

# 微重力环境利用\*

王景涛

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

葛培文

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

**摘要** 文章阐述了微重力条件下的流体物理基本现象的研究,包括流体和体积输运,扩散与质量输运,毛细与润湿、固化、成核与过冷、临界现象以及学科的相关性。继之,简要介绍了微重力实际应用,包括:太空材料加工,各种晶体生长,金属与合金、复合材料、玻璃等加工工艺;燃烧与微重力问题;生命科学中微重力利用问题(另文发表)。其间,顺便讨论了航天技术发展对微重力科学的推进与限制,针对我国卫星应用这个课题,以理论联系实际的方法进行分析评价。该文是对《微重力实验环境》一文(见1998年第7期《物理》)的补充。

**关键词** 微重力,航天,材料

## MICROGRAVITY ENVIRONMENT UTILIZATION

WANG Jing Tao

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

GE Pei Wen

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** As a supplement to a previous paper [Wuli (Physics), Vol. 27, No. 7], further applications of microgravity environment will be described. In the former article, we concluded that the microgravity has a greater deference on fluids than on solids, since the gravity force is not strong enough to change the solid structure. We first discuss the elementary phenomena of fluid physics under microgravity such as fluid and volume transport, diffusion and mass transport, capillary action and moistening, solidification, nucleation and supercooling, critical phenomenon, and the interreaction of the subjects. Then, a brief introduction to microgravity application will be given including material processing in space: crystal growth, processing of metals, alloys, composite materials, glass etc., and fundamental problem of combustion in microgravity. Life science studies in space will be discussed in another paper. The development of microgravity science depends closely on the progress of space technology, and this will be analyzed with particular reference to the applications to Chinese satellite.

**Key words** microgravity, astronautics, material

自从1957年有了人工卫星以来,相继出现了载人飞船、天空实验室、空间站、航天飞机、专用空间实验平台,从而获得了长时间微重力局部环境,表明人类掌握了太空往返、设站、在太空进行科学实验、人-人轮换接力等技术,发展空基自动化和遥科学(Telescience),使地基科学家也能进行远程受控操作,使地-空、人-机资源形成共享系统,并在此基础上完成了一些初步实验。通过初期工作,出现了微重力科学,为利用这种环境创造了条件,取得了一些认识,得到了能显示微重力环境特征的物质是流体和熔融的固体的结论。

微重力环境的利用,在某种意义上是随着载人

飞行而提出的,实际上是航天技术的发展促进了微重力科学研究的发展。中国也不例外,先有中国的返地卫星技术,才有中国微重力实验飞行平台。微重力环境提供了一种极端的物理条件,可这种物理条件的利用目前还是昂贵的:运送1kg实验设备和样品大约需22000美元(见《Space News》,1999年5月10日),宇航员操作1小时约需60000美元。即使资金雄厚,时间安排上也不允许很快,一般要等待一年以上。例如加拿大昆斯大学的流体扩散实验QUELD-I(QUELD是Queen's University Ex-

\* 2000-07-06 收到

periment in Liquid Diffusion 的缩写) 是 1992 年 10 月 STS - 52 飞行时搭载实验, 而 QUELD - II 是 1996 年在俄国 Mir 上进行实验的, 这两次时隔 4 年的同类实验是在俄、美、加三国的合作下完成的。俄国的和平号空间站、美国的航天飞机、加拿大的实验设备, 加在一起, 实力可谓不一般, 还是经过 4 年才能与前一次实验相接。这是微重力科学和应用的限制条件, 严酷の利用条件限制着这个领域的发展。

从载人航天出现至今, 人们对微重力科学与应用进行了约 30 年的探索, 到目前为止还没有出现重大突破。是否长此以往慢下去呢, 不尽然。美国 NASA 准备利用 3 种可重复使用的 X 系列飞行器, 大幅度降低有效载荷和把人送入轨道的成本, 下一代航天运输系统低轨道运输成本将从目前的每千克 22000 美元降到每千克 2200 美元, 预计大约在 2000 年试飞 X - 33 飞行器, 2001 年试飞 X - 37。21 世纪第三代可重复使用的运载器“航天客机 100”(Space-liner 100), 有可能降到每千克 220 美元。两次降两个数量级还是有吸引力的。国际空间站 (ISS) 将取代和平号空间站 (Mir), 前者比后者宽敞 4 倍, 与足球场面积相当, 重 460 T, 能源 110 kW, 可载 6, 7 人飞行在 400 km 的太空。有较好的基础设施, 能进行蛋白晶体生长、细胞和组织培养 (生物反应器)、医学和重力生物学 (离心机)、流体物理、燃烧科学、材料科学、基础物理和技术科学等实验。在微重力环境利用和微重力科学与应用的发展上, 不久的将来可能会有所突破。空间微重力实验已有 30 年的历史, 时间不短, 有效实验时间不取决于历史年限, 而取决于飞行器轨道飞行并载有微重力实验的频次。大略估计不过数千小时的实验时间, 30 年中只有这么一点短促实验, 要解决微重力环境利用中深层次的问题几乎是不可能的。

