

郑州地区通风屋盖的隔热性能分析

赵凤台

(土建系)

提 要

郑州地区属于炎热气候区,近年来在住宅中逐渐采用了通风屋盖,以提高屋盖的隔热性能。本文介绍了1986年夏季对已建住宅的通风屋盖所作的测试结果,证明隔热性能是优良的,并验证了“民用建筑热工设计规程”中所推荐的计算法是适用的。为今后对郑州地区住宅的屋盖进行热工设计提供了依据。

关键词: 通风屋盖, 隔热性能, 炎热气候区, 空气间层, 内表面温度。

一、前 言

通风屋盖在我国南方炎热地区的民居中早已广泛使用,例如双层架空粘土瓦坡顶,山形槽瓦上铺粘土瓦坡顶等。在城市的住宅楼中大多采用屋面板上架空大阶砖或架空混凝土薄板。这种架空的瓦或板(简称面层)与屋面板(简称基层)之间形成了一个通风的空气间层,间层中流动的空气以对流换热的方式带走了一部分热量,冷却了面层内表面和基层的外表面,从而减少了传入室内的热量,得到一定的隔热效果。当然,通风屋盖隔热性能的优劣,除了取决于间层中的通风量,间层尺度以及面层和基层的材料和构造外,还取决于当地的气候特征,如炎热的程度(太阳辐射强度,室外气温的最大值和日较差)及炎热的特征(干热或湿热,风强或风弱)。

郑州地区夏季的日平均温度稳定等于和大于 $+25^{\circ}\text{C}$ 的天数近90天,近20年最高气温的平均值在 39°C 左右。按我国建筑气候分区的规定,郑州地区属于炎热气候区,与南方炎热地区相比,除高温天气持续天数较短外,其炎热程度并不亚于南方的某些炎热地区。因此,近年来通风屋盖在郑州地区的住宅中也逐渐地被采用。但是这种通风屋盖在郑州的夏季气象条件作用下,其隔热效果如何至今未经实验证实。另外,“民用建筑热工设计规程”(简称“规程”)中所推荐的用于通风屋盖隔热设计的计算方法其适用性及误差如何,都需要与实测值进行对比。为今后对郑州地区住宅的屋盖进行热工设计提供依据。

鉴于上述,我院建筑物理实验室于1986年7月15日至25日,对已建住宅楼通风屋盖的隔热性能进行了实测。使用“规程”中的算法进行了计算,实测值与计算值作了对比分析,现分述如下。

二、实 验 结 果

测试地点为我院新建21*宿舍楼,其通风屋盖的构造形式及材料如图1所示。

本文1987年12月3日收到。

使用铜——镍铜热电偶及UJ33a电位差计,逐时测试了面层的内外表面温度和基层的内外表面温度(测点位置见图1)以及室内气温,并进行了谐波分析。为了与计算值比较,仅选用86年7月23日的实测数据进行对比分析(表1)。这是由于该日的室外气象数据与郑州地区近20年来最高气温的平均值相近,具有代表性。而且与“规程”中有关郑州地区室外气象数据的推荐值接近,因此所得实测值与计算值的比较更有实际意义。

表中数据均以北京时间计时。由于逐时测试时均提前5分钟进行,所以折合成郑州地方平均太阳时应减去30分钟。

由表1数据可知,面层外表面温度的最大值 $\theta_{s,e,max} = 63.25^{\circ}\text{C}$,出现时间为12时30分,平均温度为 39.39°C ,温度振幅为 18.92°C 。

由表1数据可知,面层内表面温度的最大值 $\theta_{s,i,max} = 56.5^{\circ}\text{C}$,出现时间为13时30分,平均温度为 37.93°C ,温度振幅为 14.92°C 。

上述数据表明面层在室外综合温度及间层空气温度共同作用下,温度谐波传至面层内表面时,面层内外表面温度振幅相比,振幅衰减度为1.26,时间延迟为1小时。

由表1数据可知,基层外表面温度的最大值 $\theta_{b,e,max} = 42.95^{\circ}\text{C}$,出现时间为13时30分,平均温度为 35.13°C ,温度振幅为 6.71°C 。

