

The Performance and Carbon Sequestration of the Biochar Concrete

Dannel Zhang¹, Xian Huang¹, Zhenhong Wang^{1*}, Yansen Huang²

¹College of Life Science, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Lianjian Civil Engineering Quality Testing Monitoring Center Co. Ltd., Guiyang Guizhou

Email: *w_zhenhong@126.com

Received: Nov. 15th, 2017; accepted: Nov. 30th, 2017; published: Dec. 8th, 2017

Abstract

Carbon sequestration is a key technique mitigating the global warming. We used biochar to replace cement to make the biochar concrete in concrete production, and then compared the performance and carbon sequestration of the biochar concrete with C20 concrete. When 1% of cement was replaced by biochar, the strength of the biochar concrete increased by 9.77% compared with the control; When 5% of cement was replaced by biochar, the strength of the biochar concrete was similar to the control; When 6%~30% of cement was replaced by biochar, the strength of the biochar concrete decreased compared with the control, but the biochar concrete still met the national standards of the C20 concrete for the concrete strength. The addition of water for the production of the biochar concrete and the saturation water contents of the biochar concrete increased with increasing amount of biochar in the concrete, but slump constant and the apparent density of the biochar concrete decreased. If the biochar concrete that have met the demand of the strength of the C20, C25 and C30 concrete is applied to all constructing buildings in China, these buildings will be able to sequester 4.95×10^{10} kg CO₂; If the biochar concrete is applied for improvement in structures and functions of the existing buildings, these existing buildings will be able to sequester 1.73×10^{12} kg CO₂. The total sequestration of CO₂ by the application of the biochar concrete equals to 1.5‰ of the standard forest area in China. Biochar used to replace cement in concrete production is an innovative method of carbon sequestration. The biochar concrete has the advantages of easy operation, low cost, and long-time sequestration of carbon, and the production of the biochar concrete can consume a great amount of solid wastes.

Keywords

Carbon Sequestration, Biochar, Biochar Concrete, Absorption Ratio, Quantity of Carbon Sequestration, Standard Forest

生物炭混凝土性能及碳封存效益研究

张兴伟¹, 黄 娴¹, 王震洪^{1*}, 黄彦森²

*通讯作者。

¹贵州大学生命科学学院, 贵州 贵阳

²贵州联建土木工程的质量监测监控中心有限公司, 贵州 贵阳

Email: *w_zhenhong@126.com

收稿日期: 2017年11月15日; 录用日期: 2017年11月30日; 发布日期: 2017年12月8日

摘要

碳封存是减缓全球变暖的关键技术。本研究利用不同质量分数生物炭替代普通水泥, 制造生物炭混凝土, 用C20强度标号混凝土作对照, 比较分析生物炭混凝土基本性能及碳封存效益。当生物炭替代水泥为1%, 生物炭混凝土强度超过对照9.77%; 当替代水泥为5%, 生物炭混凝土强度和对照强度相当; 当替代水泥量为6%~30%时, 生物炭混凝土强度下降, 但仍然大于C20混凝土强度国家标准。生物炭混凝土补加水量、饱和吸水量随生物炭替代量增加而增加, 坍落度和密度则下降。生物炭混凝土满足C20、C25和C30混凝土强度要求条件下, 在全国新增建筑中推广, 每年可封存 4.95×10^{10} kg CO₂, 在现有建筑改造中应用, 可封存 1.73×10^{12} kg CO₂, 相当于每年增加1.5‰我国现有森林面积。生物炭混凝土是封存碳的新方法, 具有方法简单、成本低、封存时间长, 能处理有机固体废弃物的特点。

关键词

碳封存, 生物炭, 生物炭混凝土, 吸水率, 碳封存量, 标准森林

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生物炭是有机物在嫌气条件下热裂解(<700°C)形成的一类具有稳定结构、高度芳香化的化合物[1] [2] [3] [4]。生物炭的来源十分广泛, 可以是养殖场粪肥、酿酒发酵剩余物、农田秸秆, 也可以是污水处理厂的污泥、城乡垃圾、工业废弃有机物等对环境质量安全造成危害的有机物。混凝土是当代最主要的土木工程材料, 它是由胶凝材料、骨料、水等按一定比例配制, 经均匀搅拌, 密实成型, 养护硬化而成的一种人工石材[4] [5] [6] [7] [8]。生物炭混凝土是本课题组发明的、在混凝土制造过程中通过生物炭替代水泥, 形成一种具有封存碳功能, 同时具有混凝土工程属性和施工属性的混凝土。

