

粉煤灰掺量对碳化水泥浆体微结构的影响

白佳佳, 林楠, 王建民, 柳俊哲

(宁波大学土木与环境工程学院, 浙江宁波 315211)

摘要: 为了探究粉煤灰掺量对水泥浆抗碳化性能的影响,采用压汞法、可蒸发含水量法、XRD衍射图谱等,研究了碳化作用下粉煤灰掺量对水泥浆体内部微观结构的影响。结果表明:掺入粉煤灰可促进水泥浆试件的碳化,粉煤灰掺量为30%时水泥浆试件的碳化深度最大;随着粉煤灰掺量的增加,水泥浆总孔隙率增大,碳化后总孔隙率减小,小孔所占比例增大,水泥浆的孔结构改善效果越好,碳化后钙矾石消失,生成 CaCO_3 ;碳化有利于水泥浆试件裂缝的愈合,30%粉煤灰掺量试件养护后的平均裂缝宽度比养护前减小了72%。

关键词: 水泥浆; 碳化; 粉煤灰掺量; 微观结构; 裂缝宽度

中图分类号:TV41

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)05-0154-06

Effect of fly ash dosage on microstructure of carbonized cement paste

BAI Jiajia, LIN Nan, WANG Jianmin, LIU Junzhe

(School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to explore the influence of fly ash content on the carbonation resistance of cement paste, the mercury intrusion method, evaporative water content method and XRD diffraction pattern were used to study the influence of fly ash content on the internal microstructure of cement paste under carbonation. The results show that the incorporation of fly ash promotes the carbonation of the cement paste specimens, and the carbonation depth of the specimens is the largest when the dosage of fly ash is 30%. With the increase of the fly ash dosage, the total porosity of the cement paste increases, the total porosity after carbonation decreases, the proportion of small pores increases, the pore structure of the cement paste is improved, the calcium alum after carbonation disappears, and calcium carbonate is generated. The carbonation is conducive to the healing of cracks in the cement paste specimens, and the average crack width with 30% fly ash dosage is reduced by 72% compared with that before the maintenance of fly ash.

Key words: cement paste; carbonation; fly ash dosage; microstructure; crack width

1 研究背景

空气中的二氧化碳等酸性气体与混凝土中的碱性物质发生化学反应生成碳酸钙和水,使混凝土的碱度降低,这种现象称为混凝土的碳化^[1-2]。碳化过程中的生成物沉淀于内部孔隙中,提高了混凝土的密实度,使得混凝土抗压、抗折强度增大^[3-4]。但是碳化会降低混凝土对钢筋的保护能力,当碳化深度超过混凝土保护层厚度时,会破坏钢筋表面致密的保护膜,使得钢筋直接暴露在空气中,导致钢筋的

锈蚀。锈蚀会引起钢筋体积变大和表面裂缝,造成混凝土的开裂,结构的承载能力降低^[5-7]。因此研究混凝土的碳化过程具有重要的实际意义。

粉煤灰是从燃料燃烧过程中收集到的细粉末,其颗粒直径在1~100 μm之间。在混凝土中掺入粉煤灰,不但能够改善混凝土的性能,而且能代替水泥从而减少水泥用量,降低成本,减少大气污染,因此在工程中得到越来越多的应用^[8-9]。诸多学者对掺加粉煤灰的混凝土做了大量的实验研究及理论分析。阿茹罕等^[10]研究发现同等强度混凝土掺粉煤

收稿日期:2022-03-06; 修回日期:2022-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52178223)

作者简介:白佳佳(1999-),女,河南漯河人,硕士研究生,主要研究方向为混凝土耐久性。

通讯作者:柳俊哲(1964-),男,黑龙江五常人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为混凝土耐久性。

灰含量越大,越不利于抗碳化,但是当粉煤灰含量在 40% 以下时,粉煤灰掺量不同的混凝土抗碳化性能基本相同,且粉煤灰掺量对混凝土碳化早期影响较慢,而在碳化后期影响较大。李永鑫等^[11]的研究认为,单掺或复掺粉煤灰等掺合料对水泥硬化浆体的早期孔结构有一定的劣化作用,但是在水泥水化后期,粉煤灰明显改善了水泥浆体的孔隙结构,其中等直径的孔隙明显减少,优化了孔径分布。张扬等^[12]通过碳化试验研究了水胶比、水泥用量以及粉煤灰掺量对混凝土碳化深度的影响,结果表明,三者对混凝土碳化深度均有影响,而影响最大的为粉煤灰掺量。本文主要在保持其他条件相同的情况下,探究不同掺量的粉煤灰水泥浆试件在碳化环境中的微结构损伤变化,总结碳化条件下水泥浆试件的微结构变化规律^[13-17],为提高混凝土材料的抗碳化性能提供理论依据。

