

## 浮盖式蓄水屋顶隔热功效研究

3  
10-15

丁小中

(重庆建筑大学建筑城规学院 400045)

TU111.41

**摘要** 描述蓄水屋顶的演变过程,推荐隔热效果最优化的浮盖式方案,提出蓄水屋顶动态衰减的新见解,分析影响衰减的主要因素。

**关键词** 蓄水屋顶, 隔热降温, 长波辐射冷却, 水体蓄热, 蒸发耗热, 动态衰减

中图分类号 TU111.41

### 1 浮盖式蓄水屋顶的形成

蓄水屋顶作为水隔热屋面的一种,较之淋水或喷水屋顶有耗水量少(仅为1/50)、设备简单、管理方便及兼有其它功能(保护防水层、蓄水消防)等特点,故工程中多被采用。

蓄水屋顶隔热效果的好坏受多因素制约,如太阳辐射的强弱、空气湿度的高低、室外风速的大小和天空的晴朗程度等。除此之外,蓄水水层厚度将严重地左右水温变化。水层过深,水温上升不易,下降亦难,一旦屋顶成为热面,不仅白天,夜晚也向室内传热,不利于使用;同时,屋顶荷载大增,必然造成结构上不合理、不经济。若水层过浅,在强烈的太阳辐射下,水被加热蒸发,不需几日便会干涸,从而导致蓄水屋顶失去汽化耗热降温的功能。所以欲保证一定厚度的蓄水,必须加设自动供水装置,这样自然也增加了投资及维修。因此,如何改进蓄水屋顶,扬长避短,增强隔热功效,便成为建筑技术工作者多年来努力的目标。

据文载,1926年在广州修建的蓄水屋顶上,就有在水面上架设席棚的做法,以获得良好的隔热效果<sup>[1]</sup>。在北欧(如英国)和我国北方(如山东),为防止冬季蓄水屋顶水体冻胀,损害结构,采取了铺装固定盖板的方案(或在走道板下加保温材料,或用混凝土板)<sup>[2]</sup>。加盖后,夏季,盖板遮挡了太阳辐射,水温变化小,减少了传给室内的热量。在美国,有在蓄水屋顶上设置移动式百页隔热板的工程实例(见图1、图2),即依靠专用的电动机牵引隔热板在屋顶的导轨上来回移动。夏季白天,隔热板盖住蓄水屋顶,阻止太阳辐射加热水体;夜晚,则敞开蓄水屋顶,利用射向太空的长波辐射冷却水体,降低水温,使屋顶形成一个恒冷面,从而改善室内的热环境(据测定,室外气温在40℃以上时,室内气温可保持在28℃左右)。

这种移动式盖板的思路是完全正确的。夏季它白天隔热,夜间冷却,周而复始,循环进行,随着时间的推移,其隔热效果更加显著。同时,显而易见的是对盖板的拖动,需要一套价

收稿日期:1998-06-18

丁小中,男,1942年生,副教授

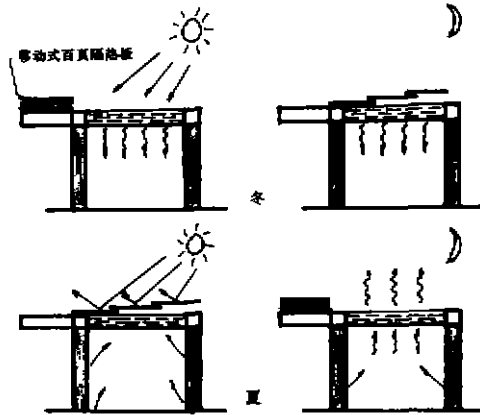


图1 移动式隔热板蓄水屋顶隔热机理

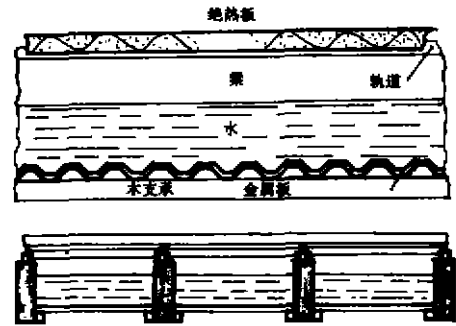


图2 移动式隔热板蓄水屋顶构造

格不菲的装置。实例仅是进深较小的住宅，若遇大进深建筑，保证移动式隔热板夜开昼闭、操作灵活方便的设施肯定要复杂许多，且不允许任何机械事故或人为事故发生，否则盖板该关不关，水层的温度将很快上升，多日长波辐射冷却的效果会前功尽弃（每日长波辐射冷却量为太阳辐射热量的 1/10）。

