

# 含湿建筑材料导热系数研究进展

王莹莹, 姜超, 刘艳峰, 刘加平

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安, 710055)

**摘要:** 建筑材料含湿对其导热系数的影响较大, 且该影响在热湿气候区尤为明显。目前, 在建筑节能工程计算中, 仍无法准确计算含湿建筑材料的导热系数, 对其依然采用规范给出的参考值, 这必然造成围护结构热工性能及建筑节能计算的不准确性。本文以含湿建筑材料导热系数为研究对象, 对业界在模型预测、实验测试等方面取得的进展进行了深入的研究分析, 总结了国内外在含湿材料导热系数研究中所取得的主要成果。针对存在的问题, 指出了其应用的局限性, 同时展望了该领域的发展趋势。

**关键词:** 含湿建筑材料; 热湿耦合传递; 导热系数

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0271-06

## Research progress on the thermal conductivity of moist building materials

WANG Yingying, JIANG Chao, LIU Yanfeng, LIU Jiaping

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The moisture content of building materials has great influence on the thermal conductivity, especially in the hot humid climate zone. At present, in the calculation of building energy saving, we are unable to accurately calculate the thermal conductivity of moist building materials, which still adopted the reference value. This will inevitably lead to the uncertainty of thermal performance of building envelope and the inaccuracy of calculation of building energy-saving. In this paper, taking the thermal conductivity of moist building materials as the research object, the progress of the model prediction and experimental testing were deeply studied and analyzed. In addition, the main achievements at home and abroad about studying the thermal conductivity of moist building material were also summarized. In view of the existing problems, the limitations of its application were pointed out, and the development trend of this field was prospected.

**Key words:** moist building materials; coupled heat and moisture transfer; thermal conductivity

建筑材料大多都属于含湿非饱和多孔材料, 湿组分的存在不仅会使围护结构滋生微生物和霉菌, 减少其使用年限, 而且对其热工性能有很大影响。导热系数是评价建筑围护结构保温性能、隔热性能的一个重要参数。建筑材料与周围热湿环境接触, 使得建筑材料内部含湿, 并且不同的热湿环境将导致建筑材料内部含湿量不同, 因此建筑材料导热系数并非是一个恒定值。

目前, 相关计算软件和设计规范主要考虑的是干材料的导热系数, 或者给出一定含湿状态的建筑材料导热系数<sup>[1-3]</sup>, 将导热系数视为一个常数, 这样在围护结构热工性能及建筑节能计算中必然

会造成误差。针对含湿对导热系数影响这一问题, 国内外学者通常从两方面展开研究: (1) 建立逐渐成熟的预测模型; (2) 利用实验直接测量含湿材料的导热系数。

基于以上论述, 以含湿建筑材料导热系数为对象, 从模型预测、实验测试及热湿传递过程对其影响三方面展开探讨。

### 1 含湿建筑材料导热系数模型预测研究

对材料有效导热系数的预测已有五个基本结构模型, 分别为: 串联模型、并联模型、麦斯威

收稿日期: 2016-10-15

修改稿日期: 2017-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508443, 51509011, 51408457) 陕西省自然科学基金基础研究计划-青年人才基金资助项目(2016JQ5055)

作者简介: 王莹莹(1986—), 女, 副教授, 主要从事建筑热湿耦合传递和热湿环境控制研究。E-mail: 1274296191@qq.com

尔-欧肯模型(对于双组分材料, 根据构成连续相的组分不同, 模型有两种表达形式)和 EMT 模型<sup>[4]</sup>. 在模型推导过程中, 串联和并联模型假设多孔材料的物理结构上各组分层与热流保持平行或垂直排列. 串联预测模型表达式如下:

$$K = \frac{1}{v_1/k_1 + v_2/k_2} \quad (1)$$

式中:  $K$  为材料的有效导热系数;  $v$  为各组分的体积分数;  $k$  为各组分的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ .

并联模型如下:

$$K = v_1 k_1 + v_2 k_2 \quad (2)$$

EMT 模型假设所有组分完整随机分布. 其模型如下:

$$v_1 \frac{k_1 - K}{k_1 + 2K} + v_2 \frac{k_2 - K}{k_2 + 2K} = 0 \quad (3)$$

麦斯威尔-欧肯模型假设一些不同组分、连续基质分散小球的距离足够远, 使得每个小球周围因温度分布引起的局部扰动不影响相邻小球的温度分布. 根据构成连续相的组分不同, 模型可以分成两种表达式, 第一种为

$$K = \frac{k_1 v_1 + k_2 v_2 \frac{3k_1}{2k_1 + k_2}}{v_1 + v_2 \frac{3k_1}{2k_1 + k_2}} \quad (4)$$

式中:  $k_1$  为连续相材料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $k_2$  为分散相材料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $v_1$  为连续相组分的体积分数;  $v_2$  为分散相组分的体积分数. 第二种为

$$K = \frac{k_2 v_2 + k_1 v_1 \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}}{v_2 + v_1 \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}} \quad (5)$$

式中:  $k_1$  为分散相材料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $k_2$  为连续相材料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $v_1$  为分散相组分的体积分数;  $v_2$  为连续相组分的体积分数.

目前, 大多数研究都是基于这五种基本有效导热系数的结构模型进行改造和优化. 这些基本结构模型在理论分析和更复杂的模型, 特别是关于定义某些物理结构的热传导边界是极为重要的.

但是, 上述的基础模型中需要实验确定的参数没有任何确切的物理结构基础, 并不能反映多孔材料的实际结构. 针对这一问题, GONG L<sup>[5]</sup>将各相态或各组分视作一些小球体分散在假定的均匀导热系数模型中, 并提出一种新的有效介质理论来模拟多孔材料导热系数, 该模型可统一五种

基本有效导热系数结构模型, 并且不需要任何的经验参数. 徐婷婷<sup>[6]</sup>将三种经典的两相模型(串联模型、平行传导模型、麦斯威尔-欧肯模型)拓展为三相状态, 并推算出三个理论计算式来预测含湿材料的有效导热系数, 且只需要材料的干密度和绝干状态时的导热系数, 便可选用相应理论模型预测含湿材料的有效导热系数. 徐婷婷所提出模型能对含湿材料导热系数进行较好预测, 但是理论计算式不够简洁, 不便于工程使用, 适用性受限. 胡雪蛟<sup>[7]</sup>运用有限元法对二维稳态条件下非饱和含湿多孔材料特征单元的导热方程进行处理, 获得了不同含湿饱和度下的多孔材料的有效导热系数, 发现当液相饱和度很低时, 有效导热系数随饱和度的增加而显著增加. FAN L W<sup>[8]</sup>分析了木材多孔微观结构的电子显微镜图, 用盒计数方法得到图像的不规则维度为 1.4, 利用热阻法建立了一个用来预测木材有效导热系数的不规则模型. 但这个模型的简化是基于单个孔隙, 比较简单和粗糙, 应用场合有一定的局限性, 因此需要提出适用于三维条件下的不规则模型. ZHANG H<sup>[9]</sup>提出了预测多孔介质有效导热系数的简便模型, 该模型假设最小一部分的相是立方体, 且所有立方体随机分散在空间中, 利用各向异性材料热传导原则, 有效导热系数可从各组成部分的导热系数和体积分数中获得. 该方法不依赖于经验参数, 算法容易执行, 但模型预测和实验结果之间的偏差大于 0.6, 模型有待于进一步改进.

TONG F<sup>[10]</sup>提出了一种模拟土壤多孔介质多相流热-湿-应力耦合系统的有效热导率模型, 该模型考虑了温度、湿组分、孔隙度、水压、气体压力、蒸汽压力以及固相矿物成分的综合影响, 适用于孔隙度和饱和度范围较广的 Wiener 边界条件(针对各向异性模型)和 Hashin-Shtrikman 边界条件(针对各项同性模型), 但该模型考虑影响因素过多, 大量参数使计算不方便. 针对这一问题, CHEN Y<sup>[11]</sup>采用均匀化技术, 对非饱和膨润土提出了一种均匀化的导热系数预测模型, 该模型与 TONG F 提出的有效热导率模型相比, 不仅物理机理清晰, 而且依据所采用的同质化方案, 可减少 3 或 4 个参数.

