

国家微重力实验室落塔及微重力实验研究

韦明罡 万士昕 姚康庄 解京昌
(中国科学院力学研究所)

摘要 落塔是短时、经济的微重力实验地基自由落体重要设施。中国科学院力学研究所国家微重力实验室落塔,在近三年来我国空间计划一些重要项目的预研中发挥了重要作用。

关键词 微重力 落塔 实验研究 系统运行

1 引言

进入 21 世纪以来,我国微重力科学的兴起和目标已不仅仅停留在理论研究探索阶段,而是正在朝向应用空间技术的深度发展。随着神舟飞船载人航天成功,发展建立空间站、开发利用外层空间、探索深层空间等空间计划已成为当前我国科技发展的重要战略目标之一。国家微重力实验室(NMLC)落塔即是我国进行微重力科学与应用空间技术研究的重要设备。作为国家微重力实验室的主要公用设备之一,NMLC 落塔既要满足我国空间计划一些重要项目预研的需要,又要在技术性能上接近国际先进水平,在国际上对外开放,以显示我国科学技术的实力。

世界上多个国家拥有落塔实验设施。比较典型的是著名的德国不来梅大学应用空间技术与微重力中心(ZARM)的 Bremen 落塔。Bremen 落塔高 146m,试件从 110m 高的定位平台自由下落,获得 4.7s 的微重力时间;近年来 Bremen 落塔在雄厚的科研资金资助下,实施了上抛方案的科研改造并取得成功,搭载的试件在双行程失重的条件下其微重力时间可达到近 9s。它吸引了各国科学家参与该落塔进行微重力实验研究,已成为国际瞩目的一座微重力实验重要设施。中国的 NMLC 落塔高 116m,试件从 83m 自由落下(图 1),可获得 3.6s 的微重力时间(图 2),微重力水平达到 $10^{-5}g_0$ 的量级,最大冲击加速度 $<15g_0$ (图 3),目前是国内最高且获得微重力时间最长的落塔,为我国研究流体物理,燃烧,非金属材料、航天飞行器液体管

理、某些高精度感应仪器研制试验和载人航天飞行器防火技术等诸多学科的科学家进行微重力实验提供了良好的平台。

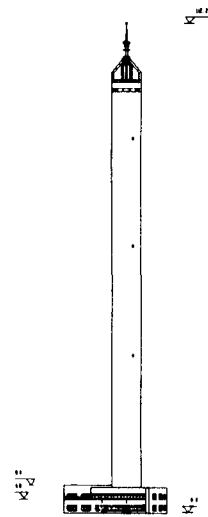


图 1 NMLC 落塔

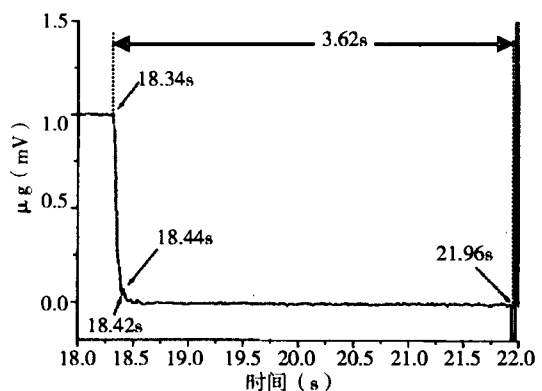


图 2 微重力实验曲线

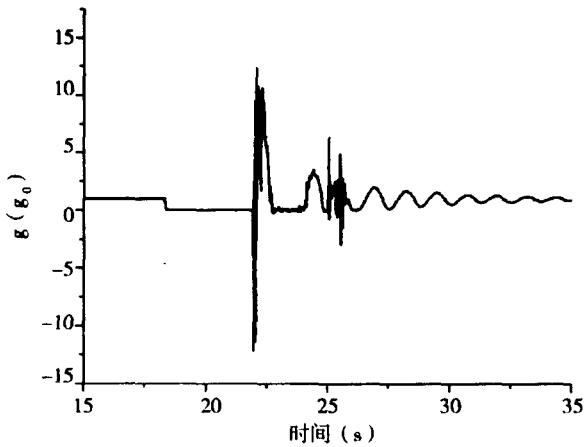


图 3 冲击加速度曲线

2 NMLC 落塔

NMLC 落塔自由落体设施是根据我国当时的国情而建的,主要由落舱、提升-吸合-释放分系统、回收分系统和测量与控制分系统组成,一些重要部套采取的设计方案与国际上少数拥有落塔设施的科研发达国家不尽相同,其功用和技术性能比较独特。本文主要介绍 NMLC 落塔自由落体设施目前的运行状况以及与用户搭载载荷关联的机械界面和电界面,关于本套设施的详细介绍有另文论述^[1]。

