

文章编号:1007-9629(2023)07-0697-08

高强混凝土内养护效果的微观量化表征与分析

郭利霞^{1,2,3}, 武铮¹, 钟凌^{1,2,3,*}, 张芳芳¹, 罗云⁴

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南郑州 450046; 2. 河南水谷研究院, 河南郑州 450046;
3. 华北水利水电大学河南省水环境模拟与治理重点实验室, 河南郑州 450002; 4. 河南省
信阳水文水资源勘测局, 河南信阳 464000)

摘要:采用高吸水性树脂(SAP)作为混凝土内养护材料,通过纳米压痕试验,研究了养护龄期和SAP掺量对内养护混凝土孔洞界面微观力学的影响,借助扫描电镜与能谱分析(SEM-EDS)表征混凝土的内部物相及化学组成.结果表明:随着养护龄期的增加,SAP释水界面的弹性模量和硬度提高;掺入SAP后,混凝土中的水化产物分布更加均匀;随着养护龄期的增加,水化产物含量逐渐增大,界面更加致密;SEM-EDS测试结果与力学性能相吻合,说明SAP对高强混凝土具有积极影响.

关键词:高强混凝土;内养护;高吸水性树脂;微观特征;纳米压痕;SEM-EDS

中图分类号:TU528.31

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.001

Microscopic Quantitative Characterization and Analysis of Internal Curing Effect of High Strength Concrete

GUO Lixia^{1,2,3}, WU Zheng¹, ZHONG Ling^{1,2,3,*}, ZHANG Fangfang¹, LUO Yun⁴

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Water Valley Research Institute, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450002, China; 4. Xinyang Hydrological and Water Resources Survey Bureau of Henan Province, Xinyang 464000, China)

Abstract: Super absorbent polymer (SAP) was used as the internal curing material for concrete. Through the nanoindentation test, the effects of curing age and SAP content on the micromechanics of the cavity interface of the internally cured concrete were studied, and the internal phase and chemical composition of the concrete were characterized by scanning electron microscope and energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS). The results show that the elastic modulus and hardness of the SAP water release interface increase with the increase of curing age. After adding SAP, the distribution of hydration products in concrete becomes more uniform. As the curing age increases, the content of hydration products gradually increases, and the interface becomes denser. The SEM-EDS test results are consistent with the test of mechanical properties, indicating that SAP has a positive impact on high-strength concrete.

Key words: high strength concrete; internal curing; super absorbent polymer (SAP); microscopic feature; nanoindentation; SEM-EDS

内养护^[1]是依靠预湿的内养护材料在水化过程中释放水分,减少高强混凝土自收缩和开裂,从而提高耐久性的方法.高吸水树脂(SAP)由于释水效果好而常被作为内养护材料^[2].通常通过抗压强度、自

收稿日期:2022-08-09; 修订日期:2022-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52109154);河南省自然科学基金资助项目(202300410270)

第一作者:郭利霞(1982—),女,河南开封人,华北水利水电大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:guolx@126.com

通讯作者:钟凌(1982—),男,湖南邵阳人,华北水利水电大学讲师,硕士生导师,博士.E-mail:250514782@qq.com

收缩^[3]和电镜扫描(SEM)等分析SAP对混凝土这种多相材料的内养护效应^[4-5].丁小平等^[6]通过建立混凝土自干燥计算模型,实现了对内养护剂动态释水过程的计算,为设计内养护混凝土配合比提供了新的依据;胡传林等^[7]介绍了混凝土微观力学性能表征方法,为从微观角度探究混凝土性能提供了新途径.纳米压痕技术常被用于水泥基材料各相微结构的力学表征^[8-13];华培成^[14]基于水泥基材料纳米压痕试验数据,选用K-均值聚类算法检测分析了材料中各物相的弹性模量、硬度及含量.

本文从量化内养护混凝土微观力学特性,研究其与宏观力学特性间的关系入手,采用纳米压痕技术探究混凝土掺入SAP后释水界面的硬度和弹性模量,同时利用扫描电镜与能谱分析(SEM-EDS)探测材料的物相及分布特征,将微观表征技术与材料性能相匹配,以实现内养护混凝土材料微观物相的划分及微观性质的直接测量.

1 试验

1.1 原材料及样品制备

水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料为碎石,粒径为5~20 mm,连续级配,其物理性质见表1;细骨料为河砂,粒径为0.35~4.75 mm;掺合料采用矿渣、粉煤灰和硅灰,其中矿渣和粉煤灰性能指标符合GB/T 18046—2017《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》和GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》规定;减水剂为聚羧酸减水剂,掺量(质量分数,文中的含量、组成等除特别说明外均为质量分数)为0.1%(以水泥和各掺合料的总质量计);高吸水树脂(SAP)购自佰斯特环保材料公司,材料外形呈白色颗粒状,吸水倍率为400~500 g/g,粒径为0.15~0.25 mm(60~100目),掺量为0.36%(以水泥和各掺合料的总质量计).水泥及各掺合料的主要化学组成见表2.

