

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-490-06

基于外墙热工性能的辐射供暖热响应研究

谢文进 陈金华

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室 重庆 400030)

【摘要】 针对夏热冬冷地区居住建筑进行分析,通过 energy plus 模拟分析了外墙保温方式、保温层厚度、保温材料等对辐射供暖响应时间的影响。研究表明在室内设计温度为 18℃ 时,自保温+外保温和外保温方式下的辐射供暖热响应时间分别短于自保温+内保温和内保温方式下的辐射供暖热响应时间;当墙体厚度为 260mm 时,选用硬质聚氨酯作为保温材料所需辐射供暖热响应时间更短,保温性能更优,在自保温+外保温的保温形式下可实现 76min 室内温度达到 18℃;保温材料和保温方式相同时,随着保温层厚度的增加,热工性能优势逐渐弱化;外保温、内保温、自保温+外保温及自保温+内保温条件下,相比于热惰性,墙体传热系数对辐射供暖热响应时间的影响更强。

【关键词】 夏热冬冷地区;辐射供暖;热响应;外墙热工性能

中图分类号 TU832/TU86 文献标识码 A

Thermal Response of Radiant Heating with Performance of External Wall

Xie Wenjin Chen Jinhua

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400030)

【Abstract】 This paper analyzes the influences of external wall insulation methods, insulation layer thickness and insulation materials on the response time of radiant heating through energy plus simulation based on the residential buildings in hot summer and cold winter area. The results show that when the indoor design temperature is 18 °C, the radiant heating thermal response time of self insulation + external insulation and external insulation is shorter than that of self insulation + internal insulation and internal insulation respectively. When the wall thickness is 260mm, the rigid polyurethane as insulation material can make radiant heating thermal response time shorter and insulation performance better. In the form of self insulation+external insulation, the indoor temperature can reach 18°C in 76min. When the insulation materials and methods are the same, with the increase of insulation layer thickness, the thermal performance advantage gradually weakens. Compared with thermal inertia, the influence of wall heat transfer coefficient on the thermal response time of radiant heating is stronger under the conditions of external insulation, internal insulation, self insulation + external insulation and self insulation + internal insulation.

【Keywords】 hot summer and cold winter area; radiant heating; thermal response; thermal performance of exterior wall

作者简介: 谢文进 (1997.6-), 女, 硕士研究生, E-mail: 1160499773@qq.com

通讯作者: 陈金华 (1973.7-), 男, 博士研究生, 教授, E-mail: c66578899@126.com

收稿日期: 2021-06-22

0 引言

长江流域建筑供暖问题近年来备受关注,辐射供暖可解决传统供暖方式存在的室内空气流速大,吹风感明显,热空气易出现分层导致热不舒适等问

题^[1],具有应用推广前景,但辐射供暖性能还具有优化空间。刘小浩^[2]通过模拟对比分析了散热器、风机盘管及地板辐射供暖三种形式下的温度热响应速度,研究结果表明地板辐射供暖温度热响应最

慢。为加快辐射供暖热响应时间,近年来许多学者^[3]从供暖系统运行参数着手进行研究,但马云^[5]通过实验测试指出辐射供暖热响应速度受供暖地面结构特性和加热管内热水流动状态的影响,仅将改变水温及流量的调控方法用于辐射供暖将无法满足不同温控需求。王登辉^[6]模拟分析了夏热冬冷地区间歇辐射供暖方式下室内热环境动态特性,指出外墙保温形式对间歇启停阶段室内热环境的影响不能被忽略。刘诗韵^[7]分析了不同保温形式下的辐射空调室内热过程得到自保温的气温时间常数长于外保温和内保温,对流空调则无明显差异。由于辐射供暖换热过程与对流不同^[8],外墙热工性能在辐射地板间歇供暖时起着重要作用^[10],为缩短辐射供暖热响应时间还需合理地选择外墙保温方式、保温材料及保温层厚度。由于干式地暖相比于湿式地暖具有热响应迅速的特性^[12],为缩短辐射供暖热响应时间,本文将区别于前人的研究,以辐射供暖热响应时间作为主要评价指标,针对干式地暖条件下的外墙热工性能进行优化。

