

引用格式: 梁可, 郭明磊, 吕忠. 混凝土抗氯离子渗透性能测试方法研究进展[J]. 中国材料进展, 2026, 45(4): 340-350.
LIANG K, GUO M L, LV Z. Research Progress on Test Methods for Resistance to Chloride Ion Penetration of Concrete[J]. Materials China, 2026, 45(4): 340-350.

混凝土抗氯离子渗透性能测试方法研究进展

梁可, 郭明磊, 吕忠

(安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 氯盐环境下氯离子能够渗入混凝土内部, 破坏钢筋的钝化膜, 引发钢筋锈蚀, 扩散是氯离子在混凝土中主要的传输方式, 氯离子扩散系数是常用测试及表征混凝土耐久性的重要指标。从测试时间、适用强度等级范围、测试精度及适用场景等方面分析对比了国内外有关混凝土氯离子扩散系数测试方法, 并建立了相关测试方法之间的关联性, 为准确反映混凝土抗氯离子渗透性能提供指导。结果表明, 自然扩散法测试结果可信度高, 适用于基于 Fick 第二定律扩散模型进行寿命预测, 常用于重要工程的耐久性评估; ASTM C1202 法和 NEL 法的试验时间短且测试结果可区分度较高, 常用于混凝土的配合比筛选和质量验收; RCM 法测试结果与自然暴露条件下的测试结果较为吻合; ACMT 法得到的氯离子稳态扩散系数能更好地反映氯离子在混凝土中的长期扩散性能, 适用于寿命预测和耐久性设计; Permit 法由于实验设备小巧轻便, 操作简便且对结构破坏小, 适用于现场无损检测。

关键词: 混凝土; 抗氯离子渗透性; 氯离子扩散系数; 测试方法; 相关性

中图分类号: TU528.0 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2026)04-0340-11

Research Progress on Test Methods for Resistance to Chloride Ion Penetration of Concrete

LIANG Ke, GUO Minglei, LV Zhong

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: Chloride ions can penetrate into concrete under chloride salt environment, destroying the passivation film of steel reinforcement and triggering the corrosion of steel reinforcement. Diffusion is the primary mode of chloride ion transport within concrete. The chloride ion diffusion coefficient, the most frequently tested and characterised parameter, quantifies the migration rate of chloride ions within concrete and serves as a crucial indicator for evaluating concrete durability. In this paper, the testing methods of chloride ion diffusion coefficient of concrete at home and abroad are reviewed from the aspects of testing time, applicable strength grade range, testing accuracy and suitable scenarios, the advantages and disadvantages of each method are analyzed and compared, with the correlation between the relevant testing methods established, to provide guidance for testing and evaluating the accurate reflection of resistance to chloride ion penetration of concrete. The results show that the natural diffusion method has high reliability and is suitable for life prediction based on Fick's second law diffusion model, which is commonly used in the durability assessment of important projects. The ASTM C1202 method and NEL method have short testing times and provide highly distinguishable results for evaluating the chloride ion permeability resistance of concrete, which are commonly used in concrete mixing ratio screening and quality acceptance. The test results of the RCM method are more in line with the test results of the natural exposure conditions. The chloride ion steady-state diffusion coefficient measured by the ACMT method can more accurately reflect the long-term diffusion performance of chloride ions in concrete, making it more suitable for service life prediction and durability design. The Permit method, due to its compact and portable equipment, simple operation and minimal structural damage, is primarily suitable for on-site non-destructive testing.

收稿日期: 2025-02-10 **修回日期:** 2025-06-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3802005); 安徽省高校科研计划项目(2024AH040029); 安徽省高校优秀拔尖人才培育资助项目(gxyqZD2021106); 安徽省高校自然科研重点科研项目(2023AH051100)

第一作者: 梁可, 男, 2000年生, 硕士研究生

通讯作者: 吕忠, 男, 1982年生, 教授, 博士生导师,

Email: zhonglv1982@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202502009

Key words: concrete; resistance to chloride ion permeability; chloride ion diffusion coefficient; test method; relevance

1 前言

自改革开放以来,我国海洋工程发展迅速,随之而来的是钢筋混凝土结构的破坏失效问题,其中大多是氯离子侵入导致钢筋被腐蚀造成的。氯盐(如海水、除冰盐等)环境下,氯离子通过扩散、毛细管吸附、对流、迁移等方式向混凝土内部渗透,透过混凝土保护层在钢筋表面富集,当氯离子浓度达到临界浓度时钢筋表面钝化膜被破坏从而形成腐蚀电流,诱发钢筋锈蚀,锈蚀产物膨胀使得混凝土保护层开裂、剥落,最终导致钢筋混凝土结构失效^[1-4]。因此,为延长钢筋混凝土的使用寿命,准确测试和评价混凝土的抗氯离子渗透性能至关重要。

氯离子扩散系数是评价混凝土抗氯离子渗透性的重要指标,也是混凝土寿命预测模型的重要参数。它表示的是在单位浓度梯度下,单位时间内通过混凝土的氯离子量。近年来,氯离子扩散系数计算在理论和实验研究方面均取得了显著进步。根据测试氯离子扩散系数和抗氯离子扩散性能所需时间的长短,可分为慢速法和快速法。慢速法是将混凝土试样暴露在氯盐溶液中进行长期扩散试验,以模拟自然环境中的氯离子侵蚀,主要包括扩散槽法^[5]、自然扩散法^[6]和暴露实验法^[7]。快速法是利用电场加速氯离子的迁移,以缩短测试时间快速获取结果,主要包括RCM法^[8]、ASTM C1202法^[9]、ACMT法^[10]、NEL法^[11]、Permit法^[12]等。

氯盐环境下,混凝土结构的耐久性设计和寿命预测依赖于氯离子扩散系数的准确测定和评价。混凝土氯离子扩散系数的测试方法有多种,实验原理和条件各有不同,也各有优势与局限性。为准确地表征混凝土的抗氯离子渗透性能,根据实际场景和需求合理选择相匹配的测试方法是至关重要的。本文对混凝土抗氯离子渗透性能的测试方法进行梳理,对比其优缺点,分析其适用性,建立它们之间的相关性,为检测人员及研究学者提供决策参考。

2 混凝土中氯离子的传输方式和影响因素

氯离子在混凝土中的传输方式主要包括扩散、毛细管吸附、对流、迁移等^[13]。海洋水下区的混凝土可视为处于饱和状态,扩散是氯离子最主要的传输方式。氯离子在混凝土中的扩散一般符合Fick第二定律^[14],该定律适用的前提是将混凝土看作是均匀且各向同性的材料,材料的扩散特性不随时间和氯离子浓度的改变而变化,同时氯离子在传输过程中不受其它离子的影响,且材料和氯离子之间没有产生结合作用,氯离子的扩散系数恒定。但实际上混凝土是一种由水、水泥、砂石,可能还

有矿物掺合料经过复杂的物理化学作用后形成的复合材料,内部各处孔径结构及物理化学性质均存在差异。同时氯离子在混凝土中会受到物理吸附和化学结合的作用,也可能受到环境变化影响重新释放,这些都使得氯离子扩散系数是个变量。

