

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.093



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 内养护作用下混凝土耐久性研究进展

罗大明, 李凡, 牛荻涛

(西安建筑科技大学 土木工程学院; 绿色建筑全国重点实验室, 西安 710055)

**摘要:** 混凝土具有优良的力学性能和耐久性能, 但常规养护方法难以解决其早龄期自收缩和开裂问题。内养护技术能有效改善混凝土内部湿度场, 缓解其收缩开裂现象, 提高耐久性。分析混凝土内养护机理、内养护作用对混凝土耐久性的影响发现: 将预湿轻骨料或超强吸水聚合物掺入混凝土中能在骨料周围湿度降低时释放水分, 填充混凝土内部的非饱和孔隙, 增加孔隙溶液的弯月面半径, 从而达到内养护的目的; 内养护作用不仅能促进骨料周围水泥水化, 提高骨料-浆体界面过渡区的密实度, 还能缓解混凝土因自干燥产生的裂缝, 提高其抗裂性能; 同时, 该作用能阻断侵蚀介质的传输路径, 改善混凝土的渗透性, 提升其抵御离子、气体等介质侵蚀的能力; 内养护材料释水后, 会在混凝土内部形成大量孔隙, 这些孔隙能释放孔隙溶液结冰产生的膨胀压力, 从而提高混凝土的抗冻性; 此外, 轻骨料的孔隙为膨胀凝胶的沉积提供空间, 进而减少碱-骨料反应的发生。

**关键词:** 内养护; 界面过渡区; 侵蚀介质; 环境作用; 抗裂性能; 混凝土耐久性

中图分类号: TU528.064

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2025)06-0193-14

## Research progress on durability of concrete under influence of internal curing

LUO Daming, LI Fan, NIU Ditao

(School of Civil Engineering; State Key Laboratory of Green Building, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** Concrete has exceptional mechanical properties and durability. Nevertheless, conventional curing methods are ineffective in addressing the issues of autogenous shrinkage and cracking during its early stages. Internal curing technology can effectively enhance the internal moisture distribution of concrete, mitigate shrinkage cracking, and improve its durability. This paper investigates the internal curing mechanism of concrete and analyzes its influence on the durability of concrete. Incorporating pre-wetted lightweight aggregates or super-absorbent polymers into concrete releases water, as the moisture surrounding the aggregates decreases. This process fills the unsaturated pores in the concrete and increases the meniscus radius of the pore solution, thereby achieving internal curing. Internal curing promotes cement hydration around the aggregates, improves

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(52278217); 陕西省教育厅青年创新团队建设科研计划项目(21JP059)

作者简介: 罗大明(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事混凝土结构耐久性研究, E-mail: dmluo@xauat.edu.cn。

牛荻涛(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: niuditao@163.com。

Received: 2023-05-10

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52278217); Youth Innovation Team Building Project of Shaanxi Provincial Department of Education (No. 21JP059)

**Author brief:** LUO Daming (1986-), PhD, associate professor, main research interest: durability of concrete structures, E-mail: dmluo@xauat.edu.cn.

NIU Ditao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: niuditao@163.com.

the compactness of the interfacial transition zone, alleviates concrete cracking caused by self-desiccation, and enhances cracking resistance. Moreover, it obstructs the transmission path of corrosive media, improves concrete permeability, and enhances corrosion resistance against ions, gases, and other corrosive agents. After water release, the internal curing materials create a substantial number of pores within the concrete. These pores aid in releasing the expansion pressure resulting from the freezing of the concrete pore solution, thereby improving frost resistance. Additionally, the pores of lightweight aggregates provide space for the deposition of expansive gel, thereby reducing the occurrence of alkali-aggregate reaction.

**Keywords:** internal curing; interfacial transition zone; corrosive media; environmental effects; cracking resistance; concrete durability

混凝土强度高、尺寸稳定性好,且具备优良的抗渗性与耐久性,造价相对低廉,因此在现代土木工程结构中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。随着现代建筑朝着大跨度、超高层、重负载的方向发展,高性能混凝土应运而生。然而,高性能混凝土通常采用较低水胶比,并掺入大量掺合料,虽降低了混凝土的传输性能<sup>[2]</sup>,但也使其内部因自干燥产生自收缩,进而加剧早龄期混凝土的开裂<sup>[3]</sup>,显著影响其适用性。

为了减小高性能混凝土早期自收缩和开裂带来的影响,学者们尝试了各种养护方法<sup>[4-5]</sup>。然而,受混凝土构件尺寸、形状、浇筑位置的限制,外界水分难以向其内部迁移,常规养护存在一定局限性。因此,对混凝土进行养护时,要求养护方法既能降低其早期水分散失、提高内部相对湿度,又能避开表层致密混凝土对水分迁移的阻碍,在内部最需要水分的区域及时补水养护。通过向混凝土内部“引水”,进行“内养护”,以提高其内部相对湿度、促进水泥水化进程,从而延缓混凝土早期开裂、提升混凝土耐久性<sup>[6]</sup>。

2010年,美国混凝土学会(ACI)在其指南中将“内养护”定义为:在混凝土中引入一种组分作为养护剂,如预湿轻骨料(lightweight aggregates, LWA)或超强吸水聚合物(superabsorbent polymers, SAP),该组分均匀分散在混凝土内部,起到“内部蓄水池”的作用,可按照水泥水化过程中对水的需求释放水分,弥补因蒸发或自干燥损失的水分,支持水化反应继续进行。该定义清晰简明地指出内养护的两个主要目标:最大限度提升水泥水化程度,减少自干燥及由此引发的早龄期开裂。因此,作为降低混凝土开裂风险、提高其密实性的新技术,内养护对提升混凝土耐久性、延长混凝土结构服役寿命具有重要意义。现有研究多集中于内养护机理<sup>[7]</sup>、不同影响因素下内养护剂的作用效果<sup>[8-9]</sup>、内养护引发的水泥基材料微观结构变化<sup>[10-11]</sup>以及内养护对混凝土力学性能的影响<sup>[12]</sup>等方面。然而,内养护混凝土的应用尚处于起步阶段,笔者将系统阐

述内养护作用机理,并从抗裂性能、骨料界面过渡区、透水性能、抗氯离子侵蚀性能、气体传输性能、抗冻性能及碱-骨料反应等方面,综述内养护技术对混凝土耐久性的影响。

## 1 内养护原理

水泥水化产物的固相体积通常小于水化前反应物的总体积,因而水化反应常伴随着化学收缩。在终凝前,混凝土的化学收缩宏观表现为其三维物理尺寸减小;在混凝土终凝并初步产生强度后,因缺乏额外的水化用水供给,化学收缩会引发自干燥现象,并在混凝土内部形成大量非饱和孔隙。非饱和孔隙中溶液的弯月面会产生毛细管负压,该压力可由 Young's 方程描述<sup>[13]</sup>。

$$\sigma = (-2\gamma \cos \theta) / r \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为毛细管压力或应力,Pa; $\gamma$ 为孔隙溶液的表面张力,N/m; $\theta$ 为接触角,rad; $r$ 为毛细孔半径,m。

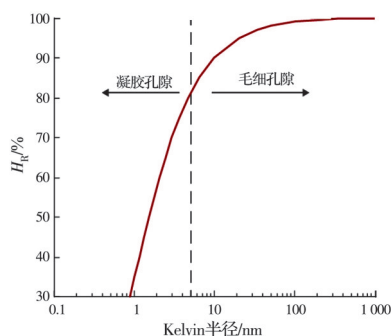
由式(1)可知,随着水泥水化反应的持续进行,混凝土自干燥现象加剧,孔隙负压增加,内部相对湿度降低;平衡相对湿度与毛细孔隙半径之间的关系可用 Kelvin-Laplace 方程表示<sup>[14]</sup>。

$$\ln(H_R) = \frac{2\gamma V_m}{r_m RT} \quad (2)$$

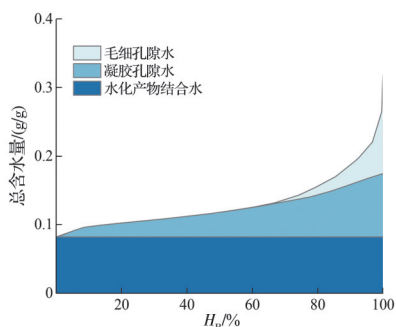
式中: $H_R$ 为相对湿度,%; $V_m$ 为水的摩尔体积,m<sup>3</sup>/mol; $r_m$ 为孔隙溶液弯月面平均曲率半径,m; $R$ 为理想气体常数,取8.314 3 J/(mol·K); $T$ 为绝对温度,K。

