

## 颗粒晶体:非线性动力学与材料工程的结合

(中国科学院物理研究所 厚美瑛 编译自 Mason A. Porter et al. *Physics Today*, 2015, (11): 44)

宏观粒子在晶格排布上具有尺寸、刚度和空间分布选择等自由度,使得颗粒晶体成为减震材料、聚声装置、音响开关及其他新奇装置的理想组建单元。

材料创新和新工艺的出现是紧密联系的。金属打造能力使人类有了犁和剑;半导体的发展导致了晶体管的发明;再近的,像增强塑料、聚合物和金属泡沫等复合材料的合成使得更轻、更节能的汽车和飞机成为可能。在这些例子中,“材料”的含义都可以被理解为一种比化学成分更为广泛的意义。原子的几何排列和它的化学成分同样重要,共同决定着材料的力学和电学性质。事实上,新材料不仅是靠发现新的化合物或掺杂物,也可通过对化合物微观结构精确控制来实现。拿金属泡沫材料作为例子,金属泡沫的密度和刚度是通过在制造过程中控制组合物和多孔微观结构而制成的。

颗粒晶体同样也模糊了材料的定义。顾名思义,颗粒晶体指的是由宏观粒子而不是原子或分子组成的材料。更具体地说,它们是固体颗粒呈晶格或无序排列紧密堆积而

成的。我们可以把轴承钢球想象为晶体固体中的原子。与晶体中的原子一样,颗粒晶体中的粒子也可排列成一维、二维或三维晶格(图1)。然而,与原子通过化学键的相互作用不同,宏观粒子通过几何接触来交换彼此间的动量和相互作用力。

宏观颗粒本身可以组成如金属、聚合物和陶瓷等不同材料。粒子的成分和形状的选择影响到它们的相互作用力,并最终影响到颗粒晶体材料的力学响应。类似于原子晶体的缺陷,位错、空位和杂质粒子等缺陷也会影响颗粒晶体的整体行为。但是,与原子晶体中缺陷随机存在形成鲜明对比的是在颗粒晶体中缺陷的位置可以设计放在特定位置。这种精确设计材料缺陷的能力为材料行为的控制提供了一个调节旋钮。

如光学和声学超材料等人工材料,在颗粒晶体中也可以通过晶体结构的周期性和局域共振来控制波的传播。只不过它们的动力学行为是由颗粒接触点的弹性形变所决定。力最初只发生在接触点上。当球渐渐地挤压在一起,接触点的重叠长度为 $\delta$ ,接触点变成了一个二维的面接触,压力正比于 $\delta^{3/2}$ 。这种强的非线性力学响应使颗粒晶体从其他特制微结构材料

中脱颖而出。

一个一维未压缩晶体,或者没有外力作用于边界的颗粒链,声波波速为零。其运动方程不包含线性项,这样的颗粒链支持所谓的孤立的传播。这种弹性波在颗粒链方向传播时,保持着高度局域化和相干性,并且保有极其特殊的性质,例如,波的速度取决于振幅,振幅越大,其速度越快,其波长则与振幅无关。

当颗粒链两端外加静压力使得颗粒的受力形变与动力学形变相当甚或超过时,颗粒晶体的非线性响应会减弱,甚至几乎变成是线性的。在这几近线性区,颗粒晶体呈熟悉的离散周期系统特征,包括色散关系中带隙的出现。

预压是调整颗粒晶体力学行为的一种方式。工程师还可通过改变其弹性性能来改变晶体中声速。控制粒子的几何形状能进一步提供控制局部接触相互作用的非线性协调性。此外,增加颗粒的复杂性,如在颗粒表面镀上另一种材料,把颗粒嵌套在大颗粒内,或嵌入聚合物基质中,都能使内部自由度(包括能修正接触作用的局域势能)引发动力学效应。

$N$ 个球形颗粒组成的颗粒链可以被看成一组耦合振子,颗粒之间的相互作用由赫兹定律所确定。这样的颗粒链可以支撑三种主要类型的波:行波,冲击波,和内禀局域模,它也被称为离散呼吸子,是一种空间局域化,时域周期振荡,稳

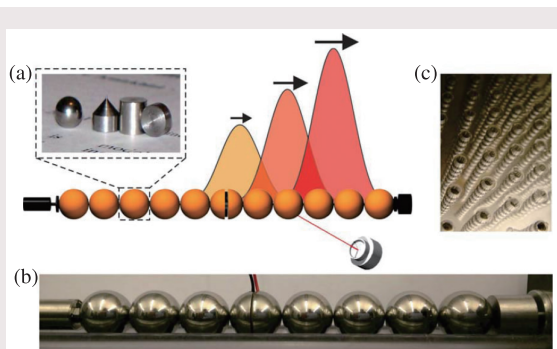


图1 (a)颗粒链示意图,颗粒可以为其他形状(见插图)。链支持波速与振幅相关的行波,振幅越大,波速越快;(b)2 mm直径轴承钢珠组成的一维颗粒链;(c)三维颗粒晶体

定的(或至少是长寿的)激振模式。图2给出了这三种类型的波。

行波最简单的产生方法是敲击颗粒链的一端。行波像传统的孤立波,但当可调参数  $\Delta_n=0$  时,波尾以比典型的孤立波更快的速度(双指数)衰减。当  $\Delta_n \neq 0$  时,波呈指数衰减,至少在小振幅时可以双曲正割平方分布近似。由两种不同粒子组成的链,如钢和铝球交替组成的链,会产生有趣的行波模式。就在几年前行波还被认为除了在某些特定参数值,不可能长时间存在于这样的异构链中。

