

## 高吸水树脂水凝胶用于水泥基材料裂纹自封堵的研究进展

杨 进<sup>1,2</sup>, 段晓鹏<sup>1</sup>, 邱金胤<sup>1</sup>, 苏 英<sup>1,2</sup>, 贺行洋<sup>1,2</sup>

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 武汉 430068; 2. 湖北省建筑防水工程技术研究中心, 武汉 430068)

**摘 要:** 水泥混凝土由于脆性大、早期易收缩变形等特点, 导致服役过程中易发生开裂, 并诱发混凝土结构渗水漏水等问题。混凝土开裂渗漏的及时与有效修复一直是工程界关注的重点。高吸水树脂(SAP)水凝胶是近几年发展的一种新型自封堵材料, 具有快速吸水, 且体积显著膨胀的特性, 在潮湿环境中混凝土的裂纹愈合封堵方面具有较大应用潜力。本文分析了水凝胶的裂纹自封堵机理, 综述了水凝胶用于混凝土裂纹自封堵的设计方法, 归纳了水凝胶对混凝土抗渗、力学及耐久性恢复的影响规律, 总结了裂纹愈合封堵测试评价方法。最后, 对当前水凝胶作为裂纹自封堵材料面临的主要挑战及未来方向进行了展望。

**关键词:** 水泥基材料; 裂纹; 自封堵; 高吸水树脂; 封堵效率

中图分类号: TU528.0 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-3015-10

网络出版时间: 2023-09-11



## Application of Superabsorbent Polymer Hydrogel to Crack Self-Sealing of Cement-Based Materials

YANG Jin<sup>1,2</sup>, DUAN Xiaopeng<sup>1</sup>, QIU Jinyin<sup>1</sup>, SU Ying<sup>1,2</sup>, HE Xingyang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Building Waterproof Engineering and Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Cement concrete is sensitive to cracking during service due to its brittleness and early susceptibility to shrinkage and deformation, further leading to the water seepage and leakage of concrete structure. The timely and effective repair of water leakage in cracked concrete has attracted recent attention in engineering. Superabsorbent polymer (SAP) hydrogel is a new type of self-sealing agent developed in recent years, which has the characteristics of rapid water absorption and significant volume expansion, and has a promising application potential in crack healing and sealing in humid environment. This review represented the basic design method of self-sealing cement-based materials based on hydrogel, discussed the working mechanism of SAP hydrogel as self-sealing agent and its effect on the anti-permeability, mechanics and durability recovery of concrete, and summarized the evaluation method of crack healing and sealing efficiency. In addition, the main challenges and future directions of hydrogel based crack self-sealing technology were also proposed.

**Keywords:** cement-based material; crack; self-sealing; superabsorbent polymer; sealing efficiency

水泥混凝土作为应用最广泛的建筑材料之一, 不仅造价低廉, 且具有优异的抗压以及耐久性能。然而, 由于其抗拉能力较低, 且本身脆性大、易收缩变形产生裂纹, 并进一步诱发混凝土结构渗水漏

水、有害离子侵蚀等安全性问题<sup>[1]</sup>。为了解决这一问题, 部分研究者在混凝土中掺入纤维<sup>[1]</sup>, 或者通过加入矿物掺合料改善界面过渡区来抑制裂纹的扩展及宽度<sup>[2]</sup>。当裂缝宽度到达一定程度时, 再

收稿日期: 2023-06-15。 修订日期: 2023-07-03。

基金项目: 国家自然科学基金面上及青年项目(52172017; 51902095);

湖北省重点研发计划项目(2021BCA153)。

第一作者: 杨 进(1989—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 贺行洋(1976—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-06-15. Revised date: 2023-07-03.

First author: YANG Jin (1989—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: jinyang@hbut.edu.cn

Correspondent author: HE Xingyang (1976—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: hexycn@163.com

由人工进行裂缝修补。这种在裂缝产生后期对其进行修复的过程,在一定程度上增加了维护成本,且如果维护不及时,也会造成一定安全隐患。

自修复技术具有对开裂部位自感知、自修复的能力,是实现混凝土裂纹智能修复的新兴途径。广义上讲,混凝土裂纹自修复可分为自愈合与自封堵,能够在裂纹产生初期形成自愈合或自封堵效果,为混凝土裂纹修复带来新的技术思路。自愈合主要依赖于修复材料的胶结特性,能够重新粘合裂纹,实现力学性能恢复;而自封堵主要依靠修复材料的体积膨胀效应,快速封堵裂纹,实现抗渗性能恢复。目前,国内外关于裂纹自修复的研究主要集中于自愈合方面,包括微胶囊型自愈合<sup>[2-3]</sup>、微生物矿化型自愈合<sup>[4]</sup>、中空纤维/玻璃管型自愈合<sup>[5-6]</sup>等。一般而言,自愈合过程主要依赖于修复剂在裂纹中的聚合、水化、矿化沉积等化学反应进程,但受扩散速度和反应进程的控制,化学触发后修复剂往往需要一定的周期(一般几天到几个月)发挥有效封堵作用,愈合速度仍有待进一步提升。

高吸水树脂(SAP)是一种具有三维交联网络结构的聚合物材料,可在短时间(几分钟至几十分钟)内吸收自身质量几百倍甚至几千倍的水分,并发生显著的体积溶胀从而形成水凝胶<sup>[7]</sup>,对混凝土中的裂缝形成快速封堵<sup>[8]</sup>,近年来引起研究者的广泛关注。然而,由于SAP的作用本质是形成水凝胶从而封堵裂纹,因此国际上除了自愈合的称呼之外<sup>[9-11]</sup>,也称之为自封堵<sup>[8]</sup>。一般而言,采用丙烯酸和丙烯酰胺共聚的SAP在混凝土中的应用研究较为常见,它们可以在水泥浆体中快速吸水,且不会过快释水萎缩<sup>[7-8]</sup>。然而,SAP的物理溶胀及释水后形成的孔洞,也会对水泥基材料的性能带来负面影响。例如,混凝土力学强度降低,水解后封堵效果损失等问题。有研究者尝试对SAP水凝胶进行复合改性或者与其他材料协同使用,在一定程度上改善了自封堵效率及混凝土性能的负面影响<sup>[12-14]</sup>。

为了更好地促进SAP水凝胶作为裂纹自封堵材料在混凝土中的应用,本文系统综述了水凝胶的裂纹自封堵作用机理,基于水凝胶自封堵材料的水泥基材料设计方法,水凝胶对混凝土抗渗、力学及耐久性恢复的影响规律,以及混凝土裂纹愈合封堵测试评价方法等,并指出了当前SAP水凝胶自封堵技术面临的重要挑战及未来研究方向。

