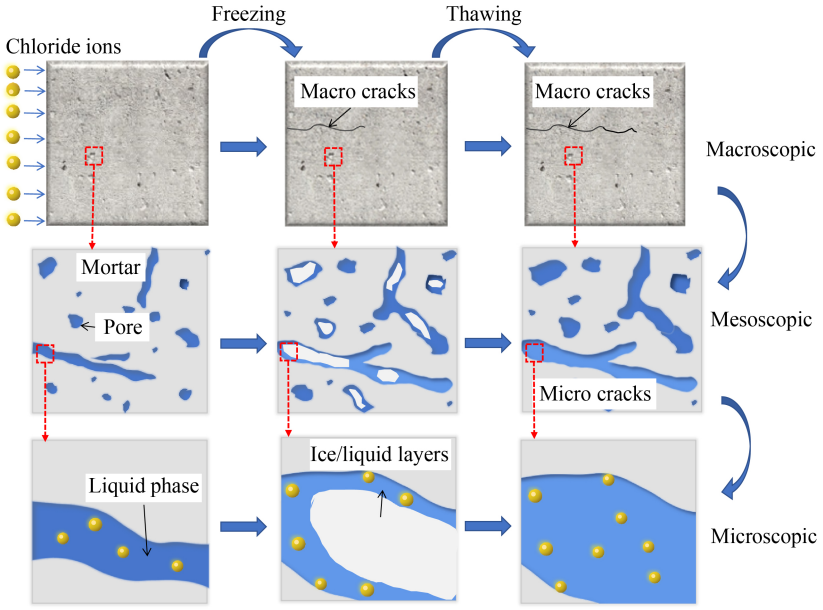


图 5　冻融循环与氯离子侵蚀双重作用下混凝土损伤示意图(改编自文献[46])

Fig. 5　Schematic diagram of concrete damaged under the dual attack of freeze-thaw cycles and chloride ingress (adapted from literature [46])

1.2.2　荷载开裂与氯离子侵蚀共同作用机理　　荷载导致的裂缝也会为氯离子侵蚀提供便利通道。实验观察和数值模型结果均表明，裂缝的存在会显著改变氯离子在混凝土中扩散行为，以及与其他离子间的电化学耦合强度[48, 49]。相关研究表明，荷载的增加也会导致混凝土中的氢氧化钙含量的减少和结合氯离子浓度的增加[50]。Šavija 等[51]提出了格构模型来研究裂缝对氯离子迁移的影响，研究结果显示，

在外加电场作用下，裂缝的存在会显著增加氯离子侵蚀深度。

多数模型采用单向耦合方法，即首先计算裂缝的形成过程，然后将裂缝作为输入参数，进一步计算氯离子的侵入。然而，值得注意的是，混凝土开裂与氯离子侵蚀均为随时间演化的过程，并在相似的时间尺度内相互作用。因此实现二者的双向耦合仍然面临较大挑战。其主要难点在于，要真正实现裂缝扩展与氯离子侵蚀的耦合，裂缝的传播过程必须在几何层面上实时更新，导致计算模型的几何形态不断变化，而这种动态几何变化会对网格质量和数值计算的收敛性产生一系列不利影响[52]。为解决这一问题，有学者采用分阶段耦合的方法，将该耦合过程划分为多个时间阶段，并通过统计学习方法实现各阶段之间的信息传递(图 6)，以建立裂缝扩展与氯离子侵蚀的内在联系[53]。然而，这种方法仍然是一种折中方案，其预测精度高度依赖于阶段划分的数量。因此，未来研究需实现更精确的裂缝扩展与氯离子传输的动态耦合，提升耐久性预测的可靠性和计算效率。

