

多种因素环境下混凝土耐久性研究综述^{*}

张 硕^{1,3}, 唐孟雄², 胡贺松², 苏定立^{1,3}

(1. 广州市建筑科学研究院集团有限公司, 广州 510440)

(2. 广州建筑股份有限公司, 广州 510030)

(3. 广州建研工程科技有限公司, 广州 510440)

摘 要: 本文综述了多种因素环境下混凝土耐久性研究的现状和进展。主要探讨了氯盐和硫酸盐双因素对混凝土的侵蚀机制、荷载与盐环境共同作用对混凝土耐久性的影响、杂散电流和水压力作用对混凝土结构的腐蚀和耐久性影响。总结了侵蚀性离子在混凝土中的迁移行为及其相互作用, 分析了腐蚀环境及荷载耦合条件下混凝土的力学性能和腐蚀规律, 阐述了杂散电流和高水压作用对混凝土微结构和渗透特性的影响, 最后, 对该领域未来的重点研究方向以及耐久性研究成果在实际工程中的应用提出了建议与展望。

关键词: 多因素; 盐环境; 杂散电流; 高水压; 混凝土; 耐久性

中图分类号: TU528.0

文献标识码: A

文章编号: 1671-2439(2024)08-103-06

作者简介: 张硕 (1987—), 男, 黑龙江大庆, 博士, 高级工程师, 主要从事工程结构耐久性、工程建设管理研究, E-mail: zhangshuo2011@126.com。

A Review on the Durability of Concrete in Multi-factor Environments

ZHANG Shuo^{1,3}, TANG Meng-xiong², HU He-song², SU Ding-li^{1,3}

(1. Guangzhou Institute of Building Science Group Co., Ltd., Guangzhou 510440)

(2. Guangzhou Construction Co., Ltd., Guangzhou 510030)

(3. Guangzhou Jianyan Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou 510440)

Abstract: This paper reviews the current status and progress of research on the durability of concrete under multi-factor environments. It primarily explores the erosion mechanisms of concrete under the combined effects of chloride and sulfate ions, the impact of combined load and salt environments on concrete durability, the corrosion effects of stray currents on concrete structures, and the influence of high hydrostatic pressure on concrete durability. The study summarizes the migration behavior and interactions of different ions within concrete, analyzes the mechanical properties and corrosion patterns of concrete under various environmental and load conditions, and elaborates on the effects of stray currents and high hydrostatic pressure on the microstructure and permeability of concrete. Finally, it provides recommendations and outlooks on future key research directions and the practical engineering applications of durability research outcomes in this field.

Keywords: multiple factors; salt environment; stray current; high hydrostatic pressure; concrete; durability

0 引言

混凝土的耐久性问题始终是工程界关注的热点。混凝土结构常常暴露于包含多种因素的恶劣环境中, 如复杂盐环境、杂散电流和高水压环境。这些因素单独作用时会对混凝土结构造成侵蚀和损伤, 在多因素耦合作用下, 混凝土的耐久性会表现出比单一因素作用更复杂的退化机制, 共同作用会加剧混凝土的劣化过程, 显著影响工程结构的安全性与使用寿命。

复杂盐环境主要包括氯盐和硫酸盐等多种离子

的共同存在。氯离子和硫酸根离子在混凝土中的迁移行为会相互影响, 表现出复杂的耦合作用。不同浓度和组合的复杂盐环境对混凝土的物理、化学和力学性能都有显著影响。杂散电流现象主要在地铁等轨道交通系统中出现, 是由于轨道电流泄漏或接地不良导致的非预期电流。这些杂散电流在钢筋混凝土结构中引发电化学腐蚀, 严重威胁结构的耐久性。在地铁系统中, 杂散电流不仅会加速钢筋的锈蚀, 还会影响混凝土的电化学环境, 导致材料的进一步劣化。而高水压环境下, 水和有害离子的渗透

