

封闭和半封闭通风空间的环境流体问题*

王涛[†] 尹兆华 胡文瑞

中国科学院力学研究所, 国家微重力实验室, 北京 100080

摘要 半封闭与全封闭空间的环境流体力学包括系统内的空气流动、温度和湿度分布以及污染物的凝积等问题, 其中涉及控制空间的空气质量、通风设计以及预防水汽凝结等多个方面的研究. 本文着重介绍国内外近年来相关的工作, 研究如何从理论分析、实验研究以及数值模拟等方面入手, 解决通风问题, 以达到获得高通风效率、低能耗和提高空气舒适度的目的. 研究的对象包括房间, 建筑物, 城市等半封闭空间, 以及汽车、地铁、飞机、潜艇、载人航天飞行器等不同程度的全封闭空间. 现有的理论研究已经从解释单点源纯浮力对流的基础模型发展到能够描述具有体积流量和动量流量的扩散流的湍流喷泉模型. 然而, 理论研究上的进步还不足以使它处理实际问题中多样的通风情况和复杂的空间结构, 工程应用中还需更多依靠实验研究和数值模拟的结论. 对载人航天飞行器中的环境流体问题的研究虽然刚刚起步, 但其研究手段和经验可以从相对成熟的半封闭与全封闭空间的相关研究中获得借鉴.

关键词 自然通风, 置换通风, 强制通风, 水汽凝结

1 引言

人类无时无刻不在呼吸空气, 环境空气质量与人们的生活息息相关. 当人们停留在建筑物, 或者汽车、火车等半封闭系统内时, 便会自然地注意到空间的空气质量和通风情况; 而考虑到需要长时间处于潜水艇、飞机、甚至航天飞行器等全封闭系统内的人类活动时, 封闭系统空气质量就成为关系到人们行动甚至生命安全的重要因素. 尤其对于全封闭的载人航天器而言, 气体的流速还与材料的着火密切相关, 在设计防火系统时必须考虑舱内气体的流动情况.

我国近年来大力发展载人航天工程, 科研人员对作为航天员生命维持系统中重要一环的舱内通风系统进行反复的设计、论证和试用. 以神舟六号为例, 神舟飞船的太空舱内环境控制系统主要包括: 用于清除空气中各种灰尘杂质和有害气体的通风净化系统, 用于维持空间温度在 $17^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度控制系统, 以及通过吸附孔隔膜过滤空气中的水汽, 用于维持空间相对湿度在 $30\% \sim 70\%$ 范围内的湿度控制系统^[1]. 现有的环境控制系统虽然可以保证在飞行任务的数天时间内太空舱环境基本满足航天员的生理要求, 但远远不能达到舒适的标准. 如果需

要延长飞行时间 (比如完成一次载人飞行到火星的任务大约需要 3 年左右时间), 或需改善航天员的生活环境 (比如降低对航天员的身体素质要求, 使更多人可以飞上太空), 就必须改进现有系统, 提高舱内环境质量, 应当在通风回路中加入空气回收、水回收、热量转移等循环装置, 用完备的环境控制系统为航天员创造比较舒适的生活、工作环境.

鉴于空间实验机会有限且花费昂贵, 现有的研究普遍基于地面条件解决环境通风问题, 所得到的数据与结论在一定程度上可以为微重力条件下的研究提供参考. 现阶段研究工作的重点大致集中在以下几个方面: 室内空气质量与舒适度, 建筑物通风效率, 车内空气质量与通风, 城市空气环境, 隧道与地铁站内通风现象等.

随着现代人室内活动时间的增长, 室内空气质量 (indoor air quality, IAQ) 与室内空气舒适度 (包括热舒适度与湿度舒适度等) 成为通风问题中人们较关心的一个方面. 因此, 对室内空气环境的研究也开展的较为深入和全面. Linden 等人的工作关注于自然通风条件下的室内通风, 从流体动力学角度解释自然通风现象^[2], 并广泛利用了实验和数值模拟的手段研究此类问题^[3~5].

收稿日期: 2006-11-24, 修回日期: 2007-11-21

* 国家自然科学基金 (10502054, 10432060) 以及中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助项目

[†] E-mail: wangtao@imech.ac.cn

近年来, 车内空气质量与通风问题的研究也逐步引起人们的注意. 研究人员从实验出发, 关注影响车内空气质量的温度、湿度、车龄、空气交换率、通风模式和环境本底浓度等参数^[6], 将空气取样分析实验得到的数据与国际上广泛采用的日本自动车协会 (JAMA)^[7] 以及德国汽车公司的测量标准^[8] 相比较, 监控车内主要可能污染物的含量.

在关注室内、车内的空气环境质量时, 都涉及到了半封闭系统与外界大环境的通风问题, 所以城市空气环境也是通风研究的要点. Settles 列举了有关污染物随空气流动传播的几个例子^[9], 包括城市内建筑对污染物传播与沉降的影响^[10,11], 病菌、飞沫在空气中停留与消散^[12~14], 以及爆炸产生的冲击波造成的超音速膨胀气体对污染物的携带效应等. Turner 也将湍流的输运理论运用到大尺度的地球物理问题的研究上, 并在适当的假设下成功地解释了一些有关大气运动的自然现象^[15]. 最近几年来 Li^[16,17] 和 Xie^[18,19] 更是将关注点放到了城市高楼间的街道污染物排放问题的研究上.

隧道和地铁站的通风问题涉及到自然通风和强制通风的共同作用. 设计隧道时应当考虑到机械通风设施的必要性: 虽然在通常情况下, 由于车辆穿行形成的“活塞效应”^[20] 可以基本满足通道内的通风需要, 但为了防备如火灾、污染物突然增多等特殊情况, 通风设备也必不可少. 此外, 如果隧道长度过大, 或穿行其中的车辆的行驶速度达不到通风所需的要求时, 通风设备也应适当运转做以辅助. 合理搭配使用“活塞效应”和强制通风设施, 便可以在保证安全的情况下节约大量能源^[20~22].

对半封闭和全封闭系统通风问题的研究, 可以使人们更好地了解和控制身边的生活环境. 对通风问题的研究常归结为对系统内部空气质量的关注, 而控制空气质量的主要因素就是空气流动对系统中的热和污染物的输运. 所以通风本质上就是系统内外的空气流动. 早期的通风研究更多关注风力驱动下气流在风洞中流过建筑物的过程, 讨论不同风向对建筑物通风效率的影响, 而对建筑内部的空气流动以及流动的力学特性关注不足. 随着通风问题涉及的范围从单纯的建筑物发展到各类交通工具以及太空飞船, 甚至考虑到将来在太空中的长期生活需要, 对通风问题尤其是半封闭和全封闭系统内的环境流体的研究就显得尤为重要了. 相比全封闭系统而言, 半封闭通风系统在系统内部的通风之外, 还会受到外界大气通风的影响, 因此半封闭系统通风问题的应用范围更广, 其研究开展也较为深入; 而其研究手段和结

论又可以作为全封闭系统研究的借鉴与参考, 所以本文将对这类研究做重点的阐述, 从理论研究 (第 2 节)、实验手段以及计算机数值模拟方法 (第 3 节) 等方面具体介绍国内外通风问题的研究现状.

