

室内空气净化技术的研究与进展^{*}

华南理工大学 王元元[☆] 张立志

摘要 介绍了净化室内不同空气污染物采取的相应净化技术,针对室内 VOC,常用吸附法、光催化法、纳米材料净化法;针对室内空气颗粒物,主要采用机械过滤、静电除尘技术、低温等离子体技术、纳米光催化技术等,而微生物的净化主要是利用纳米 TiO₂ 光催化技术。还介绍了生物净化技术、膜分离技术等室内空气净化技术的最新进展。

关键词 室内空气 净化 挥发性有机化合物

Progress in indoor air cleaning technology

By Wang Yuanyuan[★] and Zhang Lizhi

Abstract Presents different cleaning techniques for various indoor air pollutants. For VOCs purification, adopts the adsorption, photocatalytic reaction and nanometre material technology. For indoor airborne particles cleaning, adopts the mechanical filtering, electrostatic dust removing, low-temperature plasma technique and nanometre photocatalytic technique. Nanometre TiO₂ photocatalyst technique is used for indoor airborne microbe cleaning. Presents the progress of biology and membrane separation air cleaning technology.

Keywords indoor air, cleaning, volatile organic compound

★ South China University of Technology, Guangzhou, China

①

继煤烟型、光化学烟雾型污染之后,现代人正经历以室内空气污染为标志的第三污染时期^[1]。在一天的生活中,人们停留在室内的时间超过了 80%,每天呼吸的绝大部分是室内空气,所以室内空气质量比大气质量更关乎人们的生命健康。最新研究结果表明,现代居室内的空气污染对人体健康的长期影响更甚于户外的城市烟雾。

1 室内污染物的种类和危害

按照结构不同,室内污染物可分为:1) 挥发性有机化合物(volatile organic compound)。挥发性有机化合物是沸点低于 260℃、室温下饱和蒸气压超过 13 332 Pa 的易挥发性化合物^[2]。挥发性有机化合物除醛类外,常见的还有苯、甲苯、二甲苯、三氯乙烯、三氯甲烷等,还包括源于建筑材料及室内装修装饰材料等的甲醛、苯、甲苯、氯仿,厨房中的油烟和香烟中的烟雾等有机蒸气。2) 可吸入固体颗粒物及有害无机小分子。室内空气中可吸入固体颗粒物主要是悬浮的粉尘微粒,包括灰尘、烟尘,人与动物毛发、皮屑等。有

害无机小分子包括燃烧产生的 CO、氮氧化物、SO₂ 等。3) 悬浮微生物。包括细菌、病毒、霉菌等。微生物能通过特异性机制、传染过程和直接毒害途径等引起疾病,对人们的生活、工作产生巨大的影响。

2 不同污染物的净化技术

现有的治理室内空气污染的各种技术,只是对室内空气中的某些特定污染物有着很好的去除效能,采取单一技术很难对室内空气中的各种污染物进行处理并取得令人满意的效果。下面介绍净化室内不同空气污染物分别采取的净化技术。

2.1 挥发性有机化合物的净化

虽然室内 VOC 数量不算多,但是对人体的危害却很大。目前净化挥发性有机物的方法有吸附法、光催化净化

①[☆] 王元元,女,1983 年 5 月生,在读硕士研究生

510640 华南理工大学化工所教育部传热与节能重点研究实验室

(020) 87114268

E-mail: babywy_1983@163.com

收稿日期: 2005-12-19

修回日期: 2006-10-31

法,还有新兴的纳米材料净化技术、微波催化氧化技术、膜基吸收净化技术、生物过滤技术等,其中尤以吸附法、光催化法、纳米光催化法最为常用。

吸附法是利用有吸附能力的多孔物质来吸附有害成分;光催化技术是利用在紫外线照射下生成的空穴具有的氧化分解能力,在室温下将空气中有机污染物氧化为 CO_2 和 H_2O 等无机物;纳米 TiO_2 的降解机理是在光照条件下将有机物转化为 CO_2 , H_2O 和有机酸。

