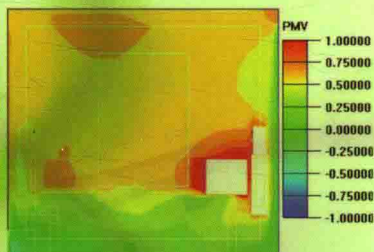


毛细管空调系统理论 及其应用

◎ 李永安 刘学来 著

MAOXIGUAN
KONGTIAO
XITONG
LILUN JIQI
YINGYONG

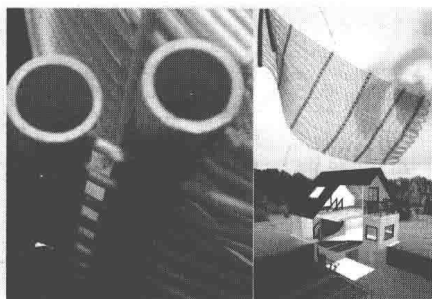


化学工业出版社

毛细管空调系统理论 及其应用

MAOXIGUAN
KONGTIAO
XITONG
LILUN JIQI
YINGYONG

◎ 李永安 刘学来 著



化学工业出版社

· 北京 ·

毛细管空调系统是一种新兴的、发展前景看好的空调方式。本书以热力学理论为基础,系统介绍了毛细管空调系统的组成、特点及其换热过程分析、强化换热的措施、毛细管网设置方式、系统水力计算的方法、工程应用案例、系统运行策略等。

本书可供从事建筑环境与能源应用工程、制冷技术、热能工程的本科生、研究生、教师及有关的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

毛细管空调系统理论及其应用/李永安,刘学来著.

北京:化学工业出版社,2006.12

ISBN 978-7-122-28397-9

I. ①毛… II. ①李…②刘… III. ①毛细管-空
气调节系统-研究 IV. ①TU831.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 260721 号

责任编辑:陶艳玲

装帧设计:韩 飞

责任校对:王 静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张9 字数148千字 2017年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究

前言



FOREWORD

传统集中式空气调节系统存在一系列弊端：能耗大、舒适度低、卫生条件差、风速过高、噪声大等。新的时代迫切需要节能、环保、健康舒适的空气调节系统。

近几年，我们先后承担了山东省自然科学基金“毛细管平面辐射空调系统机理研究（ZR2011EEM030）”、山东省科技发展计划项目“毛细管平面辐射空调系统的研究与工程应用（2014GSF116007）”，对新型空调系统——毛细管空调系统的组成、换热过程、系统水力计算方法以及工程应用等诸多关键技术进行了较为深入的理论和实验研究，本书就是上述研究成果的总结。本书对于毛细管空调系统的推广应用、优化设计、高效运行等都具有一定的参考价值。

在课题研究过程中，顾皓、阎佳佳、崔新阳、田丹丹、王婷婷、董修珍、陈晓欣、王德晔、王垂宁等诸多课题组的同仁均做了大量富有成效的工作。本书在写作过程中，得到山东大学龚海兴教授、山东建筑大学戎卫国教授的帮助，借此机会，向他们表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中定有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

著 者

2016 年 7 月

目录

CONTENTS

第 1 章	绪论	1
	1.1 研究背景	1
	1.2 国外研究现状	2
	1.2.1 置换通风与独立新风	2
	1.2.2 毛细管空调	4
	1.3 国内研究现状	5
第 2 章	毛细管空调系统	6
	2.1 毛细管空调系统的发展简史	6
	2.2 毛细管空调系统的组成	11
	2.3 毛细管空调系统的工作原理	11
	2.4 毛细管空调系统的特点	13
	2.5 毛细管空调系统节能潜力分析	15
	2.5.1 毛细管系统的使用对制冷机效率的影响	15
	2.5.2 毛细管系统的使用对输送系统的影响	20
	2.5.3 毛细管系统的使用对空调对象的影响	21
	2.5.4 毛细管系统的使用对冷却水系统的影响	22
	2.5.5 节能潜力分析的理论意义	24
第 3 章	毛细管辐射空调换热过程分析	27
	3.1 毛细管空调换热过程	27

