

空间材料科学的前沿学科

——微重力晶体生长

陈 万 春

一、微重力晶体生长环境

人类为了自身的生存,希望有一天能走出地球,从外层空间索取他们赖以生存的部分或全部资源。作为人类走向外层空间的第一步,当然是利用近地空间资源。而微重力资源则是首先受到重视和研究的近地空间资源之一。

人们对空间晶体生长的研究,经历了从零重力到微重力的认识阶段。在60年代末到70年代初期,材料科学家们认为天空实验室内的晶体生长过程应是零重力场下的固-液界面反应过程,但一系列空间晶体生长实验表明:由于实验系统运动状态的不稳定,空间晶体生长环境仍然存在重力(g),但其数值远小于地面重力(g_0)。目前,可以用在地面建立自由落体装置和发射飞行器的办法,获得微重力。这里所指的飞行器包括抛物线飞机、试探火箭、卫星、航天飞机、空间平台和空间站等而落管和落塔则是地面自由落体装置。表1列出了它们的微重力范围和微重力时间。

表1 空间飞行器和地面自由落体装置的微重力条件

微重力实验装备	微重力范围 (g_0)	微重力时间
落管、落塔	$10^{-3}-10^{-6}$	5 秒
抛物线飞机	$10^{-1}-10^{-2}$	30 秒
火箭	$10^{-4}-10^{-6}$	5 分
卫星、航天飞机	10^{-6}	5—15 天
空间平台、空间站	10^{-6}	数十年

晶体生长是长周期实验过程。熔体生长历时数天,溶液生长历时数周,气相生长历时数月。故微重力晶体生长宜借助于卫星、航天飞机和空间站进行。

二、微重力晶体生长的物理现象

晶体生长过程是固体结晶基元和流体结晶基元在特定条件下的相互作用和能量再分配过程。结晶过程

总是离不开固体成分和流体成分的。因固体的内部结合力远大于1个 g 的重力,所以结晶过程仅需考虑流体成分受到重力的影响。在溶液中液体的粘着力和表面张力与 g 的重力同数量级,液体的常规性质是内分子力和重力相互作用的结果。假如重力消失,流体的行为将受内分子力支配。因此,微重力条件将显著影响流体的行为,也必将影响晶体的生长过程。

晶体生长过程离不开质量的输运和热量的传递。质量输运通过对流和扩散途径进行,而热量传递则通过对流传导和辐射途径进行。在微重力条件下,扩散将支配质量输运过程。晶体生长的输运问题将变成斯忒藩问题,也就是变成求解自由边界和运动边界的扩散微分方程问题。

晶体生长过程受外生长参量和内生生长参量的制约。熔点、蒸气压、扩散系数、粘滞系数、热导率、表面张力和化学反应性等是与生长过程密切相关的内参量。在微重力条件下有些内参量将显著不同于地面重力场生长系统;流体的粘滞性和热传导性将失去其重要性,表面张力将上升为重要的支配驱动力。

界面的不稳定性是产生晶体不完整性的主要原因之一,它渊源于自然对流。此对流破坏长程扩散场,进而改变界面附近的温度梯度和浓度分布。研究对流机制对理解微重力晶体生长的物理现象尤为重要。

消除浮力驱动对流,沉淀、流体内部的静压梯度是微重力环境的特点。这些微重力物理现象将揭示晶体生长的新理论和新方法,可探索新型晶体材料,改善地面上生长的晶体材料和创造地面上难以实现或无法实现的独特的晶体生长条件。由于浮力驱动对流的消除,固-液晶体生长界面的热涨落和组分涨落大大地受到抑制,可极大简化输运过程的理论分析,获得准纯扩散过程。由于消除了沉淀,不同物质将保持混合或悬浮状态,使结晶体系趋于热力学平衡和动力学稳定,因而系统更均匀。由于消除了晶体的静压梯度,生长界

面将受表面张力束缚；在地面上受重力掩盖的二级力将支配晶体生长过程，浮区过程可以扩展到低表面张力材料。基于空间晶体生长的上述微重力特点和条件，使它受到世界各国的高度重视。