2 通风问题的理论研究

根据驱动原理不同, 通风问题基本上可以分为自然通风和强制通风两大类. 自然通风是由浮力驱动或自然风引起的空间内空气流通现象; 强制通风是由机械装置如风扇、空调、通风管道等形成的空气流通现象.

2.1 自然通风

基于地球表面室内自然通风问题的理论研究由来已久, 早在 1956 年, Morton, Taylor 和 Turner 基于前人实验观测到的现象提出了羽流理论 (plume theory)^[23], 给出了存在持续源或瞬时源情况下浮力驱动对流的基本理论, 以及线性密度分布的稳态分层流体的精确解, 为后来对自然通风的理论研究奠定了基础.

Linden, Lane-Serff 和 Smeed 基于羽流理论, 发展了一套用于研究单一空间自然通风问题的理论: LLSS 理论^[24]. Linden 等着重研究通风空间内外以及多个通风空间之间, 由温差产生的浮力驱动的自然通风流动, 将浮力对流驱动的自然通风问题分为两类情况: 混合通风 (mixing ventilation), 如图 1(a) 和置换通风 (displacement ventilation), 如图 1(b). 单通风口的混合通风中 (图 1(a)), 空间内的热空气与外部的冷空气在通风口处交换, 进入空间的冷空气会在空间内以湍羽流 (turbulent plume) 形式下降, 形成与空间内原有空气充分混和的趋势. 而在双通风口的置换通风中 (图 1(b)), 热空气从上部风口流出空间, 冷空气从下部风口流入, 空间内部会形成一个稳定的界面: 中性层 (the neutral level). 考虑周围环境空气密度 ρ_{amb} 为常数, 空间内空气密度为 $\rho_s(z)$, 在无空气流动的情况下, 压强满足 $dp/dz = -g\rho$. 如果空间内外空气存在温度差, 以空间内气温较高为例, 即 $\rho_s(z) < \rho_{amb}$, 这样空间内压力梯度就小于周围环境的压力梯度, 因此存在一个界面 $z = z_1$, 满足内部压强 $p_s(z_1)$ 与环境压强 $p_{amb}(z_1)$ 相等, 此界面称为中性层. 内部空间中性层以上部分的高压强驱动了上出口的排风流, 而中性层以下部分的低压强驱动了下出口的进风流. 所以, 在相同温差以及相同通风面积的情况下, 置换通风效率高于混合通风. 这也是不同流动形式对通风效率的影响的最简单例证.

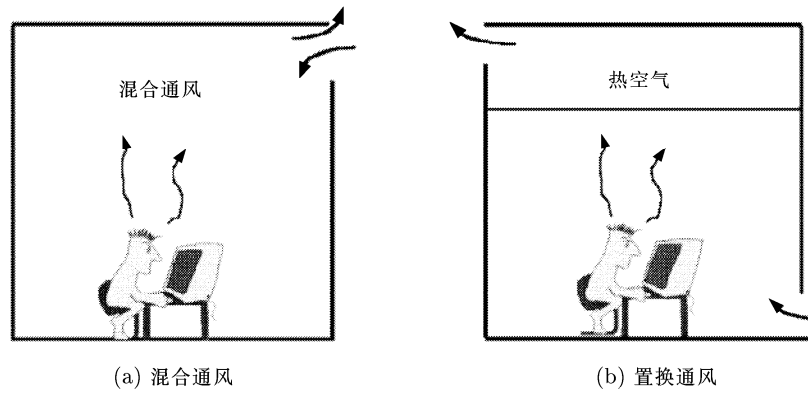


图 1 浮力对流驱动的自然通风 [2]

为了避免对全尺寸模型低 Re 数空气流动的研究上的不便, 实验中选用了比例模型, 采用水作为流体介质, 并用水的盐度差异模拟空气的温度差异作为驱动流体流动的动力. 这个盐度差形成的驱动力称为替代重力 g' (reduced gravity)

$$g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho} = g \frac{\Delta T}{T}$$

从而使得空气介质下的 Reynolds 数和 Peclet 数

$$Re = \frac{UH}{\nu}, Pe = \frac{UH}{\kappa}$$

其中 H 为垂直方向的尺度, 转化为水介质下的

$$Re = \frac{(g'H)^{1/2}H}{\nu}, Pe = \frac{(g'H)^{1/2}H}{\kappa}$$

这样在水介质的实验中就可以通过调整实验模型的 g' 和 H , 保证比例模型与全尺寸模型的 Re 数和 Pe 数一致.

在 LLSS 理论的基础上, 后续的通风研究进一步细化, 尤其对其中效率相对较高的置换通风重点关注, 分别分析了浮力流单点源、多点源, 以及规律分布的点源下置换通风流动的特性 [25~27]. 通过从通风气流量守恒以及质量守恒关系的数学推演, 以及比例模型的验证, 便可以得到置换通风与混合通风的通风效率. 以置换通风的单点热源情况为例 [23,24,28], 通风效率受到有效面积 (effective area) A^* 的影响

$$A^* = c_d a_t a_b / \left[\frac{1}{2} \left(\frac{c_d^2}{c} a_t^2 + a_b^2 \right) \right]^{1/2}$$

其中 a_t, a_b 分别代表上下开口面积, c_d, c 分别为上下两个开口处的压力损失系数. 利用中性层假设和 Bernoulli 关系, 可以得到空间内的体积流

$$Q = A^* [g'(H - h)]^{1/2}$$

式中 h 为中性层高度. 若初始时空间充满替代重力为 g'_0 的流体, 水平方向面积为 S , 则

$$\frac{h}{H} = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_e} \right)^2$$

t_e 为排空空间内流体所需的时间

$$t_e = \frac{2S}{A^*} \left(\frac{H}{g'_0} \right)^{1/2}$$

这大约只是同样通风强度下混和通风所需时间的 60%.

当空间内存在两个点源的情况下, A^*/H^2 (H 为空间高度) 成为影响通风效率的一个重要的无量纲参数 [24~27,29,30]. 而对于多点源, 或多个浮力流以及分布点源的研究是上述工作的拓展, 也可以运用类似的分析方法 [24,31]. 将此置换通风相关理论应用于建筑物室内通风设计上, 结果表明: 使用设计优良的地下送风系统 (underfloor air distribution, UFAD) 可以在提高热舒适度、通风效率和室内空气质量的同时, 降低能量的使用、延长建筑物使用寿命, 并可以在不影响室内空气质量的前提下, 降低使用此种通风系统建筑物的层间距 [32,33].

