

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.171



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



湿热地区生物炭透水混凝土的热湿性能

吴维¹, 谭康豪¹, 张云寒², 汪俊松³

(1. 广西大学土木建筑工程学院; 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100044; 3. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 透水混凝土因丰富的孔隙结构而具有良好的渗透和调湿性能, 不仅能渗透降雨以减少地表径流, 还能在内部截留一定的水分并通过水分蒸发降低表面温度。为提高透水混凝土的保水性以延长其降温效果, 利用农业废弃物制成生物炭作为保水填料, 并按照一定质量比取代水泥, 制备出生物炭透水混凝土, 分析生物炭对透水混凝土力学性能的影响, 进而在最佳取代率下探讨生物炭对透水混凝土的热物参数和吸水蒸发降温性能的影响。结果表明: 当生物炭取代率小于 5.0% 时, 研磨后的超细炭颗粒可以充分发挥填充和内固化效应, 有效提高透水混凝土的力学性能; 生物炭的掺入对其发射率影响并不显著, 但降低了反射率和导热系数; 生物炭具有较高的比表面积和丰富的孔隙, 添加到透水混凝土后能显著提高其毛细吸水能力和保水能力, 而额外吸收的水分能有效降低其表面温度 3~6 °C, 维持 14~18 h 的蒸发冷却效果。

关键词: 农业废弃物; 生物炭; 透水混凝土; 保水能力; 蒸发降温

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)04-0173-09

Hygrothermal properties of biochar-modified pervious concrete in hot and humid area

WU Wei¹, TAN Kanghao¹, ZHANG Yunhan², WANG Junsong³

(1. School of Civil Engineering and Architecture; Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety of Guangxi, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100044, P. R. China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract: Pervious concrete has good permeability and moisture adjustment properties due to its rich pore structure. It can not only penetrate rainfall to reduce surface runoff, but also retain a certain amount of water inside then via evaporation to decrease surface temperature. In order to improve the water retention of pervious concrete and prolong its cooling effect, this study introduced a modified method of incorporating biochar produced by pyrolyzing agricultural wastes into pervious concrete as hygroscopic filler. The effects of biochar on the mechanical properties of pervious concrete were analyzed, then the thermophysical properties, water

收稿日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(51678243、51678164); 广西研究生教育创新计划资助项目(YCBZ2021022)

作者简介: 吴维(1993-), 男, 主要从事建筑材料与节能研究, E-mail: wuweia403@163.com。

谭康豪(通信作者), 男, 博士, E-mail: haokangtan@163.com。

Received: 2021-04-19

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51678243, 51678164); The Innovation Project of Guangxi Graduate Education (No. YCBZ2021022)

Author brief: WU Wei (1993-), main research interests: building materials and energy saving, E-mail: wuweia403@163.com.

TAN Kanghao (corresponding author), PhD, E-mail: haokangtan@163.com.

absorption properties and evaporative cooling performance of biochar-modified pervious concrete with the optimum replacement rate were studied. The results show that the carbonaceous particles after grinding could fully exert the filling and internal curing effects when the replacement rate was less than 5.0%, and effectively improve the mechanical strength of pervious concrete. It was found that the biochar addition had little impact on the emissivity of pervious concrete, while significantly reduced the reflectivity and thermal conductivity. Contributing to the abundant micro-pores and higher specific surface area of biochar particles, it could improve capillary water absorption and water storage ability of pervious concrete. During the evaporation process, the water absorption increment could effectively reduce surface temperature of 3-6 °C and maintain evaporation cooling effect for 14-18 h.

Keywords: agricultural wastes; biochar; pervious concrete; water storage; evaporation cooling

城市规模的不断扩大导致城市下垫层过度人工化,破坏了原有天然土壤界面与大气间的热湿交换平衡^[1-3]。现有路面多为沥青、混凝土、石板或水泥砖等不透水材料,丧失了对地表温度和湿度的调节能力^[4]。加上混凝土的热惰性,不透水路面上白天吸收的热量在夜晚以长波辐射形式释放出来,导致近地面空气平均气温升高,进一步加剧了城市热岛效应^[5-6]。由于路面占据了15%~30%的城市面积,运用冷却路面的方法降低城市热岛效应成为城市热环境研究的热点^[7-9]。与不透水混凝土铺装相比,透水混凝土材料及构造层中含有连通孔隙,内部可以储存一定水分,在太阳辐射、空气温度、湿度和风速的综合作用下,以水蒸气的形式将内部热量转化为潜热热量散发到室外环境中,降低了铺装表面温度,从而抑制周围空气温度上升。而湿热地区夏季高温、天然降雨较多且季风旺盛的气象特点为上述蒸发降温过程的发生提供了先决的自然条件。以湿热地区的典型代表城市——广州为例,夏季太阳辐射照度日总量值约为7 318 W/m²,可为蒸发过程提供充足的能量来源;夏季降雨量丰沛,年平均降雨量约为1 694 mm。该地区年蒸发量水平低于降雨水平,应用气候资源实现被动蒸发冷却技术值得推广^[10]。

