

围护结构保温设计中非稳态计算方法适用性研究

何 泉, 盛昂昂, 刘大龙

(西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 以寒冷地区不同太阳能资源区的城市居住建筑为研究对象, 分别在太阳能富集地区选取拉萨、敦煌, 次富集地区选取西安、北京, 采用稳态和非稳态方法进行传热计算, 分析了冬至日的逐时外墙内表面温度和墙体热流强度的变化规律, 以及建筑能耗。研究发现: 在拉萨, 采用两种方法计算的温度和热流差异都最大, 而西安的相应差异最小。表明: 在太阳能富集地区, 非稳态计算的采暖能耗更低; 当室外温度逐时差值日均温度大于 1.9°C 时, 两种方法计算耗热量的差值大于 10% ; 随着两者差值日均温度的增大, 两种方法计算的耗热量差值呈显著增长趋势, 差值最大可达 60% 以上。因为太阳辐射造成的室外温度波动显著, 此时围护结构传热采用非稳态更为合适, 与动态能耗模拟的结果更接近。

关键词: 保温设计; 动态模拟; 内表面温度; 热流; 耗热量

中图分类号: TU111.19+5.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)04-0561-07

Study on the applicability of unsteady calculation method in thermal insulation design of enclosure structure in cold area

HE Quan, SHENG Angang, LIU Dalong

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Taking the urban residential buildings in different solar energy resource areas in the cold area as the research object, Lhasa and Dunhuang are selected in the solar energy enrichment area, Xi'an and Beijing are selected in the sub-enrichment area, and the heat transfer is calculated by steady-state and unsteady-state methods. The variation rules of interior wall temperature and wall heat flux intensity of hourly exterior wall during the winter solstice, as well as building energy consumption are analyzed. It is found that the difference of temperature and heat flux calculated by the two methods is the largest in Lhasa, while the corresponding difference is the smallest in Xi'an. The results show that in solar energy enrichment areas, the heating energy consumption of unsteady calculation is lower; when the hourly difference of outdoor temperature is more than 1.9°C , the difference of heat consumption calculated by the two methods is more than 10% ; with the increase of the daily average temperature of the difference between the two methods, the difference of heat consumption calculated by the two methods shows a significant growth trend, and the maximum difference is more than 60% . Because of the significant outdoor temperature fluctuation caused by solar radiation, the unsteady heat transfer of the enclosure structure is more suitable, which is closer to the result of dynamic energy consumption simulation.

Key words: thermal insulation design; dynamic simulation; surface inside face temperature; heat flux; heat consumption

20 世纪 70 年代能源危机的爆发, 提高了公众对各行各业能耗的关注度。其中建筑能耗在全国总能源构成中占很大比重^[1], 因此建筑能耗也成为业界关注的热点。在建筑能源的消耗中, 大部分由建筑本体所消耗。且外墙作为建筑的外围护结构, 对建筑的能耗起着至关重要的作用^[2], 因此围

护结构传热计算模型是建筑节能设计的理论基础。

围护结构保温计算长期采用稳态计算方法。随着节能要求的不断提升^[3], 可再生能源的应用越来越被关注, 稳态计算方法不利于考虑太阳能的热效应。同时随着蓄热墙体^[4]、相变墙体^[5]的应用, 以及动态采暖控制^[6]等新型节能技术的应用,

收稿日期: 2020-12-10 修改稿日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(51878536); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(面上)(2019JM-505); 西部绿色建筑国家重点实验室开放研究基金项目(LSKF202017)

