

## 严寒地区保温墙体的冷凝判断

张九红,周展帆,李 晋,韩 臻

(沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 确定保温材料重量湿度增量,判断墙体是否发生冷凝,提出合理的墙体保温构造设计方案,实现建筑节能. 方法 根据墙体构造,环境参数和材料参数计算墙体的温度场和湿度场,绘制出墙体水蒸气分压力和饱和水蒸气分压力分布线. 结果 理论计算为墙体内部发生冷凝,但采暖期重量湿度增量  $\Delta\omega = 1.000\% < 15\%$ . 证明墙体的设计符合《民用建筑热工规范》(GB 50176—2016)要求. 在计算结果的基础上,对可能发生的结构破坏提出了墙体结构的改造建议,墙体加入了隔气层后,经计算知改造后的结构未发生冷凝. 结论 结构计算方法能够为保温结构设计提供设计依据,也可以应用到实际工程,能对既有建筑的墙体保温构造进行数据模拟及技术改造.

**关键词** 冷凝;热湿传递;保温墙体;严寒地区

中图分类号 TU111.4

文献标志码 A

## Analyzing Software for Heat and Moisture Transfer of Thermal Wall Insulation in Cold Regions

ZHANG Jiuhong, ZHOU Zhanfan, LI Jin, HAN Zhen

(School of Architecture & Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The purpose of this paper is to judge whether the wall is condensed according to the increment of moisture content of the insulation material, and to propose a reasonable design scheme of the wall insulation structure, to realize the building energy conservation. Based on the wall construction, environmental parameters and material parameters the temperature field and moisture field of the wall were calculated. partial pressure distribution curve of water vapor and saturated water vapor for wall was drawn out. The theoretical calculation results show that the wall is internally condensed, but the weight humidity increment in the heating period is  $\Delta\omega = 1.000\% < 15\%$ , which proves that the design of the wall complies with the requirements of GB 50176—2016. On the basis of the calculation results, some suggestions for the possible structural damage were put forward. After the addition of the gas barrier layer, it was calculated that the structure did not condense after the modification. The structure calculation method can provide the design basis for the thermal insulation structure design, and also can be applied to the actual engineering. For example, structure data simulation and technical transformation for the existing building wall insulation.

**Key words:** condensation; heat and moisture transfer; wall insulation; cold regions

收稿日期:2016-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51278311)

作者简介:张九红(1968—),女,教授,博士,博士研究生导师,主要从事绿色建筑和建筑物理方面研究.

提高建筑围护结构的使用性能,让室内的生活环境更加舒适,围护结构设计时需要考虑保温、隔热、防潮、防水等因素.为保证室内的舒适感受,需要满足一定的相对湿度,由于室内含有一定量水蒸气,有时在墙体的表面和内部会产生凝结,影响建筑的使用.因此,室内水蒸气过量或者不足都会导致室内环境不舒适.围护结构是否出现冷凝现象,主要取决于结构各处的温度是否低于该处的露点温度.当建筑室内相对湿度过高、通风处理并不合理的时候,很容易在温度低的部位产生冷凝<sup>[1-5]</sup>.一般分为内部冷凝和表面冷凝<sup>[6]</sup>.内部冷凝是在围护结构内部出现凝结水的现象,影响结构材料的物理特性和耐久性;表面冷凝是在围护结构表面出现凝结水的现象,影响室内的观瞻和卫生标准.一般通过计算可以判断建筑围护结构是否发生冷凝现象<sup>[7-16]</sup>.因此,笔者选取严寒地区保温墙体结构,研究判断冷凝现象发生的步骤,并通过计算冷凝强度,确定保温材料重量湿度增量是否超过《民用建筑热工规范》(GB 50176—2016)的规定值,进而判断建筑围护结构是否需要改造,并且提出结构发生冷凝时的改造措施.

