

科技综述

主动除湿转轮在民用建筑空调领域的发展

同济大学 钟 怡[☆] 秦朝葵 徐吉浣

摘要 主动除湿工艺利用干燥剂吸附水分的特性,可实现温湿度精确调节,干燥剂利用低位能源再生,与常规方式相比,在达到同等舒适状态下能减少能耗。介绍了主动除湿原理,认为其技术合理,在民用建筑空调中很具推广潜质。

关键词 主动除湿系统 主动除湿转轮 蒸气压缩制冷 干燥剂

Application of active dehumidification wheel to air conditioning systems for civil buildings

By Zhong Yi[★], Qin Chaokui and Xu Jihuan

Abstract In the dehumidification technology, desiccant is used to adsorb water and temperature and humidity can be regulated accurately. The desiccant regenerates by low-grade heat source, and can reduce energy consumption at the same comfort condition compared with conventional ways. Presents the principle of the dehumidification technology, and considers that the technology is reasonable and has potential in future utilization.

Keywords active dehumidification system, active dehumidification wheel, vapor compressed refrigeration, desiccant

★ Tongji University, Shanghai, China

①

主动除湿系统 ADS(active dehumidification system)是利用干燥剂在温度、浓度差下的吸附解析水分特性,实现湿空气减湿的一种方法,干燥剂由外部得热再生。

主动除湿是减湿升温过程(近似等焓),民用建筑中减湿后的空气还需干工况冷却至相应送风温度。图 1 为空气除湿处理过程的比较。

转轮是继溶液喷淋塔、固体填料床(塔)、旋式水平床、多分割垂直床之后 ADS 的又一新型设备,其传热传质效率高、结构紧凑、湿工况适应力强,是探索主动除湿民用化技术的重要研究方向^[1]。

1 冷却除湿存在的问题

1.1 在健康舒适及环保方面

首先,民用建筑空调极少采用露点再热处理,送风相对湿度高,难以抑止微生物繁殖,人员会有

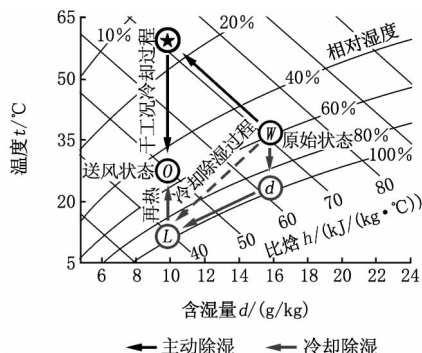


图 1 空气除湿处理过程比较

①[☆] 钟怡,男,1978 年 12 月生,在读博士研究生
200092 上海同济大学机械工程学院热能工程系
(021) 62436405
E-mail:zhongyiii@sina.com.cn
收稿日期:2005-11-01
修回日期:2005-12-30

过冷感;其次,潮湿设备还会滋生军团菌等呼吸道病菌,致人感染;再次,IAQ 新标准大幅提高了人均新风量^[2],但冷却除湿往往不能适应热湿非同步的新风负荷增长,湿度失控会加重此不利影响;最后,用于蒸气压缩制冷(VCR)的卤化烃制冷剂还会引发温室效应等重大环境问题。

1.2 在能耗和经济性方面

首先,采用 VCR 冷却除湿空调的数量及用电负荷的剧增给城市电网带来很大压力,迫切需要改变用能结构以减少电力基本建设投资和能耗;其次,室内相对湿度高会造成建筑围护结构、家具、地毯织物等霉烂,美国每年仅旅馆业改造腐变设施的花费就达 6 800 万美元^[3],空气凝水还会引发室内水患;再次,现有建筑为满足高新风量标准,需进行改造,否则由病态建筑综合症诱发的工作效率低下也将带来很大损失,美国每年此类损失高达 600 亿美元^[3];最后,控湿场所往往采用电再热,造成冷热量抵消,增加了能耗。

