

# 基于 DesignBuilder 模拟的严寒地区换流站 综合楼能耗模拟研究

曾茹 邹红波 刘广强 王雪梅\*

辽宁科技大学

**摘要:** 研究严寒地区换流站综合楼外墙保温材料类型及厚度对全年冷热负荷的影响,为围护结构节能设计提供依据。以哈尔滨某换流站综合楼为对象,采用 DesignBuilder 软件模拟岩棉板、石墨聚苯板、高密度膨胀聚苯板三种保温材料在不同厚度下的能耗,以 EPS (60 mm) 为基准计算节能率。结果发现,相同厚度下,节能率排序为:石墨聚苯板>高密度膨胀聚苯板>岩棉板。厚度增加使供热能耗持续下降但降幅减缓,制冷能耗上升(石墨聚苯板 150mm 较 60mm 制冷能耗增加 13.5%)。石墨聚苯板厚度从 60mm 增至 100mm 时,总能耗降幅 8.4%;增至 150mm 时降幅收窄至 5.5%,边际效益递减。提升外墙保温可显著降低供热能耗,但会导致制冷能耗上升。推荐经济厚度 100~120 mm;多层建筑优先选用石墨聚苯板,高层建筑推荐高密度膨胀聚苯板(A 级防火),成本敏感项目可采用岩棉板。

**关键词:** 严寒地区;换流站;外墙保温;DesignBuilder;能耗模拟;冷热负荷

**DOI:**10.65976/3105-8450.2026.01.002

## Energy Consumption Simulation Study of Converter Station Comprehensive Building in Severe Cold Region Based on DesignBuilder

Zeng Ru Zou Hongbo Liu Guangqiang Wang Xuemei\*

(University of Science and Technology Liaoning)

**Abstract:** Objective To investigate the influence of external wall insulation material type and thickness on the annual cooling and heating loads of a converter station comprehensive building in a severe cold region, providing a basis for energy-saving design of building envelopes. Methods Taking a converter station comprehensive building in Harbin as the research object, the DesignBuilder software was used to simulate the energy consumption of three insulation materials (rock wool board, graphite polystyrene board, high-density expanded polystyrene board) at different thicknesses. The energy saving rate was calculated using EPS (60 mm) as the baseline. Results Under the same thickness, the order of energy saving rate was: graphite polystyrene board > high-density expanded polystyrene board > rock wool board. As thickness increased, heating energy consumption continued to decrease but the reduction rate slowed down, while cooling energy consumption increased (for graphite polystyrene board, cooling energy consumption increased by 13.5% when thickness increased from 60 mm to 150 mm). When the thickness of graphite polystyrene board increased from 60 mm to 100 mm, total energy consumption decreased by 8.4%; when increased to 150 mm, the reduction narrowed to 5.5%, indicating significant diminishing marginal benefits. Conclusion Improving external wall insulation can significantly reduce heating energy consumption but leads to an increase in cooling energy consumption. The recommended economic insulation thickness is 100~120 mm. For multi-story buildings, graphite polystyrene board is preferred; for high-rise buildings, high-density expanded polystyrene board (Class A fire resistance) is recommended; for cost-sensitive projects, rock wool board can be used.

**Key words:** severe cold region; converter station; external wall insulation; DesignBuilder; energy consumption simulation; cooling and heating load

目前,建筑能源消耗已成为我国三大能源消耗来源之一。据《中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)》统计,2021年全国建筑运行能耗为11.5亿tce,占全国能源消费总量的21.9%,建筑运行碳排放为23.0亿tCO<sub>2</sub>,占全

**基金项目:** 辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目-寒冷地区换流站全生命周期碳排放快速计算工具。

**作者简介:** 曾茹(2004—),女,研究方向为建筑环境与能源应用。

**通讯作者:** 王雪梅,副教授,研究方向为建筑减排。

国能源相关碳排放的 21.6%<sup>[1]</sup>。其中，北方采暖地区建筑运行碳排放总量达 13.1 亿 tCO<sub>2</sub>，占全国建筑运行碳排放的 57%，且哈尔滨、沈阳等严寒地区城市的人均建筑碳排放显著高于全国平均水平（哈尔滨为 4.3 万 tCO<sub>2</sub>/人，而全国人均仅为 1.1~2.4 万 tCO<sub>2</sub>）<sup>[1]</sup>。严寒地区冬季漫长寒冷，建筑供热能耗占比较高，围护结构保温性能不足是导致能耗偏高的主要原因。提升外墙保温性能是降低建筑供热能耗的有效途径，合理的保温层设计可以显著减少冬季热量散失，改善室内热舒适性。然而，围护结构热工性能的提升对全年冷热负荷的影响并非单向，过度保温可能导致夏季制冷能耗上升，需在设计中加以权衡<sup>[2-3]</sup>。

