

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.04.006



南方建筑非透明围护结构热工与节能设计

冯雅, 南艳丽, 钟辉智

(中国建筑西南设计研究院有限公司, 成都 610042)

摘要:如何兼顾冬夏两季建筑供暖空调负荷和能耗, 保证室内热环境质量, 确定最适宜的热工特性, 是长期困扰中国南方建筑围护结构热工与节能设计的难点。通过对夏热冬冷和夏热冬暖地区建筑在采暖、空调与自然通风条件下动态热过程的分析, 研究了这一地区围护结构热特性与能耗的制约关系, 以及对室内热环境与建筑热稳定性的作用机理。在兼顾冬季保温与夏季隔热的情况下, 将建筑全年能耗作为控制目标, 从室内热环境质量、节能效果、围护结构的安全性、可靠性、经济性和实用性等角度评价目前所采用的围护结构节能技术存在的问题, 提出一种适宜南方气候的建筑围护结构热特性指标及构造形式。

关键词:南方地区; 围护结构; 热工设计; 节能设计

中图分类号: TU832.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)04-0033-07

Energy-saving and thermal design of the nontransparent enclosure structure for the buildings in southern China

Feng Ya, Nan Yanli, Zhong Huizhi

(China Southwest Architectural Design and Research Institute Corp., LTD, Chengdu 610042, P. R. China)

Abstract: In southern area of china, the problem that balancing heating load in winter with cooling load in summer to ensure indoor thermal comfort when designing building envelop still remains. In this article, the correlation between thermal characteristics of building envelope and energy load is found by analyzing dynamic thermal process of buildings in hot summer and cold(warm) winter zones. In addition, the thermal characteristics of building envelope which affect indoor thermal environment and thermal stability of building are revealed. Also, the impact mechanism of enclosure thermal performance on indoor thermal environment and thermal stability is studied. By taking the balance between winter heat preservation and summer heat dissipation into consideration, the calculation of annual building energy consumption would be carried out, based on which the existing enclosure energy-saving method is evaluated from the standpoint of energy-saving effect, safety, reliability, economy and practicability. Finally, the climatic-suitable thermal design and its structure type of the enclosure is proposed.

Keywords: southern area; building envelope; building thermal design; energy-saving design

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(51278478)

作者简介: 冯雅(1958-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事建筑热工与建筑节能研究, (E-mail) fc10@xnjz.com.

Received: 2016-07-25

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51278478)

Author brief: Feng Ya(1958-), professor of engineering, PhD, main research interests: building thermal engineering and energy saving, (E-mail) fc10@xnjz.com.

围护结构保温隔热是影响建筑节能最为重要的因素之一,围护结构材料的保温性、耐久性和安全性问题也是国内外长期关注的重点。北美、欧盟、日本等发达国家采用钢结构、木结构及木框架结构的建筑占 70% 以上,围护结构构造主要采用龙骨+保温隔热材料+装饰面板的做法,工业化水平高,质量稳定,能很好地解决矿(岩)棉、聚苯乙烯泡沫塑料板(EPS)、聚苯乙烯挤塑泡沫板(XPS)等高效有机保温隔热材料作为围护结构保温隔热系统的安全性、可靠性、耐候性、透汽性,以及受热应力影响的膨胀与收缩、裂缝、以及材料体系老化等问题^[1-3]。但对于传统砖石、混凝土外墙等保温隔热体系,国外相关技术标准^[2]并未做出详细的性能要求。

中国南方地区建筑非透明围护结构保温隔热技术,主要采用欧盟和中国北方外墙外保温技术思路,即采用高分子化学类(如聚苯乙烯、酚醛泡沫、聚氨酯等)高效保温材料、岩棉、无机保温砂浆等各种外墙外保温技术^[1,4]。从南方地区的气候、资源和 10 多年建筑节能工作的实际情况来看,现有技术无法根本解决围护结构保温隔热技术体系所存在的固有缺陷。尤其央视文化中心、上海胶州教师公寓等建筑相继由于外墙外保温材料引发火灾,公安部下发公消[2011]65 号文后,南方地区大量采用无机保温隔热材料技术体系,但其围护结构热工性能与相关的物理力学性能却难以达到节能和建筑的质量要求。本文根据南方目前在保温隔热技术体系、设计施工等方面的实际情况,从技术体系、节能效果、安全性、经济性、实用性等方面进行研究,提出一种围护结构保温隔热设计方法和构造措施,为南方地区非透明外围护结构的节能设计提供一种新的思路和方法。