目前国内外碳封存技术有地质封存、海洋封存、矿石碳化、工业利用、生态封存等[9] [10] [11] [12] [13]。地质封存利用类似地层封存天然气的原理对CO₂进行封存, 封存潜力大, 被普遍认为是未来主流的方式, 但工程量大, 技术要求高, 后期维护有一定风险[9] [12]。海洋封存是通过海上管道或者轮船输送、高压注入到海洋中的一种封存技术, 封存量大, 但该技术涉及技术经济、环境影响等一系列复杂问题有待解决, 故目前尚处于探索阶段[10] [13]。矿石碳化是利用碳与金属氧化物发生反应生成稳定的碳酸盐, 从而将碳永久固定, 此技术要增加反应速率, 非常耗能, 因此该技术发展潜力并不乐观[9] [12]。工业利用是以碳作为填料生产各种含碳化学物质的封存技术[13]。生态封存是环境友好型封存, 是重要的碳封存技术, 包括造林绿化固定二氧化碳、农田施用生物炭改良土壤, 同时也把碳封存在森林和土壤中[11]。碳的生态封存是一种方便操作低成本的封存方式。但是通过造林绿化生态封存周期长, 农田施用生物炭, 农田面

积是有限的,同一农田具有施用总量的限制[11][13]。因此,在生态工程领域,还需要寻找能够持续封存、操作方便、成本低的碳封存方式。

基于较小范围内钢材硬度-耐磨性随碳含量增加的理论、碳的同分异构体理论、以及生态系统地球化学循环调控理论[14][15][16][17],我们假设在混凝土胶结过程中掺入一定量的生物炭替代水泥,会导致混凝土强度增强或维持混凝土工程性能和施工性能要求的强度,以便能在新建建筑和已有建筑改造中应用生物炭混凝土,实现碳封存。因此开展混凝土生产过程中掺入生物炭的试验,获得数据,检验上述假设。本研究要回答下列问题:1)在混凝土生产过程中,不同生物炭替代水泥后,混凝土强度如何变化?是否达到工程要求的强度水平?2)不同生物炭含量的混凝土制造过程中用水量、坍落度、吸水率、密度有什么变化?3)如果生物炭混凝土能满足建筑工程强度等级和施工性能要求,在全国新建建筑和已有建筑改造中使用生物炭混凝土,其每年碳封存效益是多少?最后根据这些结果,综合评价生物炭混凝土作为新的碳生态封存方法的可能性。

2. 材料和方法

2.1. 试验材料

试验材料如图1,主要包括生物炭、水泥、粗细集料砂和石子。生物炭选用贵州省平坝县十字乡猫岩机制生物炭厂生产的低温木炭。水泥采用贵州省都匀豪龙水泥有限公司生产的P.O42.5级。粗细集料砂和石子从市场购买。试验材料的基本性质见表1。

2.2. 试验设计

参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011)及《混凝土结构设计规范》进行生物炭混凝土试块制作[17][18]。按C20混凝土强度 $f_{cu,k} = 20.0$ MPa设计,配制强度 $f_{cu,o} = 26.58$ MPa,设计坍落度为10-20 mm,设计砂率为40%,水灰比{即水/(水泥+生物炭粉)} $W/C = 0.57$;试块标准养护28天后,95%以上达到设计强度[5][6][7]。施工配合比为水泥:砂:碎石:水 = 1:3.16:4.36:0.57。以此为基础,试件按照生物炭替代水泥的重量百分比即0%、1%、5%、10%、15%、20%、25%、30%制作试块,每一替代百分比做2组重复,1组用于标准养护28天强度测定,另外1组用于饱和吸水后强度、吸水率测定。在混凝土制作过程中还测定了坍落度、补加水量、表观密度等指标。最后,依据国家统计局数据,对我国新增建筑及现有高耗能建筑改造,假定推广应用满足建筑工程要求的生物炭混凝土,估算碳的封存量,折算成标准森林面积,评价生物炭混凝土的效益。主要试验仪器见图2。

2.3. 试验步骤

2.3.1. 生物炭混凝土强度测定

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)[19]和《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080-2002)[20],按照水泥:砂:碎石:水 = 1:3.16:4.36:0.57,对每一个生物炭替代水泥的重量百分比重复,依次称取砂29.23 kg、碎石40.32 kg、水5.13 kg;水泥和生物炭二者总重量,不管百分比变化,均为9.00 kg。然后放入搅拌机预搅拌1 min,再徐徐加水搅拌,直到水用完,总搅拌时间约5 min。把搅拌充分的拌合物装入内表面已打油的标准试模,用捣棒分两层振捣,每层振捣25次,然后放振实台上振实30 s,抹平静止。装模后第三天脱模,放入标准养护室养护(标准养护室条件:温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度95%以上、并养护28天)。每一生物炭替代百分比制作2组试块,每组3个重复,第一组28天标准养护龄期后,采用万能压力试验机直接测定强度;第2组达到28天标准养护龄期后,浸水饱和,用万能压力试验机测定强度。