1 冷凝基础理论

1.1 建筑围护结构是否发生冷凝的判断步骤

根据热湿传递理论判断建筑围护结构是否发生冷凝现象的主要步骤<sup>[7]</sup>:①通过室内温湿度和室外温湿度来确定结构内表面水蒸气分压力  $P_i$  和外表面水蒸气分压力  $P_e$ ,然后按照热湿传递理论计算围护结构各层的水蒸气分压力,并做出水蒸气分压力  $P$  的分布线;②根据室内空气温度  $t_i$  与室外空气温度  $t_e$  来确定室内饱和水蒸气分压力  $P_{si}$  和室外饱和水蒸气分压力  $P_{se}$  以及围护结构各界面温度  $\theta_m$ ,做出饱和水蒸气分压力  $P_s$  的分布线;③根据水蒸气分压力  $P$  分布线与饱和水

蒸气分压力  $P_s$  分布线是否相交,来判断围护结构内部是否会发生冷凝.如果  $P$  线与  $P_s$  线相交,则说明围护结构内部发生冷凝;如果  $P$  线与  $P_s$  线不相交,则内部不会发生冷凝(见图1)<sup>[17]</sup>.

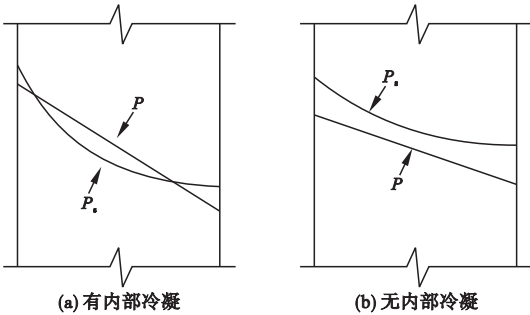


图1 围护结构的内部冷凝判断

Fig. 1 Condensing curve of enclosure structure

1.2 保温材料的重量湿度增量计算

计算建筑围护结构的冷凝强度与采暖期间保温材料重量湿度,然后根据《民用建筑热工规范》(GB 50176—2016)规定的保温材料的重量湿度允许增量,确定保温材料重量湿度增量是否超过规定范围,进而判断建筑围护结构是否需要改造.

(1) 冷凝强度  $\omega_c$

在水蒸气渗透过程中,当材料的水蒸气渗透系数由大到小变化时,由于水蒸气遇到比较大的阻力,这个位置最容易发生冷凝.一般把冷凝发生最严重的界面和最容易发生冷凝的界面称为冷凝界面.

当围护结构内部发生冷凝的时候,在冷凝界面产生的水蒸气分压力已经达到界面温度下的饱和水蒸气分压力  $P_{s,c}$ . 设水蒸气分压力较高一侧空气进到冷凝界面的水蒸气渗透强度是  $\omega_1$ ,从界面渗透到分压力较低一侧空气的水蒸气渗透强度是  $\omega_2$ ,二者的差为冷凝界面处的冷凝强度<sup>[18]</sup>.

$$\omega_c = \omega_1 - \omega_2 = \frac{P_A - P_{s,c}}{H_{0,i}} - \frac{P_{s,c} - P_B}{H_{0,e}} \quad (1)$$

式中: $P_A$  为分压力较高一侧空气的水蒸气分压力,Pa; $P_B$  为分压力较低一侧空气的水蒸

气分压力,Pa; $H_{0,i}$ 为冷凝界面水蒸气流入一侧的水蒸气渗透阻, $(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{Pa})/\text{g}$ ; $H_{0,e}$ 为冷凝界面水蒸气流出一侧的水蒸气渗透阻, $(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{Pa})/\text{g}$ .

(2)采暖期总的冷凝量的估算值

$$\omega_{c,0}=24\omega_cZ_h. \tag{2}$$

式中: $Z_h$ 为当地的采暖期,d; $\omega_{c,0}$ 为采暖期内总的冷凝量, $\text{g}/\text{m}^2$ .

(3)采暖期内保温层材料湿度的增量

$$\Delta\omega=\frac{24\omega_cZ_h}{1000d_i\rho_i}\times100\%. \tag{3}$$

式中: $d_i$ 为保温层的厚度,m; $\rho_i$ 为保温材料的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ .

一般在围护结构内部出现少量的冷凝水是允许的,这些冷凝水在天气转暖之后会从结构内部蒸发出去<sup>[13]</sup>.为了保证结构的耐久性,要求采暖期间围护结构中的保温材料因内部冷凝受潮而增加的湿度,即保温材料的重量湿度增量 $\Delta\omega$ 不应该超过《民用建筑热工规范》(GB 50176—2016)规定的采暖期间保温材料重量湿度的允许增量 $[\Delta\omega]$ .

当计算结果显示墙体结构内部发生冷凝时,需要对墙体结构进行改造.根据规范所示的 $[\Delta\omega]$ ,可算得冷凝计算界面内侧所需的最小水蒸气渗透阻 $H_{i,\min}$ ,为结构改进提供指导.

$$H_{i,\min}=\frac{P_i-P_{s,c}}{10\rho_id_i[\Delta\omega]}+\frac{P_{s,c}-P_c}{H_{0,e}}. \tag{4}$$

式中: $H_{i,\min}$ 为冷凝计算界面内侧所需的水蒸气渗透阻, $(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{Pa})/\text{g}$ ; $P_{s,c}$ 为冷凝计算界面处的界面温度 $\theta_c$ 对应的饱和水蒸气分压力,Pa; $\rho_i$ 保温材料的干密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ .

内侧部分水蒸气渗透阻为室内至冷凝发生界面间的墙体结构总水蒸气渗透阻,若其数值小于 $H_{i,\min}$ 时,应该设置隔汽层或者提高已有隔汽层的隔气能力.

2 严寒地区保温墙体的冷凝判断

笔者选取沈阳地区常见建筑保温墙体对热湿传递过程进行冷凝状态判断.辽宁地区冬季室内计算温度 $t_i=18\text{ }^\circ\text{C}$ ,室外平均计算温度 $t_e=-11.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,冬天采暖期为152 d,室内相对湿度为 $\varphi_i=60\%$ ,室外相对湿度为 $\varphi_e=55\%$ <sup>[18]</sup>.保温墙体构造如图2所示.墙体各项结构材料的物理参数如表1所示,其中,聚苯乙烯保温板(EPS)导热系数修正系数取1.05.

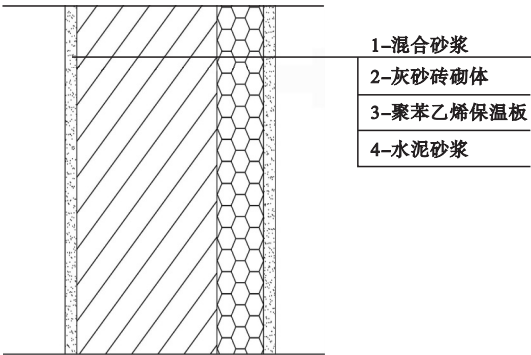


图2 保温墙体构造

Fig. 2 Insulation wall structure

表1 材料物理参数

Table 1 Physical parameters of materials

材料名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	材料厚度/ mm	导热系数/ ( $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ )	蒸汽渗透系数/ ( $\text{g}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa})^{-1}$ )
混合砂浆	1 700	20	0.870	0.000 097 5
灰砂砖砌体	1 900	240	1.100	0.000 105 0
EPS 保温层	20	80	0.039	0.000 016 2
水泥砂浆	1 800	20	0.930	0.000 021 0

