

工 程 材 料

· 郑 明 新 主 编

中央广播电视大学出版社

工 程 材 料

郑 明 新 主 编

中央广播电视大学出版社出版
新华书店北京发行所发行

一二〇二印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张22.25 千字475
1986年8月第1版 1986年5月第1次印刷

印数 1—60,000

书号15300·28 定价3.70元

目 录

第一章 概论.....	(1)
第一节 材料科学的发展与工程材料.....	(1)
第二节 物质的状态.....	(3)
第三节 固体中的结合键.....	(7)
第四节 工程材料的分类.....	(10)
第二章 金属的结构.....	(14)
第一节 金属的特性.....	(14)
第二节 金属的晶体结构.....	(15)
第三节 实际金属中的晶体缺陷.....	(23)
第四节 金属中的扩散.....	(28)
第三章 金属的结晶.....	(31)
第一节 金属结晶的概念.....	(31)
第二节 金属的结晶过程.....	(33)
第三节 晶粒大小.....	(37)
第四节 铸锭的结构.....	(38)
第四章 材料的机械性能.....	(41)
第一节 静载时材料的机械性能.....	(41)
第二节 动载时材料的机械性能.....	(46)
第三节 变载时材料的机械性能.....	(48)
第四节 断裂韧性.....	(49)
第五章 金属的塑性变形和再结晶.....	(51)
第一节 金属的塑性变形.....	(51)
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响.....	(58)
第三节 变形金属在加热时组织和性能的变化.....	(62)
第四节 金属的热加工.....	(67)
第六章 二元合金.....	(69)
第一节 合金中的相.....	(69)
第二节 二元合金相图.....	(73)
第三节 匀晶相图.....	(74)
第四节 共晶相图.....	(77)
第五节 包晶相图.....	(82)
第六节 其它相图.....	(83)
第七节 合金的性能与相图的关系.....	(83)
第七章 铁碳合金.....	(85)
第一节 铁碳相图(介稳定系)中的组元和相.....	(85)

第二节	铁碳合金的平衡结晶过程和组织	(90)
第三节	铁碳相图的成分·组织·性能规律	(99)
第四节	铁碳相图的应用和局限性	(101)
第五节	碳钢	(105)
第八章	钢的热处理	(111)
第一节	钢的奥氏体化	(112)
第二节	过冷奥氏体的转变	(116)
第三节	钢的淬火	(126)
第四节	钢的回火	(129)
第五节	退火与正火	(133)
第六节	钢的淬透性	(137)
第七节	钢的表面淬火	(142)
第八节	钢的化学热处理	(144)
第九章	合金钢	(151)
第一节	概论	(151)
第二节	合金元素在钢中的作用	(152)
第三节	合金结构钢	(160)
第四节	合金工具钢	(174)
第五节	特殊性能钢	(184)
第十章	铸 铁	(192)
第一节	概论	(192)
第二节	常用铸铁	(198)
第十一章	有色金属及其合金	(214)
第一节	铝及铝合金	(214)
第二节	铜及铜合金	(222)
第三节	轴承合金	(228)
第十二章	高分子材料	(235)
第一节	高分子材料概述	(235)
第二节	高聚物的结构	(245)
第三节	高聚物的物理、力学状态	(251)
第四节	高聚物的基本性能及特点	(254)
第五节	常用塑料	(262)
第十三章	陶瓷材料	(275)
第一节	陶瓷材料概述	(273)
第二节	陶瓷的组织与结构	(275)
第三节	陶瓷的性能	(283)
第四节	常用陶瓷材料	(287)
第十四章	复合材料	(294)
第一节	复合材料概述	(294)
第二节	复合材料的增强机制及复合原则	(297)
第三节	复合材料性能的特点	(301)

第四节	常用复合材料	(303)
第十五章	机器零件的失效与选材	(309)
第一节	零件的失效	(309)
第二节	选材的一般原则	(313)
第三节	不同失效形式的选材分析	(320)
第四节	典型零件的选材	(330)
附录		(345)

第一章 概 论

第一节 材料科学的发展与工程材料

材料就是人类用来制作各种产品的物质,是先于人类产生的,为人类生产和生活的物质基础。人类社会的发展史表明,生产中使用的材料的性质直接反映人类社会的文明水平。所以,历史学家根据制造生产工具的材料,将人类生活的时代划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。当今,人类正跨进人工合成材料的新时代。

