

严寒地区教学楼围护结构节能改造分析

王宏伟, 蒲增艳, 尹 翠, 刘 璐

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 设计沈阳地区某高校既有教学楼围护结构节能改造方案,改善教室的热环境,以期降低能耗、节约能源、提高人体舒适度. 方法 根据《公共建筑节能设计标准》(GB50189—2015)、《公共建筑节能(65%)设计标准》(DB21_T1899—2011)和《既有公共建筑节能改造技术规程》(DB21—T1824—2010)的要求,参照保温材料的热工性能、吸水性、可燃性、经济性等因素,通过 DeST-C 软件模拟计算,比对保温材料的传热系数和厚度,并比对外窗玻璃的类型和结构,优选出节能改造所需的保温材料和窗型. 结果 教学楼节能改造外墙宜选择 45 mm 石墨聚苯板(SEPS);外窗推荐充惰性气体+镀 Low-e 膜中空玻璃,并充氩气贴暖边;屋面节能改造时选择 90 mm 的 SEPS. 结论 围护结构节能改造包括外墙、外窗、屋面 3 个可实际改造的对象,对这些方面进行能耗分析,可为既有建筑选出最优保温材料和窗型.

关键词 教学建筑;能耗分析;节能改造;DeST-C

中图分类号 TU111.19⁺5

文献标志码 A

Energy Saving Reconstruction and Suitability Analysis of Teaching Building Envelope in Severe Cold Area

WANG Hongwei, PU Zengyan, YIN Cui, LIU Lu

(School of Municipal and Environment Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to design an energy saving renovation program for the existing building envelope of a university in Shenyang, and to improve the thermal environment of the classroom in order to reduce energy consumption, save energy and improve human comfort. According to the “design standard for energy efficiency of public buildings” (GB50189—2015), “public buildings energy-efficient(65%) design standards” (DB21_T1899—2011) and “technical specification for both the energy saving renovation of public buildings” (DB21—T1824—2010) requirements, based on the insulation material thermal properties, water absorption, flammability and economy, insulation materials and energy-saving window type were optimized through the DeST-C software simulation and comparison the heat transfer coefficient and thickness of thermal insulation material, and the type and structure of foreign window glass. In view of Shenyang area, it is sug-

收稿日期:2016-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51508341);辽宁省教育厅基金项目(L2013228)

作者简介:王宏伟(1964—),女,教授,博士,主要从事建筑节能与供热空调节能技术研究.

gested that the 45mm polystyrene board(SEPS) should be selected as external wall; External window around the seal would be hollow colorless glass with inert gas and coated Low-e film , plastic steel window frame , and argon warm side ; 90mm graphite polystyrene board(SEPS) will be chose as roof. The energy saving retrofit of the envelope includes three objects which are the exterior wall , the outer window and the roof.

Key words:teaching building ; energy consumption simulation ; energy-saving retrofit ; DeST – C

公共建筑是城市构成的主要部分,是城镇化过程中资源、能源的主要消耗者,也是城镇化影响自然环境的主要影响因素. 大型的公共建筑体量大,单位面积能耗大大高出其他类型建筑,故大量投入使用的公共建筑已经构成我国建筑能源消耗的主体. 因此,公共建筑的节能已经成为我国节能减排和可持续发展的战略重点^[1-6]. 高校建筑属于公共建筑中的科教文化类建筑,各高校纷纷建设的新校区促使学校的建设规模突飞猛进地扩大,高校不断扩建的基础设施对资源消耗过度^[7-11]. 寒假期间应暂停某些教学建筑的供暖,而有些学校担心供热管网爆裂,仍然采取低温供暖的措施;管理人员节能环保意识差,运行调控和维护管理及环保措施不到位,致使能源消耗过大、室内空气环境达不到要求;建筑实体多年缺少维护,致使围护结构热工性能降低等,据此高校既有建筑的节能改造

势在必行^[12-20].
笔者针对沈阳建筑大学教学楼现状,依据《公共建筑节能设计标准》和《既有公共建筑节能改造技术规程》,探讨对教学楼围护结构节能改造方案,以期改善教室的热环境,达到降低建筑能耗的目的.

1 工程概况

沈阳建筑大学的教学楼建造于2001年,建筑包括教室、办公室、中庭、长廊、走道、实验室等功能房间. 教学楼结构形式为框架结构填充陶粒混凝土砌块,外墙以面砖为主要外立面,未做外墙保温,窗户以大面积的单层玻璃窗为主. 建筑层数为5~6层,建筑高度19.75 m,首层层高12 m,其他层层高3.9 m,体型系数为0.329,平均窗墙比为0.45,最大窗墙比为0.79,供热面积9.618万m². 教学楼的围护结构具体构造及传热系数如表1所示.

