

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711157

热惰性指标对围护结构热稳定性量化作用机制

赵金玲¹,李 杰¹,党伟康²

(1. 大连理工大学 土木工程学院,大连 116023; 2. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司,北京 100084)

摘 要: 热惰性指标 D 是基于谐波分析法的建筑热稳定模型中的关键参数,为揭示热惰性指标对围护结构内热流波动的作用机制,首先基于对周期性非稳态热作用下围护结构传热过程的理论分析和求解,给出了热惰性指标与围护结构内温度波衰减及温度波数量的关系式,然后利用数值模拟方法分析了热惰性指标对围护结构内温度波衰减和延迟的影响,最后分析了热惰性指标对剧烈波动层厚度、内表面蓄热系数、多层围护结构的衰减倍数及延迟时间等热稳定性能参数计算的关键影响. 研究表明:热惰性指标与围护结构内温度波衰减以及温度波数量存在定量关系式;对于相同形式的围护结构, D 越大,衰减倍数及延迟时间越大,围护结构内温度波数量越多,热稳定性能越好;对于不同形式的多层围护结构, D 越大,表明延迟时间越长,而衰减倍数的大小还与材料层的排顺有关,外保温比内保温围护结构能获得更大的衰减倍数;利用 $D=1$ 确定温度剧烈波动层厚度为围护结构蓄热设计提供了新思路;内表面蓄热系数的计算主要与剧烈波动层内的热工参数有关.

关键词: 热惰性指标;围护结构;热稳定;温度波;衰减;延迟

中图分类号: TU111.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)010-0182-07

Quantitative mechanism of thermal inertia index on thermal stability of building envelope

ZHAO Jinling¹, LI Jie¹, DANG Weikang²

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. North China Power Engineering Co., Ltd of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100084, China)

Abstract: The thermal inertia index D is the key parameter in the thermal stability model of the building based on the harmonic analysis method. To reveal the effect mechanism of D on the heat flow fluctuation in the enclosure structure, the relationship between D and the attenuation and the number of temperature waves was given, based on the theoretical analysis and solution of the heat transfer process of the building envelope under the periodic unsteady thermal action. Then the effect of D on the attenuation and delay of temperature wave in the enclosure structure is analyzed by numerical simulation method. Finally, the key influence of D on the calculation of thermal stability parameters was analyzed, such as violent fluctuating layer thickness, the thermal storage coefficient of inner surface, the attenuation multiplier and the delay time. The results show that there is a quantitative relationship between D and the attenuation of temperature wave and the number of temperature waves in the enclosure. For the same type of enclosure structure, when D value increases, the attenuation and the delay time become greater. As the number of temperature waves in the enclosure structure increases, and the thermal stability become better. For different forms of multilayer enclosure structure, the larger the D value is, the longer the delay time is, and the attenuation ratio is related to the arrangement of the material layer, and the external insulation can obtain more attenuation multiple. Using $D=1$ to determine the thickness of violent fluctuating layer provides a new idea for thermal storage design of building envelope. The calculation of the thermal storage coefficient of inner surface is mainly related to the thickness of violent fluctuating layer. The theoretical basis for the improvement of the physical meaning of the thermal inertia index from the qualitative description to the quantitative description is provided.

Keywords: thermal inertia index; building envelope; thermal stability; temperature wave; attenuation; delay

热稳定性是当热流波动时围护结构温度保持相对稳定的性能,随着节能建筑轻型化以及装配式建筑和被动式建筑等新技术的发展,建筑热稳定设计

及其对室内热环境和建筑能耗影响的定量评价问题日益凸显.

围护结构热稳定性能计算是进行室内空气温度波动分析、建筑能耗分析及隔热/蓄热模型优化的基础^[1-2]. 基于谐波分析法的建筑热稳定理论模型,能够解决围护结构对室内或室外扰量的热响应特性关键问题,反映热流波动周期、围护结构热工参数等因

收稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(51408100)

作者简介: 赵金玲(1974—),女,博士,副教授

通信作者: 赵金玲, zhaojinling@dlut.edu.cn

素对非稳态传热过程的影响^[3-4]. 其对周期性传热过程的描述物理意义清晰、计算过程相对简单, 被广泛应用于非稳态建筑热过程的计算.

