

高吸水树脂作为混凝土内养护材料的研究进展

张媛媛, 毛倩瑾, 李松涛, 王子明

(北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124)

摘 要: 为保证混凝土质量, 在混凝土施工过程中进行合理充分的养护是必不可少的。目前常用的洒水、覆膜等传统的外养护方式存在养护深度有限、对构件形状、施工部位依赖性大等问题, 而采用内养护方式能够很好地解决这些问题, 对于易于收缩开裂、不便进行外养护的部位和结构具有很好的应用价值。本工作回顾了内养护材料的发展, 重点介绍了具有发展前景的内养护材料—高吸水树脂(SAP)的种类与吸/释水作用机理及相应的体积变化, 综合归纳了在水泥基材料中 SAP 的吸/释水行为及其影响因素, 探讨了 SAP 的掺入对于水泥基材料水化进程、孔隙结构和宏观性能的影响, 并且对 SAP 作为混凝土内养护材料的发展方向进行了展望。

关键词: 高吸水树脂; 内养护; 吸-释水行为; 水化; 孔隙结构

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)11-3009-12

网络出版时间: 2022-10-01



Research Progress on Super Absorbent Polymer as Internal Curing Materials of Concrete

ZHANG Yuanyuan, MAO Qianjin, LI Songtao, WANG Ziming

(Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: It is essential for the quality of concrete to carry out reasonable and adequate curing during the construction of concrete. The conventional external curing methods such as watering and coating, which are commonly used at present, have some problems of limited curing depth and dependence on the shape and construction part of the member. The internal curing method can solve these problems well and has a good application potential for the parts and structures that are easy to shrink, crack and inconvenient for external curing. This review represented recent development on the internal curing materials, and focused on the types of super absorbent polymer (SAP) as the promising internal curing materials and the mechanism of water absorption/release and the corresponding volume change. The water absorption/release behavior of SAP in cementitious materials and its influencing factors were summarized. The influence of SAP on the hydration process, pore structure and macroscopic properties of cementitious materials was discussed. In addition, the future direction of using SAP as an internal curing material for concrete was also envisaged.

Keywords: super absorbent polymer; internal curing; water absorption-release behavior; hydration; pore structure

混凝土作为一种传统建筑材料, 具有原材料丰富、造价低廉、优异的耐久性能和力学性能等优点, 广泛应用于建筑工程、道路工程、桥梁工程中^[1]。在混凝土施工过程中, 对混凝土进行科学合理的养护是保证混凝土质量的重要环节和关键措施, 可是长期以来, 混凝土养护的作用和重要性并没有得到

应有的重视, 养护方法和相关养护材料的研究还有待深入和加强。混凝土的养护方式包括外养护和内养护, 如图 1 所示。传统的外养护方式包括洒水、覆膜、覆草等, 对高强混凝土结构养护很难深入到内部, 且不利于对混凝土的立面、顶面等施工部位及特殊的构件形状进行养护^[2-3], 而采用内养护方式

收稿日期: 2022-05-15。 修订日期: 2022-06-04。

基金项目: 国家自然科学基金(51621003)。

第一作者: 张媛媛(1998—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 王子明(1963—), 男, 博士, 教授。

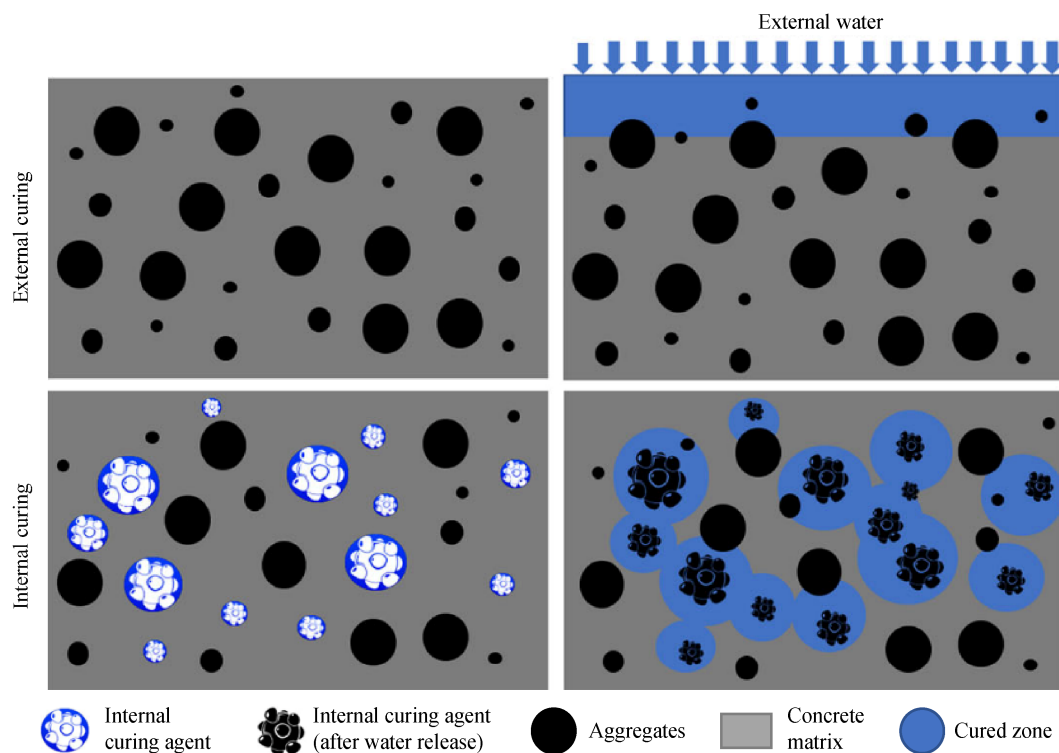
Received date: 2022-05-15. Revised date: 2022-06-04.

First author: ZHANG Yuanyuan (1998—), female, Master candidate.

E-mail: Zhangyuanyuan@emails.bjut.edu.cn

Correspondent author: WANG Ziming (1963—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wangziming@bjut.edu.cn

图1 外养护和内养护作用机理^[4]Fig. 1 External and internal curing mechanism^[4]

能够很好地解决这些问题^[5]。故内养护技术的应用对于超长结构、薄板结构、大体积混凝土、高性能混凝土等易收缩、开裂、维修困难的结构具有重要的实用价值^[6–8]。

目前,国内外常用的混凝土内养护材料主要有多孔轻集料和高吸水树脂(SAP)。其中,多孔轻集料吸水倍率一般为自重的5%~30%,通常需要24 h以上才能达到饱和,如陶粒、沸石、膨润土等^[9–14]。在使用多孔轻集料作为内养护材料时,易产生新拌混凝土集料上浮,硬化混凝土强度明显下降等问题^[15–17]。2001年丹麦学者Jensen提出将SAP作为内养护材料应用于混凝土中^[18],SAP不仅能够迅速吸收其自重几百倍乃至上千倍的液态水,同时其三维网络结构能够很好地将液态水储存在聚合物网络内部。相比于其它内养护材料,SAP具有掺量小,吸水快且吸水倍率大的特点^[19],是一种具有发展前景的内养护材料。为了更好地促进SAP作为内养护材料在混凝土中的应用,本文在详细总结SAP吸-释水行为的基础上,综述了SAP对于水泥基材料孔隙结构等微观结构及工作性能、力学性能等宏观性能的影响,指出了SAP作为内养护材料的未来研究方向,以期进一步地推动内养护技术的发展。

