



在改革开放的探索和实践过程中,我国确立的社会主义市场经济正在稳健有序地运行着。今天,市场经济已影响到人们生活的各个方面,以至没有人能离开市场而独立生活,也没有哪个企业能离开市场而开展经营活动。竞争是市场经济的基本特性,市场竞争所形成的优胜劣汰,会有力地推动市场经济的运行,迫使企业去改进生产技术,更新设备,提高产品(本书所说的“产品”,是指对原材料进行加工、制作或对零部件进行装配而获得的成品)质量等。没有高质量的产品,企业就将失去用户,失去市场。为了赢得市场竞争的胜利,企业必须坚持产品质量第一的原则。

优质的机电产品在力学性能、物理性能、使用性能、安全性能、耐用性能及经济合理性等方面一定要达到国家相关标准的要求。实现这些性能要求的关键是什么呢?无数事实告诉我们,首先取决于所选用材料的质量。倘若一个具有原创性设计的产品忽略了制造材料的选择,那么就难以完美地展现出其创造性了。具体到实际工作中,产品的设计者经常会遇到选材的问题,小到剃须刀片的选材,大到汽车、火车、轮船、飞机、桥梁以至宇宙飞船、深海潜艇的选材……这些表明,作为一名工程技术人员,必须具备材料科学的基本知识。

什么是材料呢?材料是人类赖以生存与发展的、征服及改造自然的物质基础。人们利用它可以制造各种有用的器件。在人类社会漫长的进化过程中,材料一直被认为是社会生产力发展的标志,每一种新材料的发现和应用都把人类改造自然的能力提高到一个新的水平,把人类文明带进一个新的阶段。

在远古时代,人类采用石头、树木、兽骨等制造生产工具和生活用具,过着刀耕火种的生活。六千多年前的原始社会末期,我们的祖先学会了用火烧制陶器,并在商周时期发明了釉陶,此后便发展为东汉时期的青瓷。瓷器的出现打通了东西方文化交流的渠道,促进了人类文明的交流。

在烧制陶器的过程中,人类又发明了冶铜术。我国的冶铜术开始于公元前 2140 年,到了商周时期,青铜已普遍用来制作工具与祭器,如晚商遗址(河南安阳)出土的斚(音 qiāng,古代的一种斧子)、铲、犁、铤(音 bēn),以及重达 875 kg、外形尺寸为 110 cm(长)×78 cm(宽)×113 cm(高)、四周刻有精美花纹的青铜器司母戊鼎,尤其是从湖北随州出土的战国青铜编钟以及 1998 年在南京东郊发掘的六朝(东吴、东晋、宋、齐、梁、陈,公元 229—589 年)古墓群中的金器、银器、玉器、陶器与瓷器,都充分显

示了当时人类与自然界作斗争的能力和生产、文化成就。

冶铜术的发展,不仅促进了奴隶社会向封建社会的过渡,也为炼铁提供了必要的条件。我国是世界上最早进行生铁冶炼的国家。据文史资料记载,早在春秋战国时期,我国就广泛采用了铁制器具,不仅有镰、铲、锹,还有斧、锯、钻等。考古发现的河南南阳冶铁遗址(一个大型的铸造作坊,其面积达 $120,000 \text{ m}^2$,残留熔炉 17 座,其间还有不少铁质工具),足以显示当时的生产规模和技术水平。在炼铁的过程中,我国古代劳动人民还创造出多种炼钢的方法。自隋朝以后,钢铁用量明显增大,这进一步推动了冶铸技术的发展,从而使我国古人最早掌握了先炼铁、后炼钢的冶金技术。这对晚于我国 1600 多年后才起步的欧洲各国的钢铁生产有着极深远的影响。对此,明代宋应星在他所著的《天工开物》一书有详细论述。由上所述可以看出,在材料制造与使用方面,我国劳动人民谱写了光辉的篇章,为人类社会文明的发展作出了巨大的贡献。

进入 18 世纪后,钢铁生产得到了大步的提升,成为产业革命的重要内容与物质基础。到了 20 世纪,近代工业与冶金技术取得了很大的进步,钢铁材料的产量在世界范围内有了大幅度的增长,且品种规格繁多。与此同时,研究材料的方法也在不断深化,从 1863 年采用光学显微镜研究材料开始,相继出现了 1921 年的 X 射线晶体衍射技术,1932 年的电子显微镜分析技术以及后来的使用电子探针、离子探针、俄歇电子谱仪等现代仪器的测试技术。人们对材料及材料科学的全新认识,有力地促进了对新材料的探索与研制。

自 20 世纪 50 年代开始,高分子材料、先进陶瓷材料及复合材料的开发与应用十分活跃;尼龙、聚甲醛、聚酯、聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯等新型的工程塑料相继问世;在陶瓷材料方面,开始了从传统陶瓷生产迈向现代陶瓷,如氧化铝系列的切削工具陶瓷、氮化硅系列的结构陶瓷以及氧化锆增韧陶瓷等的开发,并形成产业化的新趋势;以玻璃钢为代表的一系列复合材料也应运而生。20 世纪 80 年代中期,随着高新技术的涌现,上述材料的研发又有了新的突破,出现了光导高分子材料、生物医用高分子材料、液晶显示高分子材料、光电子高分子材料等,出现了压电陶瓷、导电陶瓷、热敏陶瓷、生物陶瓷、金属基复合陶瓷及隐身吸波材料等。除此之外,还有一些与信息、能源产业息息相关的材料,如激光材料、光纤材料、磁记录薄膜材料(计算机硬盘一般是在铝合金基体上先镀一层非晶态的 Ni-P 膜,在其上再镀几十纳米厚的磁性膜,磁性膜外面还需镀一层几十微米的类金刚石保护膜)、太阳能电池材料、汽车燃料电池材料、纳米材料等等。其中纳米材料是进入 21 世纪后特别受人关注的新材料。