与实验机会少得可怜相反, 要求进行微重力空间实验的需求多。从生物到制药, 从晶体生长到玻璃、陶瓷, 从流体行为到燃烧, 从基础物理到化学反应, 从生理到生命, 不下 10 多种学科都有实验需求。每种学科中任何一项实验都是多参数系统, 每种参数都需要有相应的、可靠的实验数据。这样, 进入这个领域做实验的次数总量可有以 10 为底的多次方的值。这还不包括飞行平台及实验设备的设计和改进的需求。

在此种背景下, 微重力作为一个学科还在发展中, 一些严肃的重要著作大都以多作者文集形式出版, 表达阶段性的见解或工作阶段小结。一个方面的

作者, 很难表达多方面的深入见解。本文也在此例。

作为微重力环境初期利用的概论, 下面将分三个方面叙述。

## 1 微重力流体物理基本现象的研究

在空间长时间微重力环境中, 由重力引起的自然对流、沉积、静压力的宏观变化, 在特殊条件下的微观变化, 如临界点系中引起的基本物理现象研究, 是整个微重力科学的研究的基础。这些基本现象主要有:

### 1.1 流体与体积输送

在长期轨道飞行中, 微重力水平可达  $10^{-6} g_0$ , 进一步改善时可达  $10^{-8} g_0$ 。和平号空间站内加上微重力隔离器 (MIM), 可使  $g$ - 跳变 ( $g$ - jitter) 再降两个数量级, 并可以无故障地工作过 1200h (到 1997 年底)。自然对流即浮力驱动对流的基本消失, 是微重力环境具有吸引力的主要特征之一。又是流体科学、材料科学、生命科学等在微重力环境中进行实验的依据。曾经被重力掩盖的弱力表现出来, 甚至在某些条件下控制了流体动力学过程, 例如沿熔体自由表面的温度梯度支持的热毛细对流。研究这种弱力引起的对流在微重力科学基础研究和实际应用上, 均有重要意义。实际上表面能的不均匀 (包括浓度) 引起的体积流动可构成新的耗散体系, 涉及材料科学中定向固化和浮熔区的输运现象、液滴动力学, 甚至还存在与化学反应动力学之间的耦合现象。

与流体动力学相联系的热、质传递和凝固联系起来的过程, 通过初期研究发现比预期的更复杂。在微重力环境下以一种复杂方式改变系统行为流体动力学问题, 只有在长期微重力条件才能进行适当研究。

### 1.2 扩散与质量输运

在凝固物理学的流体过程中, 熔体里的扩散有重要作用。所有地面实验, 由于存在驱动对流, 使测量精度大大下降, 甚至完全不可能完成精确测定。微重力环境下, 大大减小了重力引起的对流, 排除了影响测量精度的干扰, 可以准确测量过去很难测量的熔体的扩散特性、质量输运特性, 可以十分准确地给出扩散系数和温度的关系, 这对凝固和结晶过程的控制是有重大意义的。

对于各种理论模型内部机制的检验, 流体扩散的精确数据是重要的。它甚至导致关于流体过程的新理论、新概念, 更有效地揭示凝固和结晶的内在规

律,进一步改善过程控制.扩散和质量输运是空间材料实验的主要内容,微重力环境为研究纯扩散和交叉扩散过程提供了优越条件.

### 1.3 毛细与润湿

固、液、气各相之间边界上的界面现象,是由分子间(短程)作用力所决定的性质(诸如表面张力、接触角、润湿和流体的混溶性),这种现象正好提供了分子之间力的存在的宏观证明.一般估计这些性质与重力(长程力)无关,如果液体的质量大,重力将积累起来,在宏观上将会占主导地位.微重力环境将会为那些通常被重力覆盖、重力减小后却变得十分显著的那些现象的研究提供优越条件,例如可获得大尺寸的静止界面.还有,由温度梯度或溶质浓度引起表面张力瞬态非均匀性变化,导致 Marangoni 对流;与界面存在相联系的多余能量会引起表面张力增大,形成稳定或不稳定流体静力学状态;合金融化再凝固各相空间分布几乎完全由润湿和毛细不稳定所确定;毛细力和展布条件对难混熔合金的相分离起关键作用,有必要对这些复杂现象作实验和理论探索.

毛细与润湿的界面现象是短程力与长程力交汇,宏观中蕴含微观的复杂系统.这类问题减除了重力影响仅仅减除了一个重要参数,温度、成分及浓度、运动状态、构形及尺度、吸附、电磁等参数可能发生影响,实验测量技术也是关键因素.界面现象引起人们研究兴趣已有 300 多年了.100 多年前,分子运动论建立后出现了多种理论,都有局限性,而微重力条件将预示着会在基本规律研究上出现重大进展.

润湿、毛细稳定性、界面流动,是涉及悬浮区熔晶体生长的主要问题,特别是 Marangoni 对流对微重力材料的制备有重要影响,是微重力流体物理和实际晶体生产的关键课题.

孤立的旋转流体的平衡和稳定是个经典问题,它一直被用作恒星或星系的研究模型.

### 1.4 固化

微重力环境中,所有材料固化研究的主要目的是增加对流体力学与液-固相之间相互作用的认识.在此环境条件下,可以把重力引起的输运机理(如浮泛、沉积、自然对流)同与重力无关的过程(如扩散、特殊对流)区分开来,来研究单一机理对整体热输运、质量输运的作用,确定对结晶形态的影响,包括涉及固化前沿与宏观或微观(如固化对流)对流之间相互作用的固化前沿动力学研究.