近年来，众多学者对严寒地区建筑围护结构热工性能优化开展了深入研究。王庆辉等<sup>[2]</sup>以沈阳某近零能耗办公建筑为对象，采用 DesignBuilder 软件进行能耗模拟，发现目标建筑全年累计冷负荷指标（19.94 kWh/m<sup>2</sup>）略高于热负荷指标（15.96 kWh/m<sup>2</sup>），并指出内部热扰和外窗太阳得热对冷热负荷影响显著。纵婉婉等<sup>[3]</sup>通过正交试验与能耗模拟研究了严寒地区绿色建筑外墙节能技术，结果表明随着外墙保温性能增强，冬季供暖能耗明显下降，而夏季空调制冷能耗波动不大甚至可能增加。骆艳杰等<sup>[4]</sup>基于生命周期评价与成本分析，模拟了严寒地区不同城市（漠河、哈尔滨、沈阳）办公建筑采用四种保温材料时的能耗，发现随着保温层厚度增加，采暖能耗明显降低，而制冷能耗出现小幅度上升。刘富康<sup>[5]</sup>以内蒙古严寒 C 区居住建筑外窗为研究对象，实测与模拟分析了外窗传热系数对能耗的影响。换流站综合楼作为站前区的主要建筑，是站区工作人员办公与生活的重要辅助场所，兼具办公、住宿、会议、就餐等综合功能，是站区内最具民用属性的建筑。其能耗特征既包含办公建筑的日间用能需求，也包含居住建筑的夜间用能需求，且人员活动规律复杂，对室内热舒适性要求较高。尽管上述研究为严寒地区建筑节能提供了重要参考，但针对哈尔滨地区换流站综合楼（兼具办公与居住功能），同时对比多种保温材料厚度及不同厚度对全年冷热负荷影响规律的研究仍较为缺乏。

本文以哈尔滨某换流站综合楼为例，采用 DesignBuilder 软件建立建筑能耗模型，对比分析岩棉板、石墨聚苯板、

高密度膨胀聚苯板三种外墙保温材料厚度及不同保温层厚度对建筑全年供热与制冷能耗的影响，旨在揭示保温性能提升对冷热负荷的差异化影响规律，为严寒地区同类建筑的围护结构节能设计提供参考。

## 1 综合楼模型建立及其参数

### 1.1 建筑概况

本文选取哈尔滨某换流站综合楼为研究案例，总建筑面积 4033.77m<sup>2</sup>，体型系数为 0.22，北向窗墙比 0.22，西向窗墙比 0.044，南向窗墙比 0.27，东向窗墙比 0.047，层数为 3.3m，建筑共四层。为更准确直观地分析比较外墙节能技术应用效果，减少外窗、屋顶、幕墙等其他因素的干扰，试验建立的建筑模型暂不考虑其他节能技术，只模拟不同外墙工况时建筑的冷热负荷。建筑主要功能区域分为厨房、餐厅、休息室、卫生间、办公室、会议室、接待室、活动室等。

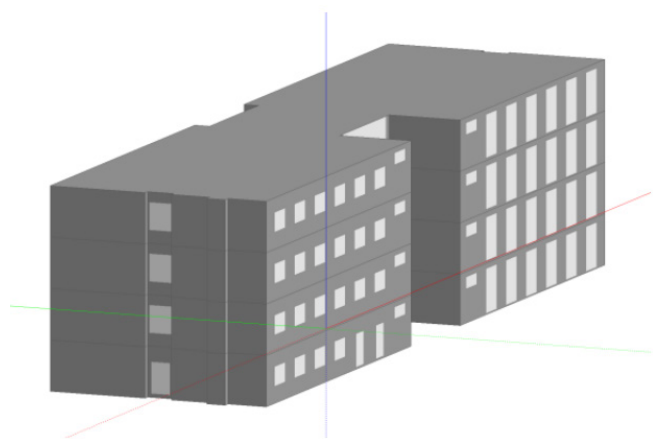


图 1 综合楼模型

### 1.2 热工参数（见表 1）

表 1 保温材料热工参数

基础墙体	保温层种类	导热系数 W/(m·K)	密度 kg/m <sup>3</sup>	比热容 J/(kgK)
240mm 加气砌体	岩棉板	0.04	140	710
	石墨聚苯板	0.03	28	1400
	高密度膨胀聚苯板	0.035	35	1200
	基准材料	0.041	20	1400

