



# 国内外蒸发冷却空调技术研究进展(1)

西安工程大学 黄翔<sup>☆</sup>

**摘要** 介绍了直接蒸发冷却器的研究情况,主要包括填料的传热传质性能、净化性能及直接蒸发冷却器的应用。

**关键词** 蒸发冷却 直接蒸发冷却器 空气调节 填料 传热传质 净化

## Progress in research of evaporative cooling air conditioning technology at home and abroad(part 1)

By Huang Xiang<sup>★</sup>

**Abstract** Presents the study status of direct evaporative coolers, including the performance of heat and mass transfer and purification of padding, and the application of direct evaporative coolers.

**Keywords** evaporative cooling, direct evaporative cooler, air conditioning, padding, heat and mass transfer, purification

★ Xi'an Polytechnic University, Xi'an, China

①

蒸发冷却是一项利用水蒸发吸热制冷的技术。水在空气中具有蒸发能力。在没有别的热源条件下,水与空气间的热湿交换过程是空气将显热传递给水,使空气的温度下降,而由于水的蒸发,不但空气的含湿量要增加,而且进入空气的水蒸气会带回一些汽化潜热,当这两种热量相等时,水温达到空气的湿球温度。只要空气不是饱和的,利用循环水直接(或通过填料层)喷淋空气就可获得降温的效果。在条件允许时可以降温后的空气作为送风以降低室温,这种处理空气的方法称为蒸发冷却。

蒸发冷却是一种环保高效且经济的冷却方式。它具有较低的冷却设备成本;能大幅度降低用电量和用电高峰期对电能的要求;能减少温室气体和CFC的排放量。因此,蒸发冷却技术可广泛应用于居住建筑和公共建筑中的舒适性冷却,并可在传统的工业领域如纺织厂、面粉厂、铸造车间、动力发电厂等工业建筑中提高工人的舒适性。蒸发冷却可以降低干球温度,给居住者提供一个较舒适的环境;蒸发冷却还可通过控制干球温度和相对湿度来

改善农作物的生长环境及满足生产工艺要求。

本文主要介绍直接蒸发冷却器的研究情况。

目前,直接蒸发冷却器主要有两种类型:一类是将直接蒸发冷却装置与风机组合在一起,成为单元式空气蒸发冷却器,另一类是将直接蒸发冷却装置设在组合式空气处理机组内作为直接蒸发冷却段。

填料或介质是直接蒸发冷却器的核心部件。目前,填料主要有木丝填料、刚性填料和合成填料三种。国内市场上常见的刚性填料有瑞典某公司生产的 CELdek 有机填料和 GLASdek 无机填料及国产的金属(不锈钢或铝箔)填料等。国家空调设备质量监督检验中心对三种填料的检验结果如表 1 所示。从填料的热工性能来看,三种填料中无机填料最好。综合考虑填料的防腐耐久性、防火

①☆ 黄翔,男,1962 年 7 月生,硕士研究生,工学硕士,教授,副校长

710048 西安市金花南路 19 号西安工程大学  
(029) 82330016

E-mail: huangx@xpu.edu.cn

收稿日期:2006-11-30

修回日期:2007-01-09

表 1 国家空调设备质量监督检验中心对三种填料的检验结果

| 填料类型 | 无填料时参数 |        |            | 有填料后参数 |        | 测试结果     |            |         |
|------|--------|--------|------------|--------|--------|----------|------------|---------|
|      | 干球温度/℃ | 湿球温度/℃ | 迎面风速/(m/s) | 干球温度/℃ | 湿球温度/℃ | 填料前后温差/℃ | 加湿量/(g/kg) | 风侧阻力/Pa |
| 有机填料 | 40.02  | 24.99  | 2.59       | 32.66  | 25.48  | 7.36     | 4.06       | 36.8    |
| 无机填料 | 40.06  | 23.54  | 2.45       | 29.58  | 23.74  | 10.48    | 9.70       | 26.7    |
| 金属填料 | 40.01  | 23.50  | 2.61       | 37.10  | 25.01  | 2.91     | 3.63       | 38.4    |

性、除尘性及经济性等,金属填料性能最好,目前在工程中应用最广<sup>[1]</sup>。

### 1 填料的传热传质性能

Dzivama 等人对四种作为主动式蒸发冷却器填料的材料(碎海绵、茎海绵、黄麻纤维及炭)进行了测试<sup>[2]</sup>,实验结果表明,当环境温度为 32℃、相对湿度为 25%时,茎海绵的性能最好,能使温度降到 18℃,相对湿度达到 84%。

