

学科发展

微重力科学及其应用研究

胡 文 瑞

(力学研究所)

一、微重力科学的主要内容

空间科学及其应用是当代高科技的前沿之一,微重力科学及其应用则是近来从中涌现出的一个新领域。随着空间飞行试验的开展,微重力研究日益活跃,已经成为各国空间利用计划的主要内容之一,并正在不断取得新进展。微重力环境提供了地面不能或难于实现的实验条件,从而可以研究物质运动,特别是流体运动的新规律。微重力研究的诱人前景还在于其商业应用和工业开发。人们预计,在微重力环境中生长蛋白质晶体和半导体晶体,以及加工其它高品质和特殊性能的新材料,有可能成为今后最重要的空间产业。

微重力科学主要包括三方面的内容,即微重力流体科学、空间材料科学和空间生物技术。微重力流体科学包括微重力流体物理和输运现象、燃烧以及流体管理等;空间材料科学包括电子材料、玻璃和陶瓷、金属、合金和复合材料等;空间生物技术包括蛋白质等生物大分子的晶体生长,以及生物材料的分离和提纯等。由于空间材料科学和生物技术研究越来越强调探索微重力环境中的基本规律,从而促进了流体物理与材料科学、生物技术的结合。微重力流体科学本身还包含许多与物理、化学相结合的前沿学科问题。流体科学越来越受到重视,它常常被

微重力科学的主要内容

微重力流体科学: 它是理解微重力过程的基础,是改进空间材料过程的先导。其主要内容包括对流和扩散输运、多相混合、临界点现象、流体的热物理性质、毛细过程、流体管理、燃烧。

空间生物技术	空间材料科学
主要任务: 通过基础研究、过程发展研究和产品发展研究,生产纯净药物和生长生物大分子。 主要内容: 包括粒子和大分子电动力学和动力学,细胞培养,大分子结晶,生物流变。 关键技术: 电泳仪,生物晶体生长器,循环式等聚焦装置,生物反应器。	(1) 玻璃和陶瓷方面: 主要任务: 研究低损耗玻璃纤维和高品质玻璃,生产高强度、高热抗、低密度陶瓷。 主要内容: 玻璃的生长、纯度和结构的研究。 关键技术: 悬浮技术,成壳技术和纤维拉细技术。 (2) 电子材料方面: 主要任务: 研制大的、完整的、低杂质含量和缺陷少的晶体。 主要内容: 扩散控制,分凝的性质、原因和模型,对流的影响。 关键技术: Bridgeman 生长,溶液生长,气相生长,悬浮区生长炉(等温、梯度、镜面反射)。 (3) 金属合金和复合材料方面: 主要任务: 发展微重力冶金学。 主要内容: 两相混合物的粗化和稳定性,两相熔体的固化和合金分凝,尺度定律,热物理性质,离子溶液形成金属时的沉淀,对流作用。 关键技术: 先进的定向固化炉,电磁悬浮炉,过程实验炉等

强调成微重力科学的核心。

微重力科学的主要任务、内容和关键技术归纳为表 1。不难看出,微重力科学的蓬勃发展不仅在于其学科上的重要性,还在于它的重大应用前景。

二、微重力研究的发展趋势

微重力研究需要在微重力环境中进行,最好的长期实验环境是绕地球近地轨道运行的空间站或者自由飞行器。美国阿波罗飞船和苏联礼炮号空间站上的初期微重力实验所显示的新现象,揭开了微重力研究的新篇章。现在,苏联和平号空间站上的大量空间材料科学研究,美国航天飞机上的微重力研究,以及 90 年代开始的更大量空间实验机会,使微重力研究在本世纪内可望取得重大突破。

