

拉萨民居围护结构热工性能的新型评价参数的建立

赵 群¹, 谢一建², 李峥嵘²

(1. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 拉萨地区冬季寒冷, 但太阳能资源丰富, 在改善当地冬季室内热环境的技术分析中, 减少当地室内热量损失和增强墙体太阳能热利用对围护结构的保温与蓄热性能产生了不同的需求. 为平衡这种需求, 使得围护结构对室内热环境改善效果达到最佳, 对围护结构蓄热与传热性能的相对强弱及其对围护结构室内侧导热量的影响进行研究. 首先运用拉普拉斯变换法, 得到集墙体厚度、材料导热系数及体积热容为一体的评价围护结构蓄热性能与传热性能相对强弱的 RSHST 数, 然后运用 Energyplus 模拟分析拉萨地区一定保温性能墙体的不同 RSHST 值对冬季围护结构内壁面导热量和壁面温度的影响, 最后以夜间内壁面平均温度及夜间内壁面单位面积导热热量大小为指标, 得到当地围护结构 RSHST 的设计推荐值.

关键词: 拉萨; 围护结构; 太阳能热利用; 传热蓄热

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0876-11

Establishment of new evaluation parameters for thermal performance of Lhasa residential building envelope structure

ZHAO Qun¹, XIE Yijian², LI Zhengrong²

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The Lhasa area is cold in winter, but solar energy resources are abundant. In the technical analysis of improving the local indoor thermal environment in winter, reducing the local indoor heat loss and enhancing the wall solar heat utilization have produced different requirements for the insulation and heat storage performance of the envelope structure. In order to balance this demand and make the envelope structure achieve the best improvement effect on the indoor thermal environment, this paper studies the relative strength of the envelope structure's heat storage and heat transfer performance and its influence on the indoor heat conduction of the envelope structure. First, by using the Laplace transform method, the RSHST number of wall thickness, material thermal conductivity and volume heat capacity is obtained to evaluate the relative strength of heat storage performance and heat transfer performance of envelope structure. Then Energy plus simulation is used to analyze the effect of different RSHST values on the thermal conduction and wall temperature of the inner wall of the enclosure structure in Lhasa in winter. Finally, the average temperature of the inner wall at night and the heat conduction per unit area of the inner wall at night are used as indicators to obtain the local enclosure structure RST The design recommendation value.

Key words: Lhasa area; enclosure structure; solar thermal utilization; heat transfer and storage

围护结构作为建筑室内外热环境交换的媒介, 其保温性能通过控制室内热量的散失或流入、蓄热性能通过蓄存热量对室内热环境产生影响. 研究表明围护结构的保温性能改造有助于长时间保持室内在冬季和夏季的舒适, 降低建筑能耗最高达 80%^[1-8]. 蓄热性能通过“移峰填谷”作用能够有效抵御室外温度的剧烈变化, 调节室内热环境,

夏季能够节约空调用电量 8% 左右, 冬季可以减少供热量达 43%^[9-15].

对于属于寒冷地区的拉萨, 昼夜温差大, 其传统民居围护结构呈现出与内地建筑围护结构不同的特点: 厚度大, 约 500~800 mm; 采用重质材料如黏土、石块等. 这种特点使得其具有良好的保温性能, 另一方面, 在藏区太阳能资源丰富、

收稿日期: 2021-07-11

修改稿日期: 2021-11-10

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题项目(2017YFC0702400)

第一作者: 赵 群(1975—), 女, 副教授, 主要从事被动式建筑技术设计研究. E-mail: qunzhao@126.com

通信作者: 谢一建(1993—), 男, 硕士生, 主要从事围护结构热工性能研究. E-mail: xie_ljian@126.com

昼夜温差大的气候条件下,这种构造特点也使得围护结构具有良好的蓄热性能,从而维持稳定的室内热环境。但传统民居围护结构的做法仍然有局限性,为了进一步提高室内温度及维持室内温度的稳定,有必要加强围护结构的保温和蓄热性能设计。目前的设计思路是以提升保温性能为主,通过构造保温复合墙体来提高围护结构热阻,实现保温改造^[16-18];蓄热性能的优化是作为辅助手段,以维持室内温度的稳定为目标,给出热惰性指标推荐值或是提出具体墙体构造建议^[16,18-20]。另一方面,当地强太阳辐射的气候条件也成为围护结构热工设计时考虑的因素之一,桑国臣等考虑到建筑不同朝向受太阳辐射影响的不同,提出了非平衡保温的概念,在保温成本一定的条件下,理论上非平衡保温能够达到对室内热环境的最佳改善效果^[21-23]。可以看出,即使在考虑了太阳辐射的条件下,当地围护结构的热工设计的仍侧重于保温性能,蓄热性能则以维持室内温度的稳定为目的。但围护结构特别是墙体作为建筑的主体,具有较大的蓄热容量,从蓄热载体的角度探讨其对室内热环境的影响也具有一定的意义。

在现有的围护结构热工性能研究中,墙体材料基本热工性能参数:导热系数 λ 、密度 ρ 、比热容 c 和墙体的厚度构成了评价墙体热工性能的两类参数: $R=d/\lambda$ 热阻,用于评价墙体的保温性能; $S=\sqrt{\omega_n\lambda\rho c}$ 墙体蓄热系数或 $D=RS=\sqrt{\omega_n\rho c d^2/\lambda}$ 墙体热惰性指标,用于评价墙体的蓄热性能。对于热阻,它可以反映墙体阻止室内热量流失或流入的能力,在关注墙体的蓄热载体作用时,仍然可以作为评价参数。对于蓄热性能的两种参数,除了与墙体材料的热工性能参数有关,也与外扰变化的周期有关,体现了对外扰变化的响应能力。但从蓄热载体的角度,应着重考虑其蓄热容量的大小,另一方面,墙体能够发挥多少蓄热能力,也与能够进入墙体热量的多少有关,即受墙体传热性能的影响。相关研究表明,保温性能对蓄热性能的作用过程产生影响^[24-26],并且二者之间存在一个最佳组合使得对室内热环境的改善效果达到最佳,建筑能耗也能达到最低^[27-29]。但这些研究多是从材料的基本热工性能参数的角度讨论各参数之间的影响,而没有涉及围护结构保温与蓄热性能之间的相互影响和权衡问题。

综上所述,在拉萨地区,只从室内“维稳”的角度研究围护结构的蓄热性能存在一定的局限性,

也可以从蓄热载体的角度出发,在这种情形下,需要探讨保温性能对蓄热性能的影响。本文结合现有的研究基础与实际背景,提出一种表征单层墙体蓄热与传热性能相对强弱的参数 RSHST,并通过模拟案例说明在拉萨地区的气候条件下,南向墙体 RSHST 数对室内热环境的影响。