然而,传统路面所用透水混凝土的孔隙粒径较大,造成雨水渗透速率过快而不能有效地将雨水储存于面层中,导致热天后期蒸发降温能力严重不足^[3]。为了提高其保水性能,以延长降温效果,常见的改善措施有:优化多孔结构设计;提供有效水源补充;掺入高吸水性填料。在优化设计方面,Bao等^[11]和Qin等^[12]通过封闭透水混凝土的四周和底部,并在材料内部插入与铺装材料厚度等高的溢水管,在保证水分渗透的同时,又能截留足够多的水分,以供蒸发降温。在有效水源补充方面,Yamagata等^[13]对东京地区的透水铺装进行了淋水降温试验,并对比观测了路面温度、湿度及暑热压

力指数(WBGT)。研究发现,有淋水的情况下,相比草地区域,路面温度白天降低了8 °C,夜晚降低了3 °C。在高吸水性填料方面,姜骞等^[14]发现,纳米二氧化硅具有高比表面积,易吸附自由水,能促进浆体在透水混凝土中的竖直分布,提高连通孔隙率和透水系数。此外,高吸水性填料如多孔陶瓷^[15]、高炉矿渣^[16]、硅灰和粉煤灰^[17-18]在多次吸水后仍具有较好的保水性能,降温效果更持久。因此,掺入高吸水性填料是提高透水混凝土路面蒸发降温性能的最有效途径之一。

生物炭(Biochar, BC)是在缺氧条件下由废弃生物质高温裂解而成的富碳固体产物,因能提高土体的保水能力、降低土壤密实度而被广泛应用于土壤改良领域^[19-20]。最近,研究发现,生物炭作为一种替代水泥的辅助胶凝材料,部分掺入混凝土可发挥填充和内固化效应,提高胶凝材料的力学性能和耐久性,成为一种潜在的碳捕捉和封存技术^[21-23]。生物炭因其较大的孔隙度和超高的比表面积而具有良好的保水能力,若能以透水混凝土作为母体材料,结合一定量的生物炭粉末作为保水材料,制备生物炭透水混凝土,不仅可提高透水混凝土的蒸发降温效果,还可将碳元素以稳定态的形式存储在胶凝材料中,以达到固碳减排的目的,从而实现双赢。

笔者以木屑和米糠两种生物质为原料制备生物炭,并取代部分水泥制备生物炭透水混凝土。分析生物炭取代率及类型对透水混凝土力学性能的影响,在确定最佳取代率的前提下,研究生物炭透水混凝土的反射率、发射率、导热系数、孔隙率、吸水特征和蒸发降温效果。

1 试验

1.1 原材料制备及表征

水泥采用42.5级海螺牌普通硅酸盐水泥。粗骨料为粒径5~10 mm的玄武岩碎石,表观密度为2 760 kg/m³,细骨料为细度模数2.9的中砂。选取

木屑和米糠为原料,在实验室自制生物炭。在制备过程中,首先将这 2 种生物质原料烘干、粉碎,筛选后于 70 °C 下干燥 24 h。然后将这些生物质装入坩埚并放置于控温马弗炉内,以 10 °C/min 的升温速率加热到 500 °C,保温 2 h 使其完全碳化,冷却后取出,即得到经过高温裂解碳化的生物炭。最后将其机械研磨 30 min,过 100 目筛网后贮存在干燥箱中备用。

通过 Master 3000 激光粒度分析仪测试机械研磨后的生物炭颗粒粒径分布。如图 1 所示,两种生物炭粒径均主要分布于 1~100 μm 之间,且 50% 的米糠生物炭(RBC)和 42% 的木屑生物炭(WBC)粒径小于 10 μm。二者粒径均小于水泥颗粒,意味着这些炭颗粒易填充于水泥砂浆之间的孔隙。图 2 为 RBC 和 WBC 颗粒的 SEM 微观图。可以看出,两种

生物炭颗粒表面呈现出丰富的孔隙结构,这些孔隙结构有利于细小颗粒的吸附,使其具有较强的毛细吸水能力。其中,RBC 颗粒具有细长且均匀的孔结构,而 WBC 颗粒的孔隙为蜂窝状的连续圆孔,孔径范围均在 10~30 μm 之间。结合能谱仪(EDS)分析两种生物炭的化学成分发现,RBC 和 WBC 的 O/C 比分别为 0.16 和 0.13,一般情况下,O/C 原子摩尔比小于 0.2 的生物炭稳定性更佳,据估算,其半衰期可超过千年^[24],这也意味着两种生物炭掺入混凝土内部可以保持较长时间的稳定。

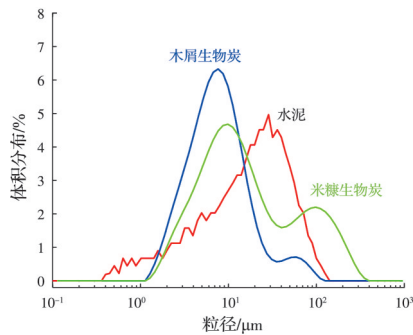
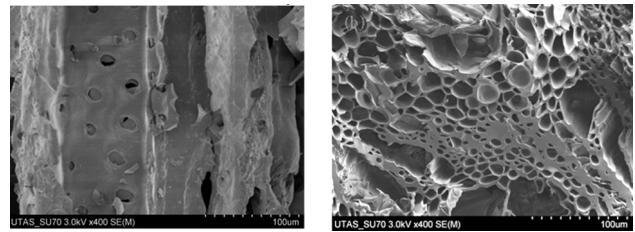


