

文章编号:1007-9629(2022)01-0016-08

## 湿热环境下 SAP 内养生混凝土抗碳化性能及机理研究

郭寅川<sup>1,\*</sup>, 黄忠财<sup>2</sup>, 王文真<sup>1</sup>, 申爱琴<sup>1</sup>, 李得胜<sup>3</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点试验室, 陕西 西安 710064; 2. 广西崇瑞高速公路有限公司, 广西 南宁 530028; 3. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100089)

**摘要:**为解决湿热地区混凝土碳化破坏严重的问题,在室内模拟湿热环境,通过碳化试验研究了超吸水性树脂(SAP)粒径和掺量对混凝土抗碳化性能的影响;采用扫描电子显微镜(SEM)对碳化前后混凝土的微观形貌进行分析;采用压汞仪(MIP)对混凝土不同层位的孔结构进行剖析.结果表明:SAP材料可有效提高混凝土的抗碳化性能,且随着碳化龄期的增长,混凝土的抗碳化性能显著提升;虽然SAP的掺入增大了混凝土的孔隙率,但可以细化各层位之间的孔结构,降低孔隙间的连通性;SAP释水后在孔隙外部形成较为致密的环形层,且SAP促进水化可以较好地填充孔隙,减少裂缝数量和尺寸,从而抑制CO<sub>2</sub>的扩散,改善了混凝土的抗碳化性能.

**关键词:**道路工程;SAP内养生混凝土;抗碳化性能;微观形貌;孔结构分布

中图分类号:U414.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.01.003

## Investigation of Carbonation Resistance and Mechanism of SAP Internal Curing Concrete in Humid and Hot Environment

GUO Yinchuan<sup>1,\*</sup>, HUANG Zhongcai<sup>2</sup>, WANG Wenzhen<sup>1</sup>, SHEN Aiqin<sup>1</sup>, LI Desheng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Guangxi Chongrui Expressway Co., Ltd., Nanning 530028, China; 3. China Highway Engineering Consultants Group Co., Ltd., Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to solve the severe carbonization problem in hot and humid regions, the hot and humid environment were simulated in laboratory, the carbonization test was conducted and the effects of particle size and use level of super absorbent polymer(SAP) on the carbonation resistance of concrete were investigated. By using scanning electron microscope(SEM), concrete microscopic morphology before and after carbonation test were identified, and based on mercury intrusion meter(MIP), the pore structures of the concrete at different layers were determined. The results show that the incorporation of SAP can effectively improve the concrete carbonation resistance, and the carbonation resistance improved significantly with the increase of carbonization age. Although the incorporation of SAP increases the porosity of concrete, it refines the pore structure between each layer and reduces pore connectivity. Furthermore, after SAP releases water, a higher density region is formed outside the pores, and SAP promotes hydration to fill these pores, it also reduces the amount and size of crack, thereby SAP internal curing concrete can inhibit the diffusion of CO<sub>2</sub> and promote the carbonization resistance of concrete.

**Key words:** road engineering; SAP internal curing concrete; carbonation resistance; micromorphology; pore size distribution

收稿日期:2020-05-30; 修订日期:2020-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778061)

第一作者(通讯作者):郭寅川(1983—),男,江西九江人,长安大学副教授,博士.E-mail:silver007007@163.com

广西地区的桥梁构筑物长期在高温高湿环境下服役,全年较高的气温大大促进了CO<sub>2</sub>的扩散,加快了混凝土的碳化速率<sup>[1-2]</sup>.这不仅引起混凝土强度下降,桥梁承载能力降低,还导致混凝土产生微裂缝,为有害物质的侵蚀提供便捷通道,从而加速混凝土性能劣化,缩短桥梁构筑物的使用年限<sup>[3-4]</sup>.

目前,有学者通过提高混凝土强度<sup>[5]</sup>、使用防腐涂料<sup>[6]</sup>、增加保护层厚度<sup>[7]</sup>等方式来减缓CO<sub>2</sub>的扩散速率.然而这些方法不仅大大增加了混凝土成本,且难以从根本上解决混凝土碳化后开裂剥落、被腐蚀的问题.近年来,国内外学者发现超吸水性树脂(SAP)的掺入可有效减缓混凝土的碳化速率,降低其碳化深度<sup>[3-4,8]</sup>.Ma等<sup>[9]</sup>研究发现,SAP颗粒粒径越大,混凝土抗碳化效果越明显.张力冉等<sup>[10]</sup>认为,SAP颗粒可起到“水泵”的作用,其吸水膨胀的特点产生了堵塞孔隙的效果,进而抑制了CO<sub>2</sub>的扩散.秦鸿根等<sup>[11]</sup>研究认为,SAP可极大促进胶凝材料的水化,使混凝土内部的碱含量增加,从而延缓CO<sub>2</sub>的侵蚀.