第一作者: 何 泉(1976—), 女, 博士、副教授, 主要从事建筑气候与节能方面的研究。E-mail: 76634259@qq.com

通信作者: 刘大龙(1976—), 男, 博士、副教授, 主要从事建筑气候与节能方面的研究。E-mail: coffevec@xauat.edu.cn

稳态计算方法已经不能满足传热计算的需求。

国内外已有学者开始从事保温设计中非稳态计算方法的应用研究。Wonjun Choi 等^[7]指出由于稳态方法不考虑围护结构的蓄热,环境温度变化的稳态分析不能很好地反映系统的工作特性。Haie Huo 等^[8]同样指出气候条件是计算建筑热工性能的重要参数,并用非稳态方法分析了在相同节能措施下,定量研究了在不同地区的建筑围护结构在节能中的贡献率。龙恩深^[9]等以美国芝加哥和中国上海为例,用 DOE-2 和 CTM 模拟分析了同一建筑在两种截然不同的气候条件下,相同保温措施下的年采暖降幅有显著差异。王靖文等^[10]利用谐波反应法分析西安与哈尔滨的非稳态传热过程,提出非稳态计算方法可体现围护结构对室外气象参数的响应。刘大龙等^[11]曾对藏区展开室外太阳辐射调研,而后文献^[12]提出高海拔强辐射地区能耗计算方法不宜采用稳态计算方法的建议。张率^[13]等选取严寒和寒冷地区 10 个典型城市,对比两种方法下耗热量的差异,提出对于差异率在 15% 以上的城市采用非稳态计算方法。上述学者对非稳态热工设计的研究各有侧重,强调单一指标在两种计算方法下的差异,却没有对不同太阳能辐射下内表面热流,热流量以及耗热量在两种方法下综合评判非稳态方法的适用性,以及间歇采暖在北方采暖地区适应性问题考虑较少。

针对以上问题,建立一栋多层建筑模型,选取寒冷地区太阳能辐射不同的城市,分析内墙面温度,逐时热流以及耗热量在这种计算方法下的差异性,探究非稳态计算方法在围护结构保温设计中的适用性,为将来精细化节能控制下围护结构保温动态评价提供参考。

1 计算方法的对比

1.1 稳态计算方法

现有的围护结构保温设计^[14]假定在全阴天的环境条件下(不考虑太阳辐射的影响),室内外边

界条件均为静态,以传热系数(传热阻)为基础(不考虑围护结构蓄热),计算稳态的内表面温度、热流、耗热量,其结果在一天中均为定值。即稳态计算方法考量的是在室内边界条件为定值时,围护结构所做出的静态响应。

由于研究的区域为采暖房间,故取室内空气温度设定为 18℃。为使稳态计算方法与非稳态计算方法计算的值具有可比性,故稳态计算方法中的室外空气温度取为非稳态计算过程中的室外逐时温度的平均值。稳态计算方法公式参考《建筑物理》^[15]。

1.2 非稳态计算方法

非稳态计算方法的室外边界条件呈现为逐时动态的变化,考虑太阳辐射的热效应,以及围护结构的蓄热,因此围护结构作出的响应为动态的、多因素的,考量内容有墙体的逐时的内墙面温度分布,逐时的热流等。非稳态计算方法^[16]一般有有限差分法,谐波反应法,反应系数法等。本文选用以反应系数法为内核的 EnergyPlus 作为模拟的软件。反应系数法主要是基于内外墙面温度的反应系数法,相对于基于室内温度的反应系数法更为精确。EnergyPlus 的精确性得到学者的认可,且应用于学术研究^[17-18]。

2 模拟分析的参数设置

2.1 模拟建筑信息及围护结构的选型

采用 EnergyPlus 对一城市居住建筑进行传热计算模拟。模拟的建筑模型如图 1 所示,单层建筑面积为 274.66 m²,共 6 层,建筑体积为 4 943.97 m³,东西向窗墙比为 0.05,南向窗墙比为 0.38,北向窗墙比为 0.21,建筑体形系数为 0.33。符合规范^[19]要求。建筑模拟主要计算参数的设置均符合规范^[19]。

为体现围护结构在寒冷地区保温设计中非稳态传热适用性的普适性特征,选取 6 种围护结构构造,其中包括 2 种无保温墙体,2 种外保温墙体,2 种内保温墙体。墙体构造形式见表 1:

