

# 严寒地区节能建筑应对气候变暖的围护结构热工参数

刘大龙, 刘加平, 杨 柳

(西安建筑科技大学建筑学院; 陕西省西部绿色建筑协同创新中心, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 严寒地区在未来气候变暖条件下节能建筑的设计方法对于我国建筑节能技术发展具有重要意义。以稳态传热理论为基础, 提出了严寒地区节能建筑围护结构传热系数限值与气温升高的关系模型。使用该模型分析: 随着气候变暖采暖能耗降低, 严寒地区围护结构传热系数的要求可降低。以哈尔滨为例, 结合气候模拟与动态能耗模拟技术, 验证了 2021-2050 期间严寒地区节能建筑传热系数变化规律。依据等能耗原则, 研究了外墙与窗户传热系数趋同的自保温构造体系在变暖的严寒地区的适用性。

**关键词:** 传热系数; 气候变化; 建筑能耗; 自保温构造体系

**中图分类号:** TU111.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)06-0856-04

围护结构是围合建筑空间的主体, 是建筑与外界发生热量交换的主要部位, 是决定建筑能耗的关键因素之一。传热系数是衡量围护结构保温性能的核心指标, 是建筑围护结构最重要的热工参数<sup>[1-2]</sup>。严寒地区是我国冬季采暖能耗最大, 对建筑保温要求最高的地区。传热系数已经成为严寒地区建筑围护结构热工性能的核心判定指标, 成为了严寒地区建筑节能标准中强制性节能性指标之一<sup>[3]</sup>。

自 20 世纪 80 年代以来, 地球气候出现显著变暖, 其增温幅度比任何历史时期都快<sup>[4-6]</sup>。20 世纪后期北半球 50 年平均温度很可能是近 1300 年中最高的。在中国过去 2000 年中, 20 世纪以来的增温幅度是最大的<sup>[7]</sup>。气候的过度暖化将对建筑能耗产生重要影响。2001 年 Cartalis 等<sup>[8]</sup>使用度日数研究了温室效应引起希腊地区气温升高对于建筑能耗的影响, 研究表明: 温度升高 1.0℃, 希腊的采暖能耗会降低 10%, 而降温能耗会增加 28%。本文作者依据气候模拟获得的未来气候数据, 采用建筑能耗模拟方法预测了我国未来的建筑能耗, 研究表明到 2021-2050 期间严寒地区的采暖能耗将减少 18%<sup>[9]</sup>。

上述研究表明, 建筑采暖能耗将随着气候变暖而明显降低。那么在未来气候变暖的条件下, 严寒地区节能建筑的保温性能是否要减弱, 其节能指标该如何确定? 决定我国采暖能耗走向的严寒地区节能水平如何发展, 这是我们需要未雨绸缪, 预先研究的问题。以围护结构传热系数为研究对象, 通过分析其在气候变暖条件下的变化规律, 来确定未来严寒地区节能建筑围护结构的热工设计策略。

## 1 气候变暖条件下传热系数变化规律的理论分析

依据建筑热工理论, 采暖房间通过围护结构的传热量的计算采用稳态传热计算方法<sup>[10]</sup>, 其计算公式如下式所示。

$$q = K_0(t_i - t_e) \quad (1)$$

式中:  $q$  为通过围护结构的传热热流强度;  $K_0$  为围护结构传热系数;  $t_i$  为室内空气温度;  $t_e$  为室外空气温度。

以稳态传热模型为基础, 依据围护结构传热量不变的原则, 进行传热系数变化分析。假定通过围护结构的热流强度和室内空气温度保持不变 (如式 2 所示), 确定传热系数的变化量。

$$K_0(t_i - t_e) = K'[t_i - (t_e + \Delta t)] \quad (2)$$

$$K' = K_0[1/(1 - (\Delta t/(t_i - t_e)))] \quad (3)$$

式中:  $K_0$  为气候变暖前的围护结构传热系数;  $K'$  为气候变暖后的围护结构传热系数;  $\Delta t$  为室外空气温度的增量 (大于零)。

