

无论在陆地、海洋还是天空，地球上的物体，包括我们人类，一直在一个G。决定的重力下存在着、发展着。人们似乎习惯了这样的环境，要想摆脱重力影响倒成了不可思议的事情。然而，一些科学工作者从高处跌落的瞬间“失重”现象中受到了启迪，开始思考如何在材料制备中利用近地空间的特殊环境，探索晶体生长研究的新途径。1782年英国人威廉·瓦特取得了利用自由落体法生产铅弹的专利权。1785年他在布里斯托尔建造一座高塔，并挖了一口深井，使总的落程达27.2米，用以生产铅弹，取得明显的效果。这是人类利用微重力制备材料的一次颇有成效的尝试。

当人类进入宇宙空间之后，微重力材料研制工作才真正开展起来。1969年苏联科学家在联盟号飞船进行金属熔化与焊接试验，揭开了微重力材料研究的序幕。1971年美国科学家利用阿波罗飞船开展材料制备试验。此后，日本、西欧各国科学家也进行了类似试验。我国科学家也在1987、1988年利用回地卫星开展空间材料制备试验，获得空间生长GaAs单晶等一批成果。空间试验结果表明：研究微重力对晶体生长的影响，不仅仅有利于提高晶体本身的质量，还为研制新晶体、开发天体资源提供新的途径。

一、晶体的生长条纹缺陷

现代科学技术采用不少晶体材料。例如，红宝石，YAG单晶，人造石英晶体，HgI₂单晶，碲镉汞晶体，硅、锗、砷化镓单晶材料被广泛用在激光、通讯、电视、钟表等高新技术领域之中。然而，由于地面生长的晶体出现生长条纹的缺陷，使它的应用受到了一定的限制。

所谓生长条纹，是晶体在生长过程中因温度场、浓度场周期变动不规则而造成微观成分发生变化所产生的。生长条纹不但存在于从熔态生长的晶体，也存在从溶液生长的晶体。它们都起因于熔体或溶液中浮力引起的对流。但在微重力条件下，尽管密度发生变化，熔体或溶液不再引起沉浮，不产生浮力，消除了对流现象，克服了生长条纹的缺陷。近年来，国内外科学家提

的四分之三工程已经完成。CEBAF将在1993年建成。

A. 丹尼尔斯《实验物理的控制系統》第2期

1986年，欧洲物理学会实验物理控制系统(EPCS)

供的空间生长的GaAs单晶，InSb晶体，掺Ga的Ge单晶，掺Ag的PbTe单晶，InP和掺Te的GaAs晶体，均未发现生长条纹。以Ga作溶剂生长的GaSb晶体，在一个区域内也没有生长条纹。

然而，在空间进行的悬浮区溶生长Si晶体时，发现与地面相似的生长条纹。研究证明：在熔体中不但浮力会引起对流，表面张力也能引起一种称为马拉戈尼的对流，后者同样会在晶体中引起生长条纹。后来有人在Si表面形成SiO₂薄膜，使它熔化后熔体无自由表面，达到根除生长条纹的目的。这是由于这些体系的马拉戈尼数值小，或者生长时间短不足以形成马拉戈尼对流的缘故。

最近研究发现：即使熔体去除了自由表面，空间生长的晶体仍然存在一种特殊的生长条纹。这种生长条纹与前述的不同，它是非周期性的，且不平行于瞬时生长界面。已经观察到这种生长条纹的台阶迹和谷迹，认为这是由于生长台阶这一动力学因素引起掺质或杂质微观分凝现象所造成的。研究者把这种条纹称作II类生长条纹，或称动力学条纹。空间熔态生长的Si单晶和从Ga溶剂里生长的GaSb单晶中，都能检测到II类生长条纹。

二、晶体的纯扩散生长

如果将晶体生长过程看成质量运输过程，那么在固液界面处多组分物质中任一组分浓度比，就可以由相图的分布系数来决定。其结果必然造成液相中有的组分富集，有的组分贫乏。多余的组分需要输运掉，贫乏的组分需要补充，方能保持固液界面处液相成份恒定，这是晶体获得成分均匀的必要条件。在单一液相中，物质依靠扩散与对流进行输运，而扩散的动力是浓度差，其速度较慢但稳定性好。对流一般分为强迫对流、自然对流和马拉戈尼对流。自然对流与重力有直接关系。与扩散相比，对流传质的速度较快，但极易受外界条件(如温度场、熔体表面气流等)的影响，因而相当不稳定。一般而言，晶体生长希望建立扩散控制的稳态传质过程。只有这时，质量输运率和晶体生长

所际组织建立，到1989年底，该组织共有30个成员所，分布在西欧、东欧、北美(美、加)和亚洲(印、中、苏、伊拉克、日)。介绍该组织几年来卓有成效的活动。

(秦宝 编译)



