

文章编号:1007-9629(2016)04-0688-06

彩钢板饰面层外墙外保温系统温度场分析

熊厚仁^{1,2}, 徐金明¹, 牛志荣², 周志超³

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 嘉兴学院 建筑节能技术实验室, 浙江 嘉兴 314001;

3. 浙江宏正建筑设计有限公司, 浙江 嘉兴 314003)

摘要:以大尺寸耐候试验箱的彩钢板饰面层外墙外保温系统为试验对象,提出了一套完整的外保温系统构造层温度场实测方案,测得高温-淋雨循环下彩钢板饰面层外墙外保温系统各构造层温度数据;根据实测结果对比分析了分别以泡沫玻璃、硬泡聚氨酯和泡沫混凝土作为保温材料的外墙外保温系统构造层温度场分布特征、延迟时间和衰减系数.结果表明,彩钢板饰面层外墙外保温系统饰面层、保温层的温度变化特征与箱内气温一致,界面层受箱内气温影响较小,变化比较平缓;窗口位置温度波动幅度较墙体中心位置大;硬泡聚氨酯保温隔热效果优于泡沫玻璃和泡沫混凝土.各系统墙体的温度波动在各构造层中的延迟时间相同,保温层使得墙体温度场衰减显著.

关键词:彩钢板;外保温;温度场;构造层;衰减;延迟时间

中图分类号:TU111.3

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2016.04.014

Analysis on Temperature Field of External Thermal Insulation Composite Systems with Colorful Steel Plate

XIONG Houren^{1,2}, XU Jinming¹, NIU Zhirong², ZHOU Zhichao³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Building Energy Efficiency Technology Laboratory, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China;

3. Zhejiang Hong Zheng Architectural Design Co., Ltd., Jiaxing 314003, China)

Abstract: An experimental design was constructed to measure the temperature field on an external thermal insulation composite system (ETICS) with colorful steel plate (CSP). Three rigs of ETICS with CSP finish of various insulation materials (foam glass, rigid polyurethane foam and foam concrete) were tested inside a weathering test chamber. The thermal fields of the rigs were measured during the heat-rain cycles. Based on the measured temperature data, distribution of temperature on the wall's structural layer, time lag and decrement factor were explored. The results show that the temperatures of the CSP finish and the outer face of the insulation layer tend to change in accordance with the air temperature of the chamber; the temperatures of CSP finish change quickly and intensely (especially near the window) while the temperatures of the bonding layer change slowly. Among the three insulation materials, the rigid polyurethane foam is the most efficient in energy-conservation. In all three ETICSs, each layer tends to cause time lag and decrease in the transmission of thermal waves from the exterior to interior parts, being more obvious in the insulation layer.

Key words: colorful steel plate; external insulation; temperature field; structural layer; decrement; time lag

自中国强制实行建筑节能以来,外墙外保温技术由于具有良好的节能和经济效益而已成为建筑围

收稿日期:2015-04-27; 修订日期:2015-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(1472254);浙江省“十二五”省高校重点学科项目(浙教高科[2012]80号);嘉兴学院校级重点课题(70115020)

第一作者:熊厚仁(1982—),男,江西奉新人,嘉兴学院实验师,上海大学博士生. E-mail:104072005@163.com

通信作者:徐金明(1963—),男,江苏南通人,上海大学教授,博士生导师,博士. E-mail:xjming@163.com

护结构节能的主流技术,新的墙体保温材料和外墙保温体系也不断投入使用^[1].然而,中国现有外保温系统在使用过程中常遇到恶劣的自然气候条件,如外界温差、雨淋、冻融破坏等因素,使外保温系统长期受反复的温度变化作用,而在内部承受温度应力.当应力超出材料荷载时,可能出现保温层开裂、与基体脱开、饰面层脱落等问题^[2-4].

