

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0804

掺生物炭对碳化养护水泥基材料力学性能和固碳率的影响

陈鑫, 贺智敏*, 黄伯韬, 陈信策

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了促进水泥基材料的性能, 提升固碳率, 以掺生物炭的水泥基材料为研究对象, 分析了掺生物炭试件的抗压强度和碳化程度的影响因素, 结合热分析和电镜观察等方法对水化产物进行了定量分析, 并探究其微观机理。研究表明: (1) 与空白组试件相比, 掺生物炭试件在水胶比为 0.50、生物炭粒径为 200 目、碳化养护时长为 48 h、生物炭掺量质量分数为 3% 时碳化养护的强度提升效果显著, 掺生物炭试件在 3 d 和 28 d 时抗压强度分别提升了 21.6% 和 23.0%; (2) 在碳化养护时长为 4~48 h 范围内, 掺生物炭胶砂试件的固碳率随着碳化时长的增加提升明显, 碳化面积从 16.52% 增加到 51.98%, 预饱和 CO_2 处理生物炭能够增加 0.71% 的固碳率。

关键词: 生物炭; 碳化养护; 强度; 固碳率

中图分类号: TU528.57

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 04-0019-09

加速碳化养护技术是在水泥基材料成型数小时后将置于高浓度 CO_2 环境中进行短期养护, 由于水泥基材料中熟料和水化产物与 CO_2 发生矿化反应, 生成碳酸钙等物质能够提高早期强度, 还能吸收固定 CO_2 , 因此该技术不仅可以实现工业固废资源化, 还能对温室气体进行永久封存, 是一种有效的碳捕集、封存和利用技术^[1-2]。生物炭比表面积大, 对非极性物质的亲和力强, 能够通过自身孔隙吸附和储存 CO_2 ^[3], 已成为一种新型低成本 CO_2 吸附剂。添加生物炭是增加水泥基材料对 CO_2 吸收的潜在手段之一。

有学者^[4-6]对生物炭在碳化水泥基材料中的应用进行了研究, 发现添加质量分数为 2%~4% 的生物炭可以显著增加碳化条件下水泥基材料的强度, 而掺入过量的生物炭则会对试件强度产生不利影响。陈铁锋等^[7]将生物炭试件在 CO_2 体积分数为 20% 的环境中碳化 12 h 后发现: 掺生物炭试件的孔结构明显优于纯水泥试件, 且能有效弥补因碳化时间过长造成试件后期强度增长缓慢的不足。李林珊

等^[8]研究表明: 在 CO_2 体积分数为 99%、压力为 2.5 MPa 的条件下, 对钢渣粉与生物炭的混合物进行 2 h 预处理, 生物炭在碳化反应中成核作用明显, 能使 CaCO_3 逐渐沉淀并生长于生物炭表面, 试件孔隙得到优化, 试件强度提高明显。赵立莹^[9]研究发现, 随着生物炭粒径的缩小, 生物炭及其上堆积的水化产物的填充效果变强, 总孔隙率减少, 孔径向小孔径发展, 降低了有害孔径比例。Gupta^[10]将生物炭试件在 2% CO_2 环境中养护 28 d, 发现掺质量分数为 2.5% 的生物炭水泥试件, 相比于碳化纯水泥试件碳酸化反应加速, 28 d 质量增加了 0.56%, 表明生物炭经过预饱和 CO_2 后, 能够使生物炭通过内部碳酸化反应增加总体碳化产物。Liu 等^[11]研究发现: 在标准养护条件下, 当水灰比增加时, 生物炭对水泥基材料 CO_2 捕获能力的提高更明显。Praneeth 等^[4]将试件在纯 CO_2 、压力为 1 MPa 环境中养护 1 h 后发现: 生物炭具有的大表面积和高孔隙率能够增加水泥基材料的 CO_2 吸收率。有学者^[12]将生物炭试件在 CO_2 体积分数为 2% 的环境中养护

收稿日期: 2024-08-10 宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(42477152); 企、事业单位委托项目(HX2023000737)

第一作者: 陈鑫, 硕士研究生, 主要研究方向为混凝土材料。E-mail: 1961223568@qq.com

*通信作者: 贺智敏, 副教授, 主要研究方向为混凝土材料。E-mail: hezhimin@nbu.edu.cn

28 d 后发现:使用生物炭替代质量分数为 20%的硅灰,试件的固碳率提高了 10%。

目前,针对掺生物炭水泥基材料在标准养护条件下的研究较多,但对生物炭通过内部和外部碳化作用对水泥基材料力学性能和固碳率影响的研究仍较为少见。

笔者通过力学性能测试、热分析和电镜观察等方法,研究水胶比、生物炭掺量、种类、粒径、碳化养护时长及预饱和 CO₂ 等因素对水泥基材料力学性能和固碳能力的影响,并探究其作用机理,以期为水泥基材料的减碳减排提供参考。

1 试验

1.1 原材料

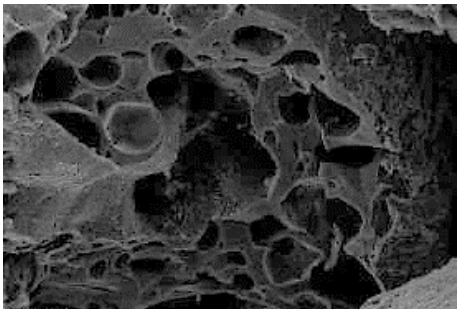
水泥为海螺 P·II52.5 硅酸盐水泥;生物炭为河南平顶山绿之原活性炭有限公司产品。鉴于影响生物炭性能的主要因素为生产原料、粒径和活化方式,因此试验选用 4 种不同类型的生物炭,其性能指标见表 1,形貌如图 1 所示。从图 1 可见,生物炭的孔隙率较高。

