

混凝土抗渗性能及测试方法的分析评述

崔云鹏^{1,2}, 李洪斌¹, 张浩¹, 刘金欣¹

¹ 沈阳理工大学材料科学与工程学院 辽宁沈阳

² 辽宁省交通规划设计院有限责任公司 辽宁沈阳

【摘要】混凝土的抗渗透性能是其耐久性能的重要组成部分，它直接关系到混凝土结构在长期使用过程中抵抗水分、气体、化学物质等渗透的能力。这种抗渗能力对于保护混凝土内部结构、防止钢筋腐蚀、延缓老化过程以及维持结构的整体性能至关重要。随着工程应用环境的复杂性和材料需求的多样性增加，混凝土抗渗性能的研究不仅逐渐深入，也日益受到关注。本文主要介绍了影响混凝土抗氯离子性能的主要因素，包括水胶比、掺合料、养护温度、水化龄期，以及目前对混凝土抗渗性能检测方法的利弊以及原理，以便对相关试验及测试结合实际情况进行选择与预测。

【关键词】混凝土；抗氯离子渗透性能；实验装置；测试方法

【基金项目】辽宁省教育厅基本科研项目（LJKQZ20222293）：沈阳理工大学高层次人才科研支持计划

【收稿日期】2025 年 3 月 3 日

【出刊日期】2025 年 4 月 5 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250147

An analysis and review of the impermeability of concrete and its testing methods

Yunpeng Cui^{1,2}, Hongbin Li¹, Hao Zhang¹, Jinxin Liu¹

¹School of Material Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning

²Liaoning Traffic Planning and Design Institute Co., Ltd, Shenyang, Liaoning

【Abstract】The permeability resistance of concrete is an important part of its durability, which is directly related to the ability of concrete structures to resist the penetration of moisture, gases, chemicals, etc. during long-term use. This impermeability is essential to protect the internal structure of concrete, prevent corrosion of rebar, slow down the aging process, and maintain the overall performance of the structure. With the increasing complexity of engineering application environment and the diversity of material requirements, the research on impermeability of concrete has not only gradually deepened, but also attracted more and more attention. In this paper, the main factors affecting the chloride resistance of concrete are introduced, including water-glue ratio, admixture, curing temperature, hydration age, as well as the advantages and disadvantages of the current testing methods for impermeability of concrete, so as to select and predict the relevant experiments and tests in combination with the actual situation.

【Keywords】Concrete; Resistance to chloride permeability; Experimental setup; Test method

引言

随着时代的发展，水泥基材料的耐久性逐渐为人们所关注，其抗渗透性能与耐久性密切相关，成为人们研究的重点^[1]。混凝土作为一种广泛使用的建筑材料，其耐久性已经受到广泛关注，而在海洋或含盐环境中应用时，其性能和寿命也将面临更加严峻的挑战。氯离子渗透进入混凝土过程比较复杂，归纳起来主要有物理变化和化学变化两类。根据目前对氯离子渗透方式的研究，可以总结出氯离子主要通过渗透作用、毛细吸

附作用、电化学迁移作用和自由氯离子的扩散作用^[2]侵入混凝土。在这几种方式中，渗透作用是影响最大且最常见的一种。国地域辽阔，拥有较多沿海城市，在海洋环境中，混凝土不仅要承受海浪的冲击、海水的侵蚀，还要应对海水中高浓度的盐分。盐分中的氯离子具有极强的渗透性和腐蚀性，能够逐渐侵入水泥砂浆的内部结构，对其产生破坏，导致材料强度的降低和耐久性的下降。长期作用下，混凝土可能出现开裂、剥落等现象，严重影响建筑物的安全性和使用寿命。同样，在含

