

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.005

西北乡村建筑冬季墙体构造界面结露研究

朱轶韵, 韩艳, 桑国臣

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 西北地区冬季严寒干燥, 室内外热湿环境差异显著, 由于乡村建筑体形系数大, 冬季墙体结露问题较为突出。结合对乡村建筑冬季最冷月室内热状况的调研与测试, 以宁夏地区乡村建筑为例, 采用稳态热湿传递分层分析法, 解析墙体构造界面的结露特点与影响因素。结果表明: 墙体构造方式对构造界面结露情况影响较大, 其中无保温和外保温节能构造墙体不易出现结露, 而内保温节能构造墙体的构造界面结露风险较大, 并且保温层厚度越大, 界面结露越严重。

关键词: 西北地区; 乡村建筑; 构造界面; 结露

中图分类号: TU241.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)03-0278-05

Interfacial condensation of rural building external walls in Northwest Areas in winter

ZHU Yiyun, HAN Yan, SANG Guochen

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: It is very cold and dry in winter in northwest areas, and the differences of indoor and outdoor thermal and humidity are obvious. Due to the large rural building shape coefficient, the winter condensation of wall exists clearly. Based on survey and testing on indoor thermal conditions for the rural buildings in coldest months in winter, taking the rural buildings in Ningxia areas for examples, the paper employs the steady-state heat and moisture transfer stratified analysis method, and analyses the characteristics and influential factors of condensation of wall construction interface. Results show that the model of wall construction affects the condensation of construction interface greatly, of which the wall with non-insulation and external insulation energy saving structure is not easy for the condensation to occur, and that the construction interface of wall with internal insulation energy saving structure risks large condensation; accordingly, the thicker the thermal insulation layer is, the more serious the interfacial condensation appears.

Key words: Northwest Areas; rural building; construction interface; condensation

西北地区地处内陆, 属于温带大陆性气候, 冬季严寒、空气干燥, 特殊的气候条件增大了乡村建筑围护结构结露的风险。墙体结露现象易造成围护结构发生霉变, 形成霉菌, 恶化室内环境, 对建筑居住者的身体健康造成危害, 并会损坏建筑结构, 影响建筑使用寿命^[1]。已有研究对围护结构内表面结露现象关注较多, 但对构造界面的内部结露现象关注较少^[2], 故难以对墙体防结露设计进行有效指导。本文以宁夏中卫地区为例, 根据当地乡村建筑围护结构受到的热湿作用, 对该地区乡村建筑围护结构内表面和构造各界面结露情况进行了综合分析。

1 乡村建筑及其室内外热状况调研

宁夏回族自治区中卫市位于西北腹地, 处于宁、甘、蒙三省区交汇地带, 其气候特征与建筑形式均具有西北地区的代表性^[3]。该地区常年气压较低, 年平均气压为 876.1 hPa^[4], 年平均相对湿度 54.7%^[4], 年平均气温 5℃~10℃^[4]。该地区冬季寒冷漫长, 室内温湿度较高, 水蒸气分压力较大。室外温湿度较低、水蒸气分压力较小, 水蒸气由内向外渗透, 易在围护结构表面或内部发生冷凝或结露。

课题组于 2015 年 1 月对宁夏中卫地区乡村建

收稿日期: 2016-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278419, 51378424)

作者简介: 朱轶韵, 女, 博士, 副教授, 研究方向为建筑节能、绿色建筑。E-mail: zyyun@xaut.edu.cn

筑进行了实地调研测试。当地建筑外墙多为 370 mm 粘土实心砖,内外 20 mm 厚抹灰,墙体热阻为 $0.5(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$,传热系数为 $1.54 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。通过热像仪测得典型乡村建筑堂屋墙体表面温度分布,如图 1 所示。

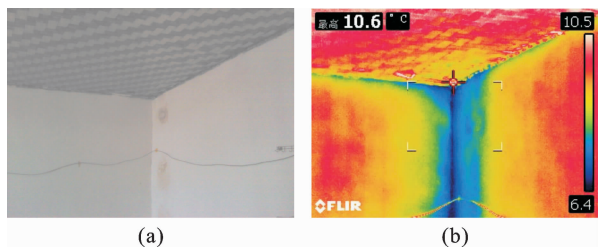


图 1 测试建筑外墙内壁面实景及温度分布状况
Fig.1 Inside of test building exterior wall and real temperature distribution

