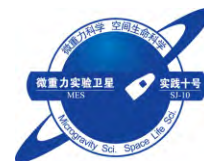


# 空间中的胶体自组装现象<sup>1)</sup>

李伟斌 蓝 鼎 王育人<sup>2)</sup>

(中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190)



**摘要** 实践十号卫星上即将开展的空间胶体自组装实验,旨在阐明重力在胶体组装过程中的作用,进一步理解胶体自组装现象,为制作大面积高质量的胶体晶体提供理论支持,以期未来制备出具有实用价值的光子晶体器件.空间胶体自组装实验的大量创新性设计,将为未来空间实验的开展提供新的思路.

**关键词** 实践十号, 胶体, 微重力, 自组装

**中图分类号:** O648.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.6052/1000-0879-16-078

## 引 言

胶体一般指某种微小颗粒分散在另外一种溶液中,颗粒的尺寸在纳米到微米之间.胶体在日常生活和工业生产中几乎是无处不在的,例如雾霾、书写用的墨水、喝的咖啡等都是胶体.经常喝咖啡的人会留意到,洒在桌面上的咖啡液滴,干燥后往往会留下环状的图案,这种现象被称为“咖啡环效应”.咖啡环效应背后蕴含着丰富的物理机制.1997年,Deegan等<sup>[1]</sup>通过研究胶体液滴中的颗粒运动,在Nature期刊上发表文章,首次揭示了咖啡环效应的形成机理.他们发现,液滴表面各部分的蒸发速率不同,边缘区域的蒸发明显快于中间区域.当液滴的接触线被固定住时,为了补偿边界部分过快蒸发掉的那部分液体,液滴内部的液体会流向边缘,并带动悬浮在液滴内部的颗粒向边缘移动,进而使得大量颗粒在边界附近聚集,最终形成环状图案.从显微镜下观察环状图案的局部区域,会惊奇地发现颗粒排列成非常有序的阵列结构.这种周期性的排列结构看起来很像原子晶体的排列,但是胶体中的质点比原子尺度大10000倍的胶体微球,所以被科学家称为胶体晶体.人们发现,胶体晶体结构排列的周期恰好为光波波长数量级,可以改变光传输路径,因此被称为光子晶体<sup>[2-3]</sup>.光子晶体的出现,被认为极有可能

代替半导体,成为新一代信息承载和传输的媒介,这让我们对未来产生了无限的遐想.理论上,科学家们有望通过设计各种光子晶体及器件,达到自由操纵和控制光波行为的目的.

胶体体系最突出的性质是它的自组装能力,咖啡环结构就是由胶体颗粒通过自组装的方式形成.所谓自组装,是指基本的物质结构单元(如分子、微纳米颗粒等)自发形成有序结构的一种技术,是制备胶体晶体的有效途径.科学家利用各种自组装方法,在地面上合成了不同尺寸和形状的胶体晶体<sup>[4-5]</sup>.然而,在地面组装过程中,胶体颗粒很容易因为重力的作用而产生沉降,并且重力驱动下的浮力对流现象使颗粒的组装过程变得复杂,限制了对这一过程的观察和认识.在空间微重力环境下,浮力对流受到较大抑制,由于重力导致的颗粒沉降和分层作用被极大减弱<sup>[6]</sup>,这为理解胶体自组装现象,从而控制胶体颗粒的排列行为,预测颗粒沉积后形成的图案提供了有利条件.空间中的胶体自组装研究,将为实现大面积高质量胶体晶体的制作,进而在未来制备出具有实用价值的光子晶体器件提供思路.

利用微重力环境进行空间胶体晶体的研究已达二十余年,国外科学家在航天飞机<sup>[7]</sup>和国际空间

2016-03-11 收到第 1 稿,2016-03-30 收到修改稿.

1) 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA04020202, XDA04020406)和国家自然科学基金(11202209, 11472275)资助项目.