## 1 SAP水凝胶的裂纹自封堵机理

SAP在水环境中,网状结构内外的离子渗透压促使水分子渗入到聚合物网络结构中,分子链上的官能基团在水中电离,同离子之间的静电斥力使高分子链伸展溶胀,形成水凝胶,而SAP本身的交联网状结构以及氢键作用又限制了水凝胶的无限溶胀<sup>[7, 15]</sup>。在水泥基材料中,较高的pH值(12.5~13.0)和离子浓度(如 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等)会降低SAP的溶胀能力<sup>[16-17]</sup>。另外,高浓度的 $\text{Ca}^{2+}$ 会与SAP分子结构中的羧基等发生络合作用,从而进一步降低SAP的溶胀能力<sup>[7, 18]</sup>,水凝胶溶胀能力的降低不可避免将导致裂纹愈合封堵能力的降低。此外,还值得注意的是,在混凝土内部压力环境(如自重、泵送压力等)作用下,SAP的溶胀能力也会受到一定程度的物理限制。

SAP溶胀后的裂纹自封堵机理<sup>[18]</sup>如图1所示,当混凝土水硬化后,SAP释水萎缩,留下几十到几百微米大小的宏观孔洞,与水泥浆体中的其他“缺陷”(如微裂纹、骨料界面过渡区等)相比,这些孔洞的尺寸更大,且大小相似<sup>[19]</sup>,被视为宏观缺陷。当混凝土结构发生开裂时,裂纹更加倾向于贯穿通过SAP水凝胶留下的宏观缺陷进行延伸。当SAP暴露在裂缝处之后,由于外界渗入的水与混凝土中的孔溶液相比,离子浓度低的多,同时在减少了部分物理限制的情况下,SAP会快速发生二次吸水溶胀行为,且与初始溶胀相比,二次溶胀能力显著增加,从而有效封堵原始宏观孔洞及裂缝,甚至扩展到裂缝之外,极大减少或阻止水分的渗入。但从长期愈合封堵角度来看,裂缝的封堵除了与水凝胶的物理溶胀有关之外,还与裂缝周围由于水凝胶内养护促进形成的C-S-H凝胶等产物相关<sup>[8-9, 18]</sup>。

值得注意的是,SAP作为自封堵材料的触发前提是:1)水泥基材料开裂;2)周围环境中存在水或湿气。当水或湿气进入裂缝时,裂缝内的SAP会快速吸水膨胀,并物理封堵裂缝,这个过程通常在数分钟之内就可以完成。然而,当周围环境较为干燥时,水凝胶内部的水分会逐渐蒸发,导致物理溶胀和封堵效应逐渐损失。但正如上文所述,干燥环境中并不存在明显的渗水问题,也就不需要所谓的渗漏修复。因此,SAP水凝胶更加适用于地下结构等长期有水或潮湿环境中裂纹的自封堵,特别是对于混凝土开裂后渗水抵抗能力的恢复效果较好。

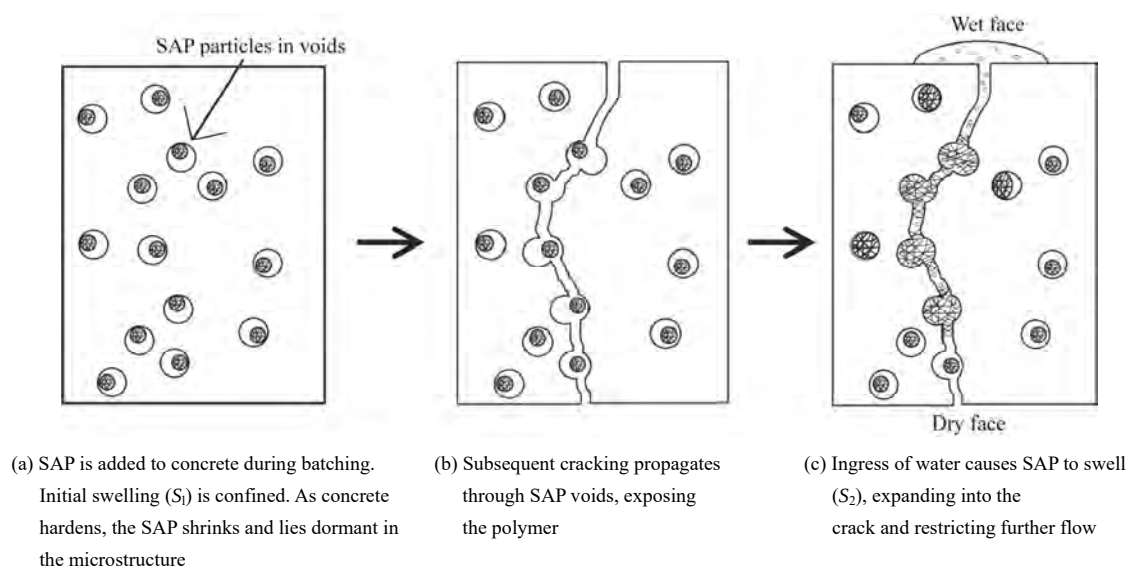


图 1 SAP 水凝胶的裂缝自封堵机理<sup>[18]</sup>  
Fig. 1 Self-sealing mechanism of SAP hydrogel in cracks<sup>[18]</sup>

综上所述, SAP 在裂缝出现后的二次吸水溶胀行为是影响自封堵响应速度及效率的关键。SAP 作为自封堵材料本质上是一个先填充初始孔洞, 再封堵孔洞周围裂缝的过程。也即, SAP 在混凝土开裂后的体积膨胀需消耗一部分在初始孔洞, 剩余部分用于填充孔洞周围的裂缝; 同时, SAP 吸水溶胀产生的宏观孔洞也会对混凝土力学、抗渗性等造成负面影响。因此, 理论上 SAP 掺入混凝土后形成的初始孔洞应尽可能小, 即 SAP 在混凝土内应尽可能少吸收含有复杂离子的孔溶液, 以在二次溶胀(自封堵)过程中产生更大的体积比(溶胀体积/初始孔洞体积)。

## 2 基于水凝胶自封堵材料的混凝土设计方法

### 2.1 SAP 水凝胶的制备及改性方法

2.1.1 表面改性 普通 SAP 在水泥浆体搅拌过程中吸收水分, 并在混凝土水化硬化时由于渗透压导致释水成孔<sup>[7]</sup>, 从而造成开裂前混凝土强度的降低。Feng 等<sup>[10]</sup>研究了一种包覆改性 SAP, 以水泥及 SAP 作为芯材, 聚乙二醇为包覆材料, 同时将环氧树脂和沙子作为防水层, 不仅保证了混凝土裂纹的自封堵效果, 也避免了 SAP 在塑性混凝土拌合物中的初始溶胀行为和后续释水成孔。此外, SAP 自身也可作为囊壁材料来包覆其他芯材制备自封堵材料。例如, Wang 等<sup>[11]</sup>通过甲基丙烯酸酐对壳聚糖进行改性, 合成了一种 pH 响应型水凝胶, 并用来

