

# 连栋温室热水供热系统散热管道传热系数的计算与测试

蔡龙俊, 冯哲隼

(同济大学现代农业科学与工程研究院)

**摘要:** 设施农业是我国现代化进程中的一个重要内容, 现代化温室作为设施农业的标志, 正在受到大力发展和重点研究, 为了对温室热水供热系统散热管道的热工性能进行研究和测试, 论文主要进行了以下工作: 对温室热水供热系统散热管道的热工性能进行理论分析和计算; 在密闭小室内, 对温室散热管道热工性能进行实际测试。通过理论计算与实际测试, 得出了散热管道传热系数的实验公式, 并分析了可信性与影响因素。

**关键词:** 连栋温室; 热水供热系统; 散热管道; 光管传热系数

中图分类号: TU 261

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)02-0196-04

## 1 引言

设施农业是在人为可控环境保护设施下的农业生产。目前已由简易塑料大棚、简易温室发展到具有人工环境控制设施的自动化、机械化程度很高的现代化大型温室和植物工厂。现代化的大型温室, 通常是占地面积较大的连栋温室。冬季, 为保证温室内作物的正常生长, 温室内需设置供热系统, 以维持温室内合适的温度。温室供热系统常采用两种型式。一种是热水供热系统, 另一种是热风供热系统。热水供热系统常采用散热管道作为散热元件, 它具有蓄热量大, 热稳定性好, 温室内温度场较均匀等优点。因而被广泛采用。散热管的热工性能参数是热水供热系统设计的基本数据。据初步调查, 国内连栋温室热水供热系统散热管道的设计大多凭经验套用, 造成有些温室散热管布置数量偏少, 达不到供热效果; 有些则布置过多, 引起不必要的浪费。而供热系统的初投资在温室工程中占了一定比例(根据笔者的工程实践, 约占初投资的 20%~30%); 散热系统的运行费用则在温室总运行费用中, 占了很大比例。

本文将通过研究农业温室最常用的以热水为热媒以管道为散热设备的供热系统的热工性能参数, 为农业温室供热系统的设计提供经济、可靠的技术参数。

## 2 连栋温室供热系统的型式

### 2.1 采用管道散热的热水供热系统的型式

#### 2.1.1 系统原理图

供热系统的原理图见图 1。

#### 2.1.2 散热管道的材质与外形

散热管道按管道材质分类, 可分为钢管和 PVC 管道。

钢管的优点是耐压高, 管壁导热热阻小; 缺点是易腐蚀。

PVC 管优点是耐腐蚀, 缺点是管壁导热热阻较大。散热管道外形有光管与圆翼形管道。

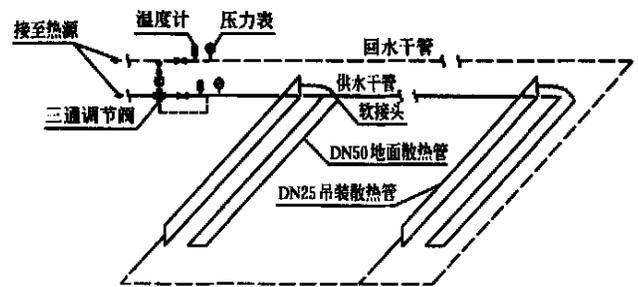


图 1 供热系统原理图

Fig 1 Schematic diagram of heating system

采用圆翼形散热管, 虽与光管相比, 换热系数有一定提高, 但也增加了初投资。因此实际工程仍多采用光管散热管。

### 2.2 散热管道布置方式

#### 2.2.1 蔬菜种植区散热管道的布置方式

蔬菜种植区散热管道的布置方式见图 2。地面散热管水平布置在田垄之间的人行道上, 管径通常为 DN 50; 管道中心离地面约 150 mm; 地面散热管还可作为采摘果实手推车的导轨, 一举两得。在种植蔬菜的中间位置, 垂直吊装 2 根散热管道, 管径通常为 DN 25。吊装散热管的高度可随作物生长情况而调整。如蔬菜种植初期, 吊装高度约 0.5 m; 蔬菜结果时吊装管高度约 1.50~1.70 m。

