

同济大学机械工程学院

---

硕士学位论文

---

辐射冷顶板换热机理与实验研究

---

姓名：赖艳红

---

申请学位级别：硕士

---

专业：供热、供燃气、通风及空调工程

---

指导教师：潘毅群

---

20080301

## 摘 要

辐射供冷技术历史悠久，但是由于各种原因，辐射供冷远没有辐射供暖普及。随着工艺技术和人们观念的转变，人们认识到辐射冷顶板作为一种空调系统末端装置，其节能性和舒适性突出，符合现代空调发展的要求，其应用是广阔的。本文分别研究了金属辐射冷顶板和毛细管辐射冷顶板的换热机理，建立了辐射冷顶板热量传递模型。通过实验研究和 CFD 模拟验证辐射冷顶板模型的合理性，两类辐射冷顶板制冷量实验值与理论计算值的误差分别为 6% 和 0.6%。采用辐射冷顶板模型分析计算了影响辐射冷顶板供冷的影响因素，重点分析了冷媒水温度、流量和室内温度对辐射冷顶板供冷能力的影响。研究结果表明，冷媒水温度和室内温度对辐射冷顶板供冷能力影响显著；冷媒水流量对辐射冷顶板供冷能力影响较小，金属辐射冷顶板供冷能力随冷媒水流量的增大而提高，但是当流量增大到一定值时，金属辐射冷顶板供冷能力稳定在某一水平不再增大；毛细管辐射冷顶板的供冷能力随流量的增大而缓慢提高，但变化量非常小。

关键词：辐射冷顶板 传热机理 水流量 CFD

## ABSTRACT

Although radiant cooling technology has been known for very long time, its application is less popular than radiant heating due to various reasons. With the development of production technology and the change of people's recognition, ceiling radiant cooling panel (CRCP) has been regarded as a type of comfortable and energy efficient air-conditioning terminals. This paper studies on the heat transfer mechanism of metal ceiling radiant cooling panel and capillary ceiling radiant cooling panel respectively, by developing heat transfer models. In order to verify the mathematical models, laboratory experiments were conducted for the two types of CRCP, moreover CFD simulation was done for metal CRCP. The results of experiments and mathematical models meet well, with only 6% error for metal CRCP and 0.2% error for capillary CRCP. Based on the models, the factors influencing CRCP cooling capacity are analyzed, including inlet cooling water temperature, water flow rate and indoor air temperature. Research shows that both the inlet cooling water temperature and indoor air temperature have great impacts on the CRCP cooling capacity, while water flow rate has smaller impact. Cooling capacity of metal CRCP increases with water flow rate but maintains constant at a certain water flow rate. Cooling capacity of capillary CRCP increases slowly with water flow rate in a very small range.

**Key Words:** ceiling radiant cooling panel(CRCP) heat transfer mechanisms water flow rate CFD

## 符号说明

- $A_j$ —房间内暴露于辐射顶板下的围护结构表面面积,  $m^2$   
 $A_p$ —金属辐射冷顶板的表面面积,  $m^2$   
 $A_r$ —暴露在顶板下房间内表面的总面积,  $m^2$   
 $d_1$ —管内径,  $m$   
 $d_2$ —管内径,  $m$   
 $F_{c-c}$ —相邻毛细管间的辐射角系数  
 $F_{c-p}$ —毛细管表面与结构平板的角系数  
 $F_{p-r}$ —毛细管辐射顶板结构平板表面与房间的角系数  
 $F_{c-r}$ —毛细管表面与房间的角系数  
 $h_r$ —管内的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $h_{11}$ —金属辐射冷顶板肋片 1 处顶板表面与空气的总换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $h_{12}$ —金属辐射冷顶板肋片 2 处顶板表面与空气的总换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $h_{conv}$ —金属辐射顶板与室内空气的自然对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $h_{conv-c}$ —毛细管辐射顶板与室内空气的自然对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $h_r$ —金属板辐射换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $l'$ —入口段长度,  $m$   
 $L$ —定型尺寸,  $m$   
 $a$ —空气导温系数,  $m^2/s$   
 $\beta$ —体积膨胀系数  
 $\gamma$ —运动粘滞系数,  $m^2/s$   
 $\sigma$ —普朗克常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ,  $W/(m^2 \cdot K^4)$   
 $\epsilon_c$ —毛细管表面发射率  
 $\epsilon_j$ —房间内暴露于辐射吊顶之下的所有围护结构表面的辐射率  
 $\epsilon_s$ —顶板表面与房间的系统发射率  $\epsilon_s$   
 $\epsilon_r$ —房间内表面平均发射率  
 $\epsilon_p$ —金属辐射冷顶板表面发射率  
 $\delta_b$ —连接体的平均厚度,  $m$   
 $\delta_1$ —金属辐射冷顶板肋片 1 承重板的厚度,  $m$   
 $\delta_2$ —金属辐射冷顶板肋片 2 承重板的厚度,  $m$   
 $\lambda_b$ —连接体的导热系数,  $W/(m \cdot K)$   
 $\lambda_c$ —毛细管管道导热系数,  $W/(m \cdot K)$   
 $\lambda_v$ —管道的导热系数,  $W/(m \cdot K)$   
 $\lambda_1$ —金属辐射冷顶板肋片 1 的导热系数,  $W/(m \cdot K)$   
 $\lambda_2$ —金属辐射冷顶板肋片 2 的导热系数,  $W/(m \cdot K)$   
 $\eta_f$ —按流体平均温度计算的流体的动力粘度,  $kg/(m \cdot s)$   
 $\eta_w$ —按流体壁面温度计算的流体的动力粘度,  $kg/(m \cdot s)$

## 符号说明

- Bi—毕渥数, 无量纲  
Gr—格拉晓夫系数, 无量纲  
Nu—努谢尔特系数, 无量纲  
Pr—普兰特数, 无量纲  
Ra—瑞利数, 无量纲  
 $q_f$ —管道内强迫对流换热量, W/m  
 $q_v$ —管道导热换热量, W/m  
 $q_b$ —金属辐射冷顶板连接体换热量, W/m  
 $q_r$ —金属辐射顶板辐射换热量, W/m  
 $q_{conv}$ —金属辐射顶板自然对流换热量, W/m  
 $q_{conv,c}$ —毛细管辐射顶板的自然对流换热量, W/m  
 $q_{b-r}$ —毛细管结构平板辐射换热量, W/m  
 $t_a$ —室内空气温度, °C  
 $t_b$ —金属辐射冷顶板管板接触处的温度, °C  
 $t_c$ —毛细管外壁平均温度, °C  
 $t_f$ —冷媒水平平均温度, °C  
 $t_{in}$ —进口水温, °C  
 $t_{out}$ —出口水温, °C  
 $t_{wb}$ —室内露点温度, °C  
 $t_{v1}$ —管内壁平均温度, °C  
 $t_{v2}$ —管外壁平均温度, °C  
 $T_c$ —毛细管表面平均温度, K  
 $T_j$ —暴露在辐射吊顶下的房间内表面的温度, K  
 $T_p$ —结构平均表面平均温度, K  
 $T_{pm}$ —金属辐射顶板顶板表面平均辐射温度, K  
W—相邻毛细管管道间结构平板有效自然对流宽度, m  
 $W_1$ —金属辐射冷顶板两管径中心距离, m  
 $W_2$ —金属辐射冷顶板作用板宽度, m  
 $v$ —管内流速, m/s  
V—冷媒水流量, L/h

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名： 赖艳红

2008年3月27日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名： 赖艳红

2008年3月27日

## 第 1 章 绪论

大量研究与实践表明，良好舒适的工作环境有助于提高工作人员的工作效率，因此在现代化的办公建筑中大量采用了集中空调系统，以为工作人员创造良好的工作环境。随着中央空调技术的不断发展，人们不单单满足于环境温度的控制，对舒适性要求也不断提高。在传热的三种方式当中，辐射的舒适性最高，当辐射吊顶以其能耗低、噪声低、舒适性高的突出优势出现后，能够在种类繁多的空调末端设备当中脱颖而出。2002 年辐射吊顶被美国能源部列为美国当今和未来，在经济上最具优势的 15 项暖通空调节能技术之一<sup>[1]</sup>，并成为美国最有发展潜力的空调系统—DOAS（Dedicated Outdoor Air-conditioning System，称“独立新风系统”）的主要组成部分。

### 1.1 研究背景

能源是能量的源泉，是社会发展的动力。20 世纪以来，由于世界经济的发展和不断追求更高水准的生活，能源消耗的增长速度远远超过人口增长的速度。20 世纪的前 75 年，世界人口在原基础增长了 1.5 倍，而能源消耗增长了 10 倍，由 7.75 亿吨增至 85.7 亿吨标准燃料。根据 1978 年的报导，世界化石燃料油大约可采储量约折合为 7300 亿吨标准煤，如按照现在的开采技术水平，煤可用约 200 年，石油大约可用 30 年，天然气可用 50 余年，这充分说明了能源问题的严重性。因而在现在社会中，任何国家都把节能作为一项国策<sup>[2]</sup>。

在我国，建筑耗能、工业耗能和交通耗能成为我国能源消耗的三大“耗能大户”。所谓建筑能耗通常是指建筑物使用过程中所消耗的能源，主要包括暖通空调、热水供应、炊事、家用与办公电器、照明等方面的能耗，其中采暖空调能耗占主要部分。据 2004 年国家电力部门统计，空调能耗已占全国年耗电量的 15% 左右，其增长率和全国实际 GDP 增长率相近，随着空调的进一步普及，空调用电负荷逐年猛增，这个数字还将进一步提高。在空调能耗中，空调用电负荷尤其值得关注。夏季供需矛盾突出，重点是空调用电负荷呈现“爆发性”增长，表现为用电总量和高峰用电负荷两个方面。特别是高峰用电的供需矛盾，例如



2002年、2003年、2004年我国各地夏季出现连续高温，全国各电网夏季高峰时段都出现了供电紧张。全国多数电网负荷又连续增高，至少有10个省市拉闸限电，据估计各电网高峰负荷中约有1/3都属于空调制冷用电，共达4500万千瓦，在上海，2004年夏天最高负荷达到1670万千瓦。在2003年峰值负荷组成中，空调负荷约600万千瓦，集中式空调的用电量已占全市高峰总用电量的31.1%以上。空调用电负荷增长随着温度的升高呈增长趋势<sup>[3]</sup>。国家管理委员于2005年3月1日起正式实施新的空调能效国家标准，这标志着我国实施能源效率标识制度，空调节能已经成为我国空调发展的主流。

辐射冷顶板在节能上的突出优势，使人们对辐射冷顶板在空调节能方面寄予希望。所谓辐射冷顶板供冷技术是指降低顶板表面温度，形成冷辐射面，依靠辐射面与人体、家具及围护结构其余表面的辐射热交换进行降温的技术方法。辐射冷顶板节能主要表现在：由于辐射冷顶板是直接通过辐射方式作用于人体和室内墙体，在相同的舒适性条件下，与常规空调系统相比，室内设计温度可比常规系统提高1~2℃；由于辐射供冷承担了大部分显热负荷，送风系统主要为满足室内卫生需要及补充冷量的不足，比全空气系统风量大为减少，因此大大减少了风机能耗；此外与空气相比，辐射冷顶板冷媒水具有高比热和高密度的特点，需更少的水泵能耗就可将相同冷量输送到目的地。

辐射冷顶板系统室内无回风，空调末端设备干工况运行，减少细菌孳生的机率，符合人体健康要求。“非典型性肺炎”（SARS）和“禽流感”疫情相继在东南亚和我国大规模爆发以后，人们的公共卫生意识有了很大程度的提高，对于长期处于的办公空间室内空气品质，特别是室内微生物环境提出了更高的要求。在我国，由于风机盘管加新风系统技术成熟、布置简单、造价较低，因此长期以来为业主和设计人员所接受，成为了如学校、办公楼、图书馆、医院等公共场所，所采用的非常典型的空气末端处理设备形式。而在我国风机盘管加新风系统的设计过程中，通常采用的是利用独立新风系统将室外新风处理到室内空气设计状态的等焓线上后送入室内的传统理念，这就要求位于室内的风机盘管不仅要处理室内全部湿负荷，还要承担部分室外新风所带来的湿负荷，造成了风机盘管长时间处于大除湿强度的工况下工作，而室内微生物源（如，带病人员等）所散发出的微生物孢子会被风机盘管的回风带入机组内，一些孢子便附着在过滤网、换热器（表冷器）和凝结水盘的表面，表冷器和凝结水盘的湿表面以及黏附其上的灰尘正为这些微生物的生长提供了一个良好的“温床”。特别

是对于间歇性运行的办公建筑空调系统而言，在系统停运时期（如，夜间和周末）表冷器和凝结水盘表面高温高湿的环境进一步加速了微生物的繁殖，在系统重新启动时，大量的微生物及其代谢物被风机盘管的送风带入到室内空气中，造成了室内微生物浓度的“爆发性增长”，这对于在室人员的健康是非常不利的<sup>[4]</sup>。由于采用辐射冷顶板作为空调系统的显热末端，辐射冷顶板只承担室内的显热负荷，其余负荷由空气输送系统承担。辐射冷顶板的进水温度高，全程为干工况运行，无凝结水，从源头上根除了细菌的生长，提高了室内空气品质。

由于辐射冷顶板面通过辐射方式直接作用于围护结构表面和人体表面，降低围护结构表面温度，加强了人体辐射散热份额，从而提高了人体的舒适性。美国、日本、欧洲对此都做过大量的研究测试，其结论是一致的。此外，辐射供冷没有吹冷风的感觉，不存在“空调病”，以及使用分体式空调时室内机噪声的问题。

辐射顶板除了在节能性、提高室内品质和舒适性三大优点，还具有：由于辐射供冷时所用冷媒水温度高，所以为低温的地面水、地下水、太阳能、地热（冷）等自然冷热源的使用，提供了可能性，提高自然资源的利用，减少环境污染；辐射冷顶板系统占用建筑空间小，提高了建筑空间的利用率。

辐射冷顶板有着众多优点，也存在一些缺点阻碍了它的应用，这些缺点包括：表面温度低于空气露点温度时，会产生结露，影响室内卫生条件；由于露点温度限制，加上表面温度太低，会影响人的舒适感，所以限制了辐射供冷的供冷能力；在潮湿地区，室外空气进入室内会增大结露的可能性，因此要求门窗尽可能密闭，影响自然通风；不同时使用风系统时，室内空气流速太低，如果温度达不到要求，更增加闷热感。

辐射供冷作为当今国际上普遍采用的一项健康节能的先进技术，适应我国目前空调系统发展的大方向，应该为我国空调界所知、所用。我国从上一世纪90年代开始，就开始了辐射供冷系统和辐射板的研究工作，探讨辐射供冷的特点、热舒适性、新风量的选取以及空调水系统形式等。本文从探索辐射冷顶板的发展历史，产品开发和使用情况着手，研究辐射冷顶板的换热机理，与实验相结合分析了辐射冷顶板换热性能的影响因素，以期人们对它有更好的了解，更好地应用于实际中，创造出更好的生活和工作环境。

## 1.2 辐射供冷的发展历史和应用情况简介

本节参考了文献[5]对辐射供冷的发展历史和应用情况的介绍。人类从很早开始就已经采用了辐射供冷，据有关资料的记载，最早采用辐射供冷的时期可以追溯到公元前 7000 年。由于受到技术、经济、文化等多方面的社会原因，辐射供冷的普及程度远不及辐射供暖，现代辐射供冷技术起源于辐射供暖。

现代辐射采暖开始于 1907 年，英国教授 Arthur H. Barker 发现，如果将热水管道埋入地板，可以达到很好的供暖效果。随后，辐射供暖在欧洲普通建筑得以大规模的采用。随着辐射供暖应用的扩大，人们不禁想到，只要把管内热水换成冷水，辐射供暖就可以转换成辐射供冷，将辐射供冷作为辐射供暖的附属功能之一。但是，20 世纪 30 年代设计的辐射供冷系统大部分由于冷凝水问题导致失败，另外还存在空调温度不保证及水管断裂、锈蚀、系统漏水等现象，迫使人们逐渐地放弃了辐射空调方式，该项技术也一直停滞不前。

现代辐射供冷技术大约在 50 年前开始得以应用。1951 年，Bildén 借助一些工程实例，集中报道了利用水采暖和供冷的优点，并首次提出辐射供冷需要和通风结合。此后越来越多的学者投入精力对辐射供冷技术进行研究。到 1973 年，辐射吊顶作为空调系统的末端设备，在许多建筑当中已经得以广泛应用，辐射吊顶表面温度和供、回水温度等技术参数要求也有了明确的规定，此时的辐射供冷已经成为现代该项空调技术的基础。

随着空调行业在民用和商业建筑中需求的不断增大，对流空调方式发展最为迅速，几乎成为“空调”的代名词。但是这种空调方式在保证室内空气品质时存在局限性，其所必需的空调箱、风管往往成了细菌繁殖的基地和细菌传播的途径。受自身的限制，对流空调方式无法从根本上解决这些由自身引发的问题。与此同时，在世界能源日益紧张的状况下，人们发现空调用电占据建筑能耗的绝大部分。政府部门大力呼吁节约空调用电，各研究单位和企业也开始投入大量人力物力，以寻求健康节能的空调系统。基于辐射空调方式在欧洲的成功经验和系统本身低能耗、高舒适性的突出优点，洁净且节能的辐射空调方式再度引起人们的关注。

自从二十世纪八十年代的智能化建筑提出以后，智能建筑的概念逐渐深入人心，欧洲地区首先大规模地采用了辐射供冷技术，现已成为辐射供冷应用最多的地区，尤其在西欧和北欧国家。辐射供冷在欧洲已经成功应用了 15 年之久，并发展成为一项较为成熟的技术，应用领域从单一的住宅建筑拓展到商业建筑。

20 世纪 90 年代初期，辐射供冷与空调送风的技术相结合后，人们对辐射供冷的关注越来越多。它从一定程度上解决了辐射板的冷量和冷凝水问题，使得辐射供冷的应用不再局限于气候温和地区。实验证明，只要向室内送入适量

新风,并采用凝露控制技术,那么即使在炎热潮湿的地区也能够采用辐射供冷。由于辐射供冷技术符合健康节能的空调要求,而且不受地域限制,因此得以大力推广。以几个国家为例:在加拿大,近几年的新建建筑采用的辐射供冷的面积超过了总面积的50%;在德国,一年当中采用辐射板的新建和扩建项目面积超过80万平方米,截至1996年,德国大约有42个辐射板生产厂家,辐射供冷已经成为德国空调的新标准,而到1999年,德国新建或正在建设的非住宅建筑空调(主要是银行或保险业的办公大楼)有10%采用的是辐射冷顶板空调系统;在美国越来越多的办公建筑开始采用辐射冷顶板系统,文献[1]指出2002年美国能源部将辐射吊顶列入美国当今和未来15项空调节能技术之一。因此在美国和加拿大辐射供冷空调技术得到大力提倡和采用。

我国从80年代初开始研究辐射供冷,也陆续发表了一些地板辐射供冷顶板辐射供冷的文章,借助国外工程资料,从理论上分析辐射供冷。而且这些文章的数量和其它领域的研究相比,是非常少的。由于当辐射供冷技术从欧美引进国内时,人们对辐射供冷一直存在偏见,认为该系统容易结露,初投资过高,而且辐射板本身的冷却能力有限,这三大顾虑阻碍了辐射供冷技术在我国的应用。

目前辐射板的生产厂家主要分布在欧洲、加拿大和美国,近来我国也有少数厂家和研究机构开始研究和生产辐射供冷末端产品,逐渐把注意力从系统研究上面转移到国有产品的开发上,如文献[5]提到一种新型的金属辐射冷顶板的研发,整块板采用两张铝板冲轧而成,水管截面呈半圆形,增加了冷水与金属板面的接触传热面积,特别是顶板表面经过了憎水膜处理,从根本上解决了辐射冷顶板凝露的问题。这种新型板制作工艺简单,价格低廉,从测试结果来看,该产品的性价比可与国外知名产品相比。文献[6]分别对这种新型辐射冷顶板在夏季与蒸发冷却结合和在冬季供热的能力进行了实验研究,实验取得了满意的结果。同时指出由于西北地区干燥炎热,辐射冷顶板表面不易结露,使得控制系统非常简单,在冬夏两季可以共用一套辐射冷顶板系统就可提供舒适的室内环境。

### 1.3 辐射冷顶板的类型

用于辐射供冷的产品有四种:冷梁、内埋管的混泥土板、毛细管网板(冷却格栅)和金属辐射板。冷梁作为室内显冷设备,可以嵌在房间吊顶内,表面与吊顶平面相平,也可以自由悬挂在大空间屋顶上,像房梁一样成行排列,因此称为“冷梁”。内埋管的辐射板一般是在混泥土板内布置金属管或者塑料和橡胶管。由于金属管容易和地板混泥土发生化学反应,金属管被腐蚀以后容易漏

水,并且检修也很不方便。随着工业技术的不断改进,现在常用经过抗氧化处理的聚乙烯或橡胶管,均匀地排放在地板下,水管间距在10mm~30mm之间,确保地面温度分布均匀。这种辐射板一般比较厚,因此承重能力强,主要应用在地板辐射供冷当中。地板辐射供冷的地面温度一般控制在20℃左右,此外要求气候不能太潮湿,否则地面容易孳生霉菌,在潮湿地面行走时容易滑倒,由此可以看出,地板辐射供冷量较小,并且受到气候条件限制,符合欧洲国家气候温和和干燥的特点,因此这种辐射板主要在欧洲使用。虽然该辐射板对负荷变化的反应最不灵敏,但是由于地板蓄热性能好,它的供冷效果也更加持久和稳定<sup>[5]</sup>。

毛细管网由比较密集的PPT材料或者橡胶材质的毛细管水管组成。由于毛细管直径小,以前受到工艺技术的限制,这种小直径的管网无法大批量的生产,随着生产工艺提高以及材料的突破,毛细管得以大批量的生产。相对其它类型的辐射供冷板,毛细管辐射板可以说非常年轻,世界上第一家生产毛细管辐射板创建于1994年。毛细管辐射板一般安装在房间吊顶或者墙壁内,在管网表面进行液体石膏喷涂,使它和建筑相互结合。也可以将管网埋入石膏板或者嵌在金属板上做成辐射板,可用于墙壁和吊顶辐射供冷。管内水流速度较慢,大约在0.1~0.2m/s之间,因此系统运行时的噪声较低。同时由于这种格栅的表面积大,毛细管管径小,所以温度分布比较均匀。毛细管系统可以在工厂内根据不同需要制造出各种尺寸和特性,具有高度的灵活性,可以方便的安装在球形天花板或者其它不同形状的吊顶。连接诸如电灯、风管等设备也可安装在系统上,给与建筑师和设计人员无限的设计自由。毛细管吊顶系统非常薄和轻,可不需要特殊结构来支持,在翻新时也可以很方便的与原来的吊顶设备融为一体,因此即可用新建项目,也可用于改造项目。