2 试验材料与方法

2.1 试验原材料及配合比

水泥采用 P. O42.5R 普通硅酸盐水泥,基本化学参数见表 1;粉煤灰采用巩义市元亨净水材料厂 I 级粉煤灰,具体参数见表 2;拌合水采用实验室内自来水,试验过程中水温基本保持在 20℃。本试验固定水灰比为 0.35,粉煤灰掺量采用 0、10%、20%、30% 取代水泥制作 4 组水泥浆试件,每组 12 块试件,尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm。试件成型 24 h 后拆模,将其放入标准养护室里进行养护,28 d 后移入混凝土碳化试验箱进行碳化。

表 1 试验用 P. O42.5 水泥的化学成分 %

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	R ₂ O
20.89	5.44	3.96	1.71	62.24	2.65	0.48

表 2 试验用粉煤灰的化学成分 %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	烧失量
53.36	29.09	0.81	3.87	2.27	2.48

2.2 试验方法

2.2.1 碳化试验 碳化试验在加速碳化室内进行^[18]。以 20% 的 CO₂ 浓度、(35±2)℃ 温度、(70±2)% 相对湿度条件处理试件,龄期分别达到 7、14、21、28 d 时破型,横向切开试件,将 1% 酚酞试剂喷涂在截面,静置显色后用高精度钢尺测量碳化深度^[19]。

2.2.2 孔隙率测量试验 孔隙率测定方法采用

“可蒸发水含量法”^[20-24]。即通过饱水混凝土试件在特定条件下的失水率间接求得,其计算公式如下:

$$P = \frac{V_p}{V_c} = \frac{(m_0 - m_d)\rho_c}{m_d \cdot \rho_w} \times 100\% \tag{1}$$

式中: P 为混凝土试件的体积孔隙率; V_p 为水泥浆中的孔隙体积, m^3 ; V_c 为水泥浆的体积, m^3 ; m_0 为完全饱水的水泥浆试件质量, kg ; m_d 为失水后的试件质量, kg ; ρ_c 为水泥浆的密度, kg/m^3 ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 。

孔结构测定采用压汞法^[25],将养护至预定龄期的水泥浆试件破碎后,选用 3~5 mm 的小碎块通过 Micromeritic AutoPore IV9510 型全自动压汞仪测定水泥浆试件的孔径分布情况,按照孔径大小对水泥基材料强度的影响^[26],将孔径大于 30 nm 的称为大孔(包含了部分少害孔及其全部有害及多害孔),孔径小于 30 nm 的称为小孔。

2.2.3 XRD 物相分析 用取芯机钻取养护后试样的中间部分,放入研钵中磨细均匀,放入振筛机筛选出直径小于 0.3 mm 的粉末,将筛选出的粉末放入烘箱中烘干 24 h,将烘干冷却后的样品放 X 射线衍射仪中,得到 XRD(X-ray diffraction)衍射图谱。

2.2.4 裂缝宽度测量试验 裂缝宽度实时检测采用北京建研佳康工程检测技术有限公司生产的裂缝宽度检测仪,型号为 JY-A8。水泥浆试件从标准养护室取出之后,采用裂缝宽度检测仪对试件表面裂缝进行检测,随后进行碳化养护或自然养护(室外自然条件,避免阳光直射),养护至预定龄期测量裂缝宽度。