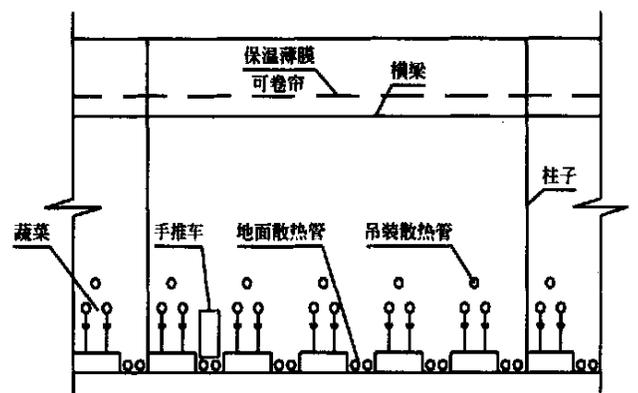


图 2 散热管布置示意图(种植蔬菜)

Fig 2 Schematic diagram of heating pipe layout (vegetable area)

收稿日期: 2002-05-20 修订日期: 2002-12-20

作者简介: 蔡龙俊, 副教授, 上海市四平路 1239 号 同济大学机械学院, 200092。Email: CaiLongjun@263.net

### 2.2.2 花卉区或育苗区散热管道的布置方式

花卉区或育苗区常采用花架或苗床, 散热管道布置方式见图 3。苗床(或花架)的高度  $H = 0.5\text{m}$ ; 散热管道敷设在下部, 苗床(或花架)应有足够的间隙, 以保证散热管道的气流均匀的掠过盆栽花卉区或苗区, 向上浮升, 如果散热量不够, 也可以在柱上布置散热管。

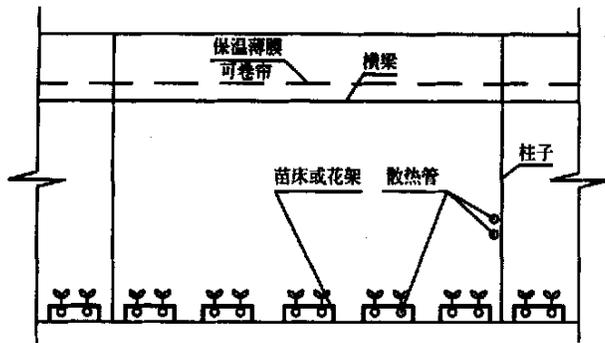


图 3 散热管道布置示意图(种植花卉或育苗)

Fig. 3 Schematic diagram of heating pipe layout (flower or seedling area)

### 2.3 散热管热水供热系统的特点

一般热水管道加热系统都采用同程式系统以保证系统阻力平衡和水力工况稳定。这一系统形式为保持热力工况稳定和室内温度场均匀创造了良好基础。与其他供热散热器相比, 散热管道的有效辐射面积大, 所以辐射换热量占总换热量的比例也略高。这有利于温室内作物的生长。

## 3 温室散热管道热工性能的理论分析

### 3.1 计算的原始数据

计算的原始参数如下:

温室内冬季植物所需的设计温度, 不同的植物, 温度要求不同。冬季室内的计算温度: 蔬菜区  $t_n = 14$ ; 花卉区  $t_n = 18$ ; 育苗区  $t_n = 20$ 。

设计供水温度, 考虑到温度太高会伤害作物, 直取  $t_g = 80$ ; 设计回水温度, 取  $t_h = 55$ 。

### 3.2 理论分析及计算

#### 3.2.1 基本计算公式

散热管的散热特性与供暖散热器的放热特性有相同之处, 也有不同之处。相同之处是管外表面以自然对流放热为主, 不同之处是散热器辐射换热占的比例较少。根据文献[1], 圆管的  $K$  值计算式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{D}{d_n} \right) \right) + \frac{1}{\alpha_r}} \quad (1)$$

式中  $\alpha_w$  —— 散热管外表面的复合换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\alpha_r$  —— 散热管内表面的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $D$  —— 散热管道外径,  $\text{m}$ ;  $d_n$  —— 散热管道内径,  $\text{m}$ ;  $\lambda$  —— 散热管导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

对于薄壁的散热管, 根据传热学的基本原理, 可认

为

$$K = \alpha_w$$

散热管外表面的复合换热系数

$$\alpha_w = \alpha_c + \alpha_r \quad (2)$$

式中  $\alpha_c$  —— 对流换热系数;  $\alpha_r$  —— 辐射换热系数。

#### 3.2.2 对流换热系数的分析与计算

散热管外是自然对流换热。对流换热系数  $\alpha$  可根据下式计算出

$$\alpha = N u_w \frac{\lambda_w}{D} \quad (3)$$

式中  $N u_w$  —— 管外空气的努谢尔特准则, 无因次;  $\lambda_w$  —— 空气导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

