

# 近零能耗建筑围护结构节能适宜性评价体系研究

李德英<sup>1</sup>,王艺霖<sup>1</sup>,邓琴琴<sup>2</sup>,宋波<sup>2</sup>

(1. 北京建筑大学供热、供燃气、通风及空调工程重点实验室,北京 100044;

2. 中国建筑科学研究院有限公司,北京 100013)

**摘要目的** 建立不同气候区近零能耗建筑围护结构保温隔热节能技术适宜性评价体系。**方法** 运用层次分析法和 Delphi 专家咨询法建立不同气候区近零能耗建筑围护结构节能适宜性评价体系,根据《近零能耗建筑技术标准》(GB/T51350—2019)中围护结构热工性能指标设计的严寒、寒冷和夏热冬冷地区外墙采用不同保温体系的做法,对不同厚度的模塑聚苯板、石墨改性聚苯板、聚氨酯板、岩棉条和真空绝热板等五种保温材料及系统进行相关试验,对不同气候区外墙保温隔热技术的地区适宜性体系进行验证。**结果** 根据评价体系,建议严寒和寒冷地区优先采用模塑聚苯板或石墨聚苯板薄抹灰系统,夏热冬冷与夏热冬暖地区优先采用隔热涂料,并应考虑遮阳。**结论** 该评价体系可以为近零能耗建筑围护结构方案设计提供参考。

**关键词** 适宜性分析;围护结构;保温材料;层次分析法;评价体系

中图分类号 TU201

文献标志码 A

## Energy Efficiency Technology Suitability Evaluation Research on Building Envelope System of Near Zero Energy

LI Deying<sup>1</sup>, WANG Yilin<sup>1</sup>, DENG Qinqin<sup>2</sup>, SONG Bo<sup>2</sup>

(1. Beijing Municipality Key Lab of Heating, Gas Supply, Ventilating and Air Conditioning Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, 100044; 2. China Academy of Building Research, Beijing, China, 100013)

**Abstract:** The objective is to establish energy efficiency technology suitability evaluation system of building envelope of near zero energy in different climate zones. The analytic hierarchy process (AHP) was used. According to the thermal performance index of non-transparent envelope in the national technical standard for near-zero energy building, the thermal insulation technology system of non-transparent envelope in different climate zones was designed. Five insulation materials and systems, such as molded polyphenylene board, graphite polyphenylene board, polyurethane board, rock wool board and vacuum insulation board, were tested on the weather resistance of building

收稿日期:2019-09-09

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0702600)

作者简介:李德英(1955—),男,教授,博士,主要从事供热及热能利用技术和建筑节能技术方面研究。

external walls for different areas. According to the evaluation system, the suggestions are put forward that, molded polyphenylene board, graphite polyphenylene board are given priority to be used in severe cold and cold climate zones, heat insulation coatings are used in hot summer and cold winter and hot summer and warm winter climate zones, and also need consider the shadings. The evaluation system can be reference to the design of near zero energy building envelope.

**Key words:** suitability; envelope structure; analytic hierarchy process(AHP); evaluation system

近零能耗建筑是指适应气候特征和场地条件,通过被动式建筑设计最大程度降低建筑供暖、空调、照明需求,通过主动技术措施最大程度提高能源设备与系统效率,充分利用可再生能源,以最少的能源消耗提供舒适室内环境的建筑<sup>[1]</sup>.近零能耗建筑的围护结构构造及保温材料性能至关重要,在不同气候区的近零能耗建筑所需的围护结构材料特性不同,北方地区应保证围护结构的保温性能更高,而南方地区保证围护结构的隔热性能<sup>[2-6]</sup>.

适宜性技术是指针对该地区具体条件,结合当时当地的自然、经济和社会环境,能取得最佳综合效益的技术系统<sup>[7]</sup>.中国不同气候区的供暖供冷能耗需求不同<sup>[8-13]</sup>,所需围护结构材料特性也不同,目前还没有建立不同气候区近零能耗建筑围护结构保温隔热节能技术适宜性评价体系.基于此,笔者针对不同气候

区近零能耗建筑围护结构的适宜性进行研究,通过层次分析法和 Delphi 专家咨询法,提出了在不同气候区最适宜采用的围护结构体系,为近零能耗围护结构提供设计依据.