由于保温层的保温隔热作用,外墙外保温体系饰面层会遭受比传统墙体饰面层更为恶劣的热雨环境,然而相关研究很少,目前仅有少量关于外墙外保温体系的耐候试验成果^[5-6].本文借鉴夹芯压型彩钢板在实际工程中凸显出的耐久性,研制出一种新型的由饰面层、防护层、保温层、界面层和固定件构成的外墙外保温系统(即彩钢板饰面层外墙外保温系统).通过耐候性试验,进行湿热荷载作用下各构造层的温度监测,并对比分析了保温材料不同(泡沫玻璃、硬泡聚氨酯、泡沫混凝土)时的温度场分布,探讨了高温-淋雨循环(模拟热雨环境)下彩钢板饰面层外墙外保温系统中温度随保温材料不同而变化的规律.

1 温度场实测方案设计

1.1 试验模型

为了考虑大气温差、雨水对外保温墙体的实际影响,利用大尺寸耐候试验箱来模拟夏季经高温日晒、突降暴雨以及冬夏温差对外保温墙体的反复作用.试验箱内左右两侧是被研究的各种墙体,内置雨

水喷头;通过蒸发器和风扇来施加温度荷载(见图 1).

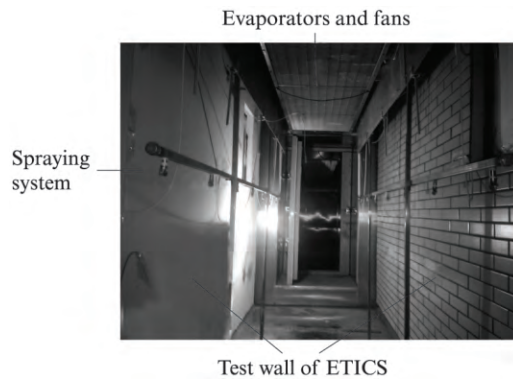


图 1 大尺寸耐候试验箱
Fig. 1 Large size climate chamber

为了对比分析 3 种保温材料所组成的新型外墙外保温系统中温度变化特征,试验时采用相同的外墙外保温系统构造.这一系统中,施工制作条件相同、所用辅材相同,仅改变构造层中保温层材料的类型.系统的构造层由外至内依次为饰面层、防护层、保温层、界面层和基层墙体(钢筋混凝土).保温层分别采用泡沫玻璃、硬泡聚氨酯和泡沫混凝土,据此将系统分为彩钢板饰面层泡沫玻璃外墙外保温系统(A 型系统)、彩钢板饰面层硬泡聚氨酯外墙外保温系统(B 型系统)和彩钢板饰面层泡沫混凝土外墙外保温系统(C 型系统).试验墙体构造见表 1,保温材料热工参数(密度 ρ ,导热系数 λ ,蓄热系数 S ,比热容 C_p)见表 2.

表 1 彩钢板饰面层外墙外保温系统构造

Table 1 Structure of ETICS with colorful steel plate

Structure layer	Material	Thickness/mm	Sketch of structure
Rig wall(RW)	Reinforced concrete	150.0	
Bonding layer(BL)	Insulation mortar	10.0	
Insulation layer(IL)	Foam glass	50.0	
	Rigid polyurethane foam		
Coating layer(CL)	Anti-crack mortar	10.0	
Finishing layer(FL)	Colorful steel plate	0.5	

表 2 保温材料的热工参数

Table 2 Thermal properties of insulation materials

Insulation material	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$S/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Foam glass	148.2	0.061	0.744	847
Rigid polyurethane foam	40.1	0.028	0.369	1640
Foam concrete	259.4	0.134	1.717	1166

1.2 测试仪器及布置方案

1.2.1 测试仪器

(1)温度传感器.采用沈阳怀远仪表有限公司生产的 Pt100 型铂热电阻,其测量范围 $-50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$,

测量精度 $\pm 0.15 \text{ }^\circ\text{C}$.

(2)数据采集仪.温度数据采集采用北京世纪建通科技公司研发的建筑物温度与热流测试系统,该采集系统可按用户设定的采集时间间隔,对温度数据

进行连续采集和存储.

