

载人航天器总装地面污染控制技术体系初步分析

熊 涛 刘宏阳

(中国空间技术研究院总装与环境工程部)

摘 要 阐述载人航天器地面总装过程环境污染控制技术的国内外研究现状,提出以控制载人航天器总装过程舱内污染物浓度为目标,分析可能污染源、筛选重点监控目标污染物种类、研究污染物采样分析技术、确定目标污染物最大容许浓度的系统研究总装过程舱内污染物控制技术方案。

关键词 载人航天器 总装过程舱内污染 控制

1 前 言

我国“神舟”载人飞船的成功发射为实现航天员出舱活动、空间飞行器交会与对接和建造空间实验室等后续任务奠定了重要基础。中长期载人航天计划。随着载人航天飞行任务的延长,载人航天器舱室污染控制问题越来越受到人们的关注。因为舱室内有害气体和颗粒悬浮物浓度超标,将直接影响着航天员的生命安全和设备的工作可靠性,这个问题随着飞行时间的延长而成为亟待解决的关键技术之一。

航天器在地面总装及轨道飞行时会引起舱内污染物的产生及繁衍。总装过程可以提供清洁的环境,最大限度地降低有害气体和颗粒悬浮物在舱内的遗留浓度;如不能即时清除这些污染物,其中颗粒悬浮物会在太空失重环境下漂浮于舱室,引起设备工作性能下降,舱内有害气体污染则直接影响到航天员的生命安全。而在太空飞行中只能通过航天器上的主动污染净化设备控制舱内的污染物浓度。所以,控制总装过程中舱内各种污染物的浓度就成为航天器研制过程中必须解决的重要问题之一。发展载人航天器总装过程环境污染控制技术,不仅是保障各种先进装备正常工作的前提条件,也是保证航天员生存和提高航天员效能的有力手段,有可能影响到载人航天任务的成败。

2 载人航天器舱内气体污染研究概述

2.1 国外研究现状

美国、俄罗斯等国家一直非常注重载人航天器

舱内污染控制问题,提出通过连续监测航天器内污染物浓度变化,应用各种主动和被动污染物控制方法加以限制及改善,并制定了详细的载人航天器舱室最大容许浓度标准^[1]。

据调查,美国“水星”号飞船座舱气体中已确定的污染物有 46 种,“天空实验室”中气样分析出 300 多种化合物,“阿波罗”飞船非金属材料散发的污染气体也多达 300 多种;航天飞机前 5 次飞行中采集的气样共测出 152 种微量污染气体。另已查明,俄罗斯“和平”号空间站密闭舱气体中的污染物约 300 种。所以,必须通过被动和主动方法控制这些污染物产生源以及其污染物浓度,以确保舱室气体质量。

被动控制是根据建立的材料释放气体准则,通过限制使用材料、设计安装和试验程序,最大限度地降低微量化学污染释放量。美国在研制“天空实验室”空间站时详细分析了各种材料微量污染释放率与时间、温度的关系,并建立了以 mg/天/kg 表示的非金属材料化学污染产生率数据库。

但是,不管如何选择材料,都不能完全消除材料释放的微量有害气体,而且总装技术人员和在轨航天员也会不断带来及产生各种污染物,所以需要主动控制污染方法来确保清洁的舱室气体质量。

国外许多学者曾详细地研究了人体代谢产生的各种污染物。研究表明,人体产生的微量化学污染物通过许多途径进入舱内,主要包括:呼吸的空气、肠胃气和汗液等气体。过去微量化学污染负荷使用了非常有限的人体代谢污染源信息,主要是 P·Webb

和 R·A·Dora^[2]的研究成果。尽管对飞行器污染控制系统设计非常有用,但是这些参考文献非常有限。后来, M·A·Golub 和 T·Wydeven^[3]提出舱内污染源研究数据,全面考虑了 Leban、Wagner、M·T·Dmitriyev、A·G·Malysheva 和 Y·G·Rastyannikov^[4]关于人体代谢产生污染方面的近期研究成果。美国、俄罗斯和欧洲航天局的研究成果现在已作为国际空间站人体代谢污染设计的基础。