作者简介：崔云鹏（1989-）男，汉，黑龙江哈尔滨人，副教授，工学博士，21 年毕业于大连理工大学结构工程专业，研究方向：建筑材料。

盐量较高的内陆地区,如盐碱地、盐矿区域等,混凝土的应用也面临着类似的挑战。这些地区的土壤和地下水含有大量的盐分,这些盐分同样会对混凝土产生腐蚀作用,加速其老化过程。氯离子渗透是导致水泥基材料耐久性下降的主要原因之一,因此,提高混凝土的抗氯离子渗透性能对于延长其使用寿命至关重要。

1 抗氯离子渗透性能研究现状

1.1 水胶比

水胶比是指水与水泥、掺合料等胶凝材料之间的比例,其对混凝土的强度、施工性能以及耐久性有着直接的影响。随着水胶比的降低,水泥的水化反应能够更加充分地进行,混凝土内部的游离水含量会相应减少,进而导致内部孔隙数量变少,混凝土整体结构变得更加致密^[3]。混凝土在水化凝结硬化过程中,其内部空隙数量的增加与水胶比呈正相关。这些大孔隙为氯离子的扩散提供了便利条件^[4],从而使得氯离子更容易在混凝土内部发生迁移扩散,最终导致混凝土的抗氯离子渗透性能降低。

王伟琛^[5]等采用控制变量法,保持混凝土的养护龄期恒定,采用四种水胶比:0.24、0.27和0.40进行对比实验,然后对混凝土进行电通量测试(单位:Coulombs)。结果表明,水胶比为0.24时,混凝土的电通量最低,为820.5C,与水胶比0.40时的1760C相比,减少了53.3%。黄爱菊^[6]等选用0.36、0.38、0.40、0.42、0.44五个水胶比梯度,其他条件均不变,测定了混凝土的电通量值。结果表明,水胶比为0.36时,混凝土的电通量最低,为1503.5C,与水胶比0.44时的1710.1C相比,减少了12.1%。王继博^[7]等,采用电通量法评价麦秸秆纤维混凝土的抗氯离子渗透性能。研究表明:在水胶比、麦秸秆纤维掺量、掺合料掺量这三个因素中,麦秸秆纤维混凝土抗氯离子渗透性能受水胶比的影响最为突出,水胶比由0.4增加到0.5后,电通量由782.7C增加到889.7C,增加了12%。李秀阳^[8]以0.36为水胶比,加入3%膨润土,并将水胶比分别增加至0.4以及降低为0.3,同时保持其他材料用量不变,制备混凝土,对混凝土的电通量进行了测试。研究发现,当水胶比增大至0.4时,混凝土的电通量增加了三分之一,当水胶比降低至0.36时,混凝土的电通量显著降低,降幅超越50%。以上实验结果表明,低水胶比能有效提升混凝土抗氯离子渗透性能。

1.2 掺合料

矿物掺合料的掺入能显著降低混凝土的氯离子渗透性,且随着掺合料掺量的增加,氯离子扩散系数通常

会大幅下降。矿物掺合料掺入混凝土后,一方面能提高混凝土的密实度,另一方面固化混凝土内部的氯离子,二者均对混凝土的抗氯离子渗透性能有所增益。不过,不同矿物掺合料对混凝土抗氯离子渗透性能的影响存在差异。但混凝土抗氯离子渗透性能受不同矿物掺合料的影响也存在差异。