本文主要研究外墙外保温体系，研究变量为保温层厚度和材料类型，其建筑围护结构参数如表 2 所示。

本次模拟按照哈尔滨地区的气候变化特点进行时间设定，供暖季为十月下旬至次年四月下旬（10 月 20 日至

表 2 建筑模型的围护结构

名称	结构	传热系数/(W·m <sup>2</sup> /k)
屋顶	120 mm 厚挤塑聚苯板 (XPS) +120 mm 厚钢筋混凝土 +20 mm 厚水泥砂浆	0.263
地面	100 mm 厚挤塑聚苯板 (XPS) +150 mm 厚钢筋混凝土 +25 mm 厚水泥砂浆找平层	0.301
外窗	断桥铝合金窗框 + 三层 Low-E 中空玻璃	1.2

4月20日), 制冷季为六月至八月(6月1日至8月31日)。气候文件采用 DesignBuilder 能耗模拟软件内置的哈尔滨典型气象年(IWEC)数据。本文研究在固定上述相关参数的前提下, 设置外墙构造为保温材料+240mm加气混凝土砌块, 对换流站综合楼外墙保温材料能耗进行研究。

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为节能率(%);  $Q_1$  为基准建筑(或未优化方案)的全年采暖(或制冷)能耗, kWh;  $Q_2$  为优化后建筑的全年采暖(或制冷)能耗, kWh。

表3 外窗节能方案

基础墙体	保温层种类	厚度 mm	U W/(m <sup>2</sup> ·k)
240mm 加气砌体	岩棉板	60	0.375
		80	0.315
		100	0.272
		120	0.24
		150	0.203
	石墨聚苯板	60	0.315
		80	0.261
		100	0.222
		120	0.193
		150	0.162
	高密度膨胀聚苯板	60	0.347
		80	0.289
		100	0.248
		120	0.217
		150	0.183
基准材料	60	0.38	
	80	0.32	
	100	0.277	
	120	0.244	
	150	0.207	

## 2 研究结果

### 2.1 同厚度条件下材料能效对比

在相同厚度条件下, 四种保温材料的能效优劣顺序保持稳定, 从高到低依次为: 石墨聚苯板>高密度膨胀聚苯板>岩棉板≈基准材料(EPS)。以60mm厚度为例, 石墨聚苯板的全年总能耗为125,316 kWh, 折合单位面积能耗为31.07 kWh/m<sup>2</sup>; 而岩棉板与基准材料分别为132,276 kWh和132,914 kWh, 对应单位面积能耗为32.80 kWh/m<sup>2</sup>与32.96 kWh/m<sup>2</sup>, 石墨聚苯板较基准材料节能约5.7%。

当厚度增加至100mm时, 岩棉板与高密度膨胀聚苯板的能耗趋于接近(分别为120,360 kWh与117,661 kWh), 而石墨聚苯板仍保持明显领先优势, 其总能耗为114,772 kWh, 较岩棉板节能约4.6%。当厚度达到120mm及以上后, 石墨聚苯板的领先优势稳定在1.5~2.0 kWh/m<sup>2</sup>(约6,000~8,000 kWh/年)。这一结果与张宇等<sup>[8]</sup>针对严寒地区装配式住宅的研究结论一致: 在相同厚度下, 石墨聚苯板因其更低的导热系数(0.033 W/(m·K)), 在保温性能上优于岩棉板(0.040 W/(m·K))和普通EPS板。

### 2.2 保温厚度对能耗的边际影响

以节能效果最优的石墨聚苯板为例, 当厚度从60mm增加至100mm时, 总能耗从125,316 kWh降至114,772 kWh, 降幅为8.4%; 当厚度从100mm进一步增加至150mm时, 总能耗仅从114,772 kWh降至108,439 kWh, 降幅收窄至5.5%。这意味着厚度超过100mm后, 每增加10mm保温层所带来的节能率从约2.1%下降至约1.1%, 边际效益显著递减。庄蕊<sup>[6]</sup>在严寒地区围护结构热工性能优化研究中也指出, 保温层厚度存在“经济厚度区间”, 超过该区间后增量成本的回收期将大幅延长。因此, 从全生命周期经济性角度考虑, 100~120mm可作为严寒地区综合楼外墙保温的推荐厚度范围。

