

* 学科发展 *

微重力科学的发展与应用前景

胡文瑞*

李和娣

(力学研究所 北京 100080) (中国科学院基础研究所 北京 100864)

摘要 微重力科学是研究微重力环境中的物理学、化学、生命科学和材料科学等的一门新兴科学,它是载人空间活动的主要利用项目。

关键词 微重力科学

人类祖祖辈辈生活在地球环境中,处处都受着地球重力的作用。一旦进入“失重”状态,地球的重力作用几乎不存在,由浮力引起的对流,不同密度流体间的分层,重力平衡要求的压力梯度等地面常见的现象都几乎消失。微重力环境就是其重力大小比地球重力加速度 980cm/s^2 低得多的环境。微重力科学是研究微重力这种极端条件下的物理学、化学、生命科学和材料科学等的一门新兴科学。微重力科学并非简单地研究体系受力状态的变化,而是研究这种环境中出现的许多新的现象,这些现象在地面上被重力现象掩盖了;另一方面,微重力环境中为发展高精度实验,研究自然科学一些重大前沿问题创造了极好的条件。

微重力研究主要源于载人航天的需求。当空间飞行器在地球附近作圆轨道运动时,飞行器中受到的地球重力与离心力几乎平衡,可以使有效重力减到地球重力的 10^{-6} (即微重力),成为微重力或低重力的环境。为了能在这些空间飞行器中工作和生活,需要进行微重力研究;同时,这些空间飞行器也为微重力科学的发展提供了实验条件。一般认为,载人空间活动和空间站任务的主要利用项目是微重力研究。空间实验耗资巨大,机会少。为了提高空间实验的效益,除了必须加强地面研究外,还要利用自由落体设施(落塔、落管、微重力气球)、飞机抛物线飞行实验,以及微重力火箭等较短时间微重力手段进行预研。

1 微重力流体物理

重力是一个体积力,它对流体的平衡和运动有重要作用。所以,微重力流体物理有时被看作是微重力科学的基础。在地球重力环境下自然对流主要表现为浮力对流,而在微重力环境下的自然对流主要表现为表面(或界面)张力不均匀产生的对流。这种新型自然对流过程是微重

* 中国科学院院士

收稿日期:1999 年 3 月 26 日,修改稿收到日期:1999 年 6 月 4 日

力环境中传热、传质过程的基础。

在微重力环境中重力分层和沉淀现象的消失,为研究两相流和多相流提供了极好的条件。地面上重力对多相流的流型、传热和传质起着主导的作用,微重力环境中密度不同的多相可以相对均匀地混合,从而有助于研究不同相介质间的相互作用机理,建立多相流的量化模型。在火箭运行、航天飞行员生命保障系统、空间站工程以及月球开发等诸多项目中,都有微重力两相流的问题,需要进行深入的研究。而且,微重力两相流的研究成果正在用来改进地面上许多两相流传热和传质的问题,这些问题在地面的电站和许多工程中广泛存在。

最近,复杂流体的研究又成为一个新的热点。复杂流体泛指悬浮流体、胶体、混合液体、聚合物流体及液晶等。与简单流体不同,复杂流体一般是混合体,有其自身的结构特征。复杂流体的理论内涵和应用前景正越来越受到人们的关注,而微重力环境可以更好地研究分子间相互作用力与其它力的耦合过程。

在微重力流体物理中,还有磁流体力学、电流体力学等多方面的重要课题。可以看出,微重力流体物理发展了经典流体力学研究体系,奠定了空间利用基础,也为更好地理解地面的许多流体力学过程给予了帮助。