## 1 现状调研

笔者对近几年近零能耗示范项目外墙保温材料的应用现状进行现场调研与资料收集<sup>[14-15]</sup>,共包括3个严寒地区项目、5个寒冷地区项目、2个夏热冬冷地区项目以及1个夏热冬暖地区项目,具体示范项目信息见表1.从表中可以看出,在严寒地区的近零能耗建筑外墙保温材料主要以石墨改性聚苯板(SEPS)外保温体系为主;在寒冷地区,以岩棉条和石墨改性聚苯板外墙外保温体系应用较多.当前应用的保温体系还有聚氨酯复合板、模塑聚苯板、岩棉条、挤塑板、真空绝热板等保温体系.

表1 示范项目信息表

Table 1 Demonstration projects information

气候区	项目地点	示范项目	外墙保温体系	外墙传热系数设计值/ ( $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ )
严寒地区	吉林	1	20 mm 气凝胶真空绝热板 + 100 mm 石墨聚苯板 + 100 mm 石墨聚苯板	0.15
	吉林	2	加气砼砌块 + 岩棉 + 苯板 + 表皮层保温系统	0.15
	黑龙江	3	300 mm 石墨聚苯板外保温	0.10
寒冷地区	北京	4	外挂真空绝热板外保温	0.15
	河南	5	150 mm 石墨聚苯板外保温	0.20
	山东	6	250 mm 岩棉保温板外保温	0.17
	河北	7	300 mm 钢筋混凝土 + 220 mm 石墨聚苯板保温	0.13
夏热冬冷	北京	8	300 mm 厚岩棉条保温	0.14
	江苏	9	轻质砌块 + 100 mm 岩棉保温	0.20
夏热冬暖	江西	10	200 厚加气混凝土墙 + 200 厚岩棉条	0.21
	广东	11	EPS 石墨聚苯板外保温薄抹灰体系	0.20

## 2 适宜性评价体系的建立

根据围护结构的保温性、防火性能、施工便利性、耐久性、联结安全性以及经济性能等相关影响因素,建立了严寒、寒冷、夏热冬冷和夏热冬暖地区近零能耗建筑围护结构适宜性评价体系.设置一级指标层为技术性(B1)

和经济性(B2),对一级指标层细分为7个二级指标层,再对二级指标层细分三级指标层,各气候区的指标层建立如图1所示.其中屋面和门窗的耐候性、耐融冻性、抗冲击性等性能较外墙的复杂程度要低.运用 Delphi 法和层次分析法<sup>[16-17]</sup>对高性能围护结构进行权重分析.