落舱分为双舱和单舱两种舱型,总实验落舱质量(包括内、外舱自身质量及用户搭载质量)为 630kg。

双舱采用内舱和外舱组成的内、外套舱结构,实验载荷安装于内舱载荷平台上,内、外舱之间抽真空至 30Pa。实验过程中外舱在大气环境中自由下落,而内舱是在真空环境中下落。由于内舱在下落期间受空气阻力的影响很小,其残余加速度可达到 $10^{-5}g$ 的量级。双舱主要用于对微重力水平要求较高的实验,如已进行的微重力环境下流体物理热毛细对流、液滴气泡迁移、流体界面现象,以及微重力环境下池沸腾传热、航天器液体管理等项目的实验研究。内舱有效载荷空间(即用户实验设备最大有效空间:直径×高度) $\leq \Phi 550 \times 700\text{mm}$;用户设备总重量 $\leq 80\text{kg}$ (含用户电池)。实验平台与辅助平台安装固定在纵梁桁条上,形成 2~3 个工作平台,在载荷空间范围内可根据试件安装要求沿纵向调节工作平台的高度。

单舱适用于对微重力水平要求为 $10^{-2} \sim 10^{-3}g_0$ 量级的实验研究,例如飞船防火材料表面火焰传播、燃

料电池、粉尘燃烧火焰特性以及固体燃料燃烧特性等微重力实验研究。与双舱相比,单舱的结构比较紧凑,没有内舱,不需要抽真空,用户的试件可直接安装在舱内特定平台上。单舱可搭载载荷总重量 $\leq 90\text{kg}$ (含用户电池);用户实验设备最大有效空间 $\leq \Phi 850 \times 1000\text{mm}$ 。

落舱的实验过程(以双舱为例)可概略描述为:用户搭载的试件在地面安装调试并经巡回检测确认工作状态正常后装舱;调整落舱(内舱)的质心;内舱挂锁在外舱盖下,使内、外舱底盘保持特定的轴向间距;内、外舱之间抽真空至 30Pa;落舱与吸合-提升-释放分系统对接后提升至 83m 释放平台定向定位;落舱从 83m 定位平台被释放后,内舱和外舱几乎同时下落,但外舱是在大气条件下自由下落,在外舱下落的同时,内舱在外舱内真空环境下自由下落,内舱下落速度比外舱稍快,大约经过 3.6s 时间,内舱落在外舱底盘上,与此同时落舱进入回收网转入回收阶段,落舱速度经过回收系统大功率能耗电阻网的有效制动,使落舱-回收网融为一体慢速下滑,从而速度逐渐衰减最终降到零,在 -8m 指定位置停止,至此实验过程结束。

测量与控制系统是落塔实验设施的重要组成部分之一,它直接关乎实验的成败与否,对用户而言则是能否获得实验结果。这也是检验实验系统运行正常的标准之一。

根据实验过程的需要,测控系统分为舱内测控系统、舱外控制系统和视频监视。

舱内测控系统的主要功能是测量内务数据和多路实验数据;提供开关命令并测量开关状态;通过数传电台实现无线传输功能。舱内测控系统根据微重力实验的特点设计:①双舱测控系统设备做到小型化,模块化,提高抗冲击抗震动的能力。②单舱测控系统根据大多数用户实验设备都有大功率温控设备且要求能够提供大容量直流电源的要求,在舱内配置了 90Ah 的直流电源,并通过逆变器提供 220V 交流电源(这部分电源重量均包含在用户搭载总载荷 90kg 之内。如果不用,可撤去)。③在双舱中配置了 2 套舱内图像记录器,这对微重力实验的图像数据分析和判断实验结果起到最重要和最直观的作用。④双舱内的 2 套图像记录器在每次实验中也可以同时高质量记录下舱内实验的图像数据。⑤在单舱/双舱

内均配置了重力开关控制器,当落舱释放随即进入微重力状态时,可通过重力开关控制器自动控制舱内实验设备,如阀门的开闭,光源和点火电路的通断等。

微重力实验过程中通过中央控制室主控机控制 83m 释放系统和 22m 回收系统,实现对落舱的释放与回收。落舱在下落过程末期进入回收网后,在程序控制的特定时间内要求保持舱—网—体带制动下滑期间不允许实验舱脱离回收网是落舱回收成功的关键。2005 年落塔科研人员完成了对回收系统大功率能耗电阻网进行全面改造实现了这一目的。这项卓有成效的技术改进有效控制了落舱自由下落进入回收网后回收网组件下滑的速度,从而制约了回收过程中落舱二次入网姿态以及舱—网—体带制动自由下滑的姿态,落舱得到了安全可靠的回收。

落塔实验系统实现了视频监视。在单舱/双舱内均配置了 2 路无线遥传图像发射机,每 2 个通道图像相互切换可组成 1 路无线遥传图像。目前单舱/双舱均可以为用户显示 4 个通道模拟图像。在实验过程中,用户在中央控制室可以同时实时监测并记录下舱内的 2 路实验图像。在双舱的内舱解锁/锁闭这一关键部位配置监控图像电路,提高了电气工作的安全性和可靠性。舱内 CCD 的监视信号由信号线经舱内的特制线束连接到安装于舱外上盖的无线发射机,发射的信号由 83m 检修平台上的接收机接收后,通过同轴电缆送入中央控制室的录像机,再由录像机录像后传送到监视器上。