3.2	毛细管空调数学模型的建立	28
3.3	毛细管空调辐射换热量	30
3.4	毛细管网的对流换热量	30

第 4 章 毛细管网设置方式 32

4.1	不同设置方式下室内温度模拟结果分析	32
4.2	毛细管不同设置方式下室内 PMV 模拟	35
4.3	毛细管不同设置方式模拟分析	38

第 5 章 毛细管空调强化换热过程分析 42

5.1	组合方案	42
5.2	不同夹角的敷射方式对供冷能力的影响	47
5.3	不同形状的敷设方式对供冷能力的影响	55
5.4	不同尺寸的敷设方式对供冷能力的影响	57
5.5	不同敷设方式的组合	61
5.6	平行敷射方式的关系式	61
5.6.1	曲线拟合	64
5.6.2	函数关系式的应用	65
5.7	新型敷设方式的应用条件	67

第 6 章 毛细管空调系统水力计算方法 69

6.1	遗传算法基础	69
6.2	基于遗传算法的水力计算理论	70
6.3	水力计算模型	72
6.4	水力计算表的研制	79

第 7 章 毛细管空调系统的应用 93

7.1	工程项目简介	93
7.1.1	空调冷热负荷	94
7.1.2	冷热源	95

7.1.3	空调末端系统	95
7.1.4	控制系统	97
7.1.5	主要空调设备表	98
7.2	工程项目实施效果	99
7.2.1	测试方法	99
7.2.2	测试仪器	100
7.3	测试数据及其分析	102
7.4	工程项目总结	110

第 8 章

毛细管空调系统运行策略 112

8.1	运行条件分析	112
8.2	预冷时间分析	112
8.3	间歇运行节能分析	116
8.3.1	空调负荷计算	116
8.3.2	办公建筑间歇空调设计负荷	119

第 9 章

结论 121

9.1	主要结论	121
9.2	前景展望	122

附录 1

全国主要城市室外计算温湿度系数 124

附录 2

毛细管空调水力计算表 130

参考文献 135

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景

(1) 我国建筑能耗与空调能耗的现状

目前,我国城乡既有建筑约有 4000 多亿平方米,其中 95%属于高耗能建筑,约有三分之一需要进行节能改造。这些建筑的总能耗约占社会总能耗的 30%,而这 30%还仅仅是使用过程中的耗能比例,如果再加上建材生产过程中耗掉的能源等,该比例将上升到 46.7%。其中,空调系统作为建筑能耗的重要组成部分,其节能形势严峻但潜力巨大。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。事实上,我国目前空调总装机负荷已达到 7~8 个三峡电站的年发电量之和。按照现在的用能效率,如果要达到发达国家的室内舒适度水平,空调能耗还将会翻倍,毫无疑问这是我国经济基础所无法承担的。因此,空调系统的节能对于实现建筑节能意义重大。

(2) 实现建筑节能的途径

在探索建筑节能的道路上,我国从最初的“墙体改造”开始起步,经过数次针对暖通空调的“设备换代”,再到对于“输送能耗”的关注,最终认识到“整体节能观”的重要意义。在取得进步的同时,我们也看到一些值得讨论和反思的问题。比如:片面且孤立地追求空调设备 COP 值,事实上该值并不能全面而合理地反映系统的整体用能水平。再如,对于从国外引进的技术盲目推广,没有充分认识到其使用条件或负面作用。

总结上述,我国在建筑节能上取得的成绩和走过的弯路,在借鉴吸收国外的经验和技术的的基础上,我们看到科学合理的建筑节能新途径如下。

① 从供热/供冷的实质出发,从能质匹配的角度重新审视空调系统各环节。

② 末端形式的改进。比如新型辐射冷板的应用,毛细管席(capillary system)是辐射型空调末端的最新一代产品。

③ 热回收技术,包括制冷系统冷凝热和排风余热的利用。前者通过冷却塔供冷(free-cooling);后者通过独立新风系统(DOAS)的焓轮(enthalpy wheel)实现。