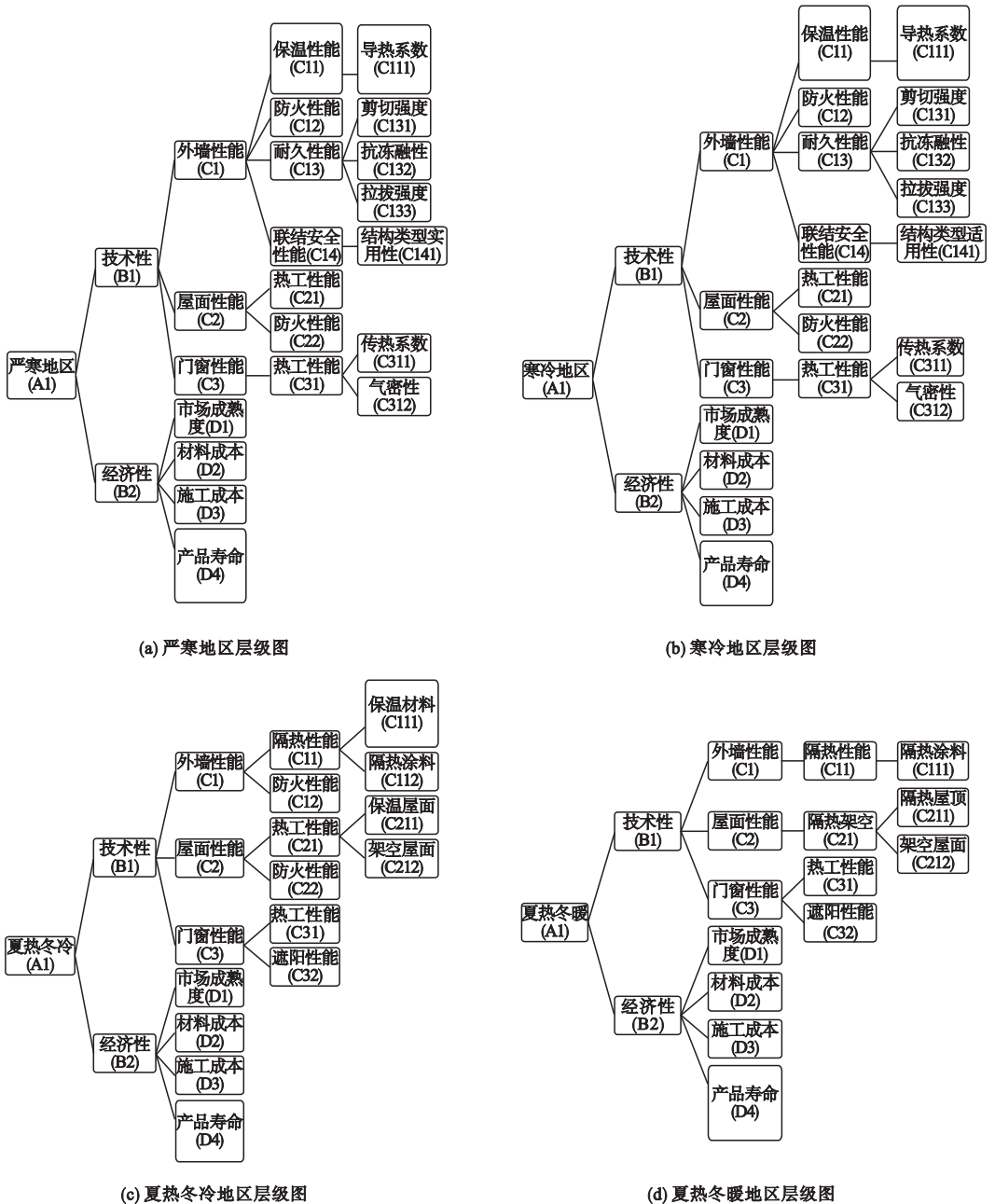


图 1 各气候区建筑围护结构适宜性评价指标层级图

Fig. 1 Levels of building envelope suitability evaluation index in each climate zones

本次调查问卷共发放 40 位副高级以上的专家,收回问卷 36 份. 根据调查问卷,推算出各指标的权重,通过不断反馈和修改,得到相应结果. 按照围护结构适宜性评价体系的结构层次及各级指标分别给各级指标的权重赋值. 由专家对每项指标的重要性程度进行 1~9 分的评价,9 表示对上级指标影响最大,1 表示对上级指标影响最小. 其中经济性指标中,所用材料成本越高则打分越低,成熟度越高则打分越高. 采用两轮 Delphi 专家咨询法修正指标体系. 利用层次分析法,对由 Delphi 法得到的权重值进行进一步分析.

运用 yaahp 软件<sup>[18]</sup>对 36 位专家的打分输入判断矩阵中,计算得出方案层对目标层的权重值,结果见表 2~表 5. 根据权重分析结果可以看出,在严寒和寒冷地区,外墙和屋面应用的保温材料中,石墨聚苯板和模塑聚苯板的权重值最高,达到 0.167;门窗措施中节能门窗权重最高,达到 0.216;在夏热冬冷地区,外墙、屋面和门窗的权重值最高分别为隔热涂料 0.159、保温屋面 0.174、节能门窗 0.186;在夏热冬暖地区中权重值最高的分别是外墙隔热涂料 0.232、屋面的隔热屋顶 0.197、门窗的遮阳板 0.209.