2.2 可吸入固体颗粒及有害气体的净化

针对室内空气颗粒物,主要采用机械过滤、静电除尘技术、低温等离子体技术、纳米光催化等技术处理^[3]。

低温等离子体技术去除无机污染物的原理是:由于等离子体体系中含有大量具有较高能量的活性基团,它们能够破坏大多数气态有机物中的化学键,使之断裂,从而达到降解的目的;同时低温等离子体体系中的活性基团极易氧化具有还原性的无机物包括还原性较强的硫化氢等。体系中能量高的活性离子则打开键能较小的物质使其生成一些单原子、分子,最终转化为无害物^[4]。纳米光催化剂 TiO_2 在紫外线作用下可以将多种无机物分解或氧化^[5]。

2.3 微生物的净化

净化微生物主要应用臭氧氧化和纳米光催化技术。

臭氧具有很强的氧化性,与很多有机物、细菌病毒等微生物发生氧化还原反应,破坏细菌、病毒内部的细胞器和核糖核酸,使细菌的物质代谢生长和繁殖过程遭到破坏,从而达到净化空气的目的。臭氧灭菌消毒可以彻底、永久地消灭物体内部所有微生物^[6]。

3 几种净化技术的最新发展

3.1 吸附技术

吸附技术由于脱除效率高,富集功能强,适用于几乎所有的恶臭有害气体的处理,因而是脱除有害气体比较常用的方法。常用的吸附剂有:颗粒活性炭、活性炭纤维、沸石、分子筛、多孔黏土矿石、活性氧化铝及硅胶等,其中又以颗粒活性炭、含高锰酸钾的活性氧化铝及复合活性炭纤维最常用^[7]。

近些年已研制出各种新型的活性炭,如蜂窝状活性炭、球状活性炭、活性炭纤维(ACF)和新型活性炭等^[8]。目前的研究主要集中在活性炭的吸附应用和吸附性能的改进上。其中,ACF 由于吸附容量大、吸附速度快等优越的性能,备受人们关注。日本最先将 ACF 用于有机废气处理技术,此后这项研究得到了人们的重视。C. H. Ao 和 S. C. Lee 对 ACF 与光催化结合净化室内空气中的 VOC 进行了研究,取得了满意效果^[9]。P. Navarri 等人对二甲苯和乙酸乙酯利用炭纤维材料进行吸附处理,着重研究了不同炭纤维、纤维层数、不同气体以及气体浓度间的关系,取得了较好的效果。

我国在活性炭吸附方面的研究也有了很大的进展。汪

明光等人采用热风工艺用 ACF 吸附处理甲苯废气,取得了满意的效果;荣海琴等人用聚丙烯腈 ACF 经浸渍改性处理后提高了对甲醛的吸附容量^[10];季涛等人采用静电植绒技术将 ACF 固着在某种基材上^[11];汤鸿等人用亚铁盐和铜盐配方处理 ACF,研究其对氨类小分子量有害气体的吸附^[12];蔡健等人在适当条件下用 H_2O_2 对 ACF 改性从而研究对甲醛的吸附的影响^[13];尹华强等人研究了 ACF 在烟气脱硫中的催化作用^[14];黄正宏等人研究了湿氧化改性 ACF 对低浓度苯和丁酮蒸气的吸附^[15]。研究结果表明,经过处理的 ACF 对小分子量低浓度的有毒气体的吸附能力有了很大的提高。

ACF 具有良好的吸附性能、容易再生再利用、生成的炭粉尘少等优点。虽然 ACF 不能从根本上除去污染物,且易造成二次污染,但由于其优点显著,应用日益广泛,也是当今世界最先进的室内 VOC 处理技术之一。

3.2 纳米材料光催化技术

纳米材料是指晶粒尺寸为纳米级(10^{-9} m)的超细材料^[16]。而新型的高功能精细无机产品纳米 TiO_2 其粒径介于 1~100 nm,它的比表面积大,尺寸小,具有很高的催化活性^[17]。