对于海洋潮汐区和除冰盐地区,混凝土处于非饱水状态,扩散、对流和毛细管吸附共同驱动氯离子在混凝土中传输。在干湿循环过程中,混凝土中的孔溶液会在饱和与非饱和之间周期性变化。当环境湿润时,氯离子伴随水分扩散进入混凝土内;当环境干燥时,混凝土内部水分蒸发,氯离子在影响深度范围内浓度升高,浓度梯度增大,表层氯离子受毛细管吸附作用逐渐向内部运输并积累^[15]。在干湿循环环境下,对流和毛细管吸附作用是氯离子进入混凝土内部的主要方式,且这种方式主要发生在混凝土的表层区域,虽然传输距离有限,但能够使氯离子快速到达混凝土内部并形成峰值^[16]。在混凝土的内部区域,氯离子的传输方式与饱水混凝土相同,以扩散为主。

氯离子在混凝土中的传输主要受材料和外部环境的影响,包括水胶比、掺合料的种类及掺量、温度和湿度等。水胶比是水与胶凝材料质量的比值,对混凝土的强度、工作性能、耐久性和服役寿命有着很大的影响。水胶比越大,混凝土在养护过程中形成的气孔越多,混凝土的孔隙率升高为氯离子传输提供更多的通道。此外,水泥的水化产物能够对氯离子产生结合作用,水泥含量的减少势必会影响水化产物的生成,从而影响对氯离子的结合作用^[17-19]。总之,水胶比越大,混凝土的密实性越差,氯离子的扩散系数越大。

矿物掺合料由于具有颗粒小、比表面积大等特点,常被掺入混凝土中改善混凝土的流动性等工作性能,以提高混凝土耐久性。掺合料中的活性成分 SiO_2 、 Al_2O_3 能够与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 产生火山灰效应生成更多的水化硅酸钙凝胶等物质,从而改善混凝土的内部结构,减少孔隙和裂缝数量,显著提高混凝土的密实性和抗渗性^[20]。同时,水化产物的增加能够提高混凝土对氯离子的物理吸附和化学结合能力,减少混凝土中自由氯离子含量,从而延长钢筋钝化膜被腐蚀的时间。掺合料的加入会影响氯离子在混凝土内的传输能力,影响程度与掺合料的种类和掺量有很大关系。宁灿^[21]研究发现,单掺粉煤灰或矿粉均有助于提高水泥浆体对氯离子的固化能力,单掺矿粉对氯离子的固化作用优于单掺粉煤灰,当粉煤灰或矿粉掺量高于40%(质量分数,下同),则会降低水泥浆体对氯离子的固化能力。复掺粉煤灰和矿粉对氯离子的固化能力要高于单掺,10%粉煤灰和20%矿粉复

掺时氯离子的固化能力最强, 固化率可以达到 65.2%。Sua-iam 等^[22]发现分别掺入 8% 和 15% 的硅灰可以使混凝土的氯离子扩散系数降低 22.5% 和 59.9%。Al-sodani^[23]研究了暴露温度为 23~68 °C 时, 5%, 10% 和 15% 偏高岭土掺量对氯离子扩散系数的影响, 结果表明氯离子扩散系数随着偏高岭土掺量的增加而降低, 15% 掺量时抗氯离子渗透性能效果最好, 氯离子扩散系数相比 5% 掺量时降低了 64%~71.4%。

环境温度对混凝土的影响首先是发生在养护期间, 混凝土的水化时间较长, 温度会对混凝土的孔隙结构产生很大的影响。丁平祥等^[24]研究表明养护温度为 10~20 °C 时, 随着温度的增加, 混凝土中的总孔隙减少, 多害孔、有害孔和少害孔占比减少, 无害孔占比增大。在服役过程中环境温度也会对混凝土氯离子的扩散产生影响, 温度升高会加快氯离子在混凝土中的迁移速率, 使扩散系数增大。Samson 等^[25]测试了不同养护龄期的混凝土在 4, 23 和 40 °C 温度下的氯离子扩散系数, 结果显示氯离子扩散系数随着环境温度的升高而增大, 40 °C 时的氯离子扩散系数是 4 °C 时的 2 倍以上。

在养护阶段, 相对湿度对混凝土的水化和孔隙结构有很大的影响。Yeon 等^[26]研究了 45%, 65% 和 95% 3 种相对湿度养护方式对氯离子扩散系数的影响, 结果表明: 增大混凝土早期养护湿度, 能够使混凝土的表观氯离子扩散系数减小, 可能是相对湿度的增加为混凝土水化过程提供了足够的水, 使混凝土的水化过程更加充分。Zhu 等^[27]研究了内部水分和外部相对湿度(50%~100%)对氯离子渗入不饱和混凝土的影响, 结果表明, 氯离子渗透率与混凝土内部相对湿度之间存在良好的相关性。当内部相对湿度低于 50% 时, 氯离子很难渗透到混凝土中; 但是, 当混凝土的内部相对湿度超过 75% 时, 氯离子的渗透率会增加, 其迁移速率随相对湿度和暴露时间的增加而增加。混凝土的水分蒸发随着外部相对湿度的降低而增加, 当外部相对湿度为 50% 时, 表面氯离子含量会明显增加; 但是, 当外部相对湿度高于 75% 时, 随着暴露时间的延长, 内部氯离子含量增加, 表面氯离子含量减少。综上所述, 相对湿度是影响氯离子在混凝土中渗透的重要因素, 内部和外部相对湿度的变化都会对氯离子的传输行为产生显著影响。

氯离子在混凝土中的传输行为主要受两类机制调控, 其一为通过调控混凝土早期水化进程及孔隙结构演化影响其微观密实性。具体而言, 水胶比、矿物掺合料掺量、养护温度及湿度等参数通过影响水化产物生成与孔隙率发展, 显著改变混凝土的微观结构特征。研究表明, 优

化养护条件(维持 10~20 °C 环境温度、较高相对湿度)、降低水胶比(≤ 0.4)及掺入适量矿物掺合料可促进致密水化产物形成, 使孔隙结构细化, 从而显著降低氯离子扩散系数。其二为服役环境参数对传输动力学的直接影响, 其中环境温度通过阿伦尼乌斯效应加速离子迁移速率, 而水分作为氯离子传输的必要介质, 其存在形式(毛细孔饱和度 $>80\%$)与含量将主导离子迁移的渗透-扩散耦合机制。这两类机制分别在材料形成阶段与服役阶段发挥主导作用, 共同决定了氯离子在混凝土中的长期传输行为。