包裹细菌孢子制备裂纹自封堵材料, 该种自封堵材料对混凝土抗压强度影响较小, 且对裂缝的封堵效率达到 81%~90%。

2.1.2 内部交联改性 内部交联改性一般采用化学聚合方法使 SAP 更容易适应水泥基材料中的高盐高碱环境, 该方法主要被用来改善 SAP 敏感性或耐盐性。例如, Hu 等<sup>[12]</sup>通过钙离子和海藻酸钠交联制备了对钙离子浓度敏感的水凝胶, 即在含钙离子的孔溶液中具有较低的溶胀率, 而在淡水中具有较高溶胀率; 这种对  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的敏感性可避免水凝胶在水泥石硬化过程中形成过大的宏观孔洞; 当水泥石裂缝出现, 水渗入裂缝时, 水凝胶会产生更大的溶胀行为, 从而封堵裂缝; 且由于钙离子敏感型水凝胶在孔溶液中的初始溶胀能力受到抑制, 在 0.5% 掺量下其对抗压强度的负面影响可忽略不计。Hong 等<sup>[8]</sup>研究了聚丙烯酸酯-丙烯酰胺共聚水凝胶的裂纹自封堵行为, 发现裂缝处的水凝胶最快在 5 分钟内形成了有效的愈合封堵。Wang 等<sup>[9]</sup>通过甲基丙烯酸乙酯和丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵的共聚, 合成了 pH 敏感型水凝胶, 其在中性和弱碱性溶液中吸水倍率可达 34~44 g/g, 而在强碱性溶液中溶胀率仅有 10~15 g/g, 从而保证了裂纹出现后水凝胶具有更高的吸水溶胀能力, 最高可以封堵 166  $\mu\text{m}$  宽度的裂缝。Mignon 等<sup>[13]</sup>通过海藻酸钙、丙烯酸海藻酸盐和丙烯酸的交联共聚, 合成了在水泥滤液中具有较强溶胀能力的水凝胶, 且耐水解性也得到了明显的提升。

2.1.3 纳微米复合改性 由于二氧化硅等无机纳

微米材料较高的反应活性和成核效应,可在一定程度上提升 SAP 水凝胶周围水泥的水化进程,且水凝胶表面及内部复合的活性纳米粒子反应所产生的水化产物对 SAP 所留下的孔洞也具有较好的填充效果<sup>[14,20]</sup>。He 等<sup>[21]</sup>将偏高岭土与聚丙烯酸-丙烯酰胺共聚水凝胶进行复合改性,在碱性溶液和水泥抽滤液中的溶胀性能明显优于商用 SAP。目前,关于纳微米复合改性水凝胶自封堵方面的研究相对较少,部分研究者采用纳微米材料<sup>[22]</sup>、纤维<sup>[23–24]</sup>等与 SAP 复掺的方式改善裂纹封堵效果。例如, Lefever 等<sup>[25]</sup>为了抵消混凝土加入 SAP 水凝胶所产生的强度负面影响,将纳米 SiO<sub>2</sub> 与水凝胶复掺,利用纳米 SiO<sub>2</sub> 的水化诱导和火山灰反应特性,在 28 d 时达到与对照组相当的抗压强度,且裂纹封堵率达到了 100%。

综上所述,目前 SAP 自封堵材料设计、制备及改性方法,主要包括表面改性、内部交联改性及纳微米复合改性等。通过抑制 SAP 的初始吸水溶胀行为,有助于减小 SAP 溶胀后形成的宏观孔洞,从而降低水凝胶对混凝土强度的负面影响;同时,应提高混凝土开裂后水凝胶的二次溶胀行为,使水凝胶具备尽可能高的溶胀倍率,从而保证对裂纹的有效封堵。此外, SAP 水凝胶与纤维、活性矿物材料等共混复合也有助于提升裂纹封堵效果。

## 2.2 SAP 用于水泥基材料裂纹自封堵的设计方法

**2.2.1 粒径设计** SAP 的粒径和溶胀特性对裂纹自封堵效果有较大影响。Lee 等<sup>[18]</sup>发现大粒径的 SAP 会增加溶胀后水凝胶的尺寸,从而提高其裂缝封堵能力。然而,小粒径的水凝胶颗粒有助于减少初始孔洞的大小,且增加了水凝胶在水泥基体内部的分布密度,因此可提高水凝胶颗粒与随机裂缝相交的概率。关于 SAP 的粒径设计, Wyrzykowski 等<sup>[26]</sup>研究表明, SAP 在溶胀状态下的颗粒大小不宜超过 1 mm。对于一个吸水溶胀能力约 15 g/g 的球形 SAP 颗粒,干颗粒的密度等于 1.4 g/cm<sup>3</sup>,这意味着它在水泥浆体中吸水后体积溶胀将增加约 20 倍。进一步地,为了不超过溶胀状态下的颗粒尺寸的建议限值(1 mm),则 SAP 颗粒在干燥状态下的粒径不宜超高 350 μm。但是, Gruyaert 等<sup>[27]</sup>认为, 400~600 μm 可能是最合适的粒径区间,较大粒径的 SAP 可能会带来更大的力学性能上的负面影响。目前,适用于裂纹自封堵的最小 SAP 粒径方面的研究较少,同时也没有发现将 SAP 粒径控制更小,甚至降低至亚微米级别方面的研究报道;然而,更小粒径的 SAP 也意味着在水流冲刷等作用下水凝胶颗粒

更容易从裂纹处的水泥基体脱离,从而不利于持久的裂纹自封堵效果。

**2.2.2 掺量设计** SAP 掺量对混凝土的工作性能、力学性能等均有明显影响<sup>[18]</sup>。从内养护的角度, SAP 在混凝土中的用量一般根据其在水泥浆体中的吸水倍率以及额外引入水量来进行设计<sup>[28]</sup>。Olawuyi 等<sup>[29]</sup>认为在低水灰比的高性能混凝土中,建议将 SAP 的掺入量限制为 0.3% 左右。然而,对于裂纹自封堵而言,为了保证较好的封堵效果, SAP 掺量在 0.5% 到 1.0% 之间较为合适<sup>[30]</sup>,这一掺量水平明显高于其在内养护混凝土中的掺量范围(一般不超过 0.5%)。Sun 等<sup>[31]</sup>也证实了这一点,当他们掺入 0.25%~1.00% 的水凝胶时, 28 d 砂浆抗折强度降低了 12.6%~30.1%。此外,对于自修复剂掺量的设计,钱春香等<sup>[32]</sup>提出了具有 95% 准确度的自修复理论剂量的计算方法,自修复剂分布模型如图 2。自修复剂颗粒在水泥基材料中的分布呈二项式分布(式(1)),他们使用泊松分布(式(2)、式(3))或正态分布(式(4))来近似代表自修复剂颗粒的概率密度,其中泊松分布适用于自修复剂粒径小、添加量大的水泥基材料,而正态分布适用于自修复剂粒径大、添加量小的水泥基材料。该方法也可以为水凝胶自封堵材料的剂量设计提供参考。