式(2)可用图1(a)表示,混凝土中的自由水主要以毛细孔隙水(孔径>10 nm)和凝胶孔隙水(孔径<10 nm)两种形式存在。不同相对湿度下混凝土孔隙含水量如图1(b)所示:随着混凝土内部相对湿度降低,水分先从孔径较大的孔隙中蒸发;当相对湿度从100%降到75%时,大部分毛细孔隙水及部分凝胶孔隙水会损失;当相对湿度低于75%时,水分蒸发以凝胶孔隙水为主,而水化产物结合水的含量在环境相对湿度变化时基本保持不变。总体而言,环境相对湿度越低,混凝土总含水量越少,非

饱和孔隙的孔径越小,混凝土孔隙负压越高,越容易诱发早期开裂。从式(2)还可以得出,毛细管负压与孔隙溶液的表面张力成正比,与非饱和孔隙的最大尺寸成反比。因此,减小毛细管负压、缓解混凝土开裂有两种可行途径:一是通过减缩剂降低孔隙溶液的表面张力;二是向混凝土内部“引水”,将水分填充到非饱和孔隙中,增大非饱和孔隙内弯月面的曲率半径,即“内养护”。



(a) 相对湿度与水泥浆体孔径的关系



(b) 不同相对湿度下混凝土总含水量

图1 相对湿度与混凝土孔隙水的关系<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Relationship between relative humidity and moisture content of concrete pores<sup>[15]</sup>

混凝土中内养护材料的掺量决定了额外引水量,也在一定程度上决定了水泥浆体处于较高饱和度的时间。高饱和度的维持不仅有利于提高水泥的水化程度和火山灰反应程度,还可有效减小引起早龄期混凝土开裂的自应力和自应变。内养护材料掺量过多可能使混凝土孔隙率增大、强度降低;掺量不足或在混凝土拌和物中分布不均,则有可能导致“养护不足”或局部“过养护”。罗大明等<sup>[16]</sup>研究了不同湿度养护环境下轻骨料的内养护效率,结果如图2所示。在内养护不足且外界湿度较低时,随着混凝土水化程度的增加,孔隙水含量减少、孔隙负压增大;孔隙水的耗尽将进一步导致更低的内部相对湿度和更大的内应力<sup>[17]</sup>,此时混凝土对内养护材料中的水分需求更为迫切,使得内养护材料具有更高的释水率和内养护效率。

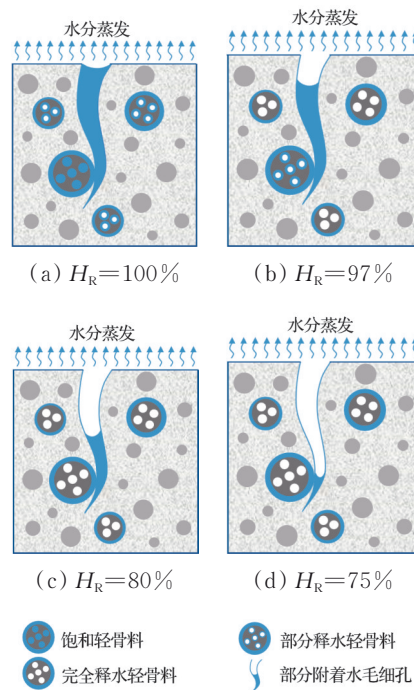


图2 不同湿度环境下轻骨料的内养护效果<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Internal curing effect of lightweight aggregate under different humidity environments<sup>[17]</sup>

## 2 内养护技术的实现

Klieger<sup>[18]</sup>于1957年首次在其发表的论文中提及轻骨料的内养护作用。直到1991年,内养护的概念才由 Philleo<sup>[19]</sup>正式明确,该概念可用图3示意:在低水胶比混凝土中,外界养护水仅能从养护面向内渗透几毫米,而内养护可使养护水在混凝土整个三维结构中均匀分布。20世纪90年代中后期,德国<sup>[20]</sup>、荷兰<sup>[21]</sup>、以色列<sup>[22]</sup>等国家的多个研究团队沿着 Philleo 的研究思路,开展了轻骨料内养护作用的相关研究。随后几年,越来越多的内养护蓄水材料被应用于混凝土中,如超强吸水聚合物<sup>[23-25]</sup>、预湿植物纤维<sup>[26]</sup>等。

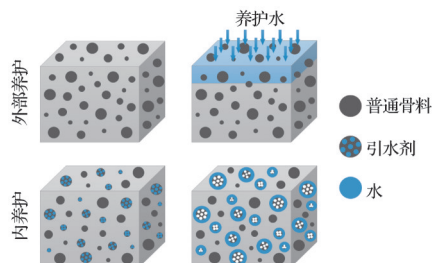


图3 外部养护与内养护示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of external curing and internal curing<sup>[20]</sup>

### 2.1 预湿轻骨料内养护

轻骨料混凝土具有轻质、多孔、保温隔热性好、便于运输及工程综合造价低等优点<sup>[27-28]</sup>,如图4(a)

所示。用预湿轻骨料替换普通骨料拌制混凝土时,其预湿后的“返水”作用能对骨料-浆体界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)的水泥浆体进行“内养护”,调节轻骨料周围浆体的局部水灰比,提高界面过渡区的致密程度<sup>[29]</sup>,切断毛细管通道,阻断离子与流体的传输路径<sup>[30]</sup>,降低混凝土的孔隙率,使骨料周围水泥浆体结构更密实、微裂缝更少。因此,轻骨料的内养护作用能改善混凝土的水化进程及骨料界面过渡区结构,提升混凝土的抗裂能力和耐久性能<sup>[6, 23-24]</sup>。

## 2.2 超强吸水聚合物内养护

超强吸水聚合物具有由大量羟基、羧基等亲水基团交联形成的三维网络结构,在吸收高达其干重数千倍的水或溶液后膨胀形成水凝胶,如图 4(b)、(c)所示。混凝土孔隙中存在高浓度的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液,促使 SAP 凝胶在内外渗透压作用下释放水分,提高混凝土内部相对湿度,推动水泥水化持续进行,缓解早龄期混凝土内部的自干燥现象,从而实现内养护目的。



(a) 轻骨料表现形态



(b) SAP 吸水前



(c) SAP 吸水后

图 4 轻骨料表现形态与 SAP 吸水前后形态

Fig. 4 Appearance of light aggregate and SAP before and after water absorption

## 2.3 预湿植物纤维内养护

纤维凭借其优异的物理力学性能,被用作水泥基复合材料的增强组分,能显著提高混凝土的延展性、抗拉强度、韧性等力学性能<sup>[31]</sup>及抗震性能<sup>[32]</sup>。除此之外,大多数植物纤维(如剑麻、红麻、黄麻等)内部具有纵向多孔内腔,这些管腔可通过毛细作用吸收并储存大量水分,并在周围环境相对湿度较低时释放<sup>[33]</sup>。研究发现,预湿植物纤维吸收的水分可以供给水泥浆体,这些额外供应的水分补偿了胶凝材料自干燥引起的水分损失,减少了混凝土的自收

缩<sup>[34-36]</sup>。虽然预湿植物纤维已被证实可用作水泥复合材料的内养护组分<sup>[37]</sup>,但目前关于内养护混凝土的研究仍主要集中于轻骨料和 SAP 方面。

## 3 内养护效率影响因素

### 3.1 理论引水量

Trtik 等<sup>[38]</sup>认为,内养护的效率主要取决于三方面:内养护材料何时释水、能释出多少水以及释出水在水泥浆体中的传输距离。若内养护材料能在混凝土水化过程中释放出足够水分,并输送至需要的地方,就能实现较好的内养护效果。为使混凝土中的胶凝材料尽可能水化,同时减小混凝土自干燥的影响,混凝土配制过程中需保证合适的内养护引水量。近年来,涌现了多种内养护引水量计算方法,其中以 Bentz & Snyder 方法和 Jensen & Hansen 方法较为主流。

