

# 吐鲁番地区居住建筑室内热环境研究

陈洁, 杨柳, 罗智星

(西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 吐鲁番地区夏季极端干燥炎热, 为了解沙漠干旱气候下居住建筑室内热环境状况及围护结构隔热性能, 对室内空气温度、相对湿度及各朝向内表面温度进行测试, 并采用理论计算与数值模拟方法, 对多种围护结构热工条件下太阳辐射朝向差异对建筑隔热性能影响进行分析。结果表明: 吐鲁番地区居住建筑室内热环境较差, 满足热舒适与湿度要求时间比分别为 15.8%、22.1%。在吐鲁番地区可通过控制室内蓄热改善室内热环境, 当外围护结构热阻小于  $0.85 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$  时, 朝向差异对围护结构内表面温度影响显著, 提高南向、东向围护结构热阻值可以有效改善室内热环境。为该地区建筑节能及热工设计优化提供参考。

**关键词:** 干热气候; 内表面温度; 热环境测试; IES

**中图分类号:** TU111.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2019)04-0578-06

## Analysis of indoor thermal environment of residential buildings in Turpan

CHEN Jie, YANG Liu, LUO Zhixing

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

**Abstract:** Turpan is extremely dry and hot in summer. In order to obtain the indoor thermal environment condition of residential buildings and the heat insulation performance of envelope structure under the dry climate condition, indoor air temperature, relative humidity and internal surface temperature of all orientations were tested. Theoretical calculation and numerical simulation were used to analyze the influence of solar radiation orientations on building insulation performance under various thermal conditions of envelope structures. Results show that the indoor thermal environment is poor, and the time ratio to meet the thermal comfort and humidity requirements is 15.8% and 22.1% respectively. In Turpan area, indoor thermal environment can be improved by controlling indoor heat storage. When the thermal resistance of the outer protective structure is less than  $0.85 \text{ m}^2 \cdot \text{k} / \text{w}$ , the orientation difference has a significant impact on the inner surface temperature of the protective structure, and increasing the thermal resistance value of the south and east protective structure can improve the indoor thermal environment more economically and effectively. It provides reference for the improvement of indoor thermal environment and the optimization of thermal design in Turpan.

**Key words:** hot and dry climate; inner surface temperature; thermal environment testing; IES

我国建筑能耗约占总能耗的 30%, 其中用于控制室内热环境和空气质量的采暖、通风和空调能耗是建筑运行阶段能源消耗的主要组成部分, 通过提高设备系统运行效率, 优化围护结构太阳辐射得热及保温隔热性能是实现建筑节能的基本方法。随着生活水平与城市化水平的不断提高, 夏季高温地区空调能耗持续增加。吐鲁番地区降雨量低蒸发量高, 属于典型大陆性干旱荒漠气候, 夏季极端干燥炎热, 见图 1, 最高温度  $47.7^\circ\text{C}$ , 最热月平均温度  $32.7^\circ\text{C}$ , 空调度日数 CDD26 高达  $579^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ , 是我国除海岛以外降温需求最高的地区。夏季不保证率为 2.5% 的太阳辐射日均累计值

为  $8697 \text{ W} / \text{m}^2$ , 太阳辐射强烈<sup>[1]</sup>, 室内热环境存在过热、干燥和气闷等问题<sup>[2]</sup>。如何通过围护结构热工性能改善室内热环境, 特别是在极端气候地区, 亟需针对干热气候特征的围护结构隔热设计方法。

室内热环境是一个复杂的热平衡过程, 被动式设计建筑设计方法基于室外气象条件优化围护结构, 使得衰减和延迟后的自然室温接近人体热舒适范围<sup>[3]</sup>, 在选取不同承重结构与保温隔热层材料与厚度组合研究中, 主要有保温隔热层厚度优化与围护结构动态传热性能数值研究<sup>[4]</sup>, 围护结构蓄热性能临界值及相对位置对建筑冷热负荷的影响研

究<sup>[5]</sup>, 以及热惰性指标与构造方式对围护结构热工性能的影响研究<sup>[6]</sup>, 外围护结构蓄热被认为是有利于建筑节能和调节室内热环境<sup>[7]</sup>, 内部蓄热体虽然不承受室外气候波动, 但因其体积占比大对室内环境作用显著<sup>[8]</sup>. 文献<sup>[9]</sup>认为围护结构蓄热的作用本质上取决于热流的时间变化, 并且室外气温和太阳辐射的周期性是最具决定性的因素之一. 文献<sup>[10]</sup>结合室外热作用朝向差异对外墙失热量进行分析, 认为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. 在吐鲁番地区, 围护结构夏季受到较高的室外气温和强烈的太阳辐射双重作用, 建筑各朝向受到太阳辐射存在差异, 单一的隔热设计将造成室内非均匀热环境从而降低室内人体热舒适感<sup>[11]</sup>.