速率显著增加,加速了混凝土的劣化过程。海底隧道、深水桥墩等结构常常处于高水压条件下,这些结构不仅要承受物理压力,还需抵御水中有害离子的侵蚀。因此,研究这些环境因素对混凝土耐久性的影响具有重要的实际工程意义,可以为混凝土结构的设计、维护和防护提供科学依据。

综合来看,复杂盐环境、杂散电流与高水压环境对混凝土耐久性的影响是一个复杂的多因素耦合过程。本综述旨在总结和分析近年来关于这些因素共同作用下混凝土耐久性的研究进展,揭示其影响机制和劣化规律,并提出未来的研究方向和技术需求,以为工程实践提供科学依据和技术支持。

1 氯盐和硫酸盐双因素对混凝土的侵蚀

在实际工程中,混凝土结构很少仅受单一类型盐类环境的侵蚀。例如地下水中常含有氯离子、硫酸根离子和碳酸氢根离子等。我国的海洋环境和内陆地区的盐湖和大面积的盐碱地都含有较高浓度的氯盐和硫酸盐^[1-2],这些盐离子对混凝土耐久性的影响各不相同,并且在共同存在时会相互作用。一种离子的迁移行为会受到其他离子的促进或限制作用,其中以氯盐和硫酸盐共存环境对混凝土的影响最为典型。

目前,不同学者设置的双因素环境存在较大差异,尚无统一标准。研究主要采用自然浸泡和干湿循环环境,部分研究基于自然界盐浓度加速试验,但大多数人为选用较高的氯盐和硫酸盐浓度,这些浓度选择缺乏明确依据。尽管如此,这些试验有助于探讨双因素环境下离子间的相互影响及规律。在考查指标方面,硫酸根离子和氯离子的空间分布、侵蚀后的微观结构及产物是研究重点,为阐释双因素侵蚀机理提供了基础。部分研究还测试了混凝土的抗压强度、动弹性模量及质量损失,以回答多因素条件下混凝土力学性能演变的问题。

已有部分文献针对两种盐的相互作用机制进行了研究。曹园章^[2]通过试验发现,水泥基材料表面氯离子浓度与硫酸盐浓度呈反比关系,而与氯盐浓度呈正比关系。杜建民等^[3]采用高浓度的氯盐和硫酸盐溶液对混凝土进行加速腐蚀。试验结果表明溶液中氯离子浓度的提高会导致腐蚀深度的减小,也

会延缓混凝土强度的退化。这与氯离子的存在会抑制硫酸根离子的入侵有关^[4-5]。陈晓斌等^[6]和李鹏^[7]研究发现氯离子和硫酸根离子在混凝土中的扩散有一定相互制约作用。Tumidajski 和 Chan^[8]以及管志超等^[9]的试验结果也对硫酸根离子抑制氯离子扩散的作用进行了验证。俞小彤^[10]的研究结果表明硫酸盐在复合侵蚀条件下对钢筋腐蚀形态类型没有影响,但在混凝土保护层胀裂之前,它能显著减缓钢筋在氯盐影响下的锈蚀速率,从而延长保护层的胀裂时间。然而,硫酸盐侵蚀会加速混凝土裂缝在锈蚀过程中的扩展。金祖权等^[11]和俞君宝^[12]在研究中发现:在腐蚀前期,硫酸盐的存在可在一定程度增强混凝土的抗氯离子扩散能力,而在后期又削弱该能力。与此同时,氯盐使得硫酸盐对混凝土的腐蚀速度放缓,因此两种离子间存在双向抑制作用。

