

文章编号:1672-9331(2021)01-0102-09

武汉市梅雨季节农村住宅建筑围护结露影响因素

何叶从,周 欢

(长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要: 为探索建筑参数和居住者行为模式对武汉市梅雨季节农村住宅建筑围护结露的影响,基于试验验证,考虑窗墙比、外墙反射率、窗户开启模式 and 外墙保温层等因素,采用建筑热环境设计模拟工具包(designer's simulation toolkit,DeST)模拟了武汉市农村住宅室内热湿环境,采用结露率分析了梅雨季节建筑围护结露的情况。研究表明:武汉市农村住宅不宜盲目追求自然采光,窗墙比宜取为 0.6。当气温急剧升高时保持窗户关闭可以有效缓解结露问题。从防止结露角度考虑,武汉农村住宅不宜增设外墙保温层。

关键词: 结露率;农村住宅;室内热湿环境;窗墙比;外墙反射率

中图分类号: TU83

文献标志码: A

Influence factors of building envelope condensation in rural residences in Wuhan during plum rain season

HE Ye-cong, ZHOU Huan

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to explore the influence of building parameters and occupants' behavior patterns on building envelope condensation in Wuhan rural residences during plum rain season, based on experimental verification, considering the factors, such as window-wall ratio, external wall reflectivity, window opening mode and external wall insulation layer, the designer's simulation toolkit(DeST) was adopted to simulate the indoor thermal and humid environment of rural residences in Wuhan. The building envelope condensation in rural residences was analyzed during plum rain season by using condensation rate. The research results show that rural residences in Wuhan should not blindly pursue natural lighting, and the window-wall ratio should be 0.6. Keeping window closed when temperature rises sharply can effectively alleviate the condensation problem. From the view of anti-condensation, it is not suitable to add external wall insulation layer in rural residences in Wuhan.

Key words: condensation rate; rural residence; indoor thermal and humid environment; window-wall ratio; external wall reflectivity

建筑围护结露会使建筑围护结构保温性能劣化,会破坏墙体材料、缩短建筑使用寿命^[1],也会使墙体表面发霉^[2-3]、室内空气质量恶化,进而危

害人体健康。

在我国夏热冬冷地区,梅雨季节炎热、多雨、潮湿。在该类地区,当室外气温急剧升高时,由于

收稿日期:2020-09-18

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40303)

通讯作者:何叶从(1980—),男,副教授,主要从事建筑节能理论与技术方面的研究。E-mail: heyecong@163.com

围护结构的蓄热作用,建筑墙体温度上升缓慢,导致其内表面温度低于室内空气露点,墙体内表面出现结露现象。因此,该类地区建筑墙体内表面的结露风险远高于我国其他地区^[4]。而我国上述地区的农村建筑大多偏好设置大量玻璃窗,盲目提高窗墙比以改善建筑的采光,由此增大了建筑围护内表面的结露风险,使室内结露情况非常严重。

为了缓解建筑围护的结露问题,给居住者提供良好的居住环境,延长建筑的使用寿命,国内外学者对室内热湿环境及建筑围护防结露等问题做了大量研究。

在室内热湿环境方面,王福林等^[5]针对目前室内温度设定值不尽合理、导致能源浪费的问题,提出了一种基于居住者舒适感控制室内热环境的全新控制理念。贾洪愿等^[6]基于建筑热工过程,分析了室内热环境的主要影响因素,模拟了长江流域典型城市住宅的室内热环境。贺宇彦等^[7]以衡阳市住宅为例,利用建筑能耗模拟软件 Energy Plus 模拟了不同通风模式和通风量情况下夏热冬冷地区墙体内表面的热湿变化。孔文憬等^[8]基于长江流域被动式住宅夏季空调系统形式,研究发现优化围护结构可以降低恶劣气候条件下的峰值负荷,简化空调系统形式。阮方等^[9]研究了长江流域分室间歇用能对墙体内外保温节能的影响,基于研究结果指出该地区的建筑必须兼顾外墙保温和内墙保温。

在建筑围护防结露方面,王威等^[10]采用计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)建立三维非稳态数学模型,分析了通风强度、方式和监测角度与墙面湿度、温度分布之间的关系。You 等^[11]采用 CFD 研究了在高湿度气候下建筑物内表面的结露风险。基于多区域数值模型,Cho 等^[12]研究了在全年温暖潮湿气候下办公建筑的结露风险,提出了年结露率、结露频率和结露风险 3 个结露指标。杨岑等^[13]以某湿热工业厂房围护结构作为研究对象,基于自然对流和热传导,结合结露机理研究了围护外墙结露与室内环境温度、湿度及室外环境温度之间的关系。在夏热冬冷地区的梅雨季节,城市住宅可通过架空地板进行通风,

