

太阳能建筑外墙传热系数朝向差异设计研究

桑国臣, 方 倩, 王文康, 朱轶韵, 赵 钦, 崔晓玲

(西安理工大学土木建筑工程学院, 西安 710048)

摘 要: 结合太阳能建筑室外热作用朝向差异显著的特点, 对不同朝向外墙单位面积日平均失热量进行分析, 提出“传热系数朝向差异”的太阳能建筑墙体热工设计方法。借助建筑分析模型, 确立墙体节材量随基础传热系数和室内计算温度的变化关系; 对比分析拉萨、银川及西安3个地区太阳能建筑的墙体节材性特点及传热系数朝向差异设计下的墙体内壁面温度动态变化规律。结果表明: 采用墙体传热系数朝向差异化设计可减少墙材用量, 且太阳辐射强度越高的地区节材性越明显, 该方法不会对室内热环境产生不利影响。

关键词: 被动式太阳能建筑; 太阳能; 节能; 传热系数; 建筑材料

中图分类号: TK512

文献标识码: A

0 引 言

被动式太阳能采暖建筑因其具有节约能源、造价低廉、无污染等优点, 正逐渐成为绿色建筑领域的研究热点^[1]。提高太阳能建筑外墙热阻是减少采暖能耗的重要技术措施之一^[2], 然而墙体热阻与墙体材料用量密切相关。现行的采暖居住建筑节能设计标准中^[3], 所有朝向外墙均采用相同的传热系数, 该方法虽能简化一般采暖建筑墙体热工设计及分析过程, 但对于太阳能建筑的墙体传热朝向差异性和墙体构造的经济性考虑有所不足^[4-6]。文献[7]针对太阳辐射热作用的朝向差异特点, 提出太阳能建筑的非平衡保温设计方法, 该方法突破“等传热系数”的外墙热工设计模式, 可为太阳能建筑墙体热工优化设计提供新思路。然而, 该方法是以“等热流密度”进行不同朝向外墙传热系数的设计, 虽可有效降低建筑内壁面的不均匀辐射温差、改善室内热环境, 但建筑墙体材料总用量并未改变。

针对太阳能建筑室外热扰朝向差异特点, 探索建筑热工优化设计方法, 有助于提升太阳能建筑的综合性能。本文以拉萨、银川及西安地区的气候条件为例, 探索外墙传热系数朝向差异化设计的方法及其对墙材用量和室内热环境影响, 以期对太阳能建筑节能墙体优化设计提供参考。

1 外墙单位面积日平均失热量的朝向差异分析

建筑外墙单位面积传热量取决于墙体传热阻和传热温差。但太阳能建筑的室外综合温度存在朝向差异, 因此热阻相同的不同朝向外墙, 单位面积失热量有所差别。

1.1 外墙室内外传热的外边界条件

建筑围护结构所受到的室外热作用是室外空气温度、太阳直射辐射、天空散射辐射等的综合作用^[8]。室外综合温度的计算式为:

$$t_{sa} = t_e + \frac{I\rho}{\alpha_a} - \frac{q_e}{\alpha_a} \quad (1)$$

式中, t_{sa} 、 t_e ——室外综合温度和空气温度, $^{\circ}\text{C}$;
 I ——围护结构单位外表面积所受到的太阳总辐射, W/m^2 ; ρ ——围护结构外表面对太阳辐射的吸收率, 取 0.7; α_a ——壁表面总换热系数, 取 $23.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
 q_e ——有效辐射或夜间辐射, W/m^2 。

以拉萨、银川和西安地区为例, 根据典型气象年数据^[9]并结合式(1), 可得到采暖期内3个地区不同朝向外墙所受到的太阳辐射照度及室外综合温度逐时值, 进而根据每个地区采暖期的时间, 分别求出3个地区采暖期内的太阳辐射照度及室外综

收稿日期: 2018-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51678482); 陕西省社发攻关(2012K12-03-05)

通信作者: 桑国臣(1973—), 男, 博士、教授、硕士生导师, 主要从事建筑热工与建筑材料方面的研究。sangguochen@xaut.edu.cn

合温度平均值,见表1。由表1可见,不同朝向外墙所受到的太阳辐照度有所不同。其中,南向最高,北向最低,东向和西向介于南向与北向之间。不同朝向的室外综合温度变化规律与太阳辐照度的变化规律相似,表现为南向室外综合温度最高、北向最低、东/西向相近,且介于南/北向之间。其中,拉萨地区的南向比北向高5.9℃,达到8.0℃;银川地区南向比北向高3.9℃,达到2.4℃;西安地区南向比北向高1.6℃,达到6.6℃。此外,通过3个地区的太阳辐照度及不同朝向室外综合温度差异分析可知,太阳辐射强度越高的地区,不同朝向室外综合温度的差异性越大,外墙室内外传热的外边界条件随朝向差异也越大。

表1 拉萨、银川和西安地区采暖期内不同朝向的太阳辐照度及室外综合温度

Table 1 Solar radiation and outdoor sol-air temperature of different orientations during heating period in Lhasa, Yinchuan and Xi'an areas					
地区	室外气象参数	南向	东向	西向	北向
拉萨	太阳辐照度 $I/W \cdot m^{-2}$	220.6	113.8	93.4	38.5
	室外综合温度 $t_{sa}/^{\circ}C$	8.0	4.5	3.9	2.1
银川	太阳辐照度 $I/W \cdot m^{-2}$	159.6	64.8	73.6	36.6
	室外综合温度 $t_{sa}/^{\circ}C$	2.4	-0.6	-0.4	-1.5
西安	太阳辐照度 $I/W \cdot m^{-2}$	104.2	56.3	59.7	40.9
	室外综合温度 $t_{sa}/^{\circ}C$	6.6	5.1	5.2	4.6

1.2 不同朝向外墙单位面积日平均失热量分析

因室内外温差的存在,室内热量会经建筑外墙向室外传递,但由于不同朝向外墙所对应的太阳辐射及天空辐射不同,因此在室内温度及墙体传热系数相同的条件下,不同朝向外墙单位面积日平均失热量会有所差别。不同朝向外墙单位面积失热量的计算式^[10,11]为:

$$W_j = q_j \cdot s = K_j \cdot (t_i - t_e) \cdot \varepsilon_j \cdot s$$
$$= \frac{s}{R_{0j}} (t_i - t_e) \left(\frac{t_i - t_{sa,j}}{t_i - t_e} \right) = \frac{s}{R_{0j}} (t_i - t_{sa,j}) \quad (2)$$