表 2 严寒地区权重分析

Table 2 Weight analysis of severe cold climate zone

第 1 个准则层	对目标层权重	第 2 个准则层	对目标层权重	第 3 个准则层	对目标层权重	第 4 个准则层	对目标层权重	方案层	对目标层权重		
技术性 B1	0.529	外墙性能 C1	0.176	保温性能 C11	0.044	导热系数 C111	0.044	节能门窗	0.216		
				外墙防火性能 C12	0.044	—	—	石墨聚苯板	0.167		
				耐久性 C13	0.044	剪切强度 C131	0.016	模塑聚苯板	0.167		
				—	—	抗冻融性 C132	0.014	聚氨酯保温板	0.159		
				—	—	拉拔强度 C133	0.014	遮阳	0.010		
				—	—	联结安全性能 C14	0.044	结构类型适用性 C141	0.044	岩棉条	0.099
				—	—	屋面热工性能 C21	0.088	—	—	真空绝热板	0.092
				—	—	屋面防火性能 C22	0.088	—	—	—	—
				—	—	门窗热工性能 C31	0.177	—	—	—	—
				—	—	—	—	—	—	—	—
				—	—	—	—	—	—	—	—
				—	—	—	—	—	—	—	—
				—	—	—	—	—	—	—	—
				—	—	—	—	—	—	—	—
经济性 B2	0.471	市场成熟度 D1	0.121	—	—	—	—	—	—		
		材料成本 D2	0.121	—	—	—	—	—	—		
		施工成本 D3	0.108	—	—	—	—	—	—		
		产品寿命 D4	0.121	—	—	—	—	—	—		

表 3 寒冷地区权重分析

Table 3 Weight analysis of cold climate zone

第 1 个 准则层	对目标 层权重	第 2 个 准则层	对目标 层权重	第 3 个 准则层	对目标 层权重	第 4 个 准则层	对目标 层权重	方案层	对目标 层权重		
技术性 B1	0.529	外墙性能 C1	0.176	保温性能 C11	0.044	导热系数 C111	0.044	节能门窗	0.216		
				外墙防火性能 C12	0.044	—	—	石墨聚苯板	0.167		
				耐久性能 C13	0.044	剪切强度 C131	0.015	模塑聚苯板	0.167		
				—	—	抗冻融性 C132	0.014	聚氨酯保温板	0.159		
				—	—	拉拔强度 C133	0.015	遮阳	0.100		
				—	—	联结安全性能 C14	0.044	结构类型适用性 C141	0.044	岩棉条	0.099
				—	—	屋面热工性能 C21	0.088	—	—	真空绝热板	0.093
				—	—	屋面防火性能 C22	0.088	—	—	—	—
				—	—	门窗热工性能 C31	0.177	—	—	—	—
				—	—	市场成熟度 D1	0.125	—	—	—	—
经济性 B2	0.471	材料成本 D2	0.111	—	—	—	—	—			
		施工成本 D3	0.111	—	—	—	—	—			
		产品寿命 D4	0.125	—	—	—	—	—			
		—	—	—	—	—	—	—			

表 4 夏热冬冷地区权重分析

Table 4 Weight analysis of hot summer and cold winter climate zone

第 1 个准则层	对目标层权重	第 2 个准则层	对目标层权重	第 3 个准则层	对目标层权重	方案层	对目标层权重
技术性 B1	0.500	外墙性能 C1	0.142	外墙隔热性能 C11	0.071	节能门窗	0.186
				外墙防火性能 C12	0.071	遮阳板	0.177
				屋面热工性能 C21	0.083	保温屋面	0.174
				屋面防火性能 C22	0.083	外墙隔热涂料	0.159
				门窗热工性能 C31	0.088	架空屋面	0.157
—	—	—	—	遮阳性能 C32	0.104	外墙保温材料	0.148
经济性 B2	0.500	市场成熟度 D1	0.132	—	—	—	—
		材料成本 D2	0.118	—	—	—	—
		施工成本 D3	0.118	—	—	—	—
		产品寿命 D4	0.132	—	—	—	—

表5 夏热冬暖地区权重分析

Table 5 Weight analysis of hot summer and warm winter climate zone

第1个准则层	对目标层权重	第2个准则层	对目标层权重	第3个准则层	对目标层权重	方案层	对目标层权重
技术性 B1	0.500	外墙性能 C1	0.125	外墙隔热性能 C11	0.125	外墙隔热涂料	0.232
		屋面性能 C2	0.175	隔热架空 C21	0.175	遮阳板	0.209
		门窗性能 C3	0.200	门窗热工性能 C31	0.080	隔热屋顶	0.197
				遮阳性能 C32	0.120	节能门窗	0.194
经济性 B2	0.500	市场成熟度 D1	0.132	—	—	架空屋面	0.168
		材料成本 D2	0.118	—	—	—	—
		施工成本 D3	0.118	—	—	—	—
		产品寿命 D4	0.132	—	—	—	—

