

高等学校教学参考书

固体的力学和 热学性质

洪 晶 编

人民教育出版社

湖南大学数学力学系

固体的力学和 热学性质

· · ·

湖南大学数学力学系

高等学校教学参考书



固体的力学和热学性质

洪 晶 编

人民教育出版社

本书是高等工业学校普通物理学课外读物之一。内容主要是从宏观现象出发讨论固体的力学和热学性质的主要规律，然后以晶体的微观结构进一步阐明这些现象和规律的物理本质，着重讲述基本概念，注意联系实际。

本书主要是供高等工业学校一二年级学生作为普通物理课程的课外读物。也可供教师或其他有关读者参考。

固体的力学和热学性质

洪 晶 编

人民教育出版社出版(北京沙滩后街)

人民教育出版社印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 13012·052 开本 787×1092 1/32 印张2 6/16

字数 51,000 印数 11201—61,200 定价(5)¥0.20

1964年11月第1版 1977年12月北京第3次印刷

一、固体 晶体和非晶体

§ 1. 固体 固体的两种类型

在通常条件下，物质有三种不同的存在形态：气体、液体和固体。凡是受外力作用时，形状和体积改变很小的物体叫做固体。组成固体的微粒可以是分子、原子或离子。一般说来，在固体中，相邻原子（或分子、离子）之间的距离比在液体或气体中的距离小，相互作用强。因此固体中原子的运动不如在液体或气体中自由，活动性较弱。例如固态铜的原子之间的自由空间约占总体积的 26%，熔成液态后，增长 3%，这说明原子间的距离加大了。

固体又可分成晶体和非晶体（又称无定形体）两大类。岩盐、冰洲石、明矾、金属等都是晶体。玻璃、松脂、沥青等是非晶体。

从微观结构来看，组成晶体的微粒（原子、分子或离子）有规则地、周期性地排列成一定的结晶格子，简称晶格。用伦琴射线的衍射实验可以研究晶格的结构。由于晶格粒子的分布有高度的规律性，晶体具有远程有序性，也就是说，在一定方向的直线上，粒子有规则地重复千百万次。非晶体中粒子的分布只具有近程有序性，就是说只有近邻的一些粒子形成有规则的结构。例如石英晶体（ SiO_2 ）中，氧原子在四面体的四个顶点上，硅原子在四面体的中心，这样的四面体有规则地堆积起来，形成具有远程有序性的晶体。图 1 (a) 是石英晶体的平

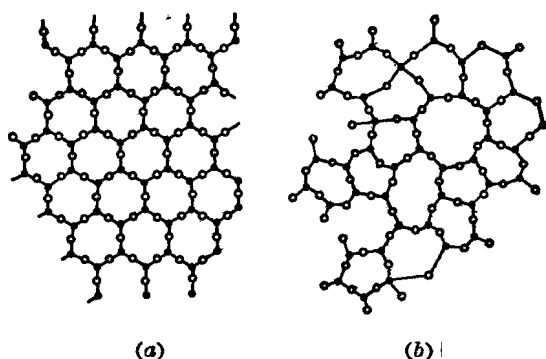


图 1

面示意图, 其中 $\circ$ 代表氧原子, $\bullet$ 代表硅原子。石英玻璃也是由二氧化硅 (SiO_2) 的四面体组成的, 但是堆积起来成为没有一定几何规律的外形 (图 1, b), 这就是非晶体近程有序性。

晶体具有下面的几个重要宏观性质: 晶体有一定的有规则的外形, 服从面角不变定律; 晶体的很多物理性质具有各向异性的特征; 晶体有确定的熔点。非晶体则不具有这些性质。晶体具有这些宏观性质正是由于晶体结构的远程有序性。晶体的原子排列是有规则的, 并构成重复性的结构, 因此很容易理解同一种晶体上对应晶面的夹角是恒定的; 沿不同方向晶体的原子排列可以有不同的周期性规律, 说明晶体应有各向异性的特征。关于晶体具有确定熔点的性质, 将在 § 3 中加以解释。