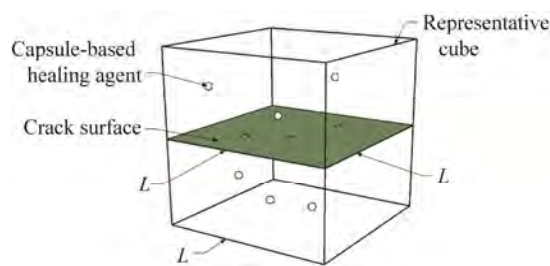


图2 自修复剂颗粒分布模型<sup>[32]</sup>

Fig. 2 Model for the theoretical analysis of self-repairing agent particles distribution<sup>[32]</sup>

$$P_n(k) = C_n^k P^k (1-p)^{n-k} \quad (k=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

$$G_p = \frac{8\pi}{3} \frac{nr_i^4 S_c}{L^3} (np < 4) \quad (2)$$

$$G_p = \frac{8\pi}{3} \left( \frac{nr_i S_c}{L^3} - \sqrt{\frac{1.6nr_i S_c}{L^3}} \right) r_i^3 \quad (3)$$

$$G_N = (np - 2\sigma_N) \frac{4}{3} \pi r_i^3 \\ = \left( n \frac{2r_i S_c}{L^3} - 2 \sqrt{n \frac{2r_i S_c}{L^3} \left( 1 - \frac{2r_i S_c}{L^3} \right)} \right) \times \frac{4}{3} \pi r_i^3 \quad (4)$$

式中:  $P$  表示单个颗粒自修复剂位于裂纹表面的概

率;  $R$  表示自修复剂颗粒的半径;  $L$  表示立方体的侧面边长;  $n$  表示添加到代表性立方体中自修复剂颗粒的量;  $k$  表示落在裂纹表面上的自修复剂颗粒的量。

**2.2.3 添加方式** SAP 在水泥基材料中常见添加方式可分为干粉掺入(干燥状态)和预溶胀掺入(预吸水状态)<sup>[33]</sup>。这两种添加方式对混凝土性能影响相似,但其水分迁移交换机制是不同的<sup>[34]</sup>。Tan 等<sup>[35]</sup>对比了两种添加方法对水泥砂浆性能的影响,发现干粉状 SAP 颗粒和预溶胀 SAP 水凝胶分别降低砂浆收缩率约 32.2%和 14.5%。这种在加入拌合水之前将干粉状的 SAP 与粉状胶凝材料一起加入的方式,使 SAP 在高碱性环境中的吸水能力大大降低(约为自来水的 1/10)。Woyciechowski 等<sup>[34]</sup>研究了各种添加方法,并且考虑了水泥基材料力学性能的保持,认为预吸水 SAP 的应用同样有效。由于预溶胀的 SAP 不易均匀地分散在水泥基体中,并且在搅拌过程中会过快地释放出水(释放的水分无法被精确计算),所以可能导致混凝土的性能不稳定<sup>[30, 36]</sup>。因此, SAP 自封堵材料在混凝土中优先推荐采用干粉掺入的方式。

由此可见, SAP 水凝胶的粒径、掺量及添加方式是裂纹自封堵混凝土设计及制备过程中需要重点考虑的因素。1) 在粒径方面,大粒径的 SAP 也会增加溶胀后水凝胶的尺寸,从而有助于提高其裂缝封堵能力,但会对混凝土强度造成较大负面影响。相反,小粒径的水凝胶颗粒可减少初始孔洞的大小,且增加了水凝胶颗粒在水泥内部的分布密度,因此增大了水凝胶颗粒与随机裂缝相交的概率。目前, SAP 水凝胶粒径对裂纹封堵效果影响的研究仍不够系统,且研究者得出的结论也尚未形成统一认识,结合已有结果,认为 SAP 粒径不宜超过 300~600  $\mu\text{m}$ 。2) 在掺量方面,为了保证裂纹自封堵效果, SAP 掺量在 1.0%以内较为合适,但对于裂纹宽度更大的水泥基材料, SAP 掺量可适当提高。3) 在添加方式方面,尽管 SAP 以预吸水溶胀的形式掺入,同样具有裂纹自封堵效果;但考虑到预溶胀水凝胶早期释水不易控制,且絮凝的水凝胶不易均匀分散,推荐 SAP 自封堵材料以干粉的形式添加。

### 3 SAP 水凝胶对水泥基材料开裂后性能恢复的影响

目前,国内外关于水泥基材料自愈合及自封堵

性能的研究主要集中于抗渗性能、力学性能及耐久性恢复。从 SAP 溶胀封堵裂纹的作用原理来看,其自封堵作用更多是促进开裂后材料抗渗性能的快速恢复。由于水凝胶自身力学强度较低,其对水泥基材料力学性能的恢复能力有限;但从长期作用来看,水凝胶内部富含的水分也在一定程度上促进了 C-S-H 凝胶等产物形成,特别是,对于活性纳米材料复合的水凝胶,其对水泥基材料力学性能恢复效果更为明显。在耐久性方面,由于水凝胶对裂缝形成了有效封堵,也在一定程度上阻止了有害离子的侵入,因此也有助于耐久性的恢复。

#### 3.1 抗渗性恢复

对于自封堵材料而言,裂纹愈合封堵效果最直观的表现是抗渗性能的恢复。为了避免水凝胶溶胀后在水泥基体中留下大孔, Wang 等<sup>[11]</sup>发现,采用 pH 响应型水凝胶包覆细菌孢子,利用 pH 敏感性限制水凝胶在水泥浆体中的初始溶胀能力,在添加 1%由水凝胶包覆的细菌孢子时,混凝土裂缝处水流量减少达 81%~90%,而抗压强度仅降低了约 5%。Chindasiriphan 等<sup>[37]</sup>通过粉煤灰和 SAP 水凝胶的复合,来增强混凝土的裂纹愈合封堵能力,发现裂缝的闭合主要与水凝胶、碳酸钙、C-S-H 凝胶等产物的形成有关,28 d 裂缝抗渗性恢复率达到 100%。总体而言, SAP 水凝胶对裂纹的快速封堵效果良好,对 0.3 mm 以下的裂纹容易实现完全封堵<sup>[18, 20, 38-39]</sup>,但是更大宽度的裂缝则需要更长时间或与其他活性矿物材料复合实现裂缝的完全愈合封堵。