综上所述,现有研究均证明SAP内养生混凝土具有显著的抗碳化性能,但在高温加速混凝土碳化环境下,内养生混凝土的抗碳化性能还需进一步研究.另外各学者未能对内养生混凝土改善碳化机理进行深入研究,且混凝土抗碳化性能的优劣与其内部微观形貌和孔结构特征密切相关.鉴于此,本文分析了广西湿热地区SAP材料对混凝土抗碳化性能的影响规律,并从细微观角度深入揭示了SAP对混凝土抗碳化性能的增强机理.

## 1 试验

### 1.1 原材料

超吸水性树脂(SAP)采用不规则聚丙烯酸钠型SAP.基于Powers理论公式<sup>[12]</sup>,计算SAP的理论内养生引水量.以实体工程配合比为基础,配制相应的水泥浆液,通过茶袋法测试不同粒径的SAP在广西极端最高气温(38℃)条件下的真实吸液倍率.SAP的主要技术指标及实测吸液倍率见表1.

表1 SAP的主要技术指标及实测吸液倍率  
Table 1 Main technical indicator and measured water absorption ratio of SAP

| Appearance   | Density/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | pH value/(1%<br>moisture<br>dispersion) | Saturated<br>absorption time<br>(deionized water)/s | Absorptance<br>(deionized<br>water)/(g·g <sup>-1</sup> ) | Water absorption ratio/(g·g <sup>-1</sup> ) |            |            |            |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------|------------|------------|
|              |                                   |                                         |                                                     |                                                          | 83-125 μm                                   | 125-149 μm | 149-250 μm | 250-500 μm |
| White powder | 750                               | 5.5-6.8                                 | <28                                                 | 450-550                                                  | 42.66                                       | 59.72      | 48.13      | 33.53      |

水泥选用海螺牌P·II 52.5硅酸盐水泥,其主要技术指标见表2;粗集料为石灰岩碎石,最大公称粒径为19 mm,分为4.75~9.5 mm和9.5~19 mm两档,堆积密度最大时两档料的质量比为3:7,满足水泥混凝土合成级配要求;细集料采用合浦伸信砂场产机制砂,细度模数为2.92,含泥量(质量分数,文中涉及的含量、水胶比除特别说明外均为质量分数或质量比)为1.6%,表观密度为2.655 g/cm<sup>3</sup>;减水剂采用PCA-I型高性能减水剂,减水率为36%,含气量(体积分数)为5.6%;水为市政自来水,氯离子含量为10 mg/L,碱含量为10 mg/L,pH=7.5.原材料各项性能指标均符合技术规范要求.

表2 水泥的主要技术指标  
Table 2 Main technical indicator of cement

| Density/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | Fineness/<br>(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | Stability/<br>mm | w(SO <sub>3</sub> )/<br>% | w(MgO)/<br>% | IL(by<br>mass)/% |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|------------------|---------------------------|--------------|------------------|
| 3 100                             | 328                                              | 1.5              | 1.66                      | 0.66         | 2.64             |

### 1.2 混凝土配合比

根据4种粒径SAP(83~125、125~149、149~250、250~500 μm)实测的吸水泥浆倍率,基于内养

生混凝土理论额外水胶比计算公式<sup>[13]</sup>,得到SAP理论掺量(以胶凝材料质量计)分别为0.180%、0.120%、0.100%和0.140%.结合室内砂浆试验结果,并通过灰靶理论计算分析,确定适用于湿热地区内养生混凝土的SAP最佳粒径为125~149 μm,最佳掺量为0.100%.在最佳粒径条件下,研究了SAP掺量(0.075%~0.125%)对混凝土碳化性能的影响.内养生混凝土的配合比如表3所示.

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 抗碳化性能试验

广西地区年平均最高气温为29.5℃,且高温持续时间长,空气相对湿度高(RH≥80%).为模拟广西湿热环境对混凝土抗碳化性能的影响,将成型后的混凝土试件放置在恒温恒湿箱中养护28 d后,按照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行混凝土抗碳化性能测试.棱柱体试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,每组设置3个平行试件,试件留1个侧面,其余侧面用石蜡进行密封.为加快混凝土碳化速率,将混凝土碳化箱环境设置为(30±2)℃、相对湿度(70±5)%、CO<sub>2</sub>质