大约二、三百万年前人类最先使用的工具是石头。由古猿到原始人的漫长进化过程中,石器一直是人类使用的主要的工具之一。当时,制造石器的原料大都为燧石和石英石。因为这些石头坚硬,能纵裂成薄片,崩解为锋刃,容易加工,而且到处都有,资源丰富。约五十万年前人类学会了用火。在六、七千年以前的原始社会末期,我们的祖先开始用火烧制陶器。新石器时代的仰韶文化和龙山文化时期,制陶技术已经发展到能在氧化性窑中 950°C 温度下烧制红陶;在还原性炉气中 1050°C 温度下烧制薄胎黑陶与白陶。三千多年前的殷、周时期发明了釉陶,炉窑温度提高到 1200°C 。到东汉出现了瓷器,并于九世纪传至非洲东部和阿拉伯世界,十三世纪传到日本,十五世纪传至欧洲。瓷器成为中国文化的象征,对世界文明产生了很大的影响。

制陶技术的发展为炼铜准备了必要的条件。我国青铜的冶炼在夏(公元前2140~1711年)以前就开始了,虽然晚于古埃及和西亚,但发展较快,到殷、西周时期已发展到较高的水平,普遍用于制造各种工具、食器、兵器。从河南安阳晚商遗址出土的司母戊鼎重达875kg,外形尺寸为 $133\times 78\times 110\text{cm}$,是迄今世界上最古老的大型青铜器。从湖北江陵楚墓中发掘出的两把越王勾践的宝剑,长55.6cm,至今仍锋利异常,是我国古青铜器的杰作。在湖北大冶发现的春秋晚期的铜矿井遗址深达50m,炼铜炉渣有40多万吨,实属罕见。从湖北隋县出土的战国青铜编钟是我国古代文化艺术高度发达的见证。春秋战国时期《周礼·考工记》中关于青铜“六齐”的科学论述,反映我们的祖先已经认识到了青铜的性能与成分之间的关系。他们在青铜材料的冶炼和应用方面达到了当时世界的高峰,创造了灿烂的青铜文化。

由青铜器过渡到铁器是生产工具的重大发展。我国从春秋战国时期(公元前770~221年)开始大量使用铁器。从兴隆战国铁器遗址中发掘出了浇铸农具用的铁模,说明冶铸技术已由泥砂造型水平进入铁模铸造的高级阶段。到了西汉时期,炼铁技术又有了很大的提高,采用

煤作炼铁的燃料，要比欧洲早一千七百多年。在河南巩县汉代冶铁遗址中，发掘出20多座冶铁炉和锻炉。炉型庞大，结构复杂，并有鼓风装置和铸造坑。可见当年生产规模之壮观。我国古代创造了三种炼钢方法。第一种是从矿石中直接炼出自然钢。用这种钢作的剑在东方各国享有盛誉，东汉时传入了欧洲；第二种是西汉时期的经过“百次”冶炼锻打的百炼钢；第三种是南北朝时期生产的灌钢。先炼铁后炼钢的两步炼钢技术我国要比其它国家早一千六百多年。从西汉到明朝的一千五、六百年间，我国钢铁生产技术远远超过了世界各国。相应地，其它金属材料的工艺技术也都有高度的发展，留下了大量的珍贵文物和文献。

在材料领域中还应该提到的是丝绸。丝绸是一种天然高分子材料，它在我国有着悠久的历史，于十一世纪传到波斯、阿拉伯、埃及，并于1470年传到意大利的威尼斯，进入欧洲。

历史充分说明，我们勤劳智慧的祖先，在材料的创造和使用上有过辉煌的成就，为人类文明作出了巨大的贡献。

铁器在公元一千多年以前在亚洲的大地上出现以后，逐渐在文明古国的巴比伦、埃及和希腊也得到了广泛的应用。经过许多世纪的发展，西欧和俄国后来居上，创造了不少冶炼技艺，使以钢铁为代表的材料生产和应用跨进一个新的阶段。但是，由于材料的问题太复杂，直到十七世纪的科学革命和十八、十九世纪的工业革命时期，人们对材料的认识仍是非理性的，还主要停留在工匠、艺人的经验技术的水平上。

十八世纪以后，由于工业迅速发展，对材料特别是钢铁的需求急剧增长。因此，为适应这一需要，在化学、物理、材料力学等学科的基础上，产生了一门新的科学——金属学。它明确地提出了金属的外在性能决定于内部结构的概念，并以研究它们之间的关系为自己的主要任务。一百多年来，由于显微镜、X射线技术、电子显微镜等新仪器和新技术的相继涌现和发展，金属学得到了长足的进步。

进入二十世纪以来，现代科学技术和生产飞跃发展。材料、能源与信息作为现代技术的三大支柱，其发展格外迅猛。在材料中非金属的发展尤其神速，而以人工合成高分子材料的发展最快。从六十年代到七十年代，有机合成材料每年以14%的速度增长，而金属材料的年增长率仅为4%。到七十年代中期，全世界的有机合成材料和钢的产量的体积已经相等，除了作为结构材料代替钢铁外，目前，正在研究和发展具有良好导电性能和耐高温的有机合成材料。另外，陶瓷材料除了具有一些特殊的性能（例如可作光导纤维，激光晶体等）外，它的脆性和抗热震性能正在逐步获得改善，可望作为高温结构材料使用。所以工程结构已不再只使用金属材料了。近20多年来，金属与非金属相互渗透，并且相互结合，组成了一个完整的材料体系。材料科学也就在金属学、高分子科学和陶瓷学等的基础上很快地发展起来了。其任务也是揭示材料的成分、结构和性能之间的关系，但研究对象却是一切固体材料。