式中, W_j ——第 j 个外墙的日单位面积失热量, J/m^2 ; q_j ——第 j 个外墙的单位面积日传热失热量, W/m^2 ; s ——时间, s ; K_j ——第 j 个外墙的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; t_i ——室内计算温度,取 $18^{\circ}C$; t_e ——采暖期室外平均温度, $^{\circ}C$; R_{0j} ——第 j 个外墙的传热阻,

$(m^2 \cdot K)/W$; ε_j ——不同朝向外墙的传热系数修正系数; $t_{sa,j}$ ——第 j 个外墙所对应的室外综合温度, $^{\circ}C$ 。

根据表1中3个地区的南向、东向、西向及北向外墙所对应的室外综合温度,由式(2)得出不同墙体传热阻下的3个地区各外墙单位面积日平均失热量,见表2。从表2可看出,在相同墙体传热阻下,北墙的单位面积失热量最大、东/西墙次之、南墙最小。此外,虽然不同朝向外墙的单位面积失热量均随传热阻的增大而减小,但失热量随传热阻增大的变化速率存在朝向差异。

表2 不同传热阻下各朝向外墙采暖期内单位面积日平均失热量

Table 2 Quantity of average daily heat loss per unit area of exterior walls in different orientations during heating period under different heat transfer resistance

		W/(kJ·m ²)			
地区	朝向	外墙传热阻 $R/m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$			
		1.0	1.5	2.0	2.5
拉萨	南墙	864.00	578.90	432.00	345.60
	东墙	1166.40	777.60	587.50	466.60
	西墙	1218.20	812.16	613.40	483.80
	北墙	1373.80	915.80	691.20	553.00
银川	南墙	1347.80	898.60	673.90	535.70
	东墙	1607.00	1071.36	803.50	639.40
	西墙	1589.80	1062.70	794.90	639.40
	北墙	1684.80	1123.20	846.70	673.90
西安	南墙	985.00	656.60	492.50	397.40
	东墙	1114.60	743.00	561.60	449.30
	西墙	1105.90	734.40	553.00	440.60
	北墙	1157.80	769.00	578.90	466.60

1.3 传热阻对墙体单位面积日平均失热量的影响

为探究墙体传热阻增大对不同朝向外墙节能效果的影响差异,以传热阻为 $1.0 (m^2 \cdot K)/W$ 时的各外墙日单位面积失热量为基础值(见表2),分析等量增加传热阻条件下,不同朝向外墙日平均单位面积的失热量差值(即“节能量”)的变化规律,见图1。由图1可见,随着外墙传热阻的增大,墙体的日平均单位面积节能量增大,但在等量增大墙体传热阻的条件下,不同朝向外墙的节能量不同。其中,北墙

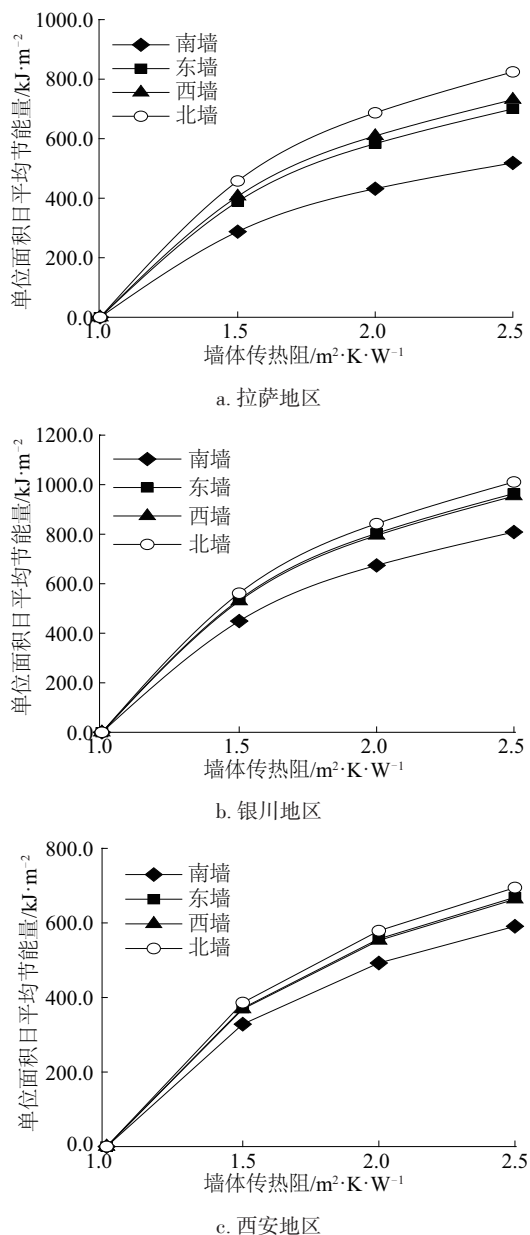


图1 单位面积外墙日平均节能量随墙体传热阻的变化

Fig. 1 Change of average daily energy saving quantity per unit area of exterior wall with increase of heat transfer resistance

表3 建筑分析模型相关参数

Table 3 Primary parameters of building analysis model

建筑朝向	建筑面积 A_0/m^2	南向窗墙面积比	东西长度/m	南北长度/m	建筑层高/m	非透明墙体面积/ m^2			墙体材料及其导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
						南墙	东/西墙	北墙	
南北	128.0	0.5	16.0	8.0	3.0	24.0	24.0	48.0	灰砂砖/1.10

2.2 朝向差异传热系数墙体的节材量分析

现行的《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》

单位面积日平均节能量最大、南墙最小、东西墙介于南北墙之间,并且不同朝向外墙间的单位面积日平均节能量差值随传热阻的增大而逐渐增大。

当墙体传热阻由 $1.0 (\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ 增至 $2.5 (\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ 时,拉萨地区北墙の日平均单位面积节能量达到 $820.8 \text{ kJ}/\text{m}^2$,南墙为 $518.4 \text{ kJ}/\text{m}^2$,北墙是南墙的 158.3%;银川地区北墙の日平均单位面积节能量达 $1010.9 \text{ kJ}/\text{m}^2$ 、南墙为 $812.2 \text{ kJ}/\text{m}^2$,北墙是南墙的 124.5%;西安地区北墙の日平均单位面积节能量达到 $691.2 \text{ kJ}/\text{m}^2$ 、南墙为 $587.5 \text{ kJ}/\text{m}^2$,北墙是南墙的 117.6%。

