

文章编号:1000-582X(2002)08-0011-03

蓄水屋面的传热特性动态分析*

刘玉东,童明伟

(重庆大学 动力工程学院,重庆 400044)

摘要:建筑物的屋面是外围护结构中受室外热作用影响最大的部位,在屋面上蓄上一定深度的水后,增大了蓄水屋面传热分析的复杂性。在对蓄水层的热湿交换机理进行理论分析的基础上,建立了蓄水屋面的传热数学模型,用传递函数法得出了蓄水屋面温度和热流的动态响应。结果表明,蓄水层大大降低了屋顶内表面的温度和热流输出,具有很好的隔热和节能效果。

关键词:蓄水屋面;传递函数;温度;热流响应

中图分类号:TU111.4

文献标识码:A

我国大部分地区属湿热性气候,全年气温变化幅度大,干湿交替频繁。晴日高温干燥和雨日低温潮湿交替出现。气候的急剧变化使建筑平屋面的隔热成为一个难题。上世纪60年代以来,平屋面隔热设计中出现了两项技术。一种是种植屋面,一种是蓄水屋面。这两种屋面在建筑隔热、节能两方面都取得了一定成效。但对于前者,由于土壤层散热慢,传热的延迟时间较长,使种植屋面在白天的隔热效果较好,而到了晚上,土壤层吸收的热量向室内散发,这时土壤层就成了一个散热源,使夜间室内的气温迟迟不能降低,空调冷负荷增加。对于蓄水屋面,由于一般是在混凝土刚性防水屋面上蓄水,既可利用水层隔热降温,又改善了混凝土的使用条件:1)避免了直接暴晒和冰雪雨水引起的急剧伸缩;2)长期浸泡在水中有利于混凝土后期强度的增长;3)由于混凝土有的成分在水中继续水化产生湿胀,因而水中的混凝土有更好的防渗水性能;4)蓄水的蒸发和流动能及时地将热量带走,减缓了整个屋面的温度变化;5)由于在屋面上蓄上一定厚度的水,增大了整个屋面的热阻和温度的衰减倍数,从而降低了屋面内表面的最高温度。因此,由于上述优点,蓄水屋面现在已经被大面积推广采用。但是,要设计一个隔热性能好,又节能的蓄水屋面,必须对它的传热特性进行动态分析和计算,以确定蓄水的深度。笔者对此进行了理论分析。

1 屋面不稳定传热模型的建立

建筑屋面的传热是一种很复杂的物理现象,一方面,它包括屋顶表面的吸热、放热和结构本身的导热3个基本过程^[1-2],而且,这些过程本身又涉及导热、对流和辐射3种基本传热方式;另一方面,由于室外空气温度和太阳辐射强度等气象条件随季节和昼夜不断变化,而且室内空气温度和屋顶表面的热状况也随室内用具、供暖与空气调节设备的形式和运行条件而不断变化^[3-4],因此,屋面的传热是一个复杂的不稳定传热过程。

所研究的物理模型见图1。

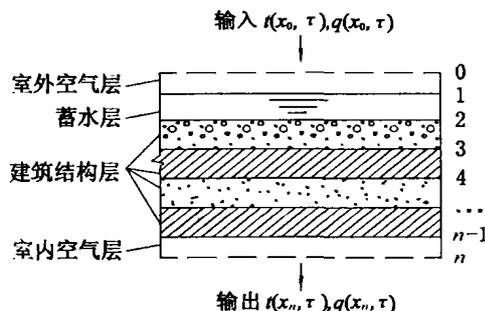


图1 蓄水屋面的传热物理模型

根据传热学基本理论,如果屋面的长度和宽度是厚度的8~10倍,按一维导热处理时,其计算误差不大于1%。因此,其传热过程就可以用一维导热微分方程和傅立叶导热定律来描述,即

* 收稿日期:2002-03-10

作者简介:刘玉东(1972-),男,重庆忠县人,重庆大学讲师,博士研究生。主要从事户式中央空调系统及汽车空调研究。

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

$$q(x, \tau) = -\lambda_i \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \quad (2)$$

$$t(x, 0) = 0, \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad i = 0, 1, \dots, n$$

$$a_i \text{ 为各层材料的导温系数, } a_i = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i}, \text{ m}^2/\text{h}$$

$$\lambda_i \text{ 为各层材料的导热系数, W/m} \cdot \text{K}$$

$$c_i \text{ 为各层材料的比热, kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\rho_i \text{ 为各层材料的密度, kg/m}^3$$