在对于单一空间的浮力驱动通风研究的基础上, 已有理论还被拓展到多空间通风的情况. Lin 应用 LLSS 理论研究了由主动通风空间与被动通风空间相连接形成的两空间通风问题 [34]. 主动通风空间在整个过程中经历两个阶段: 在最初的快速发展阶段, 通风情况受制于主动空间尺度和有效通风面积 A^* , 而在后来的稳定发展阶段则受制于被动通风空间的分层情况. 对比主动通风空间而言, 被动通风空间有相对稳定的分层现象, 但由于通过通风口的流体密度总是小于空间内的流体密度, 中性层位置时刻都在变化, 这也是多空间通风问题与单一空间通风问题的最大不同.

自然通风中有关自然风力驱动通风 (wind-driven ventilation) 的情况相比上述的浮力驱动通风 (stack-driven ventilation) 情况要简单一些. 影响风力驱动通风的因素主要为: 建筑物结构形状, 风向, 以及附近其他建筑物造成的影响等^[2]. 现有研究中将自然风力驱动通风与浮力驱动通风综合考虑, 解决风力-浮力混合驱动通风问题^[35~39]. 考虑到风力的上风向与下风向存在压降 $\Delta = \frac{1}{2}\rho U^2$, 若风向与浮力作用方向相同, 则通风被加强, 中性层位置向上移动, Froude 数

$$F_r = \sqrt{\frac{\Delta/\rho}{(B/H)^{2/3}}}$$

式中 B 为点源强度, 表征了空间内通风流动的驱动力. 当 $F_r \ll 1$ 时浮力控制空间通风, 当 $F_r \gg 1$ 时风力控制空间通风^[24,35,36,38,39]; 若风向与浮力作用方向相反, 则通风被减弱, 具体情况变得复杂, 可能出现瞬时或稳定的置换通风到混合通风的转换, 需要对不同的环境条件分别讨论^[37,40~42].

在 Linden 等人的理论与实验研究的基础上, 大量自然通风问题的相关研究正在开展: Woods 等人沿用 LLSS 的研究方式, 研究室室内空气流通与温度分布的具体问题^[43~45]; Howell 和 Potts 采用经 CFD 验证的实验方法在真实的建筑物中研究全尺寸模型中的通风情况^[46,47], 通过对温度分布的精确测量验证了 Linden 等的理论, 但在实验中却并没有清楚地观测到“中性层”的存在, 并且实验测量得到的温度场分布与理论预测也有所偏差. 所以, 还需要通过更加精确的研究进一步完善 LLSS 模型.

2.2 强制通风

强制通风又称机械通风, 是依靠风机产生的风压强制驱动的空气流动. 与自然通风相比, 强制通风作用能力强, 通风效果稳定, 还可以根据需要采用合适的风机数量和通风强度, 调节控制方便, 并可通过布置风机和通风口的位置组织室内气流, 便于在空气进入空间前进行加温或降温的处理. 所以当仅靠自然通风不能完全满足通风要求时, 通常均需设置机械通风系统. 全封闭系统的机械通风设备除了应满足维持日常通风的需要之外, 还需要具备一定的应对突发事件的能力. 比如当火灾发生时, 燃烧产生的有毒气体和烟雾往往最为致命, 应利用通风设备迅速将其排放到系统以外, 从而保障被困人员的生命安全.

强制通风是由机械装置产生的压差驱动空气流动的, 这使得系统中的空气流动多以湍流形式存在, 而且强制通风系统中往往不止有一个机械装置, 系统中的空气流动情况可以十分复杂. 对强制通风情况下空气流动的理论研究多从自然通风的理论发展而

来, 结合湍流理论解决问题, 目前并没有形成较系统的理论体系. Peng 等工作发展了一种低 Re 数 $k-\omega$ 模型模拟循环流动^[48,49], Baines 和 Turner 研究了空间存在点源或线源情况下湍流浮力对流的流动现象^[50], 给出了长时间轴对称问题的解. Hunt 等^[51~54]研究了由喷嘴形成的湍流羽流 (turbulent plume) 的湍流强度、输运能力等问题, 以及两个湍流羽流接合或碰撞的相关问题. Lin 等^[55]在上述研究的基础上发展了湍流喷泉模型 (turbulent fountain model): 探讨存在稳定的两层分层的通风空间中, 湍流喷泉效应对通风输运的影响. 模型基于典型的置换通风情况, 在其中加入一个流动方式为湍流喷泉的热源, 定义一个无量纲渗透排放率 (penetrative entrainment rate)

$$E = \frac{u_e}{\omega}$$

其中 u_e 为排风速度, ω 为湍流强度 (turbulence intensity). 则整个空间的通风流 Q_E 为

$$Q_E = E(R_i)Q_{\text{int}}$$

其中 Q_{int} 为通过分层界面的体积流动, R_i 为 Richardson 数

$$R_i = \frac{g'l}{\omega^2}$$

无量纲量 E 是 Richardson 数的函数, 经过此模型假设下的推演, 可以得到 E 的具体表达式满足

$$E \propto R_i^{-3/2}$$

同时, 实验也证实: 在 R_i 数小于 1.2 的实验中, 渗透排放率 E 维持在 0.65 ± 0.17 范围. 运用湍流喷泉模型可以建立空间通风体积流量、流速与湍流强度之间的关系, 渗透排放率 E 表征了分层界面附近湍流喷泉的排风效率. 这个值要大于自然通风情况下运用羽流理论得到的结果, 此差别主要源自两种不同流动情况下内部流体动力学结构的差异. Liu 等^[33]利用实验手段研究此湍流喷泉模型描述的湍流在稳定的两层流体分层空间中穿过“中性层”的输运行为, 所得温度分布和“中性层”高度等结果与湍流喷泉模型理论预测相符.

综上所述, 对通风空间环境流体的理论研究已经从描述单点源纯浮力流的羽流理论, 发展到描述具有体积流量和动量流量的扩散流的湍流喷泉理论, 并且拓展了一系列从单点源到多点源, 从单空间到多空间的不同通风情况. 然而, 理论研究上的进步还不足以使它处理实际问题中多样的通风情况和复杂的空间结构. 比如, 低对流情况下热源的热辐射与热扩散不可忽略; 理论模型中的纯浮力点源在实际中并不可能存在, 其初动量不可忽略; 多空间问题很大程

度上与空间结构以及空间接合方式相关等等. 虽然某些现有结论可以定性的甚至定量的描述一些通风问题, 但是在将研究转向更复杂的情况之前还需完善现有的理论模型. 目前, 更多细致有效的研究还需依赖于实验和数值模拟.