Figure 1. Materials for testing
图 1. 试验材料

Table 1. The basic property of experimental materials
表 1. 试验材料的基本性质

生物炭 Biochar						
密度(g/cm ³)	pH	MgO(%)	CaO(%)	ZnO(%)	CuO(%)	Al ₂ O ₃ (%)
1.56	7.56	1.55	10.01	0.0063	0.0105	0.76
水泥 Cement						
密度(g/cm ³)	石粉含量(%)	比表面积	初凝时间(min)	终凝时间(min)		
3.101	15.6	357	245	316		
粗细集料 Coarse and fine aggregates						
集料	表观密度(g/cm ³)	堆积密度(g/cm ³)	细度模数	最大粒径(mm)	级配	
砂	2.78	1.81	3.5	0 - 4.75	良好	
碎石	2.79	1.43	-	5 - 20	良好	



Figure 2. Main test instruments
图 2. 主要试验仪器

2.3.2. 生物炭混凝土坍落度测定

按照施工配合比,依次对每一个生物炭替代水泥百分比重复称取砂 9.74 kg、碎石 13.44 kg、水 1.71 kg,水泥与生物炭总重量为 3.00 kg,放入搅拌机预搅拌 1 min,再徐徐加水搅拌,直到水用完,总搅拌时间约 5 min。将拌合物装入坍落度桶,用捣棒分层振捣,装实后取出桶,用直角尺测定塌落高度 H_i ($i = 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30$),根据公式(1) [19] [20]计算:

$$L = H - H_i \quad (i = 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30) \quad (1)$$

式中: L 为塌落度(mm); H 为塌落度桶高度(mm); H_i 为生物炭替代混凝土塌落后最高点的高度(mm)。

2.3.3. 生物炭混凝土设计塌落度条件下的补加水量测定

根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080-2002) [20],按照施工配合比拌制生物炭混凝土,测定坍落度时,由于生物炭的掺和,理论上,塌落度将减小;试验时,若小于设计坍落度,则加入一定量的水再搅拌,再装桶振捣,测定塌落度,直到与设计坍落度一致,累加每次增加的水量,最后得到设计塌落度条件下的补加水量。

2.3.4. 生物炭混凝土表观密度测定

根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080-2002) [20],称量干净的 5L 容量筒重量 M_1 ,记录并编号,将每一个生物炭替代水泥的重量百分比重复的拌合物装入量筒,振捣装实抹平,称量 M_{2i} ($i = 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30$),按公式(2) [19] [20]计算表观密度:

$$\rho = \frac{(M_{2i} - M_1) \times 1000}{V} \quad (i = 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30) \quad (2)$$

式中: ρ 为表观密度(kg/m^3); M_{2i} 为容量筒和试样总重量(kg); M_1 为容量筒重量(kg); V 为容量筒容积(L)。

2.3.5. 生物炭混凝土饱和吸水率测定

用 1.3.1 中第二组标准养护试块, 称量初重量 M_{0i} ($i = 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30$), 放入水中浸泡 3 h, 取出称重并记录, 然后再放入水中浸泡 3 h, 取出称重并记录, 直到多次浸泡和称重后重量恒定为止。根据试块浸泡前和浸泡后重量, 用公式(3) [7]计算吸水率:

$$R = \frac{(M_{1i} - M_{0i}) \times 100\%}{M_{0i}} \quad (i = 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30) \quad (3)$$

式中: R 为吸水率; M_{0i} 为试块未浸水时的重量(kg); M_{1i} 为试块多次浸水后被水饱和的重量(kg)。

2.3.6. 生物炭混凝土碳封存评价

根据《混凝土结构设计规范》, 不同强度等级混凝土在建筑工程中的使用量不同。基于全国新增建筑和已有建筑改造数量得出不同强度混凝土用量, 按满足混凝土设计强度等级及建筑工程施工条件下普通混凝土被生物炭混凝土替代, 换算出二氧化碳封存量; 按标准森林封存纯碳量, 估算生物炭混凝土碳封存折合成标准森林面积[19]。其计算公式如下:

$$Cs = \alpha \cdot \beta \cdot M / 0.273 \quad (4)$$

$$M = 0.3 \times S \cdot \gamma \quad (5)$$

$$Ss = \frac{1}{160} \times Cs \times 0.273 \times 0.1 \quad (6)$$

式中: Cs 为二氧化碳封存量(kg); α 为水泥重量与混凝土重量的比例系数, 即 1/9.09; β 为满足建筑工程强度要求的生物炭替代水泥的重量百分数(%); M 为全国新增建筑或已有建筑改造所需混凝土重量(kg); 0.273 是纯碳换算成二氧化碳的比例系数; 0.3 是单位建筑面积折合成混凝土的最小体积(m^3/m^2); S 为新增建筑面积或已有建筑面积(m^2); γ : 混凝土容重(kg/m^3); Ss : 标准森林面积(m^2); $\frac{1}{160}$ 是纯碳封存量折合成标准森林面积的转换系数(m^2/kg); 0.1 为换算系数(图 3)。