基层外表面温度是在面层内表面的热辐射和间层空气温度共同作用的结果,即间层综合温度作用的结果。与面层内表面温度振幅相比,振幅衰减度为2.22,时间延迟为零。

由表1数据可知,基层内表面温度的最大值 $\theta_{b,i,max} = 32.88^{\circ}\text{C}$,出现时间为17时30分,平均温度为 31.32°C ,温度振幅为 1.45°C 。

基层内表面温度是在间层综合温度和室内气温的双向热作用的结果。与基层外表面温度振幅相比,振幅衰减度为4.63,时间延迟为4小时。

三、计算结果

计算步骤按两步计算法,首先根据“规程”的郑州地区室外气象推荐值算出室外综合温度,进而求出面层内表面温度。然后根据间层综合温度及室内气温计算基层内表面温度即屋盖内表面温度。

(一) 第一步:

1、求室外计算温度 $t_{s,e}$:

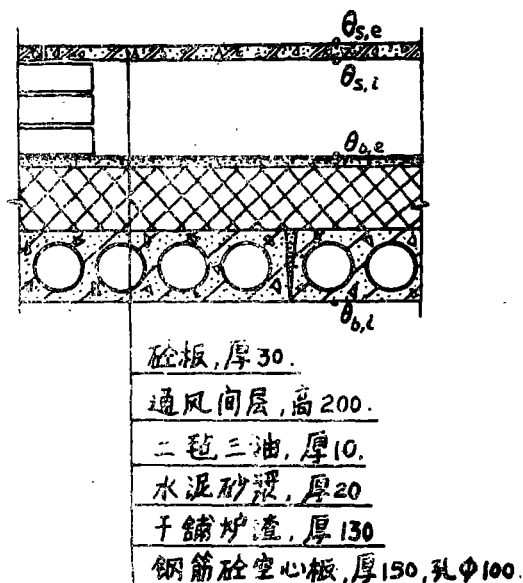


图1 通风屋盖及测点位置

表1 实测数值与谐波分析

T (h)	面层外表面温度 $\theta_{s,e} (^{\circ}\text{C})$	面层内表面温度 $\theta_{s,i} (^{\circ}\text{C})$	基层外表面温度 $\theta_{b,e} (^{\circ}\text{C})$	基层内表面温度 $\theta_{b,i} (^{\circ}\text{C})$	室内空气温度 $t_i (^{\circ}\text{C})$
0	26.75	28.15	31.35	30.55	29.30
1	26.10	27.35	30.60	30.35	28.80
2	25.80	26.90	30.25	30.25	28.65
3	25.40	26.50	29.75	30.10	28.15
4	25.05	26.15	29.55	30.05	28.05
5	24.75	25.85	29.25	30.10	28.25
6	24.85	25.65	29.05	30.10	28.30
7	25.10	27.00	29.92	30.20	28.40
8	35.10	31.85	30.80	30.20	29.95
9	41.90	36.70	32.45	30.35	30.55
10	49.90	43.45	35.20	30.65	31.70
11	56.85	48.65	37.35	30.90	32.60
12	61.75	53.55	39.40	31.35	33.80
13	63.25	55.60	41.75	31.55	34.61
14	63.00	56.50	42.95	31.95	35.25
15	59.75	54.63	42.70	32.30	35.28
16	56.40	52.50	42.55	32.45	35.35
17	50.63	49.08	41.83	32.65	36.13
18	43.15	43.88	40.02	32.88	35.05
19	37.25	39.00	38.00	32.83	34.40
20	33.05	37.38	36.08	32.58	33.18
21	30.95	32.58	34.93	32.53	32.35
22	29.75	31.23	34.10	32.43	31.75
23	28.90	30.25	33.35	32.30	31.30
\bar{t} ($^{\circ}\text{C}$)	39.39	37.93	35.13	31.32	31.71
A	18.92	14.92	6.71	1.45	3.86
ϕ (rad)	3.64	3.79	4.09	4.68	4.18

根据“规程”推荐的室外气象数据,如最高室外气温 $t_{s,\max}=38.8^{\circ}\text{C}$,气温日较差 $\Delta t_s=12.6^{\circ}\text{C}$,然后按我国西安标准线型的逐时气温变化的模比系数 β_i 及计算公式