针对吐鲁番地区夏季极端高温与太阳辐射周期性强烈变化的气候特征, 本文对吐鲁番居住建筑室内热环境进行实测, 以双向非稳态传热计算围护结构内表面温度, 通过数值模拟方法, 分析了太阳辐射朝向差异作用下内外蓄热体对室内热环境的影响, 提出室外综合温度朝向差异的建筑墙体热工设计方法, 为该地区建筑节能与热工设计提供参考.

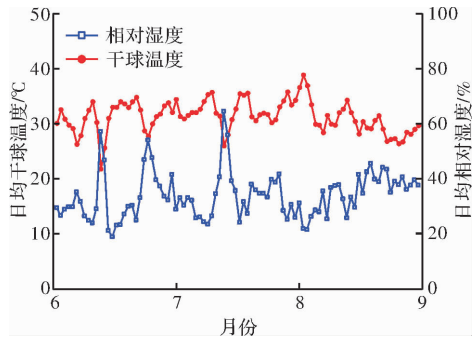


图 1 吐鲁番夏季日均干球温度、日均相对湿度  
Fig. 1 Dry bulb temperature and relative humidity in Turpan in summer

# 1 围护结构内表面温度

## 1.1 室外综合温度

在室外综合温度的作用下, 通过外围护结构向室内大量传热, 《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)中室外综合温度计算由室外气温增加太阳辐射的等效温度值<sup>[12]</sup>.

$$t_{sa} = t_e + \frac{\rho_s I}{\alpha_e} \tag{1}$$

式中:  $t_{sa}$  为室外综合温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_e$  为室外空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $I$  为投射到围护结构外表面的太阳辐射照度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\rho_s$  为外表面的太阳辐射吸收系数;  $\alpha_e$  为外表面换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . 热工标准中建筑隔热设计以围护结构内表面温度为目标, 控制外墙传热性能. 外围护结构外表面受到日晒时数和太阳辐射强度存在差异, 在谐波作用下的周期性传热过程中, 传热量与材料和材料层的蓄热系数及材料层的热惰性有关. 因此, 考虑室外温度谐波和室内温度谐波传至平壁内表面时的衰减倍数和延迟时间, 提出计算围护结构在热阻及朝向差异下的内表面温度.

## 1.2 围护结构内表面温度计算

室外计算参数值为历年最高日平均温度中的最大值所在日的室外温度逐时值, 以及各朝向室外太阳辐射逐时值, 计算各个朝向室外综合温度. 通过设置外围护结构保温隔热层厚度, 计算自然通风状态下吐鲁番地区外围护结构内表面温度, 室内外空气平均温度分别为  $37.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $35.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 外表面放热系数  $19\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 太阳辐射吸收系数  $0.7$ , 内表面放热系数  $8.7\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 围护结构热工性能见表 1, 其总热阻分别为  $0.131\text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (工况一)、 $0.845\text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (工况二)、 $2.511\text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (工况三), 热惰性指标分别为  $2.081$ (工况一)、 $2.335$ (工况二)、 $2.917$ (工况三).

表 1 墙体构造及热物理性能

Tab. 1 Thermal physical properties of walls

材料名称	厚度/mm	导热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$	容重/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	蓄热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$
水泥砂浆 1 800	15	0.93	1 800	1.05	11.32
钢筋混凝土 2 500	181	1.74	2 500	0.92	17.081
0 (工况一)					
聚苯乙烯泡沫塑料 30	30(工况二)	0.042	30	1.38	0.356
100(工况三)					
水泥砂浆 1 800	10	0.93	1 800	1.05	11.32