由于该技术在紫外光照射下,在室温条件下就能将许多有机污染物氧化成无毒无害的 CO_2 和 H_2O ,并且这个过程不需要其他化学辅助剂,反应条件温和,二次污染小、运行成本低和可望利用太阳光为反应光源,再加上纳米 TiO_2 制备成本低、化学稳定性和抗磨损性能良好,是目前最具发展前景的室内空气净化技术。纳米 ZnO 也是一种有潜力的空气净化光催化剂。井立强等人在 ZnO 光催化剂上对 SO_2 氧化进行了研究,结果表明,320 °C 下焙烧的 ZnO 纳米粒子对大气中 SO_2 的净化效率高达 99%^[18]。

欧美一些发达国家对这个方向作了深入的研究,如美国的 Obee 研究小组用纳米 TiO_2 清除室内甲醛等污染物取得了成果。国内于 20 世纪 90 年代起开展这方面的研究,如杨瑞、张寅平、肖劲松等人分别用静态试验、纳米 TiO_2 涂料光催化降解甲醛的试验来研究用纳米光催化剂去除有害气体的效果。沈杭燕等人研究证明了锐钛矿型 TiO_2 对分子量较小的有机物的转化率高达 100%^[19]。古政荣等人研制了用于室内空气净化的活性炭-纳米 TiO_2 复合光催化净化网,它对甲苯的净化率达 98.8%,对甲醛的净化率达 98.5%,对氨的净化率达 96.5%,对活性炭还可以原位再生^[20]。周宇松等人在负载型纳米 TiO_2 光催化剂分解 H_2S 、甲基醇与乙硫醇模拟试验的基础上,研制出可以快速分解 H_2S 气体的纳米光催化空气净化样机^[21]。同时国内一些学者还将光催化技术和吸附技术结合起来,如杨瑞等人对 TiO_2 /丝光沸石光催化降解甲苯、甲醛的特性进行了研究,为此类混合光催化材料的应用提供了科学指导^[22-23]。

3.3 低温等离子体-光催化技术

近年来,低温等离子体应用于污染控制成为一个新兴的交叉学科,该技术可应用于脱硫脱硝、消除挥发性有机化合物、净化汽车尾气、治理有毒有害化合物等方面,但是它不能彻底降解污染物,易引起二次污染。目前一些学者把低温等离子体技术和光催化技术结合起来,使低温等离子体技术得到了优化。

国内外学者对低温等离子体-光催化技术降解 VOC 进行了初步探索。Misook Kang 等人用等离子体 TiO_2 光催化体系降解甲苯,试验结果表明,在等离子体光催化体系下,相同条件下甲苯转化率、脱除率都有提高,比单一的低温等离子体和光催化技术强^[24]。Byung Yong Lee 等人的研究表明,在等离子体光催化体系中,苯的降解率比单一等离子体反应过程提高 10%,苯的降解过程进行得更加彻底^[25]。研究人员对降解危害大且比较难处理的氮氧化物 NO_x 也进行了研究,如 Akinori Katamoto 用溶胶凝胶法将 TiO_2 涂覆在等离子体反应器内壁,考察了去除 NO_x 的效果^[26];Hyun Ha Kim 等人将光催化剂 TiO_2 球形颗粒充入线管式反应器中用来去除 NO_x ^[27]。结果表明,当等离子体反应器中加入光催化剂后, NO_x 的去除率增加,且能耗降低。

在其他方面低温等离子体光催化技术也显示了其优越的一面。Soo Yeon Shin 等人研发了一种脉冲电晕联合 TiO_2 光催化室内空气净化系统,它在去除室内空气中的过敏原(如细菌、真菌等)方面作用极强^[28]。Akira Mizuno 等人利用等离子体光催化体系去除室内空气的悬浮微粒,效果显著^[29]。