表1 粗骨料的物理性质

Table 1 Physical properties of coarse aggregates

Project	Apparent density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Bulk density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Void ratio(by volume)/%	Mud content(by mass)/%	Water absorption(by mass)/%
Standard	>2 500	>1 350	<47	<0.5	
Measured	2 640	1 720	40	—	1.2

表2 水泥及各掺合料的主要化学组成

Table 2 Main chemical compositions of cement and each admixture
w/%

Material	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Cement	2.46	24.13	3.65	9.25	51.27	4.98	0.79	1.95
Slag		32.83	1.09	14.44	41.05	6.44		
Fly ash	0.42	50.25	5.35	34.20	4.50	0.50	1.20	0.80
Silica fume		90.48	1.87	1.27	2.59	0.91		

混凝土的配合比见表3,水灰比均为0.34.先将饱和和吸水的SAP与各胶凝材料加水拌和后加入砂石,再次搅拌均匀;然后倒入尺寸为 $\phi 35\times 20$ mm的模具中,并置于振动台振动2 min,在(20±5)℃、相对湿度45%的室内环境静置24 h后拆模;最后放入(20±2)℃、相对湿度95%的标准养护室内养护3、7 d.养护结束后,先使用不同粒度的粗砂纸对

试件表层进行粗磨,随后将其放入金相抛磨机进行研磨与抛光,保证试件表面粗糙度在100 nm以内.

1.2 试验

1.2.1 纳米压痕试验

纳米压痕测试原理示意图及荷载-位移($P-h$)曲线如图1所示.由图1可见:压头压入试样表面后,荷载(P)持续增大,当达到最大荷载(P_{\max})时,所对应的压痕深度为最大压痕深度(h_{\max});将 P 完全卸载至零时,所对应的压痕深度为残余压痕深度(h_f),两者之差即为压痕接触深度(h_c); S 为卸载曲线初期的斜率.

1.2.2 微观形貌和能谱分析

采用QUANTA-650型环境扫描电镜(ESEM)获得试样的微观形貌照片和EDS图谱^[15-16].立方体试样体积

表3 混凝土的配合比

Table 3 Mix proportions of concretes

No.	Cement	Slag	Fly ash	Silica fume	Water	Sand	Coarse aggregate	SAP (dry weight)	Pre-water absorption	Water reducing agent
HSC	371.2	79.6	53.0	26.4	180.0	625.0	1 065.0	0	0	0.5
HSC10	371.2	79.6	53.0	26.4	180.0	625.0	1 065.0	1.6	32.0	0.5

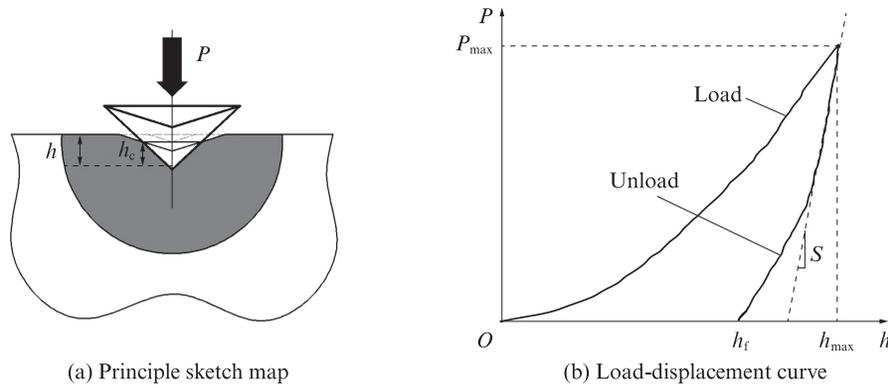


图1 纳米压痕测试原理示意图和荷载-位移曲线
Fig. 1 Principle sketch map and load-displacement curve of nano indentation test

约为 1 cm^3 , 在电压 $25\sim 30\text{ kV}$ 、最大电流 200 nA 、工作距离 10 mm 及停留时间 150 s 条件下捕获 SEM 照片。

1.3 试验方案

先通过纳米压痕试验对不同养护龄期的内养护混凝土力学性能展开研究,再运用 SEM-EDS 工具研

究材料的物相及分布特征。采用 6×6 点阵(间距为 $40\text{ }\mu\text{m}$)对试样进行纳米压痕试验,打点位置如图 2 所示,其中最大载荷为 500 mN 、单点加载时间为 25 s 、保持荷载时间为 10 s 。试验循环 5 次,以消除微观蠕变。