表 1 生物炭类型及性能指标

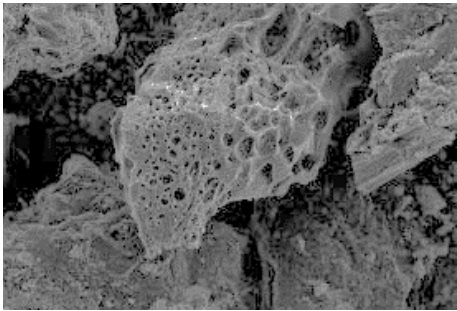
类型	原料	水分/%	灰分/%	pH 值
JG	秸秆	2.9	9.0	2.28
YK	椰壳	5.0	6.5	8.00
MXS	木屑	5.0	3.0	7.20
MXL	木屑	3.0	9.0	2.27

类型	粒度/ 目	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	堆积密度/ (g·L ⁻¹)	活化方法
JG	40	1 070	438	物理烧结
YK	80	1 118	482	KOH 催化
MXS	200	1 012	426	水蒸气活化
MXL	200	1 853	426	磷酸活化

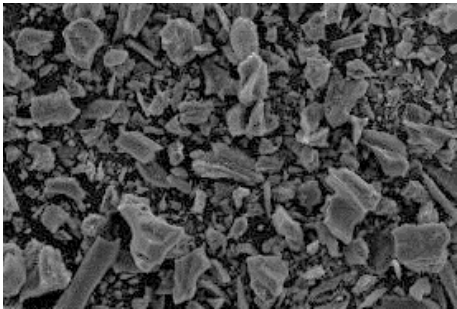
注:物理烧结温度 500 ℃。



(a) 40 目



(b) 80 目



(c) 200 目

图 1 生物炭 SEM 图(放大 500 倍)

试验用砂为 ISO 标准砂;减水剂为科之杰萘系高效减水剂,减水率为 22.3%;CO₂ 气体采用宁波高波气体有限公司产品,纯度为 99.99%。

1.2 配合比

为了方便性能对比,采用水泥与砂质量比为 1:3 的标准胶砂。根据前期试验,生物炭掺量不宜超过质量分数 5%,选取掺量为 0%、1%、3%、5%。为考察碳化养护时间对强度和固碳率的影响,选取碳化时间 4、24、48 h。由于预饱和和生物炭能够提高水泥基材料的固碳率,选取 MXL 型生物炭进行预饱和 CO₂ 处理,与未预饱和 CO₂ 的生物炭进行对比,以探究预饱和 CO₂ 处理对胶砂试件性能的影响。试验配合比见表 2。

表 2 胶砂试验的配合比

编号	水胶比	水泥/%	生物炭/%	是否预饱和 CO ₂
M0	0.50	100	0	否
MXL1	0.50	99	1	否
MXL3	0.50	97	3	否
MXL5	0.50	95	5	否
MXL3Y	0.50	97	3	是
JG3	0.50	97	3	否
YK3	0.50	97	3	否
MXS3	0.50	97	3	否

表2中除基准配合比编号为M0外,其他配合比编号规则为生物炭类型+掺量,如MXL3Y表示掺质量分数为3%木屑生物炭、经预饱和CO₂处理、磷酸活化的试件。

选取掺质量分数为0%、3%、5%的MXL型生物炭,制备水胶比0.40水泥净浆用于微观机理研究,以探明生物炭对水泥水化及碳化的影响,其配合比见表3。

表3 净浆试验的配合比

编号	生物炭类型	水泥/%	生物炭/%	是否预饱和CO ₂	水胶比
P0	未掺生物炭	100	0	否	0.40
P3	MXL	97	3	否	0.40
P3Y	MXL	97	3	是	0.40
P5	MXL	95	5	否	0.40
P6	JG	97	3	否	0.40
P7	YK	97	3	否	0.40

另外,针对生物炭掺量为0%、3%的试件,选用MXL型生物炭,研究其水胶比为0.35、0.40、0.50、0.60时的性能,以探明水胶比变化对掺生物炭胶砂试件性能的影响。

1.3 试件制备及养护

按照文献[13]要求:胶砂试件成型后用薄膜覆盖,在室内(温度25℃,相对湿度60%)养护24h后脱模,然后将试件分为标养组和碳化养护组,标养组试件放入标养室养护至测试龄期。

碳化养护组试件脱模后开始碳化养护,养护时长分别为4、24、48h,碳化箱环境参数为温度20℃,相对湿度60%,CO₂体积分数90%。碳化养护后试件放入标准养护室继续养护至测试龄期。

采用预饱和CO₂试验时,将MXL型生物炭置于碳化箱预养护1h,养护温度20℃,相对湿度60%,CO₂体积分数99%。

1.4 测试方法

按照文献[13]要求,测试胶砂试件的力学性能。采用酚酞指示剂区分碳化与未碳化区域,使用ImageJ软件进行图像识别,识别过程如图2所示。先识别外部不变色的碳化区域,再识别内部变色未碳化区域,均标记为淡黄色,最后用式(1)计算碳化面积。采用日立S-4800扫描电子显微镜观测微观形貌,使用电镜配备的X射线能谱仪分析微