表 1 墙体的构造形式

Tab. 1 The structure of the wall

构造 编号	构造形式	传热系数 $K_0/W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$	热惰性 指标 D
1	1)20 mm 水泥砂浆 2)240 砖墙 3)20 mm 水泥砂浆	1.97	4.13
2	1)20 mm 水泥砂浆 2)370 砖墙 3)20 mm 水泥砂浆	1.47	5.83
3	1)20 mm 水泥砂浆 2)60 mm XPS 板 3)240 砖墙 4)20 mm 水泥砂浆	0.40	4.81
4	1)20 mm 水泥砂浆 2)60 mm XPS 板 3)200 mm 钢筋混凝土墙 4)20 mm 水泥砂浆	0.43	3.64
5	1)20 mm 水泥砂浆 2)240 mm 黏土实心砖墙 3)60 mm XPS 板 4)20 mm 水泥砂浆	0.40	4.81
6	1)20 mm 水泥砂浆 2)200 mm 钢筋混凝土 3)60 mm XPS 板 4)20 mm 水泥砂浆	0.43	3.64

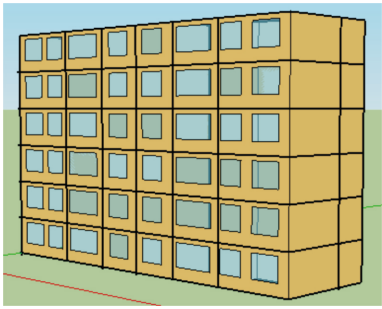


图 1 建筑模型

Fig. 1 Architectural model

2.2 室外气象条件

由于四个地点地理位置不同, 海拔不同, 造成的室外气象条件各有差异. 四个城市分别为拉萨, 敦煌, 西安, 北京. 四个地区热工分区以及太阳辐射量的具体信息如表 2 所示:

表 2 四个城市的热工分区及太阳辐射量^[14, 20]

Tab. 2 The heat division and solar radiation of four cities

城市	热工分区	年总辐射量 MJ/(m ² · a)	12 月日均总辐射量 MJ/(m ² · d)
拉萨	寒冷 A 区	8 703.85	25.03
敦煌		7 241.09	15.88
西安	寒冷 B 区	4 850.50	10.20
北京		6 281.99	13.71

室外气象条件取自于 EnergyPlus 自带的 CSWD 气象文件. 图 2 为四个城市的室外综合温度与室外空气温度. 从图中可以看出拉萨、敦煌的太阳辐射强度高. 拉萨日较差最大, 其次是敦煌, 然后是北京, 日较差最小的为西安.

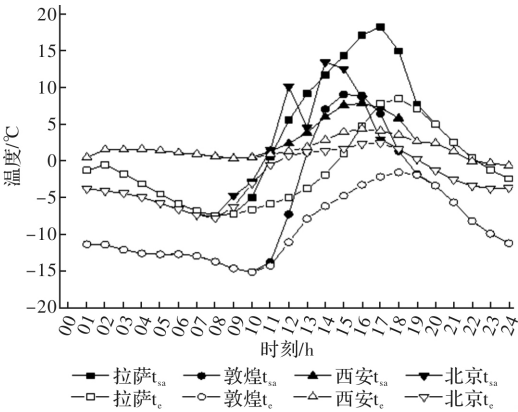


图 2 四个地区的室外综合温度 t_{sa} 和室外空气温度 t_e

Fig. 2 The outdoor integrated temperature t_{sa} and outdoor air temperature t_e in the four regions

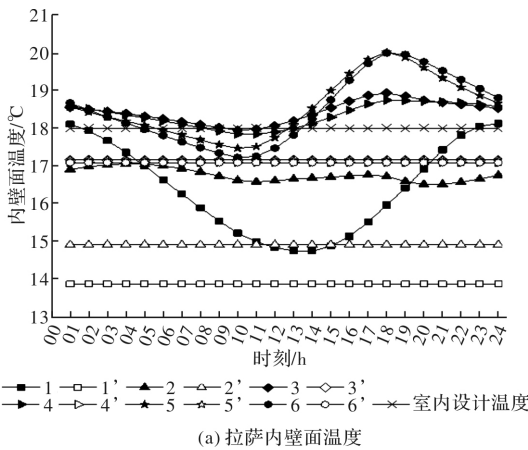
由于考虑太阳热辐射效应对传热的影响, 因此选择太阳辐射最不利的冬至日 12 月 22 日作为研究日期.