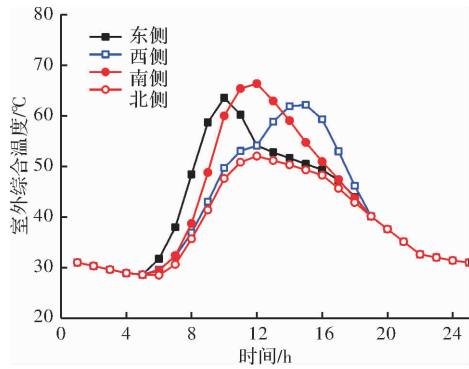


图 2 室外综合温度

Fig. 2 Sol-Air temperature for each orientation

通过图 2 可以看出,不同朝向的室外综合温度最高值分别为 63.52 °C (东侧)、62.13 °C (西侧)、66.35 °C (南侧)、52.03 °C (北侧),东西向温差最小,南北向温差最大,温差范围为 1.39~14.32 °C. 峰值出现的时间差异较大,其中东西向时差达到 5 h. 通过图 3 可以看出,围护结构的衰减和延迟作用使得各个朝向的内表面温度差异减小,随着热阻增加,各朝向温差范围分别为 0.21~2.36 °C (工况一)、0~0.55 °C (工况二)、0~0.2 °C (工况三),在吐鲁番地区当围护结构热阻小于  $0.85 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  时,朝向差异对围护结构内表面温度影响显著,围护结构隔热设计应针对不同朝向提出相应的热工性能要求. 当热阻增加  $2.38 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,各个朝向峰值降低分别为东侧 4.13 °C、西侧 3.75 °C、南侧 4.91 °C,北侧 2.75 °C,因此,在吐鲁番地区对南向、东向围护结构提高热阻值可以更经济有效的改善夏季室内热环境.

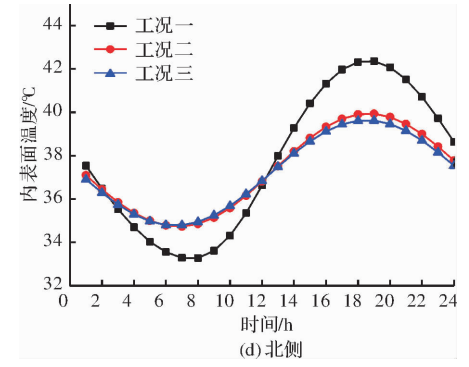
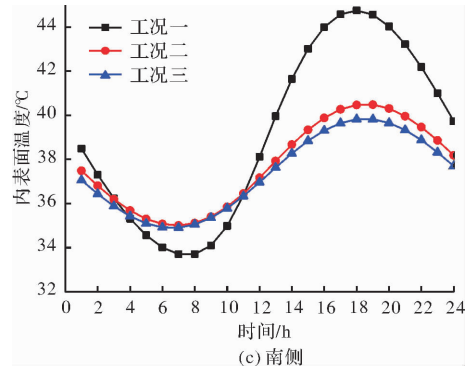
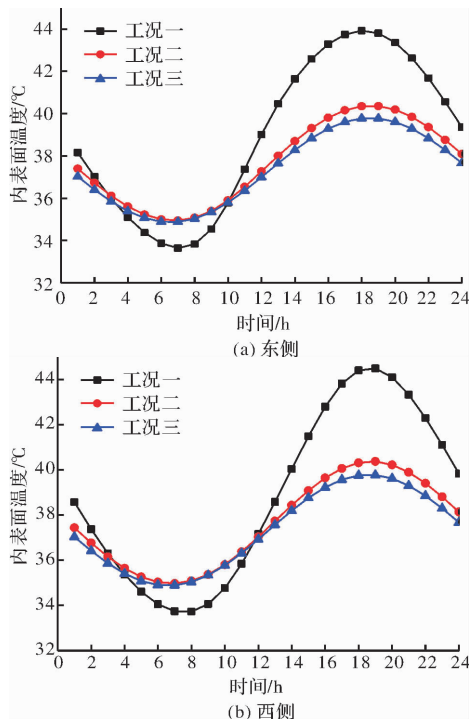


图 3 不同外墙热阻工况的内表面逐时温度

Fig. 3 The influence of thermal resistance value of external wall on internal surface temperature

## 2 室内热环境测试

### 2.1 测试对象

选取吐鲁番地区某二层居住建筑进行夏季室内热环境测试,测试对象处于自然运行状态无主动式调温措施,建筑面积  $200.1 \text{ m}^2$ ,层高 3.5 m,钢筋混凝土框架结构,围护结构主体传热系数  $0.60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,蓄热指标  $D$  值为 5.60,外墙内表面温度经计算最高  $41.92 \text{ }^\circ\text{C}$ ,满足热工标准隔热设计要求. 现场数据采集主要包括室内空气温度、相对湿度及围护结构内表面温度,测试仪器的布置依据《建筑热环境测试方法标准》JGJ/T347-2014<sup>[13]</sup>,如图 4 所示,测试仪器性能见表 2.