尽管可采取优化设计或使用新技术——如强化 HVAC 自控、增设洁净部件、室内灯源再热、增加卫生维护(例如定期杀灭军团菌)、提高 VCR 效率和采用天然制冷剂等,但笔者认为上述技术存在初投资过大、发展潜力有限、标本不兼治等问题,或许全新空气处理方式才能实现健康舒适、环保、经济、节能四者共生型的民用建筑空调环境。

2 主动除湿的优势

在民用建筑中,主动除湿与冷却除湿相比具有以下优势:

1) 精确调节负荷。ADS 单独处理湿负荷,实现温湿度精确调节(但不独立^[4]),一方面控湿后可抑止有害物滋长,另一方面当热湿负荷不同时达到峰值时(如夜晚、雨季),仍能满足设计参数,提高人员舒适性。

2) 优化空调用能。干燥剂可利用低品位热源如太阳能、内燃机缸套散热、浅层地热能 and VCR 冷凝废热等再生。

3) 丰富资源利用。上述热源均具发展潜力,特别是太阳能、浅层地热能、分布式供能余热,承担空调负荷后,也为热能找到一条切实的夏季利用途径。

4) 减少能源消耗。首先,主动除湿可实现恒温恒湿室内环境,同等舒适度下减少再热能耗;其次,冷源温度提高后可使用自然冷源或高温 VCR,

消除或降低制冷能耗;再次,与分布式热源相结合提高了综合能效;最后,当新风湿负荷增加后,主动除湿的节能效果更显著^[5]。

5) 创造经济效益。首先,能耗减少后一般运行费降低;其次,湿负荷转化为热耗后降低了冷需求,可减少制冷设备投资,这对需增加新风但缺乏改造用地的民用建筑尤为适用;再次,送风状态变化后,相比非再热冷却除湿,可省却因避免人员过冷所需的复杂气流组织及降低水气输配的保温投入,简化设计且减少投资;最后,低温送风系统复合 ADS 后,可降低送风湿度,避免输配系统凝水,使前者经济性充分体现。

6) 促进绿色环保。使用高温冷源后,可减小制冷机的制冷量,从而减少卤化烃制冷剂用量,而采用开式蒸发冷却或自然冷源的 ADS 则无化学制冷剂消耗,是真正的绿色空调。此外节能作用也对减排 CO₂ 有积极意义。

7) 有益健康卫生。以空气-水半集中系统为例,利用新风 AHU 处理全部湿负荷后,室内仅需负担显热,可避免末端水患、菌患。为做到这点,冷却除湿需降低冷源温度,一方面导致 COP 下降,另一方面需选用制冷剂直接蒸发或多排结构的非标配置,国内民用建筑鲜有应用,而 ADS 则可简单实现室内干工况。另一优势在于 ADS 除依靠室内间接控湿的被动抑止有害生物外,还有主动杀除作用,一些细菌、真菌或病毒不耐高温(碱金属卤化物,还能破坏细胞膜壁进行杀灭),据测,82 °C 时五类常见真菌、细菌的杀灭率已达 70%,提高至 100 °C 后,对流感、口蹄疫等一些常见病毒的杀灭率可达 99%(再生温度一般为 80~120 °C)^[6],硅胶干燥剂还能过滤 VOC 和烟味,具有多重健康保证。

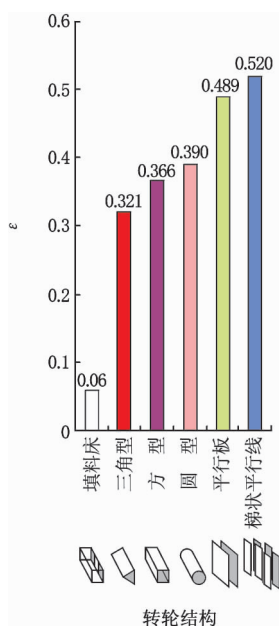
3 除湿转轮的发展

3.1 材料和结构

除湿转轮发展至今近 50 年^[7],其材料、结构数历变革。20 世纪 60 年代美国就有石棉纸浸润 LiCl 的转轮,因石棉致癌且 LiCl 易吹散,技术不成熟;70 年代牛皮纸渐渐取代石棉作为轮基,且又有两类新干燥剂——氧化铝和硅胶投入应用,氧化铝轮采用褶铝片浸入溴化物溶液产生吸附氧化层,但结构脆弱易吹散,早期硅胶轮则物理粘附于铝基;80 年代半导体工业发展后出现了以分子筛(沸石)为代表的合成干燥剂,同时加工工艺的进步又使干

