

十周年专栏

荷载与服役环境作用下混凝土耐久性的研究和进展

姚 燕, 王 玲, 王振地, 曹 银, 唐官保, 杜 鹏, 黄鹏飞

(中国建筑材料科学研究总院有限公司 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 混凝土是基础设施建设不可或缺的工程材料, 其耐久性是服役环境下混凝土结构寿命的重要保障。荷载作用引起混凝土材料微结构变化, 荷载较大时, 混凝土内的孔隙连通和微裂纹扩展影响到介质的渗透和传输。荷载和服役环境的叠加作用加速混凝土性能劣化, 因此耦合作用下混凝土耐久性研究成为了国际关注的热点。综述了荷载与服役环境耦合作用下混凝土耐久性研究的探索和研究进展, 总结了国内外在荷载-冻融循环、荷载-氯盐、荷载-碳化耦合作用下混凝土耐久性评价方法和表征参数等方面取得的重要突破, 并介绍了荷载-冻融循环、荷载-氯盐耦合作用下混凝土寿命预测模型与方法的最新研究成果。最后, 指出了现有荷载与典型服役环境作用下混凝土耐久性研究的局限性和后续的研究方向。

关键词: 混凝土; 耐久性; 荷载; 服役环境; 评价技术; 寿命预测

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)11-0855-11

Research and Progress on Durability of Concrete under Combined Mechanical Load and Environment Actions

YAO Yan, WANG Ling, WANG Zhendi, CAO Yin,
TANG Guanbao, DU Peng, HUANG Pengfei

(State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: Concrete is an indispensable engineering material for infrastructure construction, and its durability is of great importance for the service life of concrete structures in service environments. External load causes the change of microstructure and pore structure of concrete, which affects the penetration and transportation of medium into the concrete matrix. When the load is large, micro cracks appear inside the concrete matrix and the connectivity increases gradually. The combined mechanical and environmental action leads to accelerated degradation of concrete performance. Therefore, durability of concrete under combined mechanical load and environmental actions has become a hot topic at home and abroad in recent years. The present paper reviews the exploration and research progress of concrete durability research under the combined mechanical load and environmental actions. The paper summarizes the important breakthroughs in the characterization parameters and evaluation of concrete durability under combined load and freeze-thaw cycles, load and chloride salt, load and carbonation, respectively. The latest research progress of the service life prediction models and methods for concrete under the combination of load and freeze-thaw cycles, load and chloride salts is introduced. In addition, the limitations of the existing research related to durability of concrete under combined mechanical load and environmental actions as well as the corresponding research prospective are outlined.

Key words: concrete; durability; mechanical load; environment action; evaluation technique; service life prediction

1 前 言

混凝土结构在全世界的土建工程中都占绝对主导地位,

约为 80%~90%, 各种重要的基础设施工程多为钢筋混凝土结构。作为基础设施建设不可或缺的工程材料, 混凝土世界年产量近 70 亿立方米, 我国占世界总量的 60%以上。混凝土材料耐久性是服役环境下混凝土结构寿命的保障, 因耐久性不足带来的庞大维修费用在世界范围内都十分惊人^[1, 2]。在混凝土耐久性劣化的众多因素当中, 冻融循环、氯盐侵蚀和碳化作用是最普遍和最主要的因素^[3, 4], 由此产生的耐久性问题占比超过 80%。

由于绝大多数混凝土结构是在受荷状态下服役的,

收稿日期: 2018-09-28

基金项目: 国家自然科学基金重大国际(地区)合作研究项目
(51320105016)

第一作者: 姚 燕, 女, 1957 年生, 教授, 博士生导师, Email:
yy@cbmamail.com.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.11.03

现阶段采用实验室内的单一的环境因素条件下的耐久性试验结果指导实际工程并未获得满意的效果。理论和试验研究表明,忽略外部荷载作用,只考虑不持载时未损伤混凝土在单一环境因素下的劣化与实际情况存在很大差异^[5-7]。近年来,越来越多的学者开始逐渐关注并重视机械荷载与环境因素耦合作用下的混凝土耐久性,并取得了一些研究成果^[5-11]。然而,外部荷载对混凝土孔隙结构与介质传输性能的影响使得其劣化行为与机理更加复杂,如何预测和提升服役混凝土的结构耐久性,仍是国际工程界的一大难题。

本文分析了外部荷载对混凝土孔隙结构及介质传输性能的影响,重点针对荷载与冻融循环、氯盐侵蚀和碳化 3 种典型服役环境的耦合作用,综述了近年来国内外学者在荷载-冻融循环、荷载-氯盐侵蚀和荷载-碳化耦合作用下混凝土耐久性方面的研究进展和现状,介绍了荷载作用下混凝土耐久性评价方法和耦合作用下混凝土寿命预测方法最新研究进展,并指出了该领域后续的研究方向。

2 荷载作用下混凝土的孔隙结构与介质传输

硬化混凝土是一种多相多尺度的非均质多孔材料。环境因素条件下,外界侵蚀性介质以扩散、渗透、毛细吸附、迁移等不同形式侵入混凝土内部,发生各种物理与化学变化,造成混凝土劣化。外界侵蚀性介质侵入混凝土材料内部主要有连续传输、非连续传输和阻塞传输 3 种途径^[12],如图 1 所示。绝大多数介质是通过裂纹和孔隙组成的连续路径进入混凝土内部的,因此荷载作用下混凝土的孔隙结构和渗透性的变化,是荷载与环境因素耦合作用下混凝土劣化较单一环境因素下更为复杂的主要原因。

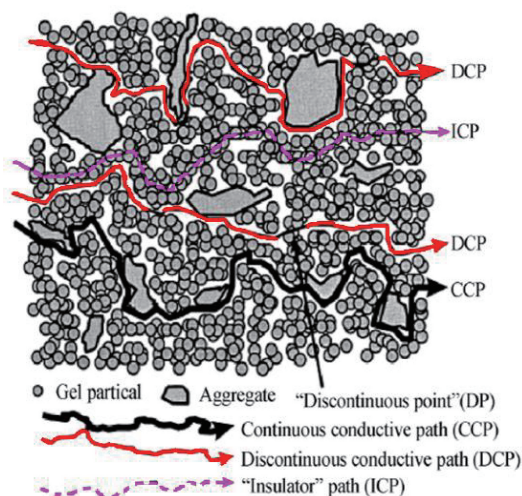


图 1 水泥基材料中的 3 种传输路径示意图^[12]

Fig. 1 Schematic of three transmission paths in cement-based materials^[12]

2.1 孔隙与裂纹

图 2 是压应力比(与极限应力的百分比)与混凝土微裂纹扩展的关系示意图^[13]。在轴压应力条件下,当压应力比在 30% 以下时,混凝土中界面过渡区的原始缺陷和微裂纹保持稳定状态,几乎没有扩展倾向,应力-应变曲线几乎是直线(图 2 中阶段①)。当应力比超过 30% 时,界面过渡区中原始微裂纹发生变化,长度、宽度和数量随着应力比的提高而增大,应力-应变曲线开始明显偏离直线阶段,直到 50% 的应力比之前,界面过渡区的微裂纹扩展仍然是稳态的,而混凝土基体新产生的微裂纹可以忽略(图 2 中阶段②)。在达到 50%~60% 压应力比时,基体中开始产生裂纹,随着应力比进一步提高,界面过渡区的原始微裂纹和新生微裂纹进一步扩展,导致应力-应变曲线明显弯曲并趋于水平(图 2 中阶段③)。在应力比达到 75%~80% 时,混凝土发生破坏(图 2 中阶段④)。

