

文章编号: 1671-6612 (2020) 03-331-04

# 毛细管辐射吊顶表面温度的动态变化特性

宫树娟

(中信建筑设计研究总院有限公司 武汉 420100)

**【摘要】** 毛细管网在结构层内换热是一个三维传热过程, 吊顶表面温度的动态变化特性非常复杂。采用 CFD 数值模拟, 得到毛细管吊顶表面温度随供水温度及时间变化的动态曲线。

**【关键词】** 毛细管辐射吊顶; 动态变化; 数值模拟; 温度

中图分类号 TU822 文献标识码 A

## Dynamic Analysis for the Temperature on Surface of Capillary Radiant Ceiling

Gong Shujuan

(CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, WuHan, 420100)

**【Abstract】** The heat transfer process of capillary radiant ceiling was a three-dimensional unsteady that was very complicated. This paper analyses the dynamic change characteristics of the average temperature of surface ceiling by using CFD numerical simulation.

**【Keywords】** capillary radiant ceiling; dynamic change; numerical simulation; temperatur

作者(通讯作者)简介: 宫树娟(1985.02-), 女, 硕士研究生, 工程师, E-mail: gsj219@126.com  
收稿日期: 2019-06-24

## 0 引言

毛细管网在结构层内换热是一个三维传热过程, 是通过毛细管供回水与施工结构层及室内环境间的换热平衡过程, 其热平衡关系复杂、影响参数众多。目前有较多文章对毛细管辐射末端的换热性能进行了相应研究<sup>[1-6]</sup>, 但对于吊顶表面温度的动态特性研究还相对较少, 因此, 本文建立了毛细管辐射末端三维动态换热模型及房间动态换热模型, 对边界条件进行简化处理, 利用此模型分析吊顶表面温度的动态变化特性。

## 1 毛细管辐射空调系统动态换热模型

### 1.1 物理模型

本文对毛细管辐射吊顶直接抹灰的施工方式进行讨论, 结构层示意图如图 1 所示。毛细管网在其中的换热过程均可看作是毛细管网在多层材料中的换热问题, 毛细管辐射板换热过程可分解为 4

个阶段: 第 1 阶段, 毛细管内水与管壁换热; 第 2 阶段, 毛细管内壁与外壁换热; 第 3 阶段, 毛细管外壁与换热表面换热; 第 4 阶段, 换热表面与室内环境换热。图 2 为毛细管辐射末端的物理模型(沿毛细管长度方向截取的一部分), 其中毛细管长 3m, 颜色深的部分为毛细管。

本文在模型的网格划分中, 首先对模型中的毛细管进行了单独地划分, 采用结构网格, 网格尺寸为 1mm, 每根毛细管划分约 1.7 万个网格。然后对找平层采用非结构网格进行划分, 以毛细管壁为源, 递增率为 1.1, 网格尺寸最大值不超过 4mm, 经统计模型约划分为 200 万个网格。

### 1.2 数学模型

#### 1.2.1 假设条件

毛细管网在结构层内换热是一个三维传热过程, 是通过毛细管供回水与施工结构层及室内环境间的换热平衡过程, 其热平衡关系复杂、影响参数

众多。本文建立数学模型重点在于对换热表面温度进行计算和对比,研究对象为不同供水参数及找平层参数下的结构层。因此,可对环境参数作为已知的边界条件进行一定假定,确定不同供水参数及找平层参数对换热的影响。同时,为使问题得以简化,有必要对这一过程作以下几点假设:

- (1) 毛细管网与埋管层材料接触良好,施工材料与冷水管接触良好,忽略不同层间的接触热阻。
- (2) 每根毛细管入口参数相同,忽略水流在集管中的热量损失。
- (3) 水在毛细管内流动为恒定流动。
- (4) 各层材料的各物性参数为常数,不随温度的变化而变化。