张丽蓉^[9]将粉煤灰以及硅灰掺入混凝土,并分别探究二者对混凝土抗氯离子渗透性能的影响,结果表明:单掺粉煤灰量为10%和25%时,均能有效降低混凝土的电通量,由基准组的1894.3C分别降低至1647.8C和1364C,分别降低13%和28%。硅灰的加入也显著降低了混凝土的电通量值,且在三种掺量(7%、9%、12%)下,混凝土电通量降幅分别达到73.4%、85.2%和58.6%,均对混凝土的抗氯离子渗透性有较大的正向提升。吴溪^[10]在混凝土中单掺粉煤灰(10%~35%)和双掺粉煤灰(10%~25%)与矿粉(20%~5%),然后对混凝土进行电通量测试。结果表明:单掺粉煤灰对混凝土抗氯离子渗透性能有较大提升,随着掺量的增加,电通量由1141C降低到282C,降幅为75.2%。矿物掺合料掺量相同的情况下,单掺粉煤灰的混凝土,其抗氯离子渗透性能不如双掺矿粉与粉煤灰的混凝土。当矿粉与粉煤灰的掺加量接近时,混凝土的抗氯离子渗透性达到最好。朱燕^[11]等对不同种类矿物掺合料对混凝土抗氯离子渗透方面的作用进行了研究。分别添加1%减水剂、0.5%~2%早强剂、0.01%引气剂、30%矿物掺合料。结果表明:矿物掺合料(包括粉煤灰、矿粉等)以及外加剂对混凝土的抗氯离子渗透能力有较大提高,不过不同种类的外加剂和矿物超细粉在影响程度上有所不同,矿渣混凝土的混凝土强度最高,粉煤灰混凝土的强度次之。实验结果表明适量的矿物掺合料添加能有效提升混凝土抗氯离子渗透性。

1.3 养护温度

现浇混凝土的性能好坏由于其浇筑的特殊性极易受到气候条件的影响。在诸多气候因素中,温度对混凝土的影响尤为突出。一方面,过高或过低的温度会直接影响水泥水化的反应速率;另一方面,温度还会对混凝土内部结构造成显著影响,进而影响其整体性能。我国许多地区属于寒冷气候区,混凝土浇筑后往往需要在低温环境中养护。因此,养护过程中的环境温度对混凝土性能的影响至关重要,不容忽视。

朱晓映^[12]等人模拟夏季高温(白天35℃夜间20℃)、冬季低温(白天15℃夜间5℃)以及自然养护三种环境,对混凝土进行电通量法实验,并以标准养护

条件下养护 64d 的数据作为对照。结果表明: 在冬季低温条件下, 试件的电通量显著增加, 对比标准养护条件下体改接近 100%; 而在夏季高温及自然养护环境下, 试件的电通量与标准养护条件下的电通量相差无几。这表明低温对混凝土抗氯离子渗透性有较强损害性。谢超^[13]等通过 RCM 法比较了-3℃低温养护和标准养护条件下混凝土的氯离子渗透系数, 选取三种水胶比进行测试。研究表明: 当养护温度处于-3℃时, 混凝土的氯离子扩散系数(单位: cm^2/s)大约是标准养护条件下的 1.1 到 1.5 倍。而且, 该扩散系数随着水胶比的上升, 先出现下降后上升的趋势。马永刚^[14]等通过对比在-5℃和标准养护条件下, 不同引气剂掺量(0、0.05%、0.10%、0.20%)混凝土在不同浇筑温度(5、10、15、20℃)下的抗氯离子渗透性能。结果表明: 当引气剂掺量和养护龄期相同时, -5℃养护混凝土的电通量为 4561C, 显著高于标准养护条件下的电通量, 为标准养护条件下的 2.22 倍。实验结果表明降低养护温度能对混凝土抗氯离子渗透性会产生不利影响。

1.4 水化龄期

水泥水化的过程本质上是水化产物逐渐占据水泥和水的原有空间这一过程, 未被填充的部分则转变为孔隙。随着水化反应的持续进行, 水化产物不断增多, 逐渐填充到孔隙结构中, 使孔隙结构更加细密。大于 20nm 的少害、有害及多害孔隙数量逐渐减少, 这在很大程度上限制了氯离子的渗透。