热惰性指标 D 是谐波分析法热稳定理论模型中的关键参数^[5-8], 对内表面蓄热系数、衰减倍数及延迟时间等参数的计算都具有决定性影响. 然而, 中国鲜见关于热惰性指标对围护结构热稳定性能作用机制的研究, 尤其欠缺关于热惰性指标物理意义的确切解释. GB50176-93《民用建筑热工设计规范》^[9]指出:“有些名词要给出一个确切的定义十分困难, 这里只能给出一个近似的名词解释, 如蓄热系数、热惰性指标、热稳定性等”, 其中热惰性指标的术语解释为“表征围护结构对温度波衰减快慢程度的量纲一的指标”. 而现行 GB50176-2016《民用建筑热工设计规范》^[10]中关于热惰性指标的术语修改为:“热惰性表征受到波动热作用时, 材料层抵抗温度波动的能力, 用热惰性指标 D 来描述, 其表现为背波面温度波动的大小”. 这些术语定性描述了热惰性指标的影响结果, 却不能解释热惰性指标为何起到这样的作用.

鉴于此, 本文通过理论推导和数值模拟分析, 给出热惰性指标与温度波及热流波衰减的函数关系式, 揭示热惰性指标对围护结构内温度波动的影响机制, 分析其对相关热工参数计算的关键作用, 为中国关于热惰性指标的物理意义由定性描述改进为定量描述提供了理论依据.

1 围护结构中温度波衰减问题求解及热惰性指标 D 的作用

1.1 围护结构中温度波模型及解析解

在计算机模拟技术发达的条件下, 即便可以用软件解决围护结构非稳态传热复杂问题计算, 但是对其数理模型中参数作用机制的深入理解, 有助于更好地发展优化热稳定性能.

围护结构中的非稳态传热在材料各向同性条件下满足傅里叶导热微分方程:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (1)$$

式中: $t(x, \tau)$ 为围护结构各时刻各位置的温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时刻, s ; a 为围护结构材料的导温系数, m^2/s ; x 为距围护结构表面的距离, m .

为了计算出整个围护结构内及其表面上温度波动的衰减, 需求解出任意时刻 τ 和任意截面 x 处的温度 $t(x, \tau)$. 已有研究表明^[11], 对于温度波在围护结构中的衰减问题, 简便方法是采用同时具有双曲函数和复变函数形式的解.

以室外空气通过围护结构向室内传热为例, 由于衰减倍数和延迟时间均以围护结构内表面作为参照面, 同时考虑计算简便, 令围护结构内表面处 $x=0$, 如图 1 所示.

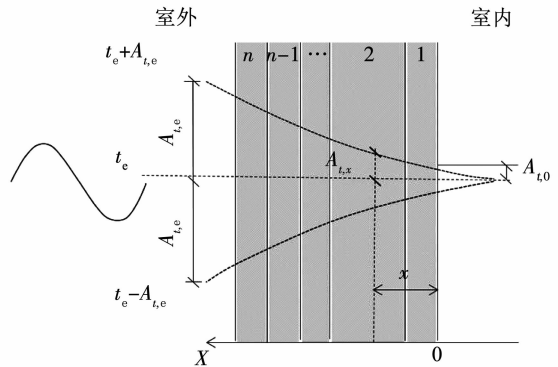


图 1 温度波在围护结构内衰减示意

Fig. 1 Schematic of the attenuation of temperature waves in the enclosure structure

由于室外气象参数呈周期性变化, 所以围护结构的边界条件为周期性温度波, 根据分离变量法^[12], 求解式(1)可得

$$\dot{t}(x, \tau) = e^{\frac{2\pi i \tau}{T}} \left(A_{t,0} \text{ch} \sqrt{\frac{2\pi i}{Ta}} x + \frac{A_{q,0}}{S\sqrt{i}} \text{sh} \sqrt{\frac{2\pi i}{Ta}} x \right). \quad (2)$$

式中: $\dot{t}(x, \tau)$ 为围护结构各时刻各位置温度的复数形式, $^{\circ}\text{C}$; $A_{t,0}$ 为围护结构内表面温度振幅, $^{\circ}\text{C}$; $A_{q,0}$ 为围护结构内表面热流振幅, W/m^2 ; T 为温度波周期, h ; S 为材料的蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, $S = \sqrt{\frac{2\pi\lambda\rho c}{T}}$, 其他符号意义同前.