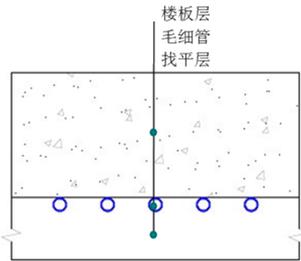


图1 吊顶直接抹灰方式  
Fig.1 Ceiling plastering

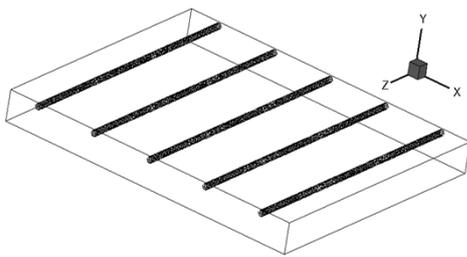


图2 毛细管辐射末端物理模型

Fig.2 Physical calculation model of capillary radiant ends

1.2.2 边界条件的处理

通常情况下,毛细管管内径在 2mm~4mm 之间,管内水流速在 0.05m/s~0.5m/s,故雷诺数范围  $Re=100\sim 2000 < 2300$ ,可知毛细管在管内换热为层流换热。对于动量方程,给定入口的平均速度值,即给定了相应的入口质量流量,将出口定为压力出口;对于能量方程,给定入口的平均温度值。楼板上表面及吊顶下表面综合换热,对流换热系数选用 Min 提出的自然对流换热系数计算公式<sup>[7]</sup>:

$$h_c = 2.13 |T_a - T_p|^{0.31} \quad (1)$$

式中,  $T_a$  为室内空气温度, °C;  $T_p$  为吊顶表面温度, °C。

系统发射率计算公式:

$$F_r = \frac{1}{\frac{1}{X_{p-r}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1\right) + \frac{A_p}{A_r} \left(\frac{1}{\varepsilon_r} - 1\right)} \quad (2)$$

式中,  $X_{p-r}$  为吊顶表面对室内其他表面的角系数;  $\varepsilon_p$  为吊顶表面发射率;  $\varepsilon_r$  为室内其他表面发射率,  $A_p$  为吊顶表面面积,  $m^2$ ;  $A_r$  为室内其他表面面积,  $m^2$ 。

吊顶周边实际工程中均设有保温措施,且周边面积与吊顶换热面面积相比比例很小,只有少部分与外围护结构接触,故可认为周边导热可忽略不计。具体的边界条件的处理如表 1 所示。

表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

模型	名称	尺寸(mm)	边界条件类型
毛细管辐射末端	毛细管进水口	$\phi 4.3$	速度进口
	毛细管出水口	$\phi 4.3$	压力出口
	楼板		混合边界
	吊顶表面		混合边界
	吊顶周边		绝热边界

2 毛细管辐射吊顶表面温度动态变化特性

毛细管辐射空调系统开机时首先开启风系统进行除湿,当室内露点温度达到某一状态时再开启辐射吊顶。关机时首先关闭辐射吊顶,当吊顶表面温度达到某一状态时再关闭送风系统。本文采用毛细管辐射末端动态换热模型研究开机、关机过程中毛细管辐射吊顶表面温度(指吊顶表面平均温度)动态变化特性。

2.1 开机过程辐射吊顶表面温度动态变化特性

2.1.1 不同室内空气温度下辐射吊顶表面温度动态变化特性

施工结构层的参数设为定值,管间距设为 40mm,供水流速为 0.1m/s,抹灰厚度为 20mm。首先考虑相同供水温度、不同室内空气温度下辐射板表面温度随时间的变化规律,图 3 为供水温度 16 °C 时,室内空气温度为 26 °C、28 °C、31 °C 下辐射板表面温度随时间的变化曲线。从图 3 可以看出,

室内空气温度为 26℃ 与 28℃ 时吊顶表面温度相差 2.5%，室内空气温度为 31℃ 与 28℃ 时吊顶表面温度相差 2.8%，计算得到：室内空气温度相差 1℃，吊顶表面温度相差 0.15℃。所以在模拟吊顶表面温度时可假定室内空气温度一定，不随时间发生变化。

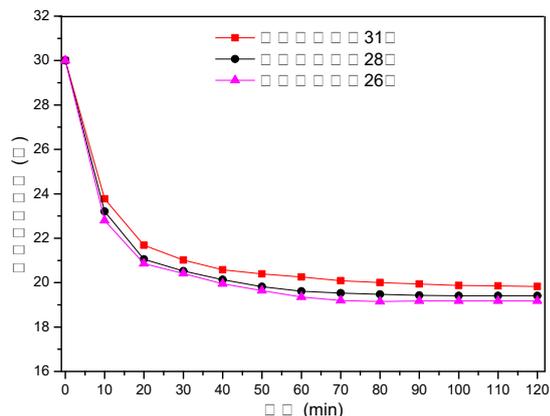


图 3 不同室内温度下辐射板表面温度随时间变化

Fig.3 Surface temperature variation of surface ceiling under different indoor temperatures

