



科技
综述

吹吸式通风技术应用研究现状^{*}

西安建筑科技大学 郑文亨[☆] 王 怡 唐易达

摘要 简述了吹吸式通风系统的特点,介绍了国内外吹吸式通风技术的研究进展,指出了吹吸式通风技术研究应用中存在的问题,并对今后的研究工作提出了一些建议。

关键词 吹吸式通风 研究现状 问题

Status of researches and applications of push-pull ventilation technology

By Zheng Wenheng[★], Wang Yi and Tang Yida

Abstract Briefly states the characteristics of push-pull ventilation systems. Presents the research development at home and abroad. Points out the problems existed in researches and applications. Puts forward some suggestions for future researches.

Keywords push-pull ventilation, research status, problem

★ Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China

①

0 引言

经过几十年的建设,无论是从工业建筑的规模、数量还是从建设速度来看,我国的工业建筑在世界上已居前列。根据统计数据,2003年度竣工的工业厂房面积约为2000年度的2.7倍^[1]。近年来,随着工业建筑的迅猛发展,在每年完成的建筑工程投资总额中,工业建筑投资额占了一半以上^[2]。然而,在工业生产过程中,许多有害物质会伴随加工生产过程而产生。根据国家统计局调查数据,2006年我国大中型工业企业的废气排放总量达266 045万t^[3],相应带来的环境污染问题也日益严重,在经济高速发展的同时付出了高额代价。

工业生产过程中产生污染物的特点表现为污染物种类繁多,很多污染物的毒性都比较强,污染物的排放量或瞬间排放量极大^[4]。工业建筑室内空气环境恶劣的问题在我国既有和新建工业建筑中都显得非常突出。对工业建筑而言,建筑空间一般比较高,因而对污染物的排放点和工人操作区重点进行局部通风,一直被认为是防毒、排尘最为有效的通风方法。局部排风装置的应用已经有很久的历史。对于局部排风罩,一般都是用吸入气流来捕捉并控制污染气流,因此抽吸和排出污染空气

的任务都是由吸入气流来承担,它只能在有各种限制的安装条件下才能实现。同时,在排风罩口前方吸入气流的流速(控制风速)是急剧下降的,在离排风罩口不远处气流就失去了控制能力。如果单纯地依靠吸入气流去抽吸并控制全部污染空气,则需要的排风量会随着排风罩口至污染源之间距离的增大而显著增加,同时排风罩的尺寸也要相应地增大,这是非常不经济的,使用起来也比较困难。在吹吸式通风中,吹出气流的特点和吸入气流刚好相反,在吹出口前方气流的流速衰减得比较慢,吹出气流的捕捉、控制能力,特别是输送能力非常强。如果把吹出气流和吸入气流组合在一起并使之协同工作,就可以弥补上述局部排风罩的不足,这就是吹吸式通风,即在吸入口对面布置吹风口从而构成吹吸气流,用它去诱导并控制污染气流。

本文综合分析国内外吹吸式通风的研究现状,指出该研究领域存在的问题,以求推动国内在吹吸式通风领域的研究,并使之广泛应用到工业建筑中。

①[☆] 郑文亨,男,1976年7月生,在读博士研究生,讲师
710055 西安建筑科技大学环境与市政工程学院
(0731) 58680204 (O) 13032942803
E-mail: zwh76@126.com

收稿日期:2010-09-20

修回日期:2011-03-04

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50978214),高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(编号:20096120110008)

1 吹吸式通风系统特点

吹吸式通风装置主要由吹风罩和吸气罩组合而成,如图 1 所示。在吹吸式通风过程中,吹风罩的送风射流对于污染物而言既是控制者同时也是输送者,吸风气流则为接受者。由于吸风气流的控制能力弱,而送风射流的作用范围大并且控制能力强,因此,相对于其他形式的局部排风罩,吹吸式通风装置有较多的优点,例如风量小且节能效果显著,对污染物的控制效果好,抵抗外界干扰气流的能力比较强,控制区域更灵活。然而由于吹吸式通风技术优势的实现要求送风射流、吸风气流设计恰当并能够良好配合,因而使得吹吸式通风相对于其他局部通风方式来说,相关设备的系统形式和工艺参数的优化设计也更加复杂。多年的实践证明,吹吸式通风有效率非常高的情况,也有相互干扰、达不到预想效果的失败案例^[5-6]。虽然吹吸式通风具有工作稳定可靠、不影响工艺操作和排风量小等优点,但是由于吹、吸气流的流动特性非常复杂,目前尚缺乏精确的计算方法^[7]。