Faleh 设计了一种专门的测试装置,对用于蒸发冷却器填料的三种天然纤维(棕榈(茎)纤维、黄麻和 Luffa 纤维)的性能进行了评估<sup>[3]</sup>,结果表明,几种湿填料中,黄麻的平均冷却效率最高,达到 62.1%,Luffa 纤维为 55.1%,棕榈(茎)纤维为 38.9%,用来作对比的商用填料的平均冷却效率为 49.9%。材料性能测试结果表明,黄麻的盐沉积最少,其次是棕榈(茎)纤维和 Luffa 纤维,而商用填料则最多;Luffa 纤维抵制发霉的能力最强,其次是棕榈(茎)纤维,而商用填料和黄麻纤维则很差。冷却效率衰减幅度的研究表明,Luffa 纤维在整体优势上强于棕榈(茎)纤维,商用填料的冷却效率衰减明显,而黄麻纤维则最差。总体结果显示,Luffa 纤维最好,对于黄麻纤维,如果能对表面作防霉处理,那么它将成为商用填料的最佳替代物。

Chung-Min Liao 等人设计了一个简洁紧凑的风洞,用于模拟蒸发冷却填料-风机系统,以便能够直接测试系统的性能<sup>[4]</sup>。选择了孔径为 2.5 mm 的粗糙 PVC 海绵筛网和孔径为 7.5 mm 的优质 PVC 海绵筛网两种填料进行测试。通过风洞实验,测试了空气流速、水流量、通过填料的静压降、填料厚度等对蒸发冷却效率的影响情况,以及填料-风机系统正常运行下填料的迎面风速和相关的静压降;得到了不同厚度填料时热质传递系数的量纲一方程。测试结果表明,在淋水密度为 15 L/(min·m<sup>2</sup>),填料厚度为 150 mm,气流速度为 0.75~1.5 m/s 等条件下,粗糙 PVC 海绵筛网的冷却效率为 81.75%~84.48%,优质 PVC 海绵筛网的冷却效率为 76.68%~91.64%。Chung-Min

Liao 等人还对无纺纤维多孔填料和椰子皮纤维填料进行了风洞实验<sup>[5]</sup>,得到了不同厚度替代填料的蒸发冷却过程的热质传递系数的量纲一方程。测试结果表明,在气流速度为 2.0~3.0 m/s 时,对于 150 mm 厚的填料来讲,通过无纺纤维多孔填料的静压降和冷却效率分别为 48~108 Pa,89.69%~92.86%;而通过椰子皮纤维填料的则分别为 60~130 Pa,89.69%~92.86%。

Y. J. Dai 等人考察了一个填料由湿的耐用蜂巢纸构成的交叉流直接蒸发冷却器,建立了一个包括液膜、气态物质、交界面边界条件等诸多控制方程在内的数学模型<sup>[6]</sup>。综合各方面因素,预测了降膜的界面温度。分析结果表明,存在一个最佳气流通道长度使温度最低,通过优化运行参数,可进一步提高系统的性能。

由世俊等人对金属填料表面上的热质传递性能进行了理论与实验研究<sup>[7]</sup>,建立了理论模型,采用差分方法建立方程组并求解,得出了填料表面水温 and 空气温湿度的分布规律。理论分析和实验结果表明,填料的传质系数不仅与淋水密度、空气的质量流速、填料的进口水温、进口空气状态有关,还与填料的材料、表面处理方法、几何尺寸等多个因素有关。采用比表面积为 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> 的铝合金填料,在高度为 400 mm、沿气流方向长度为 500 mm 时,空气比焓降可达到 37 kJ/kg。

邢永杰和孙贺江等人分别对金属填料的传热传质性能进行了实验研究<sup>[8-9]</sup>。通过采用美国 SAS 实验数据多元回归分析专用统计分析软件,对填料出口空气温度、相对湿度,填料两侧静压差及接触系数等回归公式中的变量进行了显著性分析,结果表明相关系数均大于 0.98,各因素的显著水平均在 0.05 以上。

由世俊和邢永杰等人还分别选择了铝质和不锈钢薄板金属制孔板波纹填料进行了冷却除湿实验研究<sup>[10-11]</sup>。实验表明,金属填料是一种性能良好的空气热湿处理材料,不但可实现绝热加湿过程,还可实现冷却除湿过程。在实际应用中,建议

风速取 2.2~2.8 m/s。如果综合考虑填料的热质传递性能和阻力,比表面积为  $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、沿空气流动方向填料的长度为 500 mm、高度为 500~800 mm 的填料是最佳的。华君和李泌如也分别对金属填料的除湿性能及加热加湿性能进行了研究<sup>[12-13]</sup>。