#### 3.2 力学性能恢复

一般而言, SAP 水凝胶对水泥基材料力学性能的影响,主要由水凝胶释水萎缩后留下的宏观孔洞引起<sup>[24, 40-41]</sup>。此外, SAP 水凝胶也可能夹带空气降低混凝土的力学性能<sup>[42]</sup>。例如, Craeye 等<sup>[43]</sup>发现添加 SAP 会降低混凝土的力学强度和弹性模量,另一方面, SAP 的添加量越高,混凝土的蠕变变形越大。为了改善或消除水凝胶对混凝土本体强度的降低,有研究者用活性纳微粒子对水凝胶进行复合改性。例如, Bose 等<sup>[20]</sup>将无定形二氧化硅和聚丙烯酰胺交联改性的复合水凝胶颗粒加入水泥浆体中,发现其对于后期抗压强度有提升作用。对于早期力学性能, Deng 等<sup>[23]</sup>发现,在使用 SAP 对高延性水泥基材料进行自修复时,尽管 SAP 会降低试样的抗压强度,但在满足结构力学要求的同时,试样表现出良好的裂纹自封堵效果;并且力学性能的恢复率随 SAP 掺

量的增加而提升, 在 4% 的 SAP 掺量下效果最佳。

### 3.3 耐久性恢复

SAP 的吸水溶胀封堵效应对于抵御水及有害物质的入侵有较好效果, 从而有助于开裂后混凝土的耐久性恢复。除了 SAP 本身溶胀产生的物理封堵外, 混凝土裂纹封堵后的耐久性恢复还依赖于碳酸钙结晶、C-S-H 形成及未反应水泥的持续水化<sup>[44–45]</sup>。Lee 等<sup>[18]</sup>通过对含有 SAP 水凝胶的混凝土进行切片, 发现水凝胶周围的未水化水泥颗粒含量明显降低, 且大量的氢氧化钙在水凝胶界面处沉淀, 这对开裂后混凝土的耐久性恢复具有积极作用, 同时也证实了水凝胶可以促进裂缝处未水化水泥颗粒的进一步反应。另一方面, Zhang 等<sup>[45]</sup>从结构构件的角度研究了 SAP 水凝胶对海洋环境中混凝土耐腐蚀性能的影响, 并利用显微镜观测了裂缝自封堵行为, 研究发现添加了普通水凝胶和含钙溶液处理过的水凝胶, 裂纹封堵效率分别达到 62.11% 和 84.05%, 腐蚀速率分别降低 24.07% 和 32.61%。这表明水凝胶对裂纹的封堵作用提高了开裂混凝土的耐腐蚀性。此外, Snoeck 等<sup>[46]</sup>的一项长达数年的研究发现, 水泥基体中的水凝胶可以稳定存在长达 8 年, 几乎没有劣化。该发现也证实了 SAP 作为自封堵材料对改善开裂后混凝土长期耐久性的

有效性。

## 4 水泥基材料裂纹愈合封堵评价方法

### 4.1 水渗流法

水渗流实验可以模拟实际环境, 直观地反映 SAP 的裂纹封堵能力, 是目前评价混凝土裂纹自愈及自封堵效果的主要方法。水渗流测试中, 通常会在试块内部人为制造裂缝, 并控制裂缝的宽度和裂缝开口数。测试原理如文献[8]所示, 通过储水管内的高度差和经过裂缝的水流量可计算出裂缝的水渗透率<sup>[47–48]</sup>。在进行水渗流测试时, 可以设置不同流速来模拟水的侵入状态, 在绝大多数的水渗流测试中, 水流量在起始阶段迅速增加, 并在数分钟内达到峰值, 然后在一定时间内相对恒定并最终接近或达到零<sup>[33]</sup>, 此时代表裂缝被完全封堵。但是裂纹的粗糙程度也会影响水流量, Van Mullem 等<sup>[49]</sup>发现, 即使是裂缝宽度相近, 也能获得不同的渗水速度, 这主要是由裂纹表面的粗糙程度不同而造成。此外, 由于液体所具有的黏度系数, 可能使少量水分在裂缝中残留, 因此近年来一些研究人员尝试探索具有更高精确度的方法, 如超声波法进行测试。表 1 中总结了部分研究者采用水渗流法表征水凝胶裂纹自封堵的对比效果。

表 1 水渗流测试水凝胶裂纹自封堵效果对比  
Table 1 Summary of water flow test to verify self-sealing effect of hydrogel

| Designs                   | Initial crack width | Water height/pressure gradient                                                                                | Self-sealing effect                                                                                                                | Source |
|---------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Crystallizing agents, SAP | 0.210–0.304 mm      |                                                                                                               | Flow rate can be reduced to as low as zero                                                                                         | [50]   |
| pH-sensitive SAP          | (150±20) μm         | Water level line at 500 mm in the middle of the sample; Water pressure of 0.05 bar, 1 bar, 2 bar respectively | Instant sealing efficiency up to 96%;<br>Dry and wet cycle sealing efficiency up to 98%;<br>Long-term sealing efficiency up to 99% | [27]   |
| Spherical SAP             | 0.250–0.350 mm      | Pressure gradient: 0.667 mm/mm                                                                                | Water flow decreased by 34%–72% within 13 min                                                                                      | [8]    |
| Sulfonate-modified SAP    | 200–250 μm          | Height of water flow: 280 mm                                                                                  | Water flow reduced by 72%                                                                                                          | [51]   |
| Cement, SAP               | 248–384 μm          | Height of water flow: 250 mm                                                                                  | Self-sealing efficiency up to 99%                                                                                                  | [52]   |
| SAP, Nano silica          | About 150 μm        | Height of water flow: 50 cm                                                                                   | Self-sealing efficiency up to 100%                                                                                                 | [20]   |

### 4.2 毛细吸水法

毛细吸水是评价混凝土水分传输能力的一种常用方法, 可表征自由水在混凝土基体或裂缝内的传输行为。在进行毛细吸水测试之前, 样品在 40 °C 的烘箱中进行烘干处理, 直至达到恒定质量(2 h 内质量变化小于 0.2%), 然后用铝胶带对试件进行部分防水处理, 以避免试件基体的吸水行为, 保证水分主要通过裂缝处渗入<sup>[53]</sup>。Snoeck 等<sup>[54]</sup>将样品进行 2 h 的毛细吸水处理, 然后进行中子射线图像分析, 结果表明裂纹封堵程度较低的试样吸收了更多的自由水, 而封堵程度较高的试样吸水量较少。将时间