④ 新的空气处理方式。通过新风系统对室内湿度进行独立控制。这一理念在国外被称为湿度独立控制,或非耦合系统(decouple system)。引入我国后被称为“热湿独立控制系统”或“温湿度独立控制系统”。2007年9月1日,温湿度独立调节空调技术推广联盟于北京成立。

⑤ 新的能源整体解决方案:CCHP(Combined Cooling, Heating and Power)热电冷联产系统系统,BCHP(Building Cooling, Heating and Power)楼宇冷热电联产系统。

⑥ 输配系统的革新,变“阀门耗扬程”为“变频泵补扬程”;在流量与温差间寻得平衡。

1.2 国外研究现状

毛细管空调系统是一种基于新型毛细管网辐射末端的、以湿度独立控制为特点并与相应的风系统协调运行的气—水式复合空调系统(Air-and-water Air Conditioning System),其属于广义的辐射供冷/供暖顶板空调系统。在欧洲,辐射型末端(包括毛细管网)多与置换通风相结合;而在美国,独立新风与辐射型末端的结合是最近几年的研究热点。目前,我国的相关研究整体上正在由高校和科研单位的理论研究层面向实际工程应用中延伸。

1.2.1 置换通风与独立新风

起源于20世纪40年代北欧的置换通风(displacement ventilation, DV)和新世纪初发轫于美国的独立新风系统(dedicated outdoor air system, DOAS),作为两种可以与毛细管辐射末端相结合的典型新风配置,是近年来欧美暖通界热议的题目之一。

(1) 置换通风

欧美学者对于置换通风的研究和评价鲜有一致之处,而在几个核心问题

上几乎是针锋相对的。欧洲的相关研究普遍基于置换通风下的室内温度呈现性变化这一假设 (Nielsen, Skistad 和 Mundt 等, 1987)。而美国的相关研究表明这个假定在大多数情况下是不成立的 (Chen, Q. Glicksman, 1999), 并假设在 $0.1 \sim 1.1\text{m}$ 的范围内的温度分布是线性的。正是在这种基础之上, 欧洲供热、通风与空调协会联盟 (REHVA, Federation of European Heating and Air-conditioning Association) 和美国采暖、制冷与空调工程师协会 (ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) 先后于 2002 年和 2003 年, 分别颁布了自己的置换通风系统设计指南——《非工业建筑用置换通风系统》和《置换通风系统的性能及其设计指南》。两者在充分肯定各自在过去几十年的研究成果的同时, 给出了不同的设计思路, 但并非殊途同归。近年来, 被一贯视为置换通风特点的羽状气流也在相关研究中受到质疑 (Ferro 等, 2004)。而对其鲁棒性的分析 (Li 等, 2004) 和不同粒径污染物颗粒下通风效果的深入研究正在进行^[8]。在满足人体舒适要求的条件下, Glicksman 认为置换通风的最大制冷量为 $40\text{W}/\text{m}^2$, Loveday 等 (2002) 认为最大制冷量为 $30\text{W}/\text{m}^2$, 而 Snadbegr 等 (1989), 认为最大制冷量为 $25\text{W}/\text{m}^2$ 。

另外, 在节能潜力方面, REHVA 的相关研究表明置换通风系统与传统的混合风系统相比没有明面的优势可言 (Skistad 等, 2001)。美国学者通过不同的方案设计, 在风机的年能耗有所增加的前提下, 实现了系统年能耗的整体降低 (Roth, Chen 等, 2005)。

值得注意的是, 置换通风在欧美并不用于冬季供暖 (Stefano Schiavon, M. Sc, 2005)。这是因为在冬季工况下, 尽管室内空气流速较低, 空气温度趋于均匀, 但空气处于混合状态, 人员呼吸区域的污染物浓度较供冷运行时高得多, 不具备较好的抑制交叉污染的能力。换句话说, 冬季供况下的所谓“置换风”本质上只是一种下送上回式的混合通风, 而后者形成的风场对室内空气品质甚至会起到恶化而不是净化作用。因此, REHVA 标准和 ASHRAE 标准均不推荐在冬季使用置换通风。