黄翔、宣永梅和武俊梅等人分别对采用木丝和 GLASdek 两种不同填料的直接蒸发冷却式空调机进行了实验研究<sup>[14-16]</sup>,系统地分析了进口空气干湿球温度和相对湿度对两种不同填料空调机温降、加湿管冷却效率及加湿效率的影响。对目前直接蒸发冷却式空调机常用的有机填料、无机填料、金属填料和无纺织填料的热工性能进行了对比分析,结果表明 GLASdek 填料的热工性能最好,但金属填料的综合性能最好。另外,从填料层厚度的优化、淋水量的优化、迎面风速的优化、过滤器设置、风机选择、风量调节、水泵选择、室内湿度控制以及空调机整体结构的优化等方面提出了直接蒸发冷却式空调机优化设计的主要措施,以提高其综合性能。

杜鹃等人通过对直接蒸发冷却式空调机与冷却塔的传热传质过程进行类比分析,推导出了直接蒸发冷却式空调机的热工计算方法<sup>[17]</sup>,并分别对迎面风速、空气与填料表面的传热系数、填料厚度及填料的面积系数等影响直接蒸发冷却式空调机热湿交换性能的各因素进行了详细的分析。在此基础上,对直接蒸发冷却空调系统的传热传质过程进行了数值模拟<sup>[18]</sup>,采用 SIMPLE 算法求解后,将数值模拟值与实验测试值进行了对比。结果表明二者吻合得很好,得到了温度场和湿度场的分布图,并通过在求解程序中改变不同变量的值,根据数值模拟结果绘出了迎面风速、填料厚度及空气入口状态参数等因素对直接蒸发冷却系统冷却效率及空气出口状态的影响关系曲线。

黄秋菊等人从湿膜加湿机理出发,建立了数学控制方程,利用有限差分法将控制方程离散,并利用 MATLAB 软件编程序求解。根据数值求解的结果,研究了湿膜加湿器的加湿性能,并对影响加湿性能的因素进行了分析,为提高加湿性能提供了理论依据<sup>[19]</sup>。

宣永梅和杜鹃分别对无机填料直接蒸发冷却空调机和直接蒸发冷却空调系统的传热传质过程

进行了理论与实验研究及数值模拟<sup>[20-21]</sup>。

董炳戌等人认为我国西北大部分地区可以利用水膜处理空气来达到冷却的目的<sup>[22]</sup>,建立了数学模型,给出了用平面水膜淋水器处理空气所能达到的送风参数,经计算分析后,得到了各种因素的影响,为实验设备尺寸的设计提供了依据,并为新型节能环保、高效空调的开发提供了理论基础。

宋垚臻对空气与水逆流通过填料的热质交换过程进行了分析,建立了通用的计算公式,并应用 MATLAB 数学软件方便快捷地对公式进行了求解。同时利用文献[23]中建立的模型公式和计算方法,计算出了空气与水逆流通过纸质填料后空气和水的状态参数,并与前人的实验结果比较,验证了文献[22]给出的模型公式的准确性,并为模型公式的推广应用提供依据<sup>[24]</sup>。

苏为等人总结了近几十年来关于湿帘体内蒸发降温机理的分析方法,着重讨论了各种分析方法得出的结论,及其对提高湿帘换热效率的指导意义,在此基础上提出了深入分析湿帘工作效率的思路<sup>[25]</sup>。

张继元研究了湿热冷却装置在喷淋水完全蒸发条件下的热质交换特征,经理论推导给出了喷淋水量及湿热参数的计算式<sup>[26]</sup>。从节能节水的角度出发,提出了在控制好喷淋用水量的基础上取消循环水泵,实现喷淋水完全蒸发的降温方案。强天伟等人也对不循环喷淋水喷淋填料的过程进行了分析<sup>[27]</sup>,得到的结论为:有循环喷淋水喷淋填料时,直接蒸发冷却器冷却效率受喷淋水温度的影响较大,但只有当不循环喷淋水温度等于空气湿球温度时,蒸发冷却效率最高。

吕金虎等人就进口空气相对湿度对直接蒸发冷却式空调机性能的影响进行了分析,得到了在保证一定冷却效果的条件下冷却效率、填料厚度和出口空气相对湿度与进口空气相对湿度的关系曲线<sup>[28]</sup>。