表 2 测试仪器性能参数

Tab. 4 The performance parameters of testing instruments

测试仪器	量程/ $^\circ\text{C}$	精度/%	记录方式
T&D 72 温度块	-20~70	$\pm 3.0$	2 次/h, 24 h
SE309 四通道温度计	-50~50	$\pm 0.3$	2 次/h, 24 h

### 2.2 测试结果与分析

选取夏季最高温时段 7 月 26 至 8 月 3 日进行室内热环境测试,由于篇幅所限对 7 月 27 日至 7

月 28 日连续 48 h 数据进行分析, 如图 5 所示。

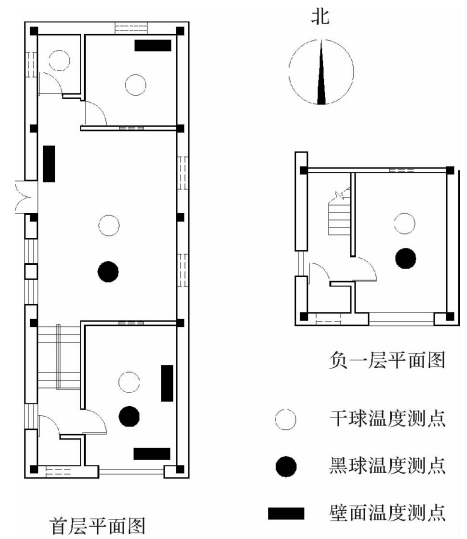


图 4 测点布置图

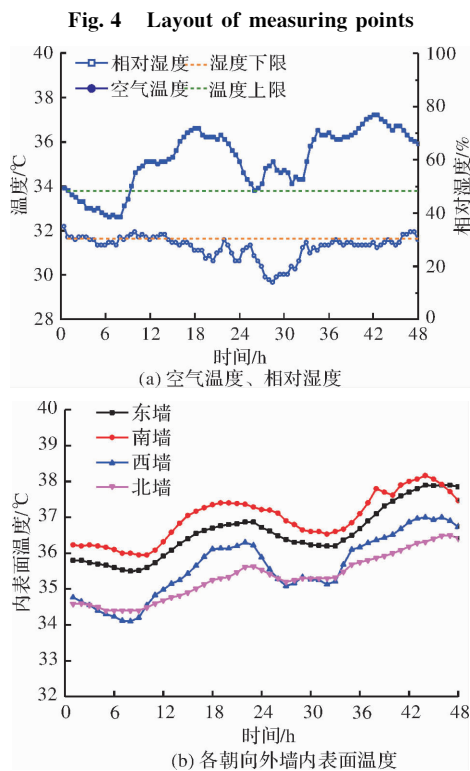


图 5 7 月 27-7 月 28 日室内热环境

Fig. 5 July 27-July 28 indoor thermal environment

吐鲁番地区中性温度为 30.1℃, 80%可接受温度上限为 33.8℃,<sup>[14]</sup>当湿度低于 30%会引起人体热感觉的不满<sup>[15]</sup>, 通过分别计算满足热舒适温度和湿度的时间比对室内环境进行评价, 实测建筑夏季室内干球温度 32.6~37.2℃, 相对湿度 14%~35%, 满足热舒适温度上限时间比为 15.8%, 达到湿度范围的时间比为 22.1%。可见以满足围护结构热工标准为隔热设计要求仍难以达到室内热舒适的需求, 这是因为热工标准以夏季室外空气温度最高值为参考对象, 而吐鲁番地

区夏季极端高温, 标准相对过于宽松。值得注意的是各朝向内表面温度实测值差异明显高于计算值, 原因可能是窗墙比差异对非透明围护结构传热的影响, 另外计算值未考虑室内蓄热体的热作用, 为分析室内蓄热体对外围护结构内表面温度的影响, 建立数值模拟模型进行比较分析。

3 模拟与分析

3.1 模型设置

以实测建筑建立几何模型, 通过集成化建筑性能分析软件 IES 对围护结构传热进行模拟分析, 构造形式及其热工性能见表 3, 通过变量控制内蓄热热惰性分别为 0.93、3.73、7.47 三种工况下分别计算各朝向的内表面温度。