1 南方建筑非透明墙体围护结构的现状与问题

目前,南方建筑的外墙保温隔热技术主要采用 EPS(或 XPS、聚氨酯)板薄抹灰外保温系统, EPS 胶粉颗粒外保温隔热系统, EPS 钢丝网架板现浇混凝土等高分子化学类高效保温材料的复合保温隔热体系和无机保温材料保温隔热技术^[1,4]。这些外墙复合保温隔热体系的稳定性、安全性、防火性、耐候性等物理力学性能与传统围护结构相比有很大区别,很多性能都还没有经过工程的长期检验^[2]。在实际工程中,室外气候和材料固有的性能将严重影响围护结构的耐候性、安全性、使用功能,以及建筑的质

量^[3]。而且,这些保温隔热墙体的使用寿命不可能与现有的砖、钢筋混凝土等材料同寿命。从外墙复合保温隔热施工来看,大都要经过界面层处理、粘接剂涂抹、保温隔热层施工、抗裂保护层施工(抗裂砂浆、抗裂玻纤布或钢丝网、抹面层)等 6~7 道工序。相对传统围护结构而言,施工复杂、要求高。

从南方围护结构外保温隔热工程包工包料的市场价格分析, EPS 胶粉颗粒浆料、无机保温砂浆 30 mm 厚外保温隔热系统绝大部分为 50 元/m² 左右, EPS 薄抹灰系统 30 mm 厚外保温隔热系统绝大部分为 65 元/m² 左右。从节能建筑施工质量检查来看, 70% 以上的工程存在不同程度的质量问题,甚至出现一些虚作假等不良行为,保温隔热工程能否达到 25 a 的设计使用寿命值得注意。这里不是讲这类技术达不到节能设计的要求,而是指目前这一地区的围护结构外保温隔热工程的质量存在问题。即使外保温隔热系统有 25 a 的使用寿命,在建筑 50~70 a 使用寿命期内,是否意味着要再进行 2~3 次外保温隔热改造,在建筑的使用寿命周期内采用这一技术对围护结构保温隔热的投入是否会过大,在整个寿命周期内技术经济指标是否合理等都是应认真考虑的问题^[5]。

综上所述,不少围护结构保温隔热系统仍未经过大型试验及工程的长期考验,特别是耐候性试验和工程的长时间跟踪检验,缺少相关基础数据。因此,现有南方围护结构保温隔热技术还没有形成完备的技术体系,与需求相比,还有较大差距,不能完全解决耐久性(与建筑同寿命)、防火、外贴墙砖、修补维护等技术细节问题,现有的技术还不完善,系统配套差,产业化程度也不高,环保、节能、经济、安全的新型墙体材料匮乏^[6]。

2 外墙热工性能对建筑能耗与室内热环境的影响

2.1 外墙围护结构传热系数 k 对能耗的影响

《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 75—2003)编制组对夏热冬暖地区不同围护结构、不同窗墙比共 3 000 多个建筑节能方案的建筑能耗和节能率进行了分析。

图 1 所示为广州住宅全年空调耗电量与外墙传热系数 k 的关系,当 k 从 2.72 W/(m²·K) 分别降低到 1.95 和 1.13 W/(m²·K) 时,全年空调耗电量指标分别下降 8% 和 3.1%,收效甚微。研究结果表明,这一地区围护结构的隔热,外窗的遮阳是影响建