张正一等人通过风洞实验检验了各种填料的阻力特性和降温特性,利用不锈钢丝网制成一种 26 层的金属丝网多孔材料,并对以这种材料为填料的蒸发冷却中冷器的阻力特性和蒸发降温特性进行了实验,结果表明,用蒸发冷却中冷器替换原有中冷器是可行的,可用于柴油机、燃气轮机及 ICR 船用燃气轮机<sup>[29]</sup>。



蒋毅等人对空气经过无机填料的直接蒸发冷却过程进行了实验研究<sup>[30]</sup>,分析了直接蒸发冷却效率、换热系数以及空气阻力的主要影响因素,并给出了关于体积换热系数和空气阻力的两个经验公式,具有较好的精度,能满足一般工程设计的要求。

孙洲阳和由世俊以及强天伟先后对直接蒸发冷却填料的传热传质性能进行了深入的理论研究<sup>[31-33]</sup>。孙洲阳、由世俊和强天伟等人还分别采用人工神经网络方法预测分析了直接蒸发冷却空调机的传热传质性能,预测结果与实测结果吻合较好<sup>[34-36]</sup>。

## 2 填料的净化性能

Paschold 等人一蒸发冷却器测试室中对室内外可吸入颗粒物进行了测定,以确定蒸发冷却对环境空气的影响<sup>[37]</sup>。通过在两个普通蒸发冷却器模型中所做的实验,发现采用蒸发冷却器后室内 PM10 可吸入颗粒物可减少 50%,对 PM2.5 可吸入颗粒物的去除效率为 10%~40%。这些结果与采用除尘系统的结果是一致的。

Wen-Whai Li 等人于 2001 年夏天在美国德克萨斯州西部的 El Paso 地区 10 所居室内对空气中的可吸入颗粒物进行了测定<sup>[38]</sup>,同时记录了德克萨斯西部一装有蒸发冷却器的居室内外 PM2.5 和 PM10 可吸入颗粒物的 10 min 平均浓度,并建立了室内外 PM 的相互关系。测定结果表明,蒸发冷却器作为 PM 过滤器使用能有效地对室内空气进行置换,可使室内空气中 PM10 可吸入颗粒物的浓度大约减小 40%,而 PM2.5 的浓度大约减小 35%。不论是刚性填料还是木丝填料,两种蒸发冷却器对 PM2.5 和 PM10 可吸入颗粒物的去除率相似。

Paschold 等人对美国德克萨斯州西部的 El Paso 地区的 10 所居室所使用的蒸发冷却器的冷却水成分进行了测定<sup>[39]</sup>,采集了各家的水样用于化学及 PM 关系分析。测定结果表明,蒸发冷却器供水并未向室内空气中引入不溶性固体。总之,蒸发冷却器能给室内提供清洁的空气。Paschold 的博士论文见文献<sup>[40]</sup>。

孙贺江等人提出了一种完全区别于空气过滤概念的过滤-脱离理念<sup>[41]</sup>,并根据该理念研究出能够同时完成过滤、脱离、灭菌消毒三个过程的填料

型洗涤式空气过滤器。实验研究表明,对于直径大于 1,3,5 和 10  $\mu\text{m}$  的尘粒及气溶胶,大气尘计数效率分别为 31.4%,93.3%,96.4% 和 96.5%,而空气阻力只有 99.96 Pa。填料型洗涤式空气过滤器的大气尘计数效率达到中效过滤器的水平,而空气阻力却低于传统粗效过滤器的平均值。

马德刚等人提出利用湿式填料除尘器作为空气粉尘过滤和消毒的功能段<sup>[42]</sup>。通常情况下,湿式填料除尘器对 1  $\mu\text{m}$  粉尘的去除效率可以达到 25%~40%,对 5  $\mu\text{m}$  粉尘的去除效率为 75%~98%,压力损失范围为 30~130 Pa。结果表明,湿式填料除尘器具备净化消毒、加湿、蒸发冷却等功能,可以替代传统空调中的粗效过滤器,对阻止传染病通过空调系统蔓延,改善室内空气质量和节能具有重要作用。

王一飞等人提出利用洗涤式金属填料过滤器来代替原空调系统的纤维过滤器,以去除车间内化纤油剂形成的油雾<sup>[43]</sup>。首先以大气尘作为过滤的对象进行了必要的实验研究,在对大气尘过滤实验结果进行整理分析的基础上,对洗涤式金属填料过滤器应用于化纤油剂的去除进行了探讨。

张伟峰等人研究了填料式喷水室中填料段对 PM10 可吸入颗粒物的去除率情况<sup>[44-45]</sup>。实验结果表明,风速(范围为 1.2~1.58 m/s)一定时,填料段对 PM10 可吸入颗粒物的去除效率随喷水量的增加而增大;喷水量一定时,填料段对 PM10 的去除率随着风速增加而减小,去除率最高可达 57.6%。

