

摄像显微技术在实验软物质物理中的应用

王华光 张泽新

Application of video microscopy in experimental soft matter physics

Wang Hua-Guang Zhang Ze-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 178705 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.178705

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.178705>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于法布里-珀罗调谐滤波器的傅里叶域锁模扫频激光光源

Fiber Fabry-Perot tunable filter based Fourier domain mode locking swept laser source

物理学报.2013, 62(6): 068703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.068703>

掺Bi离子锗铌酸盐红外发光玻璃的研究

Bi-doped germanium niobate glasses with near-infrared broad-band emission

物理学报.2012, 61(8): 086102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.086102>

非晶态石英的变电荷分子动力学模拟

Variable charge molecular dynamics simulation of vitreous silica

物理学报.2011, 60(2): 026101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.026101>

专题: 软物质研究进展

摄像显微技术在实验软物质物理中的应用*

王华光 张泽新†

(苏州大学软凝聚态物理及交叉研究中心, 苏州 215006)

(2016年6月12日收到; 2016年7月26日收到修改稿)

摄像显微技术借助强大的显微成像手段和严谨的数学物理语言, 以精密微观测量和定量图像分析为基础, 是在实空间上研究软物质体系的微观性质的重要实验技术. 一方面, 摄像显微技术为人类观察和记录微观世界提供了基本工具; 另一方面, 摄像显微技术为科学家研究微观世界的物理规律提供了无法替代的实验手段. 本文回顾了摄像显微技术的发展历史, 介绍了摄像显微的实验技术和数据处理方法, 概述了利用摄像显微技术在胶体物理研究的典型应用以及国内的最新进展. 最后, 展望了未来摄像显微技术在软凝聚态物理及交叉学科中的应用.

关键词: 摄像显微, 软物质物理, 胶体物理**PACS:** 87.64.M-, 64.70.pv, 61.43.Fs, 82.70.Dd**DOI:** 10.7498/aps.65.178705

1 引言

软物质 (soft matter) 也被称为复杂流体 (complex fluids), 是一个比较宽泛的名词术语^[1,2]. 在我们日常生活和工农业生产中常见的软物质包括: 牛奶、油漆、乳液、塑料、液晶以及生物细胞等. 这些软物质的空间尺度通常为纳米到微米级别, 这一尺度区间与可见光的波长部分重合, 因此光学显微镜成为研究软物质的最有力的工具之一. 软物质物理是在传统凝聚态物理的基础上发展起来的, 是物理学的一个新兴分支^[3,4]. 实验软物质物理结合了基础理论、实验观测、数据分析和仪器设计等方面的内容. 它主要通过软物质体系中的物理现象进行观察和测量, 试图理解软物质体系的宏观物理性质, 总结软物质体系的微观物理规律, 指导软物质材料的设计和应用. 鉴于实验软物质物理学科交叉和涵盖广泛等特点^[5], 本文仅针对实验软物质物理中最重要的实验技术之一的摄像显微技术^[6]进行探讨, 并介绍摄像显微技术对一种典型的软物质——胶体体系^[7]软物质物理研究中的重要应用.

显微镜是人类史上伟大的发明, 它对生物学研究来说尤为重要, 人类对微观生物世界的认识是从显微镜发明才开始的. 1665年, 英国物理学家 Hooke 用自己制造的显微镜观察植物组织发现了植物细胞壁. 1676年, 荷兰科学家 Leeuwenhoek 利用显微镜发现了微生物, 开启了人类探索微观世界的大门. 在之后的200多年里, 显微镜的光学部件的质量得到了发展和提升, 例如各种消色差、消球差的物镜的出现和使用, 但显微镜仍然依赖人眼直接观察. 随着电子和影像技术的发展, 各种摄像设备陆续出现, 这样光学显微镜可以与摄像设备进行组合, 初步形成了摄像显微镜技术. 20世纪50年代, 现代摄像显微技术开始出现. 硬件上, 现代摄像显微技术不仅校正了显微镜光路系统的各种光学畸变, 而且还普遍采用了光电倍增管和电荷耦合器等光电器件作为图像接收系统, 并配以计算机, 构成了完整的图像采集和处理系统, 从而使得摄像显微技术进入了自动化时代, 是该技术的一次质的飞跃.

长期以来, 显微镜技术一直是生物学家用来观察昆虫、细胞、细菌等生物微观结构的重要手段.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB821500) 和国家自然科学基金 (批准号: 11574222, 211741001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangzx@suda.edu.cn

物理学家使用光学显微镜技术来研究软物质体系, 例如胶体体系的结构和动力学, 却是相对较晚的事情. 最早使用显微镜来研究微观颗粒的工作可以追溯到英国植物学家 Brown, 他通过显微镜观察到了花粉粒子的热运动现象, 即布朗运动 (Brownian Motion). 而法国科学家 Perrin 则使用显微镜观察到了微观颗粒在液体中的沉降平衡, 并以此获得了 1926 年诺贝尔物理学奖.

传统的显微技术只能对微观物理世界进行定性观察而不能定量分析研究, 极大地限制了这项实验技术的应用. 随着计算机、摄像设备和图像处理技术的发展, 显微镜技术进入了量化的时代. 例如, Pusey 等^[8]早在 1986 年就从宏观实验上观察到了胶体体系的液态、晶态和玻璃态等多种凝聚相. 然而, 基于摄像显微技术来研究胶体体系凝聚态物理的工作却一直未见报道. 直到 1996 年, Crocker 等^[9]提出的粒子跟踪的显微图像处理技术, 摄像显微技术才真正作为量化的实验手段被软物理学家所关注. 从此, 软物质物理学领域掀起了使用摄像显微技术来定量研究胶体、乳液和生物等软物质体系凝聚态物理的热潮. 在此后的 20 多年中, 该领域的研究中出现了一系列里程碑性质的工作, 其中包括胶体玻璃的结构和动力学^[10–12]、胶体晶体的成核和结晶^[13–15]以及最近提出的胶体分子概念 (colloid molecules) 等^[16–18]. 特别是随着激光扫描共聚焦显微镜的发明, 摄像显微技术可以对胶体体系进行三维成像, 同时辅以三维粒子跟踪的计算机程序, 实现了在三维空间上定量研究胶体体系的凝聚态物理. 同时, 基于激光扫描共聚焦显微镜的三维摄像显微技术, 打破了物理学家早期只能研究二维软物质体系的局限, 使研究诸如三维晶体熔化和三维玻璃化转变成为可能^[19,20]. 另外, 随着物理、化学、工程和生物学科的交叉融合, 一些衍生的摄像显微的技术也随之发展起来, 这包括研究微观流体力学的粒子成像速度测量技术 (PIV)^[21]和研究软物质体系微观力学性质的微流变技术 (microrheology) 等^[22].

摄像显微技术在经历了上百年的发展之后, 逐渐成为软物质物理实验研究中观察和测量的最重要的实验手段. 它从早期对自然界的花粉和微生物的观察到如今各种人造软物质体系的研究; 从对微观世界的定性观察逐渐发展到定量测量; 从简单的二维平面体系拓展到复杂的三维体系; 从早期的人

工技术计数测量到如今计算机辅助图像分析. 摄像显微技术随着科学技术的进步, 其自身也得到了创新和发展. 各种先进的仪器制造理念和实验测量方法被引入到摄像显微技术中, 这其中就包括了 2014 年诺贝尔化学奖研究工作: 超分辨率显微技术. 该技术的形成和成熟就是得益于化学、生物和电子学等领域的协同发展. 这些先进技术的引入使得摄像显微技术表现出越来越强的科学生命力. 本文从摄像显微技术分类、实验测量的硬件、数据分析软件和粒子跟踪这些方面探讨了该技术在实验软物质物理中的重要应用及国内利用该技术的前沿研究, 最后展望了该技术的未来前景.

2 摄像显微技术

2.1 摄像显微的硬件

摄像显微镜是比较精密的设备, 但是基本构造却很简单. 如图 1 所示, 摄像显微镜硬件设备配置包括显微镜, 以及连接在显微镜光路系统中的、用于录制图像的摄像设备, 还需要能够记录并储存图像的计算机^[6].