1 SAP的种类及其吸水作用机理

SAP是一种典型的功能高分子材料,具有优异的吸水 and 保水能力,已经在农业、林业、工业和日常生活等领域获得了广泛的应用。按照原料来源可将SAP分为3大类:天然高分子、合成高分子、共混物及复合物^[20]。目前聚丙烯酸钠和丙烯酸-丙烯酰胺共聚物是作为混凝土内养护材料研究最多的2种SAP^[21–22],少数研究者根据水泥基材料的特性尝试合成或应用了一些其它种类的SAP,如有机-无机复合型SAP^[23–24]、磷酸盐系SAP^[25]等,在作为混凝土内养护材料应用方面,SAP种类的探索还有很大的空间。

SAP具有吸水、储水、释水的特性。SAP内部的羧基、羟基等亲水性基团首先与水分子产生水合作用,随后开始电离形成带电基团,这些带电基团一方面形成静电斥力促使聚合物网络发生扩张,另一方面形成聚合物网络内外的离子渗透压促进水分子的渗入。随着聚合物网络的扩张,其弹性收缩力也在增加,将逐渐抵消阴离子间的静电斥力,同时随着水分子的渗入,聚合物网络内外渗透压差也逐渐减小,最终SAP达到吸水平衡^[20]。而当SAP置于高浓度的溶液中时,一方面,饱水SAP会由于树脂内外的渗透压差而表现出释水行为;另一方面,

Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Cu^{2+} 等多价阳离子会与 SAP 内部的 $-COO^-$ 等基团结合或与其上的阳离子进行离子交换形成配合物,使得聚合物链上阴离子基团所

带的电负性大大减少,阴离子基团之间的静电斥力降低,从而抑制了聚合物网络的扩张,导致 SAP 吸水倍率降低^[26-27],如图 2 所示。

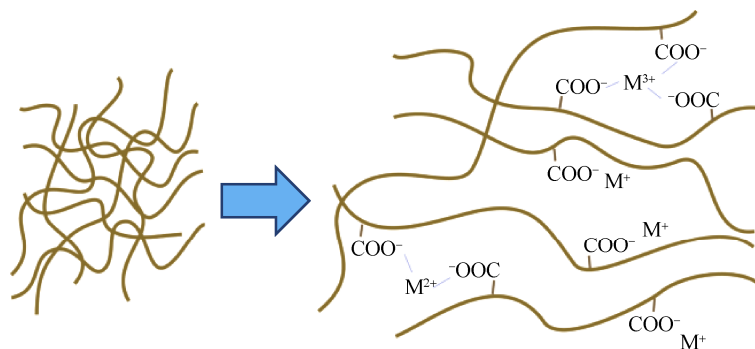


图 2 金属离子对 SAP 溶胀过程的影响^[27]

Fig. 2 Influence of metal ions on the swelling process of SAP^[27]

2 SAP 在溶液中的吸-释水行为及体积变化

SAP 在溶液中的吸-释水行为及体积变化直接影响着其作为内养护材料的应用性能。不同种类 SAP 在溶液中呈现出不同的吸水特性,表 1 列举了

不同种类的 SAP 在去离子水和在水泥孔隙溶液中的饱和吸水倍率及其随着时间推移吸水倍率的变化。其中, SAP 在水泥孔隙溶液中的吸水行为会受到 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 等离子影响^[28],随着浸泡时间的延长, SAP 在水泥浆体孔隙溶液中溶胀性能会大大减小,表现出不同于纯水中的吸水行为^[29-30]。

表 1 不同种类的 SAP 在去离子水和水泥孔隙溶液中的吸水倍率

Table 1 Absorption capacity of different types of SAP in deionized water and cement pore solution

Materials	Particle size/ μm	Absorption capacity(g/g)/Absorption(saturation)time		References
		Deionized water	Cement pore solution	
Sodium polyacrylate	140	475 g·g ⁻¹ /2 min saturation	40 g·g ⁻¹ /1 min 11 g·g ⁻¹ /30 min 6-9 g·g ⁻¹ /100 min	[31]
Sodium polyacrylate	197	275 g·g ⁻¹ /10 min saturation	30 g·g ⁻¹ /5 min 23 g·g ⁻¹ /30 min 6-9 g·g ⁻¹ /100 min	[31]
Poly(sodium acrylate-co-acrylamide)	68	350-400 g·g ⁻¹ /10 min saturation	36-40 g·g ⁻¹ /1 min 15 g·g ⁻¹ /100 min 5-6 g·g ⁻¹ /1000 min	[32]
Poly(sodium acrylate-co-acrylamide)	100	250 g·g ⁻¹ /10 min saturation	26-27 g·g ⁻¹ /10 min 28-31 g·g ⁻¹ /1 h 22 g·g ⁻¹ /24 h	[25]
Polyacrylamide	87	12-13 g·g ⁻¹ /10 min saturation	10-12 g·g ⁻¹ /1 min 15 g·g ⁻¹ /100 min 22 g·g ⁻¹ /1000 min	[32]
Starch grafting acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid copolymer	125	271 g·g ⁻¹ /2 h saturation	87 g·g ⁻¹ /2 h saturation	[23]
Organic/inorganic compound super absorbent polymer (Starch, acrylamide, 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid and sodium silicate solution are used as raw materials)	75	268 g·g ⁻¹ /2 h saturation	86 g·g ⁻¹ /2 h saturation	[23]
Sodium vinyl sulfonate and 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid copolymer	100	60-66 g·g ⁻¹ /10 min saturation	20-21 g·g ⁻¹ /10 min 22 /1 h 21-22 g·g ⁻¹ /24 h	[25]

目前大多数研究关注于 SAP 在水泥孔隙溶液中吸水倍率的变化,而随着 SAP 吸水过程的进行,其体积和形态也会随之变化,相应地会对水泥基材料的孔隙结构产生影响。因此,应该考察 SAP 在吸液过程中体积与形态的变化。Li 等^[33]通过光学显微镜观察了球形聚丙烯酸系 SAP 在吸收自来水的过程中粒径的变化,如图 3 所示。SAP 颗粒在干燥状态下的平均尺寸约为 107 μm ,在自来水中 20 s 左右达到吸水平衡,饱和吸水量约为 24.9 g/g,吸水平衡后平均直径为 345 μm (约为干燥状态下 3 倍)。此外,Esteves^[34]和 Lura 等^[35]通过光学显微镜分别观察了不同粒径的球形聚丙烯酸系 SAP 和丙烯酸-丙烯酰胺共聚型 SAP 在水泥孔隙溶液中的粒径变化发现,达到吸液平衡后的 SAP 颗粒直径为干燥状态下的 2~3 倍,体积则为干燥状态下的 8~27 倍。

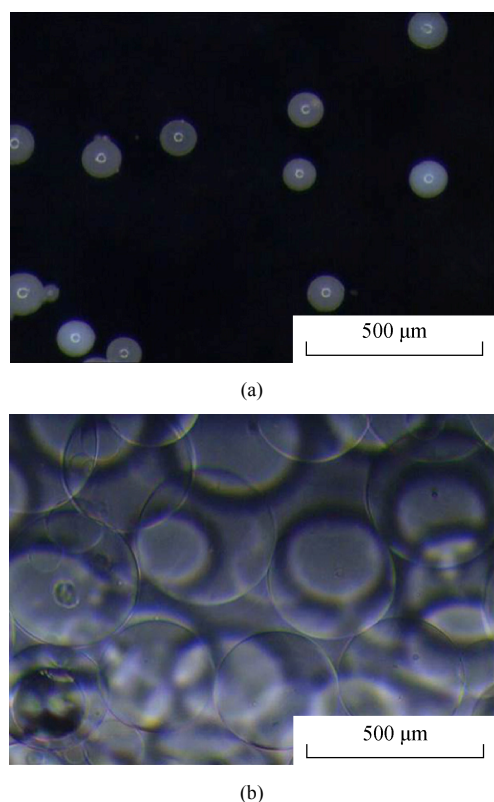


图 3 SAP 在干燥状态下(a)和在自来水中(b)粒径变化的对比图^[33]