### 2.3 制冷能耗的伴随增长效应

值得注意的是, 随着保温层厚度的增加, 各方案的

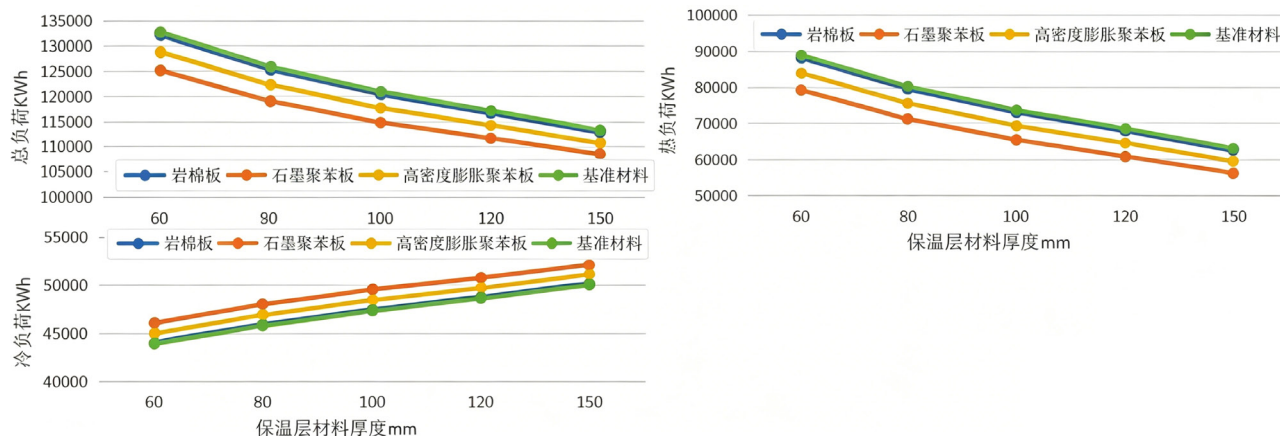


图4 不同保温材料冷负荷随厚度变化曲线

制冷能耗均呈现小幅上升趋势。以石墨聚苯板为例,厚度从 60 mm 增至 150 mm 时,制冷能耗由 45.960 kWh 上升至 52.142 kWh,增幅约 13.5%。这一现象表明:过度提升围护结构保温性能,虽然在冬季有效减少了供暖热损失,但在夏季(或过渡季)却阻碍了室内热量向外散失,导致制冷负荷增加。相关文献在对超低能耗建筑的碳排放核算中也发现,运行阶段暖通空调系统的碳排放占比高达 52.71%,其中制冷能耗的贡献不容忽视。因此,严寒地区建筑围护结构设计应兼顾冬季保温与夏季防过热,不宜单纯追求过低的传热系数,而应在保温材料选型、厚度确定及外窗遮阳等方面进行协同优化。

### 3 结论

本研究以严寒地区某综合楼为对象,基于 DesignBuilder 模拟分析了三种外墙保温材料(岩棉板、石墨聚苯板、高密度膨胀聚苯板)在不同厚度下的能耗特性。以 EPS 60 mm 为基准,得到以下结论:(1)相同厚度下,节能率排序为:石墨聚苯板>高密度膨胀聚苯板>岩棉板。以 100 mm 为例,三者节能率分别为 13.65%、11.48%、9.45%。

(2)保温层厚度存在经济最优区间。以石墨聚苯板为例,厚度从 60 mm 增至 100 mm 时,节能率由 5.72% 提升至 13.65%,提升约 7.9 个百分点;从 100 mm 增至 150 mm 时,节能率由 13.65% 提升至 18.43%,提升约 4.8%,边际效益递减。推荐经济厚度为 100~120 mm。

(3) 工程建议:多层建筑优先选用石墨聚苯板 100~120mm;高层建筑推荐高密度膨胀聚苯板 120mm(A 级防火);成本敏感项目可采用岩棉板 120mm。

### 参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院.中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J].建筑,2024(02):46-59.
- [2] 王庆辉,马语辰,黄凯良,等.严寒地区近零能耗办公建筑负荷特性分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(01):141-147.
- [3] 纵婉婉,于靓,郭福昌,等.严寒地区绿色建筑外墙节能技术优化研究[J].建筑与预算,2020(08):55-57.
- [4] 骆艳杰,赵薇,王月,等.严寒地区办公建筑外墙保温系统优化及碳减排分析[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2024,44(01):27-37.
- [5] 刘富康.“双碳”背景下内蒙古严寒C区居住建筑外窗能耗研究——以包头市为例[D].包头:内蒙古科技大学,2025.
- [6] 庄苙.严寒地区建筑围护结构热工性能优化研究[J].绿色建筑,2025(10):31-33.
- [7] 王海旭.严寒地区绿色建筑高热工性能外墙和外窗技术适应性研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2018.
- [8] 张宇,刘小赫,焦洋.基于DesignBuilder的严寒地区农村装配式住宅节能设计研究[J].建筑节能(中英文),2025,53(06):135-142.