Zhao J^[15]等对硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥混凝土抗氯离子渗透性能与冻融循环及养护时间之间的关系进行了研究。结果表明: 随着养护时间的推移, 两种水泥混凝土的抗氯离子渗透性能均有增强, 然而硫铝酸盐水泥混凝土要明显强好于硅酸盐水泥混凝土。黎碧云^[16]等在掺入粉煤灰 15%的条件下, 研究了混凝土试件的电通量与水化龄期(28、56、90d)之间的关系。结果表明: 28d 粉煤灰混凝土的电通量为 3214C; 56d 养护龄期混凝土电通量为 2474C; 90d 养护龄期混凝土电通量为 1096C。56d 和 90d 降幅分别为 28d 龄期的 23.0%和 66%。张磊^[17]研究了不同粉煤灰掺量(0、5%、15%、25%、35%)和养护龄期(3、7、28d)下的自密实混凝土的氯离子扩散系数。结果表明: 在本实验所设置的全部粉煤灰掺量下, 氯离子扩散系数与养护龄期呈负相关关系, 其降低趋势最明显的为 35%粉煤灰掺量下由 3d~28d 降低了 50%。随着养护龄期的延长, 粉煤灰、水泥和水之间的水化反应愈发充分, 生成了大量水化胶凝产物, 这些产物填充了混凝土内部的孔隙, 增

强了结构的密实性, 从而显著提升了自密实混凝土的耐久性能。施珂文^[18]等对不同水灰比(0.4、0.5、0.6)和骨料体积含量(55%、65%、75%)与混凝土氯离子扩散系数随养护时间变化的影响进行研究。研究表明: 随着养护时间的延长, 在 28d~118d 龄期内混凝土内部水化反应逐渐进行, 混凝土的氯离子扩散系数会逐渐降低, 在此 90 天内降低 37.1%。但当养护时间达到 118 天后, 其降低速度逐渐变缓, 在 118d~208d 龄期内混凝土的氯离子扩散系数降低了 17.3%。此外, 水灰比的增加或骨料体积含量的减少, 都会使混凝土的氯离子扩散系数随养护时间的延长而降低的趋势更加显著。实验结果表明养护龄期的延长能有效提升混凝土抗氯离子渗透性。

2 氯离子渗透测试方法

2.1 电通量法(RCPT 法)

该方法通过施加直流电压, 使溶液中的氯离子在负电荷作用下加速迁移至正电极, 通过测量迁移的电荷量(即电通量)来反映混凝土的抗氯离子渗透能力。电通量法与其他电测试方法得出的结果具有良好的相关性, 在大多数情况下, 相同混凝土配合比的电通量测试结果与氯离子浸泡试验方法的测试结果之间基本显现相同的趋势。电通量法适用于大部分混凝土, 但随着该方法的普及, 人们发现其存在明显的缺陷和问题^[19]:

1) 电通量法不适用于那些掺杂了容易导电以及对导电性能有阻碍的物质的混凝土抗氯离子渗透性测试。具体来说, 像亚硝酸盐和钢纤维这类能够良好导电的材料或者绝缘纤维、树脂等绝缘材料, 如果被加入到混凝土中, 就会影响电通量法的测试结果, 使得测试无法准确反映混凝土的抗氯离子渗透性能。2) 电通量法测试中, 由于需要持续一段时间对混凝土试件施加较高的电压, 这可能会导致与试件接触的溶液温度上升。温度的升高可能会改变混凝土的导电性能, 从而消耗一部分电能, 但这种消耗并不是由于氯离子穿透混凝土造成的, 因此可能会对试验结果产生影响。3) 在采用电通量法测定混凝土抗氯离子渗透性能的过程中, 所实际测量到的并非仅仅是氯离子的迁移量, 而是所有通过混凝土孔隙的带电粒子的总量。这其中包括了氯离子, 同时还涵盖了混凝土孔隙溶液中所存在的其他各种离子。由于混凝土内部孔隙溶液中离子的种类和数量是多种多样的, 这些不同的离子在迁移过程中可能会相互作用, 或者与混凝土内部的其他成分发生反应。因此, 混凝土内部孔隙溶液中各种离子的种类和数量都可能对电通量法的测试结果产生显著的影响, 进

而导致测试结果与实际的抗氯离子渗透性能之间存在一定的偏差。试验装置如图 1 所示。

2.2 饱水电导率实验法 (Permit 法)

