

抹面层湿特性对岩棉外保温系统含湿量的影响

孙立新^{1,2}, 闫增峰¹, 冯 驰²

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国建筑科学研究院 建筑环境与节能研究院, 北京 100013)

摘要: 岩棉薄抹灰外保温系统作为防火 A 级的外保温系统在建筑中的应用越来越广泛, 然而岩棉热湿物理性能与传统保温材料又有着较为明显的差异, 岩棉系统热湿耦合作用下的温湿迁移及系统含湿量也还缺乏足够的研究. 文章利用热湿耦合 (HAM) 模型模拟分析软件, 针对抹面层不同湿特性对岩棉薄抹灰外保温系统含湿量的模拟和分析, 提出了抹面水蒸气和液态水的控制指标建议, 为岩棉行业标准的编制奠定了技术基础.

关键词: 岩棉薄抹灰外墙外保温系统; 抹面层; 含湿量; 模拟

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0072-06

Research on HAM model simulation of moisture content of stone wool ETICS with different base coat moisture performance

SUN Lixin^{1,2}, YAN Zengfeng¹, FENG Chi²

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. IBEE, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: With the increasing demand for fire performance of ETICS in China, stone wool ETICS is used more and more as a Class A fire performance system. Although moisture has a big impact on the stone wool ETICS performance, we are currently lack of researches for moisture content and hygrothermal distribution of stone wool ETICS. This research is carried out on the HAM model simulation of the moisture content in each layer of the system and hygrothermal distribution of stone wool ETICS. On this basis, the indicators for water vapour and liquid water were proposed, which provides a foundation for the stone wool ETICS standards in China.

Key words: stone wool ETICS; base coat; moisture content; simulation

在实现建筑节能的各种构造措施中, 建筑外墙外保温系统是最为常见而重要的节能构造措施, 而薄抹灰外墙外保温系统又是外保温系统中最主要的形式. 对于薄抹灰外保温系统其抹面层是指外保温系统中, 采用抹面胶浆复合玻纤网薄抹在保温层外侧, 保护保温材料并起防裂、防火、防水和抗冲击等作用的构造层. 抹面层的耐久性与对系统的热湿状况和耐久性密切相关, 但在传统的建筑外保温和节能设计分析中, 常常忽略了对外保温系统中抹面层的内热湿耦合迁移研究与湿含量的控制, 这极有可能会造成系统面层开裂, 进一步对建筑外保温系统及乃至建筑本体产生不利影响, 非但不能满足节能设计要求, 还可能加剧了围护结构内部的冷凝与结露乃至发霉, 又进一步的增加裂缝数量和扩大了裂隙宽度, 影响系统的正常使用. 另一方面, 随着建筑外保温系统

防火性能要求的逐步提高, 岩棉薄抹灰外保温系统作为一种防火性能 A 级的外保温系统在中国的用量逐渐增多. 然而, 岩棉作为无机多孔纤维介质, 其热湿物理性能与传统有机保温材料又有着十分明显的差异, 尤其在水蒸气透过性方面的差异巨大. 一般而言, 岩棉的湿阻因子仅为聚苯板的 1/30 左右^[1]. 这些都表明了岩棉系统在热湿耦合作用下含湿量控制与以 EPS 薄抹灰系统为代表的传统有机板材外保温系统的湿度控制方式和思路差异巨大. 因此, 研究抹面层对岩棉薄抹灰外墙外保温系统在热湿耦合作用下系统含湿量的影响, 是当前急需解决的一个重要问题.

1 稳态水蒸气模型分析研究

受制于基础理论研究的落后和数据支撑的缺乏, 在我国相关标准中围护结构热湿耦合的计算

方法与应用分析也停滞不前。对于一般采暖建筑,在热工设计中虽然允许结构内部产生一定量的冷凝水,但是为了保证结构的耐久性和保温性,也根据材料性能的不同提出了不同的湿度限值。目前,分析和判断围护结构内部冷凝的方法主要有 Glaser 法,该方法相对直观易用,为世界上许多国家和地区所采用,并已成为国际标准。目前,我国的 GB50176-93《民用建筑热工设计规范》^[2]和相关建筑节能设计标准^[3-4]当中均采用该法,提出了一些措施和简化计算方法。与热工规范的要求主要为控制保温材料内部发生的水蒸气凝结略有差异,现有的外墙外保温系统标准中主要控制抹面层内测不结露。基于这些出发点,考虑到由于岩棉的水蒸气渗透阻较小,透气性好,因此一般要求抹面层也能有良好的透气性。针对不同气候条件,岩棉外保温系统构造中冷凝界面内外侧的蒸汽渗透阻,可按式计算:

$$\frac{P_i - P_{s,c}}{H_{o,i}} - \frac{P_{s,c} - P_e}{H_{o,e}} = \frac{10\rho_0\delta_i\Delta w}{24Z} \quad (1)$$