3.4 生物净化技术

由于生物技术具有投资少、操作管理简单、运行费用低、安全可靠等优点,近些年来人们运用其除臭、处理氮氧化物废气与挥发性有机物废气,并取得了一定的成果,用生物技术来净化和处理废气已成为一个热点研究课题。

生物法处理有机废气在德国、荷兰、美国和日本等国应用广泛,其中生物滤池和生物滴滤塔技术已经十分成熟。目前,国外已广泛利用生物过滤技术来处理低浓度、高流量的挥发性有机污染物和臭味气体,尤其是对苯、甲苯、乙苯、二甲苯以及苯乙烯等的处理。例如 Bayer A G 等公司,它们能提供处理酿酒厂、食品加工厂、化工厂等产生的有机废气的设备,且 VOC 的去除率在 50%~99% 之间。我国从 20 世纪 90 年代起,对生物技术处理挥发性有机物进行了研究。中科院生态环境研究中心运用生物过滤法对几种气态苯系物进行了研究;清华大学、天津大学等运用生物法处理 VOC 和恶臭气体;殷峻等人进行了泥炭生物滤塔处理低浓度 H_2S 恶臭气体的实验,取得了 90% 以上的净化率^[30]。

3.5 膜分离技术

近些年来,膜技术作为气体分离的新技术,以其简单、

快速、高效和经济节能等优点成为人们研究的热点。20 世纪 80 年代后,膜分离技术在海水淡化、食品工业、生物化工及化学化工等领域的液相分离和 VOC 的回收中得到了广泛的应用,还用于分离与回收石油化工生产中排放的乙烷蒸气、甲苯、二氯甲烷、氯乙烯等^[31]。膜分离法是利用各组分在压力推动下透过膜的传质速率不同进行分离的。

用于气体分离的膜主要分有机膜和无机膜。有机膜分离技术在其他方法难以回收的有机物的分离方面有了很大的进展,如采用该方法分离 CFC-12 和环氧乙烷以及制冷设备排出的 CFC 等。该方法对有机气体中的丙酮、甲苯和甲醇等的回收率可达到 97%。无机膜广泛应用在制取富氧、浓氮、炼气、石油化工及合成氨的回收和酸性气体脱除方面。现已有关于无机陶瓷膜净化空气的报道,通过液相热液合成的 MFI 型沸石膜已用于除去室内空气中低浓度污染物正己烷、甲醛和苯等^[32]。黄肖容等人用浓度梯度氧化铝净化空气的研究,对无机膜在室内空气净化方面的应用进行了研究,试验结果表明,该无机膜去除空气中大于 $0.2 \mu\text{m}$ 颗粒物的效率达 100%,对细菌的总截留率也达 99.99%^[33]。

无机膜分离技术虽然以其化学性质稳定、不被微生物降解、较大的机械强度、容易控制孔径尺寸等优点在室内空气净化方面有着巨大的潜力,但是它的气体分离系数很低,对室内空气中低浓度的 VOC 去除效果不理想。而有机膜虽然分离系数较高,但是它存在气体分离通透量低、耐热和耐腐蚀性差等缺点。所以如何将这两种膜的优点结合起来将是一个研究热点。

3.6 绿色植物自然吸附法

由于绿色植物对扩散进入室内的污染物具有吸附吸收和净化作用,促进了室内污染物的外转移、扩散,加快了室内环境中污染物浓度的降低^[34]。近年来,国内外学者根据绿色植物对有机气体有选择性吸附的特性,对室内主要有有机污染气体的植物吸附开展了广泛研究。他们筛选了一大批对室内挥发性有机物吸收能力很强的绿色植物^[35-37],如吊兰,一盆吊兰能有效吸收 $8\sim 10 \text{ m}^2$ 的房间内空气中的甲醛、一氧化碳等有毒化学物质,它可在 24 h 内杀死房间里 80% 的有害物质,吸收掉 86% 的甲醛,能将火炉、电器、塑料制品散发的一氧化碳、过氧化氮吸收掉。虎尾兰(包括一叶兰等叶片硕大的观叶植物)堪称居室的“治污能手”。一盆虎尾兰可吸收 10 m^2 左右房间内 80% 以上多种有害气体。其他的如芦荟,可消除 1 m^3 空气中所含甲醛的 90%,常青藤可吸收 90% 的苯,龙舌兰可吞食 70% 的苯、50% 的甲醛。这些研究结果充分表明,若在室内按每 10 m^2 摆放一盆抗污染植物,就足以保证室内空气质量令人满意。不过绿色植物吸收挥发性有机物的机理以及吸收后会转化为何种物质,是否会带来新的污染,有待于进一步研究。