针对复合盐对混凝土性能的影响,陈燕娟^[13]将相对动弹性模量与质量损失率作为混凝土抵抗多因素环境侵蚀性能的评价指标。在研究氯盐和硫酸盐对混凝土的侵蚀时,考虑了干湿循环的干湿时间比和干燥阶段温度对混凝土劣化程度的影响,指出后者为引起劣化的关键因素,若干燥阶段温度一定,则干湿时间比越大,混凝土的劣化较严重。另外还指出复合盐溶液中的氯离子和硫酸根离子可分别抑制混凝土中硫酸盐膨胀产物和 Friedel's 盐的形成。宿晓萍和王清^[14]依据大安地区盐渍土的主要盐离子含量配制相应复合盐溶液,开展混凝土材料的盐浸-热烘试验,研究表明,混凝土的质量损失和动弹性模量随干湿循环次数的增加都呈现先增后降的变化趋势,且侵蚀溶液的质量分数越大,下降得越迅速。Zhang 等^[15]主要关注氯盐和硫酸盐对混凝土膨胀性及膨胀损伤的影响。试验结果显示,随着硫酸根离子的浓度增加和混凝土水灰比的增大,混凝土的膨胀率和损伤程度都显著增加,然而同时存在氯离子的情况下,膨胀和损伤都有所缓解,且随着复合盐溶液中氯离子浓度的增加,这种缓解的程度愈加明显。

2 荷载与盐环境共同作用下混凝土耐久性研究

一般情况下,混凝土结构在实际工程中都受到外荷载作用。近年来,许多学者在耐久性研究方法

上逐步向模拟实际环境靠近，将荷载与硫酸盐/氯盐侵蚀作用共同考虑，开展了荷载与硫酸盐/氯盐复合环境下混凝土结构的耐久性研究。

Živica 和 Szabo^[16] 的研究表明，压应力会限制硫酸根离子在水泥基材料中的迁移，从而降低材料的侵蚀劣化速度，减缓材料的膨胀和延迟开裂。然而，这种抑制作用仅在压应力不足以引起材料开裂时才有效，并且随着压应力的增加，抑制效果会更加显著。Schneider 等^[17-21] 研究了轴压、弯曲两种类型荷载以及硫酸盐、硝酸盐、氯盐三种盐共同作用下水泥基材料抗压强度、抗折强度和弹性模量等力学性能的变化。通过试验总结得到：与水泥基材料应力腐蚀相关的因素包括应力的大小、状态及腐蚀时间等。Werner 等^[22] 将水泥净浆试件暴露于两种硫酸盐溶液中（硫酸钠溶液和硫酸氢溶液），并采用三点加载的方式施加 25%、50% 和 75% 的破坏荷载。研究表明：在硫酸钠溶液中浸泡 60 d 后，试件强度有所提高，而荷载并未产生额外的影响；但在硫酸氢溶液环境中，试件受拉区损伤加速，而受压区损伤延缓。

通过单次或反复加载后卸荷，而后考查混凝土的氯离子渗透性能变化，这是近些年针对该问题的主要研究方式。Nakhi 等^[23] 研究循环压荷载对混凝土氯离子渗透性的影响，认为 60% f_c 为影响混凝土内氯离子传输性能的临界点。在此之前循环荷载对氯离子渗透深度影响有限，因为在这个荷载水平以下，混凝土的微裂缝会在卸载后闭合，而当超过临界点时，混凝土中会出现更多的不可恢复微裂缝，因此氯离子的扩散深度显著增长。轴向疲劳荷载与氯盐的共同作用也有学者进行了研究，Fu 等^[24] 探讨了单轴拉伸疲劳荷载作用下混凝土中氯离子的渗透情况。试验结果表明，当最大疲劳荷载为试样极限拉伸荷载的 25% 至 45% 时，疲劳损伤会使氯离子渗透加快 1.5 倍至 3 倍。尤其当最大疲劳荷载超过 30% 时，氯离子渗透显著加速。Jiang 等^[25] 通过改进的快速氯离子迁移（RCM）试验研究了疲劳损伤对混凝土中氯离子扩散系数的影响。研究发现，随着残余拉应变、分形损伤因子和损伤响应可变电阻的增加，氯离子扩散系数呈指数增加。

综上所述，荷载不仅对离子的迁移产生影响，

还通过改变混凝土内部结构，进一步影响其耐久性。疲劳荷载和循环荷载对混凝土的劣化过程有显著影响，且荷载水平是影响离子迁移的重要因素。

3 杂散电流作用下混凝土结构耐久性研究

城市轨道交通由于供电系统的电流泄漏或接地不良，导致的结构内部的弥散电流易引发电化学腐蚀，严重时威胁结构的耐久性。随着城市轨道交通系统的快速发展，杂散电流对混凝土结构耐久性的影响逐渐引起了广泛关注。