使用电通量法测定抗渗性能时大部分的使用环境都是在室内,为解决传统试验设备不便携带的问题,Basheer^[21]通过电迁移试验,提出了 Permit 离子迁移法。该方法利用 Permit 装置测量室外溶液的电导率,直至测试结果达到稳定状态,即电导-时间曲线的斜率保持恒定。在此过程中,温度变化会对结果产生影响,这一影响需要同步校正。通过建立电导率与氯离子浓度之间的关系,绘制出氯离子浓度随时间变化的曲线。最终,依据 Nernst-Plank 方程计算氯离子的扩散系数。这种方法不仅便于在现场进行操作,而且能够较为准确地评估混凝土的抗氯离子渗透性能。

基于这一原理开发的新型实验设备,将更适用于现场的无损检测工作,但这种方法会导致试验成本的

上升。试验装置如图 2 所示。

2.3 快速氯离子迁移系数法 (RCM 法)

由于电通量法具有一定局限性,其测试结果不能准确的反映、量化试件内部的氯离子迁移特征,仅适用于相对比较。快速氯离子迁移系数法 (RCM 法) 因其能够提供更为精确的氯离子迁移特性分析,而得到了广泛的应用。RCM 法利用外部电场,促使溶液中的氯离子向混凝土试件内部迁移。迁移渗透一定时间后,取试件内部横截面,用硝酸银溶液显色处理,通过测量氯离子渗透深度来计算扩散系数。该方法凭借稳定的测试结果、简便的操作流程以及良好的可重复性,已成为评价混凝土抗氯离子渗透性能的常用技术手段。也有研究^[22]表明:测试孔隙率较大的混凝土抗氯离子渗透性能时,由于持续的电流通过以及混凝土的饱水处理会导致孔隙溶液的组成和性质发生变化,进而可能影响实验结果。试验装置如图 3 所示。

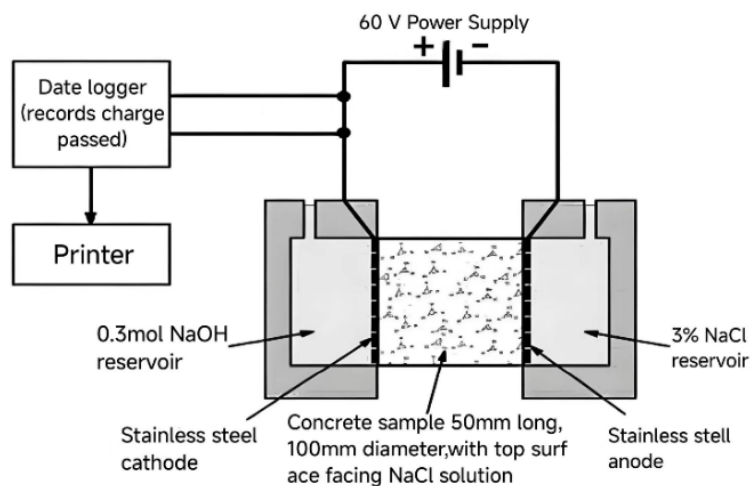


图 1 RCPT 法试验装置图^[20]

图注: 本图为 RCPT 法实验装置示意图, 试件尺寸为 100mm×100mm×50mm, 采用了 10A 直流电源, 施加电压为 60V, 实验温度为 23℃。

