

载人航天器的舱内通风问题

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)

摘要 舱内通风系统是载人航天器环境控制与生命保障系统的重要组成部分。在微重力条件下,自然对流消失,舱内通风系统造成的强迫对流可以确保舱内气体循环流动,从而保证舱内有害物质得到及时的处理和回收。同时,通风系统驱动的舱内气体流动情况与舱内防火和灭火的研究也直接相关。对载人航天器舱内通风系统的研究涉及了航天员的生命安全保障,是改善航天员生活、工作环境的必备工作,同时也为载人航天器设计提供了重要的参考意见。

关键词 舱内通风 强制通风 水汽凝结

1 引言

载人航天工程始终将保障航天员的生命安全放在首位,在载人航天器的设计上不但要使得航天员能够顺利地进入太空,还要保证航天员安全地在空间工作并且安全地返回地面。因此,载人航天器的舱内环境必须符合航天员的生理要求。

在太空中,航天员每人每天需要吸收 0.9kg 氧气,排出 1.0kg 二氧化碳;每人每天需要 2.5kg 水,排出近 1.6kg 尿液;每人每天需要大约 0.6kg 食物,排泄 0.2kg 废物,通过呼吸、排汗等生理代谢产生 1.2~1.6kg 左右的水汽。载人航天器采用密闭舱体设计,如果没有相应的环境维持系统,不仅谈不到氧气、水、食物的补给,可以说连航天员排泄的废气都可能杀死自己^[1]。

因此,现有的所有载人航天器都必须有环境控制与生命保障系统(简称为环控生保系统)。航天员生活和工作的舱段在结构上要求严格密封,舱内环控生保系统的主要任务就是创造航天器内适宜于生活和工作的气体环境。各国对环控生保系统的设计指标并不完全一致,但其设计功能大体可以总结为:为航天员新陈代谢的消耗提供氧气;为航天员的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;去除挥发性有机痕量气体;监视和控制舱内大气分压(N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2 , H_2O);维持舱内总气压;维持舱内温度、湿度水平;调节各个相连接舱体的气体分布等^[2]。以我国的

“神舟”六号飞船为例,其舱内环境控制系统主要包括:用于清除舱内各种灰尘杂质和有害气体的通风净化系统,用于维持舱温在 17℃~25℃范围内的温度控制系统,以及用于维持相对湿度在 30%~70%范围内的湿度控制系统。提供氧气并控制密封舱内总压,提供航天员饮水、就餐、大小便等生活保障及提供火情探测和灭火设备^[3-4]。

目前,短期载人任务多采用化学吸收方法,即利用碱土金属的超氧化物吸收空气中的二氧化碳,同时提供氧气(如 3kg 超氧化钾(KO_2)能产生 1kg 的氧气并吸收定量的二氧化碳和水)。这种方法迅速有效,但由于反应物质不能循环利用,需要事先按照任务需要准备足够的用量,不适合长期任务的需要。中长期载人任务采用再生式技术和生态方法。

太空飞行中,航天员每天都会通过生理代谢产生大量的水蒸气,如果不能及时地将这些水汽回收,当气体温度到达露点温度时水汽就会冷凝成滴。在微重力条件下,这些水珠会在密封狭小的舱内飘动,不仅使航天员难以忍受,还有可能附着在航天员的眼睛上、吸入到肺里。此外,液态水的存在还是病菌生存繁衍的条件,会危害到航天员的健康,甚至危及生命。而且,当这些水汽在飞船比较冷的舱壁、仪表表面等部位凝结时,可能使电气设备受潮引起短路,影响设备的正常运转,如果液态水长时间聚集还会腐蚀壁面,影响光和热的传递。所以,座舱内的仪器表面、舷窗,以及航天服的头盔面罩上都有专门的防雾防霜设计。如航天服头盔面罩上常设计有特殊的