3.7 膜基净化技术和生物过滤技术

膜基吸收净化技术是使需要接触的两相分别在中空纤维微孔膜的两侧流动,由于两相在膜孔内或膜表面接触,这样就可避免乳化现象的发生。生物过滤技术是让废气中的有机物作为炭源和能源,使其在滤料介质中微生物适宜的环境条件下,维持其生命活动,并将有机物氧化分解为 CO_2 , H_2O 和细胞基质。

用膜基净化技术、生物过滤技术处理有机废气中的 VOC 近年才发展起来,具有流程简单、设备简单、VOC 回收率高、运行费用低、较少形成二次污染等优点。这两种技术正逐渐引起人们的重视,将是去除 VOC 技术研究的热门问题。

4 结论

由于空气的复杂性,传统和新兴的各种净化技术都存在各自的局限性。吸附技术、低温等离子体技术等没有从根本上消灭有害物质,有的还带来二次污染;纳米光催化技术在常温常压的条件下能彻底消除有害气体,但是它不能解决室内空气中的悬浮物及危害很大的细微颗粒物问题,因此现在的研究方向应该是将各种技术结合起来,扬长避短,提高净化效率。为此,学者们开始把光催化技术和吸附技术、光催化和等离子体技术分别结合起来进行研究,结果发现, TiO_2 与活性炭结合不仅大大增强了对室内低浓度 VOC 的净化效率,而且还使得活性炭在使用过程中实现原位再生; TiO_2 与低温等离子体结合不仅使低温等离子体的技术得到了优化而且还降低了二次污染。如果将光催化技术和无机膜分离技术相结合,将 TiO_2 负载到无机膜上,不仅可避免光催化因催化剂表面微孔的堵塞引起的失活问题,使光催化技术能更好地发挥其优越的除 VOC 等有害气体和异味的性能,同时,又弥补了无机膜不能很好地除去有害气体的缺陷,该净化技术还具有节能环保等特点。

参考文献

- [1] 孟宪谦,薛友祥,吕华,等. TiO_2 光触媒负载多孔陶瓷室内空气净化元件的研究[J]. 现代陶瓷, 2004(2): 16-18
- [2] 吴忠标,赵伟荣. 室内空气污染及净化技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2005
- [3] 胡燕燕. 用静电空气净化器改善室内空气品质的探讨[J]. 制冷, 2003, 22(2): 80-83
- [4] 张华山,裴著革. 室内空气污染因素对人体的危害及净化技术措施[J]. 洁净与空调技术, 2005(1): 23-25, 30
- [5] 刘太起. 纳米空气净化技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004
- [6] 储金宗,吴春笃,陈万金,等. 臭氧技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2002
- [7] 赵毅,李守信. 有害气体控制工程[M]. 北京:化学工业出版社, 2001
- [8] 龚圣,黄肖容,隋贤栋. 室内空气净化技术[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(4): 55-57, 69
- [9] Ao C H, Lee S C. Combination effect of activated carbon with TiO_2 for the photodegradation of binary pollutants at

