

秸秆保温砖建筑物的全生命周期能耗特性分析

吴雨青,李金缘,刘予涵,刘怡彤,谢韬晋,黄金活,李昕宇,陈玮玮

(南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 秸秆焚烧所释放的污染物已成为我国大气污染的主要来源之一,若将秸秆制成保温型建筑材料,不仅可以减少环境污染,还可有效地降低建筑能耗. 制作了系列新型秸秆再生保温砖,采用全生命周期模型综合考虑建筑施工、运行及拆除阶段能耗,并应用傅里叶定律对南京某宾馆采用不同墙体的建筑耗能特性进行分析. 结果表明,秸秆含量的增加能显著改善秸秆砖的热工性能,但会导致其力学性能变差. 含量为 4% 的样砖兼具良好的热工和力学性能,采用该秸秆含量保温砖替代常用的粘土红砖和混凝土砖,在全生命周期内可分别节约 21.8% 和 68.2% 的电能消耗,节能效果显著,具有很强的应用前景.

[关键词] 秸秆砖,建筑节能,全生命周期,能耗分析

[中图分类号] TU55+1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2021)01-0072-06

Analysis of Energy Consumption Characteristics of Straw Insulation Brick Buildings in the Full Life Cycle

Wu Yuqing, Li Jinyuan, Liu Yuhang, Liu Yitong, Xie Taojin, Huang Jinhua, Li Xinyu, Chen Weiwei

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The pollutants released by straw burning have become one of the main sources of air pollution in China. When the straw is made into thermal insulation building materials, it can not only reduce the environmental pollution caused by its incineration, but also effectively reduce the building energy consumption. Therefore, a series of new straw recycled insulation bricks are made in this paper. The energy consumption in the construction, operation and demolition stages are comprehensively considered by using the full life cycle model, and the energy consumption characteristics of a hotel in Nanjing with different walls are analyzed by employing the Fourier's Law. It is found that the increase of straw content can significantly improve the thermal properties of straw bricks, but that it will lead to the deterioration of their mechanical properties. The sample brick with a content of 4% has the best thermal and mechanical properties. When the bricks with the straw quality content of 4% are used to replace the commonly used clay red bricks and concrete bricks, 21.8% and 68.2% power consumption can be saved in the whole life cycle respectively, which suggests a remarkable energy-saving effect and a strong application prospect.

Key words: straw brick, building energy saving, full life cycle, energy consumption analysis

我国农作物秸秆产量丰富,年产量约 6.5 亿 t^[1]. 在农村,秸秆主要用作家畜的饲料和家庭烹饪的燃料^[2],开发利用率较低. 大量未被利用的秸秆在田间焚烧而造成资源浪费^[3],且焚烧释放的气态污染物(如 CO、SO₂、NO_x 等)和颗粒物已成为我国大气污染的主要来源之一^[4],对于区域空气质量、大气能见度、人类的健康和气候改变都会产生影响^[5]. 秸秆材料的保温隔热性能优良,导热系数低于大多数常见墙体材料^[6]. 另外世界建筑能耗正逐年攀高,联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 的研究表明,在工业化国家,建筑能耗占到社会总能耗的 40%,并产生 36% 的 CO₂ 和其他相关气体^[7]. 因此,以新型农作物秸秆再生保温砖作为建材可有效降低农作物秸秆焚烧造成的环境污染和资源消耗,同时也可降低建筑能源消耗^[8]. 本文从建筑的全生命周期出发,考虑建筑各阶段的能耗,计算采用不同秸秆砖的建筑全生命周期能耗,对不同秸秆质量含量的样砖的能耗特性进行分析.

收稿日期:2020-04-27.

通讯作者:陈玮玮,博士,研究方向:建筑节能与墙体保温. E-mail:chenweiwei@njnu.edu.cn

1 秸秆砖的参数

本文以符合《GB/T 8239-2014 普通混凝土小型砌块》中制作标准的硅酸盐水泥(代号及强度等级为P·I 42.5R)、黄沙(细度模数为1.6~3.7)、经0.4%的NaOH溶液处理后的水稻碎秸秆为原料,按照标准砖尺寸(240 mm×115 mm×53 mm)以及现有研究推荐的秸秆配比方案^[9-12],试制了秸秆质量含量分别为1%、2%、3%、4%、5%的样砖.5种秸秆砖的原料及其配比如表1所示,通过实验测得秸秆砖的热物性参数和力学性能参数分别如表2和表3所示.