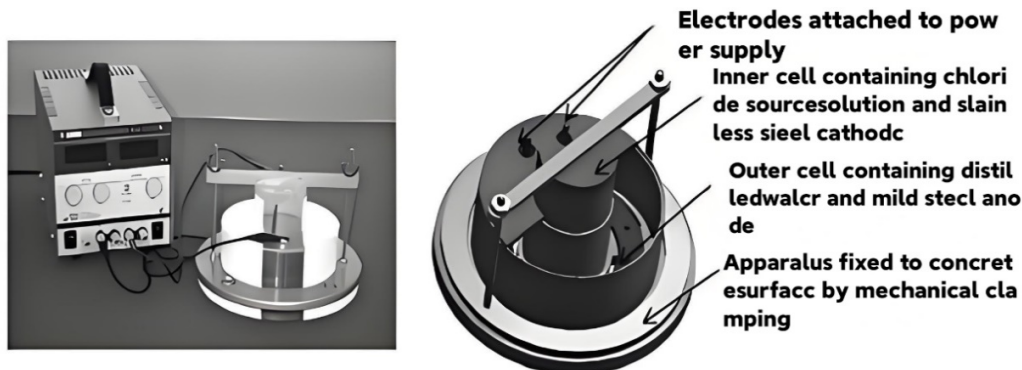
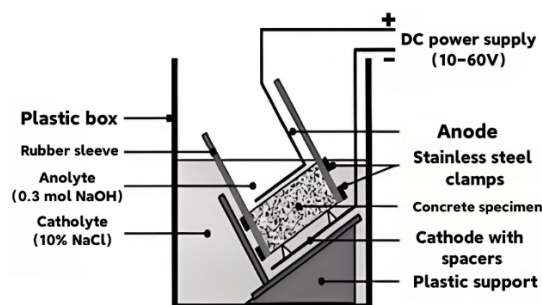


图 2 饱水电导率实验法试验装置图^[21]

图注: 本图为 Permit 法实验装置示意图, 采用了 60V 的直流电压, 电导率测量范围为 0.001 μ S/cm~2000mS/cm, 试件测试前需饱水处理。

图3 快速氯离子迁移系数法试验装置图^[23]

图注：本图为RCM法实验装置示意图，试件尺寸为直径100mm、高度50mm的圆柱体，阴极溶液为10%质量浓度的NaCl溶液，阳极溶液为0.3mol/L摩尔浓度的NaOH溶液，显色指示剂为0.1mol/L浓度的AgNO₃溶液，初始电压为30V，实验温度为23℃。

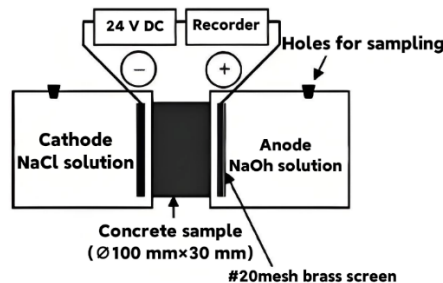
2.4 加速氯离子迁移实验（ACMT法）

ACMT法是基于RCPT法改良的测试技术，其采用低幅恒定直流电压作用于混凝土试件两端，从而加速氯离子在混凝土中的迁移过程。同时，通过周期性地检测阳极池中的氯离子浓度来绘制浓度—时间曲线。混凝土中氯离子的扩散过程可分为稳态和非稳态两个阶段。在非稳态扩散阶段，氯离子尚未充分渗透至阳极区域。基于Fick第二定律，当检测到阳极池中氯离子浓度显著升高时，即可据此计算得出该非稳态扩散阶段的氯离子扩散系数。ACMT法的优势在于：使用较低的电压，减少了电极反应；通过增大电解液体积，该方法不仅有效降低了焦耳热效应的干扰，同时更准确地模拟了氯离子在混凝土中的完整迁移过程，包括稳态和非稳态两个关键阶段。但存在测试周期长、结果可重复性不高和数据采集难度大等局限性。此外，需要定期对阳极池中的氯离子浓度进行测量，这增加了数据采集的难度，使得操作过程更为复杂和繁琐。试验装置如图4所示。