由于空间实验耗资巨大,一般在进入空间飞行器实验前,要在地面进行大量的预先研究,并发展了许多短时间的微重力实验设施。在自由落体的系统中可以得到微重力条件,由此而建造了落管和落塔。落管是内径为几十厘米和长度几十至上百米的管子,将样品放在顶部,释放后自由下落,在底部被回收。落管实验可获得几秒钟的微重力时间,主要对象是金属和合金的深过冷研究。落塔一般是口径较大的自由落体设施,它的释放器往往是一个封闭容器,实验装置可以在容器中作相对运动以获得较好的微重力条件。落塔主要用于微重力燃烧和流体物理方面的研究。另外,从高空气球上释放实验舱也可以得到几十秒钟的低重力实验环境。由于载人航天的非金属材料需进行防火实验,许多国家都建有高度超过百米的落塔。利用飞机进行抛物线飞行时,可以重复得到每次半分钟左右的低重力条件,它对于航天器训练,大型仪器和设备的检验,以及某些微重力研究都是有效的方法。对微重力研究更为重要的是利用探空火箭,它可以提供几分钟的实验时间,实验环境可达到 $10^{-4}g$ 左右。各主要空间大国都把微重力火箭作为重要的实验手段,今后的发展方向是增加飞行高度,将微重力实验时间延长到十几分钟,甚至 20 分钟。在地面实验室中进行大量的理论和实验研究,利用短时间的微重力设施进行预先研究,然后争取机会做空间实验,这是多数微重力研究的途径。

美、苏从 60 年代实现载人航天以后,即开始了空间材料制备的试验,70 年代进行了广泛的探索。当时认为,空间实验在失重或零重力条件下运行,那里使对流和沉淀都消失,扩散过程完全控制着材料的制备,因而可以加工出大尺寸的、完整的晶体,均匀的或特殊性能的合金、复合材料及金属,超纯的,特殊成分或极规则形状的玻璃或陶瓷,以及分离和提纯昂贵的药物。美、苏为此而进行一些商业化研究计划。大量的实验表明,空间飞行器中的实验结果远比人们预计的复杂得多,许多空间实验结果与申请报告设想的正好相反,空间制备的材料有些还不如地面制备的好。分析其原因,主要还是实验环境的问题。尽管在飞船中人可以飘浮起来,但那里并不是零重力,而是微重力或者低重力环境。在微重力环境中,各种在地面被浮力所掩盖了的次级效应变得突出了,产生了流体的对流、迁移,以至振荡,这些因素破坏了预期的纯扩散过程。只有认识并理解了微重力环境的这些规律,才能开展应用研究,并逐步开创空间材料商业化的美好前景。

各国的微重力研究在今后 10 年左右的时间将更加强调基本规律的探索,理解和掌握流体的运动规律及材料制备中的物理化学问题。与此同时,将积极探索新的材料和加工,以及商

业应用的可能性,促进空间研究的工业应用。下个世纪初,空间材料的商业化应用前景可望明朗,同时将发展人类探索行星过程相关的微重力研究计划。在基本规律的研究中,微重力流体科学处于中心地位。美国强调 8 个重点项目,即扩散现象和双扩散流、多相流和传热、磁流体力学和电流体力学、电动理学和电化学、毛细现象、成核和生长现象、固液界面动力学、数值模拟和软件库发展。这些项目的深入研究将直接有助于空间材料科学的开展。此外,临界现象和相对论等物理和化学研究也受到重视。由于微重力科学还处于深入探索的阶段,因此空间材料过程的研究重点也在不断地调整和深化。近来,空间蛋白质生长受到很大重视。目前的大量空间实验证明这是一个很有应用前景的领域。通过长期的有人操作的实验,以及将 X 射线晶体诊断装置放在空间直接分析样品,估计今后会取得突破性的进展。空间材料的机理研究将为今后的应用奠定基础。许多人将应用的探索重点瞄准价格昂贵的非线性光学和探测器元件材料,并根据材料制备的需要探索空间材料的加工方法。