为了分析含湿多孔材料的导热系数, 通常假设模型有固定结构, 并且选用单元孔隙或典型孔隙作为研究对象. 基于这个方法, CHENG P<sup>[12]</sup>和 HSU C T<sup>[13]</sup>提出集总参数模型来计算具有固定结构的二维、三维分散多孔模型的有效导热系数.

BHATTACHARJEE B<sup>[14]</sup>考虑了固体材料的导热率、孔隙率以及孔隙性质,将孔隙结构理想化处理,使孔隙中的微观三维传热保持在宏观一维传热,提出了多孔围护结构导热系数的数学模型. YU B<sup>[15]</sup>基于双分散多孔模型微观结构的分形特征和电学类比方法,提出了两个导热系数的分形模型. 由于假设单元孔隙中发生的是一维导热,而事实上横向导热是二维热传导,因此这两个模型有待优化. JACKSON K W<sup>[16]</sup>将各组分界面的接触面导热系数定量联系起来,提出一个单元孔隙模型,模型的单元孔隙通过三个主要的热传导来描述,这三个热传导包括固体与固体之间、固体与液体之间、固体与气体之间的传热,通过电-热间的类比获得导热系数. SARWAR M K<sup>[17]</sup>提出了一种两相介质的自相似性模型,这个模型考虑了孔隙的大小分布,通过类比欧姆定律在几个尺寸等级下的迭代获得导热系数.

综上所述,国内外学者从多孔介质的孔隙特征和含湿相态出发,提出了一系列逐渐成熟、准确的含湿建筑材料导热系数预测模型. 每个模型都根据所研究的对象,假设有一定的物理结构和限制条件,并且具有各自的适用范围. 但是到目前为止,没有任何一个单一的模型方程可以应用于所有类型的结构. 现有研究普遍采用的方法是基于一个概念性的初始模型,并根据材料结构和结构的变化对模型进行不断的调整;此外,将经验参数加入模型中来取代结构的差异,使用有限差分或有限元方法对已知微观结构的复合材料有效导热系数进行数值模拟也是广大学者采用的方法. 总体来说,除了完全干燥或者完全湿饱和的情况外,非饱和含湿多孔介质的导热系数尚缺公认的预测模型. 根据现有的研究成果,基于初始模型和微观结构,逐渐取代模型中复杂不易获取的参数,寻求一个能将导热性能与微观结构很好的联系起来的统一的预测模型,将是后续研究的重点.

## 2 含湿建筑材料导热系数实验测试研究

多孔材料热湿耦合传递模型是建筑物理的主要研究课题,随着计算能力的提升和非线性微分方程解稳定算法的提出,用模型预测含湿材料的导热系数越来越普遍. 然而,不同于热传导,湿传递中没有驱动势和输运系数的普遍理论,每个预测模型都有自己的限制条件,仅靠模型推导出

来的导热系数是不够的,研究中普遍的方法是在常用的模型上添加一个经验加权系数来抵消结构差异,但这些经验参数没有任何明显的物理基础,并不能反映多孔材料的实际结构,模型得到的预测值与实际仍有一些差距. 因此,许多研究人员选择通过实验去测定含湿建筑材料的导热系数.

对于含湿建筑材料导热系数的测量,早期测试方法主要为稳态测试法,如热流计法和防护热板法;而后又开发出瞬态测试法,如瞬态平面热源法及瞬态热线法.

### 2.1 稳态测试法

建筑材料导热系数的测量往往需要作用在样品上的温度梯度,对于含湿建筑材料,温度梯度的存在往往会使水分蒸发或冷凝进而造成传质现象. 在同时考虑湿传递、辐射换热、对流换热的情况下,国内外学者通常采用稳态法对不同含湿建筑材料的导热系数进行测量.