表 3 建筑围护结构构造及物理性能参数

Tab. 3 Building envelope structure and physical performance parameters

名称	构造(由外到内)	热阻 /m <sup>2</sup> · K · W <sup>-1</sup>
屋面	30 mm 土原浆抹面, 50 mm 保温	4.45
	土层, 20 mm 岩棉板, 150 mm 保温土层, 200 mm 植物草层	
外墙	30 mm 生土抹灰, 500 mm 土坯,	0.71
	30 mm 生土抹灰	
内墙	土坯砖砌块	0.34(工况一)
		0.51(工况二)
		0.74(工况三)
楼板	40 mm C200 混凝土, 15 mm 木	3.29
	板垫层, 150 mm 圆木格栅, 150 mm 圆木檩条, 30 mm 玻璃棉, 10 mm 石膏板	
地板	200 mm 素土夯实, 100 mm 土坯	0.39
	层, 25 mm 水泥砂浆平铺砌土坯砖	
门	50 mm 木材	0.46
窗	6 mm 木质玻璃窗	0.32

3.2 模拟结果分析

通过实测数据验证数值模拟计算可行性, 在 24 h 周期内, 实测温度均值与模拟计算均值分别为 37.27℃、37.33℃, 变化趋势一致, 逐时温差最大为 1.47℃, 均方根误差为 0.74, 其结果在误差允许范围内, 经验证 IES 能够对室内热环境进行准确预测。

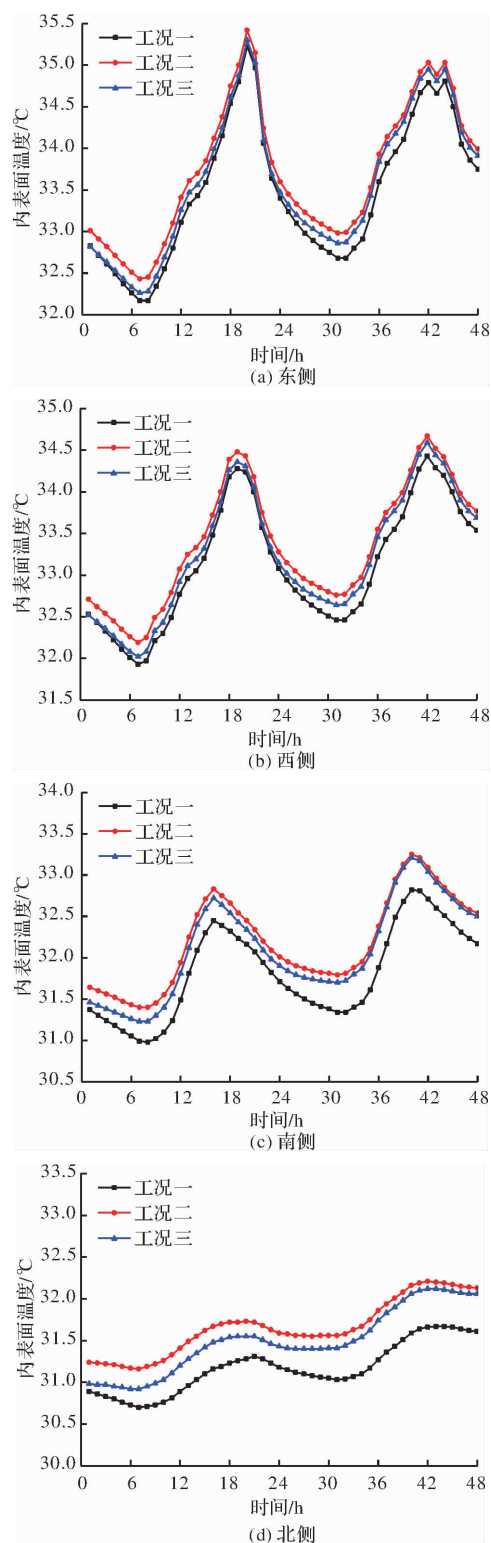


图6 不同内蓄热工况的外墙内表面温度  
Fig. 6 The effect of internal regenerator on internal surface temperature

由图6可见,室内蓄热状况对热环境产生影响,当内蓄热体的热惰性由0.34增加到3.76时,温度增加 $0.18\sim 0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但当热惰性增加至7.47时,温度增加 $-0.01\sim 0.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可见外围护结构内表面温度并不与内蓄热体热惰性线性相关.室内低蓄热状况下外围护结构内表面温度均较低,

并且室内蓄热程度对外围护结构内表面温度影响幅度存在朝向差异,北侧变化幅度高于其他方向,在室内空间划分时,应注意北侧内蓄热体对夏季降温的有利作用.西侧和东侧变化趋势存在昼夜差异,也就是说,控制室内较低蓄热有利于改善低温时段室内热环境.