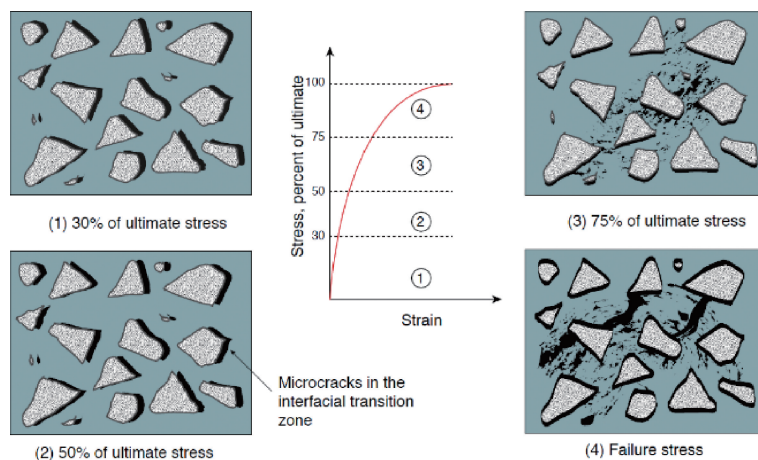


图 2 压应力水平与混凝土微裂纹扩展的关系示意图^[13]

Fig. 2 Schematic of relationship between crack propagation and compressive stress ratio^[13]

时, 应变能的释放速率达到裂纹扩展所需的临界水平, 混凝土急剧变形直至破坏(图 2 中阶段④)。

混凝土在单轴受拉时, 裂纹扩展方向与应力方向垂直, 每条新裂纹的产生和扩散都减小了混凝土有效承载面积, 从而导致临界裂纹尖端应力增大。因此, 拉伸荷载作用下混凝土微结构破坏对所施加应力大小的敏感程度要远大于压荷载的作用。

不同形式的荷载作用造成混凝土微结构发生不同程度的变化, 可能引起裂纹的闭合、萌生与扩展。原始裂纹的闭合延缓外界介质的侵入, 而微裂纹的相互交错会使孔隙曲折度降低、连通度增大, 加速外界侵蚀性介质侵入。典型的侵蚀性介质(如氯离子、 CO_2 、水等)在混凝土中传输行为的变化直接影响混凝土在氯盐侵蚀、碳化或冻融循环等环境因素条件下的耐久性。以荷载-冻融循环耦合作用为例, 研究表明^[14-21], 冻结过程中随着温度的降低, 混凝土孔隙水结冰量增加, 结冰膨胀导致微裂纹萌生与扩展、孔隙连通度增加; 融解过程中, 孔隙连通导致孔隙内相对湿度和饱水度增大。冻融循环过程中, 孔隙水在水、冰两相之间重复变化(图 3), 导致微裂纹扩展, 混凝土出现明显内部损伤, 外部荷载使得这种损伤加剧, 基体产生的不可恢复变形缓慢增加。经多次冻融循环, 饱水度持续增大, 不可恢复变形急速增加, 直至混凝土材料完全破坏。

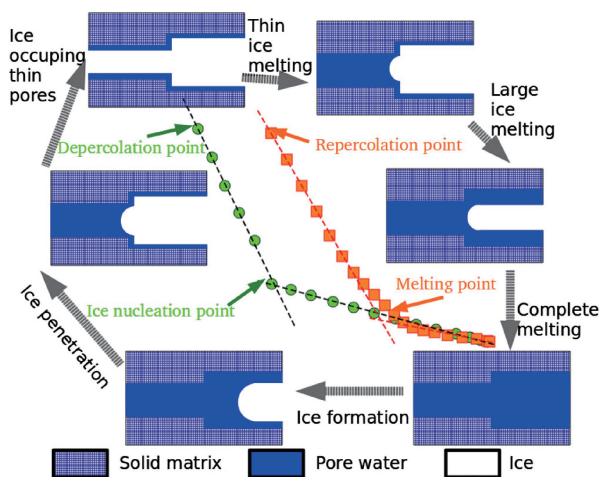


图 3 冻融过程中冰的形成与融化过程^[19]

Fig. 3 Actions of ice formation and melting during freeze-thaw cycles^[19]

2.2 介质传输

一般情况下服役混凝土是带裂纹工作的, 外界荷载通过改变混凝土材料的微结构而影响介质传输性能。不同荷载形式下, 混凝土内部孔隙结构变化不同, 一般用渗透性来表征混凝土材料抵抗外界侵蚀性介质的能力。

图 4 和图 5 为典型研究中压应力和拉应力对混凝土

渗透性影响的结果^[22-28]。可以看出, 压应力作用下, 不同介质在混凝土中的渗透行为大致可以分为两个阶段: 第一阶段荷载的施加一定程度上使得混凝土内孔隙闭合, 混凝土基体变得更加密实, 介质在其中的传输速率表现为不同程度的下降; 第二阶段则是当外加应力超过某特定范围或者特定值(也被称为临界应力比)后, 介质在其中的传输速率明显增大, 混凝土渗透性显著增大。与轴向压应力下的渗透性轻微下降不同, 轴向拉应力下混凝土第一阶段的介质传输能力随着拉应力的增加而缓慢增大, 达到临界应力水平之前, 介质的传输速度未明显加快。第二阶段的传输行为与压应力下类似, 超过临界应力水平之后, 介质的传输速度显著增加。

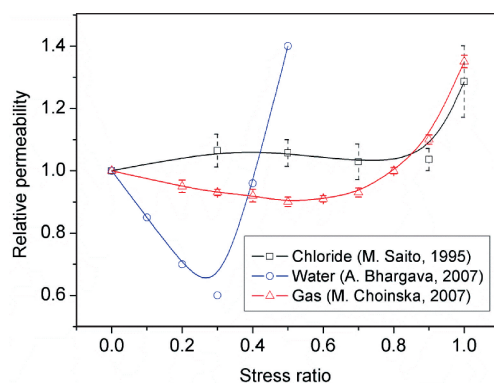


图 4 压应力对混凝土渗透性的影响^[22-24]

Fig. 4 Influence of compressive stress on concrete permeability^[22-24]

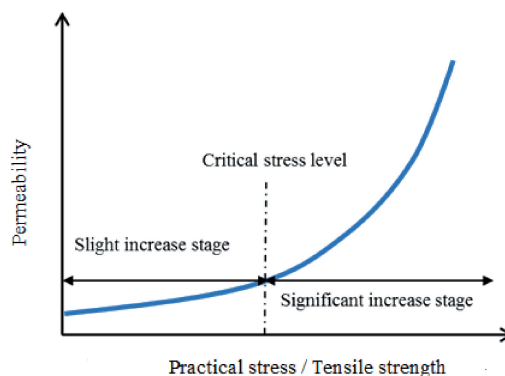


图 5 拉应力对混凝土渗透性的影响^[25-28]

Fig. 5 Influence of tensile stress on concrete permeability^[25-28]

图 6 和图 7 总结了文献中压应力和拉应力作用下混凝土渗透性显著增大的临界应力比^[22-52]。压应力作用下的临界应力比分布在 0.3~0.9 范围内, 拉应力下临界应力比相对集中分布在 0.2~0.5 范围内, 但也有学者获得了 0.9 的高临界应力比。

作为一种非均质准脆性材料, 混凝土材料组成、渗透介质、试验装置与方法都会对渗透性测试结果造成影

响,但以归一化的应力比为自变量时,临界应力比仍在如此宽的范围内波动,进一步证明应力水平与传输性能并不存在直接对应关系,本质的原因应归结于荷载对混凝土孔隙结构(孔隙率、孔隙曲折度和孔隙连通度等)与裂纹状态(张开与闭合)的影响方面。因此,荷载与服役环境耦合作用下混凝土劣化行为与机理比单一环境因素作用更加复杂。