3 实验研究与 CFD 数值模拟方法

理论研究需要从最简化的情况开始, 逐步分析流动的物理本质, 而在实验与 CFD (computational fluid dynamics) 模拟中可以考虑更加复杂的几何结构、热源分布甚至加入表面热交换以及流体的瞬时行为等. 在通风问题的研究中, 实验方法与计算机数值模拟方法常被共同使用、互为验证, 成为论证通风理论的重要手段. 实验研究的具体方法多种多样, 既可以研究比例模型的相似运动, 也可以模拟全尺寸模型的实际情况^[47,56,57]. 实验观测空间内温度分布, 湿度分布, 以及通风气体流动参数等相关重要物理量, 现有技术中温度的测量常使用热电偶 (精度可达 $0.2^{\circ}\text{C} \sim 0.5^{\circ}\text{C}$); 对湿度的测量用湿度传感器 (精度可达 $2\% \sim 3\%$); 对流场的量度常用热线、热膜、热球风速仪, 激光多普勒风速仪 (laser Doppler velocimeter, LDV), 相位多普勒风速仪 (phase Doppler anemometry, PDA), 粒子成像速度场仪 (particle image velocimetry, PIV) 等. 近年来, 有关通风问题的实验研究国内外开展的十分广泛, 焦点集中在对被测空间内的流场、温度场、湿度分布、污染物分布等的测量上^[56~62].

运用 CFD 技术对通风系统内环境进行模拟仿真, 可以形象、直观、快捷地对空间通风系统做出分析和评价, 常被用作实验手段的补充^[3~5]. CFD 方法还常常被用来解决一些难以运用实验方法解决的问题. 实际的通风研究中, 由于室内空气流动大部分属于湍流, 仅在壁面附近为层流, 数值计算中湍流黏性占主导地位. 若室内空气流动雷诺数 Re 较大, 则通风房间通常模拟为一个非定常三维湍流问题, 一般采用标准的 $k-\varepsilon$ 两方程模型对其进行数学描述, 数值模拟室内空气环境气流的流动和传热现象, 以及污染物的扩散传质现象. 控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程、气体组分方程等, 它们可统一写成如下标准形式

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\varphi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi}\text{grad}\varphi) + S_{\varphi}$$

式中 φ 为微分方程的因变量, 它取 1 时代表连续方程, 取 $u_i, T, \kappa, \varepsilon, m$ 时, 分别对应于速度、温度、湍流动能、湍流动能和气体组分方程, Γ_{φ} 为扩散系数, S_{φ} 为广义源项. 求解上述模型时, 通常采用有限差分法进行离散, 再用某种离散算法, 比如 SIMPLE

方法等求解. 具体求解时, 还可借助于功能强大的商用 CFD 软件, 如 FLUENT、PHOENICS、CFX、STAR-CD、FIDAP 等, 以及 DOE-2、RNSYS、ESP-r、Climate Surface 等被广泛应用于建筑热环境模拟和分析的软件.

事实上, 由于 CFD 方法实用方便, 它的应用较之实验方法更为广泛^[3~5,22,63~68]. 运用 CFD 方法解决问题, 焦点在于对湍流算法的选取. 常用模型有直接数值模拟 (direct numerical simulation, DNS), 雷诺平均统计模式 (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS), 以及大涡数值模拟 (large eddy simulation, LES) 等. 其中, DNS 方法最为精细, 但由于其计算量过于庞大, 实际中较少使用. 出于实用的考虑, 当只需预测湍流的平均速度场、平均标量场和平均作用力时, 可以从雷诺平均方程出发解决问题, 即 RANS 方法. 介于 DNS 和 RANS 之间的 LES 方法用数值模拟计算大尺度脉动, 而将小尺度脉动对大尺度运动的作用做模型假设^[69]. 通常的应用中 RANS 方法给出的信息就足以满足工程要求了, 当需要获得动态信息时则可采用 LES 方法.

本节中将从半封闭通风系统, 全封闭通风系统, 以及与通风相关的湿度分布与水汽凝结 3 个方面分别综述介绍.

3.1 半封闭系统通风研究

半封闭系统的通风, 尤其是建筑物通风的问题引起人们较多的关注, 所以这一部分的实验研究也开展的较为广泛. 以 He 等的实验为例^[3], He 等使用全尺寸模型模拟某办公室内空气流动情况, 如图 2 所示. 1 为桌子, 2 为模拟人, 3 为灯, 4 为电脑, 5 为壁橱, 6 为置换送风口, 7 为槽形送风口, 8 为正方形送风口, 9 为格栅形送风口, 10 为置换通风在大天花板的出风口, 11 为混合通风在墙壁的出风口, 12 为窗户. 模拟热源相关的物品有 2 组, 分为 a 组, b 组, 以 1a, 2a, 4a, 5a 及 1b, 2b, 4b, 5b 为区别, 即 1a (桌子 a), 2a (模拟人 a), 4a (电脑 a), 5a (壁橱 a), 1b (桌子 b), 2b (模拟人 b), 4b (电脑 b), 5a (壁橱 b). 研究置换通风、混合通风对污染物的排放效率. 实验中采用了 4 种常见的通风模式: 置换、正方形、槽形和格栅形送风口 (displacement, square, slot and grille diffuser), 其中正方形, 槽形和格栅形送风口属于混合通风情况, 分别研究了在这 4 种不同通风模式下空气的流动情况. 实验中, He 等在模型内设置了 11 个测量点, 使用热球风速仪、热电偶、污染物分析仪采集流动空气的速度、温度、污染物含量的分布.

实验结果证实了, 与混合通风相比, 置换通风通风效率更高, 置换通风系统形成的单一循环气流可以推动新鲜空气稀释低层空间内的污染物浓度, 空间内

空气形成清晰稳定的上下分层现象,无量纲中性层高度 $\theta = z/H$ 根据通风强度不同在 0.1~0.4 范围内变化. 在混合通风的 3 种方式中, 格栅形送风口的通风效率相对最高, 但仍比置换通风效率低 20%~28%.

He 的工作中也采用了 CFD 方法与实验结果对比, 选用重整化群 (re-normalization group, RNG) 两方程 $k-\epsilon$ 模型作为计算模型, 出于降低计算量的考虑, 模拟中采用了简化的送风口模型作为边界条件, 即不考虑送风口的具体几何形状, 只给出喷嘴处的出射流量. 经验证, 数值模拟获得的流场, 温度场以及

污染物分布等结果与实验结果相符: 混合通风的气流流形造成了污染物在房间内的不一致分布, 格栅形送风的高通风效率得益于气流流形对此污染物源位置的适用性. 排气口位置设定虽不会影响到流形, 却可以影响到污染物排放效率. 所以可以通过恰当地设置进气、排气口位置提高室内通风效率. 这一实验也验证了中性层 (LLSS) 的存在, 与理论模型中对自然通风效率的定性论断相符. 数值结果还分析了空间气流流形与污染源高度对污染物排放效率的影响, 可作为室内通风设计的参考.