微重力研究项目的周期一般都比较长。从提出新的构思,到进行概念的可行性分析,进而做深入的实验室研究,然后利用各种手段确认低重力的影响,这个过程一般需要 7 年左右。在大量地面工作的基础上,发展关键性的空间实验硬件和进行空间实验,并不断地与地面研究相结合以验证所提出的构思,这个过程又需要相当长的周期。因此要求在课题的选择上必须十分慎重。美国今后几年的研究重点将强调蛋白质晶体生长,流体、界面和输运现象,材料研究,燃烧科学,无容器材料过程,生物技术和基本现象等方面。与此同时,商业应用计划的探索也在努力地执行。苏联利用其空间实验的优势,大力促进空间材料科学和应用的发展。一方面以苏联宇航总局为代表,组织工业部门大力开展空间材料的加工计划;一方面以苏联科学院空间科学研究所为主,开展以半导体材料及合金材料为重点的空间材料科学研究。这两方面的探索将会持续地进行。西欧各国也以极高的热忱进行微重力研究,所用年经费总额已略超过美国。他们在借鉴美国多年工作的基础上,很有独创性地摸索出一条有特色的道路,特别是强调较深入的基础研究。日本的科技厅,文部省和通产省组织了大量单位参予微重力研究,基本上是跟踪美国的足迹,更侧重于应用研究。

人们估计,微重力研究在今后 10 年会有重大的突破,各国政府的投资逐年增加,其重要原因是 90 年代有大量的空间实验机会。苏联和平号空间站每年有数百小时的微重力实验时间,并将于 1992 年在和平号空间站上对接一个专门进行材料研究的舱段。与此同时,每年还有一颗回地的微重力实验卫星 ϕ OTOH 进行无人的实验。90 年代中后期,预计苏联将发射功能更大的新一代空间站。在 90 年代前 5 年,西方国家将充分利用美国航天飞机进行微重力实验,每年有 5 次左右的中舱实验任务和 2—3 次空间实验室的任务。1996 年国际自由号空间站入轨以后,将更加强调长期有人参予的、需要更大功率的项目。美国宇航局 (NASA) 计划发展 6 个共用性的实验装置,即先进的蛋白质晶体生长装置、空间加工炉装置,标准无容器加工装置、流体物理及动力学装置、生物技术装置和燃烧装置。与此同时,西方的一些空间自由飞行器将入轨工作;1991 年西欧的可回收飞行器 EURECA 首次入轨并从事微重力实验,以后预计每 2 年发射 1 次,在轨道工作 6 个月;1992 年 MBB 和 GE 公司联合发射自主的微重力工业飞行器 AMICA;1993 年日本将发射空间飞行单元 SFU 进行微重力装置的实验;1998 年欧洲空间局计划发射有人照料的自由飞行器 MTFF。由于自由飞行器可以有长期的实验时间和更理想的微重力环境,美国许多科学家也在呼吁发展与空间站同轨的微重力研究自由飞行

器,它依靠空间站提供维修、补给,通讯等服务,同时又维持较好的实验和工作环境。这样就充分发挥了空间站的优点。

在本世纪末和下世纪初,人类将开始新的探索空间历程,即探索更遥远天疆的载人航天,诸如建立月球站和探索火星等。这些任务对微重力科学和应用提出了新的要求,诸如流体动力学和输运现象中的多相流、相变传热和流体管理等,带颗粒介质的力学中的土力学和流变学等,燃烧学中的防火及能源问题,以及材料生产和资源利用等材料加工的项目。可以预料,微重力科学和应用将保持其发展势头,在更长远空间探索计划中发挥重要作用。

三、我国微重力科学及其应用研究

我国微重力研究始于 60 年代以来航天技术的需要。流体管理问题的研究,诸如微重力环境中的充液腔问题等,为工程设计提供了可靠的依据。为此,在航空航天部北京强度环境研究所建立了 38 米高度的落塔和在飞行实验研究所发展了微重力实验飞机。另一方面,探空火箭 T7 和 T7A 具有 170 公斤的有效载荷,可发射到 100 公里以上的高度。它被用来进行生物学实验、技术发展试验及其它研究。

为了促进我国空间科学和技术的中长期发展,近年来制订了一些发展规划。许多单位都建议将微重力研究做为一个重点项目,予以优先安排。在此背景下,微重力科学和应用的研究正在逐步地开展,重要的实验设施已经或正在安排建造,理论和实验研究也取得了一些初步的成果。