纳米材料是指选用尺寸为 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 范围内的超细微粒原材料制备而成的,内部晶粒、晶界、第二相等显微构造均小于 100 nm 尺寸水平的材料。这种材料的超细显微结构在一般显微镜下是无法看见的,只能用高放大倍数、高分辨率的电子显微镜来观察。纳米材料又分为纳米粉粒、纳米丝、纳米管、纳米薄膜、纳米固体和纳米复合材料等不同的类型。研究表明,纳米微粒是大块物质到单个原子间的过渡形态,物质

处于这种特殊的状态将会呈现出许多奇异的性质,即它的光学、热学、电学、磁学、力学以及化学方面的性质和传统固体材料相比有着显著的不同。例如,传统固态金属具有不同颜色的光泽,这表明它们对可见光范围波长的反射和吸收能力不同,但当大块金属显微结构的尺寸减小到纳米级时,它会失去原有的颜色,几乎都呈黑色,这意味着对光的反射能力消失了。此外,纳米微粒与由它构成的纳米固体还有着传统固体材料不具备的一些效应。

第一,小尺寸效应。固态物质在其形态为大尺寸时,其熔点是固定的,在成为纳米微粒后其熔点显著降低。例如,金的常规熔点为 $1064\text{ }^{\circ}\text{C}$,当其微粒尺寸减小到 2 nm 左右时,其熔点为 $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。粒子尺寸的减小,使得自由电子减少,正离子与电子的相互作用减弱,金属键受到一定程度的破坏,从而导致金的熔点降低。另外,纳米微粒与大块材料的磁性也显著不同,如纳米金属铁(微粒尺寸为 8 nm)在室温时的饱和磁化强度仅为 $22 \times 10^3\text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,比起大块多晶 $\alpha\text{-Fe}$ 的 $38 \times 10^3\text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 小了约 40% 。

第二,表面与界面效应。纳米微粒尺寸小,比表面积大,且位于表面的原子数与体内的原子数之比随微粒的尺寸变小会迅速增大。例如,微粒尺寸为 10 nm 时,比表面积为 $90\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;微粒尺寸为 5 nm 时,比表面积为 $180\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;微粒尺寸小到 2 nm 时,比表面积会增加到 $450\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。由于表面原子的环境与内部原子的不同,通常出现大量的悬挂键与点阵畸变,故纳米微粒的活性大大增强了,其吸附作用也大大增强了,很容易与其他原子结合。例如,金属纳米粒子在空气中会燃烧,无机材料纳米粒子暴露在大气中会吸附气体,并与气体进行反应。

第三,量子尺寸效应。实验发现,同一种材料的半导体,随着纳米微粒尺寸的减小,发光的颜色从红色到绿色再到蓝色,即发光带的波长由 690 nm 移向 480 nm 。这种随颗粒尺寸减小而发生光的蓝移的现象被认为是量子效应所引起的。一般来说,导致纳米微粒的磁、光、声、热、电及超导性与宏观特性显著不同的效应称为量子尺寸效应。这一效应对微电子与光电子器件的制备带来深远的影响。

从 20 世纪末至今,人们对纳米粉的加工、纳米吸波、纳米催化、纳米除污、纳米医药、纳米电子、纳米传感、纳米陶瓷及其塑性的改性等多个应用领域中的问题已进行了广泛的研究,并取得了不少实验室成果。与此同时,科技工作者已开始将实验室成果转化为规模生产的产品。有文献表明,国际上已有多个纳米公司可以经营纳米粉及其生产线;中国科学院纳米材料研究组已成功地制备出蜂窝状氧化锰纳米粒子和有序多孔氧化硅纳米球,利用它们可将家具、涂料、烟雾中的甲醛分解为二氧化碳和水,从而改善人们的居住环境。此外,用纳米铁粒子作为显影剂发现早期癌变,添加纳米 Al_2O_3 来提高 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 纳米复相陶瓷的抗弯强度,采用纳米材料对污水进行深度处理等等,纳米材料的应用已现端倪。

现代材料的品种繁多,世界各国已注册的材料达数十万种。在浩瀚的材料世界中,那些用来制作工程构件、机械装备、机械零件、工具及模具的材料归属于工程材

料,工程上要求它具有较高的强度、硬度和较好的韧性、塑性等;而那些要求具有光、声、电、磁、热等功能和效应的材料则称为功能材料。工程材料中又包含着金属材料、高分子材料、陶瓷材料以及由它们组成的复合材料,其中传统的钢铁、非铁金属材料一直是用量最大、使用范围最广的工程材料。仅就机械工业来说,在各种机床、汽车、农业机械、矿山机械、冶金设备、发电设备、石油化工设备、交通运输设备以及军用器械等所用的材料中,金属材料占90%以上。这是因为金属材料具有其他材料不可能完全取代的独特性能,如金属有比高分子材料高得多的弹性模量,有比陶瓷材料好得多的韧性、磁性和导电性。

需要指出的是,我国及各工业发达国家当今还在不断开发新的金属材料,如高比强度与高比模量的铝锂合金、有序金属间化合物及机械合金化合金、氧化物弥散强化合金等高温结构材料,这些材料已经分别在航空航天、能源、机电等领域获得了应用,并产生了很大的技术经济效益。国际社会公认,人类已进入“材料变革”的新时代。毋庸置疑,如果没有相应水平的材料科学研究成果与材料制造技术的支持,我国的空间发射与回收技术也不可能取得今天这样卓越的成就。

综上所述可知,21世纪是知识经济推动下的科技创新的世纪,需要更多具有专业素质的人才。“材料科学”课程正是一门培养机械类及近机械类专业素质人才的技术基础课,本书就是一本为配合该课程的学习而编写的教材。