### 3 保温材料性能测试

为验证上述指标体系相关指标的可行性与地区适宜性,笔者重点对外墙保温体系中高性能保温材料的耐候性、耐融冻性、抗冲击性等性能进行试验。试验所选用的高性能墙体保温材料为模塑聚苯板、石墨改性聚苯板、聚氨酯复合板、岩棉条、真空绝热板等5种材料。

根据文献[19]的要求,近零能耗建筑外墙平均传热系数以及不同气候区保温材料厚度范围见表6、表7<sup>[20]</sup>。参考《模塑聚苯板薄抹灰外墙外保温系统材料》(GB/T 29906)、《硬泡聚氨酯板薄抹灰外墙外保温系统材料》(JG/T 420)、《建筑绝热用石墨改性模塑

聚苯乙烯泡沫塑料板》(JC/T 2441—2018)、《建筑外墙保温用岩棉制品》(GB/T 25975—2010)、《建筑用真空绝热板》(JG/T 438—2014)等标准,对5种保温材料的耐候性、耐融冻性、抗冲击性进行测试,测试结果见表8。

表6 居住建筑外墙平均传热系数

Table 6 Average heat transfer coefficient of external walls of residential buildings

气候区	传热系数/( $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ )
严寒地区	0.10~0.15
寒冷地区	0.15~0.20
夏热冬冷地区	0.15~0.40
夏热冬暖地区	0.30~0.80
温和地区	0.20~0.80

表7 不同气候区保温材料厚度范围

Table 7 Thickness range of insulation materials in different climate zones

板材	严寒地区外墙满足传热系数 $0.1 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 时保温材料理论厚度值	寒冷、夏热冬冷地区外墙满足传热系数 $0.2 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 时保温材料理论厚度值	夏热冬冷、夏热冬暖、温和地区外墙满足传热系数 $0.35 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 时保温材料理论厚度值
	mm		
模塑聚苯板	≥350	≥180	≥90
石墨改性膨胀聚苯板	≥300	≥150	≥76
聚氨酯复合板	≥225	≥105	≥58
岩棉条	≥450	≥240	≥115
真空绝热板	≥75	≥35	≥20

表8 保温材料耐候性、耐冻融性及抗冲击性测试结果

Table 8 Results of weather resistance, freeze-thaw resistance and impact resistance of insulation materials

检验材料	测试保温层厚度/mm	检测项目	检测内容	测试结果	结论	
模塑聚苯板 (EPS)系统	370、350、300、 240、200	耐候性	外观	370 mm 厚以下时未发现起泡、剥落、空鼓、脱落等破坏现象,未发现裂缝;370 mm 厚时发现起泡、裂缝	合格	
			抹面层与保温层 拉伸粘结强度	0.12 MPa/0.12 MPa/0.12 MPa/ 0.13 MPa,模塑聚苯板破坏		
		耐冻融性	外观	未发现裂缝,未发现粉化、空鼓、剥落现象		合格
	抹面层与保温层 拉伸粘结强度		0.22 MPa/0.24 MPa/0.25 MPa/ 0.24 MPa,模塑聚苯板破坏			
	抗冲击性		二层及以上	3J 冲击合格	合格	
		首层	10 J 冲击合格			
石墨聚苯板 (SEPS)系统	320、300、240、200	耐候性	外观	320 mm 厚以下时未发现起泡、剥落、空鼓、脱落等破坏现象,未发现裂缝;320 mm 厚时发现起泡、裂缝	合格	
			抹面层与保温层 拉伸粘结强度	0.12 MPa/0.12 MPa/0.11 MPa/ 0.11 MPa,石墨聚苯板破坏		
		耐冻融性	外观	未发现裂缝,未发现粉化、空鼓、剥落现象		合格
	抹面层与保温层 拉伸粘结强度		0.21 MPa/0.24 MPa/0.23 MPa/ 0.23 MPa,石墨聚苯板破坏			
	抗冲击性		二层及以上	3J 冲击合格	合格	
		首层	10J 冲击合格			
聚氨酯板(PU) 系统	300、250、240、 200、160	耐候性	外观	未发现起泡、剥落、空鼓、脱落等破坏现象,未发现裂缝	合格	
			抹面层与保温层 拉伸粘结强度	0.10 MPa/0.11 MPa/0.12 MPa/ 0.11 MPa/0.12 MPa,聚氨酯板破坏		
		耐冻融性	抹面层与保温层 拉伸粘结强度	0.13 MPa/ 0.12 MPa/0.13 MPa/0.13 MPa/0.12 MPa,聚氨酯板破坏		合格
	抗冲击性		二层及以上	3J 冲击合格	合格	
			首层	10J 冲击合格		