### 1.5 核化与过冷

相变是两相之间自由能之差引起的过程,即形成相的自由能随尺寸变化时产生的核化作用.该作用开启了成核过程,在此过程中伴随相变形成一个需要超越的活性势垒,从而产生过冷效应.

核化现象在涉及相变的许多加工过程(如汽化、冷凝、云层形成、固化、缺陷形成)中起重要作用.过冷是一个能进入相图范围内的非平衡过程,而不是一个能达到平衡体系的过程.因此,该过程是一种获得亚稳相材料(如非晶金属或金属玻璃)的方法.

成核和液-固相变的控制有重要关系,与相的选择或微观结构的获得有关.凝固之前过冷程度对最终固体产物微观结构有明显影响,尤其是通过迅速固化能获得高度精细的微观结构.据此,可改进材料的强度、硬度、韧性,还可产生优良的电、磁特性,减少磁滞和损耗,制备高临界磁场的“硬”超导体.这就需要努力扩大过冷范围的极限,为此应避免异质成核.

扩大过冷温度范围最有效方法之一是将熔化物在超清洁的环境中进行无容器加工,使熔化物置于超高真空环境中,避免同器壁接触,是太空飞行器飞行中最有价值的点.

当液体流动时,还有动力成核的问题,或流动影响成核.在空间微重力环境中,基本上没有重力引起的对流和沉降作用,保持良好的静止状态是太空飞行长时间微重力环境独特性能.

在微重力条件下进行核化与过冷现象的研究,可以加深对非均质成核化过程和均质成核化过程的认识,确定成核理论的有效范围,扩展对大过冷温度范围的相变动力学知识;同时还可以控制相选择过程和亚稳相产生,提高和控制微观结构的细化方法,从而获得更大范围的亚稳态固相,有可能制造出具有不同特性的亚稳态新材料.

### 1.6 临界现象

气、液、固物质三态及其相互转变曾是物理学早期研究的内容,后来有了第四态——等离子态,这些研究已记录在教科书中.物态的改变、物相的变化、晶体结构的转变、超导转变、超流转变、磁性转变等,对这些相变物理过程也相继进行了大量研究.近年来,临界现象的研究,作为物理学发展的前沿之一进展迅速,涉及的领域极为广泛.如物质的两个相在特定条件下彼此处于平衡状态,不能区分两个相时,这时的条件就确定了临界点.流体相变性质的参考点就是临界点,是由某种固定的温度、压力、密度标定的,在该点流体的气相和液相之间的差别刚刚消失.

在临界点附近出现的物理性质就是临界现象的研究对象。

在临界点会出现一些极端现象,例如纯流体的压缩率在非常接近临界点时,它非常大.对于纯流体,重力的影响也只有非常接近临界点时变得很大.就在围绕临界点这个小小的区域里(如果用温度标识不过几十毫 K 的量级),进行实验、测量、认证规律或定律.严格地说,这里研究的是“近临界现象”.这种研究能反映临界点现象,或外推临界点现象.这个非常小的区域受不住重力的系列影响,例如纯流体气-液临界点的研究受到重力限制,这些限制使流体压缩率发散,流体在自身重量下分层和在临界点得不到大体积样品.加热和冷却近临界点的流体会引起剧烈而长时间的对流不稳定,这是膨胀率发散的结果.类似地,对于相分离过程的研究也受到沉积和对流作用的影响.空间微重力环境的优点在一定程度上突破了这些重力限制。

大多数的情况下,临界点是一条表示不连续相变或“一阶”相变曲线的终点.当终点显示相变的连续性所导致的许多奇异性时,称作二阶相变.二阶相变是指某种特定性质在相变中连续改变,例如气-液体系相变时密度连续改变.一阶相变时密度不连续,例如在标准大气压  $0^{\circ}\text{C}$  时水变成冰。

二阶相变是个独立的物理概念,具有对各物理现象的普适性,这种普适性也适用于大量物理体系,不仅包括单元流体,还包括二元或多元流体的混合物.在液晶、微型乳胶、聚合物、熔态盐、合金、超流氦、磁铁、铁电体等,都显示出同样普适特性.这些不同的体系可分为几种“普适类”,这里主要研究流体这一“类”。

所有这种临界点相变行为,在形式上非常相似,在很大程度上与分子间相互作用的特性无关.例如,许多决定临界异常的参数是普适的.这种普适性,除了在理论上重要之外,还有实际意义.在某类体系中,经过实验验证的理论预言,能用到那些很难或根本无法直接进行研究的体系.这种临界现象的普适性,使对一个体系的认识就可能对明显不同领域理解的加深.预言哪一技术领域受益,目前虽有猜测,但尚难定论。

临界点附近的非平衡现象,包含静力学和动力学作用的混合,以及非常大的非线性过程,因而难于用数学表达,这时微重力下的实验数据就显得十分重要.在气-液态临界点获得临界晶胞的微重力,避免对流的微重力等研究均要求微重力条件.微重力

下的临界现象研究,可以使人们更深刻地认识相变的物理含义,特别是对材料科学极为重要的成核作用.晶体生长、拐点(spindal)分解的研究有重要意义。

### 1.7 学科相关性

上述 6 点表达了基本现象与重力影响的复杂性,也表明微重力流体科学研究将会与许多学科互相影响.这些影响大都还在考察之中.微重力流体科学的研究课题将会对热力学、流体力学、物理化学、材料科学、生命科学、燃烧等学科有支持、拓展、补充的潜在作用.其中有支持这些学科基础研究的,也有应用开发方面的交互渗透。