2 空间生物技术

空间生物技术是目前最具有应用价值的微重力研究项目,正在受到各方面的关注。

在微重力环境中的电泳分离可以比地面的产量高出几百倍,分离效率高几倍。微重力环境中可维持很大的浓度梯度,从而可以生长出比地面更大和质量更好的蛋白质单晶,足以进行蛋白质三维结构分析。微重力环境中可以进行三维细胞和组织的培养,新型的空间细胞培养器为组织工程开辟了新的前景。空间生物技术已经显示出巨大的活力。国际空间站计划中将放置一个X射线衍射仪,把空间生长的蛋白质晶体就地进行结构分析,向地面传回蛋白质三维结构图。三维低应力细胞培养已经生长出了人体的瘤组织,并且正在向临床应用发展。

空间生物技术已经展示出很好的前景,但对其过程的机理性研究还较弱。这正是微重力科学所要解决的问题,并且需要流体物理和材料科学的专家与生物学专家共同努力,来解决这些研究课题。空间生物技术的发展必将促进生物技术的量化和模型化研究,将物理学的分析和研究方法引入到目前以经验方法为主的生物技术研究。因此,空间生物技术的发展不仅在具体研究项目上,而且在研究方法上都将促进地面生物技术的发展。

3 空间材料科学

材料加工都通过相变时的成核和凝固来实现。在地面上,流体中的温度和浓度不均匀要产生浮力对流,从而影响材料加工的质量。微重力环境中浮力对流和密度分层都极大地减弱,为研究晶体生长和材料加工提供了极好的条件,可以更好地研究相变界面的成核与凝固过程及流体(熔体、溶液或气体)中各种场(温度、浓度、流动等)变化之间的关系,研究流体中的宏观场与相变后的固体微观结构之间的关系。当然,微重力环境中还有表面(介面)张力驱动对流以及热毛细迁移等新的传热、传质过程。从根本讲,微重力环境可以更好地研究晶体生长和材料

加工的机理,可以加工出比地面质量更好的材料。而且,空间材料科学的研究成果还有助于改进地面的加工过程。人们期待着在微重力环境中生长出大尺寸和高品质的半导体单晶,诸如砷化镓和碲镉汞等。人们希望利用微重力研究成果解决高品质合金的铸造问题。着眼于今后的月球开发和空间产业,空间材料科学和加工是一个十分重要的领域。

在材料科学研究中,各种输运系数的数据是非常重要的。地面上不可避免的对流效应,使各种扩散系数的测量误差很大,有时高达 100% 以上。特别是高温熔体的扩散系数的数据更是很少。微重力环境中浮力对流的作用基本消失,由此提供了进行扩散系数和交叉扩散系数测量的极好条件。这些数据不仅对空间材料生长是重要的,对于地面材料科学研究也非常重要。

由于空间实验的耗资大,人们不可能在空间反复进行材料加工的研究试验,而要求进行大量的地面预先研究,这种模型化的研究已经促进了空间和地面的材料科学发展。即使在地面,人们也开始用数值模拟和理论分析的方法进行材料加工研究,以减少实验的盲目性,提高实验的效率。

4 微重力燃烧

燃烧是一类剧烈的化学反应过程,但地面的燃烧过程都同时伴随着浮力对流。这两种过程相互耦合,为研究燃烧过程增加了难度,地面燃烧过程很少能用定量化的模型来描述。微重力环境中浮力对流基本消失后,为研究燃烧过程的机理提供了极好的条件。

微重力燃烧研究几乎涉及到燃烧学的主要对象,从固体颗粒燃烧、液滴燃烧、液池燃烧、非预混火焰燃烧、预混火焰燃烧、层流燃烧到湍流燃烧等各个方面。已经有一些定量化的理论模型可以与微重力燃烧的实验相比较,这个进展对于研究燃烧机理很有好处。微重力燃烧正在并将会进一步推动燃烧科学的发展。

载人飞行器中的防火是重要的安全问题。由于微重力环境中非金属材料的着火、传播和监测与地面重力环境中有许多不同,载人航天器中所有非金属材料都必须进行规范化筛选。这是微重力燃烧的一项繁重任务。