1. 2. 2 测试仪器布置方案

试件尺寸按 JGJ 144—2004《外墙外保温工程技术规程》制作,首先对试件基层墙涂刷界面砂浆,用砂浆找平安装龙骨;将搅拌好的胶黏剂均匀地批在保温板材上,按自下而上、从左至右的要求把保温板材粘贴在基层墙上;然后铺贴耐碱玻纤网格布、抹抗裂砂浆;24 h 后采用橡胶沥青玛蹄脂涂抹在抗裂砂浆表面做防水处

理;最后用 2 000 0 mm×850 0 mm×0.5 mm 彩钢板与保温系统通过铆钉连接,并在窗洞口和边沿都做好封边、护角处理.制作后的模型墙尺寸为 2 0 m×3 0 m,模型墙右上部开设 0.4 m×0.6 m 单层普通玻璃铝合金窗.分别在试件基层墙与界面层之间、保温层与防护层之间和饰面层外表面上埋入温度传感器,同时在每个试件外侧(试验箱外部)中心表面处各粘贴 1 个温度传感器.温度传感器测点布置见图 2.



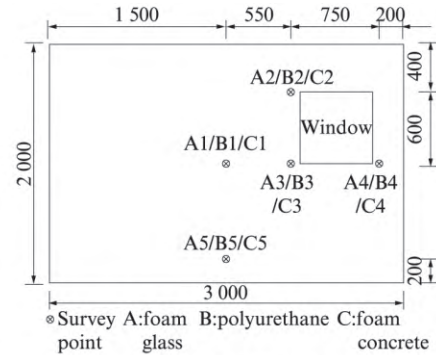
(a) Finishing layer facade



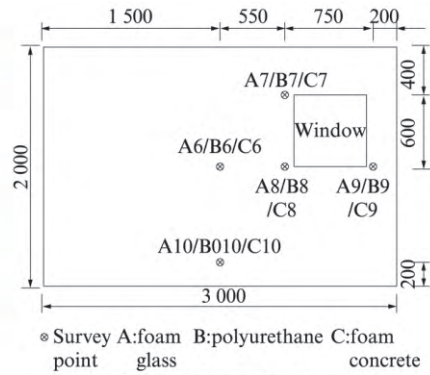
(c) Insulation layer facade



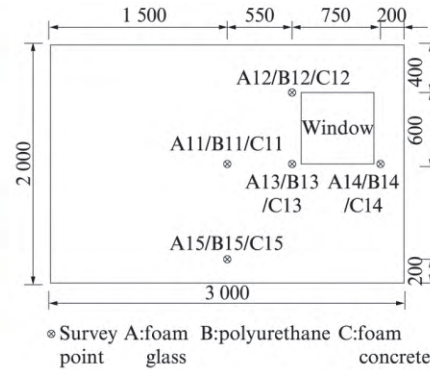
(e) Internal facade of rig wall



(b) Size of finishing layer



(d) Size of insulation layer



(f) Size of internal rig wall

图 2 各构造层的温度传感器布置

Fig. 2 Positions of the temperature sensors profiles in the structure layers(size; mm)

1. 3 试验方法

耐候性试验方法参照 JGJ 144—2004 附录 A, 试验主要步骤为:

(1)把养护好的试件吊入并安装在大尺寸耐候试验机上,连接好温度传感器,每隔 10 min 采集 1

次数据;(2)开始高温-淋水循环 80 次,每次 6 h,使得外墙表面 1 h 升温至 70 °C,并在(70±5) °C 下恒温 2 h,然后向试件表面淋水 1 h,水温为(15±5) °C,水量为 1.0~1.5 L/(m²·min),再静置 2 h;(3)对采集的温度数据进行分析.