在这些研究中,MEUKAMA P<sup>[18]</sup>、DARIUSZ J. GAWIN<sup>[19]</sup>和FRATTOLILLO A<sup>[20]</sup>分别测试了聚苯乙烯保温板、红土砖、混凝土、砂浆这些常用建筑材料在不同含湿量下的导热系数,发现这些建筑材料的导热系数随含湿量的增大而增大,尤其是,当聚苯乙烯保温板含湿量处在0~55.55%之间、红土砖的含湿量在0~12%之间、混凝土的含湿量在70%~85%之间时,导热系数的增长速率最快.

#### 2.1.1 热流计法

相较于其他导热系数测试方法,热流计法测试有三个主要的优点<sup>[21]</sup>,一是可以在较低的热流密度下输出较大的信号,便于检测与处理;二是只需要很小的温度梯度就能产生较大的信号;三是成本、价格相对低廉,适于广泛使用. 因此,ABDOU A<sup>[22]</sup>、RUDTSCH S<sup>[23]</sup>和HALL M<sup>[24]</sup>分别以玻璃纤维和岩棉、硅酸钙纤维素纤维板和SRE材料为测试样品,利用热流计法测试了其在不同含湿量下的导热系数,对比发现,较高的含湿量总是对应着较高的导热系数.

#### 2.1.2 防护热板法

SONDEREGGER W<sup>[25]</sup>、JIN X L<sup>[26]</sup>利用防护热板法测试了含湿建筑材料导热系数的变化,发现导热系数随含湿量的增加而增加. 与之前研究不同的是,SONDEREGGER W还发现导热系数增长曲线的斜率取决于建筑材料本身的结构. 而JIN X L在对加气混凝土砌块导热系数测试的过程中发现导热系数虽然随含湿量的增加而增加,但

其增加速率却随含水量的增加而逐渐降低。

## 2.2 瞬态测试法

### 2.2.1 瞬态热线法

与稳态测试法相比,瞬态热线法因其能缩短测试时间的优点,而被许多学者所采纳。W. N. DOS SANTOS<sup>[27]</sup>用该方法测试了较为常见的建筑材料:白砖、浇筑块和水泥混凝土的热物性参数,结果表明,含湿量对其导热系数有重大影响,但并没有进一步说明导热系数随含湿量的变化关系。

为了寻找具体的变化关系,KHAN M I<sup>[28]</sup>用非稳态线源热线法测试了四种不同类型的岩石在干饱和、湿饱和状态下的导热系数,结果表明材料导热系数随含湿量的增加而增大。此外,COLLET F<sup>[29]</sup>和SHIN H C<sup>[30]</sup>还通过实验得到了导热系数随含湿量变化的定量分析。COLLET F利用一根5 cm长的热线测试了大麻混凝土的导热系数并建立了自洽方案模型,研究结果表明,当材料密度增加三分之二时,导热系数增加约54%;当材料含湿量由干燥状态增加到90%时,导热系数增加小于15%~20%。SHIN H C测试了混凝土混合物的导热系数,含湿量增加1%将导致混凝土混合物的导热系数增加约7%~10%,并采用差分分析法对此实验结果进行证实。

### 2.2.2 瞬态平面热源法

YU Z T<sup>[31]</sup>利用瞬态平面热源法测试干燥材料和含湿材料的导热系数,并给出了每一种测试样本导热系数与含水量的关系方程。结果表明,在恒定温度下,导热系数随含湿量线性增加。

姚晓莉<sup>[32]</sup>采用瞬态平面热源法测试了含湿加气混凝土的有效导热系数,分析结果表明,含湿加气混凝土的有效导热系数随含水率的增加呈单调增长趋势,但其增长曲线在质量含水率为15%时出现明显拐点。此外,作者还将含湿加气混凝土样本与对照干燥样本进行对比,提出含湿加气混凝土有效导热系数基于质量含水率的预测方程,并通过实验发现当质量含水率达到25%时,含湿加气混凝土有效导热系数较干燥试样增大了近一倍;而当质量含水率高达100%时,含湿加气混凝土的有效导热系数约为干燥试样的4倍。

## 2.3 其他方法

除以上常用的测试方法外,部分学者采用了其他测试方法对含湿建筑材料导热系数变化进行研究,例如,TAOUKIL D<sup>[33]</sup>利用“盒子法”测试了不同含湿情况下木材-混凝土复合材料的导热系数,这种测试方法与热线、热盘这些常规测试方