表1 既有围护结构热工性能
Table 1 Thermal performance of existing building envelope

建筑构件	结构描述	结构尺寸/mm	传热系数 K/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
外墙	灰色陶瓷砖及抹灰+黏土空心砖+室内墙体装饰材料及抹灰	20+370+20	1.191
外窗	普通无色中空玻璃塑钢窗	5+9+5	2.78
屋面	灰色地面砖及水泥砂浆粘结层+高分子卷材+水泥砂浆找平层+水泥珍珠岩保温层+乳化沥青珍珠岩一道+水泥砂浆找平层+钢筋混凝土屋面板	25+1.5+25+120+1+20+200	1.297

根据《公共建筑节能设计标准》(GB50189—2015)、《公共建筑节能(65%)设计标准》(DB21_T1899—2011)和《既有公共建筑节能改造技术规程》(DB21—T1824—2010)的要求,围护结构热工性能限值如表2所示.

表1与表2对比可知,沈阳建筑大学教学楼的外围护结构均超出公共建筑节能标准限值,对该教学楼进行节能改造极具节能意义.
笔者通过DeST-c建立该教学楼A1馆建筑模型经过运行计算可得教学楼A1馆全年动态冷热负荷;采暖累计热负荷为

表2 围护结构热工性能限值

Table 2 Limit value of thermal performance of building envelope in Shenyang area

围护结构部位	限值传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	
	体型系数≤0.3	0.3<体型系数≤0.50
屋面	≤0.35	≤0.28
外墙(包括非透光幕墙)	≤0.43	≤0.38
外窗(窗墙比>0.80)	≤1.4	≤1.3
外窗(0.70<窗墙比≤0.80)	≤1.5	≤1.4
外窗(0.60<窗墙比≤0.70)	≤1.7	≤1.5
外窗(0.50<窗墙比≤0.60)	≤1.7	≤1.5
外窗(0.40<窗墙比≤0.50)	≤2.0	≤1.7
外窗(0.30<窗墙比≤0.40)	≤2.3	≤2.1
外窗(0.20<窗墙比≤0.30)	≤2.6	≤2.4
外窗(窗墙比≤0.20)	≤2.9	≤2.7

915 655.76 kW·h; 制冷季累计冷负荷为412 841.42 kW·h. 建筑冬季峰值供热负荷627.48 kW, 夏季峰值冷负荷为749.52 kW. 全年最大热负荷指标为137.41 W/m², 全年最大冷负荷指标为1 610 W/m². 综合窗墙面积比为0.45, 最大值为0.79. 模拟的逐时负荷结果如图1所示. 其中零刻度线以上为热负荷, 零刻度线以下为冷负荷. 由图1可知, 1月份出现了最大瞬时热负荷, 8月份出现最大瞬时冷负荷. 由冷热负荷分布图可以看到该教学楼在制冷季中偶尔存在热负荷, 制冷季中偶尔存在冷负荷.

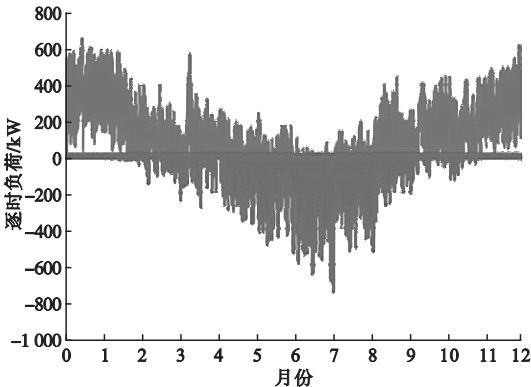


图1 建筑全年逐时冷热负荷分布图

Fig. 1 Cold and hot load distribution of building all-year hourly

2 教学楼外墙节能改造分析

由工程概况可知, 现有外墙结构为灰色

陶瓷砖及抹灰 20 mm + 黏土空心砖 370 mm + 室内墙体装饰材料及抹灰 20 mm. 其传热系数为1.191 W/(m²·K), 不能满足限值要求的 $K \leq 0.38$ W/(m²·K), 故应对其进行节能改造.

在严寒地区既有建筑节能改造中, 外墙改造一般为去除外墙表面砂浆, 在其表面添加保温层. 考虑外墙保温材料防火等级要求, 笔者选取4种墙体保温材料, 有模塑聚苯乙烯塑料板(EPS)、挤塑聚苯乙烯塑料板(XPS)、石墨聚苯板(SEPS)、聚氨酯保温板(PUR), 对外墙进行节能改造的模拟计算, 取厚度0 mm到100 mm, 每5 mm计算一次. 附加保温层后, 不同保温材料不同厚度的墙体传热系数见图2.