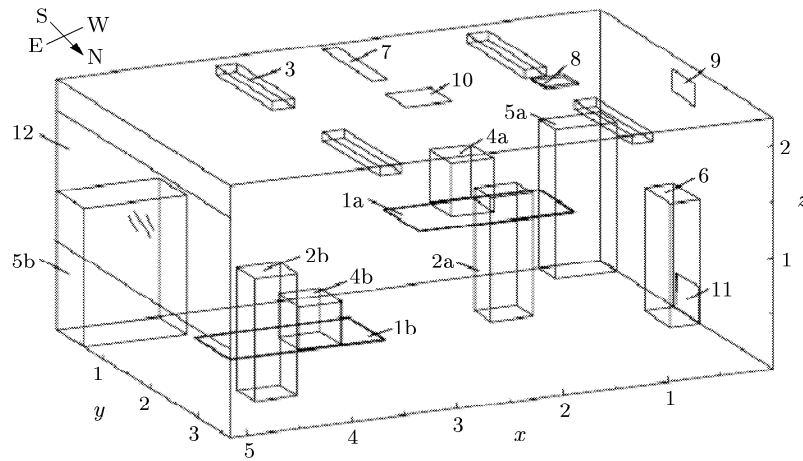


图 2 全尺寸半封闭系统实验模型图 [3]

3.2 全封闭系统通风研究

全封闭系统通常应用于载人舱体中, 比如轮船、火车、飞机、潜艇, 甚至载人航天器等. Bosbach 等 [4] 利用模型实验模拟了某民航客机舱内混合通风情况, 选取图 3(a) 中黑色框选区域进行全尺寸模型实验, 如图 3(b). 实验采用气态介质 PIV 方法测定模型内的流场, 用大尺度 PIV 方法观测全场, 精细 PIV 方法研究感兴趣的细节部位的气流情况. 通过实验测量, 得到了模型内部全场的流动情况, 特别是空

气喷嘴部位的高分辨率流动数据. 数值模拟采用雷诺平均 RANS 方法, 将多个湍流模型使用于不同类型的网格上, 以获得最佳的计算结果. 结果表明, 低 Re 数 $k-\epsilon$ 模型的结果与 PIV 实验数据最为相符, 流速差别不超过 0.1 m/s(除进风口区域以外). 相比高 Re 数 $k-\epsilon$ 模型和双层 (two layer) $k-\epsilon$ 模型, 低 Re 数 $k-\epsilon$ 模型与结构网格的搭配可以很好的描述机舱内部的空气流动情况. 在 CFD 方法中, 湍流模型的正确选取可以保证得到精确的计算结果和较短的计算时间.

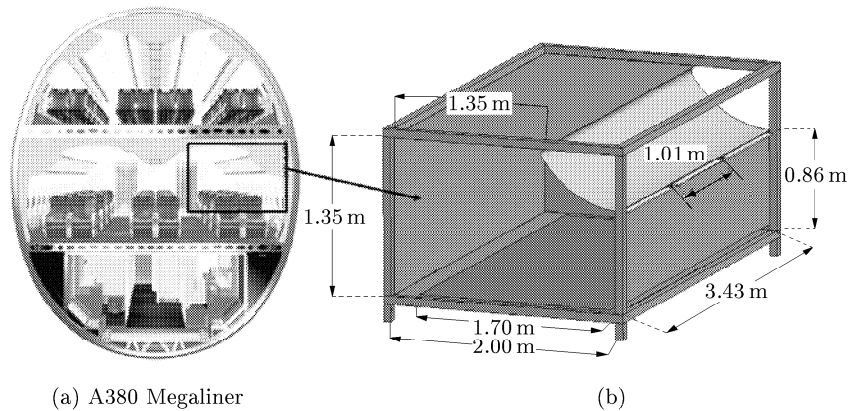


图 3 全封闭系统实验模型 [4]

3.3 湿度分布与水汽凝结

在单纯研究通风现象的基础上，研究人员又将湿度分布与水汽凝结与通风过程的相互作用引入到当前的通风研究中，研究空气流动对水汽的输运作用以及空间内凝结现象发生的可能性。Liu 等 [5,63] 实验测量了有内部水汽蒸发源的封闭通风空间内的温度与湿度分布。在图 4 所示的箱体内部设置一个可控水汽蒸发源，空间内的通风由出入风口风扇 1, 2 驱动，温度 - 湿度传感器安装于图 4 中心平面内的 14 个测量点上，可以得到强制通风驱动下的温湿度分布。实验研究了不同通风强度和蒸发速率对水汽分布的影响。数值模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算被测空间内 3D 瞬态气

流情况，同时得到空间温湿度分布情况。通过对比实验数据与计算结果，修正数值模型用于描述空间通风流动情况。根据修正后的非定常湿度场分布，便可以利用壁面处湿度值的变化计算壁面的累计凝结水量。Liu 的工作证实了通风空间内水汽凝结的可能，通过数值模拟计算出壁面水汽凝结，并讨论了改变通风强度与通风口设置等对降低水汽凝结的影响。但是，计算所得的凝结水量只是从空间内的过饱和水汽量推算而得，并未考虑水汽凝结过程与空间内空气流动的相互影响，而这个相互影响包括了水汽的相变，液态水滴的凝结、融合，热转移、热交换等复杂物理过程，解决起来还需要更多深入的研究工作。

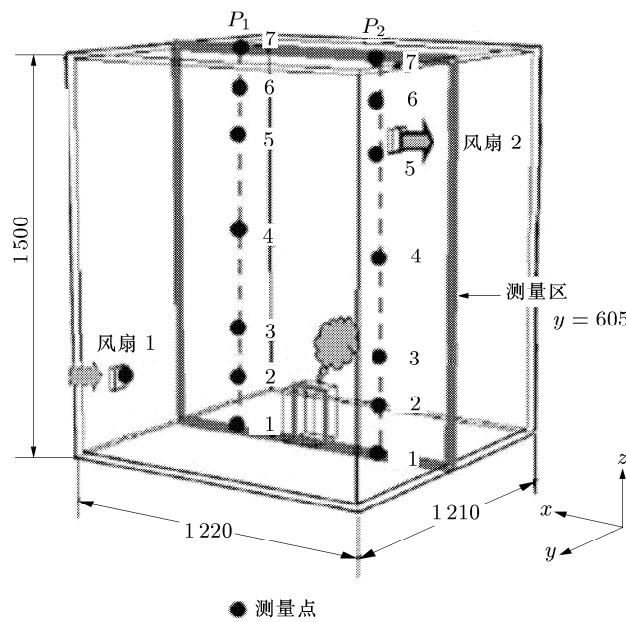


图 4 通风与水汽凝结实验模型图 [5]

水汽凝结的实验测量中，对于固壁表面水汽凝结的实验研究相对较少，多数以湿度传感器测量壁面附近的湿度分布。Klemm 等发展了一种非接触式的光学湿度分布测量方法，研究固体表面的微观几何结构对凝结现象产生的影响 [70~72]。实验采用激光束监视固壁表面，利用凝结量不同引起的光学特性变化测量壁面水汽凝结现象 (如图 5)，通过对比玻璃表面、多孔渗水表面和水泥质表面的凝结现象，研究凝结物生长与固体表面粗糙度的联系。此方法为非接触式测量，实验过程中对凝结表面没有干扰，有利于研究表面凝结现象，但由于其技术复杂、设备昂贵，而且需要经验丰富的操作者，该实验装置还有待进一步的改进和完善。

