

# 自保温混凝土-秸秆复合砌块热工性能研究<sup>①</sup>

黎桢君, 鲍安红, 饶凯, 罗秋

西南大学 工程技术学院, 重庆 400716

**摘要:** 稻草秸秆作为一种新兴的绿色可再生建筑材料, 在农村建筑节能开发中具有广阔的应用前景. 设计了一种自保温混凝土-秸秆复合砌块, 组成方式为在混凝土小型空心砌块孔洞中填充秸秆芯材. 根据传热学基本理论对秸秆填充率分别为 30%, 35%, 40%, 45%, 50% 且长宽比不同的 15 组混凝土-秸秆复合砌块模型进行热工性能理论计算与模拟. 研究表明: 新型复合砌块的热工性能随着秸秆填充率的增大而加强; 秸秆芯材横截面长宽比对复合砌块的传热系数影响很大, 长宽比越大, 传热系数越小, 热工性能越好; 当秸秆填充率为 50%, 且秸秆芯材横截面长宽比在规定范围内最大时, 复合砌块热工性能较好, 传热系数为  $0.851 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 保温性能远远好于相同尺寸下未填充秸秆芯材的混凝土小型空心砌块, 建筑节能率达到 56.2%, 充分体现出该新型复合砌块的优越性.

**关键词:** 混凝土-秸秆复合砌块; 秸秆填充率; 传热系数; 保温性能

**中图分类号:** TU502+.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5471(2018)12-0085-06

近年来, 随着环境污染的日益严重与全球气候变暖的趋势不断加快, 节能减排成为了人类共同的责任. 在我国, 城市建设不断推进, 建筑能耗逐年增加, 占到国民经济总能耗的 27.8%<sup>[1]</sup>, 在同环境下已经达到国外能耗指标的 2~3 倍, 其增长速度远远超过了我国能源生产的速度, 给环境与资源带来了巨大的挑战, 所以建筑节能是一项极其重要的可持续发展战略, 是建筑业发展过程中需迫切解决的问题<sup>[2-3]</sup>. 据统计, 在建筑总耗热量中, 围护结构的传热耗热量占到 73%~77%, 而墙体占到围护结构耗热的 70%<sup>[4]</sup>, 因此提高建筑墙体的保温性能是实现建筑节能的关键举措. 在建筑墙体保温节能技术中, 自保温墙体因其耐久性好、施工方便、建筑成本低、与建筑物同寿命等优势而被广泛用于实际工程中.

秸秆作为我国农村最常见的“农业废弃物”, 其年产量约为 6.5 亿吨, 位于世界第一, 是一种重要的生物资源, 但目前开发利用率低, 大量秸秆在田间焚烧, 不仅造成了大气污染, 并且极大地浪费了这种可再生资源. 通过科学技术将秸秆转化为生态环保的建筑材料, 可促进秸秆的资源化利用, 具有极大的社会效益和现实意义<sup>[5]</sup>. 本文结合农村地区的施工工艺和建造要求, 将秸秆软化压缩成型<sup>[6]</sup>后填充至混凝土小型空心砌块孔洞内, 形成一种成本低廉、便于施工、保温优良、绿色环保的新型自保温复合砌块, 将混凝土与秸秆两种材料的优点相结合并且发挥到最大, 使这种复合砌块砌筑形成的墙体兼有保温和承重功能, 以此来适应我国新农村建设.

① 收稿日期: 2018-04-18

基金项目: 重庆市应用技术项目(cstc2014yykfA50001).

作者简介: 黎桢君(1992-), 男, 实验师, 硕士, 主要从事绿色建筑材料的研发.