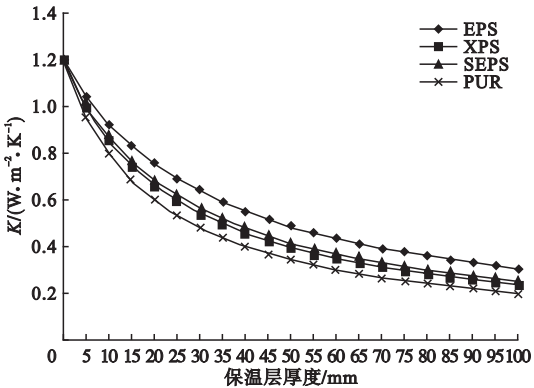


图2 添加保温层后墙体传热系数

Fig. 2 The heat transfer coefficient of exterior wall with thermal insulation layer

由图2可知, 达到规范标准要求的 $K \leq 0.38$ W/(m²·K), EPS厚度需75 mm, XPS厚度需55 mm, SEPS需60 mm, PUR厚度需45 mm. 对同一种材料而言, 随着厚度的增加, 传热系数越来越小, 但变化趋势趋于平缓. 在相同厚度下, 传热系数由小到大的顺序为PUR、XPS、SEPS、EPS.

根据教学楼A1馆建筑模型, 利用DeSt-C对教学楼在不同保温层、不同厚度下的全年逐时冷、热负荷进行模拟, 计算得出不同保温层、不同厚度下的所对应的全年累计负荷, 找出保温材料的厚度与能耗的变化规律, 模拟结果如图3~4所示.

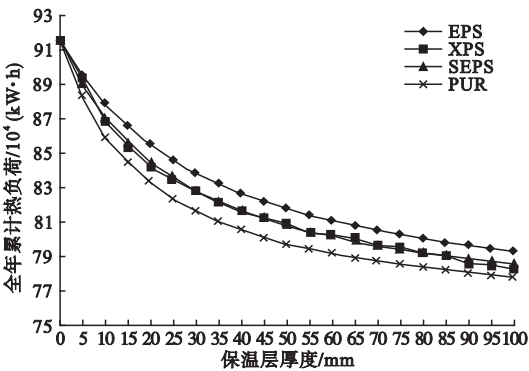


图3 不同厚度、不同保温材料的建筑累计热负荷
Fig.3 Cumulative heat load of building with different thickness and thermal insulation layer

由图3可知,随着外墙保温层厚度的增大,建筑全年累计热负荷逐步减小,且减小的幅度趋于平缓,尤其是在达到外墙传热系数限值所对应的保温层厚度后.从建筑累计负荷变化可以看出,采用保温措施有利于减少建筑的能耗,建筑能耗随着保温层厚度的增大而减少.对同一厚度而言,建筑全年累计热负荷从小到大的顺序为PUR、XPS、SEPS、EPS.

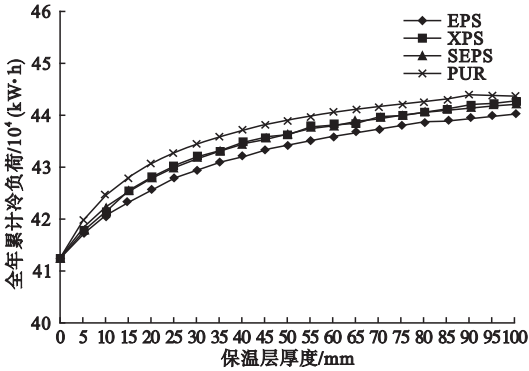


图4 不同厚度、不同保温材料的建筑累计冷负荷
Fig.4 Cumulative cool load of building with different thickness and different thermal insulation layer

由图4可以看出,随着外墙保温层厚度的增大,建筑全年累计冷负荷在逐步增大,而且增大的幅度趋于平缓,尤其是在达到外墙传热系数限值所对应的保温层厚度后;对同一厚度而言,建筑全年累计冷负荷从大到小的顺序为PUR、XPS、SEPS、EPS.

不同厚度的保温材料对全年累计总负荷的影响如图5所示.从图5可以看出,随着外墙保温层厚度的增大,全年累计总负荷在逐

步减小,而且减小的幅度趋于平缓,尤其是在达到外墙传热系数限值所对应的保温层厚度后.对同一厚度而言,全年累计总负荷从大到小的顺序为EPS、SEPS、XPS、PUR.