由图 1 可见,围护结构内表面温度最低为 $6.4 \text{ }^\circ\text{C}$,位于墙角部位;最高温度为 $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$,位于屋顶及外墙中心部位。对当地现有建筑的调研测试可知:建筑屋面多采用现浇混凝土板加一定的保温构造,屋面基本不会出现结露现象,因此研究侧重于复合墙体构造界面及墙角等部位的结露问题。

2 室内露点温度及墙体热湿传递

2.1 室内露点温度

露点温度是在大气压力一定、空气含湿量不变的情况下,未饱和的空气因冷却而达到饱和状态时的温度,用 $t_d(\text{ }^\circ\text{C})$ 表示^[5]。

宁夏中卫地区属于寒冷气候区,根据“农村居住建筑节能设计标准(GB/T 50824—2013)”^[6]和“民用建筑热工设计规范(GB 50176—1993)”^[7]对居住建筑室内热环境的要求,乡村建筑冬季室内计算温度取 $14 \text{ }^\circ\text{C}$,室内相对湿度取 60%。

相对湿度是指在某一温度下空气中的实际水蒸气分压力与同温度下饱和水蒸气分压力的百分比^[5]。饱和水蒸气分压力是指密闭条件下水的气相与液相达到平衡。饱和水蒸气分压力数值与温度相关,当温度上升时,对应的饱和水蒸气分压力随之提高。相对湿度计算公式见式(1)。

$$\varphi = \frac{P}{P_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中, φ 为空气相对湿度; P 为空气的实际水蒸气分压力(Pa); P_s 为同温下的饱和水蒸气分压力(Pa)。

由文献[5]可知,当室内空气温度为 $14 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,所对应的饱和水蒸气压为 1597.2 Pa 。进而由公式(1)得出:室内相对湿度为 60% 时的实际水蒸气分压力为 958 Pa 。由文献[5]中的“饱和水蒸气分压

力与露点温度的对应关系”可知,当饱和水蒸气分压力为 958 Pa 时,其所对应的空气温度为 $6.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,依据露点温度的定义:该温湿度条件下的乡村建筑室内露点温度为 $6.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 墙体内表面温度与最易结露月份

由于居住建筑冬季室内外热湿环境相差较大,室内的热量和水蒸气会经由墙体向室外传递,因此易在墙体内表面或墙角内表面处发生结露现象。墙面和墙角的内表面温度分别为 θ_n 、 θ'_n ,计算公式见式(2)和(3)^[7]:

$$\theta_n = t_n - \frac{(t_n - t_e)}{R_0} R_n \quad (2)$$

式中, θ_n 、 t_n 和 t_e 分别为内壁面温度($^\circ\text{C}$)、室内空气计算温度($^\circ\text{C}$)和室外空气计算温度($^\circ\text{C}$); R_n 为内壁面换热阻,取 $0.11(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$; R_0 为墙体传热阻,是传热系数 K 的倒数($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)。

$$\theta'_n = t_n - \frac{(t_n - t_e)}{R_0} R_n \xi \quad (3)$$

式中, ξ 为比例系数,取 1.73 ^[7]。

基于文献[4]给出的当地冬季各月室外气象数据,利用公式(2)、(3)及当地实际建筑墙体热工参数,计算冬季各月份最不利条件下建筑墙面及墙角内表面温度。

冬季各月份最不利室外气象条件下建筑墙面及墙角内表面温度情况,见图 2。

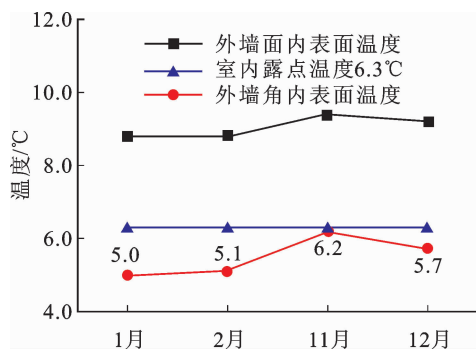


图 2 冬季各月份围护结构内表面温度
Fig.2 Surface temperatures of building envelope in winter

由图 2 可见,冬季各月墙面内表面温度均明显高于室内露点温度,不易产生结露现象,而墙角内表面温度在冬季各月最不利室外气象条件下均低于室内露点温度。同时,由图 2 中的外墙内表面温度变化情况可以看出,外墙体内表面温度和外墙角内表面温度存在逐月变化的规律。其中,11 月的外墙体内表面温度及墙角内表面温度最高,12 月及 2 月两种内表面温度有所降低,1 月两种内表面温度均达到最低值,故 1 月是最易发生结露的月份。