金属辐射板是应用最多的一种辐射供冷元件,主要用于辐射吊顶。它实际上是一种管内走水,管外为空气的表面式空气换热器。为了便于工业化生产和安装,一般做成模板(module panel)形式。辐射板宽度一般为0.6m,长度从0.6-3.7m不等,板厚度在0.7-2cm之间,如果有特殊需要,可以加大辐射板长度。辐射板的面板通常为铝板(也有做成铁板),水路可以串联,也可以并联。为了减少冷损失,辐射板背面保温。金属辐射板一般安装在吊顶上,也可以安装在墙壁上。安装在墙壁上时,人们往往喜欢对辐射板的表面进行个性化的工艺艺术处理,起到供冷和装饰的双重作用。安装在吊顶时,辐射供冷系统一般会结合机械通风系统使用。如果安装全吊顶,辐射面板应该做成具有吸声功能的孔板。随着制作工艺的不断改进,目前辐射板的使用寿命可以达到30年以上。金属辐射板具有以下几项优点:1)对负荷反映迅速灵敏,一般不超过5分钟;2)占据室内空间小,能够灵活配合建筑美观以及空调系统分区要求,适合新建建筑和改造项目使用;3)安装、检修方便,可以在不影响系统运行的情况下进行局

部检修；4) 运行噪声低<sup>[5]</sup>。

鉴于金属辐射冷顶板是应用最多的一种辐射供冷元件，以及毛细管辐射板系统作为冷辐射板的新起之秀，系统轻薄、应用灵活，本文主要对这两种类型的辐射冷顶板进行了研究。

## 1.4 文献综述

人类从很早开始就已经采用了辐射供冷，真正的现代辐射供冷技术大约在 50 年前开始在欧洲得到应用。直到 20 世纪 90 年代初期，辐射供冷与空调送风的技术相结合后，人们对辐射供冷的关注和研究越来越多，包括了辐射板的换热机理、系统设计和控制、系统性能、系统舒适性和系统的一次投资对比的研究。

### 1.4.1 辐射供冷顶板国外研究状况

关于辐射冷顶板系统的研究，美国宾夕法尼亚州立大学的 Stanley A. Mumma 教授及其课题组将其与独立新风系统与相结合 (CRCP+DOAS)，形成一种新型的空调方式，并对该系统做了一系列研究。其研究工作主要体现在以下方面：(a) 系统概念与形式的提出，以及辐射冷顶板等组成部件的提出和介绍<sup>[3]</sup>；(b) 基于室外新风状态分区和系统能耗最小化原则所提出的 DOAS 和辐射冷顶板等各部件的控制逻辑及其原理，以及服务于单个区域的系统实验台的搭建，辐射冷顶板水系统形式优化<sup>[8][9][10][11][12]</sup>；(c) 建立了主动型（监控人员在室情况、门窗开启情况）和被动型（被动式结露传感器）二类防结露控制手段，研究了辐射冷顶板的结露特性和系统的防结露控制能力<sup>[13][14]</sup>；(d) 系统所控室内环境舒适性的客观评价<sup>[13][15]</sup>。(e) 服务于多区的系统控制逻辑与方式的理论拓展：主要的控制理念为最不利区域控制，对于那些非最不利区域会产生过冷的问题，提出了分别加设末端再热装置的方式来予以解决<sup>[16][17]</sup>。(f) 辐射供冷顶板的节能分析<sup>[18]</sup>。(g) 通过混合通风方式可以明显提高顶板供冷能力，但是当送风口的送风速度小于 2m/s 时，混合通风对辐射冷顶板供冷能量的提高影响很小，此时可用自然对流换热公式来估计辐射冷顶板的供冷能力<sup>[19][20]</sup>。(h) 对悬挂式顶板绝热和不绝热的辐射冷顶板的实际应用冷却能力进行估计，采用 2-k 方程对辐射冷顶板换热量影响因素进行影响因子优化，并在实验统计的基

基础上得出辐射冷顶板换热量计算的线性方程,对自然对流和混合通风两种情况都适用<sup>[21][22][23]</sup>。

关于辐射冷顶板系统的能耗和一次投资的研究,前面提到 C. Stetiu 使用美国各地气象参数对商用建筑进行模拟计算的基础上得出结论,在使用电力(不包括使用自然冷热源)的前提下比较,得出辐射供冷的耗能量可以节能 30%<sup>[2]</sup>; Abdelaziz Laouadi 给出了一个详细的辐射冷顶板供暖和供冷的模型用于能耗模拟软件计算<sup>[24]</sup>。Franc Sodes 利用能耗模拟软件 TRANSYS,从能耗、一次投资和系统空间需求与 VAV 系统对比,得出辐射冷顶板系统能耗更低,空间需求更少,当空调负荷大于 45-55W/m<sup>2</sup> 时,辐射冷顶板系统的一次投资更少<sup>[25][26]</sup>。

关于辐射冷顶板舒适性研究, P. Simmonds 高度评价了辐射冷顶板作为空调系统的显热末端形式的节能性和舒适性,给出了自然对流下辐射冷顶板系统的设计步骤,以及防止结露的注意事项,通过一个具体的例子阐述了系统的设计要点<sup>[27]</sup>。日本 Koichi Kitagawa 等学者,通过客观实验对辐射冷顶板供冷系统进行了评价。测试者坐在一间装有辐射冷顶板供冷系统的测试室内的椅子上,室内风速小(0.1-0.3m/s),改变室内相对湿度,分别为 45%、65%和 85%,通过问卷调查测试者的热感觉和舒适感觉。调查结果显示,在辐射冷顶板供冷系统中,小风速有助于提高人体的舒适度<sup>[28]</sup>。Martin Behne 通过实验分析了当置换通风空气系统承担了超过 20%-25%的冷负荷,那么混合通风加辐射冷顶板供冷系统能够比置换通风加辐射冷顶板供冷系统,能够提供更好的舒适环境<sup>[29]</sup>。

关于辐射冷顶板性能和传热机理的研究, Stetiu, Feustel 和 Winkelmann 建立了一个辐射冷顶板的模型,可模拟水管辐射吊顶供冷的性能<sup>[30]</sup>。关于辐射冷顶板传热机理和影响因素的研究, Morteza 和 Nirvan 建立了辐射冷顶板与热区域的换热模型,与其它模型不同之处是该模型中考虑了人体与辐射冷顶板的换热,在建立模型中重点分析了辐射换热的角系数计算<sup>[31]</sup>。Yizai 和 Mumma 建立了采用导热板为传热中介的辐射冷顶板传热方程,阐述了导热板效率、管径、管间距、质量流量、管长、板材的热工性质和室内空气流速对顶板换热的影响<sup>[32]</sup>。

#### 1.4.2 辐射供冷顶板国内研究状况

关于辐射冷顶板系统介绍和设计的研究有,湖南大学的殷平教授首次介绍了 Mumma 教授提出 DOAS 与辐射冷顶板末端相结合的系统,从系统设计的角度进行了分析计算<sup>[33]</sup>,并研制出一种在性价比可与国际知名品牌辐射冷顶板抗

衡的新型辐射冷顶板<sup>[34]</sup>。关于辐射冷顶板应用研究,杨芳介绍了辐射供冷的历史和辐射板的类型,提出辐射板冷量计算模型和计算方法,辐射供冷系统的特点及应用,最后总结了辐射冷顶板水系统形式和控制方法<sup>[5]</sup>。布文峰通过对冷顶板制冷性能的研究,设计并组装了一套冷顶板系统,对辐射冷顶板的换热效果和室内环境进行了实验研究,并编制了相应的运行程序,验证了冷板系统的实用性和舒适性<sup>[35]</sup>。

关于辐射冷顶板能耗和一次投资的研究有,香港学者通过能耗模拟软件 ACCURACY 对针对香港的气候条件,对常规 CAV 系统、全热回收的全空气系统、辐射冷顶板结合空调箱系统,辐射冷顶板结合空气干燥剂除湿系统,做了全年能耗空调能耗对比,结果显示,相对常规 CAV 系统,辐射冷顶板结合空气干燥剂除湿系统能节能 44%<sup>[36]</sup>;并通过能耗模拟软件 ACCURACY 探索辐射冷顶板结合通风系统在炎热潮湿地区如何避免结露问题,结果显示,夏季提前一小时通风除湿,就能够避免结露<sup>[37]</sup>。

关于辐射冷顶板系统的舒适性的研究有,熊帅介绍了辐射冷吊顶与独立新风相结合的空调系统的技术特点,并对辐射冷顶板在我国面临结露,冷顶板冷量不足和一次投资三大进行分析。研究表明与传统空调相比,此系统在舒适性、安全性、节能性方面都有其优势,具有很好的发展前景<sup>[38]</sup>。熊帅,汤广发利用计算流体力学(CFD)的方法,对使用冷顶板与独立新风相结合的办公建筑进行了计算模拟,并对室内空气的速度场、温度场、垂直温度梯度进行分析,认为该系统能提供良好的室内舒适性<sup>[39]</sup>。狄洪发通过在实验小室内对辐射吊顶夏季供冷和冬季供暖的热工性能进行的测试,根据实验数据,计算了对流和辐射的综合效果。结果显示在我国应用辐射吊顶可以满足供暖的要求,而且具有适宜的室内温度分布和人体舒适感<sup>[40]</sup>。邓仁杰等分别从空调系统的工况参数和热环境指标方面,评价了冷吊顶系统优于传统空调系统的热舒适性;从风机能耗、辐射传热特性和供冷工质的替代等方面,分析了冷吊顶空调系统独特的节能优势。就冷吊顶系统的模拟研究方法,评述了几种模拟模型、应用软件和实验方法等<sup>[41]</sup>。

关于辐射冷顶板水系统的研究有,陈启,马一太,马利蓉认为辐射供暖所需热水的温度为 40—60℃,辐射供冷所需冷水的温度为 16-20℃,针对我国丰富的天然冷热资源,探讨了以地热水、地下水、地热(土壤热)、太阳能、电锅炉、燃气锅炉作为辐射供暖、供冷系统的热源或冷源的可行性<sup>[42]</sup>。孙丽颖,马最良通过对冷却吊顶运行能耗的计算机动态模拟,分析了供水方式、新风系统形式、



冷却塔供冷、制冷机冷水温差等因素对系统能耗的影响,认为采用冷却吊顶水系统与新风系统独立的水系统形式,并结合冷却塔自然供冷,节能效果最好。建议生产厂家开发小温差、大流量、低流动阻力的冷水机组,以推动冷却吊顶的应用<sup>[43]</sup>。文献[44]分析了冰蓄冷与辐射冷顶板相结合系统,并与一幢位于东京的典型办公楼为研究模拟对象,结果显示当采用蓄冰辐射式供冷系统时,最大电力需求量和年耗电均等于或稍小于对流式系统。没有蓄冰系统时,对辐射式供冷来说,其最大电力需求量和年电耗会比对流式系统增加大约 10%。如果不采用蓄冰,辐射式系统在节能和运行费用方面就没有长处。

在我国辐射冷顶板通常与置换通风相结合作为空调系统使用,关于辐射冷顶板与置换通风系统的这方面的研究有,王晋生针对目前冷顶板/置换通风系统在推广应用中的两个突出问题:“结露”和“下降气流”问题提出了解决方法,采用对长波具有高透性的薄膜包裹冷顶板,并在冷顶板下表面和薄膜之间保留一层真空或空气夹层,通过实验验证了这种方法的有效性。对冷顶板/置换通风在无膜、加膜且夹层为空气、加膜且夹层为真空三种情况下的性能进行了模拟比较。通过比较可知:在系统总制冷量相同的前提下,与无膜时相比,加膜后室内温度场具有明显的置换通风特点,“下降气流”明显减小;污染度平均降低 70%左右,空气品质明显提高<sup>[45]</sup>。关于能耗方面,谭礼保评价置换通风和冷顶板复合系统性能及节能潜力,应用 EnergyPlus 软件分别模拟了我国六个典型城市中采用不同除湿方式的置换通风和冷顶板复合系统及带热回收装置的定风量系统供冷季的能耗进行对比分析。结果表明:置换通风和冷顶板复合系统采用转轮除湿方式时总能源费用与冷却除湿方式相当;置换通风和冷顶板复合系统可比定风量系统节约 15%以上的运行费用,节能潜力因地区气候和能源价格而异<sup>[46]</sup>。关于舒适性,王晓娇研究了冷顶板加置换通风相结合的复合式空调系统,在保证置换通风换气效率高,提高了室内空气品质的优势基础上,加入了冷顶板来增强空调系统的制冷能力,并有效减小室内的垂直温度梯度,均可以达到 ISO7730 推荐的 3℃的范围值。冷顶板的存在,更多的作用是利用自身的高辐射性来降低室内的平均温度,减小室内的垂直温度梯度,增强置换通风系统的制冷能力。因此,对房间的气流组织并无多大的影响。但是,要考虑冷板表面的结露问题,推荐使用的表面温度为 19~21℃<sup>[47]</sup>。

关于辐射冷顶板性能和换热机理的研究有,朱能等结合我国的材料条件、加工能力等具体情况,在对冷顶板热工性能理论分析的基础上,对冷天花冷顶板

进行了热工实验研究和对实验结果进行正交分析。研究表明,在影响冷顶板传热性能的多种因素中,冷顶板内部的冷媒管管间距、冷顶板的板面材料导热性能等与冷顶板传热(冷)量有显著的相关性,而冷媒管管径、冷顶板的厚度等与冷顶板传热量的相关性不明显。并由此得出在我国加工生产冷天花冷顶板的选材原则和内部结构的优化原则<sup>[50]</sup>。闫全英等人通过建立天棚辐射供冷系统的物理模型和数学模型,对控制方程进行数值模拟,给出了影响系统供冷能力的诸多因素之间的关系。研究结果显示:冷水温度越低,天棚表面温度越低,系统提供的冷量越大。天棚表面与室内环境之间的辐射换热量大于对流换热量,舒适度好。管子埋深越大,天棚表面温度越大,换热能力越小,但差别不显著。埋管间距越大,天棚表面温度越大,换热能力越小,所以埋管间距不宜取得过大。埋管管径的变化对天棚表面温度及换热量的影响不大<sup>[51]</sup>。

### 1.4.3 小结

国内外学者对辐射冷顶板供冷进行了一系列的研究,涵盖了辐射冷顶板换热机理研究,实验和模拟研究,与辐射冷顶板相结合的置换通风或独立新风复合空调系统在设计应用、能耗和舒适性方面的研究,使人们对该辐射冷顶板有了更进一步的认识。这些研究表明辐射冷顶板供冷作为空调系统的显热末端具有节能、舒适性好等优点,是一项健康节能的先进技术。但是目前对辐射冷顶板换热机理的具体研究还不是很详细,本课题通过对辐射冷顶板换热机理和实验研究,补充了这一领域。

## 1.4 本文的研究目的与主要工作

本文研究目的是基于辐射冷顶板换热机理分析,从理论研究和实验测试两方面对辐射冷顶板换热机理和影响因素进行探讨。

本文的主要工作由以下五个方面组成:

### 1) 基于辐射冷顶板换热机理建立冷量计算模型

由于大多数辐射冷顶板采用金属冷顶板,毛细管冷顶板近年来发展迅速,以及毛细管管径小,在材质上也与金属板不同,在本文分布对金属冷顶板和毛细管冷顶板两种类型的辐射冷顶板进行了研究。分别建立典型金属辐

射冷顶板模型和毛细管辐射冷顶板模型，分析了换热机理，建立这两类辐射冷顶板冷量理论计算模型。

2) 辐射冷顶板冷量计算

采用辐射冷顶板冷量计算模型进行迭代计算，得出辐射冷顶板的冷量，并与辐射冷顶板标准冷量对比。

3) 辐射冷顶板换热实验研究

搭建测试辐射冷顶板冷量测试实验台，改变顶板进水水量，得到辐射冷顶板供冷量的变化规律。

4) 辐射冷顶板供冷量 CFD 模拟

采用 Fluent 模拟软件对辐射冷顶板供冷能力进行模拟研究，通过改变辐射冷顶板表面温度，间接模拟了改变流量对辐射冷顶板供冷能力的影响，为理论计算模型提供依据。

5) 辐射冷顶板换热性能影响因素分析

采用辐射冷顶板冷量计算模型，分析影响辐射冷顶板换热性能的因素，并重点分析了辐射冷顶板工作条件因素对换热量的影响。

## 第2章 辐射冷顶板换热机理分析和计算

由于金属辐射冷顶板美观、安装方便快捷，在所有的辐射冷元件中应用最广；毛细管辐射板系统轻薄、柔软度高、应用灵活；并由于毛细管冷顶板的结构和材料与金属辐射冷顶板不同，本文主要对这两种类型的辐射冷顶板进行了换热机理分析和换热量的计算。

### 2.1 金属辐射冷顶板的类型

按金属辐射冷顶板结构分，金属顶板主要有三类：一类是将管道与管板紧固件连接，如图 2.1；一类是将管道焊接与顶板上，如图 2.2；另一类是由顶板块挤压而成，如图 2.3。三种类型的金属辐射冷顶板主要区别在管道与顶板连接的方式不同，也由于连接体的导热性能不同，使得顶板的换热性能有所不一样，但是其换热机理是一样的。由于多数金属辐射冷顶板采用类型 3，本章对图 2.3 中的金属辐射冷顶板类型为例，分析了金属辐射冷顶板的换热机理。

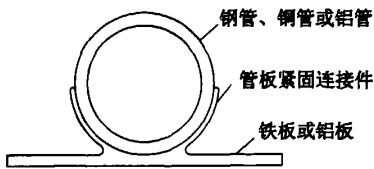


图 2.1 金属辐射冷顶板类型 1

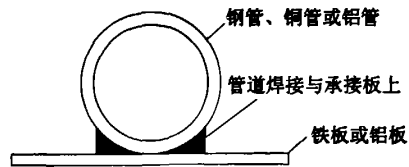


图 2.2 金属辐射冷顶板类型 2

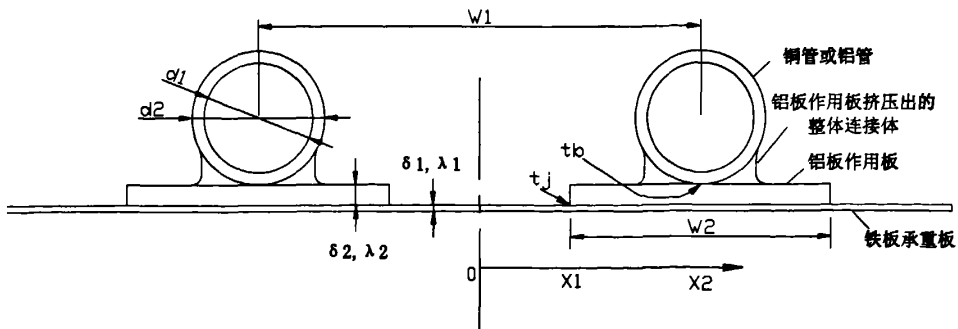


图 2.3 金属辐射冷顶板类型 3

## 2.2 毛细管辐射冷顶板的类型

按安装方式毛细管冷顶板可分为五种类型<sup>[51]</sup>：

第一类是用石灰涂层与毛细管顶板上，将整个毛细管网覆盖，由于整个顶板的结构高度非常小，特别适合层高低的房间，安装后几乎不影响层高，如图 2.4。

第二类是金属盒冷吊顶，毛细管网可安装在所有类型 and 形状的金属盒吊顶内，毛细管网被粘在金属盒吊顶上，再覆盖一层绝热层，如图 2.5。

第三类是毛细管网固定在干结构吊顶的下方，表面石灰石抹平，毛细管的水管和其他房间设施的管线都安装在吊顶狭小的吊顶空间内，如图 2.6。

第四类是干结构冷吊顶，毛细管网安装在无缝封闭的干结构吊顶上方，覆盖一层绝热层，在朝向房间的一侧压平整并粉刷，如图 2.7。

最后一类是毛细管冷吊顶采用声学平制造，最外层有声学石灰层，如图 2.8。

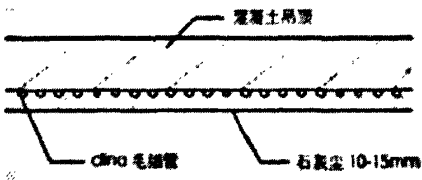


图 2.4 毛细管顶板类型 1

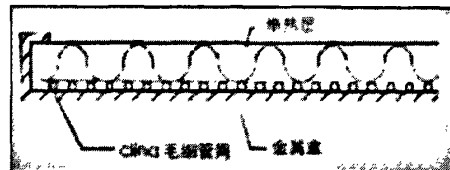


图 2.5 毛细管顶板类型 2

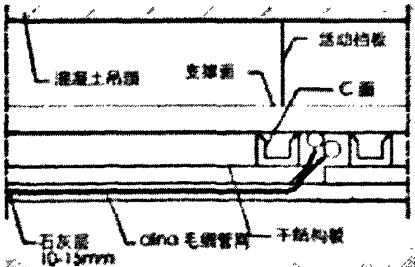


图 2.6 毛细管顶板类型 3

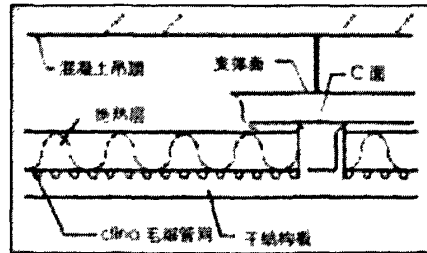


图 2.7 毛细管顶板类型 4

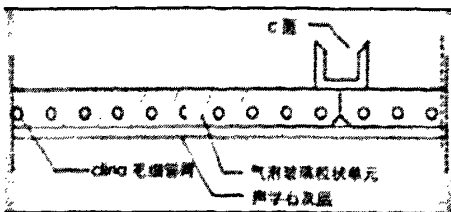


图 2.8 毛细管顶板类型 5

## 2.3 金属辐射冷顶板换热机理分析

本小节对金属板辐射板类型3（图2.3）为例，分析了金属辐射冷顶板的换热机理。辐射冷顶板的冷水与室内空气之间的换热分为以下几个过程：管内冷水与管内壁之间的强迫对流换热；管内壁与管外壁之间的导热换热；管外壁与顶板作用板经连接处之间的导热换热；顶板作用板吸收的冷量传布整个顶板表面的导热过程；顶板表面与房间进行的热交换过程。为了方便分析，将这几个过程划分为板上传热过程、板内传热过程和板下传热过程。