图 1 普通硅酸盐水泥和生物炭颗粒的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of pulverized biochar and ordinary Portland cement



(a) 米糠生物炭 (b) 木屑生物炭

图 2 生物炭颗粒的 SEM 图

Fig. 2 SEM micrograph of pulverized biochars

1.2 透水混凝土配合比设计

根据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)^[25]设计控制组透水混凝土基准配合比,在此基础上将生物炭按 1%、3%、5%、8% 质量取代水泥制备透水混凝土,水胶比为 0.40,砂率为 10%,具体配合比见表 1。

表 1 透水混凝土配合比

Table 1 Mix proportions of pervious concrete

编号	取代率 ω/%	水泥/(kg·m ³)	粗骨料/(kg·m ³)	细骨料/(kg·m ³)	水/(kg·m ³)	生物炭/(kg·m ³)	备注
CK	0	400	1 350	150	100	0	控制组
RBC-PC	1	396	1 350	150	100	4	米糠生物炭透水混凝土
	3	388	1 350	150	100	12	
	5	380	1 350	150	105	20	
	8	368	1 350	150	100	32	
WBC-PC	1	396	1 350	150	105	4	木屑生物炭透水混凝土
	3	388	1 350	150	105	12	
	5	380	1 350	150	105	20	
	8	368	1 350	150	105	32	

1.3 试验方法

1.3.1 基本力学和物理性能 透水混凝土采用手工振捣和平板振动相结合的方式制作成型,成型后用保鲜膜覆盖试块,24 h 后拆模,在标准养护室中养护 28 d。达到养护龄期后,分别对试件开展力学性能、吸水性能和热物性能试验,热物性能主要包括

反射率、发射率和导热系数。采用的相关试验方法、标准及所需试件如表 2 所示。

1.3.2 风洞蒸发降温试验 蒸发降温试验平台选择华南理工大学自主研发的可高质量复现气象参数环境的热湿气候风洞试验台,风洞的具体设计参数见文献[30-31]。为尽可能消除室外气象条件对

表 2 所有试件采用的相关试验方法和标准

Table 2 Relevant test methods and standards for all specimens

测试项目	测试内容	测试方法/标准	试件尺寸	试件数量
力学性能	抗压强度	GB/T 50081—2019	150 mm×150 mm×150 mm	3
	抗折强度		150 mm×150 mm×550 mm	3
热物性能	反射率	ASTM C1549—09 ^[26]	150 mm×150 mm×20 mm	3
	发射率	GB 7287.10—1987	150 mm×150 mm×20 mm	3
	导热系数	ISO 8302—1991 ^[27]	300 mm×300 mm×60 mm	2
吸水性能	开孔率	ASTM C1699—09 ^[28]	100 mm×100 mm×60 mm	3
	吸水率	ASTM C1585—13 ^[29]		

多孔材料蒸发造成的影响,试验过程采用稳态工况进行。湿热地区气象参数设置参考广州地区典型气象^[32]:太阳辐射 600 W/m²、相对湿度 60%、风速 1.5 m/s、气温 33℃。空调小室温度控制为 18℃,以模拟地下恒温温度。

如图 3 所示,为了测量透水材料蒸发量的变化,在风洞试验段下方安装 3 台连续自动读数的岛津 BW32KH 系列电子天平(量程 0~32 kg,精度 0.1 g)。将待测样品放置在亚克力制成的方盒中,其四周和底部均采用聚乙烯泡沫板包裹,以隔断周围局部热源对试件蒸发的影响,保证一维传热,通过调节亚克力盒下方电子天平上的 II 型不锈钢支架的高度,使试件表面与光源照度一致(见图 4)。电子天平通过专业的传输线与计算机相连,每分钟自动记录试件的质量变化。每个样品的表面均布置高精度的 T 型热电偶线,以监测温度变化,热电偶线一端通过导热硅胶紧贴在试件表面,另一端则连接数据采集仪。此外,在试件附近放置长波辐射传感器,以监测试件表面接收到的长波辐射。所有温度和辐射探头数据均采用 CR3000 数据采集仪以相同频率(1 次/min)记录。整个蒸发试验测量时间为 48 h,试验前样品(尺寸为 300 mm×300 mm×60 mm)均在蒸馏水中浸泡至饱和。

