

上海超低能耗导则下高校教学楼的设计对能耗经济性的影响

王萌泽, 洪燕, 顾洁瑜

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年8月4日; 录用日期: 2024年8月27日; 发布日期: 2024年9月3日

摘要

对公共建筑节能设计标准和上海市超低能耗技术导则规范进行分析, 选取满足上海市超低能耗技术导则规范的围护结构保温材料。针对夏热冬冷地区的高校教学楼进行建筑节能设计, 用DeST-C软件对各个方案进行能耗模拟, 选取满足上海市超低能耗技术规范标准的围护结构构造。通过正交试验极差分析的方法, 根据其模拟的结果进行比对, 得出围护结构最佳方案: 外墙保温层选取厚度为50 mm的PF板, 屋面保温层选取厚度为60 mm的PF板, 外窗选择真空镀膜复合中空玻璃。为上海市超低能耗技术导则规范下教学楼节能设计的经济与节能方面提供重要的参考价值。

关键词

能耗模拟, DeST-C, 节能设计, 夏热冬冷地区, 正交试验, 上海超低能耗

Impact of the Design of University Teaching Buildings on Energy Economy under the Shanghai Ultra-Low Energy Consumption Guidelines

Mengze Wang, Yan Hong, Jieyu Gu

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 4th, 2024; accepted: Aug. 27th, 2024; published: Sep. 3rd, 2024

Abstract

The paper analyses the energy-saving design standards of public buildings and Shanghai's ultra-low

energy consumption technology guideline specification, and selects the envelope structure insulation materials that meet Shanghai’s ultra-low energy consumption technology guideline specification. In order to carry out building energy-saving design for university teaching buildings in hot summer and cold winter areas, DeST-C software is used to simulate the energy consumption of each scheme, and the envelope structure construction that meets the standard of Shanghai’s ultra-low-energy-consumption technology guideline is selected. Through the method of orthogonal test extreme difference analysis and comparison based on the results of its simulation, the best scheme of the envelope structure is concluded: the thickness of the external wall insulation layer is selected as 50 mm PF boards, the thickness of the roof insulation layer is selected as 60 mm PF boards, and the external windows are selected as vacuum-coated composite insulating glass. It provides an important reference value for the economic and energy-saving aspects of the energy-saving design of the teaching building under the specification of Shanghai’s ultra-low-energy-consumption technology guideline.

Keywords

Energy Consumption Simulation, DeST-C, Energy Efficient Design, Hot Summer and Cold Winter Region, Orthogonal Test, Shanghai Ultra Low Energy Consumption

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 研究现状与参考规范

自住房和城乡建设部于 2022 年 3 月 1 日发布《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》通知以来，我国的发展重心已转向全面推动大型公共建筑等新建建筑达到星级绿色建筑标准。据规划，到 2025 年，我国将完成既有建筑节能改造面积 3.5 亿平方米以上，并建设超低能耗、近零能耗建筑 0.5 亿平方米以上[1]。此外，教育部于 2022 年 10 月 26 日发布了《绿色低碳发展国民教育体系建设实施方案》[2]，标志着绿色低碳理念已融入校园建设，如图 1。