表3 内养生混凝土的配合比  
Table 3 Mix proportion of internal curing concrete

| Specimen No. | Extra water-binder ratio(by mass)/% | Particle size/<br>$\mu\text{m}$ | $w(\text{SAP})/\%$ | Mix proportion/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |           |        |        |                  |
|--------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|-----------|--------|--------|------------------|
|              |                                     |                                 |                    | Cement                                           | Aggregate | Sand   | Water  | Superplasticizer |
| ZJ           | 0                                   |                                 | 0                  | 479.00                                           | 1 100.00  | 733.00 | 158.00 | 2.63             |
| S03          | 5.94                                | 250-500                         | 0.180              | 479.00                                           | 1 100.00  | 733.00 | 158.00 | 2.63             |
| S06          | 5.94                                | 149-250                         | 0.120              | 479.00                                           | 1 100.00  | 733.00 | 158.00 | 2.63             |
| S10-1        | 4.48                                | 125-149                         | 0.075              | 479.00                                           | 1 100.00  | 733.00 | 158.00 | 2.63             |
| S10-2        | 5.94                                | 125-149                         | 0.100              | 479.00                                           | 1 100.00  | 733.00 | 158.00 | 2.63             |
| S10-3        | 7.46                                | 125-149                         | 0.125              | 479.00                                           | 1 100.00  | 733.00 | 158.00 | 2.63             |
| S12          | 5.94                                | 83-125                          | 0.140              | 479.00                                           | 1 100.00  | 733.00 | 158.00 | 2.63             |

量分数(20±3)%.通过式(1)计算混凝土碳化3、7、14、28 d后的平均碳化深度.

$$\bar{d}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

式中: $\bar{d}_i$ 为试件碳化 $t$ 时刻的平均碳化深度,mm; $d_i$ 为各测点的碳化深度,mm; $n$ 为测点总数,每个试件至少读取10个数据.

### 1.3.2 微观形貌测试

使用 JEOL JSM-6390A 扫描电子显微镜 (SEM)对28 d龄期的ZJ组(基准组)和S10-2组(初选最佳配比组)混凝土的微观形貌进行观测.SEM的图像分辨率为3.5 nm,放大倍率为20~8×10<sup>6</sup>.试样制备和测试过程为:将养护28 d的试件切片剪裁成尺寸为1 cm<sup>3</sup>左右的立方体试样,每个试件制取2个试样;使用5~74  $\mu\text{m}$ 的砂纸对其打磨抛光

后,用无水乙醇浸泡至终止水化,放入60℃的烘箱中烘至恒重;采用离子喷溅仪对试样进行喷金处理后,用导电胶将其固定在支架上,用SEM观测其微观形貌.

### 1.3.3 孔结构测试

采用 AutoPore IV 9510 型压汞仪(MIP)研究混凝土的孔结构,测试平均孔径、孔隙率、临界孔径、各类型孔径进汞量及所占比例等孔结构特征参数.孔径测试范围为6.2 nm~1 000  $\mu\text{m}$ ,接触角为140°.从养护至规定龄期试件的不同位置取1 cm<sup>3</sup>左右的颗粒,用无水乙醇浸泡至终止水化后放入60℃烘箱中烘至恒重,采用MIP进行孔结构测试.研究混凝土分层孔结构特征参数时,采用分层取样的方法,沿混凝土厚度方向,在其上、中、下层位处分别取样,具体取样位置如图1所示.

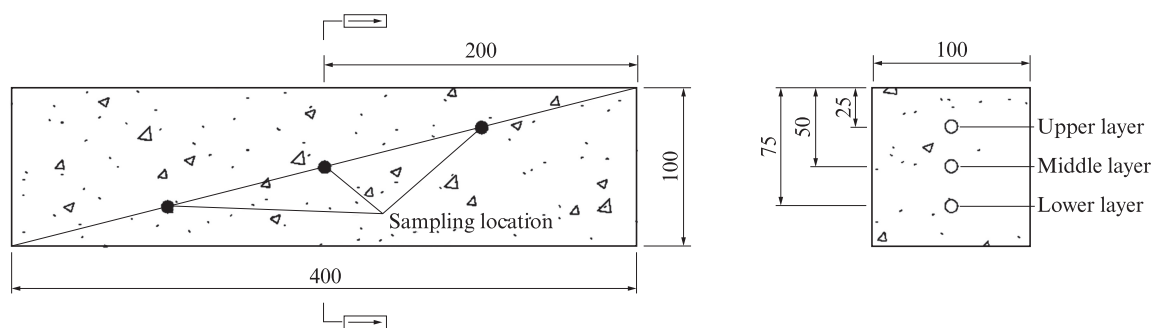


图1 分层取样位置

Fig. 1 Location of stratified sampling (size:mm)

## 2 试验结果分析

### 2.1 SAP粒径对混凝土抗碳化性能的影响

SAP粒径对混凝土抗碳化性能的影响见图2.由图2可知:(1)掺入SAP后,除SAP粒径为250~500  $\mu\text{m}$ 的混凝土试件S03外,其余各混凝土试件的抗碳化性能均有良好改善,其中SAP粒径为125~