3 混凝土抗氯离子渗透性能的测试方法

混凝土抗氯离子渗透性能的测试方法有多种, 其测试原理和适用范围也各不相同。因此, 测试、评价混凝土抗氯离子渗透性能时应进行科学合理的选择。RCM 法是我国现行的评价混凝土抗氯离子渗透性能的标准方法, 但与其他方法相比, 该方法测试时间久, 且 AgNO_3 显色法测氯离子渗透深度备受争议、可靠性较低, 且无法测量已受氯离子侵蚀的混凝土^[28]。Lay 等^[29]以碘离子作为渗透离子, 碘酸盐-淀粉乙酸为指示剂, 使得显色深度是混凝土真实的侵蚀深度, 从而避免了已有氯离子对所测氯离子扩散系数的影响。但淀粉作为指示剂对碘离子的显色效果不明显, Liu 等^[30]采用 AgNO_3 代替淀粉来显色, 使得碘离子渗透区域为淡黄色, 能够更清晰地分辨碘离子渗透深度。ASTM C1202 法由于在混凝土两端施加的电压较大使得实验容易受到电极反应的影响, 所以仅适合测量电通量在 1000~3000 C 和强度等级在 C30~C50 的混凝土的抗氯离子渗透性能, 常用于配合筛选和质量验收。ACMT 法则是在电通量法上进行改进, 更适用于评价高性能混凝土的抗氯离子渗透性能。NEL 法是目前最快的电迁移法, 适用于各种类型的混凝土, 常用于耐久性评价、配合比筛选和质量验收。为解决 NEL 法因实验过程中紫铜电极和混凝土试件之间难以完全接触而影响实验结果, 覃荷瑛^[10]对实验装置进行了改进, 使试件固定在溶液池之间, 能够始终保持混凝土试件与电极完全接触, 使测试结果更准确。Permit 法是一种能够现场无损检测的方法, 该方法操作简便、测试时间短且适用于各种强度等级的混凝土, 但其仅适用于混凝土表层渗透性的评价, 无法对深层混凝土的渗透性进行评价且实验设备成本较高, 一般用于配合比筛选和实际工程的质量验收。表 1 是对上述方法参考标准、测量指标、测试时间、理论基础、适用范围及适用场景的简要总结。

表 1 混凝土抗氯离子渗透性能测试方法比较
Table 1 Comparison of test methods for chloride ion permeability of concrete

Method	Reference standard	Testing indicators	Experiment time	Theoretical foundation	Scope of application (concrete strength)	Applicable scenarios or target
Natural diffusion method	AASHTO T259 ^[31] , NT build 443 ^[32]	Chloride ion concentration depth distribution in concrete	Several months	Fick's second law	Concrete with various strengths	Lifespan prediction, mix design screening and long-term durability assessment
RCM	GB/T 50082—2024 ^[33] , NT build 492 ^[34]	Average chloride ion penetration depth and diffusion coefficient	6~96 h	Nernst-Planck equation	C50~C70	Mix design screening, quality monitoring and acceptance, service life prediction
ASTM C1202	ASTM C1202 ^[8] , AASHTO T277 ^[35]	Conductivity	6 h	Correlation between electrical conductivity and pore structure in saturated concrete	C30~C50	Mix design, quality monitoring and acceptance
ACMT	—	Chloride ion diffusion coefficient	9 h	Nernst-Planck equation	C15~C80	Mix design, quality monitoring and acceptance, durability design and general service life prediction
NEL	CCES 01—2018 ^[36]	Electrical conductivity	5~8 min	Nernst-Einstein equation	C20~C100	Mix design, quality monitoring and acceptance, durability design
Permit	—	Chloride ion diffusion coefficient	5~10 min	Nernst-Planck equation	C15~C80	Mix design, quality monitoring and acceptance, non-destructive testing

3.1 自然扩散法

自然扩散法是实际应用中常见的一种测定氯离子扩散系数的方法，它基于 Fick 第二定律，通过将混凝土试样暴露于氯盐溶液中进行长期扩散实验来实现。这种方法模拟了自然环境中氯离子对混凝土的侵蚀，是评估混凝土耐久性的重要手段。实验方法如图 1 所示，实验步骤为：① 保留混凝土试件的一个侧面作为暴露面，其余面均用环氧树脂密封以防止氯离子多方向进入；② 将试件放入装有氯盐溶液的容器中持续浸泡至预定期限；③ 去除试件表面的环氧树脂并将试件逐层取粉，烘干后将各层粉末分开存放；④ 将混凝土粉末浸泡于去离子水和稀硝酸溶液中，过滤后采用 AgNO_3 滴定测量氯离子含量；⑤ 分析

氯离子浓度与侵入深度的关系曲线，根据 Fick 第二定律利用最小二乘法拟合出氯离子在混凝土中的扩散系数。

该方法的优点为：① 由于模拟的是自然环境下的氯离子侵蚀，所以能够提供较为真实的氯离子扩散情况；② 实验原理简单且可信度较高，修正后可用于实际寿命预测。但也存在一些缺点：① 实验周期长，通常需要持续数月甚至更久^[37]；② 实验过程繁琐，涉及多个过程；③ 检测结果的误差较大。尽管自然扩散法存在一些局限性，但仍是一个用于评估混凝土结构在氯盐环境中耐久性的重要方法。自然扩散法适用于各种强度等级的混凝土，尤其适用于长期耐久性评估和寿命预测，常用于重要工程的耐久性评估。

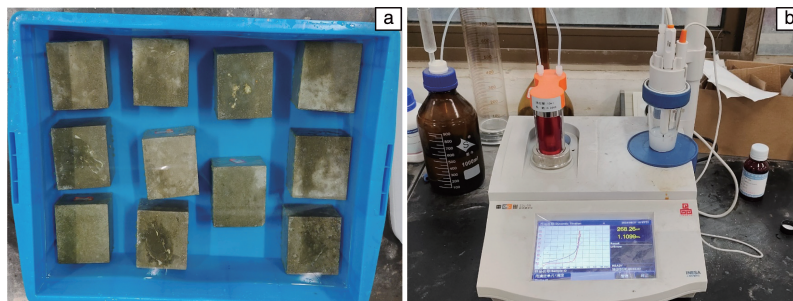


图 1 自然扩散法测试：(a) 混凝土浸泡，(b) 氯离子含量测试

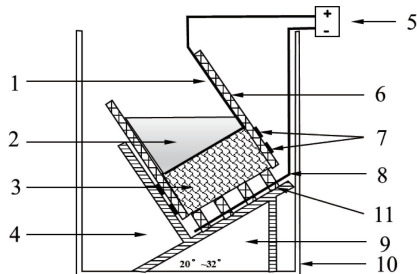
Fig. 1 Natural diffusion testing: (a) submerged concrete, (b) test of chloride ion content

3.2 RCM 法

RCM 法是由唐路平教授开发的旨在评估混凝土中氯离子非稳态迁移特性的方法^[36]。RCM 法曾被国内外众多规范及标准推荐使用^[38, 39]，实验原理为采用外加电场加快氯离子向混凝土内部迁移的速率，结合渗透深度计算氯离子扩散系数，图 2 为实验装置示意图^[33]。该方法可用于混凝土配合比设计与混凝土质量检验评定依据，也可用于混凝土使用寿命的预测和评估。实验时先将直径为 (100 ± 1) mm、厚度为 (50 ± 2) mm 的圆柱体试件进行真空处理，之后再套在橡胶桶内，放入负极为 10% 的 NaCl 溶液、正极为 0.3 mol/L 的 NaOH 溶液的实验槽中，两端施加 30 V 左右的直流电压直至实验结束，之后劈开试件，用 AgNO_3 测量显色深度，并根据式 (1) 计算氯离子扩散系数：

$$D_{\text{RCM}} = \frac{0.0239 \times (273 + T)L}{(U - 2)t} \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}} \right) \quad (1)$$

式中， D_{RCM} 为混凝土的非稳态氯离子迁移系数，精确到 $0.1 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}$ ； U 为所用电压的绝对值(V)； T 为阳极溶液的初始温度和结束温度的平均值($^{\circ}\text{C}$)； L 为试件厚度(mm)，精确到 0.1 mm； X_d 为氯离子渗透深度的平均值(mm)，精确到 0.1 mm； t 为实验持续时间(h)。