在式(2)中, $e^{\frac{2\pi i \tau}{T}}$ 项反映了围护结构 τ 时刻对应的温度波相位因子, 其模恒等于 1, 只改变幅角(相位角), 对温度振幅的大小没有影响. 因此, 距离内表面 x 处的温度波振幅的复数形式为

$$\dot{A}_{t,x} = A_{t,0} \text{ch} \sqrt{\frac{2\pi i}{Ta}} x + \frac{A_{q,0}}{S\sqrt{i}} \text{sh} \sqrt{\frac{2\pi i}{Ta}} x. \quad (3)$$

式中: $\dot{A}_{t,x}$ 为距内表面 x 处的温度波振幅, $^{\circ}\text{C}$; 同理, 根据傅里叶定律 $q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}$, 可以求得围护结构内热流密度波动振幅的复数形式为

$$\dot{A}_{q,x} = \lambda \sqrt{\frac{2\pi i}{Ta}} \left(A_{t,0} \text{sh} \sqrt{\frac{2\pi i}{Ta}} x + \frac{A_{q,0}}{S\sqrt{i}} \text{ch} \sqrt{\frac{2\pi i}{Ta}} x \right). \quad (4)$$

式中: $\dot{A}_{q,x}$ 为距内表面 x 处的热流波振幅, W/m^2 ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 其他符号意义同前.

对于单一材料围护结构或单一材料层,引入热惰性指标参数为

$$D = RS. \quad (5)$$

式中: D 为热惰性指标; R 为材料层热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, 距内表面 x 处 $R_x = x/\lambda$. 热惰性指标 D 是材料蓄热系数 S 与热阻 R 组合而成的一个量纲一的参数. 将式(5)代入式(3)、(4)可得:

$$\dot{A}_{t,x} = A_{t,0} \text{ch} D_x \sqrt{i} + \frac{A_{q,0}}{S \sqrt{i}} \text{sh} D_x \sqrt{i}, \quad (6)$$

$$\dot{A}_{q,x} = S \sqrt{i} \left(A_{t,0} \text{sh} D_x \sqrt{i} + \frac{A_{q,0}}{S \sqrt{i}} \text{ch} D_x \sqrt{i} \right). \quad (7)$$

对比式(3)与式(6)、式(4)与式(7)可见,热惰性指标 D 以替代 x 表示所在截面处于材料层中的位置,也被称作“假想厚度”^[13],是求解温度波以及热流波衰减问题的关键参数.

1.2 D 与温度波衰减的关系式

热惰性指标对温度波动衰减的作用可通过数学推导进行揭示. 随着温度波的推进,波幅逐渐减小,相位发生延迟,称之为温度波的衰减. 由式(6)可得,从距离内壁面 x 处到内壁面的温度波衰减 $\dot{\nu}_x$ 的复数计算式为

$$\dot{\nu}_x = \frac{\dot{A}_{t,x}}{\dot{A}_{t,0}} = \text{ch} D_x \sqrt{i} + \frac{A_{q,0}}{A_{t,0} S \sqrt{i}} \text{sh} D_x \sqrt{i}, \quad (8)$$

对式(8)进行双曲函数变换和复数变换可得^[11]

$$\dot{\nu}_x = e^{\frac{D_x \sqrt{i}}{2}} \frac{S \sqrt{i} + Y_i}{S \sqrt{i} + Y_x}. \quad (9)$$

式中: Y_i 为围护结构内表面蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $Y_i = A_{q,0}/A_{t,0}$; Y_x 为表面蓄热系数,表示在距离内壁面 x 处热流波振幅 $\dot{A}_{q,x}$ 与温度波振幅 $\dot{A}_{t,x}$ 的比值,即 $Y_x = \dot{A}_{q,x}/\dot{A}_{t,x}$. 在相同的 $\dot{A}_{q,x}$ 下, Y_x 越大,则 $\dot{A}_{t,x}$ 越小,表明 x 截面热稳定性越强.

对于无限厚 ($D > 1$) 单层匀质材料, $Y_i = Y_x = S \sqrt{i}$, 则式(9)变为

$$\dot{\nu}_x = e^{\frac{D_x \sqrt{i}}{2}}, \quad (10)$$

式(10)的模为 $e^{\frac{D_x}{\sqrt{2}}}$, 表示在 x 距离内波动幅度的衰减倍数,而幅角为 $\frac{D_x}{\sqrt{2}}$ 弧度,表示在 x 距离内初相角的改变,即谐波相位的延迟,可得单层匀质材料构成的围护结构内温度波衰减倍数 ν 和相位延迟 Φ 分别为^[13]:

$$\nu = e^{\frac{D}{\sqrt{2}}}, \quad (11)$$

$$\Phi = \frac{D}{\sqrt{2}}. \quad (12)$$

温度波在单层匀质围护结构内的延迟时间可按下式计算:

$$\xi_0 = \frac{\Phi}{2\pi} T = \frac{D}{2\sqrt{2}\pi} T. \quad (13)$$

可见,当围护结构由单一材料组成时,温度波的衰减倍数 ν 及延迟时间 ξ_0 只受热惰性指标 D 影响, D 越大, ν 和 ξ_0 越大,温度波的衰减和延迟越强.