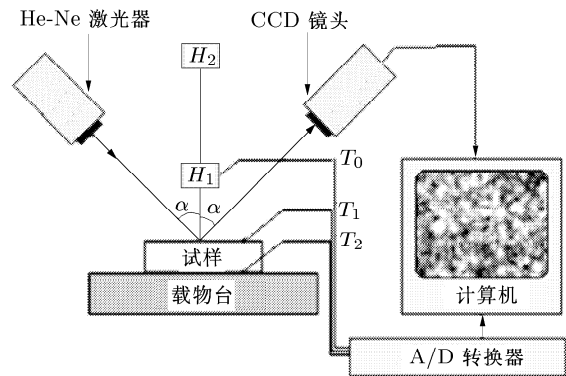


图 5 非接触凝结量测量装置示意图 [70] (H_1, H_2 分别为湿度计; T_1, T_2 分别为热电偶)

4 载人航天器的通风研究

载人航天器的通风由环境控制系统掌控,配合生命保障系统,组成环控生保系统(environment control and life support system, ECLSS),其主要作用为^[73]:

- 为新陈代谢的消耗提供氧气;
- 为日常消耗提供可饮用水和卫生需求用水;
- 去除舱内二氧化碳;
- 过滤悬浮微粒和微生物;
- 去除挥发性有机痕迹气体 (volatile organic trace gases);
- 监视和控制舱内大气分压 (N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2 , H_2O);
- 维持总气压;
- 维持温度、湿度水平;
- 调节各个相连接舱体的大气分布。

由于在微重力条件下,气体的热对流极大削弱,太空舱内空气流动完全依靠强制通风系统的驱动.强制通风系统对热控制和气体净化与均匀性控制有重要的调节功能.通过强制通风系统可以保持舱内气体有一定的流动速度,造成强迫对流,使舱内特别是航天员活动范围内的气体成分、温度和相对湿度保持均匀.此外,当航天器着陆后,还需通过用强制通风系统保证舱内气体与舱外大气的交换^[74,75].

微重力条件下的湿度控制关系到飞行安全.地面条件下每人每天散发 2.04 kg 水汽,在太空中这个数据大约是 1.80 kg^[1].当空气中的水蒸汽的温度到达露点温度 (dew point) 时就会在固壁表面凝结成滴,在太空中液态水的存在是危险的隐患:液态水是病菌生存繁衍的条件,会危害到航天员的健康,如果长时间聚集甚至会腐蚀容器,影响光和热的传递.因而,控制温湿度是太空舱的通风系统在循环空气之外最主要的一项任务.

对于舱内强制通风系统的研究是保证载人航天飞行的必要课题,设计制造国际空间站 (ISS),美国的航天飞机,以及俄罗斯的“联盟 TM”飞船时都进行了相应的研究.俄罗斯的研究中将通风系统与飞船的防火系统综合考虑,采用量纲分析、数值模拟和模型实验的方法研究了全密封舱体内的通风情况.其中,数值模拟采用了俄罗斯 Keldysh 中心开发的简化的 2D 非稳态模型,计算太空舱内的大气湍流流动,同时研究了强制通风系统造成舱内大气流速的周期性变化.舱内通风系统的风扇打开以后,通风管道内的大气流速迅速增加,通风管道内上游气压降低,下游气压升高,由于压差的存在,舱内大气开始被加速.与此同时,舱内的压降开始减速通风管道

的气流.在舱内大气加速以及通风管道内流速降低之后,通风管道和舱内气压的变化又使管道气流加速,而舱内气流减速,从而形成大气流动的波动现象.为了模拟舱内气体的流动情况,计算模型中引入一个质量平均力来模拟风扇的工作

$$r\rho \frac{Du_i}{Dt} = -r \frac{\partial P_e}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (r\mu_e \frac{\partial d_{ij}}{\partial x_j}) + f_i$$

$$i, j = 1, 2$$

$$P_e = P + \frac{2}{3}k, \mu_e = \mu + \mu_t, d_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

其中, k 为湍流能量, P_e 为风扇通道出口压力, μ 为黏性系数, f_i 为模拟风扇的质量平均力.再对比实验数据得到的经验公式就可以得到此质量平均力的有限差分网格形式.模拟中分别考虑了两个相连舱体通风问题的 3 种情况,即两舱通风系统同时运行、工作舱通风系统单独运行、服务舱通风系统单独运行.数值模拟的结果得到了舱内大气流速分布,流动边界层厚度等数据,并与实验结果相一致.由于实验与数值模拟采用了与 ISS 相近似的几何结构,其结果基本反映了不同通风强度下太空舱内的大气流动情况.

总体来说,由于现阶段空间实验机会较少且造价昂贵,对载人航天器的通风研究只能基于地面实验和计算机数值模拟,其研究手段与其他封闭与半封闭系统的通风研究工作并无本质区别.但由于微重力条件下的流体运动特性还有待深入研究,地面上得到的研究结果只能作为微重力条件下的参考,对载人航天器通风问题的研究只是刚刚起步.

5 结 语

半封闭与全封闭通风空间中的环境流体问题涉及到系统内空气质量以及通风设计的问题,关系到人们的生活质量甚至影响到生命安全,在现代社会人们室内活动所占比例越来越多的情况下,更应当引起人们的重视.对于这一问题的科学研究从理论、实验、数值模拟等方面正在广泛的开展.其中自然通风理论已经发展的相对完善,但应用于实际通风问题时仍有局限;而强制通风的理论研究受制于湍流理论的发展,现有研究更多的从 CFD 方法以及实验研究手段出发解决问题;随着载人航天事业的蓬勃发展,要求更加全面深入地开展对全封闭系统环境通风流体问题的研究.在传统研究手段的基础上,基于知识的系统 (knowledge-based system, KBS)^[76] 和基于数据的模型 (data-based modelling, DBM)^[77] 也可以作为有

益的补充方法解决一定的实际问题. 本文从理论、实验和数值模拟的角度总结了当今国内外环境通风流体问题的研究现状, 进一步的研究将重点关注微重力条件下载人航天飞行器的全封闭系统的环境通风流体问题. 研究短期或长期载人太空飞行任务中的环境流体控制, 在保证通风效果的同时降低通风系统能耗、提高通风效率, 为载人航天飞行器的通风系统设计提供参考.