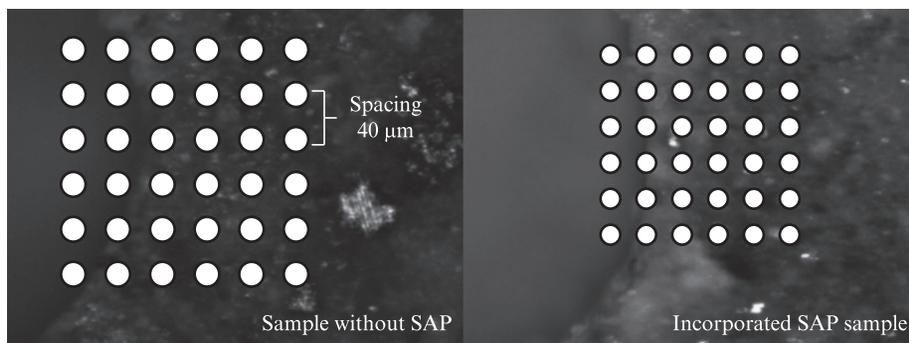


图2 试样压痕试验区域照片
Fig. 2 Photographs of indentation test area of samples

2 结果与讨论

2.1 不同养护龄期内养护混凝土的微观特性量化分析

2.1.1 养护龄期对内养护混凝土微观力学的影响

以试样 HSC10 为研究对象,为确保试验数据的可靠性,对养护龄期分别为 $3, 7\text{ d}$ 时的试样各进行 3 组,共 6 组纳米压痕试验,对比不同养护龄期对内养护混凝土的养护效果。由于微观试验精度要求较高,试验环境等影响会产生无效数据,选取 6 组试验中无效点占比最少的数据。本试验所选用的 2 组纳米压痕数据中无效点数分别为 3 个和 2 个,占总压痕点数的 8.3% 和 5.6% ,数据合理可靠。

将纳米压痕结果绘制为弹性模量与硬度分布云图,如图 3 所示。由图 3 可见:界面为内养护混凝土中的薄弱环节,孔隙较多,其弹性模量介于水泥石和孔隙之间,随着养护龄期的增加,内养护范围内界面的

弹性模量逐渐增大; 3 d 龄期时孔周围的物相分布不均匀,SAP 周围的低密度水化硅酸钙凝胶(LD C-S-H)居多,并夹杂孔隙; 7 d 龄期时,SAP 周围仍被 LD C-S-H 包围,但高密度 C-S-H 凝胶(HD C-S-H)增多,且原夹杂孔隙被填充,结构变得密实。这说明 7 d 龄期时,SAP 周围的硬度高于 3 d 龄期试样,并且随着水泥水化的进行,各物相的硬度值呈现一定的增长。

图 4 为 SAP 的释水过程示意图。由于 SAP 本身释水^[17]且强度不高,内养护混凝土内孔隙率增高,宏观力学性能降低。随着水泥水化的进行,SAP 释水导致水分迁移至界面,但该界面并非十分致密,越靠近 SAP 孔隙的位置,结构愈发稀疏,表明水化界面是由于水泥基体中的离子在 SAP 释水过程中扩散到 SAP 孔后,逐渐发生反应所形成的。根据模量云图颜色变化及弹性模量相对值(图 3)可知,当养护龄期增加时,水化产物 C-S-H 的逐渐沉积促使 SAP 孔隙面积