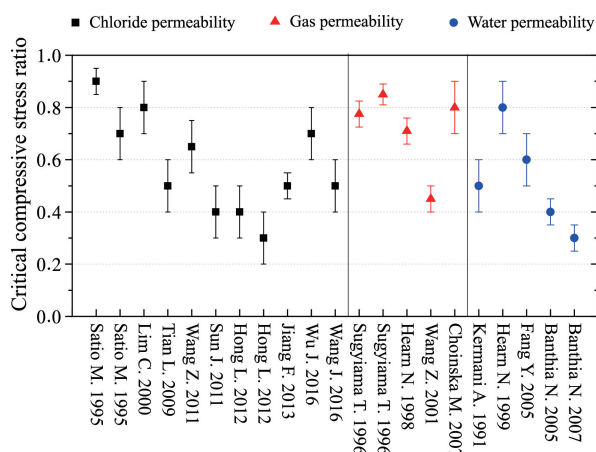


图 6 压应力下混凝土渗透性改变的临界应力比^[22-24, 29-51]

Fig. 6 Critical stress ratio of permeability change of concrete under compressive stress^[22-24, 29-51]

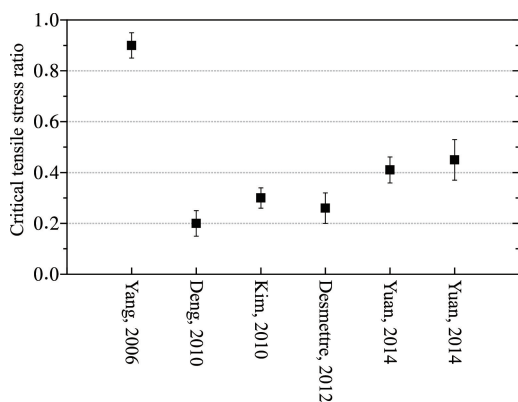


图 7 拉应力下混凝土渗透性改变的临界应力比^[25-28, 52]

Fig. 7 Critical stress ratio of permeability change of concrete under tensile stress^[25-28, 52]

3 荷载作用下混凝土耐久性评价方法

现有的所有国家标准和国际标准中,均只单独考虑了混凝土在不同单一环境下的耐久性。然而,试验结果表明,荷载和环境因素的耦合作用会产生叠加效应,造成混凝土的破坏速度和程度远大于单一作用,这是导致混凝土结构达不到设计服役寿命的重要原因之一^[5-11]。因此,十分有必要建立荷载与环境因素耦合作用下的混

凝土耐久性测试方法,为实际钢筋混凝土结构的服役寿命预测提供依据。

考虑耦合作用下的耐久性已经成为共识,国内外学者在传统试验方法的基础上开展了多种探索性尝试,基本存在荷载与环境因素“先后作用”^[36, 46, 51]和“同时作用”^[6, 9, 11, 20, 21, 53]两个学术流派,但二者的“同时作用”更符合工程实际。然而,“同时作用”在试验设备与测试方法上存在诸多难点,一些传统表征参数不适用。

下文重点针对荷载-冻融、荷载-氯盐和荷载-碳化耦合作用,分析在测试设备、表征参数等方面存在的难点和问题,综述近年来相关研究进展。

3.1 荷载和冻融耦合作用

3.1.1 难点和问题

荷载-氯盐耦合作用下混凝土耐久性测试设备与评价方法研究存在的难点和问题主要表现在以下几个方面:

(1) 剧烈、频繁温变条件下加载设备若无应力补偿,荷载损失较高。荷载-冻融循环耦合作用下混凝土耐久性测试设备需要在剧烈变温、长期反复冻融条件下提供并保持稳定荷载。现有耦合试验研究中常用的加载装置主要有弹簧式加载^[8, 9]、千斤顶式加载^[53]等。这几种传统的加载装置与混凝土试件之间均为刚性接触,不同材料之间热膨胀系数差异,以及冻融循环过程中由于混凝土试件表面剥落、内部孔隙水结冰膨胀-融解收缩等原因,都会在很大程度上影响施加荷载的稳定性,反复冻融过程中混凝土产生的内部损伤也会导致施加的外部荷载随冻融循环而持续减小,甚至是迅速衰减。由于这几种传统加载装置都没有荷载监测和周期性补偿,都不能完全保证冻融环境下荷载的精确施加和稳定保持。

(2) 在表征参数方面,传统方法仅能获得质量损失、相对动弹性模量和强度等传统参数,不能在线连续监测损伤参数,难以用于工程实际。现有的研究中通常采用质量损失率^[8, 9, 54-57]、相对动弹性模量^[8, 9, 54-57]、毛细吸水系数^[54]、力学性能参数^[56]等来表征混凝土在冻融循环作用下的表面剥落损伤和内部损伤,但这些参数均是周期性测试参数,无法实现在线连续测量,不能连续获得混凝土劣化的全过程信息,可能丢失重要的性能演化临界点。另外,质量损失只能反映冻融循环造成的表面剥落,相对动弹性模量、毛细吸水系数和强度只能间接表征冻融产生的裂纹扩展,不能反映温湿度梯度、孔隙溶液相变、试件体积变形等信息,不足以全面评估荷载-冻融循环耦合作用下混凝土的耐久性;耦合作用下混凝土材料耐久性评价尚停留在利用传统参数描述劣化行为阶段,难以用于工程实际的在线连续监测与评价。

3.1.2 探索和成果

(1) 测试设备与方法。中国建筑材料科学研究总院 (CBMA) 研究团队很早便开始了应力作用下混凝土抗冻性测试设备的研发^[53, 57], 发明了由液压执行机构、荷载传感器、程序控制和信号采集与反馈系统构成的闭环控制系统, 实现施加荷载的在线监测和精确补偿。液压执行机构稳定施加外部荷载, 荷载传感器实时监测试件实际受力大小, 当施加荷载发生变化时能够自动启动液压执行机构进行补载, 实现了在 $-30 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, $26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 升降温速率下外部荷载的精确施加和持续稳定保持。经过实践过程中的多次更新换代, 得到了荷载和冻融作用下混凝土耐久性的测试设备与方法^[20, 53, 57]。

(2) 表征参数及劣化规律。CBMA 研究团队^[14-21, 53, 57, 58]在混凝土试件中预置多种传感器, 采用信号隔离技术, 解决了长期剧烈温变条件下冻融热交换介质对弱电信号的干扰、多参数采集时的信号干扰问题, 实现了多种信号的实时连续采集。利用连续采集的耦合作用下混凝土试件的应变、电阻率、相对湿度、温度和荷载等参数, 获得了混凝土劣化的孔隙溶液结冰程度 (电阻率表征)、裂纹萌生与扩展 (应变和电阻率表征)、孔隙连通 (电阻率表征)、饱水度增大 (相对湿度和电阻率表征) 等全过程信息^[14-19], 并分析得出荷载-冻融循环协同作用下混凝土劣化规律^[14-19]。结果表明, 弯拉荷载-冻融耦合作用下, 混凝土试件拉应力区和压应力区均产生了不可逆的残余应变, 且随着冻融循环次数的增加而增大; 施加应力比越大, 残余应变越大 (图 8); 外加荷载加剧受冻混凝土的损伤。残余应变随冻融循环次数的增加呈三段式发展 (图 9), 分别为加速增长期、缓慢增长期和加剧破坏期^[21], 可以通过连续监测荷载-冻融循环过程中混凝土的应变来获取混凝土损伤演变信息。