2) E-mail: yurenwang@imech.ac.cn

**引用格式:** 李伟斌,蓝鼎,王育人.空间中的胶体自组装现象.力学与实践,2016,38(2):211-214

Li Weibin, Lan Ding, Wang Yuren. Self-assembly phenomenon of colloidal spheres in space. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 211-214

站<sup>[8]</sup>上都进行过胶体晶体生长的实验,取得一批重要的研究成果,并展现出美好而诱人的应用前景.但是,受到空间实验条件和资源的限制,以及实验技术复杂,目前尚未有人利用胶体颗粒在空间进行蒸发自组装实验.实践十号返回式卫星是我国首颗微重力科学实验卫星,将于2016年4月初发射<sup>[9]</sup>.实践十号卫星将在太空绕地球运转接近15d时间,相当于一个临时搭建的太空实验室.胶体材料箱是搭载在该卫星上的一个重要载荷,类似一个安装在卫星上的空间胶体实验平台,可以通过地面远程控制,在空间自动完成复杂的实验流程.利用卫星提供的微重力环境,计划在空间完成胶体自组装实验,研究微重力条件下的胶体组装现象,阐明重力在胶体组装过程中的影响,为未来胶体晶体的应用提供理论

支持和实验依据.

## 1 空间实验介绍

### 1.1 空间实验原理

空间实验原理如图1(a)所示,于微重力环境下,在一个透明的石英基片上注射一个大体积的胶体液滴.在石英基片的侧方装置一个侧视相机,观察液滴宏观轮廓的变化,大液滴的轮廓如图1(b)所示.对液滴轮廓的观察,可以得到液滴接触角随时间的变化过程,进一步判断液滴内部的微流动和颗粒的运动过程,因为这种微小流动和接触角密切相关.在石英基片的下方安置一个显微镜,用显微镜观察液滴中胶体颗粒的运动过程和胶体颗粒之间的相互作

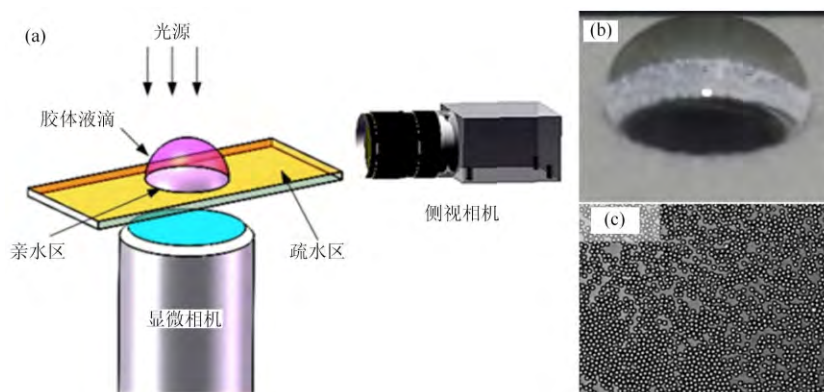


图1 (a) 空间实验原理示意图; (b) 宏观相机中观察到的液滴轮廓; (c) 显微镜中观察到的胶体颗粒运动

用,这是胶体颗粒组装成有序结构的物理基础.一个典型的显微观察图片如图1(c)所示,图中的小球为胶体颗粒.

### 1.2 实验关键技术问题

为了顺利实现空间实验,胶体材料箱进行了大量适应性创新设计,其中最关键技术有两项,一是液滴的注入和维持技术,二是空间显微观察技术.在空间环境中,由于没有了重力,液体不能自动从注射针头上滴落下来,并稳定地在石英基片上形成液滴.因此如何实现液滴的注射及限制,是一个不小的难题.在实验设计上,采用精确的注射泵来控制液滴的大小.同时,利用注射泵给液滴一个驱动力,让液滴有效地脱离针头,针头用疏水材料制备.石英本身为亲水材料,在石英基片上液滴形成的外围区域,制作了大面积的超疏水涂层,如图1(a)所示的黄色区域.这样,在液滴接触亲水区的时候,就会在表面张力的作用下顺利脱离注射针头,在基片的亲水区

上形成我们需要大小的液滴.同时,由于疏水区的存在,使得液滴不会铺展到整个石英基片上,影响空间实验观察.

观察液滴中胶体颗粒的运动过程是另一项关键技术.胶体颗粒只有 $3\mu\text{m}$ 大小,如果想获得清晰的胶体颗粒图像,就必须非常精确地控制显微镜的定位和稳定性,使得显微镜聚焦平面的稳定度在微米量级.这在地面上虽然是一项普通技术,但对于空间实验设备却提出了不小的挑战,因为空间实验设备要经历火箭发射过程带来的巨大振动和冲击,即使地面的装配技术能够保障显微镜的安装精度在微米量级上,也无法保障在经过强烈冲击和振动后,这个安装精度依然保持得住.另外一方面的困难来源于,在地面的实验中可以通过手动调节来校正显微镜焦平面的误差,但在空间实验中由于无人操作,所以不能采用手动的办法来调整显微镜的误差.从光学设计原理出发,对空间试验中的显微观察光路

进行了巧妙设计,从而保证了显微光路的精度.通过地面大量的力学试验及热试验验证,显微图像依然清晰可见,这说明对显微光路的设计是合理可靠的.

