

特邀综述

自组织结构的控制: 从平衡过程到非平衡过程*

石燕 张天辉†

(苏州大学物理科学与技术学院, 软凝聚态物理及交叉研究中心, 苏州 215006)

(2020年1月28日收到; 2020年4月22日收到修改稿)

自组织是自然界广泛存在的一种自发从无序到有序的转变过程. 从晶体的生长到生物功能结构的形成, 自组织过程的影响和作用无处不在. 生物功能结构通常是具有多尺度特征的复合结构. 其中纳米结构的形貌及其空间排列方式对生物功能的实现起着关键作用. 功能结构有两大类: 平衡结构和非平衡结构. 本文总结了功能结构和人工仿生结构的最新进展. 研究发现, 虽然物理科学和材料科学在有关静态平衡功能结构的研究上取得了令人激动的进展, 但在如何实现具有响应和适应性的动态非平衡功能结构上, 仍然面临着挑战. 本文认为, 远离平衡态的活性体系在周期性驱动力的反复激发和训练下, 有可能演化出非平衡的动态结构. 这为实现具有自适应和自修复功能的非平衡结构提供了一种可能途径.

关键词: 自组织, 平衡结构, 非平衡结构, 活性系统

PACS: 05.65.+b, 89.75.Fb, 05.70.Ln

DOI: 10.7498/aps.69.20200161

1 引言

基本结构单元(如原子、分子、微纳米颗粒等)自发形成有序结构或花纹图案的过程称为自组织. 自组织现象在物理、化学、生物等各种体系都非常普遍. 在平衡体系, 自组织过程形成的是处于热力学平衡态结构, 其物理性质空间均匀、不随时间变化. 液-固(结晶)相变是一种常见的平衡自组织过程. 平衡相变形成的晶体作为热力学上的平衡稳定态, 其结构和物理性质在一定压强和温度范围内是稳定的. 平衡液-固相变是工业获取各种金属、半导体以及非线性晶体的主要手段(图1)^[1-3]. 随着新一代柔性光电材料的兴起, 以有机高分子为基本单元的有机晶体的生长和制备成为晶体材料领域一个新的研究方向. 虽然有机晶体在物理特性和晶体结构上与传统无机晶体材料相比, 有许多特异之处, 但依然是热力学平衡结构.

平衡相变或平衡自组织在经典平衡热力学框架下, 有成熟的理论和数学表述. 熵最大化和自由能最小化概括了平衡相变的基本源动力和演化趋

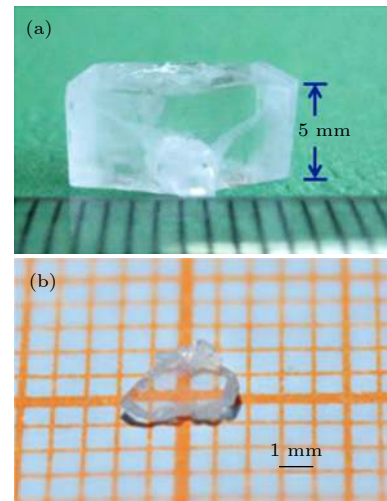
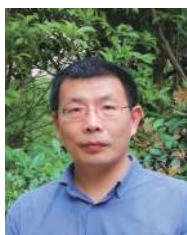


图1 人工晶体 (a) $K_3Ba_3Li_2Al_4B_6O_{20}F$ 单晶^[1]; (b) $NH_4B_4O_6F$ 晶体^[3]

Fig. 1. Artificial crystals: (a) Single crystal of $K_3Ba_3Li_2Al_4B_6O_{20}F$ ^[1]; (b) crystal of $NH_4B_4O_6F$ ^[3].

* 国家自然科学基金(批准号: 11674235, 11635002, 11974255)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangtianhui@suda.edu.cn



张天辉, 苏州大学, 教授. 2008 年新加坡国立大学获博士学位. 2008–2011 年在荷兰 Utrecht University 范特霍夫物理与胶体化学实验室做博士后研究. 2012 年加入苏州大学物理科学与技术学院·软凝聚态物理及交叉研究中心. 主要从事液-固相变和晶体生长动力学的相关研究. 已有工作集中在胶体体系中的结晶成核过程和分散体系的相分离. 相关研究结果揭示了晶核形成过程中亚稳态结构的热力学性质及其动力学演化过程. 目前研究工作专注于活性胶体体系集体行为、非平衡自组织和活性有序结构的涌现与控制.

势. 但并非所有空间均匀、性质稳定的固体都是平衡结构. 日常普遍使用的玻璃便是一种准静态的非平衡结构. 玻璃是液体极速冷却后的产物, 是液-固转变过程被冻结后的亚稳态结构. 玻璃是远离平衡的一种无序准静态结构, 其物理本质仍是凝聚态物理中一个难题, 2005 年被 *Science* 期刊列为 125 个有待解决的重大科学问题之一. 金属玻璃具有与普通晶体材料迥然不同的物理性质, 是目前新型材料研究中的一个重点方向.

2 生物体中的自组织结构

玻璃与普通固体(晶体)性质上的不同主要源于分子尺度上的空间排列的不同. 而在生物体中, 大量实例显示, 生物材料的物理性质和功能虽然和材料的原子成分及其空间排列有关, 但微纳米层面上的结构外形及其空间构筑方式的影响更为显著.

由于生物功能的需要, 生物组织需要具备普通结构不具备的特殊物理性质. 生物在利用自组织构建多尺度结构, 充分利用结构的尺寸效应实现特殊物理性质上显示出了超常的能力. 比如, 骨骼作为生物的支撑结构, 需要很好的韧性与较强的抗外力撞击能力. 为实现这种效果, 人体骨骼巧妙糅合了蛋白纤维和无机纳米晶粒两种结构(图 2(a)). 柔性的蛋白纤维提供了骨骼需要的韧性, 而无机纳米晶粒提供了骨骼作为支撑结构所需要的刚性^[4,14]. 竹子和棕榈树是植物中高强度和高韧性的代表. 竹纤维结构中包含了纤维束构成的蜂窝状单元, 再以这些单元为基础形成更高层的空间结构, 同时在径向上形成密度梯度. 这种多级结构使得竹子具有很强的抗弯刚度.