美国、俄罗斯等国家早已在舱室污染物控制方面开展了许多工作。苏联航天医学工程研究者们曾对“和平”号空间站及其地面空间实物舱内的气体微量污染控制和监测做了大量研究。美国还在地面实验基地内对微量污染物进行了连续监测。另外,美国和苏联对“阿波罗”号飞船、“联盟”号飞船、“和平”号空间站、“天空实验室”和航天飞机座舱气体都进行了监测,但采用的是离线的、回顾性的座舱气体污染监测。长时间的载人航天飞行任务要求在线实时的气体监测。目前,微量污染物在线监测和实时控制是国际上公认的难题。美国国家航空航天局在 STD-3000《长期航天气体污染监测设计方案》中提出:

- 对座舱气体中的全部有机污染物进行实时监测;
- 对产生污染的目标物间断地进行定性定量测量;
- 污染的浓度超标时采用声音或光报警。

美国国家航空航天局肯尼迪航天中心早在 1980 年就对空间站气体监测系统的技术方案进行了评估研究,推荐了下列几种检测方法:

- 利用傅立叶红外分析仪快速定性检测目标物;
- 利用气相色谱/质谱分析仪监测低浓度污染物;
- 利用气相色谱、质谱、傅立叶变换红外分析仪系统监测高浓度污染物。

在航天飞行应急情况下,保障水平相应降低,航天应急容许浓度的概念是指在直到 24h 的应急暴露状态下,对航天员完成特定的任务没有影响,不引起严重的或永久性的损害,但可引起可逆性的影响,这种影响将不能损害或妨害航天员对诸如火灾事故等应急情况的判断和正常反应。

在长期飞行情况下,美国于 20 世纪 70 年代由美国国家研究委员会的毒理学委员会主持,研究的成果主要为中长期载人航天飞行任务提供微量污染

物最大容许浓度,即按要求净化污染、航天员的舒适性和安全性要求。

综上所述,长期以来航天技术发达国家都非常重视与载人航天器舱内污染物监测控制相关的技术研究,取得的大量研究成果,大多直接应用于国际空间站。

2.2 国内研究现状^[5]

载人航天事业与众多学科的结合和发展,促进了航天毒理学的形成和发展。我国在这个领域内的研究工作起步较晚,但在密闭环境污染源研究、非金属材料毒理卫生学评价、各种舱室有害气体容许浓度标准制订和检测方法等方面做了许多工作,取得了很大进步和成绩,但就整体水平、规模和队伍来看,与科技发达国家相比还有相当大的差距。

随着“神舟”号载人飞船的成功飞行,我国载人飞船的在轨飞行时间也将由几天发展到将来的数天、数月。由于在轨飞行时间的延长,舱室气体质量问题也越来越受到关注,成为关键的技术难点之一被提出来加以研究和解决。

目前,中国航天员训练中心、中国空间技术研究院、北京航空航天大学等在载人航天器污染物监测与控制方面开展了大量相关研究工作,并取得许多研究成果,一些污染物监测与控制技术直接应用于目前“神舟”号载人飞船。

在载人航天器总装过程舱内环境污染控制方面,有关单位针对航天器总装过程灰尘、微小多余物等污染物浓度控制要求,设计了变风量换气除尘设备,用于改善飞船舱内环境,控制舱内环境的污染物浓度。该设备具有温度控制、湿度控制、除尘等特点,能够初步满足航天器总装环境的有关控制要求。由于该设备是在国内首先研发和使用,所以还存在如除尘效果、舱内风场分析等问题尚需完善解决^[6]。

在航天器非金属材料释放有机污染物研究方面,有关单位开展了大量的研究工作,但主要针对的是非载人航天器用非金属材料在真空环境下脱气物成分及污染分析,通过非金属材料出气污染成分的检测分析,并结合污染测试,确定材料出气物的基本成分对污染物控制与防护设计具有重要的参考依据。但上述研究只能满足真空时材料脱气,尚不能适用于载人航天器舱内非金属材料释放微量污染物研究的需要。