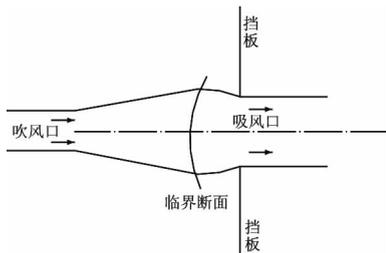


图 1 吹吸式通风示意图

2 国外研究现状

国外对于吹吸式通风的研究大致经历了三个阶段。

第一个阶段从 20 世纪初至 60 年代,是吹吸式通风研究的开拓时期。这一阶段的研究工作主要是实验研究。各国专家学者根据各自的实验条件,对吹吸式通风装置和局部排风罩在相同实验条件下对比分析污染物的控制效果,结果表明吹吸式通风装置在相同条件下可比局部排风罩节约 50% 的风量。其代表性成果有:1945 年, Malin 第一个提出吹吸式通风装置可节约 50% 风量(与侧边排风罩相比)^[8]。1947 年, Battista 在实验基础上也发现了同样的结果,并给出了送风气流速度和吸气速度的一些经验值^[9]。Ege 和 Silverman 在 1950 年测试了不同敞口槽几何尺寸条件下的流场,通过实

验也得出了吹吸式通风装置与局部排风罩相比可节省 50% 风量的相同结论,并给出了喷口尺寸和送风气流速度与敞口槽之间的关系,但是敞口槽的长度不能大于送风口宽度的 40 倍^[10]。1957 年, Hama 在实验台比 Malin 和 Battista 的实验台大很多的情况下进行实验,也得出了吹吸式通风装置与局部排风罩相比大约可以节省 50% 风量的结论,并给出了送风气流速度和吸气速度的一些经验值^[11]。

第二个阶段是 20 世纪 70 年代至 80 年代。在这个时期,专家学者开始对吹吸式通风的流动特性进行理论分析。其代表成果有:日本的林太郎对吹吸式排风罩的设计计算提出极限流量比的计算方法,并通过大量的实验研究开发了平行流吹吸式通风装置(平行流是指流动沿单一方向呈平行流线的气流),在日本的印刷、造纸等行业的工业建筑室内污染物控制中得以应用。由于平行流在一定的流线平行度范围内可在流动过程中控制污染物不沿垂直于流动方向传播,从而在个案中显示出优良的污染物控制特性,并且可以在高大工业建筑中对局部温湿度进行控制,相比于全室温湿度控制大大降低了运行能耗。但由于基础理论仍未得到充分的揭示,使其推广应用受到限制,应用效果也有待进一步评价^[6]。美国职业安全卫生研究所(NIOSH)于 20 世纪 80 年代出版了一系列有关吹吸式通风的论文,给出了不同情况下送、排风的推荐最小风速。Hughes 和 Huebener 分别在 1982 年和 1985 年通过理论分析和实验,给出了不同敞口槽条件下送风气流速度和吸气速度的最小值^[12-13]。Klein 在 1985 年和 1987 年介绍了 NIOSH 的进一步研究成果。NIOSH 把 Hughes 和 Huebener 的研究成果应用到实际工业中,并对一些特殊场合的送风气流流速和吸气流速作了调整,同时研究结果也表明 Hughes 和 Huebener 的实验结果在一些特殊场合,甚至在流场中有障碍时也是有效的^[14-15]。

第三个阶段是 20 世纪 90 年代至今。在这个阶段,随着计算流体力学(CFD)的发展,专家学者借助 CFD 软件对吹吸式通风进行模拟分析,并利用先进的测试仪器进行对应的实验。通过模拟分析与实验研究,对吹吸式通风的流动特性作进一步的研究。其代表成果有:Heinsohn 在 1991 年利用数值模拟方法模拟了二维吹吸式通风的流场,并

