

文章编号: 0253-4339(2011)06-0049-04

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2011.06.049

# 加膜冷却顶板/置换通风系统及其实验研究

隋鲁彦 王晋生 缪小平 贾代勇 彭关中

(解放军理工大学 工程兵工程学院 南京 210007)

**摘要** 对冷却顶板/置换通风系统中存在的两个突出问题: 冷却顶板易“结露”以及形成“下降气流”破坏置换通风的流型进行理论分析, 提出了用对长波具有高透过性的薄膜包裹冷却顶板, 在冷却顶板下表面和薄膜之间保留真空或空气夹层的解决方法, 并且设计了实验系统, 选定了长波高透过性薄膜作为实验材料, 通过实验对新系统的性能进行了验证。结果表明: 在外界环境基本相同的条件下, 加装长波高透过性薄膜后, 冷却顶板/置换通风系统的室内温度略有升高, 平均升高1.8%; 污染度明显下降, 在呼吸区以下, 平均降低60%; 在呼吸区以上, 平均降低40%, 空气质量明显得到了提高。

**关键词** 市政工程; 冷却顶板; 置换通风; 结露; 下降气流; 薄膜

**中图分类号**: TU834.5; TB657

**文献标识码**: A

## Experiment on the Displacement Ventilation and Cooling Ceiling System with the Film

Sui Luyan Wang Jinsheng Miao Xiaoping Jia Daiyong Peng Guanzhong

(Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA Univ. of Sci&Tech., Nanjing, 210007, China)

**Abstract** Currently displacement ventilation(DV) and cooling ceiling (CC) system has two main disadvantages: condensation when the radiant panel temperature is lower than the dew point temperature of air around it, and the downdraft from the cooling ceiling. Through theoretical analyses, the paper puts forward a method to avoid condensation and downdraft: the radiant panel is covered and airproofed with the film whose long wave transmittance is high, and there is a layer of air or vacuum between the undersurface of panel and the film. The experiment system was designed with long wave transmittance film, and the capability of the new system was validated through the experiment. It is shown that with the same ambient environment, the indoor temperature in DV/CC system with film is 1.8% higher than that in tradition DV/CC system, and the contaminant concentration is 60% decreased under the breathing zone and 40% decreased above the breathing zone, respectively.

**Keywords** Municipal engineering; Cooling ceiling; Displacement ventilation; Condensation; Downdraft; Film

空调系统发展到今天, 其任务不仅仅是保证室内湿度的要求, 而是应向更高层面, 如提高室内空气品质、创造舒适室内环境和节约能源的方向发展<sup>[1]</sup>。置换通风和冷却顶板相结合的空调系统被认为是最符合这种发展方向的空调形式之一。它具有噪音低、通风效率高、节能、室内空气品质高等优点<sup>[2]</sup>。但是这种系统也存在两个缺点: 一是冷却顶板在温度低于附近空气的露点温度时将结露<sup>[3]</sup>, 可能形成“室内雨”。二是冷却顶板下表面形成的下降气流一定程度上破坏了置换通风的流型<sup>[4]</sup>, 可能降低室内空气品质。如果能够解决这两个问题, 该系统就可能成为一种极具应用价值的空调。

## 1 解决方法的提出

### 1.1 解决“结露”和“下降气流”的方法

“结露”和“下降气流”问题产生的主要原

因就是由冷却顶板表面温度过低产生的。只要能够解决冷却顶板的表面温度, 这两个问题就都能够避免。但是如果提高冷却顶板的表面温度, 则制冷量就要减少, 空调系统性能就会降低。所以要解决这两个问题的关键要求就是既保持冷却顶板的表面温度较高, 同时仍不明显减少制冷量。针对上述要求, 这里提出了一个解决方法: 用对长波具有高透过性的薄膜包裹冷却顶板, 并在冷却顶板下表面和薄膜之间保留一个真空或空气夹层, 具体布置形式如图1所示。