Fig. 3 Images of the particle size change of SAP in dry state (a) and in tap water (b)^[33]

3 SAP 在水泥基材料中的吸-释水行为及其影响因素

SAP 对水泥基材料工作性能、收缩性能等宏观性能的影响归根结底受 SAP 在水泥基材料内部的

吸-释水状态控制。因此,探究 SAP 在真实水泥浆体内部的吸-释水状态演变对于 SAP 作为内养护材料在水泥基材料中的应用是至关重要的。

近年来,研究者们采用核磁共振^[36-40]、中子照相技术^[41]、体视显微镜^[42-44]等方法来探索 SAP 在水泥基材料内部的吸-释水行为。研究发现当 SAP 以不同方式掺入时, SAP 会表现出不同的吸-释水行为。Liu 等^[38]以干掺的方式引入聚丙烯酸系 SAP,并采用低场核磁共振检测法得到了干掺 SAP 在水泥水化不同阶段的含水量,研究发现 SAP 在水泥水化 4~5 h 之前一直处于吸水状态,随后开始释水。Yang 等^[45]以预吸水的方式引入聚丙烯酸系 SAP,他选用了粒径为 1.5~2 mm 的球形 SAP,并测试了在不同预吸水倍率(5.0、13.5、20.0 和 40.0 倍)下 SAP 在水泥浆体硬化过程中的质量变化,通过研究发现当预吸水倍率为 5.0 和 13.5 倍时, SAP 在密封浆体中主要处于吸水状态;而当预吸水倍率为 20 和 40 倍时, SAP 在密封浆体中表现为持续释水状态,且观察到 SAP 的释水过程包括 2 个阶段,分别为渗透压释水阶段和湿度差释水阶段。此外, Schroebl 等^[41]发现不同种类的 SAP 在水泥浆体中表现出不同的吸-释水行为, Schroebl 等^[41]采用中子照相技术观察不同时刻掺加 SAP 的水泥浆体的图像发现,聚丙烯酸系 SAP 在水泥浆体制备后 22 min 时开始释放水分,在 8 h 时 SAP 的释水速率开始减慢;而丙烯酸-丙烯酰胺共聚型 SAP 在水泥浆体制备后的 1.5 h 内都没有出现释水现象,在此期间甚至出现了轻微的吸水现象。在 1.5 h 后, SAP 开始出现释水,在 4.0~5.0 h 后,释水速率稍有减慢。其次, SAP 在水泥基材料中的吸-释水行为与含有 SAP 水泥基材料的水灰比也有关, Justs 等^[46]和 Zhang 等^[47]均采用等温量热法发现对于水灰比为 0.25~0.42 的水泥浆体,在加速期开始时,甚至在诱导期中期时, SAP 就开始出现释水现象^[46]。而在 0.50 的高水灰比下,直到加速期结束时, SAP 才开始出现释水现象,这可能是由于较高的水灰比阻碍了 SAP 颗粒中水分的释放^[47]。

总之,对于 SAP 在水泥浆体内部的吸-释水状态演变的研究是应用 SAP 作为内养护材料的前提,因此,尝试更多的方式来探索 SAP 在水泥浆体中的吸-释水状态演变过程、准确把握 SAP 在水泥基材料中的吸-释水特性是很有必要的。

4 SAP 对水泥基材料水化进程的影响

SAP 的掺入会改变水泥基材料中不同时刻的含

水量,继而会对水泥基材料中的水化进程产生影响。Li 等^[33]发现通过对水泥基材料水化进程的研究可以反映出 SAP 的吸-释水过程,他在水灰比为 0.25 的水泥浆体中掺入 0.5% SAP 并额外引水(其中内养护水灰比为 0.05),通过对比 SAP 试样组和未掺 SAP 的水灰比为 0.25 的基准组的水化速率发现,在 7.0 h 前(稍大于终凝时间),SAP 试样组和基准组的水化速率基本一样,在 7.0 h 以后,基准组的水化速率高于 SAP 试样组,而在 13.5 h 以后,SAP 试样组的水化速率高于基准组。这说明 SAP 开始时吸水导致其与基准组有相似的水化动力学,随后 SAP 将水释放到水泥浆体中,孔溶液被稀释,水泥水化速率降低,而随着 SAP 持续释水,水泥浆体内部水分消耗得到补充,从而促进水泥水化进程。Zhang 等^[47]研究了 SAP 掺量对于水灰比为 0.50 的水泥浆体的水化进程的影响,发现随着 SAP 掺量的增加,水化放热峰出现时间不断提前,但其掺量变化对水化放热峰值影响不大。此外,Kong 等^[48]通过预吸水的方式掺入 SAP,研究其对混凝土的水化放热过程的影响发现,在 7 d 和 28 d 时,预吸水 SAP 对于水泥水化的促进作用要明显低于简单增大浆体的拌合水量,他认为这是由于二者额外引入水分在水泥浆体中不同分布状态所致。

其次,SAP 的掺入对于水泥水化产物的形成也会产生影响,Zhang 等^[47]和 Esteves 等^[49]通过 XRD 分析结果发现,在水泥水化过程中 SAP 的加入会促进 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的形成。同时 Zhang 等^[47]还发现 SAP 的加入使得在水泥水化早期时钙矾石的形成发生了轻微的延迟,并且延迟了钙矾石向单硫型的转变,而钙矾石的形成和转变与水泥浆体的很多性能、特别是收缩性能密切相关。因此,水泥浆体干燥收缩和自收缩的减少归因于 SAP 对于钙矾石形成和转变的影响。

5 SAP 对水泥基材料微观结构的影响

5.1 SAP 对水泥基材料孔隙结构的影响

水泥基材料的孔隙结构对于其力学性能、收缩性能等起着至关重要的作用,所以 SAP 对于水泥基材料孔隙结构的影响一直是学者们的研究重点。研究发现,SAP 颗粒释水坍塌后会在混凝土内引入受 SAP 颗粒原始形状控制的大尺寸孔隙,大小与 SAP 颗粒吸水溶胀后的体积相关^[50]。

此外,SAP 加入后改变了水在水泥基材料中的分布状态,相应地对于水泥基材料中各孔径范围的

孔隙含量也产生了不同程度的影响。一方面,由于 SAP 中内养护水的释放促进了未水化的水泥进一步水化,产生的水化产物填充了小毛细孔,其次,由于自收缩被抑制,减少了水泥基材料内部的小裂缝,使得 SAP 周围结构变得更加致密^[51-53];另一方面,SAP 释水后会在水泥基材料中残留孔隙,粒径较大的 SAP 所留孔隙无法被水化产物全部填充,从而对混凝土强度等性能产生不利影响^[54-55]。

5.2 SAP 在水泥基材料中释水后形态

SAP 在水泥基材料中释水后有 2 种形态:SAP 与水泥基体结合的壳状形态和 SAP 未与水泥基体结合的坍塌形态,如图 4 所示。SAP 在释水后通常会表现出与水泥基体结合的壳状形态,这种形态的产生是由于在水泥基材料初凝后,SAP 释水会受到毛细孔的控制,毛细孔力会将 SAP 拉向水泥基体,导致 SAP 与水泥基体之间的结合,从而使得 SAP 在水泥基材料中释水后形成壳状形态。同时 SAP 未与水泥基体结合的坍塌形态的产生是由于在水泥基材料内部相对湿度较高时,SAP 发生早期释水造成的^[56]。