续表

检验材料	测试保温层厚度/mm	检测项目	检测内容	测试结果	结论
岩棉(RW)系 统	480、400、多层 300、 单层 300、240	耐候性	外观	未发现起泡、剥落、空鼓、脱落等 破坏现象,未发现裂缝	合格
			抹面层与保温层 拉伸粘结强度	159 kPa/98 kPa/106 kPa /201 kPa/111 kPa,岩棉条破坏	
	480、400、多层 300、 240	耐冻融性	外观	未发现裂缝,未发现粉化、空鼓、 剥落现象	合格
			抹面层与保温层 拉伸粘结强度	169 kPa/121 kPa/116 kPa /123 kPa,岩棉条破坏	
真空绝热板 (VIP)系统	480、400、多层 300、 240	抗冲击性	二层及以上	3J 冲击合格	合格
			首层	10J 冲击合格	
	100、50、60、90、100	耐候性	外观	未发现起泡、剥落、空鼓、脱落等 破坏现象,未发现裂缝	合格
			抹面层与保温层 拉伸粘结强度	0.12 MPa/0.13 MPa/0.13 MPa/ 0.11 MPa/0.12 MPa,真空绝热 板与抹面砂浆界面破坏	
	100、50、60、90、100	耐冻融性	外观	未发现裂缝,未发现粉化、空鼓、 剥落现象	合格
			抹面层与保温层 拉伸粘结强度	0.14 MPa/0.16 MPa/0.15 MPa/ 0.15 MPa/0.15 MPa,真空绝热 板与抹面砂浆界面破坏	
100、50、60、90	抗冲击性	二层及以上	3J 冲击合格	合格	
		首层	10J 冲击合格		

从上表测试结果可以看出,材料厚度 370 mm 以下的模塑聚苯板系统进行耐候试验时未发现起泡、剥落、空鼓、脱落,未发现裂缝,但材料厚度为 370 mm 时发现起泡、裂缝;材料厚度 320 mm 以下的石墨聚苯板系统进行耐候试验时未发现起泡、剥落、空鼓、脱落,未发现裂缝,但材料厚度为 320 mm 时发现起泡、裂缝;其他系统进行耐候试验时未发现起泡、剥落、空鼓、脱落,未发现裂缝。后经重复测试,也未发现起泡、剥落、空鼓、脱落及裂缝。因此,严寒地区近零能耗建筑外墙保温系统施工时,应加强模塑聚苯板和石墨聚苯板保温体系的施工过程质量控制。

## 4 结 论

(1)通过权重分析可以得出,严寒和寒

冷地区近零能耗建筑的外墙和屋面保温材料建议优先采用石墨聚苯板和模塑聚苯板外墙保温体系,门窗优先选择节能门窗,如断桥铝门窗或铝包木窗,玻璃采用 Low-E 等高性能玻璃;在寒冷地区,聚氨酯保温体系权重仅次于石墨聚苯板和模塑聚苯板保温体系,因此也可优先考虑聚氨酯保温体系;在夏热冬冷地区,近零能耗建筑外墙建议优先以隔热涂料为主,屋面优先选择保温屋面,门窗优先考虑遮阳方式,节能门窗权重略高于遮阳板;在夏热冬暖地区,外墙优先选择隔热涂料,如水溶性热反射隔热涂料,屋顶优先选择隔热屋顶,门窗应考虑遮阳,优先选择遮阳板。