顺便在这里提一下, 液体的微观结构也有近程有序性。从这个观点来看, 非晶体的固态与液体是很相似的, 甚至是难以区分的。(有人认为, 严格说来, 只有晶体才能算是固体。) 在晶

体熔化的过程中，組成晶体的原子热运动加强了，原子在平衡位置附近的振动振幅加大了，热运动的影响使得有一些原子离开它們原有的活动范围，因而破坏了晶体的理想有序性，只有在最近邻的，或次一层近邻的原子范围内仍保持有序性，这就是近程有序性。因此，溫度在熔点时，晶体由固态轉变为液态，远程有序性消失，只剩下近程有序性。在这个轉变过程中，起着关键性作用的，是热运动。对于气态物质來說，热运动更成了重要的因素，气体中分子或原子的分布有理想的无序性。

还应该提到，有些晶体，整块体积中，沿各个方向的晶体结构的周期性完整地重复着，这种晶体叫做单晶体；另外有些晶体是由許多个体晶粒組成的，每个晶粒是一个单晶体，不同的晶粒有不同的形状和大小，并且在方向上也是任意排列的，这样的晶体叫做多晶体。譬如常見的金属材料就是多晶体，但可以用人工的方法培养成单晶体。金属材料的力学性质和晶粒的大小有密切联系。一般說来，晶粒大的富有韌性，但比較軟；晶粒小的則脆而硬。切削刀具要用晶粒小的金属材料，需延压的金属片要用晶粒大的金属材料。对金属进行热处理，可以改变晶粒的大小。

多晶体的物理性质几乎是各向同性的，个别晶粒虽然是各向异性，但由于晶粒的排列是杂乱的，宏观的表现就不显示各向异性了。

§ 2. 晶体的类型

晶体中的粒子(原子、分子或离子)形成一定的几何排列，

这是由于粒子之間存在着相互作用力。依靠相互作用力，粒子結合成晶体，这种力称为晶体的結合力。根据結合力性质的不同，一般可以把晶体分为四种类型。不同类型的晶体具有不同性质的結合，也就是說具有不同的鍵，結合力又叫做鍵力。

1. 离子晶体 离子晶体的晶格是由正負离子交替排列而

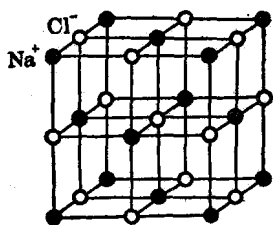


图 2

成的。例如岩盐是具有最簡單結構的离子晶体，由带正电的鈉离子 Na^+ 和带負电的氯离子 Cl^- 組成(图2)，每个离子都占据一个最小立方体的一角。不能把氯化鈉离子晶体中的一个 Na^+ 和一个 Cl^- 看成是一个 NaCl 的分子組合，

在整个晶体中， Na^+ 和 Cl^- 有整体的离子結合。

离子晶体中的結合力(即离子鍵力)主要是离子間的庫侖力。由于离子鍵的作用力大，离子晶体的特点是熔点高，揮发性低，可壓縮性小。

2. 原子晶体 原子晶体是由中性原子組成的。例如金剛石、碳化硅等，每个原子上的价电子不仅在一个原子周圍运动，属于一个原子，也有一部分時間在相邻原子周圍运动，成为相邻原子的共有价电子。相邻原子的自旋取向彼此相反的一对电子，在两个原子之間出現的机会較多，这两个电子对于两个原子核的庫侖引力使两个原子紧密相結合，这种結合称为共价鍵。共价鍵力的本质，只有根据量子力学才能解釋，共价鍵力是所謂“交換力”的一种表現。例如組成金剛石的碳

原子(图 3), 有四个是在四面体的四个頂角上(1, 2, 3, 4), 另外一个在四面体的中心(5)。頂角上的碳原子, 各有一个价电子和中心碳原子的四个价电子形成四对共价键。