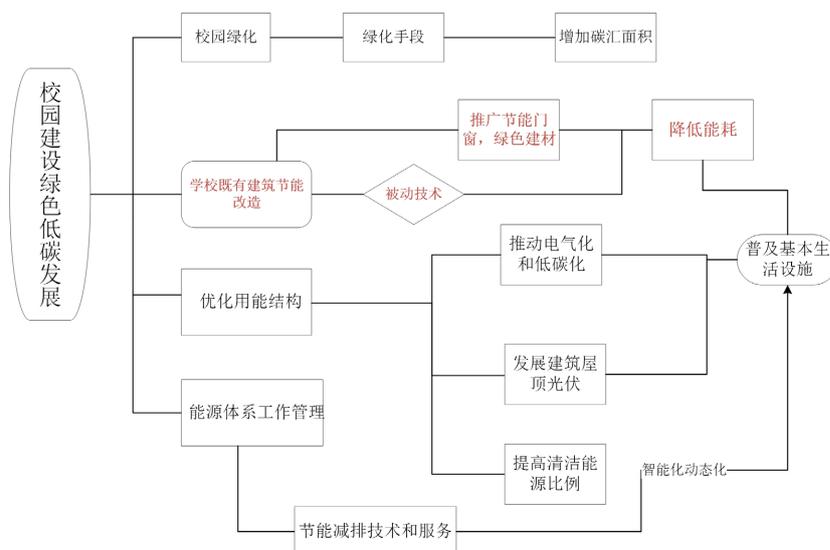


Figure 1. Campus green building content
图 1. 校园绿色建设内容

本文旨在研究高校建筑节能设计改造，利用被动技术以降低建筑冷热负荷的能耗，积极响应绿色校园建设的政策。

1.1. 现状分析

随着中国城镇化的不断推进，公共建筑面积迅速增长。2021年公共建筑中，学校建筑竣工面积占比20%，较2020年增长13%。据2022年全国教育事业统计公报[3]，全国共有高等学校3013所。其校舍建筑面积达113080.55万平方米，年增加4313.26万平方米，增长3.97%。这表明目前高校建筑存量巨大，单位面积能耗高，且高校建筑面积每年仍在不断扩大，节能潜力巨大。相关学者对此进行了研究，例如，巫春玲等[4]研究了位于寒冷地区的西安某一教学楼的节能设计改造，从围护结构、照明系统、供暖制冷三个方面降低能耗。王宏伟等[5]通过模拟计算设计了严寒地区的沈阳某高校的教学楼围护结构改造方案，得出最优围护结构改造方案。赵西平等[6]通过实地测量及调研分析了位于寒冷地区的兰州交通大学的教学建筑室内外环境及围护结构，建立模型对建筑进行能耗模拟，并设计改造方案。研究表明，围护结构的构造是节能的主要因素。黄仁达等[7]分析夏热冬冷地区不同墙体保温材料的经济厚度，结果得出聚氨酯泡沫塑料投资费用低，回收周期短。

综上所述，教学楼拥有很大的节能设计空间和应用空间。然而，目前大多数教学楼的节能改造局限在寒冷地区或严寒地区，关于夏热冬冷地区的教学楼节能改造涉及较少，且对于改造后的经济性未有太多分析。故本研究选取位于上海的某教学楼建筑为研究对象，分析围护结构设计对建筑能耗经济性的影响，根据规范进行外围护结构保温层防火、防水等设计。

1.2. 参考的基本规范

从全国范围来看，2015年新出台了统一的《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015)国家规范(以下简称《公共建筑》)。从地方来看，2012年上海市出台了《上海市公共建筑节能设计标准》(DGJ08-107-2012)的标准规范。到2019年，上海绿色建筑协会印发了《上海市超低能耗建筑技术导则(试行)》(以下简称《上海超低能耗》)。《上海超低能耗》是以满足国家标准《公共建筑》要求为基准建筑，在此基础上要求全年累计耗冷热量降低幅度 $\geq 30\%$ 。作为地方标准，充分结合上海地区气候特征和用能习惯，以进一步推动地区性建筑能效水平提升。更加注重实际应用，提供了更多的技术指导和实施细则。

鉴于此，选取目前正在试行最新地方规范更具有参考性和实际性。因此，本文主要参考《上海超低能耗》规范进行分析，筛选合适的保温材料，采用DeST-C软件模拟建筑的能耗。

2. 教学楼建筑节能改造分析

2.1. 案例概况

该教学楼建筑位于上海市中心区，其经济技术指标如表1所示。

Table 1. Basic building information
表 1. 建筑基本信息

建筑总面积(m ²)	14237.76		各楼面面积(m ²)		层数	
			1774.26		4	
外围护结构参数						
体形系数	0.18	屋面面积(m ²)	东墙体面积	南墙体面积	西墙体面积	北墙体面积
层高(m)	4.45	2027.02	1026.95	1660.46	1136.59	2247.53
综合窗墙比	0.24		东外窗面积	南外窗面积	西外窗面积	北外窗面积
			120.96	1175.77	30.96	594.24
各方向窗墙比			0.10	0.41	0.03	0.21

该教学楼的主要结构形式是钢筋混凝土框架结构。其中二层和三层有局部架空，出挑楼板也需考虑保温设计措施，图 2 为此建筑模型。

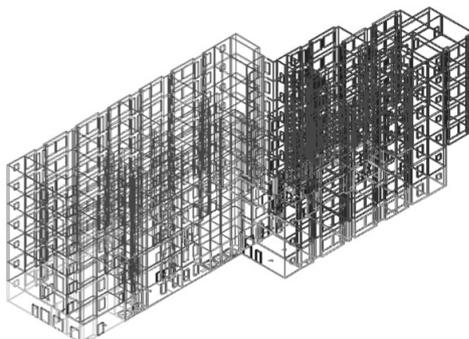


Figure 2. Building model schematic
图 2. 建筑模型示意图

首先对未考虑节能规范的建筑进行分析，通过 DeST-C 建立该教学楼模型，此时围护结构构造如表 2。

Table 2. Construction of the envelope when energy saving is not considered

表 2. 未考虑节能时的围护结构构造

围护结构	具体构造(mm)	传热系数/W/(m ² ·K)
外墙	20 水泥砂浆 + 200 的蒸压加气混凝土 + 20 水泥砂浆	0.813
外窗	普通 6 的单层玻璃	5.7
屋面	40 碎石混凝土 + 10 石灰砂浆 + 20 水泥砂浆 + 30 陶粒混凝土 + 120 钢筋混凝土 + 20 水泥砂浆	2.861

为了进一步得到具体的能耗，对此建筑进行能耗模拟。考虑到学生寒暑假不在校，该教学楼统一设置假期期间不进行供暖和供冷。通过 DeST-C 进行能耗模拟，得到该建筑的全年逐时冷热负荷，见图 3 所示。