由此可见,太阳能建筑受太阳辐射热作用的朝向差异影响,各朝向外墙间存在不平衡失热现象,并且太阳辐射强度越高的地区,这种不平衡失热现象越明显,增大北墙传热阻所产生的节能效益也越大。

2 传热系数朝向差异化墙体热工设计与节材性分析

2.1 建筑分析模型的基础参数

根据《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824—2013)^[12]对严寒地区和寒冷地区农村居住建筑的相关规定,结合课题组对当地乡村太阳能建筑的实地调研,对太阳能建筑分析模型进行以下假设:

1)建筑为南北朝向的条形单层建筑;建筑南向开大窗,且窗、门面积占墙体面积的 50%,东西向和北向不开窗;

2)东西墙面积相等,为北墙面积的 50%;北墙面积为南墙面积的 2 倍(南墙面积是指除门窗外的非透明墙体面积)。

建筑分析模型的相关参数,见表 3。

准》(JGJ 26-2010)^[3]规定,各朝向外墙的传热系数取值相等(简称“等传热系数”法),只是在围护结构热热量计算时,通过传热系数朝向修正系数对太阳

辐射、天空辐射等所引起的传热量朝向差异加以考虑。“朝向差异传热系数”墙体热工设计方法,是在“等传热系数”法基础上发展而来的一种墙体传热系数设计方法,即在保证建筑外墙总传热失热量不变的条件下,依据墙体传热的室外侧边界条件朝向差异,使不同朝向的外墙传热系数有所差异的一种墙体热工设计方法。

采暖期内太阳能采暖建筑热平衡方程^[10]见式(3):

$$q_{cc} + q_{in} + q_H = q_{INF} + q_e \quad (3)$$

式中, q_{cc} ——折合到单位建筑面积上单位时间内由被动式集热部件获得的净得热量, W/m^2 ; q_{in} ——折合到单位建筑面积上单位时间内建筑物内部得热量, W/m^2 ; q_H ——折合到单位建筑面积上单位时间内的辅助耗热量, W/m^2 ; q_{INF} ——折合到单位建筑面积上单位时间内建筑物空气渗透耗热量, W/m^2 ; q_e ——折合到单位建筑面积单位时间内通过非透明围护结构的传热失热量, $q_e = q_r + q_g + q_{dw} + q_w$, 其中 q_r 、 q_g 、 q_{dw} 、 q_w 分别为单位建筑面积上单位时间内通过屋顶的传热失热量、通过地面的传热失热量、通过门窗的传热失热量、通过建筑外墙的传热失热量, W/m^2 , $q_w = q_{w \cdot s} + q_{w \cdot e} + q_{w \cdot w} + q_{w \cdot n}$, 其中 $q_{w \cdot s}$ 、 $q_{w \cdot e}$ 、 $q_{w \cdot w}$ 、 $q_{w \cdot n}$ 分别为单位建筑面积单位时间内通过南墙、东墙、西墙和北墙的传热失热量, W/m^2 。

令 $H = q_{cc} + q_{in} - q_{INF} - q_r - q_g - q_{dw}$, 有:

$$H + q_H = q_w = q_{w \cdot s} + q_{w \cdot e} + q_{w \cdot w} + q_{w \cdot n} \quad (4)$$

太阳能建筑的外墙采用“等传热系数”法设计^[3], 当建筑面积为 A_0 时, 由式(2)和式(4)可得:

$$H + q_H \cdot A_0 = K \cdot F_{W \cdot s} (t_i - t_{sa \cdot s}) + K \cdot F_{W \cdot e \cdot w} (t_i - t_{sa \cdot e \cdot w}) + K \cdot F_{W \cdot e \cdot w} (t_i - t_{sa \cdot w}) + K \cdot F_{W \cdot n} (t_i - t_{sa \cdot n}) \quad (5)$$

式中, K ——建筑外墙传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A_0 ——建筑面积, m^2 ; $F_{W \cdot s}$ 、 $F_{W \cdot n}$ 、 $F_{W \cdot e \cdot w}$ ——南墙、北墙、东/西墙的面积(东墙与西墙的面积相等, 见表3), m^2 ; $t_{sa \cdot s}$ 、 $t_{sa \cdot e}$ 、 $t_{sa \cdot w}$ 、 $t_{sa \cdot n}$ ——南向、东向、西向和北向室外综合温度, $^{\circ}C$ 。

由表1采暖期内不同朝向室外综合温度情况可知, 南向与北向室外综合温度相差较大, 而东向与西向室外综合温度相差较小。为简化分析过程, 取东向和西向室外综合温度平均值 $t_{sa \cdot e \cdot w}$ 作为东西向的室外综合温度值。由式(5)得式(6):

$$H + q_H \cdot A_0 = K \cdot F_{W \cdot s} (t_i - t_{sa \cdot s}) + 2K \cdot F_{W \cdot e \cdot w} (t_i - t_{sa \cdot e \cdot w}) + K \cdot F_{W \cdot n} (t_i - t_{sa \cdot n}) \quad (6)$$

当太阳能建筑的外墙采用“差异传热系数”法设计时, 由于不同朝向外墙的传热系数取值不同, 结合式(6)可得:

$$H + q_H \cdot A_0 = K_s^* \cdot F_{W \cdot s} (t_i - t_{sa \cdot s}) + 2K_{e \cdot w}^* \cdot F_{W \cdot e \cdot w} (t_i - t_{sa \cdot e \cdot w}) + K_n^* \cdot F_{W \cdot n} (t_i - t_{sa \cdot n}) \quad (7)$$

式中, K_s^* 、 K_n^* 、 $K_{e \cdot w}^*$ ——南向、北向和东/西向外墙的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

为探究太阳能建筑外墙传热系数朝向差异化设计对墙体材料用量的影响, 须明确等建筑耗热量下2类墙体传热系数之间的函数关系。将式(6)和式(7)联立, 结合表3中建筑分析模型各朝向墙体面积比, 整理可得“等传热系数”法和“差异传热系数”法下2类墙体传热系数之间的关系, 见式(8):

$$K = \frac{0.5K_s^* (t_i - t_{sa \cdot s}) + K_{e \cdot w}^* (t_i - t_{sa \cdot e \cdot w}) + K_n^* (t_i - t_{sa \cdot n})}{0.5(t_i - t_{sa \cdot s}) + (t_i - t_{sa \cdot e \cdot w}) + (t_i - t_{sa \cdot n})} \quad (8)$$