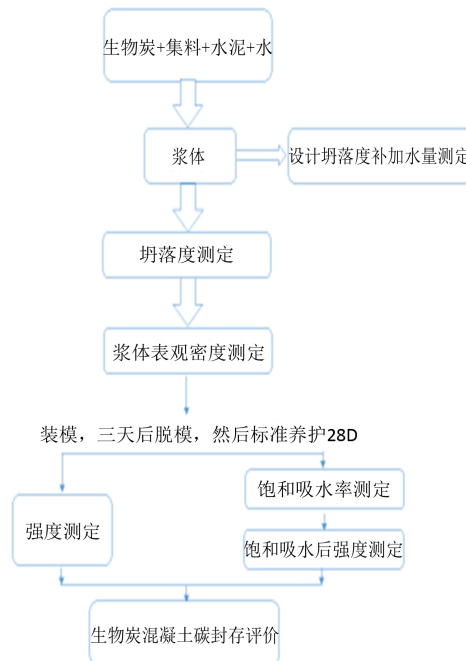


Figure 3. Test flow chart

图 3. 试验流程图

3. 结果与讨论

3.1. 生物炭混凝土强度

混凝土强度是实现混凝土工程性能和施工性能的关键指标。随着强度越大，混凝土支撑力、抗压强度越大[7]。表 2 表明，随着混凝土中生物炭替代水泥的重量百分比增加，生物炭混凝土所能承受的最大压力发生了变化。当生物炭替代量为 1% 水平时，所能承受的最大压力最大，比不加入生物炭的混凝土对照强度还大，这说明掺入生物炭，提高了混凝土强度。根据分析，当掺入 5% 生物炭时，混凝土强度和不掺入生物炭的混凝土持平。当掺入量超过 5% 后，混凝土的强度随着掺入生物炭的增加不断下降。当掺入量为 30% 时，生物炭混凝土强度接近于 C20 混凝土强度的最低限值。分析显示，除 5% 的替代百分比外，其他掺入量与对照差异显著。

结果还表明，生物炭混凝土标准养护 28 天并饱和吸水后，生物炭混凝土强度变化与标准养护 28 天后没有吸水的试块强度变化趋势一致。但是，标准养护 28 天生物炭混凝土强度要比标准养护 28 天后饱和吸水的生物炭混凝土强度要大；相比而言，二者在每一替代量百分比相差 2 左右。这主要是混凝土吸水后静摩擦力下降的结果。

3.2. 生物炭混凝土坍落度

坍落度是量化混凝土和易性的指标[6]。从图 4 表明，随着生物炭掺入量增加，坍落度依次减小，减小的幅度从 14 mm 到 2 mm。通过分析，生物炭替代水泥的重量百分比与坍落度关系可用线性方程 $y = -0.37x + 13.04 (R^2 = 0.98)$ 拟合。这一结果表明，随着生物炭掺入量增加，生物炭混凝土流动性下降，混凝土和易性有减小趋势。生物炭混凝土施工过程中，粘聚性和保水性有增加趋势，但能够满足和易性要求。生物炭掺入有增大混凝土粘聚性和保水性的特点，是因为生物炭本身有较强的吸附水能力。

3.3. 生物炭混凝土在设计坍落度条件下的补加水量

从表 3 可以看出，生物炭混凝土在设计坍落度和定水灰比条件下，其水补加量与对照相比是不断增加的，从 0 增加到 0.55 kg，其增加的水量占鲜混凝土重量百分比为 0%~1.97%。这是由于生物炭替代水泥，在混凝土制造过程中，生物炭高吸水性导致需要增加水量。这一结果表明，生物炭混凝土制造有增大耗水量的趋势，这也验证了坍落度测定中生物炭混凝土有较好的保水性。

Table 2. The strength of the biochar concrete with different biochar substitutions after the 28 days standard curing and the strength of the water-saturated biochar concrete with different biochar substitutions after the 28 days standard curing