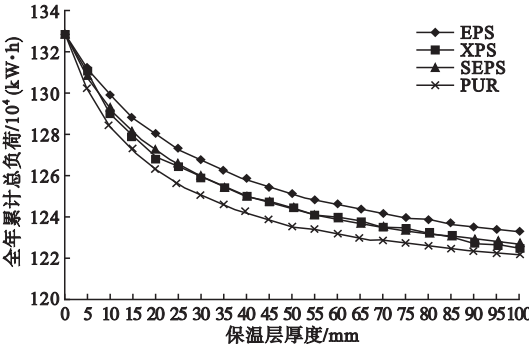


图5 不同厚度、不同保温材料的全年累计总负荷
Fig.5 Annual cumulative total load of building with different thickness and different thermal insulation layer

根据模拟得出的全年累计总负荷,可以计算得出,以未加保温层时的累计总负荷值作为基准,分析得出不同厚度、不同保温材料下所对应的全年节能比如图6所示.由图6可以看出,随着外墙保温层厚度的增大,建筑全年节能比在逐步增大,而且增大的幅度趋于平缓,尤其是在达到外墙传热系数限值所对应的保温层厚度后;对同一厚度而言,全年节能比从大到小的顺序为PUR、XPS、SEPS、EPS.各保温材料达到100 mm厚时,EPS、XPS、SEPS及PUR相对应的节能比为9.33%、10.24%、10.02%、10.71%.

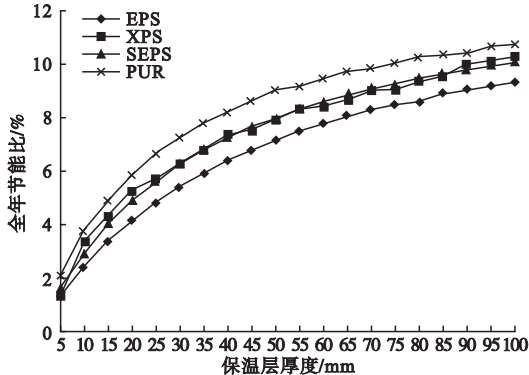


图6 不同厚度、不同保温材料的全年节能比
Fig.6 Annual energy saving percentage of building with different thickness and different thermal insulation layer

由表 2 可知,外墙传热系数限值为 $K \leq 0.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 在加保温层时,外墙传热系数达到 $K \leq 0.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的要求,此时保温层厚度的影响趋于平缓. 保温材料对比如表 3 所示,除对 4 种材料进行性能对比外,还应考虑经济性、防火性、寿命等因素. 表中 B1 是指难燃物,B2 是指可燃物.

表 3 保温材料对比

Table 3 Comparison of insulation materials

材料	达到限值 厚度/mm	全年节能量/ $10^4 (\text{kW} \cdot \text{h})$	全年节 能比/%	单价/ (元· m^{-2})	可燃性 等级
EPS	75	8.88	8.46	20.55	B2
XPS	55	8	8.30	25.41	B2
SEPS	60	8.94	8.54	28.74	B1
PUR	45	8.95	8.55	56.4	B1

由表 3 可知,在 4 种材料均达到限值传热系数要求时,所对应的厚度为 75 mm、55 mm、60 mm、45 mm,与限值厚度对应的全年节能量及全年节能比相差较小. 参考沈阳地区造价信息得到,EPS、XPS、SEPS 及 PUR 的单价分别为 20.55 元/ m^2 、25.41 元/ m^2 、28.74 元/ m^2 、56.4 元/ m^2 . 从可燃性看,SEPS 和 PUR 的燃烧等级为 B1 级,EPS 和 XPS 的燃烧等级为 B2 级,SEPS 及 PUR 要优于 EPS 和 XPS. 综合考虑各种因素,建议该教学楼外墙节能改造时,选择 45 mm 的 SEPS.

3 教学楼屋面节能改造分析

现有屋面传热系数为 $1.297 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,不能满足规范要求的 $K \leq 0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,故应对其进行节能改造.

笔者选取 EPS、XPS、SEPS、PUR 这 4 种保温材料,对屋面进行节能改造的模拟计算,取厚度 0 ~ 100 mm,每 5 mm 计算一次. 附加保温层后,不同保温材料不同厚度的传热系数如图 7 所示. 由图 7 可知,达到规范标准要求的 $K \leq 0.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,计算得到 EPS 厚度需 115 mm,XPS 厚度需 85 mm,SEPS 需 90 mm,PUR 厚度需 70 mm. 同一种材料,随

着厚度的增加,传热系数越来越小,但变化趋势趋于平缓. 在相同厚度下,传热系数由小到大的顺序为 PUR、XPS、SEPS、EPS.