生物不仅能通过结构控制材料性能, 还能利用

结构与光的相互作用实现各种效应^[5]. 蝉翼不仅有较好的弹性和韧性, 而且纤薄透明不反光. 研究发现, 蝉翼的表面是一层纳米锥阵列(图 2(b)). 锥形纳米单元之间的平均距离为 190 nm, 远小于可见光的波长(400–760 nm). 因此对于可见光而言, 锥形阵列可看作是一种准连续的传播介质^[6]. 由于锥形结构的特点, 这层阵列在空气与蝉翼基底间形成一个折射率连续变化, 具有稳定折射率梯度的界面. 这种具有连续变化折射率的界面可有效降低反射光的强度, 起到抗反射、增强透射的作用^[9,15]. 抗反射表面可用于制作无反射玻璃、弱反射手机显示屏, 以及相机镜头上的抗反射涂层等^[9]. 类似的微观阵列结构在飞蛾复眼表面也有发现(图 2(e)). 因为复眼表面的抗反射结构, 飞蛾夜间飞行时, 可以接收很弱的光, 表现出很强的“趋光”能力. 同时抗反射结构还可有效地减少眼角膜的表面眩光, 降低被天敌发现的概率. 根据抗反射原理制备的抗反射涂层, 能有效地降低入射光的反射, 在较宽的光谱范围内增强光的吸收, 可应用于提高太阳能的吸收和转化效率^[16]. 善用结构与光的还有棘皮类动物, 如海尾蛇等. 它们能够敏锐感觉到周围不同方向上的光线强弱的变化. 这一功能源于其软骨组织内方解石成分的微晶结构. 这些微晶呈透镜状, 其主轴沿晶体 *C* 轴, 可有效减弱方解石的双折射效应, 从而可通过折射光精确判定入射光的来向^[8]. 这些微透镜在空间连络成的三维网状结构, 形成很好的机械支撑(图 2(d)). 除了光学性能, 生物通过控制组织表面的纳米结构, 还能实现疏水效果. 荷叶和芋头叶是其中的典型代表. 电子显微镜下, 芋头叶表面是一层微米突起, 突起的顶端还有次级纳米结构(图 2(c)). 这种结构能有效减少叶面与水滴的直接接触面积, 从而达到超疏水和自清洁的效果^[17].

生物通过控制自组织结构, 实现各种物理和生物功能的现象为人类展示了生物在控制自组织过程及其结构上的超常能力. 通过对这类现象的研究, 人类对纳米结构及其空间排列与材料宏观性质间的关联有了深入和全面的认识. 以这些研究成果为基础, 利用胶体自组装, 结合刻蚀等工艺, 研究人员成功仿制和发展了各种仿生结构^[10–13]. 其中最有代表性的是对结构色的研究和模仿. 研究发现, 自然界中许多鸟类羽毛和昆虫外壳的色彩源于一种光子晶体结构^[19,20], 如图 3(a)–(c) 所示, 在蝴