1 传热理论

1.1 地板表面传热分析

地面辐射供暖时地板表面的传热过程主要为地板表面与室内各围护结构及人体间的辐射换热;地板表面与室内空气间的对流换热。在不考虑家具遮挡及室内热源和耗散热时进行计算,单位面积地板表面总传热量 q 计算公式如下:

$$q = q_f + q_d \quad (1)$$

式中: q_f 为单位面积地板表面辐射换热量, W/m^2 ; q_d 为单位面积地板表面对流换热量, W/m^2 。

其中, q_f 及 q_d 计算公式如下:

$$q_d = h_d(t_p - t_a) \quad (2)$$

$$q_f = \sum_{i=1}^{n-1} X_{i,p} \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_p \sigma T_p^4 \quad (3)$$

式中: h_d 为地板表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_p 为地板表面平均温度, $^\circ C$; t_a 为室内空气温度, $^\circ C$; $X_{i,p}$ 为非供暖面 i 对地面的角系数; ε_i , ε_p 为非供暖面、地面的发射率; σ 为黑体辐射常数,取 5.67×10^{-8} , $W/(m^2 \cdot K^4)$; T_i 为室内非供暖面的面积加权平均温度, K 。

1.2 墙体热工性能影响因素分析

墙体的传热系数和热惰性是表征墙体热工性能的重要参数,其计算公式如下:

$$\sum R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \quad (4)$$

式中: R 为材料热阻, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$; λ 为材料导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; δ 为材料厚度, m 。

$$\sum K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_2}} \quad (5)$$

式中: K 为墙体传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; λ 为材料导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; δ 为材料厚度, m ; h_1 为室内空气与内表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; h_2 为室外空气与外表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\rho c\lambda}{3.6T}} \quad (6)$$

式中: S 为材料蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; c 为材料比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; λ 为材料导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; T 为温度波动周期,通常取 24h。

$$\sum D = R_1 S_1 + R_2 S_2 + \dots + R_n S_n \quad (7)$$

式中: D 为热惰性指标; R 为材料热阻, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$; S 为材料蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

室内非供暖面与地板表面的辐射换热作用对辐射供暖过程存在影响且影响程度强于对流换热作用^[13],因此优化外墙热工性能,提升室内非供暖面表面温度可加快辐射供暖热响应。作为墙体热工性能重要表征参数的传热系数和热惰性受到外墙保温层厚度及保温材料影响,研究时需重点关注。但并非墙体的传热系数和热惰性相同,墙体的动态热工性能就相同,其会受到保温材料位置的影响,因此外墙保温方式的影响也不容忽视^[14]。

2 模拟方案

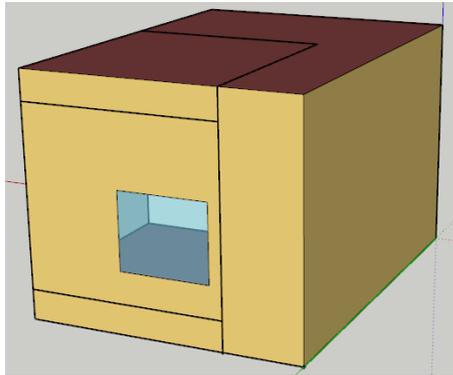


图 1 建筑模型

Fig.1 Building model

采用 Energy Plus 软件对某实验房间进行模拟，该房间可类比卧室，建筑模型如图 1 所示，一面为外墙，一面为与空调房间相邻的内墙，二面为与非空调房间相邻的内墙，上下为与非空调房间相邻的楼板，其地面敷设有预制沟槽辐射板，该建筑主要围护结构及预制沟槽板构造列于