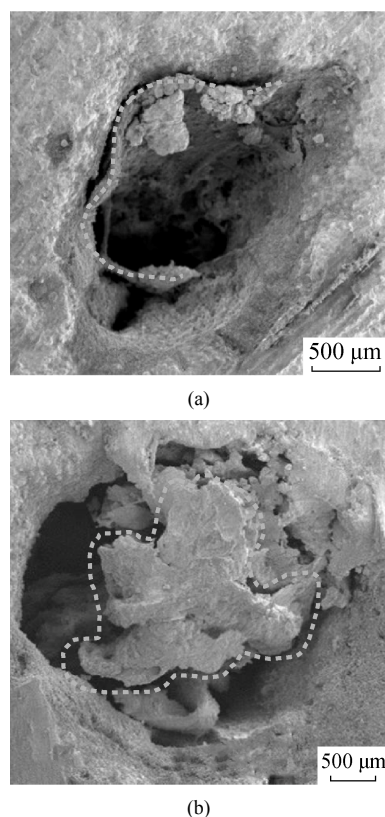


图 4 (a) SAP 与水泥基体结合的壳状形态 (b) SAP 未与水泥基体结合的坍塌形态^[56]

Fig. 4 (a) Shell-like morphology of SAP combined with cementitious matrix (b) Slumped morphology of SAP not combined with cementitious matrix^[56]

Schröfl 等^[57]将 SAP 分为储水型和非储水型 SAP, 其中储水型 SAP 能够稳定吸水, 而非储水型 SAP 在吸水后即使它仍然浸泡在溶液中, 也会快速释放部分的水。通过观察发现储水型 SAP 容易与水泥基体结合, 在释水后呈现出壳状形态^[32]。

张珍林^[50]通过观察 SAP 在水泥基材料中的扫描电镜图也发现 SAP 颗粒在完全释水后并不能恢复原来干燥状态时的形貌, 而是形成一层有机膜包覆在孔壁上, 这一形貌特征可能会对混凝土的渗透性和连通性构成影响。

6 SAP 对水泥基材料宏观性能的影响

6.1 掺加 SAP 水泥基材料的工作性能

水泥基材料的工作性能与 SAP 的吸-释水行为有很好的相关性^[58–59]。在水泥基材料中加入干燥的 SAP 时, SAP 吸水会导致水泥基材料工作性能变差, 因此, 在水泥基材料中掺入 SAP 时如果保持相同的工作性能, 就需要额外加水或者增加减水剂掺量^[60]。SAP 掺加方法有 2 种, 分别是预吸水法和额外引水干掺法^[61]。预吸水法是指 SAP 预先吸收一定倍率的水再加入到水泥基材料中拌合均匀, 额外引水干掺法是指将干燥 SAP 与水泥等原材料混合均匀后再加入所需要的拌合水继续搅拌均匀。

对于预吸水法, Kong 等^[62]将 SAP 预吸 25 倍自来水掺入混凝土后发现, 在拌合后 30 min 时, 与基准组相比, 加入预吸水 SAP 对混凝土的坍落度影响不大。杨进^[26]对比了不同预吸水倍率下 SAP 对砂浆初始流动度和 10 min 流动度的影响, 发现当 SAP 的预吸水倍率与其在水泥孔隙溶液中的平衡吸水倍率接近时, 含有 SAP 的砂浆初始流动度和 10 min 流动度均与未掺 SAP 的对照组基本一致, 而当 SAP 的预吸水倍率高于其平衡吸水倍率时, SAP 掺入水泥基材料后立刻释水, 导致含有 SAP 的砂浆初始流动度与未掺 SAP 的对照组相比明显增大, 且含有 SAP 的砂浆 10 min 流动度甚至高于其初始流动度。

对于额外引水干掺法, Mignon 等^[63]和 Schroefl 等^[41]认为根据掺入 SAP 和额外引水后水泥基材料的坍落度与未掺 SAP 的水泥基材料一样来满足工作性能的需要。而 Li 等^[33]认为尽管引入 SAP 和额外引水后水泥基材料的坍落度保持不变, 但是 SAP 吸水需要时间, 因此根据水泥基材料坍落度的变化来判断 SAP 的吸水能力可能会导致额外引水量的增加。

总之, 当 SAP 的预吸水倍率达到其在水泥孔隙溶液中的平衡吸水倍率时, 能够确保 SAP 内养护混

凝土具有良好的工作性能; 而当通过额外引水干掺的方式掺入 SAP 时, 既要考虑 SAP 在水泥孔隙溶液中的平衡吸水倍率, 又要考虑 SAP 在水泥基材料中的吸水速率。

6.2 掺加 SAP 水泥基材料的力学性能

SAP 对于水泥基材料力学性能的影响主要取决于实际的配合比设计和具体的龄期。当水灰比大于 0.42 时, 添加 SAP 对于水化影响很小, 此时, SAP 孔的引入会对力学性能产生不利影响; 当水灰比低于 0.42 时, 适量的加入 SAP 且额外引水会使得最大水化程度增加, 强度增加, 从而能够抵消由于大孔形成而造成的强度下降^[64]。需要指出的是, SAP 对于力学性能产生的负面影响一方面是由于 SAP 释水后残留孔隙造成的^[65–66], 另一方面是由于 SAP 所带入的过额外引水量所导致的^[67–68]。因此, 为保证水泥基材料的力学性能, 阎培渝等^[69]和 Sun 等^[70]均建议选用粒径较小的 SAP。因为, 尺寸较小的 SAP 不仅可以使 SAP 的分布更加均匀, 而且可以减小 SAP 形成的孔隙尺寸, 从而减小其对力学性能的不利影响。同时, 在使用高效减水剂可以获得良好工作性能的情况下, 则应尽可能少的额外引水以最大限度地提高抗压强度^[60]。Lefever 等^[71]和王豪杰等^[72]均研究了纳米二氧化硅与 SAP 复掺对于水泥基材料力学性能的影响, 研究发现纳米二氧化硅的加入能够弥补 SAP 所引起的水泥基材料力学性能的损失。Bose 等^[73]也发现在水泥基材料中掺入由丙烯酸酯和无定型二氧化硅组成的复合水凝胶颗粒时, 能够实现水泥基材料微观结构的细化和抗压强度的提高。

6.2.1 抗压强度 目前, 研究普遍发现掺入 SAP 后水泥基材料早期抗压强度下降, 但随着龄期增长, 水泥基材料强度有所恢复^[74–78], 表 2 总结了掺加不同 SAP 对于水泥基材料抗压强度的影响。Zhong 等^[79]发现在水灰比为 0.30 的水泥浆体中干掺 SAP 且额外引水时, 当有效水灰比(0.30)相同时(即不考虑额外引水), 掺入 SAP 样品组的强度要明显低于空白对照组。当总水灰比(0.354)一样时, 与空白对照组相比, 掺入 SAP 后水泥基材料的强度几乎没有改变。姜玉丹等^[80]、Justs 等^[76]、Assmann 等^[81]和 Xin 等^[82]通过研究 SAP 对于水泥基材料抗压强度的影响也发现了同样的规律。此外, 在不同养护条件下, SAP 对于水泥基材料抗压强度会产生不同的影响。Esteves 等^[49]和杨进等^[83]均发现养护湿度越低, SAP 对于水泥基材料强度的影响越有利。

表 2 掺加不同 SAP 对水泥基材料抗压强度的影响
Table 2 Effect of different SAP on the compressive strength of cementitious materials

Materials	Particle size/ μm	Dosage/%	Mass ratio		Compressive strength variation/%			References
			W/C _{effective}	W/C _{extra}	3 d	7 d	28 d	
Sodium polyacrylate	250	0.30	0.175	0.05		-1.6	2.6	[77]
Sodium polyacrylate	125–841	0.20–0.40	0.3	0.02–0.066	-12.5–0	-19.19–0	-16.67–9.26	[84]
Potassium polyacrylate	476.6 $\pm$ 52.9	0.20	0.4	0.07		-31.03	-21.74	[85]
Poly(acrylic acid-co-acrylamide)	100–120	0.57	0.3	0.06	-11.13	-4.44	-6.67	[86]
Sodium vinyl sulfonate and 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid copolymer	100	0.26	0.3	0.054		-20	-20	[25]
Organic/inorganic compound super absorbent polymer (Starch, acrylamide, 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid and sodium silicate solution are used as raw materials)	75	2.40–9.60	0.28–0.33	0.017–0.07	-10.19 -1.70		-6.76–2.36	[23]