在落塔的实验过程中有多路 CCD 监视信号。在中央控制室的监视器屏幕上可以看到实验系统在运行过程中相关的重要工作部位工作状态。用户通过中央控制室的遥测视频通道,在专用监视器上可以监控舱内实验装置工作状态并记录图像。

近 3 年来,落塔科研人员对落塔多项装备进行了卓有成效的改造,提高了落塔运行可靠性和安全性。从 2006 年下半年以来,落塔共进行了十余个研究课题的数十次微重力试验,系统运行成功率达到 100%。事实证明落塔已进入正常运行状态。仅去年 10 月份就成功进行了流体物理热毛细对流、液滴迁移、接触角微重力实验研究以及粉尘燃烧机理、非金属材料燃烧火焰扩散等多项短时微重力落塔实验,取得了一系列积极的成果。

利用 NMLC 落塔开展了短时微重力环境下的过冷池沸腾传热实验研究就是一个典型例子。沸腾传热因其高传热能力在地面和空间科技实践中有着巨大的应用价值。航天技术的发展,大功率、高集成度设备的研制日益受到重视,也因此使微重力沸腾传热研究成为微重力科学前沿。但是,微重力实验受到尺寸、功耗、质量及实验持续时间等诸多严格的限制,目前相关研究还非常有限^[2-3]。“过冷池沸腾落塔短时微重力实验研究”项目采用自行研制的一套控温池沸腾实验设备,利用 NMLC 落塔提供的 3.6s 微重力时间,研究了丝状加热表面微重力过冷池沸腾现象^[4]。该实验设备加热元件为长 30mm、直径 60 μ m 的铂丝。实验工质为 0.1 MPa 压力下过冷度为 24 $^{\circ}$ C 的 R113。在地面常重力和落塔短时微重力实验中,观测到核态沸腾和双模态过渡沸腾现象。对核态沸腾,微重力传热效果稍有增强而汽泡形态却呈现出剧烈变化。对双模态过渡沸腾,微重力下膜态沸腾部分有明显收缩,但热流密度值仍比常重力时减小 20%。图 4 为该研究项目一次典型的落塔实验中残余重力加速度 g 、热丝电阻 R_w 和加热功率 Q_e 随时间的变化情况。图中清楚地表明,热丝电阻在实验过程中很好地维持了恒定,表明加热面温度控制系统工作正常。加热功率的变化则反映了不同重力环境中传热效率的变化。

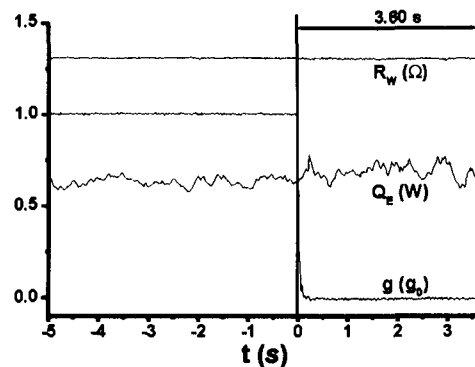


图 4 落塔实验典型过程

实验中观测到了核态沸腾和双模态过渡沸腾现象。图 5 所示的为一些典型沸腾状态的热流密度随时间的变化情况。可以看到,在落舱释放后除初期短暂的变化外,实验参数呈现出明显的统计稳定性,这表明沸腾状态在落塔所提供的 3.6s 短时微重力环境

(下转第 22 页)

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)

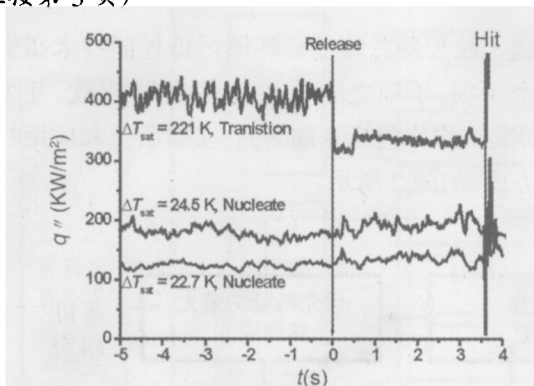


图 5 不同重力水平下的热流密度

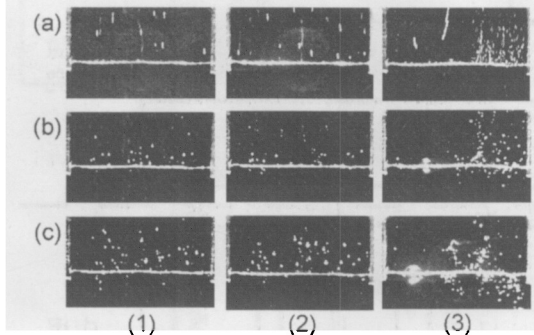


图 6 不同重力水平下的气泡形态

(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 Macro 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