**板上换热过程：**热量从管板结合处经管壁传至管内冷水的过程，包括管内冷水与管内壁之间的强迫对流换热、管内壁与管外壁之间的导热换热，和管外壁与顶板作用板经连接处之间的导热换热。

**板内换热过程：**顶板作用板吸收的冷量传布整个顶板的过程；

**板下换热过程：**顶板表面与房间环境进行热交换过程。

由于传热过程比较复杂，对辐射冷顶板的传热过程做了以下假设，以便于分析和求解：

- 1) 这里讨论的辐射冷顶板性能是稳态情况下性能，一切传热分析均在稳态传热条件下进行；
- 2) 辐射冷顶板为单面换热，即忽略顶板背部经由保温材料的传热及顶板边缘的传热；
- 3) 忽略冷顶板板面垂直厚度方向上的传热，即忽略板面垂直温度梯度；
- 4) 忽略管道、辐射板、冷媒在冷媒流动方向上的轴向传热；
- 5) 认为管内冷媒流动为均匀流动。

### 2.3.1 管内对流换热系数

当流体与管壁之间有热交换时，管子壁面上的热边界层有一个从零开始增长直到汇合于管子中心线的过程。当流动边界层及热边界层汇合于管子中心后流动及换热已经充分发展，此后的换热强度将保持不变。从进口到充分发展段之间的区域称为入口段。入口段的热边界层较薄，局部表面传热系数比充分发展段高，且沿着主流方向逐渐降低。

#### 1) 热入口段长度

有关实验研究表明，层流时入口段长度  $l'$  可采用 Shan 和 Bhatti[1987]<sup>[57]</sup> 推

荐的经验公式:

$$\frac{l'}{d_1} \approx 0.05 \text{RePr} \quad (2.1)$$

其中  $\text{Re} = \frac{vd_1}{\gamma}$ , 而紊流时, 当  $l'/d_1 > 60$ , 平均管内传热系数就不受入口段的影响。

2) 传统理论管内流态由 Re 判断:

$\text{Re} \leq 2300$	层流
$2300 < \text{Re} < 10000$	过渡流
$\text{Re} \geq 10000$	紊流

3) 由于金属辐射冷顶板模块短, 层流时的管内换热常常处于入口段的范围, 可采用齐德-泰特公式<sup>[57]</sup>来计算长为  $l$  的管道的平均  $Nu$  数:

$$Nu = 1.86 \left( \frac{\text{Re}_f \text{Pr}_f}{l/d_1} \right)^{1/3} \left( \frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.14} \quad (2.2)$$

式中定性温度  $t_f$  为流体的平均温度, 式中下标为  $f$  的参数是定性温度下水的物性参数, 下标为  $w$  的参数是壁温下水的物性参数。  $\eta_f$  与  $\eta_w$  分别是按流体平均温度及壁面温度计算的流体的动力粘度, 式中引入两粘度之比来考虑管内不均匀物性场对换热的影响。实验验证范围为

$$\text{Re} < 2300, \text{Pr} = 0.48 \sim 16700, \frac{\eta_f}{\eta_w} = 0.0044 \sim 9.75, \left( \frac{\text{Re}_f \text{Pr}_f}{l/d} \right)^{1/3} \left( \frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.14} \geq 2$$

4) 过渡流至紊流充分发展流采用格尼林斯基 Gejolinski[1976]<sup>[57]</sup>推荐的经验公式:

$$Nu = 0.012(\text{Re}_f^{0.87} - 280)\text{Pr}_f^{0.4} \left[ 1 + \left( \frac{d}{l} \right)^{2/3} \right] \left( \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0.11} \quad (2.3)$$

实验验证范围为:  $1.5 \leq \text{Pr} \leq 500$ ,  $0.05 < \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} < 20$ ,  $2200 < \text{Re} < 10000$

式中, 定性温度下标的取法同式 (2.2)。

### 2.3.2 板上换热过程

1) 管内冷水与管内壁之间的强迫对流, 沿水流流动方向单位管长换热量  $q_f$ :

$$h_f = \frac{Nu \cdot d_1}{\lambda_f} \quad (2.4)$$

$$q_f = \frac{t_f - t_{w1}}{\frac{1}{\pi d_1 \cdot h_f}} \quad (2.5)$$

$t_f$  为流体的平均温度,  $t_{w1}$  为管内壁温度。

管内壁与管外壁之间的导热, 沿水流流动方向单位管长换热量  $q_w$ :

$$q_w = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{1}{2\pi\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (2.6)$$

式中  $\lambda_w$  为管道的导热系数。

管外壁与顶板经连接处之间的导热, 沿水流流动方向单位管长导热换热量  $q_b$ :

$$q_b = \frac{t_{w2} - t_b}{\frac{\delta_b}{\lambda_b d_2}}$$

式中  $\lambda_b$  为连接体的导热系数。

将以上三个过程传热公式联立, 利用稳态时传热量相等, 得到

$$q_1 = q_f = q_w = q_b = \frac{t_f - t_b}{\frac{1}{(\pi d_1 h_f)} + \ln(d_2/d_1) \times 1/(2\pi\lambda_w) + \delta_b/(\lambda_b d_2)} \quad (2.7)$$

对于金属顶板三种类型, 主要区分在于板内传热热阻, 具体的说区别在于式

(2.7) 中第二项热阻和第三项热阻, 即  $\ln(d_2/d_1) \times 1/(2\pi\lambda_w) + \delta_b/(\lambda_b d_2)$  的不同。

为了便于分析, 假设  $\frac{1}{C_{bond}} = \ln(d_2/d_1) \times 1/(2\pi\lambda_w) + \delta_b/(\lambda_b d_2)$ 。

### 2.3.3 板内换热过程

这是顶板吸收热量处传布整个顶板表面的导热过程。冷顶板板壳一般为金属, 金属导热系数大, 厚度小, 假设顶板表面的总换热系数  $h$  为  $10W/(m \cdot K)$ ,



毕渥数  $Bi = \frac{\delta/\lambda}{1/h} = \frac{0.0031/185.6}{1/10} = 8.4 \times 10^{-5}$ ,  $Bi$  远远小于 1, 因此顶板厚度方向

的温度梯度可以忽略。设管板结合处的板表面温度均匀, 这样就可以把板表面的传热看成经典的肋片传热问题。

如图 2.3, 假设  $x_1 = \frac{W_1 - W_2}{2}$ ,  $x_2 = W_2/2$ ,  $W_1$  为顶板管间距,  $W_2$  为作用板的宽度。

1)  $0 < x < x_1$  肋片 1 的换热过程

在  $x$  处取微元  $\Delta x$  分析, 根据能量方程式有:

$$h_1 \cdot \Delta x (t_a - t_1) + \left( -\lambda_1 \delta_1 \frac{dt_1}{dx} \right) \Big|_x = \left( -\lambda_1 \delta_1 \frac{dt_1}{dx} \right) \Big|_{x+\Delta x} \quad (2.8)$$

$h_1 - 0 < x < x_1$  处顶板表面与空气的总换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$

整理上式有:

$$\frac{d^2 t_1}{dx^2} = m_1^2 (t_1 - t_a) \quad (2.9)$$

边界条件:

$$t_1 \Big|_{x=0} = t_b, t_1 \Big|_{x=x_1} = t_j;$$

设  $m_1^2 = \frac{h_1}{\lambda_1 \delta_1}$ , 得到  $0 < x < x_1$  肋片 1 内温度分布为:

$$t_1 - t_a = (t_j - t_a) \frac{\cosh(m_1 x)}{\cosh(m_1 x_1)} \quad (2.10)$$

平均温度为:

$$t_{m1} = \frac{\int_0^{x_1} t_1 dx}{x_1} = t_a + \frac{t_j - t_a}{m_1 x_1} \tanh(m_1 x_1) \quad (2.11)$$

2)  $x_1 < x < x_2$  肋片 2 的换热过程

同 1) 有,  $\frac{d^2 t}{dx^2} = m_2^2 (t - t_a)$

$h_2 - x_1 < x < x_2$  处顶板表面与空气的总换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

边界条件:

$$t_2 \Big|_{x=x_1} = t_j, t_2 \Big|_{x=x_2} = t_b$$

设  $m_2^2 = \frac{h_2}{\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2}$ , 得到  $x_1 < x < x_2$  肋片 2 内温度分布为:

$$t_2 - t_a = d \sinh(m_2 x) + e \cosh(m_2 x) \quad (2.12)$$

其中

$$d = \frac{[(t_b - t_a) \cosh(m_2 x_1) + (t_a - t_j) \cosh(m_2 x_2)]}{\sinh(m_2 W_2 / 2)}$$

$$e = \frac{[(t_a - t_b) \sinh(m_2 x_1) + (t_j - t_a) \sinh(m_2 x_2)]}{\sinh(m_2 W_2 / 2)}$$

平均温度为:

$$t_{m2} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} t_2 dx =$$

$$t_a + \frac{1}{x_2 - x_1} \frac{d}{m_2} [\sinh(m_2 x_2) - \sinh(m_2 x_1)] + \frac{1}{x_2 - x_1} \frac{e}{m_2} [\cosh(m_2 x_2) - \cosh(m_2 x_1)] \quad (2.13)$$

根据能量守恒原则, 在两肋片连接处, 即  $x = x_1$  处, 通过的热流量是相等的:

$$\lambda_1 \delta_1 \left. \frac{dt_1}{dx} \right|_{x=x_1} = (\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) \left. \frac{dt_2}{dx} \right|_{x=x_1} \quad (2.14)$$

求得

$$t_j = t_a - \frac{t_a - t_b}{g} \quad (2.15)$$

其中  $g = \cosh(m_2 W_2 / 2) + \sinh(m_2 W_2 / 2) \cdot \tanh(m_1 x_1) \cdot (\lambda_1 \delta_1 m_1) / ((\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) m_2)$

$\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为承重板和作用板的导热系数;

$\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别为承重板和作用板的厚度。

肋片沿水流流动方向单位管长热流量为  $q_2$ :

$$q_2 = -2(\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) \left. \frac{dt_2}{dx} \right|_{x=x_2} = 2(\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) m_2 \frac{(t_j - t_a) + (t_a - t_b) \cosh(m_2 x_2 - m_2 x_1)}{\sinh(m_2 W_2 / 2)} \quad (2.16)$$

### 2.3.4 板下换热过程

即顶板表面与房间环境进行的热交换过程, 辐射板与房间以辐射和对流进行热交换。

#### 1) 自然对流换热计算

a) 顶板自然对流换热系数按有限长平板的自然对流换热式计算<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} Nu^T &= 0.853\bar{C}_l Ra^{1/4} \\ Nu_l &= \frac{1.4}{\ln(1+1.4/Nu^T)} \\ C_l &= \frac{0.503}{\left[1+(0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \\ \bar{C}_l &= 4C_l/3 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$h_{conv} = \frac{Nu\lambda}{L^*} \quad (2.18)$$

$$Ra = \frac{\beta g \Delta t (L^*)^3}{a\gamma}, Ra \geq 1$$

$L^* = \frac{\text{平面的面积}}{\text{平面的周长}}$ ,  $Ra$  为瑞利数,  $h_{conv}$  为顶板与室内空气的自然对流换热系数。

$0 < x < x_1$  段, 顶板表面与室温的温差为  $\Delta t_1 = t_a - t_{m1}$ ;

$x_1 < x < x_2$  段, 顶板表面与室温的温差为  $\Delta t_2 = t_a - t_{m2}$ ;

所以在计算顶板表面平均温差  $\Delta t$  时采用下式计算:

$$\Delta t = \frac{1}{A} \int_A (t_w - t_a) dA = \frac{\Delta t_1 x_1 + \Delta t_2 (x_2 - x_1)}{x_2} \quad (2.19)$$

b) 按 *Awbi and Hatton*(1999)自然对流换热经验公式计算

*Awbi and Hatton*(1999)<sup>[60]</sup>通过 CFD 模拟和实验得出的地板辐射供暖自然对流换热系数, 由于地板辐射供暖自然对流机理和顶板辐射供冷对流换热的机理相同, *Awbi and Hatton*(1999)总结的地板辐射供暖自然对流换热系数也可用于辐射冷顶板供冷自然对流换热系数:

$$h_{conv} = \frac{2.175}{D^{0.076}} (t_a - t_{pm})^{0.308} \quad (2.20)$$

其中  $D = \frac{4 \times \text{顶板周长}}{\text{顶板面积}}$ ,  $t_{pm}$  为顶板的平均温度。

c) 按 *ASHRAE* 推荐公式计算<sup>[29]</sup>:

$$h_{conv} = 2.31 \times (t_a - t_{pm})^{0.31} \quad (2.21)$$

由 
$$Nu = \frac{h_{conv}L}{\lambda}$$

L 为顶板的特征长度,  $L = \frac{\text{顶板的宽度} + \text{顶板的长度}}{2}$ 。

顶板表面自然对流换热热量  $q_{conv}$  为:

$$q_{conv} = W_1 h_{conv} \Delta t \quad (2.22)$$

这些经验公式通过实验验证在工程误差允许范围内, 都可以作为自然对流换热系数的计算公式。本文采用的是式 (2.17) ~ (2.19)。

## 2) 辐射换热计算

顶板与室内环境之间的辐射换热主要是楼板与其它 5 个非冷却表面之间的换热, 冷顶板为平板型, 自身之间无辐射换热。金属辐射面板和室内空气之间的传热是一个复杂的动态过程, 一般对于辐射供冷系统来说, 辐射部分的冷量占总冷量的 50% 以上。

辐射换热热量  $q_r$  计算式如下:

$$q_r = W_1 \sigma \varepsilon_s (T_p^4 - T_r^4) = h_r W_1 (T_p - T_r) \quad (2.23)$$

$$h_r = \frac{q_r}{T_p - T_a} = \sigma \varepsilon_s \frac{(T_p^4 - T_r^4)}{T_p - T_a} / W_1 \quad (2.24)$$

$h_r$  为顶板表面与房间的辐射换热系数。计算  $T_r$  时引入房间平均辐射温度 *MRT* (Mean Radiant Temperature) 概念, 所谓房间平均辐射温度是将人体所处的环境假定为一个内表面均一的黑体环境, 人体同假想黑体的换热与真实环境相同, 那么黑体环境的内表面温度就是实际环境的平均辐射温度。平均辐射温度可以从辐射强度直接计算得到, *Palmer* 给出了计算公式, 但是这种计算公式比较复杂, 这里不再详细引述。工程应用中, 可近似认为平均辐射温度等于围护结构内表面平均辐射温度, 围护结构内表面平均辐射温度采用面积加权平均温度, 平均辐射温度  $T_r$  为:

$$T_r = \frac{\sum_{j \neq p}^n A_j \varepsilon_j T_j}{\sum_{j \neq p}^n A_j \varepsilon_j} \quad (2.25)$$

$A_j$  为房间内表面面积，当围护结构的辐射率  $\epsilon_j$  大致相等时，方程 (2.25) 可简化为

$$T_r = \frac{\sum_{j \neq p}^n A_j T_j}{\sum_{j \neq p}^n A_j} \quad (2.26)$$

上式也是暴露在辐射吊顶下房间内表面的温度按照各自的面积的温度加权平均值 *AUST* (*Area Weighted Average Temperature*)。

顶板表面与房间的系统发射率  $\epsilon_s$  由 *Hottel* 方程确定：

$$\epsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{F_{p-r}} + \left(\frac{1}{\epsilon_p} - 1\right) + \frac{A_p}{A_r} \left(\frac{1}{\epsilon_r} - 1\right)} \quad (2.27)$$

$\epsilon_p$  为顶板表面发射率， $\epsilon_r$  为房间内表面平均发射率， $F_{p-r}$  为顶板对房间内表面的角系数， $A_p$  为顶板的面积， $A_r$  为暴露在顶板下房间内表面的总面积。

$$\text{当 } \frac{A_p}{A_r} \leq 0.05, F_{p-r} \cong 1。$$

顶板与房间的总换热量  $q_3$  为：  $q_3 = q_{conv} + q_r$  (2.28)

顶板总换热系数  $h$  为：

$$h = \frac{q_{conv} + q_r}{(t_p - t_a)W_1} = h_{conv} + h_r \quad (2.29)$$

上述板上、板内和板下的换热过程是同时进行，又是相互联系的。根据能量守恒定律，板上换热、板内换热和板下换热是相等的，即：

$$q_1 = q_2 = q_3 \quad (2.30)$$

以式 (2.30) 为主线，联立上述三个过程的方程，消除中间变量，当已知冷媒水温度与建筑围护结构内表面、室内温度，就可计算辐射冷顶板在此情况下的供冷能力。

## 2.4 毛细管辐射冷顶板的换热机理

由于毛细管顶板都是现场安装的，安装质量对顶板冷却性能的影响大，本文采用将毛细管网挂在结构平板上（如图 2.9 中的 AB 平面），分析毛细管冷顶板外壁裸露在空气中换热情况。

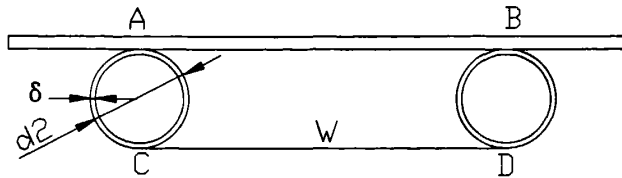


图 2.9 毛细管裸露在空气中的模型

### 2.4.1 毛细管的管内 $Nu$ 数计算

由于毛细管的管径小，尤其层流时毛细管管壁的吸附力对表面换热影响大，传统的管内  $Nu$  数的经验公式一般适用管径大于 5mm 的情况。文献[64] 采用液晶热像仪测量微小管温度以求得水流经微小管的对流换热系数，这种方法可以有效的避免用热电偶等接触式温度测量方法所产生的热分流问题。实验结果显示,完全发展流的摩擦系数及热传导系数与传统理论十分吻合。不同管径下流态转换皆发生在雷诺数从 2300 到 3000 之间，与传统的大管径转换流发生的雷诺数一样。

- a) 层流充分发展流的  $Nu$  系数为常数，常壁温下圆管的  $Nu$  系数为 3.66。
- b) 层流发展流，采用 *Shah and Bhatti*[1987]<sup>[57]</sup>推荐的经验公式：

$$Gz = \frac{x/d_1}{Re \cdot Pr} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} Gz \leq 0.00005 & \quad Nu = 1.302Gz^{-1.3} - 1 \\ 0.00005 \leq Gz \leq 0.0015 & \quad Nu = 1.302Gz^{-1.3} - 0.5 \\ Gz \geq 0.0015 & \quad Nu = 4.364 + 8.66 \times (10^3 \cdot Gz)^{0.506} e^{-41 \cdot Gz} \end{aligned} \quad (2.32)$$

- c) 过渡流至紊流充分发展流采用格尼林斯基 *Geiolsinski*[1976]<sup>[57]</sup>的经验公式：

$$Nu = 0.012(\text{Re}_f^{0.87} - 280)\text{Pr}_f^{0.14} \left[ 1 + \left( \frac{d_1}{l} \right)^{2/3} \right] \left( \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0.11} \quad (2.33)$$

实验验证范围为： $1.5 \leq \text{Pr} \leq 500$ ,  $0.05 < \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} < 20$ ,  $2300 < \text{Re} < 10^6$

#### 2.4.2 毛细管管内传热

毛细管的管内换热和金属管管内换热计算是一样的，水流方向单位管长的换热量  $q_l$ ：

$$q_l = \frac{t_f - t_c}{\frac{1}{\pi d_1 \cdot h_f} + \frac{1}{2\pi \lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1}} \times n \quad (2.34)$$

$\lambda_c$  为毛细管的管道的导热系数， $t_c$  为毛细管外壁的温度。假设毛细管顶板有  $n$  条毛细管管道组成。

(2.35)

#### 2.4.3 毛细管冷顶板与房间环境的换热

毛细管外壁与房间环境存在自然对流换热、辐射换热和与结构平板的辐射换热。

##### 1) 毛细管与房间内空气自然对流

自然对流换热系数可按空气横流毛细管的自然对流公式计算<sup>[57]</sup>：

$$Nu = 0.36 + 0.363 \times (Gr')^{1/6} + 0.0941 \times (Gr')^{1/3}$$

$$Gr' = Gr / (t_a - t_c) \quad (2.36)$$

$$Gr = \frac{\beta g d_2^3 \Delta t}{\gamma^2}, \quad \Delta t_w \text{ 为毛细管外壁温与室温的温度差。}$$

1) 由  $Nu = \frac{h_{conv-c} d_2}{\lambda}$  得到毛细管单位管长的自然对流换热量  $q_{conv-c}$  为：

$$q_{conv-c} = \pi d_2 h_{conv-c} (t_a - t_c) \cdot n \quad (2.37)$$

$h_{conv-c}$  为毛细管外壁的自然对流换热系数。

2) 毛细管冷顶板与房间内壁的辐射换热

毛细管的外径相对于管长是很小的，在计算毛细管对相邻毛细管的辐射角系数  $F_{c-c}$  时，可以当做两无限长的圆柱之间的角系数来计算，得  $F_{c-c} = 0.05$ 。如图 2.9，毛细管对房间的辐射是通过假想  $CD$  平面进行的，对结构平板的辐射是通过  $AB$  面进行的。假设  $CD$  面为房间的平均辐射温度，那么毛细管对  $CD$  平面的辐射换热量即为毛细管冷顶板对房间的辐射换热量。

$AB$  与  $CD$  是对称的关系，根据

$$\begin{aligned} F_{c-c} + F_{c-p} + F_{c-r} &= 1 \\ F_{c-p} &= F_{c-r} \end{aligned} \quad (2.38)$$