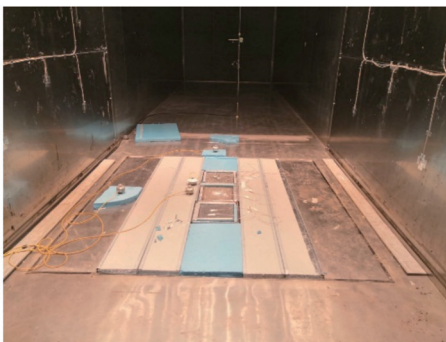


图 3 风洞中的蒸发降温试验

Fig. 3 Evaporation cooling experiment in the wind tunnel

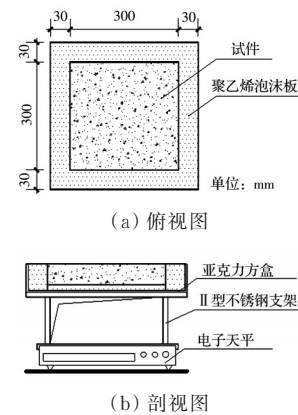


图 4 样品蒸发装置

Fig. 4 Evaporation device of the sample

2 结果与讨论

2.1 力学性能

随着生物炭取代率的增大,透水试件的抗压强度和抗折强度呈先升高后降低的趋势,且不同生物炭类型对其强度影响不明显(见图 5)。当生物炭取代率为 3% 时,透水混凝土抗压强度达到峰值,含有 RBC 和 WBC 的试块抗压强度较控制组分别提高了 10% 和 8%。而 1% 生物炭取代率的透水混凝土抗折强度最大,相比控制组提高了约 18%。

当取代率在合适范围内(5% 以内)时,生物炭可以充分发挥其填充和内固化效应,从而提高试件的抗压和抗折强度,同时,水泥浆体中的生物炭颗粒会引起裂缝多重分支,并导致裂缝扩展变得曲折,从而避免复合材料的脆性破坏^[33]。从 SEM 图像(图 6)中不难看出:碳质颗粒的存在引入了微填料效应,并提供了更多的成核位点。在 BC 孔隙内及周围沉积了大量的 C-S-H 凝胶、氢氧化钙、钙矾石等水化产物(见图 6(b))。水化作用的增强减少了大孔隙数量,使水泥胶体更加致密,从而有利于混凝土强度发展。然而,BC 颗粒添加量的进一步增大会引起稀释效应(水泥用量的减少)。当取代率

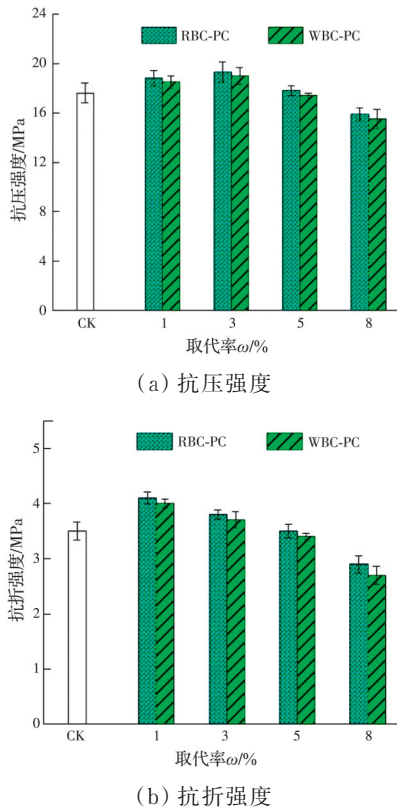


图 5 透水混凝土的 28 d 强度

Fig. 5 28-day strength of pervious concrete

超过 8% 时,混凝土强度发展明显低于控制组,过量的炭颗粒增加了界面区(ITZ)周围局部空洞和裂缝数量,这一现象与 Gupta 等^[34]的报道一致。取代率高时容易受到搅拌分散工艺水平的限制,使生物炭在水泥胶凝材料中发生团聚现象,形成更多的孔洞和裂缝,造成局部应力集中,有效承载面积减小,导致透水混凝土宏观力学性能降低。因此,在不降低透水混凝土强度的情况下,综合考虑生物炭的最佳取代率为 5%。

2.2 热物理性能

反射率和发射率是地表辐射能量平衡的关键热工参数,大小与材料本身的性质、表面状况(如粗糙度、颜色等)有关,其值为 0~1 的标量。表 3 对比分析了 5% 生物炭取代率对透水混凝土热物参数的影响规律。可以看出,米糠生物炭透水混凝土(RBC-PC)和木屑生物炭透水混凝土(WBC-PC)的平均反射率接近,控制组透水混凝土(CK)比前两者低约 0.10,这是生物炭颗粒表面颜色较黑的缘故,意味着在相同环境中含有生物炭的透水混凝土能吸收更多的太阳辐射。生物炭并未明显改变透水混凝土的发射率,3 种透水材料的发射率分别为 0.91、0.88、0.90,展现出大致相当的热辐射能力。生物炭对改善混凝土导热系数有积极影响,5% 生物炭