三、微重力晶体生长实验

自1973年美国于天空实验室首先生长酒石酸钾钠晶体以来，世界发达国家为争夺空间科学研究和空间开发的高技术优势，进行了多次微重力晶体生长实验。为选择微重力实验课题，在地面上进行了大量数值分析和模拟。在晶体品种方面，已于空间条件下探索了从光电子材料到生物晶体的几十种功能晶体的生长。在实验技术方面，已加工设计和制造了各种晶体生长实验装置，以适用于凝胶替代法、低温水溶液法、气相、浮区以及高温移动加热器法和坩埚下降法生长。

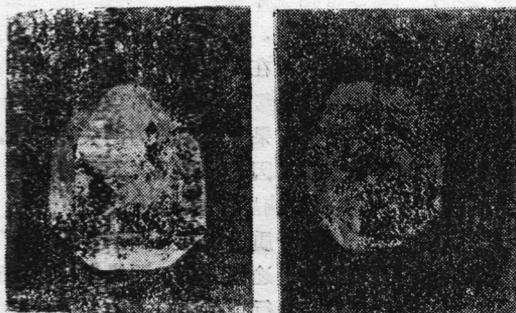


图1 微重力条件下生长的 α -碘酸锂
图2 地面上生长的 α -碘酸锂晶体

在晶体生长基础理论方面，研究了微重力条件下的晶体成核理论，生长动力学理论，纯扩散生长机制以及形态稳定性理论。一系列理论分析和实验表明：微重力条件将可能生长出极有价值的新晶体，微重力晶体生

长将可能引起材料科学的重大突破。表2归纳了部分空间晶体生长实验结果。表中的 α -碘酸锂晶体，是中国科学院物理所于1988年搭载我国回地卫星的实验结果。图1和图2分别是在微重力和地面条件下所生长的晶体照片。该图显示出空间生长的 α -碘酸锂的生长形态同于地面生长的，但均匀性优于地面生长的，由表中可看出空间生长晶体的完整性绝大部分优于地面生长的。

四、空间晶体生长研究的回顾及其产业化的前景

空间晶体生长已经历了三个发展阶段。七十年代初、中期为第一代，这是空间晶体生长实验阶段。在此期间，人们认为空间是零重力晶体生长环境，地面上的许多与重力有关的问题，到空间环境中进行实验就可以解决。实验结果表明次级效应需深入研究。七十年代中期——八十年代中期为第2代，这是晶体生长设备的设计、制造和新方法探索阶段。人们利用空间微重力条件生长各种晶体，回到地面后对其形态、结构和完整性进行观察和分析；通过空间—地面对照实验，评估微重力晶体生长效益。八十年代末期进入第三代，人们把全息术，显微照相术与空间晶体生长炉相组合，在空间实时记录晶体生长过程，研究微重力晶体生长的特有规律，从而获得最佳微重力生长条件。

应当说微重力晶体生长空间产业化的前景是光明的。诚然，为了缩短空间产业化到来的时间，须从事晶体生长基础研究，须借鉴物理学的方法和理论，还应制订科学的计划。欧空局是欧洲各国从事空间科学研究的组织机构，他们的计划值得参考。他们认为微重力晶体生长的短期目标是建立精确测定空间晶体生长参数的方法，实时观察晶体生长过程，探索微重力条件改善晶体性能、改变晶体生长形态以及发现新晶体材料

表2 微重力晶体生长实验结果

晶体	生长方法	晶体尺寸 (mm)		生长速率 (mm/天)		晶体生长形态	晶体完整性
铋化镓	移动加热器	$\phi 0.2 \times 10$	$\phi 0.1 \times 10$	4.50	1.78	空间、地面均圆柱体	杂质条纹明显低于地面
磷化铝	移动加热器	$\phi 2.3 \times 10$	$\phi 1.5 \times 15$	1.80	1.20	空间、地面均圆柱体	条纹密度明显低于地面
磷酸氢钙	凝胶替代	$\phi 2.6 \times 4$	$\phi 1.2 \times 2$	(未报导)	(未报导)	空间、地面均为杆状	晶体成核阶段无位错
α -碘酸锂	水溶液	$\phi 7.0 \times 7.2$	$\phi 6.4 \times 7.1$	0.25	0.22	空间、地面均六角棱柱体	空间晶体均匀性优于地面
钾明矾	低温溶液	(未报导)		(未报导)		空间不同于地面，(001)，(110)晶面消失	位错密度低于地面包裹体高于地面
硫酸铜	水溶液自发成核	(未报导)		(未报导)		空间明显不同于地面，表面出现复杂宏观结构	因空间、地面晶体均不均匀，难于分辨
蛋白质	凝胶替代，低温水溶液法	因蛋白质品种而异，最大尺寸： $3 \times 3 \times 1$		空间快于地面，对于半乳糖苷酶，空间产品1000倍于地面		因蛋白质品种而异，有杆状、针状、立方体等，其空-地面晶体形态，有相同亦有不同	空间晶体质量明显优于地面