通过《工程材料及应用》一书的学习,希望达到以下目的:

① 能让机械类与近机械类各专业的学生懂得材料科学的内涵,获得工程材料的有关理论和知识;

② 初步认识材料的化学成分、组织结构、加工工艺、性能特点、改性方式之间的关系;

③ 掌握常用工程材料的类别、基本特性、应用范围及质量鉴别的常用方法;

④ 懂得材料的性能与工程设计的关系,能合理地选用材料、正确地制订材料机械加工与热处理程序,设计出既经久耐用又成本低廉的优质创新产品,应对当今知识经济时代带给我们的种种挑战。



材料的原子结合方式及性能

材料是制作有用器件的物质。作为物质体系的基本单元——原子、离子或分子等粒子,在构成物质的具体状态时,彼此之间会发生作用,存在着相互作用力(包含引力与斥力),并产生相互作用的势能;又由于粒子本身永不停息的热运动,还产生相应的动能。粒子间的相互引力越大,粒子彼此就结合得越紧密;粒子的热运动越剧烈,粒子彼此分离的趋势就越大。物质的状态取决于粒子间的相互作用和它们的热运动。在一定的温度、压力等外界条件下,物质若处于气态,则表明粒子的动能大大超过粒子的势能;当温度和压力降低,粒子的热运动变慢,间距变小,其动能小于相互间作用的势能时,物质就会由气态过渡到凝聚态。这时,如果粒子间的引力不能保证粒子在较长距离内呈有序排列,但还能保证粒子承受热冲击而不分开,物质便呈液态;当粒子间的距离变得很近,相互作用的势能比粒子的动能大得多的时候,物质便呈固态。工程上常用的材料一般都是固态物质。

本章主要讲述固态物质中的原子结合方式及所导致的材料性能特点。

1.1 固态物质的原子结合键

1.1.1 晶体与非晶体

固态物质按其原子(或离子、分子)聚集的组态,可分为晶体和非晶体两大类。晶体中的原子可在三维空间呈有规则的周期性重复排列,即不论沿晶体的哪个方向看去,总是隔一定的距离就出现相同的原子,且规则排列的范围大大超过原子尺度,贯穿整个晶体,这种排列方式称为长(远)程有序。非晶体中的原子只能在几个原子尺度的小范围内呈有规则的排列,这种排列方式称为短(近)程有序。自然界的金刚石、结晶盐、水晶等都是晶体,而玻璃、松香、橡胶等都是非晶体。晶体从固态加热熔化时有固定的熔点,从液态冷却凝固时发生体积突变;而非晶体既没有固定的熔点,又没有体积的突变。研究表明,晶体和非晶体在一定的条件下可以互相转化。如通常是晶体的金属,若将它从液态通过急冷(冷却速度约 $10^6\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),便可使其具有类似玻璃的某些非晶态特征,所以非晶态的金属也有人称为“玻璃态金属”;而非晶态的玻璃经高温长时间加热又可形成晶体玻璃。需要指出的是,广泛使用的工程材料多为晶体物质。

1.1.2 原子间的结合能

晶体中的原子作长程有序的规则排列,与其原子间的相互作用有关。当两个原子接近时,原子核不发生变化,但是原子的外层电子会重新排布,或是失去电子(电离能低者),或是吸收电子(电负性高者),于是引起相互间的静电作用,产生引力与斥力。根据库仑定律,引力和斥力都随原子间距的增大而减小,而且前者作用的距离范围比后者大得多,这是因为斥力的大小除了与库仑力有关之外,还与电子云的重叠有关。当两原子相距较远时,斥力很小,只能在引力的作用下相互靠近;当两原子靠近至电子云互相重叠时,斥力会增大到大于引力,于是原子互相排斥而相互背离。在两原子间力和距离不断变化的过程中,还同时伴随着原子间相互作用势能的变化。图

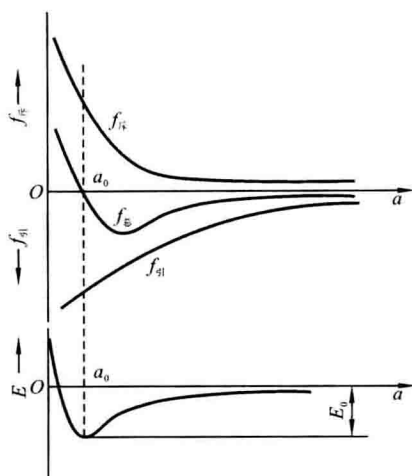


图 1-1 原子间的相互作用力和能量变化

1-1 表示了两原子间的作用力及能量随原子间距变化而变化的情形。当两原子间距 a 无限大时,它们之间的作用力 $f_{\text{总}}$ 近似为零,其相互作用势能 E 可视为参考值(设 $E=0$)。当 a 为某一值 a_0 (a_0 称为平衡距离)时,引力 $f_{\text{引}}$ 与斥力 $f_{\text{斥}}$ 平衡, $f_{\text{总}}$ 也为零。当两原子由距离无限远逐步靠近 ($a > a_0$) 时, $f_{\text{引}}$ 起主导作用,由于 $f_{\text{引}}$ 的绝对值较大,故 $f_{\text{总}} < 0$, 且 E 降低;当两原子进一步靠近到 a 接近于 a_0 时, $f_{\text{斥}}$ 起主导作用,在 $a < a_0$ 时, $f_{\text{斥}} > f_{\text{引}}$, 故 $f_{\text{总}} > 0$, 且 E 迅速增高。只有在 $a = a_0$ 时, $f_{\text{总}} = 0$, E 具有最低势能 E_0 (E_0 即原子间的结合能)。综上所述,要将相距为平衡距离的两原子拉开或靠近都需要做功,并引起能量的增大。