149  $\mu\text{m}$ 的混凝土试件S10-2的抗碳化性能最好,其28 d碳化深度较基准组ZJ降低了53.21%,其次是SAP粒径为149~250  $\mu\text{m}$ 的混凝土试件S06.(2)SAP粒径为250~500  $\mu\text{m}$ 的混凝土试件S03 3 d碳化深度比基准组ZJ高12.12%,而28 d碳化深度比基准组ZJ仅高出4.59%,说明随着碳化龄期的增长,粒径为250~500  $\mu\text{m}$  SAP的抗碳化作用逐渐明显.(3)随着

SAP粒径的减小,混凝土的抗碳化性能呈先升后降趋势;但当掺入粒径更小的83~125  $\mu\text{m}$  SAP时,混凝土试件S12的抗碳化性能改善作用不显著,其28 d碳化深度仅比基准组ZJ降低7.34%。

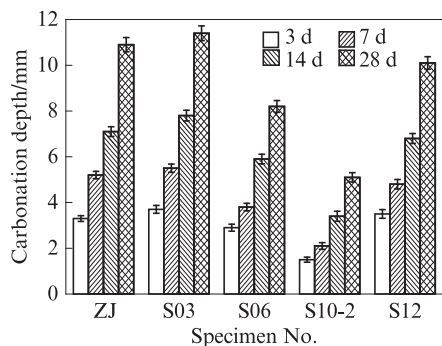


图2 SAP粒径对混凝土抗碳化性能的影响

Fig. 2 Effect of particle size on carbonation resistance of concrete

根据不同碳化龄期下混凝土的碳化深度,计算混凝土在3、7、14、28 d的碳化速率,结果如图3所示。由图3可见,5组混凝土在各碳化龄期的碳化速率趋势基本一致,即混凝土前期碳化速率较快,随着碳化龄期的增长,碳化速率逐渐降低。这与实际情况相符,随着混凝土碳化的不断进行,进入混凝土内部的 $\text{CO}_2$ 越来越少且越来越困难。由图3还可见,当混凝土碳化3 d时,除S10-2组外,其余各内养生混凝土的碳化速率均大于基准组ZJ,但碳化14 d时,所有内养生混凝土的碳化速率均高于基准组ZJ。这可能是早期SAP释水留下孔隙,后期水化作用填充了这些残留孔所致。

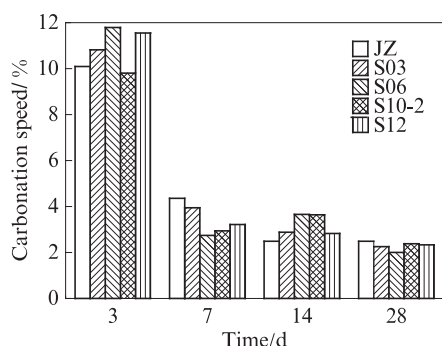


图3 混凝土的碳化速率

Fig. 3 Carbonation speed of concrete

## 2.2 SAP掺量对混凝土抗碳化性能的影响

当SAP粒径为125~149  $\mu\text{m}$ 时,SAP掺量对混凝土抗碳化性能的影响如图4所示。由图4可知:掺量为0.075%、0.100%和0.125%的内养生混凝土试件S10-1、S10-2、S10-3的3 d碳化深度较基准组ZJ分别降低了30.30%、66.67%和39.39%,28 d碳化深度

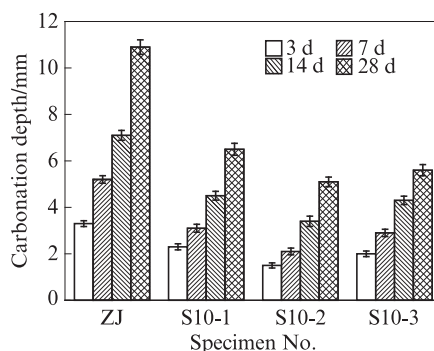


图4 SAP掺量对混凝土抗碳化性能的影响

Fig. 4 Effect of SAP on carbonation resistance of concretes

较基准组ZJ分别降低了40.37%、53.21%和48.62%。这说明SAP掺量为0.100%时,混凝土抗碳化性能的改善效果最显著,且随着碳化龄期的增长,SAP内养生材料的抗碳化作用日益突显。

## 3 增强机理分析

### 3.1 内养生混凝土微观形貌研究

利用SEM对碳化28 d前后ZJ组和S10-2组混凝土试样的微观形貌进行分析,其SEM照片如图5所示。由图5可见:碳化前,ZJ组混凝土内部水化产物较为疏松,存在孔洞较多,尚未形成致密结构;S10-2组混凝土内可见大量且致密的水化产物,如层状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{CH})$ 、簇状的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶及针状的钙矾石(Aft)相互紧密重叠、堆积,形成致密的网状结构。这说明SAP内养生材料的掺入促进了水泥的水化,同时大量水化产物对混凝土内部孔隙进行了较好填充,从而增强了混凝土结构的密实度和整体性,阻断了外界侵蚀性物质的入侵通道。此外,由于内养生混凝土内部生成了大量的水化产物, $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 侵入到混凝土内部相同深度处,需要消耗更多的侵蚀性物质(主要为 $\text{CO}_2$ ),从而延缓了侵蚀性物质的入侵速率。