区成分,采用德国STA 499 F5热分析仪进行热重分析(TG-DTA),测试气氛为N₂,测试温度为30~900℃,升温速率为20 K/min。



图2 ImageJ软件识别试件碳化面积过程

碳化面积占比计算公式为

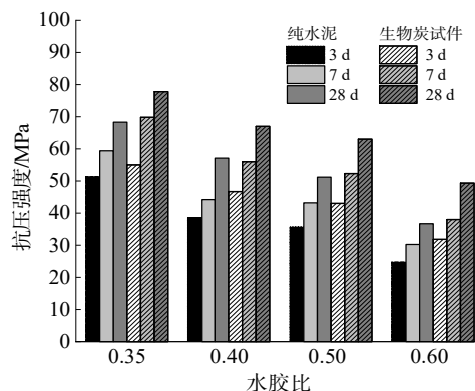
$$\eta = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \quad (1)$$

式中: η 为碳化面积占比; S_1 为碳化面积; S_2 为未碳化面积。

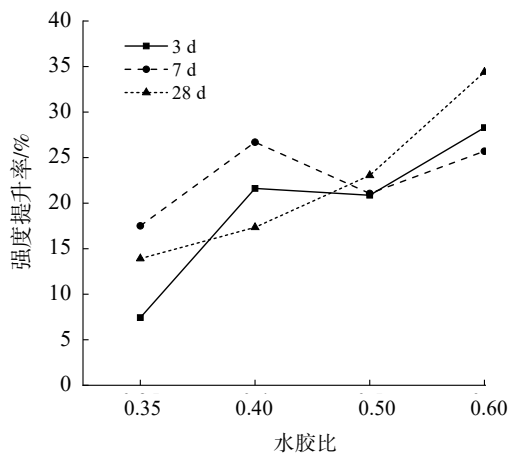
2 试验结果与分析

2.1 掺生物炭试件的力学性能

图3为不同水胶比掺质量分数为3%的MXL型生物炭试件经48h碳化养护后的抗压强度。



(a) 抗压强度



(b) 抗压强度提升率

图3 水胶比对抗压强度及其提升率的影响

从图3可见,掺生物炭试件碳化后抗压强度明显高于空白组试件,水胶比大时强度提升更为明显。水胶比为0.60时,相比空白组试件,生物炭试件3、7、28 d的抗压强度分别提高了28.3%、25.7%、34.3%。但由于0.60水胶比过大,试件碳化后的抗压强度仍然偏低,难以满足工程要求。而水胶比为0.50掺生物炭试件碳化后,3、7、28 d的抗压强度相比于空白组试件提升了20.9%、21.1%、23.0%,达到了43.0、52.3、63.0 MPa,有较好的工程应用前景。水胶比为0.35和0.40时,试件本身较为致密,即使掺生物炭,其固碳能力也较弱,碳化养护后强度提升不明显。因此,综合考虑力学性能和固碳率,选择水胶比为0.50的碳化养护下掺质量分数为3%的MXL型生物炭试件。

为研究生物炭掺量对强度的影响,采用MXL型生物炭,在水胶比为0.50时,测试不同生物炭掺量试件经48 h碳化养护后的抗压强度,结果如图4所示。

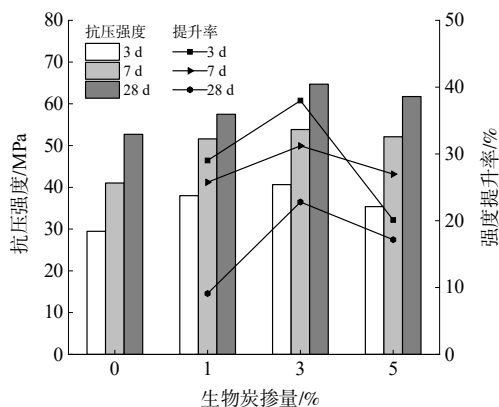


图4 生物炭掺量对抗压强度及其提升率的影响

从图4可见,掺生物炭有利于提高碳化试件的抗压强度,掺质量分数为3%生物炭时试件抗压强度最大,3、7、28 d的抗压强度分别为40.7、53.9、64.7 MPa。随着掺量增至质量分数5%时,抗压强度反而下降。文献[14]在标准养护下也发现类似现象,认为当生物炭掺量过多时,范德瓦耳斯力会使生物炭颗粒聚集程度显著提高,过度吸收试件内部的水分,减少水化产物的生成,导致生物炭附近出现大孔隙,甚至裂缝。

掺生物炭对试件3 d和7 d的抗压强度均有明显提升,但是试件后期抗压强度提升变缓。原因可能是碳化产物覆盖胶凝材料颗粒表面,降低了水化

反应的效率,也可能是由于碳化反应与水化反应在反应物上存在竞争关系^[15]。

为了研究不同类型生物炭对试件强度的影响,固定水胶比为0.50,掺质量分数为3%,测试表1中不同类型生物炭试件经48 h碳化养护后的抗压强度,结果如图5所示。从图5可见,掺MXS和MXL生物炭试件的抗压强度高于其他试件,且掺MXL生物炭试件的提升效果更优。原因是较细的生物炭不仅提高了碳化能力,同时也具有更好的密实填充作用,从而提高了抗压强度。