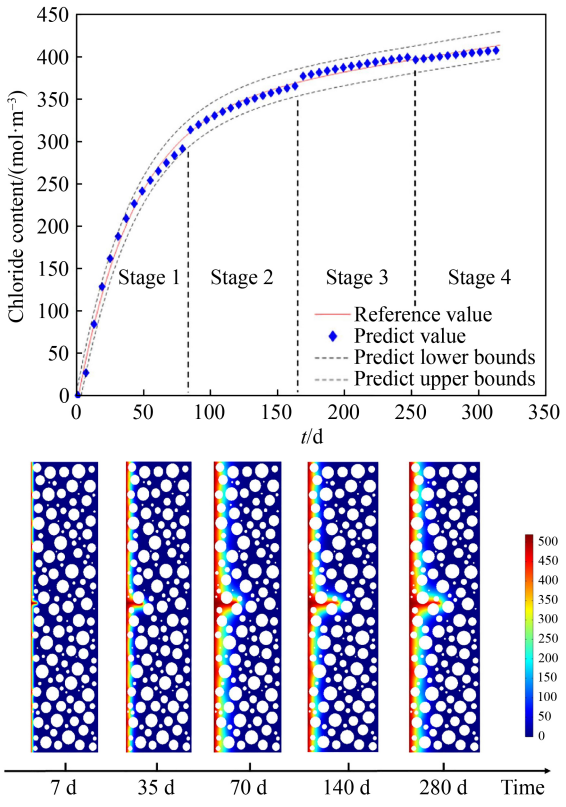


图 6 基于统计学习方法的裂缝开展下氯离子侵蚀耦合模型(改编自文献[53])

Fig. 6 Coupled chloride ingress and crack propagation model based on statistical learning (adapted from literature [53])

2 混凝土耐久性预测模型现存挑战

从近年来混凝土耐久性领域丰硕的研究成果可以看出，随着计算机科学与数值技术的发展，混凝土耐久性劣化数值模型在理论与工程应用中均取得了显著进展。然而，由于混凝土的非均质性、复杂的环境因素以及多种物理化学耦合作用，预测其耐久性劣化过程仍面临诸多挑战，进而对混凝土结构整体耐久性能的评估带来显著不确定性。

首先，尽管现有技术可以实现混凝土材料非均质性及微观结构演化的精细化建模[54]，X 射线计算机断层扫描[55]、三维颗粒接触检测算法[56]和 ITZ 局部–全局特征演化[57]等技术方法被相继提出。但总体而言，模型仍受限于尺度和复杂性，难以直接应用于结构尺度的混凝土耐久性预测。另外，虽然孔隙结构演变、ITZ 及裂缝扩展的几何表征已取得一定进展，但随着氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀、冻融循环等耐久性病害的发生，孔隙和 ITZ 的损伤效应等尚未得到精确表征。也有学者尝试从混凝土早龄期性能入手，以预测其长期耐久性劣化行为。有研究表明，混凝土在振捣过程中产生的粗骨料沉降及其相关流变特性，会显著影响后期氯离子传输等关键耐久性过程，为建立早期特性与长期劣化之间的关联提供了思路[58]。

其次，混凝土耐久性劣化涉及物理、化学和力学等多个过程，通常表现为离子迁移–水分传输–化学反应–应力损伤等多物理场的相互作用。多尺度方法通过将多粒子反应传输、水化产物反应、微观孔隙结构、介观裂缝演化与宏观结构性能进行有机结合，为耐久性预测提供了更全面的模型框架。然而，多尺度模型仍面临多尺度参数传递有效性、计算成本高，和实验验证困难等问题。

另外，混凝土耐久性损伤往往是多种病害协同作用的结果，并且还涉及服役环境、荷载作用等长期因素。传统的理论框架难以准确描述这些复杂过程，基于实验参数拟合和经验性修正的预测方法难以支撑可靠的长期性能评估与科学的耐久性预测。现有的耐久性劣化预测模型大多聚焦于单一耐久性问题，并基于加速实验数据进行外推，缺乏对长期服役数据的动态评估，对与多种耐久性病害之间的耦合效应缺乏关注。目前，贝叶斯更新、概率统计模型及人工智能技术在耐久性预测中的应用已初见成效[59]。例如，Feng 等[60]基于反向传播神经网络建立了基于混凝土配合比信息的耐久性预测模型。本

课题组前期采用人工神经网络(ANN)技术提出了混凝土氯离子扩散系数的预测模型[61]。Ashraf 等[62]采用基因表达编程(GEP)方法，并综合考虑经济与环境因素，建立了可同时预测可持续混凝土力学性能与耐久性能的模型。然而，当前方法仍需进一步优化以解决长期服役数据获取受限导致的模型泛化能力不足，以及只能对单一病害无法适应多病害耦合作用等问题。