钢筋是杂散电流环境下钢筋混凝土结构中首当其冲被影响的对象。Bertolini 等^[26]、Solgaard 等^[27] 以及高德军等^[28] 的研究都证实杂散电流可以诱发和加速混凝土、UHPC 中钢筋或钢纤维的腐蚀。

杂散电流对混凝土的间接影响是在钢筋腐蚀产物积累到一定程度时发生的。周晓军等^[29] 和杨向东等^[30] 均采用直流电模拟杂散电流，都发现了杂散电流导致的钢筋表面腐蚀物的逐渐聚集会造成包裹它的混凝土产生性能变化，前者发现钢筋周围混凝土的弹性模量、泊松比以及抗拉抗压强度均有所下降。后者给出了钢筋混凝土在杂散电流腐蚀下腐蚀产物的计算模型，以此可预测混凝土开裂的起始时间及开裂方式。鹿婷等^[31] 的研究揭示了掺加 1.5% 氯盐的盐渍土附加 10 V~30 V 恒压直流电模拟的杂散电流，钢筋锈蚀产生的膨胀应力约为 2 MPa~3 MPa；随着土壤中氯离子含量的增加和杂散电流密度的增大，钢筋锈蚀速度和混凝土开裂程度都会加快，使得锈蚀膨胀应力大约增加 50%。

除杂散电流会引起钢筋锈蚀而破坏混凝土外，杂散电流对混凝土还有一定直接的影响，例如对混凝土中的水泥水化产物也有影响。庄华夏等^[32] 的研究表明，杂散电流和氯盐环境的共同作用加速了水泥水化产物中 Ca^{2+} 的溶出，导致 CH 和 C-S-H 凝胶的分解，进而抑制了 F 盐的生成。黄文新等^[33] 针对广州地铁工程混凝土在杂散电流下的溶蚀性能进行了加速试验，微观成分分析显示，越靠近阴极部位的砂浆凝胶产物越松散，水化硅酸钙的 Ca/Si 比值下降，砂浆微观结构变得不密实，孔隙增加，导致砂浆强度比基准砂浆降低约 10%。

另外, 部分学者对杂散电流环境下混凝土内离子的迁移行为也进行了研究。耿健^[34]的研究揭示了杂散电流的存在加速了外部氯离子向混凝土内迁移, 杂散电流与氯离子的相互作用使得混凝土中的钢筋锈蚀更为快速。张雪琴^[35]发现在杂散电流存在的情况下, 氯离子传输以电迁移为主, 混凝土氯离子含量与电流强度呈正相关关系。陈永青^[36]基于分子动力学(MD)模拟与试验研究了氯离子溶液的传输机理。研究结果表明无电场环境下, 氯离子表现出极低的渗透率, 而随着电场强度的增加, 水合氯离子“笼”和离子“簇”被破坏, 渗透率显著提高。

4 高水压作用下混凝土耐久性研究

高水压环境对混凝土结构的耐久性具有显著影响, 主要表现为微裂缝扩展、渗透系数增大以及有害离子的加速渗透等问题, 很多学者在试验和模型模拟研究方面做了丰富的工作。赵铁军等^[37]在对胶州湾海底隧道的服役环境进行分析时提到高压渗水是海底隧道面临的挑战之一。在学术领域已普遍达成共识, 在高水压条件下, 有害离子将会加速向混凝土内部渗透, 从而加快衬砌混凝土结构的劣化^[38]。