		数 K	性 D
		W/	(m ² ·°C)
内墙	水泥砂浆 (20mm)+混凝土空心砌块 (190mm)+水泥砂浆 (20mm)	2.22	2.82
楼板	水泥砂浆 (20mm)+钢筋混凝土 (100mm)+水泥砂浆 (20mm)	3.03	1.53
外窗	透明玻璃 (6mm)+空气层 (12mm)+透明玻璃 (6mm)	1.79	/
辐射地板	水泥砂浆 (20mm)+钢筋混凝土 (100mm)+水泥砂浆 (20mm)+预制沟槽泡沫混凝土保温板 (40mm)+均热层 (1mm)+木地板 (7mm) 盘管间距: 150mm 管径: DN16	1.40	1.53

类型	主要结构	传热系	热惰
----	------	-----	----

表 1 建筑围护结构构造

Table 1 Building envelope structure

类型	主要结构	传热系数 K W/ (m ² ·°C)	热惰性 D
内墙	水泥砂浆 (20mm)+混凝土空心砌块 (190mm)+水泥砂浆 (20mm)	2.22	2.82
楼板	水泥砂浆 (20mm)+钢筋混凝土 (100mm)+水泥砂浆 (20mm)	3.03	1.53
外窗	透明玻璃 (6mm)+空气层 (12mm)+透明玻璃 (6mm)	1.79	/
辐射地板	水泥砂浆 (20mm)+钢筋混凝土 (100mm)+水泥砂浆 (20mm)+预制沟槽泡沫混凝土保温板 (40mm)+均热层 (1mm)+木地板 (7mm) 盘管间距: 150mm 管径: DN16	1.40	1.53

在 Energy Plus 中选用重庆沙坪坝的气象参数文件，供暖季设为 11 月 15 日至 2 月 15 日，选取供暖典型设计日 1 月 21 日进行分析，考虑供暖 II 级热舒适，将室内设计温度定为 18 °C，结合人员用能习惯设定供暖系统当日 23 点至次日 8 点开启，供水温度为 45 °C。

分别选取五种不同的外墙保温方式，五种常用外墙保温材料^[1]，在墙体厚度相同的条件下进行模拟，各保温方式及保温材料所对应的热工参数分别如 **Error! Reference source not found.** 和 **Error! Reference source not found.**所示。

表 2 外墙构造及其热工参数

Table 2 Exterior wall structure and its thermal parameters

类型	结构	厚度 δ mm	密度 ρ kg/m ³	导热系数 λ W/(m·°C)	热容 c J/(kg·°C)	蓄热系数 S W/(m ² ·°C)	热阻 R (m ² ·°C)/W	热惰性 D
自保温	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24
	加气混凝土砌块	220	700	0.22	837	3.06	1.00	3.06
外保温	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24
	保温材料	20	/	/	/	/	/	/

内保温	钢筋混凝土	200	2500	1.74	1050	18.23	0.11	2.09
	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24
	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24
	钢筋混凝土	200	2500	1.74	1050	18.23	0.11	2.09
	保温材料	20	/	/	/	/	/	/
	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24
	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24
	保温材料	20	/	/	/	/	/	/
	自保温+							
	外保温	加气混凝土砌块	200	700	0.22	837	3.06	0.91
外保温	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24
	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24
	保温材料	20	/	/	/	/	/	/
内保温+	加气混凝土砌块	200	700	0.22	837	3.06	0.91	2.78
自保温	保温材料	20	/	/	/	/	/	/
	水泥砂浆	20	1800	0.93	1050	11.31	0.02	0.24

注: 表中保温材料指挤塑聚苯 (XPS)、硬质聚氨酯 (PU)、模塑聚苯 (EPS)、岩棉及玻璃棉, 保温材料的热工参数详见 **Error! Reference source not found.**