图 1 摄像显微技术的硬件构成: 显微镜, 摄像设备和图像采集及存储的计算机

Fig. 1. Essential components of video microscopy: microscope, video camera and computer for image capture and storage.

无论是普通的快速照相机还是高速 CCD 摄影机, 都可以很容易地与显微镜联合使用, 用于录像数据采集. 其中 CCD 摄影机更适合研究内部移动的或者是持续变化的样品. 通过摄像镜头将被摄物体的图像聚焦至 CCD 芯片上, CCD 根据光的强弱积累相应比例的电荷, 各个像素积累的电荷在视频时序的控制下, 逐点外移, 在经过滤波和放大器进行处理后形成视频信号输出. 另一种常见的图像采集传感器是 CMOS, 其与 CCD 最大的差异是数据传送方式不同. CMOS 中每个像素都会连接一个放大器, 即先对像素进行放大, 再整合各个放大处理

后的数据形成视频信号输出。相比于CMOS, CCD表现出更高的灵敏度和分辨率, 并且其噪声控制等方面也要优于CMOS. CCD和CMOS图像采集技术已经得到很大发展, 性能也都有迅速提高, 本文不再做详细介绍, 有兴趣的读者可以查阅文献 [23].

摄像显微技术的输出端可以是计算机的视频采集卡、火线端口 (fire wire) 和以太网卡端口 (network card) 等, 因此数据可以直接存储在计算机硬盘中. 同时, 传统的磁带录像机 (VCR) 也经常用在摄像显微技术中, 用于存储来自显微镜摄像设备的录像数据. 摄像显微镜的类型多种多样, 而且, 即使对于同一台显微镜, 通过简单的硬件变化, 就可以有不同的应用. 下面主要介绍软物质物理常用的三种摄像显微技术: 1) 明场显微技术; 2) 荧光显微技术; 3) 激光共聚焦显微技术.

2.2 明场显微技术

最简单常用的显微镜称为明场显微镜. 如图2所示, 光源被透镜聚焦到样品上, 物镜在样品的另一侧汇聚光线, 让使用者能够通过该显微镜看到样品的图像. 显微镜可以是正置的也可以是倒置的, 正置显微镜的物镜在样品上方而光源在下方, 倒置则相反. 正置显微镜情况更适用于浮动的样品, 如LB膜 (Langmuir-Blodgett monolayer). 倒置显微镜对沉降的样品是更有效的, 如浓度很高的微粒体系. 另外, 在一些情况下, 当其他辅助设备, 例如显微操作仪 (micromanipulator) 或者光学镊子 (optical tweezers) 等需要放置在样品上方时, 需要光源在样品上方很远的地方, 这时就更加适合使用倒置显微镜 [6].

通过在显微镜光路中增加不同的光学元件, 明场显微镜可以被改进成暗场显微镜 (dark field microscope)、相差显微镜 (phase contrast microscope) 和微分干涉差显微镜 (differential interference contrast microscope). 这些改进可以增强样品的光学对比度, 能够增加显微镜对折射率差异较小样品的成像能力. 这些技术经常用于生物学, 例如一般情况下细胞都是充满水的, 而细胞培养基也主要是由水组成, 这种情况下细胞样品和周围水的折射率差别较小, 明场相位角难以形成清楚的图像, 而用微分干涉差显微镜就可以达到成像的目的. 这些改进的显微技术不常用于软物质物理研究, 在此不再赘述.

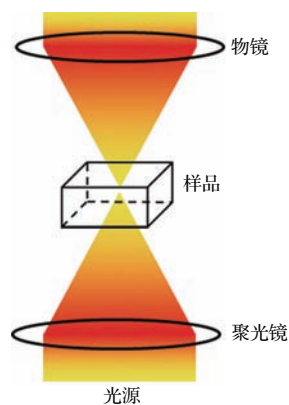


图2 正置式明场显微镜的光路示意图 光强度最高处是物镜焦点, 但样品其他部分也会被照亮

Fig. 2. Schematic of light path in a upright bright-field microscope. While the light intensity is strongest at the focal point, and the rest of the sample is also illuminated.

2.3 荧光显微技术

在明场显微镜使用过程中, 图像的反差是由于样品中含有吸光的成分或者样品折射率的差异. 然而, 当被观察样品在光学上接近于透明时, 明场显微镜就显得力不从心了. 这时就需要第二种常见的摄像显微技术——荧光显微技术 [24]. 荧光显微镜通常会配置各种滤色片和反射镜来引导从光源到样品的光线. 来自显微镜荧光光源的光经过滤色片到达样品, 穿过样品时可以激发样品中的荧光分子, 进而辐射出比入射光的波长略长的发射光. 荧光显微镜一般是采用汞灯或氙灯作为激发光源, 采用高级的致冷 CCD 作为光检测器来检测和记录荧光图像. 随着化学和生化合成手段的进步和发展, 物理学家可以借鉴其中的荧光实验技术, 采用荧光标记技术来标记软物质样品, 或者从诸如 Molecular Probes, Interfacial Dynamics 和 Bangs Laboratories 等化学药品公司购买已经被荧光染料染色过的各种微观粒子进行实验研究. 荧光显微镜技术是一种十分强大的显微成像技术, 即使是在多组分的复杂软物质系统中, 如生物细胞或者乳液胶体混合物中, 仍然可以采用荧光染色技术将不同的组分染成不同的颜色. 这样被染料染成不同颜色的部分就可以很容易地通过分光光栅区别开来. 例如, 如果我们只关心胶体悬浮液中胶体粒子的行为, 可以通过物理吸附或者化学反应将对应的荧光染料分子直接结合到胶体微粒上; 反之, 如果我们关心的是乳液中的表面活性剂分子, 则选取对

应的荧光染料使其分散到表面活性剂分子里。在荧光显微镜使用中,来自荧光光源的激发光照亮整个样品,焦平面及轴向上一定厚度的焦平面及离焦区域的荧光均到达 CCD 而成像。显然,焦平面处的图像受到轴向上非焦平面各种杂散光的干扰,造成焦平面荧光图像模糊,降低了系统的对比度。而且,由于衍射极限的限制,其分辨率仅与照明波长处于同一个数量级,分辨率不高。另外,宽场荧光显微镜成像机理决定了它只适合对薄样品成像,不能对较厚的样品进行光学切片(optical sectioning)。因此使用荧光显微镜有一定的局限性。但是,由于荧光显微镜系统结构相对简单、价格低廉,而且具有激发光频带宽、荧光效率较高以及能够对样品不同区域和不同荧光颜色组分同时成像的优点,使其应用非常广泛。

2.4 激光共聚焦显微技术

传统的光学显微镜不适合三维显微成像,只能研究二维的样品。为了研究具有一定厚度的样品和观察样品内部,人们采用匹配样品和周围溶剂的折射率的方法来减少光散射。然而,这又引起了另一个问题:在没有足够的光散射时,传统的明场显微镜又很难成像。虽然荧光显微技术可以通过样品染色和未染色的部分的对比产生图像,但这种技术只适合于稀释的样品,并不适合诸如胶体玻璃这样的稠密体系。另外,由于样品本身几乎是透明的,在焦平面以外的物体也会发出荧光,并且这些荧光会与焦平面发出的光混杂在一起透过镜头,使其无法区分样品的荧光与背景荧光,这就导致了严重的成像模糊问题。为此 Minsky 在 1957 年提出了具有光学切片能力的共聚焦成像的概念。但是,直到 1985 年,Brakenhoff, Wijnaendts, van Resandt 和 Carlsson 等才基于 Minsky 的共聚焦成像概念,各自独立制造出能够用于科学研究的共聚焦显微镜^[25]。与此同时,共聚焦显微的概念开始被商业科学仪器公司采用,蔡司(Zeiss)和莱卡(Leica)等传统显微镜制造商相继生产出了如今科研人员还在一直使用的商业化共聚焦显微镜。相比于传统的光学显微镜,共聚焦显微镜提供了更加明显的光学对比性,并且通过针孔消除杂光的技术,从而使构建 3D 图像成为可能。共聚焦显微镜同时也可以使用荧光技术,但是它使用了一系列特殊光学技术手段来克服荧光显微镜成像模糊的难题,其工作原