3 结果与分析

3.1 粉煤灰掺量对水泥浆碳化深度的影响

图 1 为不同粉煤灰掺量的水泥浆试件碳化深度随龄期变化曲线,图中 f 表示粉煤灰掺量。

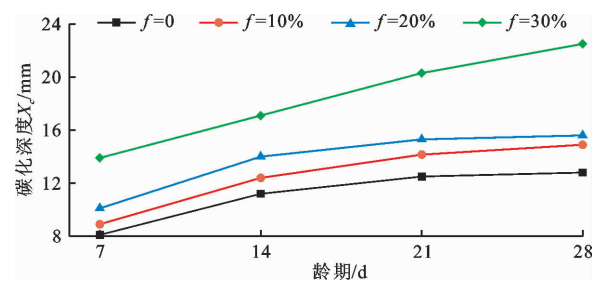


图 1 不同粉煤灰掺量的水泥浆试件碳化深度随龄期变化曲线

由图 1 可以看出,当粉煤灰掺量为 10%、20% 时,各龄期的水泥浆试件碳化深度与未掺加粉煤灰

相比差别相对较小,而粉煤灰掺量为 30% 时,碳化深度明显增大,即当粉煤灰掺量较小时,粉煤灰的掺入对增加水泥浆碳化深度的效应较弱。粉煤灰掺量为 10%、20%、30% 的水泥浆 28 d 龄期碳化深度与不掺加粉煤灰的水泥浆相比,比值分别为 1.16、1.22、1.76,说明粉煤灰促进了试件的碳化,粉煤灰作为原料取代部分水泥使试件内部氢氧化钙含量降低,同时粉煤灰具有火山灰反应,会导致试件内部氢氧化钙被消耗,减少了试件内部的碱储量,使试件的抗碳化能力变弱。图 1 中水泥浆试件前 14 d 碳化作用速度快于后 14 d,原因是胶凝材料持续水化带来的孔结构改善效应使 CO_2 在试件内的扩散逐渐受阻,碳化进程因此被延缓。