# 1 复合砌块设计

## 1.1 块型设计

本文设计的自保温混凝土-秸秆复合砌块由两部分组成：其中一部分为尺寸 390 mm×190 mm×190 mm (长×宽×高)的单排双方孔混凝土小型空心砌块，主要承担承重作用；另一部分为与混凝土小型空心砌块孔洞尺寸相同的秸秆芯材，承担保温隔热作用。将通过软化压缩成型之后的秸秆芯材填充进混凝土砌块的孔洞中形成复合砌块，其模型效果图如图 1。

由于自保温混凝土-秸秆复合砌块中秸秆芯材的尺寸与形状直接影响了砌块整体的受力性能、保温隔热性能、生产及施工过程，所以进行模型设计时，必须考虑填充秸秆芯材块型的问题，即秸秆填充率、秸秆块形状、秸秆块排数、秸秆块尺寸等。本文在已确定秸秆块形状、排

数的前提下，重点研究秸秆填充率、秸秆块尺寸对复合砌块热工性能的影响。因此，建立秸秆填充率分别为 30%，35%，40%，45%，50%的 5 种砌块，根据国标《普通混凝土小型空心砌块》<sup>[7]</sup>对砌块各部位尺寸要求，在同一填充率下再建立 3 组秸秆块尺寸不同的砌块，即截面面积相同、长宽比不同。总共 15 组自保温混凝土-秸秆复合砌块的编号及尺寸见表 1。

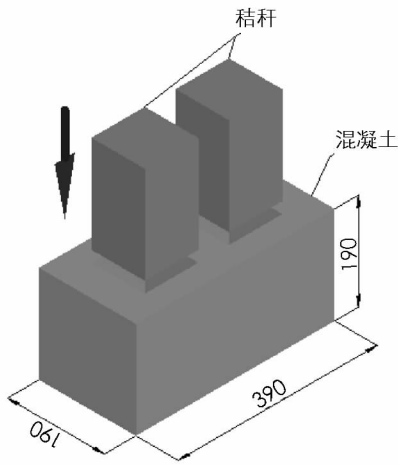


图 1 复合砌块模型效果图

表 1 自保温混凝土-秸秆复合砌块编号及尺寸

| 砌块编号   | 秸秆填充率/% | 秸秆块垂直热流    | 秸秆块平行热流    | 秸秆块长宽比 |
|--------|---------|------------|------------|--------|
|        |         | 方向尺寸(长)/mm | 方向尺寸(宽)/mm |        |
| CSB1-1 | 30      | 152.5      | 73         | 2.1    |
| CSB1-2 | 30      | 105        | 105        | 1.0    |
| CSB1-3 | 30      | 85.5       | 130        | 0.7    |
| CSB2-1 | 35      | 152.5      | 85         | 1.8    |
| CSB2-2 | 35      | 114        | 114        | 1.0    |
| CSB2-3 | 35      | 100        | 130        | 0.8    |
| CSB3-1 | 40      | 152.5      | 97         | 1.6    |
| CSB3-2 | 40      | 122        | 122        | 1.0    |
| CSB3-3 | 40      | 114        | 130        | 0.9    |
| CSB4-1 | 45      | 152.5      | 109.4      | 1.4    |
| CSB4-2 | 45      | 129        | 129        | 1.0    |
| CSB4-3 | 45      | 128        | 130        | 1.0    |
| CSB5-1 | 50      | 152.5      | 121.6      | 1.3    |
| CSB5-2 | 50      | 136        | 136        | 1.0    |
| CSB5-3 | 50      | 142.5      | 130        | 1.1    |

## 1.2 材料性能参数

根据 GB T10295-2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定热流计法》中规定的方法，采用 DRCD-3030 型智能化导热系数测定仪对混凝土小型空心砌块与秸秆芯材分别进行导热系数测定，测试过程中设定测定仪主板温度 35℃，冷板温度 15℃。试验测得混凝土部分导热系数为 1.51 W/(m·K)，蓄热系数为 15.36 W/(m<sup>2</sup>·K)；秸秆芯材导热系数为 0.03 W/(m·K)，蓄热系数为 2.6 W/(m<sup>2</sup>·K)，试验装置及秸秆试件见图 2。