### 2.1.2 不同初始温度下辐射吊顶表面温度动态变化特性

其次考虑到毛细管内水流及找平层的初始温度对吊顶表面温度也有一定的影响，为了简化计算，本文中设毛细管内水流及找平层的初始温度相同，后续章节中的初始温度即整个毛细管辐射末端的初始温度。本文计算了初始温度分别为 29℃、30℃、31℃ 时，吊顶表面温度的动态变化趋势，见图 4。从图 4 可以看出，初始温度分别为 29℃、30℃、31℃ 时，吊顶表面温度动态变化趋势相差不大。

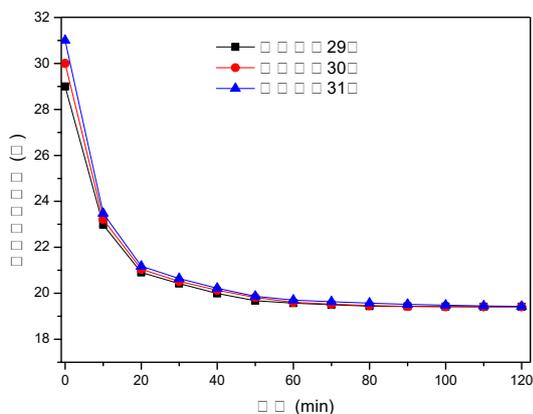


图 4 不同初始温度下辐射板表面温度随时间变化

Fig.4 Surface temperature variation of surface ceiling under different initial temperatures

### 2.1.3 不同供水温度下辐射吊顶表面温度动态变化

特性

从前述模拟得知，室内空气温度、初始温度对吊顶表面温度时影响很少，几乎不随时间发生变化，因此在模拟不同供水温度下辐射板表面温度动态变化特性时，设定室内空气温度为 29℃，毛细管辐射末端的初始温度均为 30℃。不同供水温度下辐射板表面温度动态变化特性如图 5 所示。

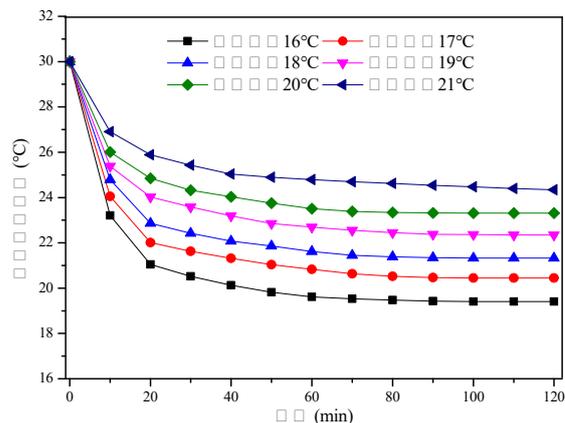


图 5 不同供水温度下辐射板表面温度随时间变化 (开机)

Fig.5 Surface temperature variation of surface ceiling under different water supply temperatures (on)

从图 5 可以看出，供水温度越低，吊顶表面温度越低，且降温速度越快，开始供水 2h 后吊顶表面温度已完全稳定。供水温度从 16℃ 到 21℃，吊顶表面温度分别稳定在 19.41℃、20.45℃、21.33℃、22.35℃、23.31℃、24.34℃。利用 Matlab 软件将开

机过程吊顶表面温度  $\bar{t}_1$  与不同供水温度  $t_g$ 、表面温度变化时间  $\tau$  的模拟数据拟合回归，得到毛细管吊顶表面温度随供水温度及时间变化的动态表面温度曲线。

$$\bar{t}_1 = 13.4371 + 2.4974 \exp(0.0866t_g - 0.0046\tau) \quad (R^2 = 0.8541) \quad (3)$$

