

# 连栋温室散热管道辐射涂层的热工性能研究

蔡龙俊, 龚俊华

(同济大学现代农业科学与工程研究院, 上海 200092)

**摘要:** 该文从连栋温室供热系统的节能要求出发, 采用理论分析和实验数据数学归纳的方法, 重点研究涂镀辐射涂层后常用的热水供热系统光管散热管道热工性能的变化, 结果表明涂镀辐射涂层后光管散热管道的热工性能较涂镀辐射涂层前有明显的提高, 为选择连栋温室散热管道提供依据。

**关键词:** 连栋温室供热系统; 散热管道; 热工性能; 红外辐射涂层; 辐射换热特性; 节能

**中图分类号:** S625.3; S625.5<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2004)05-0089-03

## 0 引言

由于连栋温室中的供热系统初投资和运行费用高, 影响了温室的发展。如何降低温室运行成本已成为迫在眉睫的问题。目前降低温室运行成本的研究大多从保温的角度进行, 而忽视对温室供热系统的研究, 这方面的基础研究还比较欠缺。如: 连栋温室内供热系统, 采用何种型式最为经济合理, 对此进行认真的分析和研究的报导很少; 温室内的散热设备, 尤其是连栋温室最常用的散热管道, 尚没有可靠的热工性能参数。连栋温室供热系统的散热设备, 主要为常规散热器、光管散热管道以及带肋片的散热管道, 由于光管散热管道相对于常规散热器(包括带肋片的散热管道)有如下几个方面的优点: 传热系数大; 没有肋片间的相互遮挡, 其辐射换热量占总散热量的比例大于常规散热器, 光管散热管道与供、回水干管以软接头连接; 当室内作物垄距需改变时, 光管散热管道拆卸方便; 光管散热管道常可同时作为温室内作业手推车的导轨; 使用光管散热管道作为散热设备的房间温度场均匀, 垂直温差较小。因此成为连栋温室中最常用的散热设备。本文着重研究提高光管散热管道的热工性能, 在理论分析的指导下进行实验研究, 并探讨降低连栋温室供热系统费用的可行性。

## 1 连栋温室供热系统常用光管散热管道的热工性能

### 1.1 理论分析的原始数据

冬季室内设定温度取花卉区的设计温度:  $t_n = 18$ 。

室外气温, 取上海地区供暖室外计算温度  $t_j = -2$ 。

设计供水温度, 考虑到温度太高会伤害作物, 宜取  $t_g = 80$ ;

设计回水温度, 取  $t_h = 55$ ;

供、回水平均温度取供、回水温度的算术平均值  $67.5$ 。

散热管道材质为镀锌钢管, 外径  $57\text{ mm}$ , 壁厚  $\delta =$

$3.5\text{ mm}$ ,  $\lambda = 54\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 散热管道内为受迫紊流流动换热。

### 1.2 理论计算与分析

根据文献[1], 每  $\text{m}$  长圆筒壁面的传热系数  $K_l$  为:

$$K_l = \frac{1}{\alpha_i \pi d_n + \frac{1}{2\pi\lambda \ln \frac{d_w}{d_n}} + \alpha_o \pi d_w} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (1a)$$

单位面积圆管外表面的传热系数  $K$  为, 即公式(1a)分母乘以  $\pi d_w$

$$K = \frac{1}{\frac{d_w}{\alpha_i d_n} + \frac{d_w}{2\lambda \ln \frac{d_w}{d_n}} + \frac{1}{\alpha_o}} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (1b)$$

式中  $\alpha_i$ ——管内表面的复合换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 热水管内低速流, 取  $\alpha_i = 500\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $d_n, d_w$ ——散热管内、外直径,  $\text{m}$ , 取  $d_n = 0.05\text{ m}$ ,  $d_w = 0.057\text{ m}$ ;  $\lambda$ ——散热管材导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 取  $\lambda = 45\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\alpha_o = \alpha + \alpha_r$ ,  $\alpha$ ——管外对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 根据文献[2], 取  $\alpha = 6.91\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\alpha_r$ ——管外辐射换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 根据文献[2], 取  $\alpha_r = 2.22\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