燥剂能“嵌入”金属和塑料表面,提高了结构强度并防止干燥剂吹散。硅胶、分子筛和氯化锂是现今使用最广的三类转轮材料,硅胶无毒抗酸,吸湿范围宽,适用性强;分子筛在低浓度高温下仍具备大吸附量,3A(钾)型还能过滤细小尘污,但成本高、结构脆,工业应用较多;氯化锂使用最早,其单位吸附量远大于硅胶和分子筛,结构轻巧,化学固化于耐热塑材后可避免吹散,制造成本仅为前两者一半,性价比高。未来,开发生物原料^[8]和有机织物^[9]也是除湿材料的发展方向。

转轮的热湿交换在附着干燥剂的微流道间实现,众多微流道再构成转轮的蜂窝状圆迎面结构,异于同为圆面的水平旋转床,转轮流道断面极小,气流层流运动($Re < 500$),气壁间接触面积大,热湿传递充分。流道结构也几经发展,寻找接触面积大、传递效率高、风阻小的结构是转轮设计者不断追求的目标。一般用表征对流传递效率的 $St(Le=1)$ 与压阻因子 c_f 间的比值评判流道的性价比—— ϵ ,不同结构转轮的 ϵ 值不同,见图2。还有一个重要因素是转轮要利于加工,由于三角型结构便于加工且牢固,故目前一种结合三角型优点且具流线型的正弦流道(见图3)已成为转轮微流道结构的主流。



注:来源 NREL

图2 转轮流道结构性能比较^[10]

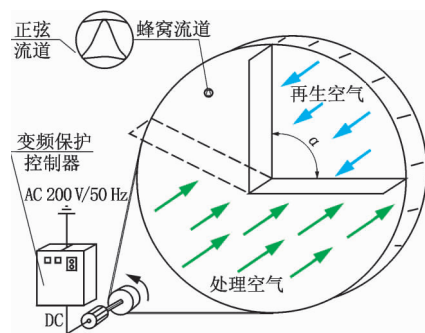


图3 除湿转轮常规结构(逆流型)

用燃气或电,只将冷量电耗转化为气耗或热量电耗,其能耗和经济性与各地气候及能源价格相关,应用受到局限。随着节能技术推广,太阳能、浅层地热能及分布式热电联产余热等能源正成为 ADS 的热源首选。

3.3 应用领域

主动除湿可用于有抑菌除霉的食品、农产品货物常温低温储藏、防潮防凝生产流程、非耐热干燥工艺(如包糖、塑脂、水产加工)和军工辍重防腐保养等场合的除湿,但目前主动除湿仍未在民用建筑空调中使用,根本原因是多数民用建筑空调注重控温,控湿不甚严格,而主动除湿能提供温湿度均适宜的空调环境,因此往往造成误解,被认为只有追求高舒适的民用场合才要使用“奢侈”的主动除湿系统。果真如此吗? ADS 相对常规热湿交换设备单件的投资的确高,但这一方面是生产尚未形成规模效应,另一方面主动除湿带来节能、削电、降低冷量消耗等作用也未计入经济收益。相比其他主动除湿形式,ADW 更适合标准化设计和生产,因此上世纪 80 年代后期至今,在许多气候区和地域均有针对不同民用建筑类型(办公楼^[11]、商业^[12]、学校^[13]、超市^[14])的应用研究,最近较具影响的有美国五角大楼能源中心和日本爱知世博会燃气馆,前者采用屋顶太阳能吸收瓦作为驱动热源,以削减夏季用电为应用目的;后者采用微型蒸汽轮机尾气余热作为驱动热源,在提高馆内空调温度的同时保证较低的相对湿度,实现节能舒适的和谐环境,两者皆具宣传和借鉴价值。一些负荷模拟软件(DOE 2.1, TRACE 等)也为实际应用提供了有益的参考^[15]。