筑能耗的主要因素^[7]。当围护结构传热阻达到某一值时,围护结构的温差传热是有限的,过分地降低墙体的传热系数值,隔热性能不会有明显改善,同时,也不经济。

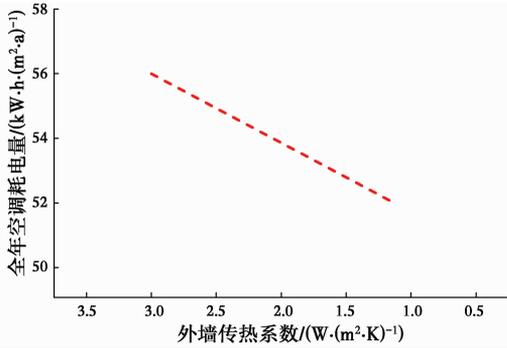


图 1 广州地区住宅全年空调耗电量与外墙 k 的关系
Fig. 1 Correlation between heating and air-con energy consumption and heat transfer coefficient k of wall in Guangzhou

同样,《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134—2010)编制组对夏热冬冷地区现有建筑能耗基数进行了研究,得出围护结构夏季负荷占 46.2%~52.8%,冬季负荷占 67.4%~80.3%。而窗的夏季负荷是墙的 2 倍多,冬季负荷是墙的 80%,而且,单位面积窗的用电负荷是墙的 3~8 倍,用电量约为墙的 4 倍^[8]。

图 2 所示为南京、重庆、成都住宅全年供暖空调耗电量与外墙传热系数的关系,表明外墙围护结构的传热系数对空调整冷影响是有限的,对冬季供暖影响明显。

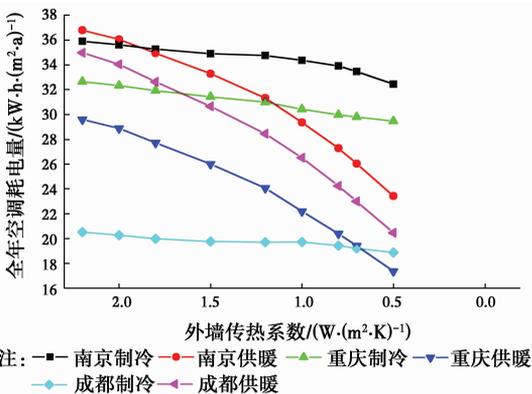


图 2 夏热冬冷地区全年供暖空调耗电量与外墙 k 的关系
Fig. 2 Correlation between heating and air-con energy consumption and heat transfer coefficient k of wall in hot summer and cold winter zone

2.2 不同外墙保温隔热系统传热特点

采用南方典型住宅的标准平面中南向、北向卧

室为研究对象,以成都典型的气候为例,借助 DOE-2 模拟软件,分析外墙围护结构在等效传热系数相等条件下($k=1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),外保温、内保温、自保温 3 种不同保温隔热体系的热过程特性。