1) Bentz & Snyder 方法。Bentz 等<sup>[39]</sup>提出一种确定预湿轻骨料体积的方法。该方法假设水分不会通过蒸发等方式散失到周围环境中,且由预湿轻骨料释放的水可确保水泥完全水化,并填充由化学收缩产生的孔隙体积;内养护需水量可通过预期化学收缩量、内养护材料的吸释水能力及骨料饱和度进行定量计算<sup>[40]</sup>。该方法可由方程式(3)描述。

$$C_f \times C_s \times \alpha_{\max} = S \times \varphi_{LWA} \times M_{LWA} \quad (3)$$

$$\text{即 } M_{LWA} = \frac{C_f \times C_s \times \alpha_{\max}}{S \times \varphi_{LWA}} \quad (4)$$

式中:  $C_f$  为混凝土中水泥用量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_s$  为水泥完全水化时的化学收缩值, %;  $\alpha_{\max}$  为最大水化程度期望值,当水胶比为 0.36 或更高时取 1, 低于 0.36 时可用  $R_{w/c}/0.36$  进行估算,  $R_{w/c}$  为水与水泥的质量比;  $S$  为轻骨料的饱水程度期望值,为  $\varphi_{LWA}$  的函数;  $\varphi_{LWA}$  为轻骨料 24 h 的吸水率, %;  $M_{LWA}$  为单位体积混凝土中干燥轻骨料的用量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。对于内养护材料的吸释水能力  $\varphi_{LWA}$ , 可通过测量从预湿条件到相对湿度为 93%~97% 条件下轻骨料的释水能力来衡量<sup>[40]</sup>, 以确保预湿轻骨料中的水在高相对湿度条件下可以顺利释放。

式(4)右边的分子可用各胶凝材料组分的需水量总和代替(例如  $i=1, 2, 3$  代表水泥、粉煤灰和矿渣), 如式(5)所示。

$$W_d = \sum_i C_i^c \cdot CS^i \cdot \alpha_{\max}^i \quad (5)$$

理论上,该方法可能高估内养护需水总量,因其考虑了终凝之前的体积变化<sup>[41]</sup>,但这种方法的优势在于简单易用。

2) Jensen & Hansen 方法。20 世纪 40 年代, Powers<sup>[42]</sup>基于硅酸盐水泥的水化过程,提出了硬化

水泥浆体的相分布模型。Jensen 和 Hansen 以此为基础,结合试验论证,给出了内养护理论引水量的计算模型<sup>[23]</sup>,如式(6)所示。

$$R_{w/c,e} = \begin{cases} 0.18 \times R_{w/c}, R_{w/c} < 0.36 \\ 0.42 - R_{w/c}, 0.36 \leq R_{w/c} \leq 0.42 \\ 0, R_{w/c} > 0.42 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $R_{w/c,e}$ 为内养护材料需提供的额外引水总量,表示为水与水泥的质量比。该方法不需要提供填充化学收缩产生的全部孔隙体积所需的水,仅需提供水泥水化所需的水。

### 3.2 材料的吸释水能力

为了充分发挥内养护效果,内养护材料必须具有足够的释水能力。Castro 等<sup>[43]</sup>研究了轻骨料浸泡 48 h 的吸水特性,如图 5(a)所示,当吸水时间小于 6 h 时,轻骨料含水量急剧上升,式(3)中的  $S$  可通过式(7)估算。

$$S = t^A, 0 \leq t \leq 2 \text{ d} \quad (7)$$

式中: $A$ 为拟合常数; $t$ 为时间, $d$ 。

不同种类养护材料的释水能力不同,与其孔隙

结构和亲水能力有关。Pour-Ghaz 等<sup>[44]</sup>利用压力板法和重力解吸附法,测试了轻骨料在不同相对湿度下的释水能力发现,随着相对湿度降低,轻骨料含水率急剧下降。当相对湿度为 99.9% 时,内养护材料的水分释放了约 40%;当相对湿度为 98.9% 时,水分释放了约 70%,如图 5(b)所示。轻骨料的释水能力可用式(8)描述。

$$\mu = \frac{a + cH_R}{1 + bH_R}, 0.3 \leq H_R \leq 1.0 \quad (8)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为拟合常数; $\mu$ 为归一化含水量, $0 \leq \mu \leq 1.0$ 。

与轻骨料不同,SAP 可在短时间内吸收较多水分。Montanari 等<sup>[45]</sup>通过测试 SAP 的质量变化,得到其在纯水中的吸水和释水能力曲线,如图 5(c)、(d)所示。由图 5 可知,SAP 浸泡前 30 min 的吸水量可达 210 g/g,浸泡 60 min 的吸水量达 230 g/g,随后逐渐趋于稳定。SAP 的释水能力与轻骨料类似:当环境相对湿度从 100% 降至 98% 时,SAP 的水分可释放近 80%。这说明 SAP 在较高相对湿度条件下仍有较好的释水能力,可对混凝土进行充分内养护。

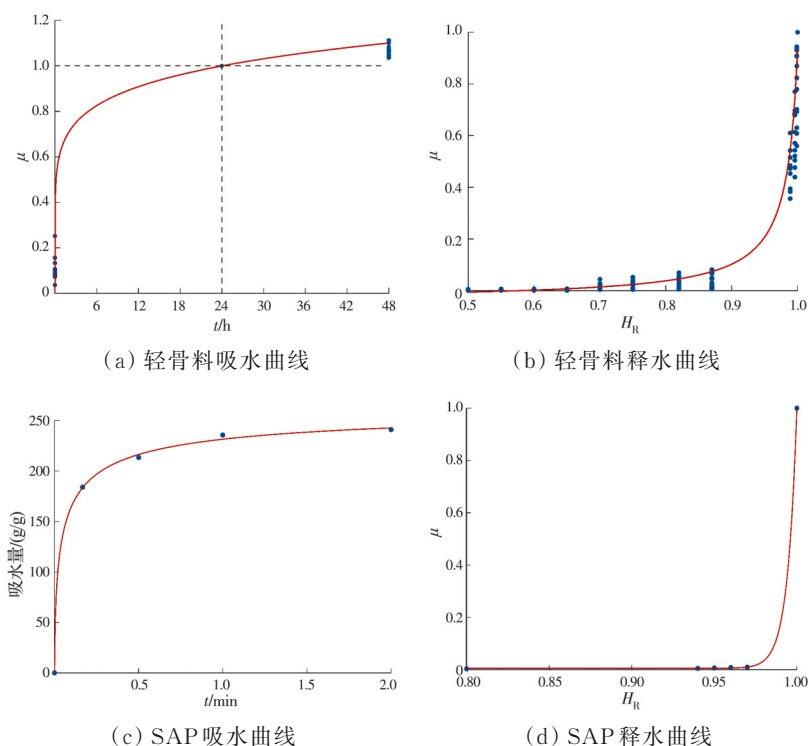


图5 轻骨料与SAP吸-释水能力<sup>[43-45]</sup>

Fig.5 Water absorption - desorption capacity of lightweight aggregate and SAP<sup>[43-45]</sup>

### 3.3 内养水的传输距离

为达到理想的内养护效果,除需有充足的内部养护水外,还需确保其具备足够的传输距离。理想的内养护效果要求:内养护水在水泥浆体相对湿度下降时能顺利释放,并可从“蓄水池”传输到自干燥

胶凝材料的所有区域。Bentz 等<sup>[39]</sup>为确定混凝土中受内养护作用的水泥浆体体积,采用数值模拟建立了三维混凝土微观模型,进而确定了内养护水在水泥浆体中的传输距离;研究发现,对于致密的高性能混凝土,该距离最大为 0.2 mm。Akçay 等<sup>[46]</sup>通过