根据文献[1] 推荐的关联式

$$N u_w = C (G r_w \cdot P r_w)^n \quad (4)$$

式中  $G r_w$  —— 管外空气的格拉肖夫准则, 无因次, 表征自然对流的流态对换热的影响;  $P r_w$  —— 管外空气的普朗特准则, 无因次;  $C, n$  —— 实验确定的常数。

现取花卉区的设计温度  $t_n = 18$ 。各参数计算后得: 温室内壁温度  $t_{am}$  与温室内外部的计算温度及温室外围护结构的热工性能相关。此处上海地区双层薄膜温室为例, 计算得  $t_{am} = 11.3$ 。代入公式(4) 得

空气导热系数  $\lambda_w = 0.0277 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  
 空气的运动粘滞系数  $\nu_w = 17.04 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ;  
 空气容积膨胀系数  $\beta = 0.00318 \text{K}^{-1}$ ;  
 空气普朗特准则  $P r_w = 0.699$ ;  
 $D = 0.053 \text{m}, g = 9.8 \text{m}/\text{s}^2, C = 0.48, n = 0.25$   
 计算得  
 $N u_w = 13.8$

$$\alpha = N u_w \frac{\lambda_w}{D} = 6.79 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

#### 3.2.3 辐射换热系数的分析与计算

辐射换热系数  $\alpha$  计算式如下

$$\alpha = \epsilon C_b \frac{T_{am}^4 - T_w^4}{t_{f2} - t_w} \times 10^{-8}$$

式中  $\epsilon$  —— 管道外壁与周围环境间的相当发射率; 管道管材是镀锌钢管, 查文献[1] 得其发射率  $\epsilon = 0.28$ ;  $C_b$  —— 黑体辐射系数,  $C_b = 5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $t_w$  —— 散热管外壁温度, 取设计供、回水的算术平均值, 即  $t_w = (80 + 55)/2 = 67.5$ ;  $t_{f2}$  —— 管外空气温度,  $t_{f2} = 18$ ;  $T$  —— 温度,  $\text{K}$ 。

计算得

$$\alpha = 2.22 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

因此

$$\alpha_w = \alpha_c + \alpha_r = 9.01 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

代入(2) 式得:  $K = 9.01 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

由上述计算结果, 可以看出:

散热管道外壁面的换热为复合换热。辐射因素所占的比例为

$$\frac{\alpha_r}{\alpha_w} = \frac{2.22}{9.01} = 24.6\%$$

与散热器相比, 辐射因素引起的散热占较大比例。

### 4 散热管热工性能的实验室测试与分析

#### 4.1 实验方案的确定

散热器传热系数的物理概念是表示当散热器内热媒平均温度  $t_{pj}$  与室内气温  $t_n$  相差 1 时, 每  $1\text{ m}^2$  散热器面积所散出的热量, 单位是  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。它是散热器散热能力强弱的主要标志。

按文献[3]的规定, 在相同流体的 3 个点以上测得散热量时, 应将结果整理成以下形式

$$K = a(\Delta t)^b = a(t_{pj} - t_n)^b \quad (5)$$

式中  $K$  —— 在实验条件下, 散热管的传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $a, b$  —— 由实验确定的系数;  $\Delta t$  —— 散热管热媒与室内空气的平均温差,  $\Delta t = (t_{pj} - t_n)$ ;  $t_{pj}$  —— 散热管进出口热媒的平均温度,  $t_{pj} = \frac{t_g + t_h}{2}$ 。

$$t_{pj} = \frac{t_g + t_h}{2}$$

式中  $t_g$  —— 散热管进口处热媒温度;  $t_h$  —— 散热管出口处热媒温度;  $t_n$  —— 室内温度。

系数  $a$  和  $b$  是将  $\log K$  看作  $\log(t_{pj} - t_n)$  的函数, 通过最小二乘法求得。

$K$  值的实验室计算方法如下:

先测量出进水温度  $t_g$ 、出水温度  $t_h$ 、室内温度  $t_n$ 、热水流量  $G$ ; 然后由下式计算  $K$  值

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t} = \frac{GC(t_g - t_h)}{F(t_{pj} - t_n)}$$