2.1 计算流程

以热湿传递理论为基础,笔者针对严寒

地区的建筑保温墙体,以html环境下的Javascript逻辑语言<sup>[19-20]</sup>制作了计算程序,

计算流程如图3所示。

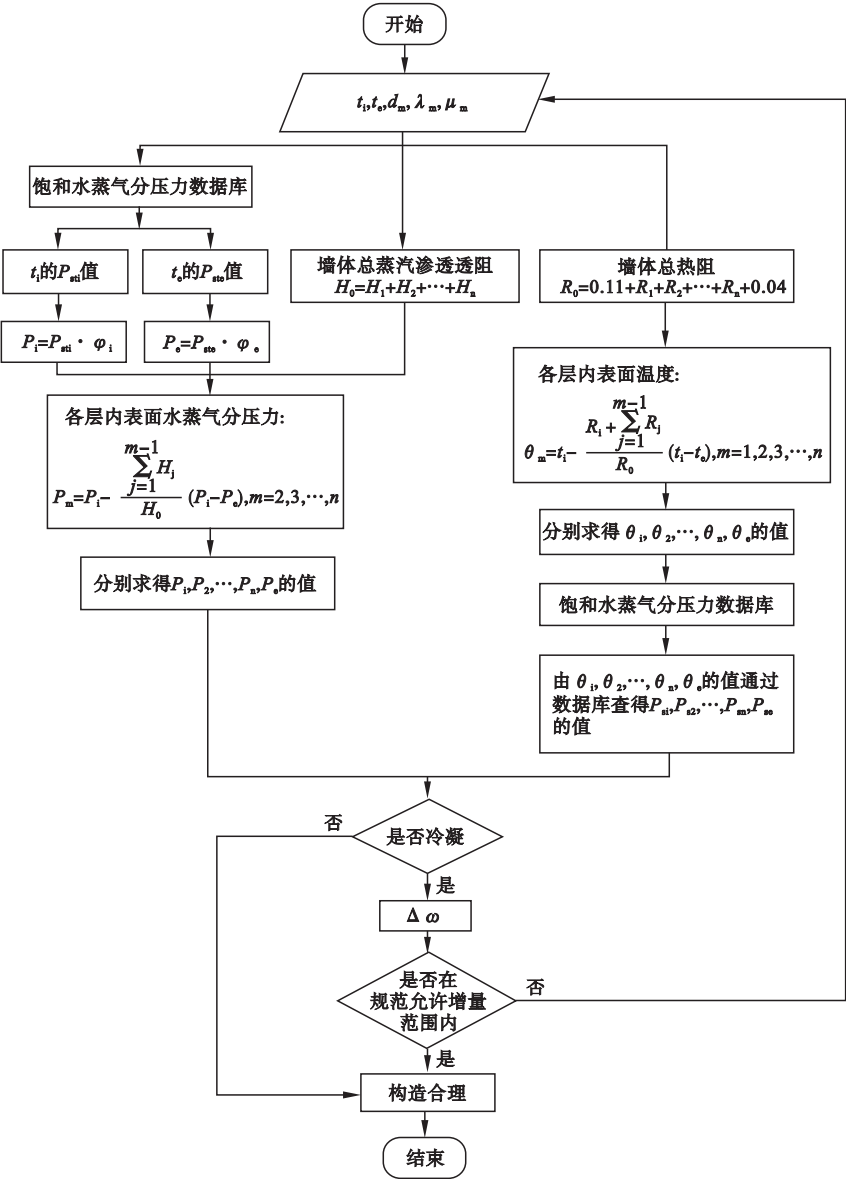


图3 计算流程图

Fig.3 Program flow chart

热湿传递计算可以准确地分析出构造方案是否会产生冷凝. 通过相关环境参数和材料参数,计算墙体温度场和湿度场,推算出结构内部的冷凝强度. 若发生冷凝,则可根据求得的保温材料重量湿度及相关规范判断采暖期保温材料重量湿度是否在允许增量区间内.

2.2 理论计算对墙体冷凝判断

2.2.1 墙体的冷凝判断

(1)计算围护结构的总热阻  $R_0$  与总水

蒸气渗透阻  $H_0$

$$R_0 = \sum \frac{d_m}{\lambda_m} = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 +$$
$$Re = 2.364 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)}/W,$$
$$H_0 = \sum \frac{d_m}{\mu_m} = \frac{0.02}{0.000\ 097\ 5} +$$
$$\frac{0.08}{0.000\ 016\ 2} + \frac{0.24}{0.000\ 105} + \frac{0.02}{0.000\ 210} =$$
$$8\ 381.495$$

$(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})/\text{g}.$  (6)

(2) 计算室内外空气的水蒸气分压力  $P_i$  与  $P_e$

当  $t_i = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 查得  $P_{\text{sti}} = 2\,062.5\text{ Pa}$ ,  
 $P_i = P_{\text{sti}} \cdot \varphi_i = 2\,062.5 \times 0.6 = 1\,237.500\text{ Pa}$ ,  
当  $t_e = -11.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 查得  $P_{\text{ste}} = 233.3\text{ Pa}$ ,  
 $P_e = P_{\text{ste}} \cdot \varphi_e = 233.3 \times 0.55 = 128.315\text{ Pa}$ .