## 2 微重力应用

前面一段关于流体物理基本现象研究的内容,很可能从直观上使对材料科技有兴趣的读者产生利用太空飞行体中的环境改善材料加工工艺的想法,进而谋求太空生产优质新材料.在载人航天初期,发现在重力作用几乎消失的情况下,密度分层效应不见了,油水能均匀混合,压力梯度近于零,热力学状态均匀,人们自然很乐观.当时出现了一些竞相在太空生长均匀、完整、大尺寸半导体单晶的努力.事实上至今还没有生产出可以代替地面产品的更好的功能材料.影响晶体生长的因素很多,有些被重力效应掩盖着,重力消失之后它们就突出表现了,如界面效应、热毛细流、浸润性、接触角、与相变有关的现象,都参与结晶过程,并非重力消失环境优化,去掉一个因素就能立刻进入空间商业化.所幸,认识到这一点之后人们并未停止探索,开始了有关微重力的流体物理、材料科学、生命科学基础的深入研究,为这些研究提供实验机会和投资,为这些学科发展提供了机遇.微重力有助于改善地面原有的加工工艺,实现某些不易在地面上进行的产品加工.空间商业化终会实现,到那时回头看走过的路,才能最终判断微重力带来了什么。

下面将概略地分别探讨太空材料加工、燃烧,关于生命科学与生物晶体的问题将另文发表。

### 2.1 太空材料加工

#### 2.1.1 晶体生长

##### (1) 熔体生长

工业规模的电子材料生长是当代固体电子学乃至信息技术发展的核心,它基本上依赖熔体生长半导体单晶,为集成电路提供基片,也包括氧化物晶体

物理

用作激光器基质、卤化物晶体用作闪烁器等。在地基熔体生产过程中重力引起的不完整性有：

(a) 宏观不均匀性：作为分凝现象的直接结果，掺质不均匀，例如硅单晶的电阻率沿轴向和横向的宏观变化。

(b) 微观不均匀性：非稳态对流热输运，即重力驱动对流产生晶体生长条纹。

(c) 其他不完整性：在重力影响下，固液界面形态的不稳定，可产生空洞；在重力和其他条件共同作用下，产生位错。

在微重力中可以有两个方面能给予熔体生长很大影响：浮力显著减少，产生仅受限于扩散热输运和质量运输的状态，能避免重力驱动对流带来的许多困难，改善生长条件。流体静压力消失，为无约束或部分约束熔体生长晶体技术提供开发空间。

电子学的发展，依靠新材料开发或改善材料性能。这些材料大多数为单晶。结晶状况和缺陷对于电子器件的性能有决定性影响。这些材料已有充分的地基生产经验，加上空(天)基探索、研究，对于拓宽应用材料范围，改善半导体器件性能会有重要贡献。这是因为在微重力环境中更容易实现物理和化学参量的测定(如杂质和热扩散，表面张力)；可以验证受控于热扩散模型对晶体生长的有效性(有更能定量的边界条件)；可以进行宏观分凝模拟实验，进一步了解微分凝的性质和起源；研究与对流有关的晶体缺陷，进行形态稳定性的模拟实验；此外还可以研究被重力屏蔽掉的现象，如 Marangni 对流、Soret 效应等。利用微重力环境，寻求熔体生长空基结晶技术和工艺，产出比地基产品更好的标准晶体样品，反过来促进地基大规模生产质量改进，或空基生长在地面上不易生长的个别晶体，满足电子学的需求，将是顺理成章的事。

这期间要不断改进空基硬件性能，不断完善软件，充分利用空基资源。扩展诊断、测量、记录手段，利用电脑和专家系统，借助于地基-空基科学家互为终端的遥科学方法，实现一个理想的“静态”晶体生长体系；晶体生长只受控于扩散过程，可以区分各种影响结晶过程的因素与重力的相关或无关(地基生长只能观察晶体生长等过程中出现的综合、叠加效应)，简化形态分析，寻求非重力扰动的因果关系，如化学不均匀性与结晶缺陷的关系。这样一种体系，适合于研究晶体生长中缺陷形成和熔质分凝的基本原理，验证晶体生长的理论模型，找出现行地基工艺中所依据的理由哪些是正确的，哪些过去只是依据

经验制订的地基晶体生产的规范、标准。

在这个“理想”“静态”环境中，如果发现由于膨胀系数(容器)不匹配产生机械应力，或污染而异质成核，可以改用不受约束或部分不受约束的熔体生长技术。请注意，此时表面和界面的张力将成为主要力学因素。

在太空飞行器飞行中进行大规模晶体生产比在地面上还是困难得多，一般不宜在太空生产，除非证明：太空产品具有地基无法得到的性能，可制造新性能的器件；太空生产效益大大高于地基生产，商业上是更有利的。

以上最后三段的内容对于晶体加工的各种方法均有参考价值，因而可以认为太空晶体加工中有较普遍的规律。例如希望有一个“静态”的加工环境，只有物质扩散而无流体热对流，如果需要，可加入工“对流”，即可控对流等等。