由前文分析可知, 等量增大太阳能建筑的不同朝向外墙传热阻时, 北墙所获得节能量大于南墙。因此, “差异传热系数”法是在“等传热系数”基础上适当增大北墙传热阻, 而减小南墙传热阻。由于东西墙的节能量适中, 所以当采用“差异传热系数”法设计时, 不考虑东西墙传热系数的变化, 只考虑南北墙传热系数的变化, 即:

$$K = \frac{0.5K_s^* (t_i - t_{sa \cdot s}) + K_n^* (t_i - t_{sa \cdot n})}{0.5(t_i - t_{sa \cdot s}) + (t_i - t_{sa \cdot n})} \quad (9)$$

为便于材料用量的比较分析, 假定建筑外墙仅由某一种材料构成, 而非由多种材料复合构成。墙体传热系数与墙体材料导热系数的关系^[10], 如式(10):

$$\frac{1}{K} = \frac{d}{\lambda} + R_i + R_e \quad (10)$$

式中, d ——墙体材料厚度, m ; λ ——墙体材料的导热系数, $W/(m \cdot K)$; R_i 、 R_e ——墙体内外表面换热阻, 分别取 0.11 和 0.04 ($m^2 \cdot K$)/ W ^[10]。

由式(10)可得: $d = \lambda(\frac{1}{K} - 0.15)$ 。由此可知, 采用“等传热系数”法时, 墙体材料用量 M 为:

$$M = d(F_{W \cdot s} + F_{W \cdot e} + F_{W \cdot w} + F_{W \cdot n}) = 2.5\lambda(\frac{1}{K} - 0.15)F_{W \cdot n} \quad (11)$$

采用“差异传热系数”法设计时, 由式(10)可分别算出南墙厚度 d_s 、东/西墙厚度 $d_{s \cdot w}$ 、北墙厚度 d_n 分别为: $d_s = \lambda(\frac{1}{K_s^*} - 0.15)$ 、 $d_{e \cdot w} = \lambda(\frac{1}{K_{e \cdot w}^*} - 0.15)$ 、

$d_n = \lambda(\frac{1}{K_n^*} - 0.15)$, 墙体材料用量 M^* 为:

$$\begin{aligned} M^* &= d_s F_{W \cdot s} + 2d_{e \cdot w} F_{W \cdot e \cdot w} + d_n F_{W \cdot n} \\ &= \lambda(\frac{0.5}{K_s^*} + \frac{1}{K} + \frac{1}{K_n^*} - 0.375) F_{W \cdot n} \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可得出墙体材料节材量 ΔM 的表达式, 见(13)式:

$$\Delta M = M - M^* = \lambda(\frac{1.5}{K} - \frac{0.5}{K_s^*} - \frac{1}{K_n^*}) F_{W \cdot n} \quad (13)$$

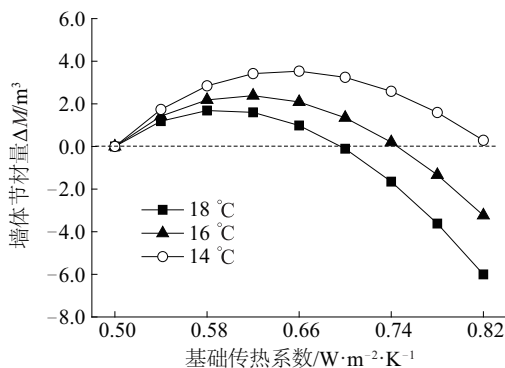
2.3 不同室内计算温度对墙体节材量影响

$$\Delta M = \lambda \frac{K_s^*(t_i - t_{sa \cdot s}) - 1.5K_s^{*2}(t_i - t_{sa \cdot s}) + 0.5K_s^*(t_i - t_{sa \cdot n}) - 0.125(t_i - t_{sa \cdot n}) - 0.25(t_i - t_{sa \cdot s})}{0.25K_s^*(t_i - t_{sa \cdot s}) - 0.5K_s^{*2}(t_i - t_{sa \cdot s}) + 0.5K_s^*(t_i - t_{sa \cdot n})} F_{W \cdot n} \quad (15)$$

由式(15)可见, 对某地区采用某种墙材的建筑而言, ΔM 主要受 t_i 和 K_s^* 影响。设 $a = (t_i - t_{sa \cdot s})$ 、 $b = (t_i - t_{sa \cdot n})$, 令 $\Delta M = f(K_s^*)$, 可得式(16)。

$$f(K_s^*) = \lambda \frac{aK_s^* - 1.5aK_s^{*2} + 0.5bK_s^* - 0.125a - 0.25b}{0.25aK_s^* - 0.5aK_s^{*2} + 0.5bK_s^*} F_{W \cdot n} \quad (16)$$

分别取采暖期室内计算温度为 18、16、14 °C, 将表 1 中拉萨、银川和西安地区的室外综合温度值及表 3 中建筑分析模型基础参数代入式(16), 可得出不同计算温度下节材量 ΔM 随基础传热系数 K_s^* 的变化规律, 如图 2 所示。由图 2 可看出, 墙体的节材量 (ΔM) 随基础传热系数 K_s^* 的增大呈先增后减的趋势, 并在基础传热系数增大到一定值后出现 $\Delta M < 0$ 情况。图 2 曲线表明, 采用“差异传热系数”法进行墙体热工设计时, 基础传热系数处于一定范围内时, 会出现 $\Delta M > 0$, 且 ΔM 存在最大值 (即 ΔM_{\max})。但同时也可看出, 室内计算温度越低, ΔM_{\max} 越大, $\Delta M > 0$ 所对应的基础传热系数 K_s^* 范围