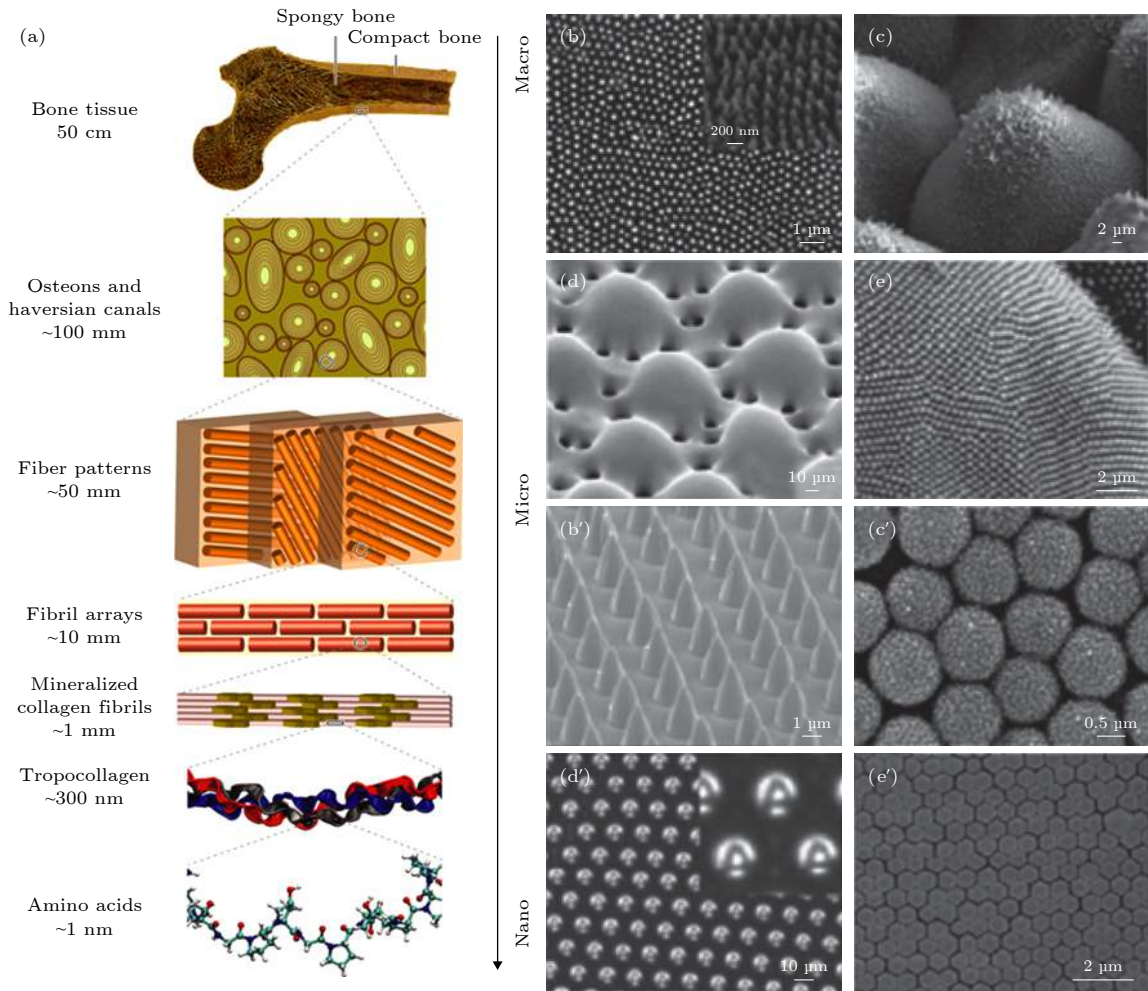


图 2 (a) 从蛋白分子的纳米结构到宏观多孔结构, 骨骼具有的多级分层结构使其具有很强的韧性和抗撞击特性^[4]; (b)–(e) 生物体中的微纳结构和 (b')–(e') 人工仿生结构^[5]: (b) 蝉翼的抗反射结构^[6]; (c) 芋头超疏水的叶子^[7]; (d) 阳遂足科动物皮肤中的透镜结构^[8]; (e) 孔雀蝶眼角膜中的乳头阵列^[9]; (b') 抗反射硅锥阵列^[10]; (c') 超疏水树莓状结构^[11]; (d') 碳酸钙的微透镜结构 (插图 为放大图)^[12]; (e') 超亲水自净二氧化钛纳米柱阵列^[13]

Fig. 2. (a) From the nanoscale of protein molecules to the macroscopic scale of physiology, the hierarchical structure of bone has significant characters of strong toughness and impact resistance^[4]; structures found on surfaces of plants and animals (b)–(e) and biomimetic, particle-based microstructures (b')–(e')^[5]: (b) the antireflective wings of a cicada^[6]; (c) the superhydrophobic leaves of taro^[7]; (d) lenses in the peripheral layer of the dorsal arm plate of a brittle star^[8]; (e) the corneal nipple arrays of a peacock butterfly^[9]; (b') antireflective silicon cone arrays^[10]; (c') superhydrophobic, raspberry-like arrangements^[11]; (d') micro-lenses from calcium carbonate (that show the magnified letter “A” here)^[12]; (e') superhydrophilic, self-cleaning titania nanocolumns^[13].

蝶的翅膀上和孔雀的羽毛中都发现了类似的光子晶体结构^[18]. 光子晶体是由两种不同折射率的物质在空间交替出现形成的周期性结构 (图 3(d)). 由于空间折射率的周期性变化, 在周期性边界条件的约束下, 某些波长和频率范围内的光 (振荡电场) 无法在这种结构中传遍, 从而形成光的“禁带”^[21]. 同时周期性排列的界面会形成多级反射. 当反射波满足布拉格方程时, 在结构表面会形成特定波长的增强干涉, 呈现特定的颜色, 即结构色. 结构色不会褪色, 而且通过改变光子晶体的晶格常数或晶格类型, 可以改变结构色的颜色. 以此原理为基础,

研究人员在实验室内成功仿制了光子晶体, 实现了人工结构色 (图 4). 结构色再一次体现了生物在利用结构实现功能上的出色能力.

与鸟类羽毛固定的色彩不同, 变色龙皮肤表面上的结构色, 在外部环境改变时, 可以迅速改变颜色, 达到伪装和自我保护的目的 (图 5(a) 和 (b)). 这种结构色的改变是通过调节皮肤表面鸟嘌呤纳米晶体的空间排列得以实现的^[23]. 与静态的光子晶体不同, 变色龙皮肤上的光子晶体结构能够对外界环境变化进行响应, 能实时进行结构和形貌调整, 具有一定活性, 即活性结构. 生物体内类似

的活性结构有很多, 如具有双层结构的细胞膜(图 5(c))^[24,25]. 细胞膜在细胞的分裂、内吞、拉伸等过程中表现出非常强的延展性和动态调整的能力. 细胞膜内的细胞骨架也是典型的活性结构. 细胞骨

架是细胞内部的支撑结构, 不断进行着分解和重构, 以适应细胞的运动和各種生理代谢过程的需要. 活性结构是一种非平衡结构, 需要消耗能量来维持稳定, 完成各种功能.