式 (3) 为保持围护结构热流不变条件下, 气候变暖前后围护结构传热系数的相互关系。从该式可看出, 随着气温升高, 传热系数比升温前变大。图 1 为升温后与升温前传热系数比值随升温幅度的变化曲线。

收稿日期: 2014-01-08

修改稿日期: 2014-11-13

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51221865); 国家自然科学基金项目 (51348002)

作者简介: 刘大龙 (1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事建筑能耗模拟方面的研究。E-mail: coffeercv@xauat.edu.cn

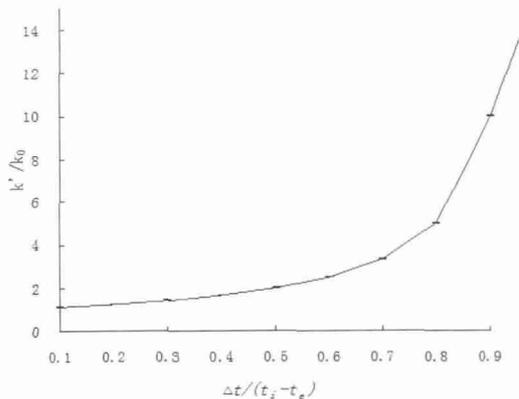


图 1 增温后与增温前传热系数比值曲线

Fig.1 Heat coefficient ratio curve before and after the temperature plus

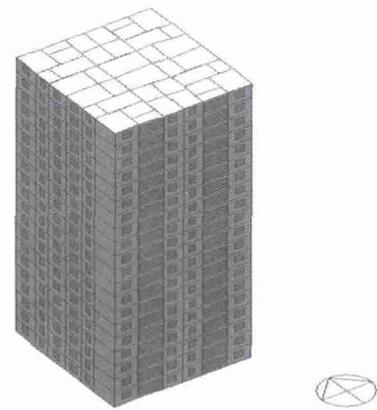


图 2 高层住宅模型

Fig.2 Simulated building model

由上图可以看出, 当气温增量与气候变暖前室内外温差相近时, 围护结构传热系数将急剧增大。也就是说, 在保持采暖能耗量不变的条件下, 随着气候不断变暖, 建筑围护结构的传热系数迅速增大, 对建筑的保温要求会显著降低。

## 2 传热系数变化对建筑能耗的影响

建筑能耗动态模拟已经成为研究建筑能耗的主要方法, 论文使用该方法来分析气候变暖条件下传热系数对建筑能耗的影响。

### 2.1 模拟建筑及模拟参数设置

能耗模拟以严寒地区哈尔滨为例, 未来气象数据采用 2021—2050 年间的的数据, 该数据来源于气候模拟<sup>[11]</sup>。采用 DOE-2<sup>[12]</sup>作为模拟软件。模拟建筑为一栋 20 层居住建筑。其模型如图 2 所示, 平面为正方形。建筑各朝向窗墙面积比均满足《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》<sup>[3]</sup>的要求。体形系数为 0.23, 满足上述节能标准中对严寒地区 14 层以上建筑小于 0.25 的要求。建筑室内采暖计算温度 18℃, 采用连续供暖方式, 采暖期为 11 月到翌年 3 月。采暖设备为家用空气源热泵空调器, 采暖额定能效比取 1.9。

### 2.2 围护结构传热系数变化的模拟分析

模拟方案如表 1 所示。方案 1 和 2 中各部位传热系数为《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》中的限定值, 其中方案 1 使用 1971—2000 的气象数据, 方案 2 为预测的 2021—2050 的气象数据, 使用不同时期气象数据的目的是为对比气候变化前后建筑能耗的差异。方案 3 为按照公式 3 计算的哈尔滨气候变暖后的传热系数, 提高为现有标准的 1.13 倍。