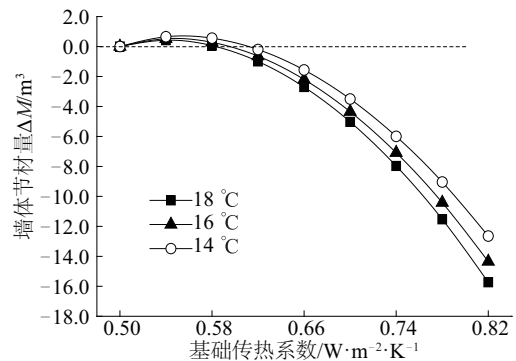


a. 拉萨地区

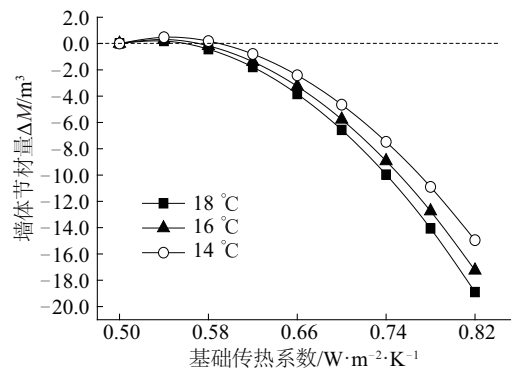
结合文献[12]中对寒冷地区农村居住建筑围护结构传热系数限值的要求, 设“等传热系数”方法中的外墙传热系数 K 为 $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。由式(9), 得出 K_s^* 与 K_n^* 的函数表达式, 如式(14):

$$K_n^* = \frac{(0.25 - 0.5K_s^*)(t_i - t_{sa \cdot s}) + 0.5(t_i - t_{sa \cdot n})}{(t_i - t_{sa \cdot n})} \quad (14)$$

设南向传热系数 K_s^* 为基础传热系数, 由式(13)和式(14)可得式(15):



b. 银川地区



c. 西安地区

图2 墙体节材量随南向基础传热系数的变化

Fig. 2 Change of wall material saving quantity with enhancement of basic heat transfer coefficients

(即 $K_{s \cdot \Delta M > 0}^*$) 也越大, 并且 $K_{s \cdot \Delta M > 0}^*$ 与 ΔM_{\max} 存在显著的地区差异。

为探究 3 个地区的建筑在不同室内计算温度下的节材性差异, 即 $K_{s \cdot \Delta M > 0}^*$ 、最大节材量 ΔM_{\max} , 对 $f(K_s^*)$ 求一阶导数, 可得式(17):

$$f'(K_s^*) = \lambda \frac{-0.125K_s^{*2}a^2 - 0.25abK_s^* + 0.125K_s^{*2}a^2 + 0.03125K_s^{*2} - 0.125ab - 0.125b^2 + 0.5abK_s^*}{(0.25aK_s^* - 0.5aK_s^{*2} + 0.5bK_s^*)^2} F_{W \cdot n} \quad (17)$$

分别令 $f(K_s^*)=0$ 和 $f'(K_s^*)=0$, 可求解出 $K_{s,\Delta M>0}^*$ 和 ΔM_{\max} 所对应的 K_s^* 值, 进而结合式(15)求解出 ΔM_{\max} 。不同室内计算温度下的 $K_{s,\Delta M>0}^*$ 、 ΔM_{\max} 见表 4。

表 4 不同室内计算温度下的节材范围及最大节材量

Table 4 Maximum values of wall material saving quantity and corresponding range of basic heat transfer coefficients at different indoor calculated temperatures			
地区	室内计算温度/℃	$K_{s,\Delta M>0}^*/W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$	$\Delta M_{\max}/m^3$
拉萨	18	0.20	1.72
	16	0.25	2.39
	14	0.33	3.54
银川	18	0.08	0.40
	16	0.10	0.53
	14	0.11	0.69
西安	18	0.06	0.22
	16	0.07	0.31
	14	0.09	0.48

由表 4 可见, 室内计算温度的取值越小, 其节材范围与 ΔM_{\max} 越大。以拉萨地区为例, 当室内计算温度从 18℃降低至 14℃时, 墙体最大节材量由 1.72 m³增加至 3.54 m³, 增加了 106%, 节材范围

从 0.20 W/(m²·K) 提高到了 0.23 W/(m²·K)。当室内计算温度取值相同时, 不同地区的节材范围与 ΔM_{\max} 存在明显差别。当室内计算温度取 14℃时, 拉萨地区的节材范围与 ΔM_{\max} 最大, 节材范围为 0.33 W/(m²·K), ΔM_{\max} 可达到 3.54 m³; 银川地区次之, 节材范围为 0.11 W/(m²·K), ΔM_{\max} 为 0.69 m³; 西安地区最小, 节材范围为 0.09 W/(m²·K), ΔM_{\max} 为 0.48 m³。由以上分析可知, 太阳辐射强度越高的地区, 采用“差异传热系数”法进行墙体热工设计时, 墙体节材潜力越大。

2.4 两种传热系数下的外墙内表面温度分析

由前文分析可知, 当采用“差异传热系数”法进行墙体设计时, 能在采暖耗热量不变的条件下, 减小墙体材料用量。但太阳能建筑的外墙采用差异传热系数时, 必然会影响到墙体的内表面温度状况。以室内计算温度为 18℃为例, 对比分析等耗热量下“等传热系数”法和“差异传热系数”法对外墙内表面温度的影响。由式(17)可知, 拉萨、银川、西安地区 ΔM_{\max} 所对应的基础传热系数分别为 0.59、0.54、0.53 W/(m²·K), 进而根据式(14)可得出北墙及东西墙的传热系数(墙体构造见表 5), 如表 6 所示,

表 5 2种传热系数下的墙体构造

Table 5 Configurations of exterior wall based on two kinds of heat transfer coefficients							
构造类型	材料层	厚度(拉萨/银川/西安)/mm	导热系数/ $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	干密度/ $kg\cdot m^{-3}$	比热 $c / kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	热阻(拉萨/银川/西安) $R/m^2\cdot K\cdot W^{-1}$	传热系数(拉萨/银川/西安) $k/W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$
等传热系数法	EPS 保温板	60	0.041	20	1.38	1.463	0.50
	灰砂砖	370	1.100	1900	1.05	0.336	
	水泥砂浆	20	0.930	1800	1.05	0.022	
差异传热系数法	南墙	EPS 保温板	48/54/56	20	1.38	1.171/1.317/1.366	0.59/0.54/0.53
		灰砂砖	370	1.100	1900	0.336	
		水泥砂浆	20	0.930	1800	0.022	
	东西墙	EPS 保温板	60	20	1.38	1.429	0.50
		灰砂砖	370	1900	1.05	0.336	
		水泥砂浆	20	0.930	1800	1.05	
	北墙	EPS 保温板	65/63/61	20	1.38	1.585/1.537/1.488	0.47/0.48/0.49
		灰砂砖	370	1900	1.05	0.336	
		水泥砂浆	20	0.930	1800	1.05	