3 结果分析与讨论

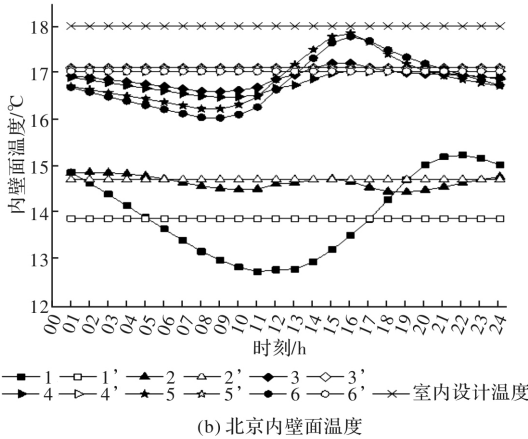
本文主要从内壁面温度、逐时热流量以及耗热量三个方面描述传热差异.

3.1 内壁面温度的对比分析

内壁面温度可反映围护结构抵抗室外温度波动的能力. 本文对稳态方法计算出的内壁面温度以及 EnergyPlus 模拟出的四个城市的建筑外墙内壁面温度进行汇总. 因篇幅原因, 仅给出有典型性的地处拉萨市和北京市建筑的内壁面温度图. 在两种计算方法得出的内壁面温度的汇总图(图 3)中, 6 种围护结构构造中的每一种构造分别对应两种内壁面温度, 前者为非稳态计算方法下的内壁面温度, 如“1”表示; 后者为稳态计算方法下的内壁面温度, 如“1'”表示. 为了方便称谓, 非稳态内壁面温度高于稳态内壁面温度的时间段, 叫做“非稳态时段”, 非稳态内壁面温度低于稳态内壁面温度的时间段, 称为“稳态时段”.



(a) 拉萨内壁面温度



(b) 北京内壁面温度

图 3 拉萨和北京的内壁面温度

Fig. 3 The surface temperature of Lhasa and Beijing

太阳辐射强烈的地区, 在一天当中的某一时间段, 特别是南向的室内温度会高于 18°C, 此时建议停止供暖, 因为此时室内的供暖会过剩, 造

成不必要的能源浪费. 因此内壁面温度的图中添加室内设计温度 18°C 线, 当内壁面温度高于 18°C 时, 可以采取间歇采暖模式, 减少能耗.

构造 1 至构造 6, 均表现出拉萨的非稳态时段最长(均为 24 h), 最小的为西安(均为 0 h). 且拉萨内、外保温围护结构均存在间歇采暖的时间段, 原因为拉萨的太阳辐射最为强烈, 且有保温的构造的保温性能较无保温的墙体较优良, 有保温构造的墙体的内壁面温度较高. 敦煌构造 2 的非稳态时段(24 h)大于北京(6 h), 这是由于敦煌的太阳辐射强于北京, 且构造 2 热惰性最大. 而构造 1、构造 3 至构造 6 的非稳态时段, 敦煌小于北京. 这是由于构造 1、构造 3 至构造 6 的热惰性指标小, 且敦煌的日较差比北京大, 气温比北京低, 导致热惰性较小的围护结构下北京的非稳态时段大于敦煌.

由两种方法计算的内壁面温度的对比得出, 太阳辐射强烈的拉萨的两种计算方法间的差异大, 最小为西安. 在非稳态时段中, 拉萨的内外保温构造的围护结构存在可以间歇采暖的时段, 构造 3 至构造 6 下的非稳态内壁面温度大于 18°C 的时长分别为 22、19、17、15 h.

3.2 不同计算方法下热流量与耗热量的对比分析

采用稳态方法与 EnergyPlus 模拟得出热流量与耗热量的值. 考虑到典型性(拉萨、敦煌与西安的逐时热流图趋势相似)与篇幅, 仅提供拉萨和北京两个城市的逐时热流量图及耗热量差异图.