上述两个原子的结合情况表明,对于大量原子聚合的固态物质,只有当其原子间距为平衡距离,并呈规则排列的晶体,才处于最低势能状态,这时是最稳定的。在晶体中,把相邻原子间强烈的相互作用并形成稳定的结合称为结合键,结合键的实质则是它们间的结合力。热力学的观点认为,结合键的强弱是以键能的大小来衡量的,且晶体的结合键能就等于原子间的结合能,即把 1 mol 的固体分解为自由原子所需的能量 ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)。原子的结合能愈大,结合键能也愈大,则原子的结合愈稳定。不同类型的原子之间产生不同类型的结合键,故其结合键能的大小也不相同。

1.1.3 原子结合键的类型

1. 金属键

金属原子最外层价电子少且电离能小。当它们相互结合时,在相邻原子核电场的作用下,原子很容易失去外层电子而变成外层为 8 个电子的正离子,所有离开原子

的价电子则形成围绕金属正离子穿梭运动的自由电子,如图 1-2a 所示。这时,价电子不再与某一特定的正离子相互吸引,而是为全部正离子所共有,形成所谓的电子气。正离子与电子气之间所产生的静电引力,使所有的离子结合在一起,这种结合就是金属键。由于维持离子在一起的电子并不固定在一定的位置上,所以金属键是无方向性的。当金属发生弯曲等变形时,金属键的方向也随之改变,金属原子便改变它们彼此之间的位置关系,但并不使键破坏,如图 1-2b 所示,因此,金属键使金属晶体具有良好的塑性。在外电压作用下,电子气中的价电子会发生运动,从而使金属晶体具有良好的导电性。正离子在热的作用下,振动加剧并传递热量,故金属晶体还有良好的导热性。

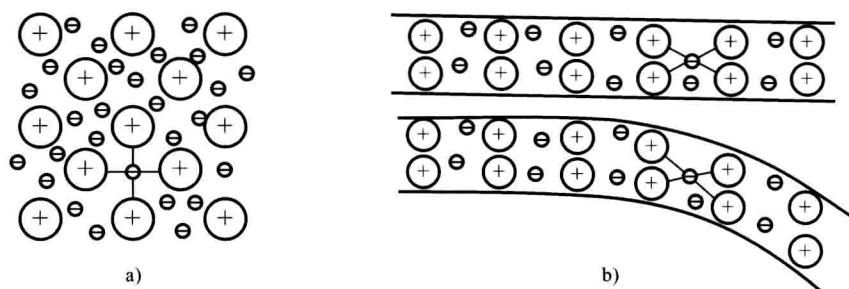


图 1-2 金属键

a) 金属原子正常堆积时的金属键及其电子气 b) 金属变形时的金属键(方向变化而未破坏)

2. 共价键

处在周期表ⅣA、ⅤA族的元素具有四个或五个价电子,它们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。当同种原子或性质相差不大的原子相互结合时,由它们共同占有的部分价电子使其最外层处于电子满壳层状态。由于价电子主要在这两个相邻原子核之间运动,于是形成一个负电荷较集中的地区,从而对带正电荷的原子核产生引力,将它们结合起来。这种结合称为共价键。以Si为例,一个4价的Si原子(见图 1-3a),与四个在它周围的Si原子共享最外层的电子,从而使每个Si原子最外层获得满壳层的八个电子,如图 1-3b所示。每一对共有电子代表一个共价键,所以一个Si原子有四个共价键分别与四个邻近的Si原子结合。为了形成Si的共价键,Si原子排列必须堆集成四面体,即四个Si原子构成一个四面体,另有一个Si原子处在四面体的中心,如图 1-4所示。可见,表征Si原子相互结合的共价键之间形成一定的角度(109°),称之为键角。这表明共价键彼此之间有固定的方向关系。

由于共价键本身很强,而且键与键之间有固定的方向关系,所以当具有共价键的晶体发生弯曲时,不能像具有金属键的原子那样彼此位置跟随发生改变,而是其键必受到破坏。以共价键结合为主的陶瓷材料有硬而脆、塑性差的特点,受力时要么不变形,要么材料破断,其导电性能也很差。

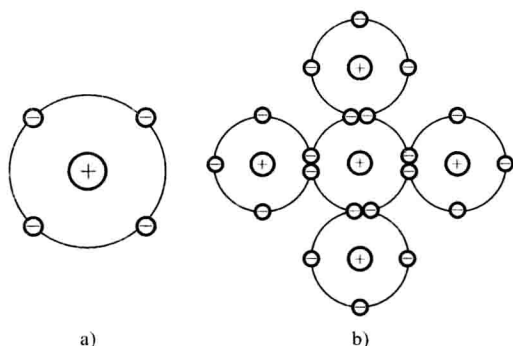


图 1-3 Si 的共价键

a) Si 原子 b) Si 的四个共价键

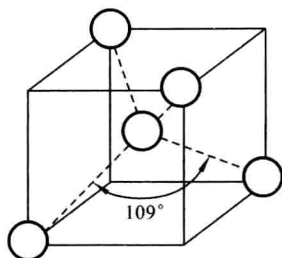


图 1-4 Si 的四面体和键角

3. 离子键

当一种材料有 A、B 两种原子时,如 A 原子将它的价电子贡献给 B 原子,A 原子外层电子在空出后具有满壳层电子数,B 原子外层电子亦被填满,则 A 变为正离子,B 变为负离子。正、负离子通过静电引力结合在一起,这种结合称为离子键。在图 1-5 中,Na 的外层电子贡献给 Cl,Na 变为带正电的离子,其内层电子数为 8,是满壳层电子数;Cl 接受一个电子,变为带负电的离子,其外层电子数为 8,也是满壳层电子数,于是一个 Na 原子和一个 Cl 原子在正负离子间的静电引力下结合在一起。

