

落管——空间实验的地面模拟手段

秦志成*

空间材料科学研究的主要目的在于利用空间环境,制备地面无法得到的新材料和在空间实现材料新工艺。然而,空间实验机会十分难得,且耗资甚巨。为此,各国科学家在地面建造了各种模拟空间环境的实验设施。落管就是其中之一。它是垂直安置并抽成真空(或根据需要充以某种惰性气体)的长管。样品在其顶部的熔化室熔化后成液滴状自由下落,并在下落时产生的失重和无容器过程中凝固,以进行空间材料研究的模拟实验。

落管的用途及科学价值

空间环境的特点是微重力、极低温、超高真空和无屏蔽的各种辐射等。其中最主要的也是地面上比较难以实现的是微重力。能模拟微重力条件的地面设施有探空火箭、高空气球、失重飞机、落管和落塔等。其中落管提供的微重力条件最好也最稳定,在较高真空下可达到 $10^{-8}g_0$ (g_0 为地面上的重力加速度值)的微重力水平,在落管中甚至没有在空间站中所存在的因宇航员的活动所引起的扰动;加之落管中的实验条件容易控制,模拟实验周期也短,一天可进行一次或数次实验。因此,落管成为开展空间材料科学模拟实验的重要手段。

落管中自由下落的液滴,在真空或某种惰性气体中凝固,是一种十分简单的无容器固化方式,它不像其它无容器过程(如电磁悬浮、助熔剂技术等),需要一种外力来抵消重力的作用。因而,也就没有其它无容器过程中的各种干扰。所以,落管的科学价值就在于,它是一种地面上模拟微重力条件下无干扰的无容器过程的实验手段。

目前,人们对空间环境、空间环境中的物理规律,以及它们对材料制备所产生的影响的认识还远远不够,而增加这些认识的空间实验机会却很有限;所以,实验前的理论与技术的广泛论证,都离不开地面模拟实验。因此,落管作为一种方便、可靠,而且花费不大的地面模拟手段,倍受各国科学家的欢迎和重视。

落管技术的历史演变

英国人 William Watts 于 1782 年申请了利用自由落体方法改善铅弹圆度的专利,这是最早将失重效应用于材料制备的例子。1956 年美国 Turnerbull 设计并安装了世界上第一个锥型落管,管高为 1.2 米,并在其中进行了 Fe-Ni 合金的过冷研究,得到了亚稳的

* 本文作者还有杨海清 王文魁 刘培铭 王龙 陈佳圭

由于声波在液体和固体中可以很好传播,因而所发展的超声全息术能很好地记录水下的潜物、人体内的器官等。而红外和微波全息术对军事侦察和监视有重要意义,因为某些红外和微波波段在大气和水中较好的传输特性。

全息显微术也是全息术的一个重要应用。如用波长为 λ_1 的激光束来摄制全息片,而用波长为 λ_2 的激光束来再现,则物体就被放大了 λ_2/λ_1 倍。例如以电子束来摄制全息片,以可见激光作为再现光,则放大倍数可达十万倍。这种技术具有立体性,能显示物体和生物样品的详细细节。

激光在多种领域内的应用

激光的神奇特性以及激光技术的飞速发展,使它在诸多领域内获得了广泛而重要的应用。

激光在物理学中的应用首先涉及对原子分子的结构、它们的内部运动规律、它们在各种物理环境下的外

部运动规律及它们之间的相互作用规律的研究,激光光谱学和非线性光学已发展成为新兴的前沿学科。另一个重要应用方面是对基本物理定律的验证,例如首次在光学波段直接测得了拉姆位移值(1058 兆赫),这是对量子电动力学的最好验证。

在计量学方面,通过激光稳频技术的发展,产生了新的频率和时间标准,光频可测准到 10^{-14} , 时间测准到 10^{-11} 。

激光通信,尤其是近十余年来发展起来的光纤通信,是一种前景似锦的通信方式。1970 年人们研制出第一根光纤。所使用的光源通常为磷砷镓半导体激光器。进入 80 年代后,光纤通信得到了大发展,几个技术领先的国家组织了大容量、高速率和长距离的大干线、各类通信网和越洋海缆等。

激光还在医学、生物学、化学、机械加工和军事方面获得广泛地应用。可以预料,在今后的岁月中,激光及其应用将继续发展并不断造福于人类。

bcc 结构相。Turnbull 的功绩不仅在于建成了实验用落管,而且,利用它较系统地进行了成核、过冷及非晶形成的研究。他是利用落管进行材料研究的先驱,他的新奇构思及研究结果很快便得到了人们的关注,几乎所有后来利用落管进行材料研究的论文都引用了他的工作。