和吸水量数据绘制成数据图, 斜率为吸水系数, 则裂纹封堵效率( $S_e$ )的计算公式<sup>[55]</sup>可表达为:

$$S_e = \frac{S_{e1} - S_{e2}}{S_{e1} - S_{e3}} \quad (5)$$

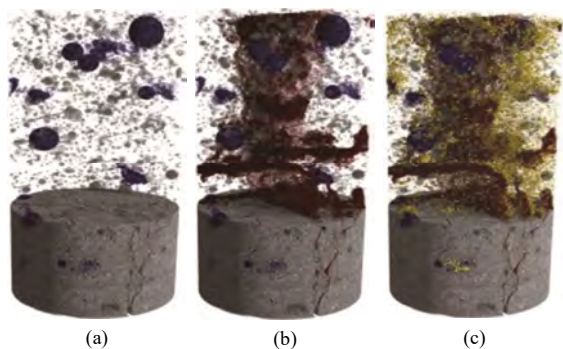
式中:  $S_{e1}$  为开裂参照试样的平均吸水系数,  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $S_{e2}$  为开裂自封堵试样的平均吸水系数,  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $S_{e3}$  为未开裂试样的平均吸水系数,  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 4.3 微观观测及图像处理法

微观观测及图像法通常与水渗流等测试方法联合使用, 以观测裂纹的愈合封堵过程及产物的填充情况。包括扫描电子显微镜、光学显微镜、X 射线

断层扫描、中子射线照相等<sup>[56]</sup>。这些方法可以对混凝土内部进行二维或三维成像,直观地看到裂纹的扩展或愈合封堵过程、面积变化等,有助于深入研究裂缝的动态演变<sup>[5]</sup>。

显微观测及图像处理法可被用来观察裂纹表面<sup>[57]</sup>,获得裂纹表面的轮廓图<sup>[58-59]</sup>,观测裂纹宽度和产物封堵情况等<sup>[58]</sup>。光学显微镜是最为便捷和直观的一种观测方式,可以简单观测水凝胶溶胀产物封堵情况;通过电子显微镜,可以观察 SAP 在裂缝中的封堵产物及界面区结构,再经 EDS 分析,进一步确定产物的化学组成。因此,多数情况都会通过显微镜对 SAP 的裂纹自封堵效果进行评价<sup>[60]</sup>。另外,X 射线断层扫描技术(CT)基于材料的原子数和密度的不同,以及衍射出的 X 射线束在不同的位置衰减,可以将试块中的裂缝、孔隙、愈合或封堵产物等不同结构渲染到 3D 图像中(图 3)<sup>[60]</sup>,从而实现裂缝内 SAP 水凝胶封堵状态的可视化和量化<sup>[54,61-62]</sup>。中子射线照相是另一种可以表征 SAP 水凝胶体积变化的方法,同时实现水在混凝土内部渗透过程的可视化。Snoeck 等<sup>[54]</sup>通过水渗流法和中子照相法研究了 SAP 水凝胶在不同时间的裂缝封堵过程,用三维图像较好的展示了试样内部的自修复效果,量化了裂纹内的封堵产物。



Porosity in grey and blue, the crack in red and the formed healing products in yellow.

图 3 X 射线断层扫描裂纹自封堵效果<sup>[60]</sup>

Fig. 3 X-ray tomography of crack self-sealing<sup>[60]</sup>

#### 4.4 超声波法

超声波是一种常见的无损检测方法,可实现对混凝土裂纹自修复的现场无损检测<sup>[63-64]</sup>。常用的超声波测试方法包括超声波脉冲速度(UPV)<sup>[65]</sup>、表面波传输<sup>[66-67]</sup>、尾波干涉<sup>[67]</sup>和透射波<sup>[1,66]</sup>等。然而,目前超声波法用于裂纹自封堵表征相对较少。Liu 等<sup>[67]</sup>使用尾波干涉法,评估了微生物自愈合混凝土整个养护期的自愈合程度,此方法具有高度敏感性、

高度重复性和实时监测的特性,对 SAP 的裂纹自封堵全周期评价有重要意义。Lefever 等<sup>[64]</sup>通过表面波对添加 SAP 水凝胶和纳米 SiO<sub>2</sub> 的水泥基材料进行裂纹自封堵效果评估。该方法证实了超声波用于 SAP 自封堵评价的可行性,同时通过与数值计算相结合,可以估算水凝胶封堵物的刚度。Lefever 等<sup>[1]</sup>的另一项研究中,采用透射波对添加不同类型 SAP 水凝胶的裂纹封堵性能进行了评价,并采用超声测绘的方法对水泥基材料内部进行可视化。超声波速度以颜色区分,在开裂前,试样的速度分布均匀,其中掺加 SAP 的 2 个样品速度偏低与水凝胶留下的孔隙有关;在开裂后,随着愈合时间的延长,所有试样的传播速度开始由低到高增长,在经历了 28 d 干湿养护后,超声波传播速度差异性逐渐减小,表明裂缝逐渐被封堵填充。

综上所述,水渗流法、显微观测及图像处理法是目前最常用的自愈合及自封堵表征方法,但上述方法主要适用于实验室条件下特定形状及尺寸的样品,难以对实际工程中混凝土的裂纹愈合或封堵进行有效表征;超声法具有设备便携,不受试件尺寸、形状、测试位置限制等特点,能够弥补上述测试方法的局限性,对实际服役环境下混凝土的裂纹自封堵性能检测具有较大优势。然而,目前超声波用于自修复混凝土的测试表征仍相对较少,且水凝胶初始孔洞、裂缝处水凝胶含水状态等对超声传输结果的影响还不明确。因此,超声波法评价水凝胶的裂纹自封堵性能还需进一步开展系统深入研究,以充分论证其适用性和可靠性。

## 5 总结与展望

本文对水凝胶作为裂纹自封堵材料的作用原理、设计方法、性能影响及测试评价方法进行了系统综述,通过对最新研究结果的总结归纳,提出如下结论或建议:

1) SAP 自封堵材料设计、制备及改性的基本原则应是,抑制 SAP 添加到混凝土中的初始溶胀行为,提高混凝土开裂后的二次溶胀行为。通过抑制水凝胶的初始溶胀倍率,有助于减小溶胀后形成的宏观孔洞,从而降低对混凝土强度的负面影响;同时,在对水凝胶化学改性时,应使其具备较高的溶胀倍率,以保证裂纹出现后水凝胶能够快速产生较大的体积膨胀,从而保证对裂纹的有效封堵。

2) SAP 自封堵材料的粒径、掺量及添加方式是其用于水泥基材料中需要重点考虑的因素。为了保

证水凝胶足够的裂纹封堵效率,并尽可能降低宏观孔洞所导致的力学负面影响,建议SAP粒径不宜超过300~600 μm,掺量范围宜在1%以内,同时推荐以干粉的形式添加SAP,以保证较好的分散效果。

3) SAP水凝胶在裂缝出现后的二次吸水溶胀行为是影响自封堵响应速度及效率的关键。理论上,SAP在混凝土内应尽可能少吸收含有复杂离子的孔溶液,以在二次溶胀自封堵过程中产生更大的体积比。因此,建议从SAP水凝胶初始溶胀、二次溶胀及循环溶胀行为的角度进行优化设计,进一步提升水凝胶的裂缝自封堵效率。