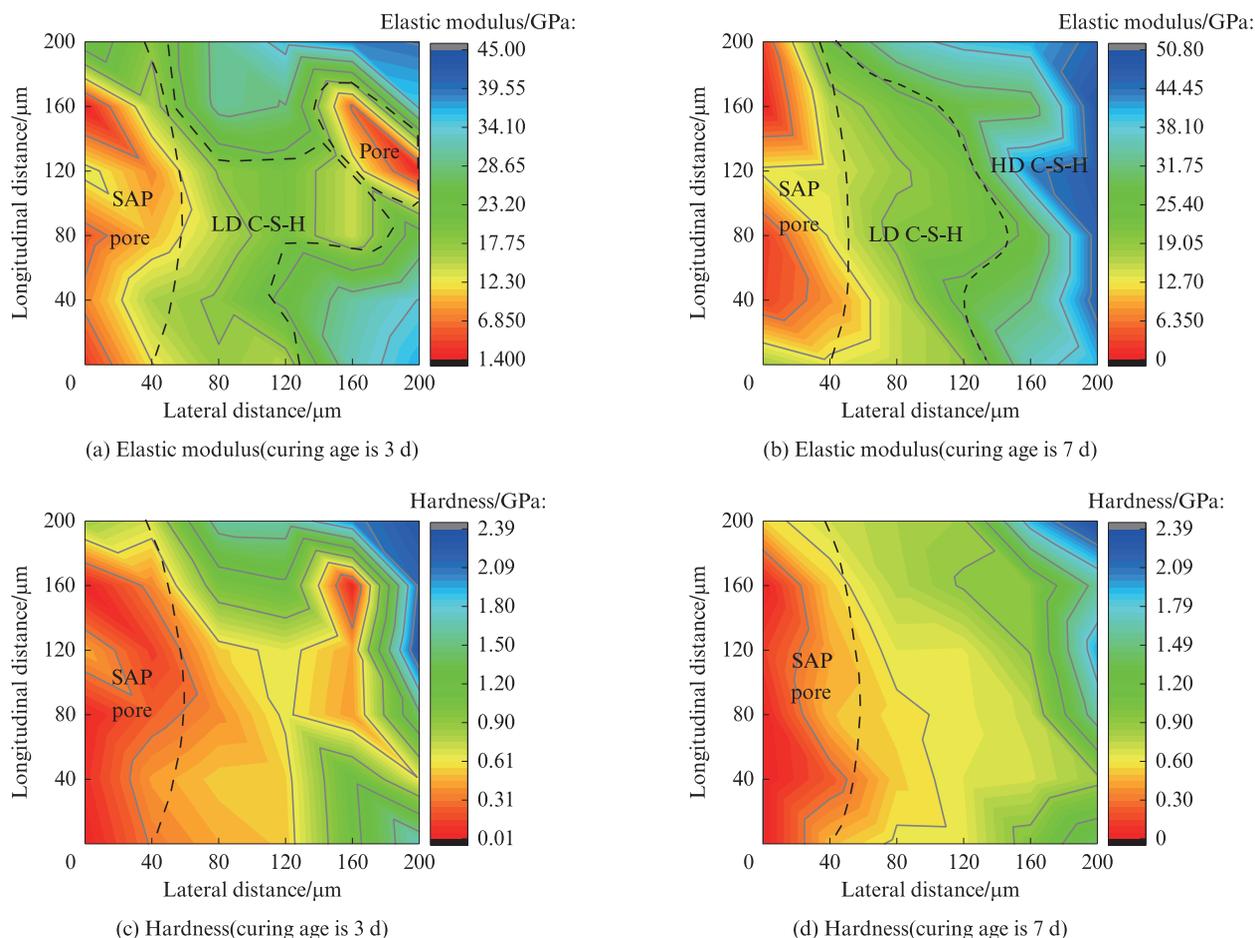


图3 内养护混凝土的弹性模量与硬度分布云图

Fig. 3 Elastic modulus and hardness distribution cloud maps of internal curing concrete

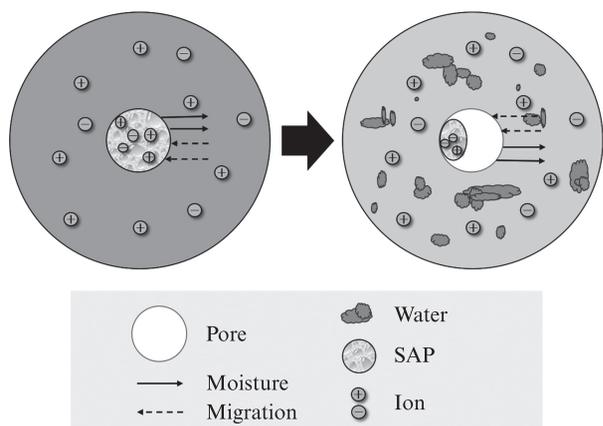


图4 混凝土中SAP释水过程示意图

Fig. 4 Schematic of water release process of SAP in concrete

减小,试样结构更加致密,其弹性模量增加。

根据纳米压痕试验,分别统计了3、7 d养护龄期下3组试样的测试结果,通过计算孔隙、未水化物、水化产物C-S-H和Ca(OH)₂在纳米压痕有效测区的面积占比(以下均为平均值)可知:随着养护龄期的增加,试样孔隙率由19.4%下降到13.9%,总体下降5.5%;3 d龄期时未水化颗粒体积分数为13.9%,7 d

龄期时未水化颗粒体积分数为8.3%,总体减小5.6%;水化产物C-S-H在3 d龄期时体积分数为50.0%,7 d龄期时体积分数为66.7%,总体增加了16.7%;当养护龄期为3 d时,水化产物Ca(OH)₂的体积分数为16.7%,龄期为7 d时体积分数为11.1%,减小了5.6%,养护龄期的增加使得Ca(OH)₂含量减少。以上表明,随着养护龄期的增加,试样内水化界面逐渐致密,减少了SAP释水产生的孔隙数量,补偿了原本薄弱的SAP与水泥基体之间的界面。

2.1.2 基于能谱线扫描识别物相并表征化学组成

为探究内养护混凝土中不同水化产物元素含量的规律,通过EDS扫描得到不同水化产物元素含量及分布规律,如图5所示。由图5可见:(1)养护龄期为3 d时,在0~40 μm范围内试样HSC10的 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 介于0.8~1.5之间,这是由于3 d龄期时水泥水化反应不充分,该范围内的物相是处于扩散阶段的C-S-H凝胶;40~60 μm和160~190 μm范围内,Si含量处于峰值,Ca含量较少,为未完全水化的硅灰和粉煤灰;养护龄期为3 d时,试样中的元素分布不均匀,原因是试样中产生了多个物相,其中包括C-S-H凝

