第 48 卷第 2 期
2020 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 2
February，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190276

综 合 评 述

冻融循环下混凝土中氯离子传输研究进展

姜文镪[1,2]，刘清风[1,2]

(1. 上海交通大学，海洋工程国家重点实验室，上海 200240；
2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室，辽宁大连 116023)

摘 要：钢筋混凝土结构遭受氯盐侵蚀和冻融循环的共同作用时，其耐久性能会迅速降低。本文针对冻融循环下混凝土中氯离子传输过程，从混凝土物理性能、氯离子传输性能和保护措施 3 个方面总结相关研究成果。冻融循环过程中混凝土损伤分为两个阶段，两阶段损伤理论可以较好描述冻融损伤初始和扩散阶段。结合实验可量化氯盐侵蚀和冻融循环双重作用下混凝土的损伤程度，冻融损伤和氯离子扩散系数之间的关系能够有效描述冻融循环对氯离子传输的加速效应，以此为基础可探究各影响因素对冻融循环下混凝土中氯离子传输性能的影响。但是目前的研究结果、规律多为实验室条件下获得，对于定量评估实际混凝土结构的寿命仍有局限性。最后介绍了 3 种常见的防护方法，分别是表面处理、电化学修复/防护技术以及添加掺合料，并对未来该领域的发展方向从实验、理论和模型三方面进行展望。

关键词：混凝土；氯离子；冻融循环；物理性能损伤；保护措施
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)02–0258–15
网络出版时间：2019–12–12

Chloride Transport in Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycles – A Short Review

JIANG Wen-qiang[1,2], *LIU Qing-feng*[1,2]
(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Shanghai 200240, China;
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: The durability of the concrete under salt-freezing environment is rapidly degraded due to the coupling effect. In this review, the research results of chloride transport under freeze-thaw cycles were summarized according tothe mechanical behavior, the diffusivity of chloride and several protective measurements. In freeze-thaw action, the concrete damage could be divided into two stages, and the two-stage damage theory was proposed to describe the initial and diffusion of damage, respectively. Some experimental methods were used to quantitatively investigate the damage degree of concrete. The relationships between damage degree and diffusion coefficient wereestablished to deal with the acceleration effect of freeze-thaw cycle on chloride transport. The influence of influencing factors on the chloride transport under freeze-thaw cycle was investigated. The existing studies are mostly obtained from lab-scale experiments, thus restricting the quantitative evaluation of the life of actual concrete structures. A series of protective measures, such as surface treatment, electrochemical rehabilitation/protection and addition of admixture were proposed, and afuture research direction in this field was discussed based on three aspects, *i.e*., experiment, theory and modelling.

Keywords: concrete; chloride transport; freeze-thaw cycles; mechanical behavior; protective measures

我国拥有广阔的滨海和沿江区域，这些地区建有大量的钢筋混凝土结构建筑物和基础设施。氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀以及由此引发的混凝土保护层开裂现象在这些结构中层出不穷，严重影响使用寿命[1–5]。而在同时存在氯盐侵蚀和冻融循环作用的地区，钢筋混凝土结构受到冻融循环作用时，内部出

收稿日期：2019–04–25。　修订日期：2019–08–03。
基金项目：国家自然科学基金项目(51978396)；中国科协青年人才托举计划(2018QNRC001)项目；上海市“青年科技启明星计划”(19QA1404700)项目。
第一作者：姜文镪(1994—)，男，硕士研究生。
通信作者：刘清风(1986—)，男，博士，副教授，博士研究生导师。

Received date: 2019–04–25.　**Revised date:** 2019–08–03.
First author: JIANG Wenqiang (1994–), male, Master candidate.
E-mail: wqjiang11@163.com
Correspondent author: LIU Qingfeng (1986–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: liuqf@sjtu.edu.cn

现细微观裂缝，进而加速氯离子传输，双重劣化因素的耦合会进一步加快结构耐久性的下降[6–10]。

冻融循环过程中的冻结使混凝土内部孔隙液结冰膨胀，产生静水压、渗透压、膨胀压等应力[11–14]。一旦应力超过混凝土的强度，内部致密性遭到破坏，从而逐渐产生微裂缝，为氯离子提供传输路径[15–16]。随着聚集到钢筋表面的氯离子浓度提升，钝化膜逐渐转变为不稳定状态，钢筋表面生锈。铁锈相对于钢筋有体积膨胀，在混凝土内部再次产生应力，导致裂缝扩展。如图 1 所示，冻融循环导致混凝土出现表面剥落、宏观裂缝等情形，与此同时，氯盐侵蚀也造成了内部钢筋的锈蚀。



图 1　发生在我国北方地区的冻融循环下氯盐侵蚀实例

Fig. 1　Examples of salt–frost damage of structures in north China

冻融循环早期所造成的混凝土微裂缝，加剧了氯盐侵蚀进而严重降低混凝土耐久性[17–19]，人们不得不投入更多维修成本来保证建筑结构能够正常使用。针对这一问题，本文将围绕冻融循环下的混凝土物理性能、氯离子传输性能以及相关保护措施 3 个方面进行综述，并对该领域未来的发展从实验、理论和模型进行展望。

1　混凝土物理性能劣化

1.1　冻融循环下的混凝土物理性能劣化

冻融循环下氯离子传输造成混凝土耐久性能降低，最直观表现即为混凝土物理性能劣化，而冻融循环对混凝土物理性能的作用首当其冲。当混凝土结构遭受冻融循环，内部出现裂纹、孔洞等不可逆破坏，宏观层次上主要表现为混凝土表面剥落、质量损失、动弹性模量损失、强度损失、形变等[20–21]。在这个过程中，冻融可以视为低循环次数的疲劳加载，随着循环次数增加，损伤持续累计，微裂缝逐渐扩张连通成为宏观裂缝。在此过程中，混凝土普遍存在一个性能突降点，一般将冻融损伤过程分为初始和扩散阶段，并建立其两阶段损伤理论。Wei 等采用动弹性模量损失率表征冻融损伤程度 D[22]。

$$D=1-\exp\left[-\frac{k_1 T\sigma_{\max}^2}{3E^2}N\right]\quad 0\le N\le N_{\mathrm{C}} \tag{1}$$

$$D=1-\left[\left(1-D_{\mathrm{C}}\right)^2-\frac{k_2 T\sigma_{\max}}{3E^2}(N-N_{\mathrm{C}})\right]^{\frac{1}{2}}\quad N_{\mathrm{C}}\le N\le N_{\mathrm{U}} \tag{2}$$

其中：k_1 和 k_2 是材料常数，由实验确定；N 是冻融循环次数；N_{C} 是性能突降点；D_{C} 是对应的损伤程度；N_{u} 是最终的冻融循环次数；T 是拉力；$\sigma_{\max}$ 是最大应力；E 是弹性模量。Nili 等从单轴拉伸实验中测量弹性模量比值 $k=E/E_t$，建立 D–N (损伤程度－循环次数)关系，并以 55 组实验检验其可靠性[23]。

$$D=1-\mathrm{e}^{-bN}\quad N\le N_{\mathrm{c}} \tag{3}$$

$$D=1-\sqrt{\frac{1}{k^2}-c\left[N-\frac{\mathrm{Ln}(k)}{b}\right]}\quad N_{\mathrm{c}}\le N\le N_{\mathrm{u}} \tag{4}$$

其中 b 和 c 是常数，由实验数据计算得到。前两位学者主要考虑使用弹性模量或者动弹性模量表征冻融损伤，但在余红发等的研究中发现混凝土弹性模量或者动弹性模量损失只能表征冻融损伤变化的一个阶段，而混凝土微观结构对于混凝土抗冻性能的影响更为密切[24]。Li 等采用 MIP 和 DSC 实验方法，发现 50 次冻融循环为性能突降点，通过迭代建立细观损伤系数，并根据临界破坏孔隙 R'_{c} 建立冻融损伤程度[25]。

$$D=\begin{cases}0 & R_0^N\le R'_{\mathrm{c}}\left(N\le N_{\mathrm{c}}\right)\\ \dfrac{\pi\left(D_0^*+D_1^*+D_2^*+\cdots+D_N^*\right)}{2\left(1+\mu\right)} & R_0^N>R'_{\mathrm{c}}\left(N>N_{\mathrm{c}}\right)\end{cases} \tag{5}$$

式中 D^*_0，D^*_1，D^*_2，D^*_N 分别是第 0，1，2，N 次冻融循环后的损伤程度，μ是混凝土 Poisson 比。

除此之外，部分学者引入“冻融力”的概念表征冻融循环过程中混凝土内部产生的应力，冻结为冻融力加载过程，而融化为冻融力卸载过程。随着冻融循环次数的增加，混凝土内部损伤加重，材料渗透性增加，离子传输过程中产生的静水压力随之降低。因此静水压模型可用于建立冻融循环次数和混凝土损伤程度之间的关系。在静水压模型的基础上，可进一步通过混凝土形变评估损伤程度，建立其和混凝土渗透性之间的关系。Du 等[11]将冻融力简化为水平拉应力，施加到混凝土两侧，分析其形变，从而预测离子传输速率。Gong 等[26]在静水压模型的基础上，通过静水压力快速定量计算混凝土内部离子传输速率。需要注意的混凝土在每一次冻融循环中都经历膨胀和收缩的过程，每一次循环结束，混凝土都会有不可恢复的残余应变，Muttaqin 等基于冻融循环下混凝土单元的塑性变形，引入刚度损失表征破坏系数，从而通过塑性应变预估冻融循环破坏程度 S[27]。

$$S=\alpha\beta K_{\mathrm{o}}C_{\mathrm{o}}(f-f_{\mathrm{p}}) \tag{6}$$

其中：α是有效系数；β是冻融循环破坏系数；K_{o}是破坏系数；C_{o}为 2；f是等效应变；f_{p}是等效塑性应变。

1.2 冻融和盐溶液复合环境中的混凝土物理性能劣化

盐冻破坏是指寒冷地区同时叠加含盐环境，如撒除冰盐或融雪剂、海水和盐碱地等。需要注意的是，仅在融化阶段接触盐溶液，和冻融全过程接触盐溶液对混凝土结构产生的影响不尽相同。本综述的关注重点为冻融全过程接触盐溶液。混凝土遭受冻融循环时若伴随氯盐侵蚀，其物理性能劣化过程将出现变化。第一，盐溶液冰点较低，降低了混凝土内部结冰劣化的可能性。第二，盐溶液渗透过程中混凝土表面和内部出现浓度梯度，一旦受冻，混凝土内部会分层结冰。鉴于水泥基和孔隙液的热膨胀系数不一致，混凝土内外由此产生的应力差会使得破坏力增强。第三，融冰过程中从混凝土内部吸热，产生过冷水。这种过冷水处于不稳定状态，温度持续降低会再次结冰导致混凝土表面剥落，出现质量损失[28]。Li 等[17]实验发现混凝土 150 个冻融循环后表面剥落，粗骨料暴露，产生明显的质量损失。Zhang 等发现在 25~60 次冻融循环之前，普通和高强度混凝土物理性能没有明显的差异，超过此循环次数，普通混凝土出现更明显的表面剥落和质量损失[29]。孙伟等发现冻融循环过程中盐溶液中混凝土表面剥落现象更严重，质量损失是水中 2 倍[30]。