我国微重力科学及其应用是按微重力流体科学,空间材料科学和应用以及空间生物技术三个主要方面安排的。微重力流体科学的重点是流体物理问题,包括对流和稳定性、软边界问题、电流体力学和磁流体力学、两相流等。此外,还要开展微重力燃烧的机理及应用研究,并创造条件适时地进行临界点现象的探讨。空间材料科学及应用将以半导体材料的制备为重点,开展相应的机理研究,为今后转入应用研究奠定基础;与此同时,进行金属和合金以及玻璃和陶瓷材料的研究,包括凝固过程、深过冷过程、无容器过程、成形技术等。空间生物技术将以蛋白质晶体生长和电动理分离过程为主,同时开展有关空间生物学的研究。结合航天技术发展的需要,将继续进行流体管理的有关问题研究。

中国的对地观测回地卫星可以在近地轨道运行 1 周,其重力水平可达 $10^{-3}g$,是进行微重力研究的很好工具。从 1987 年开始,我国学者利用该卫星进行了材料制备、蛋白质晶体生长、空间生物学等多项试验。中国科学院半导体所和航空航天部兰州物理所联合开展了材料制备的试验。他们研制了我国第一代空间晶体加工炉,采用移动加热器法于 1987 年进行了卫星搭载试验。这次试验包括砷化镓、碲镉汞和铋化铟等晶体生长,铝-锂、铝-铌、铋-镓、铝-铅、铋-铅等合金的重熔和凝固,以及其他材料试验。试验取得预期的成果,反映出微重力环境中材料加工的许多特征,迈出了可喜的第一步。在 1988 年的卫星实验中,改进的空间晶体加工炉再次进行了材料加工试验,物理所利用溶液生长法首次获得了空间生长的碘酸锂晶体。这些工作受到了国际同行的关注。

中国科学院上海分院组织有关生命科学的研究所进行了多次卫星实验,其内容包括植物种子、微生物、虫卵、昆虫等的实验,研究微重力环境、辐射及节律变化的影响。我院生物物理

所还进行了空间生长蛋白质晶体的实验,取得了初步结果。

利用我国卫星技术提供的条件,开展无人操作的 1 周左右的实验,将是今后一段时间发展我国微重力研究的主要手段。为了进行基本规律的研究,要充分地进行实验前的准备工作,研制较先进的实验设备,改进卫星上的实验环境,使微重力实验能定量化。从实验手段上看,我国的火箭技术提供了发展微重力实验探空火箭的良好基础。由于卫星实验的机会难得,利用探空火箭将是我国开展微重力研究的重要手段。与此同时,将利用飞机进行某些低重力的实验研究。显然,微重力实验还需要安排一些空间载人实验的项目,这只能在下一步再考虑。

在地面设施中最主要的是落塔和落管。我院物理所于 1987 年建成 5 米长的落管,进行合金材料的深过冷研究。最近,他们又在建造 24 米落管,不久将投入运行。航空航天部北京强度环境研究所准备在 38 米高的落塔基础上,建立 62 米高的落塔。在更高的落塔未建立之前,利用气球释放实验舱进行微重力实验将不失为一种有用的手段。我院空间科学和应用研究中心已研制了气球的微重力实验舱,并与高能物理所和大气物理所联合进行了技术实验。

地面研究是微重力科学及其应用的基础,它包括理论分析、数值模拟以及相应的实验研究。在较小尺寸、确定的温度场或离心力场的情况下,可以减少浮力的相对重要性,从而模拟某些微重力过程的机理。这种地面模拟实验是研究微重力过程的有效方法。我院力学所开展了表面张力梯度驱动对流的理论和实验研究,对振荡对流的机理进行了解释。我院物理所、半导体所、沈阳金属所、上海硅酸盐所等单位进行了空间材料科学的研究。此外,哈尔滨工业大学、西北工业大学分别成立了微重力研究中心,开展空间材料科学的地面研究;航空航天部的兰州物理所、北京航空材料研究所等单位参加了空间材料的卫星实验工作;航天医学工程研究所长期从事与载人航天有关的医学工程和生命科学研究。可以看出,微重力科学和应用研究已经有了一个良好的开端,可望能逐步取得重大的成就。