2 试验结果与分析

2.1 各构造层的温度场分布特征

本次彩钢板饰面层外墙外保温系统的温度场监测共进行了 20 d. 图 3,4 分别是热雨循环阶段监测记录

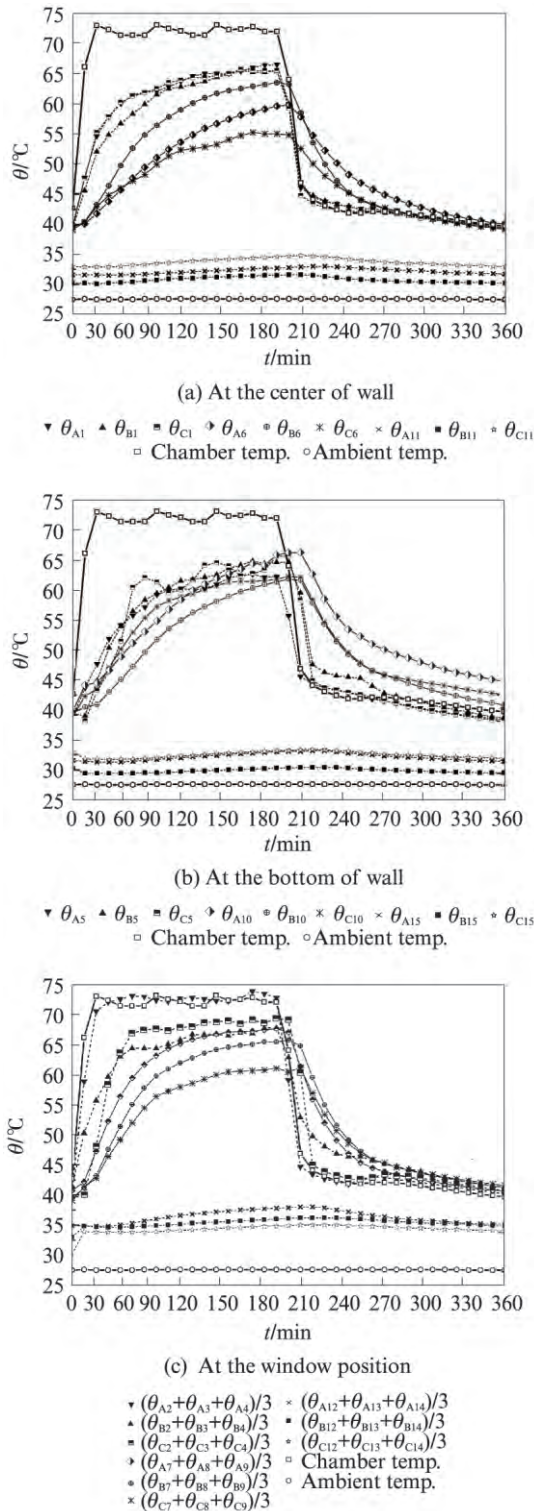


图 3 热雨循环下各构造层的温度变化曲线
 Fig. 3 Temperature vs. time of various structural layers in heat-rain cycle

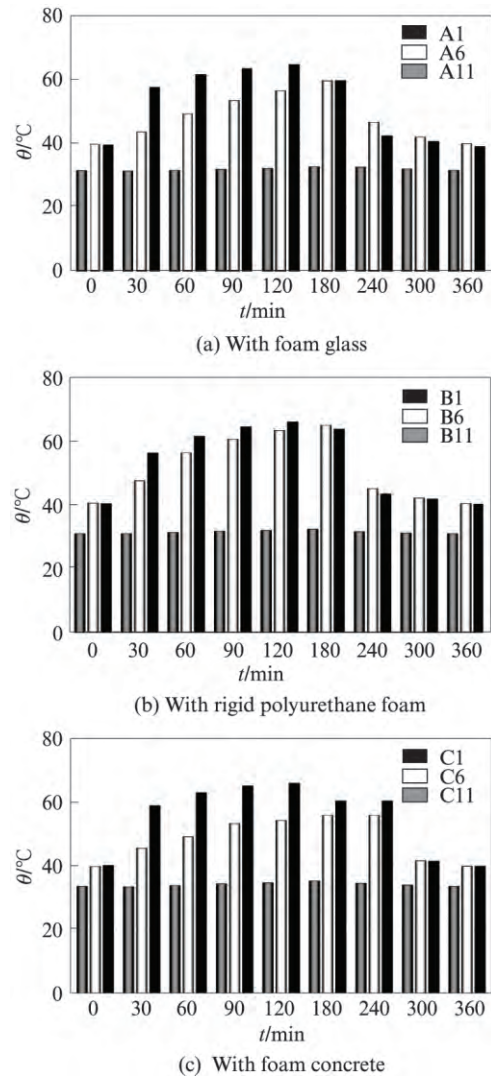


图 4 热雨循环下各构造层沿墙体厚度方向的温度分布
 Fig. 4 Temperature distribution along the thickness of wall for each layer in heat-rain cycle