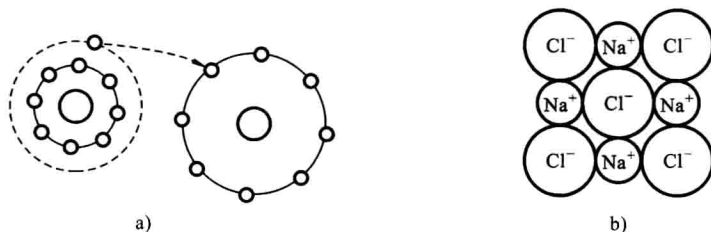


图 1-5 NaCl 的离子键

a) Na 的外层电子贡献给 Cl b) NaCl

离子键具有较强的结合力,所以,离子键结合的材料硬度高、脆性大,在受到一定外力的作用时,不易发生塑性变形,而易沿一定的原子平面快速解理,导致键被破坏(宏观上则表现为材料破断)。另外,由于固态下离子键中难有自由电子存在,故在常温下导电性能很差,但离子键结合的材料处在熔融状态时会出现自由移动的离子,从而可表现出导电性。

4. 范德瓦耳键(分子键)

原子状态已经形成稳定电子壳层的惰性气体元素,在低温下可结合成固体。由于在结合过程中没有出现因电子的得失、共有或公有化而引起的库仑力,因此它们的结合靠的是原子或分子间的一种引力——范德瓦耳力。它来自分子偶极矩间的作

用,比起前三种结合键来,它显得很微弱。通常,非极性分子是没有偶极矩的(即在平均情况下,电子云所产生的负电荷中心与原子核所具有的正电荷中心重合),但实际上,由于各种原因,在许多瞬时,原子(或分子)上电子云分布的密度是不均匀的,其正、负电荷中心并不重合,这使得分子一端带负电,另一端带正电,形成瞬时偶极矩。此外,极性分子的正、负电荷中心本不重合,也有偶极矩存在。当大量分子靠近时,偶极矩之间的电吸引力就将它们结合在一起。这样的结合称为范德瓦尔键(分子键)。

范德瓦尔键可在很大程度上改变分子晶体的性质,如由大分子链组成的高聚物(聚氯乙烯塑料),在每一个大分子内部的原子间及链节间通常具有共价键,性能应该是很脆的,但因大分子与大分子之间是以范德瓦尔键连接的,故在较小的外力作用下,键的平衡受到破坏,结果导致分子链滑动,高聚物产生很大的变形。由此可知,以范德瓦尔键结合的材料,其弹性模量、强度都较低,且熔点、硬度也较低。

晶体中几种不同结合键的比较如表 1-1 所示。由表可知,离子键结合能最高,共价键其次,金属键再次,范德瓦尔键最弱。因此,具有不同结合键的材料其性能有明显的差异。

表 1-1 不同结合键的比较

结合键种类	结合键能 [*] /(kJ·mol ⁻¹)	熔 点	硬 度	导电性	键的方向性
金属键	113~660	有高有低	有高有低	良好	无
共价键	150~712	高	高	不导电	有
离子键	586~1047	高	高	固态不导电	无
范德瓦尔键	<42	低	低	不导电	有

注 * 结合键能数据为部分晶体的测定值。

1.2 工程材料的分类

为了便于材料的生产、应用与管理,也为了便于材料的研究与开发,有必要对固体材料进行分类。由于材料的种类繁多,用途甚广,因此分类的方法也有多种。

材料按用途可分为建筑材料、电工材料、结构材料等,按材料的结晶状态可分为单晶体材料、多晶体材料及非晶体材料,按物理性能及物理效应可分为半导体材料、磁性材料、激光材料(这类材料能受激发射出方向恒定、波长范围窄、颜色单纯的激光,如红宝石是含 Cr 的 Al_2O_3 晶体、钇铝石榴石是含 Nd 的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 晶体等)、热电材料(在温度作用下产生热电效应,由热能直接转变为电能或由电能转变为热能,可用来制造引燃、引爆器件)、光电材料(利用光电效应可将光能直接转换成电能,如用硅、硫化镉等光电材料制作的太阳能电池)等。

需要指出的是,在工程上通常是按材料的化学成分、结合键的特点将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料等几大类。

1. 金属材料

金属材料是以过渡族金属为基础的纯金属及含有金属、半金属或非金属的合金,是工程材料中最重要的材料之一。金属材料皆为晶体,其原子间的结合主要为金属键。但大多数金属材料中还含有化合物等其他物质,故金属材料中还存在着其他的结合键。工业上通常把金属材料分为两大类:第一类是钢铁材料,它是指铁及其合金,其中以 Fe 为基的钢(包括合金钢)和铸铁应用最广,占整个结构和工具材料的 80% 以上;第二类是非铁金属材料,它是指钢铁材料以外的所有金属及其合金。这两类材料还可进一步细分为图 1-6 所示的系列。