笔者认为,21 世纪上叶可能是 ADW 民用化的萌芽期,但仍存在三大阻力。第一,不重视新风

3.2 驱动能源

除湿转轮为实现人居空调环境需耗用冷和热,冷源用于空气降温或冷却预除湿,热源则供干燥剂再生,均可灵活选择。

传统冷源采用 VCR,循环效率高,但夏季用电高峰期的电耗极其可观,相对冷却除湿而言,转轮 ADW 系统用冷量削减,利用高温冷源,能进一步提高 VCR 效率,低湿地区还可采用直接蒸发冷却,也可利用井水、湖泊和低温土壤,从而节电节能。

热源是实现连续主动除湿的驱动力,早期多采

供应不足和空调潮湿环境引起的健康问题;第二,能源粗放消耗、能源价格过低产生的新思想应用惰性;第三,设计和用能观念一成不变,使得新尝试步履维艰。时代在前进,追求健康是建筑发展趋势,新风量增加、室内无湿患且节能的要求将成为市场选择主动除湿的契机;对矿物燃料储量担忧及油价暴涨也使新能源应用再掀热潮,各国对 3E (environment, economy, efficiency) 的政策扶持和强制措施也使设计者和应用者更趋创新和理性,这些都利于 ADW 的应用。

4 我国 ADW 的应用前景

4.1 气候条件及设计组合

我国纬度跨幅大,并涵盖内陆和海洋各种气候,各地夏季空气湿度差异大,除湿转轮的除湿能力必须与之适应。为此笔者遴选国内典型地区的几座城市,简要探讨可行的 ADW 系统的设计组合。表 1 为我国典型地区城市的夏季空调设计参数

表 1 我国典型地区城市的夏季空调设计参数 ^[16]				
城市	所属地区	设计参数		
		干球温度/℃	湿球温度/℃	含湿量/(g/kg)
北京	华北	33.2	26.4	19.3
上海	华东	34.0	28.2	22.0
广州	华南	33.5	27.7	21.6
郑州	华中	35.6	27.4	20.1
成都	西南	31.6	26.7	20.5
哈尔滨	东北	30.3	23.4	12.6
银川	西北	30.6	22.0	13.3
乌鲁木齐	西北	34.1	18.5	7.1

由表 1 可见,城市间含湿量不同,有的甚至相差 3 倍,若要发挥应用主动除湿的室内干工况优势,ADW 系统势必要负担全部湿负荷,以室内温度 25℃、相对湿度 50% 计,含湿量为 9.9 g/kg,正常状态下(性能优化和气源可行性)的实际单轮除湿量约为 5~7 g/kg,若再承担人员湿负荷,其送风含湿量须低于 9.9 g/kg,一般为 7~8 g/kg,因

此室外空气含湿量大于 16 g/kg 的城市不能仅靠单级转轮负担全部湿负荷。

现今除湿转轮应用最多的地区是中北欧,其夏季室外空气含湿量均低于 14 g/kg,可采用图 4 方式处理空气,并利用开式直接蒸发冷却实现节能环保。我国西北地区的夏季空气含湿量与之相近,也可采用单级转轮,但这些地区夏季往往气温较高且水源紧张,采用开式水源直接蒸发并不现实,仍应考虑由 VCR 为 ADW 提供冷源。

我国高湿地区($d > 18$ g/kg)可考虑单级 ADW 复合其他除湿方式(见图 5),例如利用室外空气露点高时冷却预除湿,也可增设回风被动除湿(全热交换中的潜热交换)装置。