## 3 直接蒸发冷却器的应用

Prasad 详细介绍了坐落于印度 Kanpur 的某私人公司的生产厂房的蒸发冷却通风系统的设计情况<sup>[46]</sup>。据观测,厂房内弥漫着浓度很高的氨气,由于冷却器填料上的淋水可以溶解氨水,所以该系统可以向用户提供更高质量的空气。针对表面蒸发的形式,设计了几种不同的蒸发冷却系统,尤其是提出了填料间歇供水的蒸发冷却系统,节能显著且又安全可靠。

D. A. Hindoliya 等人通过模拟研究对居住者的热舒适性和室内相对湿度进行了评价<sup>[47]</sup>。为了保持室内相对湿度低于 65%,对蒸发冷却器的饱和效率和房间换气次数作了规定。观察发现,把具有高饱和效率的直接蒸发冷却器应用于室内相对

湿度要求较低的场所是不可取的。对于这些要求低湿度的场所,在允许室内有较高换气次数的前提下,可采用普通的低饱和效率(60%)的直接蒸发冷却器。

Chaker 等人通过对美国 122 个地区的气象参数进行详细分析,得到了这些地方使用直接蒸发冷却器的时间<sup>[48]</sup>。汽轮机操作者利用这些数据可以很方便地对蒸发冷却的经济性作出评价。通过数学分析的方法得出了美国不同地区应用蒸发冷却技术的潜力,并对汽轮机在美国 122 个地区的简单循环运行进行了模拟。

Krishan 等人分析研究了印度 Delhi 等地区的综合办公楼在 4~6 月份使用蒸发冷却器的可能性<sup>[49]</sup>。利用模拟手段研究了蒸发冷却空调建筑内温度和湿度以及换气次数和旁通量对空调运行的影响。研究能否找到使室内相对湿度保持在 80% 以下,温度保持在 27~31 ℃ 之间的换气次数和旁通量范围。结果表明,如果环境空气的温度和相对湿度太高,直接蒸发冷却器则不能达到该房间的舒适性要求。为了得到最好的效果,必须选择适当的换气次数和旁通量。

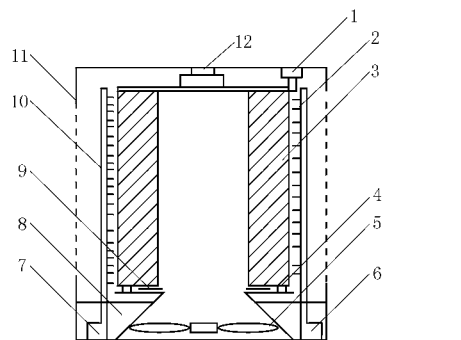
Lucas 等人针对葡萄牙 Alentejo 地区夏季高温和低湿的气候条件是导致生猪产量减少的主要原因开展了研究<sup>[50]</sup>。分析了 1995—1997 年 Alentejo 地区四个气象台记录的逐时气温和相对湿度数据,建立了气温与相对湿度之间的函数关系,给出了温度-湿度指标(THI),并用气象台的 THI 加以证实,通过这些指标可确定出夏季的热压期。得到了在热压期频繁出现的地区采用蒸发冷却系统可能是减少高温对生猪产量影响的灵活有效的解决方案的结论。

林易谈介绍了蒸发型制冷机在国内外高温车间的应用情况<sup>[51]</sup>,认为与传统空调相比,蒸发型制冷机不仅能有效排除车间内有害气体,增加换气量,而且可以降低车间温度,适宜在高温环境下应用。林易谈等人还对新疆地区增效空调系统、新风系统、冷凝器进风系统以及各种公共场所的制冷工程实例作了分析<sup>[52]</sup>,结果表明蒸发冷却制冷系统用于干燥炎热气候的新疆地区,既能降低投资成本与运行费用,又能改善使用场所的温度和湿度。