6.2.2 弹性模量 SAP 的加入会对水泥基材料的弹性模量产生不利影响,随着养护龄期的增加,含有 SAP 的水泥基材料弹性模量的降低程度逐渐减小,这类似于抗压强度的发展趋势,表 3 总结了掺加不同 SAP 对于水泥基材料弹性模量的影响。此外,Shen 等^[86]和 Craeye 等^[87]都发现随着 SAP 掺量的增加,弹性模量会逐渐减小,但其降低幅度要小于抗压强度的降低幅度。

6.3 掺加 SAP 水泥基材料的收缩性能

6.3.1 自收缩 SAP 加入水泥基材料中对于其自收缩性能有着很好的抑制作用, SAP 对于水泥基材料的减缩效果会受到 SAP 的吸-释水动力学、掺量、粒径和额外引水量的影响,表 4 总结了不同 SAP 对于水泥基材料自收缩性能的影响。大量研究表明在水泥基材料中掺入 SAP 时,随着 SAP 掺量和额外引水量的增加,水泥基材料的自收缩率逐渐降低^[88–93]。对于 SAP 吸-释水动力学对水泥基材料减缩效果的影响, Farzanian 等^[56]和 Schröfl 等^[57]都认为阴离子基团含量高的 SAP 易于在水泥基材料

塑形阶段释水,而 SAP 过早释水相当于增大了水灰比,将不能起到良好的减缩效果。Zhong 等^[32]则认为 SAP 在快速释水之后,其释放的水仍然会储存在原始的孔隙中, SAP 在水泥浆体中的释水行为并不完全决定最终的减缩效果。目前学者们对于 SAP 粒径对自收缩性能的影响持有不同的意见。Mechtcherine 等^[94]对比了 2 种不同粒径(586 μm 和 324 μm)的 SAP 对自收缩性能的影响发现,粒径较大的 SAP 抑制自收缩的效果更好,这可能是由于粒径较大的 SAP 吸收了更多的内养护水。Lura^[95]认为 SAP 对水泥基材料收缩性能的影响与 SAP 的粒径和掺量密切相关,他发现当 SAP 掺量为 0.3% 时, SAP 颗粒越大,早期膨胀越大,且抑制自收缩的时间也越长;当 SAP 掺量为 0.6% 时,粒径对水泥基材料自收缩的影响作用不再明显。其他学者认为相对于大粒径的 SAP,小粒径 SAP 的分散效果更好,内养护区域更大些,故而减缩效果更好^[96–97]。Jensen 等^[98]则认为溶胀 SAP 颗粒尺寸达 100 μm 时,减缩效果最好。

表 3 掺加不同 SAP 对水泥基材料弹性模量的影响
Table 3 Effect of different SAP on the elastic modulus of cementitious materials

Materials	Particle size/ μm	Dosage	Mass ratio		Elastic modulus variation/%			References
			W/C _{effective}	W/C _{extra}	3 d	7 d	28 d	
Poly(acrylic acid-co-acrylamide)	100–120	0.57%	0.3	0.06	-13.74	-15.36	-11.87	[86]
SAP	63	0.30%	0.15	0.05	-32.00	-23.64	-15.25	[76]
SAP		0.24%	0.33	0.06	-13.79	-14.71	-13.16	[82]

表 4 掺加不同 SAP 对水泥基材料自收缩性能的影响

Table 4 Effect of different SAP on the autogenous shrinkage of cementitious materials

Materials	Particle size/ μm	Dosage	Mass ratio		Autogenous shrinkage reduction rate/%			References
			W/C _{effective}	W/C _{extra}	3 d	7 d	28 d	
Sodium polyacrylate	125–841	0.20–0.40	0.3	0.02–0.066	75–140	50–133.33	40–108	[84]
Potassium polyacrylate	476.6±52.9	0.45	0.3	0.054	81.25	50		[97]
Polyacrylamide	10–190	0.42	0.3	0.054	92	91.67		[32]
Poly(acrylic acid-co-acrylamide)	125–150	0.16	0.33	0.03	77.27	43.18	41.67	[99]
Poly(acrylic acid-co-acrylamide)	200	0.30	0.3	0.0375	123.08	113.33		[98]
Poly(acrylic acid-co-acrylamide)	200	0.60	0.3	0.075	130.77	126.67		[98]
Poly(sodium acrylate-co-acrylamide)	100±21.5	0.22	0.3	0.054	112.5	118.18		[97]
SAP	63	0.30	0.15	0.05	90.91	86.67	81.48	[76]
Organic/inorganic compound super absorbent polymer (Starch, acrylamide, 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid and sodium silicate solution are used as raw materials)	75	2.40–9.60	0.28–0.33	0.017–0.07	40.9–71.9	36.33–65.4		[23]

6.3.2 干燥收缩 在干燥环境下,水泥基材料内部水分向外界蒸发导致其发生干燥收缩。Rostami 等^[100]和 Tan 等^[101]发现含有 SAP 的砂浆干燥收缩率与 SAP 所带入的内养护水量有关,引入的内养护水量越多,干燥收缩越大。Wu 等^[102]认为 SAP 释水后会增加水泥基材料的孔隙率,从而使得水分更易蒸发,导致干燥收缩加剧。Liu 等^[103]在水灰比为 0.18 的水泥基材料中添加 0.3%和 0.6%的 SAP 发现,在 91 d 时,干燥收缩率分别增加 2.7%和 10.9%。而 Han 等^[104]和 Yao 等^[105]通过测试发现 SAP 的加入能够降低水泥基材料的干燥收缩,但 SAP 抑制自收缩的效果要优于其降低干燥收缩的效果。Ma 等^[106]则认为当加入 SAP 且额外引水时,会增大水泥基材料的干燥收缩,当干掺 SAP 时,随着 SAP 掺量的增加,水泥基材料的干燥收缩逐渐减小,这表明 SAP 对于干燥收缩的影响与额外引水量密切相关。此外,对于薄的水泥基材料构件,在干燥条件下内养护水易于蒸发,很难保持在水泥基材料内部,进而不利于抑制干燥收缩,因此,充分的外养护在这种情况下也是必不可少的^[107]。同时,当减缩剂和 SAP 合理的配合使用时,更有利于抑制水泥基材料的干燥收缩^[103, 108]。

7 结论与展望

从 SAP 的吸-释水作用机理、相应的形态和体积变化以及 SAP 对于水泥基材料微观结构、宏观性能的影响等多个方面总结了 SAP 作为混凝土内养护材料的研究进展,基于目前的研究可以得到以下

结论:

1) SAP 的吸-释水行为与其分子结构、粒径、外界溶液浓度、外界离子类型等因素有关。SAP 中含有的亲水基团是 SAP 吸水的主要动力来源,水分子渗入后,其三维网状结构将水分子储存于聚合物内部。SAP 在水泥浆体中受到渗透压、湿度差等作用时, SAP 会释放出水分。通常,作为内养护材料的 SAP 在去离子水中吸水能力一般为 200~500 g/g,而在水泥浆体孔隙溶液中的吸液能力仅为 10~40 g/g,且聚丙烯酸盐类 SAP 和丙烯酸-丙烯酰胺共聚型 SAP 在达到平衡吸水状态时的体积一般为原始体积的 8~27 倍。