表1 秸秆砖的原料及配比

Table 1 Raw material and its proportion of straw bricks

质量比/%	水泥/g	黄沙/g	水/g	秸秆/g
1.0	1 400	1 710	400	32.0
2.0	1 400	1 710	480	62.2
3.0	1 400	1 710	540	93.3
4.0	1 400	1 710	590	124.4
5.0	1 400	1 710	670	155.5

表2 秸秆砖的热物性参数测量值

Table 2 Measurements of thermophysical parameters of straw bricks

参数	测量值				
秸秆含量/%	1	2	3	4	5
密度/(kg·m ⁻³)	2 055	1 986	1 879	1 709	1 577
导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	1.125	1.075	0.844	0.593	0.457
比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	1 035.4	1 172.2	1 240.6	1 290.4	1 326.4
导温系数/(10 ⁻⁷ m ² ·s ⁻¹)	5.29	4.62	3.62	2.69	2.18

表3 秸秆含量与抗压强度关系

Table 3 Relation between straw content and compressive strength

参数	测量值				
秸秆质量含量/%	1	2	3	4	5
最大压力/(10 ⁵ N)	2.072	1.832	1.919	1.849	1.713
抗压强度/MPa	19.87	18.56	17.52	16.57	15.87

由表2可知,秸秆质量含量为1%~5%的实心秸秆砖的导热系数均低于常用混凝土实心砖(其导热系数一般为1.51 W·(m·K)⁻¹)^[3],具有良好的保温性能.根据《GB 50574-2010 墙体材料应用统一技术规范》,表3中秸秆砖抗压强度均符合国标承重墙MU15($f \geq 15.0$ MPa)的要求,可作为建筑承重墙材料.

2 建筑全生命周期模型的理论基础

建筑能耗评价方法一般分为两类^[13].一类是动态逐时模拟法,这类方法需要考虑各种影响因素,可操作性不强;另一类是简易计算方法,该方法一般不必考虑围护结构的蓄热影响.常见的软件有:DOE-2 模拟计算软件、DeST 模拟计算软件、EHTV 法等,这些方法对建筑能耗的评价都只针对建筑运行阶段.全生命周期模型也属于简易计算方法,不同的是,该方法综合评估了建筑建成前的大量技术性能投入、建筑运行阶段能耗、建筑拆除带来的环境影响等各类因素,具有更高的参考价值.因此本文采用全生命周期模型进行建筑能耗评估.

建筑全生命周期包括规划设计、建筑施工、运营使用和拆除废弃4个阶段^[14],建筑全生命周期总能耗为这4个阶段的结果相加,故全生命周期能耗计算公式如下:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4. \quad (1)$$

式中, E 为全生命周期内总的能源消耗,J; E_1 为规划设计阶段的能源消耗,J; E_2 为施工阶段的能源消耗,J; E_3 为运营阶段的能源消耗,J; E_4 为拆除及废旧建材处理阶段的能源消耗,J.

2.1 规划设计阶段能源消耗

建筑规划设计阶段的能源消耗是指建筑从规划建造开始到设计图纸的完成过程中的能耗,这一阶段的能耗主要来源是建筑内部空调、供暖、热水、照明设备以及其他辅助设备工作产生的能源消耗.规划设

计阶段能源消耗计算公式为

$$E_1 = \sum_{i=1}^{n_i} Q_i. \quad (2)$$

式中, Q_i 为规划设计阶段第 i 种能源使用量, $J; i$ 为能源种类; n_i 为能源种类的总数目. 相对于整个建筑全生命周期而言, 该阶段的能源消耗只占非常小的一部分, 故不同围护结构在这一阶段所产生的能源消耗可忽略不计.

2.2 建筑施工阶段能源消耗

建筑施工阶段的能源消耗是指各类施工工艺的器械运行的能源消耗和现场工作人员办公设备能源消耗. 施工阶段能源消耗模型为

$$E_2 = \sum_{j=1}^{n_j} q_{ej} \times P_{ej} + \sum_{k=1}^{n_k} Q_{ek}. \quad (3)$$

式中, q_{ej} 为第 j 种施工工艺单位台班器械设备的能源消耗, $J; P_{ej}$ 为第 j 种施工工艺的工程量(机械台班数); j 为施工工艺种类; n_j 为施工工艺种类的总数目; Q_{ek} 为能源使用量, $J; k$ 为能源种类; n_k 为能源种类的总数目. 不同墙砖围护结构的施工阶段能源消耗近似相等.