混凝土孔隙结构扩张，产生微裂缝，同样表现为混凝土强度、弹性模量等物理性能下降。总体来看，水灰比 0.4 左右的普通混凝土遭受 100 次冻融循环后，抗压强度和弹性模量下降幅度普遍超过 20%。Zhang 等[29]在普通混凝土上同样施加 100 次冻融循环，抗压强度和弹性模量分别下降了 32%和 24%。Zhang 等[31]对水灰比 0.4 的普通混凝土施加 100 次冻融循环，发现混凝土的抗压强度和动弹性模量分别降低 25%和 22%。郝潞岑等[32]表明 250 次冻融循环后保温混凝土的相对动弹性模量降低至 60%以下。王萧萧等[33]表明相对清水，盐溶液中的质量损失率和相对动弹模量的冻融损伤更严重，并且孔隙率变化更明显。罗大明等综述了在荷载和环境共同作用下，混凝土的抗渗性能、抗离子侵蚀，以及抗冻融循环作用方面的研究成果[34]。王振地等在快速冻融循环与氯盐侵蚀作用下发现混凝土基体变形呈非线性且应变–温度曲线有滞回现象[35–36]。

部分学者通过实验量化混凝土冻融损伤，并建立冻融损伤和不同影响因素之间的关系。Penttala 等在盐溶液中采用 CIF/CDF 试验，建立冻融损伤程度 D 和水灰比 r、含气量 A 以及养护时间 B 的关系[37]。

$$D=a+b\cdot[r^c/A^d/B^{\mathrm{e}}] \tag{7}$$

其中：a、b、c、d、e 是常数。Amini 等分别建立质量损失 W_{loss}、抗压强度损失$\Delta\sigma$与冻融循环次数 N，水灰比W和与盐溶液浓度相关变量S之间的关系[38]。

$$W_{\mathrm{loss}}=0.887N+479.379W+26.122S-216.111\quad(R^2=0.693) \tag{8}$$

$$\Delta\sigma=1.148N+682.144W+23.951S-299.019\quad(R^2=0.728) \tag{9}$$

毛继泽等针对动弹性模量，基于冻融循环次数和氯离子浓度建立损伤演化方程[39]。

$$\mathrm{d}E_N(x)=E_0\mathrm{e}^{k(1+\omega c(x))N}\mathrm{d}x \tag{10}$$

其中：E_0 是冻融循环之前的混凝土弹性模量；ω是混凝土组分相关系数；$c(x)$是氯盐浓度；k 为常数。余红发等同样针对动态弹性模量，分别在水和盐溶液中建立损伤程度模型[40]。

在水中经历冻融循环

$$D_n=1-\frac{E_N}{E_0}=1-\frac{0.8\lg N_{\mathrm{m}}}{\lg N_{\mathrm{m}}-0.4\lg(N_{\mathrm{m}}-N)} \tag{11}$$

在盐溶液中经历冻融循环

$$D_n = 1 - \frac{E_N}{E_0} = 1 - \frac{0.8\lg N_{\mathrm{m}}}{\lg N_{\mathrm{m}} - 0.2\lg(N_{\mathrm{m}} - N)} \quad (12)$$

式中：N_{m} 代表实验条件下混凝土遭受冻融循环的疲劳寿命；E_N 为 N 次冻融循环后的混凝土动弹性模量。

总体上看，冻融损伤多通过质量损失、抗压强度、动弹性模量等来进行表征，而影响因素主要为冻融循环次数、氯盐浓度、水灰比、含气量、养护时间等。宋玉普等发现在冻融循环过程中质量损失率变化范围较小，相对动弹性模量始终维持在较高值[41]。之前已经提到余红发等的研究中发现混凝土抗盐冻能力主要与混凝土微观结构联系更为紧密。因此仅用质量损失、抗压强度、动弹性模量等指标衡量盐冻损伤全过程是不够合适的。未来的研究可通过微观孔结构指标比如孔隙率、孔径变化(最可几孔径、临界孔径)等表征混凝土盐冻损伤，从而使损伤变量更加准确，进而通过损伤变量更可靠的预测盐冻环境下离子传输速率[42–43]。

2　冻融循环下混凝土中氯离子传输性能

物理性能劣化是混凝土结构耐久性降低的直观表现，而进一步开展冻融循环下氯离子传输性能的研究能够更加全面的理解氯盐侵蚀和冻融循环双重作用地区混凝土结构耐久性降低的深层机理[44-46]。需要注意的是，本文所涉及的冻融循环下混凝土中氯离子传输性能研究主要侧重于冻融循环中前期，一旦循环次数过高，混凝土出现大面积宏观裂缝，氯盐溶液将直接进入混凝土内部接触钢筋，此时应直接对结构进行彻底修复。

2.1　冻融循环对氯离子传输性能的总体影响

近十年来，学者们通过试验研究混凝土中冻融循环对于离子传输过程的影响，普遍发现冻融循环造成的混凝土内部微观裂缝对于离子传输有着不容忽视加速作用。陈月顺等分别发现氯离子扩散系数随冻融循环次数增加而增加，浓度随扩散深度增加而降低[47]。李毅等通过试验引入冻融损伤因子，利用损伤因子对氯离子扩散系数加以修正[48]。Chen 等发现混凝土所处环境氯盐浓度升高，同样会加速氯离子在混凝土中的传输[49]。Banthia 研究发现冻融循环过程中不同温度和冻结时间对于混凝土中氯离子传输性能均有明显改变[50]。Yang 等发现冻融循环对于混凝土渗透性的放大作用大于外加荷载[51]。何世钦和赵国藩等发现冻融循环所导致的混凝土内部损伤，增大和增多了氯离子渗透的通道，进而显著提高离子扩散系数[52]。

混凝土在冻融环境下遭受氯离子侵蚀时，也会遭受环境条件变化，使得混凝土内部孔隙结构、离子传输情况出现明显差别，较为常见的环境条件包括应力作用、干湿循环、碳化、硫酸盐侵蚀等。王学军等结合不同应力状态研究混凝土抗盐冻能力，发现拉应力状态下混凝土的抗冻性能较差，适当的压应力可以有效提高混凝土的抗冻性能[53]。李长成等针对吉林西部盐渍土地区混凝土进行试验，发现干湿循环会加速冻融循环下氯离子传输[54]。Wittmann 等研究了碳化对于冻融循环下氯离子传输性能的改变[55]。硫酸盐对于冻融循环下氯离子传输产生两种相反的影响，一方面在孔隙中形成钙矾石晶体能有效延缓离子传输造成混凝土劣化，另一方面生成钙矾石过程中膨胀力使得混凝土结构内部产生微裂缝加速离子传输。Mardani 等表明 7 d 时硫酸盐侵蚀会加速冻融循环下水泥砂浆中氯离子传输，而 28 d 后硫酸盐侵蚀会降低冻融循环下水泥砂浆中氯离子传输[56]。李彦军等在冻融循环实验中均发现硫酸盐和氯盐同时存在的腐蚀溶液对于混凝土的腐蚀性高于单一氯盐或者硫酸盐[57–58]。此外前文均为冻融循环和氯盐侵蚀同步试验，现实情况中同样存在先发生冻融损伤再遭受氯盐侵蚀的混凝土结构，王孟然等试验发现既有冻融损伤的混凝土中氯离子扩散速度明显大于完好混凝土中氯离子扩散速度[59]。

近年来，学者们也开始采用数值方法揭示不同影响因素对于冻融循环过程中离子传输性能的影响。王立成等计算冻融循环过程的骨料-水泥界面过渡区(ITZ)的裂缝宽度和水泥砂浆中的毛细孔隙率[60]，在三相桁架网格模型中研究了不饱和环境下氯离子传输性能和冻融循环次数间的关系[61]。通过建立冻融损伤和氯离子扩散系数之间的关系，定量分析冻融循环对氯离子传输的加速效应能够有效预测混凝土耐久性的变化。王军强等发现双重劣化作用下氯离子含量是单一氯离子侵蚀过程中的 2~4 倍[62]。洪锦祥等基于混凝土的冻融损伤与扩散系数、扩散深度之间的非线性关系，定量表征冻融循环对于氯离子传输的加速效应[63]。Zhang 等通过扩散系数比值和表面浓度比值两种系数，定量评估冻融损伤对于高强混凝土表面浓度和扩散系数的影响[29]。

$$R_{D_c}(N) = 1 + 0.0091N \quad (13)$$

$$R_{C_s}(N) = 1 + 0.1177\sqrt{N} \quad (14)$$

刘金亮等考虑混凝土盐冻循环损伤的影响，建立了预应力混凝土结构中氯离子时变扩散系数模型，采用 Monte Carlo 模拟分析了不同参数对预应力混凝土结构盐冻环境下氯离子侵蚀耐久寿命的敏感性[64]。

上述研究分析了冻融循环下氯离子传输性能的变化，部分研究建立了冻融循环次数和离子传输速率之间的关系，但是对于冻融循环对于氯离子传输在微观尺度上的影响，即孔隙结构的演变研究较少。姜文镪和刘清风以时变的孔隙率表征孔隙结构的损伤演变，从而研究孔隙结构变化对离子传输的影响。定量揭示了冻融损伤对氯离子传输过程的加速作用，如图 2 所示，遭受冻融循环的混凝土比普通混凝土具有更高的氯离子渗透性，同时冻融循环对于离子传输深度的影响大于扩散时间。通过建立三相模型研究冻融循环下混凝土水灰比、ITZ、外界氯离子浓度、骨料体积分数、温度等对于氯离子传输性能的改变，并结合灰度关联分析方法研究这些影响