注:材料的热工参数选自参考文献[13];内外表面换热阻分别取 0.11 和 0.04 m²·K·W⁻¹。

表 6 采暖期内 2 种外墙的内表面温度状况 (室内计算温度为 18 ℃)

Table 6 Inner surface temperatures of two exterior walls during heating period (indoor calculated temperature is 18 ℃)

地区	参数	等传热系数外墙				差异传热系数外墙			
		南墙	东墙	西墙	北墙	南墙	东墙	西墙	北墙
拉萨	各朝向外墙传热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		0.5			0.59	0.50	0.50	0.47
	内表面温度/℃	17.5	17.3	17.2	17.1	17.4	17.3	17.2	17.2
	平均辐射温度/℃		17.3				17.3		
银川	各朝向外墙传热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		0.50			0.54	0.50	0.50	0.48
	内表面温度/℃	17.1	17.0	17.0	16.9	17.1	17.0	17.0	17.0
	平均辐射温度/℃		17.0				17.0		
西安	各朝向外墙传热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		0.50			0.53	0.50	0.50	0.49
	内表面温度/℃	17.4	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3
	平均辐射温度/℃		17.3				17.3		

据此计算出采暖期内各朝向外墙的内表面平均温度^[10]。采暖期内,“等传热系数”法和“差异传热系数”法下的外墙内表面温度状况。

由表 6 可看出,在拉萨、银川、西安这 3 个地区节材量最大的情况下,2 种设计方法的外墙平均辐射温度均相同。当采用“等传热系数”法设计时,外墙内表面温度呈南向高、北向低的现象,南北墙内壁面间存在明显的不对称辐射,且太阳辐射越高的地区,这种不对称辐射现象越明显。拉萨地区南/北墙内壁面不对称辐射最为严重,约为 0.4 ℃;银川其次,约为 0.2 ℃;西安最小,约为 0.1 ℃。与“等传热系数”法相比,“差异传热系数”法设计的南向外墙内壁面温度降低,而北向内壁面温度升高,有效减小了南/北墙内壁面间存在的不对称辐射。其中,西安地区基本消除了这种不对称辐射,实现了室内均匀辐射场^[14],有效改善了室内热环境。

2.5 2 种传热系数下的外墙内表面温度波动

为能更准确地反映“等传热系数”法和“差异传热系数”法对室内热舒适的影响,根据周期性传热原理用动态谐波反应法求解外墙内壁面温度的振幅和最小值出现时间,而外墙内壁面的温度受室内外双向温度波的综合作用。

室外综合温度呈周期性变化,一般认为以 24 h 为周期。虽然通常情况下室外综合温度波并非严格的正弦或余弦波,但可通过以 24、12、8、6 h 等为周期的谐波叠加而成。依据文献[9]中的拉萨

地区气象参数,通过式(1)可计算出不同朝向的逐时室外综合温度值,然后按式(18)进行傅氏函数拟合^[15,16]。

$$t_{sa}(j\Delta\tau) = A_0 + \sum_{n=1}^4 A_n \sin(n\omega j\Delta\tau + \varphi_n) \quad (18)$$

式中, $t_{sa}(j\Delta\tau)$ ——室外综合温度函数,℃; j ——采样值的序号; $\Delta\tau$ ——时间间隔,取 1 h; A_0 ——零阶外扰,即计算周期内室外空气综合温度的平均值,℃; n ——谐波的阶数,分别取 1、2、3、4; A_n ——第 n 阶正弦波外扰的振幅; $n\omega$ ——第 n 阶正弦波外扰的频率, $n\omega = n(2\pi/T)$, 其中 T 为函数的周期,取 24 h; φ_n ——第 n 阶正弦波外扰的初相位, rad。

作用于围护结构外壁面的室外综合温度波,当其经围护结构板壁系统传递至内表面时会发生一定的延迟与衰减,并且因围护结构构造方式、材料的热工参数的不同,延迟和衰减的程度也不同。如果室外侧温度波是频率为 ω_n 、振幅为 A_{an} 、初相位为 φ_n 的正弦形温度波,则温度波经围护结构到达内壁面时所发生的延迟时间 ψ_{yn} 和衰减倍数 ν_{yn} 为^[14]:

$$\psi_{yn} = A_{rg} [B(i\omega_n)] = \arctan \left[\frac{B(i\omega_n)_{\text{Im}}}{B(i\omega_n)_{\text{Res}}} \right] \quad (19)$$

$$\nu_{yn} = \frac{A_{an}}{\Delta t_{in}} = \alpha_r |B(i\omega_n)| = \alpha_r \sqrt{[B(i\omega_n)_{\text{Res}}]^2 + [B(i\omega_n)_{\text{Im}}]^2} \quad (20)$$

室内空气温度谐波传到墙体内壁面时,只经过一个边界层的振幅衰减和相位延迟过程。如果室

内侧空气温度谐波的频率为 ω_m 、振幅 A_m 和初相位为 φ_i 的正弦温度波, 则围护结构内壁面对室内空气温度波的延迟时间 ψ_m 和衰减倍数为 ν_m 为:

$$\nu_m = \frac{A_m}{\Delta t_{in}} = \frac{|B(i\omega_m)|}{|B_0(i\omega_m)|} = \frac{\sqrt{[B(i\omega_m)_{Res}]^2 + [B(i\omega_m)_{Im}]^2}}{\sqrt{[B_0(i\omega_m)_{Res}]^2 + [B_0(i\omega_m)_{Im}]^2}} \quad (21)$$

$$\psi_m = A_{rg} \left[\frac{B(i\omega_m)}{B_0(i\omega_m)} \right] = A_{rg} [B(i\omega_m)] - A_{rg} [B_0(i\omega_m)] = \arctan \left[\frac{B(i\omega_m)_{Im}}{B(i\omega_m)_{Res}} \right] - \arctan \left[\frac{B_0(i\omega_m)_{Im}}{B_0(i\omega_m)_{Res}} \right] \quad (22)$$

由有限项傅氏级数表示的不同朝向室外综合温度波 $t_{sa,i}(\tau)$, 经过围护结构的衰减和延迟作用后, 由于减小了温度波函数的振幅且改变了原来的相位角, 因此在围护结构内壁面形成新的温度波函数, 即:

$$t_{sa,i}(\tau) = \sum_{n=1}^4 \frac{A_{an}}{\nu_{yn}} \sin(\omega_n \tau + \varphi_n - \psi_{yn}) \quad (23)$$

