

固体材料中的新成员——准晶体

刘 维

众所周知,晶体具有 2、3、4、6 这四种旋转对称性。可是 1984 年秋,美国国家标准局的道·谢克曼等人在用电子显微镜观察由特殊的急冷法制备的 Al-Mn 合金时,意外地观察到有五次对称性的清晰的电子衍射谱。由于这一发现“违背”了晶体学中最经典的基本定律,引起了许多晶体学家和凝聚态物理学家的极大重视。各国科学家都争先用 X 射线衍射,中子衍射,电子衍射和高分辨电子显微镜等手段,对这种新材料进行了深入的研究,很快就弄清了它的结构特征。这些研究表明了它既不是晶体,也不完全是非晶体,而是一种介于晶体和非晶体之间的一种具有特殊排列方式的材料。并给它以“准晶体”这一新概念。

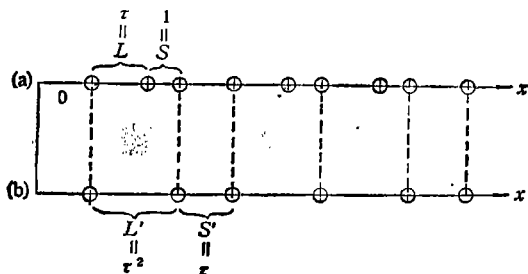


图 1 (a) 以黄金比 τ 为准周期的一维准周期原子排列。(b) 图 (a) 的原子排列中,取出一部分原子后,得到的准周期为 τ 的另一种原子排列。

一、准晶体的基本特征

准晶体的主要特征有准平移周期性,自相似性,黄金分割系数,多种单胞组成和具有晶体中不容许的对称性等。以一维准晶体为例,图 1 中给出了一维准周期原子排列方式。把图 1 (a) 中的一部分原子去掉,则构成了图 1 (b) 所表示的一维准晶体。新构成的准晶体与原来图 1 (a) 中准晶体的原子排列方式完全相同,我们称图 1 (a) 和图 1 (b) 具有自相似性。从图 1 我们看到了原子的排列虽然没有平移周期,但还是有一定规律的。这种排列规律就称为准周期性。把一维情形可以推广到二维和三维情形时,与准周期性共存的还有旋转对称性。当旋转对称性为晶体中所具有的 2、3、4、6 次对称性时,准周期性没有任何限制,甚至

任何无理数都可以,这种情形就是晶体中的无介度调制结构。当旋转对称性为晶体中不容许的对称性时(为五次、十次对称等),准周期性要受到限制。如在二维情形中,具有五次对称性的准周期是由两种菱形组成。一种是内角为 36° 和 144° 菱形;另一种是内角为 72° 和 108° 的菱形。把这两种菱形按一定的配合原则镶嵌在一起,就构成了图 2 给出的二维潘罗斯 (Penrose) 格子,这种格子

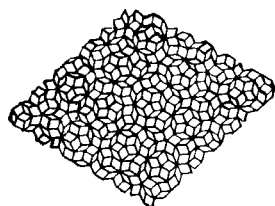
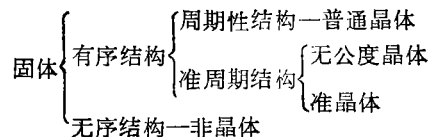


图 2 五次对称性的 Penrose 拼图

是牛津大学的数学物理学家潘罗斯在 1974 年首次提出的。在三维情形中,我们用一种与晶体中的单胞(四面体八面体、立方体等)不同的二十面体做单胞,这种二十面体有二十个面,

每个面都是等边三角形。因为这种二十面体具有五次旋转对称性,所以它不能做晶体中的单胞。可是把二十面体用 Penrose 的非周期铺砌方法排列起来,我们就得到了有准周期性并具有晶体中所不容许的五次对称性的三维体系,也就是准晶体。

根据准晶体的这些特征,我们把固体重新作如下分类:



二、准晶体的种类和结构

谢克曼等人最初在 Al-Mn 合金中发现的准晶体只是准晶体中的一种,称为 I 相。在 I 相发现后不久,在 Al-Mn 合金中又发现了十次对称准晶,称为 De 相,它是二维准晶体,在与十次对称平面垂直方向上,原子排列是有平移周期性的。后来又相继发现了十二次和八次准晶体。分类被称为 D₀ 相和 O 相。图 3 给出了这三种准晶体的电子衍射谱,此外还报道了一维方向上具有准周期性,而其它两个方向是周期排列的物质。

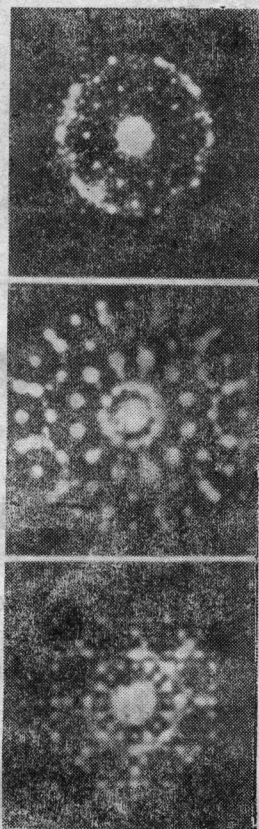


图3 De相、D₀相和O₁相准晶体的十次十二次和八次对称电子衍射谱

由这样的三十面体构成的准晶体称为菱形三十面体 I 相。与 Mackay 二十面体 I 相的原子填充方式不同。中心 O，棱心和顶点上由 Al 原子占据，而菱面体对角线上由 Mn 原子占据。这种顶点和棱心上都有原子占据的模型的 X 射线衍射峰与实验符合得很好。