(2) 独立新风

独立新风作为一个新概念被提出是在 20 世纪 80 年代, 但直到 9·11 事件的发生, 该系统才真正引起美国暖通界的广泛关注。特别是在 SARS 爆发后, 有着“反恐空调”之称的 DOAS 真正成为暖通领域一个新的研究热点。其最主要的特点有三, 一是系统的节能潜力巨大 (Roth 等, 2002); 二

是回风与新风无被动混合,从而大大降低了细菌利用空调系统进行传播的速度和空间分布密度(Mumma等,2007);三是系统对于湿度的控制灵活而高效(Steven J. Emmerich 和 Tim McDowell, 2005)。对于该系统的仿真研究(Klein等,2000; McDowell 和 Jeory 等,2003)和现场研究(Fischer 和 Bayer 等,2003)均印证了上述三点。特别是 Mumma 领导着一个研究小组针对 DOAS 系统进行了大量系统而深入的研究^[10~14]。内容涵盖系统配置、自动控制、结露问题、节能潜力、室内空气质量 and 热舒适性等多个方面,并通过专用网站 <http://doas.psu.edu> 进行学术交流和资源共享^[16~18]。

事实上,美国能源部在2002年公布的商业建筑暖通空调系统最有价值的15项节能措施中,独立新风与辐射型末端所组成的复合系统(“DOAS-Radiant” Approach),以其在技术成熟性、节能潜力和回收年限上的优异表现而名列第一。Mumma(2006)也认为,在多个针对显热处理的备选系统中,辐射冷板系统(包括毛细管型末端)因其在初投资、节能、舒适度以及室内空气质量诸方面的优势而可能成为最好的选择。

2005年,Steven J. Emmerich 和 Tim McDowell 在美国商务部(U. S. DOC)联合国家技术管理局(TA)以及国家标准和技术研究所(NIST)共同起草的《关于置换通风与独立新风在美国商业建筑中使用的初步评价》中指出,在大范围应用 DOAS 之前的主要方向是进行更多更深入的现场测试研究(field study)。

1.2.2 毛细管空调

对于广义的辐射供冷/供暖顶板空调系统的研究在欧洲已经进行了近半个世纪。

冷却顶板在1940年左右就已出现,但直到1990年左右才建立了它的标准测试方法。冷却顶板早期一般可以提供 $60\sim 80\text{W/m}^2$ 的冷量。故相关产品主要使用在欧洲特别是北欧地区。这个地区的房间热湿负荷都较低,很多情况房间的制冷设备就只有冷却顶板,没有专门的通风系统,主要通过自然通风换气。近年来随着设备的改进,冷却顶板的供冷量有所增加,但始终未突破 100W/m^2 。目前,欧洲针对毛细管干式末端的热工研究基于两大标准:德国国家标准化组织的 DN4715 和工厂、设计制造安装公司组织制定的 FGK 标准。研究表明,它对冷负荷变化的反应时间介于金属辐射板和混凝土辐射板之间。

1.3 国内研究现状

我国在 20 世纪 90 年代, 也开始了辐射供冷/供暖系统的研究工作。大多是在置换通风与辐射末端相结合的基础上展开的 CFD 模拟研究和试验室研究。研究内容涉及辐射冷板的冷量确定、结露控制和新风量确定等多个方面。其中, 天津大学依据德国 DN4715 标准对其研制的新型冷却顶板进行了测试。因为置换通风在, 所以美国的做法是在冬季增加另外一套供暖设备 (Steven J. Emmerich 等, 2005), 或是采用独立新风和常规的变风量系统 (VAV) 代替置换通风在冬季工况下使用。这也是为什么我国目前所有“辐射顶板+置换通风”的相关研究很少涉及甚至回避冬季工况的原因之一。事实上即便对其进行过研究, 结果也很可能是否定的 (张腾飞, 2008)。另外, 考虑到我国目前室内空气中的粉尘颗粒 (airborne material) 与欧洲不同, 故将置换通风与毛细管网相结合作为冬夏一体的空调系统, 其可行性值得怀疑。应该看到, 我国目前针对“辐射型末端+新风系统”所组成的空调复合式系统的术语尚未形成规范的法。例如, 对于“毛细管末端+置换通风”的空调系统有“恒温恒湿空调”的商业名; 而对于“内埋管的混凝土板+置换通风”的空调系统有“不用空调和暖气”的商业宣传。