气流或防雾涂层;美国“命运”号实验舱舷窗内外两层玻璃之间处于真空状态,为防止舷窗玻璃上出现水蒸气凝结形成水雾,专家设计“命运”号实验舱时专门在舷窗上放置了一个排水软管^[1]。太空失重环境中水汽的处理和回收并不像地面上那么方便,通常的做法是将水汽回收装置安置在通风系统的回路中,再利用特殊装置将水汽分离。神舟六号的设计人员就利用毛细材料吸附冷凝水,使飞船内部空间的相对湿度保持在 30%到 70%之间,满足舒适和安全的需要。

座舱内若要避免产生水汽凝结,或将气体中已经存在的飘浮凝结水收集、贮存起来,就需要合适的通风设置,以及相应的水汽收集装置,这样就可以在避免隐患的同时控制舱内湿度、提高舒适度,还可以将收集到的水再次循环利用。载人航天器的通风由环境控制系统掌控,通风系统的存在保证了座舱内的气体流动,是实现气体环境控制的重要组成部分。

2 座舱内通风系统

载人航天器舱内通风设备是保障座舱气体降温除湿、净化和保持舱内一定风场的重要手段。尤其在轨道飞行的微重力条件下,随着自然对流的消失,气体的热对流作用极大削弱,必须利用座舱风扇进行通风,造成舱内气体的强迫对流,使舱内温度、湿度、气体成分等得以均匀分布,以提高环境控制系统的降温、除湿和净化能力,提高舱内气体质量。实际上,由于座舱设计复杂,舱内风源并不止座舱风机一种,净化风机、冷凝干燥风机等都会对舱内气体风场有贡献。所以,进行舱体设计时要综合考虑各系统的通风配置,使得各风机分布得当,舱内风速均匀合理,避免出现死角,确保航天员活动区,特别是头部区域维持有一定的风速,一般在 0.3~0.8m/s 范围内。

舱内通风系统除了服务于环控生保系统之外,还需要满足舱内防火的需要。在载人航天器中,气流速度是影响材料可燃性的主要环境因素。实验表明,气流速度对火焰的传播速度和火焰温度影响明显^[2]。此外,多数座舱火灾检测设备也需要舱内通风系统的配合才能工作,国际空间站采用的光电式感烟探测器的光路就安装在冷却气体回路内或普通循环气体中,通过检测循环气体中的烟雾颗粒含量判定火灾是否发生。因此,设计舱内防火系统时,也必须考

虑舱内通风系统设置和舱内气体的流动情况。

此外,当航天器返回舱着陆后,还需通过强制通风系统保证舱内气体与舱外气体的交换,以保证在地面救援人员到来之前,维持航天员的生命安全。因此,舱内的通风系统设计除了应当满足轨道工作的通风要求之外,还要兼顾着陆后座舱与外界环境空气交换的需求。

为了使舱内通风系统能够实现以上所述的各项的功能,需要开展大量的相应研究作为座舱设计的参考。现有研究多从实验和数值模拟入手,利用已有的理论模型配合实验,模拟微重力条件下的通风情况,从而获得舱内气体流动的速度分布、温度分布、湿度分布以及有害气体和污染物颗粒的分布情况。

3 实验研究与数值模拟

对于载人航天器舱内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,美国的航天飞机,俄罗斯的“联盟”号飞船,以及我国的“神舟”号飞船时都进行了相应的研究。其中,俄罗斯的研究还将通风系统与飞船的防火系统综合考虑。总之,载人航天器需要采用理论分析、数值模拟和模型实验的方法研究全密封舱体内的通风情况。

理论分析方法被用来研究通风系统关闭以后,舱内空气流动的动能粘性耗散情况,从而确定表征舱内气体流动的重要物理参量,以确定后期实验方案以及实验测量参量。理论分析基于一系列的初步平行实验,实验在同一个装置中进行,介质分别为空气、水、甘油水溶液,以对比不同粘性介质的流动情况。理论分析方法计算了模型内介质运动速度降低所需的时间,其结果与初步实验结果基本一致。