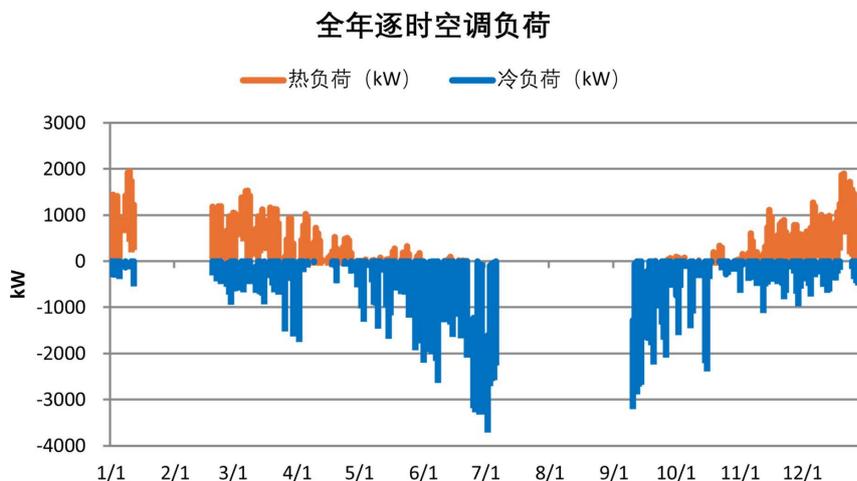


Figure 3. Building hourly cooling and heating loads throughout the year

图 3. 建筑全年逐时冷热负荷

该建筑冬季峰值热负荷为 1947.04 KW, 在 1 月 10 日时达到峰值。在 7 月 2 日时达到冷负荷峰值 3622.96 KW。全年累计热负荷为 813268.97 kW·h, 累计冷负荷为 849235.56 kW·h。制冷季偶尔会出现冷负荷, 制热季中偶尔会出现热负荷。表 3 为能耗模拟的冷热负荷数据。

Table 3. Air conditioning load data
表 3. 冷热负荷数据

总建筑空调面积		12108.48 m ²	
全年最大加湿量	978.71 kg/h	全年累计加湿量	181910.63 kg
全年累计热负荷	813268.97 kW·h	全年累计冷负荷	849235.56 kW·h
全年最大热负荷指标	160.80 W/m ²	全年最大冷负荷指标	299.21 W/m ²
全年最大加湿量指标	80.83 g/h/m ²	全年累计加湿量指标	15.02 kg/m ²
全年累计热负荷指标	66.88 kW·h/m ²	全年累计冷负荷指标	70.07 kW·h/m ²
采暖季热负荷指标	18.88 W/m ²	空调季冷负荷指标	15.25 W/m ²

2.2. 屋面节能改造分析

《上海超低能耗》中外墙、屋面、外窗传热系数约束值分别为 0.45、0.72、1.8 W/(m²·K), 且要求保温材料燃烧性能为 B1 级(难燃)以上。考虑常用保温材料的导热系数及施工特点, 本文选用改性酚醛泡沫塑料(PF)、模塑聚苯板(EPS 033 级、039 级)、挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS)、真空绝热板、岩棉板五种保温材料进行模拟分析。

首先选用导热系数最大的岩棉板进行分析, 每 10 mm 进行分段计算, 当材料厚度从 0 增加到 100 mm 时。总负荷指标对应的节能率增量分别: 2.02%、0.95%、0.67%、0.48%、0.35%、0.24%、0.18%、0.14%、0.12%、0.10%。其节能率增量逐渐降低趋于稳定。当岩棉板厚度达到 100 mm 时, 其节能率增量相比 90 mm 厚度时, 仅降低了 0.02%, 节能率降低幅度基本可以忽略不计。因此考虑到经济性的问题, 将保温材料厚度范围缩小到 80 mm 厚度, 每 10 mm 进行分段。使用 DeST-C 进行冷热负荷计算, 不同厚度、保温材料的屋面累计冷热负荷如图 4(a), 4(b)所示。