模拟结果如表 2 所示。对比方案 1 和 2, 外墙各部位传热系数相同, 只是气候条件不同, 模拟建筑单位面积采暖能耗发生了明显变化。从 1971-2000 时期到 2021-2050 时期, 采暖能耗从 86.3 kWh/m<sup>2</sup> 减少为 76.7 kWh/m<sup>2</sup>。可见, 随着气候变暖, 严寒地区建筑采暖能耗显著降低。方案 3 模拟结果表明, 根据哈尔滨从 1971—2000 到 2021—2050 时期平均气温升高 3.3℃, 将其围护

表 1 围护结构各部位传热系数限值与对应能耗值  
Tab.1 Heat transfer coefficient of building envelope and building energy consumption

方案编号	外墙 W/(m <sup>2</sup> ·K)	屋顶 W/(m <sup>2</sup> ·K)	窗户 W/(m <sup>2</sup> ·K)
1	0.55	0.30	2.20
2	0.55	0.30	2.20
3	0.65	0.35	2.50

结构传热系数提高到 1.13 倍, 其在 2021-2050 时期采暖能耗 83.9 kWh/m<sup>2</sup> 与 1971—2000 时期的 86.3 kWh/m<sup>2</sup> 基本相同, 误差为 2.8%。因此可以得出模拟结果与理论分析结果基本一致的结论。

## 3 气候变暖条件下严寒地区围护结构设计策略

### 3.1 不同部位传热系数变化对能耗的影响

围护结构中外墙、屋顶和窗户不同部位在传热中发挥不同的作用, 其中外墙和窗户占围护结构外表面积的 90%以上, 是外围护结构的主要部分。为此进行外墙和窗户传热系数变化对建筑能耗影响的模拟分析。模拟建筑和参数设置如上节所示。

外墙传热系数从 0.55 增加到 1.15, 每次增量为 0.1, 其他部位传热系数保持不变, 模拟结果如图 3 所

示. 单位面积采暖能耗与外墙传热系数呈现良好的线性关系, 传热系数增加  $0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 单位面积采暖能耗增加约  $3 \text{ W}$ .

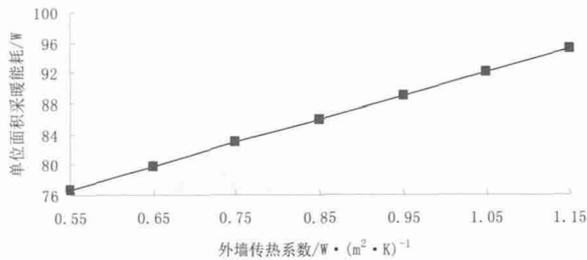


图3 外墙传热系数与采暖能耗的关系曲线  
Fig. 3 Relation curve between heat transfer of exterior wall coefficient and heating energy consumption

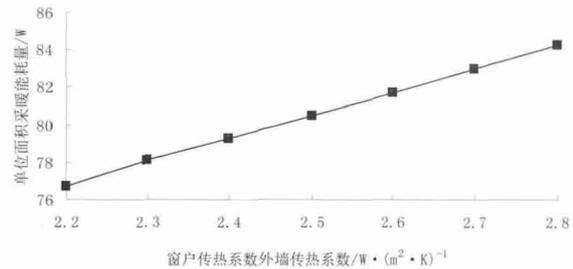


图4 窗户传热系数与采暖能耗的关系曲线  
Fig. 4 Relation curve between heat transfer of window coefficient and heating energy consumption

窗户传热系数从 2.2 增加到 2.8, 步长为 0.1, 其他部位传热系数保持不变, 模拟结果如图 4 所示. 单位面积采暖能耗与窗户传热系数呈现线性关系, 窗户传热系数每增加  $0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 单位面积采暖能耗增加约  $1.2 \text{ W}$ . 分析图 3, 4 可得, 两者相比较, 外墙传热系数的改变对采暖能耗的影响更加显著, 这跟外墙面积所占比例较大密不可分.

### 3.2 严寒地区未来节能建筑的围护结构设计策略

模拟结果表明, 在气候变暖的条件下, 我国严寒地区居住建筑保持现有节能标准中的传热系数限值不变, 其采暖能耗会显著低于目前的能耗水平. 这意味着, 在未来气候条件下为达到目前的节能水平, 墙体传热系数可增大, 对墙体保温性能要求有所降低.