葛培文

率相等,固液界面液相一边溶体成分保持不变,生长出的晶体成分自然均匀一致。当然,在地面生长晶体是不可能保持其化学成份的均匀性。而在空间微重力环境下,自然对流基本消除,晶体的化学均匀性有了很大的改善。例如,空间生长的掺 Te 的 InSb 晶体有效分布系数接近 1; 掺 Ga 的 Ge 单晶体内宏观分凝减少为地面同样条件的四分之一,其表面的宏观分凝则为地面的八分之一。又如空间碲镉汞的定向凝固实验,当生长率为 3mm/h 时,长出了成分均匀的晶体。计算表明,达到稳态平衡分布的时间需要 5 小时,这在该实验中是满足的。依据这些实验结果,可以认为在空间是能够建立扩散控制的稳态生长过程的。

三、晶体的生长习性

不同晶体各自的奇特外形,是其各向异性的表现之一。这种奇特外形,是由晶体生长过程中各向生长速率不同所造成的。晶体的这一特性称作生长习性,它与生长条件密切相关。由于地面生长晶体无法避免自然对流,晶体各方向生长条件不可能达到一致。在自然成核的生长体系中,晶核与母液密度不同,造成晶核不是沉底就是浮在母液面上。因此,在地面晶体的自然生长习性无法显现。而空间晶体生长,则有可能使晶体各个方向生长条件相同。实验证明:晶体在空间和地面生长习性不同。例如,空间生长的溴化亚汞单晶为棒状,地面生长的则是薄片型结构。微重力下生长的尿素晶体呈针状(长 8.16mm,宽 0.48mm),地面生长的则为块状(长 6.08mm,宽 1.10mm)。空间生长的 CrSi₃ 单晶出现(0001)面,地面生长的却是由(1072)面围成的锥形。在硫酸铝钾和硫酸铜晶体上,也观察到空间与地面不同的生长习性。

总之,开展微重力下的晶体生长实验,对于研究晶体生长的机制有着特殊的意义。例如,用 X 射线衍射分析测定蛋白质的三维分子结构,人们在空间得到体积比地面生长的晶体大 27 倍的 β -半乳糖苷酶晶体和大 1000 倍的溶菌酶晶体有人认为是由于蛋白质分子很大,结晶前需先排列成序。在微重力下,没有湍流,蛋白质分子团聚速度比地面上快得多,因而晶体生长得又快又大。随着晶体生长机制的深入研究,这种现象必然得到更为科学的解释。

四、晶体的结构缺陷

空间微重力环境,为晶体生长提供一个实现扩散控制的稳态生长的可能性。这将有助于减少晶体的结构缺陷。例如,空间生长的 InSb 单晶位错密度减少到地面晶体的六分之一,甚至仅为地面晶体的百分之一。掺 Ga 的 Ge 单晶空间产品位错密度也比地面产品低两个数量级。空间生长的 InSb 和 GaSb 晶体,孪晶和晶粒边界都大大减少。但是,也发现有些空间

生长的晶体位错密度高于地面的产品。因此,作出空间生长的晶体结构缺陷一定比地面产品少的结论,还为时过早。由于空间实验的次数尚少,不少实验又不够严密,还待进一步深入研究。许多科学家正为减少晶体结构缺陷而继续探索,一种无容器生长工艺受到人们的普遍重视,相信在不久的将来会取得令人满意的成果。

五、晶体的空间生长环境

空间晶体的生长环境,具有地面无法比拟的物理特点。首先,它摆脱了大气天然屏蔽层,更好地接收近乎无损失的太阳光和丰富的宇宙射线。其次,在空间轨道上飞行,晶体处在失重状态。第三,飞行器的背阳面,温度极低,热量排出不受限制;其尾流区处在 10^{-12} Pa 超高真空状态,具有地球上任何泵无法相比的抽吸率。然而,目前空间晶体的生长却受到技术条件的限制。例如,空间晶体生长装置的体积、重量和能耗,晶体生长产生的余热、废水、废气的处理,空间实验的自动化程度,飞行器在升降期间所经受的一、二十个 G 的巨大冲击,个别项目实验的特殊环境要求,都为空间晶体生长增加了难度。人们期望在短期内取得突破性成果,看来是不现实的。空间晶体生长研究,需要逐步解决上述技术难题,需要不断积累基础知识,需要完善空间生长环境,需要探讨新现象、新结果,以开辟晶体生长研究的新局面。

出版消息

根据国家新闻出版署《关于举办全国期刊展览的通知》精神,决定于 1990 年 9 月在北京举办全国期刊展览,以检阅我国期刊出版事业的成就,加强对期刊出版工作的导向,扩大期刊的宣传,促进期刊的繁荣。《现代物理知识》将参加展出,并设专柜进行销售或征订。