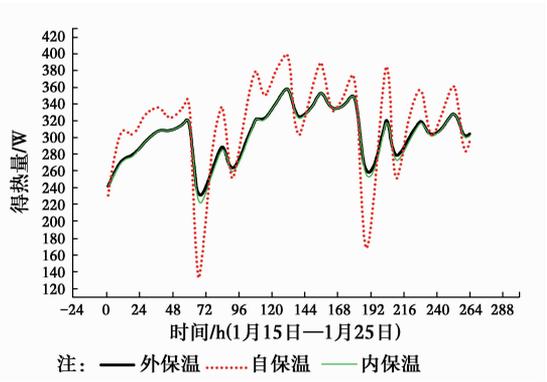


图 3 南向房间冬季外墙传热量比较图

Fig. 3 Heat transmission through southern wall in winter

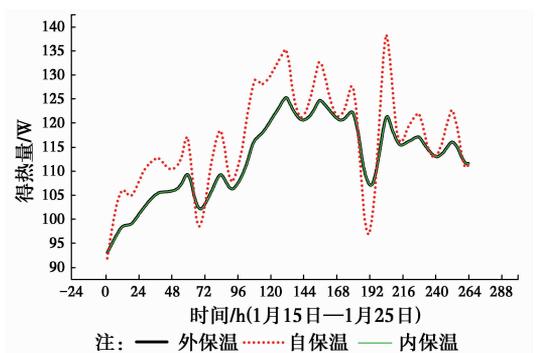


图 4 北向房间冬季外墙传热量比较图

Fig. 4 Heat transmission through northern walls in winter

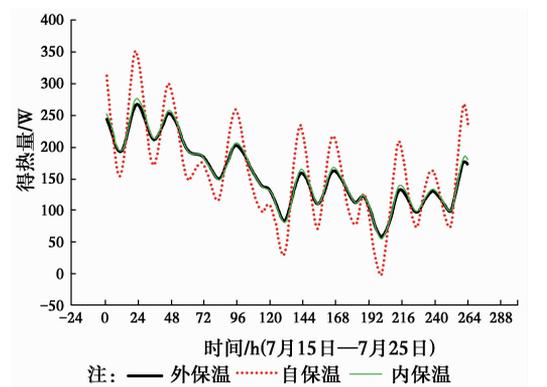


图 5 南向房间夏季外墙传热量比较图

Fig. 5 Heat transmission through southern wall in summer

图 3~6 分别给出南北朝向房间在冬季和夏季工况下不同保温体系的传热特性。可以看出,在等效传热系数相等的情况下外保温传热量的波动最小,说明外保温热稳定性好,但与内保温相比这个优点并不明显^[9]。自保温外墙传热波动明显大于其他

两种保温形式,主要原因是自保温墙体属于轻质墙体,其热容性小。

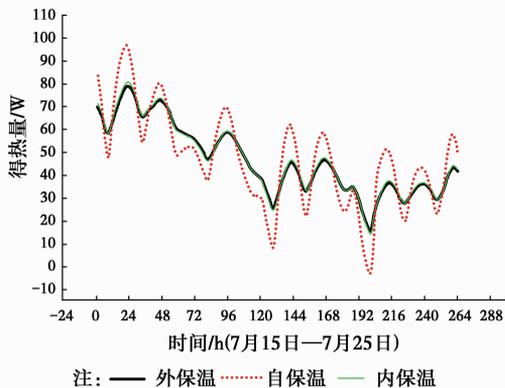


图 6 北向房间夏季外墙传热量比较图

Fig. 6 Heat transmission through northern walls in summer

2.3 能耗特征分析

在 2.2 节计算模型基础上,假设南向卧室采用间歇式空调与采暖,在外墙等效传热系数相同($k=1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)条件下,分析外保温、内保温、自保温 3 种不同保温体系的能耗特征。图 7 给出了不同保温体系在成都地区的全年逐月能耗比较。图 8 给出 3 种保温体系全年单位面积能耗比较。

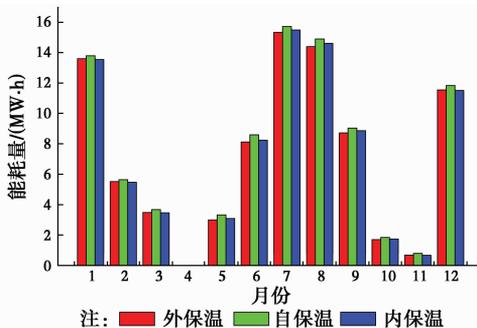


图 7 全年逐月能耗比较

Fig. 7 Monthly energy consumption comparison from Jan. through Dec.