$t_e = t_{e, \max} - \beta_{is} \Delta t_e$, 得出室外逐时计算温度及平均值。

2、求室外综合温度的平均值, 振幅及最大值。

室外综合温度的平均值:

$$\bar{t}_{sa} = \bar{t}_e + \frac{\rho \bar{I}}{\alpha_e}$$

式中: \bar{t}_{sa} ——室外综合温度的平均值, $^{\circ}\text{C}$ 。

\bar{t}_e ——室外计算温度的平均值, $^{\circ}\text{C}$ 。

\bar{I} ——太阳辐射强度的平均值, W/m^2 。

ρ ——面层外表面对太阳辐射热的吸收系数, 因表面为灰色, 取 $\rho = 0.7$ 。

α_e ——面层外表面换热系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, 因室外风速为 2.5 m/s , 查 [3]—表 C10 得 $\alpha_e = 22.2 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

代入已知数据 ($\bar{t}_e = 32.2^{\circ}\text{C}$, $\bar{I} = 308 \text{ W}/\text{m}^2$, $\rho = 0.7$, $\alpha_e = 22.2 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), 得 $\bar{t}_{sa} = 41.93^{\circ}\text{C}$ 。

室外综合温度振幅 At_{sa} :

$$At_{sa} = (At_e + At_s) \beta$$

式中: At_e ——室外计算温度振幅, $^{\circ}\text{C}$ 。

At_s ——太阳当量温度振幅, $^{\circ}\text{C}$, $At_s = \frac{\rho(I_{\max}^H - \bar{I})}{\alpha_e}$, 式中 I_{\max}^H 为水平面太阳辐射强度的最大值, W/m^2 。

β ——时差修正系数, 因 $t_{e, \max}$ 与 I_{\max}^H 出现时间不一致, 故需修正, 按 At_s/At_e 比值和 $t_{e, \max}$ 与 I_{\max}^H 出现的时差查 [3]—表 C7 求得。

将已知数据 ($At_e = 6.3^{\circ}\text{C}$, $At_s = 19.87$ 及 $\beta = 0.94$) 代入上式, 求得 $At_{sa} = 24.62^{\circ}\text{C}$ 。

室外综合温度的最大值 $t_{sa, \max}$

$$t_{sa, \max} = \bar{t}_{sa} + At_{sa} = 41.93 + 24.62 = 66.55^{\circ}\text{C}。$$

3、求面层内表面温度的最大值, 平均值和振幅:

面层内表面温度的最大值 $\theta_{s, i, \max}$

$$\theta_{s, i, \max} = 0.8 \times t_{sa, \max} = 0.8 \times 66.55 = 53.24^{\circ}\text{C}。$$

面层内表面温度的平均值 $\bar{\theta}_{s, i}$:

$$\bar{\theta}_{s, i} = 0.54 \times t_{sa, \max} = 0.54 \times 66.55 = 35.93^{\circ}\text{C}。$$

面层内表面温度振幅 $A\theta_{s, i}$:

$$A\theta_{s, i} = 0.26 \times t_{sa, \max} = 0.26 \times 66.55 = 17.3^{\circ}\text{C}。$$

(二) 第二步:

1、计算间层综合温度的平均值与振幅:

间层综合温度的平均值 $\bar{t}_{vc, s'}$

$$\bar{t}_{vc, s'} = 0.5 (\bar{t}_{vc} + \bar{\theta}_{s, i})$$

式中: \bar{t}_{vc} ——间层内空气温度的平均值, $\bar{t}_{vc} = 1.06 \bar{t}_e = 1.06 \times 32.2 = 34.13^\circ\text{C}$