材料的性能包括使用性能和工艺性能两方面。使用性能是材料在使用条件下表现出的性能，具体如力学（或机械）性能、物理性能和化学性能等；工艺性能则是材料在加工过程中表

现出的性能，如切削加工性能、铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能等。工程材料(学)是材料科学的实用部分，重点阐述结构材料的成分、组织、性能以及应用方面的一般规律。结构材料是指工程上要求强度、韧性、塑性等机械性能的材料，主要用来制作工程结构件和零件。那些要求具有电、光、声、磁、热等功能和效应的材料为功能材料，一般不在工程材料(学)中讨论。工程材料(学)的具体任务是为工程结构和机器零件的设计和使用提供正确选材和合理用材的基本原则、方法和知识，同时也为某些机械设计、制造和工艺专业学科提供必要的理论基础。

第二节 物质的状态

世界上的一切物质都是由一百多种元素组成的(图1-1)。纯元素的物质不多，元素多以复合的形式存在，构成各种固体、液体和气体。

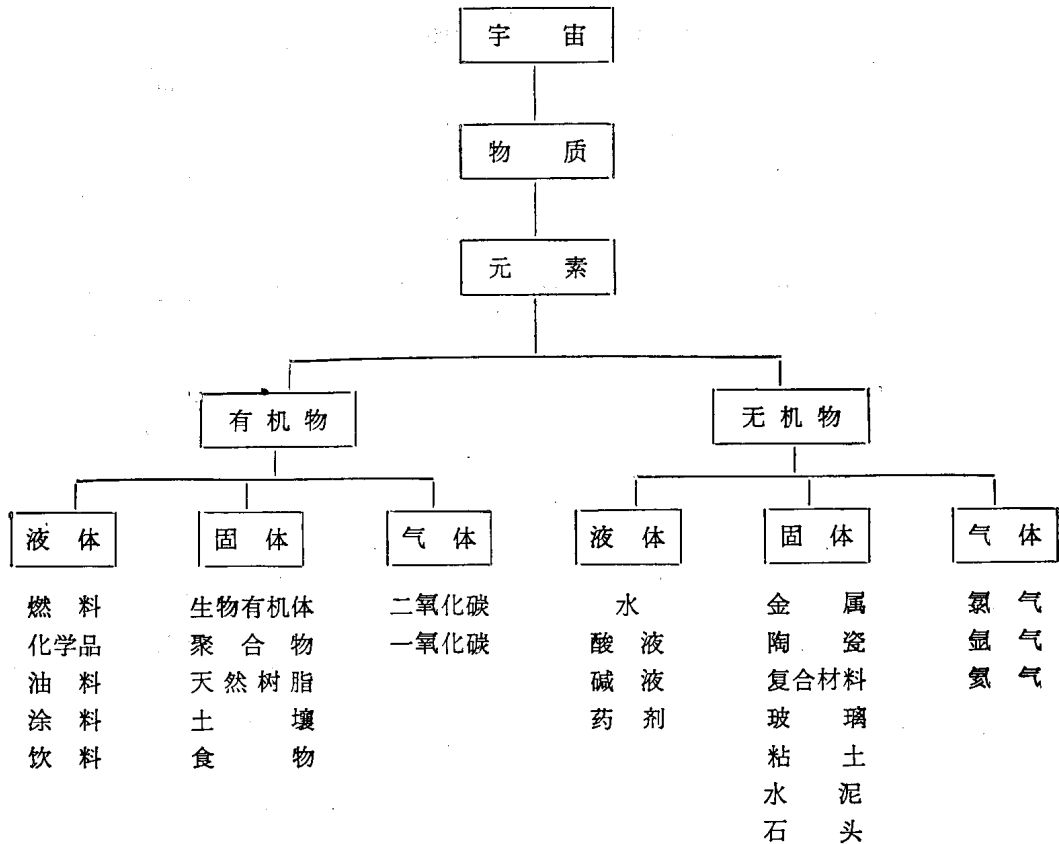


图1-1 元素是组成各种物质的基础

在我们所处的太阳系的范畴内，元素的原子皆以电子-原子核的形式组成。作为物质体系的基本构成单元的原子或分子等粒子，在组成具体物质时，彼此之间要产生相互作用力，因

而存在相互作用的势能。其本身也处在不停的热运动之中,因此,具有动能。粒子之间相互作用的势能使彼此受到约束,相互吸引,从而结合在一起。吸引力的大小与相互间的距离有关。距离越近,吸引力越大,则结合得越紧;相反粒子的热运动使粒子间约束削弱。温度是影响运动的主要因素。温度越高,粒子运动越剧烈,则吸引力越小,彼此分离的趋势越大。