1-anode, 2-anode solution, 3-sample, 4-cathode solution, 5-power supply, 6-silicone rubber sleeve, 7-clamp, 8-bracket, 10-cathode test cell, 11-support head

图 2 RCM 法实验装置示意图^[33]

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up for RCM method^[33]

RCM 法的主要优点：① 操作简单且有较好的准确性，实验周期短；② 相关设备已经标准化，确保了实验的一致性和可靠性；③ 大量实验证明该方法测得的扩散系数与自然暴露条件下的结果相吻合，用于混凝土结构耐久性设计及寿命预测时较为准确；④ 得到的数据与通过其他测试方法(如电通量法)得到的数据具有良好的相关性，可以相互验证。主要缺点：① 实验过程中溶液浓度易发生变化，且对骨料尺寸较大的混凝土测试不够准

确；② 已被碳化或氯离子侵蚀的试件在测试过程中会影响混凝土的显色深度导致测试结果误差较大；③ Spiesz^[40]认为氯离子迁移系数的大小依赖于氯离子的渗透深度，随渗透深度的增加而增加，当渗透深度大于 10 mm 才会使误差在 10% 以下，对于 60 MPa 以上强度的掺合料混凝土或 70 MPa 以上高强混凝土由于过于密实使得显色深度较小误差较大，从而使得测试结果不够精确^[41]；④ 忽略了对流、毛细管吸附作用及氯离子结合能力对氯离子迁移速率的影响^[42]；⑤ 使用 AgNO_3 显色测试氯离子侵蚀深度存在争议，当 AgNO_3 溶液喷涂在劈裂的混凝土表面时，混凝土表面形成的沉淀物可能是氧化银(氢氧化银不稳定，瞬间分解成氧化银)和氯化银的混合物。当氧化银的百分比足够大时，白色的颜色可能会被棕色覆盖^[43, 44]。当混凝土的 pH 值低于 11 时，不宜用 AgNO_3 显色法测量穿透深度^[45]。

3.3 ASTM C1202 法

外加电场加速氯离子扩散实验方法最初由 Whiting^[46]于 1981 年发明，1991 年美国材料与实验协会对实验方法及实验条件等重新修订，将它编入美国公路桥梁设计规范(AASSTO T277)及美国材料与实验协会标准(ASTM C1202)，是最具影响力的电加速快速测试氯离子渗透的方法。实验装置如图 3 所示^[47]，该实验通过在真空饱水后的混凝土两端施加 60 V 的直流电加快氯离子迁移速率，测量 6 h 内流过的总电量来评价混凝土的抗氯离子渗透性，表 2 是 ASTM C1202 法对混凝土渗透等级的评定标准。但不少学者研究指出，不同种类和组成的混凝土由于孔结构特征存在差异，ASTM C1202 法测试结果与混凝土抗氯离子渗透性能之间的相关性可能会受到影响。这意味着在应用 ASTM C1202 法时，可能需要考虑混凝土的具体组成和孔结构特征，以确保测试结果的准确性和适用性。

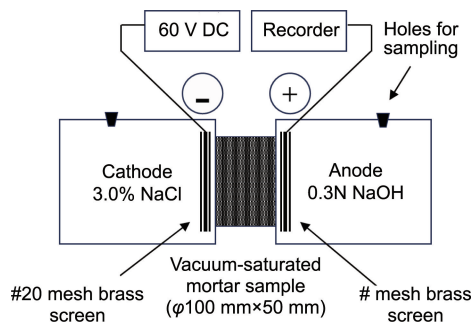


图 3 ASTM C1202 法实验装置示意图^[47]

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental set-up for ASTM C1202 method^[47]

由于操作简单、实验时间短、可重复性好，ASTM C1202 法成为目前广为人知的电测法，但该方法在测试

过程中存在许多问题：①在6h的测量过程中，测量是非稳态的，采用每30min记录一次电流的方式测试电流波动大的试样会出现较大误差；②对于强度在C30以下及C50以上的混凝土，试样电阻过小或过大均会使得测量易受焦耳效应的影响，不能准确反映混凝土的抗氯离子渗透性^[48, 49]；③测试适用范围较小，仅适用于测试0.35~0.6水胶比及电通量在1000~3000C的混凝土的抗氯离子渗透性能^[50]；④在实验测试过程中溶液温度易升高从而对导电量的测试结果产生影响；⑤对于有外加剂、掺合料的混凝土，使用电通量法测得的是混凝土整体的导电性，而不是混凝土的抗氯离子渗透性能^[51]。

表2 ASTM C1202法混凝土渗透等级标准

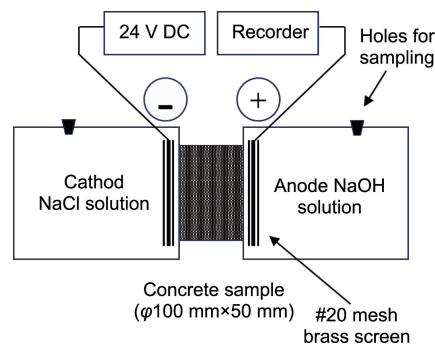
Table 2 ASTM C1202 standard for concrete penetration levels

Electric flux/C	Permeability	Types of concrete
>4000	High	High water-cement ratio
2000~4000	Medium	Medium water-cement ratio
1000~2000	Low	Low water-cement ratio
100~1000	Very low	Emulsion-modified, internally sealed, silica fume concrete
<100	Ignore	Polymer-modified or other impregnated concrete

3.4 ACMT法

20世纪90年代随着电迁移技术的出现，氯离子的迁移可以通过更低的外加电场来测定，因此ACMT法在RCPT实验方法的基础上进行了改进。ACMT法通过降低直流电压、减小试件厚度、减小电流记录间隔时间、增大溶液池容积和延长测试时间等措施提高测试结果的准确度。该方法的实验原理是采用外加电场加速氯离子迁移，通过测量阳极处氯离子的含量得到浓度-试件曲线。Shen等^[52]采用ACMT法研究了昼夜温差大、干燥程度高的养护条件对加速硫酸盐侵蚀的砂浆试样氯离子扩散系数的影响，结果显示，温度变化与干燥条件的耦合作用引起砂浆样品产生显著的初始微裂纹并增加孔隙率，致使氯离子有效扩散系数明显增大。Wang等^[53]提出了ACMT法与自然扩散实验相结合的耦合实验方法，该方法可用于模拟潮汐区钢筋混凝土结构在氯盐侵蚀环境下的耐久性退化过程。能够在保持钢筋初始钝化状态的前提下显著缩短氯离子渗透至临界浓度的诱导期，从而将腐蚀起始时间提前。ACMT实验装置如图4所示^[54]，实验时先将混凝土切割成 $\Phi 100 \times 30$ mm的试件，真空饱水21h，再在混凝土两端施加24V的电压，持续通电9h，每隔5min记录一次电流，绘制电流-时间曲线。

与ASTM C1202法相比，ACMT法具有以下优点：

图4 ACMT法实验装置示意图^[54]Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up for ACMT method^[54]