式中: $H_{o,i}$ 为冷凝计算界面内侧所需的蒸汽渗透阻, $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa/g}$; $H_{o,e}$ 为冷凝计算界面至围护结构外表面之间的蒸汽渗透阻, $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa/g}$; P_i 为室内空气水蒸气分压为, Pa; P_e 为室外空气水蒸气分压为, Pa; $P_{s,c}$ 为冷凝计算界面处与界面温度 θ_c 对应的饱和水蒸气分压力, Pa; Δw 为重量湿度的允许增量(%), 岩棉板(带)的重量湿度允许增量为 3%。

按一维稳态水蒸气迁移模型分析, 表 1 中所列气候区的外保温系统抹面层的水蒸气渗透阻应符合表 1 的规定才会避免出现结露等问题。

表 1 岩棉外保温系统抹面层水蒸气渗透阻

Tab. 1 Vapor resistivity of protecting coat in stone wool ETICS

气候区	抹面层材料水蒸气渗透阻/ $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} \cdot \text{g}^{-1}$	
	基层墙体为混凝土时	基层墙体为加气混凝土砌块时
严寒和寒冷地区	$\leq 5.83 \times 103$	$\leq 0.56 \times 103$
夏热冬冷地区	$\leq 4.36 \times 103$	$\leq 0.50 \times 103$

我国的《民用建筑热工设计规范》(GB50176-93)仍采用 Glaser 模型分析围护结构中的湿分传递过程, 由于 Glaser 法是以稳定条件下纯蒸汽扩散过程为基础提出的冷凝受潮分析方法, 因此其在判断围护结构内部冷凝是有合理性的。从设计应用的角度考虑, 采用此法较为简单和偏于安全。

但从理论上讲, 此法是不尽合理的, 因为其没有科学地反映材料内部的湿迁移机理。Glaser 模型是纯蒸汽渗透的一维稳态模型, 但在实际过程中, 湿分的传递常常是非一维、非稳态、液态和气态湿分同时传递的, 所以用现代的 HAM 模型进行分析会更合理。

2 热湿耦合(HAM)模型下模拟对比分析

关于围护结构热湿耦合模拟研究, 目前国内还主要集中在基础理论研究方面, 如热湿耦合迁移机理、模型的计算求解方法与试验比对验证等^[5-14], 以指导围护结构热工设计与工程应用研究为目标的热湿耦合模拟研究相对较少。其中, 哈尔滨工业大学孔凡红对哈尔滨地区新建建筑围护结构干燥过程的热湿耦合传递进行了模拟研究, 在考虑液态水的渗透和冬季围护结构内湿分结冰的情况下分析了新建建筑围护结构的干燥速率及对能耗的影响^[15]。张华玲等对深埋地下洞室的墙体进行了热湿传递的数值模拟, 得到了墙体温度、相对湿度、热流率、湿流率的变化规律^[16]。孙喜山等模拟分析变物性状态下了红砖外保温墙体在夏热冬暖地区夏季在墙体内部发生结露的危险性^[17]。然而以系统构造特性为研究出发点, 针对岩棉外保温系统的热湿耦合模拟研究目前还尚属空白。

2.1 软件介绍

为了更好的对岩棉薄抹灰外墙外保温系统的热湿传递进行分析, 研究采用了德国 Fraunhofer 建筑物理研究所的 WUFI 软件进行模拟分析。WUFI 是一款以 HAM 模型为理论基础, 并经过长期实践观测和校验修正的经典热湿耦合模拟计算软件。WUFI 满足 EN15026-2007 和 ASHRAE Standard 160-2009 的计算方法和要求, 并通过了相关标准的基准验证计算比对。软件以温度和相对湿度为驱动势。