由图5还可见:碳化28 d后,ZJ组和S10-2组混凝土中针状的Aft大量减少,生成大量碳化产物 $\text{CaCO}_3$ ,填充了混凝土内的孔隙和裂隙,使其结构更加致密;S10-2组混凝土的微观结构明显比ZJ组混凝土更为致密。这表明SAP内养生混凝土单位体积内可碳化物质增加,需要消耗更多的 $\text{CO}_2$ 来完成碳化进程,因此SAP的掺入能够延缓 $\text{CO}_2$ 的侵蚀速率,提高混凝土的抗碳化性能。

碳化28 d前后ZJ组和S10-2组混凝土内部裂缝特征微观形貌如图6所示。由图6可见:(1)碳化前,ZJ组和S10-2组混凝土内部均存在一定数量的裂缝,但

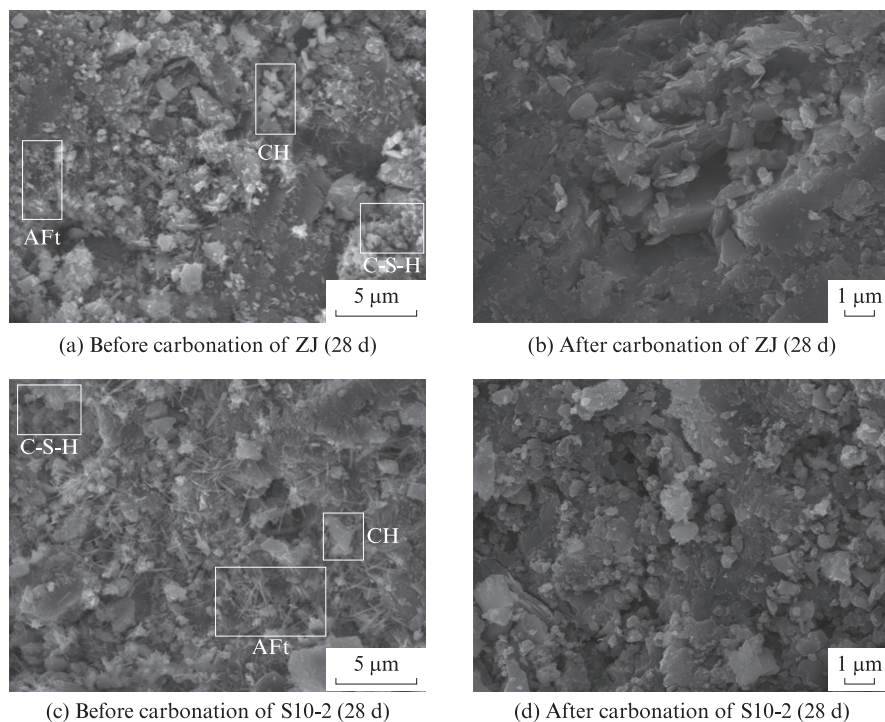


图5 碳化前后混凝土的微观形貌

Fig. 5 Micro morphology of concrete before and after carbonation

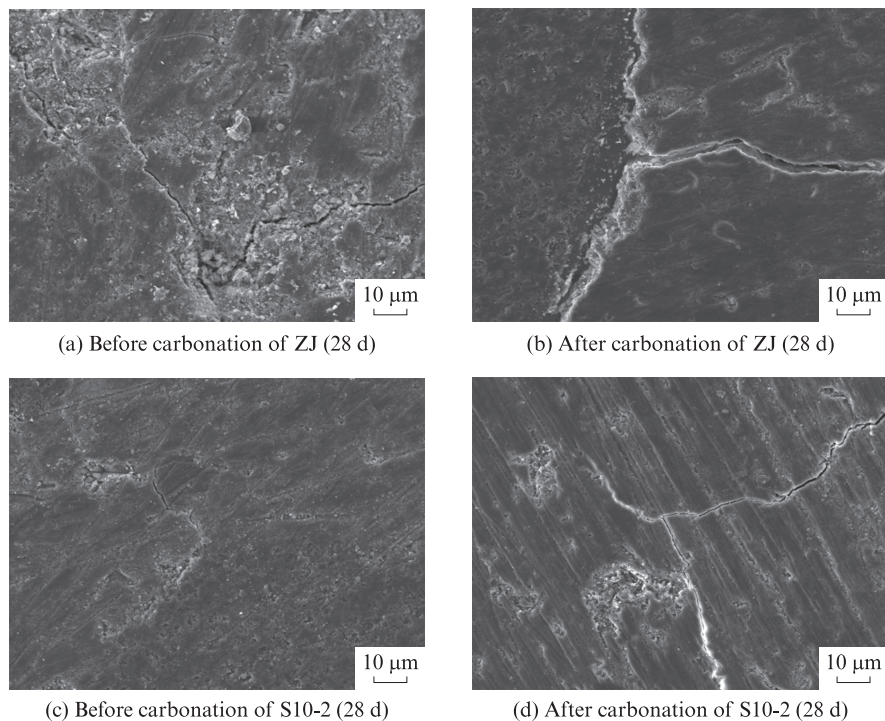


图6 碳化前后混凝土的裂缝特征微观形貌

Fig. 6 Crack characteristic micro morphology of concrete before and after carbonation

SAP内养生材料的掺入显著降低了混凝土内部微裂缝的长度、宽度和数量.这是由于随着混凝土的逐渐硬化,内部湿度下降时SAP吸收的内养生水分可以及时得到释放,起到很好的湿度补偿作用,供水泥持续进行水化,减少因水分散失严重而产生的微裂缝,

从而提高了混凝土的致密性.(2)碳化28 d后,ZJ组和S10-2组混凝土内部裂缝均明显加宽,但S10-2组混凝土裂缝的宽度仍明显小于ZJ组.这是因为混凝土碳化后产生收缩,形成细裂纹,进一步说明内养生混凝土能够延缓 $\text{CO}_2$ 侵蚀,提高混凝土抗碳化性能.

### 3.2 内养生混凝土细观孔结构分析

混凝土在成型过程中的结构分层特征对于其孔结构具有较大影响,而混凝土孔结构的变化显著影响其抗碳化性能.因此,本文依据 Odler 等<sup>[14]</sup>对水泥

石内部孔隙的分类,并以 28 d 龄期的 ZJ 组和 S10-2 组混凝土为研究对象,分别对其上、中、下层位处的孔隙及孔径分布参数进行分析.试验结果见表 4,孔径分布曲线见图 7.

表 4 混凝土不同层位孔隙及孔径分布参数  
Table 4 Pore size distribution of concrete at different layers

| Specimen No. | Layer  | Mean pore size / nm | Porosity<br>(by volume)/% | Pore size distribution / % |           |              |           |