颗粒晶体支持应力以孤立波的形式传播,使它们成为热门的聚焦和引导相干结构的材料。一方面,行波在颗粒晶体中色散远不及线性材料;另一方面,波速可以调到超慢速度,这使得颗粒晶体适于做减震材料。

自上世纪90年代末,不同实验室在不同的物理系统像磁性固体、约瑟夫森结和激光诱导光子晶体等的研究,都观察到离散呼吸子。2010年作者提出并实验证明了这些空间局域波可以在压缩的钢和铝球交替的双链中被激发。在这个装置中预压是呼吸子存在的关键。与线性色散关系相关联的小振幅傅里叶模式可以通过颗粒晶体的声学 and 光学频率波段传播,并且印证了离散呼吸子的存在。如图2(c)所示,链中每个粒子或振荡,或呼吸,它的振幅相对于中间颗粒指数衰减。

颗粒晶体呼吸子的非线性相互作用特性使它能够将噪声和机械振动局限在一个特定的位置和一个特定的频率范围内,使其成为理想的可转换成驱动微瓦到毫瓦级的小型传感器或变送器电信号的材料。

虽然波在颗粒晶体中传播的研

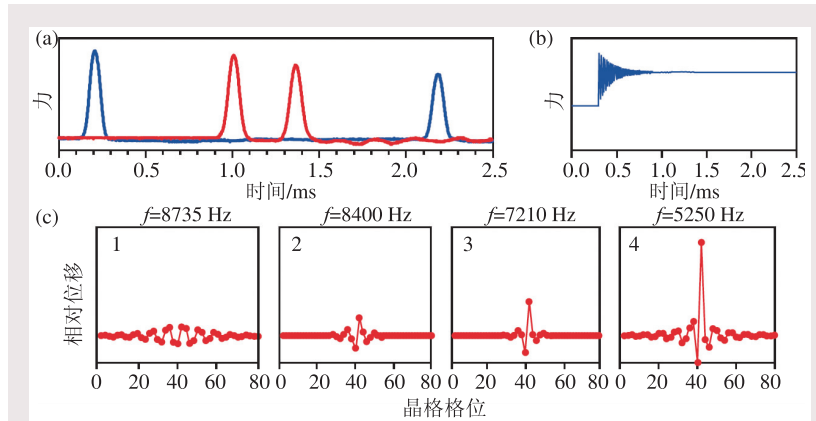


图2 (a)无色散行波; (b)激波; (c)离散呼吸子

究主要集中在—维颗粒链上,二维和三维晶体的相干结构的研究也有很大进展。高维系统为非线性波的传播方向提供了额外的自由度。例如,通过选择不同的颗粒的几何堆积或相同的几何堆积不同的材料排布,可以从根本上改变二维颗粒阵列的波阵面。

一般厘米量级的颗粒组成的颗粒晶体的响应范围在1 Hz到20000 Hz,这频段与声屏障、冲击波保护层、以及水下声纳设备等频段对应。其他常见的工程应用,包括固体的无损评价使用声波,超声医学成像,和外科手术的频段在兆赫兹的量级。这要求颗粒大小必须减小到微米尺度。制作微米级晶体的难点在于,由于元件的小型化,接触动力学性质难以控制并且敏感于颗粒缺陷和环境条件。此外,赫兹模型对微观粒子间相互作用的实用性不再充分,颗粒还会受到静电、粘附力、粗糙、水动力作用(或更具体地说,对粒子的弹性流体压力的变化)和表面电荷等的影响。

最近的研究已经证明了类似于电子设备的非线性声学器件的可行性。例如声整流器,可以考虑在均匀颗粒链靠近左端边界放一个质量小一点的颗粒。这个颗粒的存在在产

生了一个围绕这质量缺陷、呈指数衰减、频率为  $f_{\text{defect}}$  的局域波。在链的右端施加一个频率接近  $f_{\text{defect}}$  的频率为  $f_{\text{drive}}$  的驱动力,由此产生一个不能向左传播的波。相同的力应用于左端,则产生一个与缺陷模式波相干扰的频率线性组合波,  $C_1 f_{\text{drive}} \pm C_2 f_{\text{defect}}$ , 其中  $C_1$  和  $C_2$  是整数。这些频率中的某些频率可能位于通带中,这些频率能在链中传播。用类似方法可以开发出声开关和逻辑元件。有序的二维和三维颗粒晶体的排列也可以作为聚焦能量的声透镜,它的应用如无创外科手术。

颗粒晶体在基础物理和新兴的应用研究方面正蓬勃发展。颗粒的无序组构使得如安德森局域化等强非线性现象的普适化得以实现。超晶格的研究对颗粒晶体来说也是一个挑战,这样的颗粒有自己的结构会改变颗粒晶体的能带结构和共振频率。其他还包括小型化(微米尺度晶体行为在实验上渐渐成为可能)和分子间粘滞力和表面粗糙度对颗粒晶体行为影响的模型建立的需求。二维和三维颗粒晶体研究成果的不断增长,产生了比—维晶体更丰富的现象。为了了解这些高维现象,考虑诸如颗粒之间的转动相互作用等的物理效应也是一个重要问题。