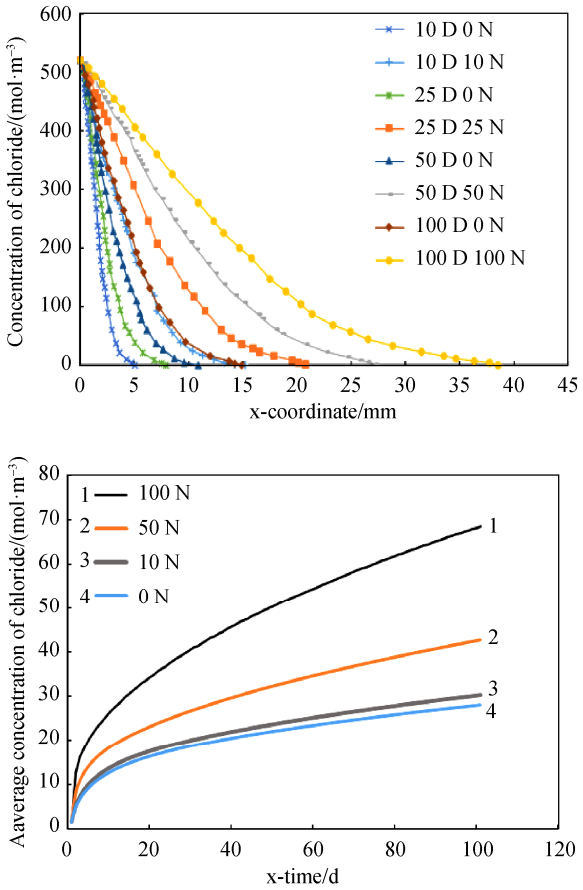


图 2 遭受不同次数冻融循环和传输时间的混凝土中离子浓度分布和平均浓度变化

Fig. 2 Variation of freeze-thaw action and penetration time on concentration profiles and average concentration

因素对于传输性能变化的关联程度[65]。随后，该团队又进一步研究冻融循环下孔隙结构变化对于氯离子固化的影响，通过修正 Langmuir 等温吸附关系和质量守恒方程来提高对于冻融循环下离子传输性能的预测精度[66]。

2.2 冻融循环下氯传输过程中的其它影响因素

氯离子传输与水泥基材料的孔结构息息相关，而孔结构主要受水灰比、养护龄期、引气剂等因素影响。除此之外，骨料、ITZ、温度等因素也会显著影响氯离子的传输性能。这些影响因素将在下文详细展开。需要注意的是，尽管下文中有个别结论是在单一劣化过程的研究中得到的，但对于双重劣化过程依然成立。

2.2.1 影响因素-孔结构 混凝土的孔隙结构扩张，为氯离子提供传输通道[67]，而孔隙数量、大小、连通性、分布等都是可以反映孔隙结构的重要因素，其中孔隙率最适合用来研究孔隙结构中离子的传输特性[68–69]。目前常用扫描电子显微镜、压汞仪、X 射线 CT、差热分析、比表面积分析等技术研究混凝土微观结构。Gong 等基于实验观测建立混凝土中孔径分布的经验公式，并研究盐冻环境下孔隙分布的演变[70]。图 3 归纳了 Yuan 等和 Gao 等研究中所发现的冻融循环次数与孔隙率变化之间的关系。其中 D 表示孔隙直径，ZK 表示混凝土孔隙率。Yuan 等和 Gao 等分别使用 X-CT、NMR 和 T2 发现 30 次冻融循环之前孔隙率改变较小，一般不超过 10%，而之后孔隙率出现急剧上升，孔径越大的孔隙越容易遭受冻融损伤，同时浸泡溶液种类在冻融循环过程中也对孔隙率有影响，NaOH 溶液在混凝土遭受冻融循环过程中对于孔隙结构的损伤最明显，NaCl 和 H_2SO_4 次之[71–72]。

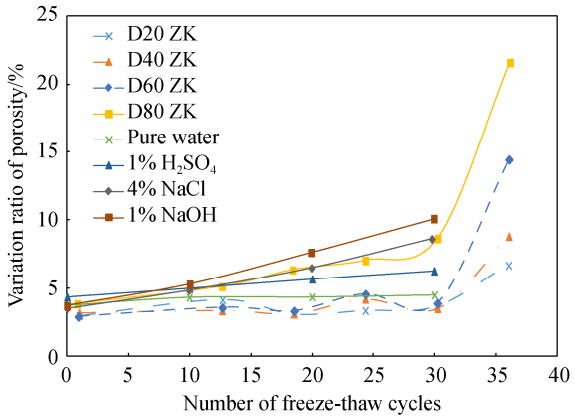


图 3 冻融循环次数对混凝土孔隙率变化的影响[71–72]

Fig. 3 Variation of porosity of concrete under different numbers of freeze-thaw cycles[71–72]

高水灰比混凝土中存在更多的孔隙和孔隙液，为离子传输提供更加便捷的通道的同时，孔隙液冻结产生的静水压力也会进一步促使混凝土内部出现微裂缝。低水灰比混凝土的孔隙率和平均气泡间距更小，孔隙结构也更曲折[73]。张鹏等利用灰色关联法分析研究 7 种相关因素和高性能混凝土抗盐冻性能的关联程度，其中水灰比的相关性最大[74]。图 4 归纳了刘军等、杜修力等、张鹏等和洪雷等的研究中所揭示的水灰比和氯离子扩散系数的关系，均展现了氯离子扩散系数随水灰比的增加而增大[31,49,75–77]。杜修力等在混凝土三相模型中将 ITZ 厚度设置为 500 μm，因此其氯离子扩散系数偏高[76]。刘军等、张鹏等和洪雷等分别发现冻融循环次数和氯离子扩散系数之间存在线性关系[31,75,77]。

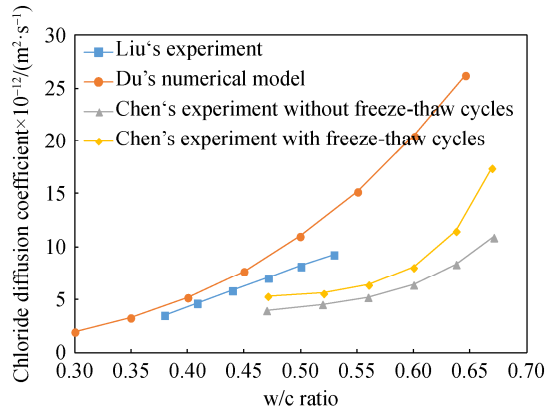


图 4　水灰比对混凝土中氯离子扩散系数的影响[31,49,75–77]

Fig. 4　Chloride diffusion coefficient with different w/c ratios[31,49,75–77]

混凝土持续水化过程中内部结构日益密实，氯离子扩散系数降低，因此充分养护能有效提升混凝土的抗盐冻能力。危行财等表明合适的养护龄期和养护温度都有助于降低氯离子扩散系数，扩散系数与养护龄期之间呈近似幂函数关系[78]。陈妤等测定了不同养护龄期下预应力混凝土结构中的氯离子浓度分布，发现龄期对氯离子浓度的影响随着混凝土结构使用年限增长而逐渐增大[79]。Zhao 等研究发现当养护时间在 3~7 d 时，氯离子扩散系数显著下降，但当养护时间超过 28 d 的时候，扩散系数趋于稳定[15]。余红发等结合冻融循环，考虑养护龄期，建立多因素作用下的氯离子扩散方程[80]。需要注意的是，尽管充分养护可以有效降低氯离子传输速率，但当冻融循环次数超过一定界限，充分养护作用有限。Penttala 等在 45 组不同混凝土中进行 CIF/CDF 实验，发现尽管增加养护时间可以有效缓解混凝土表面剥落情况，但对于缓解内部冻融损伤的效果不明显[37]。

2.2.2　影响因素-界面过渡区(ITZ)　ITZ 是骨料与砂浆的界面过渡区，区域狭窄，相较于骨料和水泥砂浆有着更大的孔隙率。当混凝土水灰比较低并且掺和细硅粉时，ITZ 对于离子传输速率的影响较小，但是在普通混凝土中，ITZ 的存在显著增加混凝土的渗透性。SEM 试验中发现 ITZ 平均厚度为 20~50 μm，ITZ 和水泥砂浆中的扩散系数比值约为 2~7[81–84]。杜修力、蒋金洋、张云升和刘清风等课题组分别研究 ITZ 的扩散系数在各种情况下对于混凝土中氯离子传输的影响[65,76,83,85]。如图 5 中所示，增大 ITZ 的扩散系数，混凝土中的氯离子浓度明显增加[76]。基于上述研究，部分学者进一步研究盐冻环境中 ITZ 结构的变化。Zhou 等指出冻融循环过程中温度变化剧烈，ITZ 较混凝土中其它组分更容易出现损伤[86]。Sicat 等将应变计分别贴在骨料层，砂浆层和 ITZ 层，实时监测冻融循环下的混凝土各组分的变形。结果表明裂缝首先出现在 ITZ 中，随之蔓延到砂浆，为氯盐提供传输通道[87]。

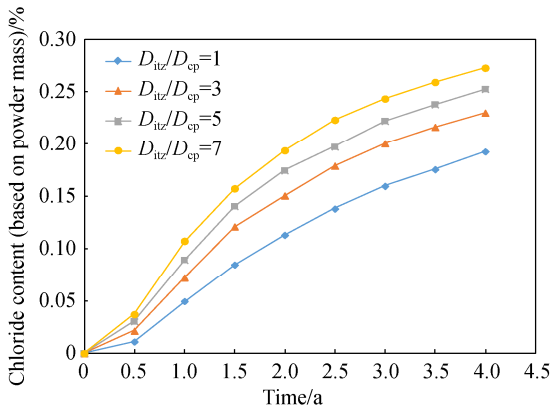


图 5　混凝土中氯离子含量和 ITZ 扩散系数之间的关系[76]

Fig. 5　Relationship between chloride content and diffusivities of ITZ[76]