将上述已知参数代入公式(1b), 求得:

$$K = 8.92\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

## 2 涂镀辐射涂层的光管散热管道的热工性能分析

在常用光管外壁面发射率较低的情况下(计算时取发射率  $\epsilon = 0.28$ ), 辐射散热在总的散热中仍占较大的比例, 为此在光管散热管道表面涂镀发射率较高的红外辐射涂料来增强辐射换热, 从而达到进一步提高光管散热管道热工性能的目的。

### 2.1 辐射涂层的特性及其基本要求

1) 涂料自身有如下的辐射性能:

不同材料的发射率不同。一般来说金属导电体的数值较小; 电解质材料的数值较高。

温度与辐射性能的关系。金属材料的发射率通常随温度上升而增加; 电解质材料的发射率则与温度没有固定的相互关系。

材料表面状态与辐射性能的关系。一般来说, 材料表面越粗糙, 其发射率值越大, 金属比电介质材料更

收稿日期: 2003-09-15 修订日期: 2004-07-24

作者简介: 蔡龙俊, 副教授, 上海 上海同济大学现代农业科学与工程研究院, 200092. Email: cai longjun@263.net

为显著。

辐射特性随工作时间的变化。金属材料由于氧化作用,其发射率通常会随工作时间增加而提高,而某些电解质材料由于晶体结构发生改变,其发射率反而将随工作时间增加而下降。

2) 温室工程中对涂层材料的要求:

防水防腐; 不影响温室内作物的生长; 无毒无害; 价格适中, 施工方便。

3) 试验材料的选择:

根据涂料自身的辐射性能和温室工程的要求, 在实验中采用上海某涂料制造有限公司试制的红外辐射涂料作为试验涂料。涂料主要成分及基本参数如下:

主要成分(按质量百分比): 硫化铅- 20%, 氧化锆- 20%, 稀释剂- 60%;

涂层厚度: 0.3 mm;

导热系数  $\lambda$ : 约 0.5 ~ 0.8 W/(m·K);

发射率: 在连栋温室的温度工况下, 涂料的发射率  $\epsilon = 0.91 \sim 0.93$  (以上数据由厂方提供)。计算时取  $\epsilon = 0.92$ 。

2.2 有辐射涂层的光热管道热工性能分析

单位面积圆管外表面的传热系数  $K$  为:

$$K = \frac{1}{\frac{d_w}{\alpha_w d_n} + \frac{d_w}{2\lambda \ln \frac{d_w}{d_n}} + \frac{1}{\alpha_w}} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (2)$$

式中  $d_w$ ——有涂料层的管道外径, m;  $d_w = d_n + \delta$ , m;  $\delta$ ——涂料厚度, m; 取  $\delta = 0.0003$  m;

$$\alpha_w = \alpha + \alpha_r$$

$$\alpha_r = \alpha \frac{\xi}{\xi_0} = 2.22 \times \frac{0.92}{0.28} = 7.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

式中  $\xi, \xi_0$ ——散热管有涂料和无涂料时的发射率。

将上述已知参数代入公式(2), 求得

$$K = 13.70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

由上述理论计算, 可知: 在管道表面涂镀高发射率涂料, 能够显著提高管道换热系数, 是提高散热管热工性能的有效方法。

2.3 试验室测试的初步结果

根据国际标准化组织(ISO)规定: 光管传热系数  $K$  值的测定在符合 ISO 标准的封闭小室内, 保持室温恒定下进行。为此在同济大学暖通空调实验室中进行了实际测量。根据文献[3]中的方法指导实验并进行试验台的布置(见图1)。试验中需记录的数据有: 进水温度  $t_g$ 、回水温度  $t_n$ 、中间温度(即钢管中间位置的温度)、基准点温度  $t_n$  (基准定位于实验室的几何中心)、热水流量  $G$ 。

其中:

钢管总长度:  $L = 1496.9$  cm

钢管内径:  $d = 50$  mm

钢管外径:  $D = 57$  mm

管道表面涂镀了红外辐射涂料后, 散热管道热工性能测试 4 个工况的试验记录见表 1。

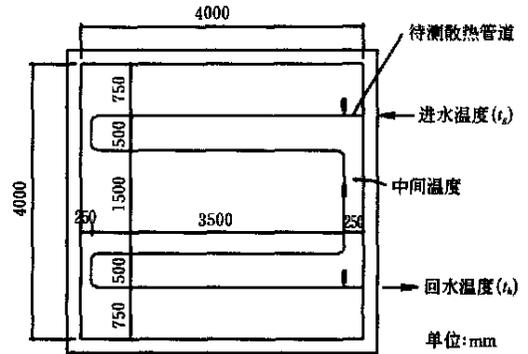


图 1 密闭小试验台布置图

Fig. 1 Set-up of test platform

表 1 散热管道热工性能测试工况的试验记录

Table 1 Tested working condition of the heating pipes					
进水温度	出水温度	基准点温度	总水量	时间	流量
$t_g/$	$t_n/$	$t_n/$	$G/g$	$/s$	$/g \cdot s^{-1}$
73.55	60.95	23.74	1491.5	49.76	29.97
79.49	65.27	24.78	1614.9	53.19	30.36
76.42	62.89	24.09	1822.3	60.37	30.19
65.65	54.24	22.40	1390.4	50.41	27.58

根据要求, 通过计算最后可将传热系数  $K$  的试验公式整理为<sup>[8]</sup>

$$K = 9.81 \Delta t^{0.888}$$

式中  $\Delta t$ ——散热管热媒与室内空气的平均温差,  $\Delta t = (t_{pj} - t_n)$ 。

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

$$K = 9.81 \Delta t^{0.888} = 9.81 \times (67.5 - 18)^{0.888} = 13.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

与前述理论分析的  $K$  值比较接近, 相对误差不到 3%。

3 初步结论与讨论

研究表明: 涂镀 0.3 mm 红外辐射涂料涂层后散热管道的传热系数有明显的增大, 其增加幅度理论上可达 50%, 这说明在供热量相同的条件下, 理论上散热管道的管材用量可以减少。

当然, 涂镀辐射涂层将增加初投资, 经济上是否合算, 这取决于涂料的价格及其在温室中的使用寿命, 同时由于光管散热管道的传热系数的测量在实验室中进行, 其实际效果还需要在现场进行大量实测来检验。

[参考文献]

[1] 章熙民, 任泽霖, 梅飞鸣. 传热学(第3版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. 6  
 [2] 蔡龙俊, 冯哲隽. 连栋温室热水供热系统散热管道传热系数的计算与测试[J]. 农业工程学报, 2003. 3  
 [3] JGJ32-86 采用密闭小室测试采暖散热器的热工性能[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1978

- [4] 高 南, 华家栋, 俞善庆 特种涂料[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986. 1.
- [5] 萧日嵘, 牟灵泉, 董重成 民用供暖散热器[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 7.
- [6] 钱滨江, 伍贻文, 常家芳 简明传热手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.
- [7] 赵荣义, 范存养, 薛殿华 空气调节(第 3 版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 11.
- [8] 徐大中, 糜振琥 热工测量与实验数据整理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991. 11.

## Thermo-engineering properties of heating pipes coated with radiant dope in gutter-connected greenhouse

Cai Longjun, Gong Junhua

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

**Abstract** From the viewpoint of the energy efficiency, this paper focuses on the difference of the thermo-engineering capability between the two pipes—common pipes and pipes coated with radiant dope and the influence on the thermal environment in gutter-connected greenhouse by enhancing radiant heat-transfer capability of heating pipe. This result provides a basis for the design of economic gutter-connected greenhouse.

**Key words** heating system of gutter-connected greenhouse; heating pipe; thermo-engineering property; radiant dope; radiant heat-transfer property; energy conservation