法相比,具有操作简单、精度更高的优点。PI-ERRE T<sup>[34]</sup>通过热轧带钢的方法测试了大麻混凝土的含湿量从0%增加至95%的过程中,其导热系数的变化规律,这种测试方法可以快速准确地测量各种材料的热传导特性。

通过实验测试得到的材料导热系数总是有限的,并且,实验结果是在特定受控的实验条件下获得的,具有一定的局限性。因此,在后续的研究中除了要拓展实验对象,增加实验的准确性外,还要尽可能的去测试处在真实复杂环境条件下建筑材料的导热系数。

## 3 热湿传递过程对建筑材料导热系数的影响

在研究含湿量对建筑材料导热系数的影响中,通常忽略湿组分迁移及其对导热系数的影响,只考虑含湿量对导热系数的作用。而在实际中,建筑围护结构内往往存在湿迁移,湿传递过程同时伴随着热传递,因而建筑材料导热系数受温湿度变化的共同影响,其变化规律与含湿量作用下变化规律不同。热湿迁移过程导致的建筑材料热力特性十分复杂。

不同气候区建筑材料中的湿组分相态不同,在热湿传递过程对导热系数也有着不同程度的影响。针对这一问题,研究人员对不同气候区的建筑材料热湿传递过程中导热系数的变化进行了研究。KONG F<sup>[35]</sup>提出了围护结构热湿耦合传递动态计算方法,并对哈尔滨地区新建建筑围护结构的热湿传递进行模拟,分析了围护结构热湿传递对含湿建筑材料热物理参数的影响,结果表明,新建建筑围护结构的传热系数随其逐渐干燥而降低。XU Y G<sup>[36]</sup>对哈尔滨地区的钢筋混凝土EPS板热绝缘复合墙在热湿传递状态下,不同初始含湿量对传热系数的影响进行了研究,实验结果表明,墙体初始含湿量为100%时,传热系数很高,且传热系数随墙体的干燥逐渐下降。

CHEN Z Q<sup>[37]</sup>和BONACINA C<sup>[38]</sup>通过理论分析和简化模型得到了热湿传递过程中建筑材料导热系数的变化情况。CHEN Z Q基于非平衡热力学理论,讨论了非饱和多孔材料热湿传递的机理,建立唯象方程来描述非饱和多孔建筑材料的热湿迁移过程,通过菲克扩散定律和理想气体的状态方程,推导了唯象方程的系数,唯象系数(导热系数)随着含水量的增加而增大。BONACINA C提出了一种简化模型来估算孔隙度适中的多孔介质

导热和辐射换热特性,并分析热湿传递过程对导热系数的影响,研究发现样品含湿量与导热系数有一定的线性关系。

CAMPANALE M<sup>[39]</sup>和SINGH A K<sup>[40]</sup>通过实验测试了热湿传递过程中建筑材料导热系数的变化情况。CAMPANALE M通过实验测量了含湿加气混凝土导热系数,同时考虑了相变过程中热湿传递的影响,结果表明,含湿量在0~80%时,从实验开始直到稳定状态的温度差小于10℃,由水分迁移造成的测量误差小于1%,然而研究没有给出含湿加气混凝土材料热湿迁移过程与导热系数的变化关系。SINGH A K在热湿传递条件下测试了湿砂的有效导热系数,实验所用样品保持在-5~30℃,实验发现由于土壤冻结将导致土壤界面有效导热系数急剧增加。

目前的研究成果大多集中在含湿建筑材料导热系数的研究,而事实上建筑物时刻处在复杂的热湿环境条件下,尤其是在热湿地区,建筑材料中不可避免的会存在热湿迁移现象,针对这一复杂耦合传递过程引发导热系数变化的研究还不是很全面,有待我们进一步深入。