1 围护结构传热过程模型

由于围护结构高度 h 与厚度 δ 之比大于10,因此可将其壁体传热过程视为一维非稳态导热过程^[30],假设围护结构为均质墙体,其传热与蓄热过程如图1所示。

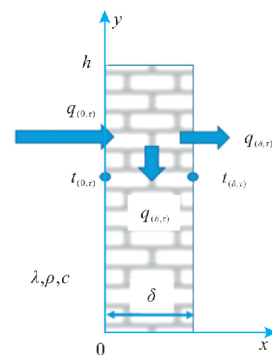


图1 围护结构传热与蓄热过程

Fig. 1 Heat transfer and heat storage process of enclosure structure

壁体的导热微分方程^[31]:

$$\rho c \frac{\partial t_{(x,\tau)}}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t_{(x,\tau)}}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: λ 为壁体材料导热系数, $W/(m \cdot K)$; ρ 为壁体材料密度, kg/m^3 ; c 为壁体材料比热容, $J/(kg \cdot K)$ 。

边界条件与初始条件:

$$t_{(x,\tau)} \big|_{x=0} = t_{(0,\tau)} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$t_{(x,\tau)} \big|_{x=\delta} = t_{(\delta,\tau)} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$t_{(x,\tau)} \big|_{\tau=0} = t_{(x,0)} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

式中, δ 为壁体厚度, m。

壁面导热热量及壁体蓄热量:

导热热量计算式为

$$q_{(x,\tau)} = -\lambda \frac{\partial t_{(x,\tau)}}{\partial x} \text{ } W/m^2 \quad (5)$$

外壁面导热热量为

$$q_{(0,\tau)} = -\lambda \frac{\partial t_{(x,\tau)}}{\partial x} \bigg|_{x=0} \text{ } W/m^2 \quad (6)$$

内壁面导热热量为

$$q_{(\delta,\tau)} = -\lambda \frac{\partial t_{(x,\tau)}}{\partial x} \bigg|_{x=\delta} \text{ } W/m^2 \quad (7)$$

壁体蓄热量:根据能量守恒,有

$$q_{(b,\tau)} = |q_{(0,\tau)} - q_{(\delta,\tau)}| \text{ } W/m^2 \quad (8)$$

2 围护结构热工性能对传热过程的影响分析

现假设围护结构的热流传递过程为室外侧传向室内侧, 由于围护结构非稳态传热特征, 进入壁体的热量即外壁面导热量 $q_{(0,\tau)}$ 沿途不断地被吸收而使壁体温度升高, 壁体吸收的热量为 $q_{(b,\tau)}$, 最终到达内壁面的热量即内壁面导热量为 $q_{(\delta,\tau)}$, 导致外壁面吸收的热量不能立即、完全地传入室内, 而是部分蓄存在壁体内, 逐渐地传向室内或室外。

三种热量 $q_{(0,\tau)}$ 、 $q_{(b,\tau)}$ 、 $q_{(\delta,\tau)}$ 的大小, 主要受围护结构保温性能与蓄热性能的影响。壁体导热系数 λ 越大, 在相同的温度梯度下可以传导更多的热量, $q_{(0,\tau)}$ 也越大; 而壁体的体积热容 ρc 越大, 温度上升 1°C 所吸收的热量越大, 即 $q_{(b,\tau)}$ 越大, 则到达内壁面的热量 $q_{(\delta,\tau)}$ 就越小^[32]。因此, 当保温性能优异时, $q_{(0,\tau)}$ 数值较小, 当蓄热性能优异时, 壁体的蓄热量 $q_{(b,\tau)}$ 较大, 则 $q_{(\delta,\tau)}$ 较小。

如图2所示, 为保温性能与蓄热性能对上述三种热量大小影响的定性表示。可以看出, 低保温能使白天围护结构吸收更多的热量 $q_{(0,\tau)}$, 而蓄热性能使得这些热量的一部分 $q_{(b,\tau)}$ 蓄存在壁体内, 一部分 $q_{(\delta,\tau)}$ 传向室内; 在夜间, 蓄存在壁体内的热量, 同时向室内侧和室外侧放热。图2中所示的 $q_{(\delta,\tau)}$ 为白天室内侧放热量, 与 $q_{(0,\tau)}$ 、 $q_{(b,\tau)}$ 同时发生, 而在以改善夜间室内热环境为目标条件下, 夜间放热量 $q_{(\delta,\tau)}$ 是需要关注的重点。此时的 $q_{(\delta,\tau)}$ 不仅与围护结构的保温性能有关, 也与白天的 $q_{(b,\tau)}$ 有关, 而 $q_{(b,\tau)}$ 又与白天的 $q_{(0,\tau)}$ 有关。因此, $q_{(\delta,\tau)}$ 主要受围护结构的保温与蓄热性能影响, 而保温对蓄热性能也产生影响。

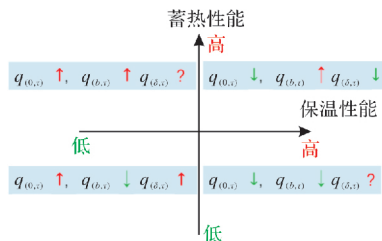


图2 围护结构热工性能参数对热量影响

Fig. 2 Effect of thermal performance parameters of enclosure structure on heat

3 RSHST 数的推导

为解决围护结构太阳能热利用与室内热量损

失对围护结构热工性能产生的不同需求的问题, 寻求围护结构保温与蓄热性能之间的平衡, 本文试图提出一种评价围护结构蓄热性能与传热性能相对强弱的参数, 该参数是围护结构本身的属性, 只与围护结构本身的热工性能参数及尺寸有关, 而与外界条件无关。

基于此目标, 可以从直观反映两者大小的三种热量出发, 找到三种热量与围护结构参数之间的关系, 而式(1)~(7)是围护结构传热过程的微分形式的表达, 需要对其进行求解。本文运用拉普拉斯变化法进行求解, 得到单层平壁结构非稳定传热的传递矩阵^[31]。

对边界条件及初始条件作如下假设:

(1) 零时刻整个墙体的温度保持为 $k^\circ\text{C}$, 即式(4)为 $t_{(x,0)} = k^\circ\text{C}$;

(2) 外侧壁面温度 $t_{(0,\tau)}$ 随时间变化, 壁体温度 $t_{(x,\tau)}$ 随之变化, 而内侧壁面温度保持不变为 $t_{(\delta,\tau)} = k^\circ\text{C}$ 。