## 4 结论

1)通过夏季室内热环境测试表明吐鲁番地区夏季室内温度偏高,相对湿度较低,热工标准隔热设计要求很难满足室内热舒适需求,80%热舒适上限达标时间比为15.8%,满足湿度要求的时间比为22.1%,室内热环境仍亟待改善.

2)利用围护结构热阻提高隔热性能的方法在不同朝向存在差异,在吐鲁番地区当围护结构热阻小于 $0.85\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ 时,朝向差异对围护结构内表面温度影响显著,对南向和东向围护结构提高热阻值可以更经济有效的改善室内热环境.

3)可通过控制室内蓄热改善室内热环境,但降温潜力不与室内蓄热值线性相关.在吐鲁番地区进行空间划分时,降低室内蓄热对北侧外围护结构内表面温度降低幅度最高,对于东侧、西侧仅在夜间低温时段有效.

## 参考文献 References

- [1] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
Meteorological Data Room of Meteorological Information Center of China Meteorological Bureau. China building thermal environment analysis special meteorological database [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [2] 何文芳, 白卉, 刘加平. 吐鲁番地区民居夏季热舒适测试研究[J]. 太阳能学报, 2014(6): 1092-1097.  
HE Wenfang, BAI Hui, LIU Jiaping. Field test study on summer thermal environment of traditional residential in Turpan basin[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014(6): 1092-1097.
- [3] 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(1): 113-117.  
GUO Chaoyue, ZHAO Lei, YANG Liu. Thermal design method and key parameters of residential building envelopes based on human thermal adaptation demand [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2018(1): 113-117.

- [4] AL-SANEA SA, ZEDAN M. Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal Mass [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(9): 3113-3124.
- [5] AL-SANEA SA, ZEDAN M, Al-hussain S. Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential[J]. Elsevier Ltd, 2012, 89(1): 430-442.
- [6] 赵金玲, 李杰, 党伟康. 热惰性指标对围护结构热稳定性量化作用机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(10): 182-188.  
ZHAO Jinling, LI Jie, DANG Weikang. Quantitative mechanism of thermal inertia index on thermal stability of building envelope[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(10): 182-188.
- [7] 杨柳, 侯立强, 刘江, 等. 围护结构蓄热性能对建筑负荷的影响分析[J]. 太阳能学报, 2018(11): 1-9.  
YANG Liu, HOU Liqiang, LIU Jiang, et al. Impact of thermal storage capacity of envelope on building load [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018(11): 1-9.
- [8] 朱新荣, 王润山, 杨柳, 等. 蓄热体对多层建筑室内热环境的作用分析[J]. 太阳能学报, 2013(8): 1410-1414.  
ZHU Xinrong, WANG Runshan, YANG Liu, et al. Sensitivity analysis of thermal mass on indoor thermal environment in multistory buildings[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2013(8): 1410-1414.
- [9] JIN X, ZHANG X, CAO Y, et al. Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor [J]. Elsevier B. v., 2012, 47: 369-374.
- [10] 桑国臣, 方倩, 王文康, 等. 太阳能建筑外墙传热系数朝向差异设计研究[J]. 太阳能学报, 2018(12): 1-11.  
SANG Guochen, FANG Qian, WANG Wenkang, et al. Study on difference of heat transfer coefficient in different facing orientation exterior wall of solar building[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018(12): 1-11.
- [11] 张宇峰, 赵荣义. 均匀和不均匀热环境下热感觉、热可接受度和热舒适的关系[J]. 暖通空调, 2007, 206(12): 25-31.  
ZHANG Yufeng, ZHAO Rongyi. Relationships between thermal sensation, acceptability and comfort under uniform and non-uniform thermal environments [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2007, 206(12): 25-31.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热设计规范: GB 50176-2016 [S]. 中国建筑工业出版社. 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of The People's Republic China. Code for Thermal Design of Civil Building: GB 50176-2016. [S]. China Architecture & Building Press, 2016.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑热环境测试方法标准: JGJ/T 347-2014 [S]. 中国建筑工业出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic China. Standard of Test Methods for Thermal environment of Building: JGJ/T 347-2014 [S]. China Architecture & Building Press, 2014.
- [14] YAN H, YANG L, ZHENG W, et al. Analysis of behaviour patterns and thermal responses to a hot-arid climate in rural China[J]. Elsevier Ltd, 2016, 59: 92-102.
- [15] 茅艳. 人体热舒适气候适应性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.  
MAO Yan. Study on climate adaptability of human beings to thermal comfort in China [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.

(编辑 桂智刚)