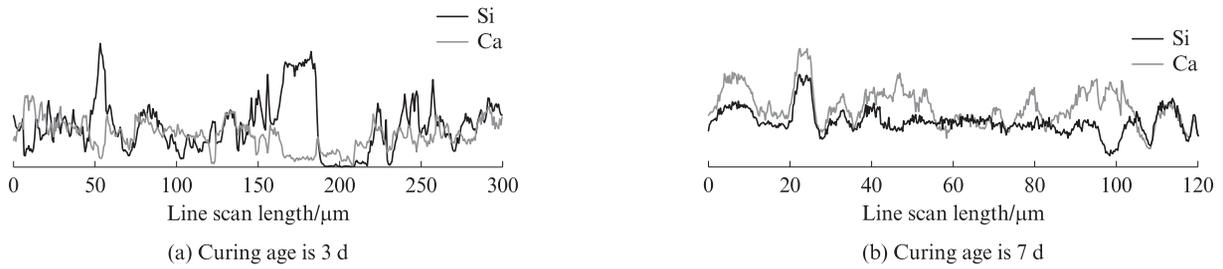


图5 不同养护龄期下试样HSC10的EDS图谱
Fig. 5 EDS spectra of sample HSC10 at different curing ages

胶、粉煤灰颗粒和孔隙等。(2)养护龄期为7 d时,在0~50 μm范围内,试样HSC10的 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 约为1.5,生成了较多的C-S-H凝胶,水化反应较充分;在60~70 μm范围内,Ca、Si含量较为接近,SAP释水后促进了该处的水化反应。这表明,7 d龄期时试样HSC10中的元素分布较3 d龄期时均匀,水化产物