## 4 结语

国内外学者对含湿建筑材料的导热系数进行了大量系统的研究,取得了丰硕成果。但含湿多孔建筑材料内部结构较为复杂,且热湿传递过程相互耦合影响,缺少一个公认的统一模型来预测所有含湿建筑材料的导热系数,此外,通过实验测试不同含湿情况的建筑材料导热系数也因工作量过大而难以实现。因此无论通过模型预测还是实验测试,都有一定的局限性,这也是长期以来国内外学者共同努力去解决的问题,有待进一步深入研究。在热湿气候条件下,围护结构传热系数将随内部含湿量的多少、迁移及其相变情况而发生变化,进而影响围护结构的热工性能,若处理不当,将造成一定程度上的能源浪费。

综上所述,继续完善围护结构的有效导热系数模型,提高实验测试含湿材料导热系数的精度,开发测试含湿建筑材料导热系数的仪器,研究热湿条件对含湿建筑材料其他热物性参数的影响,继续深入研究热湿传递过程对导热系数的影响,是该领域的主要研究方向。

## 参考文献 References

[1] HONG T Z, CHOU S K, BONGT Y. Building simu-

lation: an overview of development and information sources [J]. Building and Environment, 2000, 35(4): 347-361.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范: GB50176—93 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1993. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Thermal design code for civil building: GB50176—93 [S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 1993.
- [3] 中国建筑科学研究院. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2005 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. China Academy of Building Research. Public building energy efficiency design standards: GB50189-2005 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
- [4] WANG J, CARSON J K, NORTH M F, et al. A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2006, 49(17/18): 3075-3083.
- [5] GONG L, WANG Y, CHENG X, et al. A novel effective medium theory for modelling the thermal conductivity of porous materials [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 68(1): 295-298.
- [6] 徐婷婷, 詹树林. 含湿多孔建材有效导热系数的理论推算 [J]. 低温建筑技术, 2010, 32(6): 119-120. XU Tingting, ZHAN Shulin. Theoretical calculation of effective thermal conductivity of porous materials with wet porous materials [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010, 32(6): 119-120.
- [7] 胡雪蛟, 杜建华, 王补宣. 液相饱和度对多孔介质稳态导热系数的影响 [J]. 工程热物理学报, 2001, 工程热物理学报, 2001, 22(s1): 125-128. HU Xuejiao, DU Jianhua, WANG Buxuan. The Influence of liquid saturation on the stagnant thermal conductivity of porous media [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(s1): 125-128.
- [8] FAN L W, HU Y C, TIAN T, et al. The prediction of effective thermal conductivities perpendicular to the fibres of wood using a fractal model and an improved transient measurement technique [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2006, 49(21/22): 4116-4123.
- [9] ZHANG H, GE X, YE H. Randomly mixed model for predicting the effective thermal conductivity of moist porous media [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2006, 39(1): 220-226.
- [10] TONG F, JING L, ZIMMERMAN R W. An effective thermal conductivity model of geological porous media for coupled thermo-hydro-mechanical systems with multiphase flow [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(8): 1358-1369.
- [11] CHEN Y, SONG Z, RAN H, et al. A homogenization-based model for estimating effective thermal conductivity of unsaturated compacted bentonites [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 83: 731-740.
- [12] CHENG P, HSU C T, CHENG P, et al. The effective stagnant thermal conductivity of porous media with periodic structures [J]. Journal of Porous Media, 1999, 2(1): 19-38.
- [13] HSU C T, CHENG P, WONG K W, et al. A