## (2) 汽相生长

如需要具有重要性质的化合物晶体，但它们的稳定性较差，还未到熔点已开始分解，无法采用熔体中生长晶体，这时可采用汽相生长。汽相晶体生长速率低下，一般每天仅生长毫米量级(熔体生长速率可达每小时厘米级)。在太空生长晶体，占用飞行时间长将会大大增加成本。但是，汽相生长的晶体比熔体生长的晶体缺陷密度低得多，且晶体在微重力环境下可生长大单晶，有弊有利。因此，汽相生长可视为熔体生长的补充手段，对某些化合物(如生物晶体)生长晶体来说还是主要手段。

重力仍然是个干扰源，将引起汽相输运和对流的不稳定，从而破坏晶体的组分完全均匀。微重力环境基本上不存在此种干扰。

在太空作长期飞行的航天器上，曾用汽相生长法得到性能令人鼓舞的  $\alpha$ - $\text{HgI}_2$  晶体，并以这种材料制出  $\gamma$  射线探测器样品，质量比地基生长的晶体材料制造的都好。这种材料是用于核医学  $\gamma$  能谱仪等的重要材料。但还需进行质量运输研究，找出上述结果的成因。在  $80-130^\circ\text{C}$  升华温度范围内，存在着一大组有机非线性光学材料，性能也远远超过地基生长的现有晶体材料，可用于光电子学高技术领域。在较高温度(例如  $900^\circ\text{C}$ )下，用汽相生长技术可生长一系列不同性能的晶体材料，如用于红外探测和用作电光晶体等。

微重力环境对汽相生长晶体而言，是前所未有的有利环境。但也有特殊需求：由于生长慢，效率低，微重力持续时间要足够长(比如在太空站上实施)；

原材料纯度要求高,否则杂质会降低扩散流量和生长速度,引起生长阻滞、晶形变化,甚至失去生长意义。

根据原材料性质,可采用升华法、物理输运(PVT)、化学汽相输运(CVT)等不同方法结晶。其间,最难控制又值得研究的是质量输运。而影响这个输运过程的因素甚多。因此,首先要利用微重力环境弄清输运过程,进一步利用这个环境开发新晶体生长方法,提高生长速度,寻求突破,确定是否有太空商业价值。

### (3) 溶液晶体生长

对于某些类型的材料,溶液晶体生长是获得单晶的惟一方法。获得完整性好的大晶体,是采用溶液晶体生长的另一出发点。这种方法在地面上已应用多年,重力驱动的对流会影响生长的动力学过程、组分均匀性、杂质分布、形态稳定和成核。尤其是由于掺杂不均匀而出现的缺陷和包裹体与重力因素直接有关。在地基生长中,曾采取过多种措施消除重力,各有利弊,达不到由纯扩散控制热和质的输运生长晶体的理想条件。微重力环境大体上消除了重力影响,但由非重力因素导致的对流(对 Marangoni 对流、热对流、溶质对流、结晶流等)以及各种因素引起的不平衡,均有产生流动的可能。此时,即使排除了重力,也得不到理想条件。溶液中的流动是慢变化现象,如果使用透明容器,利用先进光学技术如全息术、纹影法、摄像记录等,进行充分实验考察,判定生长过程中的因果关系,选取适当材料和方法,可以接近理想条件。

利用接近理想的条件,实施溶液晶体生长,可获得有重要用途的单晶。如果该单晶质量极佳,那就不仅具有太空商业价值,而且还有科学研究价值、材料创新价值、促进学科发展的价值。例如与生命科学密切相关的生物晶体/蛋白质晶体的开发,上好的结晶将会推动生命科学、生物医学、蛋白质工程、药物和疫苗的设计的发展。

溶液生长的晶体中还有磁性材料,应用于光通信系统的 YIG 晶体(磁泡畴、带通滤波器、延时线、磁光调制器),应用于激光和非线性光学器件(电光、声光调制器、偏转器、参量振荡器、热电探测器) KTN 晶体。

溶液晶体生长过程较长,航天器上实验时间宝贵,上天前应更加注意地基实验做充分,掌握好流体力学条件,进行实验模拟和数值模拟。在天基实验中,应避免干扰,对微重力环境状态和实验过程(如

浓度分布)要同时记录,应有全息观察和记录,以及精致的结晶盒。总之,长时间、慢变化的溶液生长过程(包括开阀门加籽晶、样品回收都应保证不影响结果)比较容易受外界因素的影响。

### 2.1.2 金属与合金

金属与合金的冶炼术曾是人类发展史上不同生产力阶段的标识之一,其发展水平决定当时的社会进步和人类生活。冶金学是最古老的学科,在千百年的发展中积累了大量实践经验和理论精华,属人类科技宝库的一部分。微重力的利用,并非把大量冶金生产推广到太空去,目前太空生产尚无法与地面生产相竞争。当前,微重力环境对金属与合金加工处理的好处是可以提高原有的工艺水平,使之更加科学化。例如,影响冶炼结果的主要过程是固化,其中包括颗粒推移、溶液包围中的固体成核、长大,固液界面附近的动力学过程(比较迅速),以及物质输运,非晶态与晶态的转化等,在微重力环境中对这些过程进行研究,可以加深了解其因果关系,据此改进地面生产工艺,进而寻求金属与合金的改性渠道。