理如图 3 图所示。共聚焦显微镜系统一般采用激光作为激发光源、光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)作为光检测器。利用激发光和收集荧光的两个针孔共焦的原理,即光源针孔(pinhole)汇聚光源的激发光,检测器针孔收集来自焦平面的发自样品的荧光,并同时阻挡大部分来自非焦平面的荧光。这样就基本上解决了荧光显微镜系统中的非焦平面光对焦平面光的干扰,显著提高了荧光成像的对比度和成像分辨率。另外,针孔还限制了图片的焦深(focal depth),因此可以通过改变激光扫描在样品厚度方向上的位置,得到样品不同深度的二维图像序列,然后再通过三维重建技术,使具有一定厚度样品的高分辨三维成像成为可能。

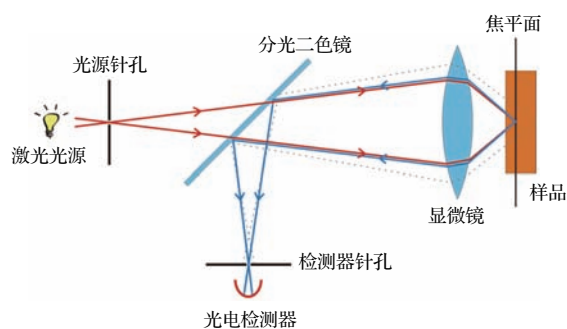


图 3 激光共聚焦显微镜工作示意图^[26]

Fig. 3. Principle of laser scanning confocal microscope^[26].

3 摄像显微图像处理

上文介绍了获得软物质体系微观图像的各种摄像显微技术,以及常见显微镜的硬件构成等内容,本节将集中描述计算机辅助的微观图像处理。内容的重点是如何将软物质体系的图片和影像转换为软物质体系组成基元的时间和空间的数值信息,从而在微观尺度上准确跟踪软物质组成基元的运动过程,获取定量的物理信息。对于跟踪的算法有多种,如交互关联(cross-correlation)、绝对误差和(sum-absolute difference)等,有兴趣的读者可以查阅相关文献^[27]。下文主要是针对胶体粒子跟踪的常用方法进行简单的介绍。

在使用摄像显微镜对胶体粒子的运动进行观察和录像后,可以得到关于胶体粒子运动的图像序列,然后通过 IDL, Matlab 等可编程的图像处理软件,对这些图像序列进行后续的图像处理,从而得到粒子的位置及其位置随时间的变化,即运动轨迹信息。通常情况下,摄像显微镜录像过程中采集的

图片为8级灰度图(8-bit gray scale), 如果采集的是彩色图片, 也可在后续的图像处理过程中, 通过上述图像处理软件, 将彩色图片转换为为8级灰度图.

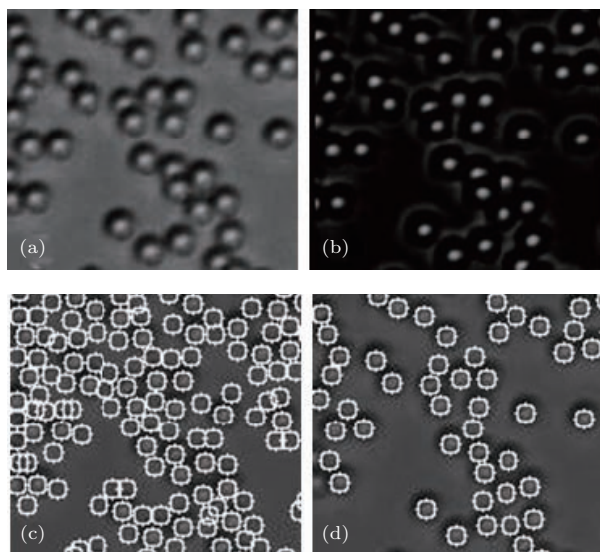


图4 (a) 通过 CCD 输出的原始显微镜照片; (b) 利用图像过滤增强照片的对比度; (c) 通过像素点亮度获取粒子位置, 图中圆圈为找到的可能的粒子位置; (d) 设置亮度阈值精确粒子位置

Fig. 4. (a) Microscope image from a CCD camera; (b) enhance image contrast by band-pass filtering; (c) estimate particle position by pixel brightness, the circles indicate possible positions of the particles; (d) refine threshold value of brightness to find precise positions of the particles.

胶体粒子的跟踪技术主要包括以下三个步骤 [9].

1) 图像过滤. 首先, 要对原始拍摄的每一张图片进行图像过滤. 在显微拍摄过程中, 物镜、连续变焦镜头和高速摄像机都会受到空气中的尘埃、水渍等污染, 使得图像中产生杂斑点. 此外, 在图像数字化过程中, 往往也会造成图像几何失真以及图像噪音等. 这些对粒子跟踪的准确性都会造成误差. 为了消除这种影响要对图像进行预过滤. 图像的过滤是采用图像处理软件中的去除背景和滤波功能实现的, 其基本的原理是基于在图像中创建标准网格, 网格尺寸略大于被跟踪的单个粒子尺寸, 通过对每个网格的平均化处理改善图像质量, 增强图像对比度并且消除其中的背景噪音. 图4(a)给出了摄像显微技术拍摄得到的二维胶体体系的原始照片. 经过图像过滤, 可以提高图像的对比度(图4(b)), 有助于接下来对粒子位置的确定.

2) 确定粒子位置. 图像中粒子的中心位置是通过考察像素点的亮度来进行确定的. 与图像过滤的

原理相似, 在过滤后的图像中要创建标准网格, 其尺寸也是在一个粒子尺寸范围, 然后在网格尺寸范围中来检测像素点的亮度, 如果在这个范围内只有一个最亮点则就将其视为可能的粒子的中心位置. 简单来说, 就是利用局部亮度极大值来确定粒子的可能位置. 图4(c)给出了利用像素点亮度找到的粒子的可能位置, 每一个圆环表示一个粒子的可能位置. 这之后再根据该位置的亮度值大小, 通过设置亮度阈值以及高斯曲线拟合亮度分布等方法, 来优化粒子的中心位置, 最后得到准确的粒子中心位置信息, 如图4(d)所示. 对于明场摄像显微技术, 如果使用100倍的物镜, 确定粒子中心的准确度可以达到几十纳米, 完全可以满足大多数软物质物理研究的需要.

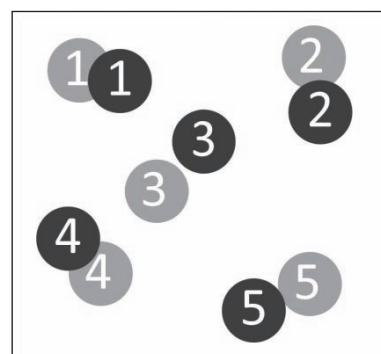


图5 粒子跟踪技术示意图 浅色表示粒子初始时刻 t 位置, 深色表示粒子下一时刻 $t + \Delta t$ 位置, 基于下一时刻粒子运动的距离最小的原则就可以确定粒子初始时刻的归属, 这里相同编号表示同一个粒子

Fig. 5. Schematic particle tracking technology. Pale colour indicates the initial position of the particle, and dark represents the corresponding position of the particle after Δt time, based on the minimum distance of the particle motion. The number indicates the same particle.

3) 粒子跟踪. 确定图集中每一张图片中的粒子位置信息后, 要将邻近时刻的图像中粒子位置信息进行串联获得粒子运动轨迹. 这种技术称为粒子跟踪. 粒子跟踪技术在软物质物理的研究中有着普遍而高效的应用. 通俗地说, 技术的核心就是利用摄像显微镜拍摄到的图片, 通过一定的算法, 来跟踪样品中粒子的轨迹. 通过样品中粒子移动的视频, 计算机就能够计算处理出粒子在各个时刻的位置, 我们就可以利用这些位置信息来跟踪粒子. 粒子在下一时刻的可能位置应该是距离上一时刻位置最近的那个位置, 通过这种方法粒子就可以被跟踪到. 需要强调的是, 为了能准确地跟踪粒子, 要

求图像里的每个粒子在连续的两帧图像之间的运动距离通常不应超过一个粒子的尺寸, 否则这种跟踪方法将会产生不惟一的未来可能粒子位置, 如图5所示. 对于像胶体或细胞这些以“粒子”为主要微观图像特征的样品, 通过摄像显微技术, 我们可以在二维甚至在三维尺度上跟踪粒子, 从而研究材料二维和三维空间上结构和动力学.