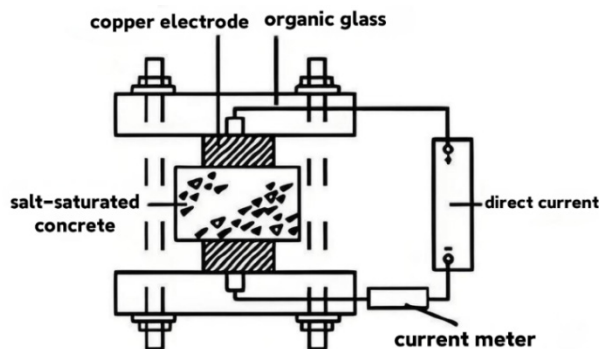
2.5 饱盐直流电导率法（NEL法）

饱盐直流电导率法（NEL法）由清华大学路新瀛教授团队研发，是基于离子扩散—电迁移耦合理论的新型测试技术，用于精确测定混凝土中氯离子扩散系

数。该方法的实验流程包括两个关键步骤：首先对混凝土试件实施真空饱盐预处理，使其氯离子迁移数趋近于1.0，从而满足线性介质假设；随后基于Nernst-Einstein方程进行扩散系数计算。相较于传统测试方法，NEL法在测试原理和操作流程上均展现出显著的技术优势。其测试过程快速高效，通常在短时间内即可完成，大大提高了测试效率。所使用的电压较低，这不仅提高了测试的安全性，还减少了电极反应对测试结果的影响。此外，测试过程中溶液和试件的温度变化幅度较小，有助于保持测试条件的稳定，从而获得更准确的测试结果。然而，该方法也存在一些局限性。首先，它对真空饱盐设备的要求较高，需要设备能够提供稳定的真空环境和精确的饱盐处理。其次，NaCl溶液在试件内部难以完全饱和，这可能会影响氯离子的迁移行为，进而影响测试结果的准确性。然而需要指出的是，真空饱盐处理过程可能对混凝土试件的微观结构产生不可逆影响。这种预处理会改变试件原有的孔隙分布特征，导致其物理状态与工程实际存在差异，进而可能引入系统性测试误差。最后，NEL法不适用于含有影响导电性能材料的混凝土试件的测试，这限制了其在某些特殊类型混凝土中的应用。试验装置如图5所示。

图4 加速氯离子迁移试验装置图^[24]

图注：本图为ACMT法实验装置示意图，施加电压为24V，试件尺寸为直径100mm、高度30mm的圆柱体，测试时间为9小时，实验温度为23℃。

图5 饱盐直流电导率法试验装置图^[25]

图注：本图为NEL法实验装置示意图，施加电压为10V，试件尺寸为100mm×100mm×50mm，测试时间为5~8分钟，具有高测量精度，可检测小于 $10^{-10}\text{cm}^2/\text{s}$ 的氯离子扩散系数。实验温度为20℃。

3 结论

(1) 混凝土抗氯离子渗透性能的提高可通过降低水胶比、掺入硅灰/粉煤灰等矿物掺合料、避免低温养护及延长水化龄期协同优化配比与工艺，从而提升密实度、细化孔隙以抑制氯离子迁移。

(2) RCPT法在大多数实验中表现良好，但其结果受温度影响较大，且不能反映氯离子迁移的全貌。相较之下，ACMT法受温度影响较小，能够较为全面地模拟氯离子迁移过程，但由于测试周期较长，适用性受到一定限制。而NEL法凭借其测试过程的快速高效，测试结果精准稳定受到广泛关注，但其对试件前处理过程较为繁琐，且对试件本身要求较高。RCM法能够精确分析氯离子迁移特性，操作简便；Permit法适用于现场便捷操作且测试精准。但前者对孔隙率高的混凝土适用性有限，后者测试成本较高。未来研究应着重改进这些方法的精确度和测试效率以及优化相关方法对试件的前处理过程，并考虑降低实验成本。