2.2.3 影响因素-骨料 混凝土内部的传输路径曲折度是影响氯离子扩散系数的重要原因，而骨料的形状，分布和体积分数都是影响曲折度的主要因素[88]。骨料体积分数增大会对氯离子传输性能带来两种相反的影响：一是骨料周围的 ITZ 体积分数增大，造成混凝土整体的渗透性增加；二是混凝土的曲折度增加，同时由于骨料的低渗透性，造成混凝土整体的渗透性降低。后者的影响往往更大，因此氯离子扩散系数一般随骨料体积分数的增大而降低[82]。目前常用数值模型研究骨料对于盐冻环境下氯离子传输性能的而影响，较为常见的两种模型分别是混凝土晶格模型[89–94]，和混凝土细观多相模型[95–101]。这两种模型都发现纯扩散情形下，骨料形状和分布对氯离子扩散率的影响较小，体积分数影响较大。而在非纯扩散的环境下，形状和体积分数的影响同等重要[94, 100]。建立包含骨料的混凝土多相模型对于盐冻环境中再生骨料混凝土的研究更具优势。再生混凝土的使用在冻融环境下存在一定争议，其质量会受到再生骨料来源和生成过程的影响。Šeps 等以及应敬伟和肖建庄的实验分别表明再生混凝土不适用于盐冻环境[8,102]。然而 Abba 基于 EMV (等效砂浆体积)方法表明，再生混凝土较普通混凝土具有更好的抗渗性和抗冻性[103]。Lei 等同样认为遭受一定数量之内的冻融循环次数，再生混凝土的耐久性高于普通混凝土[104]。

2.2.4 影响因素-温度 冻融循环中温度降低导致孔隙溶液中的离子活动速率降低，此外冻结过程中孔隙溶液结冰也会堵塞离子传输路径，两者都会降低混凝土中氯离子扩散系数[105–107]。但是当温度低至孔隙溶液结冰，内部产生应力，造成微裂缝等损伤，反而提高了混凝土的渗透性。Banthia 发现带冻融损伤的混凝土的渗透性通常超过完好混凝土一个数量级[50]。Tomlinson 等用电阻率研究混凝土的渗透性。温度下降，混凝土电阻率上升，氯离子的扩散性降低[108]。Wang 等同样运用电阻率研究冻融循环中温度变化对氯离子传输性能的影响。当温度从 20 ℃降低到–20 ℃，混凝土中氯离子的传输速率降低约 5.5 倍。如式(15)，温度对氯离子扩散的影响可以用 Arrhenius 方程表达[28]，而孔隙溶液结冰对于氯离子渗透性能的影响可以用公式(16)表达，

$$\ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)=\frac{\Delta U}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right) \tag{15}$$

$$\ln\rho = P\Delta T + C \tag{16}$$

其中 P 和 C 都是常量，普通混凝土 P=0.159；ΔU 为混凝土活化能，与混凝土性能密切相关。混凝土添加掺合料、增加龄期或者改善孔隙结构，活化能随之增加。

2.2.5 影响因素-裂缝 裂缝的出现是冻融循环过程中的必然结果，当混凝土尚未出现大面积宏观裂缝时，裂缝加速离子传输，钢筋会更早更快的出现锈蚀。Wu 等对混凝土施加 300 次冻融循环形成裂缝，在此基础上进行 75 次海水浸泡，以此研究带裂缝混凝土中的氯离子渗透能力[110]。王立成等基于裂缝宽度计算混凝土中的氯离子扩散系数。当裂缝宽度大于临界宽度，此时氯盐溶液能快速接触钢筋，裂缝的氯离子扩散系数设置为 10 000 mm/h。当裂缝宽度小于临界值，扩散系数在 1 500~4 500 mm/h 的范围内确定，一般取平均值 3 000 mm/h[60,111]。Šavija 等在三维晶格模型中发现，裂缝宽度越大，氯离子浓度越高。同时发现，在相同裂缝宽度下，平行的裂缝造成的影响比弯曲的裂缝更大[112–113]。穆松等表明小于 100 μm 的裂缝宽度对混凝土中氯离子传输速率的影响显著，当裂缝宽度大于 100 μm 时混凝土中氯离子的传输速率变化较小[114]。裂缝的临界宽度对于离子传输的影响至关重要，超过临界宽度，氯离子能快速接触钢筋，此时研究氯盐传输速率失去意义。但目前尚未能够明确不同混凝土裂缝的临界宽度，未来如何确定不同环境下混凝土裂缝的临界宽度及不同阶段的离子传输速率将会是该方向的研究重点。

2.3 现场实验中冻融循环下氯离子传输性能

前文研究了 5 种因素对于冻融循环下混凝土中氯离子传输性能的影响。需要注意的是，这些影响规律多在实验室试验条件下得到。考虑到实验室试验和现场试验的差异，有必要在现场试验中研究冻融循环下混凝土中氯离子的传输性能。元成方等以渤海地区为例，研究不同冻融损伤下的松花江大桥的氯离子侵蚀规律，发现冻融循环次数增大，混凝土内外氯离子浓度差减小，氯离子扩散系数随着混凝土冻融损伤的加深而增大；同时在此基础上结合盐冻损伤变量和离子传输方程，对大桥遭受不同冻融损伤时的氯离子传输速率进行了预测，如表 1 所示，其中 C 是保护层厚度，D 是氯离子扩散系数，T 是结构使用寿命。当引桥 T 梁混凝土冻融循环至 30 次、主桥箱梁混凝土冻融循环至 50 次时，氯离子扩散系数呈急剧上升趋势，结构使用寿命迅速下降[115]。

表 1　桥梁不同结构在冻融循环和氯盐侵蚀下的结构使用寿命

Table 1　Service life of different structural members of bridge under freeze-thaw cycles and chloride attack

Structural member	Number of freeze–thaw cycles	C/mm	D/(mm^2·s^{-1})	T/a
T beams	0	41	3.33×10^{-6}	8.7
	15		3.89×10^{-6}	7.4
	30		4.76×10^{-6}	6
	45		8.01×10^{-6}	3.6
Box beams	0	45	1.27×10^{-6}	32
	25		1.55×10^{-6}	26
	50		2.69×10^{-6}	15
	75		5.44×10^{-6}	7.5

陈浩宇等从在青海盐湖卤水中遭受 1 435 次冻融循环的不同配比混凝土试样中取样试验，研究发现普通混凝土内部孔隙结构疏松，明显加速氯离子传输，而高强和高性能混凝土内部孔隙结构仍然较为密实，因此氯离子含量随深度减少的幅度较普通混凝土明显[116]。丁廉营等对西北典型灌区—景电灌区水工混凝土材料遭受的侵蚀环境进行研究，分析遭受侵蚀破坏混凝土建筑物附近的水样、土样和混凝土残渣，对其进行化学和 XRD 衍射分析，结果发现冻融循环环境下氯盐对于混凝土耐久性的影响显著大于清水[117]。杨全兵等结合现场试验和实验室试验，发现盐类的存在将明显提高混凝土内的饱水度，使混凝土受冻时将产生更高的结冰压，从而加速混凝土内部孔隙结构劣化[118]。

3　保护措施

冻融和氯盐复合环境造成混凝土耐久性迅速降低，如何从机理上降低离子传输速率，前文在论述孔结构的部分中已涉及到一些改善孔结构的措施，如降低水灰比、添加引气剂、充分养护等。本节重点介绍其它三种盐冻环境下常见的预防方法。

3.1　表面处理

混凝土表面用涂层和硅烷憎水剂等表面处理方式属于附加耐久性增强措施。一般分为 3 种形式，如图 6 中所示，即填塞毛细孔，涂料成膜和添加硅烷憎水剂，从而防止水分或盐溶液进入，减少盐冻损伤。其中 a、b 类主要采用表面堵塞封闭方法，而 c 类采用硅烷憎水剂在孔隙表面形成憎水层[119]。表面处理剂分子结构中的硅氧烷水解，在毛细孔吸力作用下进入混凝土表面区域，与水反应生成硅醇，随后与混凝土中的硅酸盐反应形成化学键。混凝土表面与水的接触角大于 90°就可以阻止水分进入，达到防水效果，增强混凝土的抗氯离子渗透能力，减轻盐冻损伤[31,120]。

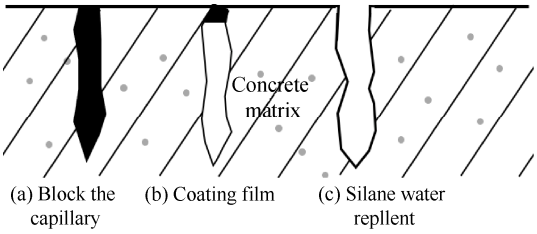


图 6　三种缓解孔隙问题的表面处理方法

Fig. 6　Three ways of solving capillary penetration problem

盐冻环境下对混凝土进行表面处理是较为常见的保护措施，Ma 等在冻融环境下用硅烷偶联剂作表面防水处理，硅烷偶联剂的渗入深度随冻融损伤增加而线性增加，从而混凝土内部氯盐浓度随之降低[121]。Bheheer 等发现深层表面处理相较浅层表面处理效果更好，且处理效果的差别随着冻融循环次数的增加效果愈加明显[122]。侯和平等对比了 Atometal 陶瓷涂料和优龙南通防腐涂料这两种常用的表面处理涂料的性能，结果表明使用这两种表面处理涂料后，混凝土的抗氯离子渗透性能都能满足标准[123]。

3.2　电化学修复/防护技术

对于已遭受盐冻损伤的钢筋混凝土结构，传统修补法主要先凿除劣化混凝土，对钢筋做除锈和阻锈处理，再使用环丙砂浆等进行填补。这样的方法导致钢筋处于新旧混凝土之间，造成新旧混凝土之间出现电位差，同时钢筋内侧氯离子难以被清除，因此传统修复技术难以满足长期耐久性要求[124]。20 世纪 70 年代提出一种非破坏性修复技术，即电化学修复/防护技术。电化学修复过程中，不同的电流强度和持续时间都会对盐冻环境下除氯效果造成显著影响。刘清风等发现随着时间和电流强度的增加，混凝土中氯离子浓度持续降低，但是除氯效率随之降低[125–126]。作为电化学修复技术的分支，电沉积法不仅可以降低氯盐浓度，还可以填补混凝土裂缝，因此更适用于盐冻环境。Sasaki 等首先在海工混凝土结构中尝试用该法修复盐冻损伤产生的裂缝，通电过程中电解质在混凝土内部发生电迁移，$CaCO_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 等沉积物在混凝土结构的表面和裂缝中生成，填充裂缝[127]。蒋正武等和刘桂凤等表明混凝土中的裂缝愈合机理是电解反应形成的产物在混凝土中裂缝中诱导成核，形成不溶性晶体填充裂缝，