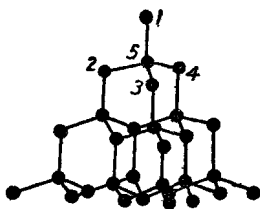


图 3

锗、硅、碲的晶体也是共价键的结合。原子晶体的结合牢固, 有很高的力学强度, 熔点高, 导电性低, 不易挥发。

3. 分子晶体 分子晶体是由分子组成的。每个分子自身内部的结合力很强, 但分子之间的结合力很弱。这种晶体分子之间的结合称分子键, 又称范德瓦耳斯键, 这种键力实质上是分子固有的电偶极矩或瞬时的电偶极矩之间的相互作用。简单的分子晶体有惰性气体的结晶、 NH_3 、 H_2 等, 复杂的分子晶体则有各种有机化合物的结晶。由于分子键力弱, 这种晶体的熔点低, 易于挥发。

4. 金属晶体 金属晶体的晶格是由金属元素正离子组成的。从原子中分离出来的价电子, 不是固定属于某个原子, 而是在正离子之间自由运动, 成为全体正离子所公有, 并在不同时刻属于不同的原子。可以认为金属是排列有序的正离子, 正离子的原子核外有填满壳层的电子, 整个浸没在自由价电子气体中。正离子就在这些运动的价电子中结合在一起, 这种晶体的结合称为金属键。金属晶体大多数很稳定, 硬度很大, 熔点很高, 导电性很强。

不少晶体分别属于上述四种类型之一, 但也有很多晶体同时具有一种以上混合形式键。例如石墨晶体, 每层中的碳

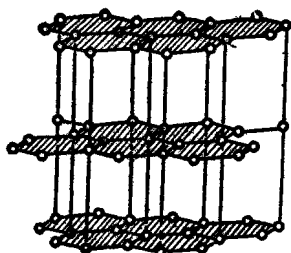


图 4

原子用它的四个价电子中的三个，和周围三个碳原子结成共价键，另一个价电子则以金属键的形式和邻层的原子相结合，这就是石墨具有导电性的原因(图4)。金刚石晶体(图3)是纯共价键的，所以没有导电性。

§ 3. 晶体结合的力和能

前面讨论了晶体的四种不同类型的结合。不同类型的晶体中，粒子之间的相互作用力的性质不同，力的起源也可能是相当复杂的。但不论是哪一种类型的结合力，都有相似的规律。组成晶体的粒子可以是原子、分子或离子，粒子(图5a中的 $A_1, A_2, A_3, \dots$)之间的相互作用力总可以看作是引力和斥力。晶体中的粒子，之所以能维持平衡态时的一定排列，正是由于在一定温度和压强的条件下，引力和斥力达成平衡。

实验和理论证明，如果把晶体中两个粒子之间的斥力看作是正的，引力看作是负的，随着两个粒子之间距离 r 的增加，斥力和引力 F 的变化情况如图5(b)中曲线1、2所示。从曲线可以看到，随着 r 的加大，斥力比引力减小得快，这一情况正与固体的不易压缩性相符合。当两个粒子之间的距离等于 r_0 时，引力和斥力相等，粒子处于不受力的状态， r_0 称为粒子的平衡距离。当粒子之间的距离比 r_0 小时(即晶体受到压缩)，斥力超过引力，合力随 r 的减小而迅速加大；当粒子之间的距离比 r_0 大时(即晶体受到拉伸)，引力超过斥力，合力的绝对值随 r 的加大而加大，合力达到最大值以后，随着 r 再

加大，又逐漸減為零。圖 5 (b) 中的曲線 3 即代表兩個粒子之間相互作用的合力隨 r 變化的情況。

把兩個粒子之間的相互作用，推廣到更多粒子之間的相互作用，力的變化仍有相似的規律。

下面簡單介紹一下，在不同類型的晶體中，粒子之間相互作用力的不同性質。在離子晶體中，正負離子之間的庫倫引力勝過同號離子之間的庫倫斥力，因而產生淨庫倫引力；而斥力則是每個離子中核外的封閉殼層電