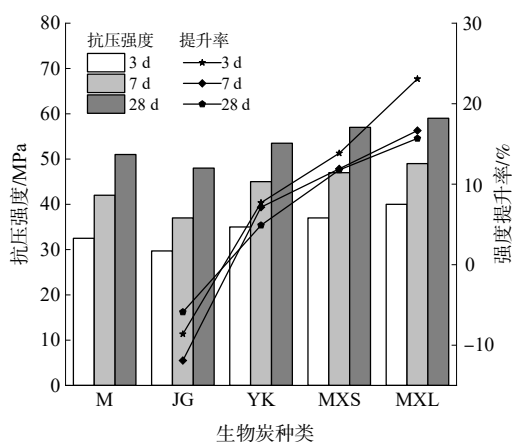


图5 生物炭类型对抗压强度及其提升率的影响

同样是200目粒径,掺MXL型生物炭试件3、7、28 d的抗压强度,比MXS型生物炭试件提升了8.1%、4.3%、3.5%。这是由于MXS型生物炭是木屑经过800℃以上蒸汽活化得到,而MXL型生物炭是木屑经过磷酸处理得到,经过化学活化后的生物炭比物理活化生物炭,在粒径相同时会有更多的孔隙,因此经化学活化生物炭的比表面积更大^[16],有利于CO₂的进入和碳化反应的进行,生成更多的CaCO₃,细化了孔隙结构^[8],因此对试件抗压强度提升的效果更好。

图6是MXL3和M0经4、24、48 h碳化养护后的抗压强度。从图6可见,掺生物炭改变了碳化养护时长对强度的影响规律。当碳化养护48 h后,M0的抗压强度不如碳化养护24 h时的抗压强度,而MXL3在3、7、28 d的抗压强度随着碳化养护时间的延长呈现增长趋势,相比于碳化养护24 h时其抗压强度分别提高了5.7%、5.0%、8.2%。这是随着碳化养护时间的延长,水分消耗增大,胶凝材料中剩余水胶比减小,水泥基材料体系水化变

弱,导致强度增长受限。因生物炭具有较大的比表面积和高吸水性,成型过程中能够吸附部分拌合水,在碳化养护后期生物炭能够从孔隙中释放水分参与碳化反应和水化反应,促进了强度的增大。表明在水泥基材料中掺生物炭能够改善碳化养护时间较长对强度增大的不利影响。

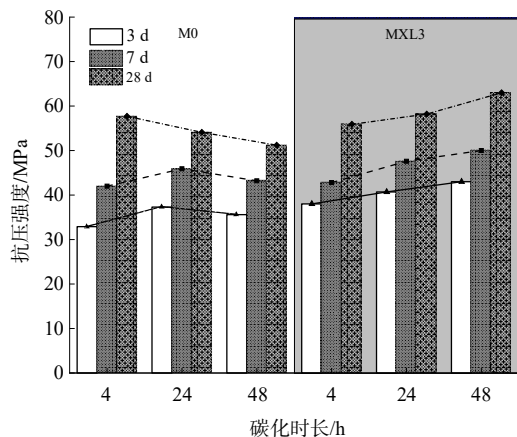


图6 碳化养护时间对抗压强度的影响

图7为MXL3Y试件经48h碳化养护后的抗压强度与MXL3和M0的对比结果。从图7可见, MXL3Y相比于MXL3,其3、7、28d的抗压强度分别提升了8.1%、3.8%、2.7%;相比于M0,其3、7、28d的抗压强度分别上升了30.9%、20.6%、27.0%。这可能是预饱和CO₂使生物炭颗粒吸附并携带CO₂进入试件内部,从而使试件内部碳化反应生成的碳化产物填充了试件孔隙,从而提高了抗压强度。

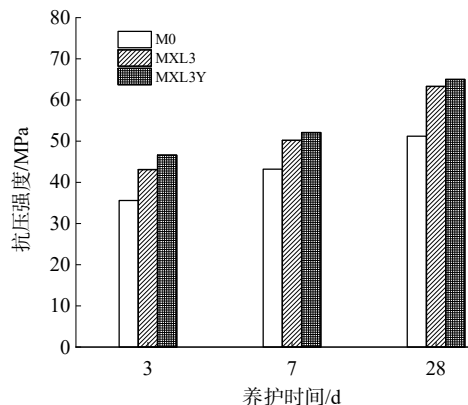
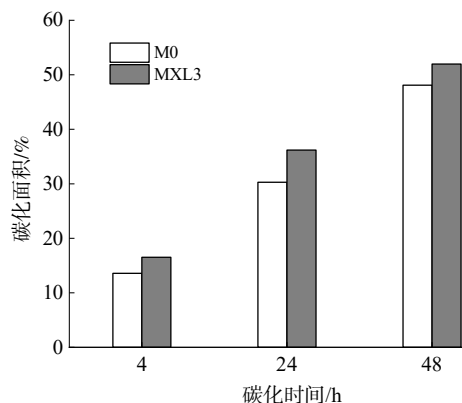
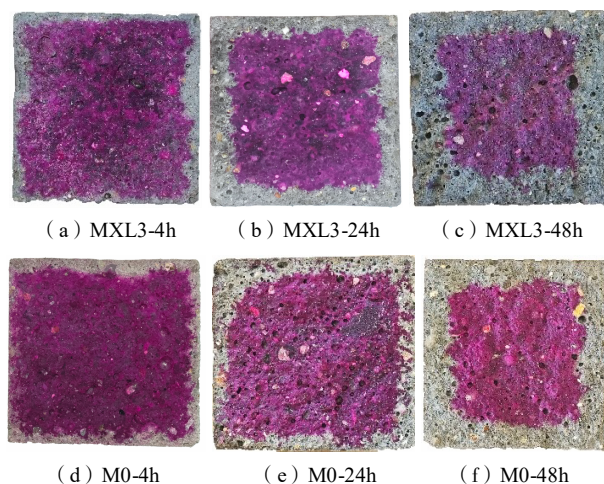