在载人航天器舱内污染控制方面，有关单位针对短期飞行的载人飞船舱室污染物开展了主动控制技术的研究工作，主要采用氢氧化锂、活性炭、常温催化技术。具有代表性的净化设备是载人飞船一氧化碳滤除装置，带有活性炭保护层，装于飞船返回舱。该产品可以在飞船返回舱气体受到火工品废气污染的情况下，保证出口气流中的一氧化碳浓度在人体安全限以下，在短时间内将舱内气体中的一氧化碳浓度降低到安全限以下。该产品的成功研制，保证了“神舟”飞船内航天员的生命安全，也为气体净化器的设计提供了技术借鉴。

此外，有关单位还以我国将要发展的空间实验室和空间站为研究对象，在国内首次针对中长期载

人航天器舱室微量污染控制开展了较为深入的理论和实验研究工作，重点分析舱室污染源及污染机理，包括舱内微量污染物来源、种类和特性；舱室气体中存在的污染物种类，微量污染气体浓度、毒性、分布状况；研究有害气体综合毒性对人体和设备的影响；初步确定主要舱室优先净化的微量污染种类及可能的最大容许浓度。

3 载人航天器总装舱内污染控制技术研究主要内容

载人航天器总装过程环境控制技术的研究内容(如图 1 所示),主要包括污染分析、目标污染物筛选、污染物采样分析技术和污染物控制技术等几个方面。

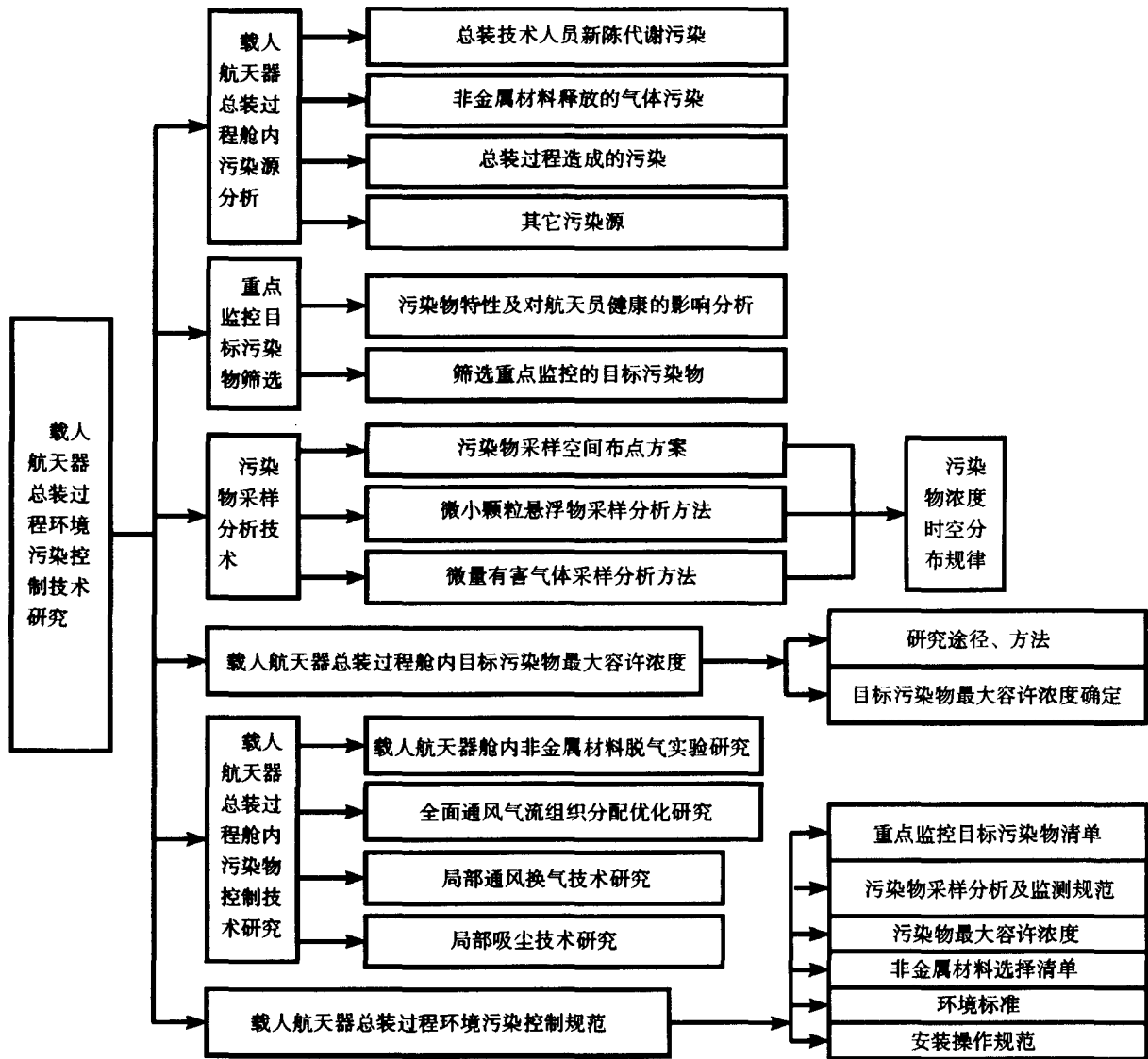


图 1 研究内容

3.1 载人航天器总装过程舱内污染源分析

污染物控制必须从源头开始,有必要详细分析载人航天器在总装过程中可能的污染源,为筛选优先污染物、检测分析和控制提供依据。

主要针对如下污染源:

(1)总装人员新陈代谢污染。重点是分析载人航天器研制过程中,进舱人员人体代谢污染产生途径、种类和数量。