对内养护混凝土断面图像的分析,发现内养护水在水泥浆体中的最大传输距离为 1 mm。Bentz 等<sup>[47]</sup>根据内养护材料和水泥浆体的孔隙大小,计算出不同水化龄期下内养护水的传输距离,结果如表 1 所示。内养护水在混凝土中的传输距离依赖于水泥浆体孔隙结构的变化。随着水化反应的进行,水泥浆体孔隙结构趋于致密,可供水分传输的路径逐渐减少,内养护作用范围随之缩小。当内养护材料确定时,水泥浆体孔隙结构与水胶比、水泥细度、矿物掺合料等因素密切相关:较低的水胶比、较高的水泥细度以及活性矿物掺合料的掺入,会使混凝土形成更致密的孔隙结构,降低孔隙连通度,阻断水分在混凝土内部的传输路径,进而导致内养护水传输距离更小。Zhutovsky 等<sup>[48]</sup>研究了水胶比为 0.33、0.25 的硅灰混凝土中内养护水的传输距离,结果表明:水分传输距离随水胶比减小而缩短,硅灰的加入使水分传输距离明显缩短。

表 1 不同水化程度下内养护水的传输距离<sup>[48]</sup>  
Table 1 Transport distance of internal curing water at different hydration degrees<sup>[48]</sup>

水化程度	传输距离/mm
早期(i.e., <1 d)	20
中期(i.e., 1~3 d)	5
后期(i.e., 3~28 d)	1
成熟期(i.e., >28 d)	0.25

水泥浆体中水分的传输过程常通过 X 射线或中子断层扫描直接观测,或通过自收缩率测试、方程分析和微观结构模型间接表征<sup>[9, 49]</sup>。表 2 列出了上述技术观测与表征得到的内养护水传输距离,可见不同内养护剂对应的养护水分传输距离略有差异,通常在 0.06~4 mm 之间。

表 2 不同内养护材料中内养护水的传输距离<sup>[9, 49]</sup>  
Table 2 Transport distance of internal curing water in different internal curing materials

内养护材料	初始水胶比	观测方法	传输距离/mm
膨胀页岩	0.30	X 射线	2
浮石	0.30		4
膨胀页岩	0.23	中子断层扫描	3~8
浮石、珍珠岩	0.33	自收缩	0.1~3
SAP	0.5	方程分析	0.06
浮石	0.33	微观结构模型	4

3.4 内养护材料的分布

由于内养护水在混凝土中的传输距离有限,为达到预期养护效果,需考虑混凝土中内养护水源的分布情况,即内养护材料的合适尺寸、分布位置等<sup>[41]</sup>。

为最大程度地减少混凝土自收缩和最低程度影响其性能,Zhutovsky 等<sup>[50]</sup>确定了最佳轻骨料类型(包括粒径、孔隙率等)及最佳掺量,并采用浆体-骨料邻近度(paste-aggregate proximity)描述轻骨料中水分迁移至周围水泥浆体的最短有效距离。结果表明,选用粒径较小且含有较多独立孔隙的轻骨料,能最大程度缓解早龄期混凝土的自收缩。这与 Bentz 等<sup>[39]</sup>的研究结论一致,即内养护材料粒径越小、分布越均匀、比表面积越大,其养护效率越高。

4 混凝土内养护对其耐久性能的影响

4.1 混凝土内养护对其抗裂性的影响

内养护能缓解混凝土因自干燥产生的裂缝,使混凝土具有一定的自愈合能力,进而提高其抗裂性能。高水胶比可为混凝土裂缝的自愈合提供有利条件,而对于低水胶比混凝土,通过添加内养护组分改善内部湿度水平,是一种缓解开裂的有效方法<sup>[51]</sup>。李北星等<sup>[52]</sup>、陈德鹏等<sup>[53]</sup>研究了预湿轻骨料混凝土的物理力学性能及内部相对湿度,结果均表明轻骨料的掺入能有效抑制混凝土的早期开裂。内养护水平也会影响混凝土的干燥收缩性能,Akca 等<sup>[54]</sup>研究了不同轻骨料替代率和粒径下内养护混凝土的自收缩性能,结果表明:当替代率为 10%、20% 和 30% 时,轻骨料粒径为 4~8 mm 的混凝土 28 d 自收缩率分别降低 11%、32% 和 65%;轻骨料粒径为 2~4 mm 的混凝土 28 d 自收缩率分别降低 24%、47% 和 92%,如图 6 所示。

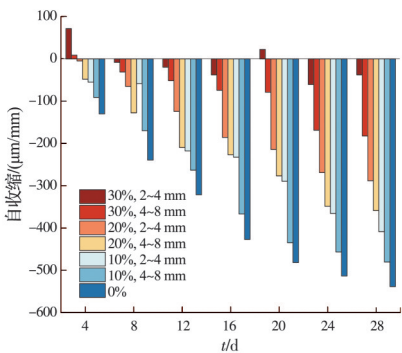


图 6 不同轻骨料替代率和粒径下内养护混凝土的自收缩性能<sup>[54]</sup>

Fig. 6 Autogenous shrinkage performance of internal curing concrete with different replacement ratios and particle sizes of lightweight aggregate<sup>[54]</sup>

采用 SAP 作为内养护组分也会增加混凝土内部的含湿量<sup>[55]</sup>。Klemm 等<sup>[56]</sup>研究认为,SAP 对混凝土力学性能的影响主要取决于其类型与吸释水能力:具有高吸水能力的 SAP 会使混凝土抗压强度增加,而对抗弯强度没有类似影响;低吸水能力的

SAP对混凝土抗压强度与抗弯强度的影响均较小。朱长华等<sup>[57]</sup>研究了不同种类、粒径SAP的吸水特性,并通过非接触式收缩法和圆环限制开裂法,探讨了SAP内养护对混凝土早期变形及抗裂性能的影响。结果表明,用于配制内养护混凝土的SAP应具备与碱性环境相容性好、吸水速率快和吸水倍率适宜的特点;优选的SAP作为内养护组分掺入混凝土后,能有效缓解混凝土的自收缩和干燥收缩,提高其抗裂性能。

#### 4.2 混凝土内养护对其界面过渡区的影响

混凝土的耐久性影响因素十分复杂,除环境与荷载作用外,混凝土材料自身的渗透性也是决定其耐久性劣化进程的主要因素之一。混凝土骨料、水泥浆体及二者之间的界面过渡区,均对其渗透性能有重要影响<sup>[54]</sup>。对于普通混凝土,其内部存在泌水现象,骨料表面因边壁效应积聚部分水分,导致骨料表面附近区域浆体的孔隙率高于基体部分<sup>[58]</sup>。与普通骨料不同,轻骨料具有多孔表面结构,与水泥浆体之间存在咬合作用,如图7所示。由图7可见,

普通骨料的界面过渡区清晰,而轻骨料的界面过渡区则相对致密,水泥浆体与骨料紧密咬合,无明显分界线。研究表明<sup>[59]</sup>,以SAP作为内养护组分的混凝土,SAP失水塌陷会导致混凝土内部出现一定数量的不规则孔隙,但释放出的水分为混凝土进一步水化提供了持续的水分供应,从而提升了混凝土的密实性;此外,在塌陷的SAP结构和孔壁之间会生成大量钙矾石晶体,也在一定程度上填充了SAP失水塌陷形成的孔隙,如图8所示。

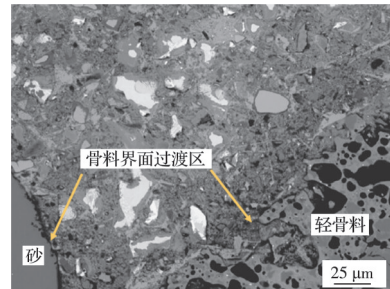
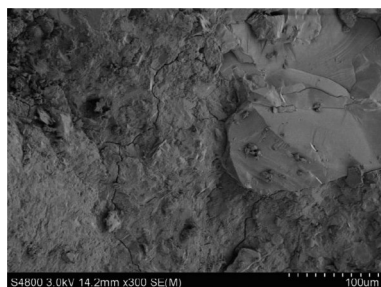
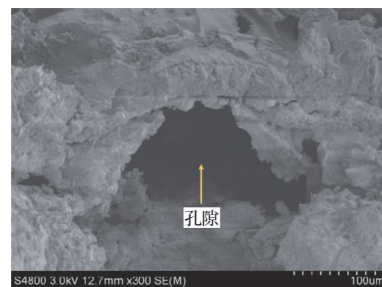