对数值模拟研究各国都有相应的研究方法。例如俄罗斯航天局 Keldysh Center 开发的简化二维非定常模型计算座舱内的气体湍流流动,同时研究了强制通风系统造成的舱内气体流速的周期性变化。舱内通风系统的风扇打开以后,通风管道内的气体流速迅速增加,通风管道内上游气压降低,下游气压升高,由于压差的存在,舱内气体开始被加速。与此同时,舱内的压降开始减速通风管道的气流。在舱内气体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,从而形成气体流动的波动现象。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。通过对比实验数据总结而得的经验公式, 就可以得到此质量平均力的有限差分网格形式。模拟计算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。研究中应用数学计算软件 MAPLE-V (v5) 进行数值模拟, 得到了舱内气体流速分布, 流动边界层厚度等数据。数值模拟的结论与实验结果保持一致。由于实验与数值模拟均采用了与国际空间站相近似的几何结构, 其结果基本反映了不同通风强度下太空舱内的气体流动情况。

“和平”号空间站进行了全尺寸模型的实验研究, 其测量段尺寸为 $9 \times 1.87 \times 1.1 \text{m}^3$ 。通过数个风扇组成的通风系统可将舱内流速控制在 $0.07 \sim 0.7 \text{m/s}$ 范围内。实验中采用间接加热热电偶测速计, 其精度可达 $1 \sim 2 \text{cm/s}$ 。热电偶测速计中采用了两种直径分别为 0.1mm 和 0.2mm 热电偶电极, 以便于测量速度边界层厚度。实验开始时, 首先关闭舱门, 打开加热器, 经过 $10 \sim 15 \text{min}$ 舱内气体达到稳定状态; 再打开通风系统进行冷却通风 10min 后, 采集到一组表征定常态通风模式的数据; 此后记录每次关闭(或打开)通风系统后 5min 内的数据, 以获得关闭(或打开)通风系统后的舱内气体流动模式的数据。实验结果表明, 靠近垂直壁面的 $200 \sim 300 \text{mm}$ 范围内和天花板 300mm 范围内空气流动微弱, 而距地板 $0.5 \sim 0.7 \text{m}$ 高处气流流速最大。根据气流速度的数据分析, 可以得到速度边界层厚度大约为 $10 \sim 20 \text{mm}$, 在某些气流流速较快区域附近可达 40mm 。

美国国家航空航天局(NASA)进行的系列研究除了着眼于舱内通风之外, 还对太空植物生长舱体以及未来计划中的太空温室的通风和湿度控制进行了初步的探讨。研究了密闭植物生长舱体中的气流分布, 并重点分析了气流的流入流出以及气流停滞区的情况^[6]。

综上所述, 鉴于空间实验机会宝贵且造价昂贵, 目前对载人航天器舱内通风系统的研究大多基于地

面研究。由于地面实验不可避免的受到重力的影响, 将其结论直接推广到空间微重力情况下的气体流动时还存在一些局限。通常可以通过实验数据验证数值模型的可信度, 将验证后的数值模型进行重力项修正, 然后使用修正后的数值模型计算微重力条件下的流动。这样, 所得的结果便可比较准确地反映出航天器轨道飞行时的实际情况。

4 结论

载人航天器的舱内通风系统关系到舱内环境、航天员生命保障、以及舱内防火等重要问题, 其相关研究引起了广泛的关注。现有的研究普遍基于地面条件, 从理论分析、实验研究和数值模拟的方面研究航天器座舱内的通风情况, 为载人航天器设计提供必要的技术支持。现有的通风系统虽然可以保证在飞行任务的数天时间内座舱环境基本满足航天员的生理要求, 但却远远不能达到舒适的标准。考虑到未来的太空飞行计划, 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, 使更多人可以进入太空), 就必须改进现有系统, 提高舱内环境质量, 通风回路中还要包括气体回收、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。因此, 对于航天器舱内通风问题的进一步研究势在必行。◇

参考文献

- [1] 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.
- [2] International Space Station Environmental Control and Life Support System. NASA FACTS. May, 2005.
- [3] 刘庆贵. 载人飞船探秘. 北京: 作家出版社, 1999, 35-40.
- [4] 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.
- [5] 张夏, 胡文瑞. 载人航天器的火灾安全问题. 载人航天, 2006(4), 5-11.
- [6] Advanced Support Systems Development and Supporting Technologies for Controlled Ecological Life Support Systems (CELSS). NASA Grants NAG9-620 and NAG9-640. August, 1994.