2.3 运营使用阶段能源消耗

采用秸秆砖的建筑在使用过程中的能耗归属于建筑运营阶段能耗^[15], 也是本文关注的焦点. 由于该阶段其他设备的能源消耗相差不大, 为方便对比, 运营使用阶段能源消耗主要考虑由于墙体材料的不同而带来的能源消耗的差异. 建筑运营阶段墙体能源消耗模型为

$$E_3 = Q_{i1} \times n + Q_e. \quad (4)$$

式中, Q_{i1} 为墙体的年耗能量, $J; Q_e$ 为其他设备的能耗, $J; i$ 为墙体材料种类; n 为建筑的使用年限.

2.4 建筑拆除及废旧建材处理阶段能源消耗

建筑拆除及废旧建材处理阶段的能源消耗是指建筑拆除阶段不同施工工艺产生的能源消耗和废旧建材运输过程中的能源消耗. 此阶段能源消耗模型为

$$E_4 = \sum_{i=1}^n Q_{Di} + \sum_{i=1}^n Q_{Si}. \quad (5)$$

式中, Q_{Di} 、 Q_{Si} 分别为第 i 种废旧建材拆除阶段和运输阶段产生的能源消耗, $J; i$ 为废旧建材种类; n 为废旧建材种类的总数目. 对于同一栋建筑, 其拆除流程是相同的, 故可近似认为采用不同墙体建材的围护结构在该阶段的能源消耗是相等的.

3 秸秆砖全生命周期内能耗特性分析

3.1 计算参数

以南京地区某宾馆为例, 建筑占地面积约为 2 000 m², 地上 6 层, 总建筑高度约为 17 m, 净层高 2.7 m, 其相关结构尺寸如图 1 所示. 外墙由三层材料组成, 从外至内分别为: 外层水泥砂浆、实心砖层、内层水泥

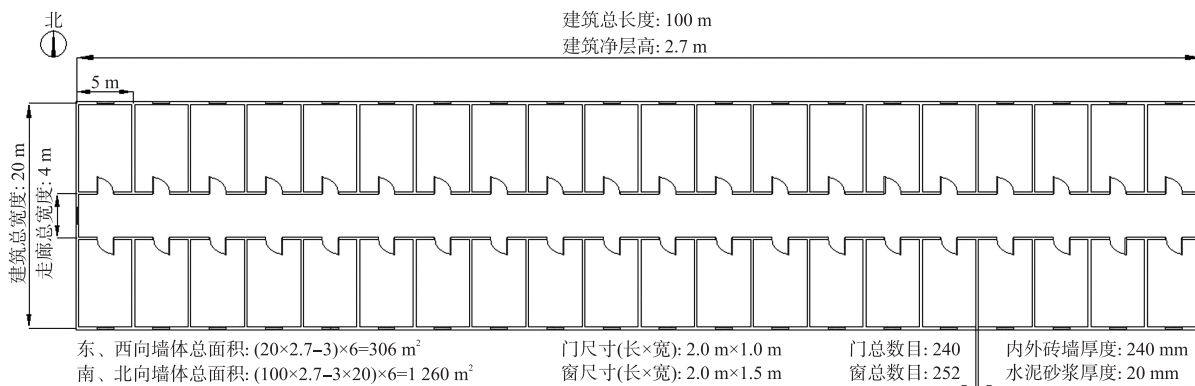


图 1 建筑相关结构尺寸

Fig. 1 Relevant structural dimensions of the construction

砂浆. 墙体的总传热系数为

$$K = \left(\frac{1}{h_{in}} + \frac{\delta_0}{\lambda_0} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_0}{\lambda_0} + \frac{1}{h_{out}} \right)^{-1}. \quad (6)$$

式中, K 为平均传热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; h_{in} 、 h_{out} 分别为外墙内、外表面对流换热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; δ_0 、 δ_s 分别为水泥砂浆和实心砖墙的厚度, m ; λ_0 、 λ_s 分别为水泥砂浆和实心砖墙的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$. 根据《GB 50176—2016 民用建筑热工设计规范》, 计算时可取: $h_{in} = 8.7 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, $h_{out} = 23.0 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, $\delta_s = 0.24 \text{ m}$, $\delta_0 = 0.02 \text{ m}$, $\lambda_0 = 0.93 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$. 秸秆砖的导热系数 λ_s 则根据秸秆含量不同, 按表 2 取值. 由以上规范还可查得实心粘土红砖和混凝土砖的导热系数分别为 $0.81 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 和 $1.51 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$.