1.3 D 与围护结构内温度波数量的关系式

根据式(12),一定厚度单一材料墙体内温度波的数量 n 按下式计算:

$$n = \frac{\Phi}{2\pi} = \frac{D}{2\sqrt{2}\pi}. \quad (14)$$

从式(14)可看出, D 可以反映围护结构内温度波的数量,如图 2 所示.

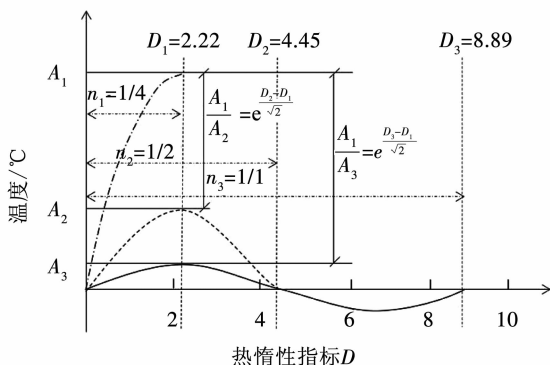


图 2 D 与围护结构内温度波数量 n 的关系示意

Fig. 2 Schematic diagram of the relationship between D and the number n of temperature waves in the building envelope

由图 2 可见, D 越大,围护结构中分布的温度波数量 n 越多,温度波幅沿材料层厚度衰减越快. 当 $D = 2\sqrt{2}\pi \approx 8.9$ 时,相位延迟 $\Phi = 2\pi$, $n = 1$,即 $D \approx 8.9$ 的围护结构内存在一个完整的温度波;而当 $D = \sqrt{2}\pi \approx 4.45$ 时,则 $\Phi = \pi$, $n = 1/2$,即 $D \approx 4.45$ 的围护结构内存在 1/2 个温度波,以此类推,可以根据 D 求得围护结构内温度波的数量 n .

为进一步分析 D 对围护结构内温度波数量的影响,以钢筋混凝土墙体和炉渣混凝土墙体为例,计算不同 D 值下墙体厚度及温度波数量. 钢筋混凝土热工参数: $\rho = 2\,500 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\lambda = 1.74 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $C = 0.92 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, $S_{24} = 17.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $S_{12} = 12.16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $S_8 = 9.93 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 炉渣混凝土热工参数: $\rho = 1\,700 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\lambda = 1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{W})$, $C = 1.05 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, $S_{24} = 11.68 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $S_{12} = 8.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $S_8 = 6.74 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 根据式(14),计算结果见表 1.

由表 1 可见,围护结构 D 值相同时,由于热流波动周期不同、建筑材料不同,对应的围护结构的厚度也不同,但是,围护结构内温度波的数量 n 相同,即围护结构内温度波的数量只由热惰性指标 D 决定。

表 1 热惰性指标对不同围护结构内温度波数量的影响

热惰性指标 D	钢筋混凝土墙体厚度 δ/m			炉渣混凝土墙体厚度 δ/m			波的数量 n
	$T=24\text{ h}$	$T=12\text{ h}$	$T=8\text{ h}$	$T=24\text{ h}$	$T=12\text{ h}$	$T=8\text{ h}$	
8.89	0.90	0.64	0.52	0.78	0.55	0.45	1/1
6.66	0.68	0.47	0.39	0.59	0.41	0.34	3/4
4.45	0.45	0.32	0.26	0.39	0.28	0.23	1/2
2.22	0.23	0.16	0.13	0.20	0.14	0.11	1/4

2 D 对围护结构内温度波动影响的模拟分析

为了更直观验证热惰性指标与墙体内温度波衰减的关系,本文在墙体外表面温度 $t_{o,s}$ 周期为 $T=24\text{ h}$,振幅为 1°C 的正弦温度波条件下,通过 ANSYS 软件对不同热惰性指标钢筋混凝土墙体的内表面温度 $t_{i,s}$ 进行模拟计算,模拟结果如图 3 所示,显示了不同热惰性指标钢筋混凝土墙体的温度波衰减和延迟规律。