4 摄像显微技术的应用与国内进展

长期以来, 摄像显微技术是生物学家用来研究细胞结构与功能的主要实验工具. 在过去的十年中, 逐渐开始被物理学家用来研究胶体、乳液和生物细胞等软物质体系的结构与动力学. 摄像显微技术不但是光散射和中子散射等凝聚态物理传统研究技术手段的有效补充, 而且更重要的是, 区别于散射技术只能得到样品的平均信息的缺点, 摄像显微技术可以研究组分不均匀的样品, 甚至研究同一个样品的指定区域, 因此摄像显微技术是研究多种组分软物质体系十分重要的实验技术, 具有传统实验技术手段不可比拟的优越性. 摄像显微技术的发展, 使得研究凝聚态物理中熔化、结晶以及玻璃化转变等重要基本物理问题取得了突破. 利用摄像显微技术, 人们可以直接观察由胶体粒子组成的体系的结构演化过程, 并从单个粒子层面来研究各种结

构的形成与转变以及其对应动力学行为的基本物理机理. 下文主要介绍摄像显微技术在胶体软物质物理研究中的重要应用及其近期进展.

1986年, Pusey等在《Nature》上发表论文^[8], 证明了硬球胶体的相行为是由体系的体积分数决定的, 这一点不同于原子和分子体系通常是由温度决定的相行为. 通过观察宏观样品由于布拉格散射而产生的不同颜色, Pusey等发现不同体积分数的胶体体系可以形成液态、晶态以及玻璃态等凝聚相, 如图6所示. 这说明胶体体系可以用来研究各种相转变行为, 并且由于可以被直接观察, 因而突破了原子分子体系无法在单粒子尺度进行研究的限制, 使得直接可视化的实验研究物质结构相转变成为现实.

近年来, 数字化图像处理技术的发展为研究胶体体系提供了革命性的新工具. 主要体现在显微镜摄像技术与图像处理技术的结合促成了对胶体粒子的实时跟踪. 在法国科学家Perrin用成像技术研究胶体的沉降平衡的先驱性工作的百年之后, 摄像显微技术已经用来定量研究胶体体系的各种凝聚态相变、检测外场下胶体的运动行为以及在单个粒子尺度上研究胶体体系的微观结构和动力学. 接下来, 我们将介绍摄像显微技术在研究胶体软物质物理中的重要应用和近期国内相关的研究进展.

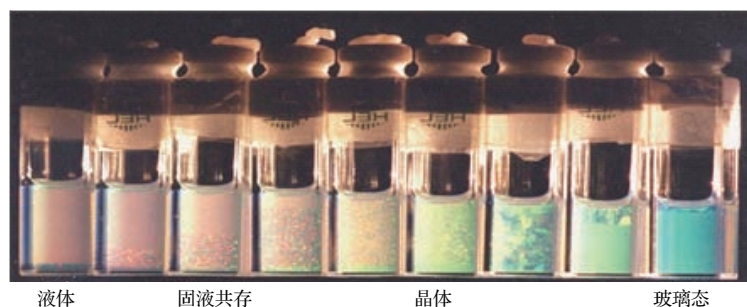


图6 胶体体系的相行为^[8]

Fig. 6. Phase behavior of colloidal suspensions^[8].

4.1 胶体玻璃化转变

玻璃化转变和玻璃态的本质是凝聚态物理最深刻和困难的问题之一. 利用摄像显微镜技术可以实现玻璃体系的可视化. 1995年, 荷兰科学家 van Blaaderen 和 Wiltzius 首次使用激光共聚焦显微镜研究了胶体玻璃的结构^[28]. 尽管多种软物体系都

可以形成广义的玻璃态, 然而胶体体系一直是研究玻璃化转变的最经典的模型体系. 胶体粒子通常被简化成为仅具有排斥体积效应相互作用的硬球, 只有当它们的表面接触, 才会表现出强烈的排斥 (类似于光滑钢球). 虽然真实的原子和分子之间同时具有吸引作用和排斥作用, 但是通常认为排斥作用对于物质结构的形成起主导作用, 例如经典的

WCA作用势模型(Weeks-Chandler-Anderson)就是简化和忽略了吸引力的作用^[29]. 基于这一点, 硬球就可以用来模拟原子和分子晶体和玻璃的凝聚态物理行为. 硬球胶体体系的热力学参量是体积分数. 通常认为, 当胶体粒子体积分数达到临界浓度0.58以上时, 如果未能结晶, 体系可以被俘获在非平衡的玻璃态. 玻璃化转变的关键问题之一就是寻找微观结构上的特征来解释玻璃态体系黏度和弛豫时间激增的普遍现象. 大量的原子和分子玻璃实验结果表明, 体系在进入玻璃态时, 微观结构并没有发生可检测的变化^[30]. 借助激光扫描共焦显微镜, 人们可以直接观察和测量胶体玻璃中的粒子, 同样也发现胶体玻璃的结构没有发生明显变化. 特别是人们并没有发现真正的结构关联长度尺度, 因此现在普遍认为玻璃体系中微观结构与黏度增长没有直接关联^[31]. 对于玻璃微观结构的研究仅仅是摄像显微镜技术一个最典型的应用, 该技术还可以用于研究凝胶^[32]、晶体^[33]和乳液等^[34]其他软物质体系的微观结构. 图7给出了二维体系下由胶体粒子组成的典型的玻璃、晶体和凝胶的显微镜图片. 三种体系的微观结构显而易见, 玻璃由两种尺寸粒子组成, 杂乱无序; 晶体是由单一尺寸的粒子构成, 呈六角密排; 而凝胶是由于在体系中粒子之间存在相互吸引作用而导致的, 呈现空间网络状.

摄像显微技术除了可以直接观察胶体玻璃的结构, 更为重要的是其可以用来精确跟踪研究胶体玻璃中粒子的运动, 即胶体玻璃的动力学. 而且, 随着快速成像显微镜技术的发展, 例如转盘式激光扫描共聚焦显微镜, 使得在三维空间上研究粒子的快速运动成为可能. 因此, 人们不但可以研究玻璃

态中粒子的相对缓慢的运动, 而且可以研究体系进入玻璃态之前, 粒子处于过冷液态时的快速运动行为. 这样就可以系统地研究体系由液态转变为玻璃的完整过程, 揭示玻璃化转变过程中体系动力学行为的演化规律^[35]. 图8给出了利用摄像显微技术研究粒子在胶体玻璃玻璃化转变中的弛豫过程. 通过显微技术获得粒子的位置信息, 从而得到粒子的运动轨迹, 并且可以计算出体系中粒子的均方位移:

$$\langle \Delta x^2(\Delta t) \rangle = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_i(t + \Delta t) - r_i(t)|^2 \right\rangle, \quad (1)$$

其中 r 为粒子位置, Δt 为时间间隔. 随着体系体积分数的增加, 粒子的均方位移减小, 体系的动力学变慢. 在高体积分数下, 在短时间内, 粒子被其邻近的粒子“笼”住(caging), 它们的运动被限制在“笼子”中, 此时均方位移出现一个短暂的平台期. 在更长的时间尺度上, “笼子”里的粒子会发生重排, 即粒子会从原来位置跳跃到新的位置, 其相邻粒子发生改变. 图8(b)的粒子轨迹直观地证明了粒子被限制在“笼子”中的运动以及从“笼子”发生跳跃的运动.