所以,物质的状态取决于原子或分子之间的相互作用和它们的热运动。随温度和压力等外界条件的不同,物质处于不同的状态。在一定的条件下物质处于气体状态,这是一种最简单的粒子体系。气体的每个粒子具有完全确定的动能,其值远远超过粒子间相互作用的势能,所以气体的粒子在一定的程度上是彼此独立的。粒子间相距较远,各自混乱飞动,不存在结合力。一个粒子受激发,整个体系的运动不会受到显著的影响。

当温度降低时,粒子的无规则运动变慢,它们之间的相互作用显著增强。在较低的温度和压力条件下,物质由气体状态过渡为聚合状态。这时粒子的动能小于粒子间相互作用的势能,粒子间的结合力变得较强。一个粒子被激发,将引起相邻粒子的类似激发而引起波动。

在聚集状态下,当粒子间的吸引力能够保持粒子承受热冲击而不分散开,但不足以保证粒子在较长距离内呈有序排列时,物质将处于液体状态。在某种意义上讲,液体象是高度压缩了的气体,然而其中的粒子在熔点和沸点之间存在局部有序排列,即一个粒子与其近邻的空间关系在任何瞬间是有规则的,但却随时间不断变化。粒子的激烈运动足以阻止长程有序的形成。

当粒子间相互作用的势能比粒子的动能大得多的时候,物质处于固体状态。按粒子排列的特点,固体可以分为无定形体和晶体两大类。无定形体又叫做非晶体,实际上是一种过冷的液体。例如玻璃和塑料,其中粒子(原子或分子)的排列短程有序。此类物质没有固定的熔点,但这一般不影响其工程性能。大多数固体是晶体。晶体是最简单的聚合体,它的原子或分子在三维空间作有规则的周期性重复排列,绵延的距离大大超过原子或分子的尺寸,贯穿整个体积,即具有长程有序。工程上最广泛应用的材料多为晶体。此外,在某些特殊的情况下,聚合体也可以是介于晶体和液体之间的液态晶体(即液晶)。它的特点是:在一定温度范围内既具有液体的流动性和连续性,同时又保留晶体的有序排列。这类物质是一种新型材料,有着重要的工程价值。

晶体中的原子、离子或分子为什么能够结合成规则排列的稳定晶体呢?这是电子-原子核形式的原子之间发生相互作用的结果。当两个原子接近,它们之间发生相互作用时,原子核不发生变化,只是原子的外层电子重新排布。这种相互作用本质上是静电作用,包括吸引和排斥作用。吸引力产生于异性电荷之间的库伦引力,是一种长程力,就是说在比原子间距大得多的距离处,即开始起作用。这种引力随原子间距的缩小,成指数关系增大(吸引力为负值,图1-2(a)中曲线 $f_{\text{吸}}$);排斥力产生于同性电荷之间的库伦斥力和原子相互接近时轨道电子的电子云相互重叠所引起的斥力,它们都属于短程力,即只有原子的距离接近原子间距

时，才有显著的作用。随着原子间距离进一步缩小，斥力迅速增大，增大的速度大于引力（排斥力为正值，图1-2(a)中曲线 $f_{斥}$ ）。原子间总的相互作用力 $f_{总}$ ，即吸引力 $f_{吸}$ 与排斥力 $f_{斥}$ 两者的合力，随距离的变化如图1-2(a)中曲线 $f_{总}$ 所示。

曲线 $f_{总}$ 交横轴于A。A点的合力为零，即原子间的距离为 a_0 时，吸引力与排斥力平衡，此时原子间相互作用的势能最低（图1-2(b)）。距离小于 a_0 时，斥力大于引力，总的作用力为斥力；距离大于 a_0 时，引力大于斥力，总的作用力为引力。所以，欲将相距为 a_0 的原子压近或拉远，都要相互地对斥力或引力做功，并造成能量的提高。这种情况也适于有大量原子的聚集体。因此，聚集体只有当其原子相距为平衡距离，作规则排列，形成晶体，对应于最低能量分布时，才处于稳定的状态。图1-3示原子在晶体中的势能的变化。图1-2(b)中平衡位置A所对应的最低势能 E_0 为晶体的原子之结合能，相当于把原子完全拆散所需要的功，是影响物质状态，决定晶体结构和性能最本质的因素。