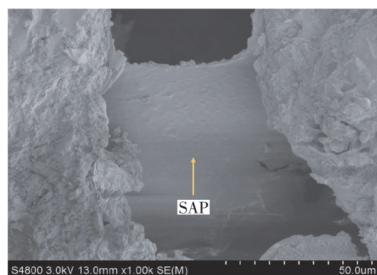
图7 普通骨料和轻骨料周围浆体的1200倍率图像<sup>[60]</sup>  
Fig. 7 1200× images of the interfacial transition zones around ordinary aggregate and lightweight aggregate<sup>[60]</sup>



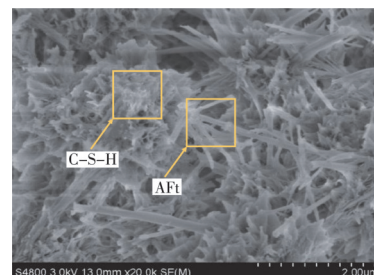
(a) 不掺SAP(300×)



(b) 掺SAP(300×)



(c) 掺SAP(1000×)



(d) 掺SAP(2000×)

图8 掺SAP水泥浆体的微观形貌<sup>[59]</sup>

Fig. 8 Microstructure of SAP-added cement paste<sup>[59]</sup>

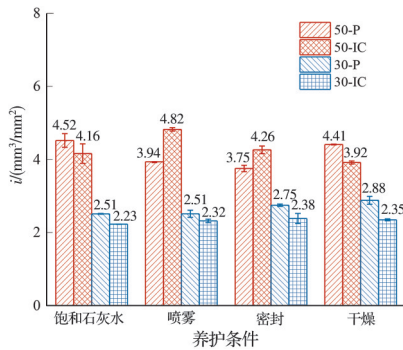
#### 4.3 混凝土内养护对其透水性的影响

水是水泥水化的必要条件,也是导致水泥基材料及结构耐久性破坏的重要因素。骨料的含量与性质对混凝土抗渗性有较大影响:轻骨料混凝土的吸水性和透水性低于28 d强度相同的普通混凝土,且随着轻骨料含量的增加,混凝土透水性逐渐降低<sup>[61]</sup>。轻骨料的吸水能力与其内养护效率直接相关,一般来说,其吸水能力及预湿程度越高,返水能

力越强,对轻骨料混凝土后期抗渗性的改善效果也越明显。低吸水性轻骨料通常具有致密的外壳或内核<sup>[62]</sup>,孔径更小,孔隙连通程度低,因此,作为内养护材料时,需要更长的预处理时间,并且对同强度等级混凝土的抗渗性提升效果有限。与之相比,高吸水率轻骨料对提高混凝土抗渗性更有利;其中,半干陶粒的轻质混凝土渗透性低于高预湿陶粒的混凝土,这种差异性受浆体密实性、陶粒孔隙率及

渗透性测试方法的综合影响。然而,对于高强混凝土而言,无论粗骨料是否为轻质,水泥石均起着主导作用<sup>[63]</sup>。

水胶比的变化直接影响混凝土的孔隙结构,继而影响其抗渗性。通常,相同水胶比条件下,轻骨料混凝土的抗渗性优于普通混凝土,经合理预湿的轻骨料混凝土抗渗性更优。Chia 等<sup>[63]</sup>的研究表明,相同体积配合比的轻骨料混凝土渗水高度比普通混凝土低 2/3 左右。孙德强等<sup>[64]</sup>通过对比普通混凝土与轻骨料混凝土的渗水性和氯离子渗透性发现,当混凝土强度等级相同时,无论介质是水还是氯离子,采用高强或普通陶粒制备的轻质混凝土渗透性均明显低于普通混凝土。罗大明等<sup>[65]</sup>的研究也表明,预湿轻骨料的掺入显著改善了低水胶比混凝土的抗侵蚀能力;如图 9 所示,内养护作用使低水胶比试件的总吸水量降低了 7.7%~18.6%。



注:30、50 分别表示水胶比为 0.3、0.5;P、IC 分别表示普通混凝土和内养护混凝土。

图 9 普通混凝土与内养护混凝土总吸水量<sup>[65]</sup>

Fig. 9 Total water absorption of ordinary concrete and internal curing concrete<sup>[65]</sup>

#### 4.4 混凝土内养护对其抗氯离子侵蚀能力的影响

混凝土的抗氯离子侵蚀能力不仅取决于其孔隙率,还取决于材料内部孔隙的连通度(connectivity)。对于普通混凝土而言,疏松的骨料界面过渡区为离子传输提供了良好通道。Otsuki 等<sup>[66]</sup>认为,当骨料粒径大于 5 mm 时,混凝土界面过渡区的氯离子扩散系数与水溶液中的基本相同,约为水泥浆体中氯离子扩散系数的 1 000 倍。对于轻骨料内养护混凝土,内养护作用能有效改善骨料界面过渡区结构,使其更为致密,进而阻碍氯离子传输,如图 10 所示。混凝土的渗透性与骨料比表面积有关,即与骨料的尺寸和级配相关。粗轻质骨料会增大混凝土的吸水性和渗透性,降低其抗氯离子渗透能力;而细轻质骨料具有更小的连通孔隙和更大的比表面积,掺入则会显著提高混凝土的抗氯离子侵蚀能力<sup>[67]</sup>。

罗大明等<sup>[65]</sup>曾对相同养护条件下内养护混凝土

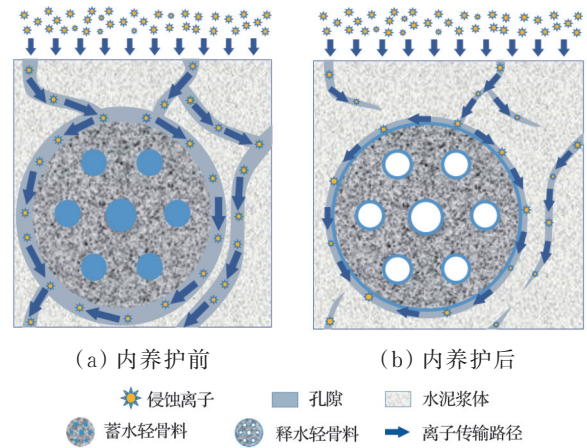
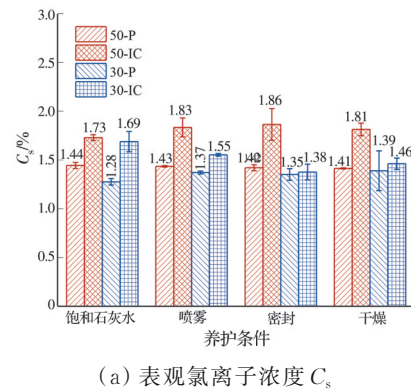


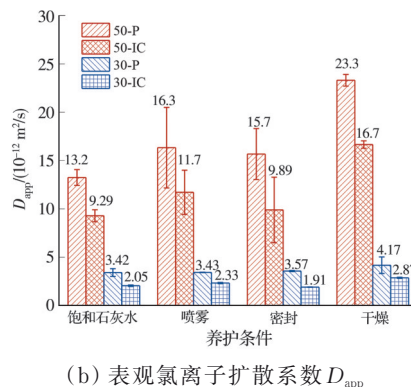
图 10 轻骨料内养护混凝土的离子传输示意图

Fig. 10 Ion transportation in internal curing concrete with prewetted lightweight aggregates

的抗氯离子侵蚀性能进行研究,结果如图 11 所示,与普通混凝土相比,相同水胶比的轻骨料内养护混凝土表面氯离子浓度  $C_s$  较高,而表观氯离子扩散系数  $D_{app}$  较低,即轻骨料内养护混凝土具有更好的抗氯离子侵蚀能力,这与 Liu 等<sup>[61]</sup>的研究结果一致。



(a) 表观氯离子浓度  $C_s$



(b) 表观氯离子扩散系数  $D_{app}$

图 11 内养护混凝土的抗氯离子侵蚀性能

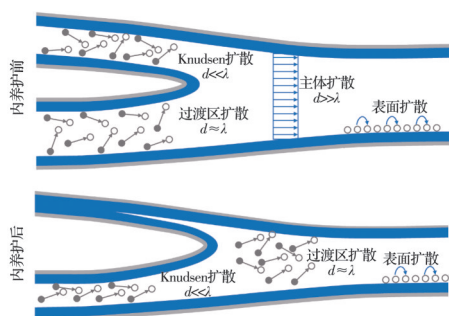
Fig. 11 Chloride ion corrosion resistance of internal curing concrete