玻璃体系会表现出一些共性: 黏度和弛豫时间发散, 协同重组区(cooperative rearrange region)以及动力学异质性(dynamical heterogeneity)等^[36]. 其中, 协同重组区和动力学异质性是近年来研究玻璃化转变的热点, 因为它们直接反映了玻璃化转变中两个本质的物理问题: 微观结构和动力学性质. 因此, 在微观尺度上研究玻璃化转变, 建立体系弛豫时间谱、协同重组区和微观结构以及动力学性质的关联, 才能真正有望理解玻璃化转变的微观机理和物理本质. 利用摄像显微技术结合计算机模拟,

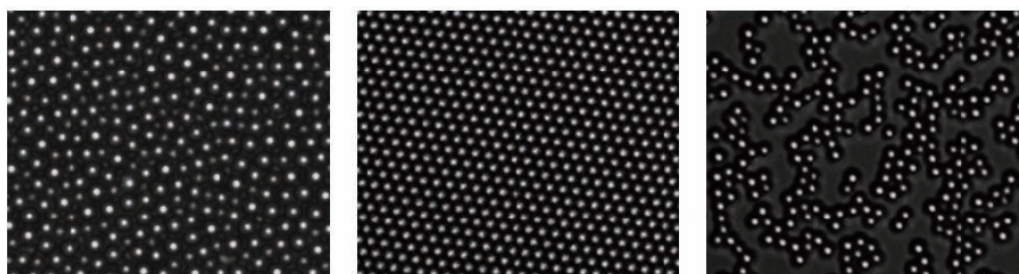


图7 典型的二维胶体体系 从左到右依次为: 无序结构的胶体玻璃、六角密排的胶体晶体和网络结构的胶体凝胶

Fig. 7. Typical two-dimensional colloidal system. From left to right: disordered structure of the colloidal glass, hexagon packing of the colloidal crystal and network structure of the colloidal gel.

人们发现这种玻璃化转变过程中的动力学异质性与体系静态结构有序度存在着一定关联^[37]. 然而二者这种关联仍然存在争论, 需要更多的实验工作进行研究验证.

最近, Zhang 等^[38] 和 Xu 等^[39] 利用摄像显微技术, 揭示了粒子间的相互作用对玻璃体系的协同重排以及动力学异质性的影响. 通过定义一个表征动力学异质性的物理量——四点极化率:

$$\chi_4(a, \Delta t) = N \left[\langle Q_2(a, \Delta t)^2 \rangle - \langle Q_2(a, \Delta t) \rangle^2 \right], \quad (2)$$

其中

$$Q_2(a, \Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\left(\frac{-\Delta r_i^2(\Delta t)}{2a^2} \right)}, \quad (3)$$

式中 Δt 时间间隔内粒子运动的距离为 Δr , a 是研究中所关注的长度尺度, 其物理意义类似于倒空间的波矢 q . 四点极化率定量地表征了玻璃体系在一定的长度和时间尺度上运动的涨落情况. 研究表明, 当粒子间相互作用从排斥转变为吸引时, 体系的动力学变慢, 动力学异质性增强, 粒子的协同重排区由链状结构向紧密结构转变(图 9).

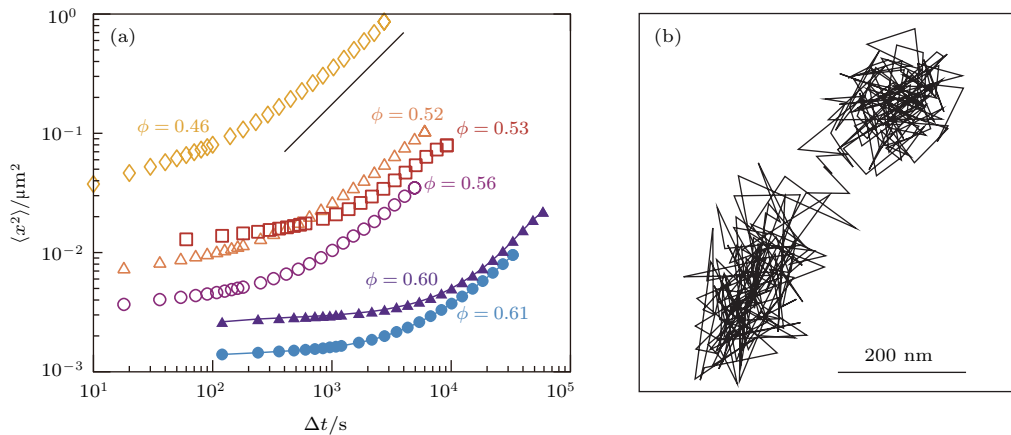


图 8 (a) 不同体积分数 (ϕ) 下胶体体系中粒子的均方位移; (b) 粒子在体积分数 $\phi = 0.56$ 体系中运动 100 min 的轨迹图 (图片来自文献 [10])

Fig. 8. (a) Mean square displacement for different volume fractions(ϕ) of colloids; (b) a trajectory of a particle in $\phi = 0.56$ system (from Ref. [10]).

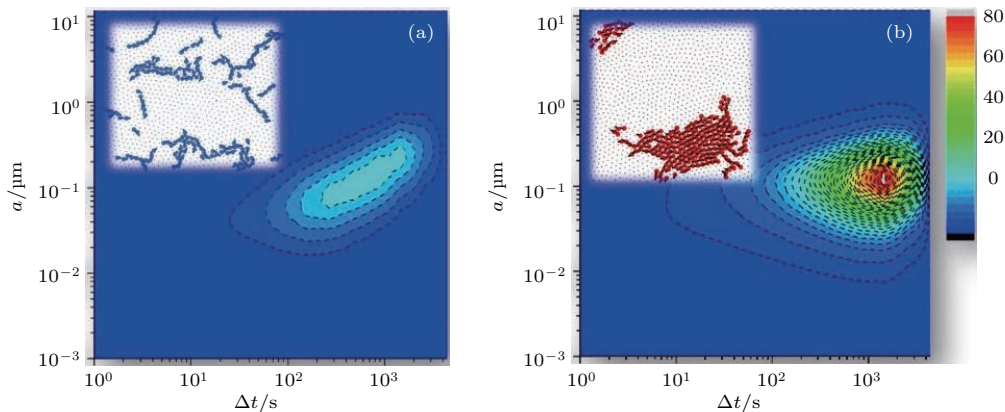


图 9 排斥力胶体玻璃 (a) 和引力胶体玻璃 (b) 的四点极化率, 内插图为协同重组区 (图片来自文献 [37])

Fig. 9. Four-point susceptibility of repulsive (a) and attractive (b) colloidal glasses. The insets are cooperative rearrange regions (from Ref.[37]).

由于玻璃为非平衡态, 所以玻璃的动力学老化研究就显得尤其重要. 利用摄像显微技术能够微观成像的特点, 可以研究胶体玻璃在老化过程中的局部结构的演化规律, 从微观层面揭示玻璃老化中体

系动力学-微观结构关系^[40]. 除了圆球粒子的胶体玻璃化行为, 摄像显微技术还拓展到了各向异性的非球形粒子的玻璃化转变的研究. 例如, 椭球就是很好的玻璃模型体系. 近期, Zheng 等^[41] 利用

摄像显微技术研究了胶体椭球体系的玻璃化转变问题. 通过对椭球体系在玻璃化转变过程中弛豫时间、动力学异质性以及粒子协同重排团簇的研究, 他们发现椭球体系存在两种玻璃化转变, 分别为常见的平动玻璃化转变和具有方向性的转动玻璃化转变. 随着体系面积分数的增加, 体系先发生转动玻璃化转变, 接着再发生平动玻璃化转变. 研究还指出这种两步玻璃化转变会随着椭球粒子长径比的减小而转变为一步玻璃化转变. 这种非球形胶体粒子玻璃化转变更具有普遍意义, 这是因为真实的分子有很多都不是圆球, 圆球模型存在过于简化的缺点. 另外, Liu 等^[42]利用摄像显微技术研究了胶体玻璃中玻色峰与结构无序度的关联性. 玻色峰在玻璃体系中普遍存在, 然而对其起源一直是凝聚态物理中的一个难题. 通过研究玻色峰的影响因素, 对认识和理解玻色峰有着重要作用. 他们的研究发现, 随着体系无序度的增加, 体系态密度在低频区增强、玻色峰增高, 揭示了低频准局域声子模式与样品中无序结构存在关联.