## 2 复合砌块热工参数计算及分析

### 2.1 热工参数计算原理

热传导、热对流、热辐射是热量传递的 3 种基本方式<sup>[8]</sup>, 都存在于建筑墙体热转移的过程中, 建筑墙体时刻受到室内外的热作用, 热量总是不间断的通过墙体传进传出, 在这整个过程中, 墙体材料的热工性能直接影响了墙体内部热传导的过程. 根据 GB50176—2016《民用建筑热工设计规范》<sup>[9]</sup>对 15 组自保温混凝土-秸秆复合砌块的平均热阻、平均导热系数、传热系数等热工参数进行理论计算, 计算公式如下:

复合砌块的平均热阻  $\bar{R}$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]:

$$\bar{R} = \left[ \frac{F_0}{\frac{F_1}{R_{0.1}} + \frac{F_2}{R_{0.2}} + \dots + \frac{F_n}{R_{0.n}}} - (R_i + R_e) \right] \varphi$$

式中:  $F_0$  为与热流方向垂直的总传热面积( $\text{m}^2$ );  $F_1, F_2 \dots F_n$  为按平行于热流方向划分的各个传热面积( $\text{m}^2$ );  $R_{0.1}, R_{0.2} \dots R_{0.n}$  为各个传热部分的总传热阻( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );  $R_i$  为内表面换热阻, 取  $0.11(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$ ;  $R_e$  为外表面换热阻, 取  $0.44(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$ ;  $\varphi$  为修正系数.

复合砌块的导热系数  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]:

$$\lambda = \frac{q}{-\text{grad}t}$$

复合砌块的传热系数  $K$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]:

$$K = \frac{1}{R_0} = \left[ \frac{1}{R_i + \sum R + R_e} \right]$$

### 2.2 热工参数计算结果与分析

15 组自保温混凝土-秸秆复合砌块热工参数的计算结果如表 2 所示, 秸秆填充率对复合砌块热工系数的影响曲线如图 3 所示. 由图表可见, 复合砌块的保温性能随着秸秆填充率的增大而提高; 同一秸秆填充率下, 秸秆块长宽比越大, 复合砌块的平均热阻  $\bar{R}$  越大, 平均导热系数  $\bar{\lambda}$  越小, 传热系数  $K$  越小, 保温性能越好; 当秸秆填充率为 50% 且秸秆块长宽比最大时, 复合砌块的平均热阻  $\bar{R}$  最大, 平均导热系数  $\bar{\lambda}$  与传热系数  $K$  最小, 即保温性能最优. 其原因主要由于秸秆的热阻远大于混凝土的热阻, 使热量在复合砌块中传递时主要汇集于与热流传递方向平行及部分垂直的混凝土肋壁处, 热量从高温区域主要沿该部分传递至低温区域, 从而形成了热桥<sup>[10]</sup>. 热量的耗散会随着热桥数量的减少及路线长度的延长而减少, 砌块的保温性能随之提高. 秸秆填充率、长宽比大的复合砌块其热桥路线长, 延长了传热途径, 使导热系数减少, 提高了保温性能, 所以 CSB5-1 的保温性能最优.