强天伟等人对直接蒸发冷却空调机中填料的正确使用、循环水水质的处理及空气预过滤等影响

空调机使用寿命的问题进行了分析<sup>[53]</sup>。为了搞清楚直接蒸发冷却的实际运行效果,强天伟等人对在广东东莞使用的一台直接蒸发冷却器进行了具体测试<sup>[54]</sup>,结果表明直接蒸发冷却器在东莞地区使用降温效果较好(10 月份时平均降温达 7.3 ℃),但相对湿度太大(平均相对湿度大于 80%),达不到空调设计标准。强天伟等人还对陕西宝鸡电厂空压机房使用直接蒸发冷却器的情况作了介绍<sup>[55]</sup>,并对房间中各测点的温湿度进行了测试,结果表明,蒸发冷却设备送风控制范围内空气温度比送风控制范围外空气温度大约低 5 ℃。檀志恒等人对蒸发冷却空调在工业厂房中的应用进行了研究<sup>[56]</sup>,建立了气候小室,利用直接蒸发冷却空调,采取正压送风的方法对其进行通风降温,系统地测得了不同条件下蒸发冷却空调的性能与使用效果,实验结论对蒸发冷却空调设备的优化与运行有一定的指导意义。

黄金福申请了蒸发型制冷机的外观设计专利<sup>[57]</sup>。汤志勤等人研究开发了旋转蒸发式空调(见图 1),它以独创的旋转湿膜专利技术为核心<sup>[58]</sup>,克服了传统固定湿膜空调器易被粉尘堵塞



1 同步电动机 2 水分散器 3 圆筒状湿膜 4 湿膜支撑滑轮 5 风机 6 湿膜供水泵 7 湿膜清洗泵 8 水箱 9 密封圈 10 带毛刷的斜向喷水管 11 机箱 12 湿膜转轴

图 1 旋转蒸发式空调示意图

的弊端。运转过程中,转动的湿膜持续被喷射水流冲洗,气流中的粉尘被湿膜表面粘附后,即时被冲入储水池并被排出机外。

张兰在分析我国空调器市场需求和技术发展的基础上,介绍了直接蒸发冷却空调的研究现状,并对该种空调在我国的应用前景和发展潜力进行了论述<sup>[59]</sup>。