并且沉积物最先在裂缝处形成[128–129]。王增忠等在电化学防护技术中既介绍了阴极防腐保护法、氯盐提取法等保护性措施，也介绍了碱性复原法这类电化学修复方法，强调应该控制裂缝及钢筋锈蚀[130]。此外，金伟良等结合电迁移型阻锈剂和电化学除氯技术，率先提出了双向电渗法提高混凝土的防护效果。该方法在迁出氯离子的同时向混凝土保护层内迁入阻锈剂，不仅可以有效除氯，同时也能起到较好的阻锈效果，在盐冻环境下效果明显[131–133]。

但是电化学修复/防护方法在实际应用中，尤其是在冻融环境下，存在一些技术难点。一旦电流强度或电通量控制不当，不仅钢筋表面会出现析氢现象或诱发混凝土的碱骨料反应，钢筋和混凝土之间的黏结面也会局部变软，黏结强度大幅度下降，这种现象在冻融环境下尤为明显，目前较为常见的办法是采用横向钢筋加固、选用高质量阳极材料等。Guo 等表明随电流强度和电通量增加，粘结强度将会持续下降，遭受冻融循环的混凝土粘结强度降低更显著，最高降低至 58.7%[134]。横向钢筋加固可以有效缓解这种情况，粘结强度降低幅度从无横向钢筋的 30%~44%改善为有横向钢筋的 19%~27%，同时粘结强度随时间推移也会逐渐回升[5, 135]。选用质量较差的阳极材料会出现阴极保护电流分布不均匀，阳极和混凝土的表面反应生成酸，以及阳极和混凝土表面干燥等问题，因此需要选择合适的阳极材料，涂有钛金属氧化物作为阳极材料具有较好的应用效果，但造价较高[136]。

3.3 掺合料

在混凝土中填充的一些胶凝材料(SCM)，如粉煤灰、硅灰等，会发生火山灰反应、微集料填充效应和微粒形态效应等，从而改善混凝土孔隙结构，提高其物理性能和耐久性，同时降低混凝土结构建设成本[137–139]，也是冻融氯盐环境下相对常见且有效的措施之一。而添加不同组合、不同用量的矿物掺合料，对于混凝土结构也有着不同的防护效果。Liu 等表明当混凝土中的粉煤灰用量为 15%，氯离子扩散系数降低为普通混凝土中的 75.4%；当粉煤灰含量为 30%，氯离子扩散率降低为 32.3%；Chen 等指出随着粉煤灰含量增加，有效扩散系数可以降低一个数量级，但是研究中均发现盐冻环境下添加粉煤灰的效果均会明显降低(如图 7)[49,75]。此外，低温环境会导致添加粉煤灰的混凝土强度增加过于缓慢，内部密实性较差，需保证适当的水灰比，养护时间以及引气剂。比如，当混凝土空气含量仅为 2%，水灰比达 0.6 时，含粉煤灰混凝土遭受冻融循环相较普通混凝土抗渗性更差，不适用于盐冻环境[19]。

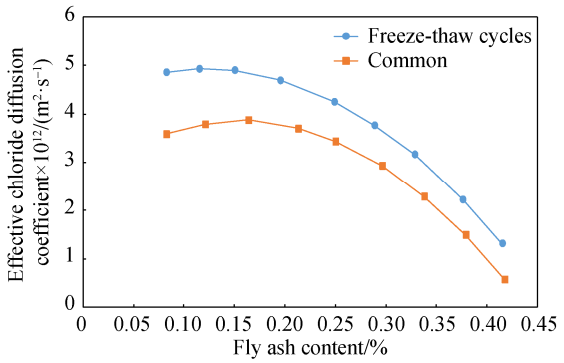


图 7 混凝土中粉煤灰含量对于有效扩散系数的影响

Fig. 7 Effective chloride diffusion coefficient with different fly ash content

Hooton 和 BENTZ 表明添加低于 20%的硅灰可以显著增加混凝土的抗渗性，降低氯离子扩散系数[88]。图 8 汇总了 Oh 等和 Garboczi 等的研究中硅灰和粉煤灰添加量和离子传输性能方面指标之间的关系。添加 10%和 20%的硅灰对于混凝土孔隙率的改变几乎相同，但添加 20%的硅灰会导致混凝土中水泥砂浆过少，无法提供足够的 CH 和掺合料反应，硅灰在混凝土中充当惰性填充剂，反而提高了混凝土孔隙率。同时硅灰中的碳成分会造成孔隙稳定问题，因为碳成分缓慢吸附引气剂，抑制微小气泡生成，降低混凝土中空气含量[140]。添加适当可粉煤灰将混凝土中氯离子的扩散系数降低到 25%，但是添加过多的粉煤灰，也会由于同样的原因，反而会增加氯离子扩散性能[1]。Panesar 实验中在混凝土中添加 0%到 60%的 GGBFS，尽管混凝土的孔隙率有效降低，但 2 年后的质量损失随 GGBFS 的掺量增加先降低后增加[141]。Yang 等表明含 20%的粉煤灰或 40% GGBFS 的混凝土遭受 50 次冻融循环后，损伤较普通混凝土更为明显，氯离子传输速率增大[51]。因此在盐冻环境下需要综合考虑现实情况，选择合适的掺合料种类，并严格控制添加量，才能有效改善混凝土的抗冻性和抗渗性。

除此之外，活性粉末，乳胶，纤维等掺合料也可改善混凝土抗盐冻性能。Wang 等表明活性粉末混凝土的孔隙结构在冻融循环早期不会出现明显变化，1500 次循环后，混凝土的孔隙度仅增加了 29.86%[142]。Wu 等指出乳胶和纤维在冻融环境下可以加强水泥净浆的粘结性，降低孔隙率。根据

实验结果，乳胶可以降低水泥净浆孔隙率达 19%。加入纤维小幅降孔隙率，但可以提高约 10%的抗拉强度[143]。

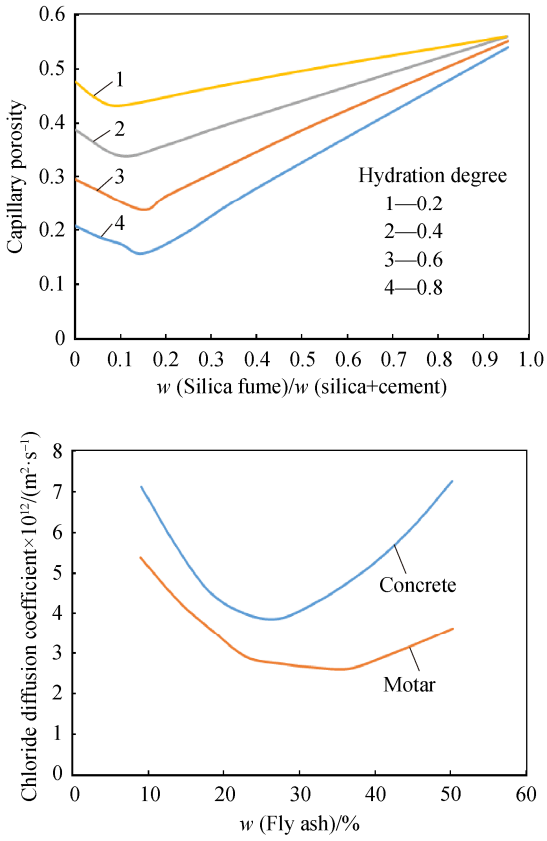


图 8　粉煤灰和硅灰含量对于氯离子扩散性的影响

Fig. 8　Effective chloride diffusion coefficient with different content of fly ash and silica fume

4　结束语与展望

通过系统分析混凝土在盐冻环境中物理性能、氯离子传输性能和保护措施 3 个方面的研究情况和结果，总结如下：

1) 冻融循环过程中混凝土损伤分为 2 个阶段，采用两阶段损伤理论可以有效表征冻融损伤初始和扩散阶段。盐冻环境中混凝土出现表面剥落，质量损伤，弹性模量下降等物理性能劣化，通过实验手段可以有效检测冻融损伤，并建立损伤变量和冻融循环次数、氯盐浓度等影响因素的关系。

2) 通过时变的孔隙率表征孔隙结构的损伤演变并结合离子传输方程，可以定量化研究冻融损伤对于氯离子传输过程的加速作用。孔隙结构主要受水灰比、养护龄期、引气剂等因素影响。除此之外，骨料、ITZ、温度、裂缝等因素也会显著影响氯离子的传输性能。

3) 盐冻环境中，表面处理可以达到防水效果，增强混凝土的抗氯离子渗透能力，同时深层表面处理相较浅层表面处理效果更好；电化学修复需要控制电流强度以防钢筋和混凝土的粘结强度迅速下降，这种现象可以通过横向钢筋加固改善。添加掺合料时需要综合考虑现实情况，选择合适的掺合料种类，并严格控制添加量，否则会加重盐冻损伤。

因试验方法和理论模型存在出入，尽管国内外学者围绕盐冻环境中混凝土的物理性能和离子传输性能已开展相关研究，但结果仍然存在分歧。为进一步推进冻融循环下混凝土中氯离子传输的机理研究，许多工作亟需进一步深入开展，下面从实验、理论和模型 3 个方向分别展望如下：

在实验研究领域，1) 从实验环境角度，在模拟实际工程中混凝土构件所处盐冻环境需保证氯盐侵蚀和冻融循环完全同步，在不同的时间节点以不同手段测试混凝土物理性能的变化，完善两阶段损伤理论。此外，实验室内的冻融循环试验与实际结构受冻条件有所差异，而本文所综述的工作大多基于实验室内快速冻融试验的混凝土试件性能变化，有限的现场试验更多的也是在展示冻融循环对于氯盐传输的加速作用。因此，现有冻融循环下氯离子传输研究主要侧重于反映客观规律，解释现象，相关模型难以直接用于预测实体结构上的氯离子传输。未来需要进一步开展现场试验，同时进一步明确混凝土结构出现表面剥落、大面积宏观裂缝等现象时的环境界限。2) 从实验材料角度，目前的大部分实验主要针对普通混凝土，而对高性能混凝土、轻骨料混凝土、自密实混凝土等具有良好应用前景的特种混凝土研究甚少，因此有必要深入开展盐冻环境下特种混凝土的物理性能及氯离子传输性能变化，从而全面分析各类混凝土的抗冻性和抗渗性，量化冻融损伤对各类混凝土中氯离子传输的加速效应，为盐冻地区混凝土结构的耐久性设计提供依据。3) 从保护措施的角度，可考虑在双向电渗中引入纳米材料，将阻锈剂制备成纳米材料，或者将纳米材料包裹阻锈剂一起通过电渗法迁移至混凝土中保护钢筋。同时开发新型表面处理剂和掺合料，研究多种保护措施协同配合增强混凝土结构耐久性。