C-S-H逐渐增多,形成了较为致密的水化界面,与纳米压痕测试结果吻合较好。

2.2 内养护机制的微观量化分析

2.2.1 内养护材料对混凝土微观力学的影响

选取7 d养护龄期时的试样HSC和HSC10进行纳米压痕试验,并将试验数据绘制成云图,如图6所示。

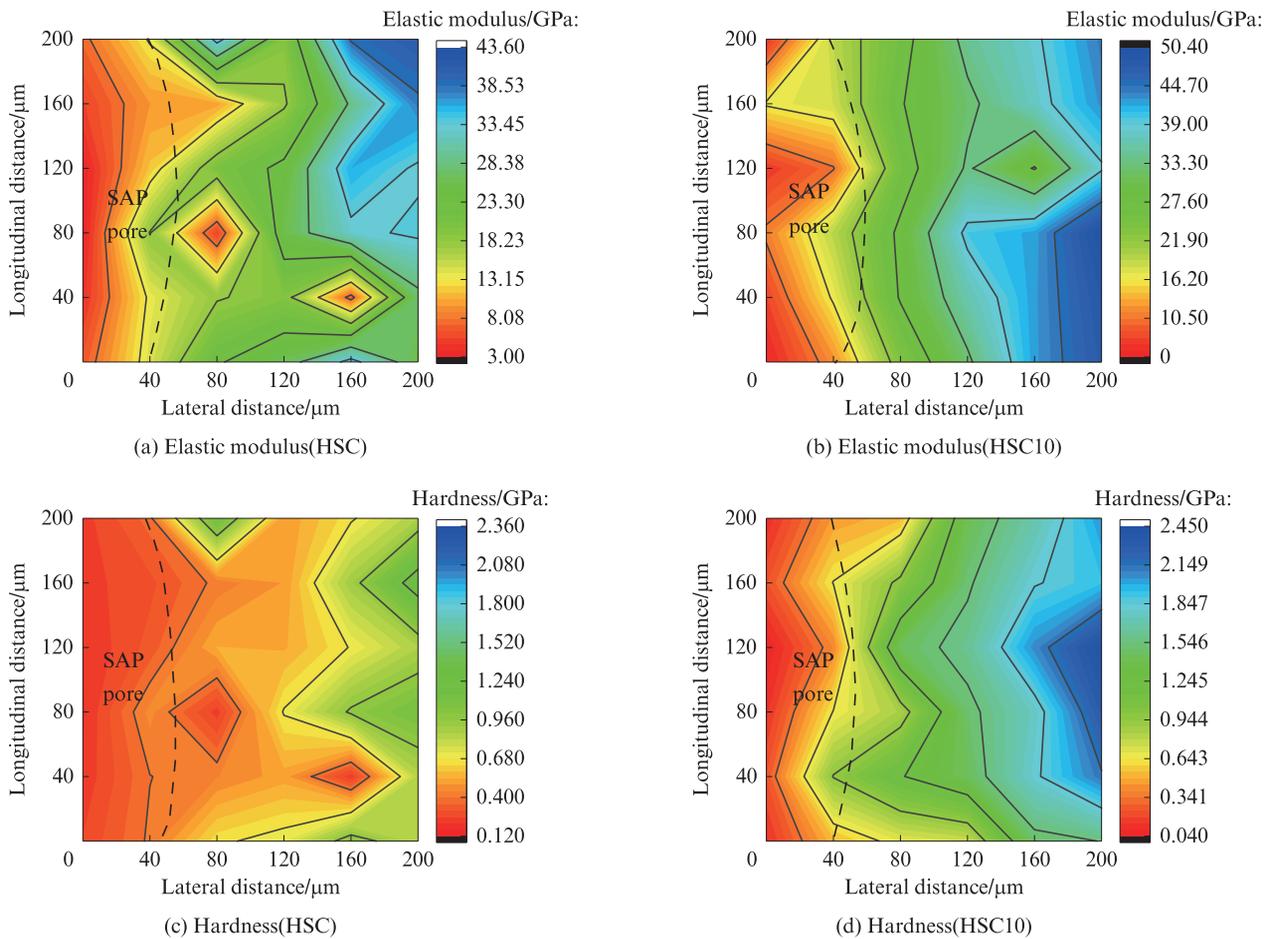


图6 试样HSC和HSC10的弹性模量及硬度分布云图
Fig. 6 Elastic modulus and hardness distribution cloud maps of sample HSC and HSC10

由图6可见:试样HSC孔洞周围的物相不均匀,并存在少量孔隙;而试样HSC10孔洞周围的物相均匀,且随着压痕点与SAP孔洞之间横向距离的增大,其弹性模量及硬度值呈现逐渐增大趋势.SAP在混凝土内释放出预先吸收的水分,使SAP孔洞周围基

体的水化反应更加充分,水化产物更加致密.以上表明,内养护材料SAP使其孔洞周围的水化界面更加致密,提高了高强混凝土孔隙周围的弹性模量及硬度。

2.2.2 基于扫描电镜的物相识别与分析

图7为7 d养护龄期时试样HSC和HSC10的

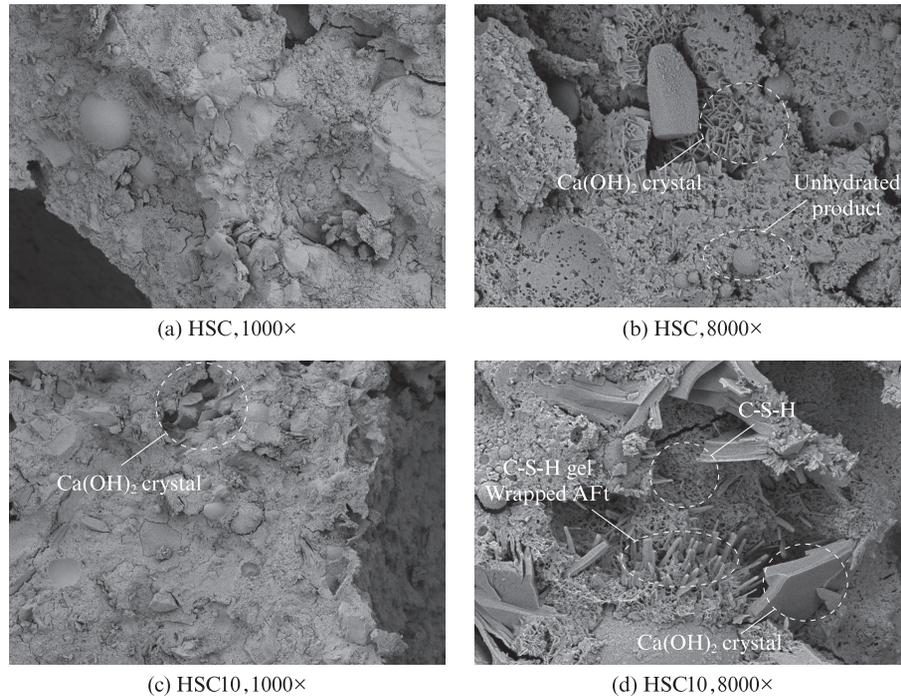


图7 试样HSC和HSC10的SEM照片(7 d养护龄期)
Fig. 7 SEM images of sample HSC and HSC10(curing age is 7 d)

SEM照片.由图7可见:(1)试样HSC内有较多微小裂缝和孔隙,其内部除了若干片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体外,还有若干球形的未水化硅灰与粉煤灰颗粒,这是因为水泥浆体在硬化过程中自身水分会随之减少,导致试样内产生较多微小裂隙,结构松散.(2)试样HSC10较HSC更为密实,这是由于内养护材料掺入后,其孔洞周围基体的水化反应较为充分;虽然仍存在微小裂缝和若干未水化颗粒,但由于密实的水泥水化产物将未水化颗粒紧紧包围,结构密实度显著提升,结构整体的宏观强度得以提高.(3)在试样HSC10中可观察到大量网络状C-S-H凝胶及少量被C-S-H凝胶包裹的细长针棒状物——钙钒石(AFt),形成了良好的结构;另外由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体沉积于C-S-H中,虽然其形貌不易辨认,但仍可观察到若干多边形片的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体.由此说明,随着SAP的掺入,混凝土结构变得更加密实,与其力学性能规律相一致.