式中  $F_{c-c}$  为相邻毛细管间的辐射角系数， $F_{c-p}$  为毛细管对结构平板的辐射角系数， $F_{c-r}$  为毛细管对房间内表面的辐射角系数。毛细管冷顶板对房间的辐射换热量  $q_{c-r}$  为：

$$q_{c-r} = \varepsilon_c \sigma F_{c-r} (T_r^4 - T_c^4) \cdot n \quad (2.39)$$

3) 毛细管与结构平板的辐射换热  $q_{c-p}$  为：

$$q_{c-p} = \varepsilon_c \sigma F_{c-p} (T_p^4 - T_c^4) \cdot n \quad (2.40)$$

式中  $\varepsilon_c$  为毛细管的发射率， $T_p$  为结构平板的平均温度， $K$ 。

4) 结构平板的自然对流换热

平板自然对流换热系数可按式 (2.37) 和 (2.38) 计算：

由  $Nu = \frac{h_{conv-p} L}{\lambda}$  得到结构平板的自然对流换热量  $q_{conv-p}$  为：

$$q_{conv-p} = h_{conv-p} (t_a - t_p) \cdot n \quad (2.41)$$

$L$  为结构平板的特征长度， $h_{conv-p}$  为结构平板的自然对流换热系数。

5) 结构平板与毛细管的辐射换热  $q_{p-c}$  为：

$$q_{p-c} = q_{c-p} \quad (2.42)$$

6) 结构平板与房间的辐射换热  $q_{p-r}$  为：

$$q_{p-r} = \varepsilon_p \sigma F_{p-r} (T_r^4 - T_p^4) \cdot n \quad (2.43)$$

在稳态情况下，结构平板与房间环境进行的自然换热量及辐射换热量全部来自毛细管对它的辐射换热量，则



$$q_{c-p} = q_{conv-p} + q_{p-r} \quad (2.44)$$

毛细管顶板与房间环境的总换热量  $q_2$  包括毛细管顶板的自然对流换热量、毛细管顶板对房间的辐射换热量和毛细管对结构平板的辐射换热量，即

$$q_2 = q_{conv-c} + q_{c-r} + q_{c-p} \quad (2.45)$$

从能量守恒角度来看，来自毛细管顶板管内的换热应该等于毛细管顶板管外的换热，即

$$q_1 = q_2 \quad (2.46)$$

当进水温度、流量、房间温度、房间辐射温度、毛细管和结构平板的材料系数已知时，以式(2.44)和式(2.46)为主线，联立式(2.36)~式(2.46)可得到毛细管的外表面温度、结构平板的表面温度，进而得到毛细管冷顶板的辐射换热量。

## 2.5 辐射冷顶板换热量的数值计算

由于辐射冷顶板与房间换热的公式复杂，含有非线性方程，直接求解困难，本节采用 *Matlab* 和电子表格计算辐射冷顶板换热量。

### 2.5.1 金属辐射板冷顶板的换热量数值计算

根据 2.3 小节所述，取热流量为正值。由于管道短，管内平均水温  $t_f$  可视为进口水温  $t_{in}$ ，则板上单位管长热流量  $q_1$  为：

$$q_1 = \frac{t_b - t_f}{1/(\pi d_1 h_f) + \ln(d_2/d_1) \times 1/(2\pi\lambda_w) + \delta_b/(\lambda_b d_2)} \quad (2.47)$$

板内单位管长热流量  $q_2$  为：

$$q_2 = 2 \times (\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) m_2 \frac{(t_j - t_a) + (t_a - t_b) \cosh(m_2 W_2 / 2)}{\sinh(m_2 w_2 / 2)} \quad (2.48)$$

板下单位管长热流量  $q_3$  为：

$$q_3 = [(h_{conv} + h_{r1})(t_a - t_{m1})(W_1 - W_2) + (h_{conv} + h_{r2})(t_a - t_{m2})W_2] \quad (2.49)$$

根据能量守恒定律，稳态条件下板上、板内、板下的热流量是相等的，即：

$$q_1 = q_2 = q_3 \quad (2.50)$$

由  $q_1 - q_2 = 0$  得到方程一:

$$\frac{t_b - t_f}{1/(\pi d_1 h_f) + \ln(d_2/d_1) \times 1/(2\pi\lambda_1) + \delta_b/(\lambda_b d_2)} - \frac{2 \times (\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) m_2 \frac{(t_j - t_a) + (t_a - t_b) \cosh(m_2 W_2 / 2)}{\sinh(m_2 W_2 / 2)}}{2 \times (\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) m_2 \frac{(t_j - t_a) + (t_a - t_b) \cosh(m_2 W_2 / 2)}{\sinh(m_2 W_2 / 2)}} = 0 \quad (2.51)$$

由  $q_2 - q_3 = 0$  方程二:

$$2 \times (\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) m_2 \frac{(t_j - t_a) + (t_a - t_b) \cosh(m_2 W_2 / 2)}{\sinh(m_2 W_2 / 2)} - [(h_{conv} + h_{r1})(t_a - t_{m1})(W_1 - W_2) + (h_{conv} + h_{r2})(t_a - t_{m2})W_2] = 0 \quad (2.52)$$

由  $q_1 - q_3 = 0$  方程三:

$$\frac{t_b - t_f}{1/(\pi d_1 h_f) + \ln(d_2/d_1) \times 1/(2\pi\lambda_1) + \delta_b/(\lambda_b d_2)} - [(h_{conv} + h_{r1})(t_a - t_{m1})(W_1 - W_2) + (h_{conv} + h_{r2})(t_a - t_{m2})W_2] = 0 \quad (2.53)$$

联立 (2.51)、(2.52)、(2.53), 当已知室内温度  $t_a$ 、室内平均辐射温度  $t_r$ 、进水温度  $t_{in}$  及水流量  $V$ , 未知参数有管板连接作用板处温度  $t_b$ , 作用板的平均温度  $t_{m2}$ , 和承重板的平均温度  $t_{m1}$ , 带入顶板的各结构参数, 在自然对流条件下, 就可求得顶板与房间环境的换热量。由于这是非线性方程组, 并且公式复杂, 直接求解难度大, 这里借助计算机进行迭代计算。为了减少迭代次数, 在进行迭代时, 管板连接作用板处温度  $t_b$ 、作用板的平均温度  $t_{m2}$  和承重板的平均温度  $t_{m1}$  的初值非常设置非常重要。迭代程序见附录 A, 迭代过程见图 2.10。

根据某厂家提供的金属顶板参数 (见表 2.1), 进行数值计算。假设室内空气温度  $26^\circ\text{C}$ , 室内平均辐射温度  $26^\circ\text{C}$ , 室内相对湿度 50%, 室内露点温度为  $14.6^\circ\text{C}$ , 取进水温度为  $16^\circ\text{C}$ 。

由于产品资料提供的制冷量是根据德国测试标准 *DIN4715* 测得的值, 这里有必要对德国测试标准 *DIN4715* 做简要介绍。*DIN4715* 制定于 1993 年 4 月, 是德国国家标准化组织的规范。它是在自然对流条件下测试辐射板冷量, 测试房间为  $4\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$  矩形, 房间外壁面为充满水的金属板, 水温可以调节, 循环水量很大, 且进、出口温差小于  $1^\circ\text{C}$ 。辐射板安装在距离天花板  $300\text{mm}$  的高度上。房间内壁采用厚度为  $10\text{cm}$ , 导热系数小于  $0.04\text{W}/\text{m}^2\text{C}$  的保温材料。其

热源由 12 根电热模拟器提供，电热模拟器外观呈圆筒状，每根圆筒内装有 3 个 60W 的球形灯泡，输出功率由电路控制，采用瓦特表测量其功率。实验始终在房间条件稳定的情况下进行，只是在规定范围内变化辐射板的供水温度和水量。

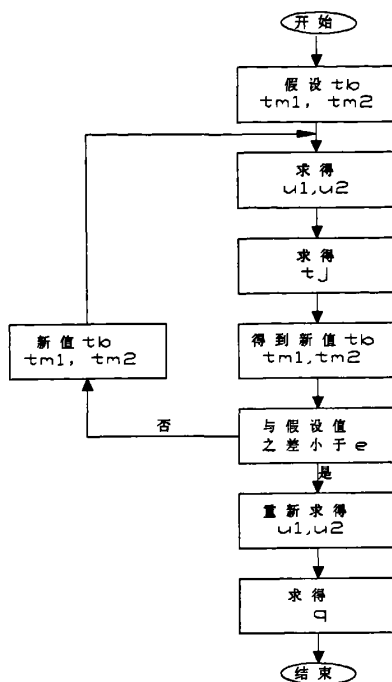


图 2.10 金属辐射板计算迭代过程

表 2.1 金属辐射冷顶板产品参数表

管子参数	内径 21mm，厚度 2.3mm，管中心距为 270mm，材料为铝，导热系数 222W/(m·K)
连接体参数	宽度 25.6mm，厚度 12.8mm，材料为铝，导热系数 222W/(m·K)
作用板参数	宽度 150mm，厚度 2.3mm，材料为铝，导热系数 222W/(m·K)，
承重板参数	长度 580mm，宽度 580mm，厚度 0.8mm，材料为铁，导热系数 81W/(m·K)，发射率 0.9
顶部保温材料	聚丙烯
标准制冷量	室内温度 26.0℃，进水温度 16.0℃，流量 250L/h，制冷为 71.4W/m <sup>2</sup>

表 2.2 室内温度为 26℃，进口水温 16℃金属辐射冷顶板的制冷量 (W/m<sup>2</sup>)

流量 (L/h)	50	100	150	200	250	300	350
进口水温(℃)	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
出口水温(℃)	16.94	16.73	16.65	16.62	16.59	16.58	16.57
温差 (℃)	0.945	0.726	0.653	0.616	0.594	0.579	0.568
制冷量 W/m <sup>2</sup>	63.57	64.55	65.57	66.60	67.14	67.46	67.68
流量 (L/h)	400	450	500	550	600	650	700
进口水温(℃)	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
出口水温(℃)	16.56	16.55	16.55	16.54	16.54	16.54	16.53
温差 (℃)	0.559	0.553	0.548	0.543	0.540	0.537	0.534
制冷量 W/m <sup>2</sup>	67.84	67.94	68.04	68.12	68.17	68.21	68.25

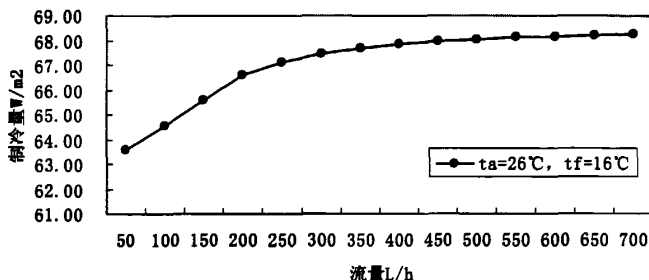


图 2.11 室温 26℃，水温 16℃，改变管内流量  
金属辐射冷顶板的制冷量变化图

该产品金属顶板在流量 250L/h 的制冷能力大约为 71.4W/m<sup>2</sup>。表 2.2 显示，进口水温 16℃时，数值模型计算得出的制冷量为 67.14 W/m<sup>2</sup>，与产品标准测定值的误差为 6%，说明数值计算模型可靠，可用来分析金属顶板的换热性能。

由图 2.10 显示，制冷量随着流量增大而增大；但当顶板进口流量  $Q \geq 300L/h$  时，辐射冷顶板的制冷量增大非常缓慢，可认为基本不变。

为了和后面的实验对比，改变运行参数，当室内温度为 26.2℃，室内平均辐射温度为 26.2℃，进口水温为 18.5℃，冷水流量从 50L/h 增大 700L/h，代入迭代程序，得到该工况下金属辐射顶板的制冷量，见表 2.3 和图 2.12。结果显示，金属辐射冷顶板的制冷量随着室温和进水温度的提高而减小。

表 2.3 室内温度为 26.2℃，进口水温 18.5℃，金属辐射冷顶板的制冷量 (W/m<sup>2</sup>)

流量 (L/h)	50	100	150	200	250	300	350
进口水温 (°C)	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
出口水温 (°C)	18.87	18.69	18.63	18.60	18.58	18.57	18.56
温差 (°C)	0.372	0.189	0.128	0.098	0.079	0.066	0.057
制冷量 W/m <sup>2</sup>	53.25	54.06	55.03	55.83	56.26	56.52	56.69

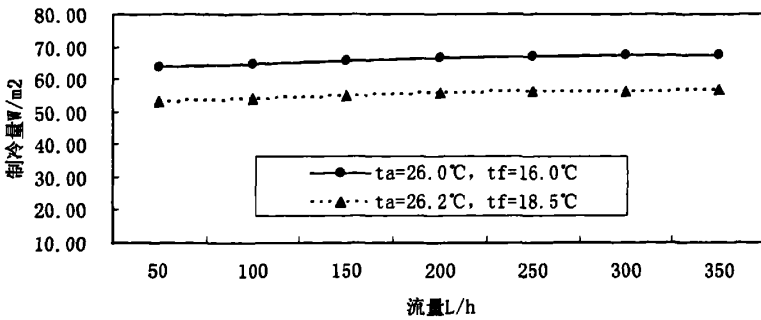


图 2.12 改变室温、进水温度和流量  
金属辐射冷顶板的制冷量变化图

### 2.5.2 毛细管辐射冷顶板的换热量的数值计算

本小节对毛细管裸露在空气的情况(图 2.9)进行分析，根据前面 2.4 小节的分析， $n$  根毛细管管道沿水流方向单位管长的换热量  $q_1$  为：

$$q_1 = \frac{t_f - t_c}{\frac{1}{\pi d_1 \cdot h_f} + \frac{1}{2\pi \lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1}} \times n \quad (2.54)$$

裸露在空气中的毛细管外壁与室内环境和结构平板进行换热，毛细管总的单位管长换热量为毛细管对房间的换热加上毛细管对结构平板的换热量  $q_2$ ：

$$q_2 = q_{conv-c} + q_{c-r} + q_{c-p} \quad (2.55)$$

毛细管顶板自然对流单位管长换热量  $q_{conv-c}$ ：

$$q_{conv-c} = \pi d_2 h_{conv-c} (t_a - t_c) \cdot n \quad (2.56)$$

毛细管顶板与房间进行的单位管长辐射换热量  $q_{c-r}$ ：

$$q_{c-r} = \pi d_2 \varepsilon_c \sigma F_{c-r} (T_r^4 - T_c^4) \cdot n \quad (2.57)$$

毛细管顶板与结构平板进行的单位管长辐射换热热量  $q_{c-p}$ :

$$q_{c-p} = \pi d_2 \varepsilon_c \sigma F_{c-p} (T_p^4 - T_c^4) \cdot n \quad (2.58)$$

结构平板的自然对流换热和对房间的辐射换热冷量全部来自毛细管顶板对其的冷辐射, 即:

$$q_{c-p} = q_{conv-p} + q_{p-r} \quad (2.59)$$

其中, 结构平板的自然对流换热热量为:

$$q_{conv-p} = W h_{conv-p} (t_a - t_p) \cdot n \quad (2.60)$$

$W$  为相邻毛细管管道间的减去毛细管管径的结构平板有效自然对流宽度。

结构平板与房间进行的辐射换热热量为:

$$q_{p-r} = W \varepsilon_p \sigma F_{p-r} (T_r^4 - T_p^4) \cdot n \quad (2.61)$$

根据能量守恒定律, 稳态时毛细管管内的换热热量相等, 也即  $Q_1$  和  $Q_2$  是相等的, 由此得到方程 1:

$$\frac{t_f - t_c}{\frac{1}{\pi d_1 \cdot h_f} + \frac{1}{2\pi \lambda_c \ln \frac{d_2}{d_1}}} - \pi d_2 h_{conv-c} (t_a - t_c) - \pi d_2 \varepsilon_c \sigma F_{c-r} (T_r^4 - T_c^4) - \pi d_2 \varepsilon_c \sigma F_{c-p} (T_p^4 - T_c^4) = 0 \quad (2.62)$$

根据式 (2.42) 和 (2.43) 得到方程 2:

$$\pi d_2 \varepsilon_c \sigma F_{c-p} (T_p^4 - T_c^4) - W h_{conv-p} (t_a - t_p) - W \varepsilon_p \sigma F_{p-r} (T_r^4 - T_p^4) = 0 \quad (2.63)$$

联立 (2.62)、(2.63), 当已知室内温度  $t_a$ 、室内平均辐射温度  $t_r$ 、进水温度  $t_f$  及水流量  $V$ , 未知参数有毛细管管外壁温度  $t_c$  和结构平板表面平均温度  $t_p$ , 带入顶板的各结构参数, 在自然对流条件下, 就可求得毛细管顶板与房间环境的换热热量。由于辐射冷顶板的换热热量计算公式复杂, 两方程属于非线性方程, 直接求解不容易, 这里借助计算机进行迭代计算。迭代过程图:

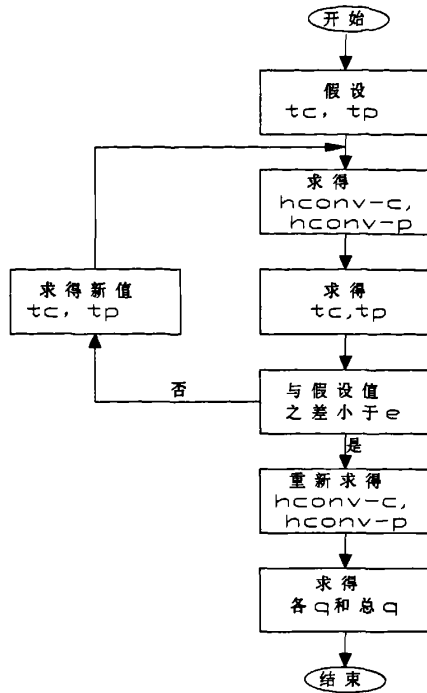


图 2.13 毛细管辐射顶板迭代计算过程

室内空气温度  $26.0^{\circ}\text{C}$ ，室内平均辐射温度  $26.0^{\circ}\text{C}$ ，进水温度为  $16^{\circ}\text{C}$ 。毛细管辐射冷顶板的各项参数见表 2.4。改变流量从  $50\text{L/h}$  至  $700\text{L/h}$ ，计算毛细管顶板制冷量。

表 2.5 室内温度为  $26^{\circ}\text{C}$ ，进口水温  $16^{\circ}\text{C}$ ，金属辐射冷顶板的制冷量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

管子参数	外径 $3.4\text{mm}$ ，管厚 $0.8\text{mm}$ ，管中心间距 $10\text{mm}$ ，材料为聚丙烯，导热系数 $0.23\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，管数 56 根，发射率 0.8
顶部保温材料	聚丙烯
标准制冷量	毛细管顶板表面抹石灰石的标准制冷量为 $83\text{W}/\text{m}^2$

表 2.6 室内温度为 26℃，进口水温 16℃，毛细管辐射冷顶板的制冷量 (W/m<sup>2</sup>)

流量 L/h	50	100	150	200	250	300	350
进口水温℃	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
出口水温℃	16.63	16.31	16.21	16.16	16.13	16.10	16.09
温差 ℃	0.63	0.31	0.21	0.16	0.13	0.10	0.09
制冷量 W/m <sup>2</sup>	101.02	101.02	101.03	101.04	101.06	101.09	101.12
流量 L/h	400	450	500	550	600	650	700
进口水温℃	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
出口水温℃	16.08	16.07	16.06	16.06	16.05	16.05	16.04
温差 ℃	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04
制冷量 W/m <sup>2</sup>	101.15	101.17	101.20	101.22	101.24	101.27	101.29

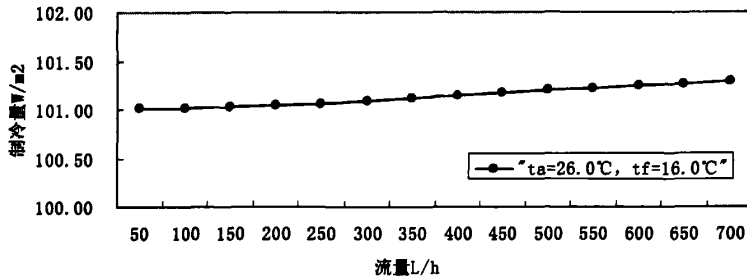


图 2.14 室温 26℃，水温 16℃，改变管内流量  
毛细管辐射冷顶板的制冷量变化图

图 2.14 显示，毛细管顶板的制冷量随流量变化非常小。流量为  $V=50\text{L/h}$  的制冷量与流量为  $V=700\text{L/h}$  的制冷量相差仅为  $0.27\text{W/m}^2$ 。流量小时，进出水温度差大；流量小时，进出水温度差减小。对于  $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}$  尺寸的毛细管模块，流量大于  $300\text{L/h}$  时，进出水温度差小于  $0.1\text{℃}$ 。该产品表面刷石灰做成的辐射冷顶板制冷量 DIN4715 测试为  $81\text{W/m}^2$ 。由于本次模型中毛细管与空气直接接触，传热热阻减小，换热量增大。

改变运行工况，室内温度为  $26.2\text{℃}$ ，平均辐射温度为  $26.2\text{℃}$ ，进水温度  $18.5\text{℃}$ ，进水流量从  $50\text{L/h}$  增大至  $700\text{L/h}$ ，毛细管顶板制冷量变化可见表 2.7 和图 2.15。结果显示，毛细管冷顶板的制冷量随着室温和进水温度的提高而减小。



表 2.7 室内温度为 26.2℃，进口水温 18.5℃毛细管顶板的制冷量 (W/m<sup>2</sup>)

流量 L/h	50	100	150	200	250	300	350
进口水温℃	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
出口水温℃	18.98	18.74	18.66	18.62	18.60	18.58	18.57
温差 ℃	0.48	0.24	0.16	0.12	0.10	0.08	0.07
制冷量 W/m <sup>2</sup>	77.83	77.83	77.84	77.85	77.86	77.88	77.91

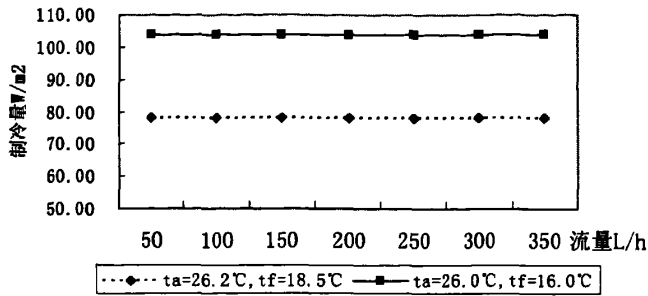


图 2.15 改变室温、进水温度和流量  
毛细管辐射冷顶板的制冷量变化图

### 2.5.3 小结

金属辐射冷顶板模型计算的制冷量与产品标准值误差为 6%，说明数值计算模型可靠，可用来分析金属顶板的换热性能。制冷量随着流量增大而增大；但当顶板进口流量  $V \geq 300 L/h$  时，辐射冷顶板的制冷量增大非常缓慢，可认为基本不变。

毛细管顶板的制冷量大，是由于理论计算中毛细管外壁与空气直接接触，传热热阻减小，制冷量增大。毛细管顶板的制冷量随流量变化非常小。此外关于毛细管顶板制冷量大于金属顶板制冷量的主要原因是毛细管冷顶板表面的接触面积大。毛细管外壁与空气直接换热，毛细管圆柱形的外表面大于直径大小的平板，对于相同宽度的顶板，毛细管辐射冷顶板的换热面积几乎为金属辐射冷顶板的换热面积的 2 倍。