中选取的 1 个循环阶段在不同构造层、不同部位处的温度 θ 随时间 t 的变化曲线,以及 1 个循环阶段在各构造层中心部位沿墙体厚度方向的温度分布直方图。

图 3 中,A 型系统饰面层、保温层、界面层墙体中心的温度分别取 A1, A6, A11 的温度值;饰面层、保温层和界面层墙体底部点的温度分别取 A5, A10, A15 的温度值;饰面层窗口部位温度值取 A2, A3, A4 的平均值;保温层窗口部位温度值取 A7, A8, A9 的平均值;界面层窗口部位温度值取 A12, A13, A14 的平均值。B 型和 C 型系统的温度取值方法与此相同。

由图 3 可知:受箱内气温的影响,饰面层、保温层外表面温度随时间变化的趋势与箱内气温变化趋势一致(见图 3(a)),饰面层、保温层外表面温度与箱内气温几乎同步发生周期性变化;饰面层表面(A1, B1, C1 处)温度变化幅度最为剧烈,特别是窗户位置(见图 3(c));保温层外表面(A6, B6, C6 处)温度变化较为

剧烈;界面层处(A11,B11,C11处)温度变化幅度平缓,基本呈水平线.这说明,由于保温层的阻热作用,外保温系统中保温层能大幅度减弱外部热环境的影响;饰面层和保温层外表面的升温时间长于淋雨降温时间,界面层的升温时间和降温时间基本相同,说明箱内气温对各构造层温度影响的强度由于保温材料的热阻而逐渐减弱,热量在传递过程中逐渐衰减.

由图4可发现,3种系统墙体各构造层沿墙厚方向的温度变化趋势相同,保温层外表面和饰面层的温度呈现同步增大(升温阶段)或减小(喷淋降温阶段)规律,温度波动的振幅都是先增大后逐渐减小,最终趋于稳定,而界面层的温度波动不明显;温度波动滞后顺序是饰面层、保温层、界面层,说明保温层能很好地延迟内部墙体峰值温度达到时刻,避开热应力重叠时刻;达到峰值温度时,3种系统墙体中心点的保温层外表面与界面层之间的温差分别为27.2℃(A型)、32.1℃(B型)和21.0℃(C型);将图4实测峰值温差对照表2中的热工参数可知,由于在3种保温材料中硬泡聚氨酯(B型)的导热系数和蓄热系数最小,保温隔热效果最好,而其在保温层处的温度波动明显比泡沫玻璃和泡沫混凝土大,说明导热系数和蓄热系数越小的材料其表面温度波动越大;泡沫混凝土(C型)由于其导热系数和蓄热系数都比硬泡聚氨酯和泡沫玻璃大,导致其保温隔热性能在3种材料中最差.

同一构造层内墙体中心位置和窗口位置的温度变化曲线基本一致,这2个位置在保温层外表面的最高温差依次为8.2℃(C型)、6.6℃(A型)和3.9℃(B型);在界面层的温差则较小,最高温差依次为3.2℃(B型)、3.1℃(A型)和1.9℃(C型).同一位置处保温层外表面与界面层之间的温差,在墙中心分

别为27.2℃(A型)、32.1℃(B型)和21.0℃(C型),在窗口位置分别为29.3℃(A型)、29.8℃(B型)和24.4℃(C型);在窗户位置,饰面层和保温层外表面的温度变化要比墙体中心位置剧烈.

2.2 保温材料对墙体温度场的延迟和衰减

外墙外保温系统的各构造层会对两侧温度传递产生延迟和衰减作用^[7-8],可以用温度传递延迟时间 Φ 和温度传递衰减系数 f 对3种外墙外保温系统各构造层的温度传递特性进行分析.