得 $t_{vc, sy} = 0.5 (34.13 + 35.93) = 35^\circ\text{C}$

间层综合温度振幅 $At_{vc, sy}$

$$At_{vc, sy} = 0.5 (At_{vc} + A\theta_{b, i})$$

式中: At_{vc} ——间层空气温度振幅, $At_{vc} = 1.3 At_e$

$$\text{则 } At_{vc} = 1.3 \times 6.3 = 8.19^\circ\text{C}$$

得 $At_{vc, sy} = 0.5 (8.19 + 17.3) = 12.75^\circ\text{C}$

2、计算基层内表面温度的最大值和平均值

计算公式如下:

$$\theta_{b, i, \max} = \bar{\theta}_{b, i} + \left(\frac{At_{vc, sy}}{v_0} + \frac{At_i}{v_i} \right) \psi$$

$$\bar{\theta}_{b, i} = \bar{t}_i + \frac{t_{vc, sy} - \bar{t}_i}{R_0 \alpha_i}$$

上两式中:

$\theta_{b, i, \max}$ ——基层内表面温度的最大值, $^\circ\text{C}$

$\bar{\theta}_{b, i}$ ——基层内表面温度的平均值, $^\circ\text{C}$

At_i ——室内气温振幅, $^\circ\text{C}$

\bar{t}_i ——室内气温平均值, $^\circ\text{C}$

R_0 ——基层的总传热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{k} / \text{w}$

v_0 ——间层综合温度谐波由间层空气介质传至基层内表面时的振幅总衰减度。

v_i ——室内空气温度谐波由室内空气介质传至基层内表面时的振幅衰减度。

α_i ——基层内表面的换热系数, $\text{w} / \text{m}^2 \cdot \text{k}$,

取 $\alpha_i = 8.75$

ψ ——时差修正系数, 这是由于间层综合温度最大值出现的时间 ($\varphi_{t_{vc, sy}}$) 与室内空气温度最大值出现的时间 (φ_{t_i}) 不一致而引入的修正系数, 可根据 $At_{vc, sy} / v_0$ 与 At_i / v_i 的比值以及 ($\varphi_{t_{vc, sy}} + \xi_0$) 与 ($\varphi_{t_i} + \xi_i$) 之差, 查[3]——表C7得到。其中 ξ_0 为间层综合温度谐波传至基层内表面时的总延迟时间; ξ_i 为室内空气温度谐波传至基层内表面时的延迟时间。

由上两式可知, 若要计算 $\theta_{b, i, \max}$, $\bar{\theta}_{b, i}$, 必须首先求出 R_0 , v_0 , v_i , ξ_0 , ξ_i 等参量。下面逐一进行计算。

(1) 计算 R_0

$$R_0 = R_i + \sum R + R_e$$

式中: R_i ——基层内表面的换热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{k} / \text{w}$, $R_i = \frac{1}{\alpha_i}$,

$$\because \alpha_i = 8.75 \text{ w} / \text{m}^2 \cdot \text{k} \cdot$$

$$\therefore R_i = 0.11 \text{ m}^2 \cdot \text{k} / \text{w}$$

R_e ——基层外表面的换热阻, $m^2 \cdot k/w$, $R_e = \frac{1}{\alpha_e}$,

$\because \alpha_e = 22.2 w/m^2 \cdot k$, $\therefore R_e = 0.04 m^2 \cdot k/w$

ΣR ——基层各材料层的热阻之和。基层各材料层的热物理参数见表2, 由表2 可知
 $\Sigma R = 0.68 m^2 \cdot k/w$

表2 基层各材料层的热物理参量

序号	内 容 名 称	d (M)	γ (kg/M ³)	λ (w/M·K)	S (w/M ² ·K)	R (M ² ·K/w)	D=RS
1	钢筋混凝土	0.025	2500	1.74	18.4	0.015	0.27
2	空气间层	0.10	0	0.85	4.26	0.12	0.51
3	钢筋混凝土	0.025	2500	1.74	18.4	0.015	0.27
4	干铺炉渣	0.13	1000	0.29	4.41	0.45	1.98
5	水泥砂浆	0.02	1800	0.93	11.51	0.021	0.24
6	二毡三油	0.01	600	0.17	3.33	0.057	0.19
Σ						0.68	3.46