2.3 墙体构造界面温度与水蒸气分压力

节能墙体构造较为复杂,通常是由多种不同性能的材料层复合而成。由于最冷月份(1月)建筑外墙的室内外两侧温湿度差异较大,因此热量和水蒸气会经墙体由内向外传递。室内外热湿传递的影响因素有所不同,热传递是受材料层的热阻影响,而湿传递是受材料层的水蒸气渗透阻影响,墙体材料的各界面层会发生温湿度的非同步变化。因此,构造界面的结露与否,需综合考虑界面层的温度及水蒸气分压力情况。

墙体构造界面的温度 θ_m 及水蒸气分压力 P_m 计算见式(4)和(5)^[5]。

$$\theta_m = t_n - \frac{(t_n - t_e)}{R_0} (R_n + \sum_{j=1}^{m-1} R_j) \quad (m = 2, 3, \dots, i) \quad (4)$$

式中, θ_m 为构造界面温度(°C); R_j 为第 j 层材料热阻($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$); $\sum_{j=1}^{m-1} R_j$ 为从室内一侧算起,由第 1 层至 $m-1$ 层的热阻之和。

$$P_m = P_n - \frac{(P_n - P_e)}{H_0} \sum_{j=1}^{m-1} H_j \quad (m = 2, 3, \dots, i) \quad (5)$$

式中, P_m 、 P_n 和 P_e 分别为构造界面及室内外的实际水蒸气分压力(Pa); H_0 和 H_j 分别为围护结构的总水蒸气渗透阻和第 j 层材料的水蒸气渗透阻($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}/\text{g}$); $\sum_{j=1}^{m-1} H_j$ 为从室内侧起第 1 层至 $m-1$ 层的水蒸气渗透阻之和。

构造界面的饱和水蒸气分压力,根据 P_m 由文献[5]附录 2 查得。

在墙体构造界面上,当计算的实际水蒸气分压力大于饱和水蒸气分压力时,就会在界面上发生冷凝现象^[5]。

3 墙体结露分析与讨论

3.1 墙体构造方式

综合考虑到当地技术经济条件和材料资源状况,本文选取 4 种墙体构造,就不同保温构造和墙体厚度对墙体结露的影响进行分析,其中保温材料选取水泥膨胀珍珠岩,其价格低廉,导热系数小,对于乡村地区具有较强的适应性。四种墙体构造组成和热工参数见表 1。

表 1 4 种墙体构造组成和热工参数
Tab. 1 Four types of wall structure and thermal parameters

构造类型	材料层	厚度/mm	导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	热阻/ [$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}$]	水蒸气渗透系数/ [$\text{g} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}$]	水蒸气渗透阻/ [$(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}) \cdot \text{g}^{-1}$]
构造 1	水泥砂浆(内)	20	0.930	0.022	0.000 090 0	222.22
	实心粘土砖	240	0.810	0.296	0.000 105 0	2 285.71
	水泥砂浆(外)	20	0.930	0.022	0.000 090 0	222.22
构造 2	水泥砂浆(内)	20	0.930	0.022	0.000 090 0	222.22
	实心粘土砖	370	0.810	0.457	0.000 105 0	3 523.81
	水泥砂浆(外)	20	0.930	0.022	0.000 090 0	222.22
构造 3 (内保温)	聚合物砂浆(内)	3	0.930	0.003	0.000 059 7	50.25
	水泥膨胀珍珠岩	50	0.160	0.313	0.000 191 0	261.78
	水泥砂浆	20	0.930	0.022	0.000 090 0	222.22
	实心粘土砖	370	0.810	0.457	0.000 105 0	3 523.81
	水泥砂浆(外)	20	0.930	0.022	0.000 090 0	222.22
构造 4 (外保温)	水泥砂浆(内)	20	0.930	0.022	0.000 090 0	222.22
	实心粘土砖	370	0.810	0.457	0.000 105 0	3 523.81
	水泥砂浆	20	0.930	0.022	0.000 090 0	222.22
	水泥膨胀珍珠岩	50	0.160	0.313	0.000 191 0	261.78
	聚合物砂浆(外)	3	0.930	0.003	0.000 059 7	50.25