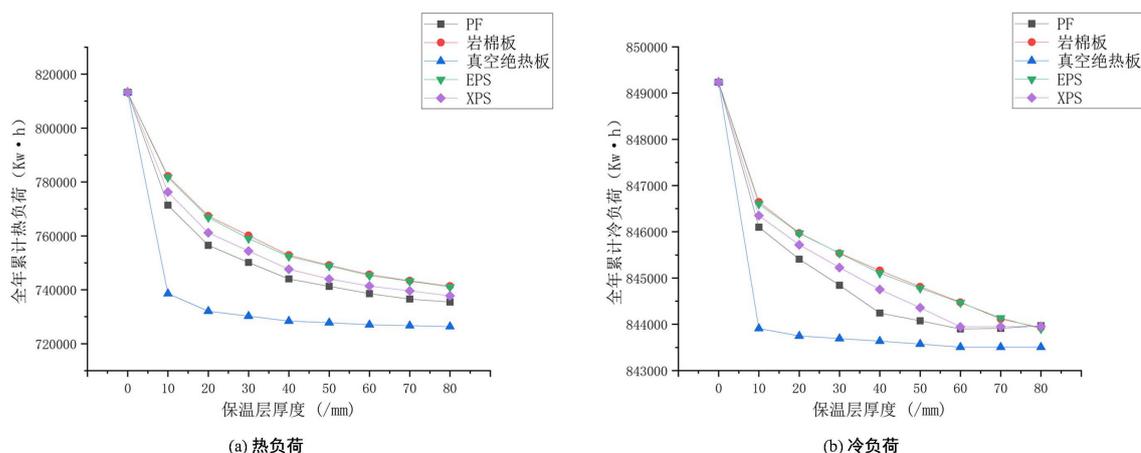


Figure 4. Cumulative annual cooling and heating load of building roofs with different thicknesses of insulation materials
图 4. 各保温材料不同厚度下建筑屋面全年累计冷热负荷

当保温层厚度达到 10 mm 时, 屋面全年累计热负荷降低幅度最大, 且逐渐趋于平缓。PF 板, 岩棉板、真空绝热板、EPS 板、XPS 板其热负荷分别降低 41867.05、31076.7、74719.98、31582.06、37034.26

kW·h。真空绝热板热负荷降低幅度最大，其次是 PF 板。

随着保温层厚度的增加，屋面全年累计冷负荷逐渐降低。且逐渐趋于平缓，然而 XPS 和 PF 板厚度为 60 mm 时，保温材料的导热系数小于 0.45。全年累计冷负荷开始微量增加。

Table 4. Heat transfer coefficients of building roofs with different thicknesses of each insulation material
表 4. 各保温材料不同厚度下建筑屋面传热系数

保温材料	厚度(mm)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
PF	2.861	1.351	0.864	0.635	0.502	0.415	0.354	0.309	0.273	
岩棉板	2.861	1.743	1.214	0.931	0.741	0.635	0.548	0.482	0.43	
真空绝热板	2.861	0.354	0.188	0.128	0.097	0.078	0.065	0.056	0.049	
EPS	2.861	1.724	1.195	0.915	0.731	0.623	0.537	0.472	0.421	
XPS	2.861	1.522	1.01	0.755	0.603	0.502	0.43	0.376	0.334	

通过模拟计算，在满足《上海超低能耗》规范下，改性酚醛泡沫塑料(PF)、模塑聚苯板 EPS (033 级、039 级)、挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS)、真空绝热板、岩棉板其屋面最小厚度分别为 24.9、40.5、31.2、4.3、41.6 mm。综合表 4，当保温层厚度为 30 mm 时，保温材料都基本满足《公共建筑》设计标准的传热系数限值 1.0，其中 PF 板与真空绝热板满足《上海超低能耗》限值 0.72。当保温层厚度为 50 mm 时，保温材料的传热系数都满足《上海超低能耗》限值。

2.3. 外墙节能改造分析

依旧选取与屋面相同的五种保温材料进行外墙能耗分析，采用耐候性好、施工简单、成本较低的薄抹灰外墙外保温的方式进行外墙外保温设计。外墙保温材料厚度取 0 到 80 mm 分段，每 10 mm 为一段。通过模拟后，得出的不同厚度、不同保温材料的外墙累计冷热负荷如图 5(a)，图 5(b)所示。

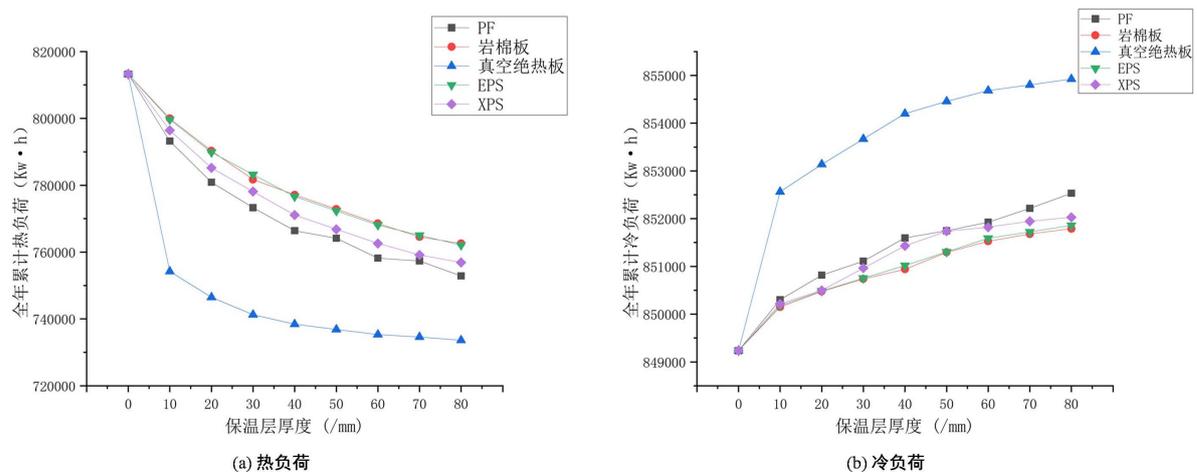


Figure 5. Cumulative annual cooling and heating load of the external walls of buildings with different thicknesses of insulation materials