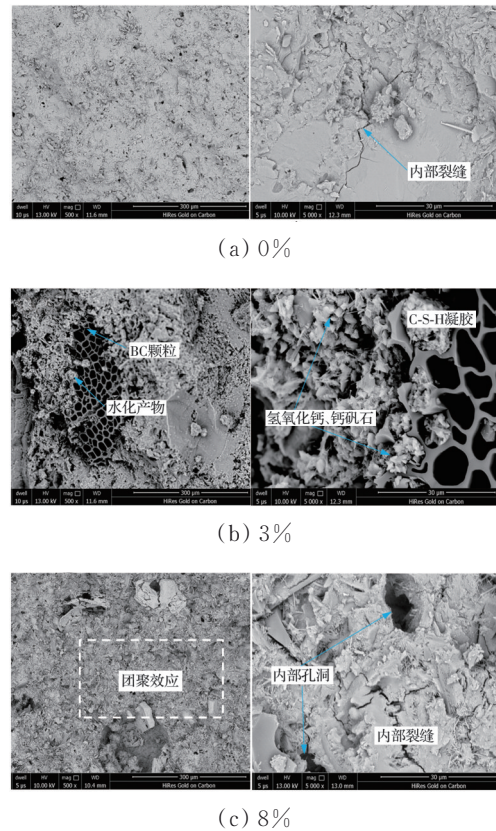


图 6 28 d WBC-PC 试件的 SEM 图

Fig. 6 SEM image of WBC-PC at 28 d

取代率可以使透水混凝土的导热系数从 1.62 W/(m·K) 降至 1.29 W/(m·K)。这可能是因为在水的情况下生物炭的团聚性使其在水泥基质中分散较差,热量传递被阻断并寻找新的通道^[35],导热系数的降低有助于延缓路面峰值温度的出现。

表 3 生物炭透水混凝土的热物性参数

Table 3 Thermophysical parameters of BC-pervious concrete

试件	反射率		发射率		导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	
	平均值	p-value	平均值	p-value	平均值	p-value
CK	0.21	0.051	0.91	0.009	1.62	0.016
RBC-PC	0.11	0.012	0.88	0.021	1.34	0.021
WBC-PC	0.13	0.023	0.90	0.012	1.29	0.034

注:以 α=0.05 为检验水准。

2.3 吸水性能

毛细吸水系数是表征多孔材料吸水能力的关键参数,根据标准 ASTM C1585—13^[29]可知,多孔材料 7 d 毛细吸水可分为 2 个阶段,前期 6 h 为第 1 吸水阶段,后期第 1 天至第 7 天为第 2 吸水阶段,通过回归拟合单位面积累计吸水量与时间开平方的

曲线斜率,得到相应的毛细吸水系数。表4对比了影响3种透水混凝土试件吸水性能的特征参数。单面浸泡试验结果表明,5%生物炭取代率的试件WBC-PC和RBC-PC的第1阶段吸水系数(A_{cap1})分别为 2.59×10^{-2} 、 $2.65 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{0.5}$,比试件CK大约提高了30%~35%。这是因为毛细吸水与透水混凝土的孔隙结构特征(开孔率、孔径和孔隙形状)有关。真空饱和试验结果表明,3种试件具有近似的开口孔隙率,故孔隙分布是造成吸水性差异的主要原因。相比普通透水混凝土,一方面,生物炭自身丰富的微孔结构提高了透水混凝土内部的毛细

能力;另一方面,得益于超细炭颗粒的物理填充效应,混凝土中部分大孔隙和过渡区界面微结构得到明显改善,使之成为更多连通开放的毛细孔,提高了透水混凝土内部的毛细吸水能力。由于后期多孔材料吸水趋于饱和,生物炭对透水混凝土第2阶段毛细吸水系数(A_{cap2})的影响相差不大。总体来说,由于生物炭丰富的孔隙特征和亲水特性,加入到透水混凝土后,可提高试件的储水性能,3种材料最终的总吸水量 W_{vap} 大小排序为CK<RBC-PC<WBC-PC。

表4 含生物炭的透水混凝土吸水性能比较

Table 4 Water absorption properties of BC-pervious concrete

试件	$A_{cap1}/(10^{-2} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-0.5})$		$A_{cap2}/(10^{-2} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-0.5})$		$W_{vap}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$		开孔率/%	
	平均值	p -value	平均值	p -value	平均值	p -value	平均值	p -value
CK	1.99	0.051	0.03	0.019	100.58	0.618	22.05	0.011
RBC-PC	2.59	0.012	0.06	0.023	113.42	0.121	20.98	0.021
WBC-PC	2.65	0.023	0.04	0.006	117.03	0.234	21.04	0.052

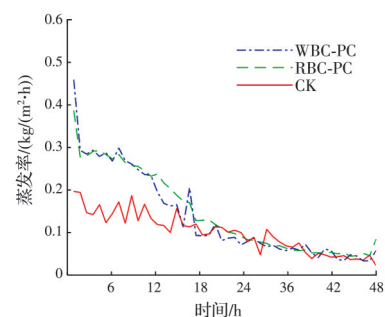
注:以 $\alpha=0.05$ 为检验水准。

2.4 蒸发降温性能

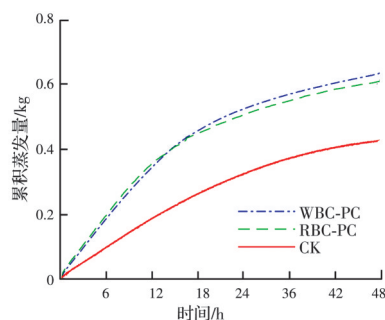
2.4.1 蒸发量 吸水饱和后透水材料的蒸发过程也分为两个阶段^[32]:第1阶段由周围环境中的蒸汽压差驱动,水分通过毛细管作用从饱和区迁移至蒸发表面;第2阶段主要发生在材料介质内部,随着表层自由水蒸发耗尽,深层孔隙的自由水开始蒸发,这个过程中内部的水汽先通过分子扩散的形式扩散到表面,最后蒸发到空气中。