其中  $F$  —— 散热管总表面积,  $\text{m}^2$ ;  $G$  —— 热水流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $C$  —— 水的定压比热,  $\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ 。

#### 4.2 实验台布置

国际标准化组织 (ISO) 规定: 散热器传热系数  $K$  值的实验, 应在一个符合 ISO 标准的封闭小室内, 保持室温恒定下进行的。根据文献[3], 密闭小室的主要要求如下:

- 地面  $(4 \pm 0.2)\text{ m} \times (4 \pm 0.2)\text{ m}$ ;
- 高度  $(2.8 \pm 0.2)\text{ m}$ ;
- 小室应为气密, 换气次数不应大于 0.5 次/h;
- 小室内表面应涂不含金属填料的油漆;
- 构成小室的围护结构的热阻偏差应在 20% 以内;
- 小室外应设风冷或水冷的补偿层, 以保证小室内表面温度尽可能均匀。

本实验在同济大学暖通空调实验室中进行的。实验小室完全符合 ISO 标准的各项规定。实验小室为长 4.0 m, 宽 4.0 m, 高 2.8 m 的封闭小室。外间设有空调系统的补偿层。

实际测点布置以及实验台的设计如图 4。

各测点都采用经标定的热电偶温度计; 测点 9 作为基准点, 其读得值即  $t_n$  值 (位于平面的几何中心, 距地面高度 0.75 m);

测试时每个测点均连续测试, 每次间隔 5 min;

若基准点连续测试 4 次, 温度波动不超过  $\pm 0.1$ , 其他各测点连续测试 4 次, 温度波动不超过  $\pm 0.2$  时, 便可认为环境已经处于稳定状态。

实验台的布置如图 5。

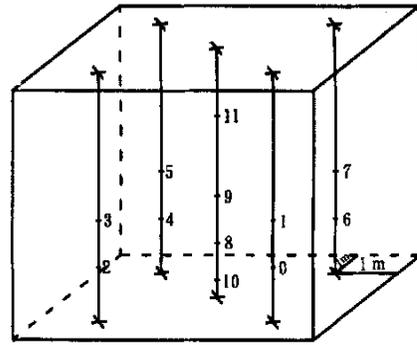


图 4 散热器闭式小室温度场测点布置图  
Fig 4 Schematic the layout of the testing spot in the sealed chamber

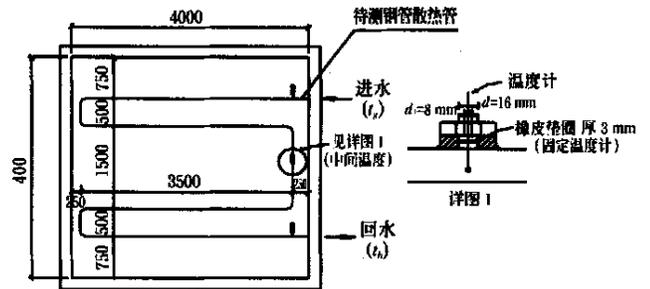


图 5 密闭小室实验台布置图 (单位: mm)  
Fig 5 Layout of sealed chamber lab

钢管总长度:  $L = 1496.9\text{ m}$ ; 钢管内径:  $d = 50\text{ mm}$ ; 钢管外径:  $D = 53\text{ mm}$ ; 钢管总的外表面积:  $F = \pi DL = 3.14 \times 53 \times 10^{-3} \times 1496.9 \times 10^2 = 2.49\text{ m}^2$ 。

#### 4.3 实验方法及实验数据记录

实验需记录的实验数据有: 进水温度  $t_g$ 、出水温度  $t_h$ 、中间温度、基准点温度  $t_n$ 、热水流量  $G$ 。

##### 4.3.1 实验数据记录

表 1 实验数据记录

Table 1 Tested data

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
$\Delta t/$	49.71	44.17	39.21	34.89
$K / \text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})$	9.90	9.75	9.55	9.42