由图 2(a) 可知, 随着秸秆质量含量的增加, 墙体总的传热系数逐渐减小. 由图 2(b) 可知, 秸秆质量含量的增加, 使得秸秆砖的导热系数下降, 即室外温度波的变化对室内温度的影响变小, 秸秆砖的热工性能得到显著改善. 然而, 秸秆质量含量的增加使得材料的力学性能变差, 抗压强度下降明显.

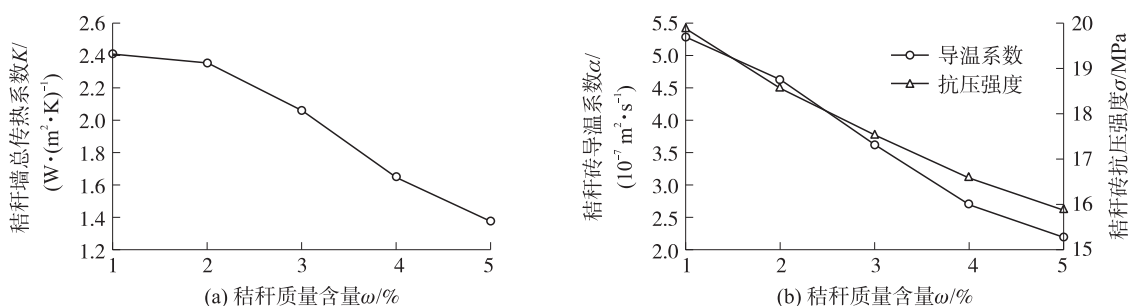


图 2 不同秸秆质量含量样砖(砖墙)的性能参数

Fig. 2 Performance parameters of bricks (wall) with different straw quality content

从材料热工性能出发, 秸秆质量含量越高, 秸秆砖墙总传热系数越小, 建筑物越保温, 全生命周期内能耗越小. 然而, 在制作样砖过程中发现, 当秸秆质量含量达到 5% 时, 虽然秸秆砖成型尚佳, 但搬运过程中容易出现破边、碎角的情况, 力学性能变差. 因此, 为了兼顾秸秆砖的热工与力学性能, 本文从制作的 5 种秸秆质量含量中, 选取 4% 的秸秆砖进行后续全生命周期能耗特性的分析计算.

3.2 计算方法

由建筑全生命周期模型的理论基础可知, E_1 可忽略不计, E_2 、 E_3 中的 Q_e 和 E_4 对于不同墙砖组成的墙体近似相等. 因此以下关于不同墙砖组成的墙体在全生命周期内 (30 年) 的能耗特性分析只考虑因墙砖材料的不同而带来的能耗差异. 为方便分析讨论, 将秸秆砖墙体分别与常见的粘土红砖和混凝土砖墙体进行对比, 引入月平均负荷指标 C_1 、月累计耗电量 C_2 、年耗电量指标 C_3 与全生命周期总耗电量 C_4 共 4 个评价指标来进行能耗特性分析.

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{A_0} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(i), \\ C_2 = \frac{1 \times 10^{-6}}{\text{COP}} \sum_{i=1}^n |L(i)|, \\ C_3 = \frac{1}{A_0} \frac{1 \times 10^{-3}}{\text{COP}} \sum_{i=1}^N |L(i)|, \\ C_4 = \frac{3 \times 10^{-5}}{\text{COP}} \sum_{i=1}^N |L(i)|. \end{cases} \quad (7)$$

$$L(i) = K \sum_{j=1}^4 A_j [t_{z,j}(i) - t_{in}], \quad t_z = t_{out} + \frac{\alpha I}{h_{out}}. \quad (8)$$