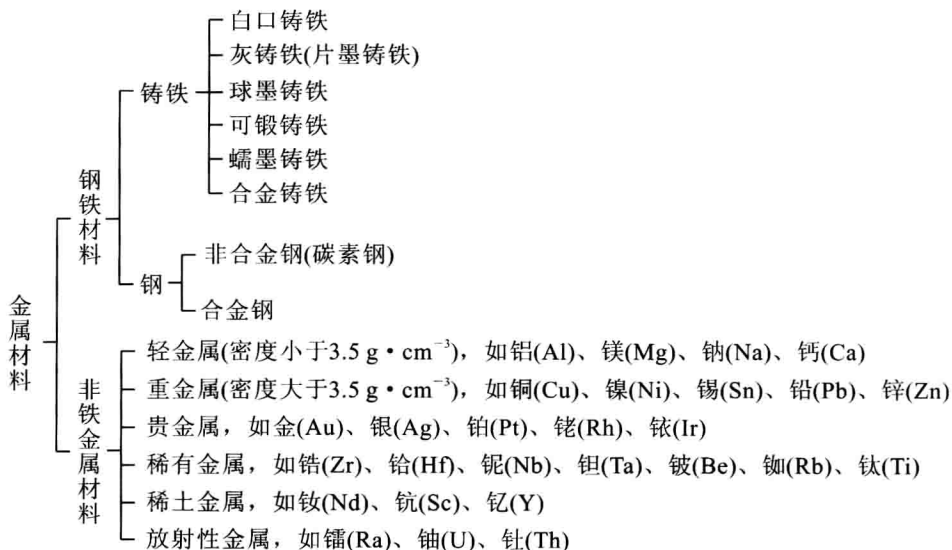


图 1-6 不同系列的金属材料

2. 高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为主要组分材料。每一种高分子化合物又都是由一种或几种简单的低分子化合物聚合而成的,故高分子化合物也称为高分子聚合物(简称高聚物)。有的高聚物是以 C、H、O 中的一种或几种元素结合而成的,有的高聚物中还含有 N、S、Cl、F、Si 等元素。高聚物大分子内的原子间存在着很强的共价键,而大分子与大分子之间的结合是分子键。这类材料大体可细分为图 1-7 所示的系列。

3. 陶瓷材料

陶瓷材料主要是指由一种或多种金属元素与非金属元素的氧化物、碳化物、氮化物、硅化物及硅酸盐所组成的无机非金属多晶材料。它们有的是以离子键为主的离子晶体,有的是以共价键为主的共价晶体,而完全由其中一种结合键组成的陶瓷材料是不多的,大多数是二者的混合键。国际上,陶瓷材料常按无机非金属材料系列进行分类,如图 1-8 所示。



图 1-7 不同系列的高分子材料

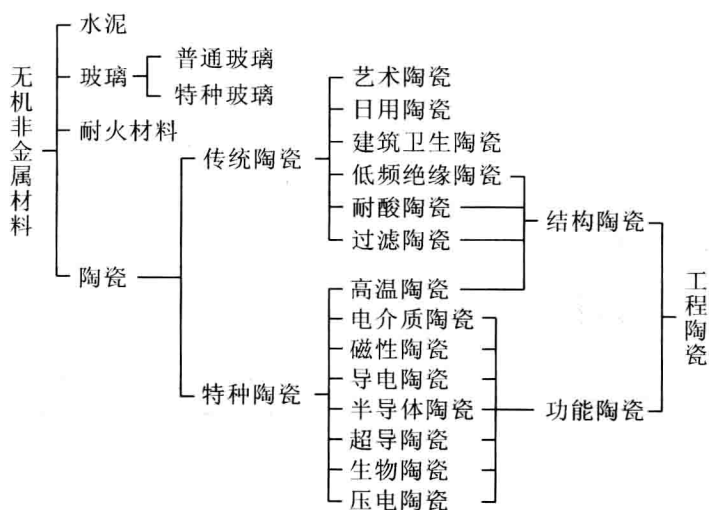


图 1-8 无机非金属材料的分类

4. 复合材料

复合材料是由两种或两种以上性质不同的材料组合起来的一种固体材料(如玻璃钢是由玻璃纤维与热固性高分子材料复合而成的),它的原子具有非常复杂的结合键。复合材料在性能上不仅保留了组成材料各自的优点,而且还有着单一组成材料不具备的优良性能。这类材料密度小、强度高、耐高温、耐磨损,不仅是航空航天领域的理想材料,也是建筑、化工、机械、造船等工业领域广泛使用的材料。

1.3 材料的性能

材料的性能一般分为使用性能和工艺性能。材料的使用性能主要是指材料的力学、物理和化学性能等,材料的工艺性能则是指材料的铸造性能、锻造性能、焊接性能及切削加工性能等。材料的这些性能不仅是设计工程机件(或构件、零件、工件)选用材料的重要依据,同时还是控制、评定产品质量优劣的标准。本节重点讲述的是材料的力学性能及其测试方法。

不产生永久变形的能力称为弹性。图中 e 点对应的应力 R_e 为不产生永久变形的最大应力,称为弹性极限。 Oe 段中有一部分为直线,这部分应力与延伸率(应变)始终成比例,所对应的最大应力称为比例极限。

材料在弹性范围内,其应力与延伸率的比值($E=R/e$)称为弹性模量(或杨氏模量),它是产生单位弹性变形量所需的应力,单位为 MPa。 E 值的大小主要取决于各种材料的本性,反映了材料内部原子结合力的强弱。当温度升高时,原子间距加大,金属材料的 E 会有所减小,而一些处理方法(如热处理、冷热加工、合金化等)对它的影响很小,或者说金属材料的弹性模量是一个对显微组织不敏感的力学性能指标。表 1-2 列出了一些材料的弹性模量及其键型。

表 1-2 部分工程材料的弹性模量(E)及其键型

材 料	E/MPa	键 型	材 料	E/MPa	键 型
铁	2.14×10^5	金属键	Al_2O_3 陶瓷	4×10^5	共价键和离子键
镍	2.10×10^5	金属键	石英玻璃	7×10^4	共价键和离子键
铜	1.21×10^5	金属键	无规聚苯乙烯	3×10^3	分子键
钛	1.12×10^5	金属键	支化聚乙烯	200	分子键
铝	7.06×10^4	金属键	碳纤维复合材料	$(7 \sim 20) \times 10^4$	—
镁	4.16×10^4	金属键	玻璃纤维复合材料	$(7 \sim 46) \times 10^3$	—
金刚石	1.14×10^6	共价键	—	—	—