2) 在水泥基材料中掺入 SAP 时,随着水化过程的进行,水泥基材料内部水分被不断消耗, SAP 释水会促进水泥基材料的水化进程,提高最大水化程度,同时细化 SAP 周围孔隙。SAP 释水之后在水泥基材料中主要表现为 2 种形态,分别是 SAP 与水泥基体结合的壳状形态和 SAP 未与水泥基体结合的坍塌形态。

3) 由于 SAP 的吸水特性,在水泥基材料中掺入 SAP 时,会导致水泥基材料的工作性能变差,可以通过调整额外引水量或减水剂掺量来改善水泥基材料的工作性能。在掺入 SAP 时有 2 种方法,分别是预吸水法和额外引水干掺法。采用预吸水法时,要考虑 SAP 在水泥浆体孔隙溶液中的平衡吸水倍率,而采用额外引水干掺法时,既要考虑 SAP 在水泥浆体孔隙溶液中的平衡吸水倍率,又要考虑 SAP 的吸水速率。

4) SAP 掺入水泥基材料后, 由于 SAP 自身强度低, 且在释水后留下较大的孔隙, 通常会对水泥基材料早期力学性能产生不利影响, 但随着龄期增长, SAP 发挥其内养护作用, 水泥基材料的力学性能会有所恢复。

5) SAP 对于水泥基材料的自收缩具有良好的抑制作用, SAP 的掺量和额外引水量越大, 抑制自收缩的效果越好, 而 SAP 粒径对于自收缩性能的影响还没有统一的结论。此外, 学者们对于 SAP 对水泥基材料干燥收缩的影响存有争议, 可能与 SAP 所带入的内养护水量有关。

目前 SAP 作为混凝土内养护材料已经得到了大量的研究, 但仍有以下方面需要深入探索:

1) SAP 在水泥基材料中过早释水会影响内养护效果, 这与 SAP 中阴离子基团和水泥孔隙溶液中多价离子的相互作用有关, 有待针对水泥基材料的需求, 设计出合适的 SAP 分子结构, 从而减小多价离子对 SAP 溶胀性能的影响。

2) SAP 在水泥基材料中的掺量要根据其在水泥基材料中的平衡吸水倍率和额外引水量来确定, 而 SAP 在水泥基材料中的吸液能力会受到水灰比、水化时间等因素的影响, 因此, 有必要提出测试 SAP 在水泥基材料中平衡吸水倍率的准确方法。

3) 有待探究 SAP 粒径对于水泥基材料收缩性能、力学性能的影响规律, 在保证具有良好减缩效果的同时, 尽可能减小力学性能的损失, 以确定最优粒径范围。

参考文献:

- [1] HE Z, SHEN A, GUO Y, et al. Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 225(20): 569–590.
- [2] MOUSA M I, MAHDY M G, ABDEL-REHEEM A H, et al. Mechanical properties of self-curing concrete (SCUC)[J]. *HBRC J*, 2015, 11(3): 311–320.
- [3] YANG J, FAN J, KONG B, et al. Theory and application of new automated concrete curing system[J]. *J Build Eng*, 2018, 17: 125–134.
- [4] BENTZ D P, WEISS W J. Internal curing: a 2010 state-of-the-art review[M]. Gaithersburg: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2011: 3.
- [5] 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]. *Cem Concr Compos*, 2010, 32(5): 339–350.
- [6] SHAO K, DU Y, ZHOU F. Effect of bio-based internal curing agent on the performance of high-performance mortar[J]. *J Build Eng*, 2022, 49: 104092.
- [7] BEUSHAUSEN H, GILLMER M. The use of superabsorbent polymers to reduce cracking of bonded mortar overlays[J]. *Cem Concr Compos*, 2014, 52: 1–8.
- [8] LIU K, YU R, SHUI Z, et al. Effects of pumice-based porous material on hydration characteristics and persistent shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Materials*, 2019, 12(11): 1–22.
- [9] 丁小平. 基于多孔颗粒内养护的低收缩混凝土设计及相关性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
DING Xiaoping. Mixture design and properties study of low shrinkage concrete by internal curing with porous particles (in Chinese, dissertation). Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [10] 张磊. 预湿轻骨料内养护自密实混凝土效果评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZHANG Lei. Evaluation method on the internal curing effect of self-compacting concrete by pre-wet lightweight aggregates (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [11] BALAPOUR M, ZHAO W, GARBOCZI E J, et al. Potential use of lightweight aggregate (LWA) produced from bottom coal ash for internal curing of concrete systems[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 105: 103428.
- [12] GHOURCHIAN S, WYRZYKOWSKI M, LURA P, et al. An investigation on the use of zeolite aggregates for internal curing of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 40(3): 135–144.
- [13] CASTRO J, KEISER L, GOLIAS M, et al. Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures[J]. *Cem Concr Compos*, 2011, 33(10): 1001–1008.
- [14] ZHUANG Y, ZHENG D, NG Z, et al. Effect of lightweight aggregate type on early-age autogenous shrinkage of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 120: 373–381.
- [15] AKCAY B, TASDEMIR M A. Optimisation of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2009, 23(1): 353–363.
- [16] CHIA K S, ZHANG M. Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2002, 32(4): 639–645.
- [17] HOSSAIN K M A, AHMED S, LACHEMI M. Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics[J]. *Constr Build Mater*, 2011, 25(3): 1186–1195.
- [18] JENSEN O M. Water-entrained cement-based materials.I. Principles and theoretical background[J]. *Cem Concr Res*, 2001, 31(4): 647–654.
- [19] 吕兴栋, 刘战鳌, 董芸. 内养护材料高吸水树脂(SAP)和陶粒对混凝土性能影响的对比研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(1): 246–252.
LYU Xingdong, LIU Zhanao, DONG Yun. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2019, 38(1): 246–252.
- [20] 许晓秋, 刘延东. 高吸水性树脂的工艺与配方[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [21] 马先伟, 张家科, 刘剑辉. 高性能水泥基材料内养护剂用高吸水树脂的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(8): 1099–1110.
MA Xianwei, ZHANG Jiake, LIU Jianhui. *J Chin Ceram Soc*, 2015, 43(8): 1099–1110.
- [22] SCHRÖFL C, ERK K A, SIRIWATWECHAKUL W, et al. Recent progress in superabsorbent polymers for concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2022, 151: 106648.
- [23] 刘荣进. 有机-无机复合混凝土内养护材料设计、合成与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
LIU Rongjin. Research on Design, Preparation, and Properties of Organic-Inorganic Multiple Concrete Internal Curing Materials (in

- Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [24] 毕雨田. 改性高吸水性树脂的制备及对砂浆性能的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- BI Yutian. Study on the Preparation of Modified Super Absorbent Polymer and Its Effect on Mortar Performance (in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [25] DE MEYST L, MANNEKENS E, VAN TITTELBOOM K, et al. The influence of superabsorbent polymers (SAPs) on autogenous shrinkage in cement paste, mortar and concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 286(1): 122948.
- [26] 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 Performance of Cementitious Materials Internally Cured by Superabsorbent Polymers (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [27] ZHU Q, BARNEY C W, ERK K A. Effect of ionic crosslinking on the swelling and mechanical response of model superabsorbent polymer hydrogels for internally cured concrete[J]. *Mater Struct*, 2015, 48(7): 2261–2276.
- [28] ESTEVES L P, JENSEN O M. Absorbency of superabsorbent polymers in cementitious environments[C]//Materials Research Society Symposium on Concrete with Smart Additives and Supplementary Cementitious Materials, Cancun, 2012: 1–8.
- [29] SIRIWATWECHAKUL W, SIRAMANONT J, VICHIT-VADAKAN W. Behavior of superabsorbent polymers in calcium- and sodium-rich solutions[J]. *J Mater Civ Eng*, 2012, 24(8): 976–980.
- [30] LEE H X D, WONG H S, BUENFELD N R. Effect of alkalinity and calcium concentration of pore solution on the swelling and ionic exchange of superabsorbent polymers in cement paste[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 88: 150–164.
- [31] FARZANIAN K, PIMENTA TEIXEIRA K, PERDIGÃO ROCHA I, et al. The mechanical strength, degree of hydration, and electrical resistivity of cement pastes modified with superabsorbent polymers[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 109: 156–165.
- [32] ZHONG P, HU Z, GRIFFA M, et al. Mechanisms of internal curing water release from retentive and non-retentive superabsorbent polymers in cement paste[J]. *Cem Concr Res*, 2021, 147: 106494.
- [33] LI M, WANG Y, WANG W, et al. Quantitative characterisation of absorption capacity and dosage of SAP in cement paste[J]. *Adv Cem Res*, 2016, 28(8): 518–528.
- [34] ESTEVES L P. On the absorption kinetics of Superabsorbent Polymers[C]//International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2010.
- [35] LURA P, DURAND F, LOUKILI A, et al. Compressive strength of cement pastes and mortars with superabsorbent polymers[C]//Proceedings of the International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. Lyngby, Denmark: Rilem Publications SARL, 2006.
- [36] SNOECK D, PEL L, De BELIE N. The water kinetics of superabsorbent polymers during cement hydration and internal curing visualized and studied by NMR[J]. *Sci Rep-Uk*, 2017, 7(1): 1–14.
- [37] YANG J, SUN Z, ZHAO Y, et al. The water absorption-release of superabsorbent polymers in fresh cement paste: An NMR study[J]. *J Adv Concr Technol*, 2020, 18(3): 139–145.
- [38] LIU J, MA X, SHI C, et al. Internal curing of blended cement pastes with ultra - low water - to - cement ratio: Absorption/desorption kinetics of superabsorbent polymer[J]. *J Am Ceram Soc*, 2021, 104(7): 3603–3618.
- [39] CHIDIAC S E, MIHALJEVIC S N, KRACHKOVSKIY S A, et al. Efficiency measure of SAP as internal curing for cement using NMR & MRI[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 278(5): 122365.
- [40] NESTLE N, KÜHN A, FRIEDEMANN K, et al. Water balance and pore structure development in cementitious materials in internal curing with modified superabsorbent polymer studied by NMR[J]. *Micropor Mesopor Mater*, 2009, 125(1-2): 51–57.
- [41] SCHROEFL C, MECHTCHERINE V, VONTOBEL P, et al. Sorption kinetics of superabsorbent polymers (SAPs) in fresh Portland cement-based pastes visualized and quantified by neutron radiography and correlated to the progress of cement hydration[J]. *Cem Concr Res*, 2015, 75: 1–13.
- [42] 李明, 徐文, 王康臣, 等. 高吸水树脂在水泥浆体硬化过程中的释水行为[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(2): 111–116.
- LI Ming, XU Wen, WANG Kangchen, et al. *J Build Mater(in Chinese)*, 2022, 25(2): 111–116.
- [43] ZHAO S, JENSEN O M, HASHOLT M T, et al. Absorption capacity of superabsorbent polymer in cement pastes: a robustness test[J]. *Mater Struct*, 2021, 54(46): 1–15.
- [44] ZHAO S, JENSEN O M, HASHOLT M T. Measuring absorption of superabsorbent polymers in cementitious environments[J]. *Mater Struct*, 2020, 53(11): 1–16.
- [45] YANG J, WANG F, LIU Z, et al. Early-state water migration characteristics of superabsorbent polymers in cement pastes[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 118: 25–37.
- [46] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, WINNEFELD F, et al. Influence of superabsorbent polymers on hydration of cement pastes with low water-to-binder ratio - A calorimetry study[J]. *J Therm Anal Calorim*, 2014, 115(1): 425–432.
- [47] ZHANG G, WANG Y, HE R, et al. Effects of super absorbent polymer on the early hydration of Portland cement highlighted by thermal analysis[J]. *J Therm Anal Calorim*, 2017, 129(1): 45–52.
- [48] KONG X, ZHANG Z, LU Z. Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete[J]. *Mater Struct*, 2015, 48(9): 2741–2758.
- [49] ESTEVES L P, LUKOŠIŪTĖ I. Hydration of cement with superabsorbent polymers[J]. *J Therm Anal Calorim*, 2014, 118(2): 1385–1393.
- [50] 张珍林. 高吸水性树脂对高强混凝土早期减缩效果及机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- ZHANG Zhenlin. Investigation on the Shrinkage-reducing Effect of Super-absorbent Polymer in High-strength Concrete and its Mechanism (in Chinese, dissertation). Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [51] LURA P, YE G, CNUDDÉ V, et al. Preliminary results about 3D distribution of superabsorbent polymers in mortars[C]//International conference on microstructure related durability of cementitious composites, Nanjing, 2008.
- [52] 钟佩华. 高吸水性树脂(SAP)对高强混凝土自收缩性能的影响及作用机理[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- ZHONG Peihua. Study on the Autogenous Shrinkage and Mechanism of High Strength Concrete with Super Absorbent polymer (in Chinese, dissertation). Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [53] 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.
- [54] 覃潇. SAP内养生路面混凝土水分传输特性及耐久性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- Tan Xiao. Study on Moisture Transport Characteristics and Durability of SAP Internal Pavement Concrete (in Chinese, dissertation). Xi'an: Chang'an University, China, 2019.
- [55] KANG S H, HONG S G, MOON J. The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 172: 29–40.
- [56] FARZANIAN K, GHahremaninezhad A. The effect of the capillary forces on the desorption of hydrogels in contact with a porous cementitious material[J]. *Mater Struct*, 2017, 50(216): 1–15.
- [57] SCHRÖFL C, MECHTCHERINE V, GORGES M. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage[J]. *Cem Concr Res*, 2012, 42(6): 865–873.
- [58] MA X, YUAN Q, LIU J, et al. Effect of water absorption of SAP on the rheological properties of cement-based materials with ultra-low w/b ratio[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 195: 66–74.
- [59] KANG S, HONG S, MOON J. Importance of drying to control internal curing effects on field casting ultra-high performance concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 108: 20–30.
- [60] ADAMS C J, BOSE B, OLEK J, et al. Evaluation of mix design strategies to optimize flow and strength of mortar internally cured with superabsorbent polymers[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 324: 126664.
- [61] 申爱琴, 杨景玉, 郭寅川, 等. SAP内养生水泥混凝土综述[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(4): 1–31.
- SHEN Aiqin, Yang Jingyu, Guo Yinchuan, et al. J Traff Transp Eng(in Chinese), 2021, 21(4): 1–31.
- [62] KONG X M, ZHANG Z L, LU Z C. Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete[J]. *Mater Struct*, 2015, 48(9): 2741–2758.
- [63] MIGNON A, SNOECK D, D HALLUIN K, et al. Alginate biopolymers: Counteracting the impact of superabsorbent polymers on mortar strength[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 110: 169–174.
- [64] HASHOLT M T, JESPERSEN M, JENSEN O M. Mechanical properties of concrete with SAP. Part I: Development of compressive strength[C]//International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2010.
- [65] 胡曙光, 周宇飞, 王发洲, 等. 高吸水性树脂颗粒对混凝土自收缩与强度的影响[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2008(1): 1–4.
- HU Shuguang, ZHOU Yufei, WANG Fazhou, et al. J Huazhong Univ Sci Technol: Urb Sci Ed(in Chinese), 2008(1): 1–4.
- [66] 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.
- [67] HASHOLT M T, JENSEN O M, KOVLER K, et al. Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength?[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 31: 226–230.
- [68] OLAWUYI B J, BOSHOFF W P. Compressive strength of high-performance concrete with absorption capacity of Super-Absorbing-Polymers (SAP)[C]//Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation, London, 2013.
- [69] 阎培渝, 余成行, 王强, 等. 高强自密实混凝土的减缩措施[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(4): 363–367.
- YAN Peiyu, YU Chenghang, WANG Qiang, et al. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(4): 363–367.
- [70] SUN B, WU H, SONG W, et al. Design methodology and mechanical properties of Superabsorbent Polymer (SAP) cement-based materials[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 204: 440–449.
- [71] LEFEVER G, TSANGOURI E, SNOECK D, et al. Combined use of superabsorbent polymers and nanosilica for reduction of restrained shrinkage and strength compensation in cementitious mortars[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 251: 118966.
- [72] 王豪杰, 刘荣桂, 崔钊玮, 等. 纳米二氧化硅改性SAP内养护水泥基材料的力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(1): 41–49.
- WANG Haojie, LIU Ronggui, CUI Zhaowei, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2020, 39(1): 41–49.
- [73] 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(7): 106400.
- [74] BEUSHAUSEN H, GILLMER M, ALEXANDER M. The influence of superabsorbent polymers on strength and durability properties of blended cement mortars[J]. *Cem Concr Compos*, 2014, 52: 73–80.
- [75] TAN Y, LU X, HE R, et al. Influence of superabsorbent polymers (SAPs) type and particle size on the performance of surrounding cement-based materials[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 270: 121442.
- [76] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, BAJARE D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2015, 76: 82–90.
- [77] DE SENSEALE G R, GONCALVES A F. Effects of fine LWA and SAP as internal water curing agents[J]. *Int J Concr Struct M*, 2014, 8(3): 229–238.
- [78] ALMEIDA F C R, KLEMM A J. Efficiency of internal curing by superabsorbent polymers (SAP) in PC-GGBS mortars[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 88: 41–51.
- [79] ZHONG P, WYRZYKOWSKI M, TOROPOVS N, et al. Internal curing with superabsorbent polymers of different chemical structures[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 123: 105789.
- [80] 姜玉丹, 金祖权, 陈永丰, 等. 高吸水树脂对混凝土水化及强度的影响[J]. *材料导报*, 2017, 31(24): 40–44.
- JIANG Yudan, JIN Zuquan, CHEN Yongfeng, et al. Mater Rep(in Chinese), 2017, 31(24): 40–44.
- [81] ASSMANN A, REINHARDT H W. Tensile creep and shrinkage of SAP modified concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 58: 179–185.
- [82] XIN J, HUANG D, LI J, et al. Effect of SAP on the tensile creep of early-age concrete using ring specimens[J]. *Eur J Environ Civ En*, 2018, 22(7): 869–882.
- [83] 杨进, 王发洲, 黄劲, 等. 内养护预拌混凝土性能与应用研究[J]. *混凝土*, 2015(7): 113–117.
- YANG Jin, WANG Fazhou, HUANG Jin, et al. Concrete(in Chinese), 2015(7): 113–117.
- [84] URGESSA G, CHOI K, YEON J. Internal relative humidity, autogenous shrinkage, and strength of cement mortar modified with superabsorbent polymers[J]. *Polymers-Basel*, 2018, 10(10): 1074.
- [85] ZHANG M, ABA M, SAKOI Y, et al. Synergetic effect of expansive agent (KEA) and superabsorbent polymers (SAP) on the shrinkage, strength and pore structures of mortars[J]. *J Adv Concr Technol*, 2021,