引入新的变量 $\theta_{(x,\tau)} = t_{(x,\tau)} - t_{(x,0)}$, 为 $t_{(x,\tau)}$ 相对于起始温度的变化量, 则式(1)~(8)可改写为

$$\rho c \frac{\partial \theta_{(x,\tau)}}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 \theta_{(x,\tau)}}{\partial x^2} \quad (9)$$

$$\theta_{(x,\tau)} \big|_{x=0} = \theta_{(0,\tau)}^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$\theta_{(x,\tau)} \big|_{x=\delta} = \theta_{(\delta,\tau)} = 0^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$\theta_{(x,\tau)} \big|_{\tau=0} = \theta_{(x,0)} = 0^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$q_{(x,\tau)} = -\lambda \frac{\partial \theta_{(x,\tau)}}{\partial x} \text{ W/m}^2 \quad (13)$$

$$q_{(0,\tau)} = -\lambda \frac{\partial \theta_{(x,\tau)}}{\partial x} \bigg|_{x=0} \text{ W/m}^2 \quad (14)$$

$$q_{(\delta,\tau)} = -\lambda \frac{\partial \theta_{(x,\tau)}}{\partial x} \bigg|_{x=\delta} \text{ W/m}^2 \quad (15)$$

$$q_{(b,\tau)} = \sum_{i=1}^n \rho c \frac{\partial \theta_{(i,\tau)}}{\partial \tau} d\delta \text{ W/m}^2 \quad (16)$$

对式(9)和式(13)进行拉普拉斯变换求解得到单层平壁结构非稳定传热的代数表达式^[31]:

$$\Theta_{(x,s)} = ch \left(\sqrt{\frac{s}{a}} x \right) \Theta_{(0,s)} - \frac{1}{\lambda \sqrt{\frac{s}{a}}} sh \left(\sqrt{\frac{s}{a}} x \right) Q_{(0,s)} \quad (17)$$

$$Q_{(x,s)} = -\lambda \sqrt{\frac{s}{a}} sh \left(\sqrt{\frac{s}{a}} x \right) \Theta_{(0,s)} + ch \left(\sqrt{\frac{s}{a}} x \right) Q_{(0,s)} \quad (18)$$

根据上述两式, 只要已知边界条件 $\theta_{(0,\tau)}$ 和 $q_{(0,\tau)}$ 就可通过拉氏变换求得单层平壁任意部位的温度和热流的拉氏变换, 再对 $\Theta_{(x,s)}$ 和 $Q_{(x,s)}$ 进行拉氏逆变换, 即能求得最终解。

当 $x=\delta$ 时,有

$$\Theta_{(\delta,s)} = ch\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\delta\right)\Theta_{(0,s)} - \frac{1}{\lambda\sqrt{\frac{s}{a}}}sh\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\delta\right)Q_{(0,s)} \quad (19)$$

$$Q_{(\delta,s)} = -\lambda\sqrt{\frac{s}{a}}sh\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\delta\right)\Theta_{(0,s)} + ch\left(\sqrt{\frac{s}{a}}\delta\right)Q_{(0,s)} \quad (20)$$

因为 $\theta_{(\delta,\tau)} = 0$ °C, 所以 $\Theta_{(\delta,s)} = 0$, 代入式(19), 再联合式(20)得到内外壁面热流拉氏变换的关系式为

$$Q_{(\delta,s)} = \frac{1}{ch\left(\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}\sqrt{s}\right)}Q_{(0,s)} \quad (21)$$

式(21)右边分母项中 $\sqrt{s} = \sqrt{\sigma + j\omega}$ 是与边界条件及拉氏变换中的衰减函数有关, 其中 σ 为拉氏变换中引入的衰减系数, $\sigma \geq 0$, ω 为频率, $\omega \geq 0$, j 为虚数单位. 分母项中 $\sqrt{\delta^2/a}$ 只与围护结构本身的热工参数及厚度有关, 现分析它的组成:

$\frac{\delta^2}{a} = \frac{\rho c \delta^2}{\lambda} = \frac{\rho c \delta}{\lambda/\delta}$, $\rho c \delta$ 体现厚度为 δ 的单位面积墙体的蓄热能力; λ/δ 体现该墙体的传热性能.

$Q_{(0,s)}$ 根据边界条件可以确定, $Q_{(\delta,s)}$ 与 $\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}$ 及 \sqrt{s} 有关, 所以现根据双曲余弦函数的图像(图3), 讨论不同 s 值条件下, $\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}$ 对内壁面热流 $Q_{(\delta,s)}$ 的影响.

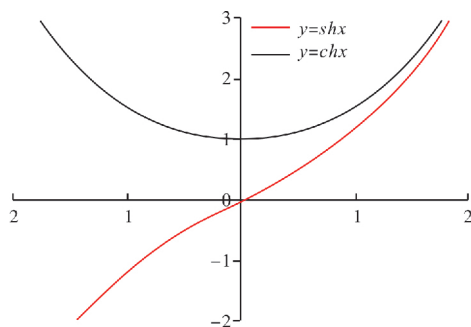


图3 双曲函数图像

Fig.3 Hyperbolic function image

(1) 当 s 为正实数时, $Q_{(\delta,s)}$ 随 $\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}$ 的增大而减小, 则墙体蓄热量增大;

(2) 当 s 等于零时, $Q_{(\delta,s)} = Q_{(0,s)}$, 墙体蓄热量为 0, 即为稳态导热过程, $Q_{(\delta,s)}$ 与传热性能 $\frac{\lambda}{\delta}$ 有关, 而与蓄热性能无关;

(3) 当 s 为负实数时, 即 $\sigma < 0$, 无意义;

(4) 当 s 为复数时, 即 $s = \sigma + j\omega$, $\sigma \omega \neq 0$, $\sqrt{s} =$

$r_1 + jr_2$, 根据双曲函数两角和差公式及 $ch(jx) = \cos x$, $sh(jx) = -\sin x$, 可得

$$ch\left(\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}\sqrt{s}\right) = ch(kr_1)\cos(kr_2) - sh(kr_1)\sin(kr_2) \quad (22)$$

式中: $k = \sqrt{\frac{\delta^2}{a}}$, $r_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2} + \sigma}{2}}$, $r_2 = \sqrt{\frac{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2} - \sigma}{2}}$, 或 $r_1 = -\sqrt{\frac{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2} + \sigma}{2}}$, $r_2 = -\sqrt{\frac{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2} - \sigma}{2}}$, 由于双曲函数及三角函数的奇偶性, r_1 与 r_2 的正负并不影响 $ch\left(\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}\sqrt{s}\right)$ 的结果.

因此, $Q_{(\delta,s)}$ 随 $\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}$ 的变化关系视具体的 s 而定, 而

当 s 确定时, $Q_{(\delta,s)}$ 随 $\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}$ 的变化关系确定, 墙体蓄热量也可随之确定.

综上所述, 在非稳态传热条件下, $\sqrt{\frac{\delta^2}{a}}$ 对墙体蓄热量与传热量的分配产生影响, 因此可以作为评价围护结构蓄热性能与传热性能的相对强弱的综合参数, 记为 RSHST 数 (the Relative Strength of Heat Storage and Transfer).