尽管存在诸多挑战，但若上述耐久性劣化预测模型的关键技术瓶颈能够取得突破，可极大推动混凝土耐久性预测工作的进展。混凝土耐久性预测不仅关注材料在局部区域的损伤演化，更关注结构整体在实际服役环境下的长期性能表现，包括功能退化、使用寿命和安全性等。因此，劣化机制模型的完善、数据获取能力的提升以及多尺度模型之间的有效联通，对于实现系统性的耐久性预测具有重要意义。同时应注意，不同类型的混凝土体系及不同掺合材料对耐久性演化路径和服役行为具有显著影响[21]。因此，耐久性预测模型的发展亦需因材料体系和工程应用环境的不同而进行针对性优化，进而提升其实用性与准确性。

3　结论与展望

近年来，混凝土中离子传输、耐久性劣化模型和服役寿命预测等领域进展显著，为混凝土行业的可持续发展提供了有力支持。本文综述了该领域的最新进展，并探讨了混凝土耐久性多病害耦合劣化机理和耐久性预测方面的研究机遇与挑战。

1) 多病害劣化数值模型的耦合程度方面仍有很大的优化空间。特别是在裂缝扩展与离子传输的双向耦合方面，过往研究尚未能在相同时间尺度上实现精准模拟。混凝土孔隙结构的演变，以及不同耐久性病害作用下孔隙率的变化同样需要更深入的探讨。裂缝扩展和孔隙结构演化二者对物质输运和耐久性病害发展的共同影响，也有待通过数值计算方法进行更系统的量化。此外，环境因素如温度、湿度和风化作用对耐久性演化的影响仍缺乏准确的物理和数学表征。

2) 多病害耦合劣化数值预测模型几何维度有待提高。由于多离子耦合、化学与电化学反应，以及水化产物相互作用的高度非线性，目前针对多离子迁移、化学反应和混凝土非均质性的三维数值模型仍然较为有限。优化计算算法并引入创新的建模方法，可能是解决这一技术难题的关键。同时，计算机辅助技术的不断进步，使得将二维模型升级为更准确、更具代表性的高维模型成为可能，从而提升耐久性预测的准确性和适用性

3) 多病害作用下的耐久性研究范围仍需进一步扩展，包括从宏观结构到微观层面的研究，以及从混凝土早龄期性能到长期服役行为的系统分析。许多宏观耐久性劣化现象往往难以直接用微观机理解释，因此深入理解不同劣化机制及其相互作用，将微观耐久性劣化机理与宏观结构力学性能相结合，将有助于建立更精准的预测和评估方法。同时，探索早龄期流变性能与最终耐久性劣化之间的关联，在提升服役寿命预测精度方面也有待更多尝试。

4) 当前多病害耐久性研究仍主要集中在传统混凝土，而随着碱活性胶凝材料、高性能混凝土以及绿色可持续混凝土的广泛应用，这些新型混凝土的耐久性问题逐渐受到关注。然而，由于其化学组成和制备工艺与传统混凝土存在较大差异，现有的耐久性劣化预测模型难以直接适用，特别是在离子传输、耐久性劣化机理和耐久性预测等方面，新型混凝土可能表现出不同的特性。因此，未来需要针对这些新材料的耐久性机理问题开展深入研究，以提升其长期服役性能的预测能力，并推动其更好的运用于工程实践。

参考文献:

[1] 牛荻涛, 孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1094–1099.
NIU Ditao, SUN Congtao. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(8): 1094–1099.

[2] 吴萌, 张云升, 刘志勇, 等. 水泥基材料碳硫硅钙石型硫酸盐侵蚀的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2270–2283.
WU Meng, ZHANG Yunsheng, LIU Zhiyong, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2270–2283.

[3] 姜文镟, 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. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(2): 258–272.

[4] JIN L, XU J D, ZHANG R B, et al. Numerical study on the impact performances of reinforced concrete beams: A mesoscopic simulation method[J]. Eng Fail Anal, 2017, 80: 141–163.

[5] LIU Q F. Progress and research challenges in concrete durability: Ionic transport, electrochemical rehabilitation and service life prediction[J]. RILEM Tech Lett, 2022, 7: 98–111.

