

空间材料科学实验中的几个关键技术

于 强

(中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘 要 分析了我国未来的空间材料科学实验设备应该具备的功能,并对这些功能进行了需求分析。对我国新一代空间材料科学实验设备的研制方向进行了探讨。

关键词 空间材料科学 空间晶体生长设备

空间材料科学实验在空间科学实验中扮演着重要角色,世界各航天大国均花费了大量的时间和经费开展空间材料科学实验,以期探讨微重力条件下材料形成过程中的科学规律,为科学研究提供直接的实验数据,为有规模的空间材料生产打下基础。由于载人航天工程的实施,我国空间材料科学研究得到了前所未有的发展,获得了一大批有较大科学研究价值的实验结果,这不但为我国空间材料科学的发展作出了贡献,也为我国的空间材料科学在国际上赢得了声誉。随着载人航天工程的进一步开展,如何在我国未来的空间站上进行高水平的空间材料科学实验,成为摆在我们面前的一项重要任务。本文将针对我国目前空间材料科学实验的基本状况,探讨我国未来空间材料科学实验设备应该具备的功能和水平,为我国未来空间材料科学实验设备的研制起到抛砖引玉的作用。

1 设备功能方面的关键技术

1.1 外加磁场

外加磁场可以在熔体凝固过程中控制凝固熔体的形状(电磁成型),按照所需要的方向对熔体进行搅拌(电磁搅拌),并且可以降低熔体的扰动或者不规则流动(电磁刹车)。外加磁场能够改善冶金产品的内部结构,减少夹杂异物,改善其成分均匀性和机械性能。在电子晶体材料的生长过程中,外加磁场可以增加晶体中掺杂原子分布的均匀性和微观均匀性。在微重力条件下的材料制备过程中,由于重力的减小而使得电磁力的作用效率大大提高,也就是说,要得到与地面上相同的结果,在微重力条件下所需要的外加磁场将会较小。在微重力条件下的材料制备过程中,主要利用外加磁场的电磁搅拌或电磁刹车的功能。

国外的空间晶体生长设备通常带有几到几百赫

兹、几个毫特斯拉的磁场。

我国材料科学家提出,要求未来进行空间材料实验时,在熔体凝固过程中增加外加辅助磁场,以提高材料的品质。而我国以往的空间材料科学实验设备不具备外加磁场的功能。

1.2 淬火

淬火是材料加工过程中一个重要的工艺过程。先进国家的许多空间材料科学实验设备都带有淬火功能,甚至还有专门用于在空间进行淬火实验的空间材料科学实验设备。不论是从国外的空间材料科学实验设备来看,还是从我国空间材料科学的需求来看,淬火功能都是我国未来空间材料科学实验设备不可缺少的一个重要功能。下面以几种具有重要空间实验意义的材料为例来说明空间材料实验对淬火的需求。

要在空间进行的高度无序非晶材料和硫(卤)系玻璃的制备,合金熔体的无容器过冷、亚稳形核与生长实验,易形成亚稳结构的体系相变热力学研究,要求实验设备能够提供 $200^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (300°C 以上)的降温能力。

在微重力条件下材料微结构的应力操纵研究中,复合体系熔融后冷却速度的确定和微观应力点阵或花样的辨识问题是要解决的科学问题。在空间进行实验的关键技术之一是较大失配体系熔融后的冷却,对冷却过程和速度要有严格的控制。要求冷却能力达到 $100\text{K}/\text{min}$ 。

高性能金属合金的空间制备则对实验设备提出了 $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的淬火要求。由此可以看出,如果不能在空间对材料进行淬火处理,很多具有重要科学研究意义的材料将无法在空间进行实验。

2 设备结构方面的关键技术

2.1 多样品

目前, 国际上的空间材料科学实验装置大多采用可更换样品结构或多样品结构设计。可更换样品结构的实验装置, 如国际空间站上哥伦布舱中的材料科学实验室 (Materials Science Laboratory (MSL)) 有一个模块化的插入式炉子, 不同的炉子加工不同的样品, 通过更换不同的炉子模块, 即可加工不同的样品。而多样品结构设计的实验装置, 如加拿大的 ATEN (Advanced Thermal Environment) 炉一次可进行 40 个样品的实验, 日本的 GHF (Gradient Heating Furnace) 梯度加热炉, 一次可进行 15 个样品的实验。