2.2 模型建立

WUFI 可以按围护结构的实际构造对墙体进行分层设置, 各层均可以独立设置该层的材料热、湿物性参数和厚度, 设定完后可根据建筑特点设定构造的朝向和高度。本研究所用构造层依次为 5mm 抹面层、120 mm 保温层(岩棉、或 EPS)、5 mm 粘接层、200 mm 混凝土基墙, 模型为南向

外墙(垂直),高度为 20 m 以上.同时,WIFI 在热湿耦合计算中以温度和相对湿度为迁移驱动力,因此各层材料的热湿特性参数,除材料的密度、孔隙率、比热等基本参数外,其余动态热湿参数如:材料的等温吸放湿曲线,液态水的传导系数、蒸汽渗透系数、温度作用下的导热系数变化曲线、温度作用下的导热系数变化曲线,焓随温度的变化曲线等动态参数均以温、湿度的函数表达式体现.考虑到目前国内尚缺乏可以直接应用的外保温系统的体系性热湿物性参数,因此本文在材料的热湿物性参数方面,直接选用了 WUFI 自带材料数据库中的物性参数及特性^[18].

2.3 边界条件与初始含湿量、气象参数的设定

边界条件与初始含湿量的设定值,主要是依据国家建筑工程质量监督检验中心多年的工程材料测试为主提出的,部分参数参考了 WUFI 软件的默认设置,具体设定详见表 2、3^[19-20].

表 2 典型边界条件

Tab. 2 Typical boundary conditions

参数	赋值
外墙表面换热组/ $\text{m}^2 \cdot \text{W} \cdot \text{k}^{-1}$	0.058 8
内墙表面换热组/ $\text{m}^2 \cdot \text{W} \cdot \text{k}^{-1}$	0.125
SD 值	1.2
短波辐射吸收率	0.4
长波辐射吸收率	0.9
地面短波辐射反射率	0.2
雨水附着系数	0.7

表 3 初始含湿量

Tab. 3 Initial moisture content

材料层	含湿量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
抹面层/粘接层	10.5
岩棉	0.39
EPS	0.39
混凝土	75

WUFI 的气象参数数据库中给出了主要城市的典型气象年的逐时温度、相对湿度、降雨、风速、太阳辐射,并对全年最高、最低以及平均温度和年均湿度、总降雨量进行了统计.本研究选择了 WUFI 气象参数数据库中的北京作为典型城市.模拟的计算周期为 10 a.

2.4 抹面层不同液态水吸水系数对系统的影响分析

无论是控制保温材料内部发生的水蒸气凝结,

还是外墙外保温系统标准中主要控制抹面层内测不结露,这种一维稳态水蒸气的计算方法均只考虑了抹面层的水蒸气渗透阻,并未涉及其液态水的传递性能进行.为此,本研究分别模拟分析了作为岩棉薄抹灰外保温系统抹面层透汽不吸水(抹面层吸水系数 A 为 $0 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)和正常情况下(抹面层 A 为 $0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)系统内各个构造层的含湿量,并与 EPS 薄抹灰外保温系统(混凝土基墙)正常情况下(抹面层 A 为 $0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)进行了对比分析.

首先,通过改变系统抹面层的吸水系数,在其他边界条件均一致的条件下,系统抹面层的含湿量发生了较大幅度的改变.当抹面层吸水系数 A 为 $0 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$ 时,抹面层最大含湿量不超过 20 kg/m^3 ,如图 1.而当吸水系数调整为 0.1 时,抹面层的最大含湿量可达到近 400 kg/m^3 ,如图 2,为抹面层不吸水时的 20 倍之多.同时,进行反向验证模拟分析.当其它所有参数不变的情况下,将对抹面层水蒸气传递的核心参数 SD 值(水蒸气渗透阻比)进行修改,将 SD 值设定为 12 时(相当于抹面层渗透阻增大 10 倍),抹面层的含湿量也没有明显的变化,如图 3.