- typical indoor air level [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2004, 161(2/3): 131-140
- [10] 贾云,刘火安. 室内空气污染与治理研究现状[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版, 2005, 7(2): 58-62
 - [11] 季涛,高强,王春梅,等. 活性炭纤维静电植绒制品及其空气净化性能研究[J]. 东华大学学报:自然科学版, 2003, 29(5): 108-111
 - [12] 汤鸿,庞亚芳,李启东. 改性活性炭对氨和三甲胺的吸附特性研究[J]. 环境化学, 2000, 19(5): 431-435
 - [13] 蔡健,胡将军,张雁. 改性活性炭纤维对甲醛吸附性能的研究[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(3): 16-17, 19
 - [14] 尹华强,邹长武,吴军良,等. 活性炭纤维在烟气脱硫过程中的催化作用[J]. 环境工程, 2003, 21(2): 32-34
 - [15] 黄正宏,康飞宇,吴慧,等. 湿氧化改性多孔炭对低浓度苯和丁酮蒸气的吸附[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2000, 40(10): 111-115
 - [16] 王宝庆,马广大,陈剑宁. 挥发性有机废气净化技术研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(5): 47-51
 - [17] 赵年伟,王伟. 纳米材料和技术在玻璃行业的应用[J]. 玻璃, 2002(2): 36, 8
 - [18] 井立强,孙晓君,徐自力,等. ZnO 超微粒子光催化氧化 SO_2 的研究[J]. 催化学报, 2002, 23(1): 37-40
 - [19] 沈杭燕,唐新硕. TiO_2 粉末催化剂光催化降解室内空气中有机污染物[J]. 杭州大学学报:自然科学版, 1998, 25(4): 55-58
 - [20] 古政荣,陈爱平,戴智铭,等. 活性炭-纳米二氧化钛复合光催化空气净化网的研制[J]. 华东理工大学学报, 2000, 26(4): 367-371
 - [21] 周宇松,聂通元,曹国洲,等. 纳米光催化净化分解炼化厂恶臭有毒气体研究[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 66-67
 - [22] 杨瑞,莫金汉,张寅平. TiO_2 /丝光沸石光催化降解甲醛特性研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 474-476
 - [23] 杨瑞,张寅平,赵荣义. TiO_2 /丝光沸石光催化降解甲苯特性研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(8): 981-986
 - [24] Kang M, Kim B J, Cho S M, et al. Decomposition of toluene using an atmospheric pressure plasma/ TiO_2 catalytic system [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2002, 180: 125-132
 - [25] Lee B Y, Park S H, Lee S C, et al. Decomposition of benzene by using a discharge plasma-photocatalyst hybrid system[J]. Catalysis Today, 2004, 93-95: 769-776
 - [26] Katamoto A, Doi K, Kogoshi S. Efficient NO_x removal using silent discharges and TiO_2 photocatalyst simultaneously [C]//The 30th International Conference on Plasma Science, Jeju, Korea, 2003
 - [27] Kim H H, Tsunoda K, Katsura S, et al. A novel plasma reactor for NO_x control using photocatalyst and hydrogen peroxide injection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(6): 1306-1310

加改造,改为热电冷联产系统,将大大提高一次能源的利用率。

6 结论

6.1 通过等效发电 ■ 效率的分析可以看出,与全国供电煤耗水平相比较,目前常用的热电冷联产方式除直燃机(严格地说不是是一种热电冷联产机组,本文将其视作对外输出电量为零的热电冷联产机组)外,在使用双效溴化锂吸收式机组的情况下,燃气轮机+余热锅炉为热源的热电冷联产、燃煤热电厂为热源的热电冷联产(抽汽压力为 0.6 MPa 时),在电动压缩式机组 COP 达到 5.1 时均具有节能优势,节能比例与热电冷联产的具体情况和电动压缩式机组的性能有关,随电动压缩式制冷机组 COP 提高,节能的比例呈下降趋势,这充分说明节能也要因时而异,与时俱进,选取合理的能源利用方式。

6.2 对燃煤热电冷联产,增大蒸汽的初参数,系统的节能优势有增大的趋势,在相同的初参数下降低抽汽压力节能优势也有增大的趋势,但抽汽压力的最小值应能保证双效溴化锂机组能够正常工作,因为使用单效吸收式制冷机组系统的性能会有较大的下降,同全国的平均供电煤耗相比不具有节能优势。