4) 水渗流法、显微镜观测及图像处理法是目前最常用的自修复表征方法,但难以对实际工程中混凝土的裂纹修复效果进行有效表征;超声法具有便携,不受试件尺寸、形状限制等优势,对实际服役环境下混凝土的裂纹自封堵检测具有较好适用性。然而,目前超声波用于裂纹自封堵的测试表征仍相对较少,且水凝胶初始孔洞、裂缝处水凝胶含水状态等对超声传输结果的影响还不明确,有待进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] LEFEVER G, VAN HEMELRIJCK D, AGGELIS D G, et al. Evaluation of self-healing in cementitious materials with superabsorbent polymers through ultrasonic mapping[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 344: 128272.
- [2] 李静卢. 基于胶囊化页岩陶砂的水泥基材料自愈合性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
LI Jinglu. Study on self-healing properties of cement-based materials based on encapsulated shale ceramic sand(in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [3] 杜玮. 异氰酸酯微胶囊制备及其对混凝土自修复性能的影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.  
DU Wei. Study on preparation of isocyanate microcapsules and its influence on self-repairing performance of concrete(in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [4] 张鹏, 郭得阳, 鲍玖文, 等. 基于微生物矿化作用的混凝土自愈合性能研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(2): 544–554.  
ZHANG Peng, GUO Deyang, BAO Jiuwen, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(2): 544–554.
- [5] WU M, JOHANNESSON B, GEIKER M. A review: self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 28(1): 571–583.
- [6] 阙黎黎, 施惠生, 翟广飞, 等. 高延展性纤维增强水泥基复合材料自愈合行为[J]. *硅酸盐学报*, 2011, 39(4): 682–689.  
KAN Lili, SHI Huisheng, ZHAI Guangfei, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2011, 39(4): 682–689.
- [7] 杨进. 高吸水树脂内养护混凝土的微观结构与性能[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.  
YANG Jin. Microstructure and properties of super absorbent resin internal curing concrete(in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [8] HONG G, CHOI S. Rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 143: 366–375.
- [9] WANG C Y, BU Y H, GUO S L, et al. Self-healing cement composite: Amine- and ammonium-based pH-sensitive superabsorbent polymers[J]. *Cem Concr Compos*, 2019, 96: 154–162.
- [10] FENG J H, DONG H, WANG R X, et al. A novel capsule by poly(ethylene glycol) granulation for self-healing concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2020, 133: 106053.
- [11] WANG J Y, MIGNON A, TRENSON G, et al. A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 93: 309–322.
- [12] HU M M, GUO J T, DU J B, et al. Development of Ca<sup>2+</sup>-based, ion-responsive superabsorbent hydrogel for cement applications: self-healing and compressive strength[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2019, 538: 397–403.
- [13] MIGNON A, VERMEULEN J, GRAULUS G J, et al. Characterization of methacrylated alginate and acrylic monomers as versatile SAPs[J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 168: 44–51.
- [14] 申莹琛. 复合高吸水树脂的制备及对水泥基材料性能的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.  
SHEN Yinghui. Study on preparation of composite super absorbent resin and its influence on properties of cement-based materials(in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [15] 刘加平, 汤金辉, 韩方玉. 现代混凝土增韧防裂原理及应用[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(10): 47–54.  
LIU Jiaping, TANG Jinhui, HAN Fangyu. *China Civ Eng J*(in Chinese), 2021, 54(10): 47–54.
- [16] GARTNER E M, TANG F J, WEISS S J. Saturation factors for calcium hydroxide and calcium sulfates in fresh Portland cement pastes[J]. *J Am Ceram Soc*, 1985, 68(12): 667–673.
- [17] SCHWEINS R, HUBER K. Collapse of sodium polyacrylate chains in calcium salt solutions[J]. *Eur Phys J E*, 2001, 5(1): 117–126.
- [18] LEE H X D, WONG H S, BUENFELD N R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers[J]. *Cem Concr Res*, 2016, 79: 194–208.
- [19] LEE H D, WONG H S, BUENFELD N R. Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete[J]. *Adv Appl Ceram*, 2010, 109(5): 296–302.
- [20] BOSE B, DAVIS C R, ERK K A. Microstructural refinement of cement paste internally cured by polyacrylamide composite hydrogel particles containing silica fume and nanosilica[J]. *Cem Concr Res*, 2021, 143: 106400.
- [21] HE R, TAN Y W, CHEN H X, et al. Preparation and properties of novel superabsorbent polymer (SAP) composites for cementitious materials based on modified metakaolin[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 258: 119575.
- [22] 鞠家佳, 廖宜顺, 陈磊, 等. SAP与硅灰复掺对水泥强度与电阻率的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(9): 6–9.  
JU Jiajia, LIAO Yishun, CHEN Lei, et al. *China Concr Cem Prod*(in