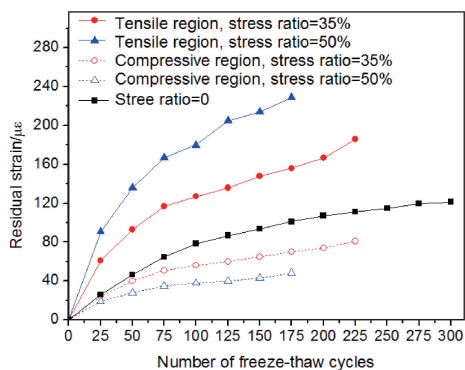


图 8 荷载-冻融耦合作用下残余应变的变化^[21]

Fig. 8 Residual strain of concrete under combined freeze-thaw cycles and load^[21]

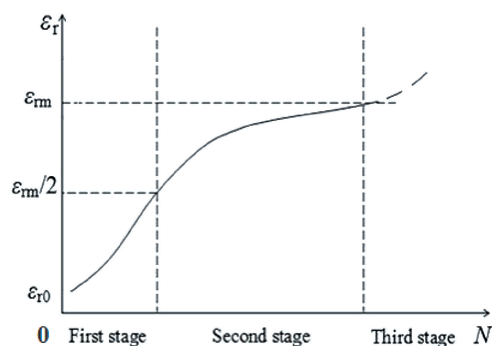


图 9 荷载-冻融耦合作用下残余应变演变规律^[21]

Fig. 9 Residual strain evolution of concrete under combined freeze-thaw cycles and load^[21]

3.2 荷载和氯盐耦合作用

3.2.1 难点和问题

荷载-氯盐耦合作用下混凝土耐久性测试设备与评价方法研究存在的难点和问题主要表现在以下几个方面:

(1) 受试件装配方式的限制, 拉伸试验普遍存在试件受力偏心和端部应力集中问题, 影响氯离子稳定扩散。国内外开展较多的是压荷载-氯盐耦合作用^[33-38, 40, 42, 43, 50, 51]和弯曲荷载-氯盐耦合作用^[59-62]下混凝土的性能试验研究, 拉荷载-氯盐耦合作用下的混凝土性能研究相对较少。这主要是由于缺乏能够长期保证精确轴向拉应力和氯盐侵蚀耦合作用的试验装置。由于混凝土材料的离散性以及试验装置的限制, 轴拉试验要完全避免偏心和端部应力集中非常困难, 国内外至今尚未完全解决这一问题。现有的单轴拉伸试验的试件装配方法有粘接法、夹持法和内埋法 3 种。粘接法操作繁琐、对粘接水平要求苛刻、试件极易从粘接面脱落, 试验成功率很低; 夹持法和内埋法极易造成试件端部的应力集中, 3 种方法都不能有效解决偏心问题。

(2) 采用浸泡实现氯离子自然扩散, 易腐蚀加载装置造成应力损失, 且无氯盐浓度的精确控制措施。现有的荷载-氯盐侵蚀试验^[33-38, 40, 42, 43, 50, 51]常将加载装置连带试件整体浸泡入侵蚀溶液, 长期浸泡容易导致装置腐蚀造成应力损失; 随着氯盐溶液不断向混凝土内部传输以及长龄期试验条件下的蒸发效应, 氯盐溶液浓度存在较大波动, 无法实现应力场与氯离子浓度场的长期稳定。

(3) 多采用电加速法测试氯离子扩散系数, 与工程实际不符。测试方法方面, 现有的研究^[33, 34, 37, 42, 51]多采用电加速法测试氯离子扩散系数, 与自然条件下的氯离子扩散存在较大差异, 耦合作用下混凝土材料耐久性评价尚停留在利用电加速氯离子扩散系数描述劣化行为阶段。

3.2.2 探索 and 成果

专利 CN 101271103A^[63]、CN 203191259U^[64] 和 CN 102213660A^[65] 公开了拉应力与环境共同作用下混凝土多因素耐久性实验装置, 采用不同的方法尽可能减小轴向偏心问题, 但都没有同时解决应力偏心、装置腐蚀和氯盐浓度不稳定等 3 个问题。

CBMA 研究团队^[66-69] 分别对加载装置和拉伸试件进行了创新设计, 有效解决了应力偏心难题: ① 设计哑铃型混凝土试件, 并通过在端头预埋锚固螺栓、增加试件过渡段等措施, 减轻试件夹持部位的应力集中; ② 设计带上、下球铰的加载装置, 通过球铰的转动, 使哑铃型试件在 360° 方向上具有自调节功能, 防止偏心; ③ 在立柱上粘贴应变片, 随时监测立柱的受力大小, 及时微调保证立柱受力平衡, 消除轴向偏心。此外, 还创新性地设计了由外加溶液盒和溶液循环装置组成的侵蚀介质控制系统, 通过在试件受力均匀区域粘贴溶液盒的方式避免了侵蚀溶液与加载装置直接接触, 消除了侵蚀介质对加载装置的腐蚀, 封闭的溶液循环系统可保证侵蚀溶液长期无蒸发和浓度恒定。另外, 该控制系统中的侵蚀溶液种类、浓度范围和流速可调, 适应不同腐蚀环境下的混凝土耐久性测试与评价。最终, 形成了荷载-氯盐侵蚀耦合作用下混凝土耐久性测试设备及方法^[66]。该测试设备由加载装置和侵蚀介质控制系统组成(图 10), 同时解决了耦合作用下试件轴向偏心影响氯离子稳定传输、氯离子扩散表面浓度不稳定和装置易受腐蚀的问题^[66, 67]。

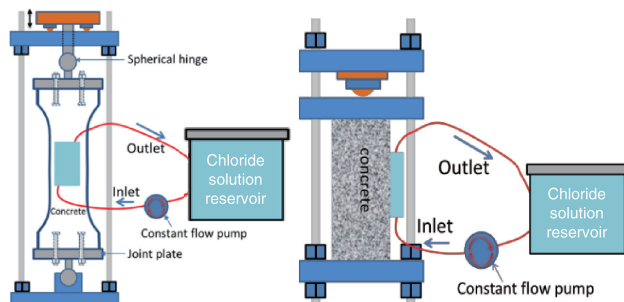


图 10 荷载-氯盐侵蚀耦合作用下混凝土耐久性测试设备示意图^[66, 67]: (a) 拉荷载-氯盐侵蚀, (b) 压荷载-氯盐侵蚀

Fig. 10 Schematic diagram of test equipment for concrete durability under combined mechanical load and chloride attack^[66, 67]: (a) tension and chloride attack, (b) compression and chloride attack

基于上述研究, CBMA 研究团队向国际著名学术机构 RILEM 申请成立了“荷载与环境作用耦合作用下混凝土耐久性测试方法”技术委员会(RILEM TC-246 TDC)。笔者任技术委员会主席, 组织来自亚、欧、非、大洋和

南美洲的 40 余名国际著名混凝土科学家共同展开工作, 开展了多轮次国际对比试验, 以验证测试方法的复现性和科学性。期间, 组织召开了 12 次会议, 包括一次荷载-氯盐耦合作用下混凝土耐久性研究国际研讨会。经过多家单位的对比试验, 验证了提出的荷载-氯盐侵蚀耦合作用下混凝土耐久性测试方法原理科学、操作性强, 测试方法和结果能清晰反映外部荷载对混凝土中氯盐传输的影响^[70], 形成首个荷载与服役环境作用下混凝土耐久性测试方法国际标准^[71]。

3.3 荷载和碳化耦合作用

3.3.1 难点和问题

荷载-碳化耦合作用下混凝土耐久性研究存在的难点和问题主要表现在以下几个方面:

(1) 不同 CO₂ 浓度下, 混凝土碳化产物、碳化深度发展规律和破坏机理的差异以及与自然碳化的关联性还未明确。目前, 世界各国的加速碳化试验标准中规定的 CO₂ 浓度不统一(如我国为 20%, 欧洲为 2%), 不同加速碳化条件下的劣化进程与自然碳化条件下(0.035% CO₂) 的关联性不明朗。

(2) 荷载-碳化耦合作用下的混凝土耐久性测试设备还不完善。我国科研单位率先开始关注荷载作用下的混凝土碳化破坏, 开展了相应研究, 取得了一定的成果^[72-79]。但在荷载和碳化耦合作用下的试验设备中, 同时实现荷载精确施加与稳定保持、CO₂ 浓度和温湿度高精度控制比较困难。

(3) 由于混凝土的碳化进程是一个复杂的物理、化学过程, 外部荷载的施加使碳化作用下的混凝土劣化机理更为复杂。耦合作用下碳化机理的分析通常没有从荷载作用导致混凝土气体渗透性变化入手, 缺乏本质性的理论分析与研究。

3.3.2 探索 and 成果

目前国内外针对荷载作用下混凝土气体渗透和碳化作用的研究还不多, 主要的探索和成果体现以下在 3 个方面:

(1) 荷载作用下混凝土气体渗透性。从图 6 中压应力作用下混凝土渗透性研究结果来看, 影响混凝土气渗性的临界压应力比分布在 0.4~0.9 范围内; 由于拉应力试验装置的复杂性, 拉应力作用下混凝土的气渗性研究较少。CBMA 研究团队利用 RILEM TC 246-TDC 确定的轴压和轴拉试验架、英国女王大学 Autoclam 渗透性测试装置^[80, 81], 测试获得了荷载作用下的混凝土气体渗透系数, 发现气体渗透系数随拉应力的增大而增大, 气渗系数与拉应力比近似呈指数关系; 也证实了压应力下混凝土气体渗透系数随压应力增大均呈先减小后增大的趋势,

气渗系数与压应力比近似呈二次函数关系^[82]。基于此, CBMA 研究团队还建立了基于荷载作用下气渗系数的混凝土碳化深度预测模型, 并在现有碳化模型的基础上, 探索形成了耦合作用下实际混凝土服役寿命可靠度计算模型。

(2) 加速碳化与自然碳化相关性。针对国内外加速碳化试验时使用的 CO₂ 浓度差异, CBMA 团队开展了不同 CO₂ 浓度下加速碳化试验与自然碳化关系的对比研究^[83, 84]。结果表明, 与自然碳化相比, 2% 与 20% 的 CO₂ 浓度下加速碳化试验明显提高了混凝土碳化深度、完全碳化区碳化程度、碳酸钙生成量与收缩, 降低了孔隙率、平均孔径和氢氧化钙 (CH) 含量, 20% 浓度的改变幅度远大于 2%。与 2% CO₂ 加速碳化相比, 20% CO₂ 条件下混凝土早龄期碳化速度过快, 碳化产物的生成会快速降低混凝土孔隙率, 导致碳化系数随着时间的增长而降低。2% CO₂ 浓度下碳化产物以方解石和文石为主, 20% CO₂ 浓度下碳化产物以方解石和球霏石为主^[83]。

(3) 荷载作用下混凝土碳化试验设备及碳化规律。CBMA 团队研究突破了低 CO₂ 浓度高精度控制和大容积试验箱内加速循环技术难题, 利用 RILEM TC 246-TDC 确定的轴压和轴拉试验架^[70, 71], 形成了一套完整的荷载与碳化耦合作用下混凝土耐久性测试设备与方法, 获得了拉、压荷载对混凝土碳化深度、碳化系数的影响规律。荷载作用下, 不同 CO₂ 浓度下混凝土碳化深度随压应力比的增大呈先减小后增大的趋势, 随拉应力比的增大而增大; 相同碳化龄期下, 各应力比的混凝土碳化深度均随 CO₂ 浓度的提高而增大。这些研究结论与 Wittmann 研究团队^[10, 72-74]得出的结论是一致的。Castel 等^[11]在研究荷载作用下混凝土的碳化行为时发现受拉区的混凝土界面过渡区处微裂纹增加, 拉应力加剧了混凝土碳化速度, CBMA 团队的研究结果也证实了这一结论。

现有的国内外研究团队并没有得出统一的压荷载下混凝土碳化深度曲线的临界应力比^[10, 11, 72-74, 76-79] (见表 1), 分析其原因, 在于加载模具、加载与碳化同时或分别进行、碳化浓度控制等方面的差异, 这也充分说明了建立统一的荷载-碳化耦合作用试验方法的必要性。

2017 年, 新成立的 RILEM TC 281-CCC 技术委员会 (含有辅助性胶凝材料混凝土的碳化)^[84] 下设 WG4 工作组, 在 2017~2021 年间专题开展荷载作用下混凝土碳化的表征和试验方法研究, CBMA 研究团队负责这个专题的组织工作, 有望形成 RILEM 标准试验方法。

表 1 外加荷载对混凝土碳化性能的影响

Table 1 Effect of external load on concrete carbonation

References	Stress ratio	Results
Wittmann, <i>et al.</i> ^[10, 72-74]	Compression: 0.35, 0.65, 0.75	Carbonation depth decreases and then increases with the compressive stress. Threshold is between 0.35 and 0.65
	Tension: 0.35, 0.65	Carbonation depth increases with stress ratio
Shi, <i>et al.</i> ^[76]	Compression: 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75	The greater the compressive stress, the slower the concrete carbonation
	Tension: 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75	Carbonation depth increases with stress ratio
Tian, <i>et al.</i> ^[77]	Compression: 0.05, 0.5, 0.7	The greater the compressive stress, the slower the concrete carbonation
	Tension: 0.3, 0.5, 0.7	Carbonation depth increases with stress ratio
Jin, <i>et al.</i> ^[78]	Tension: 0.25, 0.5	Carbonation depth increases with stress ratio
Tu, <i>et al.</i> ^[79]	Compression: 0.3, 0.5, 0.7	The greater the compressive stress, the slower the concrete carbonation
	Tension: 0.3, 0.5, 0.7	Carbonation depth increases with stress ratio
Castel, <i>et al.</i> ^[11]	Tension: 0.28	Carbonation rate increases

4 荷载与服役环境耦合作用下混凝土寿命预测方法

荷载与服役环境耦合作用下混凝土寿命预测方法可用于新建结构耐久性辅助设计, 为混凝土结构安全运行提供保障, 也可用于既有混凝土结构的安全性评估, 为在役混凝土提供修复与维护决策建议。然而, 现有的混凝土结构寿命预测模型与方法研究中, 多考虑荷载或环境的单一作用, 不符合实际服役条件, 预测结果准确性较低。下文重点针对荷载-冻融和荷载-氯盐耦合作用, 分析在寿命预测模型与方法等方面存在的难点和问题, 综述近年来相关的研究进展。

4.1 荷载和冻融耦合作用

4.1.1 难点和问题

荷载-冻融耦合作用下混凝土寿命预测模型还存在如下难点和问题:

(1) 模型的建立基于传统间歇性测试参数, 模型相互之间的关联度较低, 缺乏统一性、规范性^[85]。冻融循

环条件下混凝土损伤模型主要有质量衰减模型^[86]、强度衰减模型^[87, 88]、能量耗散模型^[89, 90]、超声波声速变化规律模型^[91]、相对动弹性模量衰减模型^[92]、应变变化规律模型^[93]等,一般采用李金玉等^[94]建立的不同地区混凝土室内外冻融循环次数之间的关系来进行寿命预测。荷载-冻融耦合条件下的混凝土寿命预测模型研究相对较少^[95-98],选用最多的损伤表征参数是相对动弹性模量。由于相对动弹性模量测试属于间歇性测试,无法实时监测。