同时湖南大学殷平教授领导的一个小组致力于独立新风与干式空调末端结合的相关研究。这与目前大多数“置换风+辐射末端”相比, 是两个相互联系但又有根本区别的两个研究方向。但由于独立新风本身在美国也是一个新生事物, 我国目前的研究多是基于有限的翻译资料。因此, 整体上仍处于综述状态, 且存在较多误区。比如, 很多文章将之引述为一种美国的前沿技术, 事实上它是对旧有技术的一种重新整合。再如, 独立新风 (DOAS) 与低温送风独立新风 (CDOAS) 的概念混淆等。

具体到毛细管末端, 相关研究刚刚展开。内容涉及针对设备和系统的介绍 (马玉奇, 刘学来, 李永安等, 2006; 闫振华等, 2008), 热工性能的评价等方面 (狄文静等, 2008; 黄翔等, 2008)。研究结果显示我国毛细管网的热工性能较高, 与新风系统相结合后, 完全可以满足冬夏季空调要求。学者们认为, 毛细管空调系统将逐渐成为未来空调发展的方向。

≡ 第 2 章 ≡

毛细管空调系统

2.1 毛细管空调系统的发展简史

如果总结现代建筑史，那么 1987 年的柏林国际建筑展（Internationale Bauausstellung Berlin，简称 IBA）将会是最值得回味的标志性事件之一。为举办这次柏林建筑展，原西柏林市政当局从 1978 年开始就举行了多次国际建筑设计竞赛。正是在 IBA 主持的一项节能建筑设计展上，一种全新的空气调节系统出现在世人的眼前，这就是毛细管平面辐射空调系统。其发明者德国人多纳蒂·赫博斯特（Donald Herbst）将其命名为“Kapillarrohr System”（见图 2.1）。

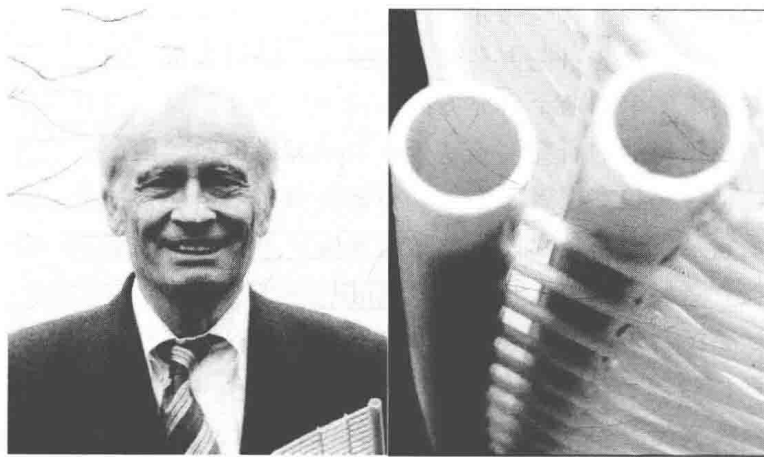


图 2.1 毛细管发明者及毛细管微观效果图

“Kapillarrohr”一词为德语，其含义就是指“毛细管”。但事实上，这种壁厚约 0.9mm，直径约 3.5~5.0mm 的无规共聚聚丙烯管在工作状态下并不依赖严格意义上的“毛细作用”，这与在冰箱制冷循环中起节流作