## 2 地基试验结果

### 2.1 胶体颗粒的地面组装试验

为了验证空间实验方案的有效性,在地面上,对胶体材料箱进行了大量地基匹配试验,图 2(a)为正在测试中的胶体材料箱载荷设备.图 3(a)给出了胶体液滴外轮廓的变化.液滴和基底的接触面积保持不变,而液滴的接触角和高度都随蒸发时间不断减小.说明液滴边界被完全钉扎在设计的基础上,证明在空间实验中对液滴的控制是完全有效的.图 3(b)给出了漂亮的胶体自组装图案.这是胶体液滴干燥完成后,在石英基片的局部区域有序排列而成的单层胶体晶体.由于空间微重力环境几乎没有浮力对流的干扰,并且胶体颗粒不再产生重力沉降现象,

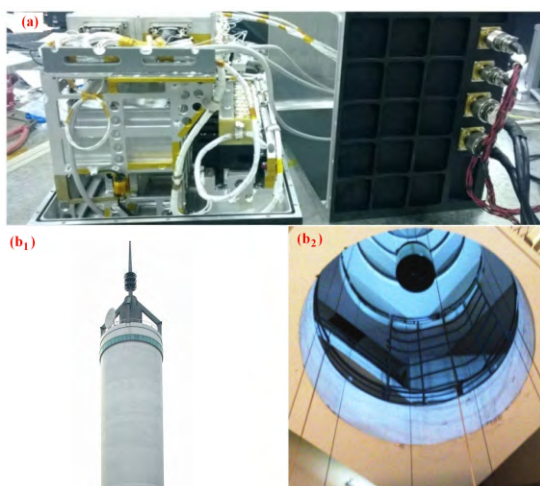


图 2 (a) 胶体材料箱地检测试中; (b) 中科院百米落塔, (b<sub>1</sub>) 和 (b<sub>2</sub>) 分别是落塔外部形状和内部结构

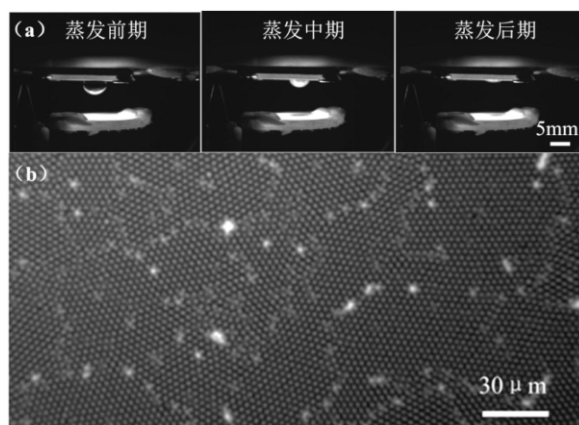


图 3 (a) 胶体液滴蒸发过程中轮廓的变化; (b) 胶体液滴干燥后形成的图案

因此预测在空间实验中,胶体颗粒的运动活性更大,组装成的有序结构质量更高.

### 2.2 受限液滴的落塔试验

利用中国科学院力学研究所国家微重力实验室(NML)的国内唯一百米落塔装置,对空间实验环境下液滴形成的微重力效应进行了初步探索.图 2(b)是微重力落塔装置,是开展微重力实验的基本手段之一.落塔试验的原理很简单,即将试验落舱悬挂在落塔顶部,释放后的落舱开始做自由落体运动,那么落舱内部的实验设备将处在失重状态下.NML的落塔高 116 m,可以获得 3.6 s 的微重力时间.

图 4 是对体积不同的两个液滴进行的落塔试验.观察到液滴进入微重力环境后,液滴产生剧烈振荡,虽然形状发生了显著的变化,但是液滴被牢牢钉扎在基片上,这进一步验证了对液滴控制的有效性.在空间实验中,液滴的形状将与地面上有显著差别,更加趋近于球形,这种形状的变化会引起液滴内部流场的变化,进而引起胶体颗粒的组装过程.