由于空间实验的机会非常珍贵, 因此在一个实验装置上一次装载多个实验样品, 可以在一次空间实验中进行多个样品实验, 这样可大大提高空间资源的利用效率, 提供更多的实验机会, 获得更多的实验结果。我国未来空间站上的空间材料科学实验设备应该具有一次加工多个实验样品的能力, 以满足更多科学实验的需求。

2.2 模块化的结构设计

目前, 国际上大多数的空间材料科学实验设备都是采用模块化结构, 功能集成化程度越来越高, 已将材料制备、过程探测、物性分析和材料后处理等功能集成在一个设备中, 构成一种高性能、多用途的新型材料研究设备。我国未来的空间科学实验设备要走这条路。模块化设计有以下几大优点:

(1) 可灵活配置。通过不同的模块组合, 可形成多功能、多用途的实验设备。例如国际空间站哥伦布舱中的材料科学实验室 (Materials Science Laboratory (MSL)), 如图 1 所示, 可通过更换不同的炉子来进行不同的材料试验。

又如法国航天局 (CNES) 和美国航天局 (NASA) 在国际空间站中进行的合作研究项目 DECLIC (如图 2 所示), 是一种结构紧凑、配置灵活、性能优异的系统, 目前主要用于空间流体力学和材料科学方面的实验, 研究近室温和高温临界流体、以及模型合金的定向凝固, 有 3 个可更换的实验模块, 分别是近室温和高温临界流体实验模块和定向凝固实验模块。将来还要通过利用已有的设施和 (或) 在模块中加入其他特定的光学和光电器件, 开发光学诊断模块。另外, 新的软件可以由地面上载至轨道飞行器上。

法国航天局 (CNES) 目前的中期计划包括一些模块的开发, 准备对高温临界流体实验模块进行适应性改造, 在测量水的临界幅度的基础上, 研究化学过程和高可压缩介质中流体力学之间的相互影响;

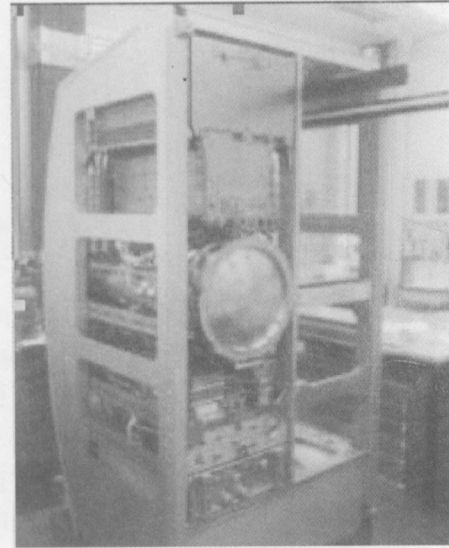


图 1 MSL 的工程模型



图 2 DECLIC 实验设备和其中的 3 个模块

在燃烧领域, 将研究开发大容量液体中微量液滴悬浮燃烧现象的实验模块。

(2) 节约投资。设备中共用的功能模块可一次开发完成, 并且可作为一个较为长久的平台使用。

(3) 节约飞行器上的资源。对于我国未来空间站上的科学实验, 运输飞船只需携带需要更换的模块上行和下行即可, 不必携带整个实验设备。

(4) 适应性强。通过不同的模块组合, 既可以在资源较为充足的空间站上进行科学实验, 也可以在资源相对较少的返回式卫星上进行科学实验。这样, 一次开发成功的设备, 可以在不同的场合进行试验, 提高了设备的使用效率。

2.3 振动隔离

材料科学实验之所以要在空间进行,就是要利用空间的微重力实验环境。但由于空间载荷产生的振动(例如泵、风扇、电机)、飞行器姿态控制和轨道维持等因素的影响,使空间科学实验的微重力环境不能满足空间科学实验的要求。

国际上的相关研究结果表明,航天器上的振动(或 g 跳)环境对空间材料科学实验结果(如晶体生长、熔体材料的扩散系数等)有明显的影响,已引起人们的广泛关注。国际空间站上的科学实验对微重力加速度的要求和实际的加速度环境如图 3 所示。

在我国以往的空间科学实验中,空间生命科学实验中生物培养箱的离心机动作对微重力的干扰较大,特别是该离心机从火箭分离到返回前,整个运行段几乎一直在工作,因此其对微重力环境的扰动在整个实验过程中都一直存在。