图7 预饱和CO₂生物炭的抗压强度

2.2 掺生物炭试件碳化面积

采用酚酞喷洒和图像识别测试不同试件碳化后的碳化面积。图8为MXL3与M0经4、24、48h

碳化养护后试件,其中图8(a)~(f)为选取的典型试件经酚酞显色的碳化面积对比,图8(g)为一组3个试件的平均碳化面积对比。



(g) 掺或不掺生物炭试件的平均碳化面积对比

图8 掺生物炭对碳化面积的影响

从图8可见,掺生物炭试件表面的颜色略深,随着碳化时间的增加,MXL3与M0的碳化面积均显著增加。在碳化时长4~48h期间,MXL3的碳化面积大于M0。当碳化时间为4h时,MXL3相比于M0碳化面积增加了2.95%;当碳化时间为24h时,MXL3相比于M0碳化面积增加了5.90%;当碳化时间为48h时,MXL3的碳化面积相比于M0增加了3.88%,碳化面积差异有所减小,这可能是由于随着碳化深度的加深,CO₂进入试件内部的难度增加。表明掺入生物炭可以提升水泥基材料的碳化能力,生成更多的碳酸钙,提高试件的密实度和强度,这与前述力学性能的变化相一致。

2.3 掺生物炭试件的水化产物与固碳率

图9和图10为试件的热分析结果。从图9和

图 10 可见,物理结合水、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 的分解分别对应 50~200 °C、350~500 °C、550~900 °C 的放热峰。在 550~1 000 °C 时, CO_2 的吸收量可以用 550 °C 和 1 000 °C 下试样的质量差表示^[17]。

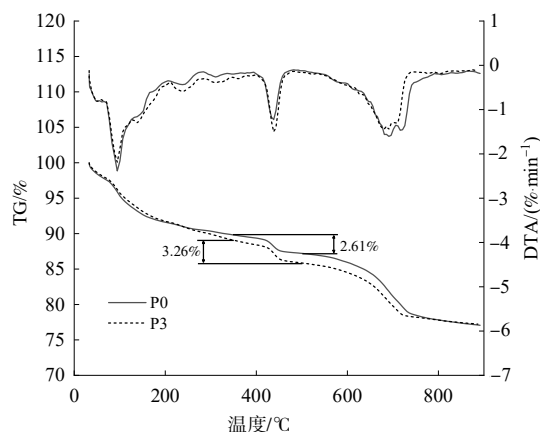


图 9 标养试件的热重和差热曲线

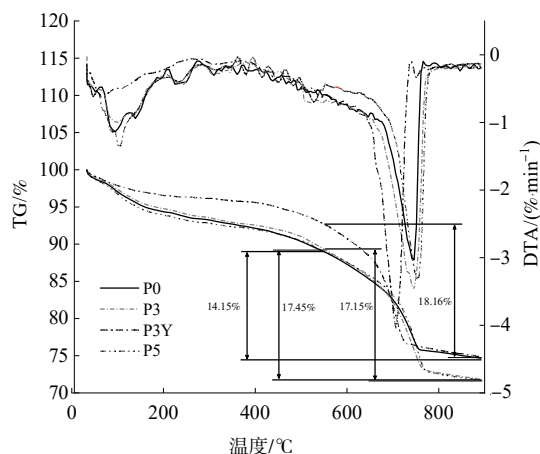


图 10 碳化试件的热重和差热曲线

采取式(2)可计算试件的固碳率,得出组分含量,结果见表 4。

$$\beta_{\text{CO}_2} = \frac{(m_{550} - m_{1000})}{m_c} \quad (2)$$

式中: m_{550} 和 m_{1000} 分别为样品在热重分析试验中 550 °C 和 1 000 °C 对应的质量; m_c 为所用水泥质量。

从图 9 可见,在标养条件下, P3 与 P0 对比,其物理结合水、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量增大了 0.17% 和 2.68%,表明掺生物炭可以促进水化产物的生成。在碳化 48 h 条件下,掺质量分数为 3% 和 5% 生物炭试件比空白组试件的固碳率分别增加了 3.30% 和 3.00%。这是由于生物炭比表面积大、孔隙率高,增加了 CO_2 与水泥基材料的接触^[5],促进了碳化反

应;生物炭经过预饱和 CO_2 制成的试件(P3Y)相比于 P3 固碳率增加了 0.71%。这是由于在预饱和 CO_2 过程中,生物炭的微孔吸附了 CO_2 ,这部分 CO_2 与水泥基材料发生了内部碳化反应,从而增加了碳酸钙的含量^[10]。

表 4 试件中各成分质量分数

试件	碳化养护 时间/h	物理结 合水/%	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ / %	CaCO_3 / %	CO_2 / %
P0	0	6.75	10.56	17.30	9.69
	48	4.39	9.78	25.25	14.15
P3	0	6.92	13.24	18.09	10.13
	48	4.18	7.89	31.16	17.45
P3Y	48	2.54	7.53	32.43	18.16
P5	48	4.79	7.84	30.63	17.15