[6] 刘清风. 基于多离子传输的混凝土细微观尺度多相数值模拟[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1074–1080.
LIU Qingfeng. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1074–1080.

[7] 周宇, 刘清风. 三维混凝土细观模型构建与骨料形态对氯离子扩散影响的数值研究[J]. 材料导报, 2023, 37(24): 171–177.
ZHOU Yu, LIU Qingfeng. Mater Rep, 2023, 37(24): 171–177.

[8] 穆松, 刘建忠. 基于混凝土裂缝特征的氯离子传输性质研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(6): 829–838.

MU Song, LIU Jianzhong. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(6): 829–838.

[9] 金祖权, 赵铁军, 陈惠苏, 等. 海洋环境下裂缝混凝土氯盐腐蚀[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2821–2826.
JIN Zuquan, ZHAO Tiejun, CHEN Huisu, et al. J Cent South Univ Sci Technol, 2012, 43(7): 2821–2826.

[10] SMITH J, VIRMANI Y P. Materials and methods for corrosion control of reinforced and prestressed concrete structures in new construction[R]: United States. Federal Highway Administration, 2000.

[11] 侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(6): 601–609.
HOU Baorong, LU Dongzhu. Bull Chin Acad Sci, 2018, 33(6): 601–609.

[12] DE OLIVEIRA PEREIRA V C, MONTEIRO E C B, DA SILVA ALMEIDA K. Influence of cement type in reinforcement corrosion of mortars under action of chlorides[J]. Constr Build Mater, 2013, 40: 710–718.

[13] AMIN M T E, SARKER P K, SHAIKH F U A, et al. Chloride permeability and chloride-induced corrosion of concrete containing lithium slag as a supplementary cementitious material[J]. Constr Build Mater, 2025, 471: 140629.

[14] ŠAVIJA B, LUKOVIĆ M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities[J]. Constr Build Mater, 2016, 117: 285–301.

[15] HOUST Y F, WITTMANN F H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(12): 1923–1930.

[16] SURYAVANSHI A K, NARAYAN SWAMY R. Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements[J]. Cem Concr Res, 1996, 26(5): 729–741.

[17] SHEN X H, LIU Q F, HU Z, et al. Combine ingress of chloride and carbonation in marine-exposed concrete under unsaturated environment: A numerical study[J]. Ocean Eng, 2019, 189: 106350.

[18] RIMMELÉ G, BARLET-GOUÉDARD V, PORCHERIE O, et al. Heterogeneous porosity distribution in Portland cement exposed to CO_2-rich fluids[J]. Cem Concr Res, 2008, 38(8–9): 1038–1048.

[19] SAETTA A V, SCHREFLER B A, VITALIANI R V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials[J]. Cem Concr Res, 1993, 23(4): 761–772.

[20] SHEN X H, JIANG W Q, HOU D S, et al. Numerical study of carbonation and its effect on chloride binding in concrete[J]. Cem Concr Compos, 2019, 104: 103402.

[21] WANG L R, TONG L Y, DAI J G, et al. Durability of seawater and sea sand concrete under combined carbonation and chloride attack: A numerical study[J]. Constr Build Mater, 2026, 507: 144519.

[22] TONG L Y, LIU Q F, XU X, et al. Effect of carbonation on transport properties of cementitious materials under different environmental conditions: A pore-scale modelling[J]. J Clean Prod, 2025, 490: 144669.

[23] 童良玉, 刘清风. 碳化对水泥基材料孔径分布及渗透速率影响的数值研究[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(10): 879–886.
TONG Liangyu, LIU Qingfeng. J Build Mater, 2024, 27(10): 879–886.

[24] GENG J, EASTERBROOK D, LIU Q F, et al. Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride-contaminated concrete[J]. Mag Concr Res, 2016, 68(7): 353–363.

[25] CHEN Z, YU J M, BINDIGANAVILE V, et al. Time and spatially dependent transient competitive antagonism during the 2-D diffusion-reaction of combined chloride-sulphate attack upon concrete[J]. Cem Concr Res, 2022, 154: 106724.

[26] IKUMI T, SEGURA I. Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review[J]. Cem Concr Res, 2019, 121: 91–105.

[27] JIN Z Q, SUN W, ZHANG Y S, et al. Interaction between sulfate and chloride solution attack of concretes with and without fly ash[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(8): 1223–1232.