图7为3种透水材料在风洞稳态条件下的逐时蒸发率和累积蒸发量。5%生物炭取代率试件RBC-PC和WBC-PC的最大初始蒸发率分别为0.46、0.39 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而试件CK的蒸发率仅为0.20 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。同时,试件WBC-PC和RBC-PC的第1阶段分别能持续15、13 h,而CK仅能持续2 h。在第2阶段,由于黏滞力和向下的重力作用,蒸发动力骤减,所有样品的蒸发速率均急剧下降,20 h后所有样品的蒸发速率均降至0.1 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 左右,此后蒸发速率趋于平稳(见图7(a))。生物炭可以提高透水混凝土第1阶段蒸发率并延长此阶段蒸发持续时间,这是因为生物炭透水混凝土的毛细吸水率和体积吸水率比普通透水混凝土更大(见表4)。毛细吸水率较大的材料能够在孔隙内部维持长距离的水力连续性,从而保证水分相对容易迁移至表面蒸发;饱和体积含水率大的材料则能保证更多的水分供应。生物炭透水混凝土第1阶段较高的蒸发率和更长的蒸发持续时间使其累积蒸发量显著增加,添

加5%生物炭的试件WBC-PC和RBC-PC累积蒸发量分别约为0.69、0.63 kg,比未添加生物炭的样品高40%~50%(见图7(b))。



(a) 逐时蒸发率



(b) 累积蒸发量

图7 3种样品的逐时蒸发率和累积蒸发量

Fig. 7 Hourly rate of evaporation and cumulative evaporation of the three samples

2.4.2 表面温度 在湿润状态下,透水材料可通过蒸发潜热有效地带走其表面吸收的热量,从而降低表面温度。在风洞 600 W/m^2 太阳辐射下,5%生物炭取代率的试件 WBC-PC 和 RBC-PC 早期温度上升速度比试件 CK 慢,二者最大温降分别为 6°C 、 3°C ,并分别可维持 18、14 h 的低温(见图 8)。结合图 7 可以认为,这是由于生物炭透水混凝土第 1 阶段蒸发速率较快,蒸发时间较长,导致更多热量被带走,从而显著提高了透水混凝土的蒸发冷却效果。

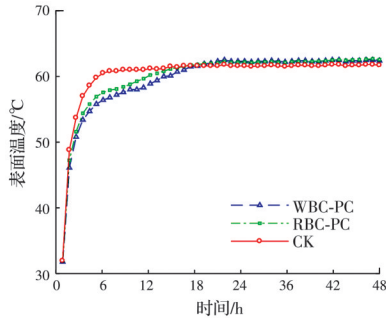
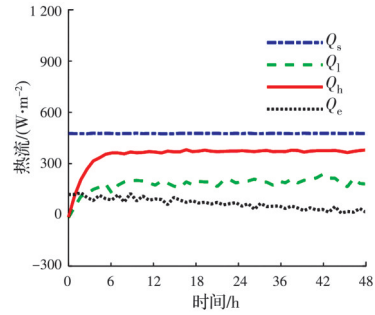


图 8 透水样品蒸发过程的表面温度变化

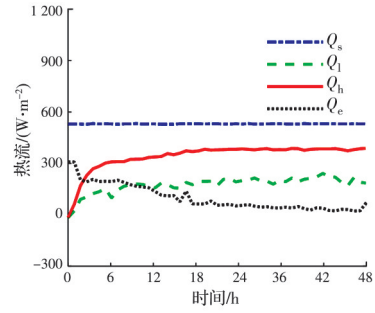
Fig. 8 Surface temperature change during evaporation of pervious samples

2.4.3 能量分项 透水路面主要通过长波辐射和对流换热形式与周围环境进行热量交换。炎热夏季,路面温度往往高于空气温度,而在人工淋水或自然降雨后,透水路面水分通过蒸发将一部分热量带走,即将显热热流转化为潜热热流,从而抑制了路面温度的上升。汪俊松^[36]系统地测量了在稳定的风洞环境中透水材料吸收的太阳短波辐射(q_s)、发射的长波辐射(q_l)、显热热流(q_h)和蒸发潜热(q_e)。据此计算出 3 种吸水饱和后的透水混凝土 48 h 蒸发过程中能量分布变化,如图 9 所示。