固碳率和碳化面积均为表征材料固碳能力的技术指标。结合试验结果发现:掺质量分数 3% 的生物炭试件比空白组试件的固碳率增加了 3.30%,碳化面积增大了 3.8%,变化趋势一致,数值接近。从测试原理看,碳化面积测试直观且简单易行,但测试数据受水泥基材料复杂的孔结构影响,不如固碳率精确,二者同时测试可以互为验证。

2.4 碳化生物炭试件的微观结构

图 11(a) 和 (b) 为 P6 和 P7 经 48 h 碳化后的电镜图片。从图 11(a) 可见,40 目生物炭与水化产物的粘接较差,生物炭周围存在连续间隙。从图 11(b) 可见,80 目生物炭附近存在少量 CaCO_3 ,无定型 C-S-H 凝胶、片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物明显减少,生物炭与水泥石连接紧密。图 11(c) 和 (d) 为 P3Y 和 P3 经 48 h 碳化后电镜观察图片。从图 11(c) 可见,生物炭附近存在大量的无定型 C-S-H 凝胶和针棒状的钙矾石(Aft),且未见典型 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,生物炭上覆盖许多细碎的 CaCO_3 ,生物炭被水化产物和碳化产物紧密覆盖。生物炭可以使胶砂试件的结构更加致密,这与前文得到的力学性能相一致。从图 11(d) 可见,生物炭颗粒上紧密附着大量的 C-S-H 凝胶,掺杂少量片状 CaCO_3 ,水化产物和碳化产物在生物炭表面附着、生长,使生物炭颗粒与水泥基材料紧密连接。

图 12 是 P3 经碳化 48 h 后的 EDS 分层图像,在生物炭附近取样发现生物炭周围存在大量的 Ca、Si、O 元素,表明生物炭附近存在大量的 C-S-H

凝胶。

图 13 为碳化 48 h 的 P3 试件的能谱图像。从图 13 可见,生物炭附近存在大量的 C、O、Ca、

Si 元素,表明生成了较多的水化产物和碳酸钙。表明生物炭加速了水化,同时验证了生物炭对于碳化反应的促进作用,这与 Qin 等^[6]的试验结果一致。

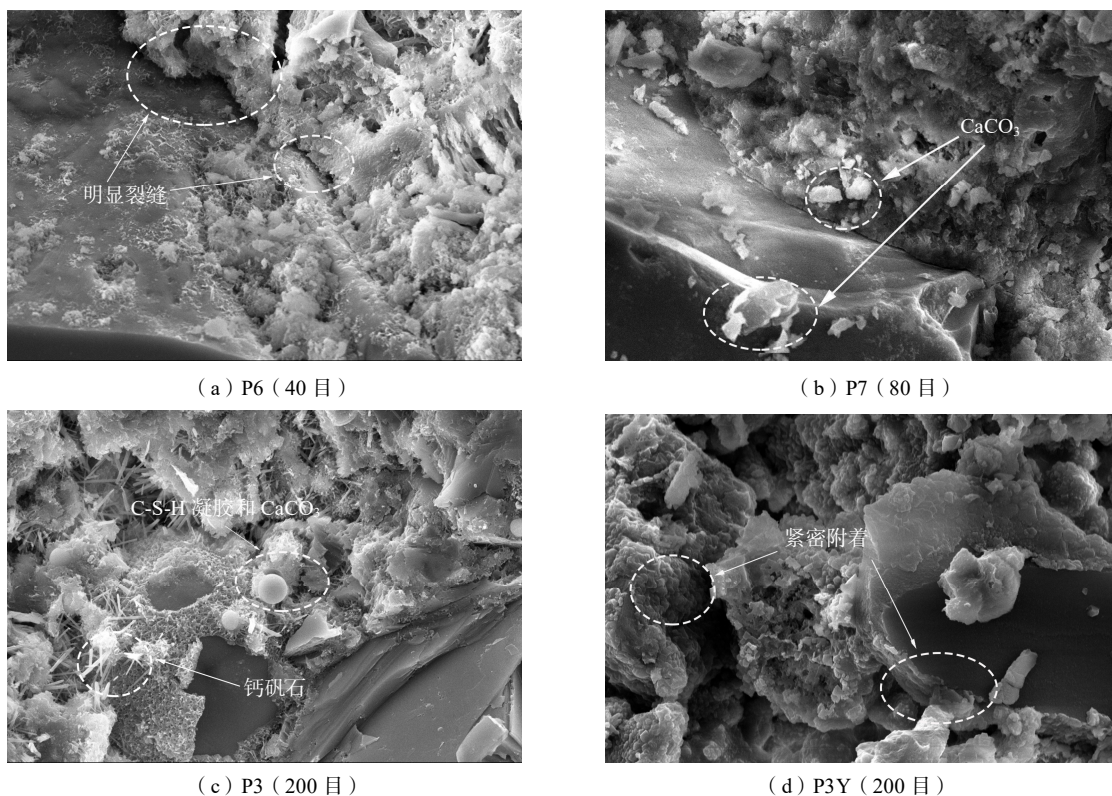
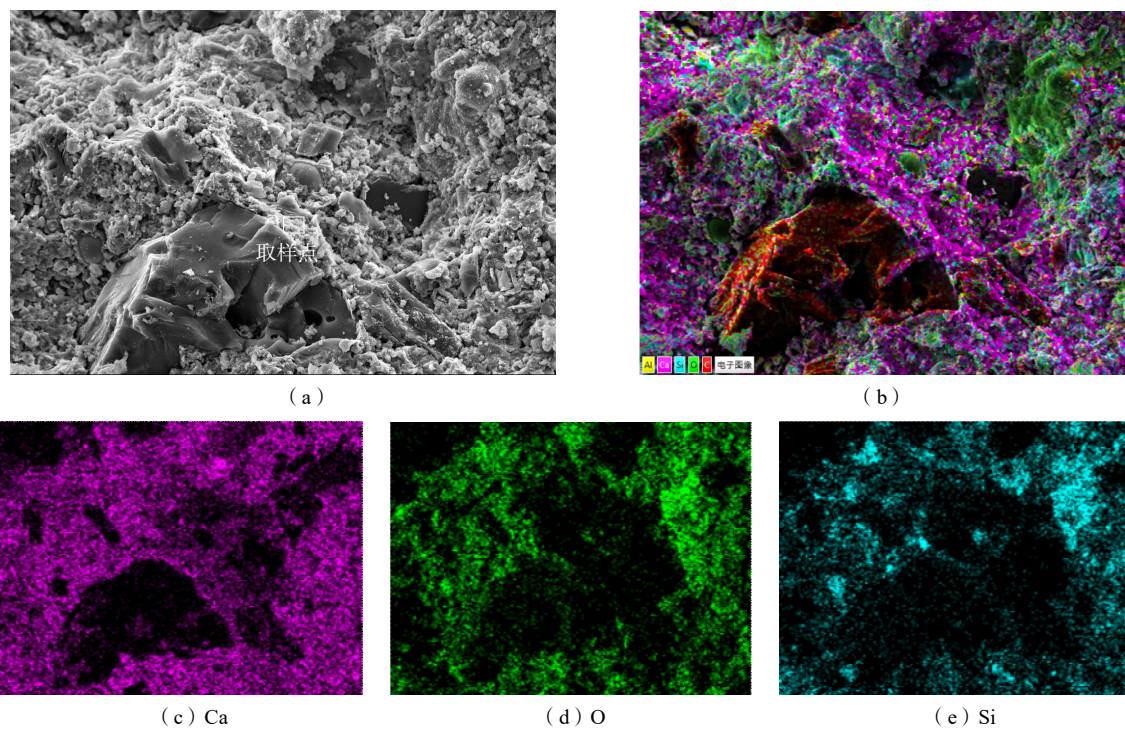