从计算式(11)、(13)可知, D 值不同的墙体抵抗温度波动的能力不同,且衰减倍数 ν 、延迟时间 ξ_0 与 D 成正相关关系。由图 3 可见, D 值愈大,围护结构内温度波延迟时间 ξ_0 越长,温度波沿材料层厚度衰减倍数 ν 越大。

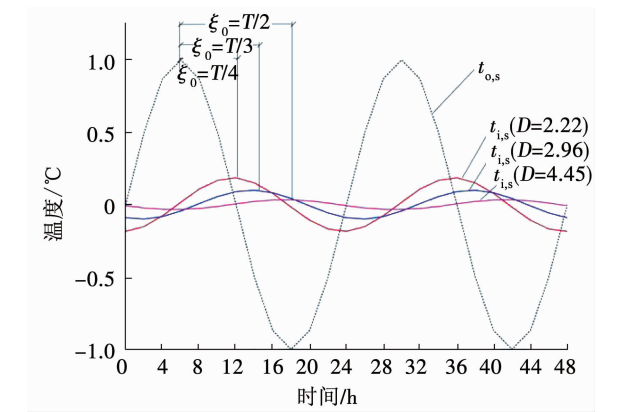


图 3 不同 D 值钢混墙体温度波衰减和延迟的规律
Fig. 3 Law of attenuation and delay of temperature wave in a reinforced concrete wall with different D values

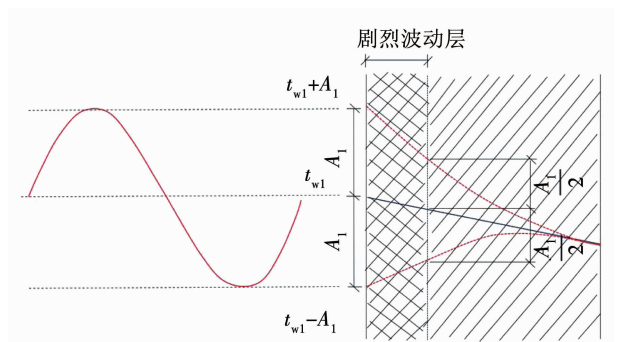
3 D 对相关热稳定性能参数计算的关键影响

3.1 剧烈波动层厚度的计算

沿温度波传递方向,围护结构内温度的波幅不断衰减。如图 4 所示,定义温度波幅衰减为表面温

度波幅 $1/2$ 处的围护结构层为“温度剧烈波动层”^[13],其厚度为“剧烈波动层厚度”。

剧烈波动层厚度在建筑蓄热设计中具有重要意义,根据 $Q = mC\Delta t$,由于温度波动幅度大,热量大部分储存在温度剧烈波动层内。而在温度剧烈波动层之外的围护结构部分,由于温度波幅小,对蓄热的作用相对不大。因此,可将温度剧烈波动层厚度认为“有效蓄热层厚度”。



注: A_1 为围护结构壁面温度波动振幅, $^\circ\text{C}$ 。

图 4 围护结构内的剧烈波动层示意
Fig. 4 Violent fluctuating layer in building envelope

温度剧烈波动层厚度的计算取决于 D 值。根据式(11),剧烈波动层边界处的温度波幅衰减倍数 $\nu = e^{\frac{D}{\delta}} = 2$,则剧烈波动层的热惰性指标 $D_\delta = 1$ 。

$$D_\delta = R_\delta S = \frac{\delta}{\lambda} S = 1.$$

式中: δ 为剧烈波动层厚度,m; R_δ 为剧烈波动层的热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$; S 为剧烈波动层材料的蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;其他符号意义同前。

剧烈波动层厚度 δ 按下式计算:

$$\delta = \frac{\lambda}{S} = \sqrt{\frac{T \lambda}{2 \pi \rho c}},$$

式中:符号意义同上。

热惰性指标 D 以及剧烈波动层厚度 δ ,都与热流的波动周期 T 有关。傅里叶级数将热作用展开成

若干个不同阶数的谐波热作用之和,一阶、二阶、三阶波对应的波动周期分别为 24、12、8 h. 本文选取几种常见蓄热材料,计算不同温度波动周期时相应的 δ 值,结果见表 2.