室内温度波在经过墙体内表面换热后, 在围护结构内壁温度内壁面形成新的温度波函数:

$$t_{if,i}(\tau) = \sum_{n=1}^4 \frac{A_m}{\nu_{zn}} \sin(\omega_m \tau + \varphi_{i,n} - \psi_{zn}) \quad (24)$$

围护结构内壁面的温度受室内外温度波的综合影响, 内壁面的温度波可由 2 个分谐波合成, 由于 2 个温度谐波的初相位不相等, 所以合成波的振幅不能由 2 个分谐波的振幅直接相加而得, 合成波的振幅和初相位角可按下文各式计算^[10]。

合成波的振幅为:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (25)$$

式中, A ——合成温度波的振幅; A_1 、 φ_1 ——室外侧谐波热作用下所引起的内壁面温度波的振幅和初相位; A_2 、 φ_2 ——室内侧谐波热作用下所引起的内壁面温度波的振幅和初相位。

合成波的初相位为:

$$\varphi = \alpha + \tan^{-1} \left(\frac{N}{M} \right) \quad (26)$$

式中, φ ——合成温度波的初相位; α 角的取值, 根据 φ 所在象限确定: $M > 0$ 且 $N > 0$, 属第一象限, α 取 0; $M < 0$ 且 $N > 0$ 时, 属第二象限, α 取 $\pi/2$; $M < 0$ 且 $N < 0$ 时, 属第三象限, α 取 π ; $M > 0$ 且

$N < 0$ 时, 属第四象限, α 取 $3\pi/2$;

$$N = A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2, M = A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2。$$

最终合成的内壁面温度波函数为:

$$\theta_i = \bar{\theta}_i + A \cdot \sin(\omega\tau - \varphi) \quad (27)$$

式中, $\bar{\theta}_i$ ——按稳态热过程计算的内壁面平均温度值。

以上分析是以 1 阶谐波为例进行的说明, 对于其他各阶谐波可按上述分析分别计算, 然后叠加即可求得任意时刻内壁面温度的 4 阶谐波函数。

以拉萨地区冬至日的各朝向外墙及屋顶的室外综合温度逐时值(见表 7)为外边界条件, 取室内计算温度为 18 °C 时, 最大节材量“ ΔM_{max} ”所对应的基础传热系数的墙体构造(见表 5), 根据式(18)~式(27)可计算出拉萨冬至日时不同朝向的外墙内壁面温度波。由于 2 种传热系数东西向墙体的传热系数相同, 外墙内壁面温度波也相同, 所以本文只分析南向和北向的墙体内壁面的温度波, 见图 3。

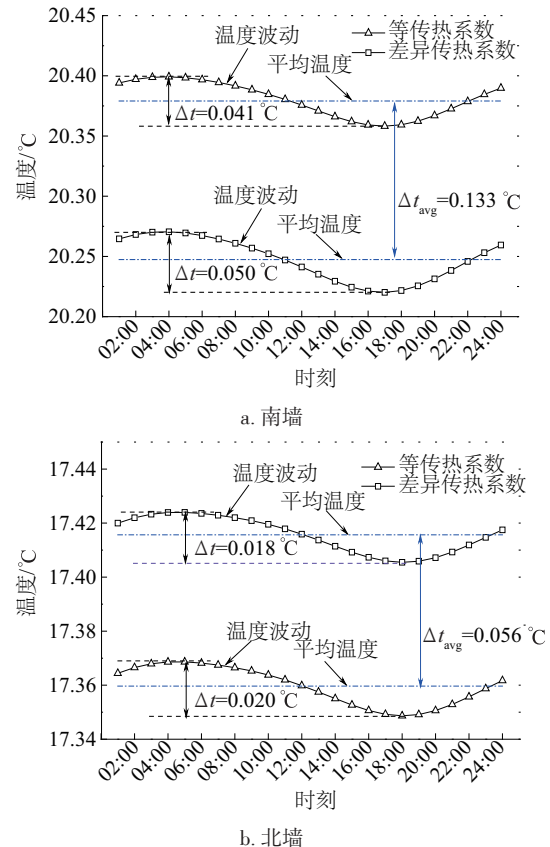


图3 外墙内壁面温度波动曲线

Fig. 3 Curves of exterior walls inner surface temperatures

由图 3 可看出, 2 种传热系数下南北墙内壁面

温度波变化趋势基本一致,均未在内壁面产生较大的温度波动,经墙体延迟与衰减作用后的室外综合温度波与室内温度谐波在墙体内壁面叠加,南墙内壁面温度波幅小于 0.05℃,北墙内壁面温度波幅小于 0.02℃;墙体内壁面温度已接近恒定状态。“等传热系

数”法南墙内壁面温度的平均值比“差异传热系数”法高 0.13℃,北墙内壁面温度的平均值比“差异传热系数”法低 0.06℃,2 种传热系数的内壁面温度值相差较小。通过上述分析可知,“差异传热系数”法在节材量最大时,并未对室内热环境产生不利影响。

表 7 冬至日逐时室外空气温度与室外综合温度

Table 7 Hourly outdoor sol-air temperatures and air temperatures in midwinter day

时刻	综合温度/℃					室外空气 温度/℃
	水平面	南向垂直壁面	东向垂直壁面	西向垂直壁面	北向垂直壁面	
01:00	-1.58	1.11	1.11	1.11	1.11	3.80
02:00	-3.01	-0.41	-0.41	-0.41	-0.41	2.20
03:00	-3.74	-1.17	-1.17	-1.17	-1.17	1.40
04:00	-4.56	-2.03	-2.03	-2.03	-2.03	0.50
05:00	-5.56	-3.08	-3.08	-3.08	-3.08	-0.60
06:00	-6.07	-3.64	-3.64	-3.64	-3.64	-1.20
07:00	-5.94	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-1.10
08:00	-5.45	-3.03	-3.03	-3.03	-3.03	-0.60
09:00	-5.16	-2.73	-2.73	-2.73	-2.73	-0.30
10:00	0.26	6.67	9.06	-0.65	-0.65	0.20
11:00	6.03	12.85	11.71	1.35	1.35	1.10
12:00	11.07	16.78	11.34	3.88	3.88	2.70
13:00	13.88	17.74	9.55	6.54	6.54	4.50
14:00	14.50	17.27	8.01	8.18	8.01	5.60
15:00	12.95	15.30	7.91	10.31	7.91	5.70
16:00	9.35	11.55	6.55	9.80	6.55	5.10
17:00	5.12	7.63	4.54	7.63	4.54	4.40
18:00	0.93	3.58	2.52	4.04	2.52	4.00
19:00	-1.86	0.77	0.77	0.77	0.77	3.40
20:00	-2.97	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	2.20
21:00	-4.63	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	0.40
22:00	-5.85	-3.37	-3.37	-3.37	-3.37	-0.90
23:00	-6.60	-4.15	-4.15	-4.15	-4.15	-1.70
24:00	-7.39	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-2.60