表 2. 生物炭混凝土标准养护 28 天后试块强度及养护 28 天后饱和吸水试块强度

生物炭替代百分比(%)	试块养护 28 天后强度(MPa)	试块养护 28 天饱和吸水后强度(MPa)
0	33.63 ± 0.15(b)*	31.53 ± 0.32(b)
1	37.27 ± 0.72(a)	33.67 ± 0.12(a)
5	32.07 ± 0.15(b)	31.03 ± 0.32(b)
10	26.73 ± 0.15(cd)	26.03 ± 0.09(c)
15	27.93 ± 0.18(c)	26.57 ± 0.30(c)
20	27.13 ± 0.03(cd)	26.23 ± 0.3(c)
25	25.63 ± 0.80(d)	22.33 ± 0.12(d)
30	22.20 ± 0.06(e)	20.43 ± 0.26(e)

*数字后边括号内的不同字母表示不同处理间在 0.95 置信水平上具有显著差。

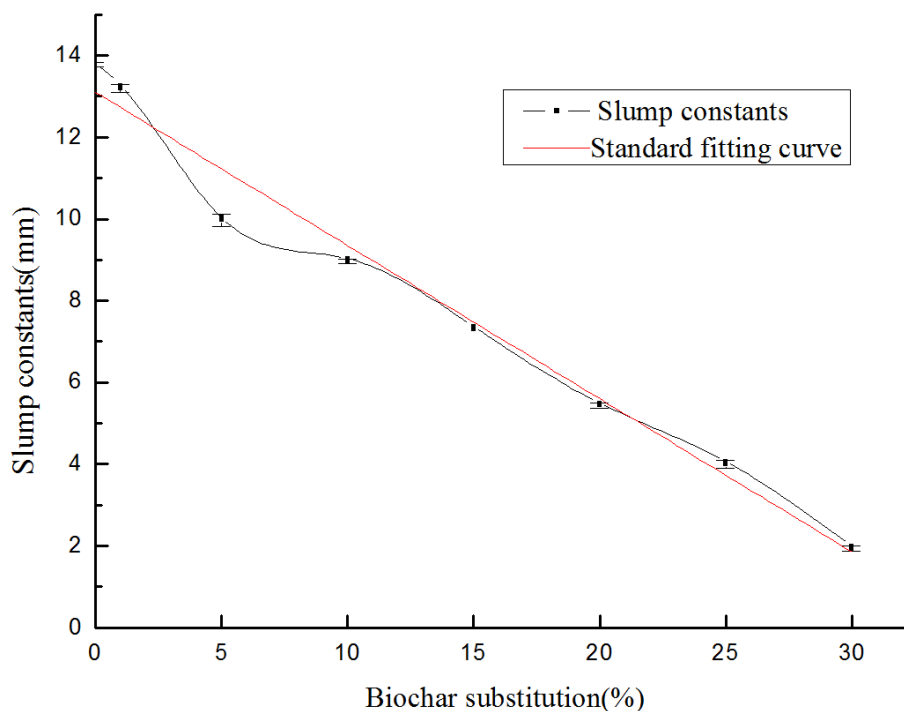


Figure 4. The relationship between the amount of biochar substitutions and slump constants of the biochar concrete

图 4. 生物炭替代水泥百分比与混凝土坍落度关系

Table 3. The relationship between the biochar substitutions and the water supplement ratio under the defined slump constants and water cement ratios

表 3. 在设计坍落度与定水灰比条件下生物替代量与补加水量关系

生物炭替代水泥重量百分比(%)	坍落度(mm)	水补加量(kg)
0	13.8 ± 1.18	0.00 ± 0.00
1	13.2 ± 1.05	0.10 ± 0.01
5	13.5 ± 0.80	0.25 ± 0.01
10	13.0 ± 0.79	0.31 ± 0.02
15	13.4 ± 0.84	0.38 ± 0.02
20	13.5 ± 1.10	0.40 ± 0.03
25	13.4 ± 1.15	0.50 ± 0.06
30	13.0 ± 0.95	0.55 ± 0.05

3.4. 生物炭混凝土表观密度

由图 5 表明, 生物炭混凝土随着生物炭替代水泥量的增加, 表观密度下降了, 其变化范围在 0%~30% 范围内, 从大于 2.6 g/m³ 下降到 2.4 g/m³。生物炭替代水泥量与密度的关系可用线性方程 $y = -0.0064x + 2.62$ ($R^2 = 0.95$) 拟合。生物炭混凝土的这个特性有利于减轻建筑物重量。