|--------------|--------|---------------------|---------------------------|----------------------------|-----------|--------------|-----------|
|              |        |                     |                           | <10 nm                     | 10~100 nm | 100~1 000 nm | >1 000 nm |
| ZJ           | Upper  | 44.7                | 14.18                     | 14.06                      | 75.22     | 8.47         | 2.25      |
|              | Middle | 47.4                | 9.69                      | 12.97                      | 69.06     | 13.20        | 4.77      |
|              | Lower  | 28.8                | 8.58                      | 9.73                       | 72.59     | 11.87        | 5.81      |
| S10-2        | Upper  | 42.3                | 15.60                     | 22.73                      | 63.30     | 12.68        | 1.29      |
|              | Middle | 38.1                | 13.27                     | 21.48                      | 60.65     | 15.23        | 2.64      |
|              | Lower  | 34.6                | 12.37                     | 19.83                      | 59.96     | 16.49        | 3.72      |

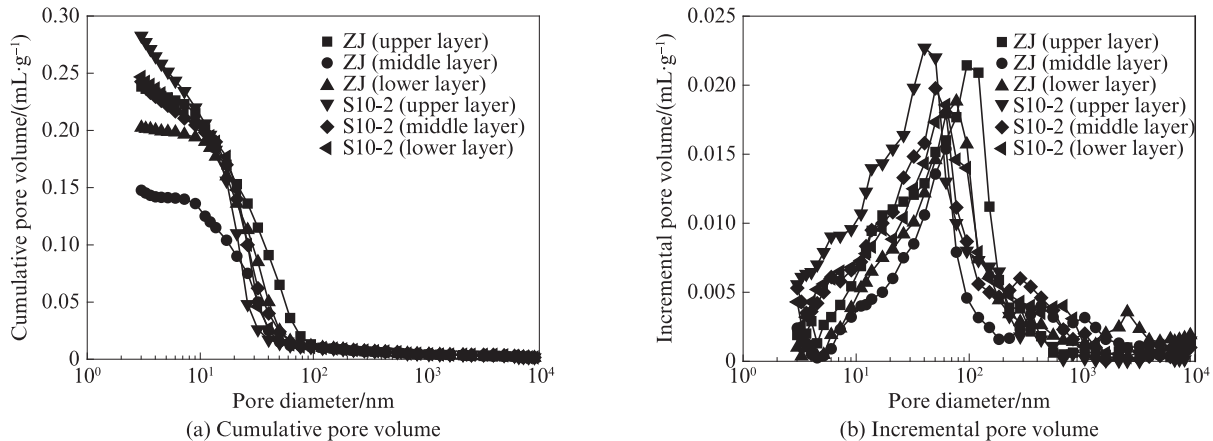


图 7 混凝土不同层位的孔径累积分布曲线及增量分布曲线

Fig. 7 Cumulative and incremental pore volume curves of concretes at different layers