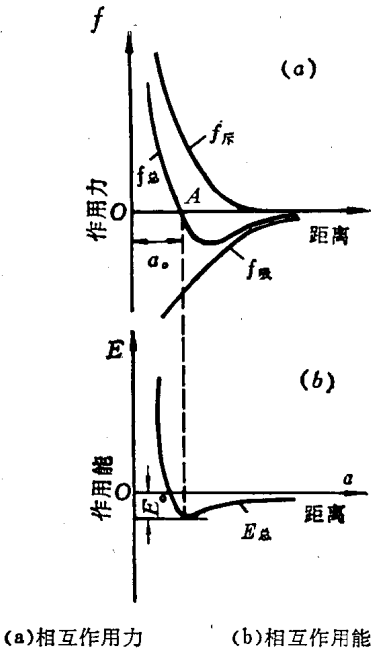


图1-2 原子间的相互作用

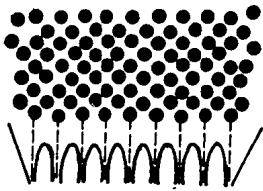


图1-3 晶体中原子势能的变化

各种元素的结合能见表1-1。表中的数据表示从0(K)的固体中分离出中性原子所需要的能量，是根据热力学和光谱学的数据求得的。由表中可知，惰性气体的结合最弱，碱金属的结合为中等强度，过渡族金属具有极强的结合，共价键结合的碳也具有极强的结合。此外，离子晶体也具有极强的结合（但这在元素表中无法表达出来）。

元素的结合能(KJ/mol), 即从0(K)固体中分离出中性原子所需的能量, 括号中数值代表室温或熔点
(当熔点低于室温)时得到的数据

表1-1

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VI	VII	IB	II	IIIA	IV	V	VA	VIA	VIIA	0		
H																	
Li 159	Be 322																
Na 109	Mg 148																
K 91	Ca 177	Sc 380	Ti 470	V 512	Cr 396	Mn 288	Fe 415	Co 424	Ni 429	Cu 339	Zn 130	Ga 269	Ge 374	As 289	Se 206	Br (118)	Kr 11.2
Rb 83	Sr (164)	Y 424	Zr 608	Nb 721	Mo 659	Te 640	Ru 640	Rh 556	Pd 380	Ag 286	Cd 112	In 248	Sn 302	Sb 260	Te 193	I (107)	Xe (15)
Cs 80	Ba (179)	La 434	Hf 612	Ta 782	W 839	Re 784	Os (784)	Ir 670	Pt 566	Au 366	Hg (67)	Tl 181	Pb 197	Bi 208	Po (145)	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

稀有土或鐳系元素

系鋼元素

Ce 461	Pr 373	Nd 324	Pm	Sm 204	Eu 174	Gd 400	Tb 394	Dy 298	Ho 294	Er 323	Tm 248	Yb 151	Lu (428)
Th 573	Pa 528	U 523	Np 440	Pu 386	Am 252	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

↑ 惰性气体

← 共价键金属 → ← 非共价键金属 →

← 过渡族金属 →

← 难熔金属 → ← 贵金属 →

← 金属键 →

稀土或镧系元素

系锕元素

← 共价键金属 → 非共价键金属 →
↑ 惰性气体

← 难熔金属 → 贵金属
← 金属键

过渡族金属

难熔金属

贵金属

第三节 固体中的结合键

在固体状态下，当原子（离子或分子）聚集为晶体时，原子（离子或分子）之间产生较强的相互作用，这种相互作用就是晶体的结合力，也叫做结合键。晶体的结合能也就是晶体的键能。由于电子运动使原子产生聚集的结合力为化学键。固体中的结合键主要是化学键，其大小与原子的结构有关。不同类型的原子之间，具有不同性质的结合键。固体中的结合键可以分为离子键、共价键和金属键三种化学键，以及分子键和氢键等物理键。相应地，固体也分为离子晶体、共价晶体、金属晶体、分子晶体和氢键晶体等。

一、离子键和离子晶体

当周期表（见表1-1）中相隔较远的一正电性元素原子和一负电性元素原子接触时，前者失去最外层价电子变成带正电荷的正离子，后者获得电子变成带负电荷的满壳层负离子。正离子和负离子由于静电引力相互吸引；当它们充分接近时会产生排斥，引力和斥力相等即形成稳定的离子键。离子键要求正负离子相间排列，而且要使异号离子之间的引力最大，同号离子之间的斥力最小。

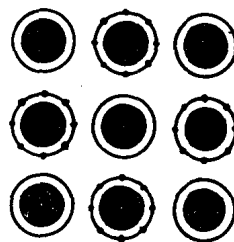


图1-4 氯化钠晶体示意图（离子键）

氯化钠晶体是典型的靠离子键结合的离子晶体（图1-4）。钠原子有一个价电子处于稳定的八个电子所组成的壳层以外；氯原子有七个价电子，需要一个电子以形成八个电子的稳定壳层。钠原子失去一个电子成为带正电荷的 Na^+ ，氯离子获得一个电子成为带负电荷的 Cl^- 。这两种离子依靠静电引力相互吸引，直至引力被斥力所平衡形成离子化合物。