[28] WANG P G, MO R, LI S, et al. A chemo-damage-transport model for chloride ions diffusion in cement-based materials: Combined effects of sulfate attack and temperature[J]. Constr Build Mater, 2021, 288: 123121.

[29] 张成琳, 刘清风. 钢筋混凝土中氯盐和硫酸盐耦合侵蚀研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(1): 69–77.
ZHANG Chenglin, LIU Qingfeng. Mater Rep, 2022, 36(1): 69–77.

[30] YU Y G, GAO W, FENG Y, et al. On the competitive antagonism effect in combined chloride-sulfate attack: A numerical exploration[J]. Cem Concr Res, 2021, 144: 106406.

[31] ZHANG C L, CHEN W K, MU S, et al. Numerical investigation of external sulfate attack and its effect on chloride binding and diffusion in concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 285: 122806.

[32] MENG Z Z, LIU Q F, UKRAINCZYK N, et al. Numerical study on the chemical and electrochemical coupling mechanisms for concrete under combined chloride-sulfate attack[J]. Cem Concr Res, 2024, 175: 107368.

[33] 计洌, 刘清风. 硫-氯耦合侵蚀和钙溶蚀作用下混凝土中物质传输与反应机理的数值研究[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(5): 1486–1498.
JI Lie, LIU Qingfeng. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(5): 1486–1498.

[34] DE LARRARD T, BENBOUDJEMA F, COLLIAT J B, et al. Concrete calcium leaching at variable temperature: Experimental data and numerical model inverse identification[J]. Comput Mater Sci, 2010, 49(1): 35–45.

[35] WANG Y, YUAN Q, DENG D H. Modelling calcium leaching kinetics of cement asphalt paste[J]. Mater Struct, 2018, 51(5): 133.

[36] TANG Y J, ZUO X B, YIN G J, et al. Influence of calcium leaching on chloride diffusivity in cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2018, 174: 310–319.

[37] ZOU D J, ZHANG M, QIN S S, et al. Calcium leaching from cement hydrates exposed to sodium sulfate solutions[J]. Constr Build Mater, 2022, 351: 128975.

[38] LIU Q F, EASTERBROOK D, YANG J, et al. A three-phase, multi-component ionic transport model for simulation of chloride penetration in concrete[J]. Eng Struct, 2015, 86: 122–133.

[39] LIU Q F, SHEN X H, ŠAVIJA B, et al. Numerical study of interactive ingress of calcium leaching, chloride transport and multi-ions coupling in concrete[J]. Cem Concr Res, 2023, 165: 107072.

[40] KESSLER S, THIEL C, GROSSE C U, et al. Effect of freeze–thaw damage on chloride ingress into concrete[J]. Mater Struct, 2016, 50(2): 121.

[41] WANG L C, UEDA T. Mesoscopic simulation of chloride ions diffusion in frost-damaged concrete[J]. Int J Model Identif Control, 2009, 7(2): 148.

[42] ZHU X P, REN Q, HE B, et al. Upscaling degradation of cementitious calcium (aluminate) silicate hydrate upon ultra-low temperature attack: A multiscale insight and a bottom-up enhancement route[J]. Compos Part B Eng, 2022, 243: 110122.

[43] LI B, MAO J Z, NAWA T, et al. Mesoscopic chloride ion diffusion

model of marine concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Constr Build Mater, 2016, 125: 337–351.

[44] JIANG W Q, SHEN X H, XIA J, et al. A numerical study on chloride diffusion in freeze-thaw affected concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 179: 553–565.

[45] JIANG W Q, SHEN X H, HONG S X, et al. Binding capacity and diffusivity of concrete subjected to freeze-thaw and chloride attack: A numerical study[J]. Ocean Eng, 2019, 186: 106093.

[46] LI L J, LIU Q F, TANG L P, et al. Chloride penetration in freeze–thaw induced cracking concrete: A numerical study[J]. Constr Build Mater, 2021, 302: 124291.

[47] 李林洁, 刘清风. 冻融循环下混凝土内部结冰及氯离子传输规律的数值研究[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2245–2256.
LI Linjie, LIU Qingfeng. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2245–2256.