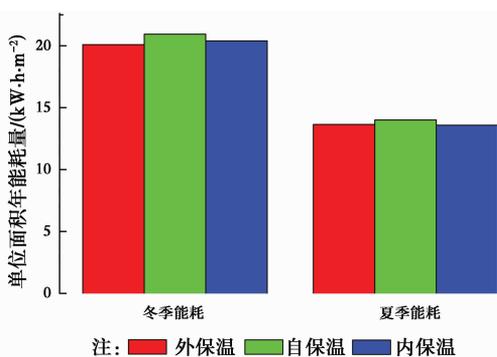


图 8 全年能耗比较图

Fig. 8 Annual energy consumption comparison

从结果可以看出,自保温体系年能耗量略高于其他两种情况,但超过量不大。外保温与内保温相比基本相等。所以,在外墙等效传热系数相同情况下,3 种保温体系外墙动态传热特性有差别但全年能耗量基本相等^[9]。

从节能标准所规定的热工指标来看,南方地区住宅围护结构对节能的贡献率只占节能标准要求的节能指标的 40%~50%,公共建筑占 30%~40%左右。而且南方地区建筑的供暖空调主要以间歇运行为主。因此,这一地区建筑围护结构除了采用外保温隔热外,内保温隔热和墙体自保温隔热技术都是适合这一地区很好的构造形式^[10]。这 3 种技术在南方的应用中,不同功能的建筑、建筑的不同运行方式所产生的节能效果和环境指标是完全不一样的,应选择相适应的保温隔热技术^[11-12]。

2.4 围护结构热稳定性对热环境的影响

中国南方地区夏季实测屋面外表面综合温度,南京可达 62℃、武汉 64℃、重庆 61℃、广州 60℃、南宁 60℃以上,西墙外表面温度南京可达 51℃、武汉 55℃、重庆 56℃、广州 52℃、南宁 54℃以上,在夏季室外综合温度热作用下,围护结构热特性除了用传热系数这个参数外,还应有抵抗温度和热流波在围护结构中传播的热惰性指标 D 、衰减倍数 ν 、和延迟时间 τ 等热稳定性指标来评价^[13]。

无论是自然通风、连续空调还是间歇空调,热稳定性好的厚重结构与加气混凝土、混凝土空心砌块以及金属夹芯板等热稳定性差的轻质围护结构相比,外围护结构内表面温度波幅差别很大。在传热系数相同条件下,连续空调时,240 mm 空心砖外墙内表面温度波幅为 0.5~1.0℃,加气混凝土外墙内表面温度波幅为 1.5~2.0℃,金属夹芯板外墙内表面温度波幅为 2.0~3.0℃。在间歇空调时,内表面温度波幅比连续空调还要增加 1.0~2.0℃。自然通风时,轻型结构外墙和屋顶的内表面使人明显的感到一种烘烤感。研究表明,热稳定指标越大,说明围护结构抵御室外温度波扰动能力,自身被动调节室外自然环境的能力越强。

3 南方地区建筑围护结构的节能设计

3.1 南方建筑围护结构的节能设计理论

根据以上分析,南方地区降低围护结构的传热系数有利于降低冬季采暖能耗;而要降低夏季空调能耗,必须提高围护结构的隔热性能。但无论冬季还是夏季,提高围护结构的热稳定性,都有利于提高

或降低外墙内表面温度,有效地延迟和衰减室外温度波的作用,改善室内环境。

按照热舒适理论,人的热感觉主要受室内空气温度(t)、空气湿度(φ)、围护结构内表面平均辐射温度(MRT)和室内风速(v)的影响,而建筑的形态、平、立面空间形式(窗墙面积比 S)、围护结构的传热系数 k 、热惰性指标 D 等热工参数对围护结构内表面平均辐射温度(MRT)起到非常重要的作用。在特定的气候条件下,人体的主观热反应 TSV (Thermal Sense Vote)基本处于可接受的热舒适区 $[-1, +1]$ 范围,即

$$TSV = f(t, \varphi, v, MRT, S, K, D) \in [-1, +1]$$

具有气候适应性的围护结构将有利于自调节作用,这也是自古以来人类总结出的,今天流行的被动节能技术设计方法。即通过被动式自然能源的应用,对建筑进行优化设计,利用围护结构的蓄热,自然通风等对室外温度波的衰减、延迟特性,将围护结构内表面平均辐射温度(MRT)的日平均值和波幅值控制在人可接受的范围内。因此,采用被动与主动相结合的节能技术,尽可能延长基本热舒适时间,减少采用主动干预室内热环境的方式实现热舒适环境时间,即尽量减少空调和采暖时间,是气候适应性节能建筑的核心,也是建筑热工学与节能建筑最重要的科学原理,这才是中国南方建筑节能的技术路线和方向。