一个 Na^+ 可以和几个 Cl^- 结合；一个 Cl^- 也可以和几个 Na^+ 结合，周围的 Cl^- 或 Na^+ 的数目和排列则取决于所形成晶体的排列方式。钠离子和氯离子交错分布，整个晶体呈电中性。可将整个晶体看作一个大分子，所以离子键没有饱和性；同时，离子的电荷分布呈球形对称，从各个方向都可以吸引电荷相反的离子，因而离子键没有方向性。

离子键的结合力很大，所以，离子晶体的硬度高，强度大，热膨胀系数小，但脆性大。例如 MgO 、 Al_2O_3 和钢中的某些非金属夹杂等的性能即如此。离子键中很难产生可以自由运动的电子，所以离子晶体都是良好的绝缘体。在离子键结合中由于离子的外层电子比较牢固地束缚在离子的外围，可见光的能量一般不足以使其外层电子激发，因而不吸收可见光，所以典型的离子晶体往往是无色透明的。可见，离子晶体的性能在很大程度上取决于离子的性质及其排列方式。

二、共价键和共价晶体(原子晶体)

处在周期表中间位置的一些具有三、四、五个价电子的元素,距表中惰性元素的距离相当,获得和丢失电子的能力相近,原子既可能获得电子变为负离子,也可能丢失电子变为正离子。当这些元素原子之间或与周期表中位置相近的元素原子形成分子或晶体时,由共用价电子形成稳定的电子满壳层的方式结合。被共用的价电子同时属于两相邻的原子,使它们的最外层均为电子满壳层。价电子主要在这两个相邻原子核之间运动,形成一负电荷较集中的地区,因而对带正电荷的原子核产生吸引力,将它们结合起来。这种由共用价电子对产生的化学键叫做共价键。由共价键形成的晶体为共价晶体。共价晶体中的粒子为中性原子,所以也叫做原子晶体。

具体代表性的共价晶体为金刚石,其结构如图1-5所示。金刚石是由碳原子组成的,每个碳原子贡献出四个价电子与周围的四个碳原子共有,形成四个共价键,构成正四面体结构:一个碳原子在中心,与它共价的另外四个碳原子在四个顶角上。硅、锗、锡等元素也是共价晶体。属于共价晶体的还有 SiC 、 Si_3N_4 、 BN 等化合物。有些元素,如砷、硒、砷、锑、铋等的原子之间,存在有近似的共价结合。 H_2 、 N_2 、 O_2 、 Cl_2 等单质分子和 HCl 、 H_2O 、 NH_3 等化合物也是靠共价键结合。

一般,两个相邻原子只能共用一对电子。故一个原子的共价键数,即与它共价结合的原子数,最多只能等于 $8-N$, N 表示这个原子最外层的电子数。所以共价键具有明显的饱和性。另外,在共价晶体中,原子以一定的角度相邻接,各键之间有确定的方位,因此共价键有着强烈的方向性。

共价键的结合力很大,所以共价晶体具有强度高,硬度大,脆性大,熔点高,沸点高和挥发性低等性质,结构也比较稳定。由于相邻原子所共有的电子不能自由运动,共价晶体的导电性较差。

三、金属键和金属晶体

周期表中左边的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ族元素均在满壳层外有一个或几个价电子。满壳层在带正电荷的原子核和价电子之间起屏蔽作用,原子核对外面轨道上的价电子吸引力不大,所以原子很容易丢失其价电子而成为正离子。当大量这样的原子相互接近并聚集为固体时,其中大部或全部原子都会丢失其价电子。同离子键或共价键不一样,这里被丢失的价电子将不为某个或某两个原子所专有或共有,而是为全体原子所公有。这些公有化的电子叫做自由电子,它们在正离子之间自由运动,形成所谓电子气。正离子则沉浸在电子气中。在理想情况下,当价电子从原子上脱落形成对称的正离子时,其电子云的分布呈球对称。由于这种对称性,正离子在三维空间或电子气中呈高度对称的规则分布。正离子和电子气之间产生强烈的静电吸引力,使全部离子结合起来,这种结合力就叫做金属键。由金属键结合起来的晶体为金属晶体。图1-6示典型金属钠的结构。

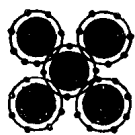


图1-5 金刚石晶体示意图（共价键）

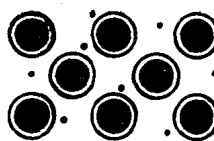


图1-6 金属钠晶体示意图（金属键）

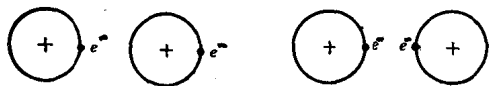
在金属晶体中，价电子弥漫在整个体积内，所有的金属离子皆处于相同的环境之中，全部离子（或原子）均可被看作是具有一定体积的圆球，所以金属键无所谓饱和性和方向性。