## 参考文献

- [1] 黄翔. 空调工程[M]. 北京:机械工业出版社,2006

- [2] Dzivama A U, Bindir U B, Aboaba F O. Evaluation of pad materials in construction of active evaporative cooler for storage of fruits and vegetables in arid environments[J]. *Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*, 1999, 30(30)
- [3] Faleh A S. Evaluation of the performance of local fibers in evaporative cooling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43: 2267-2273
- [4] Liao C M, Chiu K H. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region [J]. *Building and Environment*, 2002, 37: 177-187
- [5] Liao C M, Sher S, Wang T S. Characterizing the performance of alternative evaporative cooling pad media in thermal environmental control applications [J]. *J Environ Sci Health*, 1998, 33(7): 1391-1417
- [6] Dai Y J, Sumathy K. Theoretical study on a cross-flow direct evaporative cooler using honeycomb paper as packing material [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22: 1417-1430
- [7] 由世俊, 张欢, 孙贺江, 等. 金属填料型空气过滤设备的热质传递性能研究[C]//全国暖通空调制冷 2002 年学术年会论文集, 2002: 818-821
- [8] 邢永杰, 魏东. 淋水金属填料的直接蒸发冷却实验研究[J]. *制冷*, 2001, 20(4): 16-19
- [9] 孙贺江, 由世俊, 涂光备. 空调用金属填料传热传质性能实验[J]. *天津大学学报*, 2005, 38(6): 561-564
- [10] 由世俊, 华君, 涂光备. 金属填料表面热质传递实验研究[J]. *制冷学报*, 2000(4): 35-39
- [11] 邢永杰, 由世俊. 淋水金属填料的冷却、除湿性能研究[C]//全国暖通空调制冷 2002 年学术年会论文集, 2002: 632-635
- [12] 华君. 金属填料冷却除湿性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2000
- [13] 李泌如. 金属填料加热加湿性能的研究[D]. 天津: 天津大学, 2001
- [14] 黄翔, 武俊梅, 宣永梅. 两种填料直接蒸发冷却式空调机性能的实验研究[J]. *制冷学报*, 2001(3): 33-40
- [15] 宣永梅, 黄翔, 武俊梅. 直接蒸发冷却式空调机用填料的性能评价[J]. *洁净与空调技术*, 2001(1): 68
- [16] 武俊梅, 黄翔, 陶文铨. 单元式直接蒸发冷却空调机的优化设计[J]. *流体机械*, 2003(1): 59-62
- [17] 杜鹃, 武俊梅, 黄翔. 直接蒸发冷却空调机与冷却塔内部传热、传质过程的类比分析[J]. *制冷与空调*, 2003(1): 11-14
- [18] 杜鹃, 武俊梅, 黄翔. 直接蒸发冷却系统传热传质过程的数值模拟[J]. *制冷与空调*, 2005(2): 28-33
- [19] 黄秋菊, 刘乃玲, 陈伟, 等. 湿膜加湿器加湿性能的数值模拟分析[J]. *制冷*, 2006, 25(3): 44-50
- [20] 宣永梅. 无机填料直接蒸发冷却空调机的理论与实验研究[D]. 西安: 西安工程科技学院, 2001
- [21] 杜鹃. 直接蒸发冷却系统传热传质过程的理论与数值模拟[D]. 西安: 西安工程科技学院, 2004
- [22] 黄炳戌, 张晓莉. 平面水膜淋水器蒸发冷却过程的理论研究[J]. *兰州铁道学院学报: 自然科学版*, 2001(3): 99-102
- [23] 宋垚臻. 空气与水逆流直接接触热质交换模型及分析[J]. *化工学报*, 2005(4): 614-619
- [24] 宋垚臻. 空气与水逆流直接接触热质交换模型计算及与实验比较[J]. *化工学报*, 2005(6): 999-1003
- [25] 苏为, 张天柱. 湿帘体内强制换热机理分析[J]. *制冷与空调*, 2005(3): 84-86
- [26] 张继元. 湿垫内“水-气”间热质交换过程的理论分析[J]. *农业机械学报*, 1999(4): 47-50
- [27] 强天伟, 沈恒根. 直接蒸发冷却空调工作原理及不循环水喷淋填料分析[J]. *制冷与空调*, 2005(2): 62-65
- [28] 吕金虎, 宋垚臻, 卓献荣, 等. 进口空气相对湿度对直接蒸发冷却式空调机性能的影响[J]. *制冷*, 2005, 24(3): 67-69
- [29] 张正一, 张妍, 孙聿峰. 一种多孔介质蒸发冷却中冷器性能的初步研究[J]. *热能动力工程*, 2004(2): 163-166
- [30] 蒋毅, 张小松, 殷勇高. 无机填料的直接蒸发冷却实验研究[C]//第四届全国制冷空调新技术研讨会论文集, 2006: 211-215
- [31] 孙洲阳. 基于智能方法的蒸发型空调系统性能实验与优选研究[D]. 天津: 天津大学, 2002
- [32] 由世俊. 空调用金属填料传热传质性能的实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2003
- [33] 强天伟. 通风空调设备用蒸发冷却节能技术的研究[D]. 上海: 东华大学, 2006
- [34] Sun Z Y, Tu G B, You S J, et al. A novel method to study on evaporative cooling air conditioning performance [C] // *Cryogenics and Refrigeration Proceedings of ICCR'2003*
- [35] 由世俊, 牛润萍, 张欢. 空调用填料表面传热传质性能的预测分析[J]. *暖通空调*, 2006, 36(增刊): 254-256
- [36] 强天伟, 沈恒根, 宣永梅. 用人工神经网络方法预测分析直接蒸发冷却空调机的性能参数[J]. *暖通空调*, 2005, 35(11): 10-12
- [37] Paschold H, Li Wen-Whai, Hugo M, et al. Laboratory study of the impact of evaporative coolers on indoor PM concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 1075-1086
- [38] Li Wen-Whai, Paschold H, Hugo M, et al. Correlations between short-term indoor and outdoor PM concentrations at residences with evaporative coolers[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 2691-2703
- [39] Paschold H, Li Wen-Whai, Hugo M, et al. Elemental analysis of airborne particulate matter and cooling