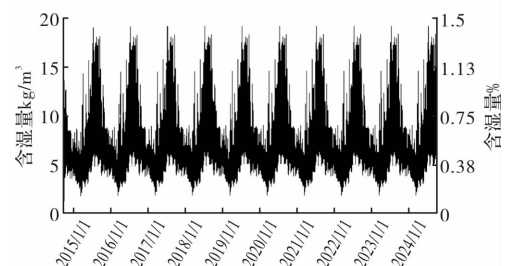


图 1 岩棉薄抹灰外保温系统抹面层含湿量
($A=0 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)

Fig. 1 Moisture content of protecting coat in stone wool ETICS ($A=0 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)

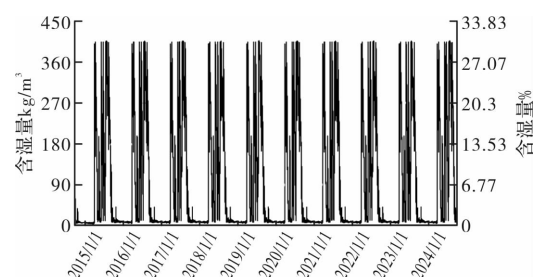


图 2 岩棉薄抹灰外保温系统抹面层含湿量
($A=0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)

Fig. 2 Moisture content of protecting coat in stone wool ETICS ($A=0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)

在此基础上, 进一步上述模拟结果将与 EPS 薄抹灰外保温系统(混凝土基墙)正常情况下(抹面层 A 为 $0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)进行了对比分析, 对比结果见表 4.

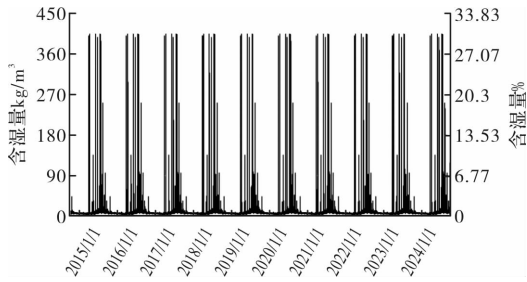


图 3 岩棉薄抹灰外保温系统抹面层含湿量
($A=0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=12$)

Fig. 3 Moisture content of protecting coat in stone wool ETICS ($A=0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=12$)

表 4 初始含湿量

Tab. 4 Initial moisture content

		岩棉外保温系统			EPS 外保温系统
抹面层 湿物理性质	液态水吸 收系数	0	0. 1	0. 1	0. 1
	$A \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$				
	水蒸气渗透 阻比 SD	1. 2	1. 2	12	1. 2
抹面层最大 含湿量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$		20	400	400	400
保温层最大 含湿量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$		1	11	13	2
混凝土基墙最大 含湿量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$		56	125	130	50

可见, 与传统的水蒸气计算模型相比, 在热湿耦合计算当中抹面层的液态水吸收系数对该层和保温材料的含湿量影响巨大(抹面层最大含湿量增大近 20 倍), 对基墙的含湿量也有较大程度的影响. 即 HAM 模型分析中液态水(降雨)对系统含湿量的影响远大于水蒸气(空气相对湿度)的影响. 这点与在稳定条件下纯蒸汽扩散模型有着较大的差别. 因此, 建议根据降水量, 尤其是在降水较多地区, 除对岩棉薄抹灰系统的水蒸气渗透阻提出要求外, 还应增加对系统抹面层吸水性能的要求, 以控制系统内的含湿量.

2.5 岩棉薄抹灰系统内表面结露的模拟对比分析

通过表 3 岩棉系统与 EPS 系统的比对可以发现, 由于岩棉自身的湿阻因子仅为聚苯板的 1/30 左右, 因此当采用与 EPS 系统湿物理性质相似的抹面胶浆会导致保温材料和混凝土基墙含湿量的

增加, 这些都会导致采用该系统的围护结构内表面产生结露或者发霉. 为此, 本研究利用 WUFI 软件进行了内表面温湿度模拟分析, 并根据 WUFI 给出了发霉结露的温湿度控制曲线进行分析判断. 该曲线是基于德国 Fraunhofer 建筑物理研究所的大量工程研究与理论分析得到的, 在图中虚线以上部分出现的温湿度分布点, 是有可能造成系统内表面的发霉结露的温湿度点.

可以看到, 当抹面层不吸水时, 系统内表面没有任何结露和发霉的危险, 但当系统的抹面层改为常规抹面层的吸水系数 0.1 时, 系统内表面在热湿耦合的作用下, 系统墙体内表面温度和湿度分布规律与之前有了较大的变化, 有可能出现大面的结露和发霉. 如图 4~5 所示. 对于 EPS 系统而言, 由于 EPS 本身的水蒸气渗透阻很大, 因此抹面层的吸水性对混凝土基墙的含湿量影响较小, 因此, 同样也不存在结露或发霉的危险, 如图 6.