在图 4、图 5 中可以看出稳态下的热流量不随时间变化; 非稳态下的热流量整体上呈现随时间先减小后增大的趋势. 其中无保温构造的稳态热流大于有保温构造的稳态热流. 非稳态热流除具有稳态热流在构造上的表征外, 内保温的逐时热流大于外保温的逐时热流.

在计算采暖时期传热时, 一般是考虑室内流向室外的散热的热流量. 且稳态下的热流量是以传热系数与室内外温差(定值)为基础, 得出来的热流为定值, 且方向为室内流向室外; 非稳态下的热流考虑围护结构的传热、蓄热, 以及逐时温度的影响, 从图中同样可以看出非稳态下的热流方向为室内流向室外时, 与稳态下的热流量具有对比性. 在这样的前提下, 构造 1 至构造 6 下, 拉萨的两种计算方法下的热流量差异均最大, 其次是敦煌, 然后是北京, 差异最小的为西安. 其原因为拉萨的日较差最大, 非稳态下的逐时气温与

稳态下气温均值差值最大, 西安的日较差最小, 温度波动平缓, 非稳态下的逐时气温与稳态下气温均值差值最小. 且若把非稳态逐时热流量取平均与稳态下的热流量做对比, 仍然是拉萨的差异最大, 其次是敦煌, 然后是北京, 最小的为西安. 以砖墙外保温构造为例, 非稳态逐时热流量取平均与稳态下的热流量差值分别为: 拉萨(5.61°C) > 敦煌(5.49°C) > 北京(3.83°C) > 西安(1.19°C).

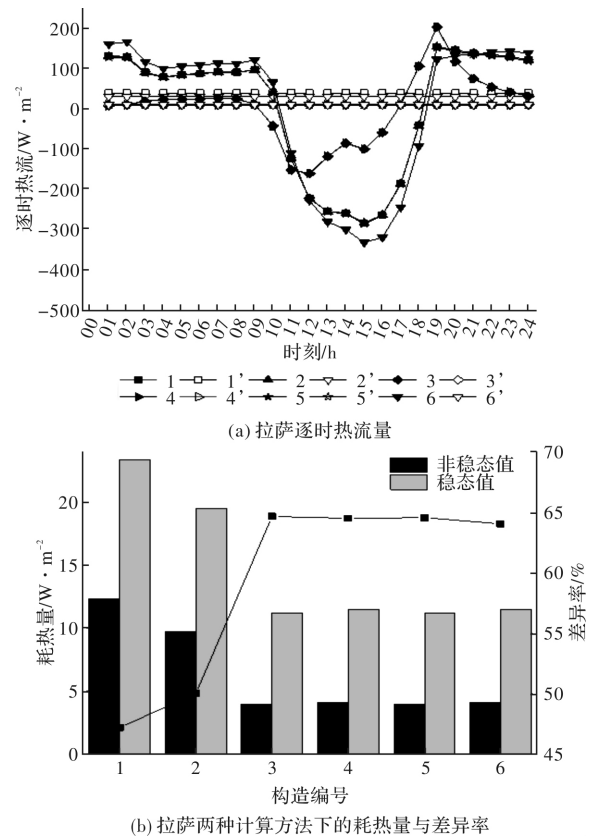


图 4 拉萨两种计算方法下逐时热流量与耗热量
Fig. 4 The heat flow and heat consumption calculated in two methods in Lhasa

稳态下的耗热量是在室外平均温度下, 为保持室内温度, 单位面积内消耗的热量, 这种消耗并不包括室内得热. 而在非稳态下的耗热量则是在逐时的室外温度下, 为保持室内温度, 单位面积消耗的热量, 此时也考虑室内的太阳辐射的得热. 因此在太阳辐射强烈的地区, 无论何种保温形式耗热量的差异则会最明显, 以耗热量差异率表现两种方法所表征的差异. 以拉萨与北京两种计算方法下耗热量以及差异率 $\epsilon(\%)$ 为典型绘制出图像, 见图 4b 与图 5b.