(2)另外,该领域建立的现有寿命预测模型多基于冻融单一因素进行,未考虑荷载的影响,预测准确性较低。

4.1.2 探索和成果

CBMA 团队在总结现有模型^[85]的基础上,建立了首个冻融耐久性与寿命预测模型数据库,以及基于残余应变的荷载-冻融耦合作用下混凝土寿命预测模型(FCB 模型)^[21]。

将环境因素进行统一的力学等效转化,冻结过程相当于拉应力加载过程,每个循环应变值达到最大时所受到的冻融作用力为最大冻融作用力。以工程中可连续监测的应变为特征参数,以残余应变来反映耦合作用下混凝土的损伤与破坏,以第二阶段残余应变最大值 ε_m 作为服役寿命极限状态,弯曲荷载耦合作用下的混凝土构件 ε_m 取受拉区的 ε_{tm} 。通过受力平衡和力矩平衡,经推导并修正后得到荷载-冻融耦合作用下混凝土寿命预测 FCB 模型(式(1))。结合快速冻融循环次数与自然冻融次数的内在关系(式(2))^[94],可得出混凝土实际使用寿命 T 。

$$\frac{24}{13}k_{\sigma}k_{\varepsilon}k_{\zeta}k_u\left(\frac{\Delta\varepsilon_{tm}}{\Delta N}\right)_0\frac{N}{\varepsilon_{tm0}}=-\frac{9}{2}\ln 2\zeta_n-\frac{63}{4\zeta_n}+\frac{69}{8\zeta_n^2}-\frac{2}{\zeta_n^3}+13 \quad (1)$$

$$T=kN_F/M \quad (2)$$

式中,各参数物理意义及取值方法详见文献[21, 94]。模型考虑了荷载-冻融循环的耦合作用,以连续监测的应变为特征参数,预测结果更准确。

建立的 FCB 模型和方法在哈齐专线松花江特大桥项目、芜湖长江公路二桥项目等工程中获得验证。预测得出的荷载-冻融作用下松花江特大桥混凝土连续梁的使用寿命为 112 年,满足设计使用寿命 100 年;通过预测不同配合比的芜湖长江公路二桥节段梁、塔柱混凝土在荷载-冻融作用下的使用寿命,对施工用节段梁、塔柱混凝土配合比进行了优化设计。

4.2 荷载和氯盐耦合作用

4.2.1 难点和问题

针对氯盐侵蚀条件下混凝土结构耐久性设计和寿命

评价方法,国内外开展了大量研究。文献对氯盐侵蚀环境下的混凝土寿命预测模型进行了详细的分析和综述^[99-101]。受测试设备与方法的限制,荷载-氯盐侵蚀耦合作用下混凝土寿命预测模型与方法研究相对较少。荷载-氯盐侵蚀耦合作用下混凝土寿命预测模型还存在如下难点和问题:①寿命预测模型多未考虑外部荷载的影响;②多采用确定性方法计算服役寿命,没有考虑模型中各输入参量(环境因素参量和材料特性参量)的不确定性,预测结果准确性低。

4.2.2 探索和成果

CBMA 团队在前人研究^[99-106]的基础上,基于 Fick 第二定律,以耦合作用下的氯离子扩散系数为特征参数,建立了基于可靠度的荷载-氯盐侵蚀耦合作用下混凝土结构寿命预测模型(RSC 模型)(见式(3)~式(5))。

$$p_f=p\{C_{crit}-C(x=c,t)<0\}=\Phi(-\beta) \quad (3)$$

$$C(x,t)=C_0+(C_{x,\Delta x}-C_0)\left[1-\operatorname{erf}\frac{x-\Delta x}{2\sqrt{D_{app}t}}\right] \quad (4)$$

$$D_{app}(t)=k_T\cdot k_{RH}\cdot k_{test}\cdot k_L\cdot D_0\left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad (5)$$

式中各参数的物理意义及取值方法详见文献[67]。运用 RSC 模型进行寿命预测时,先利用研发的荷载-氯盐侵蚀耦合作用下混凝土耐久性测试设备与方法^[67, 70, 71]开展实验室试验得出 D_0 、 k_L 等参数,根据实际工程环境条件分析确定 k_T 、 k_{RH} 、 C_{crit} 等参数,由工程技术文件确定 c 、 C_0 等参数;再考虑各参数的概率特性,采用可靠度算法和 StruREL 软件,由式(3)计算出可靠度指标 β 和失效概率 p_f 随时间的演变曲线,对于给定可靠度指标 β_{target} 或失效概率 p_{target} ,可直接得出混凝土结构服役寿命 T 。

RSC 模型综合考虑了混凝土结构服役条件下影响氯离子传输的各种因素,如外部荷载、环境温度、湿度等,与混凝土结构实际服役条件一致。寿命预测方法采用了全概率方法和可靠度理论,消除了材料特性与环境参数的波动对寿命预测准确性的影响。该寿命预测方法在港珠澳大桥工程受压承台混凝土和受拉承台后浇孔混凝土中获得验证,验证结果与工程设计基本一致^[67]。

5 结 语

多因素下的混凝土耐久性评价方法与寿命预测方法的研究非常必要,研究成果能更加精准地评价服役混凝土耐久性、预测混凝土工程服役寿命,对我国混凝土工程安全可靠运行和国民经济建设具有重要意义。

通过发明荷载与典型服役环境下的混凝土耐久性测试设备与方法,建立荷载与典型服役环境下混凝土的耐

久性评价技术与寿命预测方法,能解决单一耐久性加速破坏试验无法准确反映实际服役混凝土耐久性的问题。为新建混凝土工程的配合比设计、制备与施工全过程提供指导,也可对现役混凝土工程的实际耐久性及安全服役年限进行评估与判断,并提出修复与维护建议,为提升混凝土工程的综合使用年限提供重要支持。这将大大减少因混凝土性能劣化而产生的建造及修复费用,为实现混凝土工程的绿色化、节能减排及可持续发展提供保障,可产生巨大的经济和社会效益。

现有的研究成果提供了荷载-氯盐、荷载-冻融、荷载-碳化耦合条件下较为全面及完善的检测设备和技术,在混凝土耐久性和服役寿命评价技术上完成了从单一因素到耦合多因素的跨越。但还存在一定的局限性,主要体现为:

(1) 服役环境和荷载类型存在一定的局限性。钢筋混凝土结构所处的实际服役环境非常复杂,还有硫酸盐侵蚀等其他服役环境因素;荷载类型方面,除了轴拉、轴压及弯曲等静态荷载外,在实际中还存在疲劳、冲击等动态荷载类型。今后的重点研究方向在于扩大环境因素和荷载类型,需要在逐步阐明耦合作用机理的基础上,开发不同环境因素与荷载作用下的混凝土耐久性测试设备和方法,探索耦合作用下的耐久性表征与评价参数。