## 第 3 章 辐射冷顶板冷却性能实验验证

本章通过实验方法研究辐射冷顶板的换热性能,实验在恒温室内进行,进口水温不变,改变流量,测量出口的水温,得到辐射冷顶板的换热量。并采用红外热像仪对辐射冷顶板表面的温度分布进行了分析。

### 3.1 实验装置

本实验台如图 3.1,在标准散热器实验台的实验室内,实验设备明细表见附录 C。辐射冷顶板距离地面 2.3m。需要特别说明的是,小流量计的测量范围为 10L/h~80 L/h,大流量计的测量范围为 80L/h~800 L/h,为了更准确的测量流量,实验中当流量大于 80L/h 时,小流量前的截止阀关闭,采用大流量计测量流量;当流量小于 80L/h 时,关闭大流量前的截止阀,采用小流量计测量流量。采用 0~50℃的水银温度计测量室内温度,测量中采用铝箔纸罩子将水银温度计的罩住。

实验中使散热器标准试验台内的温度调节到夏季工况,利用原有的自动控制设备,保持室内温度恒为夏季工况,辐射冷顶板进水水温稳定。测量不同流量下辐射冷顶板的进出水温度,得到不同流量下辐射冷顶板的制冷量。

### 3.2 实验数据采集

万用表测量热电偶的阻值,而实验需要的是辐射板进出口的水温,将测量得到的阻值转化为温度值,这就需要将热电偶进行标定。热电偶的标定是在标准标定试验台上进行的,热电偶 1 测量辐射板进口水温,热电偶 2 测量辐射板出口水温。本次实验辐射冷顶板的进口水温范围为 15~20℃,实验前,使用的热电偶在标准标定实验台做了标定。

2 个热电偶分别连接到标定时对应的两台万用表,再将万用表的一端连接到电脑中,运行专用软件 Ut71a\_b,就可自动采集热电偶热阻的变化数据,设置采集数据时间间隔设置为 10 秒。

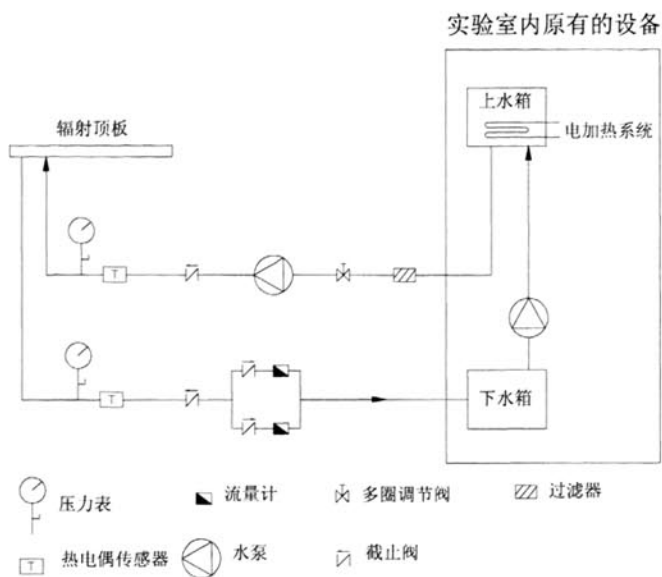


图 3.1 系统装置图



图 3.2 实验测试金属辐射冷顶板



图 3.3 实验测试毛细管辐射冷顶板

### 3.3 实验内容

室内温度为  $26.2^{\circ}\text{C}$ ，进水温度为  $18.5^{\circ}\text{C}$ ，流量分别为  $50\text{L/h}$ 、 $100\text{L/h}$ 、 $150\text{L/h}$ 、 $200\text{L/h}$ 、 $250\text{L/h}$ 、 $350\text{L/h}$ ，待进出口水温稳定后，连续采集进出口的热电偶值，并采用红外热像仪拍摄辐射冷顶板表面，分析辐射冷顶板表面的温度分布。

#### 3.3.1 辐射冷顶板进出口水温测试

室内温度不变，进水温度不变，流量从  $50\text{L/h}$  逐渐增大至  $350\text{L/h}$ ，通过测得进出口温差，求得辐射冷顶板的换热量，反映顶板换热量随流量的变化趋势。室内温度为  $26.2\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为  $50\%$ ，露点温度为  $14^{\circ}\text{C}$ ，为了防止结露，辐射冷顶板的进口水温要高于露点温度，实际工程中进口水温采用  $17^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，本次实验中采用进水温度  $18.5\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。测量每个流量工况下，三种不同的辐射冷顶板的制冷量，数据采集  $60$  组，每组数据采集时间间隔为  $10\text{s}$ 。图 3.4~3.10 为金属辐射冷顶板进出口水温测试图，图 3.11~3.16 为毛细管冷顶板进出口水温测试图。

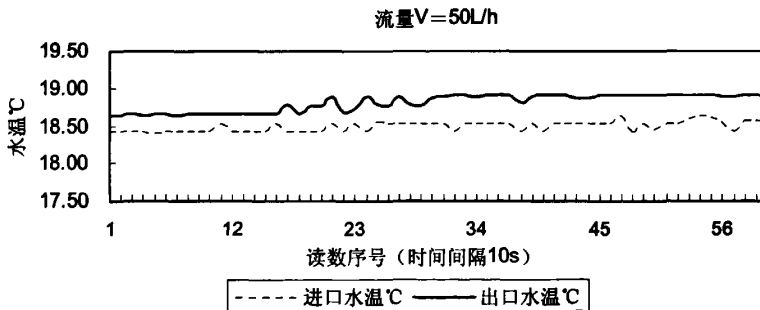


图 3.4 金属顶板进出口水温测试图 1

进出口水温每隔 10s 读一组数据

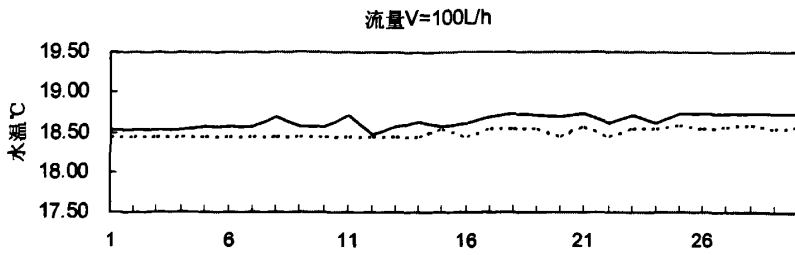


图 3.5 金属顶板进出口水温测试图 2

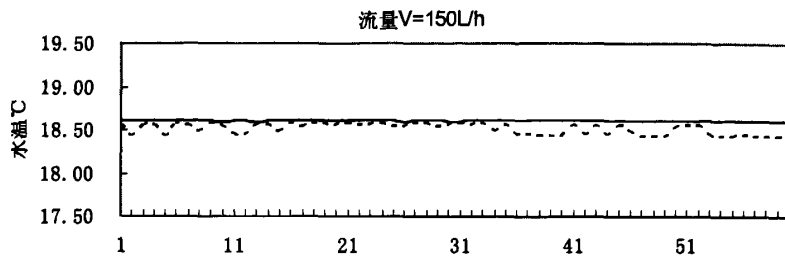


图 3.6 金属顶板进出口水温测试图 3

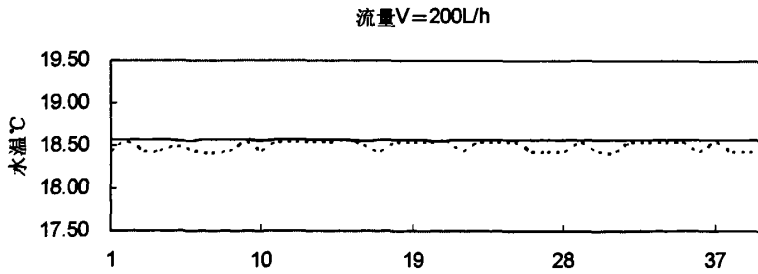


图 3.7 金属顶板进出口水温测试图 4

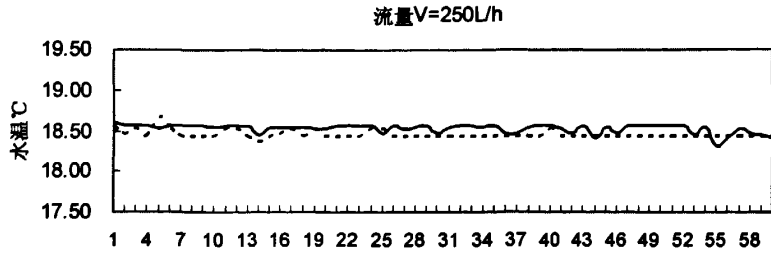


图 3.8 金属顶板进出口水温测试图 5

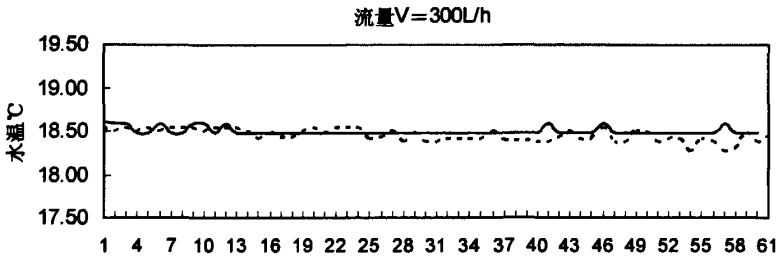


图 3.9 金属顶板进出口水温测试图 6

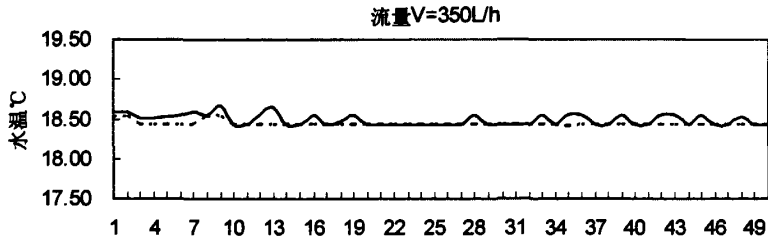


图 3.10 金属顶板进出口水温测试图 7

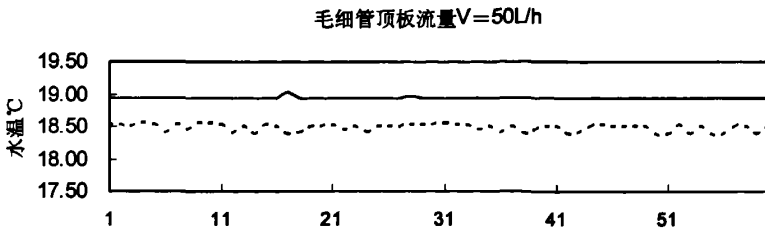


图 3.11 毛细管顶板进出口水温测试图 1

进出口水温每隔 10s 读一组数据

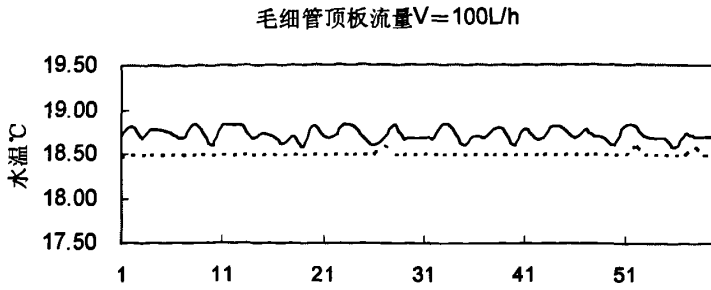


图 3.12 毛细管顶板进出口水温测试图 2

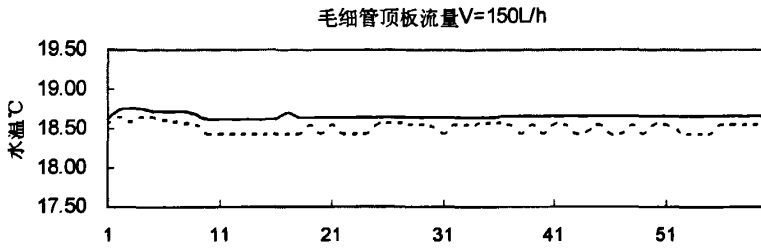


图 3.13 毛细管顶板进出口水温测试图 3

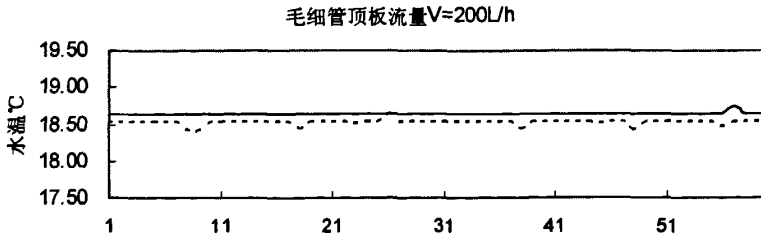


图 3.14 毛细管顶板进出口水温测试图 4

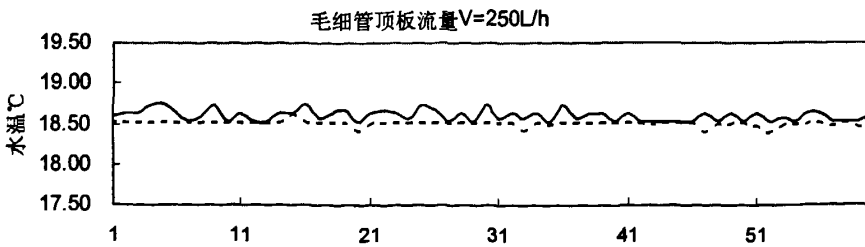


图 3.15 毛细管顶板进出口水温测试图 5

### 第3章 辐射顶板冷却性能实验验证

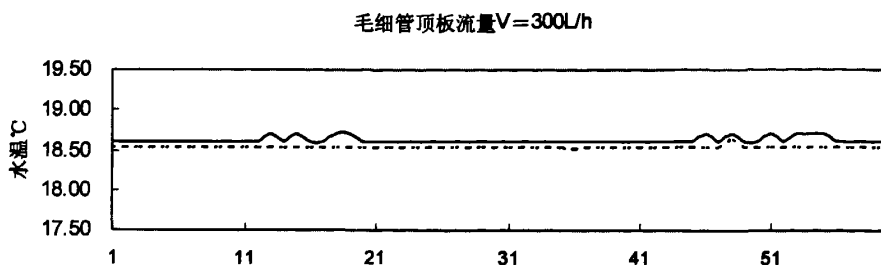


图 3.16 毛细管顶板进出口水温测试图 6

将进出口水温数据的算术平均值作为顶板的进出水温度值，表 3.1 为金属板的实验数据总结表，表 3.2 为毛细管顶板的实验数据总结表。每个流量下，金属辐射冷顶板具体的进出口水温数据见附录 D，毛细管冷顶板的具体进出口水温数据见附录 E。根据平均进出水温度温差， $Q = c\rho V \cdot \Delta t / A$ ，可得到顶板的制冷量，及当室温不变、进口水温不变，顶板制冷量与流量的关系图。

表 3.1 金属辐射冷顶板实验数据总结表

流量 L/h	50	100	150	200	250	300	350
平均进水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.50	18.48	18.51	18.48	18.45	18.45	18.44
平均出口水温 $^{\circ}\text{C}$	18.85	18.67	18.643	18.60	18.55	18.56	18.50
温差 $^{\circ}\text{C}$	0.32	0.16	0.137	0.113	0.09	0.105	0.065
制冷量 $\text{W/m}^2$	50.83	53.27	55.11	58.39	59.62	60.95	61.64

表 3.2 毛细管冷顶板实验数据总结表

流量 L/h	50	100	150	200	250	300
平均进水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.47	18.49	18.50	18.52	18.51	18.53
平均出口水温 $^{\circ}\text{C}$	18.93	18.72	18.66	18.65	18.61	18.63
温差 $^{\circ}\text{C}$	0.46	0.23	0.16	0.13	0.11	0.10
制冷量 $\text{W/m}^2$	74.3	75.6	76.6	77.1	77.7	78.0



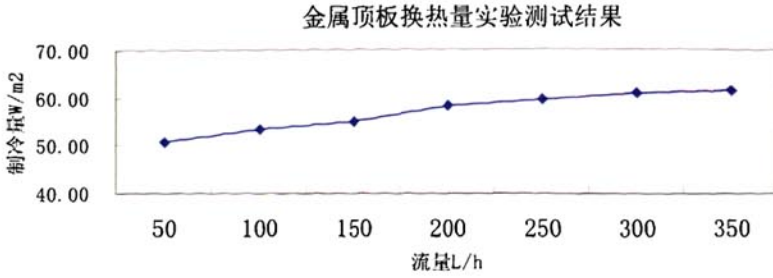


图 3.2 金属辐射冷顶板换热量与流量关系实验结果图

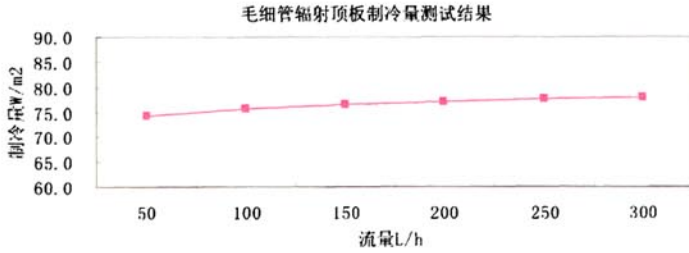


图 3.3 毛细管冷顶板换热量与流量关系实验结果图

### 3.3.2 辐射冷顶板表面温度分布测试

实验条件：室内温度为  $26.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ，利用红外线成像仪对顶板表面进行拍照，得到顶板表面的温度分布图。如图 3.4 金属辐射冷顶板表面温度红外线成像图，管内水流流动方向，作用板温度分布较为均匀；红外图显示金属顶板表面的温度呈现不均匀分布，作用板下方的顶板温度低，而周围承重板的温度高，并且远离作用板的顶板温度高于顶板附近的温度。图 3.5 为毛细管顶板表面温度红外线成像图，由于毛细管管径小，毛细管之间管间距小，毛细管顶板表面温度分布较为均匀。

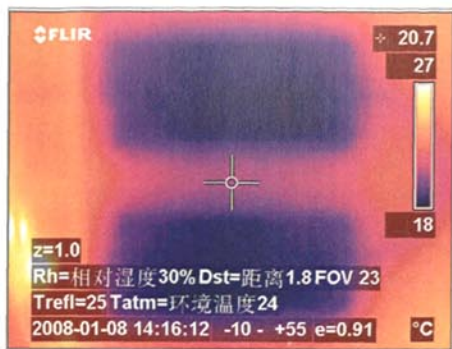


图 3.4 金属辐射冷顶板表面温度红外成像图

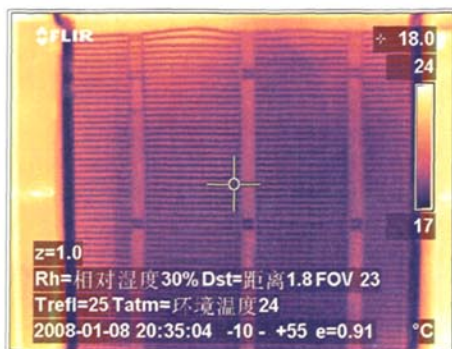


图 3.5 毛细管顶板表面温度红外成像图

### 3.4 实验结果分析

#### 1. 流量改变对顶板换热量的影响

实验结果显示顶板制冷量随流量的增大而提高；金属顶板的制冷量随流量的变化，比毛细管顶板的制冷量随流量增大的变化更为显著。并且随着流量的增大，两者增大的变化都不明显，当流量大于 250L/h 时，金属顶板的制冷量随流量增大基本不变。流量从 50L/h 增大至 350L/h，毛细管的制冷量增大缓慢。

#### 2 顶板表面温度分布

整个金属顶板的表面温度存在明显的温度梯度，作用板下方的顶板表面温度低，接近顶板冷水进水温度，且温度沿作用板宽度较为均匀，作用板水流方向没有明显的温度差；而作用板之外的顶板温度较高，沿水流方向温度存在明显的温度梯度。由于毛细管顶板管间距小，毛细管顶板的表面温度分别较为均匀。

#### 3 冷量分析

图 3.6 和图 3.7 为冷顶板的顶板模型计算值与实验测试值的对比情况。当室内温度 26.2°C、进水温度 18.5°C、水量 250L/h 相同条件下，毛细管计算值与理论计算值拟合的较好，误差小于 0.2%；金属管的实验值测试值小于理论计算值，误差为 6%。

实验测试值与理论计算值吻合的好，两类顶板的随流量的变化趋势与理论计算值是相同的，当流量增大到一定值时，顶板的制冷量也稳定在某一值上。实验也证实了理论计算模型正确可靠，可用来做进一步分析。

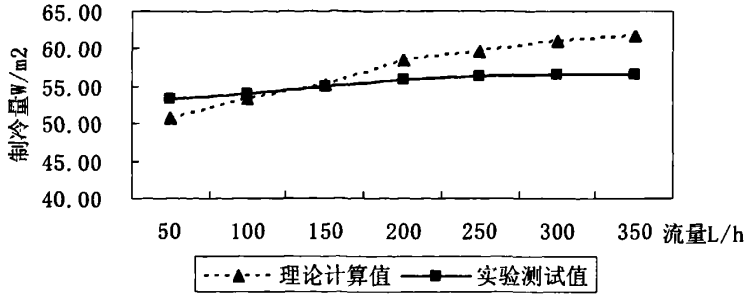


图 3.6 金属辐射冷顶板模型计算冷量值与实验测试冷量值对比表

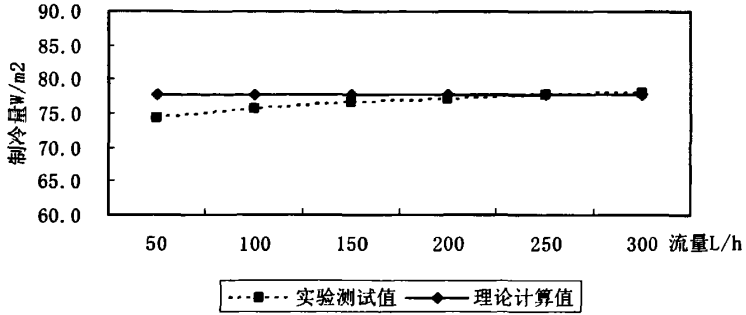


图 3.7 毛细管冷顶板模型计算冷量值与实验测试冷量值对比表

## 第4章 金属辐射冷顶板换热 CFD 模拟

本章采用 Fluent 软件模拟金属辐射冷顶板自然对流状态下，改变顶板表面平均温度研究金属辐射冷顶板制冷量的变化。由于顶板表面温度随着流量的变化而变化，改变顶板表面平均温度，间接改变了进口流量，也就间接研究了金属辐射冷顶板制冷量的变化规律。