- Chinese), 2018(9): 6–9.
- [23] DENG H W, LIAO G Y. Assessment of influence of self-healing behavior on water permeability and mechanical performance of ECC incorporating superabsorbent polymer (SAP) particles[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 170: 455–465.
- [24] SNOECK D, DEBO J, DE BELIE N. Translucent self-healing cementitious materials using glass fibers and superabsorbent polymers[J]. *Dev Built Environ*, 2020, 3: 100012.
- [25] LEFEVER G, SNOECK D, AGGELIS D G, et al. Evaluation of the self-healing ability of mortar mixtures containing superabsorbent polymers and nanosilica[J]. *Materials*, 2020, 13(2): 380.
- [26] WYRZYKOWSKI M, IGARASHI S I, LURA P, et al. Recommendation of RILEM TC 260-RSC: using superabsorbent polymers (SAP) to mitigate autogenous shrinkage[J]. *Mater Struct*, 2018, 51(5): 1–7.
- [27] GRUYAERT E, DEBBAUT B, SNOECK D, et al. Self-healing mortar with pH-sensitive superabsorbent polymers: testing of the sealing efficiency by water flow tests[J]. *Smart Mater Struct*, 2016, 25(8): 084007.
- [28] 张媛媛, 毛倩瑾, 李松涛, 等. 高吸水树脂作为混凝土内养护材料的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(11): 3009–3020.
- ZHANG Yuanyuan, MAO Qianjin, LI Songtao, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(11): 3009–3020.
- [29] OLAWUYI B J, BABAFEMI A J, BOSHOF W P. Early-age and long-term strength development of high-performance concrete with SAP[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 267: 121798.
- [30] SNOECK D, VELASCO L F, MIGNON A, et al. The effects of superabsorbent polymers on the microstructure of cementitious materials studied by means of sorption experiments[J]. *Cem Concr Res*, 2015, 77: 26–35.
- [31] SUN B B, WU H, SONG W M, et al. Design methodology and mechanical properties of Superabsorbent Polymer (SAP) cement-based materials[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 204: 440–449.
- [32] ZHANG X, QIAN C X. Effects of the crack geometric features on the probability density of spherical healing agent particles in concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 301: 124083.
- [33] 李婉文, 赖俊英, 林学智, 等. 多孔型高吸水树脂对水泥净浆流动性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(2): 171–177.
- LI W W, LAI J Y, LIN X Z, et al. *J Build Mater(in Chinese)*, 2022, 25(2): 171–177.
- [34] WOYCIECHOWSKI P, KALINOWSKI M. The influence of dosing method and material characteristics of superabsorbent polymers (SAP) on the effectiveness of the concrete internal curing[J]. *Materials*, 2018, 11(9): 1600.
- [35] TAN Y W, CHEN H X, WANG Z D, et al. Performances of cement mortar incorporating superabsorbent polymer (SAP) using different dosing methods[J]. *Materials*, 2019, 12(10): 1619.
- [36] SNOECK D, SCHAUBROECK D, DUBRUEL P, et al. Effect of high amounts of superabsorbent polymers and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with a water-to-cement ratio of 0.50[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 72: 148–157.
- [37] CHINDASIRIPHAN P, YOKOTA H, PIMPAKAN P. Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 233: 116975.
- [38] SULEIMAN A R, ZHANG L V, NEHDI M L. Quantifying crack self-healing in concrete with superabsorbent polymers under varying temperature and relative humidity[J]. *Sustainability*, 2021, 13(24): 13999.
- [39] MIGNON A, SNOECK D, DUBRUEL P, et al. Crack mitigation in concrete: superabsorbent polymers as key to success?[J]. *Materials*, 2017, 10(3): 237.
- [40] BALOCH H, USMAN M, RIZWAN S A, et al. Properties enhancement of super absorbent polymer (SAP) incorporated self-compacting cement pastes modified by nano silica (NS) addition[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 203: 18–26.
- [41] 孔祥明, 张珍林. 高吸水性树脂对高强混凝土浆体孔结构的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(11): 1474–1480.
- KONG Xiangming, ZHANG Zhenlin. *J Chin Ceram Soc*, 2013, 41(11): 1474–1480.
- [42] BENTZ D P, JENSEN O M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking[J]. *Cem Concr Compos*, 2004, 26(6): 677–685.
- [43] 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]. *Constr Build Mater*, 2011, 25(1): 1–13.
- [44] YANG Y Z, LEPECH M D, YANG E H, et al. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles[J]. *Cem Concr Res*, 2009, 39(5): 382–390.
- [45] ZHANG C C, GUAN X C, TIAN J L, et al. Corrosion resistance of RC/UHTCC beams with various healing promoters in marine environment[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 131: 104604.
- [46] SNOECK D, DE BELIE N. Autogenous healing in strain-hardening cementitious materials with and without superabsorbent polymers: an 8-year study[J]. *Front Mater*, 2019, 6: 48.
- [47] LEPECH M D, LI V C. Water permeability of engineered cementitious composites[J]. *Cem Concr Compos*, 2009, 31(10): 744–753.
- [48] HOU S L, LI K, WU Z M, et al. Quantitative evaluation on self-healing capacity of cracked concrete by water permeability test—A review[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 127: 104404.
- [49] VAN MULLEM T, GRUYAERT E, DEBBAUT B, et al. Novel active crack width control technique to reduce the variation on water permeability results for self-healing concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 203: 541–551.
- [50] PARK B, CHOI Y C. Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs)[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 189: 1054–1066.
- [51] TENÓRIO FILHO J R, VERMOESEN E, MANNEKENS E, et al. Enhanced durability performance of cracked and uncracked concrete by means of smart in-house developed superabsorbent polymers with alkali-stable and-unstable crosslinkers[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 297: 123812.
- [52] GWON S, AHN E, SHIN M. Water permeability and rapid self-healing of sustainable sulfur composites using superabsorbent polymer and binary cement[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 265: 120306.
- [53] SNOECK D, VAN DEN HEEDE P, VAN MULLEM T, et al. Water

- penetration through cracks in self-healing cementitious materials with superabsorbent polymers studied by neutron radiography[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 113: 86–98.
- [54] SNOECK D, STEUPERAERT S, VAN TITTELBOOM K, et al. Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography[J]. *Cem Concr Res*, 2012, 42(8): 1113–1121.
- [55] VAN MULLEM T, ANGLANI G, DUDEK M, et al. Addressing the need for standardization of test methods for self-healing concrete: an inter-laboratory study on concrete with macrocapsules[J]. *Sci Technol Adv Mater*, 2020, 21(1): 661–682.
- [56] TANG W, KARDANI O, CUI H Z. Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials—A review[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 81: 233–247.
- [57] HOMMA D, MIHASHI H, NISHIWAKI T. Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites[J]. *J Adv Concr Technol*, 2009, 7(2): 217–228.
- [58] NISHIWAKI T, KODA M, YAMADA M, et al. Experimental study on self-healing capability of FRCC using different types of synthetic fibers[J]. *J Adv Concr Technol*, 2012, 10(6): 195–206.
- [59] WIKTOR V, JONKERS H M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2011, 33(7): 763–770.
- [60] SNOECK D, DEWANCKELE J, CNUDDÉ V, et al. X-ray computed microtomography to study autogenous healing of cementitious materials promoted by superabsorbent polymers[J]. *Cem Concr Compos*, 2016, 65: 83–93.
- [61] VAN TITTELBOOM K, SNOECK D, VONTOBEL P, et al. Use of neutron radiography and tomography to visualize the autonomous crack sealing efficiency in cementitious materials[J]. *Mater Struct*, 2013, 46(1): 105–121.
- [62] HONG G, CHOI S. Modeling rapid self-sealing of cracks in cementitious materials using superabsorbent polymers[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 164: 570–578.
- [63] 贾强, 姜欢, 张鑫. 微生物沉积碳酸钙封堵混凝土裂缝的试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(4): 663–666.
- JIA Qiang, JIANG Huan, ZHANG Xin. J Build Mater(in Chinese), 2018, 21(4): 663–666.
- [64] LEFEVER G, DANNY V H, DIDIER S, et al. Self-healing assessment of cementitious mortars through ultrasonic monitoring[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 133: 104683.
- [65] ZHU Y, ZHANG Z C, CHEN X, et al. Non-destructive methods to evaluate the self-healing behavior of engineered cementitious composites (ECC)[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 230: 116753.
- [66] AGGELIS D G, SHIOTANI T. Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements[J]. *Cem Concr Compos*, 2007, 29(9): 700–711.
- [67] LIU S K, BUNDUR Z B, ZHU J Y, et al. Evaluation of self-healing of internal cracks in biomimetic mortar using coda wave interferometry[J]. *Cem Concr Res*, 2016, 83: 70–78.