(3) 计算围护结构内部各层的温度和水蒸气分压力

围护结构内各层的温度  $\theta_m$  为

$$\theta_m = t_i - \frac{R_i + \sum_{j=1}^{m-1} R_j}{R_0} (t_i - t_i),$$

$m = 1, 2, \dots, n.$  (7)

查表得出各结构层温度  $\theta_m$  及其对应的饱和水蒸气压力  $P_{\text{sm}}$  如表 2 所示.

表 2 结构层温度  $\theta_m$  及其对应的饱和水蒸气压力  $P_{\text{sm}}$

Table 2 Structural layer temperature and its corresponding saturated water vapor pressure gauge

编号	$\theta_m / ^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{sm}} / \text{Pa}$
$i$	16.600	1 887.800
2	16.400	1 863.800
3	13.700	1 566.500
4	-10.400	250.600
$e$	-10.700	244.000

计算围护结构内各层的水蒸气分压力  $P_m$  为

$$P_m = P_i - \frac{\sum_{j=1}^{m-1} H_j}{H_0} (P_i - P_e), m = 2, 3, \dots, n.$$
 (8)

计算得:  $P_1 = 1\,237.500\text{ Pa}$ ;  $P_2 = 1\,210.354\text{ Pa}$ ;  $P_3 = 907.868\text{ Pa}$ ;  $P_4 = 254.351\text{ Pa}$ ;  $P_e = 128.315\text{ Pa}$

(4) 绘制水蒸气分压力分布线

根据计算的围护结构内部各层的水蒸气分压力值与饱和水蒸气分压力绘制水蒸气分压力分布线如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 饱和水蒸气分压力分

布线与水蒸气分压力分布线发生相交, 所以此围护结构发生冷凝.

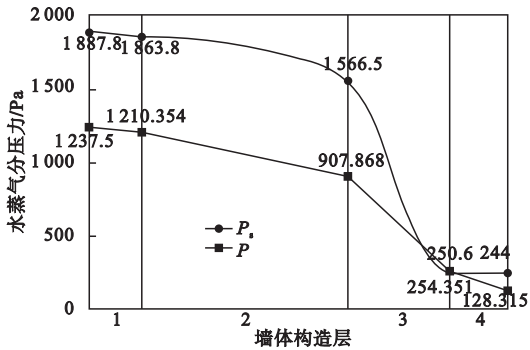


图 4 水蒸气分压力分布线

Fig. 4 Water vapor pressure distribution curve

2.2.2 墙体保温构造的合理性判断

(1) 冷凝强度

从图 4 可以看出, 冷凝界面发生在 3 层和 4 层之间的交界处, 所以

$P_{s,c} = P_{s4} = 250.6\text{ Pa};$   
 $H_{0,i} = 7\,429.114\text{ }(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})/\text{g};$   
 $H_{0,e} = 952.381\text{ }(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})/\text{g}.$   
根据式(1)得:  $\omega_c = 0.004\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}).$

(2) 采暖期保温层内湿度增量

根据冷凝强度及式(3) 计算得:  $\Delta\omega = 1.000\%$ .

根据《民用建筑热工规范》(GB 50176—2016) 中采暖期保温材料重量湿度的允许增量表, 可知此种结构形式下的保温材料重量湿度允许增量上限为 15%. 而计算得到的  $\Delta\omega = 1.000\% < 15\%$ , 因此, 该保温墙体结构符合规范要求. 此墙体构造在保温层外侧界面产生了轻微的冷凝, 但经计算验证并未超过规范所要求的保温材料重量湿度允许增量. 因此判断此结构满足要求.

2.3 冷凝改造措施

如果保温墙体发生冷凝, 且保温材料重量湿度增量超过规范规定的允许增量上限值, 必须对保温墙体进行改造. 设置隔气层是目前防治围护结构内部冷凝设计应用最普遍的技术改造措施. 可将水蒸气渗透系数小的



隔汽材料布置在水蒸气流入的一侧,而将水蒸气渗透系数大的材料放置在水蒸气流出的一侧.也就是在构造设计上遵循“难进易出”的原则.