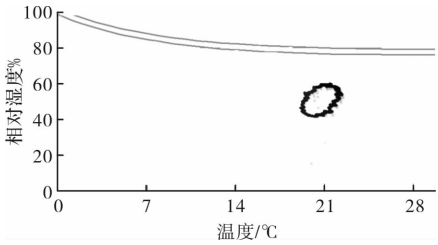


图 4 岩棉薄抹灰外保温系统内表面温湿度统计
($A=0 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)

Fig. 4 Temperature and RH statistics for the inner surface of stone wool ETICS($A=0 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)

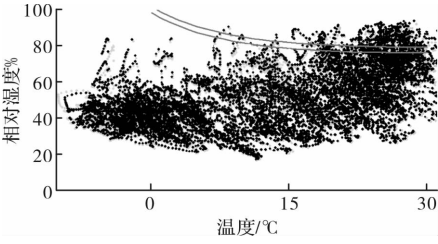


图 5 岩棉薄抹灰外保温系统内表面温湿度统计
($A=0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)

Fig. 5 Temperature and RH statistics for the inner surface of stone wool ETICS($A=0.1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$, $SD=1.2$)

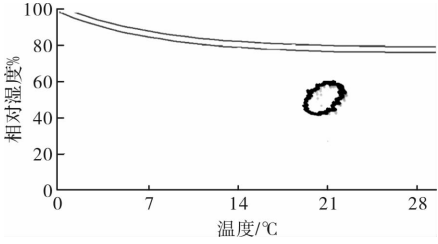


图 6 EPS 薄抹灰外保温系统内表面温湿度统计
Fig. 6 Temperature and RH statistics for the inner surface of EPS ETICS

由此可以发现, EPS 作为传统外保温系统, 尽管采用薄抹灰系统的构造做法和配套材料, 但其围护结构的内表面不存在发霉和结露的危险。但岩棉薄抹灰外墙外保温系统作为新兴的系统, 如果依然采用与 EPS 相同的指标和配套材料, 采用 Glaser 法的思路不对抹面层的液态水吸水系数做指标要求, 不仅会导致系统内部各个材料的含湿量大幅增加, 对外保温系统的耐久性造成影响, 还有可能导致基墙的内表面即室内侧出现结露和发霉, 降低了室内环境卫生品质。

3 结论

研究通过对岩棉薄抹灰外墙外保温系统的 Glaser 法的稳态计算, 以及热湿耦合(HAM)模型中系统含湿量的模拟和分析, 可以得到:

(1)在稳态水蒸气模型中, 当岩棉系统的抹面层水蒸气渗透阻与基墙匹配时, 可以控制系统内部的结露, 系统湿含量也不会明显增长。这也证明了既有标准规范中稳态计算对寒冷地区较为宽松的水蒸气渗透阻要求是能满足外保温系统质量含湿量控制的要求。

(2)热湿耦合(HAM)模型更贴近系统在现实中的应用情况, 液态水对系统内各个构造层的含湿量影响很大, 除对岩棉薄抹灰系统的水蒸气渗透阻提出要求外, 还应增加对系统抹面层吸水性能的要求, 以控制系统内的含湿量。

(3)岩棉薄抹灰外墙外保温系统与 EPS 系统不同, 如不对抹面层的液态水吸水系数做指标要求, 不仅会导致系统内部各个材料的含湿量大幅增加, 对外保温系统的耐久性造成影响, 还有可能导致基墙的内表面即室内侧出现结露和发霉, 降低了室内环境卫生品质。

研究通过稳态水蒸气模型和热湿耦合模型的计算和模拟分析, 提出了岩棉薄抹灰外墙外保温系统构造的水蒸气和液态水的分类控制指标建议, 为岩棉行业标准的编制奠定了技术基础。

参考文献 References

- [1] HENS H. IEA annex 14: condensation and energy, volume 3: catalogue of material properties [R]. Paris: International Energy Agency, 1991.
- [2] 中国建筑科学研究院. 民用建筑热工设计规范: GB

50176-93[S]. 北京:中国计划出版社,1993.

China Academy of Building Research. Code for thermal design of civil building: GB 50176-93[S]. Beijing: China Planning Press, 1993.

- [3] 中国建筑科学研究院. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 26-2010[S]. 北京:中国计划出版社, 2010.