#### 4.5 混凝土内养护对气体传输性能的影响

混凝土气体扩散性能或渗透性能可在一定程度上反映混凝土材料的抗中性化能力,为混凝土结构耐久性评定提供依据。混凝土的透气性受其孔

隙结构及环境温湿度等诸多因素的影响<sup>[68-69]</sup>。现有关于混凝土气体传输性能的研究主要针对普通混凝土,针对内养护混凝土的探讨相对较少。

混凝土骨料性质对其透气性能有重要影响:骨料尺寸较大、含量较高时,混凝土气密性较差;相对于干燥骨料混凝土,预湿骨料混凝土的吸水能力和气体渗透性较低<sup>[70-71]</sup>。此外,内养护作用对混凝土气体传输性能亦有较大影响。环境中的气体通常在无压力梯度情况下进入混凝土内部,其传输机制可按孔径大小分为主体扩散、Kundsen扩散、表面扩散以及三者共同组成的过渡区扩散。内养护材料的掺入,能够提高水泥水化程度,改善骨料-浆体界面过渡区,增加混凝土内部相对湿度,减小孔隙尺寸,进而限制混凝土中气体的传输,使其扩散方式转变为过渡区扩散、Kundsen扩散和表面扩散,如图12所示。罗大明等<sup>[16]</sup>基于Lawrence方法和Ballim方法,开展了内养护混凝土的氧气扩散试验和渗透试验,探究了混凝土的界面过渡区结构、内部相对湿度、水化程度、孔隙率以及孔隙迂曲度的变化对内养护混凝土气体扩散性能和渗透性能的影响,结果如图13所示,由于预湿轻骨料的掺入,水胶比为0.5、0.3的砂浆试件氧气扩散性能分别降低了9.8%~26.8%、28.7%~45.3%。



注:  $\lambda$ 为气体分子的平均自由程;  $d$ 为孔径。

图12 内养护混凝土的气体传输机制<sup>[16]</sup>

Fig. 12 Gas transport mechanism in internal curing concrete<sup>[16]</sup>

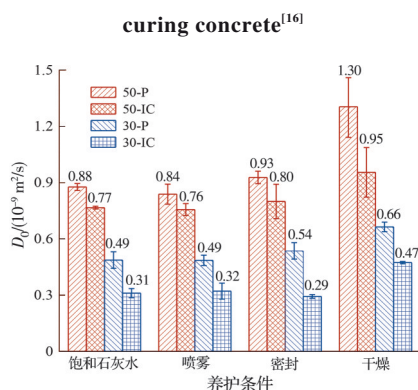


图13 普通混凝土与内养护混凝土的气体扩散系数<sup>[16]</sup>

Fig. 13 Gas diffusion coefficients of ordinary concrete and internal curing concrete<sup>[16]</sup>

#### 4.6 混凝土内养护对其抗冻性的影响

抗冻性是寒冷地区混凝土耐久性评价的重要指标。内养护材料(LWA和SAP)释水后会在混凝土中形成较多孔隙,相当于引入大量气泡,这与引气剂的作用类似,能够提高混凝土的抗冻性能。Schlitter等<sup>[72]</sup>发现,经14 d密封养护并经历300次冻融循环后,内养护混凝土没有冻融损伤,说明轻骨料的孔隙可有效释放混凝土中水结冰产生的膨胀能,进而提高混凝土抗冻性。轻骨料的预湿程度对混凝土抗冻性的影响不大,郑秀华等<sup>[73]</sup>认为,随着轻骨料预湿程度增加,混凝土抗冻性略有降低,但仍满足300次冻融循环的要求。孔丽娟等<sup>[74]</sup>研究发现,高水胶比条件下预湿轻骨料的内养护效果不明显,这是由于其水泥石结构较疏松,在冻压下轻骨料内部水分较难释出,不利于抗冻;而在低水胶比条件下,预湿轻骨料的返水作用能显著提升混凝土的长期抗冻性,这与赵振亚等<sup>[75]</sup>、魏亚等<sup>[76]</sup>的研究结果一致。

随着水泥水化过程的进行,饱和SAP在渗透压作用下释水收缩,与混凝土浆体间形成孔隙,可在一定程度上实现引气效果,通过控制SAP的粒径能有效控制引气量和气泡尺寸。Reinhardt等<sup>[77]</sup>的研究表明,掺入SAP的混凝土抗冻能力显著提高,而抗氯离子渗透性却有所降低。Kim等<sup>[78]</sup>、Laustsen等<sup>[79]</sup>的研究也得出一致结论,即SAP释水后在混凝土中形成大量孔隙,能显著提升混凝土的抗冻性。

#### 4.7 混凝土内养护对碱-骨料反应的影响

混凝土中碱-骨料反应(ASR)的机理复杂,采用多孔轻骨料部分或全部替代普通骨料进行混凝土内养护,一方面能增强水泥浆体的水化程度,降低其整体孔隙率,减小碱-骨料反应速率<sup>[80]</sup>;另一方面,轻骨料的孔隙能为膨胀凝胶的沉积提供空间,进而减小凝胶在基体中产生的压力,降低膨胀的可能性<sup>[81]</sup>。如图14所示,在相同替换率条件下,轻骨料

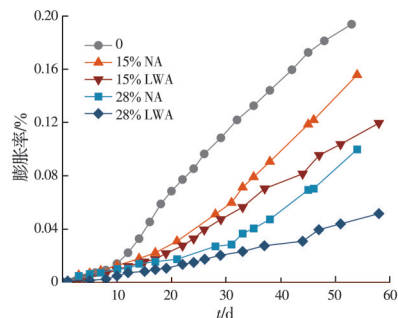


图14 非活性骨料(NA)和轻骨料(LWA)替换对碱-骨料膨胀的影响<sup>[81]</sup>

Fig. 14 Influence of non-reactive aggregate (NA) and lightweight aggregate (LWA) replacement on ASR expansion<sup>[81]</sup>

拌制的混凝土比非活性骨料混凝土的膨胀速度慢很多。此外,SAP的内养护作用能显著降低碱-骨料反应速率,Askarian<sup>[82]</sup>的研究表明,当SAP掺量从0增加到0.5%、1.0%、1.5%和2.0%时,混凝土19 d的碱-骨料反应膨胀率分别下降2.1%、3.0%、3.8%和4.1%,结果如图15所示。

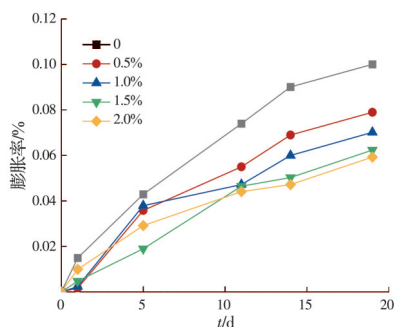


图 15 不同 SAP 掺量对碱-骨料膨胀的影响<sup>[82]</sup>

Fig. 15 Influence of different SAP contents on ASR expansion<sup>[82]</sup>

## 5 结论与展望

内养护技术能降低混凝土早期开裂风险,提高混凝土结构的耐久性,延长其服役寿命。本文总结内养护技术的研究成果,分析其作用机理及对混凝土结构耐久性的影响,得出以下主要结论:

1) 预湿轻骨料或超强吸水聚合物作为内养护组分掺入混凝土,可发挥内部“蓄水池”的作用,在周围环境相对湿度较低时释放水分,进而提高混凝土内部湿度,为水泥水化反应的持续进行提供条件。该内养护技术在最大限度提升水泥水化程度的同时,还能缓解混凝土因自干燥产生的收缩开裂,是改善混凝土适用性的新手段。

2) 作为降低混凝土早期开裂风险的新技术,内养护能改善混凝土骨料-浆体界面过渡区结构,提高该区域的致密程度,切断毛细管通道,减少离子与流体的传输路径,从而降低混凝土对侵蚀性介质的传输能力。此外,内养护材料释水后留下的孔隙,能有效释放混凝土孔隙溶液结冰产生的膨胀压力,提升混凝土的抗冻性能。因此,内养护作为提高混凝土耐久性的一项新技术,对延长混凝土结构服役寿命大有裨益。