$t(x, \tau)$ 和 $q(x, \tau)$ 分别代表温度和热流。

运用上面的数学模型进行传热分析之前, 对水层与室外空气之间的热湿交换应作特别处理。因为水层除了与空气和其下面一层材料有显热交换外, 还与空气之间存在质交换, 即潜热交换, 这一潜热交换表现为水的蒸发, 蒸发过程中要吸收大量的汽化潜热; 同时, 在水层内部还存在热对流和导热两种传热方式。这与建筑结构其它材料层的传热特性不同。因此, 对水层应单独处理, 建立相应的传热数学模型。

如果忽略水层与周围物体间辐射换热的影响, 且保持水层表面周围的空气不滞留, 即在夏季自然通风条件下, 当空气的温度大于水的初温时, 通过温差传热空气传递给水的热量, 一部分用于水的蒸发, 另一部分用于增加水层的温度, 即单位时间内空气传递给水的热量必定等于水蒸发所需的热量加上水层内能的增量^[5]:

$$a[t(x_a, \tau) - t(x_0, \tau)] = q_v + x_1 c_1 \rho_1 [t(x_0, \tau) - t(x_0, 0)] \quad (3)$$

式中 $t(x_0, 0)$ 为水表面的初始温度, 为方便起见, 令 $t(x_0, 0) = 0$ 。解式(3)得

$$t(x_0 - \tau) = t(x_a, \tau) \frac{x_1 c_1 \rho_1}{a + x_1 c_1 \rho_1} - \frac{q_v}{a + x_1 c_1 \rho_1} \quad (4)$$

$$\text{令 } A = \frac{x_1 c_1 \rho_1}{a + x_1 c_1 \rho_1}, B = \frac{q_v}{a + x_1 c_1 \rho_1}$$

$$\text{则 } t(x_0, \tau) = t(x_a, \tau) - At(x_a, \tau) - B \quad (4')$$

$t(x_0, \tau)$ 为水表面温度, $t(x_a, \tau)$ 为室外空气温度, $q(x_0, \tau)$ 为水表面的热流输入, $q(x_a, \tau)$ 为室外空气的热流输入。因为 $0 < A < 1, B > 0$, 所以 $t(x_0, \tau) < t(x_a, \tau)$, 即水和室外空气经过热湿交换后, 水表面上的温度输入有所衰减。而 $q(x_0, \tau) = q(x_a, \tau)$ 。a 为空气与水表面的显热交换系数, ρ_1 为水的密度, c_1 为水的比热, x_1 为水层的深度, q_v 为水的蒸发潜热^[4],

$$q_v = r\beta(p_{q,b} - p_q)F \frac{B}{B'}$$

r 为水表面温度下水的气化潜热 J/kg;

p_q 为空气中水蒸气分压力 Pa;

F 为蒸发水面的表面积 m^2 ;

β 为蒸发系数 $\text{kg/N} \cdot \text{s}$;

B 为标准大气压 $B = 101\,325 \text{ Pa}$;

B' 为当地实际大气压 Pa;

v 为水表面上周围空气流速 m/s ;

α 为不同水温下的扩散系数, $\text{kg/N} \cdot \text{s}$ 。

2 屋面的传递矩阵

先计算蓄水层的传递矩阵。对式(1)两端的时间变量 τ 进行拉氏变换^[6], 得

$$a_1 \frac{d^2 T(x, s)}{dx^2} - sT(x, s) = 0 \quad (5)$$

$T(x, s)$ 为 $t(x, \tau)$ 的拉氏变换。对(5)式的空间变量 x 进行拉氏变换并整理, 得

$$F(p, s) = \frac{a_1 p}{a_1 p^2 - s} T(0, s) + \frac{T'(0, s)}{a_1 p^2 - s}$$

再对 $F(p, s)$ 中的参数 p 进行拉氏逆变换, 得

$$T(x, s) = \text{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) T(0, s) + \frac{1}{\sqrt{\frac{s}{a_1}}} \text{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) T'(0, s) \quad (6)$$