表 2 蓄热材料剧烈波动层厚度 δ
Tab.2 Violent fluctuating layer thickness δ of materials

建筑材料	导热系数 $\lambda/(W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1})$	体积比热容 $\rho C/(kJ \cdot (m^3 \cdot ^\circ C)^{-1})$	温度剧烈波动层厚度 δ/cm		
			$T=8\ h$	$T=12\ h$	$T=24\ h$
碎石混凝土	1.51	2 116	5.7	7.0	9.9
钢筋混凝土	1.74	2 300	5.9	7.2	10.2
粉煤灰陶粒混凝土	0.95	1 785	4.9	6.0	8.6
灰砂砖砌体	1.10	1 995	5.0	6.2	8.7
炉渣砖砌体	0.81	1 785	4.6	5.6	7.9

由表 2 可知,波动周期越大,剧烈波动层厚度 δ 越大,反之 δ 小. 一阶波作用下,常用建筑材料的有效蓄热厚度约为 8 ~ 10 cm;对于间歇供暖或制冷的房间,若热源波动为二阶和三阶波,则有效蓄热层厚度也随之减小.

剧烈波动层厚度概念及其计算方法,不仅对其他关键热稳定性能参数,如内表面蓄热系数、衰减倍数和延迟时间具有决定性的影响,而且为围护结构有效蓄热设计方法提供了新的思路.

3.2 内表面蓄热系数计算边界的确定

内表面蓄热系数 Y_i 被定义为围护结构内表面

热流波动振幅 A_q 与温度波动振幅 A_t 的比值,是表征围护结构表面蓄热能力的重要参数.

根据“温度剧烈波动层”的物理意义,认为 Y_i 只与剧烈波动层内材料热工特性有关,剧烈变化层之外的部分,则对 Y_i 不产生影响^[11]. Y_i 计算方法见表 3,从围护结构内侧向外侧逐层推算. 因为剧烈波动层厚度内材料的热惰性指标 $D=1$,所以,在计算 Y_i 时,首先以材料层 $D \geq 1$ 、 $D < 1$ 为判断标准,确定剧烈波动层边界在多层围护结构中的位置,然后,只在 $D=1$ 的剧烈波动层内计算 Y_i . 因此,整个围护结构的 D 值大, Y_i 不一定大.

表 3 围护结构内表面蓄热系数 Y_i 计算方法
Tab.3 Calculation method of heat storage coefficient Y_i on inner surface of building envelope

剧烈波动层位置	剧烈波动层边界位置确定方法	计算方法
完全位于围护结构的第 1 层中	$D_1 \geq 1$	$Y_i = S_1$ $Y_{n-1} = \frac{R_{n-1}S_{n-1}^2 + S_n}{1 + R_{n-1}S_n}$
位于围护结构的某层,即其边界位于围护结构的第 n 层 (围护结构总层数大于等于 n 层)	$D_1 + D_2 + \cdots + D_{n-1} < 1$ $D_1 + D_2 + \cdots + D_n \geq 1$	$Y_{n-2} = \frac{R_{n-2}S_{n-2}^2 + Y_{n-1}}{1 + R_{n-2}Y_{n-1}}$ $Y_i = Y_1 = \frac{R_1S_1^2 + Y_2}{1 + R_1Y_2}$ $Y_n = \frac{R_nS_n^2 + \alpha_e}{1 + R_n\alpha_e}$
超出围护结构,即其边界落在围护结构之外	整个围护结构的 $D < 1$	(其他各层表面蓄热系数计算同上)

注: S_1 为第 1 层材料的蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; S_n 为第 n 层材料的蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; R_n 为第 n 层围护结构热阻, $m^2 \cdot ^\circ C/W$; α_e 为围护结构外表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; Y_i 为围护结构内表面蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; Y_n 为第 n 层围护结构表面蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; D_n 为第 n 层围护结构热惰性指标, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

如果整个围护结构 $D < 1$,说明剧烈波动层边界落在该围护结构之外,整个围护结构处于剧烈波动层内,所以计算 Y_i 时,需要从最外层开始计算.

在中国相关资料^[9,14]中关于 Y_i 规定“每一层围护结构均 $D < 1$ 时,则从最外层开始计算”. 根据上述温度剧烈波动层理论,如果墙体每一层均 $D < 1$,而前 n 层材料的总热惰性指标 $D \geq 1$ 时,则应从第 n

层开始计算 Y_i . 内表面蓄热系数 Y_i 的计算主要与剧烈波动层厚度内材料热工参数有关,可以解释采用 $D=1$ 作为 Y_i 计算边界的依据.