图 11 碳化养护掺生物炭试件的微观形貌



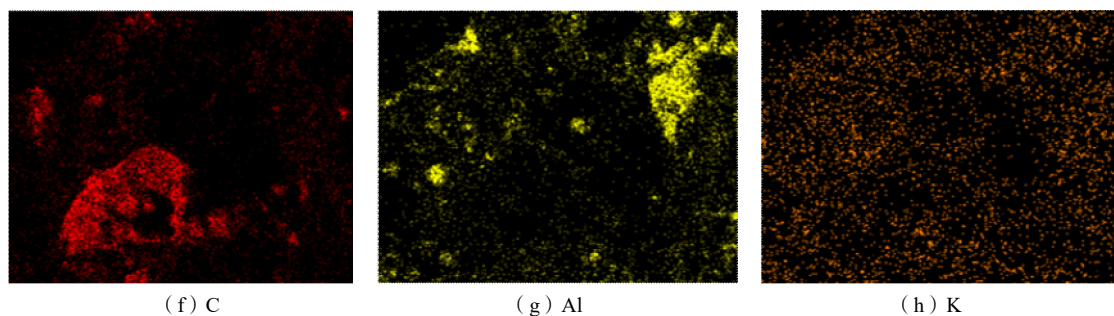


图 12 碳化养护掺生物炭试件的 EDS 分层图像

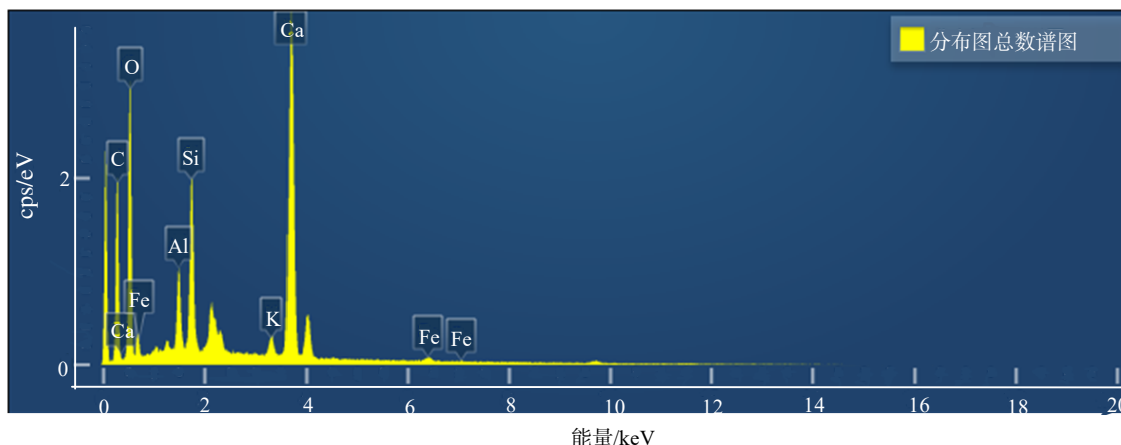


图 13 碳化养护掺生物炭试件的能谱图像

3 结论

(1) 掺生物炭可以提升碳化胶砂试件 3~28 d 的抗压强度, 较大水胶比、较小生物炭粒径以及适宜的生物炭掺量对试件抗压强度提升明显。水胶比为 0.50, 碳化时间为 48 h 时, 掺质量分数为 3% 的生物炭试件相比空白组试件在 3、28 d 时的抗压强度分别提升了 21.6% 和 23.0%, 28 d 抗压强度达到 64.71 MPa。