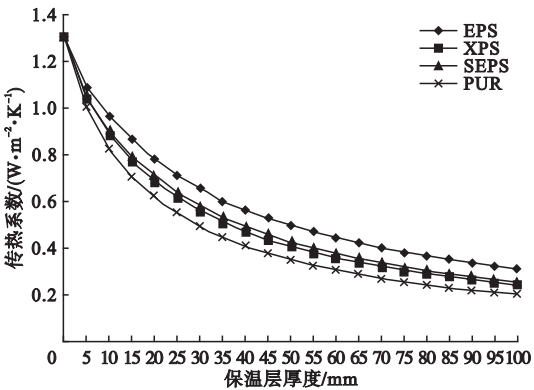


图 7 添加保温层后墙体传热系数

Fig. 7 The heat transfer coefficient of exterior wall with thermal insulation layer

根据教学楼 A1 馆建筑模型,利用 DeST - C 对教学楼在不同保温层、不同厚度下的全年逐时冷、热负荷进行模拟,计算得出不同保温层、不同厚度下的所对应的全年累计负荷,找出保温材料的厚度与能耗的变化规律,模拟结果如图 8、图 9 所示.

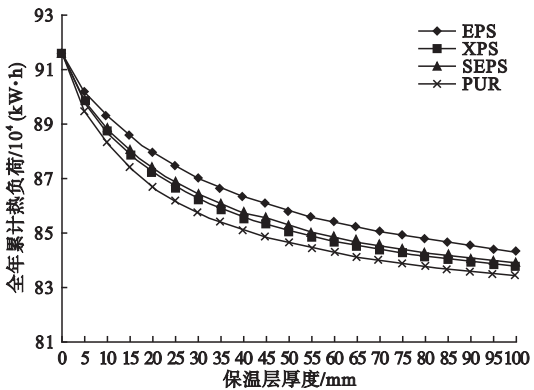


图 8 不同厚度、不同保温材料的建筑累计热负荷

Fig. 8 Cumulative heat load of building with different thickness and thermal insulation layer

由图 8 可知,随着屋面保温层厚度的增大,建筑全年累计热负荷逐步减小,且减小幅度趋于平缓,尤其是在达到屋面传热系数限值所对应的保温层厚度后. 从建筑累计负荷变化可以看出,采用保温措施有利于减少建筑的能耗,建筑能耗随着保温层厚度的增大

而减少. 对同一厚度而言,建筑全年累计热负荷从小到大的顺序为 PUR、XPS、SEPS、EPS.

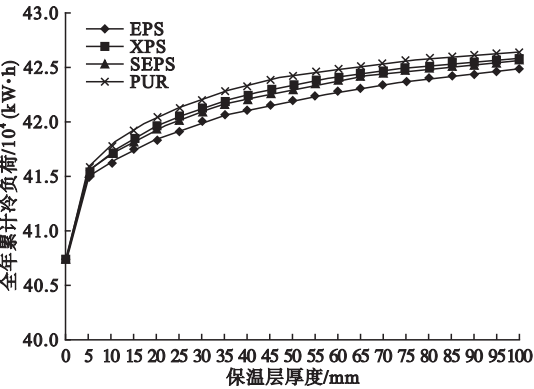


图9 不同厚度、不同保温材料的建筑累计冷负荷
Fig. 9 Cumulative cool load of building with different thickness and thermal insulation layer

由图9可以看出,随着屋面保温层厚度的增大,建筑全年累计冷负荷在逐步增大,而且增大的幅度趋于平缓,尤其是在达到屋面传热系数限值所对应的保温层厚度后;对同一厚度而言,建筑全年累计冷负荷从大到小的顺序为 PUR、XPS、SEPS、EPS.

不同厚度、不同保温材料对全年累计总负荷的影响如图10所示. 从图10可以看出,随着屋面保温层厚度的增大,全年累计总负荷在逐步减小,而且减小的幅度趋于平缓,尤其是在达到屋面传热系数限值所对应的保温层厚度后. 对同一厚度而言,全年累计总负荷从大到小的顺序为 EPS、SEPS、XPS、PUR.