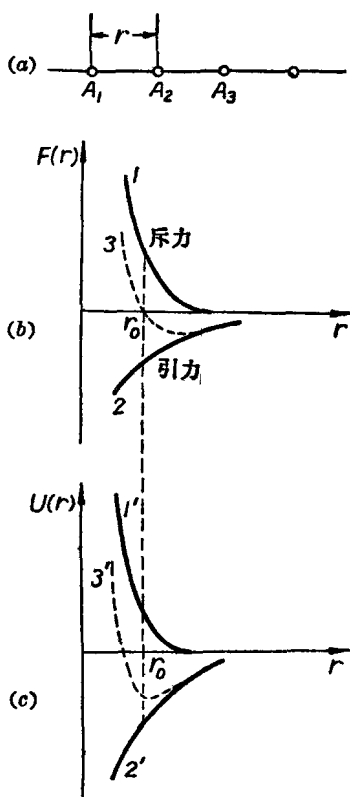


圖 5

有相反的自旋，引力就是共價鍵的电子對的相反自旋之間的“交換作用”；斥力則仍是電子之間的作用。在分子晶體中，由於分子中電子的運動形成分子電偶極子，引力就是電偶極矩之間的作用，又稱范德瓦耳斯力；斥力仍是電子之間的作用。在金屬晶體中，結合力包括金屬正離子與電子之間的庫倫引力，正離子之間和電子之間的庫倫斥力；但是金屬原子的價電子是在未填滿的殼層

中,不同原子的价电子軌道可以相互交叠而不产生斥力;另一方面,电子自旋之間的交换作用也产生引力。

晶体中粒子之間的相互作用力,既然有各种不同的性质,每种力随粒子間距离的具体变化規律当然不同,但作用力 $F(r)$ 随 r 的变化曲綫都和图 5(b) 中的曲綫 3 有相似的形状。如果用 $U(r)$ 代表晶体中粒子之間的相互作用位能,各种晶体的 $U(r)$ 随 r 的变化曲綫都和图 5(c) 的曲綫 3' 有相似的形状。图中 1' 代表粒子間相互作用的斥力位能曲綫, 2' 代表粒子間相互作用的引力位能曲綫, 3' 則是总的位能曲綫。图中設一对粒子相互距离为无穷远时, 相互作用位能为零。这里所說的无穷远, 約为几百埃(1 埃 = 10^{-8} 厘米)。当粒子相互移近时, 引力起主要作用, 引力作了正功, 位能应减小; 由于粒子相距无穷远时位能为零, 粒子相互接近时的位能应为負值。当粒子非常接近时, 斥力起主要作用, 外力作正功才能使粒子相互接近, 位能增加; 粒子足够接近时, 位能由負值轉变为正值并很快加大。当 $r=r_0$ 时, 粒子处于平衡位置, 位能最低。無論是固态晶体、固态非晶体或液体, 粒子除具有相互作用位能外, 还具有热运动的能量, 即粒子在平衡位置附近作不規則的振动。在很长的時間內, 固态晶体粒子的平衡位置可以保持不变, 这种情况, 我們說是粒子的“定居”寿命长; 固态非晶体和液体粒子的“定居”寿命則較短。

至于晶体粒子之間位能曲綫的具体数学方程, 可以离子晶体为例, 离子晶体位能的半經驗公式为:

$$U(r) = -\frac{C_1}{r} + \frac{C_2}{r^n}.$$

等式右边第一項代表庫倫引力位能, 第二項代表斥力位能, 式

中 $n=9$ ，說明斥力位能隨 r 的減小很快地加大，表示離子晶體不易被壓縮。

從能量的觀點看來，晶體的粒子所以作有規則的排列，正是因為作有規則排列時的能量低於無規則排列時的能量。例如有些玻璃，本來是非晶體，時間放久了，會發生表面發毛的現象，就是因為玻璃中的分子能逐漸調整它們的相互位置，進入能量較低的結晶狀態。