4 RSHST 数的应用

在实际应用中, 要讨论 RSHST 数对室内热环境的影响, 要做以下说明:

(1) RSHST 数是反映一个相对强弱的关系, 当 RSHST 数一定时, 墙体蓄存热量还与墙体传热性能即 λ/δ 有关, 因此需要讨论在一定传热性能下, 二者相对强弱对室内热环境的影响;

(2) 推导过程中 RSHST 数影响三类热量在同一时刻下的分配关系, 但在实际问题中, 需要将蓄存的热量在理想时段内释放到室内, 而蓄热性能同时影响热量释放的延迟时间, 因此蓄热性能并不是越高越好.

综上所述, 在不同的传热性能条件下, 为达到增强昼间围护结构的太阳能热利用及减少夜间室内热量散失的双重目标, RSHST 数存在一个最佳值, 这是围护结构保温性能与蓄热性能的一种平衡状态.

本节通过案例说明 RSHST 数的实际应用: 运用 Energy plus 模拟拉萨地区不同 RSHST 数的围护结构对室内热环境的影响, 得到对夜间室内

热环境改善效果最佳时的 $RSHST$ 值.

4.1 建筑模型信息

根据笔者在拉萨地区传统民居实地调研的结果,当地实际房间一般坐北朝南,约 87% 的房间朝向在南偏东 5° 至南偏西 5° ,南向房间窗墙面积比较大,一般在 0.35~0.5 之间.本文根据当地某实际调研的建筑,从该民居建筑中提取出一个房间,确定房间尺寸,建立一简易建筑模型,该模型为单体房间.根据调研结果,确定朝向为正南,窗墙面积比为 0.4,具体尺寸如图 4 所示.

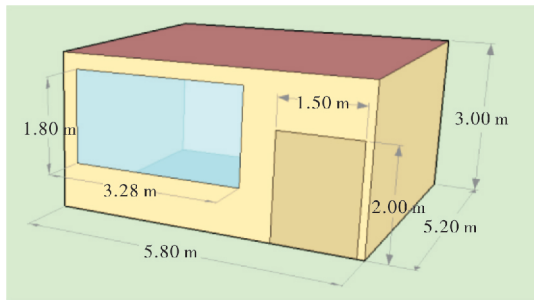


图 4 建筑模型
Fig. 4 Building model

表 1 模拟建筑围护结构基本参数表

Tab. 1 Basic parameters of simulated building envelope

朝向	构造及尺寸(由室内侧至室外侧)	传热系数/ $[W \cdot (m^2 K)^{-1}]$	热阻/ $(m^2 K \cdot W^{-1})$	热惰性指标
东、西、北墙	碎石混凝土 300 mm+EPS 保温板 40 mm	0.63	1.59	3.28
屋顶	碎石混凝土 200 mm+EPS 保温板 40 mm	0.65	1.53	2.41
南墙	见 4.3 节			

4.2 室外气象参数

选择拉萨地区冬至日气象数据作为气象条件,室外温度变化与太阳辐射变化如图 5、图 6 所示.

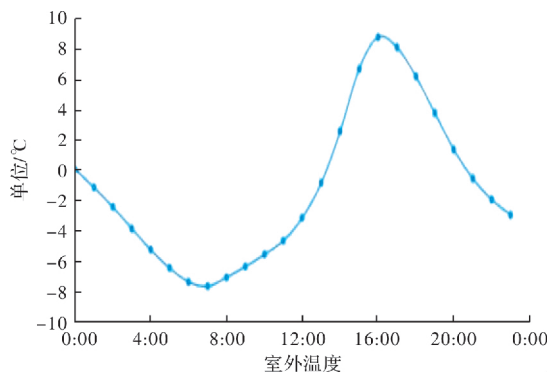


图 5 室外逐时温度
Fig. 5 Outdoor hourly temperature

4.3 南向墙体 $RSHST$ 值设置

根据当地实际建筑情况,参考文献[33],选择不同的导热系数、密度、比热容及厚度组合形式,并且为了验证 $RSHST$ 数的可靠性,说明当

因为本文重点研究非透明围护结构的传热与蓄热过程对室内热环境的影响,以受太阳辐射影响较大的南向墙体为例进行研究,考虑到南墙为研究对象,其他朝向围护结构采用控制变量的方法,其参数设定的说明如下:在原建筑中,该房间顶面和其他各向墙体的相邻空间均为室内环境,热量散失小于通过外墙的热损失,而在模型中均为外墙,因此墙体采用了保温措施,使其失热量与实际环境的内墙尽量保持相近.南墙参数的设定说明:南墙不是设置成具体的墙体,而是基于实际墙体的热工性能参数及其取值范围,改变导热率、密度、比热容、厚度等参数的大小,主要探讨 $RSHST$ 数的变化对室内热环境的影响.

为简化模拟过程,特作如下简化设置:

- (1)为减少其他朝向墙体及屋顶的影响,保持其热工性能参数及厚度不变;
- (2)为减少透明围护结构影响,保持窗墙比及窗户热工性能参数不变;
- (3)换气次数设为 0.5/h;

各朝向围护结构热工性能参数如表 1 所示,南墙为单层墙体.

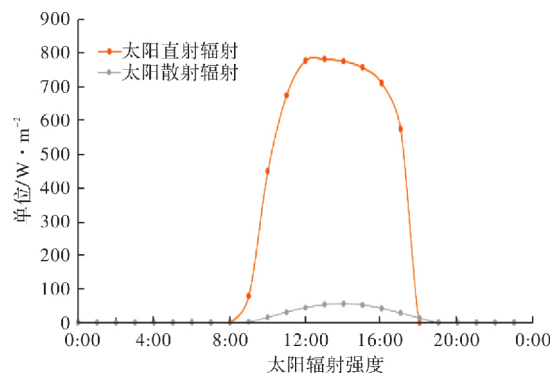


图 6 室外逐时太阳辐射强度
Fig. 6 Outdoor hourly solar radiation intensity

λ/δ 及 $RSHST$ 数一定时,改变其中基本参数对室内热环境的影响不变,设置 ω_0 系列作为验证组,如表 2 所示;实验组分别对 λ/δ 为 1.1、4.0 时的 $RSHST$ 数对室内热环境的影响进行模拟,共 20 组,如表 3、表 4 所示,这两种 λ/δ 数值是分别根据当地常见的两种墙体(黏土墙、花岗岩墙体)进行确定.