高湿地区可否仅靠 ADW 系统负担全部湿负荷呢?技术方案有两种,其一是提高单级转轮除湿能力,将其增至 10~12 g/kg,但主动除湿近似等焓过程,减湿对应温升,硅胶和氯化锂升温后(50℃以上)吸附能力骤降,只有分子筛对升温吸湿不敏感,故此方案受材料制约;其二可考虑双轮多级布设,由两个相同单轮系统叠加而成^[17],但系统两次再生能耗大,投资和运行均不甚合理,故笔者借鉴双效吸收式制冷的热利用及除湿转轮在不同的再生温度、气流分割下的特性,设计了以下双轮流程(见图 6)。采用一大一小两个转轮,不限干燥材料形式,大轮对半分,小轮按 2:1 分割,再生温度分别为 70℃ 和 120℃,外部输入热量均用于小轮再生,类似双效吸收式制冷机的低温发生器,大轮再生完全依靠自身及小轮的高温排气回收实现,因此也可称为双效双轮主动除湿。由于充分利用两轮间再生温差和排气热回收,可减少能耗近 50%,小轮直径减小也节省了初投资,但应用前提是小轮高温再生,故应用太阳能和浅层地热能时需要考虑热源品质,不足部分补充燃料,较适合采用分布式热电联产等有高温烟气可利用的场合。