能有效缓解室内结露;传统民居住宅可采用封闭空气层架空室内地面,能起到明显的防潮作用^[14]。

近年来,有研究者认为辐射制冷有显著的降温效果,但相关研究较少。本研究针对目前我国农村地区建筑盲目提高窗墙比以改善自然采光、梅雨季节窗户的开启或开闭随机性很大和南方建筑是否应该保温防结露等问题,采用建筑热环境设计模拟工具包(designer's simulation toolkit, DeST)研究了窗墙比、外墙反射率、窗户开启模式及外墙保温层对武汉市梅雨季节农村住宅室内热湿环境和建筑围护结露的影响。

1 有效性验证

1.1 试验建筑

本研究通过模拟和实测图 1 所示试验建筑室内的热湿环境来验证本研究方法的有效性。试验房间为标准间,自然通风,平面尺寸为 6 m×8 m,层高为 4 m。在试验房间相邻两边各设置 1 个空调房间,室温恒定为 26℃,相对湿度为 50%。试验房间围护结构参数见表 1。

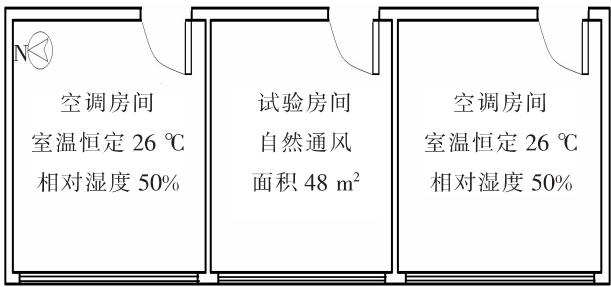


图 1 试验建筑

Fig. 1 Experimental building

表 1 试验房间围护结构参数

Table 1 Parameters of experimental room envelope

围护结构	厚度/mm	传热系数/(W·m ⁻² ·k ⁻¹)
外墙	300.0	1.070
内墙	210.0	1.385
屋顶	215.0	1.309
楼地	80.0	15.625
地板	145.0	3.350
内门	25.0	0.350
外门	25.3	0.350
窗户	6.0	5.700

注:窗户的太阳能透过率为 70%。

1.2 测试参数、仪器及周期

1.2.1 测试参数

测试参数包括:室内外温度、室内外含湿量、东南西北内墙、天花板和地板表面温度。

1.2.2 测试仪器

测试仪器有:① 干湿球温度表,量程 $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;② 非接触式红外测温仪(AS842A),量程 $-50\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;③ 水银温度计,量程 $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.3 测试周期

测试周期为:2019年10月16日—2019年11月15日(仅为验证研究方法的有效性)。

1.3 测点布置

试验房间东内墙的测点布置方案如图2所示。在墙体靠近梁、柱的区域,测点布置较密集,在中心略稀疏。东内墙面积为 32 m^2 ,可分为20个 1 m^2 和3个 4 m^2 的正方形截面,测点位于截面中心,共23个。

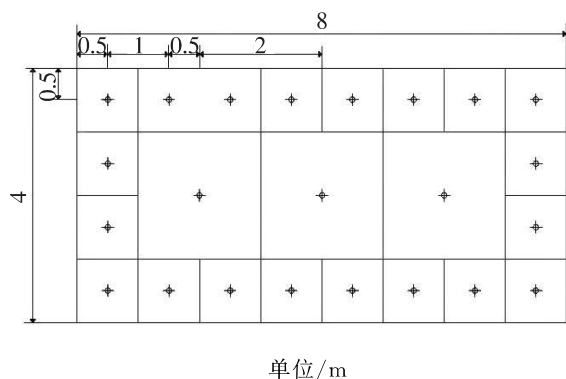
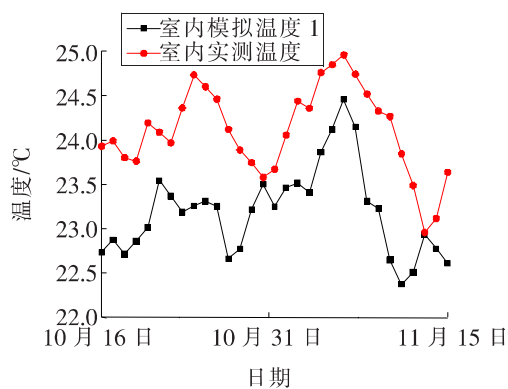


图2 东内墙测点布置方案

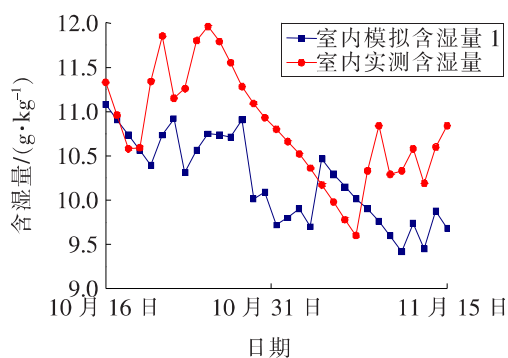
Fig. 2 Layout scheme of measuring points on east inner wall

测量仪器布置如下:① 室内中央分别悬挂3只水银温度计,测量室内逐时温度,测量结果取三者平均值;② 室内外各放置一个干湿球温度计,用于测量室内外逐时温度和逐时含湿量;③ 使用非接触式红外测温仪(AS842A)测量图2中所布测点的温度。试验房间其他围护内表面的测点布置和测量方法与东内墙类似。