从理论上讲,人们十分有可能开发出具有特殊力学性能、电学和磁学性能或其他物理特性的材料。特别是多元系材料,其中每一组元对整体性能都有贡献。其间,质点的大小、分布规律对多元系材料性能起决定性作用,微重力条件对达到目标非常有用,它大大减少了多相系统内的沉积分离作用。还应注意,即使在微重力条件下还有一些二级因素起作用,如毛细作用上升为主要因素,甚至会使企图达到完全扩散控制的要求落空。均匀的熔体分离为不均匀的混合物不仅是由重力造成,而且还有其他机制起作用,通过在微重力环境中进行探索,将其弄清,终将能控制晶体生长的均匀性,得到具有特殊性能的材料(例如磁性)。利用空基条件下熔体的弥散特性,研制塑性与硬度兼备的合金材料,以及具有可塑性的超导材料都是可能的。

无容器加工是微重力环境提供的另一有利条件,它可在真空、惰性气体中实施加工处理。这种条件加上所能达到的高温,就可获得深过冷并可形成具有特殊性能的金属玻璃。该过程中需连续排热,熔体粘度连续增加,最后形成非晶固体-金属玻璃,如果不是这个目的,粘度增加会妨碍成核。

下面讨论不同金属液态难混的问题。

在地球表面,难混液态系中各元素比重差别甚大,熔化处理只会得到多层结构,轻在上重在下,无法防止大尺度偏析,难混系应用潜力难得发挥,限制

了这种材料的工业生产和广泛应用;只有成分范围很窄的难合金可用熔化处理的方法获得,常用粉末冶金制备.在太空进行微重力材料研究,使难混溶的液态合金体系重获关注.出乎意料的是,即使在微重力环境中也会出现大尺寸分离.显然除重力引起的沉积和对流外,还有其他导致分离的机制.这些非重力机制在重力场中被掩盖着,而在太空却变成主要分离机制了.起因并非单一,不同材料加工过程也不尽相同,到底哪些因素在哪些过程中有多大程度的影响,便成为微重力材料加工处理的实用性研究课题之一.

对难混液态合金系的研究,似应从评价地面常重力环境和太空微重力环境下导致的不同分离过程出发,对比实验,深化对不同环境的基本认识和理解,从中去寻求研究结果.其研究目的不仅是寻求其科学意义,还应着眼于实际应用.开发出超导材料、超塑性材料、催化剂等特殊难混系的加工途径.此外,应着眼于当前正在使用的电接触材料、自润滑轴承等特殊合金的加工处理工艺的改善.在具有良好导电、导热性基体材料中,弥散分布着第二相致硬的合金结构,适合于选作电接触材料,它具有抗磨损和保持几何形状不变的特性,很有应用价值,因而更有生产价值.在微重力条件下,通过适当方法可使弥散状态持续较长时间,通过凝固过程保留下来,得出精细的弥散结构,这是太空加工的优势.基体中弥散分布第二相与材料的机械强度关系密切,弥散相颗粒的大小、体积分数与材料强度是什么关系,在微重力条件下比较容易研究和探索,例如材料在高温下承受应力的性能就值得研究.

### 2.1.3 复合材料

这种材料已出现在工业材料的前列,如纤维玻璃、弥散强化钢、烧结碳化物、氧化物或金属间相粒子的高温合金.燃气涡轮机要求涡轮材料在1100℃温度以上具有高强度和抗蠕变特性.这种特性只要将非常小的惰性氧化物粒子均匀地弥散在耐蚀的铁或镍基合金中就可以实现,而微重力环境适合于进行弥散处理.复合具有不同电磁特性的相,可得到具有奇异特性的材料,它有可能在抗磁、压电、热电装置方面获得应用.将不同折射率的透明相做成层状或纤维状结构(共晶)材料,可在红外偏振器和传感器中得到应用.

复合材料至少应由两种固相在微观上非均质混合,形成宏观上具有均匀结构的材料.其物理特性不同于其中任何一个组成物,其显微结构与各相的体

积分数、能量关系有关.第二相的排列方向、次序,往往导致材料力学性能和其他一些物理特性的各向异性.在基体中弥散分布的颗粒或纤维也会改变材料使用性能.复合材料包含由金属泡沫、层状结构、纤维增强材料等很宽的范围.它是当今不可缺,将来也要发展的材料,是值得利用微重力环境进行研究的.

微重力环境对熔态制备有明显影响,在制备复合材料的第一阶段,基体总是液态,强化粒子、气泡或纤维将悬浮在熔态基体中.这类夹杂物可以是混入基体中,也可以是在冷却过程中或液/固相变时沉淀出来的.因而复合材料有两类:人工复合材料与原位复合材料.前者是人工混入而成第二相,后者是从基体中经物理/化学反应生成,并通过固化保持下来成为复合材料.无论复合材料是什么结构,从应用方面评价,总是希望第二相或多相有统计均匀的分布,呈现大范围的有序化.由重力引起熔体的浮泛和沉积,一般会导致凝聚和粗化,对流还会改变温场和溶质浓度分布,它们会影响结构的有序化.其影响程度、固液界面处的传热和传质、形貌的稳定性等都值得研究.因为所导致组成物分离、附聚、骨架组织的形成会影响(降低)复合材料的机械性能,所以希望能得到第二相呈现均匀分布的结局.