式中， $\bar{t}_1$  为开机时吊顶表面温度，℃； $t_g$  为辐射吊顶供水温度，16℃~21℃； $\tau$  为时间，0~120min。

### 2.2 关机过程辐射吊顶表面温度动态变化特性

从图 5 可以看出，吊顶表面温度在 2h 后已经达到稳定，本节中考虑达到稳定状态时停止供水后吊顶表面温度的动态变化特性。这里模拟工况设为

供水温度从 16℃ 到 21℃，以图 5 中的 2h 为关机工况的初始时间点，即此时将供水流速改为 0，得到不同供水温度时吊顶表面温度的动态变化曲线，结果如图 6 所示。

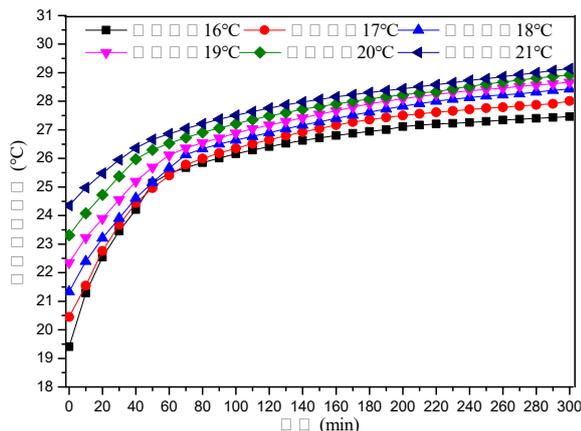


图 6 不同供水温度下辐射板表面温度随时间变化 (关机)

Fig.6 Surface temperature variation of surface ceiling under different water supply temperatures (off)

从图 6 可以看出，稳定阶段的供水温度越高，关机的初始阶段吊顶表面温升速率越慢，但总体温度较高。关机 6h 过程中，供水温度为 16℃ 和 21℃ 时的吊顶表面温差从初始的 5℃ 减小到 2℃。

利用 Matlab 软件将关机过程的吊顶表面温度  $\bar{t}_2$  与不同供水温度  $t_g$ 、表面温度变化时间  $\tau$  的模拟数据拟合回归，得到毛细管吊顶表面温度随供水温度及时间变化的动态表面温度曲线。

$$\bar{t}_2 = -100.2080 + 39.1301 \exp(1.1084 + 0.0027t_g - 0.0001\tau) \quad (4)$$

( $R^2 = 0.8831$ )

式中， $\bar{t}_2$  为关机时吊顶表面温度，℃； $t_g$  为辐射吊顶供水温度，16℃~21℃； $\tau$  为时间，0~

360min。

### 3 结论

综上，本文主要得到以下结论：

(1) 在管间距、供水流速及抹灰厚度相同的情况下，室内空气温度及毛细管末端初始温度对吊顶表面温度的动态变化影响很小，误差在 5% 左右，因此在模拟吊顶表面温度的动态变化时可将室内空气温度设为定值。

(2) 模拟得到了系统开机时毛细管吊顶表面温度随供水温度及时间变化的动态表面温度曲线，并拟合回归成了公式。

(3) 模拟得到了系统关机时毛细管吊顶表面温度随供水温度及时间变化的动态表面温度曲线，并拟合回归成了公式。

### 参考文献：

- [1] 李青,刘金祥,陈晓春,等.U 形毛细管席冷却顶板换热性能数值模拟与分析[J].暖通空调,2010,(4):136-140.
- [2] 李昊,高珊,贾甲,等.毛细管辐射供冷系统性能的试验及数值模拟研究[J].制冷技术,2014,(4):18-22.
- [3] 徐祥洋,杨洁,宫树娟,等.毛细管平面辐射空调换热性能的数值模拟研究[J].制冷技术,2014,(4):35-40.
- [4] 王赞,谢东,莫顺权,等.毛细管辐射冷却顶板供冷性能的数值模拟研究[J].制冷与空调,2016,(3):287-290.
- [5] 刘晓蕊,郑德葱,张淑娟,等.毛细管网辐射空调末端换热性能试验研究[J].能源与节能,2014,(12):171-173.
- [6] 朱备,翟晓强,尹亚领,等.毛细管辐射供冷的换热及结露特性的实验研究[J].制冷技术,2013,(4):5-10.
- [7] T CMin, L F Schutrurn, G V Parmelee, et al. Natural convection and radiation in a panel heated room[J]. Ashrae Trans, 1956,62:337-358.