方案一:将试验所测室外气象参数输入DeST进行模拟,得到室内模拟参数(即室内模拟温度1、室内模拟含湿量1、房间内表面模拟温度1),并与室内相应实测参数进行对比分析,结果见图3和图4。



(a) 温度



(b) 含湿量

图3 试验房间室内热湿环境对比

Fig. 3 Comparison of indoor thermal and humid environment of experimental room

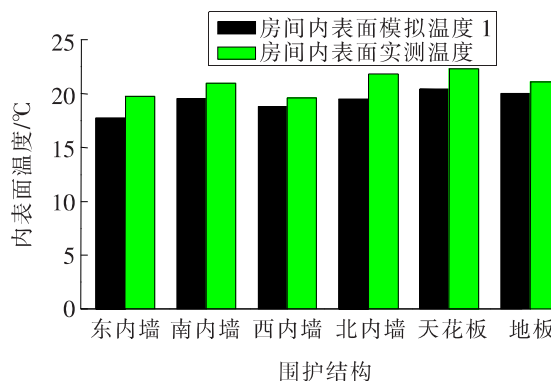
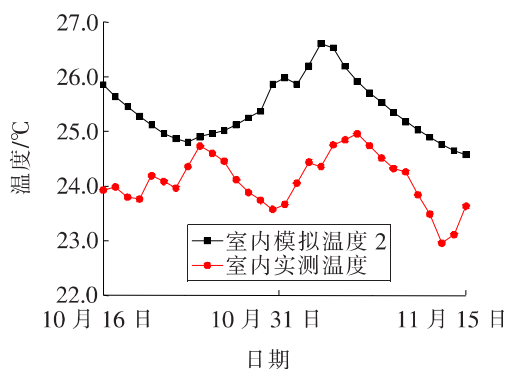


图4 试验房间内表面温度对比

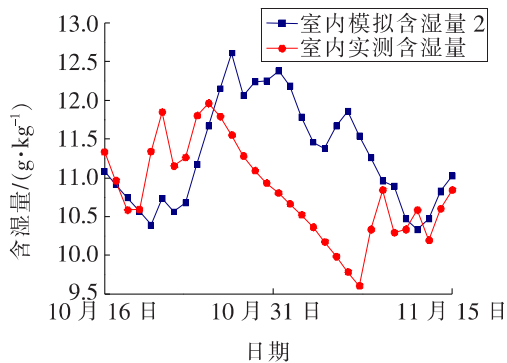
Fig. 4 Comparison of inner surface temperature of experimental room

分析图3~4可知:室内温度相对误差为 $0.12\%\sim 6.65\%$,室内含湿量相对误差为 $0.30\%\sim 10.71\%$,房间内表面温度相对误差为 $4.18\%\sim 10.67\%$,均在误差允许范围内。

方案二:根据武汉市典型气象年数据模拟得到室内参数(即室内模拟温度2,室内模拟含湿量2,房间内表面模拟温度2),并与室内相应实测参数进行对比分析,结果见图5和图6。



(a) 温度



(b) 含湿量

图 5 试验房间室内热湿环境对比

Fig. 5 Comparison of indoor thermal and humid environment of experimental room

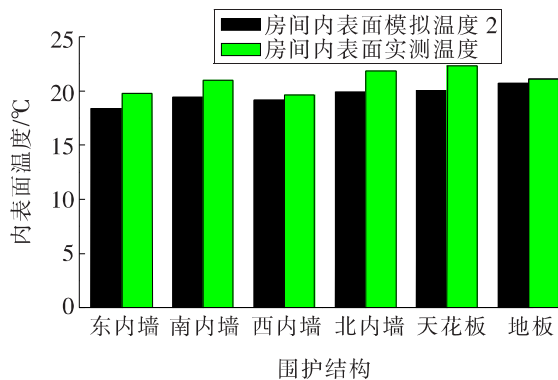


图 6 试验房间内表面温度对比

Fig. 6 Comparison of inner surface temperature of experimental room

分析图 5~6 可知:室内温度相对误差为 0.70%~9.81%,室内含湿量相对误差为 0.56%~10.17%,房间内表面温度相对误差为 2.04%~10.35%,均在误差允许范围内。

产生上述误差的主要原因为:① 有限的测点数量使测量值的代表性不够;② 用典型年气象参数代替实际室外气象参数带入 DeST,也会产生一定的误差。

综上所述,本研究采用的研究方法是可行的。

2 武汉市农村住宅模型

2.1 模型介绍

武汉市位于我国夏热冬冷地区的中部区域,属亚热带季风气候区,农村住宅多为 2~3 层建筑。本研究结合武汉市农村建筑特点,采用 DeST 建立了如图 7~9 所示的 3 层建筑模型。该模型的建筑总面积为 600 m²,层高为 3 m,南北朝向,包含 9 个卧室、2 个起居室、3 个楼梯间、3 个客厅、2 个卫生间和 1 个厨房,共 20 个房间。该模型充