实验可以有效检测混凝土物理性能的变化，尤其是 SEM、MIP、X-CT、BET、BSE、NMR 等细微观测试方法可以实时监测混凝土损伤，但仍需要理论和模型的支撑才能更加深入的明确其机理，并

定量预测盐冻环境下混凝土的耐久性。因此：1) 一方面可通过上述检测损伤，结合弹塑性力学和损伤力学理论，以孔隙结构演变表征混凝土损伤过程，建立更加符合实际的损伤变量。同时考虑混凝土不饱和状态，完善损伤变量和氯离子扩散系数之间的相关规律，同时考虑不同影响因素，如水灰比、骨料、养护时间、养护条件、温度等，在盐冻环境下修正氯离子传输的理论方程。2) 另一方面，很有必要在数值模型中建立和发展能够同时考虑冻融循环和氯盐传输的数值模型，综合考虑离子传输，水分渗流，热量传输，冻融循环等物理场，应用多场耦合理论揭示冻融循环下氯离子的传输机理。三维混凝土模型同样是未来的发展方向之一，目前局限于计算机的计算能力，氯离子传输的混凝土多相模型较多局限于二维，未来可采用“单元多次划分”技术判别单元材料，应用“骨料投影网格法”模拟混凝土网格模型，基于干涉判断数学条件建立混凝土三维模型，在此基础上建立细微观孔隙结构，更真实、准确地揭示冻融循环下混凝土中氯离子传输机理。

参考文献:

[1] OH B H, JANG S Y. Prediction of diffusivity of concrete based on simple analytic equations[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(3): 463–480.

[2] SONG H W, LEE C H, ANN K Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments[J]. Cem Concr Comp, 2008, 30(2): 113–121.

[3] YANG C C. On the relationship between pore structure and chloride diffusivity from accelerated chloride migration test in cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(7): 1304–1311.

[4] LIU Y, SHI X. Ionic transport in cementitious materials under an externally applied electric field: Finite element modeling[J]. Constr Build Mater, 2012, 27(1): 450–460.

[5] CHEEWAKET T, JATURAPITAKKUL C, CHALEE W. Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete: 10-year results in marine site[J]. Mater Struct, 2014, 47(9): 1501–1511.

[6] QU F, NIU D T. Chloride ion diffusion behavior of concrete after freezing and thawing cycles[J]. Adv Mater Res, 2013, 671–674: 1652–1656.

[7] ZHANG P, WITTMANN F H, VOGEL M, et al. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete[J]. Cem Concr Res, 2017, 100: 60–67.

[8] ŠEPS K, FLÁDR J, BROUKALOVÁ I. Resistance of recycled aggregate concrete to freeze-thaw and deicing salts[J]. Procedia Eng, 2016, 151: 329–336.

[9] FERREIRA M, LEIVO M, KUOSA H, et al. The influence of the freeze-thaw loading cycle on the ingress of chlorides in concrete[C]//Proc. Int. RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, Segment on Frost Action in Concrete, RILEM Publications SARL, Lyngby, Denmark, 2016: 31–40.

[10] KUOSA H, FERREIRA R M, HOLT E, et al. Effect of coupled deterioration by freeze–thaw, carbonation and chlorides on concrete service life[J]. Cem Concr Comp, 2014, 47: 32–40.

[11] du p, yao y, wang l, et al. Mechanical damage model of concrete subject to freeze-thaw cycles coupled with bending stress and chloride attack[J]. Adv Mater Res, 2014, 936: 1342–1350.

[12] MA Z, ZHAO T, XIAO J, et al. Evaluation of rebar corrosion in reinforced concrete under freeze-thaw environment and protection measures[J]. Anti-corros Method Mater, 2016, 63(2): 128–136.

[13] GAO F, WANG Q, DENG H, et al. Coupled effects of chemical environments and freeze–thaw cycles on damage characteristics of red sandstone[J]. B Eng Geol Environ, 2016, 76(4): 1481–1490.

[14] 杨全兵, 黄士元. 对混凝土结构抗冻融及盐冻侵蚀耐久性设计的建议[C]. 土建结构工程安全性与耐久性科技论坛. 2001.

[15] ZHAO J, CAI G, GAO D, et al. Influences of freeze–thaw cycle and curing time on chloride ion penetration resistance of Sulphoaluminate cement concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 53: 305–311.

[16] SAKULICH A R, BENTZ D P. Increasing the service life of bridge decks by incorporating phase-change materials to reduce freeze-thaw cycles[J]. J Mater Civil Eng, 2012, 24(8): 1034–1042.

[17] LI B, MAO J, 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.

[18] AL GADHIB A H. Numerical simulation of chloride diffusion in RC structures and the implications of chloride binding capacities and concrete mix[J]. Int J Civ Environ Eng, 2010, 10(5): 19–28.

[19] CHUNG C W, SHON C S, KIM Y S. Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze–thaw cycles[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(9): 1739–1745.

[20] ZHOU Z D, QIAO P Z. Durability of ultra-high performance concrete in tension under cold weather conditions[J]. Cem Concr Comp, 2018, 94: 94–106.

[21] 李文婷, 孙伟, 蒋金洋. 疲劳荷载与环境因素耦合作用下混凝土损伤劣化研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2142–2149.
LI Wenting, SUN Wei, JIANG Jinyang. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(12): 2142–2149.

[22] WEI J, WU X H, ZHAO X L. A damage model of concrete under freeze-thaw cycles[J]. Wuhan Univ Technol-Mater, Sci Ed, 2003, 18(3): 40–42.

[23] NILI M, AZARIOON A, HOSSEINIAN S M. Novel internal-deterioration model of concrete exposed to freeze-thaw cycles[J]. J Mater Civil Eng, 2017, 29(9): 04017132.

[24] 余红发, 孙伟, 麻海燕, 等. 基于损伤演化方程的混凝土寿命预测方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 1–7.
YU Hongfa, SUN Wei, MA Haiyan, et al. J Archit Civil Eng (in Chinese), 2012, 29(1): 1–7.

[25] LI B, MAO J, NAWA T, et al. Mesoscopic damage model of concrete subjected to freeze-thaw cycles using mercury intrusion porosimetry and differential scanning calorimetry (MIP-DSC)[J]. Constr Build Mater, 2017, 147: 79–90.

[26] GONG F, SICAT E, ZHANG D, et al. Stress analysis for concrete materials under multiple freeze-thaw cycles[J]. J Adv Concr Technol, 2015, 13(3): 124–134.

[27] MUTTAQIN H, KOUHEI N, YASUHIKO S, et al. Stress-strain behavior in tension and compression of concrete damaged by freezing and thawing cycles[C]//International RILEM Workshop on Frost

Resistance of Concrete. RILEM Publications SARL, 2002: 335–342.

[28] WANG Z, ZENG Q, WANG L, et al. Corrosion of rebar in concrete under cyclic freeze–thaw and chloride salt action[J]. Constr Build Mater, 2014, 53: 40–47.

[29] ZHANG X, WANG L, ZHANG J. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack[J]. Cold Reg Sci Technol, 2017, 142: 17–24.

[30] SUN W, MU R, LUO X, et al. Effect of chloride salt, freeze–thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(12): 1859–1864.

[31] ZHANG P, CONG Y, VOGEL M, et al. Steel reinforcement corrosion in concrete under combined actions: The role of freeze-thaw cycles, chloride ingress, and surface impregnation[J]. Constr Build Mater, 2017, 148: 113–121.

[32] 郝潞岑, 刘元珍, 高宇璇, 等. 氯盐侵蚀和冻融循环耦合作用下保温混凝土的耐久性[J]. 广西大学学报：自然科学版, 2018(4): 1562–1568.
HAO L C, LIU Y Z, GAO Y X, et al. J Guangxi Univ: Nat Sci (in Chinese), 2018(4): 1562–1568.

[33] 王萧萧, 申向东, 王海龙, 等. 盐蚀-冻融循环作用下天然浮石混凝土的抗冻性[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(11): 1414–1421.
WANG Xiaoxiao, SHEN Xiangdong, WANG Hailong, et al. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(11): 1414–1421

[34] 罗大明, 牛荻涛, 苏丽. 荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 1–14, 43.
LUO Daming, NIU D T, SU L, et al. Eng Plast Appl (in Chinese), 2019, 36(1): 1–14, 43.

[35] WANG Z D, YAO Y, WANG L. Research on the apparent thermal expansion coefficient of concrete subject to freeze-thaw cycles and chloride salt attack[J]. Adv Mater Res, 2012, 446–449: 3304–3310.

[36] 王振地, 姚燕, 王玲. 冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土变形和损伤分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1133–1138.
WANG Z D, YAO Y, WANG L. J Chin Ceram Soc, 2012, 40(8): 1133–1138.

[37] PENTTALA V. Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze–thaw loads[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(5): 921–928.

[38] AMINI B, TEHRANI S S. Combined effects of saltwater and water flow on deterioration of concrete under freeze–thaw Cycles[J]. J Cold Reg Eng, 2011, 25(4): 145–161.

[39] MAO J Z, ZHANG Z Y, LIU Z M, et al. Damage analysis of concrete subjected to freeze-thaw cycles and chloride ion erosion[J]. Key Eng Mater, 2011, 488–489: 464–467.

[40] YU H, MA H, YAN K. An equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete and a model for predicting the service life[J]. Constr Build Mater, 2017, 137: 104–116.

[41] 宋玉普, 商怀帅, 张众, 等. 冻融循环后引气混凝土双轴破坏准则研究[J]. 工程力学, 2007, 24(6): 134–141.
Song Y P, SHANG H S, ZHANG Z, et al. J Eng Plast Appl (in Chinese), 2007, 24(6): 134–141

[42] 李犇, 毛继泽, 吕建福, 等. 冻融循环作用下混凝土介观损伤的研究[C]. 中国硅酸盐学会混凝土与水泥制品分会第九届理事会成立大会暨第十一届全国高性能混凝土学术研讨会. 2015.