3) 利用预湿轻骨料或 SAP 对混凝土进行内养护的技术仍在不断完善中。内养护效果受多重因素影响,由于混凝土配合比、浇筑方式、养护条件等不同,内养护作用对混凝土结构的影响存在很大差异,其工程应用尚未大规模普及,关于该技术对实际结构服役寿命的提升效果研究仍然缺乏。

4) 内养护作为提高混凝土耐久性的有效方法,

在延长混凝土结构服役寿命方面具有较大潜力。目前对混凝土内养护的研究仍处于理论和试验层面,关于内养护材料的最佳掺量、最佳粒径分布以及内养护水在混凝土中的传输距离等问题,仍有待进一步研究。

5) 未来的研究中,可考虑将混凝土内养护技术与钢筋阻锈、裂缝微生物自修复等技术相结合,形成多方位、多维度的混凝土耐久性综合提升技术体系。

## 参考文献

- [1] 赵人达, 占玉林, 徐腾飞, 等. 混凝土桥及其高性能材料 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊 1): 12-22.  
ZHAO R D, ZHAN Y L, XU T F, et al. State-of-the-art review of concrete bridges and its high performance materials in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup 1): 12-22. (in Chinese)
- [2] BENTZ D P, JENSEN O M, COATS A M, et al. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30 (6): 953-962.
- [3] CUSSON D, LOUNIS Z, DAIGLE L. Benefits of internal curing on service life and life-cycle cost of high-performance concrete bridge decks - A case study [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(5): 339-350.
- [4] 安明喆, 朱金铨, 覃维祖. 高性能混凝土的自收缩问题 [J]. 建筑材料学报, 2001, 4(2): 159-166.  
AN M Z, ZHU J Q, QIN W Z. Autogenous shrinkage of high performance concrete [J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(2): 159-166. (in Chinese)
- [5] 杨医博, 岳晓东, 姚丁语, 等. 碱渣内养护剂对高强高性能混凝土自收缩及早期抗裂性能的影响及机理分析 [J]. 材料导报, 2022, 36(12): 91-96.  
YANG Y B, YUE X D, YAO D Y, et al. Effect of soda residue internal curing agent on autogenous shrinkage and early crack resistance of high-strength and high-performance concrete and its mechanism analysis [J]. Materials Reports, 2022, 36(12): 91-96. (in Chinese)
- [6] RAOUFI K, SCHLITTER J, BENTZ D, et al. Parametric assessment of stress development and cracking in internally cured restrained mortars experiencing autogenous deformations and thermal loading [J]. Advances in Civil Engineering, 2011, 2011: 1-16.
- [7] 王立成, 张磊. 混凝土内养护技术研究进展[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1471-1478.  
WANG L C, ZHANG L. Research progress on concrete internal curing technology [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1471-1478. (in Chinese)

- [8] MA X W, LIU J H, SHI C J. A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 218: 385-393.
- [9] YANG L, SHI C J, LIU J H, et al. Factors affecting the effectiveness of internal curing: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267: 121011-121017.
- [10] KIM J H, CHOI S W, LEE K M, et al. Influence of internal curing on the pore size distribution of high strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 50-57.
- [11] ZHU H, WANG Z J, XU J, et al. Microporous structures and compressive strength of high-performance rubber concrete with internal curing agent [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 215: 128-134.
- [12] SAFFAR D MAL, SAAD A J KAL, TAYEH B A. Effect of internal curing on behavior of high performance concrete: An overview [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 10: e00229.
- [13] POWERS T C, COPELAND L E, MANN H M. Capillary continuity or discontinuity in cement pastes [J]. *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 1959, 1(101): 2-12.
- [14] GRASLEY Z C, LANGE D A. Thermal dilation and internal relative humidity of hardened cement paste [J]. *Materials and Structures*, 2007, 40(3): 311-317.
- [15] CASTRO J, BENTZ D, WEISS J. Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(8): 805-813.
- [16] 罗大明, 牛荻涛. 不同湿度环境下内养护混凝土气体传输性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(8): 193-203.  
LUO D M, NIU D T. Gas transportation properties of internal cured concrete under different moisture conditions [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(8): 193-203. (in Chinese)
- [17] CUSSON D, HOOGEVEEN T. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(6): 757-765.
- [18] KLIEGER P. Early high strength concrete for prestressing [C]//*International Conference on Prestressed Concrete and Practice*. San Francisco: 1957.
- [19] PHILILEO R E. *Materials science of concrete II* [M]. Westerville, USA: American Ceramic Society, 1991: 1-8.
- [20] WEBER S, REINHARDT H W. A blend of aggregates to support curing of concrete [C]//*International Symposium on Structural Lightweight Concrete*. Sandefjord, Norway: 1979: 662-671.
- [21] VAN BREUGEL K, DE VRIES H, TAKADA K. Mixture optimization of low water/cement ratio, high-strength concretes in view of reduction of autogenous shrinkage [C]//*International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concrete*. Sherbrooke: 1998: 365-382.
- [22] BENTUR A, IGARASHI S, KOVLER K. Control of autogenous shrinkage stresses and cracking in high strength concretes [C]//*5th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete*. Sandefjord, Norway: 1999: 1017-1026.
- [23] JENSEN O M, HANSEN P F. Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(4): 647-654.
- [24] JENSEN O M, HANSEN P F. Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(6): 973-978.
- [25] 杨鲁, 李化建, 杨长辉, 等. 高吸水树脂基内养护混凝土研究进展 [J]. *材料导报*, 2011, 25(增刊2): 459-461.  
YANG L, LI H J, YANG C H, et al. Research progress on internal curing concrete based on super-absorbent polymer [J]. *Materials Review*, 2011, 25(Sup 2): 459-461. (in Chinese)
- [26] MOHR B J, PREMENKO L, NANKO H, et al. Examination of wood-derived powders and fibers for internal curing of cement-based materials [C]//*4th International Seminar: Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology*. Gaithersburg, 2005: 229-244.
- [27] DEMIRDAG S, GUNDUZ L. Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(3): 135-142.
- [28] 牛建刚, 梁剑, 焦孟友. 塑钢纤维轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(5): 92-98.  
NIU J G, LIANG J, JIAO M Y. Experimental study on flexural behavior of plastic steel fiber lightweight aggregate concrete beams [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(5): 92-98. (in Chinese)
- [29] LO T Y, CUI H Z. Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete [J]. *Materials Letters*, 2004, 58(6): 916-919.
- [30] BENTZ D P. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(5): 285-289.
- [31] 毕继红, 霍琳颖, 赵云, 等. 钢纤维混凝土的本构模型