笔者对图 2 保温墙体构造进行改进.增加隔气层,隔气层采用两道热沥青(见图 5).材料厚度 4 mm,导热系数  $\lambda = 0.27 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ,蒸汽渗透系数  $\mu = 0.000\,007\,5 \text{ g}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa})^{-1}$ .

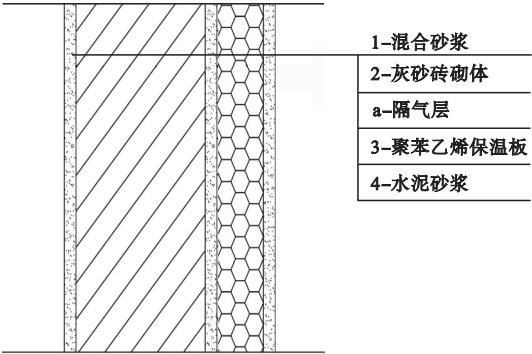


图 5 增加隔气层的墙体构造

Fig. 5 Wall structure with gas barrier

将改造后增加隔气层的墙体构造再次计算得到图 6 所示的水蒸气分压力分布线.由图 6 可见墙体未发生冷凝.由此可见,增设隔气层能够有效地避免墙体内部冷凝状况的产生.另外,隔气层会导致结构内部原有的水蒸气不易排出,因此在施工过程中应严格控制墙体材料的原始含水量.

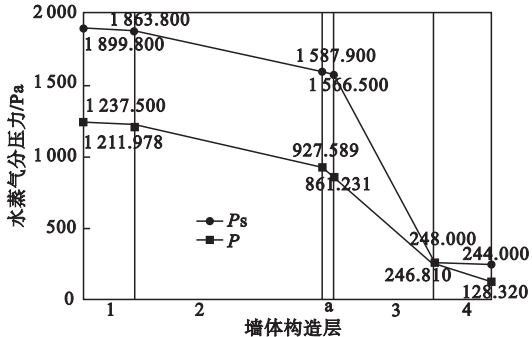


图 6 改造后的水蒸气分压力分布线

Fig. 6 Water vapor partial pressure distribution after transformation

3 结 论

(1)通过冷凝判断,可以判定墙体的传

湿设计是否符合《民用建筑热工规范》(GB 50176—2016)要求.

(2)通过选择墙体材料参数以及环境参数,可以快速准确地预判结构内部的冷凝状况,并可绘制成相关图表,直观清晰地表达出墙体结构温度和湿度分布情况,确定冷凝发生的界面.

(3)该判断为新建建筑构造设计提供了有利支持,在源头上控制冷凝的发生,最终为新建建筑提出更为合理的墙体保温构造设计方案,实现建筑节能.

(4)通过结构计算方法,对既有建筑的墙体保温构造进行数据模拟,为既有建筑提供技术改造依据.

参考文献

[ 1 ] 柳孝图. 建筑物理[M]. 北京:中国工业出版社,2010.  
(LIU Xiaotu. Building physics[M]. Beijing: China Construction Industry Publishing House, 2010. )  
[ 2 ] 崔硕. 严寒地区建筑墙体适宜性保温墙体构造湿热传递研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2014.  
(CUI Shuo. Study on the construction of thermal and humid heat transfer of building wall in cold region[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014. )  
[ 3 ] 富强. 严寒地区复合保温墙体湿热状态研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2013.  
(FU Qiang. Study on the heat and moisture state of compound heat insulation wall in cold area[D]. Shenyang : Shenyang Jianzhu University, 2013. )  
[ 4 ] 李玉洲. 寒区加气混凝土自保温墙体热工性能测试及模拟分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.  
(LI Yuzhou. The thermal performance testing and simulation analysis of aerated concrete self-insulation wall in cold regions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013)  
[ 5 ] 管文,赵立群. 装配式住宅预制夹芯保温复合外墙内部冷凝问题研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(8): 50-52.  
(GUAN Wen, ZHAO Liqun. Study on interior condensation of prefabricated sandwich insulating composite[J]. China concrete and cement