(2) 碳化反应生成 CaCO_3 一定程度可填充裂纹缝,荷载作用又会导致裂纹的加速形成与扩展,二者同时作用下的混凝土破坏机理还值得进行更加深入的研究。

参考文献 References

- [1] The Cement Concrete Pavement Promotion Section of the Ministry of Transport (交通部水泥混凝土路面推广组). *Study on Cement Concrete Pavement* (水泥混凝土路面研究) [M]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [2] Gao Haiping (高海平). *Cement Concrete Pavement Repair Technology* (水泥混凝土路面修补技术) [M]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [3] Mehta P K. *Proceeding 2nd International Conference on Concrete Durability* [C]. America: American Concrete Institution, 1991: 1-31.
- [4] Mehta P K, Monteiro P J M. *Concrete Microstructure, Properties, and Materials* [M]. New York: The McGraw-Hill Companies, 2006 (3rd ed).
- [5] Yao Y, Wang Z, Wang L. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* [J], 2012, 1(1-2): 2-15.
- [6] Sun W, Zhang Y, Yan H. *Cement and Concrete Research* [J], 1999, 29: 1519-1523.
- [7] Fang Yonghao (方永浩), Yu Tao (余 韬), Lv Zhenglong (吕正龙). *Journal of the Chinese Ceramic Society* (硅酸盐学报) [J], 2012, 40(11): 1537-1548.
- [8] Sun W, Mu R, Luo X, et al. *Cement and Concrete Research* [J], 2002, 32(12): 1859-1864.
- [9] Mu R, Miao C, Luo X, et al. *Cement and Concrete Research* [J], 2002, 32(7): 1061-1066.
- [10] Wan X, Wittmann F H, Zhao T, et al. *Journal of Zhejiang University Science A* [J], 2013, 14(1): 71-78.
- [11] Castel A, Francois R, Arliguie G. *Cement and Concrete Research* [J], 1999, 29(4): 561-565.
- [12] Song G. *Cement and Concrete Research* [J], 2000, 30(11): 1723-1730.
- [13] Neville A M. *Properties of Concrete* [M], New York: Wiley, 1996: 844.
- [14] Wang Z, Zeng Q, Wang L, et al. *Construction and Building Materials* [J], 2016, 102: 872-883.
- [15] Wang Z, Zeng Q, Wang L, et al. *Journal of Materials in Civil Engineering* [J], 2014, 27(1): 04014109-1-04014109-8.
- [16] Wang Z, Zeng Q, Wang L, et al. *Journal of Materials Science* [J], 2014, 49(12): 4305-4314.
- [17] Wang Z, Zeng Q, Wang L, et al. *Construction and Building Materials* [J], 2014, 53: 40-47.
- [18] Wang Z, Zeng Q, Wu Y, et al. *Construction and Building Materials* [J], 2014, 62: 18-27.
- [19] Wang Z, Zeng Q, Wang L, et al. *Construction and Building Materials* [J], 2013, 44: 477-486.
- [20] Wang Zhendi (王振地). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2012.
- [21] Du Peng (杜 鹏). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2014.
- [22] Mitsuru S, Hiroshi I. *Cement and Concrete Research* [J], 1995, 25(4): 803-808.
- [23] Banthia N, Bhargava A. *ACI Materials Journal* [J], 2007, 104(1): 70-76.
- [24] Choiniska M, Khelidj A, Chatzigeorgiou G, et al. *Cement and Concrete Research* [J], 2007, 37: 79-88.
- [25] Yang Z, Weiss W J, Olek J. *Journal of Materials in Civil Engineering* [J], 2006, 18(3): 424-434.
- [26] Desmettre C, Charron J P. *Cement and Concrete Research* [J], 2012, 42(7): 945-952.
- [27] Yuan Y, Chi Y. *Structural Concrete* [J], 2014, 15: 191-201.
- [28] Kim D, Shimura K, Horiguchi T. *Journal of Advanced Concrete Technology* [J], 2010, 8: 27-34.
- [29] Hong Lei (洪 雷), Peng Chao (彭 超). *Journal of Building Materials* (建筑材料学报) [J], 2012, 15(2): 255-259.
- [30] Hong Lei (洪 雷), Wei Xingcai (危行财), Wang Minggang (汪明刚). *Journal of Building Materials* (建筑材料学报) [J], 2013, 16(1): 143-152.
- [31] Fang Yonghao (方永浩), Li Zhiqing (李志清), Zhang Yitao (张亦涛). *Journal of the Chinese Society* (硅酸盐学报) [J], 2005,

- 33 (10): 1281-1286.
- [32] Wang Zhongping(王中平), Wu Keru(吴科如), Ruan Shiguang(阮世光). *Journal of Building Materials* (建筑材料学报) [J], 2001, 4 (2): 127-131.
- [33] Hong Lei(洪雷), Cheng Wei(程伟), Wang Shumei(王淑梅). *Journal of Building Materials* (建筑材料学报) [J], 2012, 15 (6): 852-856.
- [34] Wang Zhen(王振), Wang Zhongping(王中平). *Port & Waterway Engineering* (水运工程) [J], 2011, 6 (454): 16-19.
- [35] Luo Xiaoyong(罗小勇), Zou Hongbo(邹洪波), Huang Suhui(黄素辉). *Industrial Architecture* (工业建筑) [J], 2012, 42 (9): 110-115.
- [36] Tian Li(田砾), Zhang Hongyuan(张洪源), Zhao Tiejun(赵铁军). *Journal of Building Structures* (建筑结构学报) [J], 2009(sup. 2), 328-332.
- [37] Sun Jicheng(孙继成), Yao Yan(姚燕), Wang Ling(王玲), et al. *Low Temperature Architecture Technology* (低温建筑技术) [J], 2011, 3: 1-3.
- [38] Zhang Junzhi(张俊芝), Wang Liangying(王梁英). *Journal of Natural Disasters* (自然灾害学报) [J], 2010, 19(3): 13-18.
- [39] Huang Suhui(黄素辉). *Sichuan Architecture* (四川建筑) [J], 2009, 29(6): 12.
- [40] Yuan Chengbin(袁承斌), Zhang Defeng(张德峰), Liu Rongui(刘荣桂), et al. *Journal of Hohai University(Natural Science Edition)* (河海大学学报(自然科学版)) [J], 2003, 31(1): 50-54.
- [41] Du Xiuli(杜修力), Jin Liu(金浏), Zhang Renbo(张仁波). *Journal of Building Materials* (建筑材料学报) [J], 2016, 19 (1): 65-71.
- [42] Wu J, Li H, Wang Z, et al. *Construction and Building Materials* [J], 2016, 112: 733-738.
- [43] Wang J, Basheer P A, Nanukuttan S V, et al. *Construction and Building Materials* [J], 2016, 108: 56-66.
- [44] Sugiyama T, Bremner T W, Holm T A. *Materials Journal* [J], 1996, 93(5): 443-450.
- [45] Hearn N, Lok G. *ACI Materials Journal* [J], 1998, 95 (6): 691-694.
- [46] Hearn N. *ACI Materials Journal* [J], 1999, 96 (2): 234-241.
- [47] Kermani A. *Building Research and Information* [J], 1991, 19(6): 360-360.
- [48] Bhargava A, Banthia N. *Experimental Techniques* [J], 2006, 30 (5): 28-31.
- [49] Banthia N, Biparva A, Mindess S. *Cement and Concrete Research* [J], 2005 (35): 1651-1655.
- [50] Jiang F, Wittmann F H, Zhao T. *Proceeding of the First Internal Conference on Performance-Based and Life-Cycle Structural Engineering* [C]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2012: 992-997.
- [51] Lim C C, Gowripalan N, Sirivivatnanon V. *Cement and Concrete Composites* [J], 2000 (22): 353-360.
- [52] Deng Hongwei(邓宏卫), Zeng Jingsheng(曾京生), Zheng Jun(郑俊), et al. *Architecture Technology* (低温建筑技术) [J], 2010, 10: 3-5.
- [53] Huang Pengfei(黄鹏飞). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2004.
- [54] Dai Zhengzheng(代征征), Zhang Peng(张鹏), Wang Yanru(王燕茹), et al. *Architecture Technology* (低温建筑技术) [J], 2017, 39 (11): 24-27.
- [55] Tian Lizong(田立宗), Lu Jingzhou(逯静洲), Zhu Kongfeng(朱孔峰), et al. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* (长江科学院院报) [J], 2018, 35(02): 140-144+150.
- [56] Guo Chen(郭宸). *Thesis for Master* (硕士论文) [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [57] Wang Zhendi(王阵地). *Thesis for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2010.
- [58] Wang L, Cao Y, Wang Z, et al. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition* [J], 2013, 28(4): 710-714.
- [59] He Shiqin(何世钦), Gong Jinxin(贡金鑫). *Journal of Building Materials* (建筑材料学报) [J], 2005, 8(2): 134-138.
- [60] Xing Feng(邢锋), Leng Faguang(冷发光), Feng Naiqian(冯乃谦), et al. *Concrete* (混凝土) [J], 2004(5): 3-8.
- [61] Shi Jinjie(施锦杰), Sun Wei(孙伟). *Journal of the Chinese Society* (硅酸盐学报) [J], 2010, 38(7): 1201-1208.
- [62] Yao Y, Wang L, Wittmann F H. *Publications on Durability of Reinforced Concrete Structures under Combined Mechanical Loads and Environmental Actions: An Annotated Bibliography* [M]. Freiburg: Aedificat Publishers, 2013.
- [63] Sun Wei(孙伟), Song Luguang(宋鲁光), Zuo Xiaobao(左晓宝), et al. China, CN101271103A [P]. 2008-05-16.
- [64] Liu Ling(刘玲), Wang Keliang(王可良), Xu Shangjie(许尚杰), et al. China, CN 203191259U [P]. 2013-09-11.
- [65] Zhao Tiejun(赵铁军), Jiang Fuxiang(姜福香), Wang Yutian(王玉田), et al. China, CN 102213660A [P]. 2011-10-12.
- [66] Wang L, Cao Y, Wang Z, et al. *Proceedings of the 14th International Congress on the Chemistry of Cement* [C]. Beijing: Chian, 2015.
- [67] Cao Yin(曹银). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2016.
- [68] Wang L, Yao Y, Wang Z, et al. *Proceedings of MSSCE* [C]. Denmark: RILEM Publications SARL, 2016.
- [69] Cao Y, Yao Y, Wang L, et al. *Proceedings of MSSCE* [C]. Denmark: RILEM Publications SARL, 2016.
- [70] Wang L, Yao Y, Wittmann F H, et al. *Materials and Structures* [J], 2017, 50(2): 123.
- [71] Yao Y, Wang L, Wittmann F H, et al. *Materials and Structures* [J], 2017, 50(2): 155.
- [72] Liu Liangliang(刘梁梁). *Thesis for Master* (硕士论文) [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2012.
- [73] Liu Xiaonan(刘晓楠). *Thesis for Master* (硕士论文) [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2010.
- [74] Song X, Zhao T, Tian L. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition* [J], 10, 25(6): 1061-1064.