人们正试图通过微重力燃烧的研究,增强对燃烧机理的认识,进而改进地面热机的效率,改善燃烧产物对环境的污染。这方面已经有了一些初步的效果,经过进一步的努力,将会有很好的应用前景。

5 微重力基础物理

近年来,利用微重力环境进行重大基础物理研究已成为微重力科学的一个新兴领域,也有人把这个领域称为空间基础物理。

低温凝聚态物理是启动较早的项目,其中近临界点现象已经取得很好的研究成果。二阶相变的重整化群理论预言,比热值应在临界点处有奇异性。由于重力造成的静压梯度,使临界点附近不容易维持一个局域的高精度温度,因此地面实验未能获得比热的奇异性。经过多年努力,欧洲和美国都进行了航天飞机实验,获得了有奇异性的比热分布,验证了重整化群理论的正确。现在,一批低温凝聚态物理的课题已经做了安排,若干微重力实验已在计划之中。

等效原理是广义相对论的基础,从伽里略开始就在测量引力质量和加速度质量的等效性。现在,人们已经把测量精度提高到 10^{-12} — 10^{-13} 。广义相对论在本世纪初提出来以后尚未有直接的实验验证,而目前还有一些引力理论对广义相对论提出挑战。有人预计,如果把等效原理的测量精度提高到 10^{-15} 以上,有可能发现广义相对论的不足和问题。近10余年来,以美国斯坦福大学为首的一批科学家正在推进卫星验证等效原理(STEP)计划,希望利用微重力环境把等效原理的测量精度提高到 10^{-18} 。欧洲的科学家一方面参加STEP计划,同时也在发展自己的实验计划。欧洲空间局还在发展激光干涉空间天线(LISA),试图用空间 5×10^9 米臂长的天线探测引力波。这些空间探测计划无疑会把引力理论提高到一个新的阶段。

激光冷却是当代物理学的一个前沿,在地面实验室中利用磁陷阱的方法已经实现了所谓的物质第五态,即波色-爱因斯坦凝聚(BEC)。微重力环境可以减小地面诸多因素的干扰,而且可以实现物质的自由悬浮,因此可以使BEC的原子数密度比地面高出1—2个数量级,使激光谱线宽度减小1—2个数量级。这将极大地促进对BEC的研究,同时也可以提供比地面精度高2个量级的高精度时标。微重力环境中的激光冷却研究不仅具有理论上的重要性,而且也有重大的军事和民用价值,正在受到各空间大国的重视。

微重力科学作为一门新兴的前沿学科,30年来取得了巨大的进展。我国的微重力科学研究只有十年的历史,在国家航天领域高技术发展计划、国家重大科学工程、国家攀登计划、中国科学院和国家基金委的大力支持下,已组织起一支跨学科、跨单位、具有较高水平的研究力量,建成了一批先进的微重力研究基地和设施,已取得了一批高水平的学术成果,并在此基础上加强国际间的合作和交流,1999年5月10日发射成功的“实践五号”科学实验小卫星上搭载的两层流体微重力科学实验,是我国首次在空间开展的微重力流体科学实验研究。在小卫星绕极地轨道飞行中,通过卫星与地面间的遥测遥控,进行了8天30余次不同情况下的热毛细对流实验,得到了大量有学术价值的实验数据,实现了我国首次空间流体科学实验的遥操作。在小卫星上通过遥操作完成如此复杂的流体科学实验,并一次成功,在国际上也属罕见。

当前,面对国际空间站发展的挑战,面对微重力基础研究在重大科学问题上诱人的突破性进展和高科技产业的前景,我国应继续加强对微重力研究的支持,加强对微重力研究的组织和结构性调整,瞄准国际前沿,有选择的走出一条自主创新的道路,为国家为民族做出前瞻性的贡献。

参考文献

- 1 W. R. Hu and W. C. Chen. Microgravity, 1993, Q. 3(2—4):75—80.
- 2 International Journal for Microgravity Research and Applications, 1994.