①通过降低外加电场电压、增加溶液体积并在上方开孔可减少溶液温度升高对测试结果的影响；②得到的氯离子扩散系数与长期浸泡实验方法测试的结果之间具有很好的相关性，有助于使用ACMT法预测混凝土结构的长期耐久性。与RCM法相比，ACMT法虽然具有实验时间短的优势，但仍有很多的不足：①需要专门的设备和仪器进行测试，可能会增加成本；②对于某些特殊类型的混凝土或者在特定的环境条件下，适用性可能受限；③不同学者实验得出的经验系数可能存在较大差异，影响结果的一致性；④对于含有矿物掺合料的混凝土，通过的电荷易受孔隙溶液中离子的影响^[51]。

3.5 NEL法

NEL法是由路新瀛教授团队提出的，通过测定高浓度真空饱盐混凝土试件的电导率，根据电导率利用Nernst-Einstein方程测试混凝土的氯离子扩散系数^[36, 55]：

$$D_i = \frac{RT\sigma t_i}{Z_i^2 F^2 C_i} \quad (2)$$

式中， D_i 和 t_i 分别为带电粒子 i 的扩散系数(m^2/s)和迁移数； C_i 为混凝土试件孔溶液中氯离子浓度，即所用真空饱盐溶液中氯离子浓度(mol/cm^3)； σ 为混凝土的电导率； Z_i 为电荷数或者价数； R 为气体常数，8.314 J/(mol·K)； F 为Faraday常数，96500 C/mol； T 为绝对温度(K)。

测试时先用4 mol/L NaCl溶液对混凝土试件进行真空饱盐处理，之后用NEL型混凝土渗透性电测仪测量氯离子扩散系数值，实验装置如图5所示^[39]。NEL法对混凝土的测试范围很广，除普通强度等级混凝土外，还能够对超高性能混凝土的抗氯离子渗透性进行快速测量，测试结果可分为6个等级，对应的氯离子扩散系数如表3所示。与RCM法和ASTM C1202法相比，NEL法也具有其特有的优势：①能够在较短的时间内(通常少于8min)得到测试结果，且实验操作简单，适合快速评估混凝土的耐久性^[56]；②测试使用0~5V的电压，基本可以忽

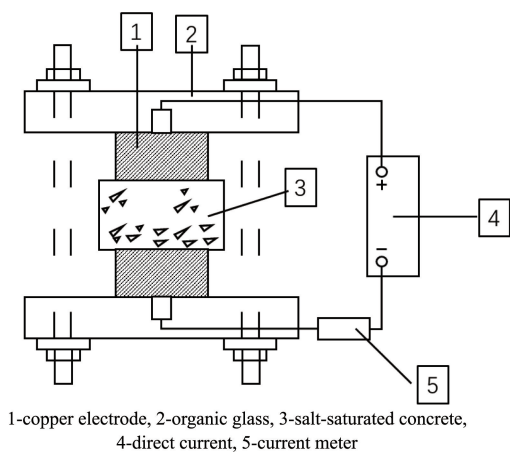
图 5 NEL 法实验装置示意图^[39]Fig. 5 Schematic diagram of the experimental set-up for NEL method^[39]

表 3 NEL 法混凝土渗透性能评价标准

Table 3 Evaluation criteria of concrete permeability by NEL method

Chloride diffusion coefficient/ ($10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$)	Permeability grade	Permeability evaluation
>1000	I	Very high
500~1000	II	High
100~500	III	Medium
50~100	IV	Low
10~50	V	Very low
<10	VI	Ignore

略电极极化反应；③对于高性能混凝土，可以得到较为稳定和准确的测试结果，王增浩等^[57]采用此3种方法测试3种超高性能混凝土的抗渗透性能，结果显示RCM法用时长达3周且显色深度均小于2mm，难以比较其渗透性，ASTM C1202法测试的电通量均小于100C也无法比较，只有NEL法测试的3种混凝土结果差距较大，渗透性容易比较且与现有研究相吻合。NEL法的不足之处是：①测试对混凝土饱和度要求高，但混凝土是多孔介质，即使经过真空饱盐处理也难以达到完全饱和状态；②测试是基于电导率来实现的，当混凝土中掺有影响其导电性能的材料时，测试结果不够准确^[58]；③在计算氯离子扩散系数时，通常假设氯离子迁移数为1，不符合实际情况；④对试件进行饱盐处理时采用高浓度氯盐会增加氯离子间的相互作用，与Nernst-Einstein方程中“溶液中的离子是独立移动的”这一假设不符。

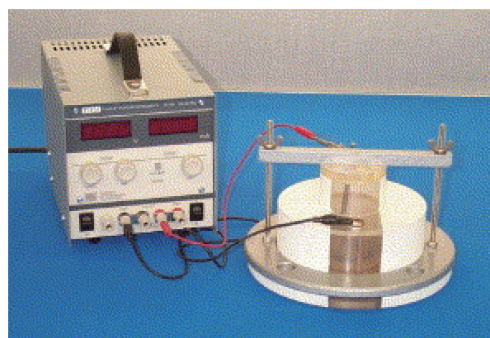
3.6 Permit 法

Permit法是由Basheer等^[59]基于稳态电迁移的实验原理改进后提出的，可现场测试混凝土及其它建筑材料（如石材）的表层氯离子扩散阻力，基本不引起结构损

伤，适用于测试混凝土保护层的抗氯离子渗透性能。吴立朋等^[60]研究发现混凝土氯离子扩散系数会受到饱水度的微弱影响，但基本不会受到孔溶液中的氯离子之外离子的影响。Liu等^[61]使用Permit法研究了不同养护方法下含大量矿物外加剂的混凝土的氯离子扩散系数，结果表明矿物掺合料掺量大的胶凝体系水化速率慢，当养护时间短，失水量大时，混凝土水化不足，将显著增加氯离子在混凝土表面的扩散速率。祝小靓等^[62]通过测定阳极室的氯离子浓度，得到氯离子浓度与电导率之间的换算关系，避免了直接测定溶液氯离子浓度时大量复杂的实验操作，并使用Permit法对现场混凝土进行测试，证明了纳固材料能够明显改善混凝土的抗氯离子渗透性能。如图6所示^[59]，Permit法离子迁移仪由测试器和控制器组成，测试器含有2个不互通的同心储液室，内室含有0.55 mol/L的NaCl溶液和不锈钢阴极，外室池装有蒸馏水和低碳钢阳极，实验时施加60V直流电，根据氯离子浓度与电导率的关系，并采用温度修正得到浓度-时间曲线，再根据式(3)计算氯离子扩散系数：

$$D_{\text{Permit}} = \frac{k_B T l V}{Z_i e_0 A UC} \frac{dc}{dt} \quad (3)$$

式中， D_{Permit} 为离子扩散系数(m^2/s)； k_B 为Boltzmann常数， $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； T 为绝对温度(K)； Z_i 为离子价数， $Z=1$ ； e_0 为电子电量(C)； l 为平行板电极间距(m)； A 为迁移面面积(m^2)； V 为外室体积(m^3)； U 为内室氯离子浓度(mol/L)； C 为室氯离子浓度(mol/L)； dc/dt 为浓度变化率(mol/(L·s))。

图 6 Permit 法的实验装置^[59]Fig. 6 Experimental set-up for Permit method^[59]

Permit法与其他测试方法相比有以下优点：①实验设备小巧轻便，操作方便，实验数据易于梳理；②可用于商业混凝土结构现场检测，且对结构基本不会造成损坏，能为结构寿命预测提供依据^[63]；③测试速度快，测试范围广，对于高性能混凝土及外掺掺合料的混凝土也能快速测定。但也存在以下不足：①国内试验数据相对较少，需要进一步研究和验证才能应用于实际工