四、分子键（范特瓦尔斯力）和分子晶体

原子状态已经形成稳定电子壳层的惰性气体元素在低温下可结合为固体，ⅦB族元素的双原子分子也能结合成晶体。在它们结合的过程中，没有电子的得失、共有或公有化，原子或分子之间的结合力是很弱的范特瓦尔斯引力。这种存在于中性原子或分子之间的结合力叫做分子键，本质上是一种物理键。因为在离子键、共价键和金属键等化学键中，原子的价电子分布同孤立原子的很不相同，而在形成分子键时，价电子的分布则几乎没有变化。

范特瓦尔斯力实际上是一种分子偶极之间的作用力。分子有极性分子和非极性分子两大类。通常说非极性分子没有偶极，是指平均情况。平均而言，电子云分布所产生的负电荷中心与原子核所具有的正电荷中心是重合的。但实际上在每一瞬时，分子（或原子）上电子云分布的密度是不均匀的，正负电荷中心并不重合。而是分子一端带负电，另一端带正电，出现分子的极化现象，形成瞬时偶极。偶极与偶极之间能相互作用。图1-7(a)为两个偶极相互吸引的瞬时状态；(b)为两个偶极相互排斥的状态。许多非极性分子彼此靠近时，形成瞬时偶极之间的电引力就是范特瓦尔斯力。在有极性分子存在的情况下，范特瓦尔斯力为非极性分子间的瞬时偶极、极性分子间的永久偶极、以及非极性分子受极性分子影响而产生的诱导偶极等之间的作用力的总和。

依靠范特瓦尔斯力结合起来的晶体为分子晶体。固态氢的晶体如图1-8所示。大部分有机化合物的晶体，溴和碘的晶体，以及 CO_2 、 SO_2 、 HCl 、 H_2 、 N_2 、 O_2 等在低温下形成的晶体都是分子晶体。分子键没有方向性和饱和性。晶体结构主要取决于几何因素，并趋向于紧密排列。



(a)偶极相互吸引

(b)偶极相互排斥

图1-7 分子间的瞬时偶极

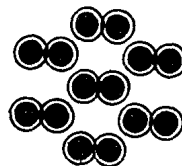


图1-8 固态氢晶体示意图（分子键）

由于范特瓦尔斯引力很弱，所以分子晶体的结合力很小。分子晶体熔点很低，硬度也很低。这种引力也可以存在于其它化学键晶体中，但可以被忽略不计。

五、氢键及氢键晶体

在含氢的物质中，特别是含氢的聚合物中，经常可以见到由于氢离子(质子)的尺寸小所引起的键。一般，一个中性氢原子只和一个另外的原子形成一 共价键。但是，在一定的条件下，一个氢原子可以同时与两个电子亲合能大的、半径较小的原子(F、O、N等)相结合，这种结合力即为氢键。

氢键的产生主要是由于，氢原子与某一原子形成共价键时，共有电子向这个原子强烈偏移，使氢原子几乎变成一半径很小的带正电荷的核，因而这个氢原子还可以和另一个原子相吸引，形成附加的键。所以氢键是一种较强的、有方向性的范特瓦尔斯键。它属于特殊类型的物理键，比范特瓦尔斯键强得多，但比离子键、共价键等要小得多。氢键在许多情况下起很重要的作用。

图1-9表示甲酸二聚分子(HCOOH)₂的结构。H原子同时与两个O原子结合，但与一个O原子结合较强，用O-H表示，键长为1.04 Å；与另一个O原子结合较弱，用H...O表示，键长为1.63 Å。当一个氢原子同时与A和B原子相结合，且与A结合较强，与B结合较弱时，其氢键可用符号A-H...B表示。有时氢键专指H...B的结合。一般认为在氢键A-H...B中，A-H基本上是共价键，而H...B则是一种较强的范特瓦尔斯键。

由氢键结合起来的晶体为氢键晶体。冰的晶体(见图1-10)、磷酸二氢钾晶体等就是靠氢键结合起来的。

从氢键的例子可以看出，大多数晶体并不单一由前述四种基本类型键(离子键、共价键、金属和分子键)结合，往往是几种键的混合结合。如果以四种典型键为顶点作成四面体(图1-11)，则实际晶体的结合键将位于四面体的体内、面上或棱上。