- products, 2012(8):50-52.)
- [6] 张甜甜, 谭羽菲, 李玉洲. 加气混凝土墙体的热桥效应及局部保温措施[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015(7):114-120.  
(ZHANG Tiantian, TAN Yufei, LI Yuzhou. Thermal bridge effect of aerated concrete wall and its partial insulation[J]. Journal of Hunan university(natural sciences), 2015(7):114-120.)
- [7] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
(LIU Jiaping. Building physics[M]. Beijing: China Construction Industry Publishing House, 2011.)
- [8] 朱轶韵, 韩艳, 桑国臣. 西北乡村建筑冬季墙体构造界面结露研究[J]. 西安理工大学学报, 2016(3):278-282.  
(ZHU Yiyun, HAN Yan, SANG Guochen. Interfacial condensation of rural building external walls in northwest areas in winter[J]. Journal of Xi'an university of technology, 2016(3):278-282.)
- [9] 张九红, 李晋, 房美序. 严寒地区复合保温墙体热湿试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016(5):838-845.  
(ZHANG Jiuhong, LI jin, FANG Meixu. Thermal & humidity experimentation of composite heat preservation wall in cold area[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2016(5):838-845.)
- [10] 张九红, 富强. 沈阳地区住宅楼外保温墙体湿破坏研究[J]. 建设科技, 2014, 21:64-67.  
(ZHANG Jiuhong, FU Qiang. Study on wet damage of exterior insulation wall of residential building in Shenyang[J]. Construction science & technology, 2014, 21:64-67.)
- [11] CHEN Tuanjie, WANG Shuangjie. Study on heat insulation of diatomite asphalt concrete in permafrost regions[J]. Journal of highway and transportation research and development(english edition), 2012, 6(4), 42-48.)
- [12] 于鑫垚. 新型保温砌体夹芯墙体构造与热湿性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
(YU Xinyao. Research on configuration and heat-moisture property of a new type of thermal insulation masonry sandwich wall[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [13] 赵立群, 陈宁. 蒸压粉煤灰加气混凝土砌块墙体自保温系统的内部冷凝问题研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2010(6):42-45.  
(ZHAO Liquan, CHEN Ning. Study on the internal condensation problem of self-insulation system of autoclaved fly ash aerated concrete block wall[J]. Building block & block construction, 2010(6):42-45.)
- [14] 郭兴国. 热湿气候地区多层墙体热湿耦合迁移特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.  
(GUO Xingguo. Research on coupled heat and moisture transfer characteristics of multilayer walls in hot and humid climate[D]. Changsha: Hunan University, 2010.)
- [15] 刘正强, 李雪. 大连某芯片工厂墙体结露与冷凝分析[J]. 建筑节能, 2009(1):21-24.  
(LIU Zhengqiang, LI Xue. Analysis on the dew and condensation of wall body in a chip factory in Dalian[J]. Construction conserves energy, 2009(1):21-24.)
- [16] 黄建恩, 吕恒林, 冯伟, 等. 蒸压加气混凝土砌块墙体热湿耦合传递特性[J]. 建筑材料学报, 2015(1):88-94.  
(HUANG Jianen, Lü Henglin, FENG Wei, et al. Coupled heat & moisture transmission characteristics of autoclaved aerated concrete block wall[J]. Journal of building materials, 2015(1):88-94.)
- [17] 中国建筑标准设计研究院. 墙体节能建筑构造:GB 06J123[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.  
(China Construction Normative Design & Research Institute. Energy-saving wall construction; GB 06J123[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 26—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
(Ministry of Housing and urban-rural Development of P. R. C. Design Standard for energy efficiency of residential building in severe cold and cold zones; JGJ 26—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [19] JEREMY K, JEFFREY S. JavaScript DOM 编程艺术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.  
(JEREMY K, JEFFREY S. DOM Scripting: web design with JavaScript and the document object model[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011.)
- [20] NICHOLAS C, ZAKAS. JavaScript 高级程序设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.  
(NICHOLAS C. ZAKAS. Professional JavaScript for web[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2012.)