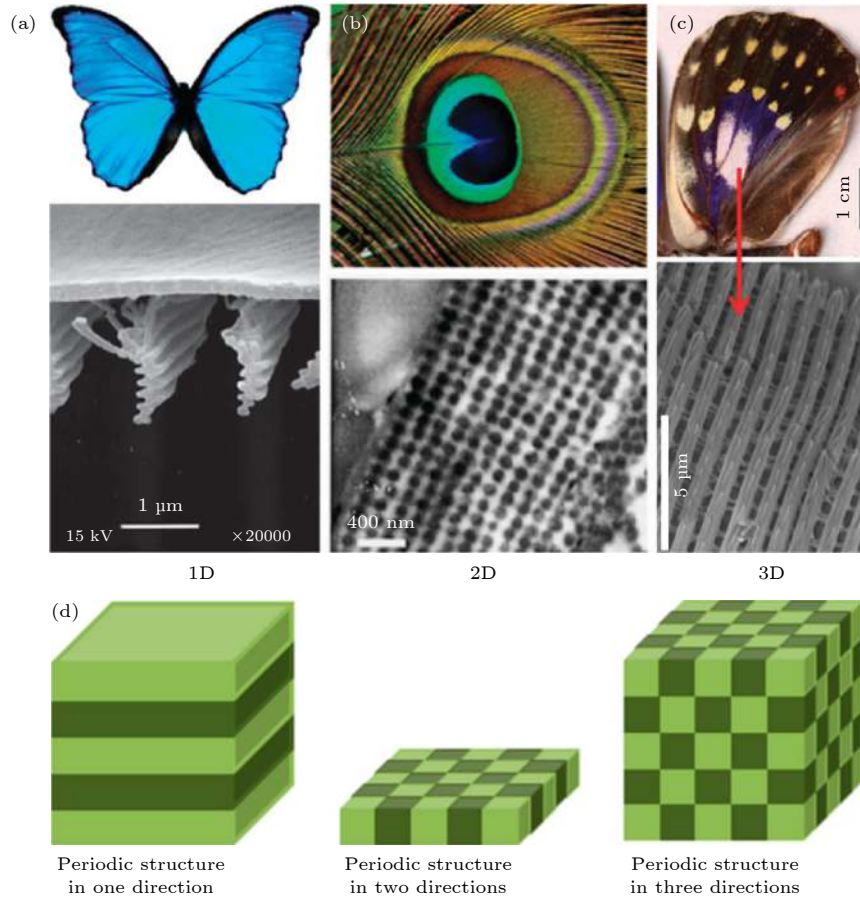


图 3 结构色与光子晶体 (a) 大闪蝶及其蓝色翅膀中的纳米结构(即生物光子晶体)的扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)图; (b) 孔雀羽毛及其蓝色部分的二维纳米结构的透射电子显微镜(transmission electron microscopy, TEM)图; (c) 大紫蛱蝶的翅膀及其白色部分的三维微观结构的 SEM 图^[18]; (d) 从左到右分别是一维、二维、三维的光子晶体结构示意图^[19]
 Fig. 3. Structure color and photonic crystals: (a) The blue iridescence and SEM image of the 1D structure of the Morpho butterfly; (b) multi-coloured peacock feather and TEM image of transverse cross section of the 2D structure of the blue area of a wing; (c) wing of the male Sasakia Charonda butterfly and SEM image of the 3D structure of the white iridescent area^[18]; (d) schematic drawings of the structures of 1D, 2D, and 3D photonic crystals^[19].

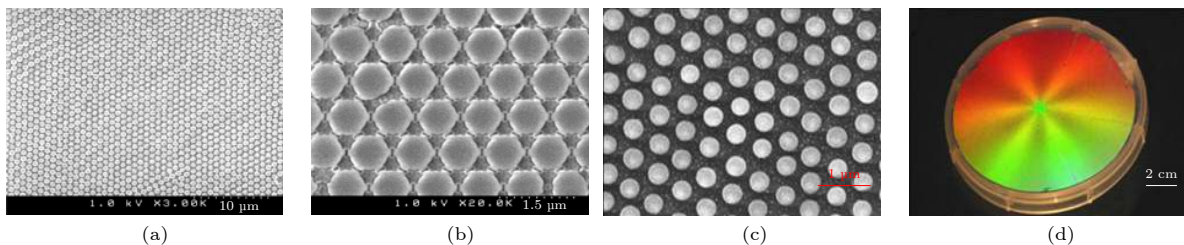


图 4 人工结构色 (a) 直径为 850 nm 的二氧化硅大颗粒形成的二元胶体晶体薄膜的 SEM 图像^[21]; (b) 直径为 150 nm 的聚苯乙烯小颗粒形成的二元胶体晶体薄膜的 SEM 图像^[21]; (c) 二氧化硅微球形成的二维胶体晶体; (d) 白光照射下, 晶圆级尺寸的胶体晶体(图(c))薄膜呈现出的结构色^[22]
 Fig. 4. Artificial structure color: (a) SEM images of binary opal films formed by large 850 nm silica spheres packed in interstices^[21]; (b) SEM images of binary opal films formed by small 150 nm polystyrene latex spheres packed in interstices^[21]; (c) SEM image of two-dimensional colloidal crystal formed by silica microspheres; (d) wafer-scale colloidal crystal film shown in figure (c)^[22].

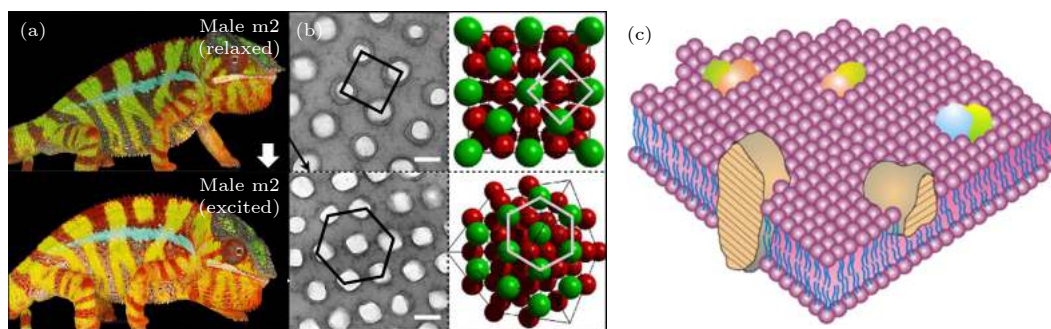


图 5 活性结构 (a) 豹变色龙在受到外部刺激时, 通过调控皮肤表面的微纳米结构, 会发生可逆色变; (b) 豹变色龙皮肤中光子晶体的微观结构图像及其三维面心立方结构模型(两个方向), 标尺为 $20\ \mu\text{m}$ ^[23]; (c) 细胞膜是由磷脂分子构成的双层膜结构, 具有很强的形变和适应能力^[25]

Fig. 5. Active structure: (a) Reversible color change is shown for the leopard chameleon exposed to external stimuli (white arrow) through adjustments of micro-nano structures on skin surface; (b) TEM images of guanine nanocrystals in S-iridophores in the excited state and three-dimensional model of an FCC (face-centered cubic) lattice (shown in two orientations). Scale bar: $20\ \mu\text{m}$ ^[23]; (c) cell membrane is a double-layer membrane structure composed of phospholipid molecules, which is highly deformable and adaptable^[25].