工程上,弹性模量是度量材料刚度(指零(构)件受力时抵抗弹性变形的能力)的系数。如零(构)件拉伸时的刚度常用试样的原始横截面面积 S_0 与该材料的弹性模量 E 的乘积 $S_0 E$ 表示,即 $ES_0 = F/e$ 。可见,当零(构)件所受外力一定、截面大小一定时, E 愈大,材料愈不容易产生弹性变形。

需要注意的是,材料的刚度不等于零(构)件的刚度,因为零(构)件的刚度除取决于材料的刚度外,还与结构因素有关。提高零(构)件的刚度,可通过增加横截面面积或改变截面形状来实现,还可通过选用弹性模量高的材料来实现。此外,理想的弹性体加载后立即产生弹性变形,卸载后立即恢复原状,应变的产生与时间无关;而实际的工程材料,特别是一些高分子材料,加载后应变不立即达到平衡值,卸载时变形又不立即消失,这种应变滞后于应力的现象,称为弹性滞后或滞弹性。

2) 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗塑性变形和破断的能力。通过拉伸试验可以测定材料的屈服强度和抗拉强度。

(1) 屈服强度 由图 1-11 可以看出,当应力超过 e 点后,试样除有弹性变形外,还产生塑性变形,表现出应力几乎不增加而延伸率却继续增加的特点,它显示了试样的“屈服”。此时若取消外加载荷,试样的变形不能完全消失,将保留一部分残余的变形,这种不能恢复的残余变形称为塑性变形。试样屈服时承受的最小应力称为屈服强度(或屈服极限),单位为 MPa。它反映了材料对明显塑性变形的抗力。

屈服强度分为上屈服强度和下屈服强度。上屈服强度 R_{eH} 是指材料发生屈服而应力首次下降前的最大应力(对应图 1-11 所示拉伸曲线上的 H 点),下屈服强度 R_{eL} 是指在材料屈服期间不计初始效应时的最小应力(对应图 1-11 所示拉伸曲线上的 L 点)。上屈服强度 R_{eH} 波动性大,对试验条件的变化很敏感,而在正常条件下,下屈服强度 R_{eL} 再现性较好,所以工程上一般多用 R_{eL} 作为材料屈服变形的力学性能指标。

实际上,不少材料并没有明显的屈服现象,为此国家标准 GB/T 228—2010 规定,把当试样产生的塑性延伸率等于规定的引伸计标距 L_e 百分率时所对应的应力定为该材料的屈服强度,称为规定塑性延伸强度,记为 R_p 。例如, $R_{p0.2}$ 表示规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力。一些工程零件(如紧固螺栓)在使用时是不允许发生塑性变形的,因此屈服强度是工程设计与选材的重要依据之一。

(2) 抗拉强度 材料发生屈服后,试样发生均匀而显著的塑性变形。图 1-11 所示拉伸曲线上 m 点对应的应力达最大值 R_m 。在 m 点之前,材料的塑性变形是均匀的;在 m 点以后,试样产生“颈缩”,并迅速伸长,变形集中于试样的局部,应力明显下降;到 k 点试件断裂。 R_m 称为抗拉强度(或强度极限),单位为 MPa,它代表材料在拉伸条件下,发生破断前所能承受的最大应力,或者是材料产生最大均匀变形的抗力。对于那些变形要求不高的零(构)件,无须靠 R_{eL} 来控制产品的变形量,常将 R_m 作为设计与选材的依据。同时, R_m 也广泛用作产品规格说明和质量控制指标。

3) 塑性

塑性是材料在断裂前发生永久变形的能力。塑性的大小采用拉伸试验中试样的断后伸长率 A 与断面收缩率 Z 两个指标来表示:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%, \quad Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

其中, L_0 与 S_0 分别为试样的原始标距与原始截面面积; L_u 与 S_u 分别为试样的断后标距与断后最小横截面面积,如图 1-10 所示。 A 与 Z 越大,材料的塑性越好。两者相比,用 Z 表示塑性更接近材料的真实应变,这是因为断面收缩率与试样长短无关。

需要指出的是,在拉伸试验中所采用的圆形截面试样有两种。一般优先采用 $L_0 = 5d_0 = 5.65\sqrt{S_0}$ 的试样。若采用 $L_0 = 10d_0 = 11.3\sqrt{S_0}$ 的试样,断后伸长率符号应附以下脚注说明所使用的比例系数,即 $A_{11.3}$ 。对于同一材料, $A > A_{11.3}$;对于不同材料, A 与 $A_{11.3}$ 不能直接比较。

材料应具有一定的塑性才能顺利地承受各种变形加工,而且,材料有了一定的塑性还可提升零件使用的可靠性,防止突然断裂。

2. 硬度

硬度是衡量材料软硬程度的指标,反映材料抵抗变形,特别是材料表面压痕或划痕形成的永久变形的能力。工程上常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度、肖氏硬度以及莫氏硬度等。