4.2 胶体结晶

与胶体玻璃比较, 胶体晶体的表征要相对简单. 当可见光经过粒径为几百纳米的胶体构成的晶体时, 由于布拉格衍射, 人们可以在裸眼状态下就观察到五彩斑斓的颜色, 这就是猫眼石呈现出五光十色的原因. 利用摄像显微技术, 胶体晶体的这种有序结构的形成过程可以被直接观察和记录. 通常认为, 胶体晶体的形成是由熵驱动的. 例如, 在胶体硬球这样的最简单体系中, 紧密排列的硬球的自由堆积体积分数是 74%, 这比混乱的硬球排列的堆积体积分数 64% 大, 所以在晶体状态下, 体系的熵较小, 这也可以联系胶体粒子的振动自由度增大来理解. 物质的结晶过程一直是凝聚态物理中的重要课题. 利用激光扫描共聚焦显微镜的三维成像技术人们实现了结晶临界成核过程的可视化, 从而深刻地理解结晶成核的物理规律^[13,33]. 实验发现, 如果晶体区域太小或者晶核尺寸远远小于某一临界尺寸, 晶体将不能继续生长. 在胶体体系中, 通常的临界尺寸大约为 100 个粒子大小.

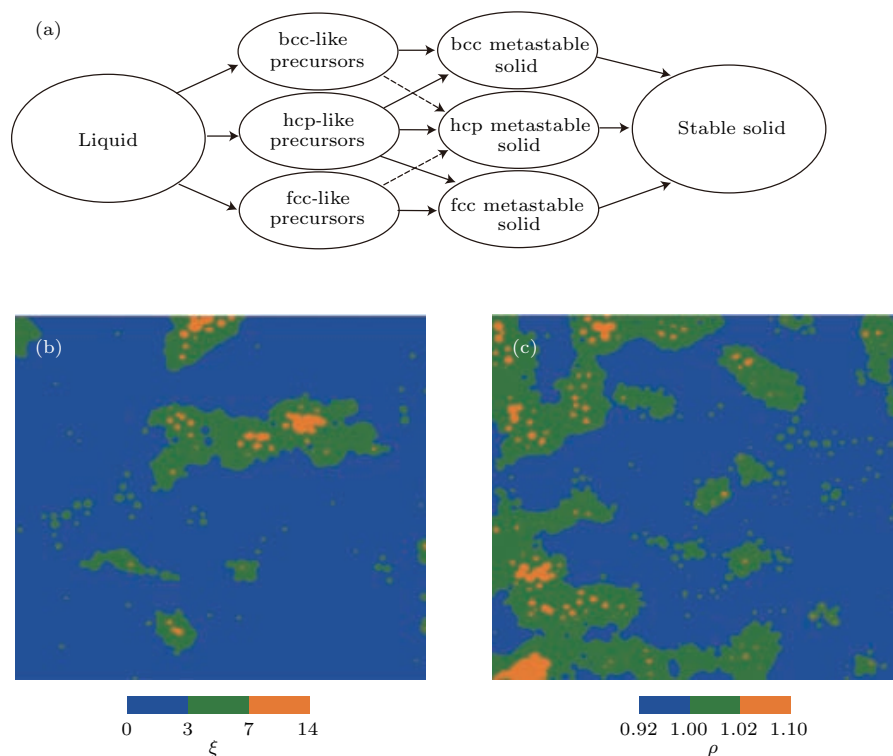


图 10 (a) 前驱调制结晶动力学, 实线表示主要路径, 虚线代表次要路径; (b), (c) 有序参量 (b) 和密度 (c) 的空间分布图, 二者无明显关联性, 成核区并非在密度高的区域发生 (图片来自文献^[43])

Fig. 10. (a) Summary of kinetics during the precursor-mediated crystallization, solid lines indicate the major pathways, and dashed lines represent the minor pathways; (b), (c) snapshots of the spatial distributions for local order parameter (b) and local density (c), a poor correlation between them is observed, and the nucleation events rarely start from the densest regions (from Ref.^[43]).

最近, Tan 等^[43]利用摄像显微技术研究晶体生长的动力学过程又有新的突破. 他们的研究发现胶体体系的结晶并不是液体到晶体的简单生长过程. 在这一转变过程中会经历多种不同对称性的有序先驱体结构 (precursor structures)(图 10 (a)). 结果表明密度的改变和对称性的演化是非关联的, 揭示体系的结晶成核并非是从体系中粒子最密的区域开始的 (图 10 (b), (c)). 这些基于摄像显微技术可视化观察的结果为人们理解液-固相转变提供了新的认识和观点.

此外, Peng 等^[44]通过摄像显微技术观察了胶体体系晶体结构的固-固转变中结晶成核的直接演化过程. 研究者在单粒子尺度上考察了体系由四方晶体转变到六方晶体的演化动力学过程, 如图 11.

结果表明, 这种固-固转变是一个两步成核过程, 先是产生一个液核即由四方晶体向液态转变, 然后再由这个中间液态开始发生结晶成核从而产生六方晶体. 文章最后指出大多数金属和合金应该也是通过这种中间液相而发生固-固相转变的. 利用胶体体系来研究金属材料中结晶相转变的问题可以很好地弥补无法直接在单粒子尺度微观上直接观察金属材料中粒子的动力学行为这一难点, 成为最近胶体研究领域的热点之一. 近期有报道考察了冷却速率对胶体结晶过程的影响, 发现晶粒的生长与冷却速率的关系与金属体系具有相似的演化规律^[45]. 这些研究表明胶体体系可以作为很好的模型体系来研究金属材料中难以直接可视化测量相关结构性能转变等问题.

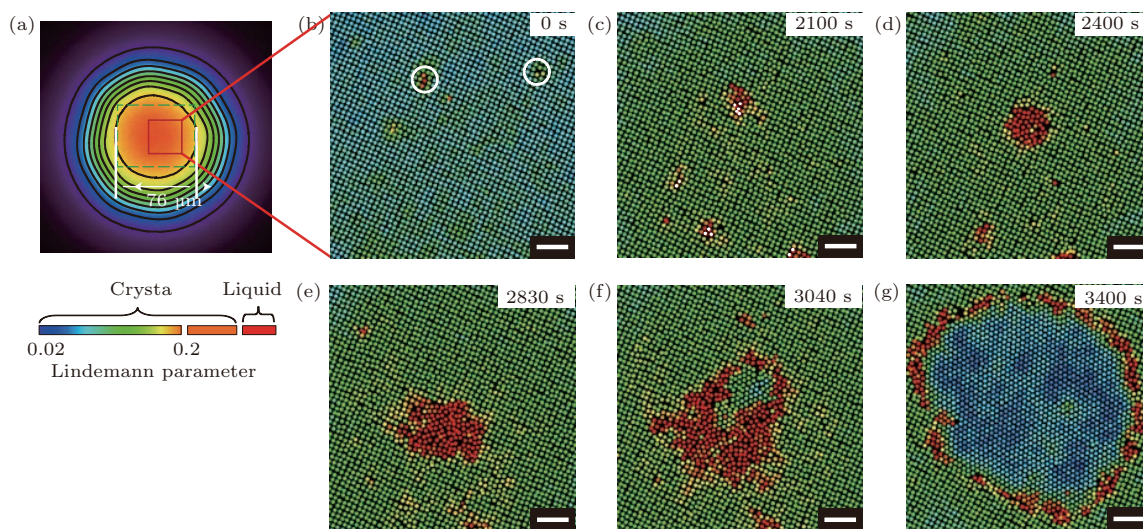


图 11 四方晶体向六方晶体的转变过程 (a) 样品 xy 剖面温度梯度, 等高线直接温差为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 中心红色方框为所观察的区域 (b)–(g); 颜色是根据左侧 Lindemann 参量的值进行标定的, 结果表明, 在六方晶体成核之前体系先进入一个中间液相区 (图片来自文献^[44])

Fig. 11. Square-to-hexagonal crystal transition: (a) Temperature profile in the xy -plane, the contour spacing is $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, the red square is the area shown in Fig.(b)–(g). The colours represent different values of the Lindemann parameter. The results indicate there is a liquid phase before the nucleation of the hexagonal crystal (from Ref. ^[44]).