表 3 保温材料热工参数

Table 3 Thermal parameters of thermal insulation materials

保温材料类型	密度 ρ kg/m ³	导热系数 λ W/(m·°C)	热容 c J/(kg·°C)	蓄热系数 S W/(m ² ·°C)	热阻 R (m ² ·°C)/W	热惰性 D
挤塑聚苯 (XPS)	30	0.03	1380	0.30	0.67	0.20
硬质聚氨酯 (PU)	35	0.024	1380	0.29	0.83	0.24
模塑聚苯 (EPS)	30	0.042	1380	0.36	0.48	0.17
岩棉	70	0.05	1220	0.56	0.40	0.22
玻璃棉	40	0.037	1060	0.34	0.54	0.18

3 模拟结果

3.1 保温方式及保温材料影响

在墙体厚度相同条件下, 不同外墙保温方式及保温材料所营造出的初始空气温度即辐射供暖系统关闭, 经过自然温降后于下一次辐射供暖系统开启前的空气温度, 如图 2 所示。

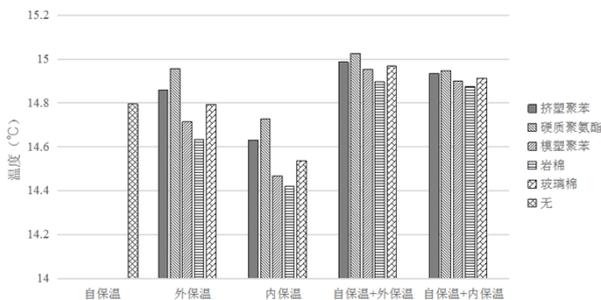


图 2 辐射供暖初始空气温度图

Fig.2 Initial air temperature of radiant heating

在墙体厚度相同的条件下, 不同的外墙保温方

式及保温材料使室内空气从初始温度达到设计温度 18°C 所需的辐射供暖热响应时间如图 3 所示。

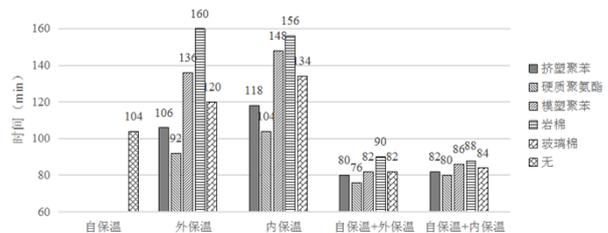


图 3 辐射供暖热响应时间图

Fig.3 Thermal response time of radiant heating

由图 2 及图 3 可知:

(1) 在保温层厚度相同的条件下, 保温方式及保温材料的选择均对辐射供暖初始温度有影响, 不同保温材料条件下, 选用外保温时, 辐射供暖热响应时间极差即最短的辐射供暖热响应时间与最长的辐射供暖热响应时间之差, 为 68min; 选用内保温时, 极差为 52min; 选用自保温+外保温时,

极差为 14min；选用自保温+内保温时，极差仅为 8min。自保温+外保温及自保温+内保温方式下墙体热阻值高且墙体主体材料热阻值高于保温材料热阻值，而外保温及内保温方式下墙体热阻值低且墙体主体材料热阻值低于保温材料热阻值，因此自保温+外保温及自保温+内保温方式下所营造出的初始温度高，辐射供暖热响应时间短，受保温材料性能影响较小。

(2) 在保温材料及保温层厚度相同条件下，因为靠近室内侧的墙体材料蓄热系数高于靠近室外侧的墙体材料蓄热系数时，墙体对室内空气温度波动的抵抗能力增强，供暖系统关闭后室内温度短时间内不会发生剧烈变化^[14]，所以自保温+外保温所营造出的初始温度高于自保温+内保温，外保温所营造出的初始温度高于内保温。但墙体对室内空气温度波动的抵抗能力增强会使室内空气温升速度减慢，辐射供暖热响应时间延长。室内设计温度为 18℃时，在温升过程中，由于自保温+内保温方式的温升速率优势弱于自保温+外保温方式的初始温度优势，内保温方式的温升速率优势弱于外保温方式的初始温度优势，所以自保温+外保温和外保温方式下的辐射供暖热响应时间分别短于自保温+内保温和内保温方式下的辐射供暖热响应时间。