式中, $L(i)$ 为第 i 小时建筑总的冷/热负荷, W , $L(i) > 0$ 时为冷负荷, $L(i) < 0$ 时为热负荷, 且当室外温度满足 $15^\circ\text{C} < t_{out} < 30^\circ\text{C}$ 时, $L(i) = 0$; t_{in} 为室内温度, $^\circ\text{C}$, 制冷时 $t_{in} = 26^\circ\text{C}$, 采暖时 $t_{in} = 20^\circ\text{C}$; $t_{z,j}$ 为室外综合温度, $^\circ\text{C}$; α 为外墙面对太阳辐射热的吸收系数; I 为外墙面太阳辐射照度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; A_j 、 A_0 分别为墙体的传热

面积和建筑的占地面积, m^2 ; j 取 1, 2, 3, 4 时分别代表东、南、西、北四个方向; COP 为性能系数 (Coefficient of Performance, COP). 制冷时 COP 为 4.5, 采暖时 COP 为 3.5; n 、 N 分别为目标月份、目标年份的总小时数.

3.3 结果分析

图 3 为 4% 的秸秆砖、粘土红砖与混凝土砖在不同月份的月平均负荷指标 C_1 、月累计耗电量 C_2 的对比图. 由图 3 可知, 对于不同材料的砖墙, 在只考虑非透明墙体传热导致的冷/热负荷条件下, 冬季的热负荷在数值上要大于夏季的冷负荷, 而春、秋季负荷较小, 这是由于不同季节室内外温差不一致所导致的. 另外, 无论是月负荷指标还是月累计耗电量, 混凝土砖最大, 粘土红砖次之, 秸秆砖最小, 这意味着秸秆砖具有比混凝土砖和粘土红砖更好的保温节能性能.

图 4 为 4% 的秸秆砖、粘土红砖与混凝土砖在典型气候年的年耗电量指标 C_3 与全生命周期耗电量 C_4 的对比图. 由图可知, 混凝土砖的年耗电量指标最大, 粘土红砖次之, 秸秆砖最小. 在全生命周期内 (30 年), 通过秸秆砖墙的冷/热负荷所导致的总耗电量为 $2.392 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 而粘土红砖与混凝土砖墙的总耗电量比秸秆砖墙分别多出 21.8% 和 68.2%, 即秸秆砖相较于粘土红砖和混凝土砖的节能量折算成标准煤分别为 64.1 吨和 200.5 吨, 节能效果显著.

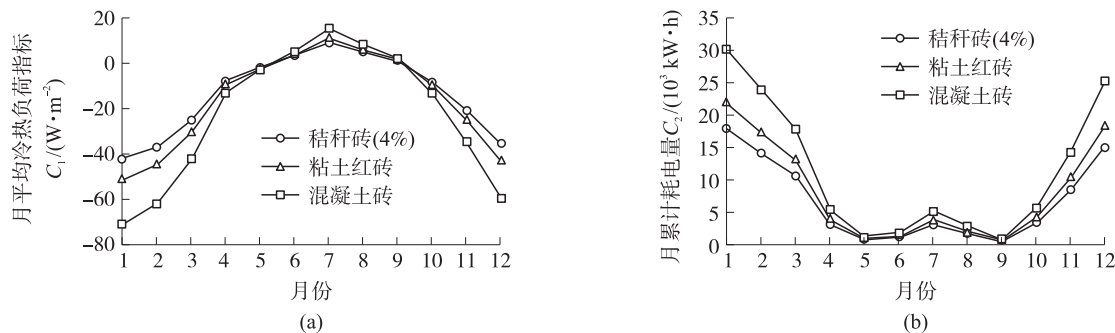


图 3 不同墙砖材料组成的墙体的月评价指标

Fig. 3 The monthly evaluation index of wall made up of different wall brick materials