- 及力学性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(7): 9-18.
- BI J H, HUO L Y, ZHAO Y, et al. Constitutive model and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(7): 9-18. (in Chinese)
- [32] 鲁海波, 张广泰, 刘诗拓, 等. 盐渍土环境下聚丙烯纤维混凝土柱抗震性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(1): 111-121.
- LU H B, ZHANG G T, LIU S T, et al. Seismic performance of polypropylene fiber reinforced concrete columns in saline soil environment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(1): 111-121. (in Chinese)
- [33] ONUAGULUCHI O, BANTHIA N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 68: 96-108.
- [34] KAWASHIMA S, SHAH S P. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(2): 201-208.
- [35] SEONGWOO G, CHEOL C Y, MYOUNGSU S. Internal curing of cement composites using kenaf cellulose microfibrils [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 47: 103867.
- [36] JONGVISUTTISUN P, LEISEN J, KURTIS K E. Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 107: 206-220.
- [37] CHOI Y C. Hydration and internal curing properties of plant-based natural fiber-reinforced cement composites [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01690.
- [38] TRTIK P, MÜNCH B, WEISS W J, et al. Release of internal curing water from lightweight aggregates in cement paste investigated by neutron and X-ray tomography [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 651(1): 244-249.
- [39] BENTZ D P, SNYDER K A. Protected paste volume in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(11): 1863-1867.
- [40] BENTZ D, LURA P, ROBERTS J W. Mixture proportioning for internal curing [J]. Concrete International, 2005, 27(2): 35-40.
- [41] HENKENSIEFKEN R, BENTZ D, NANTUNG T, et al. Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(7): 427-437.
- [42] POWERS T C. The nonevaporable water content of hardened portland-cement paste-its significance for concrete research and its method of determination [J]. ASTM Bulletin, 1949, 1949(158): 68-76.
- [43] CASTRO J, KEISER L, GOLIAS M, et al. Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(10): 1001-1008.
- [44] POUR-GHAZ M, CASTRO J, KLADIVKO E J, et al. Characterizing lightweight aggregate desorption at high relative humidities using a pressure plate apparatus [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(8): 961-969.
- [45] MONTANARI L, SURANENI P, CHANG M T, et al. Absorption and desorption of superabsorbent polymers for use in internally cured concrete [J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2018, 7(4): 20180008.
- [46] AKCAY B, TASDEMIR MALI. Effects of distribution of lightweight aggregates on internal curing of concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 611-616.
- [47] BENTZ D P, KOENDERS E, MONNIG S, et al. Internal curing of concrete [M]. France: RILEM, 2007.
- [48] ZHUTOVSKY S, KOVLER K, BENTUR A. Assessment of water migration distance in internal curing of high-strength concrete [J]. Materials Science, 2004, 220: 181-200.
- [49] ZHUTOVSKY S, KOVLER K, BENTUR A. Revisiting the protected paste volume concept for internal curing of high-strength concretes [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(9): 981-986.
- [50] ZHUTOVSKY S, KOVLER K, BENTUR A. Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(5): 499-507.
- [51] TERMKHAJORNKIT P, NAWA T, KURUMISAWA K. Effect of water curing conditions on the hydration degree and compressive strengths of fly ash-cement paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(9): 781-789.
- [52] 李北星, 查进, 李进辉, 等. 饱水轻集料内养护对高性能混凝土收缩的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(5): 24-27.
- LI B X, ZHA J, LI J H, et al. Effect of internal curing caused by saturated lightweight aggregate on shrinkage of high performance concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(5): 24-27. (in Chinese)
- [53] 陈德鹏, 钱春香, 高桂波, 等. 高吸水树脂对混凝土收缩开裂的改善作用及其机理[J]. 功能材料, 2007, 38(3): 475-478.
- CHEN D P, QIAN C X, GAO G B, et al. Mechanism

- and effect of SAP for reducing shrinkage and cracking of concrete [J]. *Journal of Functional Materials*, 2007, 38 (3): 475-478. (in Chinese)
- [54] AKCAY B, TASDEMIR M. Optimisation of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1): 353-363.
- [55] CRAEYE B, GEIRNAERT M, DE SCHUTTER G. Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(1): 1-13.
- [56] KLEMM A J, SIKORA K S. The effect of Superabsorbent Polymers (SAP) on microstructure and mechanical properties of fly ash cementitious mortars [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 134-143.
- [57] 朱长华, 李享涛, 王保江, 等. 内养护对混凝土抗裂性及水化的影响[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(2): 221-225.
- ZHU C H, LI X T, WANG B J, et al. Influence of internal curing on crack resistance and hydration of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(2): 221-225. (in Chinese)
- [58] BENTZ D P, GARBOCZI E J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone (SP-105) [J]. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(5): 518-529.
- [59] 高新文, 何锐. 高吸水树脂对混凝土强度与水化过程的影响[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(8): 34-39.
- GAO X W, HE R. Influence of super absorbent polymer on strength and hydration process of concrete [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(8): 34-39. (in Chinese)
- [60] BENTZ D P, STUTZMAN P E. Internal curing of high-performance concretes: Laboratory and field experiences [M]. Farmington: American Concrete Institute, 2008.
- [61] LIU X M, CHIA K S, ZHANG M H. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(1): 335-343.
- [62] 胡曙光, 王发洲, 丁庆军, 等. 轻集料的吸水率与预处理时间对混凝土工作性的影响[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2002, 19(2): 1-4.
- HU S G, WANG F Z, DING Q J, et al. Influence of water absorption and pre-wetted method of lightweight aggregate on the workability of concrete [J]. *Journal of Wuhan Urban Construction Institute*, 2002, 19(2): 1-4. (in Chinese)
- [63] CHIA K S, ZHANG M H. Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32 (4): 639-645.
- [64] 孙德强, 丁建彤, 郭玉顺. 普通混凝土与采用不同陶粒的轻质混凝土的水渗性和氯离子渗透性比较[J]. *混凝土*, 2005(2): 36-38, 53.
- SUN D Q, DING J T, GUO Y S. Comparison of water permeability and chloride penetrability between normal-weight concrete and lightweight concrete made with different lightweight aggregates [J]. *Concrete*, 2005(2): 36-38, 53. (in Chinese)
- [65] 罗大明, 牛荻涛. 不同水胶比及养护条件对内养护混凝土吸水性能的影响[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(1): 165-173.
- LUO D M, NIU D T. Influences of water-to-cement ratio and curing condition on water absorption of internal curing concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(1): 165-173. (in Chinese)
- [66] OTSUKI N, NISHIDA T, WATTANACHAI P, et al. Experimental study on influence of ITZ around aggregate on  $\text{Cl}^-$  diffusivity of concrete [J]. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 2006, 55(10): 899-904.
- [67] LIU X M, CHIA K S, ZHANG M H. Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(10): 757-766.
- [68] ROMER M. Effect of moisture and concrete composition on the torrent permeability measurement [J]. *Materials and Structures*, 2005, 38(5): 541-547.
- [69] HOUST Y F, WITTMANN F H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  through hydrated cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(6): 1165-1176.
- [70] BASHEER L, BASHEER P A M, LONG A E. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(9): 682-690.
- [71] GONILHO PEREIRA C, CASTRO-GOMES J, PEREIRA DE OLIVEIRA L. Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 602-608.
- [72] SCHLITTER J, HENKENSIEFKEN R, CASTRO J, et al. Development of internally cured concrete for increased service life [J]. *Concrete Pavements*, 2010
- [73] 郑秀华, 张宝生. 页岩陶粒预湿处理对轻集料混凝土的强度和抗冻性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 33(6): 758-762.
- ZHENG X H, ZHANG B S. Effect of pre-wetted shale ceramsite on strength and frost-resistance of lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 33(6): 758-762. (in Chinese)

- [74] 孔丽娟, 高礼雄, 葛勇. 轻骨料预湿程度对混合骨料混凝土抗冻性能影响[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 35-40.  
KONG L J, GAO L X, GE Y. Effect of lightweight aggregate pre-wetting on frost-resistance of combined aggregate concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(1): 35-40. (in Chinese)
- [75] 赵振亚, 姬宝霖, 宋小园, 等. 轻骨料混凝土的抗冻性研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2442-2447.  
ZHAO Z Y, JI B L, SONG X Y, et al. Frost resistance of lightweight aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(9): 2442-2447. (in Chinese)
- [76] 魏亚, 向亚平. 轻细骨料内养护混凝土抗冻融和抗盐冻性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 901-907.  
WEI Y, XIANG Y P. Freeze-thaw resistance and salt-scaling resistance of internal curing concrete with lightweight fine aggregate [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 901-907. (in Chinese)
- [77] REINHARDT H, ASSMANN A, NNIG SM O, et al. Superabsorbent polymers (SAPs) -An admixture to increase the durability of concrete [C]//1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. Nanjing: RILEM Publications, 2008: 313-323.
- [78] KIM I S, CHOI S Y, CHOI Y S, et al. An experimental study on absorptivity measurement of superabsorbent polymers (SAP) and effect of SAP on freeze-thaw resistance in mortar specimen [J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 120974.
- [79] LAUSTSEN S, HASHOLT M T, JENSEN O M. Void structure of concrete with superabsorbent polymers and its relation to frost resistance of concrete [J]. Materials and Structures, 2015, 48(1): 357-368.
- [80] BENTZ D, WEISS W. Internal curing: A 2010 state-of-the-art review [R]. Nist Interagency/internal Report, 2011.
- [81] SHIN K, CASTRO J, SCHLITTER J, et al. The role of internal curing as a method to improve durability [M]. KIM H, ANN K Y. Handbook on Concrete Durability. Middleton: Indian Concrete Institute, 2010, 379-428.
- [82] ASKARIAN R, DARBHANZI A, RANJBAR-KARIMI R. Internal curing of concrete by superabsorbent polymer particles [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022, 46(5): 3979-3994.

(编辑 朱备)