在中国，对蓄水屋顶的热效应有精辟论述的陈启高先生在七十年代末就提出：“要得到蓄水屋盖在炎热夏季有比较低的水温（包括平均温度及温度振幅），可以采取种植浮生植物对水遮阳的措施。这种措施的效果，在重庆地区最热时可得到比日平均气温 32℃降低 4℃的水温。但是，如何在屋盖的水层中培植浓密的漂浮植物，还须进一步摸索”<sup>[4]</sup>。

浮生植物可视为在水面上形成了浮盖，所以种植浮生植物的蓄水屋顶可称为浮盖式蓄水屋顶。但种植何物颇有考究，一般的浮萍过稀过薄，于隔热无补；虽茂密的水葫芦遮热不错，但随风漂移，使浮盖时有时无，影响最终功效。

笔者遵循多种隔热方案综合使用的原则，提出把屋顶浅色外表面处理和蓄水屋顶结合的设想，即在水面上放置白色漂浮物（实验系用 0.5 cm 厚白色钙塑板）板板相扣，连接成片，构成浮盖。这样处理的好处是：

- 1) 浅色外表面对太阳辐射的吸收系数  $\rho_a$  值较清水的 0.9 大大减小，大部分太阳辐射热被反射，从而大大降低了室外综合温度；
- 2) 多孔的泡塑具有一定的热阻，增加了阻止热量传递的能力；
- 3) 水面虽有浮盖，但缝隙存在，水的汽化依旧进行，继续冷却水体。另外，若在泡塑上凿洞种植植物，植物叶面的蒸腾亦能取得好的效果；
- 4) 夜间，与水面直接接触的白色浮盖又成为向外长波辐射的黑体，其辐射强度与无盖的水面等同；
- 5) 浮盖式方案的最大优点是不需专用的设备，不需一日两次的开关，不需专人守护，而移动式隔热板所具备的白天隔热和夜间冷却的功能完全得以实现。

综上所述：由浮生植物和白色漂浮物形成的浮盖式蓄水屋顶最适合夏季隔热为主的地区使用。被《民用建筑热工设计规范》推荐为围护结构有效的隔热措施之一<sup>[5]</sup>。

## 2 浮盖式蓄水屋顶的热工计算

对蓄水屋顶上的热作用进行分析,计有太阳辐射热  $q_{\odot}$ 、大气长波辐射热  $q_L$ 、环境辐射热  $q_r$ 、室外空气的对流换热  $q_c$ 、水蒸发的汽化耗热  $q_m$ 、水层与结构的蓄热  $q_i$  和向室内的传热  $q_i$  等,且几部分热量在屋顶上达到热平衡(图 3)。有:

$$q_{\odot} = q_L + q_r + q_c + q_m + q_i + q_i \quad (1)$$

把各热量的计算式代入(1)式后,经整理可得

$$K_m t_w + I dt_w/d\tau = q_{\odot} + Q_i \quad (2)$$

式中:  $K_m$ ——蓄水屋顶的广义换热系数( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$$K_m = \alpha_L + \alpha_r + \alpha_c + \alpha_m + K_j \quad (3)$$

$\alpha_L$ ——大气长波辐射换热系数

$\alpha_r$ ——水面与环境辐射换热系数

$\alpha_c$ ——水面与室外空气对流换热系数

$\alpha_m$ ——蒸发散热温度系数

$K_j$ ——结构的传热系数

$t_w$ ——蓄水屋顶水层温度( $^\circ C$ )

$I$ ——水层和结构的热容量( $W_s/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$Q_i$ ——热环境综合参数( $W/m^2$ )