可以用圖 1 來說明為什麼有規則結構的石英晶體有一定的熔點，無規則結構的石英玻璃則在一段連續升高的溫度範圍內進行熔化。石英晶體的微觀結構完全相同，圖 1a 中的六角環是表明這種結構的平面示意圖，各環完全相同，破壞一個環需要的熱運動能量是一定的，因此溫度加到一定數值時，熱運動達到一定程度，一個環能夠被破壞，其它的環也能够在同一溫度下被破壞，這溫度就是熔點。所以石英晶體有一定的熔點。石英玻璃的微觀結構不完全相同(圖 1b)，各環大小不等，形狀不同，破壞每一個環需要不同的熱運動能量，那麼當溫度升高到一定數值時，某些環上原子的熱運動能量超過結合能，這些環的結構被破壞；另一些環需要在更高的溫度下才能被破壞，因此石英玻璃在溫度升高的過程中，逐漸軟化，沒有一定的熔點。

由上面的簡單分析可以看出，熔點的高低或熔解熱的大小是晶體結合強弱的標志之一，前述四種類型晶體的熔點的差別正是鍵力不同的表現。

關於晶體結合的詳細理論，必須用量子力學的处理方法，這裡就不多談。

二、固体弹性的宏观现象和规律

在实际工程中要用到各种固体材料，对这些材料的性质有不同的要求。材料的力学性质是重要性质之一。工程上常用的固体材料多半是多晶体或无定形体。材料的宏观性质决定于微观本质，因此人们既要掌握有关多晶材料性质的宏观规律，也应对单晶材料进行微观结构的研究。

弹性和范性是固体的两个重要的力学性质，我们将在这一部分讨论弹性的宏观现象、基本规律和有关参量。

§ 1. 形变 应力和应变

当固体受到外力作用时，发生形状和大小的变化，我们说这固体发生了形变，这样的固体就不叫刚体（实际上自然界中不存在绝对的刚体）。如果固体在发生形变时，处于运动状态，问题就比较复杂，下面只讨论固体在静力作用下的形变，并且只讨论处于平衡状态下的形变。

在机械工程中，常要知道机器零件在受到拉伸、压缩、或其它更复杂的作用力时，产生的形变情况。有时把特种油漆涂在零件上，根据油漆层上裂纹的出现，可以观察零件受拉伸的形变，从而可以考虑如何选择适用的材料，以及如何改进零件的结构设计。所以研究各种不同材料在受力情况下产生形变的规律是有重要意义的。

比较简单的情况是研究单向的拉伸和压缩。图 6 中有一

长为 l ，均匀截面积为 A 的棒，上端固定在架上，下端加重物 P 。棒受到拉伸的作用力后，由原长 l 伸长到 $l + \Delta l$ 。描写形变程度的不应该是伸长的数值 Δl ，而应该是伸长的相对值 $\frac{\Delta l}{l}$ ，我們称这个相对伸长量为应变 ϵ 。产生一定应变时，棒愈粗，所需的拉力也愈大，所以应该用单位截面积上受力的大小

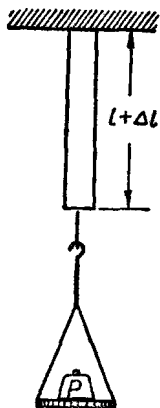


图 6

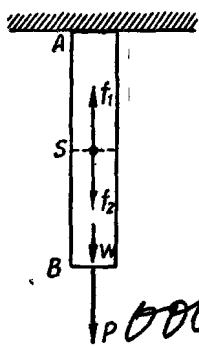


图 7

$\frac{P}{A}$ 来描述受力的强度。在棒内，设想任一横截面 S (图 7)，将棒 AB 分成两部分。先考虑 SB 段，除外力 P 及重力 W 外，还有 AS 段对 SB 段作用的力 f_1 ；为了维持 SB 的平衡态， $f_1 = P + W$ 。同时 SB 段必然以大小相等而方向相反的力 f_2 作用于 AS 。 f_1, f_2 就是在截面 S 相邻两部分之间相互作用的一对内力，我們称 $\frac{f_1}{A}$ 或 $\frac{f_2}{A}$ 为 S 面上的应力，用 σ 表示。显然靠近棒上端的截面上应力大于靠近棒下端的截面上的应力。如果棒本身的重量和外力相比很小，并可以忽略时，棒的任何截