(3) 在保温层厚度相同时，不同保温方式下，选用挤塑聚苯时，辐射供暖热响应时间极差为 38min；选用硬质聚氨酯时，极差为 28min；选用模塑聚苯时，极差为 66min；选用岩棉时，极差为 72min；选用玻璃棉时，极差为 52min。因为保温材料热阻值在总热阻值中占比相对越大，对墙体传热过程的影响程度越大，对保温方式的兼容性越强，所以硬质聚氨酯作为保温材料其兼容性最强。

(4) 在保温方式和保温层厚度相同时，保温材料导热系数越小，通过墙体的散热量越少，辐射供暖系统开启后，室内温升越快。因此保温材料对于初始室温及辐射供暖热响应时间的有利性大小为：硬质聚氨酯>挤塑聚苯>玻璃棉>模塑聚苯>岩棉。

(5) 综合考虑保温方式及保温材料对辐射供暖初始温度的影响，可知自保温+外保温的保温方式最优，其次是自保温+内保温，再次是外保温及自保温，最后是内保温。自保温+外保温的保温方式结合硬质聚氨酯作为保温材料最优。综合考虑保

温方式及保温材料对辐射供暖热响应时间的影响，可知自保温+外保温的保温方式采用硬质聚氨酯作为保温材料最优，辐射供暖热响应时间仅需 76min。

3.2 保温层厚度影响

墙体保温层厚度也是影响墙体热工性能的重要因素，而墙体保温层厚度并非越厚越好，保温材料具有其有效蓄热层厚度^[17]。辐射供暖热响应时间是评价辐射供暖性能优劣的重要指标，就辐射供暖热响应时间而言，硬质聚氨酯作为保温材料，其导热系数小，保温性能好，可使房间迅速升温，因此对硬质聚氨酯在不同厚度条件下的热工性能进行分析。

在保温材料相同的条件下，不同的外墙保温方式及保温层厚度所营造出的初始空气温度如图所示。

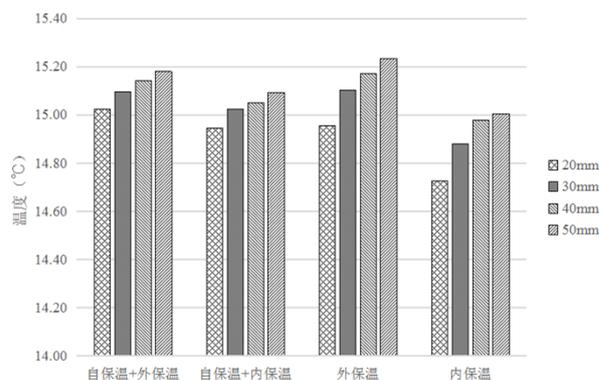
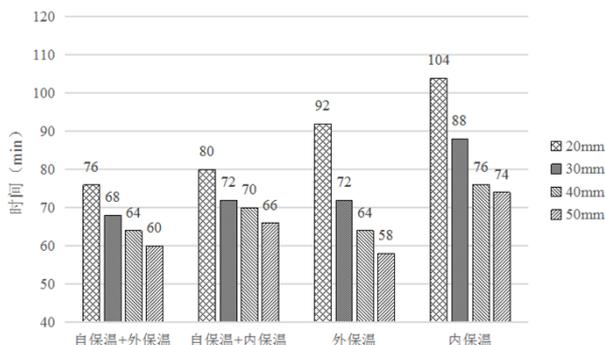