程; ② 对于掺有矿物掺合料的混凝土, 测试结果的真实性和准确度有待进一步研究; ③ 测试范围为混凝土表层 15 mm, 难以检测内部性能; ④ 测试得到的氯离子扩散系数尚未与我国现行标准 RCM 法所得扩散系数建立换算关系; ⑤ 需要建立氯离子浓度与电导率之间的换算关系, 这可能需要额外的步骤和校准。

4 混凝土抗氯离子渗透性能测试方法的相关性

为了建立氯离子快速测试方法之间的相关性, 许多学者进行了理论和实验研究。表 4 总结了不同的测试方法相关性的研究结论和适用范围。沈平邦^[64]通过正交实验, 使用 Permit 法和 RCM 法测试了不同影响因素下混凝土的氯离子扩散系数, 结果显示在 $D_{\text{Permit}} < 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 时, RCM 法和 Permit 法的氯离子扩散系数具有相关性, 两者的关系为 $D_{\text{Permit}} = kD_{\text{RCM}}$, 其中 $0.2597 < k < 0.3068$, 否则线性关系不明显。吴立朋^[65]则认为两者关系为 $D_{\text{Permit}} = 0.3D_{\text{RCM}}$ 。赵东拂等^[66]采用 RCM 法和 Permit 法开展试验研究, 同时考虑水胶比、掺合料种类及用量、模板类型(钢模和木模)等因素的影响, 得到 $D_{\text{RCM}} = 0.281 + 2.808D_{\text{Permit}}$ 的关系。

对于 RCM 法和电通量法, 陆晗等^[67]发现对于低渗

透性混凝土, 库仑电量与氯离子扩散系数之间不存在规律性。方毅^[68]用 RCM 法和电通量法测试了水胶比为 0.5、纯水泥混凝土及矿粉和钢渣粉(1:1, 质量比)复掺 30% 的混凝土抗氯离子渗透性能, 结果显示, 不掺掺合料时两者的关系为 $D_{\text{RCM}} = 0.0035Q - 4.262$, 复掺时关系为 $D_{\text{RCM}} = 0.0021Q - 0.491$, 其中 D_{RCM} 是用 RCM 法时测出的氯离子扩散系数, Q 是用电通量法测试 6 h 时总电量。韩建国等^[50]研究发现氯离子扩散系数与电通量之间呈分段线性关系, 且电通量 3000 C 为分界点。

为研究电通量法和 NEL 法之间的相关性, 易成等^[69]选用不同水胶比的混凝土进行测试, 结果表明, 对于低水胶比混凝土, 2 种测试指标(电通量和氯离子扩散系数)之间离散性较小, 相关性较好; 而高水胶比混凝土的离散性较大, 相关性较差。盛黎等^[70]探究高性能混凝土的氯离子扩散系数与电通量之间的关系, 研究表明, 矿物掺合料种类相同、水泥品种相同, 且水胶比在同一范围内的高性能混凝土氯离子扩散系数与电通量具有较好的相关性。丁小平等^[71]采用 ASTM C1202 法和 NEL 法评价开裂前后低收缩延性纤维增强水泥基复合材料试件的抗氯离子渗透性, 发现试件开裂前 ASTM C1202 法与 NEL 法测试结果相关性良好, 开裂后相关性不强。

表 4 混凝土抗氯离子渗透性能测试方法的相关性

Table 4 Relevance of test method for resistance to chloride ion penetration of concrete

Method	Scope of application or type of concrete	Conclusion	Ref.
RCM and Permit	$D_{\text{Permit}} < 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$D_{\text{Permit}} = kD_{\text{RCM}}$, $k = 0.2597 \sim 0.3068$	[64]
	Strength grade C30 or higher under natural curing	$D_{\text{Permit}} = 0.3D_{\text{RCM}}$	[65]
	Factors such as water-binder ratio, admixture type and dosage, and formwork type (steel and wood)	$D_{\text{RCM}} = 0.281 + 2.808D_{\text{Permit}}$	[66]
RCM and ASTM C1202	Low water-to-binder ratio	No correlation	[64]
	Water-binder ratio = 0.5, concrete without admixtures	$D = 0.0035Q - 4.262$	[68]
	Water-binder ratio = 0.5, blend 30% of mineral powder and steel slag powder with 1:1 ratio	$D = 0.0021Q - 0.491$	
	At the threshold of 3000 C electric flux	Exhibits a piecewise linear relationship	[50]
ASTM C1202 and NEL	Low water-binder ratio	High correlation	[69]
	High water-binder ratio	Low correlation	
		The mineral admixture type is the same, the cement type is the same, and the water-binder ratio is within the range of 0.25 to 0.3	High correlation
	Low-shrinkage ductile fiber-reinforced cementitious composite concrete	High correlation when no cracks occur, low correlation after cracking	[71]

5 结 语

在混凝土抗氯离子渗透性能评估中, 理论基础和测试方法多样, 不同方法在试验时间、测试精度及适用场景等方面各具特点。为便于工程人员和研究人员快速选

择最优测试方案, 基于自然扩散法、RCM 法、ASTM C1202 法、ACMT 法、NEL 法及 Permit 法等对比分析, 结合测试需求, 图 7 系统总结了各测试方法的判断依据及选择路径。

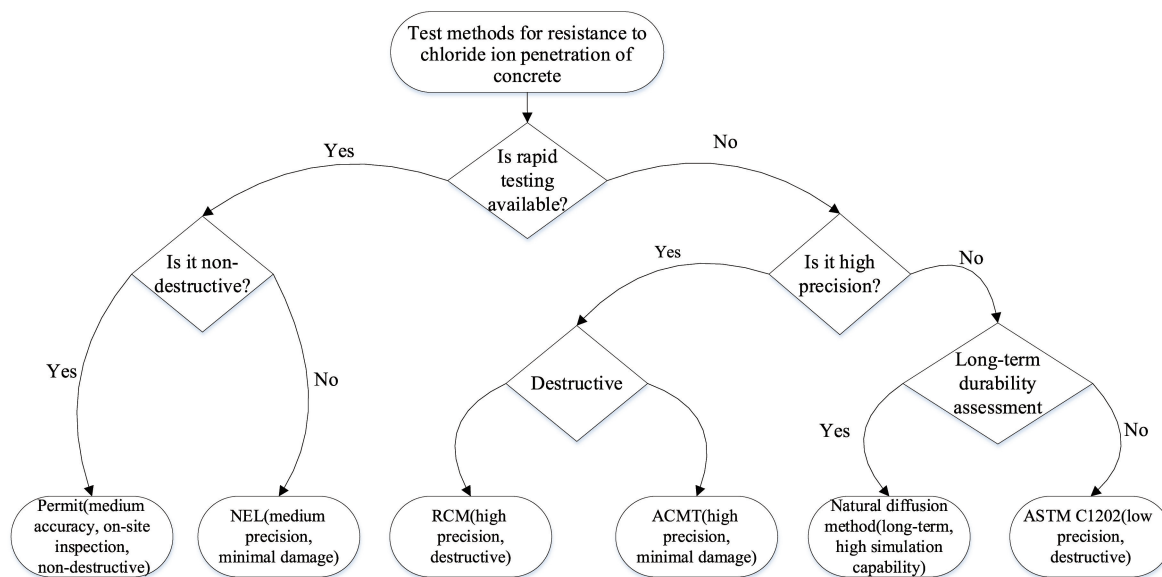


图 7 测试方法选择依据

Fig. 7 Selection criteria for test methods

(1) 现有的氯离子快速测试方法均采用先真空饱水, 后外加电场加速氯离子迁移的测试方式, 能够反映氯离子在饱水混凝土中的扩散传输, 而在浪溅区、潮汐区等干湿循环的服役环境下氯离子的传输还会涉及到对流、毛细管吸附、迁移等方式。因此, 为了与实际服役情况更加贴近, 需结合氯离子的传输方式和影响因素, 进一步加强开发能够反映混凝土在氯盐环境中不同传输方式的测试方法。