注:①围护结构的内表面换热阻取 $0.11(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$,外表面换热阻取 $0.04(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ^[7];②表 1 中“构造 1”的总传热阻为 $0.489(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$,总水蒸气渗透阻为 $2 730.16(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})/\text{g}$;“构造 2”的总传热阻为 $0.650(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$,总水蒸气渗透阻为 $3 968.25(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})/\text{g}$;“构造 3”和“构造 4”的总传热阻均为 $0.966(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$,总水蒸气渗透阻均为 $4 280.29(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})/\text{g}$ 。

3.2 墙角结露分析

通过式(2)和式(3)计算表 1 中的 4 种墙体构造,

在最冷月(1月份)时段的墙体内表面和墙角内表面温度,并将其与室内露点温度的对比分析,见图 3。

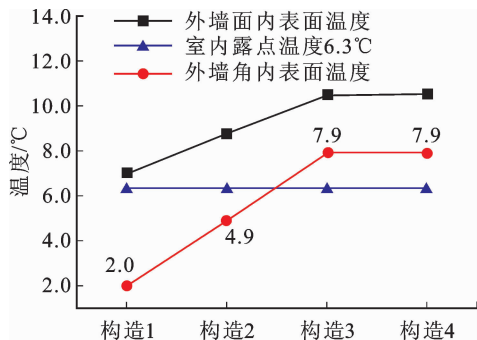


图3 不同构造墙体内部表面温度

Fig. 3 Internal surface temperatures of different structural wall

由图3可见,3种构造墙体墙面内表面温度均高于室内露点温度;构造1和构造2墙角内表面温度低于室内露点温度,构造3和构造4(内保温和外保温构造)墙角内表面温度高于室内露点温度。当墙厚由构造1中的240 mm增加到构造2中370 mm时,墙面及墙角内表面温度均有所提高,可一定程度上通过增加墙体厚度提高墙体内部表面温度,有利于减少结露现象的发生;当采用节能保温构造墙体可有效减少墙体内部表面结露现象的产生。

但在采暖期间,室内空气温度较高,水蒸气分压力较大,经围护结构由内向外渗透,由于墙体各构成材料及保温材料的水蒸气渗透系数的差异和保温层位置的不同,有可能在墙体内部出现冷凝现象^[8]。因此仍需进一步分析节能保温墙体构造各界面是否会产生冷凝现象

3.3 墙体构造界面结露分析

由式(4)和(5)计算出以上4种墙体构造各界面在最冷月最不利室外条件下的实际水蒸气分压力和饱和水蒸气分压力,如图4所示。

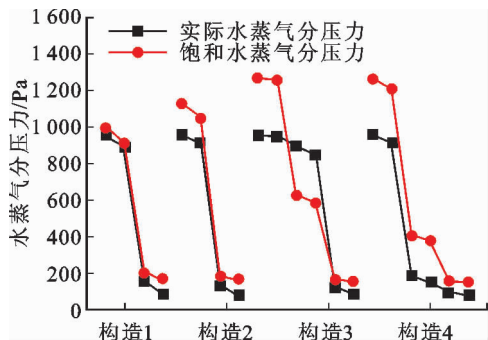


图4 不同构造墙体各界面水蒸气分压力

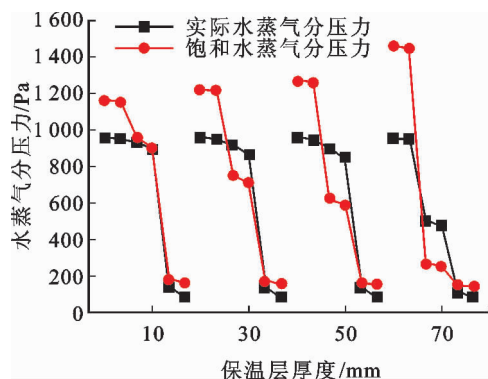
Fig. 4 Water vapor pressures at different interfaces of different structures