给出了射流和吸气的气流速度推荐值^[16]。1995年, Flynn等人利用三维有限元方法对湍流吹吸式通风系统进行模拟, 分析了干扰气流对敞口槽吹吸式通风流场分布的影响^[17]。同年, Woods和McKarns利用可视化和示踪气体技术对金属表面处理中的敞口槽吹吸式通风的污染物捕集效果进行了测试分析, 发现吹吸式通风对污染物的控制效率高达93%^[18]。1996年, Robinson和Ingham通过对敞口槽吹吸式通风的理论分析和模拟分析发现, 在离射流喷口较远的射流下游处, 喷口高度是决定射流出口流动状况的最重要影响因素^[19]。Rota等人于2001年利用CFD软件对敞口槽吹吸式通风效率的影响因素进行了模拟分析, 提出了相应的吹吸式通风的设计方法^[20]。同年, Watson等人也对利用吹吸式通风控制焊接烟气进行了研究, 发现吹吸式通风的控制效率一般都高达90%以上, 而在同样条件下, 局部排风罩的控制效率只有38%~58%^[21]。2002年, Marzal等人通过模拟和实验的方法研究了送风设备的几何特性对吹吸式通风控制污染物效率的影响^[22]。Ojima则通过研究设计了一种防止回流气流中的污染物对工人产生危害的吹吸式通风系统^[23]。同年, Robinson等人通过研究发现射流初动量是影响敞口槽吹吸式通风的最重要因素, 射流初动量应该与槽的长度成正比^[24]。2003年, Marzal等人利用先进的可视化和测试技术研究了敞口槽吹吸式通风的流动规律和对污染物的控制效果^[25]。Huang等人通过分析敞口槽吹吸式通风的气流流动特性, 并利用先进的可视化技术及以SF₆为示踪气体进行测试, 得出了吹吸式通风的效率甚至高达98%以上的结论, 并给出了相应的设计原则^[26]。2007年, Chern Ming-Jyh等人利用CFD软件模拟分析了敞口槽吹吸式通风的湍流分布^[27]。2008年, Gonzalez等人研究了排风罩的几何特性对敞口槽吹吸式通风捕集效率的影响^[28]。

3 国内研究现状

我国对吹吸式通风的研究起步较晚。从上个世纪60年代开始, 我国学者相继翻译了巴杜林的《工业通风原理》^[29]和林太郎的《工厂通风》^[6]两本专著, 同时, 嵇敬文编著了《工厂有害物质通风控制的原理和方法》^[30]。这几本专著介绍了工业通风的原理。对吹吸式通风的研究主要集中在20世纪

80年代和90年代。在这个时期, 我国的专家学者主要对敞口槽的吹吸式通风流动特性进行了理论分析, 对吹吸式通风的实验和数值模拟分析研究进行得较少。主要代表成果有: 孙一坚从理论上分析了在侧压作用下槽边吹吸式通风的气流特性, 并利用气流合成原理对气流流动特性作了进一步研究^[31-32]。于航和魏润柏从动量原理出发建立了微积分方程模型, 分析了吹吸气流的速度场^[33]。李亚宁和于广荣从动量比出发分析了横向气流作用下槽边吹吸式通风气流的选择性^[34]。于广荣以工业槽为例, 对射流末端速度法、临界断面法、流量比法、海米昂方法和孙一坚方法等几种计算方法的特点和应用条件进行了对比分析^[35]。许邦令提到了吹吸气流中临界断面的一种计算方法^[36]。孙一坚和杨勇健利用数值分析方法对吹吸式排风罩二维湍流数值解及其流动特性进行了分析, 并提出了吹吸式通风设计中应注意的一些问题^[37]。茅清希等人利用船舱检修焊接时用的吹吸式通风模型进行试验, 并结合试验结果对吹吸气流轴心速度分布、临界断面位置、吹吸风量比等进行了研究^[38]。张建忠提出了一种新流量比设计计算方法^[39]。贺素艳等人采用计算流体动力学理论建立了吹吸式排风罩流场的数学模型, 通过数值求解得出了流场内各点的流函数, 从而绘制出等速度线图, 实现对这种吹吸式排风罩作用范围的预测^[40]。直至今日相关的设计资料中也仅限于敞口槽吹吸式通风的基本设计方法, 适用条件单一, 限制了吹吸式通风技术的推广应用^[41]。另一方面, 我国目前平行流技术主要用于洁净度要求较高的洁净室环境, 其设备形式和设计方法并不适用于工业建筑污染物控制, 相应地, 平行流吹吸式通风的应用尚属空白。总体来讲, 在我国20世纪70年代之前, 工业通风在通风领域中占主导地位, 20世纪80年代到90年代, 民用建筑快速发展, 民用建筑室内空气品质问题引起关注, 民用建筑通风逐渐成为研究的热点, 相应地, 工业通风逐渐受到冷落^[1, 42]。目前工业建筑室内环境恶劣的现状不可避免地暴露了通风技术发展滞后、对通风环保设备管理不善等方面的问题。

4 讨论和建议

虽然已有不少关于吹吸式通风的研究, 但多集中在敞口槽吹吸式通风上, 尚需对更加广泛的应用条件下的吹吸式通风技术进行研究。平行流吹吸

式通风技术在国外以往的基础研究和应用个案中表现出了优良的污染物控制特性。相对于敞口槽吹吸式通风技术,平行流吹吸式通风可以在高大空间多种形式工艺条件下进行局部环境的控制,布置方式灵活。但由于近年来针对平行流吹吸式通风的研究甚少,缺少理论及技术的突破^[40],受早期实验条件和模拟技术缺乏的限制,平行流吹吸式通风在理论研究和实际应用上都有待于进一步发展。