图1中, 在原有冷却顶板的基础上, 上部加装保温材料, 而后把保温材料和冷却顶板用薄膜包裹密闭起来, 使冷却顶板和外界空气隔绝, 在下部的薄膜和冷却顶板表面之间形成一个夹层。该夹层可以为真空, 也可以是填充气体, 但该气体必须是干燥气体, 最容易实现的是填充干燥空气。

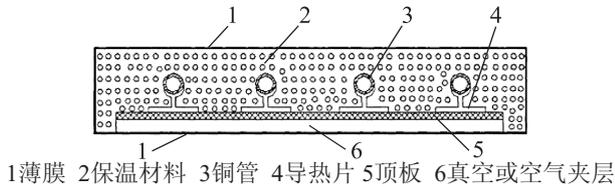


图1 冷却顶板加膜结构示意图

Fig.1 Structure of the cooling ceiling with the film

## 1.2 解决方法机理

### 1.2.1 “结露”解决机理

当冷却顶板和置换通风结合运行时，因为薄膜对长波（常温情况下主要辐射波长）透过性可以达到90%甚至更高，所以薄膜的温度受辐射换热温度的影响很小。当冷却顶板和薄膜之间是真空夹层时，则薄膜温度就与冷却顶板的温度基本无关，而近似等于薄膜外围空气的干球温度，薄膜和外围空气之间的对流换热很小。当冷却顶板和薄膜之间是空气夹层时，冷却顶板通过该空气夹层用导热或弱对流换热的方式影响薄膜的温度，薄膜的温度既受冷却顶板温度影响又受薄膜外围空气干球温度影响，薄膜温度在冷却顶板温度和外围空气干球温度之间。适当选取空气夹层的厚度或处理夹层空间形式加大夹层换热热阻，可以使薄膜的温度等于或者高于冷却顶板和薄膜空气干球温度的平均值。这样处理后，因为冷却顶板被薄膜包裹和外界空气隔绝，内部是真空或干燥气体，所以冷却顶板表面就不会结露。这样就彻底解决了冷却顶板的结露问题。

### 1.2.2 “下降气流”解决机理

因为薄膜的温度如前述比冷却顶板温度高，所以冷却顶板和外围空气之间的对流换热将减少。理论上讲，当薄膜的长波透过率为100%，且夹层为真空，则薄膜温度将等于其周围空气温度，薄膜和周围空气之间没有热交换，即不冷却周围空气，自然也就没有下降气流，也完全不影响置换通风的流型，可以保持室内空气品质。当薄膜的长波透过率不等于100%或夹层之间不为真空时，薄膜的温度将受冷却顶板温度的影响，但因为薄膜的长波透光率较高，夹层的热阻较大，所以冷却顶板对薄膜温度的影响较小，薄膜的温度比较接近其下部周围的空气温度。在这种情况下，其对流换热也比较小。因为薄膜和外围空气温差减少一半以上，所以此处的对流换热也将减少一半以上。如此大的减少量，相应下降气流也将明显减少，对置换通风的影响将大大减少。“下降气流”的问题也得以解决。

## 2 高透过性薄膜的选取

这里提出的解决“结露”和“下降气流”问题的方法中，最关键的是找到合适的长波高透过性薄膜。为满足要求，该薄膜应该具有以下特性：1)长波透过率要高。对5~15 $\mu\text{m}$ 的长波透过率达到80%以上，最好接近100%。2)具有较高的承压能力。因为在冷却顶板和薄膜之间的夹层为真空时，要求薄膜承受较大压力。3)热阻较大。这样可以加大薄膜上下表面的温差，使薄膜下表面温度更接近室内空气温度。

文献[5]测试聚乙烯薄膜的全透过率为0.815，文献[6]介绍了多种长波高透过性薄膜，有的薄膜长波透过率接近100%，文献[7]研制了一种在8~12 $\mu\text{m}$ 波段透过率超过0.8的光谱选择性透过薄膜。受限于时间和经费，实验选择聚乙烯薄膜作为实验材料，它能够满足上述的三点要求并且特别容易获得，价格也十分低廉。