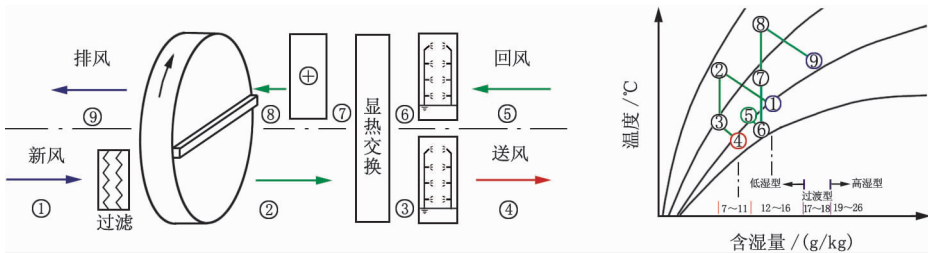


图 4 单级除湿转轮的组合及低湿空气处理方式

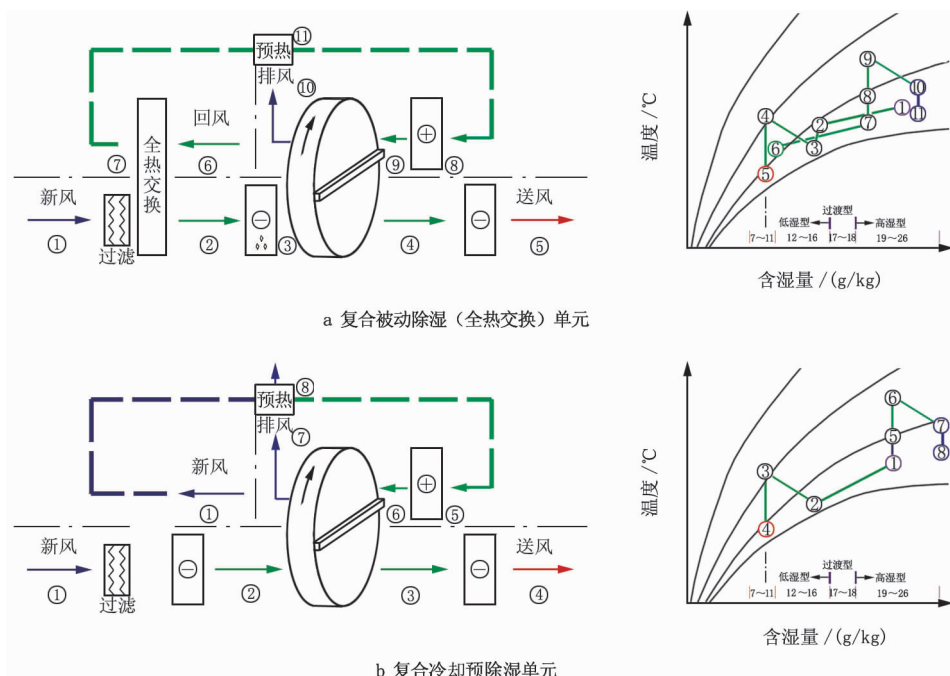


图5 单级除湿转轮复合其他除湿方式的组合及高温空气处理方式

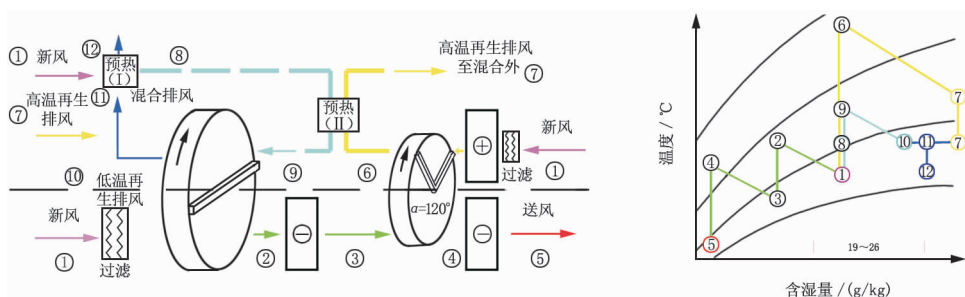


图6 双效双轮主动除湿的组合及高温空气处理方式

4.2 能耗及经济性分析

由于 ADW 的应用与经济、气候、能源价格、冷热源和空调设计密切相关,组合方式多,客观评价难,故笔者仅将经济发达的北京、上海和广州作为研究对象,以目前全国范围内推广的分布式供能系统(燃气发动机)余热利用为驱动源,冷源由发动机驱动冷水机组提供,热源为发动机余热,应用对象为办公楼,采用空气-水半集中式空调系统,新风 AHU 负担全部湿负荷,新风比 30%,附加被动除湿轮。

通过实验研究获得了冷热源效率和除湿转轮的设备性能,再对照常规冷却除湿和当地能源价格,采用当量满负荷运行时间法计算比较该种设计组合的三地能耗和经济性,结果见表 2。

可以肯定,针对三地夏季的高湿气候,ADW 系统均可取得节能效果,但投资的回收期相差较

表 2 北京、上海和广州三地的主动除湿空调复合分布式供能的评价结论^[18]

城市	所属地区	一次能源消耗减少率/% (相对冷却除湿)	设备增加投资部分的 简单回收期/a
北京	华北	15	8.0
上海	华东	16	3.0
广州	华南	17	5.6

注:能源价格为 2004 年初数据,目前气电价格均有小幅上浮。

大,这是因为能耗降低主要反映系统用能的合理性,而回收期长短多取决于当地能源价格,如上海当地电力价格较其他两地高,经济性佳。

换用太阳能热源、全空气系统或采用新 ADW 组合、选取其他地区后,又将获得新的评价指标,关于这方面的研究还将继续深入。

4.3 政府决策和市场经济对 ADW 应用的影响

我国能源利用水平低,单位 GDP 能耗为发达国家的 8~15 倍^[19],另一方面大城市夏季普遍遇

到经济发展与用电紧缺的矛盾,因此民用建筑空调的节电就成为关注的焦点。我国政府一方面倡导社会的节能意识(如调高空调温度),另一方面推行节能建筑规范,并支持鼓励健康和环保的绿色建筑发展,这些都为 ADW 应用创造了适宜的软环境。

当然在市场经济中政府并不能直接干预,但随着能源技术进步和用能结构调整,紧密结合新能源的 ADW 能为用户带来良好的预期收益,这将成为 ADW 的发展动力。

5 结语

冷却除湿的不足可通过变革除湿方式克服,ADW 既能为民用建筑营造健康舒适的人居环境,又能结合新能源利用实现节能、环保、经济效益,可能是未来空调的发展方向。

目前转轮的应用技术正不断进步,应用数量也与日俱增;我国气候多样,很适合开展 ADW 的民用化研究,期待 ADW 得到更多的应用。

参考文献

- [1] Lewis G H. The dehumidification handbook [M]. 2ed. Munters Cargocaire, 1990
- [2] ASHRAE. ASHRAE 62.1—2001 Ventilation for acceptable indoor air quality [S], 2004
- [3] Kovak B, Heimann P R, Hammel J. The sanitizing effects of desiccant-based cooling [J]. ASHRAE Journal, 1997, 39(4): 60-64
- [4] The heart of the matter [J]. Heating/Piping/Air Conditioning Engineering, 2000, 72(3): 77
- [5] Adnan A, Moustafa M E, Omar M A. Proposed energy-efficient air-conditioning system using liquid desiccant [J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16(10): 791-806
- [6] Piscataway. Dehumidification system meets