平衡自组织在自然界各种物理、化学和生物体系中, 只是很少的特例. 更为普遍和常见的是非平衡过程. 非平衡过程得到的并非总是玻璃一类的无序结构. 在维持恒定能量输入的条件下, 通过非平衡自组织, 热力学体系也可形成各种动态、稳定、有序的结构. Benard 对流花纹便是最有代表性的例子. 1900 年, Benard 研究水在被加热过程中的对流时发现, 在上下液面的温度差超过某临界值后, 热对流会自发形成规则的蜂窝状对流花纹(图 6(a)). 类似的非平衡自组织现象在自然界非常普遍. 大气湍流、海洋环流和细胞骨架(图 6(b))的形成都是非平衡自组织的结果. 正是通过非平衡自组织, 宇宙和自然展现出其复杂性的一面, 演化出地球上丰富多彩的自然现象和生命形态.

作为远离平衡态的高度有序的活性物质, 生命体不仅能实现各种生物功能, 更重要的是能对外界环境的变化和刺激做出响应和适应性调整, 有自修复功能, 这是处于热平衡态下的材料和有序结构无法做到的. 研究人员虽然在理解和模仿各种平衡自组织结构上取得了许多进展, 但如何实现具有生物活性的动态非平衡结构, 目前还是一个难题. 具有活性的动态智能结构是下一代人工材料的发展趋势^[28–30]. 但如何实现这类结构, 目前还没有统一的理论和切实可行的技术手段. 鉴于生物体系中的功能性结构通常形成和工作于非平衡态, 通过耗散能量来维持, 非平衡条件下自驱动体系的动态自组织有可能是实现活性结构的一个可能途径^[31].

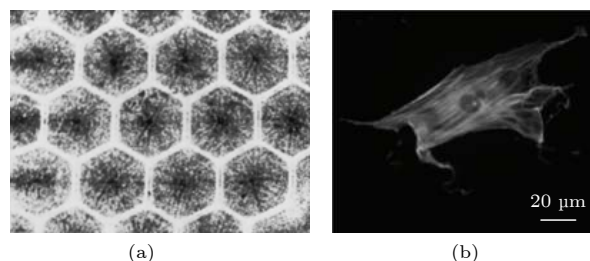


图 6 自然界中的非平衡自组织结构 (a) Benard 对流花纹^[26]; (b) 细胞骨架^[27]

Fig. 6. Non-equilibrium self-organizations in nature: (a) The formation of Benard convection pattern^[26]; (b) cytoskeleton^[27].

3 自驱动体系的非平衡自组织

非平衡自组织现象不仅存在于生物体内, 也广泛存在于生物群体行为中. 如图 7(a)–(c) 所示, 鱼群、鸟群^[32]和细菌群落^[33]等自驱动(活性)体系都能在一定条件下形成群集(flocking, 同速同向的集团式运动)、涡旋(vortex, 有稳定旋转中心的集体转动)和螺旋(swirling, 螺旋式旋转)等集体运动. 集体运动的出现伴随着自发对称性破缺, 需要个体不断消耗自身能量来维持, 具有典型的非平衡自组织的特点. 集体运动在从微观细菌到宏观的鸟群中都能出现, 说明集体运动涌现的背后存在一种不依赖于相互作用力细节, 具有标度不变性的物理机制. Vicsek 等^[34]把这种机制称作速度对齐(aligning), 即运动个体总是倾向于和周围的同类在运动方向上保持一致. 在自驱动体系集体运动理论工作的推动下, 研究人员发展出多种自驱动实验

体系, 如细菌群 [35,36]、细胞群 [37,38]、微型智能机器群 [39]、自驱动胶体体系 [40,41](图 7(d),(e)) 等用于研究集体运动背后的非平衡自组织的物理机制. 相比于其他体系, 胶体颗粒的外形以及胶体颗粒间的相

互作用力, 可根据需要进行设计和调控; 同时胶体实验体系的尺寸以及所包含的个体数量都足以摒除边界和有限尺寸效应的影响. 这是其他体系无法比拟的优势. 自驱动胶体可通过磁场 [42,43]、电场 [44]、

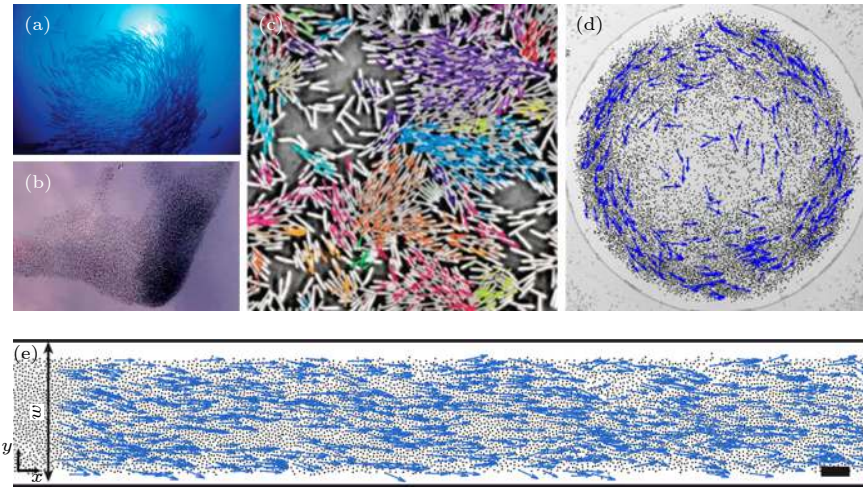


图 7 自然界和胶体体系中的集体运动 (a) 鱼群; (b) 鸟群 [32]; (c) 细菌菌落 [33]; (d) 圆形受限边界内自驱动胶体的涡旋运动, 箭头表示粒子的瞬时速度的方向 [49]; (e) 环形腔内自驱动胶体的定向集体运动, 箭头表示粒子瞬时速度方向 [50]

Fig. 7. Collective motions in natural and colloidal systems: (a) Schooling of fishes; (b) flocking of birds [32]; (c) swimming bacillus subtilis bacteria [33]; (d) a roller vortex with circular restricted boundary. The blue vectors represent instantaneous speed of the rollers [49]; (e) directed collective motion of colloidal rollers. The blue arrows represent the instantaneous particle velocities [50].