由表 4 可知,混凝土不同层位的平均孔径和孔隙率差异较大,其中 ZJ 组和 S10-2 组混凝土不同层位的平均孔径和孔隙率的极差分别为 18.6 nm、5.60% 和 7.7 nm、3.23%. 这说明 SAP 的掺入显著改善了混凝土不同层位平均孔径和孔隙率差异较大的现象,使得混凝土整体结构更加均质,受力更加均匀.此外,SAP 的掺入增大了混凝土各层的孔隙率,上、中、下层孔隙率分别为 ZJ 组的 1.10、1.37、1.44 倍;同时也较大程度地降低了混凝土各层的平均孔径,尤其对上、中层的降低效果最为显著,分别降低了 5.37% 和 19.62%. 这一方面是因为 SAP 释水后留下释水孔,增大了混凝土的孔隙率;另一方面 SAP 的掺入提高了混凝土的水化程度,更多水化产物的生成有效细化了混凝土内部的孔结构.

由表 4 还可见,S10-2 组混凝土各层凝胶孔(<10 nm)、过渡孔(10~100 nm)、毛细孔(100~

1 000 nm)和大孔(>1 000 nm)所占平均比例分别为 ZJ 组混凝土的 1.74 倍、84.80%、1.32 倍和 59.63%,过渡孔和毛细孔总比例为 ZJ 组混凝土的 91.17%. 可见 SAP 的掺入显著提高了混凝土中凝胶孔的比例,且降低了过渡孔、毛细孔的总比例及大孔的比例,促使混凝土内部孔结构细化.

由图 7(a)可见:S10-2 组混凝土上、中、下层的临界孔径分别为 ZJ 组混凝土的 33.68%、80.65%、80.00%. 临界孔径的大小决定了混凝土内部孔隙连通性的强弱,因此粒径为 125~149  $\mu\text{m}$  SAP 的掺入降低了混凝土内部孔隙的连通性,使孔隙结构变得曲折,在一定程度上抑制了侵蚀性物质如  $\text{CO}_2$  的侵入.

由图 7(b)可见:2 组混凝土的最可几孔径(即孔径增量分布曲线峰值对应的孔径)均在过渡孔范围内,S10-2 组混凝土上、中、下层的可几孔径分别为

ZJ组混凝土的42.10%、80.65%、80.52%,说明SAP的掺入有效细化了混凝土内部的孔结构。

综上所述,粒径为125~149  $\mu\text{m}$  SAP的掺入虽然增大了混凝土的孔隙率,但降低了混凝土各层的平均孔径、临界孔径和最可几孔径,极大改善了混凝土各类型孔的分布比例,细化了孔隙结构,且解决了混凝土各层孔结构差异较大的问题。另外,SAP的掺入降低了混凝土内部孔隙的连通性,使得内养生混凝土展现出优良的抗碳化性能。

### 3.3 内养生混凝土抗碳化机理分析

结合内养生混凝土微观形貌及内部孔结构分布情况,来分析内养生混凝土的碳化过程及抗碳化机理。首先, $\text{CO}_2$ 通过混凝土表面的孔隙进入混凝土,在足够湿润的环境下与混凝土水化产物发生反应。混凝土碳化过程就是 $\text{CO}_2$ 不断向混凝土内部深入反应的过程:一方面,SAP释水后留下一定大小的孔隙,同时SAP孔隙周围形成了由C-S-H凝胶组成的环形层,环形层中靠近SAP孔隙的部分有更多的小孔,而远离SAP孔隙的部分更加致密,阻挡着 $\text{CO}_2$ 深入SAP孔隙内部;另一方面,在SAP释水孔附近,混凝土中的碱性物质碳化后生成 $\text{CaCO}_3$ 和游离水, $\text{CaCO}_3$ 对混凝土孔隙进行填充,游离水进一步促进水泥水化,两者的共同作用增加了混凝土的密实度,从而在一定程度上缓解了混凝土的碳化速率。因此随着碳化龄期的增长,混凝土的碳化速率逐渐减慢。但由于混凝土碳化后产生收缩,进而产生微细裂纹。因此, $\text{CO}_2$ 会持续不断地进入混凝土中,发生碳化反应。