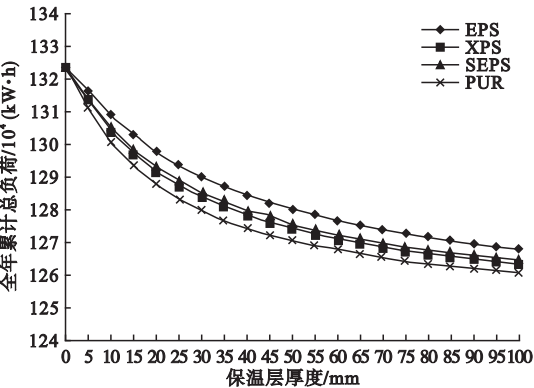


图10 不同厚度、不同保温材料的全年累计总负荷
Fig. 10 Annual Cumulative total load of building with different thickness and thermal insulation layer

根据模拟得出的全年累计总负荷,可以计算得出,以未加保温层时的累计总负荷值作为基准,分析得出不同厚度、不同保温材料下所对应的全年节能比如图11所示. 从图11可以看出,随着屋面保温层厚度的增大,建筑全年节能比在逐步增大,而且增大的幅度趋于平缓,尤其是在达到屋面传热系数限值所对应的保温层厚度后;对同一厚度而言,全年节能比从大到小的顺序为 PUR、XPS、SEPS、EPS. 各保温材料达到100 mm厚时, EPS、XPS、SEPS 及 PUR 相对应的节能比为 5.79%、6.26%、6.17%、6.56%.

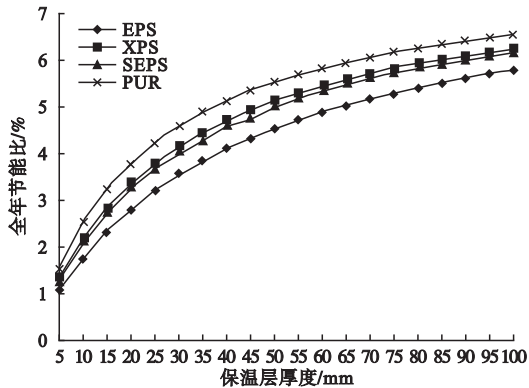


图11 不同厚度、不同保温材料的全年节能比
Fig. 11 Annual energy saving percentage of building with different thickness and thermal insulation layer

由表2可知,屋面传热系数限值为 $K \leq 0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 加保温层时,屋面传热系数 $K \leq 0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的要求,此时保温层厚度的影响趋于平缓. 除了对4种材料进行性能对比外,还应考虑经济性、防火性、寿命等因素(见表4). 由表4可知,在4种材料均达到限值传热系数要求时, EPS、XPS、SEPS 及 PUR 所对应的厚度分别为115 mm、85 mm、90 mm、70 mm,与限值厚度对应的全年节能量及全年节能比相差不多. 参考沈阳地区造价信息得到, EPS、XPS、SEPS 及 PUR 的单价分别为31.51元/ m^2 、39.27元/ m^2 、43.11元/ m^2 、65.8元/ m^2 . 从可燃性上来说, SEPS 和 PUR 的燃烧等级为

B1级, EPS和XPS的燃烧等级为B2级, SEPS及PUR要优于EPS和XPS. 而XPS长期吸水率低, 特别适用于屋面的外保温, SEPS是综合XPS和EPS的优点, 透气性好, 能隔绝雨水, 又能使墙体中的潮气透过, 有效地解决了建筑物的透气性问题. 综合考虑各种因素, 建议该教学楼屋面节能改造时, 应选择90 mm的SEPS.

表4 保温材料对比

Table 4 Comparison of insulation materials					
材料	达到限值厚度/mm	全年节能量/ 10^4 (kW·h)	全年节能比/%	单价/(元·m ⁻²)	可燃性等级
EPS	115	6.26	4.72	31.51	B2
XPS	85	6.28	4.73	39.27	B2
SEPS	90	6.27	4.72	43.11	B1
PUR	70	6.33	4.76	65.8	B1

表5 不同玻璃参数

Table 5 Different glass parameters									
编号	玻璃类型名称	结构尺寸/mm	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	遮阳系数	太阳能得热系数	太阳能		可见光	
						反射率/%	透射率/%	反射率/%	透射率/%
1	low-e真空玻璃	4+0.1+4L	1.4	0.44	0.383	33	26	52	14
2	充惰性气体+镀膜Low-e中空+暖边	6L+12(Ar)+6L	1.4	0.56	0.487	38	21	58	19

注:L表示镀膜Low-e膜.

针对表5中列出的2种玻璃, 利用DeST-C软件对教学建筑进行了模拟分析, 模拟结果如图12~图13所示.