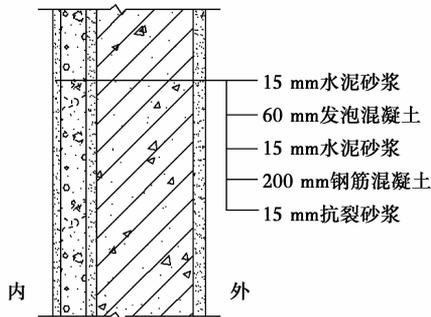


图 9 内保温墙体构造

Fig. 9 Wall construction of interior thermal insulation wall

3.2 一种新型发泡混凝土保温隔热技术

根据以上理论,从中国南方建筑围护结构节能技术总体发展状况和特点出发,对耐久性、安全防火、技术的可靠性、经济成本、环境影响等进行分析,才能得到本地区适宜的节能技术,同时,也保证了建筑工程的质量。为此,特别提出一种新型发泡混凝土内保温和自保温技术^[14],其构造形式如图 9、图 10 所示,发泡混凝土保温隔热板主要技术参数如表

2 所示^[15]。该体系为采用新型发泡混凝土外包梁、柱填充墙和保温隔热一体的自保温隔热构造,在夏热冬冷、夏热冬暖地区作为单一材料应用可满足当地热工性能要求。

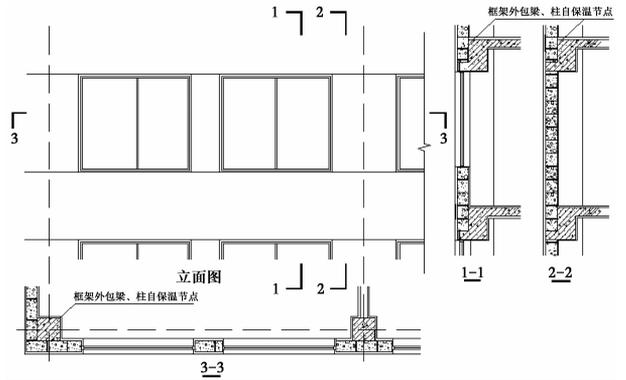


图 10 钢筋混凝土框架结构外包梁、柱填充发泡混凝土保温隔热构造

Fig. 10 beams and columns insulated with foam concrete in reinforced concrete structure

表 2 主要技术指标

Table 2 The key technical indexes

项目	指标	项目	指标
导热系数	$\leq 0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	耐水性(96 h 浸泡吸水性)	$\leq 15\%$
密度	600~900 kg/m^3	吸水率	$\leq 20\%$
抗压强度	$\geq 3.5 \text{ MPa}$	防火等级	A 级(不燃)
干燥收缩率	$\leq 0.1 \text{ mm/m}$	放射性	无放射性
抗冻融	1 000 次(不开裂)		
低温稳定性	不变质		

表 3 给出了 200 mm 加气混凝土外墙自保温、30 mm EPS 外墙外保温及 60 mm 厚新型发泡混凝土外墙内保温 3 种围护结构类型在自然通风条件下,西向墙体内表面温度的计算值。由计算结果可得出,发泡混凝土保温体系热稳定性好,与前两种外墙保温类型相比,内表面温度可以降低 1.2 $^{\circ}\text{C}$ 以上。

新型发泡混凝土外墙保温隔热技术具有以下特点:

1) 解决了现有复合外保温隔热技术目前无法根本解决的缺陷,尤其高层建筑在保温隔热系统外饰面所带来的安全、防火、耐候性等问题,无论采用内保温、外保温还是自保温技术,施工简单,与现有建筑施工技术不发生冲突,保证了工程施工质量和节能效果,真正做到与建筑同寿命。

2) 良好的热工性能,围护结构平均传热系数 k 能控制在 $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以内,即使混凝土剪力墙