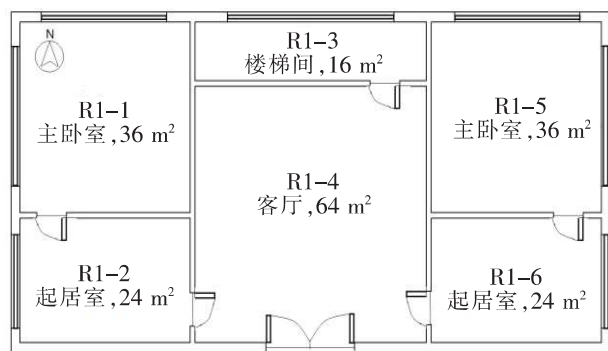


图 7 一层平面图

Fig. 7 Plan of the first floor

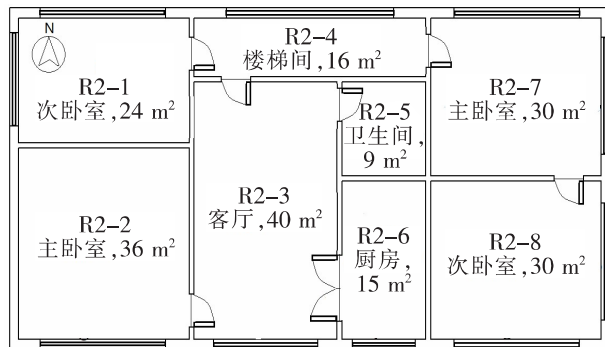


图 8 二层平面图

Fig. 8 Plan of the second floor

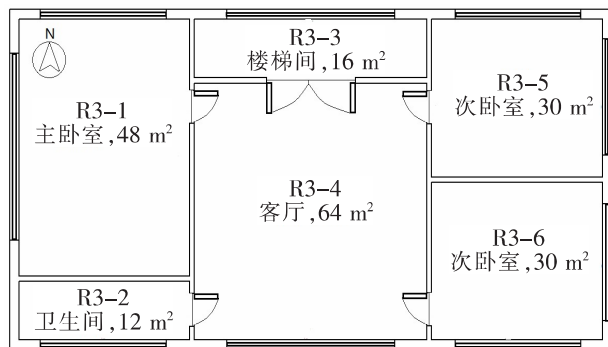


图 9 三层平面图

Fig. 9 Plan of the third floor

分考虑武汉市农村住宅特点,设有顶层、中层和底层,且涵盖了所有常规房间类型。因此,该模型可作为武汉市农村住宅围护结露影响因素研究的代表性建筑。

参考传统农村建筑,该模型的建筑热工参数的设置见表2,房间热湿负荷的设置见表3。房间主要通过窗户通风,通风模式分为2种:自然通风的全开窗模式和没有通风的全关窗模式。

表2 建筑热工参数

Table 2 Building thermal parameters

围护结构	厚度/mm	传热系数/(W·m ⁻² ·k ⁻¹)	围护结构	厚度/mm	传热系数/(W·m ⁻² ·k ⁻¹)
外墙	320.0	1.130	地板	125.0	3.054
内墙	220.0	1.515	内门	25.0	0.350
屋顶	235.0	1.334	外门	25.3	0.350
楼地	80.0	15.625	窗户	6.0	5.700

注:窗户的太阳能透过率为70%。

表3 房间热湿负荷

Table 3 Thermal and humid loads of rooms

房间类型	作息时间	人数	人均产湿量/(g·h ⁻¹)	人均产热量/W
主卧室/次卧室	0:00—6:00	2		
	6:00—22:00	0	61	53
	22:00—24:00	2		
起居室	0:00—6:00	0		
	6:00—10:00	2	61	53
	10:00—24:00	0		
客厅	0:00—18:00	0		
	18:00—22:00	4	61	53
	22:00—24:00	0		
楼梯间	0:00—24:00	1	61	53
卫生间	0:00—24:00	1	102	60
	0:00—18:00	0		
厨房	18:00—20:00	1	102	60
	20:00—24:00	0		

2.2 主要参数

2.2.1 露点

《民用建筑热工设计规范》(GB 50176-2016)规定:当房间内表面温度低于空气露点时,房间内表面会产生结露。由于 DeST 直接输出的参数中

不包含空气露点,为了能直观地了解房间的结露情况,需推导出露点的计算公式。

$$d = \frac{622P_q}{B - P_q} \quad (1)$$

当 t 为 $0 \sim 93$ °C 时:

$$t = 6.54 + 14.526 \ln P_q + 0.738 (\ln P_q)^2 + 0.094 (\ln P_q)^3 + 0.459 (\ln P_q)^{0.198} \quad (2)$$