$$\epsilon = \frac{|H_{unst} - H_s|}{H_s} \quad (1)$$

式中: H_{unst} 为非稳态计算方法下的耗热量; H_s 为

稳态计算方法下的耗热量。

以外保温构造墙体(砖墙)为例,两种方法下拉萨的耗热量差异率最大(64.65%),其次是敦煌(15.28%),再者是北京(12.01%),最小的是西安(5.50%)。

可以看出6种保温构造下,拉萨在非稳态与稳态下的热流差值和耗热量差异率最大,其次是敦煌,然后是北京,最小的是西安。对于太阳辐射强烈,平均温差相对较小的拉萨,内保温构造(60 mm保温层)下的建筑在10点~18点的时段、外保温在24 h全时段,南向房间可以考虑采取间歇采暖的方式。

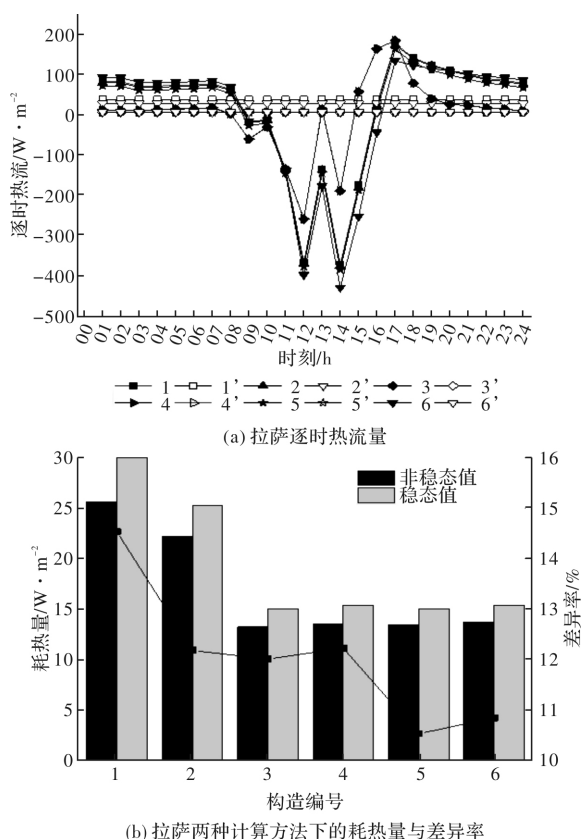


图5 北京两种计算方法下逐时热流量与耗热量

Fig. 5 The heat flow and heat consumption calculated in two methods in Beijing

4 非稳态方法适用性的讨论

四个城市下的围护结构传热在两种计算方法下的内壁面温度、逐时热流量以及耗热量均存在差异性。当非稳态下的内壁面温度高于稳态的内壁面温度,以及非稳态的逐时热流量、耗热量比稳态下热流、耗热量要小时,非稳态方法适用性越强。

拉萨的6种构造在非稳态计算方法下的内壁面

温度均大于稳态下的内壁面温度。拉萨在四地中,非稳态下逐时热流量波幅较大,其平均值与稳态下的热流相比仍是最大,且两种方法下的耗热量最小的差异率也达到47%。拉萨非稳态计算的内壁面温度与稳态相比更符合当地的实际。因为拉萨的内壁面温度高,围护结构的热流少,耗热量少。因此拉萨围护结构保温设计中非稳态方法的适用性最高。

敦煌6种构造下的非稳态的逐时热流均值小于稳态下的热流,非稳态下的耗热量少于稳态下的耗热量,耗热量差异率最小值为12.46%,最大可达21.21%。敦煌虽然有部分围护结构的非稳态内壁面温度小于稳态的内壁面温度,但差值很小,再从热流和耗热量来看,差异较大,耗热量差异率最大可达21.21%,且非稳态下的热流量与耗热量值更低,因此敦煌在围护结构保温设计中非稳态计算方法较为适宜。