参 考 文 献

- 1 秦文波. 神舟六号载人飞船及其技术改进. 上海航天, 2005, 22(5): 1~5
- 2 Linden P F. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annu Rev Fluid Mech*, 1999, 31: 201~238
- 3 He G, Yang X, Srebric J. Removal of contaminants released from room surfaces by displacement and mixing ventilation: modeling and validation. *Indoor Air*, 2005, 15(5): 367~380
- 4 Bosbach J, Pennecot J, Wagner C, et al. Experimental and numerical simulations of turbulent ventilation in aircraft cabins. *Energy*, 2006, 31(5): 694~705
- 5 Liu J, Aizawa H, Yoshino H. CFD prediction of surface condensation on walls and its experimental validation. *Building and Environment*, 2004, 39(6): 905~911
- 6 葛蕴珊, 尤可为. 车内污染物的影响因素和测量技术研究. 科技导报, 2006, 24(7): 44~47
- 7 JAMA (Japan Automobile Manufactures Association, INC). Reducing vehicle cabine VOC concentration levels. JAMA report, Japan, 1998
- 8 Fedoruk M J, Kerger B D. Measurement of volatile organic compounds inside automobiles. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2003, 13(1): 31~41
- 9 Settles G S. Fluid mechanics and homeland security. *Annu Rev Fluid Mech*, 2006, 38: 87~110
- 10 Fedorovich E. Dispersion of passive tracer in the atmospheric convective boundary layer with wind shears: a review of laboratory and numerical model studies. *Meteorol Atmos Phys*, 2004, 87(1-3): 3~21
- 11 Robins A. Wind tunnel dispersion modelling some recent and not so recent achievements. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2003, 91(12-15): 1777~1790
- 12 Nardell E A, Keegan J, Cheney S A, et al. Airborne infection-theoretical limits of protection achievable by building ventilation. *American Review of Respiratory Disease*, 1991, 144(2): 302~306
- 13 Nicas M, Hubbard A. A risk analysis approach to selecting respiratory protection against airborne pathogens used for bioterrorism. *AIHA Journal*, 2003, 64(1): 95~101
- 14 Fennelly K P, Nardell E A. The relative efficacy of respirators and room ventilation in preventing occupational tuberculosis. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 1998, 19(10): 754~759
- 15 Turner J S. Turbulent entrainment: the development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows. *J Fluid Mech*, 1986, 173: 431~471
- 16 Li X X, Liu C H, Leung D Y C. Development of a $k-\epsilon$ model for the determination of air exchange rates for street canyons. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(38): 7285~7296
- 17 Li X X, Liu C H, Leung D Y C, et al. Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(29): 5640~5658
- 18 Xie X M, Huang Z, Wang J S. Impact of building configuration on air quality in street canyon. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(25): 4519~4530
- 19 Xie X M, Liu C H, Leung D Y C, et al. Characteristics of air exchange in a street canyon with ground heating. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(33): 6396~6409
- 20 Modic J. Air velocity and concentration of noxious substances in a naturally ventilated tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(1): 105~110
- 21 Camelli F, Löhner R. Assessing maximum possible damage for contaminant release events. *Engineering Computations*, 2004, 21(7-8): 748~760
- 22 Zhang L, Jiang F, Chow T T, et al. CFD analysis of ventilation effectiveness in a public transport interchange. *Building and Environment*, 2006, 41(3): 254~261
- 23 Morton B R, Taylor G I, Turner J S. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc R Soc Lond A*, 1956, 234: 1~23
- 24 Linden P F, Lane-Serff G F, Smeed D A. Emptying flling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation. *J Fluid Mech*, 1990, 212: 300~335
- 25 Cooper P, Linden P F. Natural ventilation of an enclosure containing two buoyancy sources. *J Fluid Mech*, 1996, 311: 153~176
- 26 Cooper P, Linden P F. Natural ventilation of an enclosure containing one positive and one negative source of buoyancy. In: Bilger R W, ed. Proc 12th Australas. Fluid Mech Conf. Sydney, Australia: The University of Sydney, 1995. 645~648
- 27 Linden P F, Cooper P. Multiple sources of buoyancy in a naturally ventilated enclosure. *J Fluid Mech*, 1996, 311: 177~192
- 28 Thomas P H, Hinkley P L, Theobald C R, et al. Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical Paper No.7, HMSO, London, 1963
- 29 Cooper P, Mak N. Thermal stratification and ventilation in atria. In: Australian and New Zealand Solar Energy Soc. Proc ANZSES Conf. Adelaide, Australia, 1991. 385~391
- 30 Kaye N. Interaction of turbulent plumes: [dissertation]. Cambridge, UK: Cambridge University, 1998
- 31 Caulfield C P. Stratification and buoyancy in geophysical flows: [dissertation]. Cambridge, UK: Cambridge University, 1991
- 32 Lin Y J P, Linden P F. A model for an under floor air distribution system. *Energy and Buildings*, 2005, 37 (4): 399~409
- 33 Liu Q A, Linden P F. The fluid dynamics of an underfloor air distribution system. *J Fluid Mech*, 2006, 554: 323~341
- 34 Lin Y J P, Linden P F. Buoyancy-driven ventilation between two chambers. *J Fluid Mech*, 2002, 463: 293~312
- 35 Hunt G R, Linden P F. The natural ventilation of an enclosure by the combined effects of buoyancy and wind. In:

- Murakami S, ed. Proc ROOMVENT'96, 5th Int Conf on Air Distrib in Rooms, Yokohama, Japan, 1996. 3: 239~246
- 36 Hunt G R, Linden P F. Passive cooling by natural ventilation: salt bath modelling of combined wind and buoyancy forces. In: Blacknell J, ed. Proc AIVC, Athens, Greece, UK: University of Warwick Science Park. 1997. 175~183
- 37 Hunt G R, Linden P F. Laboratory modelling of natural ventilation flows driven by the combined forces of buoyancy and wind. In: Proc CIBSE Nat Conf, London, UK, 1997. 101~107
- 38 Hunt G R, Linden P F. The fluid mechanics of natural ventilation-displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind. *Building and Environment*, 1999, 34(6): 707~720
- 39 Hunt G R, Linden P F. Steady-state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by wind. *J Fluid Mech*, 2001, 426: 355~386
- 40 Linden P F. Mixing in stratified fluids. *Geophys Astrophys Fluid Dyn*, 1979, 13: 3~23
- 41 Holford J M, Linden P F. The development of layers in a stratified fluid. In: Davies P A, ed. Proc 5th IMA Conf. Stratified Flows. Dundee, UK: Clarendon Press. 1998
- 42 Hunt G R, Linden P F. Displacement and mixing ventilation driven by opposing wind and buoyancy. *J Fluid Mech*, 2004, 527: 27~55
- 43 Gladstone C C, Woods A W. On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor. *J Fluid Mech*, 2001, 441: 293~314
- 44 Caulfield C P, Woods A W. The mixing in a room by a localized finite-mass-flux source of buoyancy. *J Fluid Mech*, 2002, 471: 33~50
- 45 Woods A W, Caulfield C P, Phillips J C. Blocked natural ventilation: the effect of a source mass flux. *J Fluid Mech*, 2003, 495: 119~133
- 46 Howell S A, Potts I. A comparison of predictive techniques for natural displacement ventilation of buildings. In: Proc CIBSE Nat Conf. Bournemouth, UK, 1998. 156~164
- 47 Howell S A, Potts I. On the natural displacement flow through a full-scale enclosure, and the importance of the radiative participation of the water vapour content of the ambient air. *Building and Environment*, 2002, 37(8-9): 817~823
- 48 Peng S H, Davidson L, Holmberg S. A modified low-reynolds-number $k-\omega$ model for recirculating flows. *Journal of Fluids Engineering*, 1997, 119(4): 867~875
- 49 Bredberg J, Peng S H, Davidson L. An improved $k-\omega$ turbulence model applied to recirculating flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002, 23(6): 731~743
- 50 Baines W D, Turner J S. Turbulent buoyant convection from a source in confined region. *J Fluid Mech*, 1969, 37: 51~80
- 51 Hunt G R, Kaye N G. Virtual origin correction for lazy turbulent plumes. *J Fluid Mech*, 2001, 435: 377~396
- 52 Kaye N G, Linden P F. Coalescing axisymmetric turbulent plumes. *J Fluid Mech*, 2004, 502: 41~63
- 53 Hunt G R, Kaye N G. Lazy plumes. *J Fluid Mech*, 2005, 533: 329~338
- 54 Kaye N G, Linden P F. Colliding turbulent plumes. *J Fluid Mech*, 2006, 550: 85~109
- 55 Lin Y J P, Linden P F. The entrainment due to a turbulent fountain at a density interface. *J Fluid Mech*, 2005, 542: 25~52
- 56 Thatcher T L, Wilson D J, Wood E E, et al. Pollutant dispersion in a large indoor space: Part 1 Scaled experiments using a water-filled model with occupants and furniture. *Indoor Air*, 2004, 14(4): 258~271
- 57 Wan M P, Chao C Y. Numerical and experimental study of velocity and temperature characteristics in a ventilated enclosure with underfloor ventilation systems. *Indoor Air*, 2005, 15(5): 342~355
- 58 Baines W D. A technique for the direct measurement of volume flux of a plume. *J Fluid Mech*, 1983, 132: 247~256
- 59 Dalziel S B. Rayleigh-Taylor instability: experiments with image analysis. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1993, 20(1-2): 127~153
- 60 Mundt E. Non-buoyant pollutant sources and particles in displacement ventilation. *Building and Environment*, 2001, 36(7): 829~836
- 61 Hunt G R, Cooper P, Linden P F. Thermal stratification produced by plumes and jets in enclosed spaces. *Building and Environment*, 2001, 36(7): 871~882
- 62 Bouilly J, Limam K, Beghein C, et al. Effect of ventilation strategies on particle decay rates indoors: An experimental and modelling study. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(27): 4885~4892
- 63 Liu J, Aizawa Y, Yoshino H. Experimental and numerical study on indoor temperature and humidity with free water surface. *Energy and Buildings*, 2005, 37(4): 383~388
- 64 Deng Q H, Tang G F. Numerical visualization of mass and heat transport for mixed convective heat transfer by streamline and heatline. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(11): 2387~2396
- 65 Deng Q H, Zhou J M, Mei C, et al. Fluid, heat and contaminant transport structures of laminar double-diffusive mixed convection in a two-dimensional ventilated enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(24): 5257~5269
- 66 Brown A L, Dabberdt W F. Modeling ventilation and dispersion for covered roadways. *Journal of Wind Engineering*, 2003, 91(5): 593~608
- 67 Dayan J, Dayan E, Strassberg Y, et al. Simulation and control of ventilation rates in greenhouses. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2004, 65(1-2): 3~17
- 68 Abdullah M O, Mikie F A, Lam C Y. Drying performance and thermal transient study with solar radiation supplemented by forced-ventilation. *International Journal of Thermal Science*, 2006, 45(10): 1027~1034
- 69 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流理论与模拟. 北京: 清华大学出版社, 2005. 163~265
- 70 Klemm A J, Klemm P, Rozniakowski K, et al. Non-contact methods of measuring moisture concentration in external layers of building partitions. I-the influence of geometrical microstructure on the kinetics of moisture condensation on glass surfaces. *Building and Environment*, 2002, 37(12): 1215~1220
- 71 Klemm A J, Klemm P, Rozniakowski K, et al. Non-contact methods of measuring moisture concentration in external

- layers of building partitions. II-monitoring of the water vapour condensation on porous surfaces. *Building and Environment*, 2002, 37(12): 1221~1232
- 72 Klemm A J, Klemm P, Rozniakowski K, et al. Non-contact methods of measuring moisture concentration in external layers of building partitions. III-water vapor condensation on the cementitious surfaces. *Building and Environment*, 2002, 37(12): 1233~1240
- 73 NASA FACTS. International Space Station Environmental Control and Life Support System. Pub 8-40399, 2005
- 74 刘庆贵. 载人飞船探秘. 北京: 作家出版社, 1999. 35~40
- 75 戚发轫, 朱仁璋, 李颐黎等. 载人航天器技术. 北京: 国防工业出版社, 2003. 125~169, 224~256, 298~329, 569~595
- 76 Matsumoto H, Toyoda S. A Knowledge-based system for condensation diagnostics in houses. *Energy and Buildings*, 1994, 21(3): 259~266
- 77 Buggenhout S V, Desta T Z, Brecht A V, et al. Data-based mechanistic modelling approach to determine the age of air in a ventilated space. *Building and Environment*, 2006, 41(5): 557~567

ENVIRONMENTAL FLUID DYNAMICS IN SEMI-HERMETIC AND HERMETIC VENTILATED SYSTEMS*

WANG Tao[†] YIN Zhaohua HU Wenrui

National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract Environmental fluid dynamics in semi-hermetic and hermetic ventilated systems, including air motion, temperature and moisture distribution and contaminant condensation, is a widely concerned subject because of its applications in monitoring indoor air quality, designing ventilation system and avoiding vapor condensation. This paper reviews the related theoretical, numerical and experimental researches for high ventilation efficiency, low energy costs and more air comfort in practice. They involve both semi-hermetic systems (room, building and city) and hermetic systems (car, subway, plane, submarine and manned space capsule). The current theoretical models were developed from the basic plume theory with a single source to complicated turbulent fountain models with buoyancy fluxes from the plume sources and momentum fluxes from the fountain sources. However, the theoretical analysis is incapable of dealing with practical problems in situations such as of multiple ventilations and multiple geometric structures, so most engineering applications tend to rely on experiments and numerical simulations. It is worth mentioning that researches on environmental fluid dynamics in manned space capsules, although just in a beginning stage, can use the matured research strategies and techniques in related semi-hermetic and hermetic systems.

Keywords natural ventilation, displacement ventilation, forced ventilation, condensation

* The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (10502054, 10432060) and CAS Innovation Program

[†] E-mail: wangtao@imech.ac.cn