##### 4.3.2 实验数据整理

根据文献[3]的规定, 在同一种流体的 3 个以上的温度点测得散热量时, 应将结果整理成下式

$$K = A_0(t_{pj} - t_n)^B = A_0 \Delta t^B \quad (6)$$

式中 系数  $A_0$  和  $B$ , 可通过将  $\ln K$  看作  $\ln \Delta t$  的函数, 通过最小二乘法求得。

将式 (5) 变形得

$$\ln K = \ln A_0 + B \ln \Delta t$$

$$\text{令 } y = \ln K; x = \ln \Delta t; A = \ln A_0$$

表2 实验数据整理结果

Table 2 Processing results of tested data

$i$	$x_i$	$y_i$	$x_i y_i$	$x_i^2$
1	3.91	2.29	8.95	15.29
2	3.79	2.27	8.60	14.36
3	3.67	2.25	8.26	13.47
4	3.55	2.24	7.95	12.60
$\Sigma x_i = 14.92$ $\Sigma y_i = 9.05$ $\Sigma x_i y_i = 33.76$ $\Sigma x_i^2 = 55.72$				

根据最小二乘法的原理, 所求的  $A$  和  $B$  为

$$B = \frac{C \Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i}{C \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2} = 0.0512$$

$$A = y - Bx = 2.07$$

式中  $C$ ——测量组数,  $C = 4$

所以, 直线方程为

$$y = 2.07 + 0.0512x$$

因此, 传热系数  $K$  的实验公式为

$$K = 7.92 \Delta t^{0.0512}$$

在理论计算的条件下, 将温室室内散热管道的设计参数  $t_n = 18$ ,  $t_{pj} = 67.5$  代入实验室公式得

$$K = 7.92 \Delta t^{0.0512} = 7.92 (67.5 - 18)^{0.0512} = 9.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

与前述理论分析的  $K$  值相比, 其相对误差为

$$\eta = \frac{|9.67 - 9.01|}{9.01} \times 100\% = 7.3\%$$

## 5 结 论

1) 由实验数据可以看出, 散热管道的  $K$  值随管内外介质温差的减小而缓慢减小, 减小的幅度也比较小。

2) 实验公式计算的  $K$  值与理论分析所得  $K$  值很接近, 相对误差为 7.3%, 因此, 上述的  $K$  值的实验公式是可信的, 可作为散热管道的设计依据。

3) 辐射因素引起的散热, 在外表面换热总量中, 占较大比例。因此, 对管道表面涂镀发射率较高的材料, 以增强辐射换热, 是提高散热管热工性能的有效方法。

4) 理论计算用到的各准则关系式, 是在实验室条件下得出的半经验公式; 而实验公式也是以实验室实验为根据得出的。由于实验室工况与现场条件有一定差异, 因此  $K$  值的计算值和现场实际的  $K$  值可能会有一定的偏差, 因此, 实际应用时应考虑对实验  $K$  值的修正。这个修正值只有通过现场实测才能得到, 有待进一步研究。

### [参 考 文 献]

- [1] 章熙民. 传热学(第3版)[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1995.
- [2] JGJ32-86 采用密闭小室测试采暖散热器的热工性能[S]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1978.
- [3] 蔡龙俊, 鲁雅萍, 蔡志红. 农业温室供热系统的研究和设计能源研究与信息[R]. 2000. 12.
- [4] 贺平, 孙刚. 供热工程(第3版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 1.
- [5] 陆跃庆, 等. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. 1.
- [6] 李保明, 衣彩洁, 等. 温室大棚花卉生产[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2000. 7.
- [7] CJJ55-93 供热术语标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994. 10.
- [8] B. V. 卡里卡, R. M. 戴斯蒙德[美国]. 工程传热学[M]. 刘吉萱译. 北京: 人民教育出版社, 1983. 4.
- [9] 西亚庚, 杨伟成, 等. 热水供暖技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. 10.
- [10] 吴志行. 设施农业[M]. 北京: 江苏科学技术出版社, 2001. 8.

## Calculation and test of heat-transfer coefficient of heating pipe of water heating system in gutter-connected greenhouse

Cai Longjun, Feng Zhejun

(Institute of Modern Agricultural Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** People now emphasize on the research and development of agricultural greenhouse due to its key position in protected agriculture. The objective of this article is to research and test the thermodynamic function of the heating pipe of water heating system in greenhouses. The content of the article is: to do some theoretical analysis and calculation of the thermodynamic function of the heating pipe of water heating system; to perform some practical tests of the thermodynamic function of the heating pipe from the sealed-chamber Lab. Through theoretical analysis and practical test, the formula of the coefficient of heat-transfer of the heating pipe was obtained, and the reliability and the influential factors of the formula were analyzed.

**Key words:** gutter-connected greenhouse; water heating system; heating pipe; coefficient of heat-transfer of glazed heating pipe