3.3 D 对多层围护结构热稳定性的影响

由多层匀质材料层组成的围护结构的热惰性指标按下式计算. 对于多层围护结构,材料层排列顺序不影响围护结构总热惰性指标值.

$$\sum D = D_1 + D_2 + \cdots + D_n,$$

式中: $D_1, D_2, \cdots, D_n$ 为各层材料的热惰性指标.

在多层匀质材料层组成的围护结构内,温度波的总衰减为每层材料温度波衰减的乘积. 求解其总温度波衰减的复变函数十分复杂,为满足工程计算,由理论精确解处理成工程近似计算,假设围护结构中各层材料的热惰性指标 D_n 均大于 1,将温度波衰减的复变函数化为实数形式,得到温度波在多层材料围护结构内的衰减倍数 ν 和延迟时间 ξ_0 计算式^[11]为:

$$\nu = 0.9e^{\frac{\sum D}{\sqrt{2}}} \frac{S_1 + \alpha_i}{S_1 + Y_1} \times \frac{S_2 + Y_1}{S_2 + Y_2} \cdots \frac{S_n + Y_{n-1}}{S_n + Y_n} \times \frac{Y_n + \alpha_e}{\alpha_e}, \quad (15)$$

$$\xi_0 = \frac{1}{15} \left(57.3 \frac{\sum D}{\sqrt{2}} - \arctan \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \sqrt{2} Y_1} + \arctan \frac{Y_e}{Y_e + \sqrt{2} \alpha_e} \right). \quad (16)$$

式中: α_i 为内表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; Y_e 为围护结构外表面蓄热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 其他符号意义同上.

对比式(15)、(16)与式(11)、(13)可见,多层材料围护结构与单层匀质材料围护结构不同之处在于,其 ν 和 ξ_0 值不仅受 D 值影响,而且还受材料层排列顺序的影响.

有研究表明,热阻相同墙体,采用不同的材料和排列顺序,其热惰性不同^[15]. 本文以外保温、内保温及无保温 3 种不同墙体构造为例,在墙体热阻相同的条件下,计算 ν 和 ξ_0 随 D 的变化. 取结构层为钢筋混凝土,其物性参数 $\lambda = 1.74 W/(m \cdot ^\circ C)$, $\rho = 2500 kg/m^3$, $C = 0.92 kJ/(kg \cdot ^\circ C)$, $S_{24} = 17.2 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 保温层为聚苯乙烯板,其物性参数 $\lambda = 0.04 W/(m \cdot ^\circ C)$, $\rho = 18 kg/m^3$, $C = 1.38 kJ/(kg \cdot ^\circ C)$, $S_{24} = 0.27 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 其中,无保温墙体即为单层匀质材料围护结构,计算结果如图 5 所示.

由图 5 可见:1) 对于同一种形式的围护结构, D 值越大, ν 越大, ξ_0 越长, ξ_0 与 D 值呈正比关系;2) 对于不同构造的围护结构,当 D 值相同时, ξ_0 值基本相同,说明多层材料与单层材料围护结构内的温度波数量基本相同,主要受 D 值影响,单层和多层材料围护结构内的温度波数量 n 与 D 的关系式都可用式(14)表达;3) 当 D 值相同时,多层材料围护结构的 ν 值远超过单层材料围护结构,说明材料类型和

排列顺序对 ν 值具有较大影响;4) 存在围护结构 D 值不同,但 ν 值相同的情况. 例如,内保温墙体 $D = 4.1$ 时,其 $\nu = 150$,而外保温墙体 $D = 3.7$ 时,也可以获得 $\nu = 150$.