根据式(1)~(2)可推导出露点计算公式,如下式所示:

$$t = 6.54 + 14.526 \ln \left(\frac{101.33d}{622 + d} \right) + 0.738 \left(\ln \left(\frac{101.33d}{622 + d} \right) \right)^2 + 0.094 \left(\ln \left(\frac{101.33d}{622 + d} \right) \right)^3 + 0.459 \left(\ln \left(\frac{101.33d}{622 + d} \right) \right)^{0.198} \quad (3)$$

式中: t 为露点,°C; d 为房间含湿量,g/kg; P_q 为水蒸气分压强,kPa; B 为大气分压强,取当地大气压强 101.325 kPa。

由式(3)可知:在水蒸气分压力和大气压力恒定的情况下,露点与房间含湿量成正比。因此,本研究通过式(3)计算所得的露点也可作为室内含湿量变化的判断依据。

2.2.2 窗墙比

《民用建筑热工设计规范》(GB 50176-2016)规定:窗墙比是指建筑特定朝向的外窗总面积与同一朝向的整个墙体面积(包括窗面积)的比值。

2.2.3 结露率

本研究用一个新的指标——结露率 X 来表征房间内的结露问题,其表达式为:

$$X = \frac{H_L}{H_M} \quad (4)$$

式中: H_L 为墙面温度低于空气露点的小时数; H_M 为总小时数, $0 \leq X \leq 1$ 。当 $X \geq 0$ 时,说明房间内有结露现象,即室内热湿环境恶化。 X 值越大房间内结露现象越严重。

3 结果与讨论

基于上述已验证的研究方法,采用 DeST 研究窗墙比、外墙反射率、窗户开启模式(开/关)、外

墙保温层对武汉市梅雨季节农村住宅室内热湿环境和建筑围护结露的影响。所选建筑窗墙比为 0.5,外墙反射率为 0.45,窗户开启模式为全开窗,有外墙保温层。选取 R1-1 主卧室作为标准间进行研究。全年结露率模拟结果见图 10。

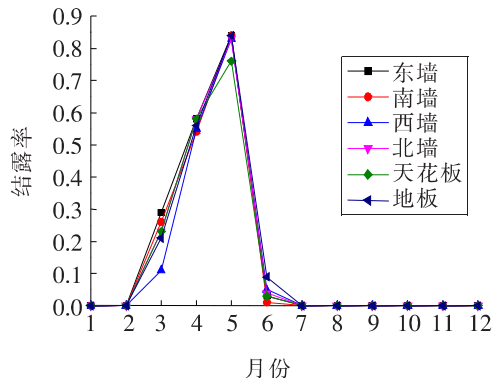


图 10 房间内表面结露率的年变化

Fig. 10 Annual variation of condensation rate of room inner surfaces

图 10 显示了房间内表面结露率的年变化过程。如图 10 所示,在 2 月中旬至 6 月中旬武汉市农村建筑内表面均可能结露。2—3 月、6—7 月结露现象较轻微,仅发生在少数气温突然升高的时候,持续时间短;3—5 月结露问题严重且结露率呈上升趋势。其中,3 月初结露率约为 0.2~0.3,4 月初结露率已增大到 0.6,5 月结露问题最严重,结露率高达 0.75~0.85,之后结露率急剧下降。因此,结露影响因素研究的重点在 3—5 月,本研究选择 4 月 1 日至 5 月 31 日为模拟时间周期。

3.1 窗墙比的影响

窗墙比是影响建筑室内环境的主要参数。当窗墙比为 0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 时,室内热湿环境和建筑围护结露情况如图 11~13 所示。

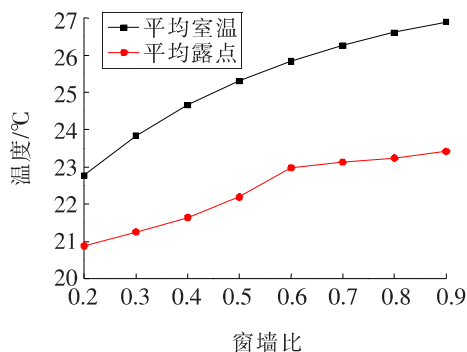


图 11 平均室温、平均露点随窗墙比的变化

Fig. 11 Variation of average room temperature and dew point with window-wall ratio

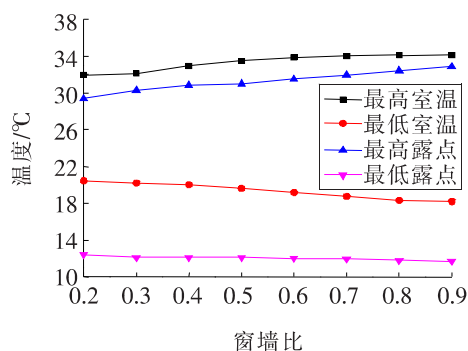


图 12 最高、最低室温和露点随窗墙比的变化

Fig. 12 Variation of maximum and minimum room temperature and dew point with window-wall ratio