(2)试验结果表明,严寒地区近零能耗建筑外墙保温系统施工时,应加强模塑聚苯板和石墨聚苯板保温体系的施工过程质量控制。



## 参考文献

- [1] 徐伟. 近零能耗建筑发展与趋势[J]. 建筑, 2019(17):17.  
(XU Wei. Development and trend of nearly zero energy buildings [J]. Construction and architecture, 2019(17):17.)
- [2] 周思宇. 不同气候区围护结构节能技术对办公建筑能耗的影响[D]. 天津:天津大学, 2012.  
(ZHOU Siyu. Influence of energy-saving technology of enclosure structures in different climate zones on energy consumption of office buildings[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)
- [3] 李洁. 寒冷地区近零能耗高层住宅围护结构关键参数优化组合研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2018.  
(LI Jie. Coordination and optimization of envelope key parameters for nearly zero energy high-rise residence in cold region[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2018.)
- [4] 黄冬娜. 广州地区近零能耗居住建筑外围护结构指标研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.  
(HUANG Dongna. Research on outer enclosure structure index of near zero energy consumption residential building in Guangzhou[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.)
- [5] BOURRELLE J S, ANDRESEN I, GUSTAVSEN A. Energy payback; an attributional and environmentally focused approach to energy balance in net zero energy buildings[J]. Energy & buildings, 2013, 65:84-92.
- [6] KOLOKOTSA D D, ROVAS E, KOSMATOPOULOS K, et al. A roadmap towards intelligent net zero and positive-energy buildings [J]. Solar energy, 2010, 85(12):3067-3084.
- [7] 王映梅. 西北传统民居建筑的适宜性技术应用分析[J]. 中国科技信息, 2010(18):54-55.  
(WANG Yingmei. Analysis on the adaptability of traditional dwelling folk architecture in the northwest part of China[J]. China science and technology information, 2010(18):54-55.)
- [8] 苏珊. 寒冷地区近零能耗办公建筑设计策略研究[D]. 天津:河北工业大学, 2017.  
(SU Shan. Research on the design strategy of the office buildings in the cold area near zero energy consumption [D]. Tianjing: Hebei University of Technology, 2017.)
- [9] SARTORI I, NAPOLITANO A, VOSS K. Net zero energy buildings: a consistent definition framework[J]. Energy & buildings, 2011, 48:220-232.
- [10] YANG Liu, YAN Haiyan, JOSEPH C L. Thermal comfort and building energy consumption implications-a review[J]. Applied energy, 2014, 115:164-173.
- [11] ERWIN M. Defining nearly zero-energy housing in Belgium and the Netherlands [J]. Energy efficiency, 2012(5):411-431.
- [12] IGNACIO Z B, ANTONIO V C, ALFONSO A U. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential [J]. Building and environment, 2011 46(5):1133-1140.
- [13] THALFELDT M, PIKAS E, KURNTSKI J, et al. Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate [J]. Energy and buildings, 2013, 67:309-321.
- [14] 徐伟. 中国近零能耗建筑研究和实践[J]. 科技导报, 2017, 35(10):38-43.  
(XU Wei. Nearly zero energy building research and development in China [J]. Science & technology review, 2017, 35(10):38-43.)
- [15] 邓琴琴, 江威, 赵鑫, 等. 近零能耗建筑外墙外保温系统性能检测研究[J]. 建筑节能, 2018, 46(8):13-18.  
(DENG Qinqin, JIANG Wei, ZHAO Chu, et al. Performance testing of external wall thermal insulation system of near zero energy consumption building [J]. Building energy efficiency, 2018, 46(8):13-18.)
- [16] 刘伟涛, 顾鸿, 李春洪. 基于德尔菲法的专家评估方法[J]. 计算机工程, 2011(12):189-191.  
(LIU Weitao, GU Hong, LI Chunhong. Expert evaluation method based on delphi method[J]. Computer engineering, 2011(12):189-191.)
- [17] ASCIONE F, BIANCO N, DEROSI F, et al. Concept, design and energy performance of a net zero-energy building in mediterranean climate [J]. Procedia engineering, 2016, 169:26-37.
- [18] 周婷. 基于层次分析法的协同内容创建系统质量评价体系研究[D]. 郑州:郑州大学, 2016.  
(ZHOU Ting. Study on the quality evaluation system of the collaborative content creation system based on analytic hierarchy process[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 近零能耗建筑技术标准:GB/T51350—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for nearly zero energy buildings:GB/T51350—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)
- [20] 杨玉忠, 叶少华, 邓琴琴, 等. 墙体热阻测试过程的热损失分析[J]. 建筑节能, 2015, 43(3):99-101.  
(YANG Yuzhong, YE Shaohua, DENG Qinqin, et al. Energy loss analysis in the wall thermal resistance test [J]. Building energy efficiency, 2015, 43(3):99-101.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)