对于吹吸式通风技术而言,现有研究都是以经验公式为基础,对吹吸气流的机理和规律性的认识显得非常缺乏。同时,由于实际气流流线是很难绝对平行的^[43],从而污染物总会有一定的扩散范围,平行流吹吸式通风的流线平行度等特性直接影响污染物的扩散范围。对于平行流吹吸式通风,其气流的规律特性依然不清楚。目前,已有的吹吸式通风的研究成果仍难以回答或解决平行流吹吸式通风在实际工程中应用时所存在的疑虑或出现的问题,无法满足实际工程发展的需要。因此,平行流吹吸式通风的气流特性应引起研究人员的高度重视。

5 结语

从吹吸式通风的研究现状及存在的问题可以看出,平行流吹吸式通风是控制工业厂房污染物扩散的有效手段。因此,突破早期实验条件及计算机模拟技术的限制,通过深入分析流体流动及污染物控制的规律性,分析研究平行流吹吸式通风技术创新和技术应用过程中的关键问题,具有重要的研究意义和广阔的实际应用价值,有助于提高我国工业建筑室内污染物控制水平,改善作业工人的生产环境。

参考文献:

- [1] 李先庭,蔡浩.我国通风领域面临的挑战[J].暖通空调,2008,38(2):31-36
- [2] 刘德华.工业建筑的发展趋势[J].新建筑,2004(3):19-21
- [3] 国家统计局.2007年中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2007
- [4] 王汉青.通风工程[M].北京:机械工业出版社,2007
- [5] 孙一坚.工业通风[M].北京:中国建筑工业出版社,1994
- [6] 林太郎.工厂通风[M].张本华,孙一坚,译.北京:中国建筑工业出版社,1986
- [7] 孙一坚.简明通风设计手册[M].北京:中国建筑工业

出版社,2005

- [8] Malin B S. Practical pointers on industrial exhaust systems[J]. Heat & Vent,1945,42:75-82
- [9] Battista W P. Semi-lateral tank ventilation hood controls contamination, cuts costs[J]. Heat Piping Air Condition,1947,19:85-89
- [10] Ege J F, Silverman L. Design of push-pull exhaust systems[J]. Heat & Vent,1950, 10:73-78
- [11] Hama G M. Supply and exhaust ventilation for metal picking operations[J]. Air Condition Heat & Vent, 1957, 54:61-63
- [12] Hughes R T, Huebener D J. Development of push-pull ventilation criteria [R]. Division of Physical Sciences and Engineering, National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, Ohio, USA,1982
- [13] Huebener D J, Hughes R T. Development of push-pull ventilation[J]. Am Ind Hyg Ass,1985,46:262-267
- [14] Klein M K. A demonstration of NIOSH push-pull ventilation criteria[R]. Division of Physical Sciences and Engineering, National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, Ohio, USA,1985
- [15] Klein M K. A demonstration of NIOSH push-pull ventilation criteria[J]. Am Ind Hyg Ass,1987, 48: 238-246
- [16] Heinsohn R J. Industrial ventilation: Engineering principles[R]. New York, USA:Wiley,1991
- [17] Flynn M R, Ahn K, Miller C T. Three-dimensional finite-element simulation of a turbulent push-pull ventilation system[J]. Ann Occup Hyg, 1995, 39 (5):573-589
- [18] Woods J N, McKarns J S. Evaluation of capture efficiencies of large push-pull ventilation systems with both visual and tracer techniques [J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1995, 56 (12):1208-1215
- [19] Robinson M, Ingham D B. Recommendations for the design of push-pull ventilation systems for open surface tanks[J]. Ann Occup Hyg, 1996, 40(6): 693-704
- [20] Rota R, Nano G, Canossa L. Design guidelines for push-pull ventilation systems through computational fluid dynamics modeling[J]. AIHA Journal, 2001,62 (2):141-148