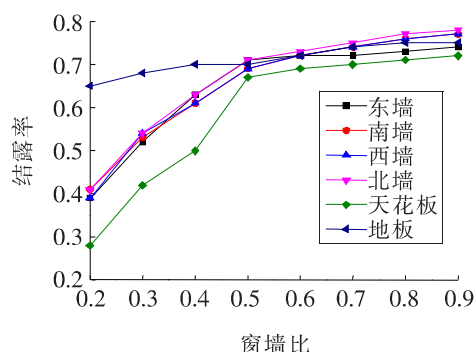


图 13 房间内表面结露率随窗墙比的变化

Fig. 13 Variation of condensation rate of room inner surfaces with window-wall ratio

图 11 显示了平均室温、平均露点随窗墙比的变化过程。由图 11 可知,平均室温和平均露点都随着窗墙比的增大而升高。当窗墙比由 0.2 增至 0.9 时,平均室温由 22.78 °C 升至 26.90 °C,平均露点由 20.88 °C 升至 23.42 °C。

图 12 显示了最高、最低室温和露点随窗墙比的变化过程。由图 12 可知,当窗墙比由 0.2 增至 0.9 时,最高室温和最高露点呈上升趋势,分别升高了 2.14 °C 和 3.44 °C,而最低室温和最低露点呈下降趋势,分别降低了 2.24 °C 和 0.68 °C。说明窗墙比的大小在一定程度上决定了室内外热湿交换速度,窗墙比越大,室内热湿环境越容易受到室外气候变化的影响。

图 13 显示了房间内表面结露率随窗墙比的变化过程。由图 13 可知,当窗墙比由 0.2 增至 0.9 时,房间所有内表面的结露率都呈上升趋势。增大窗墙比对地板结露率影响较小,当窗墙比为 0.2 时,地板结露率为 0.65;当窗墙比为 0.9 时,地板结露率为 0.75,仅增加 0.1。其他房间内表面

结露率的变化可分为两个阶段:①当窗墙比从0.2增至0.5时,结露率上升速率较大,增大至0.7左右;②当窗墙比从0.6增至0.9时,结露率上升速率变小,增长幅度约为0.05;③当窗墙比达到0.7时,结露率基本趋于稳定。说明盲目追求室内采光而增大建筑窗墙比会大大增加室内结露风险,也会增大建筑能耗。因此,有必要进一步规范武汉市农村住宅建筑,不宜盲目增大窗墙比,应该在窗墙比与更好的自然采光之间找到最佳平衡点。

3.2 外墙反射率的影响

当外墙反射率为0.45,0.60,0.70,0.80,0.96时,室内热湿环境和建筑围护结露情况如图14~16所示。

图14显示了平均室温、平均露点随外墙反射率的变化过程。由图14可知,平均室温和平均露点随外墙反射率的增大而小幅降低。当外墙反射率由0.45增至0.96时,平均室温由25.31℃降至25.02℃,平均露点由22.19℃降至21.53℃。说明外墙反射率对平均室温和平均露点的影响较小。

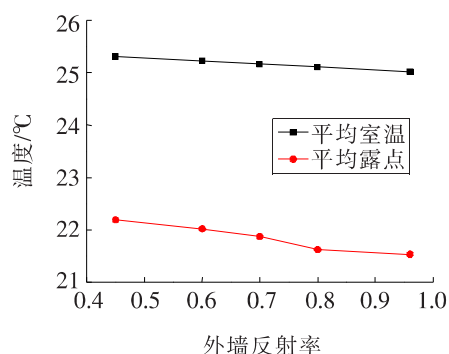


图14 平均室温、平均露点随外墙反射率的变化

Fig. 14 Variation of average room temperature and dew point with external wall reflectivity

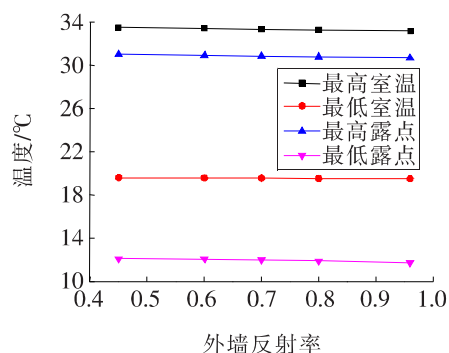


图15 最高、最低室温和露点随外墙反射率的变化

Fig. 15 Variation of maximum and minimum room temperatures and dew point with external wall reflectivity

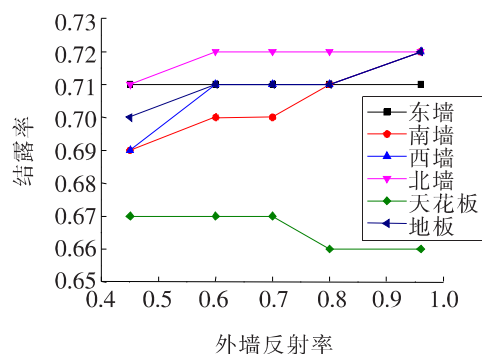


图16 房间内表面结露率随外墙反射率的变化

Fig. 16 Variation of condensation rate of room inner surfaces with external wall reflectivity