图 4 辐射供暖初始空气温度图

Fig.4 Initial air temperature of radiant heating

在保温材料相同的条件下，不同的外墙保温方式及保温层厚度使室内空气达到设计温度 18℃所需的辐射供暖热响应时间如



图所示。

究

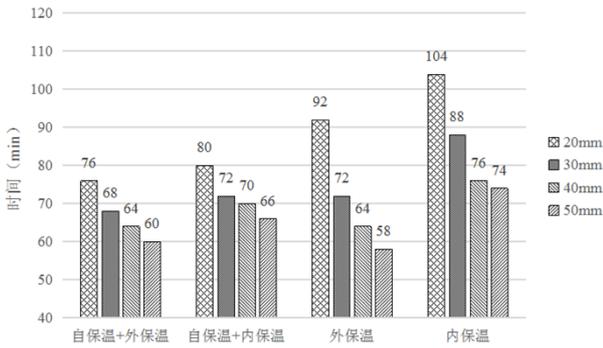
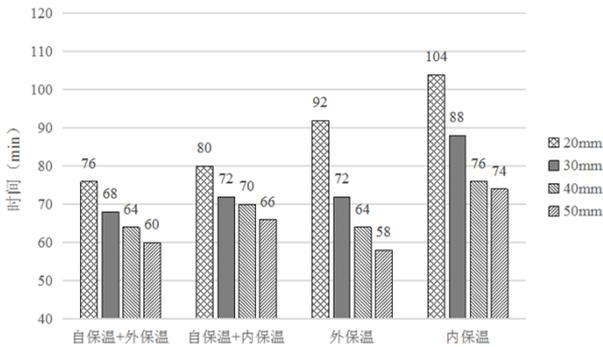


图 5 辐射供暖热响应时间图

Fig.5 Thermal response time of radiant heating

由图及



图可知:

(1) 在保温材料相同但保温层厚度不同的条件下, 选用外保温时, 辐射供暖热响应时间极差为 34min; 选用内保温时, 极差为 30min; 选用自保温+外保温时, 极差为 16min; 选用自保温+内保温时, 极差为 14min。自保温+外保温及自保温+内保温方式下墙体主体材料热阻值高, 在总热阻中占比大, 因此自保温+外保温及自保温+内保温方式下所营造出的初始空气温度和辐射供暖热响应时间受保温层厚度的影响小于外保温及内保温。

(2) 在保温材料和保温方式相同时, 随着保温层厚度的增加, 墙体热阻值增加, 通过墙体的散热量减少, 因此所营造出的初始温度逐渐上升, 辐射供暖热响应时间逐渐缩短; 但保温层厚度的增加可能使保温层处于温度剧烈波动层之外, 温度剧烈波动层之外温度波幅小, 蓄热作用相对减小, 所以初始温度上升幅度及辐射供暖热响应时间缩短幅度均有逐渐减小趋势^[17]。

3.3 传热系数及热惰性影响

传热系数和热惰性是墙体热工性能的重要表征性参数, 在墙体厚度为 260mm 时, 传热系数及热惰性不同的条件下, 室内空气达到设计温度

18°C时的辐射供暖热响应时间数值如表 4 所示。

表 4 响应时间表

Table 4 Response schedule

编号	类型	传热系数 K $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	热惰性 D	响应时间 min
1	自保温	0.83	3.55	104
		0.87	2.82	92
		1.02	2.78	106
2	外保温	1.17	2.76	120
		1.26	2.75	136
		1.40	2.80	160

续表 5 响应时间表

编号	类型	传热系数 K $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	热惰性 D	响应时间 min
3	内保温	0.87	2.82	104
		1.02	2.78	118
		1.17	2.76	134
		1.26	2.75	148
4	自保温+外保温	1.40	2.80	156
		0.51	3.51	76
		0.56	3.47	80
		0.61	3.45	82
		0.63	3.44	82
5	自保温+内保温	0.66	3.49	90
		0.51	3.51	80
		0.56	3.47	82
		0.61	3.45	84
		0.63	3.44	86
		0.66	3.49	88