图 5. 各保温材料不同厚度下建筑外墙全年累计冷热负荷

保温层厚度增加，其全年累计热负荷逐步减小，且减小的趋势会越来越平缓。当添加保温层时，所有材料的热负荷有显著降低，其中真空绝热板热负荷降低幅度最大，当保温层厚度为 10 mm 时，其真空绝

热板的热负荷降低为 754239.41 kW·h。其他保温材料热负荷降低幅度从大到小分别是 PF、XPS、EPS、岩棉板。分别降低至 793230.47、796424.7、799679.1、799956.1 kW·h。

然而全年累计冷负荷会逐渐增大，主要是因为保温层的厚度增加，其传热系数减小，建筑保温能力增强，建筑围护结构的热惰性也增加。热量通过围护结构的传递时间延长，导致室内的热量滞后于室外温度的变化。在夏季，白天的热量积蓄在保温层中，夜晚热量仍会逐渐释放到室内，从而增加了夜间的冷负荷。因此在夏季室内的热量难以散失，导致建筑冷负荷的增加。其中岩棉板的累计冷负荷增加最为缓慢，岩棉板保温层厚度从 0 mm~80 mm 时，其冷负荷仅增加了 2553.37 kW·h。

Table 5. Heat transfer coefficients of external walls of buildings with different thicknesses of insulation materials
表 5. 各保温材料不同厚度下建筑外墙传热系数

保温材料	厚度(mm)								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
PF	0.799	0.599	0.48	0.4	0.343	0.3	0.267	0.24	0.218
岩棉板	0.799	0.666	0.571	0.5	0.444	0.4	0.363	0.333	0.308
真空绝热板	0.799	0.267	0.16	0.114	0.089	0.073	0.062	0.053	0.047
EPS	0.799	0.663	0.567	0.495	0.439	0.395	0.358	0.328	0.303
XPS	0.799	0.631	0.521	0.444	0.387	0.343	0.308	0.279	0.255

根据表 5，在满足《上海超低能耗》外墙传热系数限值 0.45 的规范下，其改性酚醛泡沫塑料(PF)、模塑聚苯板 EPS (033 级、039 级)、挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS)、真空绝热板、岩棉板其最小厚度分别为 23.1、38.2、28.9、3.9、38.9 mm。当保温材料厚度为 40 mm 时，均满足规范要求。

综上分析，若采用真空绝热板时，则全年累计热负荷相较于 XPS、EPS、PF 板和岩棉板显著降低，保温效果好，但全年累计冷负荷相较于其他保温板显著提高。而 EPS 保温板和岩棉板冷热负荷数据较为相似，EPS 板保温效果稍好于岩棉板，但岩棉板的耐火性较好，防火等级为 A，而 EPS 板的耐火等级为 B1。XPS 板和 PF 板的保温效果都比 EPS 和岩棉板好，在综合考虑保温效果和耐火性的情况下，选择 XPS 与 PF 两种保温材料较为合适。

2.4. 外窗节能改造分析

在满足《上海市超低能耗》外窗传热系数 1.8 的限制下，选取表 6 两种玻璃来进行冷热负荷的模拟分析。

Table 6. Glass selection under Shanghai Ultra-low Energy Building Technical Guidelines
表 6. 上海市超低能耗建筑技术导则下玻璃选取

编号	玻璃类型名称	结构尺寸/mm	传热系数/ W/(m ² ·K)	太阳能得热系数
1	真空镀膜复合中空玻璃	3 (low-e) + 0.1 + 3 + 9 + 6	1.4	0.496
2	内张膜中空玻璃(单膜)	6air + Pet (low-e) + 6air + 6	1.7	0.522

对于上述两种玻璃，进行模拟分析，得到图 6 所示结果。

进行节能设计后的外窗能耗相较于未考虑节能时的外窗能耗有较大幅度降低，无论是冷负荷还是热负荷。其真空镀膜复合中空玻璃和内张膜中空玻璃两种玻璃的节能率分别为 11.7%和 10.7%，节能率提升幅度较大。相较于外墙和屋面，外窗对于建筑的能耗降低更为明显。