图 2 为不同粉煤灰掺量水泥浆试件的碳化深度 (X_c) 与碳化时间平方根 (d) 之间的关系。

由图 2 可知,粉煤灰掺量为 10%~30% 的 3 条拟合直线的拟合度 (R^2) 均较高,呈现出良好的相

关性。另外,30% 粉煤灰掺量下拟合直线的斜率大于 10% 和 20% 掺量下的斜率,说明 30% 粉煤灰掺量对水泥浆试件碳化深度影响更大。

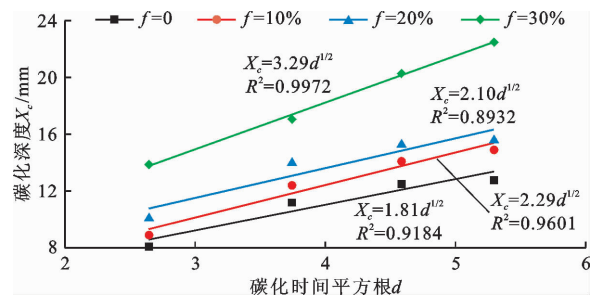


图 2 不同粉煤灰掺量水泥浆试件的碳化深度与碳化时间平方根的关系

3.2 粉煤灰掺量对水泥浆孔隙率的影响

图 3 为碳化作用下不同掺量粉煤灰的水泥净浆孔隙率随碳化时间变化曲线,反映了孔隙率大小随粉煤灰掺量、碳化时间的变化规律。

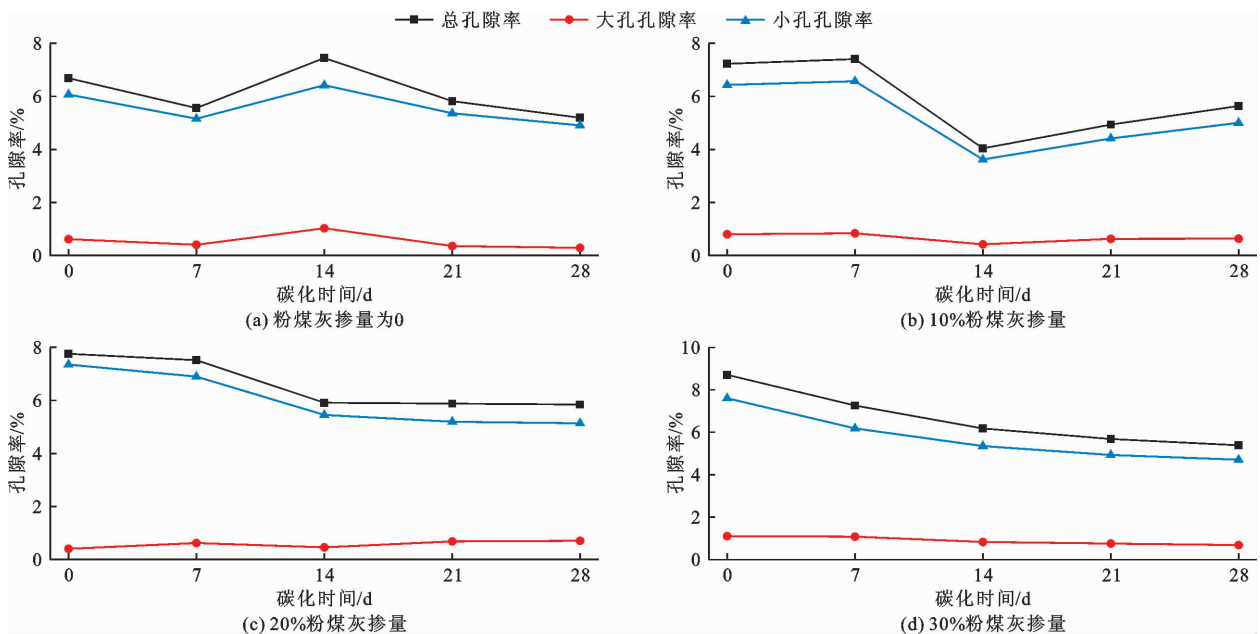


图 3 碳化作用下不同掺量粉煤灰的水泥净浆孔隙率随碳化时间变化曲线

如图 3 所示,碳化前粉煤灰掺量为 0、10%、20%、30% 的水泥浆试件总孔隙率分别为 6.69%、7.23%、7.76%、8.71%,水泥浆试件的总孔隙率随着粉煤灰掺量的增加而增大,碳化 28 d 后总孔隙率分别为 5.19%、5.64%、5.85%、5.39%。水泥水化早期,浆体中粉煤灰的掺入提高了水泥水化过程中的有效水灰比,促进了水泥中熟料的水化,但由于水泥含量百分比的降低,复合体系中总的水化程度降低,C-S-H 凝胶中 C/S 值降低,致使 C-S-H 凝胶在掺有粉煤灰的水泥浆体中类晶性更差,浆体中

颗粒的间隙增大,颗粒的堆聚结构疏松。粉煤灰的火山灰反应产生的二次水化产物不足以填充在全部的孔隙中,最终导致浆体中间隙增大。

随着碳化的进行, CO_2 进入水泥浆中与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H 凝胶、 C_2S 、 C_3S 等水化产物或未水化物质反应生成碳酸盐类物质和二氧化硅,生成物填充于体系中原来的孔隙中,使孔隙率降低,因而碳化后的水泥浆体总孔隙率均小于碳化前。对比碳化 28 d 后的孔隙率,随着粉煤灰掺量的增加,总孔隙率差别不大,但是小孔所占的比例不断增加,

大孔所占的比例总体下降,总孔径分布上更趋于小孔,表明浆体中的孔隙结构被细化。这是因为分散填充的致密作用和二次水化反应使掺粉煤灰的水泥浆试件内部结构高度细化,二次水化反应使水化产物的孔隙中产生了大量优质的水化硅酸钙,生成的这些水化产物会填充于对水泥浆耐久性不利的孔隙之中尤其是大孔之中,使结构的密实度增大。粉煤灰掺量为10%、20%、30%的水泥浆试件碳化28 d

后的总孔隙率与碳化前相比,比值分别为0.78、0.75、0.62,说明当粉煤灰掺量不大于30%时,粉煤灰掺量越大,碳化对水泥浆试件孔隙的改善效果越好。

3.3 粉煤灰掺量对水泥浆微结构的影响

图4~7为粉煤灰掺量分别为0、10%、20%、30%的水泥浆试件碳化前、后的XRD衍射图谱。横坐标为2倍入射角度,纵坐标为衍射峰强度。衍射图谱反映了水泥浆试件碳化前、后浆体中的晶体变化情况。

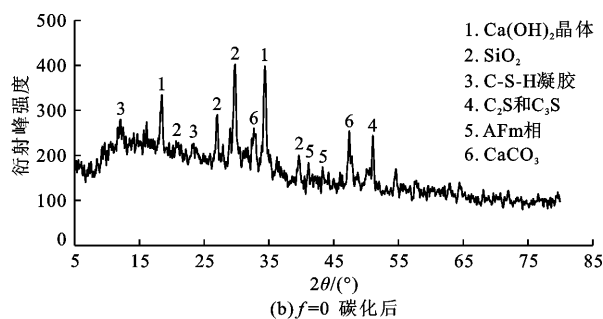
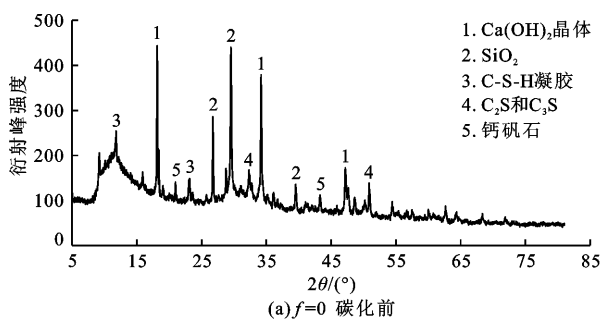