3.5. 生物炭混凝土饱和吸水量

由图 6 表明, 随着生物炭替代水泥重量百分比的增大, 生物炭混凝土饱和吸水率增加, 其增加幅度

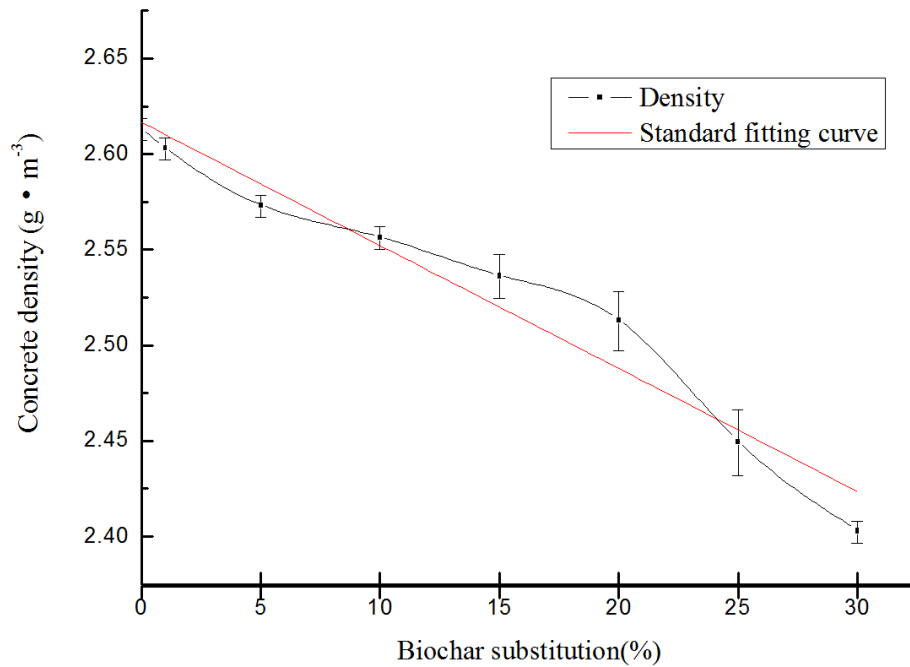


Figure 5. The relationship between biochar substitutions and the apparent density of the biochar-concrete

图 5. 生物炭替代水泥重量百分比与混凝土表观密度的关系

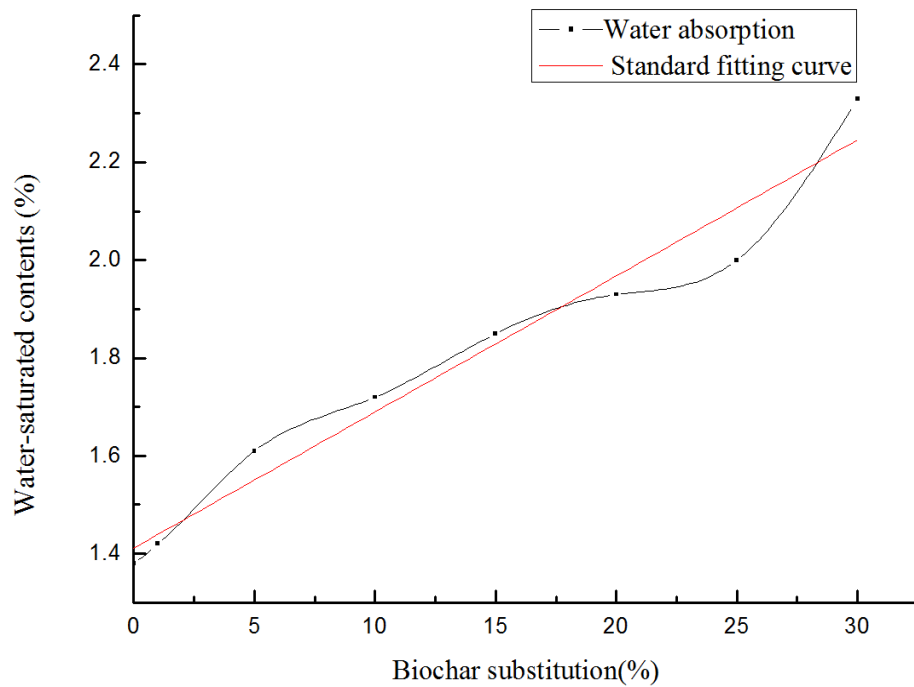


Figure 6. The relationship between the amount of biochar substitutions and the water-saturated contents of the biochar concrete

图 6. 生物炭替代水泥重量百分比与生物炭混凝土饱和吸水率关系

在 0%~30% 范围内, 从 0 增大到约 2.4%, 其关系可用线性方程 $y = 0.028x + 1.41$ ($R^2 = 0.96$) 拟合。吸水率增加主要是生物炭掺入, 生物炭多孔和高比表面增加了混凝土吸水。因此, 生物炭混凝土对改善混凝土