当SAP粒径较小时,掺入的SAP颗粒数量越多,SAP在混凝土中分散的范围就越广,内养生范围也越广。此外,SAP粒径越小,释水后残留的孔隙就越小,且生成的水化产物可以较好地二次填充,再次细化了混凝土的孔隙,从而较好地抑制 $\text{CO}_2$ 扩散。但是当SAP粒径进一步减小至125~149  $\mu\text{m}$ 时,随着其掺量的增加,所引入的内养生水量增加,大量小粒径SAP掺入混凝土中,极易发生“微团聚”效应,未吸水饱和的SAP颗粒被饱和的SAP颗粒包裹,阻止其进一步吸收内养生水,从而限制了SAP的内养生范围,降低了内养生作用。此外,“抱团”的SAP颗粒释水后大大增加了残留孔的孔径,且未被吸收的内养生水分增加了混凝土的水灰比,增大了混凝土的孔隙率。因此应选择适当掺量的125~149  $\mu\text{m}$  SAP掺入混凝土中,以充分发挥SAP的内养生作用效果。

## 4 结论

(1)SAP内养生混凝土具有优良的抗碳化性能。随着SAP粒径的减小,混凝土的抗碳化性能先提升后降低。当掺入0.100%、粒径为125~149  $\mu\text{m}$  SAP时,混凝土抗碳化性能的改善效果最佳。

(2)SAP内养生材料的掺入促进了水泥颗粒的水化,水化产物填充了混凝土孔隙,细化了混凝土内部孔隙结构;同时单位体积内水化产物增多,其作为可碳化物质(如CH)将消耗更多的 $\text{CO}_2$ ,从而使碳化速率减慢。

(3)SAP的掺入虽然增大了混凝土的孔隙率,但改善了混凝土各类型孔的分布比例,使得混凝土整体结构更加均质;同时降低了过渡孔、毛细孔的总比例及大孔的比例,减少了裂缝宽度和长度,降低了混凝土内部孔隙的连通性。

(4)SAP释水后促进水泥水化,所生成的水化产物填充孔隙;同时形成的致密环形层细化了孔结构,会消耗更多的 $\text{CO}_2$ ,阻隔 $\text{CO}_2$ 深入与扩散。SAP的掺入提高了混凝土的致密性,从而抑制了 $\text{CO}_2$ 的扩散,改善了混凝土的抗碳化性能。

### 参考文献:

- [1] ELSALAMAWY M, MOHAMEDA R, KAMALE M. The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete [J]. Alexandria Engineering Journal, 2019, 58 (4): 1257-1264.
- [2] WANG W, LU C F, LI Y X, et al. Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 486-495.
- [3] BEUSHAUSEN H, GILLMER M, ALEXANDER M. The influence of superabsorbent polymers on strength and durability properties of blended cement mortars [J]. Cement and Concrete Composite, 2014, 52: 73-80.
- [4] DANG J T, HAO J, DU Z H. Effect of superabsorbent polymer on the properties of concrete [J]. Polymers, 2017, 9: 672.
- [5] SHARMA R, KHAN R A. Carbonation resistance of self-compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(6): 04020144.
- [6] WANG J B, NIU D T, MA R, et al. Influence the carbonation resistance and mechanical properties of shotcrete by accelerated carbonation test [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1065-1069: 1985-1989.
- [7] 雷斌. 再生混凝土梁耐久性性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009. LEI Bin. Research on durability of recycled concrete beams [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [8] HE Z M, SHEN A Q, GUO Y C, et al. Cement-based materials

- modified with superabsorbent polymers: A review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 225:569-590.
- [ 9 ] MA X W, LIU J H, WU Z M, et al. Effects of SAP on the properties and pore structure of high performance cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2017, 113: 476-484.
- [10] 张力冉, 孔祥明, 邢锋, 等. 高吸水树脂内养护混凝土的氯离子渗透及碳化性能[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(1):60-65.
- ZHANG Liran, KONG Xiangming, XING Feng, et al. Chloride ion invasion and carbonation property of internal cured concrete with super-absorbent polymer[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Nature Science), 2019, 40 (1): 60-65. (in Chinese)
- [11] 秦鸿根, 高美蓉, 庞超明, 等. SAP内养护剂改善膨胀混凝土性能及其机理研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3):394-399.
- QIN Honggen, GAO Meirong, PANG Chaoming, et al. Research on performance improvement of expansive concrete with internal curing agent SAP and its action mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3):394-399. (in Chinese)
- [12] POWERS T C, BROWNYARD T L. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste [J]. Journal Proceedings, 1946, 43(9):101-132.
- [13] LYU Z H, SHEN A Q, MO S X, et al. Life-cycle crack resistance and micro characteristics of internally cured concrete with superabsorbent polymers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259:119794.
- [14] ODLER I, RÖBLER M. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration [J]. Cement and Concrete Research, 1985, 15:401-410.