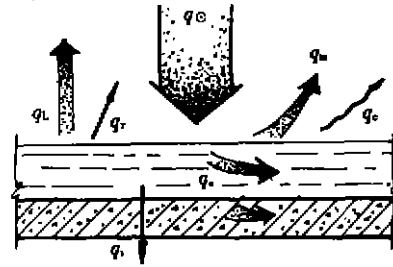


图 3 蓄水屋顶的热平衡

$$Q_i = (0.979\alpha_L + \alpha_r + \alpha_c) t_w + H_0 + K_j t_i \quad (4)$$

$t_w$ ——室外空气温度,  $H_0$ ——与温度无关之参数,  $t_i$ ——室内空气温度。

微分方程(2)可写成:

$$dt_w/d\tau + (K_m/I)t_w = q_{\odot}/I + Q_i/I \quad (5)$$

(5)式的一般解是微分方程(6)

$$dt_w/d\tau + (K_m/I)t_w = 0 \quad (6)$$

之解,且此解为  $t_w = C \exp(-\lambda\tau)$ ,  $C$  为任意常数,  $\lambda$  是待定特征量,将此解代入(6)式,则

$$\lambda = K_m/I \quad (7)$$

如果将  $C$  代为其函数  $U(\tau)$ ,应满足(5)式,其特解是:

$$t_w = U(\tau) \exp(-\lambda\tau) \quad (8)$$

为确定  $U(\tau)$ ,将(8)式对时间  $\tau$  求导:

$$dt_w/d\tau = -\lambda U(\tau) \exp(-\lambda\tau) + [dU(\tau)/d\tau] \exp(-\lambda\tau) \quad (9)$$

把(8)式和(9)式代入(5)式,得:

$$dU(\tau)/d\tau = [(q_{\odot} + Q_i)/I] \exp(\lambda\tau) \quad (10)$$

对(10)式积分,有

$$U(\tau) = \int_0^{\tau} [(q_{\odot} + Q_i)/I] \exp(\lambda\tau) d\tau \quad (11)$$

把(11)式代入(8)式,得微分方程(5)的特解:

$$t_w = \exp(-\lambda\tau) \int_0^{\tau} [(q_{\odot} + Q_i)/I] \exp(\lambda\tau) d\tau \quad (12)$$

将其中与时间有关的参数用指数函数表示,则:

$$\begin{aligned} t_w &= \exp(-\lambda\tau) \int_0^\tau [(\Theta_{0K} + \Theta_{QK})/I] \exp(iK\omega\tau) \exp(\lambda\tau) d\tau \\ &= (\Theta_{0K} + \Theta_{QK}) \exp(iK\omega\tau) / (\lambda + iK\omega) I [1 - \exp(-\lambda\tau)] \end{aligned}$$

把(7)式代入(13)式

$$t_w = (\Theta_{0K} + \Theta_{QK}) \exp(iK\omega\tau) / (K_m + iK\omega) I [1 - \exp(-K_m/I \tau)] \quad (14)$$

根据谐波向量的复数表示,则:

$$t_w = (\Theta_{0K} + \Theta_{QK}) \exp(iK\omega\tau - \Phi_K) / \{K_m [1 + K\omega(I/K_m)]^2\}^{1/2} [1 - \exp(-K_m/I \tau)] \quad (15)$$

$$= (\Theta_{0K} + \Theta_{QK}) \exp(iK\omega\tau - \Phi_K) / \beta_K [1 - \exp(-K_m/I \tau)] \quad (16)$$

其中:  $\beta_K$ ——蓄水屋顶热流振幅衰减值:

$$\beta_K = \{K_m [1 + K\omega(I/K_m)]^2\}^{1/2} = [K_m^2 + (K\omega I)^2]^{1/2} \quad (17)$$