北京和敦煌在冬季的12月份的日辐射量相差较小,因此北京和敦煌的三个量值的两种计算方法下的趋势相似。不同的地方在于北京的无保温构造下的内壁面温度的非稳态时段短但平均差值仅为0.06℃;内外保温构造上的非稳态时段较长,平均差值为0.24℃。两种方法的逐时热流差值、耗热量差异率比敦煌小,但耗热量差异率最小值可达10%以上。因此北京在围护结构保温设计中非稳态计算方法适宜。

西安6种构造在非稳态计算方法下的内壁面温度均低于稳态下的内壁面温度。由于西安的太阳辐射弱,且日较差最小,西安非稳态下逐时热流量的平均值与稳态下的热流差值最小。因此西安在围护结构保温设计中非稳态计算方法的适宜度最低。

为了探究两种计算方法下四个城市的温度与耗热量的关系,以室外温度逐时差值日均温度 t_d 来说明太阳辐射的影响。

$$t_d = \frac{|t_{s,t} - \bar{t}_{e,t}|}{24} \quad (2)$$

式(2)中 $t_{s,t}$ 为室外逐时空气综合温度; $\bar{t}_{e,t}$ 为室外逐时空气温度的平均值。

拉萨、敦煌、西安、北京的室外温度逐时差值日均温度分别为:3.68、2.67、0.8、1.94℃。可以发现差值日均温度最大的为拉萨,其次为敦煌,然后是北京,最小的为西安,这和四个城市的太阳辐射的强弱、同一种构造下的耗热量差异

率以及非稳态方法的适用性成正相关。在太阳能富集地区,非稳态计算的采暖耗热量更低,非稳态方法的适用性更高。且当室外温度逐时差值日均值大于 1.9°C 时,两种方法计算耗热量差值大于10%;随着两者差值日均温度的增大,两种方法计算的耗热量差值呈显著增长趋势,耗热量差值最大可达60%以上。

从上面讨论可得出非稳态方法的适用性最高的是拉萨,其次是敦煌,然后是北京,最低的为西安,这与四地所处的太阳辐射强弱有关。且太阳辐射越强的地区,室外温度逐时差值日均温度越高,采暖耗热量差异率越大,非稳态方法下的耗热量值更低。

5 结 论

本文通过对寒冷地区不同太阳能资源区的典型城市的围护结构的稳态与非稳态传热计算方法的差异分析,及寒冷地区围护结构非稳态传热计算方法在保温设计下适用性分析,结果表明:

(1)两种计算方法下内壁面温度、热流及耗热量在太阳辐射强烈的拉萨差异最为显著,其次为敦煌、北京,最不显著的为西安。

(2)对于太阳辐射强烈,平均温差相对较小的拉萨,在60 mm厚保温层下内保温构造的建筑在10点~18点的时段、外保温在24 h全时段,南向房间可以考虑采取被动式间歇采暖的方式。

(3)太阳辐射强烈的地区,用非稳态方法计算的耗热量更低。当室外综合温度与气温逐时差值越大,耗热量差异呈现明显增加的趋势。当差值日均温度达到 1.90°C 时,耗热量差值达到10%以上,最高差值可达60%以上。

(4)在太阳辐射强的地区,用非稳态计算方法计算建筑能耗更为适宜。

参考文献 References

- [1] YANG L, LIU J P. Building energy simulation using multi-years and typical meteorological years in different climates[J]. *Energy Conservation and Management*, 2008, 49:113-24.
- [2] HUO H, JING C, LI K, et al. Synergic relationships between thermophysical properties of wall materials in energy-saving building design[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90:246-253.
- [3] 罗凌峰, 聂忆华, 范鑫森. 居住建筑节能设计标准及热工参数对比分析[J]. *山西建筑*, 2019, 45(7):

193-195.