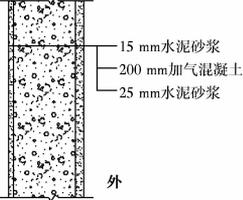
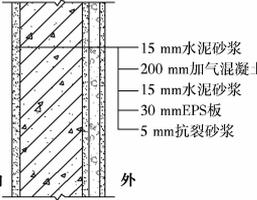
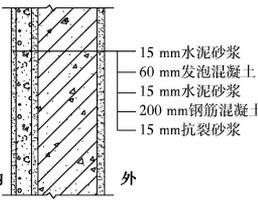
内贴 60 mm 厚保温材料,传热系数也能控制在 $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以内,其热工指标超过 370 mm 砖墙,彻底解决南方高层住宅建筑混凝土剪力墙的保温隔热要求,冬暖夏凉,具有被动节能建筑的特点。

3) 该系统经济成本低,材料与施工成本不高于现有外保温隔热技术。

4) 缺点仅仅是建筑采用内保温时,墙体加厚 50~60 mm,建筑室内面积减小 $1.0\% \sim 1.5\%$,对于公共建筑,相应平面尺度更大,减小的面积比例会更小。但与现有外墙外保温技术存在的安全、防火、耐候性等问题相比,牺牲建筑面积是值得的,从建筑的全寿命周期来看更为经济节约。

表 3 围护结构在自然通风条件下西墙的隔热性能

Table 3 Thermal insulation performance of western wall when building is naturally ventilated

城市	室外综合 温度最大 值/ $^{\circ}\text{C}$	内表面最高温度 $\theta_{i,\max}$ / $^{\circ}\text{C}$		
		200 mm 加气混凝 土内外两面抹灰 	200 mm 钢筋混凝土+30 mm EPS 板外保温墙体 	200 mm 钢筋混凝土+60 mm 发泡混凝土内保温墙体 
		$(k=0.98, D=3.520)$	$(k=1.181, D=2.662)$	$(k=1.15, D=4.661)$
重庆	60.67	38.36	36.94	35.49
武汉	58.67	36.69	35.82	34.71
广州	57.37	35.39	34.81	33.76
长沙	59.67	37.5	36.9	35.61
南京	57.87	36.72	36.31	34.87
上海	57.87	35.78	34.85	33.7
杭州	58.97	36.82	36.12	34.83
南宁	58.47	36.16	35.64	34.09
合肥	58.57	36.59	35.89	34.66
福州	58.97	36.51	35.25	33.81
南昌	59.57	37.48	36.82	35.61
成都	54.41	34.04	33.87	32.18

注:保温材料 EPS 板导热系数 1.2 进行修正。

4 结论

通过对南方典型气候条件下建筑在采暖、空调与自然通风条件下围护结构动态热过程的分析,得出以下结论:

1) 南方建筑围护结构热过程为室内外双向热量传递,与北方采暖建筑热量单向传递具有明显的差别,围护结构保温构造形式对建筑年能耗影响不大,但对建筑室内环境质量具有明显的影响。

2) 围护结构保温隔热体系,除了满足节能标准的要求外,建筑围护结构的物理力学可靠性、耐候

性、防火性、施工装修简单、经济合理、技术体系的寿命等更为重要。

3) 新型发泡混凝土导热系数可以达到 $0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以下,材料本身具有燃烧性能为 A 级,强度高,与建筑全寿命周期等优点。对于框架结构,填充墙部位采用新型发泡混凝土自保温,框架结构梁柱部位的处理采用该材料 50~60 mm 厚内外保温,可以满足夏热冬冷、夏热冬暖地区的围护结构热工性能指标要求;对于剪力墙结构,外墙采用 50~60 mm 新型发泡混凝土内保温,亦可以满足相应的节能设计要求。因此,建筑自保温和内保温技术是非