## 3 实验研究

通过理论分析，冷却顶板/置换通风系统在加装长波高透射性薄膜后能够解决“结露”和“下降气流”问题。但这个分析是否成立，这个方法是否还有其它未发现的问题，必须经过实验验证方能确定。为了初步评判这种方法的可行性，在一个真实房间进行了几种空调系统的比较实验。

实验主要比较以下三种空调系统：1)置换通风系统(简称“DV”)；2)冷却顶板/置换通风系统(简称“DV/CC”)；3)加装长波高透过性薄膜的冷却顶板/置换通风系统(简称“DV/CCF”)；

### 3.1 实验系统

#### 3.1.1 实验房间

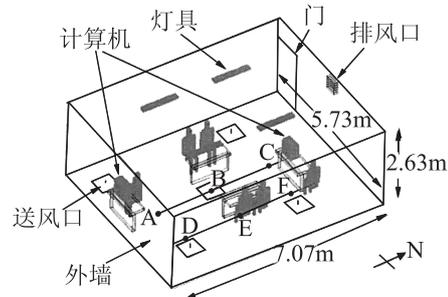


图2 实验室内布置

Fig.2 Layout of the lab

实验选择在一个六层的实验楼里进行，实验房间在三楼，尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高=7.07m $\times$ 5.75m $\times$ 2.63m，其中高度为地板上表面至顶板下表面的距离。实验房间的南墙朝向与大气相通的外界，距

地面0.6m以上是双层玻璃窗, 内有拖地窗帘, 外有大面积遮阳棚, 太阳光不能直射到南墙。实验室楼上、楼下均为没有空调的房间。室内热源主要是人员(120W/人)、计算机(150W/台)和采集板(W/块)、照明灯具(16W/盏)。具体布置及数量如图2所示。

### 3.1.2 冷却顶板系统

冷却顶板采用的是希比环境控制工程公司的RCU-166型高效辐射冷却顶板单元板, 是通过传热片把水管和金属顶板联结成的, 形式如图3所示。



图3 冷却顶板单元板

Fig.3 Unit of the cooling ceiling

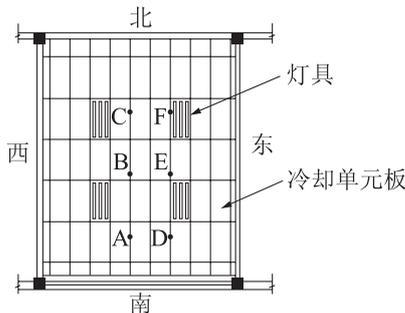


图4 冷却顶板布置图

Fig.4 Position of the cooling ceiling

实验房间共布置41块单元板, 有4块和单元板面积相同的位置布置照明灯具, 冷却顶板布置总面积为27.7m<sup>2</sup>。具体如图4所示。

### 3.1.3 测试系统

温度测量仪器为康铜热电偶, 室内共设6组测点测量空气温度, 编号为A~F(图4), 每组测点有10个, 高度分别为距地面0.0, 0.15, 0.5, 0.9, 1.1, 1.5, 1.8, 2.1, 2.5, 2.61m。四面墙各布置5个测点, 高度为0.5, 1.1, 1.8, 2.1, 2.5m。进风口、排风口、冷却顶板进水口和出水口都各布置一个测点。在冷却顶板、薄膜上各取七个测点。

风速通过热线风速仪测量, CO<sub>2</sub>浓度用CO<sub>2</sub>浓度测试仪测量, 测量仪器性能参数如下表所示。

表1 测量仪表型号

Tab.1 The type of the measure instrument

	型号	量程	误差
热电偶	TPR-WRCB-2	-200~350℃	±1℃
风速仪	QDF-6型	0~30m/s	≤3%
CO <sub>2</sub> 浓度仪	TSI 8560	0~5×10 <sup>5</sup> mg/kg	±3%