- [75] Tang Guanbao(唐官保), Wang Ling(王 玲), Yao Yan(姚 燕). *Building Science*(建筑科学) [J], 2017(33s.): 32-35.
- [76] Shi Qinliang(施清亮). *Thesis for Master* (硕士论文) [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [77] Tian Hao(田 浩), Li Guoping(李国平), Liu Jie(刘 杰), et al. *Journal of Tongji University: Natural Science* (同济大学学报: 自然科学版) [J], 2010, 38(2): 200-204.
- [78] Jin Zuquan(金祖权), Sun Wei(孙 伟), Zhang Yunsheng(张云升), et al. *Journal of Building Materials*(建筑材料学报)[J], 2005, 8(2): 179-183.
- [79] Tu Yongming(涂永明), Lv Zhitao(吕志涛). *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*(东南大学学报(自然科学版)) [J], 2003, 33(5): 573-576.
- [80] Basheer P A M. *Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete* [C]. America: American Concrete Institution, 2000.
- [81] Wang Ling(王 玲), Tang Guanbao(唐官保), Zhang Ping(张 萍), et al. *Proceedings of the Symposium on Protective and Repair Materials and Application* [C]. Nanjing: 2015: 11.
- [82] Tang G, Yao Y, Wang L, et al. *The 9th International Symposium on Cement & Concrete ISCC2017* [C]. Wuhan: 2017.
- [83] Yao Y, Tang G, Wang L, et al. *Romanian Journal of Materials*[J], 2018, 48(1): 70-75.
- [84] De Belie N. TC 281-CCC: Carbonation of Concrete with Supplementary Cementitious Materials [EB/OL]. (2017-9-30) [2018-9-20]. Https://www.rilem.net/groupe/281-ccc-carbonation-of-concrete-with-supplementary-cementitious-materials-373.
- [85] Du Peng(杜 鹏), Yao Yan(姚 燕), Wang Ling(王 玲), et al. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*(长江科学院院报) [J], 2014, 31(04): 77-84.
- [86] Wu Q, Yu H, Chen X. *Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals* [C]. Beijing: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [87] Xiao Qianhui(肖前慧), Niu Ditao(牛荻涛), Zhu Wenpin(朱文凭). *Building Structure* (建筑结构)[J], 2011, 41(S2): 203-207.
- [88] Zhang Feng(张 峰), Li Shucai(李术才), Li Shoukai(李守凯). *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*(土木建筑与环境工程)[J], 2011, 33(1): 31-35.
- [89] Ning Zuojun(宁作君). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [90] Yu Xiaomin(于孝民), Ren Qingwen(任青文). *Journal of Hohai University(Natural Science Edition)*(河海大学学报(自然科学版)) [J], 2010, 38(1): 80-82.
- [91] Ababneh A N, Xi Y. *13th International Conference on Cold Regions Engineering* [C]. Orono, Maine, United States: American Society of Civil Engineers, 2006.
- [92] Yu Hongfa(余红发), Sun Wei(孙 伟), Ma Haiyan(麻海燕), et al. *Journal of Architectural Science and Engineering*(建筑科学与工程学报) [J], 2012, 29(1): 1-7.
- [93] Cho T. *Construction and Building Materials* [J], 2007, (21): 2031-2040.
- [94] Li Jinyu(李金玉), Deng Zhenggang(邓正刚), Cao Jianguo(曹建国), et al. *Concrete*(混凝土) [J], 2000, 12(9): 61-65.
- [95] Mu Ru(慕 儒). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Nanjing: Southeast University, 2000.
- [96] Guan Yugang(关宇刚), Sun Wei(孙 伟), Miao Changwen(缪昌文). *Journal of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐学报)[J], 2001, 29(6): 509-513.
- [97] Guan Yugang(关宇刚), Sun Wei(孙 伟), Miao Changwen(缪昌文). *Journal of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐学报)[J], 2001, 29(6): 514-519.
- [98] Liu Ronggui(刘荣桂), Fu Kai(付 凯), Yan Tingcheng(颜庭成), et al. *Journal of Building Structures*(建筑结构学报) [J], 2009, 30(3): 79-86.
- [99] Nilsson L O. WP4-Report-Modelling of Chloride Ingress[R]. The European Union-Growth 2000, Project GRD1-2002-71808, 2005.
- [100] Tang L, Nilsson L O, Basheer P A M. *Resistance of Concrete to Chloride Ingress*[M]. London: Taylor and Francis, 2012.
- [101] Wang Licheng(王立成). *Waterway Engineering*(水运工程)[J], 2004(04): 5-9.
- [102] Shi Bo(史 波). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [103] Tang L. *Thesis for Doctorate*[D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 1996.
- [104] Marchand J, Samson E, Maltais Y, et al. *Materials and Structures*[J], 2002, 35(10): 623-631.
- [105] Fib. *Model Code for Service Life Design*[M]. Switzerland: International Federation for Structural Concrete(FIB), 2006.
- [106] Fib. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*[M]. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.

(编辑 吴 锐)