图4 粉煤灰掺量为0水泥浆试件碳化前、后的XRD衍射图谱

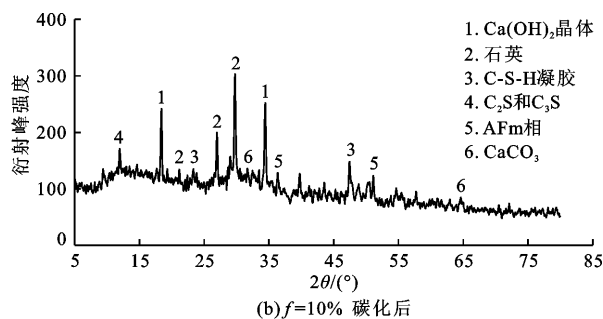
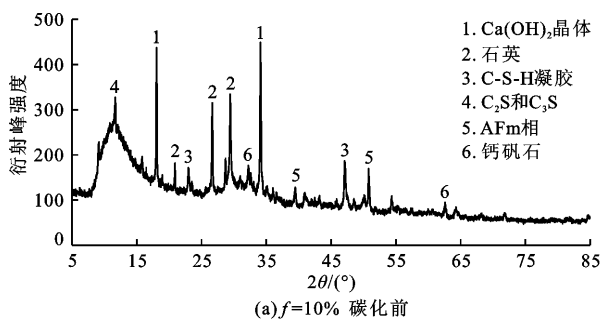


图5 10%粉煤灰掺量水泥浆试件碳化前、后的XRD衍射图谱

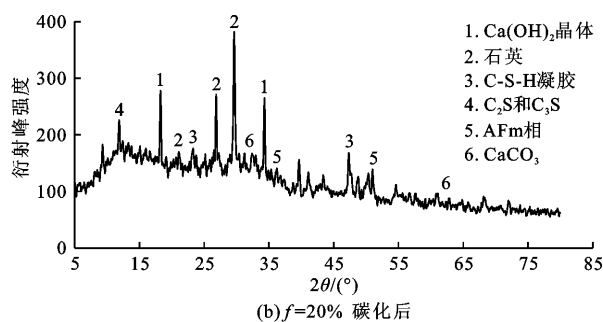
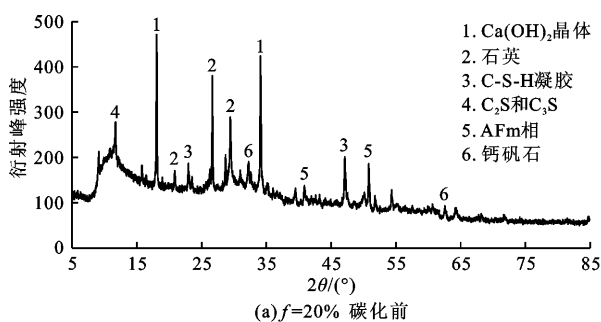


图6 20%粉煤灰掺量水泥浆试件碳化前、后的XRD衍射图谱

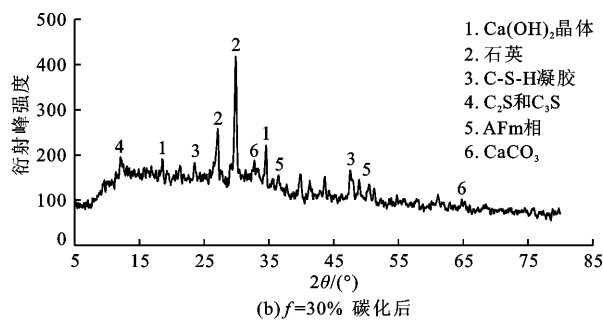
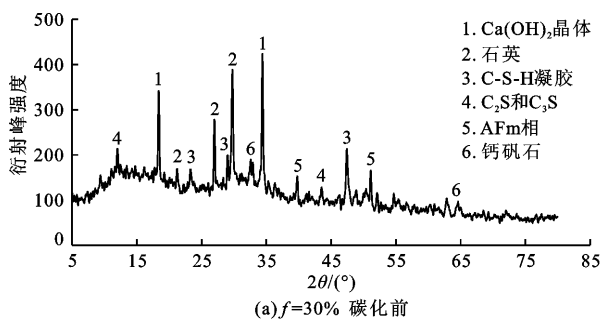
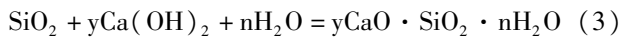
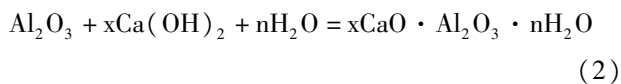