增大墙体传热系数, 可采用自保温构造墙体, 使用加气混凝土、空心砌块或多孔砖等材料辅以保温砂浆来满足建筑保温要求. 自保温墙体使外围护结构设计更加灵活, 能够有效解决现有保温材料防火不利的顽疾. 使得建筑外面层的设计更加多样化, 还可减少施工难度, 提高施工进度, 降低建造成本. 目前自保温外墙难以推广的主要原因就是其保温性能受限, 其传热系数可以达到  $0.6 \sim 1.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[13-14]</sup>, 材料不同, 构造方法不同, 其保温性能差异较大.

图 3 的模拟数据表明, 在未来气候条件下, 当外墙传热系数大于  $0.85 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 采暖能耗会超出现有节能要求. 但是可以通过改善窗户保温性能, 降低其传热系数来换取墙体传热系数的增加. 表 2 为体现这种思想的模拟结果, 将外墙传热系数提高到  $1.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 窗户传热系数降为  $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . 分析模拟结果可以发现, 通过增加外墙传热系数, 降低窗户传热系数, 在气候变暖的情况下可以实现目前的节能水平.

表 2 优化的未来自保温围护结构传热系数

外墙 $W/(m^2 \cdot K)$	屋顶 $W/(m^2 \cdot K)$	窗户 $W/(m^2 \cdot K)$	采暖能耗 $\text{kWh}/\text{m}^2$
1.15	0.30	1.50	86.6

在未来严寒地区的节能标准中如将外墙的传热系数增加到  $1.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 这就使得大部分自保温墙体都能满足节能标准要求, 为大力推进自保温墙体创造了有利条件. 提高窗户的保温能力, 使其传热系数达到  $1.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 目前的中空保温玻璃已经可以满足要求<sup>[15]</sup>. 使得外墙与窗户的保温性能相近, 即可以使得外围护结构的整个立面传热趋于均匀; 同时可以弱化建筑立面设计中对于窗墙面积比的限制, 使得立面设计更加灵活, 多样, 为设计师提供更大的创作空间. 因此, 目前节能窗户的保温性需要进一步提高.

## 4 结论

近年来, 全球气候发生了的显著变暖, 并且这种变暖的趋势短期内不会停止. 针对气候显著变暖导致建筑采暖能耗减少的问题, 研究了我国严寒地区未来气候条件下节能建筑围护结构的热工设计策略.

以围护结构传热系数为研究对象, 根据稳态传热理论, 以等能耗为原则, 建立了传热系数在随室外温度变化的数学公式. 以哈尔滨为例, 结合气候模拟与动态能耗模拟技术, 对理论分析进行了验证. 到 2021—2050 期间, 随着气候变暖, 严寒地区围护结构传热系数的要求可降低. 依据该结论, 针对严寒地区, 采用等能耗原则, 提出了减弱外墙保温性能, 提高窗户保温性能, 使外墙与窗户的传热系数趋同的自保温构造体系, 该体系具有围护结构各部位传热均匀、施工简单、降低成本、防火性好、建筑立面设计灵活等众

多优点. 该自保温构造体系同样适用于寒冷地区. 上述研究基于气候显著变暖的前提下, 如果未来气候与现在保持不变, 甚至变冷, 严寒地区节能建筑墙体和窗户的传热系数还需继续降低, 以提高或者保持现有节能水平.