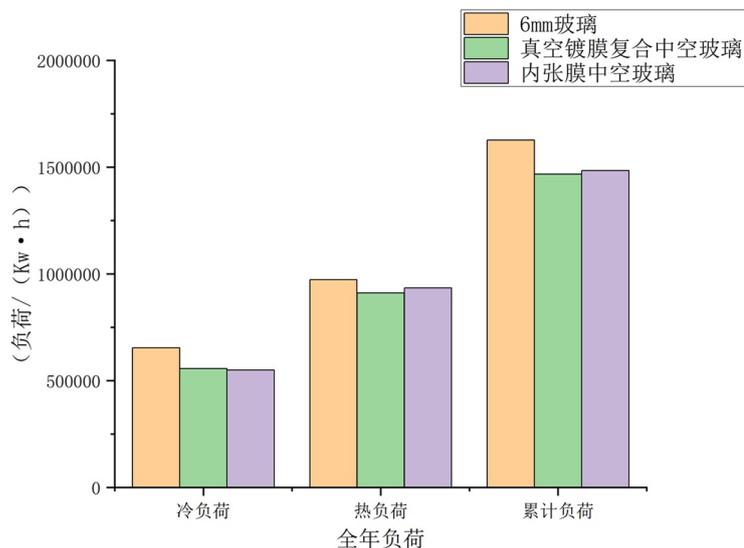


Figure 6. Cooling and heating load of each glass under the Technical Guidelines of Shanghai Ultra-low Energy Consumption Building

图 6. 上海市超低能耗建筑技术导则下各玻璃冷热负荷

上海地区属于夏热冬冷地区，除需充分考虑外墙、外窗、屋面的节能要素外，还需考虑遮阳设计。根据阳江英等学者的研究可知[8]，夏热冬冷地区的遮阳系数对建筑能耗的影响很大。因此在不改变窗墙比的情况下，对此建筑进行遮阳的设计。对于夏热冬冷地区而言，南向和西向分别用横向百叶和竖向百叶外遮阳的方式。南向由于全年日照时间较长，可以设计固定遮阳板，而东西向采用活动式外遮阳的设计[9]。

3. 经济性分析

上述能耗模拟未考虑各个材料的经济性。因此，需计算各保温材料经济性，选取合适的节能设计方案。

建筑节能改造的经济效益分析一般用静现值 NPV 作为评价的指标[10]-[12]，用于衡量不同的投资方法所获得经济效益的大小，计算可见式(1)~(4)

$$NPV = R - I \quad (1)$$

$$R = \Delta Q \times 0.67 \times (P/A, i, n) \quad (2)$$

$$NPVR = NPV / I \quad (3)$$

$$\Delta NPVR = \Delta NPV / \Delta I \quad (4)$$

其中式中 R 为节能收益现值，元/m²；

ΔQ 为改造后节省的年耗电量，kW·h/m²；

I 为投资成本；上海市分为三档阶梯电价，为方便计算取第二档电价，故取 0.67 kW·h； $(P/A, i, n)$ 为年金现值系数， i 银行投资回报率取 6%， n 取 25 年；

经计算得年现金系数为 12.78335。

根据杜传梅等学者[13]研究，夏热冬冷地区建筑保温材料厚度 0~60 mm 厚度时可达到最佳节能率。因此本文先采用了限定在 60 mm 厚度的保温材料，对外墙和屋顶进行了节能率与净现值的经济效益分析。表 7，表 8 分别展示了外墙和屋面的经济性分析结果。

Table 7. Economical insulation exterior wall materials at a thickness of 60 mm
表 7. 60 mm 厚度下各保温外墙材料经济性

60 mm 保温材料	NPVR	NPV/元	投资费用/元	单价/元	节能率
PF 板	0.776	136128.7	332575.6	55	3.15%
岩棉板	0.869	168942.2	194,289	32	2.55%
真空绝热板	-0.615	-993914.6	1,615,027	266	4.36%
EPS 板	0.678	148488.3	218392.9	35.97	2.57%
XPS 板	0.9754	203340.1	208557.1	34.35	2.89%

根据表中所列数据，除了真空绝热板的净现值为负值外，其他材料的净现值均为正值，正值说明采用该围护材料每年都能节约能源并回收成本。

Table 8. Economical insulation exterior wall materials at a thickness of 60 mm
表 8. 60 mm 厚度下各保温屋面材料经济性

60 mm 保温材料	NPVR	NPV/元	投资费用/元	单价/元	节能率
PF 板	3.336	567564.2	158133.2	41.6	4.81%
岩棉板	4.095	498110.5	121,641	32	4.35%
真空绝热板	-0.221	-223579.0	1,011,140	266	5.53%
EPS 板	3.557	486421.5	136,732	35.97	4.37%
XPS 板	4.062	530422.5	130,574	34.35	4.64%

表 7，表 8 中，屋面与外墙的保温材料节能率较低的原因有两个方面。首先，教学楼在 7~9 月和 1~3 月为学生假期，建筑冷热负荷能耗最大，但无需进行制冷和制热，所以相比其他公共建筑，节能率提升较小。其次，根据建筑外窗能耗模拟，上海地区外窗对建筑能耗的影响最为明显。

由于真空绝热板每平方米单价过于昂贵，其投入并不能回收成本，净现值为负。结合上文外墙屋面保温材料的模拟能耗分析。综合考虑节能率和净现值，XPS 板和 PF 板应优先考虑作为围护结构外保温设计。