把已知数据代入 R_0 式, 则得 $R_0 = 0.83 m^2 \cdot k/w$ 。

(2) 计算 v_0 。

$$v_0 = 0.9e^{\frac{\Sigma D}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{s_1 + \alpha_i}{s_1 + Y_{1,e}} \cdot \frac{s_2 + Y_{1,e}}{s_2 + Y_{2,e}} \cdot \frac{s_3 + Y_{2,e}}{s_3 + Y_{3,e}} \cdot \frac{s_4 + Y_{3,e}}{s_4 + Y_{4,e}} \cdot \frac{s_5 + Y_{4,e}}{s_5 + Y_{5,e}} \cdot \frac{s_6 + Y_{5,e}}{s_6 + Y_{6,e}} \cdot \frac{\alpha_e + Y_{6,e}}{\alpha_e}$$

式中: ΣD ——基层各材料层的热惰性指标之和, 由表7可知基层的 $\Sigma D = \Sigma RS = 3.49$

S_1, S_2, \dots ——基层各材料层的蓄热系数, $w/m^2 \cdot k$, 可查表2得到。

$Y_{1,e}, Y_{2,e}, \dots$ ——基层各材料层的外表面蓄热系数, $w/m^2 \cdot k$ 。可利用下式计

算:

当 $D_m \geq 1$ 时, $Y_{m,e} = S_m$,

当 $D_m < 1$ 时, $Y_{m,e} = \frac{R_m S_m^2 + Y_{m-1,e}}{1 + R_m Y_{m-1,e}}, (m = 1, 2, 3 \dots n)$

可分别得到各层外表面蓄热系数: $Y_{1,se} = 12.19$, $Y_{2,se} = 5.81$, $Y_{3,se} = 9.96$, $Y_{4,se} = 4.4$, $Y_{5,se} = 6.54$, $Y_{6,se} = 5.23$ 。

把有关数据代入 v_0 式, 得 $v_0 = 26$

(3) 计算 v_i :

$$v_i = 0.95 - \frac{\alpha_i + Y_{1,si}}{\alpha_i}$$

式中: $Y_{1,si}$ ——基层的第一层内表面蓄热系数, 即基层的内表面蓄热系数, $W/m^2 \cdot K$ 。

由于 $D_1 + D_2 = 0.7 < 1$, $D_1 + D_2 + D_3 = 1.02 > 1$ 。则首先计算 $Y_{2,si}$, 然后计算 $Y_{1,si} = 10.4 W/m^2 \cdot K$ 。最后把 $Y_{1,si}$, α_i 的值代入 v_i 式, 得 $v_i = 2.08$ 。

(4) 计算 ξ_0 :

$$\xi_0 = \frac{1}{15} (40.5 \sum D + \arctg \frac{Y_{6,se}}{Y_{6,se} + \alpha_e \sqrt{2}} - \arctg \frac{\alpha_i}{\alpha_i + Y_{1,si} \sqrt{2}}), [h]$$

把有关数据代入上式, 得 $\xi_0 = 8.45h$

(5) 计算 ξ_i :

$$\xi_i = \frac{1}{15} \arctg \frac{Y_{1,si}}{Y_{1,si} + \alpha_i \sqrt{2}}, [h]$$

代入 $Y_{1,si}$, α_i 数值, 得 $\xi_i = 1.64h$

(6) 求 ψ

$$\text{根据 } \frac{At_{vc,ss}}{v_0} = \frac{12.75}{26} = 0.49 \text{ 及 } \frac{At_i}{v_i} = \frac{3.86}{2.08} = 1.85 \text{ 之比, 和 } (\varphi t_{vc,ss} + \xi_0) -$$

$$(\varphi t_i + \xi_i) = (13.5 + 8.45) - (16.5 + 1.64) = 3.81h, \text{ 查[3]——表C7, 得 } \psi = 0.91.$$

把上述各项计算数据分别代入 $\bar{\theta}_{b,si}$ 和 $\theta_{b,si,max}$ 式

$$\text{得: } \bar{\theta}_{b,si} = t_e + \frac{t_{vc,ss} - t_i}{R_0 \cdot \alpha_i} = 32.15^\circ C$$

$$\text{及 } \theta_{b,si,max} = \bar{\theta}_{b,si} + \left(\frac{At_{vc,ss}}{v_0} + \frac{At_i}{v_i} \right) \psi$$