图15显示了最高、最低室温和露点随外墙反射率的变化过程,图中4条直线近乎水平。由此说明外墙反射率对试验房间室内热湿环境的影响很小,可忽略不计。

图16显示了房间内表面结露率随外墙反射率的变化过程。由图16可知,随外墙反射率的增大,东内墙结露率没有发生变化,天花板结露率略有降低,其他内表面结露率呈增大趋势,增长幅度为0.0~0.3。说明增大外墙反射率对房间的结露情况影响不大。

综上所述,从温度和房间结露率的变化规律来看,外墙反射率不是影响室内热湿环境的主要因素。这主要是因为除外墙反射率外,室外温湿度、太阳辐射、风速和风向的变化、相邻房间之间的热湿交换、室内的热湿源等因素对室内热湿环境均有一定的影响。因此,通过增大外墙反射率进行辐射冷却是不可行的。

3.3 窗户开启模式的影响

在建筑物理模型参数保持不变的情况下,研究在全开窗和全关窗两种模式下室内热湿环境和建筑围护的结露情况,结果见表4和表5。

表4显示了全开窗和全关窗两种模式下的室内热湿环境。由表4可知,当房间处于全关窗模式时,平均室温和平均露点低于全开窗模式。在房间窗户全部关闭后,平均室温降低了0.66℃,平均露点降低了1.53℃。表5显示了全开窗和全关窗两种模式下的房间内表面结露率。由表5可知,全关窗模式下的结露率低于全开窗模式的。在关闭房间窗户后,房间内表面结露率减小幅度为0.04~0.23,天花板结露率减小幅度最大,地板结露率减小幅度最小。由此可见,关闭窗户能够有效降低天花板结露风险。

表 4 全开窗与全关窗两种模式下室内的热湿环境

Table 4 Indoor thermal and humid environment in two modes of fully open and fully closed windows

窗户开启模式	平均室温	最高室温	最低室温	平均露点	最高露点	最低露点
全开窗	25.31	33.51	19.62	22.19	31.02	12.10
全关窗	24.65	34.77	18.84	20.66	30.12	12.01

表 5 全开窗与全关窗两种模式下房间内表面结露率

Table 5 Condensation rate in two modes of fully open and fully closed windows

窗户开启模式	东墙	南墙	西墙	北墙	天花板	地板
全开窗	0.71	0.69	0.69	0.71	0.67	0.70
全关窗	0.65	0.56	0.55	0.55	0.44	0.66

室内热湿环境主要由室内外热湿交换和室内热湿源形成。在室内热湿源恒定不变的情况下,通

过窗户与外界进行热湿交换是影响室内热湿环境的主要途径。在梅雨季节,气候炎热、多雨,热量和水蒸气从室外输入室内,关闭窗户则会减少水蒸气进入室内。因此,在梅雨季节,保持窗户紧闭可以有效遏止室内环境恶化,降低墙面结露风险。

3.4 外墙保温层的影响

在建筑物理模型参数保持不变的情况下,研究有无外墙保温层时建筑室内热湿环境和建筑围护的结露情况,结果见表 6 和表 7。

表 6 有无外墙保温层情况下的室内热湿环境

Table 6 Indoor thermal and humid environment with or without external wall insulation layer

外墙保温层	平均室温	最高室温	最低室温	平均露点	最高露点	最低露点
有	25.31	33.51	19.62	22.19	31.02	12.10
无	24.45	32.05	18.31	20.93	30.59	11.51

表 7 有无外墙保温层情况下的房间内表面结露率

Table 7 Condensation rate of room inner surfaces with or without external wall insulation layer

外墙保温层	东墙	南墙	西墙	北墙	天花板	地板
有	0.71	0.69	0.69	0.71	0.67	0.70
无	0.54	0.62	0.53	0.64	0.49	0.57

表 6 为建筑有无外墙保温层情况下的室内热湿环境。由表 6 可知,有外墙保温层时,建筑的平均室温 and 平均露点均高于无外墙保温层的情况,分别高了 0.86℃和 1.26℃。由此可见,外墙保温层可以提高平均室温 and 露点。表 7 为建筑有无外墙保温层情况下的房间内表面结露率。由表 7 可知,无外墙保温层时的房间内表面结露率低于有外墙保温层时的。当建筑不设外墙保温层时,房间内表面结露率降低幅度为 0.07~0.18。天花板结露率降低幅度最大,南内墙结露率降低幅度最小。

综上所述,建筑外墙保温层在整体上使室温和露点有所升高,但同时也增大了建筑围护的结

露风险,使得室内结露情况更为严重。因此,从房间结露角度考虑,武汉农村住宅并不适合增设外墙保温层。

4 结论

本研究以武汉农村 3 层住宅模型为例,考虑居住者行为与建筑构造,基于试验验证,采用 DeST 研究窗墙比、外墙反射率、窗户开启模式(开/关)、外墙保温层等因素对武汉市梅雨季节室内热湿环境和建筑围护结露的影响,并得出以下结论:

- 1) 从 3 月下旬开始,武汉市农村住宅普遍存在结露问题。当窗墙比由 0.2 增至 0.9 时,室温、露点随窗墙比的增大而升高,结露率随窗墙比的增大而增大,其增长速率在窗墙比为 0.6 时明显减小。外墙反射率对室内温度、露点和结露率的影响很小。在梅雨季节,关闭窗户对室内温度影响不大,但会大大降低结露率。设置外墙保温层会使室内温度有所升高,结露率有所增大。
- 2) 从防结露角度考虑,武汉市农村住宅窗墙

比宜取为0.6。提高外墙反射率降低结露风险并不可行。在梅雨季节,保持窗户关闭可有效降低建筑围护结露风险。武汉市农村住宅不宜增设外墙保温层。

〔参考文献〕

- [1] Cho B, Park D, Kim J, et al. Study on the heat-moisture transfer in concrete under real environment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 13(2): 124-129.
- [2] 王一丁. 不同送风速度下空调房间的气流组织数值模拟[J]. 建筑节能, 2017, 33(5): 33-36.
WANG Yi-ding. Numerical simulation of air distribution in air-conditioned rooms at different air supply speeds[J]. Building Energy Efficiency, 2017, 33(5): 33-36.
- [3] 于水. 严寒地区地下室外墙内壁热湿特性分析[J]. 建筑节能, 2016, 13(1): 48-52.
YU Shui. Analysis of thermal and moisture characteristics of basement exterior wall in severe cold area[J]. Building Energy Conservation, 2016, 13(1): 48-52.
- [4] Moon H, Ryu S, Kim J. The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 75(2): 439-446.
- [5] 王福林, 陈哲良, 江亿, 等. 基于热感觉的室内热环境控制[J]. 暖通空调, 2015, 45(10): 72-75.
WANG Fu-lin, CHEN Zhe-liang, JIANG Yi, et al. Indoor thermal environment control based on thermal sensation[J]. Heating Ventilation Air Conditioning, 2015, 45(10): 72-75.
- [6] 贾洪愿, 李百战, 姚润明, 等. 探讨长江流域室内热环境营造: 基于建筑热过程的分析[J]. 暖通空调, 2019, 49(4): 1-11, 42.
JIA Hong-yuan, LI Bai-zhan, YAO Run-ming, et al. Discussion on the construction of indoor thermal environment in Yangtze River Basin: based on the analysis of building thermal process[J]. Heating Ventilation Air Conditioning, 2019, 49(4): 1-11, 42.
- [7] 贺宇彦, 罗清海, 涂敏, 等. 夏热冬冷地区住宅墙体内部表面霉菌风险分析[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(40): 21-26.
HE Yu-yan, LUO Qing-hai, TU Min, et al. Risk analysis of mold on the inner surface of residential walls in hot summer and cold winter areas[J]. Thermal Ventilation and Air Conditioning of Buildings, 2019, 38(40): 21-26.
- [8] 孔文僚, 龚延风, 于昌勇, 等. 夏热冬冷地区被动式居住建筑夏季空调系统形式研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(7): 112-117.
KONG Wen-liao, GONG Yan-feng, YU Chang-yong, et al. Study on the air conditioning system form of passive residential buildings in hot summer and cold winter areas in summer[J]. Heating Ventilation Air Conditioning, 2017, 47(7): 112-117.
- [9] 阮方, 钱晓倩, 朱耀台, 等. 分室间歇用能对墙体内保温节能效果的影响[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2016, 50(1): 1-7.
RUAN Fang, QIAN Xiao-qian, ZHU Yao-tai, et al. Influence of intermittent energy utilization in different rooms on energy conservation of insulation inside and outside walls[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2016, 50(1): 1-7.
- [10] 王威, 姜建中, 王戎, 等. 利用 CFD 模拟通风小室壁面结露分布的规律[J]. 制冷与空调, 2019, 33(5): 556-561.
WANG Wei, JIANG Jian-zhong, WANG Rong, et al. Simulation of condensation distribution on the wall of ventilation chamber by CFD[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2019, 33(5): 556-561.
- [11] You S, Li W, Ye T, et al. Study on moisture condensation on the interior surface of buildings in high humidity climate[J]. Building and Environment, 2017, 12(5): 74-82.
- [12] Cho W, Iwamoto S, Kato S. Condensation risk due to variations in air tightness and thermal insulation of an office building in warm and wet climate[J]. Energies, 2016, 9(11): 875-881.
- [13] 杨岑, 赵顺安, 李陆军, 等. 湿热环境建筑围护结构的结露特性研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 4(16): 290-296.
YANG Cen, ZHAO Shun-an, LI Lu-jun, et al. Study on condensation characteristics of building envelope in hot and humid environment[J]. Journal of China Academy of Water Resources and Hydropower Sciences, 2018, 4(16): 290-296.
- [14] 南艳丽. 川渝地区夯土民居架空地面防潮设计[J]. 建筑科学, 2015, 21(6): 90-94.
NAN Yan-li. Damp-proof design of rammed earth dwellings in Sichuan and Chongqing[J]. Architectural Science, 2015, 21(6): 90-94.