因此对 XPS 与 PF 两种保温材料分析，图 7，图 8 是两种材料分别在屋面与外墙的节能率与净现值。

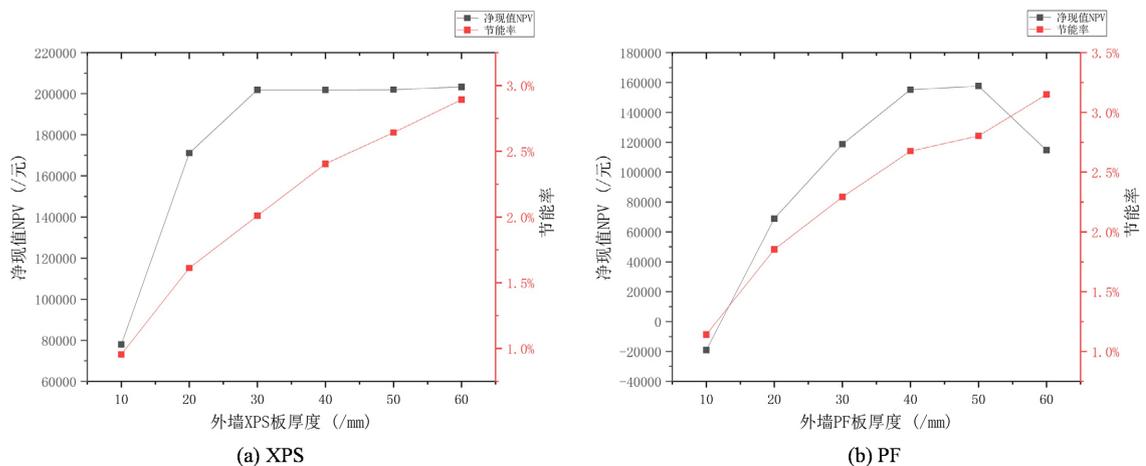


Figure 7. Energy saving rate and net present value of exterior PF and XPS panels
图 7. 外墙 PF 板与 XPS 板节能率与净现值

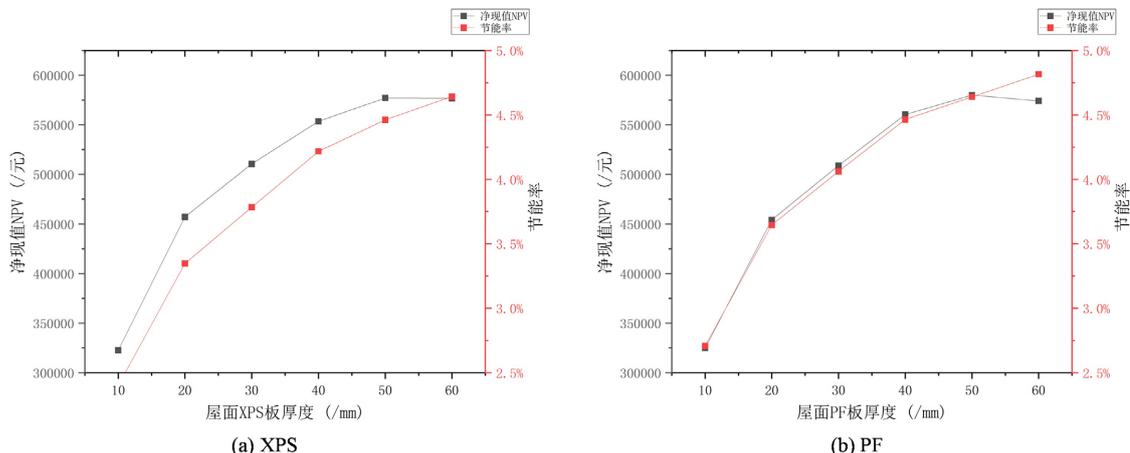


Figure 8. Energy efficiency and net present value of roofing PF and XPS panels

图 8. 屋面 PF 板与 XPS 板节能率与净现值

由上述四幅图的折线变化，观察到以下趋势：

- (1) 对于外墙 PF 保温材料，当厚度在 10~50 mm 范围内时，净现值持续增长，直到厚度达到 60 mm 时降低。
- (2) 对于外墙 XPS 保温材料，当厚度在 30~60 mm 范围内时，净现值缓慢降低。
- (3) 对于屋面 PF 保温材料，净现值从 50~60 mm 厚度时开始降低，说明此时厚度继续增加并不划算。
- (4) 对于屋面 XPS 保温材料，厚度从 50~60 mm 时，净现值略微降低。

根据上述趋势来确定最优保温材料厚度，保证节能的同时最大程度地降低成本。

正交试验极差分析

在确定了外墙和屋面厚度范围及材料的情况下，为了从多种组合中找到最优解决方案，且减少大量的模拟计算，所以采用正交方法进行试验。根据《上海市超低能耗》规范下的保温材料最小厚度及上述对 XPS 与 PF 保温材料的分析，选取了两种外窗类型，三种不同厚度保温材料的外墙和屋面。选择 1，2，3 三种水平，如表 9 所示。