## 3.2 各系统性能比较

实验共做了三种工况的比较, 即DV、DV/CC和DV/CCF。在比较时, 进风温度( $T=23^{\circ}\text{C}$ )和进风量一直保持不变, 室内换气次数为4.3次/h。DV/CC和DV/CCF的进水温度和流量也保持不变, 室内热负荷也不变。实验时选取的是一个阴天, 室外热环境变化很小。

实验中, 布置在各个测点的传感器通过计算机每分钟采集一组数据, 可以通过测点的变化很容易地判断出系统是否稳定。系统稳定半小时后, 关闭空调系统, 对室内进行开窗通风, 再次达到稳定后进行下一工况实验。测试当天气温变化如图5所示。

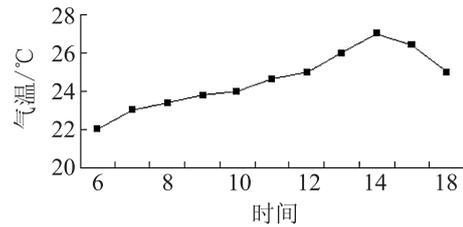


图5 气温随时间变化图

Fig.5 The graph of variations of air temperature with time

把A~F这6组测点中距地面高度相同的各点的温度值平均, 作为该高度处室内空气温度的代表值。以高度为纵轴, 空气温度减去进风温度 $T_s$ 为横轴, 就得到了室内空气温度分布图, 如图6所示。

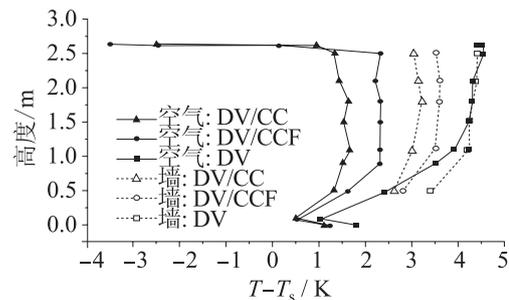


图6 室内空气和内墙表面温度分布

Fig.6 Temperature distribution of the air and the wall indoor

从图6中可以看出, 加装冷却顶板后, 上部空间的温度下降了3℃左右。在呼吸区(距地面1.1m处)以下, 三种工况趋势相同, 温度都是逐渐升高, DV系统下温差超过3℃, 能引起人的不适感。在呼吸区以上, DV系统温度继续升高; DV/CC系统的温度总体是逐渐降低, 越往上温度降低得越快; DV/CCF系统的温度基本保持不变, 从而得知在DV/CCF系统具有较好的热舒适性。

以高度作为纵轴,  $\mu$ 作为横轴, 可以得到室内

污染度分布图，如图7所示。

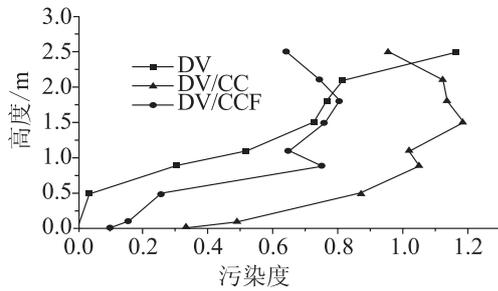


图7 室内污染度分布

Fig.7 Distribution of contamination indoor

为了分析室内CO<sub>2</sub>的浓度变化，定义了室内污染度为：

$$\mu = (C_x - C_s) / (C_e - C_s) \quad (1)$$

式中： $\mu$ —污染度； $C_s$ —送风的CO<sub>2</sub>浓度； $C_e$ —送风的CO<sub>2</sub>浓度； $C_x$ —高度为x处的CO<sub>2</sub>浓度。