[48] ŠAVIJA B, PACHECO J, SCHLANGEN E. Lattice modeling of chloride diffusion in sound and cracked concrete[J]. Cem Concr Compos, 2013, 42: 30–40.

[49] LIU Q F, YANG J, XIA J, et al. A numerical study on chloride migration in cracked concrete using multi-component ionic transport models[J]. Comput Mater Sci, 2015, 99: 396–416.

[50] LIU Z Y, JIANG J Y, YU W H, et al. Effect of load-temperature-osmotic coupling on chloride ion transport in ultrahigh-performance concrete: Experiments and models[J]. J Mater Civ Eng, 2024, 36(10): 04024297.

[51] ŠAVIJA B, LUKOVIĆ M, SCHLANGEN E. Lattice modeling of rapid chloride migration in concrete[J]. Cem Concr Res, 2014, 61: 49–63.

[52] PENG C, WU Q, SHEN J, et al. Numerical study on the effect of transverse crack self-healing on the corrosion rate of steel bar in concrete[J]. J Build Eng, 2021, 41: 102767.

[53] LIU Q F, HU Z, WANG X E, et al. Numerical study on cracking and its effect on chloride transport in concrete subjected to external load[J]. Constr Build Mater, 2022, 325: 126797.

[54] 施惠生, 孙丹丹, 吴凯. 混凝土界面过渡区微观结构及其数值模拟方法的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(5): 678–685.
SHI Huisheng, SUN Dandan, WU Kai. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(5): 678–685.

[55] REN W Y, YANG Z J, SHARMA R, et al. Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete[J]. Eng Fract Mech, 2015, 133: 24–39.

[56] XU W X, CHEN H S. Mesostructural characterization of particulate composites *via* a contact detection algorithm of ellipsoidal particles[J]. Powder Technol, 2012, 221: 296–305.

[57] GAO X, LIU Q F, CAI Y X, et al. A new model for investigating the formation of interfacial transition zone in cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2025, 187: 107675.

[58] CAI Y X, LIU Q F, MENG Z Z, et al. Influence of coarse aggregate settlement induced by vibration on long-term chloride transport in concrete: A numerical study[J]. Mater Struct, 2022, 55(9): 235.

[59] LIU Q F, HU Z, LU X Y, et al. Prediction of chloride distribution for offshore concrete based on statistical analysis[J]. Materials, 2020, 13(1): 174.

[60] FENG Q, XIE X Y, WANG P H, et al. Prediction of durability of reinforced concrete based on hybrid-Bp neural network[J]. Constr Build Mater, 2024, 425: 136091.

[61] LIU Q F, IQBAL M F, YANG J, et al. Prediction of chloride diffusivity in concrete using artificial neural network: Modelling and performance evaluation[J]. Constr Build Mater, 2021, 268: 121082.

[62] ASHRAF M, IQBAL M F, RAUF M, et al. Developing a sustainable concrete incorporating bentonite clay and silica fume: Mechanical and durability performance[J]. J Clean Prod, 2022, 337: 130315.

A Review of Numerical Modelling for Predicting Concrete Durability Degradation under Multiple Deterioration Mechanisms

LIU Qingfeng[1], *MENG Zhaozheng*[1,2]

(1. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft 2628 CN, Zuid-Holland, Netherlands)

Extended Abstract

Concrete durability has become a central concern in civil engineering as structures are increasingly exposed to complicated and aggressive environments. In practical service conditions such as marine tidal zones, cold regions, sulfate-rich soils, or industrial atmospheres, deterioration rarely occurs in isolation. Instead, chloride ingress, carbonation, sulfate attack, calcium leaching, freeze–thaw damage, and load-induced cracking often coexist and interact on multiple physicochemical and geometric levels. These complex processes alter transport behavior, pore structures, chemical equilibria, and mechanical integrity, resulting in highly nonlinear deterioration that accelerates beyond the sum of individual mechanisms. As conventional models cannot fully capture such synergistic effects, advanced numerical modelling has emerged as a vital tool for durability prediction under multi-deterioration scenarios .