China Academy of Building Research. Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings in Severe Cold and Cold Zones: JGJ 26-2010. [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

- [4] 中国建筑科学研究院. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 132-2010[S]. 北京:中国计划出版社, 2010.

China Academy of Building Research. Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone: JGJ 132-2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

- [5] 李魁山, 张旭. 周期性边界条件下多层墙体内热湿耦合迁移[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009(6): 814-818.

LI Kuishan, ZHANG Xu. Coupled heat and moisture transfer in multiwall under periodic boundary conditions[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009(6): 814-818.

- [6] 赵丹. 热湿气候地区加气混凝土墙体热湿耦合迁移特性研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.

ZHAO Dan. Research on coupled heat and moisture transfer characteristics of aerated concrete walls in hot and humid climate[D]. Changsha: Hunan University, 2013.

- [7] 刘向伟, 陈友明, 陈国杰, 等. 围护结构热湿耦合传递模型及简便求解方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2016(8): 7-12.

LIU Xiangwei, CHEN Youming, CHEN Guojie, et al. Coupled heat and moisture transfer model and simple solution method for building envelopes[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016(8): 7-12.

- [8] 张景欣, 郭兴国, 陈友明, 等. 墙体内热湿耦合过程的时域递归展开算法[J]. 土木建筑与环境工程, 2015(6): 147-152.

ZHANG Jingxin, GUO Xingguo, CHEN Youming, et al. A time domain recursive algorithm for solving the model of coupled heat and moisture transfer in building wall[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015(6): 147-152.

- [9] 孔凡红. 多层多孔介质层间界面处的热质耦合传递[J]. 太阳能学报, 2010(10):1281-1286.
KONG Fanhong. Coupled transfer of heat and mass at interface of multilayer porous media[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010(10):1281-1286.
- [10] 许锋, 苏向辉, 昂海松. 墙体内热湿耦合过程分析中的传递函数解析法[J]. 计算物理, 2004(5):461-466.
XU Feng, SU Xianghui, ANG Haisong. An analytical method utilizing transfer function for coupled heat and moisture transfer processes in walls[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2004(5):461-466.
- [11] 郑茂余, 孔凡红, 韩宗伟. 新建建筑外保温围护结构热质耦合传递[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009(4):118-122.
ZHENG Maoyu, KONG Fanhong, HAN Zongwei. Simulations on heat and mass coupling transfer in exterior insulated envelope of new building[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009(4):118-122.
- [12] MOLEND A C H, CRAUSSE P. LEMARCHAND D. The influence of capillary hysteresis effects on the humidity and heat coupled transfer in a non-saturated porous medium[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(6):1385-1396.
- [13] PEDERSEN C R. Prediction of moisture transfer in building constructions[J]. Building and Environment, 1992, 27(3):387-397.
- [14] KÜNZEL H M. Simultaneous heat and moisture transport in building components [R]. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1995.
- [15] 孔凡红. 新建建筑围护结构干燥特性及其影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- KONG Fanhong. Study on drying characteristics and its effect of newly-completed building envelope[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [16] 张华玲, 刘朝, 刘方, 等. 地下洞室多孔墙体热湿传递的数值模拟[J]. 暖通空调, 2006(12):9-13.
ZHANG Hualing, LIU Chao, LIU Fang, et al. Numerical simulation of heat and moisture transfer in porous wall in underground caves. [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006(12):9-13.
- [17] 孙喜山, 夏冬昱, 廉乐明. 用变物性法分析墙体内部结露问题[J]. 建筑科学, 2008(12):59-62.
SUN Xishan, XIA Dongyu, LIAN Leming. Analysis on inner condensation of building wall using varying property method [J]. Building Science, 2008(12):59-62.
- [18] 周辉, 钱美丽, 孙立新. 建筑材料热物理性能与数据手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
ZHOU Hui, QIAN Meili, SUN Lixin. Handbook for thermal property of building material [M]. China Building Press, 2010.
- [19] ROELS S. IEA Annex 41. Whole Building Heat, Air and Moisture Response. Subtask 2: Experimental Analysis of Moisture Buffering [M]. International Energy Agency, 2008.
- [20] KÜNZEL H M, ZIRKELBACH D. Influence of rain water leakage on the hygrothermal performance of exterior insulation systems [C]//8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Copenhagen: Nordic Journal of Building Physics, 2008:253-260.

(编辑 桂智刚)