不同相之间的最佳粘合通常是用熔态合成(人工)取得的.

微重力为均匀复合材料的熔体加工提供了理想条件,利用这个条件,研究基体为液体时弥散悬浮物的稳定性和凝固时颗粒或纤维分布的均匀性,以及如何保持这种稳定性和均匀性.浮力的消失,为可控密度材料提供了独特条件,从而使高孔隙度的材料以及最终形成多面体泡沫材料熔体加工成为可能.但还存在与微重力无关的问题,如材料的表面弹性、体积粘度、表面粘度、Marangoni对流、扩散、润湿、化学反应、静电力等,在没有重力存在时,它们在什么情况下成为影响材料性能的主要因素,也是值得研究的.这些因素即使在常重力下也不是全被淹没,仍有所表现,例如沉积/浮泛引起流体的迅速分离也与粘度、第二相的尺度(如气泡)与分布(粗化)有关,甚至可能使可控密度材料稳定性研究变为无意义的程度.在常重力下,人们有时用增加粘度来对抗沉积/浮泛作用,进一步还可能采用静电力来消除重力引起的效应.

人工复合材料制备时,熔融状态的基液中弥散物受到的外力与内力作用不存在,弥散物将能保持初始的均匀状态,这是理想状态.相反,将会有弥散



着夹杂物的基液流动,如果基液与弥散颗粒之间润湿性不好,就会使颗粒附聚破坏弥散的均匀性.不均匀将伴随表面能减少,因而不均匀被稳定地保留下来.使弥散颗粒或纤维附聚的原因是对流和沉降导致它们直接接触,其中对流输运粒子与粒子的大小尺度无关,浮力只在半径约大于 $1\mu\text{m}$ 时才有明显的斯托克斯传输,但两种情况的接触率都是弥散物尺度的函数.输运不仅是重力引起的热对流所致,而且由表面张力不平衡引起的 Marangoni 对流,在质量守恒的作用下也会引起第二相的输运.布朗运动将影响较小粒子(小于 $1\mu\text{m}$ )的附聚.凝固过程中,弥散相与逐渐推移的凝固前沿相互作用还可能产生附加的分离机制,并与粘度有关.在初期的太空微重力实验中,发现微重力残余加速度、加速度的波动、电磁和声压场以及凝固时的体积变化,都与粒子的附聚有关联,非球形的弥散体在粒子与界面接触时引起不对称的流场,也会引起附加的附聚.

复合材料在加工处理中,熔态过程很复杂,使之不能处于理想状态的因素很多.目前可能还没有完全弄清这些因素,这是因为重力影响最大,大到能够掩盖其他因素的程度.在微重力环境中,最大的力消失了,其他因素有可能显现出来.如上所述已经很多了,虽然它们之中并没有一个可与重力相比而掩盖其余,但来源各不相同,找到它们的方式也不一样.特别是凝固前沿特别敏感,变化多端而不胜枚举,应慎重观察.失去占统治地位的重力,总是比较容易实行分解研究、定量测量、鉴定评估.可以注意到人工和原位复合材料在微重力下制备,与单相、多相流体的流动(流体动力学)和凝固过程的许多物理-化学反应机制相关,复合材料要比纯金属等单一材料更富于学科交叉特点;第二相的人工控制和弥散颗粒较大,或许对熔体实验者来说,过程更显著,可控又显著.作者认为,粒度放大容易使研究者捕捉到微重力下反映出来的问题;可控,犹如“慢镜头显示”,有助于得到详情和定量数据.两方面对制备复合材料和提供地基生产参考都是有利的.

利用微重力环境,调整、优化复合材料性能非常有价值,要有多学科研究和工业界的参与、合作.不妨从利用价值高的课题开始,例如,使弥散颗粒强化结构以获得高温合金涡轮叶片的课题.

太空环境为人类提供了机遇,开发太空这一资源,科研课题与工业发展相结合,并包含可获益的因素,将会推动微重力广泛利用.

#### 2.1.4 玻璃

玻璃是结构上无序的固体.大量不同材料均可变成玻璃,即转变成玻璃态.现在,有多种玻璃:氧化物玻璃、硫化物玻璃、卤化物玻璃以及金属玻璃等.玻璃的成分无严格化学配比,性能上各不相同.金属玻璃具有高电阻率、电阻温度系数较小的特性,而且其软磁性、抗腐蚀、韧性好,作为金属材料的新品种受到注目.

微重力环境中浮置、无容器加工,不仅有利于消除污染,还能扩大成分范围,使在地球上达不到玻璃态的材料达到玻璃态.在微重环境中,保持浮置位置所需的力,可比地面上低3个数量级以上,极大地扩大了玻璃品种和制备能力.无容器消除了器壁影响,能更有效地控制成核和结晶的出现,原则上可制出高纯玻璃.许多特殊玻璃(如长距离低损耗光纤、激光器基质材料、传感器材料等)的制造工艺正酝酿着在微重力条件下突破,或作为地面工艺的借鉴.对流、沉积和浮力的消失,获得“静止”熔体,这种益处对于基础研究来说,就如同从组元密度相差甚大的两相或多相体系中制造均匀玻璃那样有意义.

微重力条件确实为玻璃科技提供了独特的发展机遇.