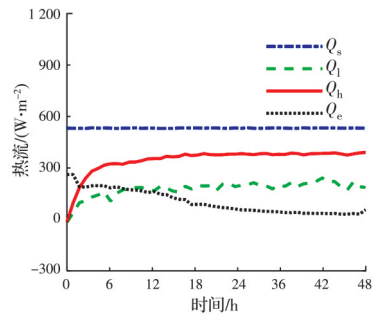
在蒸发过程中透水材料释放的蒸发潜热导致显热热流、长波辐射及表面温度不同程度降低。为了查明生物炭对透水混凝土各个能量分项的分配贡献权重,对每项热流密度进行积分,得出累积能量热流,如图 10 所示。在相同风洞环境下,3 种样品的累积长波辐射量 Q_l 和显热热流 Q_h 的差值很小。由于表面反射率较低,含有生物炭的透水混凝土比普通透水混凝土多吸收约 10% 的太阳辐射量 Q_s 。然而,在蒸发过程中,试件 WBC-PC、RBC-PC、CK 的蒸发潜热 Q_e 相对于自身吸收的净辐射比值分别约为 18.96%、18.45%、10.11%(见图 10),透水材料蒸发潜热的增加会导致显热热流和长波辐射量减小,从而能有效抑制热岛效应的形成。总的来说,含有生物炭的透水混凝土不仅吸收了更多的水分,还吸收了更多的太阳辐射。尽管如此,能量分项表明,增加的水分蒸发可以补偿生物炭引起的额外太阳辐射吸收量。



(a) CK



(b) WBC-PC



(c) RBC-PC

图 9 饱和透水混凝土表面能量变化

Fig. 9 Surface energy change of saturated pervious concrete

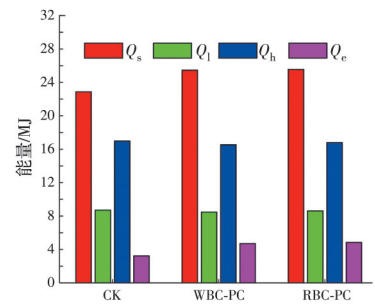


图 10 饱和透水混凝土 48 h 蒸发的表面能量分项

Fig. 10 Surface energy distribution of saturated pervious concrete in evaporation of 48 h

3 结论

1) 对于力学性能而言,建议生物炭取代水泥的质量不宜超过 5%。3% 生物炭取代率的透水混凝土抗压强度最大,相较控制组提高了 10%,1% 生物炭取代率则使透水混凝土的抗折强度最大化,提高

了约18%,而大于5%的生物炭取代率会使透水混凝土的抗压强度和抗折强度低于控制组。

2)生物炭可降低透水混凝土的反射率和导热系数,导热系数的降低有助于延缓路面峰值温度的出现。生物炭作为保水性填料,可以提高透水混凝土的吸水和储水能力。5%生物炭取代率的试件WBC-PC和RBC-PC第1阶段吸水速率分别为 2.65×10^{-2} 、 2.59×10^{-2} mm/s^{0.5},而试件CK仅为 1.99×10^{-2} mm/s^{0.5},总吸水量 W_{vap} 大小排序则为CK<RBC-PC<WBC-PC。在炎热的夏季,更大的储水量意味着可以有效延长蒸发降温时间。

3)生物炭可以有效增加透水混凝土的累积蒸发量,比普通混凝土提高约40%~50%。相比CK,5%生物炭取代率的试件WBC-PC和RBC-PC最大可分别降温6、3℃,并维持18、14 h的低温时间。能量分项结果表明:WBC-PC、RBC-PC、CK蒸发潜热占透水混凝土吸收净辐射的比值分别约为18.96%、18.45%、10.11%,透水材料蒸发潜热的增加会导致显热热流和长波辐射量的减小,有效抑制热岛效应的形成。