4.3 胶体晶体熔化

熔化是自然界中一种常见的物理现象, 研究熔化现象对与凝聚态物理、材料科学以及纳米技术等领域都具有十分重要的科学意义和应用价值. 尽管人们研究熔化已有近百年的历史, 但是仍然缺少一个完整的、基础层面上的理论来解释各种熔化现象. 对于三维晶体的熔化, 通常认为是固-液一级相变. Alsayed 等^[19]利用摄像显微技术首次在实验上观察到三维晶体是如何从晶体内部开始熔化的. 他

们利用微米尺寸的热敏胶体 NIPAM(N-异丙基丙烯酰胺) 粒子构成三维晶体样品. 这种 NIPA 胶体球是由 NIPA 高分子链通过交联形成, 这种网状的镂空的结构使其内部含有大量的水. 当温度升高, NIPA 球收缩将水挤出, 直径会变小, 从而可以调节温度来精确地改变体积分数, 被广泛用于研究胶体体系的各种相转变. 当这种三维胶体晶体被平滑的玻璃样品池所包裹时, 表面熔化现象被抑制, 因此熔化从晶畴界面上开始 (见图 12), 这种转变过程也可以被称为预熔化 (pre-melting), 因为它类似于

固体在稍低于熔点时表面就熔化出薄的液体层的现象. 近期, Wang 等 [46] 通过摄像显微技术, 利用光束加热 NIPA 胶体单晶内部, 研究了三维晶体均匀熔化时液体成核过程. 研究表明, 通常认为的热激发导致缺陷然后缺陷运动扩散最终导致熔化并非晶体均匀熔化的机理. 相反地, 他们观察到晶

格中邻近粒子在不破坏晶格结构的情况下发生了环状运动, 形成局部高震动区域. 在这些高震动区域的作用下最终导致了液体成核, 使得晶体发生熔化. 该研究使得人们首次在单粒子尺度上观察了三维晶体均匀熔化, 为理解均匀熔化的转变过程和物理机理提供了直接的实验测量结果.

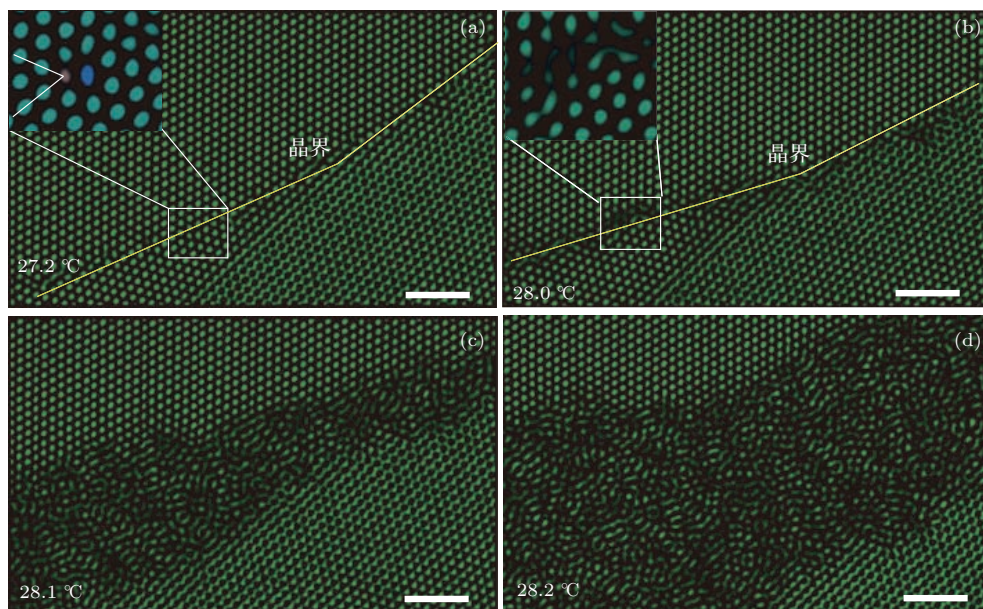


图 12 三维胶体晶体从晶界熔化的显微镜照片, 晶体的熔化从晶界交界处开始 (图片来自文献 [19])

Fig. 12. Microscopy images for the melting in three-dimensional colloidal crystal. Crystal melts from the grain boundary (from Ref. [19]).

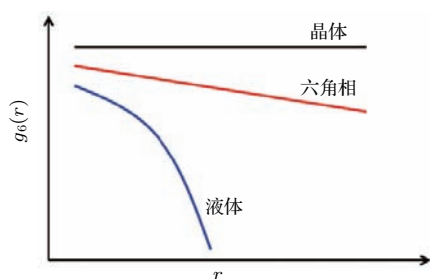


图 13 取向关联函数 $g_6(r)$ 对 r 的对数-对数坐标图

Fig. 13. Logarithmic plot of orientational correlation function $g_6(r)$ vs r .

对于二维晶体的熔化, 其熔化机理相比于三维晶体的情况又有所不同. 目前普遍被人们接受的一个理论是 KTHNY 理论, 它最早由 Kosterlitz 和 Thouless 提出, 经过 Halperin, Nelson 和 Young 三人的完善最终形成的理论. KTHNY 理论指出二维熔化不是通常认为的固-液一级相变, 而是有固相-中间相-液相这样的两个相变过程 [47]. 这里的中间相称之为六角相 (hexatic phase), 六角相具有短程的平移有序性和准长程的取向有序性. 然而这

种两步相变过程依然备受争论, 对其研究一直没有间断. 二维熔化中的相转变可以通过计算体系中粒子的取向关联函数 $g_6(r)$ 来进行判定:

$$g_6(r = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) = \langle \psi_{6i}^* \psi_{6j} \rangle, \quad (4)$$

其中, $\psi_{6j} = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n e^{6i\theta_{jk}} \right)$ 为取向有序参量 (orientational order parameter), \mathbf{r} 是粒子的位置矢量. 如图 13 所示, 取向关联函数不发生衰减, 表明体系为晶体; 当呈现对数指数衰减时, 表明体系为中间相-六角相; 而当发生 e 指数衰减时, 表明体系进入液态. 借助摄像显微技术, Peng 和 Han 等 [48] 利用 NIPAM 胶体粒子研究了胶体晶体薄膜的熔化过程. 结果发现当薄膜为单层时, 体系相转变符合 KTHNY 理论, 即二维熔化发生两步相转变: 晶体-六角相-液体. 改变薄膜层数, 熔化相转变行为发生变化. 薄膜层数非单层时, 中间相消失. 近期的计算机模拟工作发现粒子的相互作用对于二维熔化相转变有着重要影响, 可以导致不同的相转变行为 [49,50], 有待使用摄像显微技术选用合适的胶

体体系进行实验上的考察和验证. 值得一提的是, 虽然对二维熔化的研究很多, 但多数还是针对于结构的演化, 而对于二维熔化中体系动力学演化及其物理机理的研究却相对较少.

5 展 望

继光散射、X射线散射和中子散射技术之后, 摄像显微技术成为研究软物质的凝聚态结构和动力学又一项非常重要并且不可或缺的实验技术. 使用摄像显微技术, 物理学家实现了在单粒子层面直接观察和测量研究胶体等软物质的相变、微观相互作用和自组装行为等物理现象和过程, 为理解凝聚态物理基本问题提供了强大而有力的实验研究手段. 本文从硬件和研究体系两方面简要展望了摄像显微技术在软凝聚态物理及交叉学科中应用的未来.

1) 硬件设备发展. 传统的光学显微镜的分辨率由于受到阿贝极限的限制, 远远不能满足人们对微观世界探索的需要, 人们迫切需要分辨率更高的显微技术. 2014年诺贝尔化学奖的三位得主以创新的手段“突破”了这一极限, 使光学显微镜的分辨率从微米级提高到纳米级, 这一技术的发现使显微镜进入纳米显微镜时代. 利用超高分辨率显微镜, 可以让科学家们在分子水平上对活体细胞进行研究, 如观察活细胞内生物大分子、细胞器微小结构以及细胞功能如何在分子水平表达, 这对于理解生命过程和疾病发生机理具有重要意义. 其次, 要想对不断演化的软物质微观世界进行探索, 还需要进一步提高摄像显微镜的图像采集速度, 从而拓展其应用空间. 例如, 对软物质在剪切场和流场的研究, 或者对具有内部运动的样品或活细胞的研究, 都要求摄像显微技术配置更高帧频的摄像装置和高速存储设备. 而且, 对于三维样品, 使用的共聚焦显微技术还要有高速度的扫描模式, 才能精确地观察和测量体系的结构和动力学演化行为.