表 2 验证组墙体基本参数表
Tab. 2 Basic parameters of verification group wall

墙体编号	λ/δ	厚度/m	导热系数/ $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	比热容/ $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	<i>RSBST</i>
$w0, 1$	4.0	0.325	1.3	1 081	820	268.4
$w0, 2$	4.0	0.5	2	703	820	268.4
$w0, 3$	4.0	0.5	2	1 081	533	268.4
$w0, 4$	4.0	0.5	2	872	661	268.4
$w0, 5$	4.0	0.125	0.5	2 810	820	268.3
$w0, 6$	4.0	0.125	0.5	1 081	2 132	268.4
$w0, 7$	4.0	0.125	0.5	1 743	1 322	268.3
$w0, 8$	1.5	0.325	0.5	416	820	268.4
$w0, 9$	1.5	0.325	0.5	1 081	315.5	268.4
$w0, 10$	1.5	0.325	0.5	671	508	268.3
$w0, 11$	1.5	0.845	1.3	160	820	268.4
$w0, 12$	1.5	0.845	1.3	1 081	121.4	268.5
$w0, 13$	1.5	0.845	1.3	416	315.5	268.5
$w0, 14$	1.1	0.45	0.5	217	820	268.5
$w0, 15$	1.1	0.45	0.5	1 081	164.6	268.4
$w0, 16$	1.1	0.45	0.5	484	367.5	268.4
$w0, 17$	6.2	0.325	2	1 664	820	268.4
$w0, 18$	6.2	0.325	2	1 081	1262	268.4
$w0, 19$	6.2	0.325	2	1 341	1017	268.4
$w0, 20$	6.2	0.211	1.3	2 564	820	268.3
$w0, 21$	6.2	0.211	1.3	1 081	1 945	268.3
$w0, 22$	6.2	0.211	1.3	1 665	1 263	268.4
$w0, 23$	7.3	0.275	2	2 322	820	268.3
$w0, 24$	7.3	0.275	2	1 081	1 762	268.4
$w0, 25$	7.3	0.275	2	1 584	1 202	268.3

表 3 实验组 $\lambda/\delta=1.1$ 墙体基本参数表
Tab. 3 Basic wall parameters of experimental group $\lambda/\delta=1.1$

墙体编号	λ/δ	厚度/m	导热系数/ $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	比热容/ $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	<i>RSBST</i>
$w1$	1.1	0.45	0.5	217	410	189.8
$w2$	1.1	0.45	0.5	217	820	268.5
$w3$	1.1	0.45	0.5	325.3	820	328.7
$w4$	1.1	0.45	0.5	434	820	379.6
$w5$	1.1	0.45	0.5	542	820	424.3
$w6$	1.1	0.45	0.5	650.5	820	464.8
$w7$	1.1	0.45	0.5	650.5	957	502.1
$w8$	1.1	0.45	0.5	650.5	1 094	536.9
$w9$	1.1	0.45	0.5	650.5	1 230	569.3
$w10$	1.1	0.45	0.5	485	1 833	600.0

表 4 实验组 $\lambda/\delta=4.0$ 墙体基本参数表

Tab. 4 Basic wall parameters of experimental group $\lambda/\delta=4.0$

墙体编号	λ/δ	厚度/m	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/[J(kg·K) ⁻¹]	RSHST
w1	4.0	0.325	1.3	540.5	820	189.8
w2	4.0	0.325	1.3	1 081	820	268.4
w3	4.0	0.325	1.3	1 621.5	820	328.7
w4	4.0	0.325	1.3	2 162	820	379.5
w5	4.0	0.325	1.3	2 702.5	820	424.3
w6	4.0	0.325	1.3	1 081	2 460	464.8
w7	4.0	0.325	1.3	1 891.5	1 640	502.0
w8	4.0	0.325	1.3	2 162	1 640	536.7
w9	4.0	0.325	1.3	2 162	1 845	569.3
w10	4.0	0.325	1.3	2 416	1 834	600.0

4.4 评价指标

由于当地冬季夜间温度较低,室内热环境亟需改善,因此本研究主要以改善夜间室内热环境为目标,提出以夜间内壁面单位面积总导热量 q_{tot} 与夜间内壁面温度平均值 t_{ave} 为评价指标,其计算式如下.

$$q_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^m q_i \quad (23)$$

$$t_{\text{ave}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \quad (24)$$

式中: q_i 为夜间内壁面单位面积逐时导热量, W/m^2 ; t_i 为夜间内壁面逐时温度, $^{\circ}\text{C}$; i 为夜间时刻序号; m 为夜间时刻总数.

说明:

(1)根据有无太阳辐射划分白天与夜间时段,白天为 9:00~18:00,夜间为 0:00~8:00、19:00~23:00

(2)规定 q_{tot} 及 q_i 为正值时,表示热量由墙体传向内壁面;为负值时,表示热量由内壁面传向墙体.

4.5 结果分析

4.5.1 验证组结果分析:

如图 8~10 所示为验证组各墙体的模拟结果.

图 7 为验证组 25 种墙体内壁面逐时温度变化图,图中变化曲线存在差异的原因是 λ/δ 不同,当 λ/δ 一定,而仅改变 λ 和 δ 的大小时,内壁温变化情况相同,如墙体 w0, 1、w0, 3、w0, 5. 图 8 为不同 λ/δ 墙体内壁面逐时温度变化图,表明在 RSHST 数一定的条件下,当 λ/δ 不同时,内壁面逐时温度的变化也存在差异. 图 9 图 10 表明以 t_{ave} 及 q_{tot} 评价围护结构对夜间室内热环境的影响时,只要 λ/δ 及 RSHST 数一定,无论围护结构的基本参数(λ 、 ρ 、 c 和 δ)如何改变,它对室内热环境的影响效果是相同的.