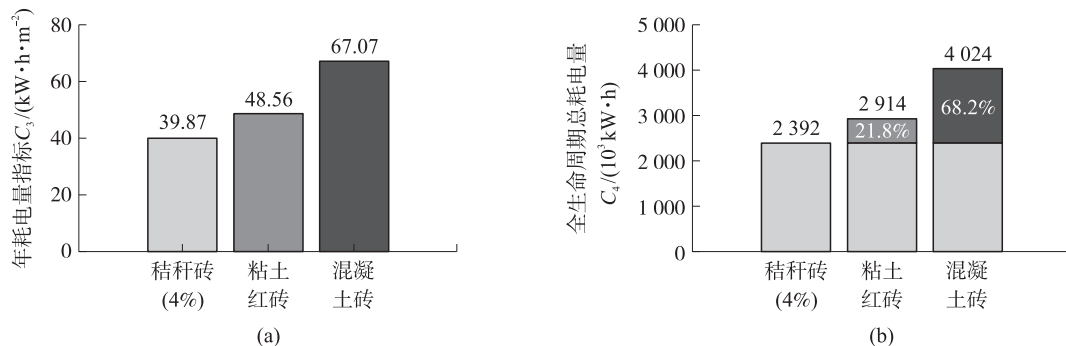


图 4 不同墙砖材料组成的墙体的年评价指标

Fig. 4 The annual evaluation index of the wall made up of different wall brick materials

4 结论

本文通过实验试制了 5 种秸秆质量含量的秸秆保温砖, 基于全生命周期理论对秸秆砖的能耗特性进行分析, 并与常用的粘土红砖与混凝土砖进行对比, 得出以下结论:

(1) 秸秆质量含量的增加, 使得秸秆砖的导热系数下降, 秸秆砖的热工性能得到显著改善. 然而, 秸秆质量含量的增加使得材料的力学性能变差, 抗压强度下降明显.

(2) 质量含量为 4% 的秸秆砖的月负荷指标和月累计耗电量均小于常用的粘土红砖与混凝土砖, 这表明秸秆砖具有比混凝土砖和粘土红砖更好的保温节能性能.

(3) 在全生命周期内 (30 年), 通过秸秆砖墙的冷/热负荷所导致的总耗电量为 $2.392 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 比粘土红砖和混凝土砖分别节能 21.8% 和 68.2%, 节能量折算成标准煤分别为 64.1 t 和 200.5 t, 节能效果显著.

[参考文献] (References)

- [1] 毕于运,王亚静,高春雨. 中国主要秸秆资源数量及其区域分布[J]. 农机化研究,2010,3(3):1-7.
- [2] DOMÍNGUEZ E L, PORCAR M. Rice straw management: the big waste [J]. Biofuels Bioproducts and Biorefining, 2010, 4(2):154-159.
- [3] 黎桢君,鲍安红,饶凯,等. 自保温混凝土-秸秆复合砌块热工性能研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2018, 43(12):85-90.
- [4] YANG S, HE H, LU S, et al. Quantification of crop residue burning in the field and its influence on ambient air quality in Suqian, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(9):1961-1969.
- [5] 杨蔓,李闯,陈广大. 农作物秸秆焚烧污染与防治[J]. 黑龙江环境通报,2018,42(2):79-81.
- [6] 马捷,王垚,金涌. 秸秆基建筑保温材料的节能减排分析[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(5):430-435.
- [7] CHEN G Q, CHEN H, CHEN Z M, et al. Low-carbon building assessment and multi-scale input-output analysis [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16(1):583-595.
- [8] ROH S, TAE S, SUK S J, et al. Development of a building life cycle carbon emissions assessment program (BEGAS 2.0) for Korea's green building index certification system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53:954-965.
- [9] 姚久星,周宝木,王付根,等. 秸秆混凝土保温性能试验研究[J]. 新型建筑材料,2017,44(3):86-89.
- [10] 刘伟,余征威. 秸秆混凝土的性能研究[J]. 吉林建筑大学学报,2016,33(1):1-4.
- [11] 程岚. 双掺秸秆灰钢渣绿色混凝土配合比设计及性能研究[D]. 张家口:河北建筑工程学院,2019.
- [12] 王晓峰,曹宝珠. 秸秆草砖保温性能研究[J]. 吉林建筑工程学院学报,2013,30(2):9-11.
- [13] 张玮. 建筑能耗计算与评价方法分析[J]. 山西建筑,2010,36(18):232-233.
- [14] 赵秀秀. 绿色建筑全生命周期碳排放计算与减碳效益评价[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [15] 刘萍,王浩. 基于 BECS 的新型围护结构应用方案全生命周期经济分析[J]. 施工技术,2018,47(增刊1):1551-1555.

[责任编辑:陈 庆]