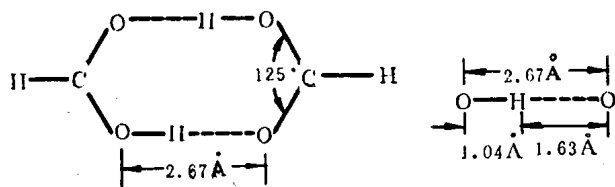


图1-9 甲酸二聚分子的结构

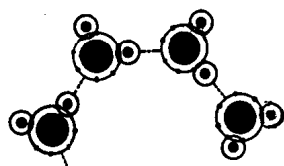


图1-10 冰晶体示意图(氢键)

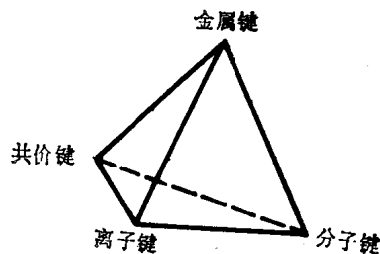


图1-11 结合键四面体

第四节 工程材料的分类

工程材料有各种不同的分类方法。比较科学的是主要根据材料的本性或其结合键的性质

进行分类。一般都将工程材料分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料等四大类。

一、金属材料

金属材料是最重要的工程材料，包括金属和以金属为基的合金。最简单的金属材料是纯金属。周期表（表1-1）中的金属元素分简单金属与过渡族金属两种。凡是内电子壳层完全填满或完全空着的元素，均属于简单金属；内电子壳层未完全填满的元素属于过渡金属。简单金属的结合键完全为金属键，过渡金属的结合键为金属键和共价键的混合，但以金属键为主。所以以金属主体的工程金属材料，其原子间的结合键基本上为金属键，是金属晶体材料。

工业上把金属和其合金分为两大部分。

1. 黑色金属——铁和以铁为基的合金（钢、铸铁和铁合金）；
2. 有色金属——黑色金属以外的所有金属及其合金。

应用最广的是黑色金属。以铁为基的合金材料占整个结构材料和工具材料的90%以上。黑色金属的工程性能比较优越，价格也比较便宜。

按照性能的特点，有色金属又可分为：轻金属、易熔金属、难熔金属、贵金属、铀金属、稀土金属和碱土金属（见图1-12）。

二、陶瓷材料

陶瓷是人类应用最早的固体材料。陶瓷坚硬，稳定，可以制造工具、用具，在一些特殊情况下也可用作结构材料。

陶瓷材料是一种或多种金属同一种非金属元素（通常为氧）的化合物，其中较大的氧原子为陶瓷的基质，较小的金属（或半金属如硅）原子处于氧原子之间的空隙里。氧原子同金属原子化合时形成很强的离子键，同时存在有一定成分的共价键，但离子键是主要的。例如MgO晶体中，离子键占84%，共价键为16%。也有一些特殊陶瓷，是以共价键为主的。陶瓷的硬度很高，但脆性很大。

陶瓷材料属于无机非金属材料。无机非金属材料是指不含碳氢氧结合的化合物，主要是金属氧化物和金属非氧化合物。由于大部分无机非金属材料含有硅和其它元素的化合物，所以又通称为硅酸盐材料，一般包括无机玻璃（硅酸盐玻璃）、玻璃陶瓷（或称微晶玻璃）和陶瓷等三类。作为结构和工具材料，工程上应用最广的是陶瓷。

按照成分和用途，工业陶瓷材料可分为：

1. 普通陶瓷（或传统陶瓷）——主要为硅、铝氧化物的硅酸盐材料；
2. 特种陶瓷（或新型陶瓷）——主要为纯氧化物、碳化物、氮化物、硅化物等的烧结材料；
3. 金属陶瓷——主要指用陶瓷生产方法制造的金属与碳化物或其它化合物组成的粉末

冶金材料。

三、高分子材料

高分子材料主要指有机合成材料。它具有较高的强度，良好的塑性，强的耐腐蚀性，高的绝缘性，密度小等优良性能，在工程上是发展最快的一类新型结构材料。

3 Li	碱土金属		4 Be	轻金属		39 Y	稀土金属		
11 Na			12 Mg	13 Al	57 La				
19 K	20 Ca	21 Sc				58—71 镧系			
37 Rb	38 Sr			22 Ti	23 V	24 Cr	难熔金属		
55 Cs	56 Ba			40 Zr	41 Nb	42 Mo			43 Tc
87 Fr	88 Ra			72 Hf	73 Ta	74 W			75 Re
89 Ac	铀金属		25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	铁族金属		
90—103 镧系									
贵金属			29 Cu				易熔金属		
44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As		
76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb		
				80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi		

图1-12 周期表中金属元素的分类

高分子材料又称聚合物，是由许多分子量特别大的大分子组成的。每个大分子由大量结构相同的单元（链节）相互连接构成。有机物质都含有碳元素（通常还含有氢）作为其主要的结构组成。在大部分情况下，碳元素构成大分子的主链。大分子内的原子之间由很强的化