用的毛细管是完全不同的概念。同时,这种辐射供冷/供暖用的毛细管与医学意义上的毛细管,在外形尺寸上也远不在同一数量级上。因此,“Kapillarrohr”所谓的“毛细管”仅在工程尺度上有意义。但这并不能抹杀“Kapillarrohr System”的仿生学意义。于是,在后期的商业宣传中,具有“毛细管”含义的“Kapillarrohr”这个词被换成了一个英文专有名词“Katube”。这个词本身并不存在,而是“Kapillarrohr”和“Tube”的合成体。此后,由于多纳蒂·赫博斯特的公司(Herbst AG)为毛细管系统所注册品牌名称为“KARO”,因此在实际商业推广中也使用“Karo Mat”一词。

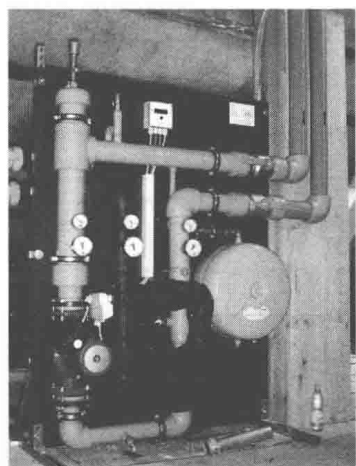
此后不久,毛细管系统在柏林科技大学接受了严格的热物性测试,并于1986年首次在实际工程中得到了应用,工程地点就设在Herbst AG公司总部。在该项目中,11840ft²的毛细管系统以吊顶敷设的方式被用来供冷。此后的20多年里,该系统被陆续应用于欧洲众多高端商业建筑、政府大楼、别墅和医疗建筑中。部分标志性工程见表2.1。在上述项目中,承担除湿任务的往往是在欧洲应用较广的置换通风系统。

表 2.1 欧洲毛细管空调系统典型工程

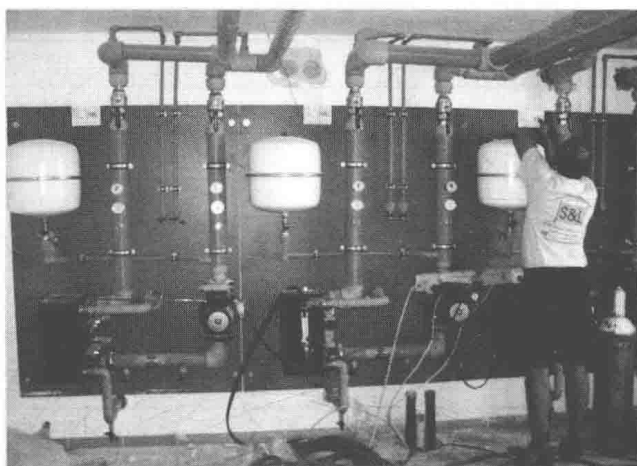
国家	城市	项 目	时间	备注
德国	柏林	Herbst AG 办公大楼	1986 年	
瑞士	Geneva	SAFRA 银行	1990 年	
比利时	Lausanne	Proven Center	1991 年	
荷兰	海牙	Kontoor Noordeinde 纪念馆	1997 年	
奥地利	Vienna	Uniklinik Innsbruck 手术中心	1997 年	
奥地利	Vienna	Raiffeisen 银行	1992 年	
法国	巴黎	法国电视台	1997 年	
挪威	阿姆斯特丹	Delta 皇家银行	1998 年	
奥地利	Vienna	国家科学研究院	1999 年	
意大利	Bagno di Romagna	Euroterme Hotel	2000 年	
西班牙	Navarra	Residences Fustinana	2001 年	
意大利	坎比亚诺	School Materna St. Teresa del Bambin Gesu	2002 年	
德国	柏林	柏林动物园	2002 年	
葡萄牙	Lissabon	Alvaro Siza	2003 年	
德国	柏林	加拿大驻德大使馆	2004 年	
意大利	Bologna	Cassro 音乐厅	2004 年	
捷克	Pribran	机场	2005 年	