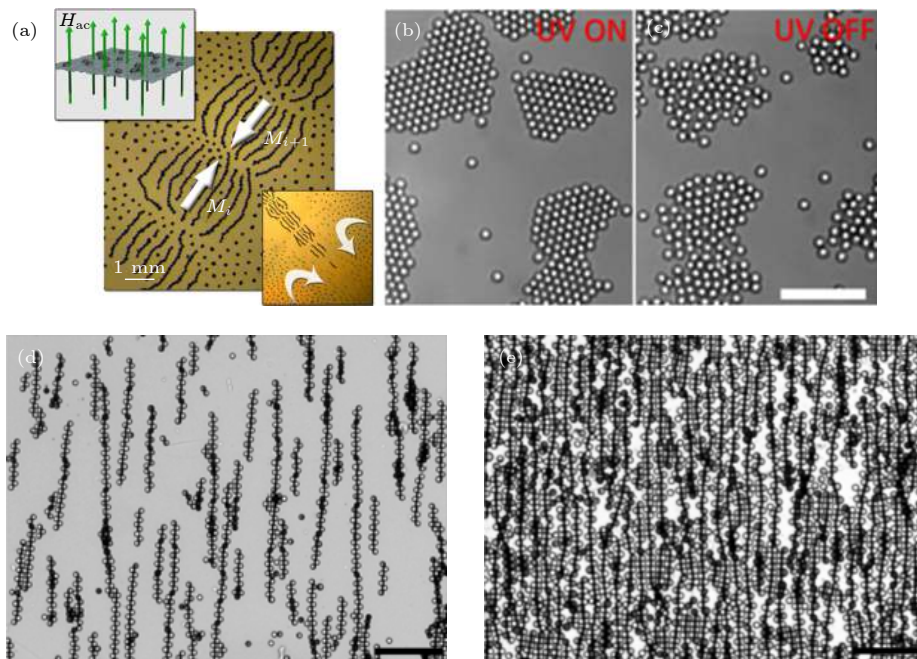


图 8 自驱动胶体体系中的动态结构 (a) 垂直交变磁场中, 尺寸可变的多节蛇形结构 [53]; (b) 蓝光照射下粒子自组装形成活性晶体; (c) 关闭光源后, 晶体溶解 [32]; (d) 交变电场中, Janus 粒子在不同粒子浓度条件下形成的交错链 ($56 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ at 40 kHz); (e) 交变电场中, Janus 粒子在不同粒子浓度条件下形成的密集交错链 ($27 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ at 40 kHz) [54]

Fig. 8. Dynamic self-assembly in the colloidal systems: (a) Self-assembled multi-segment snake-like structures generated by a vertical alternating magnetic field. The size of the segments is determined by the magnetic field frequency [53]; (b) living crystals assembled from a homogeneous distribution under illumination by blue light; (c) living crystals melt by thermal diffusion when light is extinguished [32]; (d) optical micrographs of staggered chains ($56 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ at 40 kHz) of Janus particles in an alternating-electric field [54]; (e) optical micrographs of concentrated staggered chains ($27 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ at 40 kHz) of Janus particles in an alternating-electric field [54].

光^[45]、机械振动^[46]和化学反应^[47]等方式进行驱动,可通过流体相互作用^[33]和外形(如杆状颗粒)几何效应^[46]形成速度对齐.两种典型的集体运动,群集(flocking)^[44]和涡旋(vortex)^[48,49],在自驱动胶体中都有相关报道.

在磁场、电场、流场或光等外场驱动下,自驱动胶体体系可形成各种动态结构^[31,51].如图8(a)所示,垂直交变磁场下,在气-液界面上的磁性胶体颗粒通过磁偶相互作用和流场相互作用,可形成游动的蛇形链.蛇形链的平均长度可通过调整磁场旋转频率控制^[52,53].过氧化氢、氢氧化四甲铵和十二烷基硫酸钠的混合溶液中,含赤铁矿的胶体颗粒在蓝光的照射下会催化过氧化氢的分解,在其周围形成浓度梯度和渗透流,进而驱动胶体颗粒,并在胶体间诱导一个有效的吸引力.这些被驱动的胶体颗粒在持续的光照下会聚集形成有限尺寸的晶体结构(图8(b),(c)).这些晶体结构并不稳定,会不断重新排列、合并或分裂^[32,45].交变电场中的Janus粒子通过动态自组装也能形成交错排列的链结构(图8(d),(e))^[54].

自驱动胶体体系中的各种动态结构,需要持续的能量输入和稳定的外场维持,是典型的非平衡态结构.这些非平衡态结构展现出平衡自组织结构不具备的特点:能对外场的变化产生响应,能重构.

但和生物体中典型的活性结构相比,目前实现的动态自组织结构还存在许多问题.首先,目前的动态结构仅限于单粒子层次上的自组织,还无法形成多层次的有序结构.其次,已有的动态结构仅限于局部的有限区域,还没有形成大尺度的宏观效应.这些问题极大限制了动态结构在功能结构上的应用.