由表 4 可知:

外保温、内保温、自保温+外保温及自保温+内保温条件下, 均有传热系数越大, 响应时间越长, 可见相比于热惰性, 墙体传热系数对辐射供暖热响应时间的影响更强。

4 结论

(1) 在墙体厚度及保温层厚度相同的条件下, 总热阻值高且墙体主体材料热阻值高于保温材料热阻值的墙体所营造出的初始温度高, 辐射供暖热响应时间短, 受保温材料性能影响较小。在保温材料及保温层厚度相同条件下, 辐射供暖热响应时间的快慢取决于初始温度优势和温升速率优势的相对强弱, 在室内设计温度为 18°C 时, 自保温+外保温和外保温方式下的辐射供暖热响应时间分别短于自保温+内保温和内保温方式下的辐射供暖热响应时间。在保温方式和保温层厚度相同时, 保温材料导热系数越小, 辐射供暖系统开启后, 室内温升

越快。

(2) 当墙体厚度为 260mm 时, 选用硬质聚氨酯作为保温材料所营造出的初始温度更高, 所需辐射供暖热响应时间更短, 保温性能更优。在自保温+外保温的保温形式下可实现 76min 室内温度达到 18°C。

(3) 在保温材料和保温方式相同时, 随着保温层厚度的增加, 初始温度逐渐上升, 辐射供暖热响应时间逐渐缩短, 但其幅度均逐渐减小, 热工性能优势均逐渐弱化。

(4) 外保温、内保温、自保温+外保温及自保温+内保温条件下, 相比于热惰性, 墙体传热系数对辐射供暖热响应时间的影响更强。随着墙体的传热系数增加, 辐射供暖热响应时间延长。

参考文献:

- [1] Caroline Karmann, Stefano Schiavon, Fred Bauman. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: A critical literature review[J]. Building and Environment, 2017,111.
- [2] 刘小浩. 供暖末端形式对室内热环境影响的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
- [3] 汪恒夫. 低温热水辐射供暖系统供暖性能的仿真与分析[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- [4] 陈金华, 黄敏, 姜冬, 等. 辐射供暖系统响应时间对比分析[J]. 建筑热能通风空调, 2020,39(4):26-30,101.
- [5] 马云, 蔺洁, 陈超, 等. 热水地面辐射供暖系统热响应特性实验研究[J]. 暖通空调, 2016,46(12):125-131.
- [6] 王登辉. 不同供暖末端间歇运行方式下室内热环境特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [7] 刘诗韵. 辐射地板间歇供暖房间的传热特点研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [8] 王梅杰, 赵青玲, 陈园园. 地板辐射供暖房间热负荷计算研究[J]. 建筑科学, 2020,36(4):169-177.
- [9] 刘军, 田刚, 陈志峰, 等. 低温地板辐射供暖供冷系统传热研究[J]. 山西建筑, 2018,44(13):110-112.
- [10] 王梅杰, 陈园园, 胡良博. 地板辐射供暖房间内表面温度和节能率的影响因素分析[J]. 制冷与空调, 2019,19(10):55-60,70.
- [11] 姜镀膜, 崔红社, 杨佳林, 等. 建筑热惰性对辐射供暖系统蓄热策略影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2018,37(12):38-40,10.
- [12] 黄敏. 新型预制薄型地面辐射末端供暖性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [13] 宋波, 张思思. 地面辐射供暖系统热力工况分析与系统参数设计[J]. 建筑节能, 2013,41(12):2-6.
- [14] 颜启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [15] 杨虎, 易俊, 田耿东, 等. 常用有机保温材料在建筑中的应用及性能分析[J]. 节能, 2020,39(5):18-21.
- [16] 高倩, 王兆利, 赵铁军. 几种保温复合外墙板的构造和性能[J]. 建筑技术, 2002,(10):761-762.
- [17] GB 50736-2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 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.