$\Phi_K$ ——蓄水屋顶相位延迟角:

$$\Phi_K = \arctan(K\omega I / K_m) \quad (18)$$

随着时间的推移,  $\tau \rightarrow \infty$ , 则  $1 - \exp(-K_m/I \tau)$  为 1。(15)式是正指数函数,同理可求负指数函数,按指数函数的运算,最后取余弦函数的解为:

$$\Theta_i = (\Theta_{0K} + \Theta_{QK}) / \beta_K e^{-i\Phi_K} \quad (19)$$

式中  $K = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$

一旦选定了屋面结构和水层深度,连同室内外的相关热参数,一并代入(17)式、(18)式,就可得到该蓄水屋顶温度波的衰减值和相位延迟角。如对于热阻为  $0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$  的钢筋混凝土屋面,其上有 100 mm 厚的水层,它的  $\beta_K$  和  $\Phi_K$  如表 1 所示。

表 1

谐波数 K	0	1	2	3	4	5
$\beta_K$	72.40	78.88	95.73	118.59	144.66	172.48
$\Phi_K$ (度)	0	23.38	40.86	52.38	59.97	65.18
$\Phi_K$ (弧度)	0	0.408 0	0.713 1	0.914 2	1.046 6	1.137 6
延迟小时	0	1.558 7	1.362 0	1.164 0	0.999 5	0.869 0

根据  $K_m$  和  $K\omega I$  值,可用直观的图表示  $\beta_K$  和  $\Phi_K$  (图 4)。

由(图 4)可知:

$$\beta_0 = K_m = \beta_K \cos \Phi_K$$

或  $\Phi_K = \arccos(\beta_0 / \beta_K) \quad (20)$

已知各阶的相角  $\Phi_K$ , 能方便地求出各阶之  $\beta_K$ , 反之亦然。

### 3 工程计算实例

现在通过对重庆地区浮盖式蓄水屋顶的热工计算,可清楚地看到其隔热功效。

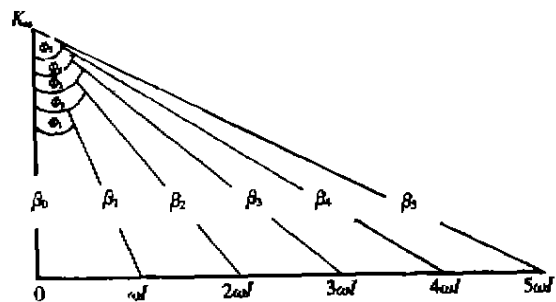


图 4 温度波衰减值  $\beta_K$  和相位延迟角  $\Phi_K$

1) 蓄水屋顶广义换热系数  $K_w$ 

$$K_w = \alpha_L + \alpha_r + \alpha_c + \alpha_H + K_f \\ = 6.74 + 5.8 + 10.8 + 45.8 + 3.26 = 72.4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

2) 蓄水屋顶水层(100 mm)及结构蓄热  $I$ 

$$I = I_w + I_r = 418\ 680 + 11\ 880 = 430\ 560 \text{ W}_s/\text{m}^2 \cdot \text{°C}$$

3) 北纬 30° 的太阳辐射热  $q_{\odot}$  ( $\rho_s = 0.15$ )

$$q_{\odot} = 50.31 - 76.76\cos 15\tau + 28.78\cos 30\tau$$

4) 热环境综合参数  $Q_i$ 

$$Q_i = (0.979\alpha_L + \alpha_r + \alpha_c) t_w + H_0 + K_f t_i \\ = (0.979 \times 6.74 + 5.8 + 10.8) [32 + 7\cos(15\tau - 225^\circ)] + 1\ 174.6 + 3.26 \times 28 \\ = 2\ 007.95 - 162.3\cos(15\tau - 225^\circ)$$

5)  $q_{\odot}$  的衰减量

$$\textcircled{1}_{\odot x} / \beta_K e^{-\omega} = 0.69 - 0.973\cos(15\tau - 23.23^\circ) + 0.3\cos(30\tau - 40.86^\circ)$$

6)  $Q_i$  的衰减量

$$\textcircled{1}_{QK} / \beta_K e^{-\omega} = 27.73 - 2.05\cos(15\tau - 248.38^\circ)$$