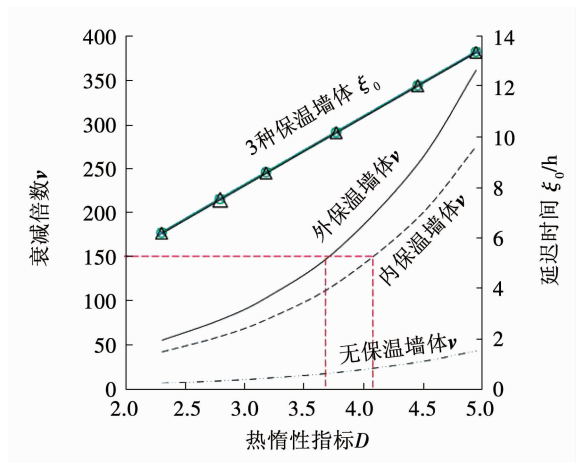


图 5 不同构造墙体的 D 与 ξ_0 、 ν 的关系

Fig. 5 Relationship between D and ξ_0, ν in different structural walls

对于多层材料围护结构, D 值越高,只表明延迟时间 ξ_0 越长,但不能说明衰减倍数 ν 越大. 欲达到良好的热稳定性能,不仅需要高 D 值,还需要材料层合理的排列顺序,外保温比内保温围护结构能获得更大的衰减倍数,热稳定性能相对良好.

4 结 论

1) 热惰性指标与围护结构内温度波衰减和热流密度波衰减的关系式,以及热惰性指标与围护结构内温度波数量的关系式,为热惰性指标量化计算围护结构对温度波动的抵抗能力提供理论依据.

2) 对于相同形式的围护结构,热惰性指标越大,衰减倍数及延迟时间越大,温度波数量越多,围护结构热稳定性越好;对于多层材料围护结构,衰减倍数不仅受热惰性指标影响,还受材料层排列顺序的影响,热惰性指标相同的外保温围护结构比内保温围护结构的衰减倍数较大,热稳定性相对良好.

3) 热惰性指标对于提出温度剧烈波动层具有关键作用,利用热惰性指标 $D = 1$ 来确定温度剧烈波动层厚度,为围护结构有效蓄热设计提供了新思路.

4) 内表面蓄热系数的计算需要通过热惰性指标确定剧烈波动层边界的位置,从而取用合适的计算式;内表面蓄热系数主要与剧烈波动层内材料热工特性有关,整个围护结构的热惰性指标高,内表面蓄热系数值不一定大.

参考文献

[1] BRAMBILLA A, JUSSELME T. Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks: A study on a real scale prototype[J]. Energy and Buildings, 2017, 156: 281. DOI:10.1016/j.enbuild. 2017.09.070

[2] DI PERNA C, STAZI F, CASANENA A U, et al. Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(1): 200. DOI:10.1016/j.enbuild. 2010.09.007

[3] ВЛАСОВ О Е. Плоские тепловые волны [J]. Известия Теплотехнического института, 1927, 3(26): 23

[4] Комиссия по строительству при СТО. Технические условия и нормы для теплотехнического расчета ограждающих конструкций: Т. У. и Н. [S]. Москва: Плановое хозяйство, 1929

[5] 刘加平. 建筑物理[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010

LIU Jiaping. Architectural physics [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010

[6] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986

YAN Qisen, ZHAO Qingzhu. Thermal process of building [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1986

[7] LIANG Shuang, WANG Shaojun, HUANG Ke. The influence law of thermal properties on building thermal stability in hot-humid and cold-humid area[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1008 – 1009: 1234. DOI: 10. 4028 www. scientific. net/AMR. 1008 – 1009. 1234

[8] 高岩, 赵立华, 张泓森. 复合混凝土砌块热工特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(7): 866

GAO Yan, ZHAO Lihua, ZHANG Hongsen. Study on the thermal characteristics of composite concrete block [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 23(7): 866

[9] 中华人民共和国建设部. 民用建筑热工设计规范: GB 50176-1993[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993

Ministry of Construction of the People’s Republic of China. Thermal design code for civil building: GB 50176-1993[S]. Beijing: China planning Publishing House, 1993

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范: GB 50176 – 2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Code for thermal design of civil building: GB 50176-2016[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017

[11] 巴格斯罗夫斯基. 建筑热物理学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988

BAGSLOWSKI. Thermal physics of architecture [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1988

[12] 汪德新. 数学物理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016

WANG Dexin. Mathematical physical method [M]. Beijing: Science Press, 2016

[13] ШКЛОВЕР А М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях[M]. Москва: Энергоиздат, 1961

[14] 杨柳, 朱新荣. 建筑物理[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2014

YANG Liu, ZHU Xinrong. Architectural physics [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2014

[15] КОРШУНОВ О В, ЗУЕВ В И. Время тепловой инерции и термическое сопротивление слоистых стен [J]. Энергобезопасность и Энергосбережение, 2011, 4(40): 23

(编辑 张 红)