### 4.1 物理模型

将金属辐射冷顶板流量对换热量影响测试实验室做了一些简化，建立二维物理模型见图 4.1。房间尺寸为宽 2m×高 2.7m，顶板位于中间室内中间，宽度为 0.58m，顶板表面距地板 2.3m，顶板上覆盖保温绝热层，厚度为 30mm。通过前面的数值计算和实验红外成像仪拍摄的图片，可知顶板表面温度分层明显，将顶板划分为五个部分 A11、A12、St0、St1、St2。A11 和 A12 分别代表两个作用板下面顶板表面，其温度低；St0、St1、St2 两作用板下顶板中间的顶板表面、左右两边的顶板表面，表面温度高。



图 4.1 金属辐射冷顶板模拟物理模型

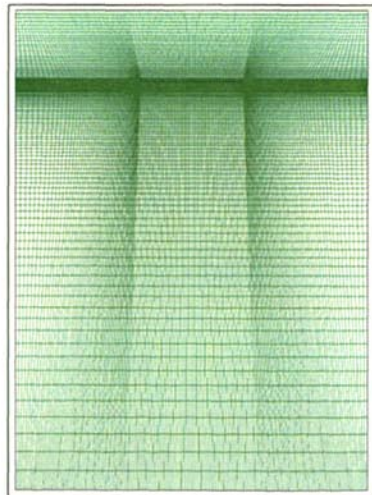


图 4.2 模型网格图

## 4.2 CFD 模拟设定

流场计算方法采用工程上应用最广泛的流场计算方法—压力耦合方程组的半隐式方法 SIMPLE 算法，解法器选择分离时求解器，采用隐式方案进行控制方程的线性化，计算模式为二维、稳态求解，考虑到有热交换，选用能量方程；由于测试室内气流低，顶板与房间空气进行层流自然对流换热和辐射换热，选择层流粘性方程和 DO 辐射模型（离散坐标辐射模型）；常压下重力加速度  $9.8\text{m/s}^2$ ，运行温度为  $308.35\text{K}(26.2^\circ\text{C})$ 。

已知室内温度  $26.2^\circ\text{C}$ ，当顶板进口水温为  $18.5^\circ\text{C}$ ，根据第二章计算得到的作用板的表面平均温度作为顶板的表面温度的初始条件。

### 1. 边界条件设定：

A11、A12 表面：设置为温度边界条件，表面发射率为 0.9。

当流量改变时，顶板表面温度该变，改变 A11、A12 表面温度，反映顶板进水流量的变化。由于进出口水温的温差小，可以设置 A11、A12 的温度相等。

表 4.1 不同流量对应的顶板 A11、A12 温度

流量 L/h	50	250	450
A11 A12 表面温度 K	292.49	292.16	292.08

1. 房间六个内表面：设置为温度边界条件，表面发射率为 0.9。温度为  $308.35\text{K}(26.2^\circ\text{C})$ 。
2. 保温层表面绝热，热流密度边界条件，热流密度为 0，为了简化计算，设置保温层表面发射率为 0。
3. 由于自然对流是由温度差引起密度差，由此产生的浮升力成为流动的动力，所以设置室内空气参数随温度变化，由于温度变化范围小，假设密度、空气导热系数和粘性系数在  $283.15\text{—}303.15\text{K}(20^\circ\text{C}\text{—}30^\circ\text{C})$  温度范围内线性变化：

$$\text{密度 } \rho = 2.40571 - 0.00409 * T$$

$$\text{导热系数 } \lambda = 0.00373701 + 7.5606 * 10^{-9} * T$$

$$\text{粘性系数 } \gamma = 3.57 * 10^{-7} + 5.0 * 10^{-9} * T$$

### 2. 计算条件控制参数

选用 SIMPLE，能量和动量选用二阶迎风格式，各流动项残差小于  $1 \times 10^{-3}$ ，能量项和辐射残差小于  $1 \times 10^{-6}$ 。

### 3. 网格生成

考虑 Fluent 软件计算中加入了辐射方程,对网格的质量要求更高一些,模型网格全采用四面体网格来划分,同时为了保证计算结果的收敛,网格划分时将顶板表面网格进行了加密处理,图 4.2 为整个房间的网络分布以及坐标分布图。

## 4.3 模拟结果分析

### 1. 顶板周围的速度分布

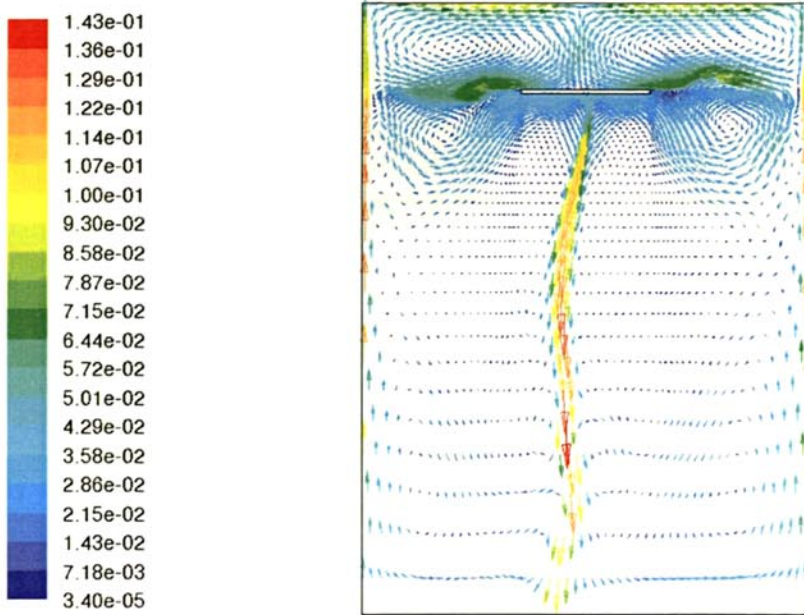


图 4.3 顶板周围空气的速度分布矢量图

图 4.3 中速度利用色彩来表示速度的大小和分布情况,箭头表示速度的方向。自然对流状态下,室内空气速度低,顶板周围速度为  $0.04\text{m/s}$ ; 空气气流从辐射冷顶板的两边向顶板中间混合流动,导致顶板中下方速度明显大于周围的速度,并在顶板下方周围方形成涡流。

## 2. 顶板周围的温度分布

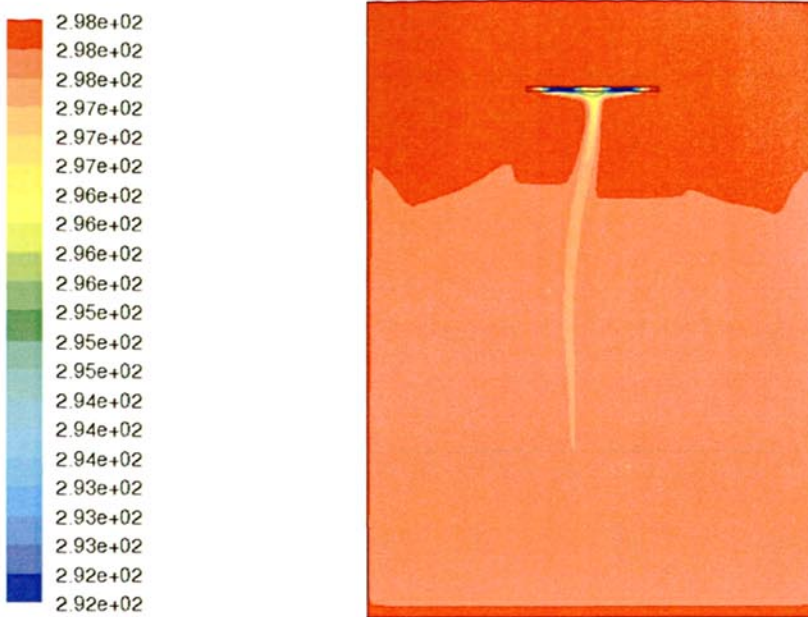


图 4.4 辐射冷顶板周围温度分布

从图 4.4 可以看出，金属顶板的温度分布不均匀，作用板温度低，作用板的周围温度明显增高，表明辐射冷顶板的作用板为主要的散热板。温度随气流变化，顶板下方中间周围温度高。

## 3. 顶板的热流密度

$A11$ 、 $A12$  的设置温度为室温  $26.2^{\circ}\text{C}$ ，进水温度  $18.5^{\circ}\text{C}$  不同流量下数值计算得到的作用板下顶板的表面平均温度。改变  $A11$ 、 $A12$  的设置温度相对应的进口流量，通过 CFD 计算得到，作用板处顶板的换热率及顶板总的换热率。顶板总换热率除以顶板的面积得到顶板的制冷量。

表 4.1 CFD 模拟计算结果汇总

流量 L/h	作用板 平均温度 $^{\circ}\text{C}$	A11 换热率 W/m	A12 换热率 W/m	总 换热率 W/m	CFD 模拟 制冷量 W/m <sup>2</sup>	理论计算 制冷量 W/m <sup>2</sup>	制冷量 差值 W/m <sup>2</sup>
50	20.45	7.005	6.761	13.75	48.36	53.25	4.89
250	20.12	8.868	8.014	16.88	57.21	56.26	-0.95
450	20.03	8.868	8.014	16.88	46.89	57.10	-0.31

结果显示:

CFD 计算得出的金属辐射冷顶板的制冷量与数值计算得出的制冷量基本吻合, 并差值随流量的增加而减小。CFD 计算得出的制冷了随流量增大而增大, 但是当流量大于 250L/h 时, 制冷随流量增大基本不变。



## 第5章 辐射冷顶板换热影响因素分析

金属辐射冷顶板数值计算分析结果与实验分析及 CFD 模拟结果吻合,说明该辐射冷顶板数值计算模型正确,可用来对辐射冷顶板换热机理做进一步研究。本章分析了影响辐射冷顶板换热的因素,并对水流量、进口水温和室内温度做了重点分析。

### 5.1 影响辐射冷顶板换热因素分析

以金属辐射冷顶板为例,板上换热量  $q$ :

$$q = \frac{t_f - t_b}{1/(\pi d_1 h_f) + \ln(d_2/d_1) \times 1/(2\pi\lambda_w) + \delta_b/(\lambda_b d_2)} = \frac{t_f - t_b}{R_f} \quad (5.1)$$

对于不同类型的金属辐射冷顶板,板上换热热阻不同在于三项热阻当中的后两项,也即是管板连接的方式不同,造成的热阻不同,为了便于分析用  $C_{bond}$  表示管板连接的传热系数,是冷顶板的固有特征参数,与冷顶板的管内外、管材的热工性能及连接体的厚度、热工参数有关。对于不同类型的金属冷顶板,板上换热量可统一表示为:

$$q = \frac{t_f - t_b}{1/(\pi d_1 h_f) + 1/C_{bond}} = \frac{t_f - t_b}{R_f} \quad (5.2)$$

板内换热量:

$$q = 2(\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2) m_2 \frac{(t_f - t_a) + (t_a - t_b) \cosh(m_2 W_2 / 2)}{\sinh(m_2 W_2 / 2)} = \frac{t_p - t_b}{R_b} \quad (5.3)$$

板下换热量:

$$q = q_c + q_r = h_{conv} W_1 (t_a - t_p) + h_r W_1 (t_a - t_p) = \frac{t_a - t_p}{R_p} \quad (5.4)$$

具体可能影响辐射冷顶板性能的因素有:室内温度、室内平均辐射温度、冷媒水入口温度、水流量、管道内外径、管道材料、管板连接材料、作用板材

料、冷顶板材料、作用板厚度、冷顶板厚度、作用板宽度及相对冷顶板的长度、管间距、室内气流分布和流速。

同样毛细管换热性能的影响因素有：室内温度、室内平均辐射温度、冷媒水入口温度和出水温度、流量、管道内外径、管道材料、管间距、粘结剂涂层材料和表面涂层材料的热工性能、室内气流分布和流速。

这些因素可归纳为两大类：

冷顶板特征因素：包括管间距，管道内外径，管道热工性能，作用板宽度、长度和厚度及它的热工性质， 承重板的厚度和热工性能。

工作条件因素：室内干球温度，室内露点温度，室内平均辐射温度，室外温度，冷媒水流量，和进口水温，和出口水温，此外还跟室内气流分布和流速。

但是对于辐射冷顶板产品，在实际应用中，影响冷顶板冷却性能的因素有：室内温度、室内平均辐射温度、冷媒水入口温度和出水温度，水流量，室内气流分布和流速。

## 5.2 流量对辐射冷顶板换热量的影响

$$\text{管内流量 } V: \quad V = \frac{\pi d_2^2}{4} v \quad (5.5)$$

$$\text{管内流态判断值 } Re: \quad Re = \frac{vd_2}{\gamma} \quad (5.6)$$

根据 (5.7)、(5.8)，流量增大时，管内平均流速增大，管内  $Re$  增大，使得管内由层流转换为紊流，提高管内  $Nu$  数，减小管内换热系数，降低顶板的表面温度，最终提高顶板的换热量。室内温度  $26.0^\circ\text{C}$  不变，冷水进水温度  $18.5^\circ\text{C}$  不变，当流量增大时，管内  $Re$ 、 $Nu$ 、对流换热系数和管内对流换热热阻随流量的变化见表 5.1。

表中显示，随着流量增大，管内  $Re$ 、 $Nu$ 、对流换热系数增大，管内对流换热热阻减小，冷顶板作用板表面平均温度降低；当流量为  $700\text{L/h}$  时，管内对流换热系数增大至  $5294\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，此时管内对流换热热阻仅为  $0.0029\text{ (m}\cdot\text{K)}/\text{W}$ ，图 5.1 能更直观的了解管内对流换热热阻随流量的变化规律。可以预示，当流量继续增大，管内对流换热热阻  $\rightarrow 0$ 。式(5.5)变成

表 5.1 室内温度 26.0℃，进口水温 18.5℃，金属冷顶板管内各项参数随流量的变化

流量 L/h	Re	Nu	对流换热 系数 W/(m·K)	对流换热 热阻 (m·K)/W	换热总热 阻 (m·K)/W	制冷量 W/m <sup>2</sup>
50	757	13.26	371	0.0408	0.0432	63.57
100	1514	16.71	468	0.0324	0.0348	64.55
150	2271	22.65	634	0.0239	0.0263	65.57
200	3028	34.62	969	0.0156	0.0180	66.60
250	3785	47.34	1325	0.0114	0.0138	67.14
300	4542	60.77	1701	0.0089	0.0113	67.46
350	5299	74.84	2095	0.0072	0.0096	67.68
400	6056	89.54	2506	0.0060	0.0084	67.84
450	6813	104.82	2934	0.0052	0.0076	67.94
500	7570	120.65	3377	0.0045	0.0069	68.04
550	8327	137.02	3835	0.0040	0.0063	68.12
600	9084	153.91	4308	0.0035	0.0059	68.17
650	9841	171.29	4794	0.0032	0.0056	68.21
700	10598	189.15	5294	0.0029	0.0053	68.25

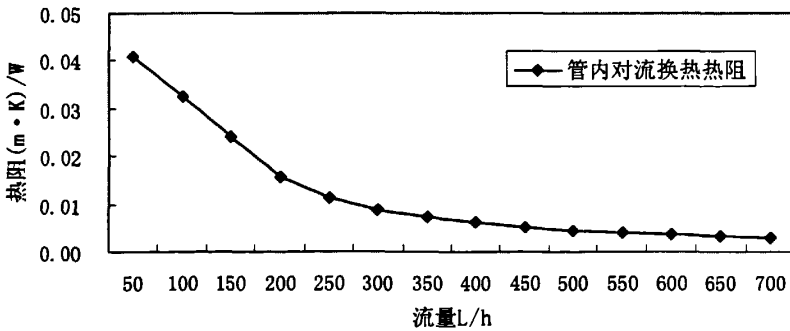


图 5.1 室内温度 26.0℃，进口水温 18.5℃，

管内对流换热热阻随流量变化趋势

$$q = \frac{t_f - t_b}{1/C_{bond}} \quad (5.7)$$

由于  $C_{bond}$  为冷顶板的固有特征参数，此时板上换热热阻为常数。当室温不变，进水温度不变，板内热阻冷顶板和板下换热热阻分别为冷顶板的固有特征参数及房间的特征参数，相当于管内冷水温度与房内环境换热之间的热阻为一常数  $R$ ，即：

$$q = \frac{t_a - t_f}{R} \quad (5.8)$$

所以，当室温  $t_a$ 、冷水进水温度  $t_f$  不变，忽略冷水温升（由于流量大，温度变化非常小），流量到一定值时，金属辐射冷顶板供冷能力稳定在某一水平不再增大。

表 5.2 室内温度 26.0，进口水温 18.5℃，毛细管辐射冷顶板管内各项参数随流量的变化

流量 L/h	Re	Nu	管内传热 系数 W/(m <sup>2</sup> ·K)	管内对流热 阻 (m·K)/W	板上换热总热 阻 (m·K)/W	制冷量 W/m <sup>2</sup>
50	123	4.36	1115	0.1241	0.4203	103.65
100	247	4.37	1116	0.1240	0.4202	103.66
150	370	4.39	1121	0.1234	0.4196	103.66
200	494	4.43	1133	0.1221	0.4184	103.68
250	617	4.50	1150	0.1204	0.4166	103.70
300	741	4.58	1169	0.1184	0.4146	103.73
350	864	4.66	1191	0.1162	0.4125	103.75
400	987	4.75	1213	0.1141	0.4103	103.78
450	1111	4.84	1236	0.1120	0.4082	103.81
500	1234	4.93	1259	0.1099	0.4062	103.83
550	1358	5.02	1282	0.1080	0.4042	103.86
600	1481	5.10	1304	0.1061	0.4024	103.88
650	1605	5.19	1326	0.1044	0.4006	103.90
700	1728	5.27	1347	0.1027	0.3990	103.92

对于相同面积的毛细管辐射冷顶板模块，由于管段数多，分配到每个毛细管的流量小，即使流量从 50L/h 增大至 700L/h，如表 5.2 所示，毛细管管内仍为层流，管内对流换热系数缓慢增大，因此对流换热热阻减小缓慢，总热阻减小也缓慢。当室内温度不变，进水温度不变，毛细管表面温度随流量下降缓慢，

与室内温度差增大缓慢，所以虽然毛细管顶板的换热量随流量增大，但是增大不显著。

流量对辐射冷顶板的影响，是由于流量增大，管内由层流变为紊流，减小了对流换热热阻，降低了顶板表面平均温度，增大了与室内温度差，因此提高辐射冷顶板的制冷量。当管内流量小时，对于金属板，流量增大，管内流态改变迅速，制冷量增大显著；而毛细管顶板管段多，随流量增大，管内流态一直停留在层流状态，因此制冷量变化不明显。

### 5.3 进水温度对辐射冷顶板换热量的影响

管内进水温度的变化对顶板换热量的影响，是由于管内进水温度引起了顶板表面温度的变化，从而影响顶板的换热量。如表 5.3、5.4，图 5.2、5.3，进水温度降低，顶板表面温度降低，与室内环境的温度差增大，自然对流换热和辐射换热都增大。不管是金属顶板还是毛细管，进水温度降低，制冷量都显著提高。在相同流量下，进水温度下降  $1.0^{\circ}\text{C}$ ，金属辐射冷顶板的制冷量增大约  $8\text{W}/\text{m}^2$ ，毛细管辐射冷顶板增大约  $12\text{W}/\text{m}^2$ 。

表 5.3 室内温度  $25.0^{\circ}\text{C}$  不变，金属辐射冷顶板制冷量随进水温度的变化表

进水温度 流量 L/h	$16.5^{\circ}\text{C}$	$17.5^{\circ}\text{C}$	$18.5^{\circ}\text{C}$	$19.5^{\circ}\text{C}$	$20.5^{\circ}\text{C}$
50	60.57	51.50	44.13	37.11	30.03
150	63.48	54.67	45.62	38.79	32.22
250	64.94	55.88	46.62	39.58	33.05
350	65.45	56.32	46.97	39.98	33.22
450	65.71	56.53	47.14	40.13	33.34
550	65.86	56.66	47.25	40.22	33.40
650	65.96	56.74	47.32	40.25	33.46

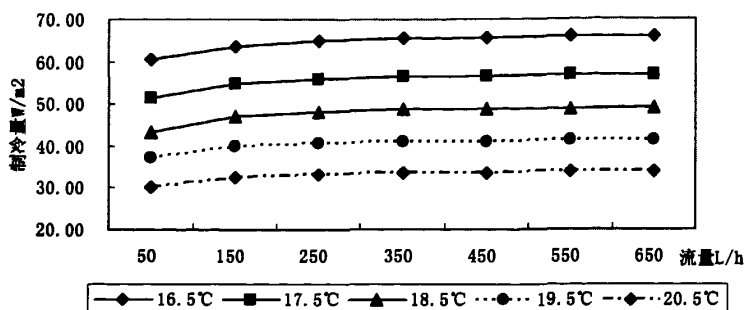


图 5.2 室温 25.0°C，金属辐射冷顶板换热量随进水温度的变化图

表 5.4 室内温度 25.0°C 不变，毛细管辐射冷顶板制冷量随进水温度的变化表

进水温度°C \ 流量 L/h	tf=16.5°C	tf=17.5°C	tf=18.5°C	tf=19.5°C	tf=20.5°C
50	87.72	73.25	64.36	55.84	44.90
150	87.73	73.26	64.37	55.84	44.90
250	87.75	73.28	64.39	55.86	44.92
350	87.77	73.31	64.42	55.89	44.94
450	87.82	73.35	64.45	55.91	44.96
550	87.87	73.37	64.49	55.94	44.99
650	87.89	73.38	64.51	55.96	45.01