李宗利^[39]利用混凝土损伤与渗透系数关系, 借助有限元分析软件建立高水压作用下混凝土的塑性损伤分析模型。通过实例分析得到 2.5 MPa 的孔隙水压力会导致混凝土的损伤破坏, 引起微裂缝的扩展而造成材料的渗透系数增大。杜守来等^[40]采用试验研究在一定程度上验证这一结论, 通过力学性能指标、含水量和声速的变化判断混凝土在 0.5 MPa~2.5 MPa 外界水压的工况下发生不同程度的微结构破坏。杜守来和李宗利^[41]总结认为, 压力水会在混凝土内部产生水力劈裂作用, 使混凝土中的连通孔隙规模增大, 导致微结构损伤从而降低混凝土的力学性能。蒋玉川^[42]等的试验表明 1 MPa~2 MPa 的水压对氯离子在混凝土中的渗透深度有明显影响, 更高的水压导致更快的渗透速率。Loo^[43]系统地研究了混凝土材料在 0 MPa、2 MPa、4 MPa、15 MPa、30 MPa 静水压力下的氯离子渗透规律, 其试验结果表明, 混凝土内氯离子的迁移机制如果仅考虑扩散作用, 理论分析结果与试验结果会存在较大差别。陈聪和杨林德^[44]由 Fick 第二定律计算得到自然浸泡下混凝土

内氯离子浓度分布及迁移系数, 并将此与 0 MPa~0.5 MPa 水下作用下的试验数据进行对比, 发现两者具有显著差异, 因此水压下氯离子迁移模型还需要进一步完善。邱倚天^[45]采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件进行了仿真模拟, 建立了无荷载条件下素混凝土中的氯离子时空分布规律, 并根据试验条件引入了内压力参数, 扩大了模型的适用范围, 但仍是经验回归公式, 普适性仍需提高。陈立保等^[46]同样采用该软件, 建立了高水压作用下饱和-非饱和条件衬砌管片的氯离子侵蚀运移数值模型, 将氯离子浓度沿深度分布划分为对水平段、过渡段和扩散段, 并以此对 120 a 时间范围内, 青岛胶州湾第二海底隧道管片混凝土的氯离子分布情况进行了预测。

5 结论与展望

通过回顾国内外学者在多因素环境下混凝土耐久性研究的现状, 可以得出以下几点结论和未来研究展望:

(1) 虽然现有研究初步揭示了复合盐对混凝土耐久性影响的定性规律, 但在定量研究方面的成果仍相对有限。需要进一步加强对氯离子和硫酸根离子在混凝土中的空间浓度分布与其对混凝土力学性能的影响的定量分析。同时, 也应着力推进在双因素共同作用下, 混凝土内部有害离子迁移模型的建立, 以便更精确地预测混凝土的耐久性表现。

(2) 混凝土的砂浆内部相较于粗骨料更易产生孔隙和微裂缝, 是外界侵蚀性离子进入混凝土后的主要迁移通道和载体。因此, 针对多因素环境下砂浆中侵蚀性离子迁移规律的研究, 是讨论混凝土耐久性的关键基础, 相关研究应给予关注。

(3) 目前关于高水压环境下混凝土结构耐久性的试验研究成果仍较为有限, 相关模型亟需更多的试验数据进行验证。另外, 高水压对混凝土微裂缝扩展、渗透系数增大以及有害离子加速渗透等影响的深入研究, 对于完善现有模型具有重要意义。

(4) 杂散电流腐蚀问题已经得到广泛关注, 现有研究大多集中在直流杂散电流腐蚀方面。然而, 由于牵引变流器输出电流存在谐波, 且列车起停过程中负荷变化, 使得杂散电流不仅仅是纯直流, 而是动态的交直流混合电流^[47]。因此, 未来研究应关