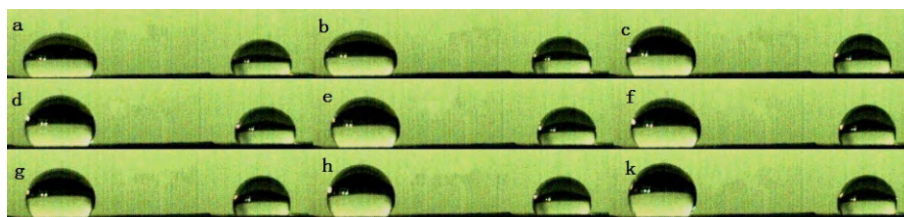


图 4 落塔试验中观察到的液滴进入微重力后外形的变化

## 3 结论与展望

空间的胶体自组装实验,是借助于我国的返回式科学实验卫星——实践十号卫星,对微重力条件下胶体颗粒的自组装现象进行的一次深入研究.实

验的开展对于解释重力在胶体蒸发组装过程中的作用,控制胶体颗粒的排列行为,预测颗粒沉积后形成的图案有重要意义.期待通过空间实验研究,为未来优化地面材料合成工艺,制备大面积高质量的胶体



晶体提供理论和技术支持.

### 参 考 文 献

- 1 Deegan RD, Bakajin O, Dupont TF, et al. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops. *Nature*, 1997, 389(6653): 827-829
- 2 Braun PV, Rinne SA, Garc A, et al. Introducing defects in 3D photonic crystals: state of the art. *Advanced Materials*, 2006, 18(20): 2665-2678
- 3 Vlasov YA, Bo XZ, Sturm JC, et al. On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals. *Nature*, 2001, 414(6861): 289-293
- 4 Norris DJ, Vlasov YA. Chemical approaches to three-dimensional semiconductor photonic crystals. *Advanced Materials*, 2001, 13(6): 371-376
- 5 Xia Y, Yin Y, Lu Y, et al. Template-assisted self-assembly of spherical colloids into complex and controllable structures. *Advanced Functional Materials*, 2003, 13(12): 907-918
- 6 Barmatz M, Hahn I, Lipa J, et al. Critical phenomena in microgravity: past, present, and future. *Reviews of Modern Physics*, 2007, 79(1): 1
- 7 Zhu J, Li M, Rogers R, et al. Crystallization of hard-sphere colloids in microgravity. *Nature*, 1997, 387(6636): 883-885
- 8 Weitz D, Bailey A, Manley S, et al. Results from the physics of colloids experiment on ISS. The 53rd International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation (IAF), Houston, TX, F, 2002
- 9 Hu W, Zhao J, Long M, et al. Space program SJ-10 of microgravity Research. *Microgravity Science and Technology*, 2014, 26(3): 159-169

(责任编辑: 刘希国)

## 第 7 届全国空间轨道设计竞赛设计结果

由中国力学学会主办、中国科学院空间应用工程与技术中心负责命题与组织的第 7 届全国空间轨道设计竞赛已圆满结束. 本届竞赛共有 40 支团队报名参加, 8 月 15 日, 命题方公布了甲、乙两组题目, 甲组题目更具挑战性, 乙组题目则面向更多初次参赛的团队, 要求参赛团队于 10 月 15 日之前提交设计结果.

经过 2 个月的努力, 经过命题方的检验, 确定了甲组 6 项正确设计结果, 乙组 13 项正确设计结果, 并最终评选出甲、乙两组各奖项, 其中甲、乙两组获得一等奖的团队所属单位分别为:

- 甲组一等奖: 中国科学院国家空间科学中心  
 西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室  
 清华大学航天航空学院
- 乙组一等奖: 中国科学院国家空间科学中心  
 中国科学院光电研究院  
 西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室

在中国力学学会的倡导下, 全国空间轨道设计竞赛于 2009 年揭幕, 第 1 届由清华大学组织举办, 此后每一届竞赛的冠军团队负责组织举办下一届竞赛, 先后有西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室、国防科技大学、中国科学院空间应用工程与技术中心与光电研究院、清华大学、航天飞行动力学重点实验室等为历届竞赛的组织举办做出了贡献. 按照惯例, 甲组题目冠军团队 (排序第一) 以独立或联合的方式负责组织举办下一届竞赛.

(第 7 届全国空间设计轨道竞赛题目见第 224 页)