#### 2.2 燃烧与微重力

燃烧这个词所表达的是化学反应物(燃料与氧化剂)之间强烈放热反应引发火焰(一般伴有发光)的现象.很多时候人们通过焰光判断其状况(如位置、形状、火势等),也有不发光的(如纯净的氢焰).燃烧不是化学释能的瞬时现象,它是有许多条件和阶段的过程.从反应物到生成物的过程中,包含有不同于化学反应的很多物理过程,这些物理过程控制着燃烧的发生、性质、种类、作用、熄灭和利用.具体包括反应物加热、相变、改变气压、气相混合及混合比控制等过程.这些过程的控制决定燃烧效率,产物对环境的污染程度,也是控制灭火条件的依据.鉴于全球能源需求80%以上由燃烧方式满足:海、陆、空、航天运输,火电,材料加工和机器制造,生活质量保证等;减少环境污染和有效防止火灾,均有赖于对燃烧的认识,故燃烧学研究重点日益转移到物理过程研究.问题实质属流体力学范畴,因而其力学行为可用3个无量纲数(Reynolds数、Richardson数、Grashof数)描述;换句话说,和其他流体相仿,燃烧中的气体流场对重力是敏感的.其中热传导、质量扩散、热化学反应引起的密度变化将影响这个过程;在重力场中浮力诱发的流动,和其他流体系统相仿,常表现为不稳定因素,使过程研究复杂化.消除后者可



简化过程,这正是利用微重力环境的主要动机.分析微重力条件下产生的火焰,可了解燃烧及其扩展的细节.为防火灾,轨道飞行中对燃烧的研究得到航天器舱内气压和材料的选择标准.灭火概念,表明了这种实验的可行性,消除自然对流对得到燃烧的明确概念和研究模式有助.对认识和利用燃烧都是有益的.

事实上,微重力下的液滴燃烧实验是近代微重力实验的先驱.日本人 Kumagai S.和 Isoda H.利用自由落体技术,进行了多次燃料液滴微重力实验,其结果在1957年召开的第6次国际燃烧会议上发表了.后继者在飞机、火箭、航天器上多次实验,不但提出了实验兼容的问题,并纳入空间站初期轨道能力(IOC)任务及其后的计划中.

### 参 考 文 献

[ 1 ] 王景涛.物理,1998,27:392 [ WANG Jing-Tao. Wuli (Physics),1998,27:392(in Chinese) ]

- [ 2 ] 王景涛著.微重力应用导引.北京:中国科学技术出版社,1988 [ WANG Jing-Tao. An Introduction to Microgravity Application. Beijing: China Science and Technology Press, 1988 (in Chinese) ]
- [ 3 ] 林兰英,柯俊,马俊如主编.中国微重力科学与空间实验——首届学术讨论会论文集.北京:中国科学技术出版社,1988 [ LIN Lan-Ying, KE Jun, MA Jun-Ru (editors in chief). Proceedings of the First Chinese Symposium on Microgravity Science and Space Experiments. Beijing: China Science and Technology Press, 1988 (in Chinese) ]
- [ 4 ] 胡文瑞.物理,1996,25:453 [ HU Wen-Rui. Wuli (Physics), 1996,25:453 (in Chinese) ]
- [ 5 ] H. U. Walter (法) 主编.葛培文,王景涛等译.空间流体科学与空间材料科学.北京:中国科学技术出版社,1991 [ H. U. Walter (editor). Ge Pei-Wen, Wang Jing-Tao translate into Chinese. Fluid Science and Materials Science in Space. Beijing: China Science and Technology Press, 1991 (in Chinese) ]
- [ 6 ] Herring R. A. QUELD Program on Mir, Microgravity Sciences. Canadian Space Agency, Sept. 1997
- [ 7 ] Feuerbacher B, Hamacher H, Naumann R. J. Materials Sciences in Space. Springer Verlag, 1986

## GaAs 表面硫钝化研究新进展\*

谢长坤 徐法强 徐彭寿

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘 要** GaAs 及其他 III-V 族半导体表面钝化一直是人们感兴趣的研究课题,在半导体器件制造工艺的发展中起着重要的作用,文章着重从钝化方法和钝化机理两方面简单地回顾了近年来 GaAs 表面硫钝化的最新研究进展.

**关键词** GaAs,钝化,表面复合,光致发光

### RECENT DEVELOPMENTS IN GaAs SURFACE PASSIVATION BY SULFUR

XIE Chang-Kun XU Fa-Qiang XU Peng-Shou

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science & Technology of China, Hefei, 230029)

**Abstract** Surface passivation of GaAs and other III-V semiconductors plays an important role in the development of semiconductor devices. Recent developments of the sulfur passivation of GaAs surfaces are briefly reviewed from the aspects of both methodology and mechanism.

**Key words** GaAs, passivation, surface recombination, photoluminescence

### 1 引言

化合物半导体 GaAs 是直接带隙半导体,具有高的电子和空穴迁移率,是制造高速半导体器件和光电子器件的优良材料.由于 GaAs 和其他 III-V

族半导体表面空气氧化以及金属与 III-V 族半导体接触,将导致很高的表面和界面态密度,钉扎了费米能级,限制了 GaAs 基器件和其他 III-V 族半导体器件的发展<sup>[1,2]</sup>,因而 GaAs 的优良特性在半导体器

\* 2000-04-26 收到初稿,2000-06-05 修回