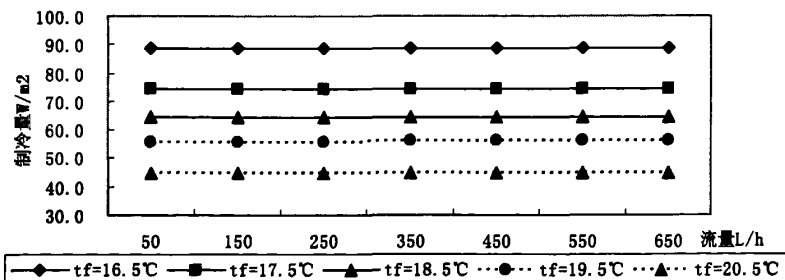


图 5.3 室温 25.0°C，毛细管辐射冷顶板换热量随进水温度的变化图

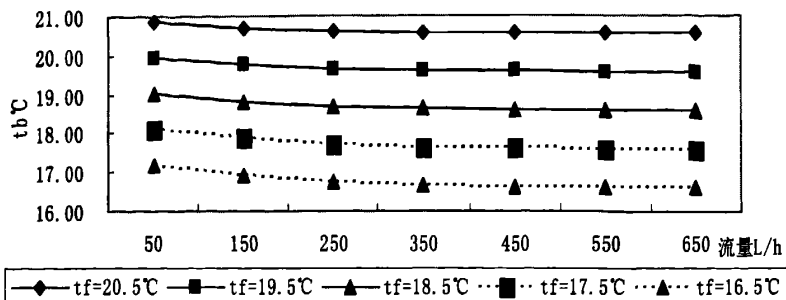


图 5.4 室温 25.0℃，进水温度降低，金属辐射冷顶板温度最低处温度变化图

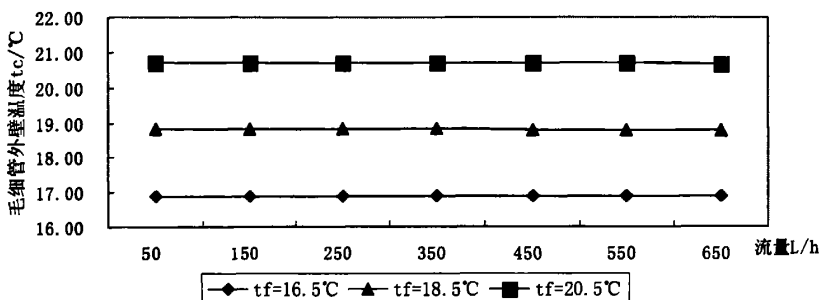


图 5.5 室内温度 25.0℃，毛细管外壁温度 \$t\_c\$ 变化图

但是管内冷水温度不能无限降低，要受到室内露点温度的约束。金属辐射冷顶板表面温度最低处的温度不能低于室内露点温度，否则顶板表面就会结露，破坏室内环境。从第二章分析可知，金属辐射冷顶板温度最低处是管板连接处的温度，温度为  $t_b$ 。由于金属辐射冷顶板的板上和板内热阻小，当流量增大到 350L/h 时， $t_b$  温度接近于冷水进水温度。所以当进水温度低于室内露点温度时，需要注意冷顶板表面最低温度随流量的增大逐渐接近进水温度，不能为了追求制冷量，无限制增大流量。Mumma 在文献中提出为了防止顶板上下表面结露，金属辐射冷顶板的进水温度至少大于室内露点温度 0.5

对于裸露的毛细管顶板，冷水进口处管外壁温度  $t_c$  最低。毛细管管内热阻大，因此当流量从 50L/h 增大至 700L/h， $t_c$  温度减小缓慢，始终至少大于进水温度 0.4℃，如图 5.5 所示。

此外表中中和图中换热量的计算中假设管内进水不变的情况下得到的。根据

$$Q = \rho V c_p (t_{out} - t_m) \quad (5.9)$$

标准大气压下 10℃、20℃时饱和水的的密度  $\rho$  为：999.7kg/m<sup>3</sup>、998.2kg/m<sup>3</sup>，热容积  $C_p$  分别为：4.191kJ/(kg·℃)、4.183 kJ/(kg·℃)。当温差变化小时，水的密度和热容积变化小，可按常量计算。采用的金属辐射冷顶板模型三，由于塑料连接管的热阻大，可以不考虑其冷量损失，单块辐射冷顶板的有效热交换管长为 0.7m。根据公式 (5.1) 及数值计算结果得到 50~700L/h 流量下的出口水温。

最大进出口水温差为流量  $V=50\text{L/h}$  时， $\Delta t=0.288^\circ\text{C}$ ，随着流量的增大，温差减小。但流量增至 200L/h 时，单块金属模板的进出口水温度差小于 0.1℃，温度差已经非常小了。从水温的变化对换热量的影响方面考虑，从图 5.2 可以看出，18.5℃与 19.5℃间 1℃温差的冷水，平均顶板换热量差值为 8W/m<sup>2</sup>，那么 0.1 的温度差为导致约为 0.8W/m<sup>2</sup> 的换热差值，也是非常小的，所以在辐射顶板模型数值计算中假设管内平均冷水温度为进口水温是可行的，不会造成很大的误差。

表 5.5 室内温度 25.0℃，金属辐射冷顶板进水温度、出水温度和温差变化表

流量 (L/h)	50	100	150	200	250	300	350
进口水温(℃)	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
出口水温(℃)	18.79	18.65	18.60	18.58	18.56	18.55	18.55
温差 (℃)	0.288	0.151	0.102	0.078	0.063	0.053	0.045
流量 (L/h)	400	450	500	550	600	650	700
进口水温(℃)	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
出口水温(℃)	18.54	18.54	18.53	18.53	18.53	18.52	18.52
温差 (℃)	0.040	0.035	0.032	0.029	0.027	0.025	0.023

#### 5.4 室内温度对辐射冷顶板换热量的影响

当室内温度提高时，室内平均辐射温度提高，由于冷顶板辐射换热量和室内平均辐射温度的 4 次方与顶板表面温度的 4 次方的差值成正比，所以当室温提高时，顶板辐射换热量增大。由于温度范围变化小时，空气的热工参数变化小，可以认为顶板对流换热量跟顶板表面温度与室温的差值成正比。当室温提高时，辐射换热量增大显著；顶板表面温度与室内空气温度的温差增大，顶板表面自然对流换热量增大。冷顶板的总换热量为辐射换热量与对流换热量之和，



所以当室温提高时，冷顶板的总换热量增大显著。如图 5.6 和 5.7，当室温由 25℃ 提高至 26.0℃，在相同进口水温下，金属辐射冷顶板和毛细管顶板的冷却能力提高了约 10W/m<sup>2</sup>。

文献[2]推荐由于存在辐射供冷，人体感觉温度比实际温度低约 2℃。换句话说，采用辐射供冷空调系统时候，可以辐射冷顶板系统的室内空气的设计温度可比常规空调系统室内设计温度提高 2℃左右。提高室内设计温度，即可节能，又可提高辐射冷顶板的制冷能力，更进一步节约了能源。

表 5.6 进水温度 18.5℃ 不变，室温改变，金属辐射冷顶板换热量变化表

流量 L/h \ 室温℃	ta=26℃	ta=25℃	ta=24℃
50	51.75	44.13	36.67
150	53.51	45.62	37.88
250	54.70	46.62	38.71
350	55.12	46.97	38.99
450	55.32	47.14	39.13
550	55.45	47.25	39.22
650	55.53	47.32	39.28

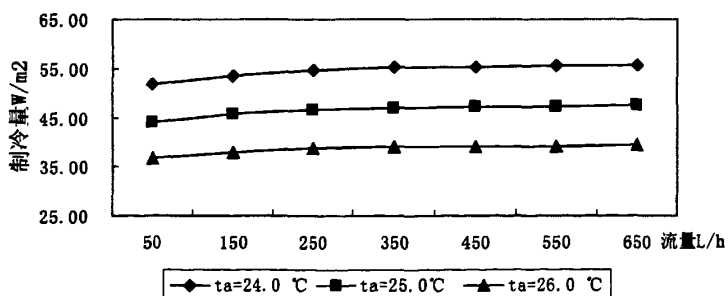


表 5.6 进水温度 18.5℃ 不变，室温改变，对金属辐射冷顶板影响曲线图

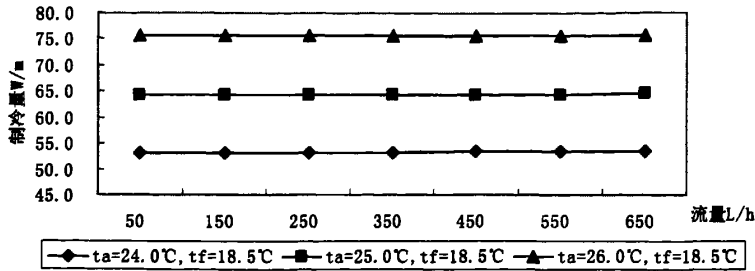


图 5.7 进水温度 18.5℃不变，室温改变，对毛细管顶板影响曲线图

## 5.5 小结

本章分析了影响辐射冷顶板换热量的因素，这些因素可分为两大类。一类是顶板特征因素：包括管间距，管道内外径，管道热工性质，作用板宽度、和厚度及热工性质，承重板的厚度和热工性质。一类是工作条件因素：室内干球温度，室内露点温度，室内平均辐射温度，室外温度，冷媒水流量，和进口水温，此外还跟室内空气分布和流速。

对于辐射冷顶板产品，顶板的特征因素不可改变，实际应用中，可控的可以影响顶板换热量的因素主要是顶板的工作条件因素。在自然对流状态下，影响冷顶板冷却性能的因素有：室内温度、室内平均辐射温度、冷媒水入口温度和出水温度，顶板的水流量。

研究表明不管是管内热阻小的金属辐射冷顶板还是管内热阻大的毛细管辐射冷顶板，室温变化对顶板换热量的影响显著。室内温度增大时，顶板表面温度与室温的温度差增大，提高了顶板的对流换热量和辐射换热量，总换热量自然提高了。

管内进水温度减小，降低了顶板表面平均温度，增大了表面温度与室温的温度差，提高了顶板换热量。但是顶板温度不能无限降低，受到室内露点的温度的限制，如果顶板表面温度低于室内露点温度，表面就会结露，出现凝水，破坏顶板和室内环境。金属辐射冷顶板的热阻小板板热阻小，当流量增大到 300L/h 时，顶板表面的最低温度接近进水温度，为了确保顶板表面不结露，顶板进水温度要大于室内露点温度。

当流量增大，提高了管内对流换热系数，减小了管内对流换热热阻，降低顶板表面温度，增大顶板表面温度与室温的温度差，从而提高了顶板的换热量。当流量增大一定时，管内对流换热热阻可忽略，顶板的换热量与顶板的本身参数有关，而已顶板的流量无关。对于金属辐射冷顶板当流量大于 300L/h 时，变化不显著。

## 第 6 章 结论

本文对辐射供冷的历史和应用情况做了简要的概述，虽然辐射供冷的历史悠久，但由于技术、经济、文化等多方面的社会原因，辐射供冷的普及程度远不及辐射供暖，辐射供冷发展道路是曲折的。随着工艺技术的发展，阻碍辐射供冷发展的技术壁垒逐渐被人类突破，加之当今世界能源供用紧张和人们对室内空气品质的有了更高的要求，辐射冷顶板在节能性和舒适性的突出优势，使得辐射冷顶板供冷技术的价值被重新定义，在 2002 年被美国能源部列为美国当今和未来，在经济上最具优势的 15 项暖通空调节能技术之一。

研究了金属辐射冷顶板和毛细管辐射冷顶板的换热机理，提出了两类辐射冷顶板冷量计算的模型，由于辐射冷顶板换热机制包含了传热的三种形式，导热、对流和辐射，辐射冷顶板换热量的方程复杂，可以采用计算机迭代进行计算。本文中结合电子表格和 Matlab 计算，可方便快捷进行计算。

通过实验研究了流量对辐射冷顶板换热性能的影响，实验表明金属辐射冷顶板的换热量随流量的增大而增大，但是当流量超过某一值时，金属辐射冷顶板的换热量增大不明显，几乎不变。毛细管辐射冷顶板的换热量随流量的增大变化不明显。通过 CFD 模拟了流量对金属辐射冷顶板换热量的影响，验证了顶板模型的可靠性。

影响辐射冷顶板换热的因素可分为两大类，一类为顶板特征因素：包括管间距，管道内外径，管道热工性质，作用板宽度、长度和厚度及热工性质，承重板的厚度和它的热工性质。另一类为工作条件因素：室内干球温度，室内露点温度，室内平均辐射温度，室外温度，冷媒水流量，和进口水温，和出口水温，此外还跟室内气流分布和流速。

本文着重分析了影响成品辐射冷顶板换热量的因素，这些主要因素有水流量、进口水温和室内温度。

a) 辐射冷顶板的换热量随流量的增大而增大；

b) 流量增大时，金属辐射冷顶板管内流动状态由层流变为紊流，管内换热系数提高，换热量显著增大，但是当流量大于 300L/h 时，金属辐射冷顶板的换热量基本不变。这是由于管内对流换热热阻很小，可以忽略不计，此时影响顶

板换热的主要因素是顶板的特征参数。由于毛细管顶板管径小，数量多，当流量从 50L/h 提高至 700L/h 时，管内流动状态仍为层流，管内对流换热系数并没有显著减小，换热量增大缓慢。

d) 进水水温的降低，降低了顶板表面温度，增大了顶板表面温度与室内温度的差值，近而增大了顶板与室内环境的换热量。但是受到顶板表面露点温度的限制，不能无限制的降低进口水温。特别对于金属辐射冷顶板，当流量增大时，顶板表面的最低温度接近冷水进水温度。为了防止结露，顶板表面温度要大于室内露点温度。

f) 实验中，室内温度 26.2℃ 保持恒定，相对湿度 40%，改变水流量，通过测试进出口水温差来计算顶板的换热量。实验表明，当水流量大于 300L/h 时，金属辐射冷顶板的换热基本不再提高。而毛细管顶板换热量对于流量的提高变化不显著。并且当流量大于 350L/h 时，毛细管顶板水流噪声明显增大。在实际应用中，对于有噪声要求的室内空调系统，需要注意流量增大带来的噪音问题。

辐射供冷在欧洲应用得较为广泛的中央空调系统之一，主要用于办公室、学校、医院、图书馆等规格较高的场所。而我国绝大多数办公建筑的中央空调系统所使用的都是风机盘管，风机盘管经过长年累月的运行后，噪声大、病菌孽生以及吹风感等问题日益严重，随着我国人民生活水平的不断提高，人们对舒适、节能、健康的空调系统越来越关注。辐射冷顶板热舒适性高，能耗低，全程干工况运行，无凝水、杜绝病菌孽生，系统无回风使得病菌无法扩散传播、噪声低、运行费用少、安装检修方便，既可用于新建筑，又适用于旧建筑的改造，符合现代人的健康需求，是一种极佳的空调方式。

## 致谢

不知不觉就要毕业了，不知不觉就要离开美丽的嘉定校园了。回首在同济的二年多的研究生生活，我付出了许多辛勤汗水，但也收获了很多。最让我怀念的是这段求学经历给我留下的亲切的回忆、是与各位老师同学们建立起来的深厚友谊。在此我想要由衷地感谢这些带给我这段美好人生经历的各位师辈、同学：

感谢我的硕士生导师潘毅群副教授，潘老师广博的知识面、对学科发展动态的敏锐洞察能力、认真严谨的治学态度以及高尚的敬业精神一直让我深受启迪和教育，这使我在专业知识和分析研究问题能力方面有了长足的进步。在我论文撰写阶段，潘老师给予了我悉心的指导和极大的支持，使我在遇到困难时坚定信念，勇往直前，最终能顺利完成这篇论文。

感谢中德工程学院的黄治钟老师，两年来一直对我的教育和帮助。在我写毕业论文期间，黄老师严谨求实的治学风格、深邃独到的见解，给了我极大的启迪，也将使我受益终身。

感谢系里的李茂德老师、朱彤老师，两位老师在我写论文期间的帮助，不仅将我们学科内的专业知识教授于我，还教会了我如何去学习这些方面的专业知识，这将使我受益一生。感谢实验室张建民老师在实验中给予的帮助。

感谢李启良博士师兄，李师兄是我学 fluent 的启蒙老师，怀念请教 CFD 的时光，师兄总能娓娓道来，耐心讲解，让我体会了软件不光要会用，还要了解之所以。感谢马素贞、刘猛等师兄师姐，你们在我学习工作生活上给予了我极大的帮助，能与你们在同一个工作室中学习生活，是我最大的荣幸。

感谢同门师友郑晓卫、殷荣欣，左明明在我做实验、写论文时给予鼓励和帮助。感谢同班同学张冬霞、王力、向素平、庄江婷、王小林，当我在本部做实验时，给予的鼓励和帮助，感谢同学陈婷婷帮我整理论文等细节工作。

感谢我的朋友周敏几年来一直对我的关怀、爱护和鼓励。

最后，我还想要由衷地感谢我的父母和姐姐，一直默默的支持我，正是二十五年来你们对我的辛勤培养教育，我才能获取今天的成就。

在我论文撰写过程中，得到过很多人的帮助和关心，在此短短的致谢中不能一一列出了，但请相信我对所有帮助过我的人都心存感激！

**友情难忘！恩情难忘！**

赖艳红

2008年3月于上海

## 参考文献

- [1] James Brodrick. Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential. New York: department of Energy, 2002, 19-15
- [2] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷. 北京, 中国工业出版社, 2003.
- [3] 龙惟定, 白玮. 我国电力紧缺对空调业的挑战, 暖通空调, 2004, 34(5):39-47
- [4] 沈烈承. 风机盘管干工况运行空调系统在办公室建筑中的应用. [硕士学位论文], 同济大学, 2006
- [5] 杨芳. 金属辐射冷顶板的研究及其应用. [硕士学位论文], 湖南大学, 2005
- [6] 李银明, 黄翔, 梁才航. 新型辐射板的实验研究及在西北地区的应用. 西安工程科技学院学报. 2004, 18(4): 353-357.
- [7] W. M. 罗森诺等. (美)《传热学基础手册》(上册). 科学出版社, 1992.
- [8] S. A. Mumma. Overview of Integrating Dedicated Outdoor Air Systems with Parallel Terminal Systems, ASHRAE Transactions 2001, 107(1)
- [9] Stanley A. Mumma. Chilled Ceilings in Parallel with Dedicated Outdoor Air systems: Addressing the Concerns of Condensation, Capacity, and Cost. ASHRAE Transactions, 2002, 108(2): 1-12
- [10] Stanley A. Mumma. Chilled ceiling in parallel with dedicated outdoor air systems: Addressing the concerns of condensation, capacity and cost. ASHRAE Trans, 2002, 108(2): 1-12
- [11] Stanley A. Mumma. Dedicated Outdoor Air-Dual Wheel System Control Requirements, ASHRAE Transactions 2001, 107(1)
- [12] Stanley A. Mumma. Integration of Hydronic Thermal Transport with Fire Suppression Systems. ASHRAE Transactions 2001, 107(1): 572-577
- [13] C.L. Conroy, Stanley A. Mumma. Ceiling Radiant Cooling Panels as a Viable Distributed Parallel Sensible Cooling Technology Integrated with Dedicated Outdoor Air Systems, ASHRAE Transactions 2001, 107(1)
- [14] S. A. Mumma. Chilled Ceiling Condensation Control, IAQ Application, 2003(Fall)
- [15] S. A. Mumma. Dedicated Outdoor Air Systems Backup Consideration Control Via Portal Sensors, IAQ Application, 2005(Winter)
- [16] S. A. Mumma. Comfort with DOAS-Radiant Cooling System, IAQ Application, 2004(Fall)
- [17] S. A. Mumma, Jae-Weon Jeong, Direct Digital Temperature, Humidity, and

- Condensate Control for a Dedicated Outdoor Air-Ceiling Radiant Cooling Panel System. ASHRAE Winter Meeting Symp. 3, Orlando-Feb. 6, 2005
- [18] S.A.Mumma, Jae-Weon Jeong. Humidity, and Condensate Control for a Dedicated Outdoor Air-Ceiling Radiant Cooling Panel System, ASHRAE Transactions 2005, 111(1)
- [19] J.W.Jeong, Stanley A. Mumma, W.P. Bahnfleth. Energy Conservation Benefits of a Dedicated Outdoor Air System with Parallel Sensible Cooling by Ceiling Radiant Panels. ASHRAE Transactions 2001, 107(1)
- [20] Jae-Weon Jeong, S.A. Mumma. Ceiling radiant cooling panel capacity enhance by mixed convection in mechanically ventilated spaces. Applied Thermal Engineering, 23(2003): 2293-2306
- [21] Jae-Weon Jeong, S.A. Mumma. Impact of mixed convection on ceiling radiant cooling panel capacity. HVAC&R Research, V. 9, No3, July 2003, 251-258
- [22] Jae-Weon Jeong, S.A. Mumma. Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel. Building and Environment, 2007, 34:3176-3185.
- [23] Jae-Weon Jeong, S.A. Mumma. Simplified cooling capacity estimation model for top insulated metal ceiling radiant cooling panels. Applied Thermal Engineering. 2004, 24:2055-2072.
- [24] Abdelaziz Laouadi. Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software. Building and Environment, 2004, 39:421-431
- [25] Franc Sodes. Economic viability of cooling ceiling systems. Energy and Buildings, 1999, 30:195-201
- [26] Franc Sodes. Economic viability of cooling ceiling systems. Energy and Buildings, 1999, 30:195-201
- [27] Peter Simmonds, Isaac Chambers etc..Applied Perforce of Radiant Ceiling Panels for Cooling. ASHRAE Transactions 2006, 112(2):572-577
- [28] Koichi Kitagawa, etc..Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under a radiant cooling ceiling by subjective experiments. Energy and Buildings, 1999, 34:185-193
- [29] Martin Behne. Indoor air quality in rooms with cooled ceilings. Mixing ventilation or rather displacement ventilation? Energy and Buildings, 1999, 30:155-166
- [30] Stetiu C, Feustel H.E., Winkelmann F.C.. Development of a model to simulate the performance of hydronic radiant cooling ceilings. ASHRAE Trans, 1995,