对式(2)两端的时间变量 τ 进行拉氏变换, 原方程变为

$$Q(x, s) = -\lambda_1 T'(x, s) \quad (7)$$

$Q(X, S)$ 为 $q(x, \tau)$ 的拉氏逆变换。当时 $x = x_0$ 时,

$$T'(x_0, s) = -\frac{Q(x_0, s)}{\lambda_1} (x_0 = 0), \text{ 代入式(6), 就得到水层}$$

中任意部位 x 处的温度变化与边界状态的关系式:

$$T(x, s) = \text{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) T(x_0, s) - \frac{1}{\lambda \sqrt{\frac{s}{a_1}}} \text{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) Q(x_0, s) \quad (8)$$

对式(8)关于 x 求导, 得

$$T'(x, s) = \sqrt{\frac{s}{a_1}} \text{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) T(x_0, s) - \frac{1}{\lambda} \text{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) Q(x_0, s)$$

将之代入式(7), 就得到水层中任意部位 x 处的热流变化与边界状态的关系式:

$$Q(x, s) = -\lambda \sqrt{\frac{s}{a_1}} \text{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) T(x_0, s) +$$

$$\operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) Q\left(x_0, s\right) \quad (9)$$

将(8)式和(9)式写成如下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} T(x, s) \\ Q(x, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) & \lambda_2 \sqrt{\frac{s}{a_1}} \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) \\ \lambda_2 \sqrt{\frac{s}{a_1}} \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) & \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} x\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T\left(x_0, s\right) \\ Q\left(x_0, s\right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G_i = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_i}} x\right) & -\frac{1}{\lambda_i \sqrt{\frac{s}{a_i}}} \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_i}} x\right) \\ \lambda_i \sqrt{\frac{s}{a_i}} \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{s}{a_i}} x\right) & \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{s}{a_i}} x\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

于是,对整个屋面,包括蓄水层在内的各层边界处温度和热流的拉氏变换之间的关系为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T\left(x_1, s\right) \\ Q\left(x_1, s\right) \end{bmatrix} &= G_1 \begin{bmatrix} T\left(x_0, s\right) \\ Q\left(x_0, s\right) \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} T\left(x_2, s\right) \\ Q\left(x_2, s\right) \end{bmatrix} &= G_2 \begin{bmatrix} T\left(x_1, s\right) \\ Q\left(x_1, s\right) \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} T\left(x_3, s\right) \\ Q\left(x_3, s\right) \end{bmatrix} &= G_3 \begin{bmatrix} T\left(x_2, s\right) \\ Q\left(x_2, s\right) \end{bmatrix}, \\ &\dots\dots \\ \begin{bmatrix} T\left(x_n, s\right) \\ Q\left(x_n, s\right) \end{bmatrix} &= G_n \begin{bmatrix} T\left(x_{n-1}, s\right) \\ Q\left(x_{n-1}, s\right) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

最终得到

$$\begin{bmatrix} T\left(x_n, s\right) \\ Q\left(x_n, s\right) \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} T\left(x_0, s\right) \\ Q\left(x_0, s\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$G = G_n G_{n-1} \cdots G_3 G_2 G_1$, 为蓄水屋面的总传递矩阵。对式(4')两边的变量 τ 进行拉氏变换,得

$$T\left(x_0, s\right) = T\left(x_0, s\right) - AT\left(x_a, s\right) - \frac{B}{s} \quad (13)$$

$$\text{因为} \quad Q\left(x_0, s\right) = Q\left(x_a, s\right) \quad (14)$$

将式(13)和式(14)带入式(12),得

$$\begin{bmatrix} T\left(x_n, s\right) \\ Q\left(x_n, s\right) \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} T\left(x_0, s\right) \\ Q\left(x_0, s\right) \end{bmatrix} - G \begin{bmatrix} AT\left(x_a, s\right) + \frac{B}{s} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(15)即为蓄水屋面温度和热流响应的拉氏变换计算公式,其中 $T\left(x_a, s\right)$ 为室外空气温度的拉氏变换, $Q\left(x_a, s\right)$ 为相应热流的拉氏变换, $T\left(x_n, s\right)$ 和