(2)非金属材料释放的气体污染。根据载人航天器舱内使用的材料清单,研究非金属材料释放低分子量有毒化合物的产生过程、途径和数量。

(3)总装过程安装操作造成的污染。研究载人航天器在总装过程中引起的有害气体、微小多余物和颗粒悬浮物种类等,分析成因及避免方法。

3.2 载人航天器总装过程重点监控目标污染物筛选

如果针对总装过程中舱内所有环境污染物进行研究,将使问题复杂化,可能导致无法完成研究目标。因此以上述主要污染源为基础,按照污染物对人体健康的影响、以及可能引起的净化设备工作效率降低等情况(如催化剂中毒和活性炭穿透),确定优先净化的污染物种类,以此为依据设计具体的采样分析方案及污染物控制实施策略。重点研究内容是:污染物特性及对航天员健康的影响分析、重点监控的舱内优先污染物种类。

3.3 载人航天器总装过程舱内污染物采样分析技术^[7]

根据重点监控污染物筛选结果,开展针对总装过程中舱内污染物采样分析的研究工作,进而确定污染物浓度时空分布规律。它是后续工作的研究基础,所以污染物采样分析技术占有十分重要的地位。

由于污染物包括微量有害气体、微小多余物和颗粒悬浮物等不同种类,将涉及到不同的采样分析方案。

采样分析技术主要研究内容包括:污染物采样空间布点方案、微小颗粒悬浮物采样分析方法、微量有害气体采样分析方法。

3.4 载人航天器总装过程舱内污染物控制技术研究

以舱内污染源、优先污染物及其最大容许浓度等研究成果为依据,从污染源入手,以优先污染物为控制对象,污染物最大容许浓度为控制目标,开展载人航天器总装过程舱内污染物控制技术研究。重点是载人航天器舱内非金属材料脱气研究、局部通风换气技术研究和局部吸尘技术研究。