图 2 秸秆导热系数测定

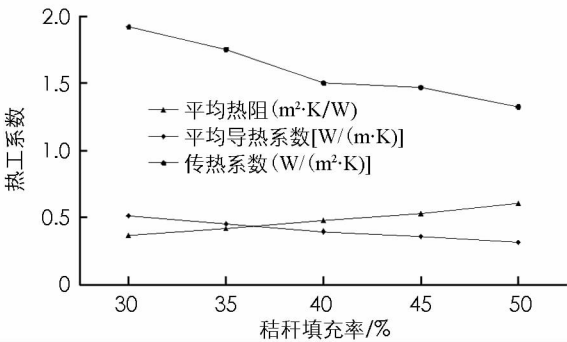


图 3 秸秆填充率对复合砌块热工系数的影响曲线

表 2 热工参数计算结果

| 砌块编号     | 秸秆填充率/% | 平均热阻 $\bar{R}$<br>/( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ) | 平均导热系数 $\bar{\lambda}$<br>/[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] | 传热系数 $K$<br>/[ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ] |
|----------|---------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| CSB1 - 1 | 30      | 0.722                                                                  | 0.263                                                                          | 1.147                                                              |
| CSB1 - 2 | 30      | 0.371                                                                  | 0.512                                                                          | 1.919                                                              |
| CSB1 - 3 | 30      | 0.296                                                                  | 0.642                                                                          | 2.242                                                              |
| CSB2 - 1 | 35      | 0.744                                                                  | 0.255                                                                          | 1.119                                                              |
| CSB2 - 2 | 35      | 0.421                                                                  | 0.451                                                                          | 1.751                                                              |
| CSB2 - 3 | 35      | 0.356                                                                  | 0.534                                                                          | 1.976                                                              |
| CSB3 - 1 | 40      | 0.766                                                                  | 0.248                                                                          | 1.092                                                              |
| CSB3 - 2 | 40      | 0.478                                                                  | 0.397                                                                          | 1.5                                                                |
| CSB3 - 3 | 40      | 0.426                                                                  | 0.446                                                                          | 1.736                                                              |
| CSB4 - 1 | 45      | 0.792                                                                  | 0.240                                                                          | 1.062                                                              |
| CSB4 - 2 | 45      | 0.532                                                                  | 0.357                                                                          | 1.466                                                              |
| CSB4 - 3 | 45      | 0.564                                                                  | 0.337                                                                          | 1.401                                                              |
| CSB5 - 1 | 50      | 0.820                                                                  | 0.232                                                                          | 1.031                                                              |
| CSB5 - 2 | 50      | 0.606                                                                  | 0.314                                                                          | 1.323                                                              |
| CSB5 - 3 | 50      | 0.671                                                                  | 0.283                                                                          | 1.218                                                              |

3 复合砌块热工性能有限元分析

3.1 有限元模型及边界条件

本文采用大型有限元分析软件 ANSYS<sup>[11]</sup>建立 CSB5 - 1 三维模型和相同尺寸的混凝土小型空心砌块三维模型,对其稳态传热过程进行仿真模拟.模拟选取三维 8 节点 SOLID70 热分析实体单元,砌块各组成成分导热系数参考 GB 50176—1993《民用建筑热工设计规范》及试验结果,混凝土的导热系数取 1.51 W/(m·K),秸秆芯材的导热系数取 0.03 W/(m·K),常温常压下空气间层导热系数取 0.073 W/(m·K).其余参数根据重庆地区冬季气候特征与规范中规定的取值范围进行选取,具体数值见表 3.

表 3 ANSYS 热工模拟取值

| 参数名称                                                  | 取 值  |
|-------------------------------------------------------|------|
| 冬季室外温度 $t_e$ /℃                                       | 18   |
| 冬季室内温度 $t_i$ /℃                                       | 0    |
| 内表面换热系数 $\alpha_i$ /W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) | 8.7  |
| 外表面换热系数 $\alpha_e$ /W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) | 23.0 |

3.2 模拟结果

自保温混凝土-秸秆复合砌块与混凝土小型空心砌块的温度场图、热流密度图如图 4、图 5.根据模拟结果计算出自保温混凝土-秸秆复合砌块与混凝土小型空心砌块的传热系数分别为 0.851 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )和 1.515 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ),可见自保温混凝土-秸秆复合砌块的传热系数满足重庆地区对于外墙传热系数  $K$  值不应大于 1.2 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )的建筑节能设计标准,并且保温性能远远好于相同尺寸下未填充秸秆芯材的混凝土小型空心砌块,其建筑节能率达到 56.2%,充分体现出该新型复合砌块的优越性.

根据两种砌块的温度云图可以看出混凝土-秸秆复合砌块与混凝土小型空心砌块相比,内部同一等温面由墙体内侧向墙体外侧呈外移趋势,即砌块内部同一位置温度升高明显,表明复合砌块填充的秸秆芯材对热量由墙内向墙外的传递起到了阻碍作用,减少了墙体热损失,使更多的热量积聚到墙体内部.热流密度图显示,自保温混凝土-秸秆复合砌块的最大热流密度为 29.066 W/ $\text{m}^2$ ,最小热流密度为 0.646 W/ $\text{m}^2$ ,其平均热流密度为 14.856 W/ $\text{m}^2$ ,相比于混凝土小型空心砌块 17.179 W/ $\text{m}^2$  的平均热流密度下降了 13.52%,热量在砌块内部分布更为广泛,提高了砌块的保温性能.但热桥部位热量未见明显减少,表明在原有孔洞中填充秸秆芯材没有有效削弱混凝土肋壁的热桥效应.