温度传递延迟时间 Φ 和衰减系数 f 按Asan的方法定义^[8],分别见式(1)~(4).由于篇幅限制,根据2.1节所述彩钢板饰面层外墙外保温系统各构造层的温度分布特征,选取系统墙体中心点A1/B1/C1, A6/B6/C6和A11/B11/C11进行分析.

$$\Phi_{fi} = t_{f, \max} - t_{i, \max} \quad (1)$$

$$\Phi_{ib} = t_{i, \max} - t_{b, \max} \quad (2)$$

$$f_{fi} = (\theta_{f, \max} - \theta_{i, \min}) / (\theta_{i, \max} - \theta_{i, \min}) \quad (3)$$

$$f_{ib} = (\theta_{i, \max} - \theta_{i, \min}) / (\theta_{b, \max} - \theta_{b, \min}) \quad (4)$$

式中: Φ_{fi} , Φ_{ib} 分别为从饰面层至保温层外表面、保温层外表面至界面层的温度传递延迟时间; f_{fi} , f_{ib} 分别为从饰面层至保温层外表面、保温层外表面至界面层的温度传递衰减系数; $t_{f, \max}$, $t_{i, \max}$, $t_{b, \max}$ 分别为饰面层表面温度达到最大值的时间、保温层外表面温度达到最大值的时间、界面层表面温度达到最大值的时间; $\theta_{f, \max}$, $\theta_{f, \min}$ 分别为饰面层表面温度的最大值、最小值; $\theta_{i, \max}$, $\theta_{i, \min}$ 分别为保温层外表面温度的最大值、最小值; $\theta_{b, \max}$, $\theta_{b, \min}$ 分别为界面层表面温度的最大值、最小值.

图5给出了彩钢板饰面层外墙外保温系统饰面层、保温层、界面层之间的温度传递延迟时间和衰减系数.

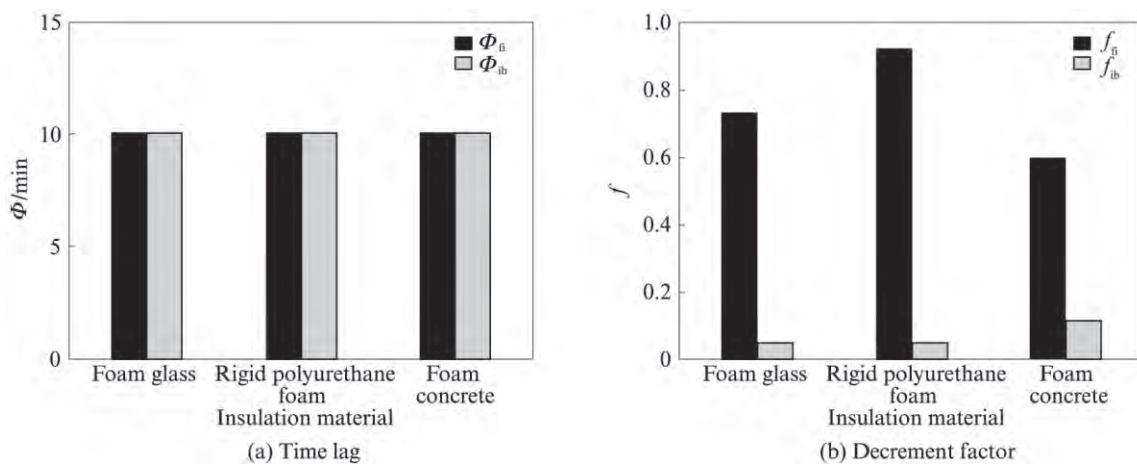


图5 彩钢板饰面层外墙外保温系统的温度传递延迟时间与衰减系数
Fig. 5 Time lag and decrement factor for ETICS with colorful steel plate

由图5可知:

(1)3种系统中饰面层与保温层外表面、保温层外表面与界面层的温度传递延迟时间均相等,可见在高温-淋雨循环6h阶段内,3种系统的温度传递延迟时间 Φ_{fi} 和 Φ_{ib} 无法区分,这说明外墙外保温耐候箱内的温度场为非稳态,可更好地模拟外墙外保温墙体系统经受高频率热负荷时的状态,并对其进行耐久性研究.