水文过程有一定作用。研究结果还表明,在浸水时间达到 12 h 后,吸水达到饱和状态。但是,由于吸水量增加,在一定程度上,减小了生物炭混凝土内摩擦力。但是,饱和吸水率增加和内摩擦力下降幅度,并不影响生物炭混凝土工程性能要求。

3.6. 生物炭混凝土的固碳效益

根据国家统计局资料,中国现有建筑面积 $5.6 \times 10^{10} \text{ m}^2$, 每年新增建筑面积 $2 \times 10^9 \text{ m}^2$, 占世界新增建筑面积的一半以上。这些建筑建造需要大量混凝土, 根据计算, C20, C25 和 C30 混凝土占这些建筑全部标号混凝土用量的 55%~60%; C20, C25 和 C30 强度等级混凝土在新增建筑中的用量分别为 $0.23 \times 10^{12} \text{ kg}$, $0.31 \times 10^{12} \text{ kg}$ 和 $0.3 \times 10^{12} \text{ kg}$, 在现有建筑改造中的用量为 $6.5 \times 10^{12} \text{ kg}$, $8.6 \times 10^{12} \text{ kg}$, $8.6 \times 10^{12} \text{ kg}$ (表 4)。现有建筑改造包括外墙、屋面、围护结构、梁、板、柱的改建, 空调、采暖、通风、照明、供配电、热水供应等高能耗系统的节能改造, 建筑格局的系统升级等一系列项目。由于现有落后建筑基数巨大, 改造需要的混凝土远大于新增建筑。基于上述结果, 生物炭混凝土在新增建筑和现有建筑改造中, 能够满足 C20, C25 和 C30 强度和施工要求, 如果在这些建筑中应用生物炭混凝土, 折算成 CO_2 封存量或相当于增加标准森林面积进行固碳, 其结果见表 4。

从表 4 看出, 不同强度等级生物炭混凝土在全国每年新增的建筑中和现有建筑改造中, 对碳封存的贡献不同, 折合成标准森林面积也随之不同: 当生物炭替代水泥重量百分比 $\leq 30\%$ 时, 混凝土强度 $\geq 20.0 \text{ MPa}$, 满足 C20 强度等级要求, 此时 CO_2 的封存量在新增建筑中达到 $27.47 \times 10^9 \text{ kg}$, 在现有建筑改造中达 $746.15 \times 10^9 \text{ kg}$, 折合标准森林面积分别为 $4.69 \times 10^7 \text{ m}^2$, $127.31 \times 10^7 \text{ m}^2$; 当生物炭替代水泥重量百分比 $\leq 25\%$ 时, 混凝土强度 $\geq 25.0 \text{ MPa}$, 满足 C25 强度等级要求, 此时 CO_2 封存量在新增建筑中达到 $31.25 \times 10^9 \text{ kg}$, 在现有建筑改造中达 $822.05 \times 10^9 \text{ kg}$, 折合标准森林面积分别为 $5.31 \times 10^7 \text{ m}^2$, $140.26 \times 10^7 \text{ m}^2$; 当生物炭替代水泥重量百分比 $\leq 5\%$ 时, 混凝土强度 $\geq 30.0 \text{ MPa}$, 满足 C30 混凝土强度等级要求, 此时 CO_2 封存量在新增建筑中达 $6.23 \times 10^9 \text{ kg}$, 在现有建筑改造中达 $164.40 \times 10^9 \text{ kg}$, 折合标准森林面积分别为 $0.62 \times 10^7 \text{ m}^2$, $0.28 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。

国家林业局 2014 年 2 月权威发布, 我国森林面积为 $2.08 \times 10^{12} \text{ m}^2$, 推广 C20、C25、C30 生物炭混凝土后, 每年新增和改造现有建筑固碳折合标准森林面积为 $3.06 \times 10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{y}^{-1}$, 约占我国森林面积的 1.5% [21]。综上, 生物炭混凝土对碳封存贡献是相当可观的, 对减少二氧化碳温室气体排放具有重要意义。

4. 结论

1) 生物炭替代水泥制作生物炭混凝土, 在较小范围内, 随着替代量增加, 混凝土强度增大; 替代量为 5% 时, 生物炭混凝土强度和未掺入生物炭的混凝土强度相似; 替代量超过 5% 时, 生物炭混凝土强度

Table 4. Carbon sequestration of the biochar concrete applied to new buildings and existing buildings in China and corresponding standard forest area