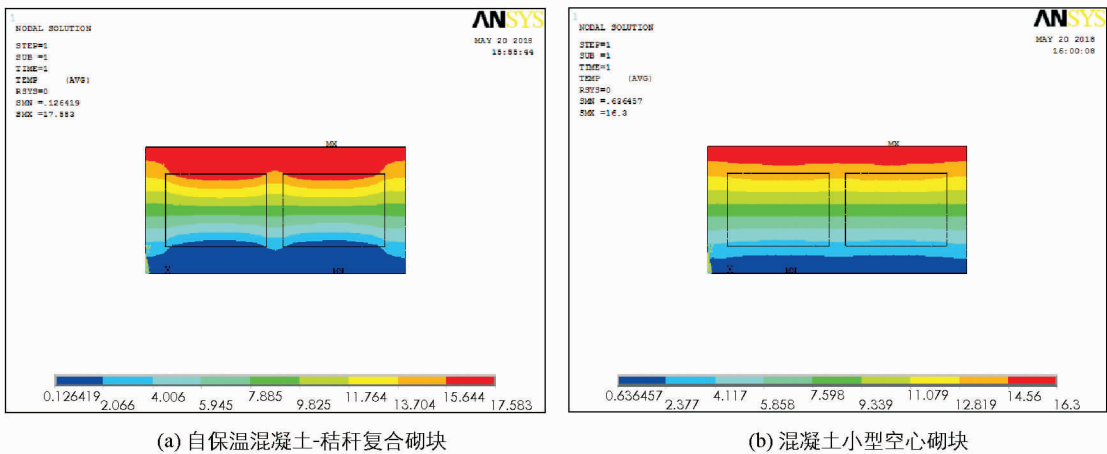


图 4 温度场图

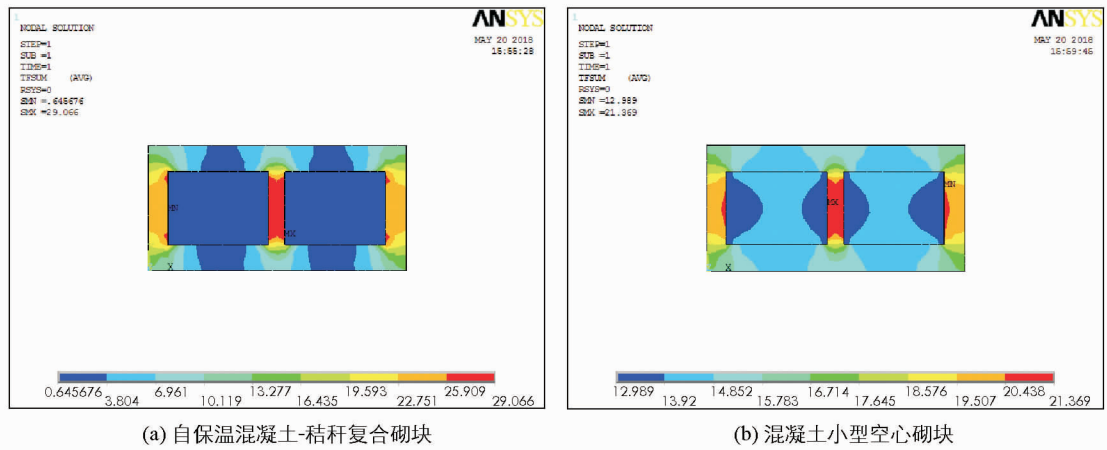


图 5 热流密度图

## 4 结 论

- 1) 自保温混凝土-秸秆砌块的保温性能随着秸秆填充率的增大而提高。在同一秸秆填充率下, 秸秆块长宽比越大, 复合砌块的平均热阻  $\bar{R}$  越大, 平均导热系数  $\bar{\lambda}$  越小, 传热系数  $K$  越小, 保温性能越好。
- 2) 根据有限元模拟结果计算出自保温混凝土-秸秆复合砌块的传热系数为  $0.851 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 与混凝土小型空心砌块的传热系数  $1.515 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  相比减少了 43.8%, 建筑节能率达到 56.2%, 充分体现出该新型复合砌块具有很好的保温隔热性能。
- 3) 秸秆芯材具有良好的热工性能, 填充至混凝土小型空心砌块的孔洞中能够明显提高砌块的保温隔热能力, 增强热稳定性, 从而形成一种性能优良的自保温混凝土-秸秆复合砌块, 有效的把秸秆变废为宝, 符合可持续发展战略的要求, 尤其适合应用于农村建筑中。不足之处在于没有有效削弱砌块的热桥效应, 没有完全发掘出复合砌块的保温节能优势。

### 参考文献:

[1] 吴 聪, 刘福胜, 范 军, 等. 工字型自保温混凝土夹心秸秆砌块墙体热工性能研究 [J]. 混凝土, 2015(6): 127—130.

[2] 江 亿. 我国建筑节能战略研究 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 30—38.

[3] 王洪波, 刘长滨. 基于博弈分析的新建建筑节能激励机制设计 [J]. 建筑科学, 2009, 25(2): 24—28.

[4] 雷 艳, 黄巧玲, 杜 松, 等. 复合自保温砌块热工性能数值模拟研究 [J]. 新型建筑材料, 2013, 40(10): 45—47.

- [5] YANG B, WYMAN C E. Effect of Xylan and Lignin Removal by Batch and Flowthrough Pretreatment on the Enzymatic Digestibility of Corn Stover Cellulose [J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2004, 86(1): 88—95.
- [6] 唐 迪, 鲍安红, 王 驰, 等. 稻草软化制砖的试验研究 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(2): 111—115.
- [7] 国家技术监督局. 普通混凝土小型空心砌块: GB 8239—1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [8] 章熙民, 任泽霈, 梅飞鸣. 传热学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计标准: GB 50176—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [10] 罗利江, 彭 力, 鲍安红. 适宜重庆农村建筑的复合秸秆墙砖尺寸研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(6): 220—223.
- [11] TADEUSZ S, NAKASONE Y, YOSHIMOTO S. *Engineering Analysis with ANSYS Software* [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.

## On Thermal Performance of Self-Insulation Concrete-Straw Composite Block

LI An-jun, BAO An-hong, RAO Kai, LUO Qiu