101(2):730-743

- [31] Morteza M. Ardehali, Nirvan G. Panah, Theodore F. Smith. Proof of concept modeling of energy transfer mechanisms for radiant conditioning panels. *Energy Convection and Management*. 2004, 45:2005-2017.
- [32] Yizai Xia, PhD, Stanley A. Mumma. Ceiling Radiant Cooling Panels Employing Heat-Conducting Rails: Deriving the Governing Heat Transfer Equations. *ASHRAE Transaction:research*, 2006
- [33] 殷平, Stanley A. Mumma. 独立新风系统 (DOAS) 研究 (1): 综述. *暖通空调*, 2003, 33(6): 44-49
- [34] 殷平, 杨芳, 刘敏新型辐射板的研制. 2004 全国暖通年会论文集. 北京: 中国建筑学会暖通专业委员会, 2004, 224
- [35] 布文峰. 冷顶板空调系统的研究. [硕士学位论文], 北京工业大学, 2001
- [36] J. L. Niu, L. Z. Zhang, H. G. Zuo. Energy saving potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 2002, (34):487-495.
- [37] L. Z. Zhang, J. L. Niu. Indoor humidity behaviors associated with decoupled cooling in hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 2003, (38):99-107.
- [38] 熊帅. 辐射冷吊顶/独立新风系统的技术研究与其可行性分析. *制冷与空调*, 2006, 6(4):34-38
- [39] 熊帅, 汤广发. 冷顶板与独立新风相结合系统的 CFD 研究. *建筑热能通风空调*, 2007, 26(1):40-43
- [40] 狄洪发, 王威, 江亿. 辐射吊顶的实验研究, *暖通空调*, 2000, 30(4):5-8
- [41] 邓仁杰, 张立志, 尹清华. 冷吊顶系统的研究进展. *建筑热能通风空调*, 2004, 23(5):18-34
- [42] 陈启, 马一太, 马利蓉. 辐射供暖、供冷系统冷热源的研究. *煤气与热力*, 2005, 25:14-18
- [43] 孙丽颖, 马最良. 冷却吊顶供水方式对系统运行能耗的影响. *万方数据*, 2001.
- [44] 中野幸夫, 蔡敬琅 等. 冰蓄冷辐射供冷系统的综合评价. *暖通空调*, 2002, 32(4):48-52
- [45] 王晋生. 加长波高透性薄膜的冷顶板/置换通风系统实验与模拟. [博士学位论文], 同济大学, 2005
- [46] 周鹏, 李强民. 置换通风与冷顶板. *暖通空调*, 1998, 5: 5-8
- [47] 张行周, 王浚. 置换通风与冷顶板相结合的空调系统. *流体机械*, 2002, 30(1): 54-56
- [48] 朱能, 刘珊. 置换通风与冷顶板的热舒适性研究. *制冷学报*, 2000(4): 64-70
- [49] 张帆. 置换通风加冷顶板技术评述. *建筑热能通风空调*, 1999, 18(4): 31-34
- [50] 朱能, 田喆, 马九贤. 冷天花冷顶板热工性能分析, *制冷学报*, 2000, 2:19-20

## 参考文献

- [51] 闫全英, 齐正新, 王威. 天棚辐射供冷系统换热过程的研究. 建筑热能通风空调, 2004, 23, (6):13-18
- [52] 殷平. 室内环境的安全性和独立新风系统. 暖通空调, 2003, 33(06): 20-30
- [53] J. Niu, J. V. D. Kooi, H. V. Ree. Energy saving possibilities with cooled-ceiling system. Energy and Buildings, 1995, (23): 147-158
- [54] Corina Stetiu, Helmut E Feustel. Development of a Model to Simulate the Performance of Hydronic Radiant Cooling Ceilings. ASHRAE Transactions, 1995, 101(2):730-743
- [55] Corina Stetiu, Helmut E Feustel, Yukio Nakano. Ventilation Control Strategies For Buildings With Hydraulic Radiant Cooling In Hot Humid Climates. In Proceedings of the Room Vent. Japan: Yokohama, 1996, 1-6
- [56] Niu J. L. and J. Burnett. Integrating radiant/operative temperature controls into building energy simulations. ASHRAE Transactions, 1998, 104(2): 210 - 217
- [57] 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [58] 王福军. 计算流体动力学分析. 清华大学出版社, 2004
- [59] R. 西格尔, J. R. 豪厄尔. 热辐射传热. 北京: 科学出版社, 1981
- [60] Awbi, H. B., and A. Hatton. Natural convection from heated room surfaces. Energy and Buildings, 1999, 30:233-244
- [61] Awbi, H. B., and A. Hatton. Mixed convection from heated room surfaces. Energy and Buildings, 2000, 32:153-166
- [62] Kilkis, B. I., S. S. Sager, and M. Uludag. A simplified model for radiant heating and cooling panels. Simulation Practice and Theory, 1994, 2(2): 61-76
- [63] ASHRAE Committee. ASHRAE Handbook. New York: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1999, 328-334
- [64] 林庭佑. Experimental Analysis on Forced Convective Heat Transfer Characteristics in Micro Tubes By the Method of Liquid Crystal Thermography (以液晶热像法探讨微小管内之热传特性).[博士毕业论文], 国立中央大学, 1996
- [65] 赵荣义, 范存养, 薛殿华等. 空气调节. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社. 1996
- [66] M. Behne. Is there a risk of draft in rooms with cooled ceilings? Measurement of air velocities and turbulences. ASHRAE Transaction, V. 101(2): 744-745
- [67] Helmut E Feustel. Radiant Cooling—a literature Survey. www.buildfind.com, 2003-12-23
- [68] Stanley A. Mumma. Economics of Improved Environmental Quality. ASHRAEIAQ Applications newsletter, 2002, 3(2): 15-1
- [69] 殷平. 独立新风系统 (DOAS) 研究 (3): 常规风机盘管独立新风系统, 2005, 35(3): 69-77

## 附录

## 附录 A 金属辐射冷顶板换热量计算 Matlab 迭代 M 文件

```

function y=metal(x)
tb=x(1);
tm1=x(2);
tm2=x(3);
global ta tr tf Rf
w2=0.15;
l1=0.06;
%w1=0.27;
%l2=0.135;
tm=(tm1*0.06+tm2*0.075)/0.135;
Gr=9.8*(ta-tm)*0.12^3/(tm+273)/15.6^2*1e12;
Nu1=0.853*0.514*(Gr*0.703)^0.25;
Nu=1.4/(log(1+1.4/Nu1));
hc=Nu*2.61/100/0.12;
hr1=0.9*5.67*(((tr+273)/100)^4-((tm1+273)/100)^4)/(ta-tm1);
hr2=0.9*5.67*(((tr+273)/100)^4-((tm2+273)/100)^4)/(ta-tm2);
u1=hc+hr1;
u2=hc+hr2;
m1=(u1/0.0648)^0.5;
m2=(u2/0.5754)^0.5;
g=cosh(m2*w2/2)+sinh(m2*w2/2)*tanh(m1*l1)*0.0648*m1/0.5754/m2;
tj=ta-(ta-tb)/g;
%q1=(tb-tf)/Rf*2;
%q2=4*0.5754*m2*((tj-ta)+(ta-tb)*cosh(m2*w2/2))/sinh(m2*w2/2);
%q3=2*(u1*(ta-tm1)*(0.06+0.08)+u2*(ta-tm2)*0.15);
%y(1)=q1-q2,y(2)=q2-q3,y(3)=q3-q1
y(1)=(tb-tf)/Rf-2*0.5754*m2*((tj-ta)+(ta-tb)*cosh(m2*w2/2))/sinh(m2*w2/2);
y(2)=(tb-tf)/Rf-(u1*(ta-tm1)*l1*2+u2*(ta-tm2)*w2);
y(3)=2*(u1*(ta-tm1)*0.12+u2*(ta-tm2)*0.15)-4*0.5754*m2*((tj-ta)+(ta-tb)*cosh(m2*w2/2))/sinh(m2*w2/2);

```

## 附录 B 毛细管辐射冷顶板换热量计算 Matlab 迭代 M 文件

```

function y=capillary(x)
tc=x(1);
tp=x(2);
global ta tf tr Rf
ec=0.85;
ep=0.8;
d2=0.0034;
L=0.01;
Fcr=0.475;
Fcp=0.475;
Fpr=0.5221;
Gr1=9.8*d2^3*(ta-tc)/(tc+273)/(15.2*1e-6)^2;    %Gr1=Gr,Gr2=Gr';
Gr2=Gr1/(ta-tc);
Nu1=0.36+0.363*Gr2^(1/6)+0.0941*(Gr2)^(1/3);
hc1=Nu1*2.61/100/d2;                            %hc1=hconv-c,Nuc1=Nuconv-c
hc2=1.812*(ta-tp)^(1/3);                        %hc2=hconv-p
%y(1)=(tc-tf)/Rf-0.01*hc2*(ta-tp)-1.35*ep*1.0e-10*((tr+273)^4-(tp+273)^4)-0.00713*hc1*(ta-t
c)-2.874*1.0e-10*ec*((tr+273)^4-(tc+273)^4);
%y(2)=2.874*1.0e-10*ec*((tp+273)^4-(tc+273)^4)-0.01*hc2*(ta-tp)-1.35*ep*1.0e-10*((tr+273)
^4-(tp+273)^4);
y(1)=(tc-tf)/Rf-pi*d2*hc1*(ta-tc)-pi*d2*ec*Fcr*5.67*(((tr+273)/100)^4-((tc+273)/100)^4)-pi*d
2*ec*Fcp*5.67*(((tp+273)/100)^4-((tc+273)/100)^4);
y(2)=pi*d2*ec*5.67*(((tp+273)/100)^4-((tc+273)/100)^4)-L*hc2*(ta-tp)-L*ep*5.67*Fpr*(((tr+
273)/100)^4-((tp+273)/100)^4);

```

附表 C 设备明细表

设备名称	数目	规格
压力表	2	量程 0.25MPa, DN100mm
铂热电偶	2	在标准标定试验台标定
万用表	2	UNI-T 万用表, 型号 UT71A, 液晶显示读数, 可精确到小数点后两位
金属浮子流量计	2	上海安锐流量计, 型号 LZZ-15/Y10/RR1, 水 20°C, 0.101325MPa, 一个量程 800L/h,, 另一个量程 100L/h, 量程比都为 10:1, 精确度 1.5 级。
水泵	1	Wilo 家用增压水泵, 型号 PBH169EA, 额定扬程 10m, 最大扬程 15 米, 进出管径 15mm, 额定流量 22L/min。
多圈调节阀	1	调节灵敏
截止阀	4	保证系统运行安全
金属滤网	1	确保顶板换热正常
金属辐射冷顶板	1	意大利 Gaconimi K6P 0.6m×0.6m DN21mm
毛细管辐射冷顶板	1	德国 Clina G 型网 0.6m×0.6m, DN3.4×0.55mm

## 附录

附录 D 金属辐射冷顶板测试流量 50L/h-350L/h 下进出口水温测试表

附录 D1 流量 V=50L/h, 金属辐射冷顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.43	18.43	18.43	18.43	18.40	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.53	18.43	18.43	18.43	18.43
出水温度℃	18.63	18.63	18.66	18.63	18.66	18.66	18.64	18.66	18.66	18.66	18.66	18.66	18.66	18.66	18.66
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.53	18.43	18.43	18.43	18.43	18.53	18.43	18.53	18.43	18.56	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53
出水温度℃	18.66	18.79	18.66	18.76	18.76	18.89	18.69	18.71	18.89	18.79	18.76	18.89	18.79	18.76	18.87
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度℃	18.53	18.43	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.43	18.53	18.43	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53
出水温度℃	18.89	18.92	18.92	18.89	18.92	18.92	18.92	18.81	18.89	18.92	18.92	18.92	18.87	18.87	18.92
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度℃	18.53	18.63	18.43	18.53	18.45	18.53	18.53	18.60	18.63	18.61	18.56	18.43	18.58	18.58	18.58
出水温度℃	18.92	18.92	18.92	18.92	18.92	18.92	18.92	18.92	18.92	18.92	18.89	18.89	18.92	18.92	18.92

附录

附录 D2 流量 V = 100L/h, 金属辐射冷顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.53
出水温度℃	18.53	18.53	18.53	18.53	18.58	18.58	18.58	18.68	18.58	18.58	18.71	18.48	18.58	18.63	18.58
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.43	18.53	18.53	18.53	18.43	18.56	18.43	18.53	18.53	18.56	18.53	18.56	18.56	18.53	18.56
出水温度℃	18.60	18.68	18.73	18.71	18.68	18.73	18.60	18.71	18.60	18.73	18.73	18.73	18.73	18.73	18.73

附录 D3 流量 V = 150L/h, 金属辐射冷顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.55	18.42	18.55	18.55	18.42	18.58	18.55	18.48	18.58	18.53	18.45	18.45	18.55	18.55	18.48
出水温度℃	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.59	18.62	18.62	18.59	18.62	18.62
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.58	18.53	18.58	18.58	18.55	18.58	18.55	18.55	18.58	18.53	18.53	18.58	18.58	18.53	18.55
出水温度℃	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.59	18.62	18.62	18.62	18.59
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度℃	18.58	18.55	18.58	18.48	18.55	18.45	18.45	18.45	18.42	18.42	18.55	18.45	18.55	18.45	18.55
出水温度℃	18.59	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度℃	18.48	18.42	18.42	18.42	18.53	18.55	18.55	18.45	18.42	18.42	18.45	18.42	18.42	18.42	18.42
出水温度℃	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62	18.62

附录

附录 D4 流量 V=200L/h, 金属辐射冷顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.43	18.53	18.43	18.43	18.48	18.43	18.40	18.43	18.53	18.43	18.53	18.53	18.53	18.53	18.56
出水温度℃	18.58	18.58	18.58	18.58	18.55	18.55	18.58	18.58	18.58	18.55	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.50	18.43	18.53	18.53	18.53	18.56	18.43	18.53	18.53	18.53	18.43	18.43	18.43	18.53	18.43
出水温度℃	18.55	18.58	18.58	18.58	18.55	18.55	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40					
进水温度℃	18.43	18.53	18.53	18.53	18.53	18.43	18.53	18.43	18.43	18.43					
出水温度℃	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58					



附录 D5 流量 V=250L/h, 金属辐射冷顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.56	18.45	18.53	18.43	18.66	18.53	18.43	18.43	18.43	18.43	18.53	18.53	18.43	18.38	18.43
出水温度℃	18.61	18.58	18.58	18.58	18.52	18.58	18.58	18.58	18.58	18.55	18.58	18.58	18.58	18.45	18.55
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.48	18.53	18.43	18.53	18.43	18.43	18.43	18.43	18.53	18.53	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43
出水温度℃	18.55	18.55	18.55	18.52	18.52	18.58	18.58	18.58	18.58	18.47	18.58	18.52	18.55	18.58	18.47
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度℃	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.53	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43
出水温度℃	18.55	18.58	18.58	18.55	18.58	18.47	18.47	18.55	18.58	18.58	18.52	18.47	18.58	18.42	18.55
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度℃	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43
出水温度℃	18.47	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58	18.45	18.55	18.32	18.42	18.52	18.47	18.45	18.42

附录

附录 D6 流量 V=300L/h, 金属辐射冷顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.53	18.50	18.53	18.50	18.53	18.50	18.53	18.53	18.53	18.50	18.53	18.53	18.53	18.50	18.40
出水温度℃	18.61	18.59	18.59	18.48	18.48	18.59	18.48	18.48	18.59	18.59	18.48	18.59	18.48	18.48	18.48
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.48	18.43	18.43	18.50	18.53	18.48	18.53	18.53	18.53	18.40	18.43	18.50	18.37	18.48	18.37
出水温度℃	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度℃	18.37	18.40	18.40	18.40	18.40	18.50	18.40	18.40	18.40	18.37	18.37	18.43	18.50	18.40	18.40
出水温度℃	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.58	18.48	18.48	18.48	18.48
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度℃	18.53	18.37	18.37	18.50	18.48	18.37	18.40	18.40	18.27	18.40	18.37	18.27	18.30	18.48	18.37
出水温度℃	18.59	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.48	18.59	18.48	18.48	18.48

附录 D7 流量  $V=350\text{L/h}$ , 金属辐射冷顶板进出口水温

读序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.53	18.53	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.53	18.53	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43
出水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.584	18.583	18.508	18.508	18.530	18.543	18.594	18.543	18.671	18.440	18.440	18.543	18.646	18.440	18.440
读序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43
出水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.543	18.440	18.466	18.543	18.440	18.440	18.440	18.440	18.440	18.440	18.440	18.440	18.543	18.440	18.440
读序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.43	18.43	18.43	18.43	18.40	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43
出水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.440	18.440	18.543	18.440	18.543	18.543	18.440	18.440	18.543	18.440	18.440	18.543	18.543	18.440	18.543
读序号	46	47	48	49	50										
进水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.43	18.43	18.43	18.43	18.43										
出水温度 $^{\circ}\text{C}$	18.440	18.440	18.539	18.440	18.440										

## 附录

## 附录 E 毛细管顶板测试 50L/h~300L/h 流量下的进出口水温

## 附录 E1 流量 V=50L/h, 毛细管顶板出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度/℃	18.51	18.51	18.49	18.54	18.52	18.41	18.52	18.44	18.54	18.54	18.52	18.41	18.49	18.39	18.52
出水温度/℃	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度/℃	18.49	18.39	18.41	18.49	18.49	18.52	18.44	18.49	18.41	18.49	18.49	18.49	18.52	18.52	18.52
出水温度/℃	18.93	19.04	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度/℃	18.54	18.52	18.52	18.44	18.49	18.41	18.49	18.39	18.44	18.49	18.49	18.39	18.41	18.49	18.52
出水温度/℃	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度/℃	18.49	18.49	18.49	18.49	18.39	18.39	18.51	18.39	18.49	18.39	18.39	18.49	18.49	18.39	18.49
出水温度/℃	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93

附录

附录 E2 流量 V=100L/h, 毛细管顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.46	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49
出水温度℃	18.71	18.81	18.68	18.78	18.78	18.73	18.68	18.83	18.78	18.60	18.81	18.83	18.81	18.68	18.73
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.59	18.49	18.49	18.49
出水温度℃	18.70	18.63	18.70	18.58	18.81	18.70	18.70	18.83	18.81	18.68	18.60	18.68	18.83	18.68	18.68
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度℃	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49
出水温度℃	18.68	18.68	18.83	18.78	18.60	18.70	18.68	18.78	18.78	18.60	18.78	18.68	18.68	18.81	18.78
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度℃	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.59	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.59	18.49	18.49
出水温度℃	18.68	18.78	18.70	18.68	18.60	18.81	18.81	18.70	18.68	18.68	18.58	18.73	18.70	18.70	18.70

附录

附录 E3 流量 V=150L/h, 毛细管顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.55	18.42	18.55	18.55	18.42	18.58	18.55	18.48	18.58	18.53	18.45	18.45	18.55	18.55	18.48
出水温度℃	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.64	18.67	18.67	18.64	18.67	18.67
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.58	18.53	18.58	18.58	18.55	18.58	18.55	18.55	18.58	18.53	18.53	18.58	18.58	18.53	18.55
出水温度℃	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.64	18.67	18.67	18.67	18.64
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度℃	18.58	18.55	18.58	18.48	18.55	18.45	18.45	18.42	18.42	18.42	18.55	18.45	18.55	18.45	18.55
出水温度℃	18.64	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度℃	18.48	18.42	18.42	18.42	18.53	18.55	18.55	18.45	18.42	18.42	18.45	18.42	18.42	18.42	18.42
出水温度℃	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67	18.67

附录

附录 E4 流量 V=200L/h, 毛细管顶板进出口水温

进水温度℃	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	
出水温度℃	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30										
进水温度℃	18.53	18.53	18.43	18.53	18.53	18.53	18.53	18.50	18.53	18.53	18.63	18.53	18.53	18.53	18.53										
出水温度℃	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65										
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45										
进水温度℃	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.43	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.50										
出水温度℃	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65										
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60										
进水温度℃	18.53	18.53	18.43	18.50	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.53	18.48	18.53	18.53	18.53	18.53										
出水温度℃	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65	18.65										

## 附录

附录 E5 流量  $V=250L/h$ , 毛细管顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度 $^{\circ}C$	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.62
出水温度 $^{\circ}C$	18.59	18.64	18.64	18.75	18.75	18.64	18.54	18.59	18.75	18.54	18.64	18.54	18.54	18.64	18.64
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度 $^{\circ}C$	18.52	18.52	18.52	18.52	18.42	18.49	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52
出水温度 $^{\circ}C$	18.75	18.57	18.64	18.67	18.54	18.64	18.67	18.64	18.57	18.75	18.67	18.54	18.64	18.54	18.75
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度 $^{\circ}C$	18.52	18.52	18.42	18.52	18.49	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.52	18.49	18.52	18.52
出水温度 $^{\circ}C$	18.57	18.64	18.57	18.64	18.54	18.75	18.57	18.64	18.64	18.54	18.64	18.54	18.54	18.54	18.54
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度 $^{\circ}C$	18.52	18.39	18.49	18.49	18.52	18.47	18.39	18.47	18.49	18.49	18.52	18.47	18.52	18.45	18.46
出水温度 $^{\circ}C$	18.54	18.64	18.54	18.64	18.54	18.64	18.54	18.57	18.54	18.64	18.64	18.54	18.54	18.54	18.64



附录

附录 E6 流量 V=300L/h, 毛细管顶板进出口水温

读数序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
进水温度℃	18.53	18.50	18.53	18.50	18.53	18.50	18.53	18.53	18.53	18.50	18.53	18.53	18.53	18.50	18.40
出水温度℃	18.63	18.60	18.60	18.50	18.50	18.60	18.50	18.50	18.60	18.60	18.50	18.60	18.50	18.50	18.50
读数序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
进水温度℃	18.48	18.43	18.43	18.50	18.53	18.48	18.53	18.53	18.53	18.40	18.43	18.50	18.37	18.48	18.37
出水温度℃	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50
读数序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
进水温度℃	18.37	18.40	18.40	18.40	18.40	18.50	18.40	18.40	18.40	18.37	18.37	18.43	18.50	18.40	18.40
出水温度℃	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.60	18.50	18.50	18.50	18.50
读数序号	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
进水温度℃	18.53	18.37	18.37	18.50	18.48	18.37	18.40	18.40	18.27	18.40	18.37	18.27	18.30	18.48	18.37
出水温度℃	18.60	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.60	18.50	18.50	18.50

## 个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

赖艳红, 女, 1982年11月生。

1997年9月毕业于江西省南康市南康中学

2004年7月毕业于中南大学 建筑环境与设备工程 获学士学位。

2005年9月入同济大学 攻读供热、供燃气、通风及空调工程 工学硕士学位。

作者: [赖艳红](#)

学位授予单位: [同济大学机械工程学院](#)

## 本文读者也读过(7条)

1. [薛红香](#) [毛细管空调系统舒适性及气流组织的研究](#)[学位论文]2009
2. [张佩东](#). [常虹](#). [ZHANG Pei-dong](#). [CHANG Hong](#) [辐射冷顶板供冷量与表面温度的模拟分析](#)[期刊论文]-[浙江建筑](#) 2010, 27(3)
3. [叶婷](#). [李锐](#). [YE Ting](#). [LI Rui](#) [顶板辐射供冷与置换通风复合式空调系统优化研究](#)[期刊论文]-[广州大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 09(5)
4. [李青](#). [刘金祥](#). [陈晓春](#). [徐稳龙](#). [丁高](#). [潘云钢](#) [U形毛细管席冷却顶板换热性能数值模拟与分析](#)[期刊论文]-[暖通空调](#) 2010, 40(4)
5. [孟涛](#) [辐射制冷装置的数值模拟及实验研究](#)[学位论文]2009
6. [马玉奇](#) [基于遗传算法的冷却/供暖顶板空调系统研究](#)[学位论文]2008
7. [杨芳](#) [金属辐射冷却顶板的研究及其应用](#)[学位论文]2005

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y1378226.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1378226.aspx)