4 载人航天器舱内地面污染控制技术实施方案

载人航天器总装过程环境污染控制技术研究涉及多个子项,子项之间关系紧密、相辅相成、互为补充。研究工作将包括基础研究、实验研究和应用技术几个方面,如图 2 所示。

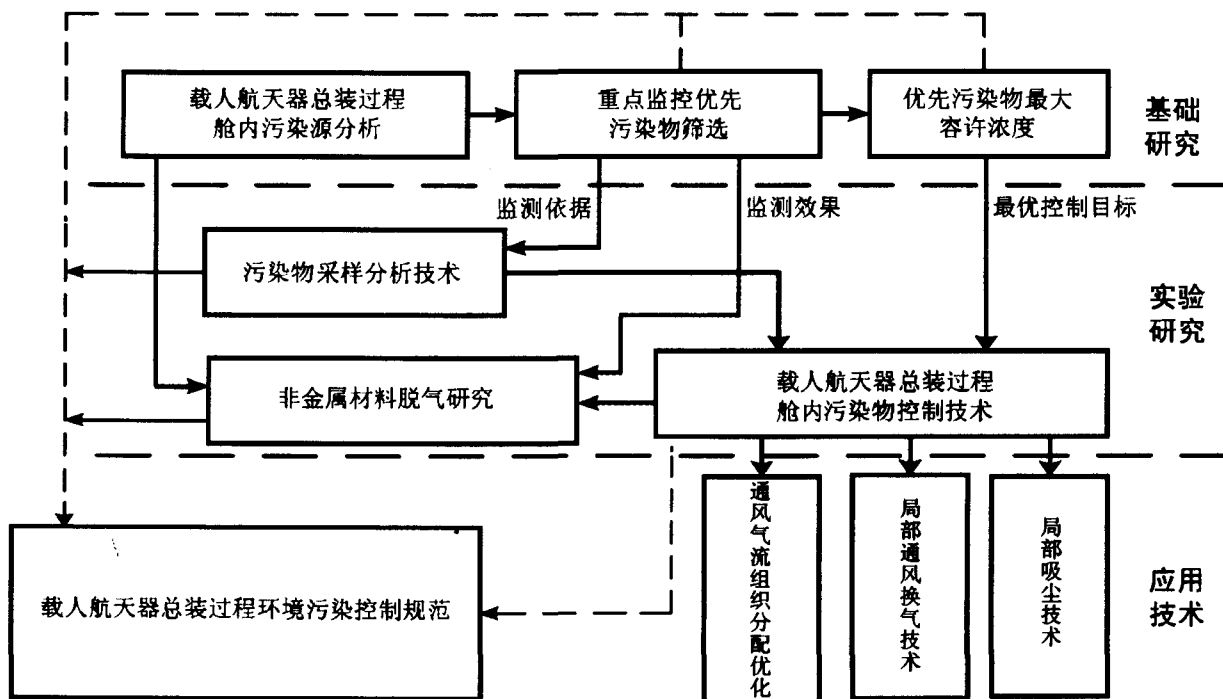


图 2 研究内容之间的相互关系

其中基础研究由载人航天器总装过程舱内污染源分析、重点监控优先污染物筛选、优先污染物最大容许浓度等部分组成。主要针对污染源和污染物开展研究工作。

实验研究包括污染物采样分析、非金属材料脱气研究、部分污染控制技术等,主要针对污染散发和采样分析开展研究工作。

应用技术包括通风气流组织分配优化、局部通风换气技术、局部吸尘技术,面向污染控制技术的应用。

5 结 论

通过以上研究工作,将能最终形成载人航天器总装过程环境污染控制规范,指导整个总装过程污染物的浓度控制,保证载人航天器舱内气体质量。

上述研究从理论及应用方面将形成关于载人航天器在总装过程中污染物控制的技术体系,为保障航天员在舱内环境中的生命安全创造有利条件。◇

参 考 文 献

[1]王普秀.航天环境控制与生命保障工程基础[M].北京:国防工业出版社,2003.145-156

[2]Perry J L. Trace chemical contaminant generation rates for space-craft contamination control system design [R]. NASA Technical Memorandum 108497, Alabama: Marshall Space Flight Center, 1995. 1-8

[3]Wieland Paul O. Designing for human presence in space: an introduction to environmental control and life support systems [R]. NASA RP21324, Alabama: Marshall Space Flight Center, 1994. 204-205

[4]戚发轫,朱仁璋,李颐黎.载人航天器技术[M].北京:国防工业出版社,1999.