上述分析结果说明,在应用 RSHST 数对室

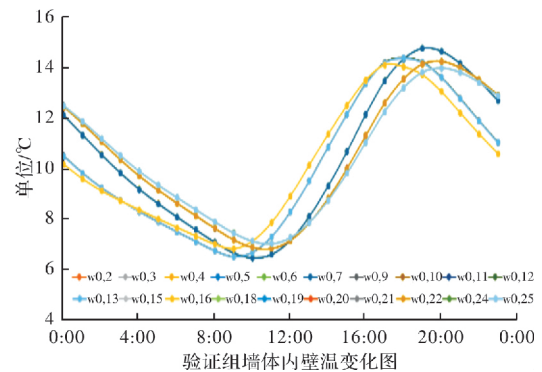


图 7 验证组墙体内壁面逐时温度

Fig. 7 Hourly temperature of inner wall in validation group

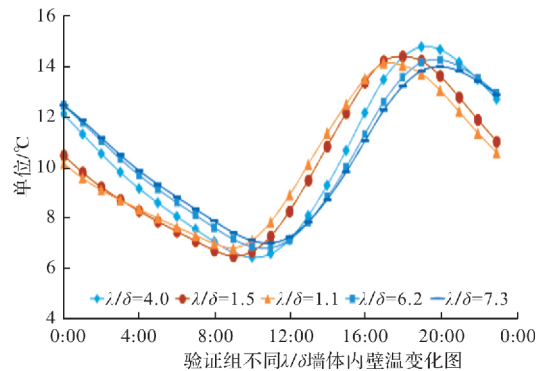
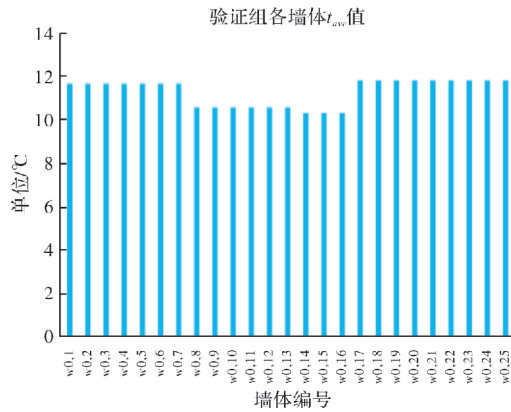
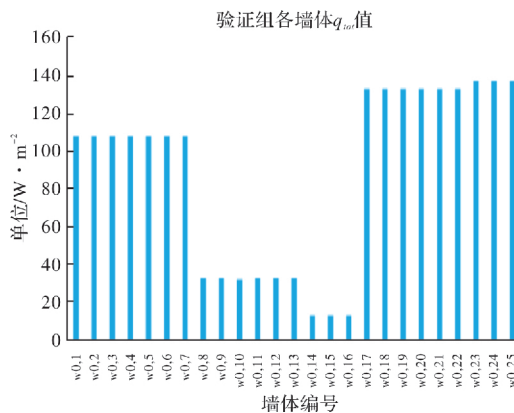


图 8 验证组不同 λ/δ 墙体内壁面逐时温度

Fig. 8 Hourly temperature of the inner wall of different λ/δ walls in the verification group

内热环境的影响进行讨论时,需要考虑 λ/δ 的影响,即在不同的保温性能下,即使蓄热性能与传热性能的相对强弱一致,对室内热环境的影响也不同. 而当 λ/δ 一定时,保持 RSHST 数不变,仅改变基本参数,其对室内热环境影响相同. 因此,在不同的保温性能条件下,用 RSHST 数表征围护结构蓄热性能与传热性能相对强弱关系并分析其对室内热环境的影响是合理可靠的.

图9 验证组各墙体 t_{ave} 值Fig. 9 t_{ave} values of each wall in the verification group图10 验证组各墙体 q_{tot} 值Fig. 10 q_{tot} values of each wall in the verification group

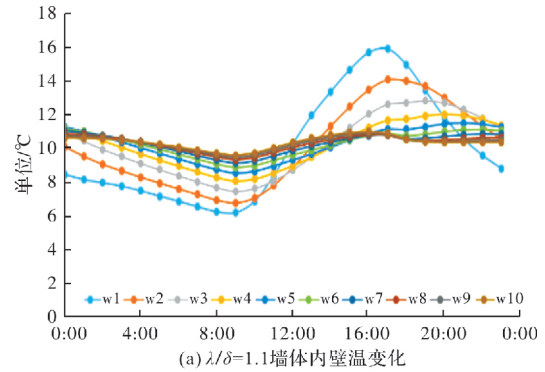
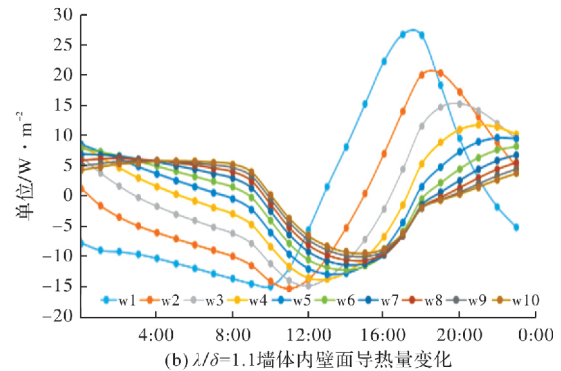
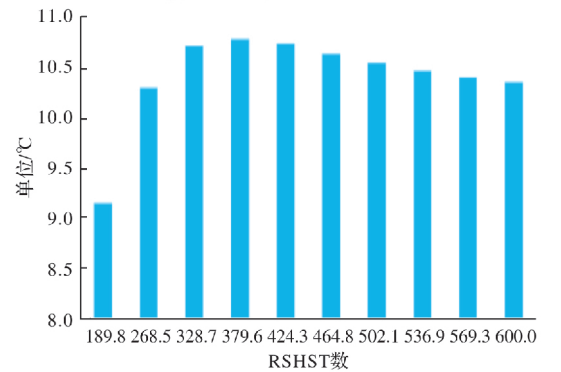
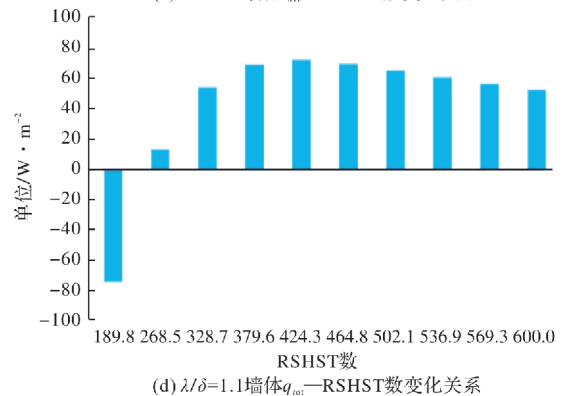
4.5.2 实验组结果分析:

如图 11、图 12 所示为实验组墙体内壁面逐时温度、内壁面单位面积逐时导热量变化情况及不同 λ/δ 墙体 t_{ave} 、 q_{tot} 随 $RSHST$ 数变化关系。从图 11、图 12 的(a)、(b)可以看出:

(1) 随着 $RSHST$ 数的增大,即蓄热性能较好时,内壁面温度波动越小,且内壁面逐时导热量变化越小,这是因为随着蓄热性能的增加,内壁面导热过程受室外影响越小;

(2) 从内壁面温度 24 h 波动来看, $\lambda/\delta=1.1$ 的墙体小于 $\lambda/\delta=4.0$ 墙体,如前者的 $w0.2$ 墙内壁温波动为 7.3°C ,而后者为 8.4°C ,说明保温性能对于维持室内的热稳定性具有积极影响,而随着蓄热性能的提升,这种影响效果逐渐减弱。

(3) 在两种墙体的保温性能条件下,当 $RSHST>424.3$ 时,随着蓄热性能参数的增大,不同墙体内壁面逐时温度之间的差异很小,内壁面逐时导热量之间的差异也很小,且各墙体内壁面日温度波动很小,几乎趋于稳定,此时从维持室内热稳定性的角度出发增加蓄热性能参数的意义不大。

(a) $\lambda/\delta=1.1$ 墙体内壁温变化(b) $\lambda/\delta=1.1$ 墙体内壁面导热量变化(c) $\lambda/\delta=1.1$ 墙体 t_{ave} — $RSHST$ 数变化关系(d) $\lambda/\delta=1.1$ 墙体 q_{tot} — $RSHST$ 数变化关系图 11 实验组 $\lambda/\delta=1.1$ 墙体模拟结果Fig. 11 Simulation results of experimental group $\lambda/\delta=1.1$ wall