面上的应力都相同,并等于 $\frac{P}{A}$,我們說棒有均匀的应力。下面将只討論有均匀应力的情况。

为了求得固体拉伸形变的規律,可以对材料样品进行实验;改变应力 σ ,测量应变 ϵ 。图8表示由实验获得的曲线。关于曲线的說明,后面将詳加討論。

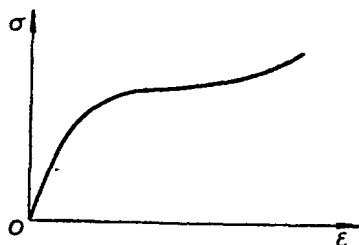


图 8

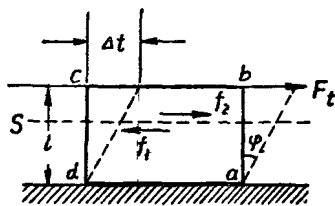


图 9

切变是固体的另一种常见的形变。当矩形六面体(图9, $abcd$ 是一截面)的下表面固定,上表面受到平行于表面的切力 F_t 的作用时,上下表面沿力的方向相对移动一段距离 Δt 。如果形变是均匀的,物体內每一条平行于 ab 的直线,都和 ab 一样,偏轉某角度 φ ,而整个六面体的体积維持不变。这类形变称为切变。設想 S 为平行于上下表面的一个截面,把物体分成上下两部分,为了維持 S 上的部分平衡,并且考虑到上下两部分之間的作用力是相互的,在 S 面上存在一对平行于 F_t 而且大小等于 F_t 的内力 f_1, f_2 ; 如果用 A 表示物体被 S 所截的面积, $\frac{f_1}{A}$ 或 $\frac{f_2}{A}$ 就称为切变应力,在任一截面上的应力都一样,并且都等于 $\frac{F_t}{A}$ 。 $\frac{\Delta t}{l}$ 称为切应变。 φ 称为切变角。当 φ 很

小时, $\frac{\Delta t}{l} = \tan \varphi \approx \varphi$, 可知切变角 φ 表示切应变。

还有一种常见的形变, 是扭转。例如电动机的轴, 飞机推进器的轴等, 都要受到扭转形变。如果在圆杆的两端施加方向相反的转矩 M_1 和 M_2 (图 10), 把杆设想成由许多等厚薄圆板组成, 圆板垂直杆轴。转矩作用的结果, 使上端圆板相对于下端圆板绕杆轴转过一个角度。图 11 中 a, b 代表杆上相邻的二圆板, AB 为当杆未受转矩时, 平行于杆轴的一段母线; 当杆受到转矩后, a, b 相对转过的角度为 φ , 相当于切变角。同时 AB 线伸长, 成为 $A'B$ 。 AB 线选取得距轴愈远, 伸长也愈甚, 这是和纯切变不同的地方。

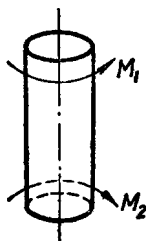


图 10

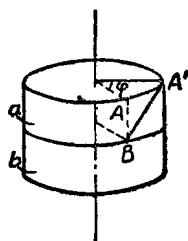


图 11

弯曲又是另一种形变。图 12(a) 中 CB 代表截面为长方形的板条, C 端固定, B 端加力 P , 板条受力矩 M 的作用, 发生弯

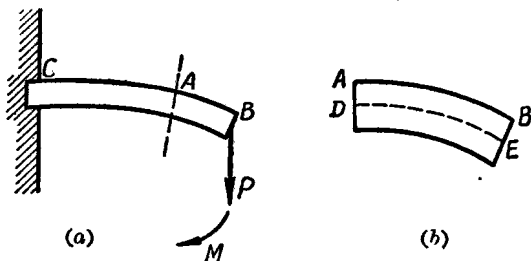


图 12