注交流或其他非直流电腐蚀对混凝土结构的影响,以全面理解杂散电流腐蚀的复杂机制。

参考文献

- [1] 曹园章,郭丽萍,臧文洁,等.氯盐和硫酸盐交互作用下水泥基材料的破坏机理综述 [J].[材料导报](#),2018,32(12): 4142-4149.
- [2] 曹园章.严酷环境下多种侵蚀性离子在水泥基材料内的交互作用机理 [D].东南大学,2021.
- [3] 杜健民,焦瑞敏,姬永生.氯离子含量对混凝土硫酸盐腐蚀程度的影响研究 [J].[中国矿业大学学报](#),2012,41(06): 906-911.
- [4] 王展飞,杨鼎宜,俞君宝,等.氯离子对硫酸根离子在混凝土中扩散的影响 [J].[混凝土](#),2015(03): 68-78.
- [5] Du J,Tang Z,Li G,et al.Key inhibitory mechanism of external chloride ions on concrete sulfate attack[J].[Construction and Building Materials](#),2019(225): 611-619.
- [6] 陈晓斌,唐孟雄,马昆林.地下混凝土结构硫酸盐及氯盐侵蚀的耐久性实验 [J].[中南大学学报 \(自然科学版\)](#),2012, 43(07): 2803-2812.
- [7] 李鹏.荷载与盐溶液耦合作用下混凝土耐久性与寿命预测 [D].扬州大学,2014.
- [8] Tumidajski P J,Chan G W.Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity[J].[Cement and Concrete Research](#),1996,26(04): 551-556.
- [9] 管志超,徐锋,王曙光,等.硫酸盐对氯离子在地下结构混凝土中传输过程的影响 [J].[混凝土](#),2014(11): 34-37.
- [10] 俞小彤,常西栋,周文涛,等.氯盐与硫酸盐复合侵蚀下钢筋混凝土锈裂行为 [J].[哈尔滨工业大学学报](#),2024,56(02): 151-160.
- [11] 金祖权,孙伟,张云升,等.混凝土在硫酸盐、氯盐溶液中的损伤过程 [J].[硅酸盐学报](#),2006,34(05): 630-635.
- [12] 俞君宝.荷载与盐溶液复合作用下混凝土耐久性试验研究 [D].扬州大学,2013.
- [13] 陈燕娟.多因素耦合作用下混凝土微结构演化及氯离子传输模拟 [D].东南大学,2017.
- [14] 宿晓萍,王清.复合盐与干湿循环双重因素作用下混凝土耐久性试验 [J].[吉林大学学报 \(地球科学版\)](#),2013,43(3): 851-857.
- [15] Zhang M,Chen J,Lv Y,et al.Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate-chloride ions[J].[Construction and Building Materials](#),2013,39(SI): 26-32.
- [16] Živica V,Szabo V.The behavior of cement composites under compression load at sulfate attack[J].[Cement and Concrete Research](#),1994,24(8): 1475-1484.
- [17] Schneider U,Piasta J,Nägele E,et al.Stress corrosion of cementitious materials in sulphate solutions[J].[Materials and Structures](#),1990,23(2): 110-115.
- [18] Schneider U,Piasta W.The behavior of concrete under Na₂SO₄ solution attack and sustained compression or bending[J].[Magazine of Concrete Research](#),1991,43(157): 281-289.
- [19] Schneider U,Chen S.Behavior of high-performance concrete under ammonium nitrate solution and sustained loading[J].[ACI Materials Journal](#),1999,96(1): 47-51.
- [20] Schneider U,Chen S.Modeling and empirical formulas for chemical corrosion and stress corrosion of cementitious materials[J].[Materials and Structures](#),1998,31(214): 662-668.
- [21] Schneider U,Chen S.The chemomechanical effect and the mechanochemical effect on high-performance concrete subjected to stress corrosion[J].[Cement and Concrete Research](#),1998,28(4): 509-522.
- [22] Werner K,Chen Y,Odler I.Investigations on stress corrosion of hardened cement pastes[J].[Cement and Concrete Research](#),2000,30(9): 1443-1451.
- [23] Nakhi A E,Xi Y,Willam K.The effect of fatigue loading on chloride penetration in non-saturated concrete[C].[European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering](#),Barcelona,2000:1-8.
- [24] Fu C,Ye H,Jin X,et al.Chloride penetration into concrete damaged by uniaxial tensile fatigue loading[J].[Construction and Building Materials](#),2016,125:714-723.
- [25] Jiang L,Li C,Zhu C,et al.The effect of tensile fatigue on