常适合南方地区的围护结构节能技术,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 成书珊,陈晓明,何韶瑶. 夏热冬冷地区建筑外墙保温节能策略研究[J]. 建筑技术,2014,45(8):722-725.
CHENG S S, CHEN X M, HE S Y. Strategies for energy-saving insulation of exterior walls in hot-summer and cold-winter zone [J]. Architecture Technology, 2014, 45(8): 722-725. (in Chinese)
- [2] U. S. Department of Energy. Building america research-to-market plan [R]. Energy Efficiency and Renewable Energy,2015.
- [3] CHANDRA S D, PARKER D, BEAL D, et al. Alleviating moisture problems in hot humid climate housing [R]. Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center, 2014.
- [4] 张永平. 建筑防火材料发展现状及改进对策[J]. 消防技术与产品信息,2014(5): 64-66.
ZHANG Y P. Development status and Improvement countermeasures of building fire prevention materials [J]. Fire Technique and Products Information, 2014 (5): 64-66. (in Chinese)
- [5] 黎瑶,龚先政,李昊. 外保温系统优化对建筑生命周期能耗的影响[J]. 河南大学学报(自然科学版),2016,46(2): 226-231.
LI Y, GONG X Z, LI H. The impact of external insulation system optimization on building life cycle energy consumption [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2016, 46 (2): 226-231. (in Chinese)
- [6] LAPSA M, GRUBBS T, KHOWAILED G. Ornl' s envelop stakeholder workshop proceedings.oak ridge [C]//TN: Oak Ridge National Laboratory,2015.
- [7] 夏热冬暖地区民用建筑节能研究[R]. 建设部科研项目(建科函[2000]285)研究报告,2004
Research on energy saving of civil building in hot summer and warm winter zone[R]. Research Report of the Ministry of Construction Projects(2000-285),2004. (in Chinese)
- [8] FENG Y. Defining the thermal design conditions in design standard for energy efficiency of residential in hot summer and cold winter zone [J]. Energy and Buildings, 2004, 36(12): 1309-1312.
- [9] 王磊,冯雅. 夏热冬冷地区不同外墙保温系统能耗特征研究[J]. 暖通空调,2007(12): 32-34.
WANG L, FENG Y. Energy consumption characteristics of exterior wall thermal insulation system in hot summer and cold winter zone [J]. HV & AC, 2007(12): 32-34. (in Chinese)
- [10] 南艳丽,冯雅,唐鸣放,等. 外墙自保温体系热桥实验研究[J]. 建筑科学,2007,23(10):74-78.
NAN Y L, FENG Y, TANG M F, et al. Experimental study on thermal bridge of self-insulation external wall [J]. Building Science, 2007, 23 (10): 74-78. (in Chinese)
- [11] 阮方,钱晓倩,朱耀台,等. 分室间歇用能对墙体内外保温节能效果的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2016(1):1-7.
RUAN F, QIAN X Q, ZHU Y T, et al. Internal and external wall insulation effect on building energy efficiency with compartmental and intermittent energy consuming method [J]. Journal Zhejiang University (Engineering Science),2016(1): 1-7. (in Chinese)
- [12] 高珂,张伟林,何军. 间歇式用能模式下墙体热分析[J]. 安徽建筑大学学报,2015,10: 47-51.
GAO K, ZHANG W L, HE J. Study on thermal analysis of wall in intermittent energy mode [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2015, 10: 47-51. (in Chinese)
- [13] 民用建筑热工设计规范: GB 50176—93[S]. 北京:中国计划出版社,1993:30-62.
Thermal design code for civil building: GB 50176-93 [S]. Beijing: China Planning Press, 1993: 30-62. (in Chinese)
- [14] FENG C, JANSSEN H, FENG Y, et al. Hygric properties of porous building materials: Analysis of measurement repeatability and reproducibility [J]. Building and Environment, 2015,85:160-172.
- [15] 冯驰,冯雅,孟庆林. 加气混凝土蒸汽渗透系数的变物性取值方法[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(5): 132-136.
FENG C, FENG Y, MENG Q L. Approach to determine value of variable permeability of autoclaved aerated concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(5):132-136. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)