图7 30%粉煤灰掺量水泥浆试件碳化前、后的XRD衍射图谱

由图 4~7 中不同粉煤灰掺量碳化前的 X 射线衍射图可知,试件的水化产物主要有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 SiO_2 、少量的 C-S-H 凝胶和钙矾石($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$),以及未水化的 C_2S 、 C_3S 。随着粉煤灰掺量的增加, SiO_2 晶体和 C-S-H 凝胶的衍射峰强度和面积增大,但是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的衍射峰强度减小。原因是粉煤灰中含有很多活性物质 Al_2O_3 和 SiO_2 ,粉煤灰掺量越高,则水泥浆中活性物质含量越高,越能与水泥浆体系中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,使得 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰减小,反应生成水化铝酸钙和水化硅酸钙晶体,同时生成大量 C-S-H 凝胶,反应过程如下:



同时水泥浆中没有水化的 C_2S 和 C_3S 会与孔溶液中的 SO_4^{2-} 发生化学反应生成钙矾石,而钙矾石在低碱环境中易失水变为 SO_4^{2-} -AFm 相,致使图谱中出现 AFm 相($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$),并且 C_2S 和 C_3S 的衍射峰变小。

观察图 4~7 中不同粉煤灰掺量碳化后的 X 射线衍射图可以发现,碳化作用下 SiO_2 的衍射峰得到加强, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体、C-S-H 凝胶衍射峰变小,钙矾石衍射峰消失,碳化后新出现了 CaCO_3 的衍射峰。

CO_2 不断入侵会与孔溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 CaCO_3 与 H_2O ,使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体不断溶解与消耗,同时 SiO_2 也会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,因此碳化后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体衍射峰减小。随着粉煤灰掺量的增加,消耗的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体也越多,则 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体衍射峰随着粉煤灰掺量的增加而减小。 CO_2 进入水泥浆体中与 C-S-H 凝胶反应生成碳酸钙与二氧化硅,虽然 SiO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应会生成 C-S-H 凝胶,但其生成量远远小于与 CO_2 的反应量,因此碳化后 C-S-H 凝胶的衍射峰减小。当 CO_2 浓度足够高时,钙矾石(AFt)会发生碳化反应并且碳化完全,因此碳化后钙矾石衍射峰消失。同时没有水化的 C_2S 和 C_3S 会与孔溶液中的 SO_4^{2-} 发生反应生成钙矾石,这种物质在低碱环境中易失水变为 SO_4^{2-} -AFm 相,此为水泥浆碳化后内部出现 AFm 相并且 C_2S 和 C_3S 的衍射峰变小的原因。

3.4 粉煤灰掺量对净浆试件裂缝宽度的影响

表 3 为不同因素作用下各龄期试件表面裂缝宽度的变化情况,表中 A1~A3、B1~B3、C1~C3 表示粉煤灰掺量分别为 10%、20%、30% 在碳化养护条

件下的水泥浆试件组次,A4~A6、B4~B6、C4~C6 表示粉煤灰掺量分别为 10%、20%、30% 在自然环境养护条件下的水泥浆试件组次。

表 3 不同因素作用下各龄期试件表面裂缝宽度

试件 编号	养护龄期/d				
	0	7	14	21	28
A1	0.13	0.09	0.08	0.06	0.05
A2	0.10	0.08	0.07	0.05	0.03
A3	0.10	0.09	0.09	0.07	0.05
A4	0.11	0.08	0.05	0.04	0.03
A5	0.10	0.09	0.08	0.06	0.04
A6	0.12	0.09	0.06	0.05	0.04
B1	0.13	0.08	0.07	0.04	0.00
B2	0.08	0.07	0.05	0.03	0.02
B3	0.10	0.09	0.08	0.06	0.04
B4	0.10	0.09	0.08	0.06	0.04
B5	0.12	0.11	0.09	0.08	0.06
B6	0.12	0.08	0.08	0.06	0.04
C1	0.12	0.08	0.05	0.03	0.00
C2	0.09	0.06	0.06	0.05	0.04
C3	0.11	0.10	0.08	0.04	0.00
C4	0.10	0.09	0.09	0.06	0.03
C5	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06
C6	0.11	0.10	0.09	0.07	0.05

由表 3 可见,在碳化养护中,随着碳化养护龄期的增长,裂缝宽度不断减小,其原因有两个方面:一是水泥浆体在水化过程中会生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体等碱性物质和 C-S-H 凝胶与 CO_2 气体发生化学反应生成的 CaCO_3 和 SiO_2 等物质沉淀填充于孔隙和裂缝中;二是粉煤灰中的活性物质 Al_2O_3 和 SiO_2 能够与水泥浆中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成水化铝酸钙和水化硅酸钙,这些凝胶物质沉淀到孔隙中,使裂缝不断愈合直至消失。在自然养护中,随着养护龄期的增长,裂缝宽度也不断减小,其有两个方面:一是自然环境中存在水分子,使水泥浆体内部没有水化或者水化不完全的物质(如 C_2S 、 C_3S)继续发生水化反应,生成水化产物填充于孔隙之间,在一定程度上修复了裂缝;二是粉煤灰中的活性物质在浆体内部发生二次水化反应生成凝胶物质填充于裂缝中。