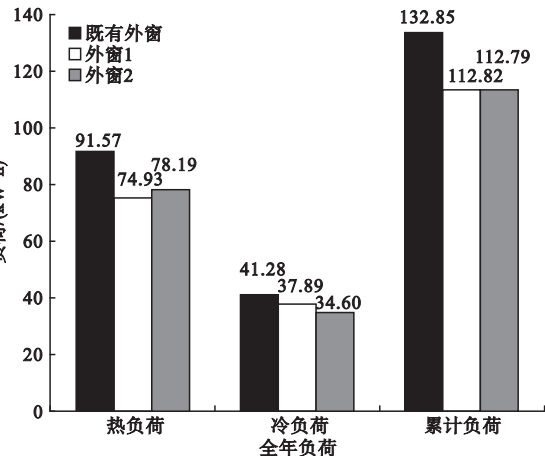


Fig. 12 Annual cumulative load for different window types

4 教学楼外窗节能改造分析

窗能耗的影响因素包括室内外温度、建筑朝向、窗墙比、材质、构造、开启方式及气密性等, 可以通过控制室内温度、合理选择建筑朝向、合适的窗墙比等加强窗的节能, 但最主要的影响因素是窗玻璃的类型与结构.

由表1可知, 教学楼现有外窗为普通中空玻璃, 窗框为塑钢窗, 窗户传热系数为2.67 W/(m²·K), 教学楼大部分窗户窗墙比为0.79, 少部分外窗窗墙比为0.28和0.47, 均不能满足规范要求的外窗传热系数, 故应对其进行节能改造. 取能够满足《公共建筑节能标准》(GB50189—2015) 限值传热系数要求的2种玻璃如表5, 窗框均为塑钢窗框, 玻璃颜色为无色.

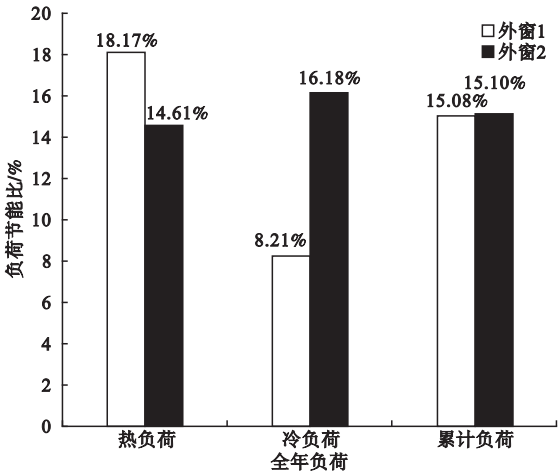


Fig. 13 Annual energy saving percentage of building with different window types

由图12可见, 从全年累计总负荷及累计热负荷节能量来看, low-e真空玻璃要稍优

于充惰性气体+镀 Low-e 膜中空玻璃;从夏季累计冷负荷节省量来看,充惰性气体+镀 Low-e 膜中空玻璃要稍优于 low-e 真空玻璃。

根据模拟得出的全年累计总负荷,以既有外窗时的累计总负荷值作为基准,可以计算得出不同外窗材料下所对应的全年累计负荷节能比如图 13 所示。

由图 13 可知,low-e 真空玻璃冬季节节能比为 18.17% 但是夏季节节能比仅为 8.21%;充惰性气体+镀 Low-e 膜中空玻璃冬季节节能比为 14.61%,夏季节节能比为 16.18%;两种玻璃全年累计总负荷节能比几乎相同,分别为 15.08% 和 15.10%。

在沈阳地区,冬季热负荷大于夏季冷负荷。所以在进行窗户改造时,应重点考虑窗户对夏季冷负荷的减少,及对于冬季的密闭性,综合成本等因素,推荐充惰性气体+镀 Low-e 膜中空玻璃,窗框为塑钢窗框,并充氩气贴暖边。

5 结 论

(1)外墙改造加保温层,外墙传热系数达到外墙传热系数限值 $K \leq 0.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的要求,此时保温层厚度的影响趋于平缓。考虑经济性、防火性、寿命等因素。建议该教学楼外墙节能改造选择 45 mm SEPS。

(2)屋面改造加过敷设保温层,屋面传热系数达到屋面传热系数限值 $K \leq 0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的要求,此时保温层厚度的影响趋于平缓。同时还应重点考虑经济性、防火性、寿命等因素。建议该教学楼屋面节能改造选择 90 mm 的 SEPS。

(3)针对沈阳地区气候,外窗推荐充惰性气体+镀 Low-e 膜中空玻璃,并充氩气贴暖边。

参考文献

[1] 张道真. 玻璃门窗节能分析与选择[J]. 建筑

学报,2006(7):34-36.

(ZHANG Daozhen. Energy saving analysis and selection of glass doors and windows[J]. Architectural journal,2006(7):34-36.)