四、我院微重力研究的发展战略

我院的流体物理、材料科学和生命科学研究不仅在国内具有优势,而且在国际学术界也有一定的影响,其表现为:在这些领域中有一批学术带头人和较强的研究队伍,建成了一批先进的研究设备,并取得了一批优秀的科技成果。特别在当前强调微重力基本规律研究时,这种优势更显突出。最近,我院已将微重力科学基础研究列入“七、五”重中之重的基础研究项目,予以资助。院外许多方面都呼吁和要求我院应在中国的微重力研究中起到核心作用。

不过也要看到,我院目前的工作还是有差距的。微重力科学和应用并不是简单的流体科学、材料科学和生物技术的总和,而是这三个方面互相渗透,交叉发展而形成的新领域。流体物理与材料科学相结合要求仔细地分析晶体生长和材料凝固过程中的对流和扩散过程,诸如软边界和形态稳定性等,特别是微重力环境中的规律。生物材料的分离和提纯时需要发展电液体力学和电化学的理论和实验。为了发展微重力科学和应用,迫切需要形成一支素质较高的研究队伍,在当前只能通过促进有关学科专家互相结合来形成。为此,需要加强学科间的交流和相互渗透,并逐渐地形成微重力科学和应用的研究实体。与此同时,要加强青年人才的培养。

我院的微重力研究实体可以有不同的层次,但应有一个核心开放实验室,它与院内有关所

的微重力研究小组密切联系,同时向院外单位开放。微重力实验室应逐步发展成为我国微重力研究的地面研究中心,需要时也可为国家制订发展计划提供建议及协调全国的微重力研究。

实验研究在微重力科学和应用中有极大的重要性。我院应该充分利用现有的各种设备开展地面模拟和机理的实验研究。与此同时,还必须发展短时间的微重力实验手段,诸如落管和落塔、气球、飞机和微重力火箭,也要努力争取卫星实验的机会,并适时地发展我国的微重力卫星。我院要与航空航天部密切合作,统一规划好利用飞机、探空火箭和卫星做微重力研究实验的计划。我院的工作重点要放在精选课题,发展先进的实验仪器和设备,协调实验的有效载荷总体,以及进行空间实验等方面。争取经过 10 年左右的努力,使我国微重力科学的重要方面能取得国际水平的成果,并为进一步的应用研究奠定基础。我国的科研经费比较低,要想在比科技发达国家投资少得多的条件下,做出高水平的研究成果,这就需要精选研究目标和加倍地奋发努力。

在现阶段和今后相当一个时期,各国的微重力研究经费主要来自国家的拨款,我国也不例外。进行微重力研究的费用是相当高的,远远超过了我院的承受能力。我院只能在力所能及的范围内,支持一部分微重力科学的基础研究,形成研究集体并发挥学科的综合优势。我院的微重力研究必须纳入国家的有关计划,统筹安排。特别是地面的重大设施和微重力的空间实验都是耗资巨大的项目,只有获得国家计划的资助才能发展。当然,我国的微重力研究并不局限于中国科学院,院外不少单位的工作也有许多特色,我们要加强横向联合,共同为发展我国的微重力科学及其应用而努力。

加强国际合作和交流对发展我国的微重力科学及其应用极为重要。要通过各种渠道,掌握国际上微重力研究前沿的情况,仔细分析吸收和消化先进的科技成果。事实上,美、苏、西欧、日本的微重力研究,特别是空间实验的项目,有许多都是重复的。通过国际交流可以有助于在高的起点上工作,避免重复实验,提高经费使用的效率。要通过国际合作,争取空间实验(包括载人实验)的机会,促进微重力研究的进展。