2008 年 1 月 1 日, 商标 “Karo” 正式被 “Bake” (中文译名为: 贝卡) 取代, 相应的企业名称改为 “BEKA · Heiz-und Kuehlmatten”, 即 “BEKA Germany”。目前, 我国国内企业代理销售的进口毛细管产品大部分来自该品牌。此后不久, 贝卡在北美建立了兄弟企业——“BEKA USA”。后者很快实现了全套系统的本土化生产, 并与在北美使用较广的独立新风系统组合使用, 分别承担室内的显热负荷与潜热负荷。

另外值得注意的是, 德国还有两家从事毛细管制造和工程设计的公司, 分别是 CLINA Heiz und Klement GmbH (被译为科利拿换热元有限公司) 和 S&L Kühldecken und Heizungssysteme GmbH & Co. KG (简称 S&L 公司)。其中, 原 Clina 公司执行董事 Dr. Axel Jahn 博士 (现作为昆山开思妥德方董事长), 也被认为是德国毛细管产品的最早发明者之一。图 2.2 分别为 S&L 公司为欧盟驻 Georgian 大使馆安装的毛细管系统的中央输送站和柏林 Maschari 中心安装的毛细管系统的分配站。S&L 的工作人员正在对毛细管系统进行打压实验。



(a) 中央输送站



(b) 分配站

图 2.2 S&L 公司在欧洲的毛细管工程的水系统

毛细管系统传入我国是在 21 世纪初。虽然学术界对其优点与缺点均提出了不同的见解, 但对其前景普遍看好。目前, 我国使用的毛细管系统的来源有 3 类。

① 通过我国代理企业进口原装的德国或美国的全套毛细管系统 (个别阀组在中国或别国采购)。比如, 德国贝卡 (即前文中的 BEKA Germany) 的大中华区总代理为际高制冷空调设备有限公司, 后者是际高集团 (际高建

业有限公司)的子公司。

② 某些国内企业购买了德国的毛细管的生产线和相关技术,从而为国内市场提供与国外毛细管技术参数近似的产品。比如,图博节能科技(上海)有限公司作为外商独资企业,从德国引进全自动毛细管生产流水线,并因此成为当时世界上第三家可以大规模批量生产无规共聚聚丙烯(PP-R)毛细管网栅的厂商。另外,上海开思拓节能技术有限公司(下设:昆山开思拓空调技术有限公司;苏州开思拓空调有限公司;北京开思拓维节能技术研究所及各地办事处等)也从德国引进了包括毛细管型换热末端设备在内的相关技术。其中的昆山开思拓公司(KUNSHAN KLIMASYSTEMTECHNIK CO., LTD.)与德国科利拿换热元有限公司(CLINA Heiz-undK lelement GmbH)合作,为我国建筑提供毛细管方面的技术服务以及相关新型毛细管产品。

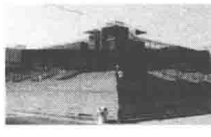
③ 我国企业自主研发的毛细管系统。比如,北京普来福环境技术有限公司自主研发的毛细管产品已经在国内市场中占有相当比例的份额。

表 2.2 列出了比较有代表性的使用毛细管空调系统的典型工程。

表 2.2 毛细管空调系统典型工程

城市	项目	时间	概貌
北京	万树 Moma 别墅	2009 年	
北京	王府家庭农场词海园 10 号	2009 年	
上海	建科院生态示范别墅	2008 年	
杭州	北秀湾	2010 年	

续表

城市	项目	时间	概貌
南京	锋尚国际公寓	2007 年	
长春	净月高尔夫会馆	2008 年	
山东	威海国际海景城	2009 年	
山东	青岛香溪庭院	2010 年	
北京	奥运村运动员公寓	2007 年	
北京	中国建研院节能示范楼	2009 年	
辽宁	沈阳建筑大学文化中心改造工程	2010 年	
北京	清华大学节能示范楼	2006 年	