因此当以维持室内热稳定性为目标,可以根据墙体的 λ/δ 选择合适的 $RSHST$ 数。

图 11、图 12 的(c)、(d)表示 t_{ave} 及 q_{tot} 随 $RSHST$ 数的变化关系,可以看出:

(1) $\lambda/\delta=4.0$ 墙体,当 $RSHST=189.8$ 时,墙体内壁面导热方向为壁面导向墙体,对于室内侧为失热过程,这对于提升冬季夜间室内热环境

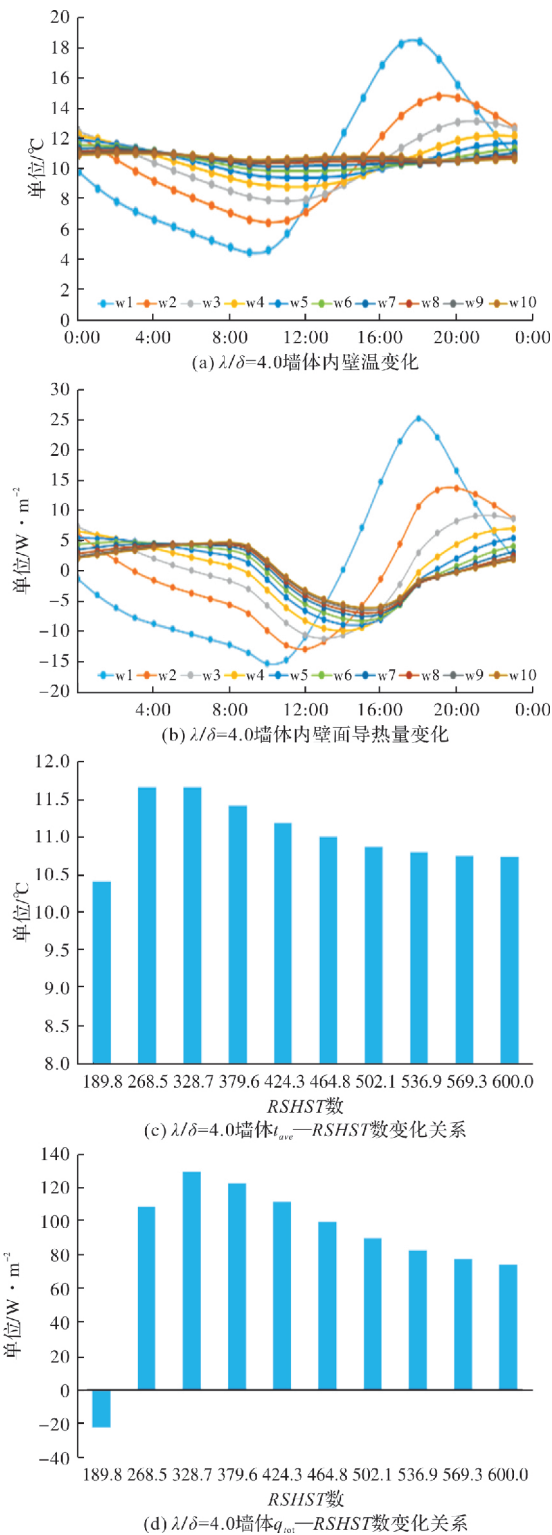
图12 实验组 $\lambda/\delta=4.0$ 墙体模拟结果

Fig. 12 Simulation results of experimental group $\lambda/\delta=4.0$ wall 是不利的,所以在围护结构热工设计时应尽量避免;

(2) 随着 $RSHST$ 数的增大, t_{ave} 及 q_{tot} 会逐渐增大,而达到最大值后,又随着 $RSHST$ 数的增大而减小,这是由于当蓄热性能参数相对较大时,虽然壁体内蓄存了更多的热量,但在夜间亦有更多的热量流向外侧壁面,使得内壁面导热呈降

低趋势,也导致了 t_{ave} 的降低;

(3) 不同保温性能墙体, t_{ave} 与 q_{tot} 最大值对应的 $RSHST$ 数不同, $\lambda/\delta=1.1$ 时, t_{ave} 最大值对应的 $RSHST$ 为 379.3, q_{tot} 最大值对应的 $RSHST$ 为 424.3; $\lambda/\delta=4.0$ 时, t_{ave} 与 q_{tot} 最大值对应的 $RSHST$ 均为 328.7.

因此当以提升夜间室内热环境为目标时,应选择 t_{ave} 及 q_{tot} 最大值对应的 $RSHST$ 数作为设计参考值.

此外 $RSHST$ 数可以用于评价拉萨地区现有围护结构热工性能,以当地传统民居现有 400 mm 厚花岗岩石墙为例, $\lambda/\delta=4.0$, $RSHST$ 数为 543.3,从维持室内热稳定性角度,蓄热性能满足要求且可以进行适当降低,但从提升夜间室内热环境角度,由图 12(c)、(d)可以看出,围护结构 $RSHST$ 数有较大的改善空间.

5 结论及展望

5.1 结论

本文建立的 $RSHST$ 数能够表征围护结构蓄热性能与传热性能的相对强弱关系,论文进一步分析了在不同的 λ/δ 条件下 $RSHST$ 数对室内热环境的影响:

(1) 对于不同的 λ/δ 的墙体, $RSHST$ 数存在两个临界值,第一个临界值为使夜间内壁面总导热量的正负号发生改变,当低于此临界值,夜间内壁面总导热量为负值,即室内侧为失热过程,在热工设计过程中,应当避免此类问题.第二个临界值是从以维持室内温度稳定性的角度考虑,当超过该临界值,增加蓄热性能对于室内热稳定性的提升效果不明显,此时提升蓄热性能的意义不大.

(2) 对于拉萨地区常见的两种保温性能水平的墙体,论文以提高冬季室内温度为目的,给出了这两种对应墙体的最佳 $RSHST$ 数值,为拉萨地区墙体热工性能评价及优化提供参考.

参考文献 References

- [1] SARKAR A, BOSE S. Exploring impact of opaque building envelope components on thermal and energy performance of houses in lower western Himalayans for optimal selection[J]. Journal of Building Engineering. 2016, 7: 170-182.
- [2] VERICHEV K, ZAMORANO M, FUENTES-SEPÚLVEDA A, et al. Adaptation and mitigation to climate change of envelope wall thermal insulation of residential buildings in a temperate oceanic climate[J]. Energy and Buildings. 2021, 235: 110719.