6.3 从式(9)可以发现,在相同的蒸汽初参数条件下,降低抽汽压力 e_2 有减小的趋势,表 2 则显示双效溴化锂吸收式制冷机组等效发电 ■ 效率随供汽压力的下降而升高,因此存在一个最佳抽汽压力的优化问题,应针对不同热电冷联产情况优化设计和运行方案,使系统的经济性最佳。

6.4 对燃煤热电冷联产若与现有的热电厂主力机组供电煤耗高达 500 g/(kWh)的情况相比,均具

有节能优势,因此应以现有的热电厂和热力管网为基础,大力发展热电冷联产,为我国的能源可持续发展战略作出积极的贡献。

参考文献

- [1] 付林,江亿.几种溴化锂制冷机组应用型式的能耗分析[J].制冷学报,1998,19(1):47-53
- [2] 贾明生,凌长明.热电冷联产系统的几种主要评价模型分析[J].制冷与空调,2004,4(4):34-39
- [3] 李培生,顾昌.用做功能力法分析热电冷联产的热经济性[J].煤气与热力,2000,20(6):420-423
- [4] 王亚茹,陆亚俊.热电冷联产系统的能耗分析[J].哈尔滨建筑大学学报,2000,33(5):90-94
- [5] 严德隆,张维君.空调制冷及热电冷联产系统的能耗分析[J].暖通空调,1998,28(6):18-22
- [6] 王长庆,龙惟定,丁文婷.各种冷源的一次能耗及对环境影响的比较[J].节能技术,2000,18(4):8-10
- [7] 汤妙琴,余敏.热电冷三联供系统能耗与经济性分析[J].上海理工大学学报,2003,25(3):247-251
- [8] 董树屏,李天铎.热能转换及利用[M].北京:机械工业出版社,1985
- [9] 王加璇. ■ 方法及其应用[M].北京:中国电力出版社,1996
- [10] 国家电网公司计划投融资部,统计处.2003 年国家电网公司生产经营情况[J].中国电力,2004,37(2):7-10
- [11] 群鹰公司.燃气轮机热电联产[EB/OL].<http://www.china5e.com/gasturbine/qianzhi.php>
- [12] 宋之平,王加璇.节能原理[M].北京:水利电力出版社,1985
- [13] 宋之平.从可持续发展的战略高度重新审视热电联产[J].中国电机工程学报,1998,18(4):225-230
- [14] (上接第 27 页)
- [28] Shin S Y, Hong Y K, Lee S H, et al. Study on performance of photocatalyst plasma for air clean[C]// Proceeding of the 2003 4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, Beijing, 2003
- [29] Mizuno A, Kisanuki Y, Noguchi M, et al. Indoor air cleaning using a pulsed discharge plasma [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(6): 1284-1288
- [30] 殷峻,方士,陈英旭.泥炭生物滤塔处理低浓度 H₂S 气体的试验研究[J].环境科学学报,2003,23(1):39-42
- [31] 吴碧君,刘晓勤.挥发性有机物污染控制技术研究进展[J].电力环境保护,2005,21(4):39-42
- [32] Aguado S, Polo A C, Bernal M P, et al. Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2004, 240:159-166
- [33] 黄肖容,隋贤栋,刘悦晖.用梯度氧化铝膜净化空气[J].环境工程,2001,19(3):32-36
- [34] 江思力,冯文如,钟巍,等.居室中主要挥发性有机物污染状况及其防治对策[J].中国热带医学,2005,5(2):210-212
- [35] 伊文.哪些绿色植物可以吸收有害气体[J].广东园林,2003,10(增刊):72-76
- [36] 苏金波.专家为植物去污能力“排座次”[J].家庭科技,2006(1):22
- [37] 张寅平,张立志,刘晓华,等.建筑环境传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,2006