表 4. 生物炭混凝土在全国新增建筑和现有建筑改造中碳封存量及折合标准森林面积

强度等级	工程用量(%)	每年混凝土用量($\times 10^{12} \text{ kg}$)		每年 CO_2 封存量($\times 10^9 \text{ kg}$)		相当于标准森林面积($\times 10^7 \text{ m}^2$)	
		新增建筑	现有建筑改建	新增建筑	现有建筑改建	新增建筑	现有建筑改建
C20	15%~20%	0.23	6.5	27.47	746.15	4.69	127.31
C25	20%	0.31	8.6	31.25	822.05	5.31	140.26
C30	20%	0.31	8.6	6.23	164.4	0.62	28.05
Total 合计	55%~60%	0.85	23.7	64.95	1732.6	10.62	295.62

*混凝土用量是根据不同强度等级在建筑工程中的比例计算。

下降。在满足 C20 混凝土强度国家标准条件下, 生物炭替代水泥量最多为 30%。在相同养护条件下, 饱和吸水生物炭混凝土强度要比未吸水混凝土强度要低。随着生物炭替代水泥量增加, 混凝土补加水量、饱和吸水率增加, 而塌落度、密度减小。在较小范围内, 生物炭替代水泥具有改善混凝土工程性能和施工性能的特点。生物炭替代水泥在 0%~30% 范围内, 生物炭混凝土能够满足混凝土 C20-C30 混凝土强度等级要求和建筑工程要求。

2) 生物炭混凝土符合不同强度等级要求及建筑工程施工要求条件下, 如果在全国推广应用, 每年封存的碳折合标准森林面积, 约占我国森林面积的 1.5‰, 对全国乃至全球的碳封存贡献十分可观, 是减少温室气体排放的有效新途径。生物炭生产通过高温裂解、水泥生产通过高温煅烧, 二者都要消耗化石燃料, 增加相似数量的温室气体排放。但是, 生物炭可利用污水处理厂的污泥、垃圾填埋场的垃圾、农村养殖场的废弃物、农田秸秆废弃物等有机物质生产, 在有效处理固体废弃物污染的同时, 把即将很快分解释放出大量 CO₂ 的有机物, 通过生物炭的方式长期固定在混凝土中, 具有显著的生态效益。

3) 生物炭混凝土的环境生态功能, 如与海绵城市建设有关的水分渗透性、热容量、保温隔热功能、热岛效应减缓功能、呼吸功能、生物炭混凝土的生物属性等有待进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] Tenenbaum, D.J. (2009) Biochar: Carbon Mitigation from the Ground Up. *Environmental Health Perspectives*, **117**, 70-73. <https://doi.org/10.1289/ehp.117-a70>
- [2] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [3] 鄂洋. 生物炭表面有机小分子及其活性研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
- [4] 余跃心, 李锦柱, 曹茂柏, 等. 稻壳灰及掺稻壳灰混凝土应用研究进展述评[J]. 混凝土, 2016(6): 57-62.
- [5] 胡云珍, 刘凤侠. 稻壳灰在水泥混凝土中的综合应用研究[J]. 材料导报, 2014(S1): 348-350+357.
- [6] 刘春, 何智海. 双掺稻壳灰和石灰石粉对混凝土干燥收缩的影响[J]. 混凝土, 2016(9): 79-81.
- [7] 梁世庆, 孙波成. 稻壳灰混凝土性能研究[J]. 混凝土, 2009(2): 73-75.
- [8] 尚鑫. 稻壳灰高性能混凝土耐久性能试验研究[D]: [博士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [9] 黄斌, 刘练波, 许世森. 二氧化碳的捕获和封存技术进展[J]. 中国电力, 2007, 40(3): 14-17.
- [10] 张军, 李桂菊. 二氧化碳封存技术及研究现状[J]. 能源与环境, 2007(2): 33-35.
- [11] Evans, A.G. (2012) Biochar: Carbon Sequestration, Land Remediation, and Impacts on Soil Microbiology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **42**, 2311-2364. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.574115>
- [12] Lal, R. (2008) Carbon Sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **363**, 815-830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>
- [13] 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 等. 生物炭碳封存技术研究进展[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3327-3333.
- [14] 杨奇梅. 炭素工具钢[J]. 制造技术与机床, 1955(15): 41-49.
- [15] 伊崇信, 张仁权, 邓启刚. 计算烷烃系列同分异构体理论数目的计算机方法[J]. 化学通报, 1997(10): 62-66.
- [16] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1): 79-97.
- [17] 丁威, 冷发光, 艾永祥, 等. 普通混凝土配合比设计规程(JGJ 55-2011) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [18] 赵基达, 徐有强, 黄小坤, 等. 混凝土结构设计规范(GB 50010-2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [19] 戎君明, 陆建雯, 姚艳, 等. 普通混凝土力学性能试验方法标准(GB/T50081-2002) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [20] 戎君明, 李可长, 黄小平, 等. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准(GB/T50080-2002) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [21] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.