从中可以看出，在呼吸区以下，污染物浓度的变化趋势相同，但污染度从大到小的顺序是DV/CC、DV/CCF、DV。在呼吸区以上，DV的浓度继续升高；DV/CC和DV/CCF污染度略微降低。越往上，污染度降低越快。此外，从图7中可以看出，DV/CC系统加膜后，污染度明显降低，说明室内空气品质有明显提高。

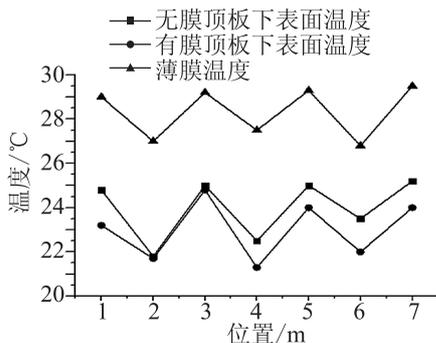


图8 薄膜和顶板温度图

Fig.8 The temperature of film and ceiling

从图8中可以看出，加膜使冷却顶板的表面温度降低，薄膜的温度明显高于冷却顶板的温度，薄膜起到了很好的作用，且薄膜的温度波幅明显小于冷却顶板下表面的温度波幅。验证了解决“结露”和“下降气流”问题机理的正确性。

## 4 结论

为解决传统的冷却顶板/置换通风系统存在的“结露”和“下降气流”问题。从理论上分析了加设一层长波高透过性薄膜来解决这两个问题的可

能性，并通过实验进行了验证。在外界环境基本相同的条件下，加装长波高透过性薄膜后，冷却顶板/置换通风系统的室内温度略有升高，平均升高1.8%；污染度明显下降，在呼吸区以下，平均降低60%；在呼吸区以上，平均降低40%，空气品质明显得到了提高。虽然受限于实验条件，不能做任意工况的实验，但是现有的实验结果说明DV/CCF是一种值得使用的具有良好品质的空调系统。

## 参考文献

- [1] 殷平. 现代空调[M]. 中国建筑工业出版社, 1999, 36-45.
- [2] 姜允涛, 王雪, 李晓冬. 置换通风与冷却顶板系统热舒适型探讨[J]. 低温建筑技术, 2008, 126-127. (Jiang Yuntao, Wang Xue, Li Xiaodong, Assessment on thermal comfort of displacement ventilation combined with chilled ceiling system[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008, 126-127.)
- [3] Mumma, S A. Ceiling panel cooling systems [J]. ASHRAE, 2001, 43 (8): 28-32.
- [4] Alamdari, F D J G. Bueler, P F Grigg, et al. Chilled ceilings and displacement ventilation. Renewable Energy [J]. 1998, 15: 300-305.
- [5] 何梓年, 任曼蕴. 用辐射计测定透明薄膜全发射率的研究[J]. 太阳能学报, 1993, 14(2): 181-184. (He Zinian, Ren Manyun. The research on integrated radiant emittance of the film through the radiometer [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1993, 14(2): 181-184.)
- [6] Kochendorfer, C. Standardized testing of cooling panels and their use in system planning [J]. ASHRAE Transactions, 1996, 102(1): 651-658.
- [7] 陈非力, 刘晓国. 一种用于自然辐射冷却的光谱选择性透过薄膜 [J]. 功能材料, 1997, 28(6): 648-650. (Chen Feili, Liu Xiaoguo. A Kind of Doped Transparent Film with Spectral Selectivity for Radiative Cooling [J]. Journal of Functional Materials, 1997, 28(6): 648-650.)

## 作者简介

隋鲁彦, 男(1983-), 博士研究生, 江苏省南京市白下区海福巷1号, 解放军理工大学内设教研室, 210007, (025) 80821567, E-mail: 116961519@qq.com. 研究方向, 采暖通风。

## About the author

Sui Luyan (1983-), male, Ph.D, PLA University of Science and Technology, 1#, Haifu Street, Nanjing, China, 210007, (025) 80821567, E-mail: 116961519@qq.com. Research fields: Heating and Ventilation.