参考文献

- [1] ARNFIELD A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island [J]. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(1): 1-26.
- [2] AKBARI H, CARTALIS C, KOLOKOTSA D, et al. Local climate change and urban heat island mitigation techniques-the state of the art [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, 22(1): 1-16.
- [3] QIN Y H. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 445-459.
- [4] 王知乐. 基于红外辐射原理的降低热岛效应型沥青路面的工作机理分析[J]. *公路*, 2017, 62(9): 226-230.
WANG Z L. Analysis of working mechanism of asphalt pavement with heat island effect reduction based on infrared radiation principle [J]. *Highway*, 2017, 62(9): 226-230. (in Chinese)
- [5] SANTAMOURIS M, SYNNEFA A, KARLESSI T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(12): 3085-3102.
- [6] JIANG J, JIN Y, BAO T, et al. Sensible heat discharging from pavements with varying thermophysical properties [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 45: 431-438.
- [7] SANTAMOURIS M, GAITANI N, SPANOU A, et al. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas - Design realization and results of the flisvos project [J]. *Building and Environment*, 2012, 53: 128-136.
- [8] LI H, HARVEY J T, HOLLAND T J, et al. The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1): 015023.
- [9] ZHU X Y, YU Y, LI F. A review on thermoelectric energy harvesting from asphalt pavement: Configuration, performance and future [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 228: 116818.
- [10] 汪俊松, 张玉, 孟庆林, 等. 透水路面蒸发降温效应研究综述[J]. *建筑科学*, 2017, 33(4): 142-149.
WANG J S, ZHANG Y, MENG Q L, et al. Review on the evaporative cooling effect of permeable pavements [J]. *Building Science*, 2017, 33(4): 142-149. (in Chinese)
- [11] BAO T, LIU Z, ZHANG X G, et al. A drainable water-retaining paver block for runoff reduction and evaporation cooling [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 418-424.
- [12] QIN Y H, HE Y H, HILLER J E, et al. A new water-retaining paver block for reducing runoff and cooling pavement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 948-956.
- [13] YAMAGATA H, NASU M, YOSHIZAWA M, et al. Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57(5): 763-771.
- [14] 姜骞, 谢德擎. 纳米二氧化硅透水混凝土新拌流变及硬化性能[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(6): 866-871.
JIANG Q, XIE D Q. Rheological and hardened properties of nanosilica blended pervious concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(6): 866-871. (in Chinese)
- [15] OKADA K, MATSUI S, ISOBE T, et al. Water-retention properties of porous ceramics prepared from mixtures of allophane and vermiculite for materials to counteract heat island effects [J]. *Ceramics International*, 2008, 34(2): 345-350.
- [16] TAKAHASHI K, YABUTA K. Road temperature mitigation effect of "road cool", a water-retentive material using blast furnace slag [J]. *JFE Technical Report*, 2009, 13: 58-62.
- [17] 董博, 温小栋, 孟萍. 保水水泥混凝土路面材料组成设计及降温性能研究[J]. *公路工程*, 2018, 43(6): 68-72.

- DONG B, WEN X D, MENG P. Study on material composition design and cooling performance of water-retaining cement concrete pavement [J]. Highway Engineering, 2018, 43(6): 68-72. (in Chinese)
- [18] 徐芬莲, 赵晚群, 卢佳林, 等. 不同增稠材料对C20卵石型透水混凝土性能的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(Sup2): 311-314.
- XU F L, ZHAO W Q, LU J L, et al. Effect of different thickening materials on the properties of C20 artificial pebble pervious concrete [J]. Materials Review, 2013, 27(Sup2): 311-314. (in Chinese)
- [19] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- ZHANG W M. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [20] 李金文, 顾凯, 唐朝生, 等. 生物炭对土体物理化学性质影响的研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(1): 192-206.
- LI J W, GU K, TANG C S, et al. Advances in effects of biochar on physical and chemical properties of soils [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(1): 192-206. (in Chinese)
- [21] GUPTA S, KUA H W, TAN CYNTHIA S Y. Use of biochar-coated polypropylene fibers for carbon sequestration and physical improvement of mortar [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 83: 171-187.
- [22] TAN K, QIN Y, DU T, et al. Biochar from waste biomass as hygroscopic filler for pervious concrete to improve evaporative cooling performance [J]. Construction and Building Materials, 2021, 287: 123078.
- [23] AKHTAR A, SARMAH A K. Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 408-416.
- [24] SPOKAS K A. Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios [J]. Carbon Management, 2010, 1(2): 289-303.
- [25] 透水水泥混凝土路面技术规程: CJJ/T 135—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Technical specification for pervious cement concrete pavement: CJJ/T 135—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [26] Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer: ASTM C1549-09 [S]. ASTM International, 2009.
- [27] Thermal insulation; determination of steady-state thermal resistance and related properties-guarded hot plate apparatus: ISO 8302(1991) [S]. ISO, 1991.
- [28] Standard test method for moisture retention curves of porous building materials using pressure plates: ASTM C1699-09 [S]. ASTM International, 2009.
- [29] Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes: ASTM C1585-13 [S]. ASTM International, 2013.
- [30] ZHANG Y, ZHANG L, PAN Z H, et al. Hydrological properties and solar evaporative cooling performance of porous clay tiles [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 9-17.
- [31] 张磊, 冯燕珊, 孟庆林, 等. 建筑多孔饰面砖蒸发降温的风洞实验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(9): 113-119.
- ZHANG L, FENG Y S, MENG Q L, et al. Experimental research on the evaporation cooling of porous decorative tile based on wind tunnel [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(9): 113-119. (in Chinese)
- [32] WANG J S, MENG Q L, ZHANG L, et al. Impacts of the water absorption capability on the evaporative cooling effect of pervious paving materials [J]. Building and Environment, 2019, 151: 187-197.
- [33] KHUSHNOOD R A, AHMAD S, RESTUCCIA L, et al. Carbonized nano/microparticles for enhanced mechanical properties and electromagnetic interference shielding of cementitious materials [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2016, 10(2): 209-213.
- [34] GUPTA S, KUA H W, PANG S D. Biochar-mortar composite: Manufacturing, evaluation of physical properties and economic viability [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 874-889.
- [35] CUTHBERTSON D, BERARDI U, BRIENS C, et al. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties [J]. Biomass and Bioenergy, 2019, 120: 77-83.
- [36] 汪俊松. 湿热地区透水铺装蒸发降温特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- WANG J S. Study on evaporative cooling characteristics of pervious pavements in hot and humid areas [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)