碳化养护前各粉煤灰掺量试件的裂缝平均宽度为 0.107 mm,碳化 28 d 后试件的裂缝平均宽度为

0.026 mm,碳化后比碳化前的裂缝平均宽度减小了76%。自然养护前试件的裂缝平均宽度为0.110 mm,碳化28 d后试件的裂缝平均宽度为0.040 mm,碳化前后裂缝平均宽度减小了64%。可见,随着时间的增长,碳化养护和自然养护中的水泥浆试件裂缝宽度均在减小,但碳化养护中裂缝宽度减小得更快,这是因为碳化作用生成的碳化产物更多,对裂缝的填充作用更强,而在28 d内的水化反应生成的水化产物明显少于碳化产物,说明碳化对水泥浆中裂缝宽度的减小具有正面作用。

比较粉煤灰掺量不同试件的裂缝宽度可知,两种养护方式下,掺入10%粉煤灰的水泥浆试件养护前的平均裂缝宽度为0.110 mm,养护28 d后试件的平均裂缝宽度为0.040 mm,养护后平均裂缝宽度比养护前减小了64%;掺入20%粉煤灰的水泥浆试件养护前的平均裂缝宽度为0.108 mm,养护28 d后试件的平均裂缝宽度为0.033 mm,养护后平均裂缝宽度减小了69%;掺入30%粉煤灰的水泥浆试件养护前的平均裂缝宽度为0.107 mm,养护28 d后试件的平均裂缝宽度为0.030 mm,养护后平均裂缝宽度减小了72%。可见随着粉煤灰掺量的增加,裂缝宽度减小的速度加快,因此在合理范围内粉煤灰掺量越高越有利于水泥浆试件裂缝的愈合。

4 结 论

(1)粉煤灰可促进水泥浆碳化,增加试件内部的碱储量,使试件抗碳化能力减弱。但是当粉煤灰为较小掺量时,粉煤灰的掺入对水泥浆碳化深度增加的效应较弱。30%粉煤灰掺量条件下的碳化深度拟合直线斜率大于10%和20%粉煤灰掺量下的斜率,说明30%粉煤灰掺量对水泥浆试件碳化深度的影响更大。

(2)粉煤灰掺量越大,则水泥浆试件碳化前的总孔隙率越大,碳化后总孔隙率减小。随着粉煤灰掺量的增加,试件总孔隙率差别不大,但在孔径的分布上更趋向于小孔,总体结构更加细化。30%粉煤灰掺量时,碳化对水泥浆试件孔隙的改善效果最佳。

(3)碳化前,水泥浆试件中的石英晶体和C-S-H凝胶数量随着粉煤灰掺量的增加而增大,Ca(OH)₂晶体数量随之减少。碳化后石英晶体数量增加,而C-S-H凝胶、Ca(OH)₂晶体数量减少,新出现CaCO₃沉淀填充于孔隙和裂缝中,使试件微观结构变得更加致密。

(4)水泥浆试件在28 d内水化反应生成的水化

产物少于碳化产物,因此碳化环境中试件裂缝宽度减小的速度比自然环境中更快。0~30%粉煤灰掺量内,掺量越高,试件裂缝宽度减小的速度越快,对水泥浆体裂缝的愈合越有利。

参考文献:

- [1] 柳俊哲. 混凝土碳化研究与进展(1)——碳化机理及碳化程度评价[J]. 混凝土, 2005(11): 10-13+23.
- [2] 高冠一, 张 铖, 麻凤海. 混凝土抗碳化性能影响因素试验研究[J]. 混凝土, 2020(6): 30-32.
- [3] 徐善华. 混凝土结构退化模型与耐久性评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [4] ZHANG Dongsheng, YANG Qiuning, MAO Mingjie, et al. Carbonation performance of concrete with fly ash as fine aggregate after stress damage and high temperature exposure [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118125.
- [5] AGUAYO F, TORRES A, KIM Y J, et al. Accelerated carbonation assessment of high-volume fly ash concrete [J]. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 2020, 8(3): 23-38.
- [6] PAKKALA T A, KOLIO A, LAHDENSIVU J, et al. Durability demands related to frost attack for Finnish concrete buildings in changing climate [J]. Building and Environment, 2014, 82: 27-41.
- [7] 原 元, 赵人达, 占玉林, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的抗碳化性能[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1275-1282.
- [8] 宋 华, 牛荻涛, 李春辉. 矿物掺合料混凝土碳化性能试验研究[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2066-2070.
- [9] 张文之, 刘 敏. 不同养护条件对大掺量粉煤灰混凝土抗碳化性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2619-2624.
- [10] 阿茹罕, 阎培渝. 不同粉煤灰掺量混凝土的碳化特性[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 7-12.
- [11] 李永鑫, 陈益民. 磨细矿物掺合料对水泥硬化浆体孔结构及砂浆强度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5): 575-579.
- [12] 张 扬, 牛荻涛, 李盛斌. 粉煤灰混凝土碳化试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(27): 275-278.
- [13] 金珊珊, 杨金龙, 黎 攀. 粉煤灰水泥砂浆孔隙结构及分形维数的演变特征[J]. 混凝土, 2020(7): 99-102.
- [14] 白花蕾, 樊耀虎, 李 滢. 再生微粉和矿物掺合料对混凝土抗碳化性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2628-2633.
- [15] 李燕军, 张美珍, 牛 宁. 矿物掺和料对混凝土抗渗和抗碳化性能影响的研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 311-317.

(下转第168页)

- [10] 钱东辉,邱忠华. 清管过程中悬索管桥的动态载荷分析[J]. 石油工程建设,2013,39(4): 14-16+29+22-23.
- [11] PENG Yang, AN Jianchuan, LUO Min, et al. Stress and displacement in pigging process of suspension cable spanning natural gas pipeline[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2021, 12(4): 05021006.
- [12] 杨志强. 水锤激励下输水管道流固耦合响应特性研究[D]. 福州: 福州大学,2017.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社,2015.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 庄小将,马芹刚,王丰平,等. 大门大桥引桥过桥管线作用效应研究[J]. 桥梁建设,2011(6): 50-53.
- [16] 马芹纲,陈方东,庄小将,等. 大跨度斜拉桥过桥水管振动关键问题研究[J]. 世界桥梁,2009(4): 50-53.
- [17] LI Ranran, WANG Xiaoshan, ZHANG Yajun, et al. Study on the mechanical characteristics of steel truss cable-stayed bridge with water pipeline[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021.
- [18] 孙建渊,王 灏. 大型输水管道水锤效应对桥梁结构的动力作用研究[J]. 中外公路,2016,36(3): 148-151.
- [19] 孙建渊,王 灏. 输水管道水锤效应作用下斜拉桥结构动力响应研究[J]. 土木工程学报,2017,50(2): 82-87.
- [20] 张 博,张嘉瑞,曹双利,等. 大型输水管桥动力特性及水锤效应作用下动力响应研究[J]. 西北水电,2021(6): 82-86.
- [21] 伍 平,张 挺,张帮稳. 基于流固耦合的过桥水管动力特性研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2014,42(6): 905-909.
- [22] 丁欢欢,张 挺,苏 燕,等. 基于双向流固耦合的多跨过桥水管模态分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2013,41(2): 242-246.

(上接第 159 页)

- [16] LIU Junzhe, YAO Senyuan, BA Mingfang, et al. Effects of carbonation on micro structures of hardened cement paste[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2016, 31(1): 146-150.
- [17] 刘继鹏. 湿热养护钢渣-粉煤灰复合材料的耐久性能及微观结构[J]. 新型建筑材料,2021,48(8): 70-73+79.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2010.
- [19] 崔正龙,张雪虹,唐 博. 不同养护环境对粉煤灰混凝土强度及碳化性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2019,38(1): 65-69+76.
- [20] 明 静,张亚梅,孙 伟. Permit 法研究氯离子渗透性及其与混凝土孔隙率的关系(英文)[J]. 硅酸盐学报,2010,38(9): 1707-1712.
- [21] 刘保东,李鹏飞,李 林,等. 混凝土含水率对强度影响的试验[J]. 北京交通大学学报,2011,35(1): 9-12.
- [22] 邓朝莉,李宗利. 孔隙率对混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土,2016(7): 41-44.
- [23] 邵珠山,张鹏举,魏 玮,等. 微波辐射下含水率对混凝土力学性能影响[J]. 工程科学与技术,2021,53(6): 93-102.
- [24] 谭 聪,李宗利,韩进生,等. 不同强度等级和尺寸混凝土自由吸水规律研究[J]. 混凝土,2019(11): 34-38.
- [25] 嵇 鹰,张 军,武艳文,等. 粉煤灰对泡沫混凝土气孔结构及抗压强度的影响[J]. 硅酸盐通报,2018,37(11): 3657-3662.
- [26] 吴中伟,廉惠珍. 高性能混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社,1999.