- [3] OZEL M. Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2011, 31(17): 3854-3863.
- [4] RAUT A N, GOMEZ C P. Assessment of thermal and energy performance of thermally efficient sustainable wall system for Malaysian low cost housing[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2018, 136: 309-318.
- [5] OLIVEIRA R D, SOUZA R V G D, MAIRINK A J M, et al. Concrete walls thermal performance analysis by brazilian standards[J]. *Energy Procedia*. 2015, 78: 213-218.
- [6] 闫伦,刘勇. 辽宁既有建筑节能改造技术浅析[J]. *房材与应用(建筑节能)*. 2006(3): 22-24.
YAN L, LIU Y. Energy saving modification techniques for Liaoning buildings[J]. *Building Energy Efficiency*. 2006(3): 22-24.
- [7] 晋文,焦俊军. 建筑围护结构得热量与建筑设计因素关系的研究[J]. *建筑热能通风空调*. 2009, 28(2): 77-79.
JIN W, JIAO J J. The research of the relation between building energy consumption and building design factors[J]. *Building Energy & Environment*. 2009, 28(2): 77-79.
- [8] 钱坤,丁芳芳. 寒冷地区既有建筑围护结构的节能改造[J]. *四川建材*. 2016, 42(4): 11-14.
QIAN Q, DING F F. Energy saving reconstruction of existing building envelope in cold area[J]. *Sichuan Building Materials*. 2016, 42(4): 11-14.
- [9] HOES P, HENSEN J L M. The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: Comparing the performance of promising concepts[J]. *Energy and Buildings*. 2016, 110: 79-93.
- [10] VERBEKE S, AUDENAERT A. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, 82: 2300-2318.
- [11] GREGORY K, MOGHADDERI B, SUGO H, et al. Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems[J]. *Energy and Buildings*. 2008, 40(4): 459-465.
- [12] 张在喜. 墙体蓄放热特性及其对建筑能耗影响的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
ZHANG Z X. Research on wall heat storage performance and its impact on building energy consumption[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [13] 孙媛媛. 混凝土建筑结构蓄热对室内热环境的影响研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
SUN Y Y. Study on the effect of heat storage on indoor thermal environment in residences with concrete components[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [14] 陈翠英. 墙体的蓄放热特性对室内热环境调节作用的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
CHEN C Y. Study of indoor thermal environment with heat charge and discharge characteristic of massive wall[D]. Dalian: University of Technology, 2006.
- [15] 朱丽,熊伟丞,王一平,等. 热质墙体在我国的热适应性研究[J]. *建筑科学*, 2010, 26(2): 88-93.
ZHU L, XIONG W C, WANG Y P, et al. Research on thermal adaptability of thermal mass wall in China[J]. *Building Science*, 2010, 26(2): 88-93.
- [16] 王秋明. 拉萨农村民居围护结构保温和蓄热优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.
WANG Q M. The optimization of the insulation and heat storage of rural residential building envelope in lhasa region[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017.
- [17] 侯立强,杨柳,刘大龙,等. 康定传统民居围护结构优化研究[J]. *建筑节能*. 2016, 44(3): 43-46.
HOU L Q, YANG L, LIU D L, et al. Envelope optimization of Kangding traditional residential building[J]. *Building Energy Efficiency*, 2016, 44(3): 43-46.
- [18] 索朗白姆,吴延孝. 拉萨传统民居围护结构热工性能[J]. *住区*, 2017(4): 144-147.
SUOLANG B M, WU Y X. The thermal performance of building envelope of traditional house in Lhasa[J]. *Design Community*, 2017(4): 144-147.
- [19] 张樱子. 藏族传统居住建筑气候适宜性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.
ZHANG Y Z. Study on climate adaptability of tibetan traditional dwellings[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [20] 何大海. 西藏拉萨地区传统民居气候适应性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
HE D H. Climatic adaptation research of traditional residence in lhasa tibet area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [21] 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.
SANG G C. Study on construction system of low energy consumption residential buildings in tibet plateau[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2009.
- [22] 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(9): 1381-1384.
ZHU X R, YANG L, LIU J P, 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(9): 1381-1384.

- [23] 王东. 西藏节能居住建筑围护结构传热系数的修正系数研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.
WANG D. Research on correct factor of envelope K factor for energy efficiency resident building in tibet [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [24] ASAN H. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials[J]. Building and Environment. 2006, 41(5): 615-620.
- [25] ULGEN K. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor[J]. Energy and Buildings. 2002, 34(3): 273-278.
- [26] BALARAS C A. The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods[J]. Energy and Buildings. 1996, 24(1): 1-10.
- [27] ASTE N, ANGELOTTI A, BUZZETTI M. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings[J]. Energy and Buildings. 2009, 41(11): 1181-1187.
- [28] ZHANG Y, LIN K, ZHANG Q, et al. Ideal thermophysical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermal physical property material[J]. Energy and Buildings. 2006, 38(10): 1164-1170.
- [29] 郭超月,赵蕾,杨柳. 基于人体热适应需求的居住建筑外墙热工设计方法及关键参数研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(1): 113-117.
GUO C Y, ZHAO L, YANG L. Thermal design method and key parameters of residential building envelopes based on human thermal adaptation demand[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2018, 48(1): 113-117.
- [30] 章熙民. 传热学[M]. 第5版. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
ZHANG X M. Heat transfer[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [31] 陈友明,王盛卫. 建筑围护结构非稳定传热分析新方法[M]. 北京:科学出版社, 2004: 323.
CHEN Y P, WANG S W. A new method for analysis of unsteady heat transfer of building envelope[M]. Beijing: Science Press, 2004: 323.
- [32] 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京:高等教育出版社, 2006.
TAO W Q. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [33] 马庆芳. 实用热物理性质手册[M]. 北京:农业机械出版社, 1986
MA Q F. Manual of practical thermophysical properties [M]. Beijing: China Agricultural Machinery Press, 1986: 1110.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 875 页)

- [22] 胡楹频, 万晶, 汤金才, 等. 武汉地区太阳能热水工程经济性评价[J]. 太阳能学报, 2012, 33(6): 916-921.
HU Yipin, WAN Jing, TANG Jincai, et al. Economic evaluation of solar water heating project in Wuhan area [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(6): 916-921.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准:GB 51366-2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for building carbon emission calculation: GB 50366-2019 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2019.
- [24] 王悦, 赵鹏军. 我国居民住宅建筑生活能耗差异性调查研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 162-170.
WANG Yue, ZHAO Pengjun. Investigation on the difference of living energy consumption of residential buildings in China[J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2018, 54(1): 162-170.
- [25] 朱方伟, 张春枝, 陈敏, 等. 武汉市城镇住宅建筑碳排放分析及总量核算研究[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(2): 25-29, 35.
ZHU Fangwei, ZHANG Chunzhi, CHEN Min, et al. Carbon emission analysis and total accounting of urban residential buildings in Wuhan [J]. Building Energy Efficiency (Chinese and English), 2021, 49(2): 25-29, 35.
- [26] 王跃生. 中国家庭结构变动与特征[J]. 人口与计划生育, 2017(9): 32-34.
WANG Yuesheng. Changes and characteristics of family structure in China[J]. Population and Family Planning, 2017(9): 32-34.

(编辑 吴海西 沈 波)