4 未来之路——具有时间特性的动态结构

物理学家很早就注意到周期性振动会在颗粒物体体系引起颗粒的对流,并形成稳定的斑图结构.调控振幅和振动频率,可改变斑图的空间结构和特征尺寸(图9)^[55,56].这种斑图结构可看作是振动激发的密度波在受限体系中的驻波态,反映的是颗粒物堆积厚度(z 方向)在 $x-y$ 平面上的不均匀分布.图9中的平面图案是这种三维堆积在 $x-y$ 平面上投影.这种堆积高度空间分布上的不均匀性是振动台周期性振动诱发的.振动过程中,振动台底板对颗粒物 z 向上施力是单向的,破坏了 z 方向上动力学的对称性.同时振动台底板对颗粒物的作用在斑图演化和形成的过程中,并不是同时均匀施加于所有颗粒,只有最下层的颗粒与振动台之间是直接相互作用的,这进一步破坏了颗粒物在 z 方向上的动

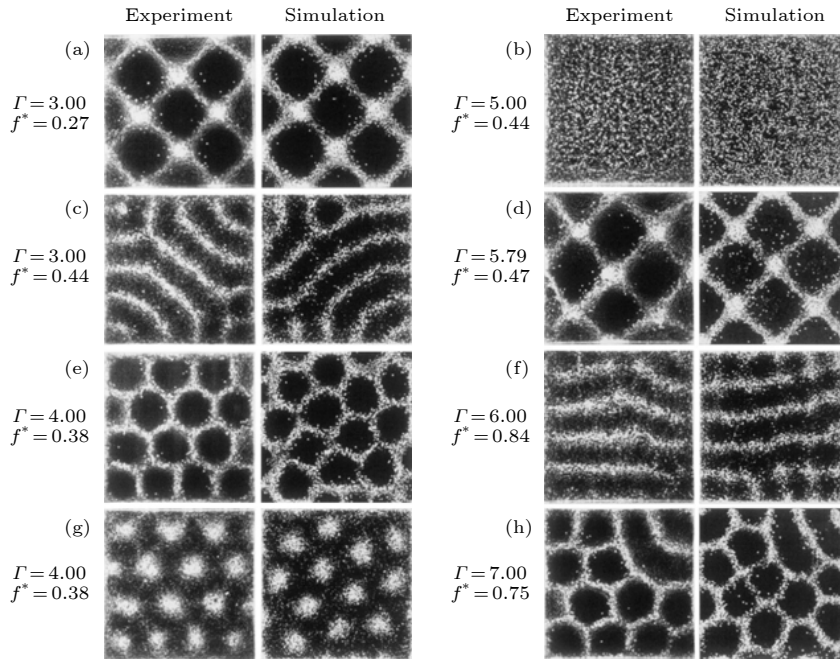


图9 (a)–(h) 振动颗粒表面形成的形态各异的斑图,实验和模拟结果对比(Γ 为加速度, f^* 为约化振动频率)^[55]

Fig. 9. (a)–(h) Spot diagrams of vibration granular surface forms: Experiment and simulation results (Γ is acceleration and f^* is frequency)^[55].

力学对称性. 因此斑图的出现不完全是自发性对称破缺的结果, 不能看作是严格意义上的非平衡自组织, 是一种受迫振动的结果.

振动颗粒物体中斑图结构的出现给了我们启示: 周期性的外场与体系内某一动力学过程的时间尺度相匹配时, 有可能激发出一些复杂的动态结构. 因此可以尝试在自驱动体系中引入周期性的驱动. 需要注意的是, 这种周期性的驱动本身不能破坏体系的动力学对称性. 已有研究结果证实, 量子体系在周期性外场的驱动下, 可形成具有时间特征的“时间晶体”^[57]. 如果“时间晶体”能够在具有空间结构的体系中实现, 就可得到同时具有空间结构和时间结构的“时-空晶体”^[58]. 目前“时间晶体”的探索集中在量子体系, 能否在经典的自驱动体系实现, 还有待探讨. 但在自驱动体系中引入周期性驱动, 把不同时间尺度上的过程进行耦合, 形成复杂的动态结构是一个值得探索的方向.