本文讨论了影响混凝土抗氯离子渗透性能的主要因素及相应测试方法，为理解和评估混凝土的抗氯离子渗透性能并选择合适的测试方法提供了指导，对于工程实践中混凝土结构的长期性能保障具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 陈喜旺.提高混凝土耐久性要重视氯离子的影响[J].江西建材,2023,(6):404.
- [2] 巴恒静,张武满,邓宏卫.评价高性能混凝土耐久性综合指标——抗氯离子渗透性及其研究现状[J].混凝土,2006,(3):3-4+14.
- [3] 焦运攀,刘可心,高凡,等.港珠澳大桥人工岛隧道混凝土配制技术研究[J].新型建筑材料,2018,45(5):10-13.
- [4] 董跃,胡德巧,华卫兵,等.复合胶凝材料体系对海工混凝土抗氯离子渗透性及抗压强度的影响[J].公路,2015,60(9):214-218.
- [5] 王玮琛.潮湿环境高强混凝土长期性能演变规律试验研究[D].哈尔滨工程大学,2017.
- [6] 黄爱菊,杨博文,路鸣晓,等.引气混凝土抗氯离子渗透性能影响因素分析[J].建筑技术,2022,53(10):1307-1309.
- [7] 王继博,任慧超,张涛,等.麦秸秆纤维混凝土抗氯离子渗透性能研究[J].新型建筑材料,2018,45(11):131-133+138.
- [8] 李秀阳.膨润土掺量和水胶比对水工混凝土抗渗性能的影响研究[J].黑龙江水利科技,2022,50(12):27-31.
- [9] 张丽蓉.矿物掺合料对混凝土力学性能及抗氯离子渗透性能研究[D].宁夏大学,2016.
- [10] 吴溪.粉煤灰对混凝土抗氯离子渗透性能及强度的影响[J].中国高新科技,2018,(2):23-26.
- [11] 朱燕,梅华,陈佳佳.矿物掺合料与化学外加剂影响混凝土抗氯离子渗透性的试验研究[J].硅酸盐通报,2016,35(11):3844-3849.
- [12] 朱晓映,武利强,王豪斌,等.水工混凝土氯离子渗透性影响因素研究[J].浙江水利科技,2024,52(5):43-48.
- [13] 谢超,王起才,李盛,等.养护温度和水灰比对混凝土微观孔结构及抗氯离子渗透性影响研究[J].硅酸盐通报,2015,34(12):3663-3669.
- [14] 马永刚,王起才,张戎令,等.入模温度和引气剂掺量对负

- 温下混凝土抗压强度及抗氯离子渗透性影响[J].混凝土, 2022,(2):26-30.
- [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].Construction and Building Materials,2014,53305-311.
- [16] 黎碧云,刘满湖,何秀强.混凝土抗氯离子渗透性的关键影响因素[J].西部交通科技,2022,(10):41-42+64.
- [17] 张磊.不同胶凝材料用量下自密实混凝土力学性能与氯离子扩散系数研究[J].江西建材,2023,(11):57-59.
- [18] 施珂文,周欣竹,郑建军.养护龄期对混凝土氯离子扩散系数的影响[J].建材世界,2014,35(2):23-26.
- [19] 路新瀛,张华新,王晓睿.混凝土渗透性电测方法评述[J].混凝土与水泥制品,2003,(4):7-9.
- [20] Hasholt T M ,Jensen M O .Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers[J].Cement and Concrete Composites,2015,55290-297.
- [21] Basheer P ,Andrews R ,Robinson D , et al.‘PERMIT’ ion migration test for measuring the chloride ion transport of concrete on site[J].NDT and E International,2004,38(3): 219-229.
- [22] 吴丽君,邓德华,曾志,等.RCM 法测试混凝土氯离子渗透扩散性[J].混凝土,2006,(1):100-103.
- [23] Nt Build 492.Concrete,mortar and cement-based repair materials:Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments[M].Nordtest method,1999.
- [24] 施跃毅,郭增伟,郭瑞琦.氯离子扩散系数快速测试方法综述[J].硅酸盐通报,2021,40(1):1-12.
- [25] 吴晓梅.混凝土渗透性测试方法比较分析[J].水利科学与寒区工程,2019,2(4):33-38.
- 版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