$$= 32.16 + (0.49 + 1.85) \times 0.91 = 34.28^\circ C$$

四、对比分析

由表3中所列室外气象数据可知, 除实测水平面太阳辐射强度略大于“规程”的推荐值外, 其它如室外气温的最大值, 平均值以及室外气温日较差均很接近。

实测的面层内表面温度的最大值和平均值均高于计算值, 这是由于实际水平面太阳辐射强度高于计算值之故。

实测的基层内表面温度的最大值, 平均值和振幅均小于计算值。其原因是郑州地区夏季主导风向多为南向, 正对建筑物朝向, 便于进入空气间层。况且室外风速较大, 一般在 $3M/S$ 左右, 更易冷却间层表面的作用。因此, “规程”中有关计算间层综合温度的经验公式

表3 实测值与计算值

	实 测 值	计 算 值
I_{\max}^H	996.7 w/m ²	938.3 w/m ²
$t_{e, \max}$	39℃	38.8℃
$\overline{t_e}$	32.65℃	32.2℃
Δt_e	12.6℃	12.6℃
$\theta_{b, i, \max}$	56.5℃	53.24℃
$A_{\theta_{b, i}}$	14.92℃	17.3℃
$\overline{\theta_{b, i}}$	37.93℃	35.93℃
$\theta_{b, i, \max}$	32.88℃	34.28℃
$\overline{\theta_{b, i}}$	31.32℃	32.15℃
$A_{\theta_{b, i}}$	1.45℃	2.13℃

中, 其系数可能偏高。若能根据当地夏季的风速大小和间层的高度, 使公式中的系数值有一个增减范围, 则更有利于使计算值接近实际情况。

五、结 论

(一) 根据“规程”规定, 在自然通风情况下, 屋盖隔热设计的验算公式是:

$$\theta_{b, i, \max} \leq t_{e, \max}$$

由实测数据可知, $\theta_{b, i, \max}$ (32.88℃) 远远小于 $t_{e, \max}$ (39℃)。不仅如此, 基层内表面温度的最大值, 平均值以及振幅均小于室内气温的最大值, 平均值和振幅, 所以图1所示的通风屋盖的隔热效果在郑州地区是明显的。

(二) 实测的基层内表面温度的最大值和平均值与计算值均较接近, 相对误差分别为4%及2.6%, 这在工程上是允许的。因此, “规程”中所推荐的计算法, 对郑州地区来说是适用的。

(三) 郑州地区冬季日平均温度稳定等于和低于+5℃的天数为102天, 度日数1682。按我国建筑气候分区规定, 郑州地区又属于寒冷地区, 冬季室内需采暖。因此郑州地区所采用的通风屋盖, 夏季既要隔热, 冬季还要有一定的保温性能。不仅在冬季的最冷天屋盖内表面不允许结露, 而且还应具有节省采暖能耗的绝热能力。因此使之成为即隔热又保温的节能型通风屋盖, 这也是今后需要深入研究的问题。

参加1986年夏季热工测试的有宋书全同志及土建系83级、84级等20位同学。

参 考 文 献

- [1] 河南省气象局, 河南气候资料 (1961—1970), 1972年, P.37.
[2] 河南省气象局资料室, 河南地面气候资料 (1971—1980), 1982年, P.55.
[3] 中国建筑科学研究院物理所, 民用建筑热工设计规程, 1985年, PP.77—98.
[4] 丁小中: 建筑环境物理, 重庆建筑工程学院, 1986年, PP.86—94.

ANALYSIS OF INSULATING PROPERTIES OF VENTILATING ROOFS IN THE DISTRICT OF ZHENGZHOU

Zhao Fengtai

(Department of Civil & Architectural Engineering)

Abstract

As the district of Zhengzhou belongs in hot climates, ventilating roofs are gradually used in dwelling houses in order to increase the insulating properties of roofs. This paper introduces the measuring results obtained for the ventilating roofs of finished dwelling houses in the summer of 1986, proves that the insulating properties are good, tests and verifies that the calculating methods recommended in «The Regulation of Civil Building Thermal Design» are applicable. It provides the bases for thermal design to the roofs of dwelling houses in the district of Zhengzhou in the future.

Key words: ventilating roofs, insulating properties, hot climates, air spaces, internal surface temperature.