$Q\left(x_n, s\right)$ 为屋顶内表面温度和热流的拉氏变换。要得到 $t\left(x_n, \tau\right)$ 和 $q\left(x_n, \tau\right)$ 的表达式,只需对式(15)作拉氏逆变换即可。本文不给出这一逆变换的通用表达式。针对具体问题,简单的办法是先将已知条件 $t\left(x_a, s\right)$ 和 $q\left(x_a, s\right)$ 带入式(15),化简后再求 $T\left(x_n, s\right)$ 和 $Q\left(x_n, s\right)$ 的拉氏逆变换 $t\left(x_n, \tau\right)$ 和 $q\left(x_n, \tau\right)$ 。

对于非蓄水屋面,按照与前面相同的步骤推导,得

$$\begin{bmatrix} T'\left(x_n, s\right) \\ Q'\left(x_n, s\right) \end{bmatrix} = G' \begin{bmatrix} T\left(x_a, s\right) \\ Q\left(x_a, s\right) \end{bmatrix} \quad (15')$$

G' 为非蓄水屋面的总传递矩阵, $G' = G_n G_{n-1} \cdots G_3, G_2, G_1$, 其中 $G_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{a_a} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, a_a 为屋顶外表面空气层的

导温系数或热扩散系数。在总传递矩阵 G' 和 G 中,除了 G_1 不同之外,其余各项均相同。比较式(15)和式(15'),在式(15)右边多减去了一个恒为正值项,其传热响应的拉氏变换值比式(15')要小;相应地,其拉氏逆变换的值也要小。这说明在相同的定解条件下,蓄水屋面比非蓄水屋面使屋顶内表面的温度输出和热流响应要降低得更多,受室外扰动的干扰较小,具有很好的隔热和节能效果。

3 结 论

建筑物的屋面是外围护结构中受室外热作用影响最大的部位,在屋面上蓄上一定深度的水后,增大了传热热阻和散热能力。运用笔者提出的传热分析方法,得出的温度和热流响应的计算公式,定量地体现了蓄水屋面隔热降温的性能,其中水的蒸发散热起了关键作用。水层越深,隔热效果越好。为了使屋面上能保持一定的水量,需要安装自动补水装置,避免因蓄水层干涸而影响隔热效果。

参考文献:

- [1] 彦启森,赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京:中国工业出版社,1991.
- [2] 陈启高. 建筑热物理基础. 西安:西安交通大学出版社,1991.
- [3] 曹叔维. 房间热过程和空调负荷[M]. 上海:上海科技文献出版社,1991.
- [4] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 北京:中国工业出版社,1998.
- [5] ASHRAE. Ashrae hand book, fundamentals[M]. Atlanta: Ashrae inc, 1985.
- [6] 郑钧. 线性系统分析[M]. 北京:科学出版社,1979.

(下转第 17 页)

- [3] 刘志俭. MATLAB 应用程序接口用户指南[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 费培之. 图和网络及其应用[M]. 成都: 四川大学出版社, 1996.
- [5] 付祥钊. 流体输配管网[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] 徐瑞龙. 通风网路理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.

Primary Research about the Analysis of Pipe-network for Fluid Supply by MATLAB

XIAO Yi-min, FU Xiang-zhao

(College of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In the domain of HV&AC, there are many problems about pipe-network for fluid supply. In order to make analysis on optimized design and project of regulation in operation, some quantitative analysis on hydraulic performances of pipe-network should be done. With graph theory and fundamental theory of pipe-network for fluid supply. Based on the analysis method of basic loop of pipe-network, a convenient, reliable description technique is introduced which could translate pipe system into network graph, and obtains some methods which could get some basic matrix that is needed in pipe network analysis from the graph of pipe network. This article also analyses MATLAB's function, high efficiency in solving the problems of pipe network analysis and develops relevant program.

Key words: graph theory; pipe-network for fluid supply; analysis

(责任编辑 姚 飞)

(上接第 13 页)

Dynamic Heat Transfer Analysis of a Water Storage Roof

LIU Yu-dong, TONG Ming-wei

(College of Thermal Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: On the basis of analyzing the complicate heat and humid exchange between the outdoor air and the water layer of the roof, the authors obtained a heat transfer model and its transmit matrix. The temperature and heat flux responses of the internal roof surface is greatly lowered than that of non-water layer roof. It can be concluded that the maintenance of a water layer on the roof is a good way to resist the fluctuation of outdoor temperature and significantly reduce the cooling load of a building.

Key words: water storage roof; transfer function; temperature; heat flux responses

(责任编辑 张 苹)