(2) 对于低等级混凝土, 采用 ACMT 法检测较为合适; 对于普通等级混凝土, ASTM C1202 法适用于配合比筛选、质量监测与验收, RCM 法适用于寿命预测; 对于高强度等级混凝土, NEL 法适用于配合比筛选、质量监测与验收, ACMT 法适用于一般寿命预测。Permit 法可以用于混凝土结构的现场无损检测。

(3) 混凝土抗氯离子渗透性能测试方法的相关性研究有助于全面评价混凝土在氯盐环境下的耐久性。对于 RCM 法和 ASTM C1202 法, 当采用 ASTM C1202 法进行混凝土配合比筛选和质量监测时, 可根据二者的相关性大致推测氯离子扩散系数, 并判断服役寿命是否能够满足要求。因此, 增加混凝土抗氯离子渗透性的样本数量和种类, 更全面地研究各测试方法的相关性对评估混凝土抗氯离子渗透性能有重要意义。

参考文献 References

- [1] MING X, LI Y, LIU Q, *et al.* Cement and Concrete Composites[J], 2023, 137: 104928.
- [2] ZHU Y, MACDONALD D, QIU J, *et al.* Corrosion Science[J], 2021, 185: 109438.
- [3] 陈宣东, 章青, 顾鑫, 等. 中国腐蚀与防护学报[J], 2021, 41(5): 673-678.
CHEN X D, ZHANG Q, GU X, *et al.* Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection[J], 2021, 41(5): 673-678.
- [4] 孙伟, 蒋金洋, 王晶, 等. 中国材料进展[J], 2009, 28(11): 19-25+53.
SUN W, JIANG J Y, WANG J, *et al.* Materials China[J], 2009, 28(11): 19-25+53.
- [5] 左国望, 苏骏, 李扬. 武汉大学学报(工学版)[J], 2016, 49(2): 269-273.
ZUO G W, SU J, LI Y. Engineering Journal of Wuhan University[J], 2016, 49(2): 269-273.
- [6] 司有栋. 荷载-氯盐共同作用下带接缝混凝土构件耐久性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
SI Y D. Durability Research of Concrete Specimens with Joint Under Combination of Load-Chloride Ingression[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [7] 赵静. 干湿循环环境下混凝土氯离子扩散性能的时变性及相似性

- [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- ZHAO J. Time Dependency and Smilarity of Chloride Diffusivity of Concrete Under Dry-Wet Cycle Environments [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [8] 赵庞远. 重载铁路高性能混凝土配合比设计及渗透性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- ZHAO P Y. Study on Mix Proportion Design and Permeability of High Performance Concrete for Heavy-Haul Railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [9] Advancing Standards Transforming Markets. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration: ASTM C1202—2019[S]. Philadelphia: ASTM, 2019.
- [10] 覃荷瑛. 再生混凝土氯离子渗透性试验研究及微观数值模拟[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- TAN H Y. Mesoscopic Numerical Simulation and Experimental Study on the Chloride Diffusivity of Recycled Aggregate Concrete [D]. Nanjing: Guangxi University, 2012.
- [11] 肖官衍, 田壮, 夏晋, 等. 硅酸盐学报[J], 2024, 52(8): 1-11.
- XIAO G Y, TIAN Z, XIA J, *et al.* Journal of the Chinese Ceramic Society [J], 2024, 52(8): 1-11.
- [12] 明静, 张亚梅, 孙伟. 硅酸盐学报[J], 2010, 38(9): 1707-1712.
- MING J, ZHANG Y M, SUN W. Journal of the Chinese Ceramic Society [J], 2010, 38(9): 1707-1712.
- [13] 姚燕, 王玲, 王振地, 等. 中国材料进展[J], 2018, 37(11): 855-865+879.
- YAO Y, WANG L, WANG Z D, *et al.* Materials China [J], 2018, 37(11): 855-865+879.
- [14] 谢小利. 混凝土中氯离子的扩散和分布行为及其影响因素研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- XIE X L. Characterization of the Diffusion and Distribution Behaviors of Chloride Ions in Concrete and Their Influencing Factors [D]. Nanjing: Guangxi University, 2020.
- [15] WU J, LI H, WANG Z, *et al.* Construction and Building Materials [J], 2016, 112: 733-738.
- [16] 杨燕, 谭康豪, 覃英宏. 材料导报[J], 2021, 35(13): 13109-13118.
- YANG Y, TAN K H, TAN Y H. Materials Reports [J], 2021, 35(13): 13109-13118.
- [17] GEORGET F, BÉNIER C, WILSON W, *et al.* Cement and Concrete Research [J], 2022, 152: 106656.
- [18] HE H, QIAO H, SUN T, *et al.* Journal of Building Engineering [J], 2024, 86: 108978.
- [19] YANG Y, PATEL R A, CHURAKOV S V, *et al.* Cement and Concrete Composites [J], 2019, 96: 55-65.
- [20] SHEKARCHI M, RAFIEE A, LAYSSI H. Cement and Concrete Composites [J], 2009, 39(10): 769-775.
- [21] 宁灿. 矿物掺合料对海砂混凝土氯离子固化性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- NING C. Study on the Curing Performance of Chloride Ions in Sea Sand Concrete with Mineral Admixture [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [22] SUA-IAM G, MAKUL N. Case Studies in Construction Materials [J], 2024, 20: e02877.
- [23] AL-SODANI K A A. Construction and Building Materials [J], 2022, 346: 128445.
- [24] 丁平祥, 许艳平, 林伟斌. 建筑结构 [J], 2022, 52(S2): 1108-1113.
- DING P X, XU Y P, LIN W B. Building Structure [J], 2022, 52(S2): 1108-1113.
- [25] SAMSON E, MARCHAND J. Cement and Concrete Research [J], 2007, 39(3): 455-468.
- [26] YEON Y, KIM J J. Case Studies in Construction Materials [J], 2024, 22: e04181.
- [27] ZHU F, MA Z, ZHANG M. Advances in Civil Engineering [J], 2020, 2020(2): 1-14.
- [28] JIN H, CHENG L, LIU J, *et al.* Journal of Building Engineering [J], 2024, 82: 108374.
- [29] LAY S, LIEBL S, HILBIG H, *et al.* Cement and Concrete Research [J], 2004, 34(3): 421-427.
- [30] LIU J, LIU J, CHENG L, *et al.* Cement and Concrete Composites [J], 2023, 143: 105257.
- [31] American Association of States Highway and Transportation Officials. Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration: AASHTO T259 [S]. Washington D.C.: American Association of States Highway and Transportation Officials, 2006.
- [32] Nordic Innovation Centre. Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration; NT Build 443 [S]. Finland: Nordtest, 1995.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法: GB/T 50082—2024 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Test Methods of Long-Term Performance and Durability of Ordinary Concrete: GB/T 50082—2024 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024.
- [34] NORDTEST. Concrete Mortar and Cement-Based Repair Materials-Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments; NT Build 492 [S]. Northern Europe: NORDTEST, 1999.
- [35] American Association of States Highway and Transportation Officials. Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration: AASHTO T277 [S]. Washington D.C.: American Association of States Highway and Transportation Officials, 2005.
- [36] 陈肇元, 廉慧珍, 李克非. 混凝土结构耐久性设计与施工指南: CCES 01—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- CHEN Z Y, LIAN H Z, LI K F. Guide for Durability Design and Construction of Concrete Structures; CCES 01—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [37] 周莹, 蔡景顺, 石亮. 混凝土 [J], 2020(9): 23-26.