[5]王红瑞.环境质量的模糊综合评价[J].北京师范大学学报,1997, 33(4): 543-547

[6]李凡修.相似率法在室内空气质量评价中的应用[J].数理医药学杂志(5)

[7]庞丽萍.载人航天器空气质量模糊综合评价灰关联分析.北京航空航天大学学报,2005年5月第31卷第5期.

(上接第 3 页)

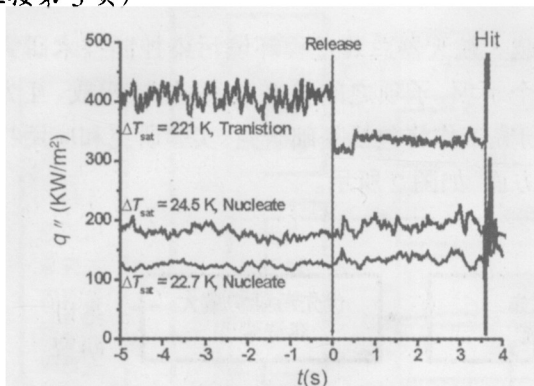


图 5 不同重力水平下的热流密度

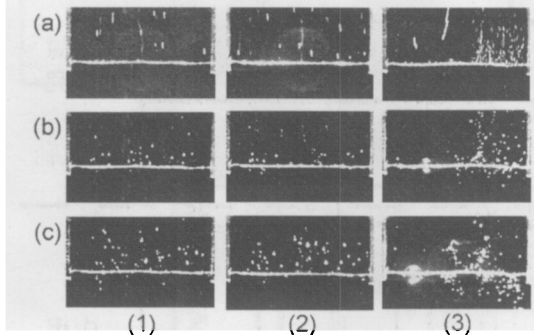


图 6 不同重力水平下的气泡形态

(1) $\Delta T_{sat} = 22.7$ K,核态沸腾; (2) $\Delta T_{sat} = 24.5$ K,核态沸腾;
(3) $\Delta T_{sat} = 221$ K,双膜态过渡沸腾。
(a) $t = -2$ s, (b) $t = 1$ s, (c) $t = 3$ s。

下能够达到稳定状态,其实验数据可以反映微重力环境的结果。图 6 则给出了与图 2 对应的 3 个实验工况下不同重力环境中(即释放前、后)的典型的气泡形态。

此前还进行了微重力环境下流体物理气泡热毛细迁移实验研究,池沸腾传热实验研究,粉尘爆燃机理研究,以及燃料电池第一阶段微重力落塔实验等。2007 年上半年一些高校到落塔进行了有关学科的微重力实验,均获得了满意的实验研究结果。目前 NMLC 落塔每天可以进行两次微重力实验。◇

参 考 文 献

[1]M G Wei, L Q Tian, Z H Chi, S X Wan, W R Hu. Recent Progress in NMLC Drop Tower. Proceedings of 2nd China-Germany Workshop on Microgravity Science. Dunhuang, China, September 1-3, 2002: 263-268.

[2]Straub J. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity. Adv. Heat Transfer, 2001, 35: 57-172.

[3]Di Marco P, Grassi W. Motivation and Results of a Long-Term Research on Pool Boiling Heat Transfer in Low Gravity. Int. J. Therm. Sci., 2002, 41(7): 567-585.

[4]赵建福,万士昕,刘刚.过冷池沸腾落塔短时微重力实验研究.工程热物理学报,2007,(1):98-100