2) 研究体系多样性. 目前对胶体软物质物理的研究仍然主要被局限于球形粒子. 已经有大量的计算机模拟结果表明, 粒子的形状也是决定胶体粒子凝聚态相行为的重要参数. 随着近年来化学合成技术的发展, 非球形胶体粒子的制备技术已经日渐成熟. 这样通过摄像显微技术就可以研究粒子形状如何影响胶体凝聚态结构和动力学, 上文也提到了利

用椭球胶体粒子来进行相关研究, 并且受到越来越多的关注. 对于电场、流场下等非平衡胶体体系的凝聚态物理, 其理论尚不完善, 缺少微观尺度上定量的物理实验研究, 摄像显微技术将在这些非平衡态体系的研究中发挥非常重要的作用. 此外, 摄像显微技术还可以用来研究具有自组装行为的胶体体系, 通过该技术可以精准地观察微观粒子的自组装行为的演化过程, 为理解和认识各类自组装行为的物理机理提供了强有力的技术手段. 这些采用摄像显微技术研究胶体软物质各类体系的研究工作, 不但可以加深理解固、液、气的相变等微观过程, 对凝聚态物理有基础科学意义, 同时也对人们制备软物质材料及其应用相关的材料科学和纳米技术等领域具有现实指导意义.

参考文献

- [1] Ouyang Z C 1999 *Science* **51** 3 (in Chinese) [欧阳钟灿 1999 科学 **51** 3]
- [2] Degennes P G 1992 *Rev. Mod. Phys.* **64** 645
- [3] Jones R A L 2002 *Soft Condensed Matter* (Oxford: Oxford University Press)
- [4] Lu K Q, Liu J X 2009 *Physics* **7** 453 (in Chinese) [陆坤权, 刘寄星 2009 物理 **7** 453]
- [5] Liu J X, Lu K Q 2006 *Introduction to Physics of Soft Matter* (Beijing: Peking University Press) (in Chinese)[刘寄星, 陆坤权 2006 软物质物理学导论 (北京: 北京大学出版社)]
- [6] Inoué S, Spring K R 1997 *Video Microscopy: The Fundamentals* (New York: Plenum Press)
- [7] Hunter R J 2001 *Foundations of Colloid Science* (New York: Oxford University Press)
- [8] Pusey P N, Vanmegen W 1986 *Nature* **320** 340
- [9] Crocker J C, Grier D G 1996 *J. Colloid Interf. Sci.* **179** 298
- [10] Weeks E R, Crocker J C, Levitt A C, Schofield A, Weitz D A 2000 *Science* **287** 627
- [11] Pusey P N, Zaccarelli E, Valeriani C, Sanz E, Poon W C K, Cates M E 2009 *Philos. T. R. Soc. A* **367** 4993
- [12] Lu P J, Weitz D A 2013 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **4** 217
- [13] Gasser U, Weeks E R, Schofield A, Pusey P N, Weitz D A 2001 *Science* **292** 258
- [14] Lowen H, Oguz E C, Assoud L, Messina R 2012 *Adv. Chem. Phys.* **148** 225
- [15] Yunker P J, Chen K, Gratale M D, Lohr M A, Still T, Yodh A G 2014 *Rep. Prog. Phys.* **77** 056601
- [16] Chen Q, Whitmer J K, Jiang S, Bae S C, Luijten E, Granick S 2011 *Science* **331** 199
- [17] Sacanna S, Irvine W T M, Chaikin P M, Pine D J 2010 *Nature* **464** 575

- [18] Wang Y F, Wang Y, Breed D R, Manoharan V N, Feng L, Hollingsworth A D, Weck M, Pine D J 2012 *Nature* **491** 51
- [19] Alsayed A M, Islam M F, Zhang J, Collings P J, Yodh A G 2005 *Science* **309** 1207
- [20] Ovarlez G, Barral Q, Coussot P 2010 *Nat. Mater.* **9** 115
- [21] Westerweel J, Elsinga G E, Adrian R J 2013 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **45** 409
- [22] Waigh T A 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 685
- [23] Wang Q Y 2003 *Image Sensor Application Technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) (in Chinese) [王庆友 2003 图像传感器应用技术 (北京: 电子工业出版社)]
- [24] Diaspro A 2011 *Optical Fluorescence Microscopy* (Berlin: Springer Publishing Company)
- [25] Paddock S W 2014 *Confocal Microscopy: Methods and Protocols* (New York: Springer Humana Press)
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Confocal_microscopy W C M [2016-06-12]
- [27] Cheezum M K, Walker W F, Guilford W H 2001 *Bio-phys. J.* **81** 2378
- [28] Vanblaaieren A, Wiltzius P 1995 *Science* **270** 1177
- [29] Hansen J P, McDonald I R 1976 *Theory of Simple Liquids* (Waltham: Academic Press)
- [30] Langer J S 2014 *Rep. Prog. Phys.* **77** 042501
- [31] Royall C P, Williams S R 2015 *Phys. Reports* **560** 1
- [32] Joshi Y M 2014 *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* **5** 181
- [33] Gasser U 2009 *J. Phys. Condens. Matter* **21** 203101
- [34] Cohen-Addad S, Hohler R 2014 *Curr. Opin. Colloid In.* **19** 536
- [35] Hunter G L, Weeks E R 2012 *Rep. Prog. Phys.* **75** 066501
- [36] Debenedetti P G, Stillinger F H 2001 *Nature* **410** 259
- [37] Kawasaki T, Tanaka H 2011 *J. Phys. Condens. Matter.* **23** 194121
- [38] Zhang Z, Yunker P J, Habdas P, Yodh A G 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 208303
- [39] Xu W S, Sun Z Y, An L J 2012 *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* **86** 041506
- [40] Yunker P, Zhang Z, Aptowicz K B, Yodh A G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 115701
- [41] Zheng Z, Ni R, Wang F, Dijkstra M, Wang Y, Han Y 2014 *Nat. Commun.* **5** 3829
- [42] Liu H X, Chen K, Hou M Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 116302 (in Chinese) [刘海霞, 陈科, 厚美瑛 2015 物理学报 **64** 116302]
- [43] Tan P, Xu N, Xu L 2014 *Nat. Phys.* **10** 73
- [44] Peng Y, Wang F, Wang Z, Alsayed A M, Zhang Z, Yodh A G, Han Y 2015 *Nat. Mater.* **14** 101
- [45] Wang L L, Wang Z J, Lin X, Wang J C, Huang W D 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 106403 (in Chinese) [王理林, 王志军, 林鑫, 王锦城, 黄卫东 2015 物理学报 **65** 106403]
- [46] Wang Z, Wang F, Peng Y, Zheng Z, Han Y 2012 *Science* **338** 87
- [47] Strandburg K J 1988 *Rev. Mod. Phys.* **60** 161
- [48] Peng Y, Wang Z, Alsayed A M, Yodh A G, Han Y 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 205703
- [49] Bernard E P, Krauth W 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 155704
- [50] Kapfer S C, Krauth W 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 035702

SPECIAL TOPIC — Progress in Soft Matter Research

Application of video microscopy in experimental soft matter physics*

Wang Hua-Guang Zhang Ze-Xin[†]

(Center for Soft Condensed Matter Physics and Interdisciplinary Research, Soochow University, Suzhou 215006, China)

(Received 12 June 2016; revised manuscript received 26 July 2016)

Abstract

Combining precise microscopic measurement with quantitative image analysis, video microscopy has become an important, real space experiment technique to study the microscopic properties of soft matter systems. On the one hand, it provides a basic tool to observe and record the microscopic world. On the other hand, it offers a essential experiment method to study the underlying physics of the microscopic world. This paper reviews the development of the video microscopy, introduces the corresponding hardware and video processing software, and summarizes the typical applications, and recent progresses of video microscopy in colloidal suspensions. The future of the video microscopy in the soft condensed matter physics and interdisciplinary research is discussed.

Keywords: video microscopy, soft matter physics, colloid physics

PACS: 87.64.M-, 64.70.pv, 61.43.Fs, 82.70.Dd

DOI: [10.7498/aps.65.178705](https://doi.org/10.7498/aps.65.178705)

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2012CB821500) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11574222, 21174101).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangzx@suda.edu.cn