此外,在飞船的变轨、姿控和轨道维持过程中,发动机对飞船造成的微重力扰动时间从几秒至几十秒,扰动幅度高达几个至几十个毫克。如此长时间、大幅度的扰动,会严重影响空间微重力科学实验的结果,甚至会导致实验的失败。

在今后空间站上的实验过程中,大量的、各学科的空间科学实验设备会在一起同时进行空间实验,实验设备之间的相互干扰是不可避免的。因此,给空间微重力实验设备加装振动隔离装置是十分必要的。

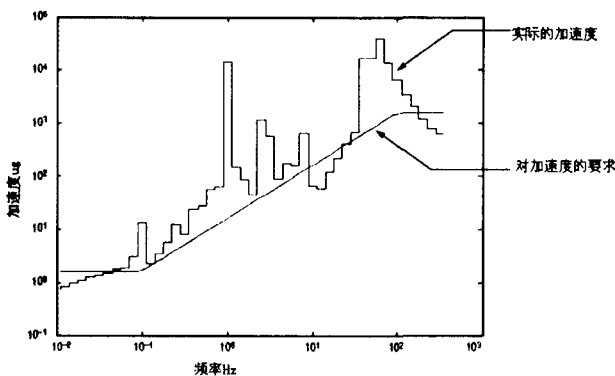


图 3 空间科学实验对加速度环境的要求

3 实验技术方面的关键问题

3.1 实时观察和在线分析

在微重力条件下,材料制备过程究竟是怎样的,

如熔区形态、界面形状等,目前大多停留在理论预测阶段,缺乏可靠直接的实验依据。为探索材料制备过程的机制,为理论模拟提供可靠的实验依据以及边界条件,并对理论模拟预测的结果进行验证,需要建立材料制备过程的实时观测系统。

固-液界面、流体对流及表面张力等是空间晶体生长中非常重要的因素,因此在线检测晶体生长的质量对于提高空间晶体生长实验的成功率至关重要。通过空间材料科学实验过程的实时观察手段,可以观察晶体生长固-液界面及其变化过程信息,对材料制备过程中的动力学过程进行研究,研究物质输运条件一对流、扩散在微重力下的性质。还可以用于晶体生长、合金制备、定向凝固等方面的研究,以及空间环境下凝聚态中基本物理问题的研究。

利用实时观察手段,可以直接获得在扩散热和质量输运条件下凝固微观结构的定量结果,这个结果对研究材料的凝固过程具有十分重要的意义。还可获得重力影响下的流体流动与微重力条件下流体流动的比较结果。研究重力在流体流动过程中所起的作用及机理。这也是我们开展空间材料科学研究的重要目的之一。

此外,实时观察和在线测试分析的目的还在于提高我国空间科学实验的信息获取和检测水平,提高空间科学实验过程的实时在线检测分析技术,加强空间科学实验信息的获取能力和水平,同时可提高实验效率。这样可将同一种实验反复进行多次,获得更多的实验结果。

利用该项技术还可对实验过程进行实时的反馈控制,从而获得更为精密的实验结果。

3.2 试验过程的监视

除可使用实时观察的方法监视实验过程之外,还可使用塞贝克电压和电阻测量、超声测量来监视样品熔解和凝固过程中的固-液界面。

法国的 Mephisto 计划最先使用赛贝克效应来诊断定向凝固实验的进行。该项技术的原理是测量两个固-液界面之间的不同热电势。如果两个界面都是平坦的,它们之间的电压差正比于它们之间的温差,可以在凝固过程中对过冷界面进行测量。材料生长过程中界面微结构、曲率、位错、熔化密度梯度和熔化流(melt flows)都对塞贝克信号有影响,这就意味着凝固过程中该效应的变化也能够用其他的手段来监视。塞贝克电压测量是空间材料科学实验中可对凝固界面进行诊断的重要实时测量方法。

塞贝克诊断可以和样品的电阻测量结合在一

起。如果已知样品的尺寸、电阻率与温度和温度分布的关系,界面的位置就可以由电阻值推断出来。

此外,不透明的合金系统可利用基于导向波的超声波诊断仪来测量生长速度。国外有实验结果表明,利用此种方法来确定固-液界面的位置,其精度可达到 0.01mm。因此,这种超声诊断技术是一种适合的和理想的测量凝固速度的工具,而且对于稳态和非稳态凝固过程同样适用。