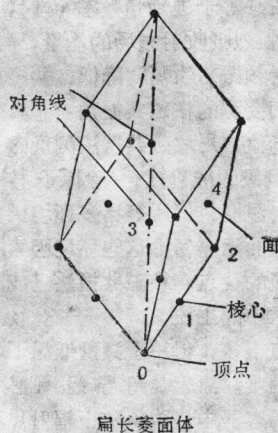


图4 构成二十面体和三十面体的扁长菱面体中原子排列的示意图

在上面提到的各种准晶体中，研究得最深入的是 I 相。现在已知在 I 相中又分为两种：一种是麦凯 (Mackay) 二十面体准晶；另一种是菱形三十面体准晶。

1. Mackay 二十面体 I 相

埃尔瑟和亨利指出这种 I 相是由二十面体原子团组成的。这种原子团由 54 个原子构成，称为 Mackay 二十面体原子团。这种原子团是由其顶点的二十个扁长菱面体组成。中心 O 没有原子占据。棱心由 Al 原子占据，顶点由 Mn 原子占据。菱面体的面上由 Al 原子占据。如图 4 所示。用它们给出的这一模型计算得到的衍射峰与实验结果极其符合。

2. 菱形三十面体 I 相

曾有人指出，在 I 相中构成三维 Penrose 格子的菱面体也能组成三十面体。模型的径向分布函数也与实验一致。

三、准晶体的物理性质

准晶体的这种特殊结构，在物质上会有什么体现？这是物理学家们极感兴趣的问题。在理论上和实验上都做过许多工作，遗憾的是不如结构研究方面那样有成效。

准晶体的力学性质的实验研究还仅仅是开始。要得到能作力学测

量的大块优质准晶材料是很困难的。在力学性质方面已开展的研究有：①关于准晶体的稳定性的研究；②关于弹性性质的研究；③关于准晶体塑性性质的研究等等。这些研究结果，除了发现准晶体很脆这一特点外，没有得到什么可以肯定的结果。这种脆性可用准晶体中位错运动相当慢，几乎不能引起塑性形变来解释。

在准晶体的磁学性质研究方面，对 I 相的研究较多。实验上发现了上面提到过的两种 I 相的磁化率与温度的关系是不同的。菱形三十面体 I 相的磁化率几乎不随温度变化，而 Mackay 二十面体 I 相的磁化率与温度是负的居里-外斯关系。除此之外，还用各种元素部分地替换准晶体中元素的方法来测量铁磁性和反铁磁性转移现象。至今为止还没有发现与准晶体结构有关的新现象。

在电学性质方面，测量了 I 相的电阻，霍尔效应和低温比热等。Mackay 二十面体 I 相的电阻与温度的关系是呈现非常大的阻抗 ($200\mu\Omega$ — $1000\mu\Omega$) 和负的温度系数。在菱形三十面体 I 相中，由于没有磁矩，它的电学性质的解释就很简单。作为这种类型的 I 相，Mg-Al-Zn 或 Mg-Al-Cu 等电阻率的绝对值在 $100\mu\Omega$ 以下，比上述的 Al-Mn 系中的更小。电阻与温度的关系也具有负的温度系数。但它和单一金属原子形成的一般非晶金属一样，可用普通非晶态理论来解释。

我们看到，作为几何学的概念的准晶体，特别是准晶格，在大体上已经明确了。关于准晶体的实际原子结构也正在建立。准晶体的发现及其概念建立的重要性，不仅仅是发现了一种稀有的结构，而是在于它具有晶体和非晶体的中间排列，使我们现在能够对非晶态到晶态的结构变化过程有了进一步的认识。

面向中学物理教学 竭诚为读者服务

《物理教师》杂志是中国教育学会物理教学研究会和苏州大学合办的中国教育学会物理教学研究会会刊，宗旨是面向中学物理教学，为中学物理教师服务。

《物理教师》辟有“教学改革研究”、“专题论析(专题介绍)”、“教材与教法”、“物理实验”、“问题讨论”、“教师进修园地”、“物理、技术、社会”、“物理学家和物理学史”、“课外活动”、“复习、竞赛、习题”等栏目。主要刊登各地物理教学改革的经验、教材教法、教材改革、物理学进展、介绍国外中学物理教材与教法、新物理实验、新教学仪器、自制教具学具、物理学(尤其是我国的)发展史等；还选登初中、高中物理测试题、问题争鸣等。欢迎您为本刊撰稿。

《物理教师》杂志为月刊，邮发代号：28—77，每期定价 1.00 元。欢迎到当地邮局订阅。《物理教师》编辑部可代办邮购，地址：江苏省苏州市十梓街 1 号(苏州大学内)，邮政编码：215006。