(2)3种系统中饰面层至保温层外表面的温度传递衰减系数从高到低依次为0.91(B型)、0.72(A型)和0.59(C型);保温层外表面至界面层的温度传递衰减系数从高到低依次为0.12(C型)、0.07(A型)和0.06(B型),这说明各系统的温度传递衰减系数 f_{fi} 随保温材料导热系数和蓄热系数的增大而减小,即保温材料的导热系数和蓄热系数值越大,从饰面层传入保温层外表面的热量越小;温度传递衰减系数 f_{ib} 随保温材料导热系数和蓄热系数的增大而增大,即保温材料的导热系数和蓄热系数值越大,从保温层传入界面层的热量越大,进一步验证了硬泡聚氨酯由于保温隔热效果好,可比泡沫玻璃和泡沫混凝土阻碍更多热量通过.

3 结论

(1)3种保温材料组成的彩钢板饰面层外墙外保温系统中,温度场变化特征基本相同;越靠近墙体外表面,墙体构造层受箱内气温的影响程度越大;饰面层表面温度变化幅度最大,但低于箱内环境温度的变化幅度,其变化趋势与箱内气温基本相同.饰面层和保温层外表面窗户位置的温度变化比墙体中心位置剧烈,在淋雨降温条件下特别明显,在同一耐候条件下箱体近窗户位置受外界影响较大.

(2)3种系统墙体各构造层沿墙厚方向的温度变化趋势相同,饰面层和保温层外表面的温度呈现同步增大(升温阶段)或减小(喷淋降温阶段)规律,温度波动幅度都是先增大后逐渐减小,最终趋于稳定,而界面层的温度波动不明显.

(3)箱内热量往墙厚方向传递时,各构造层之间

的温度传递延迟时间无差别,各系统中各构造层之间的温度传递衰减系数变化趋势相同;各系统从饰面层至保温层外表面的温度传递衰减系数 f_{fi} 随保温材料导热系数 λ 和蓄热系数 S 的增大而减小,保温层外表面至界面层的温度传递衰减系数 f_{ib} 随保温材料导热系数 λ 和蓄热系数 S 的增大而增大.

参考文献:

- [1] 张泽平,李珠,董彦莉.建筑保温节能墙体的发展现状与展望[J].工程力学,2007,24(S2):121-128.
ZHANG Zeping, LI Zhu, DONG Yanli. Development and prospects of heat preserving and energy conservation wall system in buildings[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(S2): 121-128. (in Chinese)
- [2] 黄振利.外墙外保温抗裂技术的研究(上篇)[J].施工技术,2005,34(7):77-80.
HUANG Zhenli. Study exterior wall external insulation anti-crack technology(First)[J]. Construction Technology, 2005, 34(7): 77-80. (in Chinese)
- [3] AMARO B, SARAIVA D, de BRITO J, et al. Inspection and diagnosis system of ETICS on walls[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1257-1267.
- [4] KUNZEL H, KUNZEL H M, SEDLBAUER K. Long-term performance of external thermal insulation systems(ETICS)[J]. ACTA Architectura, 2006, 5(1): 11-24.
- [5] 黄振利.外保温技术理论与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2011:83-97.
HUANG Zhenli. Exterior wall thermal insulation technology theory and application[M]. Beijing: China Architecture & Buildings Press, 2011: 83-97. (in Chinese)
- [6] NIU Z R, XIONG H R, YU Z M, et al. Monitoring and analysis on temperature for external foam glass thermal insulating system on walls under weathering test[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 3918-3924.
- [7] MAVROMATIDIS L E, MANKIBI M E L, MICHEL P, et al. Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including multilayer thermal insulation, in two different climatic zones[J]. Applied Energy, 2012, 92: 480-491.
- [8] ASAN H. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials[J]. Building and Environment, 2006, 41(5): 615-620.