- ZHOU Y, CAI J S, SHI L. Concrete[J], 2020(9): 23-26.
- [38] HE R, YE H, MA H, *et al.* Journal of Materials in Civil Engineering [J], 2019, 31(3): 04019006.
- [39] 施跃毅, 郭增伟, 郭瑞琦. 硅酸盐通报[J], 2021, 40(1): 1-12.
SHI Y Y, GUO Z W, GUO R Q. Bulletin of the Chinese Ceramic Society[J], 2021, 40(1): 1-12.
- [40] SPIESZ P P. Durability of Concrete with Emphasis on Chloride Migration[D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2013.
- [41] 庞超明, 高美蓉, 徐剑, 等. 东南大学学报(自然科学版)[J], 2011, 41(6): 1313-1318.
PANG C M, GAO M R, XU J, *et al.* Journal of Southesat University (Natural Science Edition)[J], 2011, 41(6): 1313-1318.
- [42] WANG Y, FU K. Construction and Building Materials[J], 2019, 223: 595-604.
- [43] VEDALAKSHMI R, SARASWATHY V, SONG H W, *et al.* Corrosion Science[J], 2009, 51(6): 1299-1307.
- [44] YUAN Q, SHI C, HE F, *et al.* Cement and Concrete Research[J], 2008, 38(10): 1177-1180.
- [45] KIM M Y, YANG E I, YI S T. Construction and Building Materials [J], 2013, 41: 239-245.
- [46] WHITING D. Public Roads[J], 1981, 45(3): 101-112.
- [47] YANG C C, SU J K. Cement and Concrete Research[J], 2002, 32(10): 1559-1565.
- [48] 路新瀛, 张华新, 王晓睿. 混凝土与水泥制品[J], 2003(4): 7-9.
LU X Y, ZHANG H X, WANG X R. China Concrete and Cement Products[J], 2003(4): 7-9.
- [49] HASAN T M, ALLENA S, GILBERT L. Journal of Building Engineering[J], 2024, 82: 108317.
- [50] 韩建国, 李克非. 建筑材料学报[J], 2015, 18(4): 704-709+715.
HAN J G, LI K F. Journal of Building Materials[J], 2015, 18(4): 704-709+715.
- [51] LIANG X, JI Y. Construction and Building Materials [J], 2021, 267: 120942.
- [52] SHEN T, LI Y, LOU H Q, *et al.* Case Studies in Construction Materials[J], 2024, 21: e03679.
- [53] WANG Y, LIU C, WANG Y, *et al.* Construction and Building Materials[J], 2019, 214: 158-168.
- [54] YANG C C, CHO S W. Materials Chemistry and Physics[J], 2003, 81(1): 116-125.
- [55] LU X Y, RESEARCH C. Cement and Concrete Research[J], 1997, 27(2): 293-302.
- [56] 陈朝阳. 冻融-荷载组合作用对混凝土氯离子扩散系数影响研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
CHEN C Y. Study on the Effect of Freeze-Thaw and Load Combination on Chloride Ion Diffusion Coefficient of Concrete[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [57] 王增浩, 魏宇桐, 路新瀛. 混凝土与水泥制品[J], 2020(12): 79-83.
- WANG Z H, WEI Y T, LU X Y. China Concrete and Cement Products[J], 2020(12): 79-83.
- [58] 何宗旭, 史才军, 胡翔, 等. 硅酸盐学报[J], 2015, 43(8): 1111-1119.
HE Z X, SHI C J, HU X, *et al.* Journal of the Chinese Ceramic Society[J], 2015, 43(8): 1111-1119.
- [59] BASHEER P A M, ANDREWS R J, ROBINSON D J, *et al.* NDT & E International[J], 2005, 38(3): 219-229.
- [60] 吴立朋, 阎培渝. 混凝土[J], 2010(11): 3-4+9.
WU L P, YAN P Y. Concrete[J], 2010(11): 3-4+9.
- [61] LIU Z G, LIU G R, ZHANG G S. Advances in Civil Engineering[J], 2022: 1034388.
- [62] 祝小靓, 金峰, 周虎, 等. 工业建筑[J], 2018, 48(3): 37-40.
ZHU X L, JIN F, ZHOU H, *et al.* Industrial Construction[J], 2018, 48(3): 37-40.
- [63] 吴立朋, 杨进波, 阎培渝. 应用基础与工程科学学报[J], 2012, 20(2): 304-310.
WU L P, YANG J B, YAN P Y. Journal of Basic Science and Engineering[J], 2012, 20(2): 304-310.
- [64] 沈平邦. 天津建设科技[J], 2018, 28(4): 4-8.
SHEN P B. Tianjin Construction Science and Technology[J], 2018, 28(4): 4-8.
- [65] 吴立朋. 表层混凝土氯离子扩散性能及其测试方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
WU L P. Research on the Chloride Diffusivity of Near-Surface Concrete and Its Testing Method[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [66] 赵东拂, 贾朋贺, 张晓琳, 等. 应用基础与工程科学学报[J], 2017, 25(6): 1282-1291.
ZHAO D F, JIA P H, ZHANG X L, *et al.* Journal of Basic Science and Engineering[J], 2017, 25(6): 1282-1291.
- [67] 陆晗, 刘伟, 邢锋. 混凝土[J], 2007(4): 6-7+10.
LU H, LIU W, XING F. Concrete[J], 2007(4): 6-7+10.
- [68] 方毅. 混凝土抗氯离子渗透性能试验方法研究及工程案例研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
FANG Y. The Concrete Resistance to Chloride Ion Permeability Test Method Research and Engineering Case Analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [69] 易成, 郭婷婷, 程涛, 等. 混凝土[J], 2007(3): 4-6+10.
YI C, GUO T T, CHENG T, *et al.* Concrete[J], 2007(3): 4-6+10.
- [70] 盛黎, 姚隼. 工业建筑[J], 2011, 41(11): 142-145+149.
SHENG L, YAO J. Industrial Construction[J], 2011, 41(11): 142-145+149.
- [71] 丁小平, 张君, 王庆. 建筑材料学报[J], 2017, 20(6): 827-834.
DING X P, ZHANG J, WANG Q. Journal of Building Materials[J], 2017, 20(6): 827-834.