凝固速度的超声测量是定向凝固试验的一种诊断工具。从样品冷端发出的超声波脉冲被凝固界面的相边界反射,即可检测到固-液界面的位置。利用自校正技术精确地测量行程时间,就可以得到样品中超声波的速度,因此可以得到界面的位置。由该参数与时间的关系可以得到高精度的凝固速度值。

总之,在空间材料科学实验中,如果加入了物性测量的手段,可以大大提高实验效率,在一次实验中可得到更多的科学实验数据,并依此对实验过程和实验结果作出判断和分析,得到更多的空间实验成果。

3.3 遥操作

遥科学使得进行空间材料研究的科学家在地面就能够参与空间的科学实验,通过遥科学提供的技术手段,科学家在地面就可以了解、掌握和控制空间的科学实验。这对实验的成功、实验结果的获取和分析、提高实验的有效性和效率具有非常重大的意义。

目前,国际上的空间科学实验设备均具有遥操作能力,而我国的空间科学实验设备几乎不具备遥操作能力,只有少数设备进行过初步的遥操作实验。在我国以往的空间材料科学实验中,实验过程完全按预先编制的程序进行,而预置的程序是按地面的实验条件和预想的实验结果来编制的。空间的实验环境与地面大不相同,实际的实验过程与预想的也会有差异。因此造成空间科学实验难以获得更理想的实验结果。要提高空间科学实验的效率,在一次空间实验中获得更多的实验结果,必须利用遥科学手段来干预空间的实验过程。因此,如何有效地利用遥操作来进行空间材料科学实验,是目前我们所面临的必须尽快解决的课题。

3.4 功能强大的地面实验支持系统

在我国以往的空间材料科学实验设备的研制过程中,往往对地面实验支持系统的研制重视不够。而我们都知,大量的地基实验是空间试验成功的基础和保障。如何有效和高效地开展地基实验,是摆在我们面前的一个重要问题。地基实验不是简单地积累实

验数据,而是要通过对实验结果的分析来找到进行空间实验的最佳试验参数和实验状态,同时不断地发现和修正实验设备中与材料实验的要求、空间实验环境的要求、设备研制规范的要求不匹配的地方。因此,及时、准确地发现实验过程中的问题就显得十分重要。为此,地面实验支持系统应该具备下列功能:

(1)对空间材料科学实验设备进行检测,以确保实验设备各方面的性能达到要求。

(2)模拟实验设备中各模块的功能。这样就为各模块的同步研制提供了方便,可加快研制步伐。

(3)模拟航天器系统总线的功能。发送控制命令、数据注入命令和数据采集命令。

(4)为实验模块之间的连接提供测试通道,达到对实验模块进行测试的目的。

(5)模拟有效载荷应用中心的功能。监控实验的工艺流程和实验的进行过程。控制实验的工艺流程主要是根据实验过程的监视结果发送控制命令,设置实验工艺参数,以调整实验过程使之符合预期的结果。

通过实时趋势图形、实时报表、模拟空间试验设备内部温度场分布的方式,实时监视实验的进行过程,并可在实验过程和实验状态出现异常的时候,将告警信息以语音、动画等方式提示给实验人员,也可将告警信息自动发送给指定的实验或管理人员。

(6)实验分析和管理工作。能够统计监控数据,对实验数据进行总结和分析,以达到实验的目的,并且能够管理实验数据,为今后查阅实验数据和实验记录提供方便。

4 结论

总之,我国未来的空间材料科学实验设备应瞄准国际上空间科学实验设备的先进水平,满足我国未来空间材料科学实验的要求,提高我国未来空间材料科学实验的水平,为我国未来空间材料科学的发展做出贡献。◇

参考文献

- [1] Romain Marcout, Gerald Raymond, Bernard Martin, etc. A Facility to investigate fluids and transparent materials in microgravity conditions in ISS, International Astronautical Congress 2006, IAC-06-A2.5.02
- [2] 于强, 国外几种先进的空间材料科学实验装置, 载人航天, 2006, 5
- [3] Yan Liu, Fei Ai, Chude Feng, Qiang Yu, Xiaochen Tan, A NEW KIND OF MULTI-TASK MATERIALS PROSSING FACILITY FOR SPACE APPLICATIONS, Space Technology, Vol. 26, Nos. 1-2, pp. 87-90, 2000