2.2.3 基于能谱线扫表征生成物分布特征

为观察内养护材料SAP释水后界面周围的水化情况,对试样HSC和HSC10进行EDS线扫描,图谱见图8.分析图中试样HSC的元素含量变化可知:在 $30\sim 38\ \mu\text{m}$ 范围内,Ca的原子百分比为Si的2倍,此处为未水化物硅酸二钙(C_2S);在 $70\sim 80\ \mu\text{m}$ 范围内,观察到少量的C-S-H凝胶;在 $90\sim 100\ \mu\text{m}$ 处,Ca含量丰富,为未水化物硅酸三钙(C_3S);在 $100\sim 150\ \mu\text{m}$ 范围内,试样中的元素分布分散,呈现不均匀性.总体上看,Si含量最大,其原子百分比为20.52%,其次为Ca,其原子百分比为16.28%,这是由于试样中的粉煤灰与硅灰未完全水化,导致少量水化产物、未水化颗粒、 C_3S 及孔隙等多相产生.观察试样HSC10的EDS线扫描图谱可知:在 $0\sim 25\ \mu\text{m}$ 内试样范围内的元素含量处于低峰,是试样内SAP释水后体积缩小所留下的孔洞;在 $25\sim 60\ \mu\text{m}$ 的SAP孔洞界面处, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 为 $1.5\sim 2.0$,有大量C-S-H凝胶生成;在

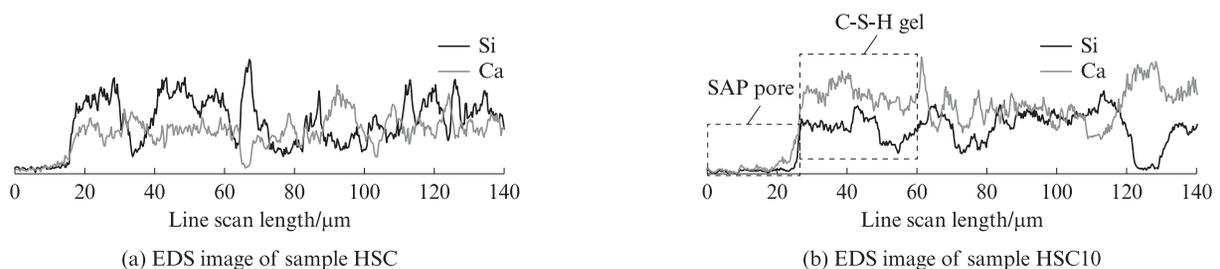


图8 试样HSC与HSC10的EDS图谱
Fig. 8 EDS spectra of sample HSC and HSC10

80~110 μm 范围内, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 近似为 1.0, 此处为处于扩散期的 C-S-H 凝胶; 线扫描图中部分区域 Si 含量依旧较大, 这是由于试验养护龄期为 7 d, 未达到粉煤灰、硅灰等完全反应时间, 但纵观全图 Ca 的原子百分比明显提高, 为 22.94%, Si 的原子百分比为 15.51%, 总体水化产物 C-S-H 增多, 水化反应更加充分。

综上所述, 掺入内养护材料 SAP 的试样 HSC10 总体上元素分布较试样 HSC 更加均匀, 水化产物含量增大, 孔洞界面更加紧密, 进一步说明内养护材料 SAP 的掺入对高强混凝土的力学性能有积极影响。

3 结论

(1) 随着养护龄期的增加, 内养护混凝土中的凝胶产物含量增大。在水化反应作用下, 随着压痕点与 SAP 孔隙点之间横向距离的增大, 混凝土的弹性模量及硬度均出现逐渐增大的趋势, 表明随着水化程度的加深, 内养护混凝土中各物相的弹性模量和硬度有一定增长。

(2) 掺入 SAP 后, 混凝土内 C-S-H 凝胶等水化产物含量增加, 水化生成物的逐渐沉积促使 SAP 孔隙面积减小, SAP 孔洞周围界面结构更加致密, 改善了多孔、多裂隙结构。

(3) 随着 SAP 材料促进孔洞界面的水化反应, 水化产物含量较未掺 SAP 的混凝土试样明显增多, 说明 SAP 的掺入对混凝土内部水化反应具有积极作用, 对高强度混凝土的抗压性和耐久性有明显改善。

参考文献:

- [1] DHIR R K, HEWLETT P C, LOTA J S, et al. An investigation into the feasibility of formulating 'self-cure' concrete[J]. *Materials and Structures*, 1994, 27(10):606-615.
- [2] 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 Licheng, ZHANG Lei. Research progress on concrete internal curing technology[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(6):1471-1478. (in Chinese)
- [3] 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. Review on cement concrete internally cured by SAP[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(4):1-31. (in Chinese)
- [4] 郭利霞, 张芳芳, 王明华, 等. 内养护高强混凝土自收缩性能研究[J]. *结构工程师*, 2021, 37(3):145-150.
GUO Lixia, ZHANG Fangfang, WANG Minghua, et al. Study on shrinkage properties of high strength concrete with silica fume internal curing[J]. *Structural Engineers*, 2021, 37(3):145-150. (in Chinese)
- [5] 吴庆, 朱袁洁, 许耀, 等. 基于 SEM 和 XRD 微观测试下单掺矿物掺合料透水混凝土性能分析[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(3):112-118.
WU Qing, ZHU Yuanjie, XU Yao, et al. Performance analysis of permeable concrete with single mineral admixture based on SEM and XRD micro-tests[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 34(3):112-118. (in Chinese)
- [6] 丁小平, 张君, 韩宇栋, 等. 考虑内养护剂动态释水的混凝土自干燥计算模型[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(3):242-247.
DING Xiaoping, ZHANG Jun, HAN Yudong, et al. Calculation model of concrete self-desiccation considering dynamic water release of internal curing agent[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(3):242-247. (in Chinese)
- [7] 胡传林, 李宗津, 王发洲. 混凝土微观力学基础研究进展及应用展望[J]. *工程力学*, 2021, 38(4):1-7, 92.
HU Chuanlin, LI Zongjin, WANG Fazhou. Progress and application prospect on fundamental research on concrete micromechanics[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(4):1-7, 92. (in Chinese)
- [8] ZHANG J L, ZAEFFERER S. Influence of sample preparation on nanoindentation results of twinning-induced plasticity steel[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, 28(5):877-887.
- [9] CONSTANTINIDES G, ULM F J, VAN VLIET K. On the use of nanoindentation for cementitious materials[J]. *Materials and Structures*, 2003, 36(257):191-196.
- [10] 盖海东, 冯春花, 董一娇, 等. 纳米压痕技术应用于水泥基材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(7):7107-7114.
GAI Haidong, FENG Chunhua, DONG Yijiao, et al. A review on the application of nanoindentation in the research of cement-based materials [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(7):7107-7114. (in Chinese)
- [11] CONSTANTINIDES G, RAVI CHANDRAN K S, ULM F J, et al. Grid indentation analysis of composite microstructure and mechanics: Principles and validation[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 430(1/2):189-202.
- [12] 周伟玲, 孙伟, 陈翠翠, 等. 应用纳米压痕技术表征水泥基材料微观力学性能[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(2):370-375.
ZHOU Weiling, SUN Wei, CHEN Cuicui, et al. Characterization for micro mechanical properties of cementitious materials by nanoindentation technique[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science)*, 2011, 41(2):370-375. (in Chinese)
- [13] 高岳毅, 张亚梅, 胡传林, 等. 用纳米压痕复合扫描电子显微镜分析水泥砂浆中单一组相的力学性能[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(11):1559-1563.
GAO Yueyi, ZHANG Yamei, HU Chuanlin, et al. Nanomechanical properties of individual phases in cement mortar analyzed using nanoindentation coupled with scanning electron microscopy[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 40(11):1559-1563. (in English)

- [14] 华培成. 水泥基材料微观力学性能的纳米压痕表征与多相分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
HUA Peicheng. Micromechanical properties of cementitious materials characterized by nanoindentation and multiphase analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [15] BENHIBA F, BENZEKRI Z, GUENBOUR A, et al. Combined electronic/atomic level computational, surface (SEM/EDS), chemical and electrochemical studies of the mild steel surface by quinoxalines derivatives anti-corrosion properties in $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl solution[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(5):1436-1458.
- [16] 孔德军, 王进春, 郭皓元, 等. 阴极弧离子镀 TiCN 涂层的 SEM-EDS 面扫描与线扫描分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(12):3000-3004.
KONG Dejun, WANG Jinchun, GUO Haoyuan, et al. SEM-EDS plane scan and line scan analysis of TiCN coatings by cathodic arc ion plating [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(12):3000-3004. (in Chinese)
- [17] 何锐, 谈亚文, 薛成, 等. 以高吸水性树脂为混凝土内养护剂的研究进展[J]. 中国科技论文, 2019, 14(4):464-470.
HE Rui, TAN Yawen, XUE Cheng, et al. Research progress of superabsorbent polymers as internal curing agent in concrete[J]. China Science Paper, 2019, 14(4):464-470. (in Chinese)