[43] 赵铁军, 朱金铨, 冯乃谦. 混凝土孔隙分析中的表征参数[C]. 全国水泥基复合材料科学与技术学术讨论会. 1999.

[44] 李芳. 混凝土损伤对氯离子渗透性影响研究综述[J]. 低温建筑技术, 2017(5): 7–10.
LI F. J Low Temp Archit Technol (in Chinese), 2017(5): 7–10.

[45] 慕儒. 冻融循环与外部弯曲应力、盐溶液复合作用下混凝土的耐久性与寿命预测[D]南京：东南大学; 2000.
MU R. Durability and service life prediction of concrete subjected to the combined action of freezing-thawing, sustained external flexural stress and salt solution (in Chinese, dissertation). Nan jing: Southeast University, 2000.

[46] 张鹏, 刘庆, 耿文超, 等. 水和氯离子在砂浆中的迁移规律[J]. 硅酸盐学报, 2017, 46(2): 67–73.
ZHANG P, LIU Q, GENG W C, et al. J Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 46(2): 67–73.

[47] 陈月顺, 齐国霖, 吴伟. 混凝土在氯离子侵蚀和冻融耦合作用下的研究[J]. 建筑技术开发, 2012, 39(2): 45–48.

[48] 李毅, 王显利, 马德宝, 等. 混凝土冻融损伤后的氯离子浓度分布预测[J]. 北华大学学报(自然), 2009, 10(2): 153–155.
LI Y, WANG X L, MA D B, et al. J Beihua Univ: Nat Sci (in Chinese), 2009, 10(2): 153–155.

[49] CHEN S J, SONG X B, LIU X L. Experimental research on chloride ingress into concrete exposed to freeze-thaw cycles[J]. Appl Mech Mater, 2013, 357–360: 621–625.

[50] BANTHIA N, MINDESS S. Effect of Early Freezing on Permeability of Cement Paste[J]. J Mater Civil Eng, 1989, 1(3): 119–132.

[51] YANG L, SUN W, LIU C, et al. Water absorption and chloride ion penetrability of concrete damaged by freeze-thawing and loading[J]. J Wuhan Univ Technol, 2017, 32(2): 330–337.

[52] 何世钦, 贡金鑫, 赵国藩. 冻融循环下混凝土中氯离子的扩散性[J]. 水利水运工程学报, 2004, 4: 32–36.
HE S Q, GONG J X, ZHAO G F. J Hydro-sci Eng (in Chinese), 2004, 4: 32–36.

[53] 王学军. 不同应力水平作用下混凝土碳化及抗冻性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017,44(11): 44–47.
WANG X J. New Build Mater (in Chinese), 2017,44(11): 44–47.

[54] 李长成, 闫洁, 李崴. 寒区盐渍土环境下混凝土的破坏机理研究[J]. 低温建筑技术, 2018(2): 13–17.
LI C C, YAN J, LI W. J Low Temp Archit Technol (in Chinese), 2018(2): 13–17.

[55] WITTMANN F H, ZHANG P, ZHAO T. Influence of combined environmental loads on durability of reinforced concrete structures[J]. Restor Build Monu, 2006, 12(4): 349–362.

[56] MARDANI AGHABAGLOU, ALI, et al. Freeze–thaw resistance and chloride-ion penetration of cement-stabilized clay exposed to sulfate attack[J]. Appl Clay Sci, 115(2015): 179–188.

[57] 吕健, 余亮, 龙海波, 等. 复杂环境下钢筋混凝土抗盐侵蚀性能[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(12): 23–26.
LV J, YU L, LONG H B, et al. J Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2017(12): 23–26.

[58] 李彦军. 盐碱-冻融环境下桥梁用混凝土耐久性分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(5): 22–25.
LI Y J. J Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2019(5): 22–25.

[59] 王孟然. 冻融循环作用下氯离子侵蚀混凝土过程研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
WANG M R. Study on chloride erosion in concrete under freeze-thaw cycle (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2017.

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

148–154.

[61] WANG L, UEDA T. Mesoscale Modeling of Chloride Penetration in Unsaturated Concrete Damaged by Freeze-Thaw Cycling[J]. J Mater Civil Eng, 2014, 26(5): 955–965.

[62] 王军强. 混凝土中冻融循环和氯离子侵蚀的耦合效应试验研究[J]. 混凝土, 2008(11): 29–31.
WANG J Q. Concrete (in Chinese), 2008(11): 29–31.

[63] 洪锦祥, 缪昌文, 黄卫. 冻融损伤对混凝土氯离子扩散性能的影响[J]. 混凝土, 2006(1): 36–38.
HONG J X, MIAO C W, HUANG W. J Concr (in Chinese), 2006(1): 36–38.

[64] 刘金亮, 贾艳敏, 王佳伟, 等. 季冻区盐冻作用下结构氯离子侵蚀耐久寿命预测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(10): 41–48.
LIU J L, JIA Y M, WANG J W, et al. J Harbin Eng Univ (in Chinese), 2018, 39(10): 41–48.

[65] 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.

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

[67] HOSEINI M, BINDIGANAVILE V, BANTHIA N. The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review[J]. Cem Concr Comp, 2009, 31(4): 213–220.

[68] DU X, JIN L, ZHANG R. Chloride diffusivity in saturated cement paste subjected to external mechanical loadings[J]. Ocean Eng, 2015, 95: 1–10.

[69] 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]. Comp Mater Sci, 2015, 99: 396–416.

[70] GONG F, ZHANG D, SICAT E, et al. Empirical estimation of pore size distribution in cement, mortar, and concrete[J]. J Mater Civil Eng, 2014, 26(7): 04014023.

[71] YUAN J, LIU Y, LI H, et al. Experimental investigation of the variation of concrete pores under the action of freeze-thaw cycles[J]. Adv Mater Sci Eng, 2016, 161(6): 583–8.

[72] GAO F, WANG Q, DENG H, et al. Coupled effects of chemical environments and freeze–thaw cycles on damage characteristics of red sandstone[J]. Bull Eng Geol Environ, 2017, 76(4): 1–10.

[73] LIU Z, ZHANG Y, JIANG Q. Continuous tracking of the relationship between resistivity and pore structure of cement pastes[J]. Constr Build Mater, 2014, 53: 26–31.

[74] ZHANG P, LIU C, LI Q. Application of gray relational analysis for chloride permeability and freeze-thaw resistance of high-performance concrete containing nanoparticles[J]. J Mater Civil Eng, 2011, 23(12): 1760–1763.

[75] LIU J, XING F, DONG B Q. Microscopic mechanism of the diffusivity of concrete chloride ion[J]. Adv Mater Res, 2013, 773: 687–692.

[76] DU X, JIN L, MA G. A meso-scale numerical method for the simulation of chloride diffusivity in concrete[J]. Finite Elem Anal Des, 2014, 85: 87–100.

[77] 洪雷, 唐晓东. 冻融循环及龄期对混凝土氯离子渗透性的影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2): 254–256.
HONG L, TANG X D. J Build Mater (in Chinese), 2011, 14(2): 254–256.

[78] 危行财. 双向荷载、冻融循环及龄期对混凝土氯离子渗透性的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
WEI X C. The research of the effect of two-way load、freezing-thawing cycles and curing age on chloride permeability of concrete (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[79] 陈妤, 刘荣桂, 付凯. 冻融循环下海工预应力混凝土结构的耐久性[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(1): 17–21.
CHEN Y, LIU J G, FU K. J Build Mater (in Chinese), 2009, 12(1): 17–21.

[80] 余红发, 孙伟. 混凝土在多重因素作用下的氯离子扩散方程[J]. 建筑材料学报, 2002(3): 240–247.
YU H F, SUN W. J Build Mater (in Chinese), 2002(3): 240–247.

[81] 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.

[82] SHANE J D, MASON T O, JENNINGS H M, et al. Effect of the interfacial transition zone on the conductivity of Portland cement mortars[J]. J Am Ceram Soc, 2000, 83(5): 1137–1144.

[83] JIANG J Y, SUN G W, WANG C H. Numerical calculation on the porosity distribution and diffusion coefficient of interfacial transition zone in cement-based composite materials[J]. Constr Build Mater, 2013, 39: 134–138.

[84] ZHENG J J, XIONG F F, WU Z M, et al. A numerical algorithm for the ITZ area fraction in concrete with elliptical aggregate particles[J]. Mag Concr Res, 2009, 61(2): 109–117.

[85] SUN G, ZHANG Y, SUN W, et al. Multi-scale prediction of the effective chloride diffusion coefficient of concrete[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(10): 3820–3831.

[86] ZHOU W, ZHAO C, LIU X, et al. Mesoscopic simulation of thermo-mechanical behaviors in concrete under frost action[J]. Constr Build Mater, 2017, 157: 117–131.

[87] SICAT E, GONG F, UEDA T, et al. Experimental investigation of the deformational behavior of the interfacial transition zone (ITZ) in concrete during freezing and thawing cycles[J]. Constr Build Mater, 2014, 65: 122–131.

[88] HOOTON R D, BENTZ D P, GARBOCZI E J, et al. Multi-Scale Microstructural Modeling of Concrete Diffusivity: Identification of Significant Varibles[J]. Cem Concr Agg, 1998, 20(1): 129.

[89] ZHENG J J, ZHOU X Z, WU Y F, et al. A numerical method for the chloride diffusivity in concrete with aggregate shape effect[J]. Constr Build Mater, 2012, 31: 151–156.

[90] E. SCHLANGEN, J.G.M VAN MIER. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures[J]. Mater Struct, 1992, 25(9): 534–542.

[91] ŠAVIJA B, LUKOVIĆ M, PACHECO J, et al. Cracking of the concrete cover due to reinforcement corrosion: A two-dimensional lattice model study[J]. Constr Build Mater, 2013, 44: 626–638.

[92] G LILLIU, J.G.M VAN MIER. 3D lattice type fracture model for concrete[J]. Eng Fract Mech, 2003, 70(7): 927–941.

[93] GRASSL P, HONG S W, BUENFELD N R. Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(1): 85–93.

[94] ABYANEH S D, WONG H S, BUENFELD N R. Computational investigation of capillary absorption in concrete using a three-dimensional mesoscale approach[J]. Comput Mater Sci, 2014, 87: 54–64.