粒子音响效应

王 连 璧

宏观物体的相互撞击会发出响声。从陨星撞击地球时的轰鸣，到雪花落地时的沙沙作响；从子弹掠空时的呼啸，到石子击水时的叮咚有声；……这是人们都熟悉的现象。微观粒子撞击固体、液体和气体时能否发出响声呢？粒子音响效应的研究正是要探索这一问题。

所谓粒子音响效应，就是具有动能的粒子与物质发生作用而产生音响的现象。这里所说的粒子，包括光子、电子、质子、 μ 子和离子、分子以及粒子团等等。这里所说的音响，包括正常人的耳朵能够听得到的声音和一般人的耳朵听不到的超声与次声。无论通常的声音还是超声与次声，其实质都是物质发生的一定频率的振动。具有动能的微观粒子进入物质，与物质发生作用，把自己的能量交给物质，可能引起物质局部的发热，也可能引起固体物质局部的液化、汽化或液体物质局部的汽化，或其他变化。这些变化都有可能使物质发生振动而产生音响效应。

音响的产生，可以是把粒子束调制为音频脉冲，作用于物质而引起；也可以是单个粒子作用于物质引起的种种效应转化而形成。

粒子音响效应的一个重要特例，是电子音响效应。电子音响效应之所以占有重要地位，是因为：电子显微镜已经有了很好地研究和发展，电子束的聚焦、偏转和调制已经是很普遍和轻而易举的事情。如果把聚焦电子束以一定的频率调制，让其作用于物质，与一定的传感器配合，可以很容易地制成电子音响显微镜，以很高的空间分辨率（约 $1\mu\text{m}$ ）探测材料表面下缺陷和测定材料的叠层结构。近十年来，不断有关于扫描电子音响显微镜技术的报道。有报道说，曾有人将一台普通电子显微镜改造而得到了 6MHz 调制、在样品表面

聚焦为 $1\mu\text{m}$ 直径点的电子束，用固定在样品背面的压电传感器探测样品中产生的 6MHz 超声波，将传感器的输出构成放大的样品扫描象。象的反差主要由分辨半径内样品的热和弹性性质的不同而形成。对于集成电路，得到了分辨约为 $4\mu\text{m}$ 的象。据推测，对于薄样品，分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$ 。……还有人用配有PZT传感器的扫描电子音响显微镜检查了陶瓷的表面下结构。配有不同传感器的扫描电子显微镜，可以用来研究金、铜、铝、硅和陶瓷等材料，在微电子工业中将会得到广泛应用。

粒子音响效应之所以引起人们的注意，还因为有可能利用这种效应来探测高能粒子，例如探测高能质子和高能中子。用粒子音响效应探测高能粒子的优点，至少有以下三条：第一，一种音响探测器，可以用来探测多种类别和多种能量的粒子，不象现在应用的种种探测器那样，一种探测器只限于用来探测一定类别和一定能量范围的粒子；第二，声波可以直接传送相当远的距离，这样以来，对某些粒子（如中微子等与物质作用截面特别小的粒子）可以用特别大的探测靶（譬如说，用辽阔的海洋作为探测靶），在远离靶的地方进行声波探测；第三，声波探测器与其它探测器相比是比较廉价的。

据报道，有些物理学家研究了高能质子在液体中引起的音响；有些物理学家考虑用音响效应探测落入大海中的 μ 子与中微子。如果有一天，音响高能粒子探测器真的研制成功了，人们将可能听到高能粒子到来时的脚步声，将可以用在海底布置的麦克风阵列听天外来客——宇宙射线奏出的美妙乐曲。

的可能性。中期目标是应用空间晶体生长的实验结果，改善地面晶体的品质。长期目标是生长特殊应用要求的晶体，发展空间产业。

目前美国、苏联、西欧和日本都已将空间晶体生长

产业化和商业应用作为其主要目标。美国空间政策中心预测，下世纪初空间产业的年收益可达650亿美元，其中光电子晶体、玻璃和制药等空间材料的产值占总收益的64%。