Table 9. Factors-level table

表 9. 因素 - 水平表

因子	1	2	3
外窗	内张膜中空玻璃(单膜)	真空镀膜复合中空玻璃	—
外墙	30 mm 厚 PF 板	40 mm 厚 PF 板	50 mm 厚 PF 板
屋面	50 mm 厚 PF 板	60 mm 厚 PF 板	60 mm 厚 XPS 板

由于外窗因子数为 2，所以采用组合法，将其多余方案删除。进行正交极差分析。下表为将多余方案删除后的正交试验表 10 和极差分析表 11。

Table 10. Orthogonal test

表 10. 正交试验

编号	外墙	窗户	屋面	节能率	净现值
1	1	1	1	14.76%	1,154,544
2	1	2	3	15.43%	1,240,533

续表

3	2	1	3	15.04%	1,188,985
4	2	2	2	15.92%	1,277,931
5	3	1	2	15.43%	1,229,977
6	3	2	1	16.03%	1,281,056

Table 11. Range analysis**表 11.** 极差分析

编号	外墙	屋面	窗户
K1	2,395,077	2,435,600	3,573,506
K2	2,466,916	2,429,517	3,799,520
K3	2,511,034	2,507,908	-
K1	1,197,538	1,217,800	1,191,169
K2	1,233,458	1,214,759	1,266,507
K3	1,255,517	1,253,954	-
R	57978.47	39195.56	75338.18
折算系数 d	0.52	0.52	0.71
R'	42636.85	28824.06	92647.58
因素最佳水平	3	2	2
因素主次顺序	窗户 > 外墙 > 屋面		

注: K_1 , K_2 , K_3 为每个因素各个水平下的指标总和 R 为极差, 表明因子对结果的影响幅度。

上表最优组合为外墙 3 屋面 2 窗户 2, 对建筑能耗影响最大的为窗户, 其次是外墙, 影响最小的为屋面。此时建筑的节能与经济性最佳。

4. 结论

(1) 相较于未考虑节能设计的建筑, 进行节能改造后的目标建筑由于保温能力显著增强, 在夏季室内的热量难以散失, 导致建筑冷负荷略有增加, 但热负荷明显降低。

(2) 当外墙与屋面的传热系数不变时, 选用满足《上海超低能耗》规范下的外窗, 真空镀膜复合中空玻璃和内张膜中空玻璃节能率分别为 11.7% 和 10.7%, 其建筑冷热负荷显著降低。在此建筑围护结构中对能耗的影响最大。

(3) 最优的围护结构节能方案为 50 mm 厚 PF 板外墙、60 mm 厚 PF 板屋面和真空镀膜复合中空玻璃。与未考虑节能建筑相比, 其节能率达到 16.14%。

(4) 围护结构各影响因素对建筑能耗的主次顺序分别为窗户 > 外墙 > 屋面。

本文就高校教学楼进行了能耗和经济性的分析, 得出了具体的节能方案。期待本研究能对上海超低能耗导则下的高校建筑提供参考价值。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》的通知[EB/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202203/20220311_765109.html, 2022-03-11.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府国务院部门. 教育部关于印发《绿色低碳发展国民教育体系建设实施方案》的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/09/content_5725566.htm, 2022-10-26.
- [3] 中华人民共和国教育部. 2022 年全国教育事业统计公报[EB/OL]. http://www.moe.gov.cn/jyb_sjzl/sjzl_fztjgb/202307/t20230705_1067278.html, 2023-07-05.

- [4] 巫春玲, 任凯, 马力圣, 王致垚. 基于能耗模拟的某高校教学楼节能改造设计[J]. 现代建筑电气, 2022, 13(5): 35-41.
- [5] 王宏伟, 蒲增艳, 尹翠, 刘璐. 严寒地区教学楼围护结构节能改造分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 497-505.
- [6] 赵西平, 张志彬. 寒冷地区高校教学楼围护结构优化改造设计——以兰州交通大学电信综合教学楼为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(5): 651-656.
- [7] 黄仁达, 李丽, 吴会军, 张晖. 夏热冬冷地区不同墙体结构的保温层厚度分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 1829-1835.
- [8] 阳江英, 丛钢, 彭家惠. 夏热冬冷地区外窗遮阳对居住建筑能耗的影响[J]. 墙材革新与建筑节能, 2009(5): 48-50.
- [9] 张晟, 王冬梅, 杨墨池. 夏热冬冷地区外遮阳对建筑能耗及采光效果的影响分析[J]. 建筑科学, 2011, 27(4): 75-79, 83.
- [10] 陈红兵, 薛闪闪, 李德英, 王聪聪. 既有居住建筑外墙保温厚度优化及减排效益分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5374-5380.
- [11] 董晓亚, 李德英, 王艺霖. 近零能耗办公建筑外墙保温材料厚度优化研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(7): 143-146, 151.
- [12] 刘玉明, 刘长滨. 基于全寿命周期成本理论的既有建筑节能经济效益评价[J]. 建筑经济, 2009(3): 58-61.
- [13] 杜传梅, 丁廉威, 何源. 夏热冬冷地区既有建筑围护结构改造分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 52-59.