*College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China*

**Abstract:** As a new environmentally-friendly and renewable building material, rice straw has broad application prospects in energy conservation development of rural buildings. A kind of self insulation concrete-straw composite block is designed in this paper, which is made by filling straw core materials into the holes of small concrete hollow blocks. According to the basic theory of heat transfer, theoretical calculation and simulation of thermal performance of 15 sets of concrete-straw composite block model, whose straw filling rates are 30%, 35%, 40%, 45% and 50% respectively and have different length-width ratios, are carried out in this paper. The results show that the thermal performance of new composite block is strengthened with the increase of straw filling rate. The length-width ratio of cross section of straw core material has a great influence on the heat transfer coefficient of composite block, which indicates that the larger the length-width ratio, the smaller the heat transfer coefficient, the better the thermal performance. And when the straw filling rate is 50%, meanwhile the length-width ratio of cross section of the straw core material reaches the maximum within the specified range, the composite block of which the heat transfer coefficient is  $0.851 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  shows good thermal performance, whose thermal insulation property is much better than the small hollow concrete block without straw core material under the same size and the building energy conservation rate reaches 56.2%. All of these characteristics fully demonstrate the comparative advantages of this new compound block.

**Key words:** concrete-straw composite block; straw filling rate; heat transfer coefficient; thermal insulation property