- [21] Watson S I, Cain J R, Cowie H, et al. Development of a push-pull ventilation system to control solder fume[J]. *Ann Occup Hyg*, 2001,45(8): 669-676
- [22] Marzal F, Gonzalez E, Minana A, et al. Influence of push element geometry on the capture efficiency of push-pull ventilation systems in surface treatment tanks[J]. *Ann Occup Hyg*, 2002,46(4): 383-393
- [23] Ojima J. Worker exposure due to reverse flow in push-pull ventilation and development of a reverse flow preventing system[J]. *Journal of Occupational Health*, 2002,44:391-397
- [24] Robinson M, Ingham D B. Design and operating parameters for push-pull ventilation of open surface tanks[J]. *Int J Energy Res*, 2003,27:757-770
- [25] Marzal F, Gonzalez E, Minana A, et al. Visualization of airflows in push-pull ventilation systems applied to surface treatment tanks [J]. *AIHA Journal*, 2003,64(4):455-460
- [26] Huang R F, Lin S Y, Jan S Y, et al. Aerodynamic characteristics and design guidelines of push-pull ventilation systems[J]. *Ann Occup Hyg*, 2005, 49(1): 1-15
- [27] Chern Ming-Jyh, Cheng Wei-Ying. Numerical investigation of turbulent diffusion in push-pull and exhaust fume cupboards[J]. *Ann Occup Hyg*, 2007, 51(6): 517-531
- [28] Gonzalez E, Marzal F, Minana A, et al. Influence of exhaust hood geometry on the capture efficiency of lateral exhaust and push-pull ventilation systems in surface treatment tanks[J]. *Environmental Progress*, 2008,27(3):405-411
- [29] 巴杜林. 工业通风原理[M]. 刘永年,译. 北京:中国建筑工业出版社,1965
- [30] 嵇敬文. 工厂有害物质通风控制的原理和方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1965
- [31] 孙一坚. 侧压作用下的吹吸气流特性[J]. *建筑热能通风空调*, 1982,1(2):1-4
- [32] 孙一坚. 侧压作用下吹吸气流特性(续)——吹吸气流的流线合成[J]. *建筑热能通风空调*, 1984,3(4):1-6
- [33] 于航,魏润柏. 吹吸气流速度场的理论分析[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 1991,19(1):77-83
- [34] 李亚宁,于广荣. 横向气流作用下吹吸气流特性的研究[J]. *建筑热能通风空调*, 1989,8(2):1-5
- [35] 于广荣. 几种吹吸式通风罩算法的分析与比较[J]. *建筑热能通风空调*, 1984,3(1):1-6
- [36] 许邦令. 论临界断面吹吸气流中的位置[J]. *建筑热能通风空调*, 1987,6(1):10-11
- [37] 孙一坚,杨勇健. 吹吸式排风罩的二维紊流数值解及特性分析[J]. *暖通空调*, 1991,21(1):11-15
- [38] 茅清希,史建国,孙莉华. 吹吸气流的实验研究[J]. *建筑热能通风空调*, 1995,14(3):11-14
- [39] 张建忠. 吹吸式通风新流量比计算方法[J]. *建筑热能通风空调*, 1995,14(2):23-25
- [40] 贺素艳,王英敏,李云飞. 一种吹吸式排风罩的流场测试及数值模拟[J]. *上海交通大学学报*, 2002,36(10): 1492-1495
- [41] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2008
- [42] 黄文胜,罗清海,汤广发,等. 建筑通风的历史与未来[J]. *建筑热能通风空调*, 2006,25(2):28-33
- [43] 郑文亨,刘加平,王怡. 工厂有害物质吹吸通风控制的原理分析[J]. *流体机械*, 2008,36(8): 28-31

(上接第 31 页)

要因素,因此控制系统装机容量是提高系统两类能源效率的关键要素,而对于管网的损耗则不需要过分担心,有部分损失率超过 5%的项目均是由于采用蓄能系统造成了部分机房内散热损失,虽然这会在一定程度上影响系统的能源效率,但并不会降低系统的经济性。

参考文献:

- [1] 曹鳴鳳. 東京都心部における熱源ネットワークの構築に関する基礎研究[D]. 東京:早稲田大学, 2008: 23-45
- [2] 渡邊健一郎. 業務用施設における空調熱源システム
- のエネルギー利用効率に関する調査研究[D]. 東京:早稲田大学, 2007:23-45
- [3] 日本地域冷暖房協会技術委員会. 地域冷暖房技術手引書[M]. 2版. 東京:日本地域冷暖房協会, 2002: 3-5
- [4] 日本熱供給事業協会. 熱供給事業便覧[M]. 東京:日本熱供給事業協会, 2005:27-28
- [5] 日本熱供給事業協会. 熱供給事業便覧[M]. 東京:日本熱供給事業協会, 2002:34-35
- [6] Shuzo Murakami, Mark Dlevine. Energy consumption, efficiency, conservation, and greenhouse gas, mitigation in Japan's building sector [R]. Lawrence Berkeley Laboratory, 2006:56