3 结 论

1)通过对拉萨、银川及西安地区的太阳辐射强度及不同朝向室外综合温度差异的分析可知,太阳辐射强度越高的地区,不同朝向室外综合温度的差异性越大。各朝向外墙间存在不平衡失热现象,并

且太阳辐射强度越高的地区,这种不平衡失热现象越明显,增大北墙传热阻所产生的节能效益也越大。

2)采用“差异传热系数”法进行墙体热工设计时,基础传热系数处于一定范围内,会出现 $\Delta M > 0$ 的情况,且 ΔM 存在最大值。

3)当室内计算温度取值相同时,不同地区之间的 ΔM_{\max} 与 $K_{s,\Delta M>0}^*$ 存在明显差别,其中拉萨地区最大、银川次之、西安最小。此外,室内计算温度对 ΔM_{\max} 和 $K_{s,\Delta M>0}^*$ 均有影响,室内计算温度越低, ΔM_{\max} 和 $K_{s,\Delta M>0}^*$ 则越大。

4)传热系数朝向差异节能墙体设计,不会对室内热环境产生不利影响。

[参考文献]

- [1] JGJ/T 229—2010, 民用建筑绿色设计规范[S].
- [1] JGJ/T 229—2010, Code for green of civil buildings[S].
- [2] 李元哲. 被动式太阳房热工设计手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [2] Li Yuanzhe. Design manual of passive solar building [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [3] JGJ 26—2010, 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S].
- [3] JGJ 26—2010, Design standard for energy efficiency of residential buildings in severe cold and cold zones[S].
- [4] 桑国臣. 西藏高原低能耗居住建筑构造体系研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [4] Sang Guochen. Study on construction system of low energy consumption residential building in Tibet Plateau [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2009.
- [5] 黄德中, 沈吉宝. 建筑节能技术综述[J]. 太阳能学报, 2007, 28(6): 682—688.
- [5] Huang Dezhong, Shen Jibao. The energy saving of buildings [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28 (6): 682—688.
- [6] 桑国臣, 韩艳, 朱轶韵, 等. 自然运行下乡村太阳能建筑热工参数对室内空气温度的影响[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 30—34.
- [6] Sang Guochen, Han Yan, Zhu Yiyun, et al. Effect of thermal parameters of rural solar building on indoor air temperature under natural operating conditions[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32 (1): 30—34.
- [7] 桑国臣, 刘加平. 太阳能富集地区采暖居住建筑节能构造研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 416—422.
- [7] Sang Guochen, Liu Jiaping. Study of energy efficiency envelope configuration of heating residential buildings in Solar radiation zone [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(3): 416—422.
- [8] 杨善勤. 民用建筑节能设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [8] Yan Shanqin. Energy conservation design handbook for civil buildings[M]. Beijing: Chinese Building Industrial Press, 2004.
- [9] 张晴原, Joe Huang. 中国建筑用标准气象数据库[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] Zhang Qingyuan, Joe Huang. Chinese standard weather databank for buildings [M]. Beijing: Machine Industry Press, 2004.
- [10] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [10] Liu Jiaping. Building physics [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2000.
- [11] 朱新荣, 杨柳, 刘加平, 等. 西藏自治区城市围护结构传热系数的修正系数[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(9): 1381—1384.
- [11] Zhu Xinrong, Yang Liu, Liu Jiaping, et al. Correction factor for heat transfer coefficient of city building envelope in Tibet autonomous region [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48 (9): 1381—1384.
- [12] GB/T 50824—2013, 农村居住建筑节能设计标准[S].
- [12] GB/T 50824—2013, Design standard for energy efficiency of rural residential buildings[S].
- [13] GB 50176—2016, 民用建筑热工设计规范[S].
- [13] GB 50176—2016, Thermal design criterion for residential buildings[S].
- [14] 朱轶韵, 刘艳峰, 刘加平. 基于室内均匀辐射场的西北农村节能建筑热工设计[J]. 太阳能学报, 2011, 32(7): 1034—1038.
- [14] Zhu Yiyun, Liu Yanfeng, Liu Jiaping. Thermal design of energy saving buildings in rural areas of northwest under the indoor uniform radiation filed [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(7): 1034—1038.
- [15] 桑国臣, 朱轶韵, 刘加平, 等. 拉萨地区节能墙体对室外综合温度扰量的频率响应[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(2): 177—184.
- [15] Sang Guochen, Zhu Yiyun, Liu Jiaping, et al. Energy-saving wall's frequency response to outdoor solar air temperature under the climate of Lhasa area [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(2): 177—184.
- [16] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [16] Yan Qisen, Zhao Qingzhu. Thermal process of building [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986.

STUDY ON DIFFERENCE OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN DIFFERENT FACING ORIENTATION EXTERIOR WALL OF SOLAR BUILDING

Sang Guochen, Fang Qian, Wang Wenkang, Zhu Yiyun, Zhao Qin, Cui Xiaoling

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Combined with the significant difference of outdoor thermal action orientation of solar buildings, the daily average heat loss per unit area of different facing orientation external walls is analyzed, and a thermal design method for solar building walls with different heat transfer coefficients in different facing orientations is proposed. The building analysis model is used to establish the relationship between the quantity of saved wall material and the basic heat transfer coefficient and the indoor calculated temperature. The wall material saving characteristics of solar buildings in Lhasa, Yinchuan and Xi'an, and the dynamic change law of internal wall face temperature under different facing orientation design of heat transfer coefficient are comparative analyzed, respectively. The results show that using the different facing orientation design of wall heat transfer coefficient can reduce wall material usage, and the higher the solar radiation intensity, the more obvious the material saving is, the method will not adversely affect the indoor thermal environment.

Keywords: passive solar building; solar energy; energy saving; heat transfer coefficients; building materials