- water in west Texas residences [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 2681-2690
- [40] Paschold H. The effects of evaporative cooling on indoor/outdoor air quality in an arid region [D]. EI Paso: The University of Texas, 2002
- [41] 孙贺江, 马德刚, 张欢, 等. 填料型洗涤式空气过滤器实验研究 [G] // 暖通空调新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 66-69
- [42] 马德刚, 张欢, 叶天震, 等. 湿式填料在中央空调中除尘的效果观察 [J]. 中国公共卫生, 2004(3): 369-370
- [43] 王云飞, 张欢, 由世俊. 洗涤式金属填料空气过滤器的试验研究 [J]. 燃气与热力, 2006(2): 74-76
- [44] 张伟峰, 黄翔, 颜苏芊. 填料式喷水室净化处理室外新风中 PM<sub>10</sub> 的实验研究 [J]. 洁净与空调技术, 2006(1): 8-11
- [45] 张伟峰. 填料式喷水室净化处理室外新风中 PM<sub>10</sub> 及加湿性能的研究 [D]. 西安: 西安工程科技学院, 2006
- [46] Prasad M. Design of an evaporative cooling ventilation system for a production shop—a case study [C] // International Congress of Refrigeration 2003
- [47] Hindoliya D A, Mullick S C. Effect of saturation efficiency of direct evaporative cooler on indoor conditions and thermal comfort in a small office room of a building [C] // Indoor Air 2005, 2005: 254-259
- [48] Chaker M, Meher-Homji C B, Mee III T, et al. Inlet fogging of gas turbine engines detailed climatic analysis of gas turbine evaporation cooling potential in the USA [J]. Transactions of the ASME, 2003, 125: 300-309
- [49] Krishan K, Ashvini K, Mullick S C. Space conditioning using evaporative cooling for summers in Delhi [J]. Building and Environment, 2001, 36: 15-25
- [50] Lucas E M, Randall J M, Meneses J F. Potential for evaporative cooling during heat stress periods in pig production in Portugal [J]. J Agric Engng Res, 2000, 76: 363-371
- [51] 林易谈. 蒸发型冷气机在高湿车间中的应用 [J]. 暖通空调, 2001, 31(6): 102-104
- [52] 林易谈, 聂武雄, 戴树百. 蒸发冷却在新疆地区应用探讨 [J]. 供热制冷, 2000: 25-26
- [53] 强天伟, 沈恒根, 冯健民, 等. 直接蒸发冷却空调机使用中的问题及探讨 [J]. 制冷与空调, 2005(6): 92-94
- [54] 强天伟, 沈恒根, 冯健民, 等. 直接蒸发冷却空调在我国非干燥地区应用分析 [J]. 制冷空调与电力机械, 2006(3): 21-24
- [55] 强天伟, 沈恒根, 冯健民, 等. 蒸发冷却空调设备在空压机房中的应用 [J]. 暖通空调, 2006, 36(10): 114-116
- [56] 檀志恒, 强天伟, 沈恒根, 等. 蒸发冷却空调在工业厂房的应用研究 [J]. 制冷与空调, 2006(2): 63-66

- [57] 黄金福. 蒸发型冷气机: 中国, ZL200430049410. 2 [P]. 2004-04-30
- [58] 汤志勤, 汤焕毅. 一种空调器: 中国, 200420043298. 6 [P]. 2004-03-09
- [59] 张兰. 直接蒸发冷却空调的技术现状及应用前景 [C] // 第四届全国制冷空调新技术研讨会论文集, 2006: 416-419

## • 会议 •

## 环黄海圈建筑能源环境国际交流会议 2007(YSRIM2007)召开

由上海市制冷学会主办, 韩国设备工学会釜山、蔚山、庆南联合分会和日本空调卫生工学会九州分会共同协办, 同济大学、上海建筑科学研究院、上海交通大学联合承办的环黄海圈建筑能源环境国际交流会议 2007(YSRIM2007) 1 月 23~25 日在上海召开。

来自韩国和日本高校、研究机关及企业的 65 名代表及上海地区的 40 名代表参加了会议。大会宣读论文 25 篇, 会议展板交流论文 35 篇。经过 23 日、24 日两日的学术和技术交流会议, 进行了深入的三地建筑环境及能源领域的交流和沟通, 对当前的热点问题及将来如何开展跨国、跨地区的产学研联合展开了积极热烈的讨论, 形成了持续发展的共识。会议还安排日韩参会者参观了上海建科院生态楼、上海交通大学闵行新校园及正在建设中的中国第一高楼——上海环球金融中心。

YSRIM (Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environment and Energy) 的创设来自于中国同济大学(谭洪卫教授)、日本九州大学(赤司泰义副教授)、韩国东亚大学(Prof. Jung Jae Yee)的共同倡议, 并得到上海市制冷学会、韩国设备工学会釜山、蔚山、庆南联合分会和日本空调卫生工学会九州分会的认同和支持, 于 2006 年 1 月由三方学会正式在日本福冈举办的第 1 届会议(YSRIM2006)上签署正式联合协议, 形成每年一届由三方轮流主办、产学研共同参与的国际交流论坛。

YSRIM 将成为一个联合跨国三地区的、具有鲜明产学研联合特色、促进地区科技进步和暖通空调产业发展的常设国际交流平台。

(谭洪卫)

## 中国勘察设计协会建筑环境与设备专业委员会北京市委员会召开技术交流会

会议于 2007 年 1 月 25 日在北京召开, 由北京市建筑设计研究院教授级高级工程师张锡虎介绍 2006 年版北京市《居住建筑节能设计标准》的编制情况, 100 多位设计人员参加了会议。张锡虎高工的介绍深入浅出, 言简意赅, 深受广大设计师的欢迎。

(刘 轶)