- chloride ions diffusion in concrete[J].*Construction and Building Materials*,2017,151:119-126.
- [26] Bertolini L,Carsana M,Pedefferri P.Corrosion behavior of steel in concrete in the presence of stray current[J].*Corrosion Science*,2007,49(3): 1056-1068.
- [27] Solgaard A O S,Carsana M,Geiker M R,et al.Experimental observations of stray current effects on steel fibres embedded in mortar[J].*Corrosion Science*,2013,74:1-12.
- [28] 高德军,黄玉龙,王青,等.杂散电流环境下 UHPC 劣化特征研究 [J].*硅酸盐通报*,2023,42(06): 2007-2014.
- [29] 周晓军,高波,郭建国,等.混凝土中钢筋受外直流电腐蚀对其强度影响的试验研究 [J].*都市轨道交通*,2001,14(4): 17-23.
- [30] 杨向东,曲学兵,周晓军.外加直流电腐蚀钢筋引起混凝土破坏机理的研究 [J].*西部探矿工程*,1999,11(4): 92-96.
- [31] 鹿婷,金祖权,陈兆毅,等.杂散电流与氯盐作用下埋地混凝土中钢筋锈蚀研究 [J].*西安建筑科技大学学报:自然科学版*,2023,55(4): 484-491.
- [32] 庄华夏,徐菲蔡,跃波钱,等.氯盐环境下杂散电流对水泥水化产物赋存状态的影响 [J].*混凝土*,2022,395:49-55.
- [33] 黄文新,殷素红,李铁锋,等.杂散电流对广州地铁混凝土溶蚀性能影响的加速试验研究 [J].*混凝土*,2008,8:17-20.
- [34] 耿健.杂散电流与氯离子共存环境下钢筋混凝土劣化机理的研究 [D].*武汉理工大学*,2008.
- [35] 张雪勤,徐锋,王曙光,等.杂散电流对地下结构混凝土中氯离子传输过程的影响 [J].*混凝土*,2016,315:75-78+83.
- [36] 陈永青.高水压耦合杂散电流侵蚀下氯离子传输及混凝土劣化研究 [D].*湖南大学*,2023.
- [37] 赵铁军,金祖权,王命平,等.胶州湾海底隧道衬砌混凝土的环境条件与耐久性 [J].*岩石力学与工程学报*,2007,26(S2): 3823-3829.
- [38] 张纬.高水压对混凝土的损伤及对氯离子传输的加速效应研究 [D].*中国矿业大学*,2020.
- [39] 李宗利,杜守来.高渗透孔隙水压对混凝土力学性能的影响试验研究 [J].*工程力学*,2011,28(11): 72-77.
- [40] 杜守来,李宗利,金学洋.孔隙水压对混凝土抗压强度影响的初步研究 [J].*人民长江*,2009,40(3): 54-55.
- [41] 杜守来,李宗利.孔隙水压对混凝土损伤的研究综述 [J].*人民珠江*,2012(03): 13-18.
- [42] 蒋玉川,秦宪明,张利俊,等.高温、高压对混凝土氯离子渗透性能的影响研究 [C]// "全国特种混凝土技术及工程应用"学术交流会暨 2008 年混凝土质量专业委员会年会论文集.2008.
- [43] Loo Y H,Lee S L,Wong S F,et al.Accelerated test of ingress of chloride ionss in concrete under pressure and concentration gradients[J].*Magazine of Concrete Research*,1996,48(174): 15-25.
- [44] 陈聪,杨林德.压力水头下开裂混凝土渗透特性试验研究 [J].*低温建筑技术*,2009(09): 1-5.
- [45] 邱倚天.高水压环境下混凝土内压应力对氯离子传输及钢筋锈蚀速率影响研究 [D].*中国矿业大学*,2023.
- [46] 陈立保,封坤,孙文昊,等.高水压作用下衬砌管片构件氯离子侵蚀数值模拟研究 [J].*现代隧道技术*,2024,61(3): 131-140.
- [47] 林炎华.地铁牵引供电回路动态杂散电流研究 [D].*北京交通大学*,2019.