## 参考文献 References

- [1] 唐鸣放. 围护结构传热系数动态分析[J]. 暖通空调, 2005,35(7):1-3.  
TANG Mingfang. Dynamic thermal analysis of building envelope[J]. HV&AC, 2005,35(7):1-3.
- [2] 兰勇, 万朝均. 建筑外墙传热系数对能耗的影响[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008,22(6):31-34.  
LAN YONG, WAN Chaojun. Impact of building outside wall heat transmission coefficient on energy consumption[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2008,22(6):31-34.
- [3] 中华人民共和国建设部. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准 (JGJ26-2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings in Sever Cold and Cold Zone (JGJ26-2010)[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [4] CLIFT R, HOSKINS BJ. Energy and climate change—mission possible[J]. The Chemical Engineer, 2005(8): 21–25
- [5] Bogdan Gądek, Jan Leszkiewicz, Impact of climate warming on the ground surface temperature in the sporadic permafrost zone of the Tatra Mountains, Poland and Slovakia[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 79/80(8): 75-83.
- [6] BU Zhaojun, HANS Joosten, LI Hongkai, et al. The response of peatlands to climate warming: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(3): 157-162.
- [7] 赵宗慈, 王邵武, 罗勇. IPCC 成立以来对温度升高的评估与估计[J]. 气候变化研究进展, 2007,3(3):183-184.  
ZHAO Zongci, WANG Shaowu, LUO Yong. Assessments and projections of temperature rising since the establishment of IPCC[J]. Advances in climate change research, 2007,3(3):183-184.
- [8] CARTALIS C, SYNODINOU A, PROEDROU M. Modifications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region[J]. Energy Conversion & Management, 2001, 42 (14):1647-1656
- [9] 刘大龙, 刘加平, 杨柳. 气候变化下建筑能耗演化规律研究[J]. 太阳能学报, 2013,34(3):439-444.  
LIU Dalong, LIU Jiaping, YANG Liu. Building energy consumption principia under climate change in China[J]. Acta Energetica Sinica, 2013,34(3):439-444.
- [10] 刘加平. 建筑物理 (第四版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
LIU Jiaping. Architectural Physics (Fourth Edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] 刘大龙, 刘加平, 杨柳. 气候变化下建筑能耗模拟气象数据研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012,34(2):110-114.  
LIU Dalong, LIU Jiaping, YANG Liu. Analysis on simulation meteorological data under climate change[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012,34(2):110-114.
- [12] WINKELMANN F C, BRIDSALL B E, BUHL W F, et al. DOE-2 BDL Summary--Version 2. 1E, Energy and Environment Division[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 1993.
- [13] 高原, 张君. 加气混凝土自保温与聚苯板外保温墙体保温隔热性能对比[J]. 新型建筑材料, 2010(3):48-52.  
GAO Yuan, ZHANG Jun. A comparative study on the self heat-insulation wall of aerated concrete blocks and the external heat-insulation wall of polystyrene panels [J]. New Building Materials, 2010(3):48-52.
- [14] GILLIAN A. External wall insulation plays prominent role in sustainable construction [J]. Concrete Engineering International, 2005, 9(4): 20-22.
- [15] 于翔, 张宏, 苏中华. 中空玻璃传热系数等级划分[J]. 门窗, 2012(10):30-32.  
YU Xiang, ZHANG Hong, SU Zhonghua. Classification of insulating glass heat transfer coefficient[J]. Doors & Windows, 2012(10):30-32.

## Thermal parameters of building envelope of energy efficiency building in severe cold climate

LIU Dalong, LIU Jiaping, YANG Liu

(1. School of Architecture, Xi'an University of Arch. & Tech., Xi'an, 710055, China  
2. Shaanxi provincial collaborative innovation centre of green building in western, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The design method of building energy efficiency in severe cold zone in future warming climate conditions has great significance for the development of building energy efficiency technology in China. The formula that the heat transfer coefficient change with temperature rise was given. The effects of changes in heat transfer coefficient on building energy consumption in severe cold zone after climate warming was analyzed in Harbin combining climate simulation with dynamic energy simulation techniques. Studies have shown that as the climate warms, the heat transfer coefficient can reduce in severe cold zone between 2021-2050. Based on the principle of equal energy consumption that the heat transfer coefficient of exterior walls and windows in self-thermal insulation system is equal its suitability was demonstrated.

**Key words:** heat transfer coefficient; climate change; building energy consumption; self-thermal insulation system

(本文编辑 吴海西)