经过较长时间的酝酿和准备,美国 NASA 于 70 年代在 Marshall 飞行中心建成了两座高度分别为 100 米和 30 米的落管,其检测设备和控制系统都反映了当时的科技水平,真空度可达 10^{-7} Torr。此后,美国 NASA 又在喷气推进实验室建立了两座 13 米高的落管。一座为倒锥形,用底部强制向外通风的办法改善微重力水平。另一座则在中间增设液氮温区,以加速试样冷却。

80 年代以来,落管数量及落管技术都有了较大发展。继美国之后,法国、西德和英国等国家都先后建成或正在建造落管。他们在设计上吸取了先期落管的经验,普遍提高了真空度。例如 1988 年投入使用的法国 47.1 米落管,其真空度可达 10^{-7} Pa;美国 Vanderbilt 大学正在筹建中的 30 米落管也提出了真空度 10^{-7} Pa 的指标。

国内外现有落管简况

目前,世界上已投入运行的落管共有十余座,正在建造中的 30 米以上的有两座。它们都设在大学或研究所的微重力中心。法国 Grenoble 的 47.1 米落管,具有迄今最高的真空条件 10^{-7} Pa,微重力水平最高可达 $10^{-9}g_0$,并且配备了先进的控制和测试系统。西德 ZARM 建造的 144 米落管,与落塔位于同一建筑内,二者作了统一安排和考虑;它是目前世界上最高的落管,其微重力时间达 4.74 秒。我国的落管建造工作始于 1987 年。目前,国内有落管三座,即中科院物理所的 20 米和 1.2 米落管,及中科院金属所的 7 米落管。

落管中材料研究的内容及其现状

如前所述,落管是一种地面上模拟微重力条件下无容器过程的手段;因此,许多与微重力条件下无容器有关的过程都能在落管中进行研究。特别是液相成核与过冷、亚稳相的形成与亚稳材料的制备,以及难混合合金的凝固等方面的研究,现分述如下:

(一) 液相成核与过冷

标志液固转变的熔点,一般是指平衡条件下的液固相变温度。任何物质在一定压力下其熔点均为固定值。但因生核需要克服某种势垒,实际液相结晶都有一定程度的过冷。为了深刻理解过冷现象的本质,了解影响成核、凝固及玻璃化的因素,必须进行成核及核长大等方面的理论研究。由于液态急冷及激光淬火等液态金属过冷方法的冷却速度非常快,难以对上述问

题进行深入研究。而落管中的微重力无容器和高真空环境,可使液态金属合金避免因与器壁的接触及表面氧化所引起的杂质成核,因而可获得较大的过冷度。对某些均匀成核率低的金属合金,甚至可在相当慢的冷却速度下得到很大的过冷度,这就为深入研究成核及核长大规律创造了条件。

(二) 亚稳相的形成及亚稳材料的制备

过冷,特别是深过冷,可导致体系进入相图上的非平衡区。当液态金属合金过冷到亚稳相熔点时,亚稳相可优先成核,这是获得亚稳材料的一条有效途径,进而可研究稳定相、亚稳相的相选择规律,以及非晶等具有优异性能的亚稳材料的形成条件。

最近的研究表明,高压相常常也是过冷相。人们利用落管在常压下先后得到了 Bi、Sb 等的高压相。

(三) 难混合合金的凝固

在重力条件下,难混合合金熔炼时会出现两相分离,因而无法获得组织均匀的合金。尽管对微重力在难混合合金凝固过程中的作用尚有不同看法,但不久前美国人的研究结果表明,在 100 米落管内自由下落过程中凝固的 Au-65at.% Rb 合金,得到了成分均匀分布的组织,而在重力条件下凝固的合金,两种组元是完全分凝的。落管不适于自身导热率低的材料(如氧化物等)的研究,因为它们难以在短时间内固化。但值得指出的是,这些物质的过冷对无容器条件并不敏感,它们的结构一般都比较复杂,因而容易过冷。

综上所述,可以看出利用落管进行材料研究的前景是很广阔的。这不仅是因为它所能研究的问题是材料科学中最活跃的前沿领域,而且还由于它对材料研究的复盖面很广,可包括低熔点金属合金、高熔点金属合金;甚至半导体物质及其合金也可在落管中研究。

· 求疵录 ·

编者按:本刊新辟“求疵录”栏目,热忱欢迎大家挑毛病,以达到编者、读者、作者三方相得益彰之目的。

读者张良生来信:

“贵刊去年第 6 期 14 页的图 1 有误。根据折射定律,入射线与折射线分居于法线的两侧,满足 $\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} =$

$\frac{n_2}{n_1}$,其中 n_1 表示空气的折射率, n_2 表示玻璃的折射率。由于 n_2 随光波的频率而变,而 $n_1 \approx 1$ 几乎不变,故发生色散。可见光在常用的光学玻璃中都是发生正常色散,即 n_2 随光频增高而变大,所以一束白光进入棱镜后,紫光比红光更接近于法线,而从另一面出棱镜时,紫光偏得更厉害。”