[95] FENG G L, LI L Y, KIM B, et al. Multiphase modelling of ionic

transport in cementitious materials with surface charges[J]. Comput Mater Sci, 2016, 111: 339–349.

[96] LIU Q F, EASTERBROOK D, LI L Y, et al. Prediction of chloride diffusion coefficients using multi-phase models[J]. Mag Concr Res, 2017, 69: 134–144.

[97] 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.

[98] LIU Q F, FENG GL, XIA J, et al. Ionic transport features in concrete composites containing various shaped aggregates: a numerical study[J]. Compos Struct, 2018, 183: 371–380.

[99] TOPÇU İB, BILIR T. Analysis of rubberized concrete as a three-phase composite material[J]. J Compos Mater, 2009, 43(11): 1251–1263.

[100]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 Q F. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1074–1080.

[101]XU W, CHEN H, LV Z. A 2D elliptical model of random packing for aggregates in concrete[J]. J Wuhan Univ Technol, 2010, 25(4): 717–720.

[102]应敬伟, 肖建庄. 再生骨料取代率对再生混凝土耐久性的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 56–62.
YING J W, XIAO J Z. J Archit Civil Eng (in Chinese), 2012, 29(01): 56–62.

[103]ABBAS A, FATHIFAZL G, ISGOR O B, et al. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method[J]. Cem Concr Comp, 2009, 31(8): 555–563.

[104]LEI B, LI W, TANG Z, et al. Durability of recycled aggregate concrete under coupling mechanical loading and freeze-thaw cycle in salt-solution[J]. Constr Build Mater, 2018, 163: 840–849.

[105]ANDERS L. Chloride ingress data from field and laboratory exposure – Influence of salinity and temperature[J]. Cem Concr Comp, 2007, 29(2): 88–93.

[106]II J J V , THOMAS J J . Permeability and elastic modulus of cement paste as a function of curing temperature[J]. Cem Concr Res, 2012, 42(2): 440–446.

[107]BODDY A, BENTZ E, THOMAS M D A, et al. An overview and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model - Effect of fly ash and slag[J]. Cem Concr Res, 1999, 29(29): 827–837.

[108]TOMLINSON D, MORADI F, HAJILOO H, et al. Early age electrical resistivity behaviour of various concrete mixtures subject to low temperature cycling[J]. Cem Concr Comp, 2017, 83: 323–34.

[109]杨海成, 杜安民, 范志宏, 等. 温度对混凝土氯离子扩散性能的影响[J]. 水运工程, 2015(10): 20–26.
YANG H C, DU A M, FAN Z H, et al. J Port Water Eng (in Chinese). 2015(10): 20–26.

[110]WU J, FAYE P N, ZHANG W, et al. Chloride diffusivity and service life prediction of RC columns with sustained load under chloride environment[J]. Constr Build Mater, 2018, 158: 97–107.

[111]WANG L, UEDA T. Mesoscale modelling of the chloride diffusion in cracks and cracked concrete[J]. J Adv Concr Technol, 2003, 9(3): 241–249.

[112]ŠAVIJA B, LUKOVIĆ M, SCHLANGEN E. Lattice modeling of rapid chloride migration in concrete[J]. Cem Concr Res, 2014, 61/62: 49–63.

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

[114]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 S, LIU J Z. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(6): 829–838.

[115]元成方, 牛荻涛, 盖青山, 等. 考虑冻融损伤的钢筋混凝土桥梁氯离子侵蚀寿命预测研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(2): 256–260.
YUAN C F, NIU D T, GAI Q S, et al. J Xi'an Univ of Arch Tech: Nat Sci (in Chinese), 2010, 42(2): 256–260.

[116]陈浩宇, 李美丹, 余红发, 等. 复杂氯盐溶液和冻融循环作用下混凝土的氯离子扩散行为[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(5): 32–35.
CHEN H Y, LI M D, YU H F, et al. J China Habour Eng (in Chinese), 2018, 38(5): 32–35.

[117]丁廉营. 盐冻环境下水工混凝土材料耐久性衰减规律研究[D]. 华北水利水电大学, 2017.
DING L Y. Study on the degradation rule of hydraulic concrete materials under salty solution frost (in Chinese, dissertation). Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power), 2017.

[118]杨全兵, 黄士元. 受冻地区混凝土的盐冻破坏[J]. 黑龙江交通科技, 1998(8): 25–28.
YANG Q B, HUANG S Y. J Commun Sci Technol Heilongjiang (in Chinese), 1998(8): 25–28.

[119]孙红尧, 杨争, 孙高霞, 等. 硅烷憎水剂在钢筋混凝土防腐应用中的探讨[J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 1–5.
SUN H Y, YANG Z, SUN G X, et al. J Hydro-sci Eng (in Chinese), 2013(4): 1–5.

[120]苏卿, 任昭君, 赵铁军, 等. 渗透型涂料表面防护对钢筋锈蚀的影响[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(10): 70–72.
SUN Q, REN Z J, ZHAO T J, et al. J New Build Mater (in Chinese), 2009, 36(10): 70–72.

[121]MA Z, ZHU F, ZHAO T. Effects of surface modification of silane coupling agent on the properties of concrete with freeze-thaw damage[J]. KSCE J Civ Eng, 2018, 22(2): 657–669.

[122]BASHEER L, CLELAND D J. Freeze–thaw resistance of concretes treated with pore liners[J]. Constr Build Mater, 2006, 20(10): 990–998.

[123]侯和平, 张克震, 张淑芹. 海工混凝土防腐涂层防护技术研究[J]. 中国水利. 2009(14): 50–52.
HOU H P, ZHANG K Z, ZHANG S Q. J Chin Water Resour (in Chinese), 2009(14): 50–52.

[124]高小建, 赵志曼, 孙文博. 钢筋混凝土电化学除氯原理与研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(5): 98–101.
GAO X J, ZHAO Z M, SUN W B. J Mater Rev (in Chinese), 2007, 21(5): 98–101.

[125]LIU Q F, XIA J, EASTERBROOK D, et al. Three-phase modelling of electrochemical chloride removal from corroded steel-reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 70: 410–427.

[126]MAO L X, HU Z, XIA J, et al. Multi-phase modelling of electrochemical rehabilitation for ASR and chloride affected concrete composites[J]. Compos Struct, 2019, 207: 176–189.

[127]金伟良, 吴航通, 许晨, 等. 钢筋混凝土结构耐久性提升技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 68–76.
JIN W L, WU H D, XU C, et al. J Adv Sci Technol Water Resour (in Chinese), 2015, 35(5): 68–76.

[128]蒋正武, 邢锋, 孙振平, 等. 电沉积法修复钢筋混凝土裂缝的基础研究[J]. 水利水电科技进展, 2007(3): 5–8.
JIANG Z W, XING F, SUN Z P, et al. J Adv Sci Technol Water

Resour (in Chinese), 2007(3): 5–8.

[129]刘桂凤, 陈正发, 张铁男, 等. 电沉积法修复钢筋混凝土裂缝试验研究[J]. 施工技术, 2017(12): 18–22.
LIU G F, CHEN Z F, ZHANG T N, et al. J Constr Technol (in Chinese), 2017(12): 18–22.

[130]王增忠, 朱玉仲. 混凝土建筑物的裂缝分析及其防护和处理[J]. 混凝土, 2001(4): 7–10.
WANG Z Z, ZHU Y Z. J Concrete (in Chinese), 2001(4): 7–10.

[131]许晨, 金伟良, 黄楠, 等. 双向电渗对钢筋混凝土的修复效果实验——保护层表面强度变化规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(6): 1128–1138.
XU C, JIN W L, HUANG N, et al. J Zhejiang Univ: Eng Sci (in Chinese), 2015, 49(6): 1128–1138.

[132]金伟良，黄楠，许晨, 等. 双向电渗对钢筋混凝土修复效果的试验研究——保护层阻锈剂、氯离子和总碱度的变化规律[J]. 浙江大学学报(工学版). 2014, 48(8): 1586–1594.
JIN W L, HUANG N, XU C, et al. J Zhejiang Univ Eng Sci (in Chinese), 2014, 48(8): 1586–1594.

[133]许晨, 金伟良, 章思颖. 氯盐侵蚀混凝土结构延寿技术初探Ⅰ——模拟孔隙液中6种胺类有机物阻锈性能分析[J]. 建筑材料学报. 2014, 17(4): 572–578.
XU C, JIN W L, ZHANG S Y. J Build Mater (in Chinese), 2014, 17(4): 572–578.

[134]GUO Y X, GONG J X. D egradation of bond between steel bar and freeze-thaw concrete after electrochemical chloride extraction[J]. J Cent South Univ Technol, 2010, 17(2): 388–393.

[135]HOSSEINI A, KHALOU A R. Study of electrochemical chloride extraction as a non-destructive repair method: part 2[J]. Struct Elem Test Sampl, 2005, 247–255.

[136]FUNAHASHI M. Innovation - Cost Effective Cathodic Protection System for Concrete Structures[J]. Mater Perform, 2014, 53(11): 32–37.

[137]胡翔, 史才军, 李庆玲, 等. 矿物掺合料对水泥基材料孔溶液中氯离子浓聚的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(4): 376–385.
HU X, SHI C J, LI Q L, et al. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(4): 376–385.

[138]吴凯, 施惠生, 徐玲琳, 等. 矿物掺合料调控界面过渡区微结构对混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(5): 623–630.
WU K, SHI H S, XU L L, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(5): 623–630.

[139]IQBAA M F, LIU Q F, AZIM I, et al.Prediction of mechanical properties of green concrete incorporating waste foundry sand based on gene expression programming [J]. J Hazard Mater, 2020, 384:121322.

[140]GARBOCZI E J, BENTZ D P. Computer simulation of the diffusivity of cement-based materials[J]. J Mater Sci, 1992, 27(8): 2083–2092.

[141]PANESAR D K, CHIDIAC S E. Capillary suction model for characterizing salt scaling resistance of concrete containing GGBFS[J]. Cem Concr Comp, 2009, 31(8): 570–576.

[142]WANG Y, AN M Z, YU Z R, et al. Durability of reactive powder concrete under chloride-salt freeze–thaw cycling[J]. Mater Struct, 2016, 50(1):18.

[143]WU H, LIU Z, SUN B, et al. Experimental investigation on freeze–thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC)[J]. Constr Build Mater, 2016, 117: 63–71.