- LUO Lingfeng, NIE Yihua, FAN Xinmiao. Comparative analysis of energy saving design standards and thermal parameters of residential buildings[J]. *Shanxi Architecture*, 2019, 45(7): 193-195.
- [4] 潘明众, 刘艳峰, 周勇. 集热蓄热墙式被动构件向房间传热量的简化计算方法[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(4): 594-601.
- PAN Mingzhong, LIU Yanfeng, ZHOU Yong. Simplified calculation method of heat transfer to room by passive components of heat storage wall[J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2020, 52(4): 594-601.
- [5] PIRASACI T. Investigation of phase state and heat storage form of the phase change material(PCM)layer integrated into the exterior walls of the residential-apartment during heating season[J]. *Energy*, 2020, 207: 118176.
- [6] BRANDI S, PISCITELLI M S, MARTELLACCI M, et al. Deep reinforcement learning to optimise indoor temperature control and heating energy consumption in buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 224: 110225.
- [7] WONJUN CHOI R O, MASANORI SHUKUYA Unsteady-state exergetic performance comparison of externally and internally insulated building envelopes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 163(9): 120414.
- [8] HAIE HUO J S, HAIBO HUO. Contributions of Energy-saving Technologies to Building Energy Saving in Different Climatic Regions of China[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124: 1159-1168.
- [9] ENSHEN L, ZIXUAN Z, XIAOFEI M. Are the energy conservation rates(RVRs) approximate in different cities for the same building with the same outer-wall thermal insulation measures? [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(4): 537-44.
- [10] 王靖文, 王焯, 孙鹏宝. 基于谐波法的建筑围护结构非稳态传热分析[J]. *兰州交通大学学报*, 2015, 34(3): 153-8.
- WANG Jingwen, WANG Ye, SUN Pengbao. Unsteady heat transfer analysis of building envelope based on harmonic method[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2015, 34(3): 153-158.
- [11] 刘大龙, 张习龙, 杨柳. 康巴藏区传统民居冬季热环境[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 48(2): 254-7.
- LIU Dalong, ZHANG Xilong, YANG Liu. Winter thermal environment of traditional dwellings in Kangba

- Tibetan area[J]. Journal of Xi'an University of Architectural Science and Technology(Natural Science Edition), 2016, 48(2): 254-257.
- [12] 刘大龙, 刘加平, 张习龙. 青藏高原气候条件下的建筑能耗分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 2167-72.
LIU Dalong, LIU Jiaping, ZHANG Xilong. Analysis of building energy consumption under the climatic condition of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Solar Energy, 2016, 37(8): 2167-2172.
- [13] 张率, 刘衍, 侯立强. 北方采暖地区居住建筑节能计算方法对比[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 178-85.
ZHANG Shuai, LIU Yan, HOU Liqiang. Comparison of energy saving calculation methods of residential buildings in northern heating areas[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10): 178-185.
- [14] 住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范: GB 50176-2016[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2016.
MOHURD. Code for thermal design of civil buildings: GB 50176-2016[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [15] 刘加平. 建筑物理[M]. 4th ed. 北京: 中国建筑工业出版社. 2000.
LIU Jiaping. Architectural Physics[M]. 4th ed. Beijing: China Construction Industry Publishing House, 2000.
- [16] 陈友明, 王盛卫. 建筑围护结构非稳定传热分析新方法[M]. 科学出版社, 2004.
CHEN Youming, WANG Shengwei. A new method for unsteady heat transfer analysis of building envelope[M]. Science Press, 2004.
- [17] ALEKSANDAR S A, MUJAN I, STOJANKA D. Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade[J]. Energy and Buildings, 2016, 118: 27-36.
- [18] ZHU D, HONG T, DA Y, et al. A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E[J]. Building Simulation, 2013, 6(3): 323-35.
- [19] 住房和城乡建设部. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 26-2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
MOHURD. Design standard for energy efficiency of residential buildings in cold and cold areas: JGJ 26-2018[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.
- [20] 国家市场监督管理总局. 环境条件分类自然环境条件太阳辐射与温度: GB/T 4797.4-2019[S]. 北京: 中国质检出版社, 2019.
SAMR. Environmental conditions classify natural environmental conditions solar radiation and temperature: GB/T4797.4-2019[S]. Beijing: China quality Inspection Press, 2019.

(编辑 桂智刚)