- environmental constraints [J]. Heating/Piping/Air Conditioning, 1999, 71(5): 99-100
- [7] Jae W J, Stanley A M. Practical thermal performance correlations for molecular sieve and silica gel loaded enthalpy wheels [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5/6): 719-740
- [8] Khedari J, Rawangkul R, Chimchavee W. Feasibility study of using agriculture waste as desiccant for air conditioning system [J]. Renewable Energy, 2003, 28(10): 1617-1628
- [9] Munter dehumidification division, desiccant option [EB/OL]. <http://www.munters.com>, 2000
- [10] Slayzak S J, Ryan J P. Desiccant dehumidification wheel test guide [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2000
- [11] Regenerative air conditioning of the office building "email-fabrik" in Amberg [R]. Germany: Project Report, 2001
- [12] Mazzei P, Minichiello F, Palma D. Desiccant HVAC systems for commercial buildings [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(5): 545-560
- [13] Halliday S P, Beggs C B, Sleight P A. The use of solar desiccant cooling in the UK: a feasibility study [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(12): 1327-1338
- [14] Jkevin M. New commercial applications for desiccant-based cooling [J]. ASHRAE Journal, 1998, 40(7): 41-42
- [15] Larry R R. How to accurately analyze feasibility of desiccant dehumidification applications [J]. Energy Engineering, 1999, 96(3): 39-57
- [16] 赵荣义, 钱以明, 范存养, 等. 简明空调设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- [17] 児玉昭雄. 低温度駆動多段除湿型デシカント空調機の開発 [R]. 金沢大学工学部, 2002
- [18] 钟怡. 燃气发动机驱动复合转轮除湿空调系统的应用 [J]. 煤气与热力, 2005, 25(1): 43-47
- [19] 日本経済産業省資源エネルギー庁. 日本のエネルギー [R]. 日本経済産業省, 2005

· 征订 ·

欢迎订阅 2006 年《暖通空调》(月刊)

《暖通空调》创刊于 1971 年,是国家期刊奖获奖期刊,中国建筑科学类核心期刊,中国暖通空调行业惟一的中央级科技期刊,由建设部主管,亚太建设科技信息研究院、中国建筑设计研究院、中国建筑学会暖通空调专业委员会联合主办。

《暖通空调》始终以“新颖、实用、准确、精练”为办刊方针,以提高全行业素质、推动全行业技术交流与发展为宗旨,及时报道国家有关建筑节能和环境保护的重大技术政策,建筑环境与设备工程中供暖、通风、空调、制冷及洁净技术方面的研究成果、学术论文、先进技术、工程总结、设计经验、设备开发与运行管理以及行业学术活动与设备市场信息。

《暖通空调》全年 12 期,每月 15 日出版,每期定价 10 元,全年 120 元,2006 年全年订户赠送《暖通空调》2004—2005 年全文检索光盘(赠送时间为 2006 年上半年),并且每期赠送《暖通空调》随刊赠阅。

● 订阅:全国各地邮电局,邮发代号:2-758。

● 邮购:本刊发行部,具体邮购事宜如下:

- 1) 全年订户免邮费,非全年订户需另付每本 3 元的邮费;
- 2) 一次性邮购 2006—2007 年两年或邮购 2006 年 5 份以上者按每份 100 元/年收费;
- 3) 本刊尚存少量过刊、合订本及光盘,可联系邮购;
- 4) 邮寄方式为普通邮寄,需要挂号或特快专递服务需另加收费用。

订购者请与《暖通空调》编辑部联系,电话:(010) 68362755,联系人:金庆平。地址:100044 北京市西直门外车公庄大街 19 号。

(本 刊)