由图4可见,构造1(240 mm)、构造2(370 mm)和构造4(外保温)墙体构造各界面实际水蒸气分压力均小于饱和水蒸气分压力,未发生冷凝现象。

而在内保温构造墙体保温材料和基体墙材之间的界面实际水蒸气分压力大于饱和水蒸气分压力,出现冷凝现象。因此,外保温构造墙体对于减少墙体内部表面、墙角内表面和构造各界面结露现象的产生效果最为显著;构造1和构造2通过调节墙体厚度虽可减少墙体内部表面和构造各界面结露现象的产生,但对于减少墙角内表面结露现象的效果较弱,若不断增加墙体厚度,由此带来的经济成本随之增加,其不太适宜于乡村建筑;内保温墙体构造相对于外保温墙体构造对减少围护结构出现结露现象的作用效果较弱,其虽可改善墙体和墙角内表面结露现象,但在墙体构造界面会产生冷凝现象,对此,可尝试通过调节保温层厚度来改善其构造界面的冷凝现象。

3.4 内保温构造的保温层厚度对结露影响

对于节能保温构造墙体而言,保温材料的性能、位置和厚度是影响墙体保温效果的主要因素。本文提出的内保温构造墙体,作为保温材料的水泥膨胀珍珠岩热工性能良好,因此保温层厚度成为影响墙体保温效果的关键因素。现就保温层厚度对内保温墙体构造界面冷凝现象的影响进行分析,不同保温层厚度的内保温墙体构造界面在最冷月最不利室外条件下的实际水蒸气分压力和饱和水蒸气分压力的计算值如图5所示。

图5 不同保温层厚度内保温墙体构造各界面水蒸气分压力
Fig. 5 Vapor pressures on internal thermal insulation wall structure of each interface water with different heat preservation layer thicknesses

由图5可见,通过调整保温层厚度减少内保温构造界面冷凝现象的效果不明显。保温层厚度越大,在内保温构造墙体保温材料和基体墙材之间的界面冷凝现象越严重;当保温层厚度降低至10 mm时,内保温墙体构造界面接近冷凝状态。因此,从降低墙体内部出现冷凝现象的角度考虑,内保温构造不适宜于当地乡村建筑。

综上所述,外保温构造墙体对改善宁夏中卫地区乡村建筑围护结构表面及内部的结露现象效果最

为显著;增加墙体厚度经济成本过大,不适宜乡村建筑;内保温构造墙体使得墙体内部易产生冷凝现象,影响室内热环境质量,不宜采用。

4 结 论

1) 西北乡村建筑冬季室内外温湿度相差较大,水蒸气由内向外渗透,易在围护结构表面或内部产生结露。根据对当地现有建筑的调研测试发现其外墙面和外墙角部位内表面温度明显低于屋面,为结露易产生部位。

2) 乡村建筑节能外墙最易发生结露现象的部位为墙角和墙体构造界面层,且冬季各月发生结露的风险有所不同,其中元月份最易发生结露。

3) 外保温构造墙体可有效防止围护结构内表面和内部出现结露;而内保温构造墙体虽可一定程度降低墙角部位产生结露的几率,但会使得墙体构造界面产生冷凝,且保温层厚度越大冷凝愈严重。

参考文献:

- [1] 朱传晟. 建筑围护结构热桥部位结露原因分析研究 [J]. 建筑节能, 2008, 36(12): 6-8.
ZHU Chuansheng. Study on causes of moisture condensation in thermal bridge position of building envelope structure [J]. Construction Conserves Energy, 2008, 36(12): 6-8.
- [2] 刘岩松. 严寒地区冬季室内结露问题分析 [J]. 房材与应用, 2002, 30(4): 14-22.

LIU Yansong. Analysis about indoor condensation in winter in severe cold regions [J]. Housing Materials & Applications, 2002, 30(4): 14-22.

- [3] 桑国臣, 陈得勇, 韩艳, 等. 宁夏中卫地区被动式太阳能民居测试研究 [J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3): 273-276.
SANG Guochen, CHEN Deyong, HAN Yan, et al. Measuring study of passive solar house for dwelling building in Ningxia Zhongwei Area [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3): 273-276.
- [4] 张晴原, JOE Huang. 中国建筑用标准气象数据库 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 刘加平. 建筑物理(第四版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [6] 中国建筑科学研究院. 农村居住建筑节能设计标准: GB/T 50824—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [7] 中国建筑科学研究院. 民用建筑热工设计规范: GB 50176-1993 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [8] 桑国臣, 刘加平. 西藏高原城镇居住建筑围护结构传湿研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(2): 175-179.
SANG Guochen, LIU Jiaping. Study of moisture transfer in envelope of city residential buildings in Tibet Altiplano [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(2): 175-179.

(责任编辑 杨小丽)