- 19(1): 26–39.
- [86] SHEN D, LIU C, JIANG J, et al. Influence of super absorbent polymers on early-age behavior and tensile creep of internal curing high strength concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 258: 120068.
- [87] CRAEYE B, GEIRNAERT M, SCHUTTER G D. 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.
- [88] WANG W B, LIU J P, TIAN Q, et al. Effects of water absorption and size of superabsorbent polymers on internal curing of cement paste[J]. *Mater Sci Forum*, 2013, 743–744: 193–197.
- [89] PANG L F, RUAN S Y, CAI Y T. Effects of internal curing by super absorbent polymer on shrinkage of concrete[J]. *Key Eng Mater*, 2011, 477: 200–204.
- [90] AZARIJAFARI H, KAZEMIAN A, RAHIMI M, et al. Effects of pre-soaked super absorbent polymers on fresh and hardened properties of self-consolidating lightweight concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 113: 215–220.
- [91] WANG F, ZHOU Y, PENG B, et al. Autogenous shrinkage of concrete with super-absorbent polymer[J]. *Aci Mater J*, 2009, 16(2): 123–127.
- [92] TU W, ZHU Y, FANG G, et al. Internal curing of alkali-activated fly ash-slag pastes using superabsorbent polymer[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 116: 179–190.
- [93] GUO L, ZHANG F, ZHONG L, et al. Texture analysis of the microstructure of concrete with different concentrations of superabsorbent polymer after internal curing[J]. *Mater Today Commun*, 2021, 27: 102361.
- [94] MECHTCHERINE V, GORGES M, SCHROEFL C, et al. Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test[J]. *Mater Struct*, 2014, 47(3): 541–562.
- [95] LURA P. Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers[C]//RILEM Publications SARL: International Rilem Conference Onchanges of Hardening Concrete: Testing & Mitigation, Paris, France, 2006.
- [96] LIU J, FARZADNIA N, KHAYAT K H, et al. Effects of SAP characteristics on internal curing of UHPC matrix[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 280: 122530.
- [97] SNOECK D, JENSEN O M, De BELIE N. The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials[J]. *Cem Concr Res*, 2015, 74: 59–67.
- [98] JENSEN O M, HANSEN P F. Water-entrained cement-based materials.II. Experimental observations[J]. *Cem Concr Res*, 2002, 32(6): 973–978.
- [99] SHEN D, WANG X, CHENG D, et al. Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 106: 512–522.
- [100] ROSTAMI R, KLEMM A J, ALMEIDA F C R. Reduction of shrinkage by superabsorbent polymers (SAP) in fibre reinforced mortars[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 288: 123109.
- [101] TAN Y, CHEN H, WANG Z, et al. Performances of cement mortar incorporating superabsorbent polymer (SAP) using different dosing methods[J]. *Materials*, 2019, 12(10): 1619.
- [102] WU L, YU Z, ZHANG C, et al. Shrinkage and tensile properties of ultra-high-performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) containing superabsorbent polymers (SAP) and united expansion agent (UEA)[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 339: 127697.
- [103] LIU J, FARZADNIA N, SHI C, et al. Shrinkage and strength development of UHSC incorporating a hybrid system of SAP and SRA[J]. *Cem Concr Compos*, 2019, 97: 175–189.
- [104] HAN J, FANG H, WANG K. Design and control shrinkage behavior of high-strength self-consolidating concrete using shrinkage-reducing admixture and super-absorbent polymer[J]. *J Sus Cem Mater*, 2014, 3(3–4): 182–190.
- [105] YAO Y, ZHU Y, YANG Y. Incorporation superabsorbent polymer (SAP) particles as controlling pre-existing flaws to improve the performance of engineered cementitious composites (ECC)[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 28(1): 139–145.
- [106] MA X, LIU J, WU Z, et al. Effects of SAP on the properties and pore structure of high performance cement-based materials[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 131: 476–484.
- [107] LIU J, SHI C, MA X, et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 146: 702–712.
- [108] LIU L, FANG Z, HUANG Z, et al. Solving shrinkage problem of ultra-high-performance concrete by a combined use of expansive agent, super absorbent polymer, and shrinkage-reducing agent[J]. *Compos Part B: Eng*, 2022, 230: 109503.