- lumped-parameter model for stagnant thermal conductivity of spatially periodic porous media [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1995, 117(2): 264-269.
- [14] BHATTA CHARJEE B, KRISHNAMOORTHY S. Permeable porosity and thermal conductivity of construction materials [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(4): 322-330.
- [15] YU B, CHENG P. Fractal models for the effective thermal conductivity of bidispersed porous media [J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 2002, 16(1): 22-29.
- [16] JACKSON K W, BLACK W Z. A unit cell model for predicting the thermal conductivity of a granular medium containing an adhesive binder [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1983, 26(1): 87-99.
- [17] SARWAR M K, MAJUMDAR P. Thermal conductivity of wet composite porous media [J]. *Heat Recovery Systems & Chp*, 1995, 15(15): 369-381.
- [18] MEUKAM P, JANNOT Y, NOUMOWE A, et al. Thermo physical characteristics of economical building materials [J]. *Construction & Building Materials*, 2004, 18(6): 437-443.
- [19] DARIUSZ J G, JAN K, KENNETH W. Thermal conductivity of moist cellular concrete—experimental and numerical study [C]// *Prosess 9th International Conference Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*. (Florida), USA: ASHRAE, 2004: 1-10.
- [20] FRATTOLILLO A, GIOVINCO G, MASCOLO M C, et al. Effects of hydrophobic treatment on thermophysical properties of lightweight mortars [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2005, 30(1): 27-35.
- [21] 廖亚非, 张青文, 何容盛. 热流计的发展、国际领先技术与改进方向研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2005, 27(2): 84-87.
- LIAO Yafei, ZHANG Qingwen, HE Rongsheng. Development of heat flow meter and research on amelioration of international advanced technique [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2005, 27(2): 84-87.
- [22] ABDOU A, BUDAIWI I. The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content [J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 43(3): 533-544.
- [23] RUDTSCH S. Thermal conductivity measurements for the separation of heat and mass diffusion in moist porous materials [J]. *High Temperatures High Pressures*, 2000, 32(4): 487-491.
- [24] HALL M, ALLINSON D. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials [J]. *Applied Thermal Engineering*, 29(29): 740-747.
- [25] SONDEREGGER W, NIEMZ P. Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2009, 67(3): 313-321.
- [26] JIN X L, LUO X Y, MENG Q L. Effect of equilibrium moisture contents on insulating performance of autoclaved aerated concrete blocks [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 216: 479-484.
- [27] SANTOS W N D. Experimental investigation of the effect of moisture on thermal conductivity and specific heat of porous ceramic materials [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(16): 3977-3982.
- [28] KHAN M I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models [J]. *Building & Environment*, 2002, 37(6): 607-614.
- [29] COLLET F, PRETOT S. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 65(13): 612-619.
- [30] SHIN H C, KODIDE U. Thermal conductivity of ternary mixtures for concrete pavements [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2012, 34(4): 575-582.
- [31] YU Z T, XU X, FAN L W, et al. Experimental measurements of thermal conductivity of wood species in China: effects of density, temperature, and moisture content [J]. *Forest Products Journal*, 2011, 61(2): 130-135.
- [32] 姚晓莉, 易思阳, 范利武, 等. 不同孔隙率下含湿加气混凝土的有效导热系数 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015(6): 1101-1107.
- YAO Xiaoli, YI Siyang, FAN Liwu, et al. Effective thermal conductivity of moist aerated concrete with different porosities [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015(6): 1101-1107.
- [33] TAOUKIL D, BOUARDI A E, SICK F, et al. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite [J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 48(11): 104-115.
- [34] PIERRE T, COLINART T, GLOUANNEC P. Measurement of thermal properties of biosourced building materials [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35(9-10): 1832-1852.
- [35] KONG F, ZHANG Q. Effect of heat and mass coupled transfer combined with freezing process on building exterior envelope [J]. *Energy & Buildings*, 2013, 62(62): 486-495.
- [36] XU Y G, LU M, JIA Z L. Effect of different initial moisture contents on the characteristics of coupled heat and moisture transfer of a reinforced concrete-EPS thermal insulation composite wall in Harbin [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 250/253: 3044-3049.
- [37] CHEN Z Q, SHI M H. Study of heat and moisture migration properties in porous building materials [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(1): 61-71.
- [38] BONACINA C, CAMPANALE M, Moro L. Analytical and experimental investigations on the heat transfer properties of light concrete [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2003, 24(5): 1407-1414.
- [39] CAMPANALE M, DEGANELLO M, Moro L. Effect of moisture movement on tested thermal conductivity of moist aerated autoclaved concrete [J]. *Transport in Porous Media*, 2013, 98(1): 125-146.
- [40] SINGH A K, CHAUDHARY D R. Evaluation of heat and moisture transfer properties in a frozen-unfrozen water-soil system [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1995, 38(12): 2297-2303.