This paper reviews recent progress in modelling durability degradation under multiple deterioration mechanisms, with emphasis on both chemically driven and physically driven coupling effects. In chemically dominated degradation, chloride ingress is recognized as the most rapid and detrimental process, and it is strongly modified by concurrent chemical reactions. The interaction between carbonation and chloride transport is particularly complex: carbonation can decompose chloride-binding phases, releasing previously bound chlorides, while simultaneously refining the pore structure through calcium carbonate precipitation. Numerical models incorporating carbonation rate, degree, and pore structure evolution have enabled more accurate quantification of chloride distribution in fully carbonated and partially carbonated regions. Similarly, for combined sulfate–chloride attack, competitive adsorption and expansion-induced microcracking play decisive roles. Thermodynamic equilibrium models and reaction-kinetic models have been used to capture the competition among ions, the formation of expansive products, and the resulting effects on transport properties.

These approaches highlight the necessity of considering multi-ion coupling and electrochemical interactions when assessing deterioration severity. Calcium leaching represents another critical chemical mechanism that strongly influences chloride behavior. The dissolution of calcium-bearing hydrates coarsens the microstructure, increases pore connectivity, and reduces binding capacity, thereby accelerating chloride ingress. Multi-ionic transport frameworks have been adopted to simulate these processes, showing that electrochemical coupling initially promotes leaching but later tempers its progression as chemical gradients evolve. Such findings emphasize the importance of capturing time-dependent feedback within reactive transport models.

On the physically driven side, processes such as freeze–thaw damage and load-induced cracking profoundly alter the geometric pathways of ionic transport. Freeze–thaw cycles induce pore dilation, microcracking, and structural weakening, forming preferential channels for chloride ingress. Models coupling thermal transfer, moisture and ionic transport have shown that although higher salt concentrations reduce freezing rates, the overall deterioration remains accelerated due to increased permeability. The synergistic effects of freeze–thaw damage and chloride transport thus demand integrated modelling strategies capable of representing dynamic pore evolution. Load-induced cracking also creates high-permeability pathways that significantly influence harmful ions transport. Mesoscale lattice models, multi-ionic models, and other models have demonstrated that crack width, shape, and orientation govern diffusion and migration behavior. However, establishing fully bidirectional coupling, where chloride ingress promotes crack propagation and crack propagation further accelerates chloride ingress, remains an unresolved challenge. Existing methods rely on staged or quasi-coupled approaches, often assisted by statistical learning, yet true geometric updating during crack evolution is still computationally difficult. This limitation highlights a critical frontier for future numerical modelling.

Summary and Prospects Research on durability degradation under multiple deterioration mechanisms has made remarkable progress, yet several breakthroughs are needed to achieve reliable long-term predictions. First, advancing the coupling of multi-mechanism models is essential. The mutual interactions between crack propagation and ionic transport, as well as pore-structure evolution under multiple deterioration modes, requires future numerical models that can dynamically update geometry and transport properties over time. More comprehensive physical representations of environmental effects such as temperature, humidity, salt concentration, freeze–thaw intensity will further enhance predictive accuracy. Second, there is an urgent need to improve the geometric dimensionality and computational efficiency of multi-scale, multi-physics frameworks. High-resolution three-dimensional modelling is still limited for multi-ion systems due to nonlinear chemical reactions and the complexity of heterogeneous microstructures. Future work should focus on algorithm optimization, parallel computing, and innovative discretization schemes to enable large-scale simulations with realistic material characteristics. Third, the scope of durability research must expand across both spatial and temporal scales. Linking micro-level deterioration mechanisms with macro-scale structural performance remains a key challenge, particularly for reinforced concrete exposed to multiple aggressive agents. Early-age behavior, interfacial transition zone development, and long-term interaction between mechanical and chemical processes should also be considered into lifecycle-oriented predictive frameworks. Finally, as sustainable and alternative binders such as alkali-activated materials and high-performance composite cements become more prevalent, existing models must be adapted or reconceptualized to accommodate their unique microstructure, chemical composition, and transport properties. Understanding multi-deterioration behavior in these emerging materials will be essential for their safe and widespread engineering application. Overall, progress in numerical modelling, strengthened by data-driven techniques, multi-scale experiments, and advanced characterization methods, is expected to transform our ability to predict durability degradation under complex service conditions. These advances will ultimately support the development of more resilient, sustainable, and long-lasting concrete structures.

Keywords concrete durability; multi-disease coupling; degradation mechanism; multi-ion transport; numerical model