7) 浮盖式蓄水屋顶水温  $t_w$ 

$$t_w = 28.42 + 3.1\cos(15\tau - 265^\circ) + 0.3\cos(30\tau - 40.86^\circ)$$

说明浮盖式屋顶很好地控制了水温,为夏季的室内创造了一个舒适的热环境。

## 4 讨论与结论

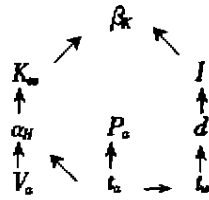
1) 夏季房屋隔热重要的一点在于设法减弱室外热作用,其次才是增大结构的衰减度,控制房屋内表面温度,最终改善室内微气候。

2) 从(17)式可知,蓄水屋顶的衰减值有别于一般实体结构。一般结构在定好材料及构造层次后,衰减值便是一个固定值。但蓄水屋顶因为有水,而在太阳辐射加热蒸发和供水(天然或人工)的过程中,水的多少在变化,所以其衰减值是动态的。

$\beta_K$  值的大小取决于  $K_w$  和  $I$ 。从  $K_w$  的表达式中知,在各因素中蓄水屋顶蒸发散热的温度系数  $\alpha_H = \alpha_m I \varepsilon_1 / P_0$  起主导作用,通常,其量值占 60% 的份额。其中质交换系数  $\alpha_m$  是风速的函数,饱和蒸汽压力在某温度处的温度系数  $\varepsilon_1$  是空气温度的函数,所以在室外风速大、气温高的地区采用蓄水屋顶,其广义换热系数大,衰减值大。

$I$  值主要依水层厚度而定。由于太阳辐射,水温升高,水份蒸发,这时出现两种情况:一是汽化潜热带走热量,水温降低,相当于减弱了太阳辐射热;二是水层厚度减小, $I$  值随之减小,但对衰减值带来的影响,并不成 1:1 的关系。当水层厚度由 200 mm 减到 100 mm,  $\beta_K$  约减小 20% 左右。由此看来,把增大蓄水屋顶的衰减度的希望寄托在加厚水层上是不妥的。

对  $\beta_K$  的影响因素见图 5。



- $\beta_k$ —蓄水屋顶温度波衰减值;
- $K_w$ —蓄水屋顶广义换热系数;
- $I$ —蓄水屋顶总蓄热量;
- $\alpha_e$ —蒸发散热温度系数;
- $d$ —水层厚度; $p$ —水蒸汽分压力;
- $v$ —室外风速; $t_a$ —室外气温; $t_w$ —水体温度。

图5

3) 衰减相对来说是被动的, 主动削弱太阳辐射的作用, 最有效的办法是遮阳。浮盖式蓄水屋顶 (不论是浮生植物或泡塑形成的) 极大地改变了水面对太阳辐射的吸收系数,  $\beta = 0.15$ , 仅为净水面吸收系数的  $1/6$ 。其优良的隔热效果已为实践所证明。

浮盖式蓄水屋顶克服了盖板式蓄水屋顶没有汽化耗热和长波辐射冷却水体的缺陷; 解决了移动盖板式蓄水屋顶耗资多、设备复杂、管理麻烦的弊端。另外, 水面种植的植被改善了环境质量, 增加经济效益等也是盖板式所不具备的。因此, 我们完全可以得出浮盖式蓄水屋顶不失为有效隔热措施之一的结论。

### 参 考 文 献

- 1 建研院建筑物理室编. 炎热地区建筑降温. 北京: 中国工业出版社, 1965
- 2 建筑设计资料集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994
- 3 Solar Energy: Fundamentals in Building Design, 1977
- 4 陈启高. 蓄水屋盖的热工计算理论. 重庆建筑工程学院, 1979
- 5 国家技监局、建设部. 民用建筑热工设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993
- 6 陈启高. 建筑热物理基础. 西安: 西安交通大学出版社, 1991

## Study on Thermal Effects of Ponding Roof with Floating Insulators

Ding Xiaozhong

(Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jianzhu University, 400045)

**Abstract** This paper describes the evolution of ponding roofs, and recommends a kind of ponding roof covered by floating insulators, which has excellent thermal performance. A new opinion on dynamic thermal decrement is presented, and its main influencing factors are analyzed.

**Key Words** ponding roof, cooling by longwave radiation, thermal storage in water, heat loss by evaporation, dynamic decrement

(编辑: 袁 江)