[2] 崔艳秋,苗纪奎,罗彩领. 建筑围护结构节能改造技术与工程示范[M]. 北京:中国电力出版社,2014.

(CUI Yanqiu, MIAO Jikui, LUO Cailing. Building envelope energy saving reconstruction technology research and engineering demonstration[M]. Beijing: China Electric Power Press,2014.)

[3] 程文,汪玺. 基于 DeST-C 的既有建筑节能改造模拟研究[J]. 四川建材,2013,39(2):9-11.

(CHENG Wen, WANG Xi. Based on DeST-C simulation study on the transformation of existing buildings[J]. Sichuan building materials, 2013,39(2):9-11.)

[4] 王卫卫. 既有居住建筑节能改造的技术经济研究[D]. 西安:长安大学,2008.

(WANG Weiwei. Techno-economic study on energy efficiency transformation of the extant residence buildings[D]. Xi'an: Chang'an University,2008.)

[5] 朱春妃. 北方采暖区既有居住建筑节能改造经济效益评价[D]. 北京:北京交通大学,2010.

(ZHU Chunfei. Economic efficiency evaluation of existing residential buildings in northern heating regions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2010.)

[6] SHARMA A, CHANI P, KULKARNI S. Energy-efficient retrofit of an unconditioned institute building[J]. Architectural science review, 2014,57(1):49-62.

[7] BYRNE A, BYRNE G, DAVIES A, et al. Transient and quasi-steady thermal behaviour of a building envelope due to retrofitted cavity wall and ceiling insulation[J]. Energy and buildings,2013(61):356-365.

[8] 李阳,谭洪卫,庄智,等. 高校科研楼能耗现状与用能特征研究[J]. 建筑节能,2015(7):85-89.

(LI Yang, TAN Hongwei, ZHUANG Zhi, et al. Status and characteristics of energy con-

- sumption of campus scientific research buildings [J]. Building energy conservation, 2015 (7): 85 - 89.)
- [9] 张志彬. 兰州地区高校校园建筑能耗分析及节能措施初探 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013
(ZHANG Zhibin. Campus building energy consumption analysis and energy saving measures in Lanzhou area. [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.)
- [10] 郭瑞芳. 高校教学楼热环境及防热保温措施浅议 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
(GUO Ruifang. Discussion of hot environment and the heat-proof-heat preservation measure in the university classroom building [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.)
- [11] 呼宇. 严寒地区教学建筑节能改造的适宜技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
(HU Yu. Building energy saving in cold area of teaching appropriate technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.)
- [12] BECCALI M, CELLURA M, FONTANA M, et al. Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 27: 283 - 293.
- [13] ZAKARIA R, AMIRAZAR A, MUSTAFFAR M, et al. Daylight factor for energy saving in retrofitting institutional building [J]. Advanced materials research, 2013, 724/725: 1630 - 1635.
- [14] 贺栋. 郑州地区教学建筑绿色节能设计研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
(HE Dong. Teaching building on green energy design in Zhengzhou [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.)
- [15] 林宪德. 节能 65% 钻石级绿色建筑: 台湾成功大学绿色魔法学校 [J]. 新建筑, 2010 (2): 77 - 81.
(LIN Xiande. Diamond grade green building with 65% energy conservation: The magic school of green technology in NCKU of Taiwan [J]. New architecture, 2010 (2): 77 - 81.)
- [16] 张福麟, 阮应君. 推进节约型校园示范建设 [J]. 建设科技, 2009 (10): 16 - 19.
(ZHANG Fulin, RUAN Yingjun. Promote the construction of a conservation oriented Campus [J]. Construction technology, 2009 (10): 16 - 19.)
- [17] 刘静, 马宪国, 孙天晴. 高校建筑能耗的节能潜力分析 [J]. 上海节能, 2010 (10): 12 - 14.
(LIU Jing, MA Xianguo, SUN Tianqing. Analysis of energy-saving potential on building energy consumption of universities [J]. Shanghai energy conservation, 2010 (10): 12 - 14.)
- [18] 潘文玉. 哈尔滨地区多层办公建筑围护结构节能改造研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
(PAN Wenyu. Study on energy conservation renovation of building enclosure for the multi-layered office buildings in Harbin region [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.)
- [19] ALSHAMRANI O, ALKASS S, GALAL K. Energy consumption reduction using sustainable building envelopes' material in school buildings [J]. Proceedings, annual conference-canadian society for civil engineering, 2011, 4: 2858 - 2866.
- [20] 牛萌. 严寒地区公共建筑围护结构节能检测 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2015.
(NIU Meng. Cold region public building enclosure structure energy saving detection analysis and effect evaluation [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2015.)