(2) 碳化时长在 4~48 h 期间, 随着碳化时间的延长, 水泥基材料的碳化面积明显增加, 最高达到 51.98%。热分析结果表明, 掺生物炭胶砂试件的固碳率提升明显, 最高为 17.45%; 通过对生物炭预饱和 CO_2 处理后, 固碳率达到 18.16%, 额外增加 0.71%。

(3) 电镜和能谱分析表明, 生物炭颗粒附近存在大量 CaCO_3 和 C-S-H 凝胶, 且生物炭粒径越小, 生物炭颗粒附近的水化、碳化产物越多。通过能谱分层图像分析生物炭附近元素, 验证存在大量的 CaCO_3 和 C-S-H 凝胶, 证实了生物炭对水化、碳化反应具有促进作用。

参考文献:

- [1] SU X, KAMAT S, HEUER A H. The structure of sea urchin spines, large biogenic single crystals of calcite[J]. Journal of materials science, 2000, 35(22):5545-5551.
- [2] MORANDEAU A, THIÉRY M, DANGLA P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties[J]. Cement and concrete research, 2014, 56:153-170.
- [3] GUPTA S, KUA H W, LOW C Y. Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar[J]. Cement and concrete composites, 2018, 87:110-129.
- [4] PRANEETH S, GUO R N, WANG T, et al. Accelerated carbonation of biochar reinforced cement-fly ash composites: enhancing and sequestering CO_2 in building materials[J]. Construction and building materials, 2020, 244:118363.
- [5] GUPTA S, KASHANI A, MAHMOOD A H, et al. Carbon sequestration in cementitious composites using biochar and fly ash: effect on mechanical and durability properties[J]. Construction and building materials, 2021, 291:123363.
- [6] QIN Y H, PANG X J, TAN K H, et al. Evaluation of

- pervious concrete performance with pulverized biochar as cement replacement[J]. *Cement and concrete composites*, 2021, 119:104022.
- [7] 陈铁锋, 高小建. 生物炭对碳化养护水泥砂浆的改性机理[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(8):831-837.
- [8] 李林珊, 陈铁锋, 高小建. 生物炭对碳化钢渣活性提升的机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(10):962-968.
- [9] 赵立莹. 生物炭和碳化养护对水泥砂浆强度和渗透性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [10] GUPTA S. Carbon sequestration in cementitious matrix containing pyrogenic carbon from waste biomass: a comparison of external and internal carbonation approach[J]. *Journal of building engineering*, 2021, 43: 102910.
- [11] LIU R, XIAO H G, GUAN S, et al. Technology and method for applying biochar in building materials to evidently improve the carbon capture ability[J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 273:123154.
- [12] GUPTA S, KASHANI A, MAHMOOD A H. Carbon sequestration in engineered lightweight foamed mortar: effect on rheology, mechanical and durability properties [J]. *Construction and building materials*, 2022, 322: 126383.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [14] TAN K H, PANG X J, QIN Y H, et al. Properties of cement mortar containing pulverized biochar pyrolyzed at different temperatures[J]. *Construction and building materials*, 2020, 263:120616.
- [15] 陈铁锋. 水泥基材料碳化养护及其对透水混凝土的改性机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [16] BARROSO-BOGEAT A, ALEXANDRE-FRANCO M, FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ C, et al. Temperature dependence of the electrical conductivity of activated carbons prepared from vine shoots by physical and chemical activation methods[J]. *Microporous and mesoporous materials*, 2015, 209:90-98.
- [17] JANG J G, LEE H K. Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement[J]. *Cement and concrete research*, 2016, 82:50-57.

Impact of biochar addition on the mechanical properties and carbon sequestration rate of carbon-curing cementitious materials

CHEN Xin, HE Zhimin, HUANG Botao, CHEN Xince

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

Abstract: In order to improve carbon sequestration rate and properties of the cementitious materials, this study investigated the effect of incorporating biochar as a supplementary cementitious material, for which the compressive strength and carbonation degree of the test specimens were evaluated. TGA and SEM tests were conducted to analyze the hydration products. The results showed that: (1) Significant compressive strength improvement effect of carbon-curing cementitious materials was found by using 3% biochar of 200 mesh size at a 0.5 w/c ratio and a 48 h CO₂ curing process, and the 3 d and 28 d compressive strength was improved by 21.6% and 23.0% respectively. (2) During 4–48 h of CO₂ curing, the CO₂ sequestration rate of biochar incorporated mortar specimens increased with CO₂ curing time, and the carbonated area expanded from 16.52% to 51.98%. Pre-saturated CO₂ treatment for biochar enhanced the carbon sequestration rate by 0.71%.

Keyword: biochar; CO₂ curing; strength; carbon sequestration rate

(责任编辑 史小丽)