参考文献

- [1] Zhao S, Kang L, Shen Y, Wang X, Asghar M A, Lin Z, Xu Y, Zeng S, Hong M, Luo J 2016 *J. Am. Chem. Soc.* **138** 2961
- [2] Chen W, Jiang A, Wang G 2003 *J. Cryst. Growth* **256** 383
- [3] Shi G, Wang Y, Zhang F, Zhang B, Yang Z, Hou X, Pan S, Poeppelmeier K R 2017 *J. Am. Chem. Soc.* **139** 10645
- [4] Libonati F, Buehler M J 2017 *Adv. Eng. Mater.* **19** 1600787
- [5] Kraus T, Brodoceanu D, Pazos-Perez N, Fery A 2013 *Adv. Funct. Mater.* **23** 4529
- [6] Zhang G, Zhang J, Xie G, Liu Z, Shao H 2006 *Small* **2** 1440
- [7] Yan Y Y, Gao N, Barthlott W 2011 *Adv. Colloid Interface Sci.* **169** 80
- [8] Aizenberg J, Tkachenko A, Weiner S, Addadi L, Hendler G 2001 *Nature* **412** 819
- [9] Stavenga D G, Foletti S, Palasantzas G, Arikawa K 2006 *Proc. R. Soc. B-Biol. Sci.* **273** 661
- [10] Zhang X, Zhang J, Ren Z, Li X, Zhang X, Zhu D, Wang T, Tian T, Yang B 2009 *Langmuir* **25** 7375
- [11] Tsai H J, Lee Y L 2007 *Langmuir* **23** 12687
- [12] Lee K, Wagermaier W, Masic A, Kommareddy K P, Bennet M, Manjubala I, Lee S W, Park S B, Cölfen H, Fratzl P 2012 *Nat. Commun.* **3** 725
- [13] Li Y, Sasaki T, Shimizu Y, Koshizaki N 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 14755
- [14] Wegst U G K, Bai H, Saiz E, Tomsia A P, Ritchie R O 2015 *Nat. Mater.* **14** 23
- [15] Morikawa J, Ryu M, Seniutinas G, Balčytis A, Maximova K, Wang X, Zamengo M, Ivanova E P, Juodkazis S 2016 *Langmuir* **32** 4698
- [16] Zhu J, Hsu C M, Yu Z, Fan S, Cui Y 2010 *Nano Lett.* **10** 1979
- [17] Nishimoto S, Bhushan B 2013 *RSC Adv.* **3** 671
- [18] Armstrong E, O'Dwyer C 2015 *J. Mater. Chem. C* **3** 6109
- [19] Seebach A, Löttsch D, Ruhmann R, Muehling O 2014 *Chem. Rev.* **114** 3037
- [20] Saranathan V, Forster J D, Noh H, Liew S F, Mochrie S G J, Cao H, Dufresne E R, Prum R O 2012 *J. R. Soc. Interface* **9** 2563
- [21] Wong S, Kitaev V, Ozin G A 2003 *J. Am. Chem. Soc.* **125** 15589
- [22] Jiang P, Prasad T, McFarland M J, Colvin V L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 011908
- [23] Teyssier J, Saenko S V, van der Marel D, Milinkovitch M C 2015 *Nat. Commun.* **6** 6368
- [24] Clapham D E, Runnels L W, Strübing C 2001 *Nat. Rev. Neurosci.* **2** 387
- [25] Nicolson G L 2014 *Biochim. Biophys. Acta-Biomembr.* **1838** 1451
- [26] Richter F M 1978 *J. Fluid Mech.* **89** 553
- [27] Liu Y, Mollaeian K, Ren J 2018 *Electronics* **7**
- [28] Mohammed J S, Murphy W L 2009 *Adv. Mater.* **21** 2361
- [29] Cui Y, Li D, Bai H 2017 *Ind. Eng. Chem. Res.* **56** 4887
- [30] Roy N, Bruchmann B, Lehn J M 2015 *Chem. Soc. Rev.* **44** 3786
- [31] Grzybowski B A, Fitzner K, Paczesny J, Granick S 2017 *Chem. Soc. Rev.* **46** 5647
- [32] Zhang J, Guo J, Mou F, Guan J 2018 *Micromachines* **9** 88
- [33] Marchetti M C, Joanny J F, Ramaswamy S, Liverpool T B, Prost J, Rao M, Simha R A 2013 *Rev. Mod. Phys.* **85** 1143
- [34] Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, Cohen I, Shohet O 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1226
- [35] Zhang H P, Be'er A, Florin E L, Swinney H L 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **107** 13626
- [36] Chen C, Liu S, Shi X Q, Chaté H, Wu Y 2017 *Nature* **542** 210
- [37] Vedula S R K, Leong M C, Lai T L, Hersen P, Kabla A J, Lim C T, Ladoux B 2012 *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **109** 12974
- [38] Minati G (Urbani Ulivi L Ed.) 2019 *The Systemic Turn in Human and Natural Sciences: A Rock in The Pond* (Cham: Springer International Publishing) pp1–39
- [39] Rubenstein M, Cornejo A, Nagpal R 2014 *Science* **345** 795
- [40] Wang W, Duan W, Ahmed S, Sen A, Mallouk T E 2015 *Acc. Chem. Res.* **48** 1938
- [41] Zhang J, Luijten E, Grzybowski B A, Granick S 2017 *Chem. Soc. Rev.* **46** 5551
- [42] Tretiakov K V, Szleifer I, Grzybowski B A 2013 *Angew. Chem., Int. Ed.* **52** 10304
- [43] Snezhko A, Aranson I S 2011 *Nat. Mater.* **10** 698
- [44] Bricard A, Caussin J B, Desreumaux N, Dauchot O, Bartolo D 2013 *Nature* **503** 95
- [45] Palacci J, Sacanna S, Steinberg A P, Pine D J, Chaikin P M 2013 *Science* **339** 936
- [46] Narayan V, Ramaswamy S, Menon N 2007 *Science* **317** 105
- [47] Wang W, Duan W, Sen A, Mallouk T E 2013 *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **110** 17744
- [48] Wioland H, Woodhouse F G, Dunkel J, Kessler J O, Goldstein R E 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 268102
- [49] Bricard A, Caussin J-B, Das D, Savoie C, Chikkadi V, Shitara K, Chepizhko O, Peruani F, Saintillan D, Bartolo D 2015 *Nat. Commun.* **6** 7470
- [50] Morin A, Bartolo D 2018 *Phys. Rev. X* **8** 021037
- [51] Lin Z, Gao C, Chen M, Lin X, He Q 2018 *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **35** 51
- [52] Snezhko A 2011 *J. Phys. Condes. Matter* **23** 153101
- [53] Belkin M, Glatz A, Snezhko A, Aranson I S 2010 *Phys. Rev. E* **82** 015301
- [54] Gangwal S, Cayre O J, Velev O D 2008 *Langmuir* **24** 13312

- [55] Bizon C, Shattuck M D, Swift J B, McCormick W D, Swinney H L 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 57
- [56] Eshuis P, van der Weele K, van der Meer D, Bos R, Lohse D 2007 *Phys. Fluids* **19** 123301
- [57] Zhang J, Hess P W, Kyprianidis A, Becker P, Lee A, Smith J, Pagano G, Potirniche I D, Potter A C, Vishwanath A, Yao N Y, Monroe C 2017 *Nature* **543** 217
- [58] Sacha K, Zakrzewski J 2017 *Rep. Prog. Phys.* **81** 016401

INVITED REVIEW

Control of self-organization: From equilibrium to non-equilibrium*

Shi Yan Zhang Tian-Hui[†]

(Center for Soft Condensed Matter Physics and Interdisciplinary Research, School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

(Received 28 January 2020; revised manuscript received 22 April 2020)

Abstract

Self-organization represents a ubiquitous transition from disorder to order. It plays a critical role in forming crystalline materials and functional structures in biology. Functional structures are generally hybrid on a multiple scale in which nano-structures are often organized in a specific way such that they can perform functions. There are two typical functional structures: static equilibrium structures and dynamic non-equilibrium structures. In this review, recent advances in understanding and mimicking functional structures are summarized. Although great advances have been achieved, it is still a big challenge to realize dynamic non-equilibrium structures. In this case, we suggest that the controlling of self-organization in active systems may be a route toward interactive and adaptive structures.

Keywords: self-organization, equilibrium structures, non-equilibrium structures, active system

PACS: 05.65.+b, 89.75.Fb, 05.70.Ln

DOI: 10.7498/aps.69.20200161

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674235, 11635002, 11974255).

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