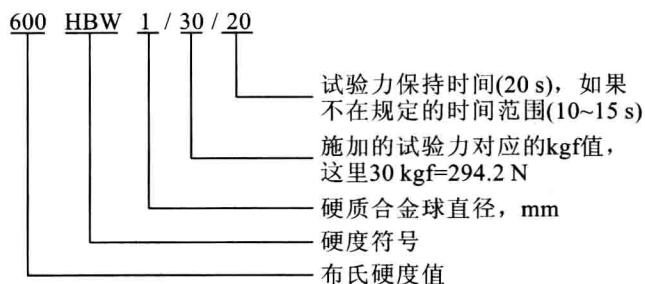
1) 布氏硬度

布氏硬度的测试是对一直径为 D 的硬质合金球施加试验力 F ,使球压入被测试

金属试样表面(见图 1-12a),保持规定时间后卸除试验力,测量试样表面压痕的平均直径 d ($d = \frac{d_1 + d_2}{2}$),如图 1-12b 所示。由此计算压痕表面积 S ,然后再求出压痕的单位面积所承受的平均压力 (F/S),以此作为被测试金属的布氏硬度。其计算式为

$$\begin{aligned} \text{布氏硬度} &= \text{常数} \times \frac{\text{试验力}}{\text{压痕表面积}} \\ &= 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-1) \end{aligned}$$

其中,试验力 F 的单位为 N,球直径 D 与压痕直径 d 的单位为 mm。布氏硬度的符号为 HBW,单位为 $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$,但习惯上不标出单位,只写出硬度值。布氏硬度的表达方法示例如下:



在进行布氏硬度试验时,应根据材料的种类和试样厚度,选用不同大小的球体直径、施加试验力和试验力保持时间,按 GB/T 231. 1—2009 规定:球直径有 10 mm、5 mm、2.5 mm、2 mm 和 1 mm 等五种;试验力与球直径二次方的比率 $0.102 \times F/D^2$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$) 有 30、15、10、5、2.5、1.25 和 1 等七种,可根据金属材料的种类和布氏硬度范围按表 1-3 选定。从压力开始至全部试验力施加完毕的时间应在 2~8 s 之间,试验力保持时间为 10~15 s。

表 1-3 不同材料的试验力与压头球直径二次方的比率

材 料	硬度(HBW)	试验力与球直径二次方的比率 $0.102 \times F/D^2$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
钢、镍基合金、钛合金	—	30
铸铁	<140	10
	≥ 140	30
铜和铜合金	<35	5
	35~200	10
	>200	30

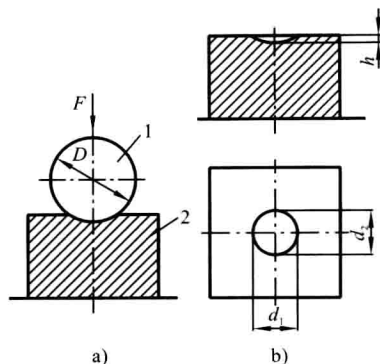


图 1-12 布氏硬度试验原理
a) 硬度试验 b) 试样压痕
1—硬质合金压头 2—试样

续表

材 料	硬度(HBW)	试验力与球直径二次方的比率 $0.102 \times F/D^2$ ($N \cdot mm^{-2}$)
轻金属及其合金	<35	2.5
		5
	35~80	10
		15
		10
	>80	15
铅、锡	—	1

注 ①当试样尺寸允许时,应优先选用直径 10 mm 的球压头进行试验。

②对于铸铁试验,压头的名义直径为 2.5 mm、5 mm 或 10 mm。

当试验力 F 与球直径 D 选定时,硬度值只与压痕直径 d 有关。 d 愈大,则布氏硬度值愈小; d 愈小,则布氏硬度值愈大。在试验时,一般用刻度放大镜测出压痕直径 d_1 、 d_2 ,并计算出平均直径 d ,然后用式(1-1)计算,求得所测的硬度值。

布氏硬度试验方法是由瑞典工程师布利涅尔(J. B. Brinell)于 1900 年提出的。

2) 洛氏硬度

洛氏硬度试验按国家标准 GB/T 230.1—2009 进行。洛氏硬度试验虽然也是用一定形状的压头(金刚石圆锥、硬质合金球)以一定大小的试验力压入试样表面,但所使用的压头及试验力与布氏硬度所使用的不同,且是根据压痕的深度来计算硬度值。材料硬,压痕深度小,则硬度值大;材料软,压痕深度大,则硬度值小。洛氏硬度计上带有显示器,试验时在显示器上可直接读出被测材料或零件的硬度值。

为了适应不同材料的硬度试验,在同一硬度仪上采用了不同的压头与载荷组合,并用几种不同的洛氏硬度标尺(A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T)予以表示。每一种标尺用一个字母在洛氏硬度符号(HR)后注明,如 HRC、HRA、HRB 等,它们的试验要求及应用范围如表 1-4 所示。

表 1-4 洛氏硬度的试验要求及应用范围

洛氏硬度	压 头	试验力/N	测量范围	应用范围
HRC	锥角 120°、顶部曲率半径 0.2 mm 的金刚石圆锥	1471	20~70HRC	淬火钢等硬零件
HRA		588.4	20~88HRA	零件的表面硬化层硬质合金等
HRB	φ1.588 mm 硬质合金球	980.7	20~100HRB	软钢和铜合金等

洛氏硬度试验方法的优点是:操作简便、迅速,硬度值可在显示器上直接读出;压痕小,可测量成品件;采用不同标尺可测定各种软硬不同和厚薄不同的材料。它的

足之处是:因压痕小,受材料组织不均等缺陷影响大,所测硬度值重复性不太好,对同一试样一般需测三次后取平均值。

洛氏硬度试验方法是由美国的两个洛克威尔(S. P. Rockwell 和 H. M. Rockwell)于1919年提出的。

3) 维氏硬度

维氏硬度试验按国家标准 GB/T 4340.1—2009 进行。洛氏硬度试验方法虽可采用不同的标尺来测定软硬不同金属材料的硬度,但不同标尺的硬度值间没有简单的换算关系,使用上不太方便。维氏硬度试验方法能在同一种硬度标尺上测定软硬不同金属材料的硬度。它是用一相对面夹角 α 为 136° 的、具有正方形基面的金刚石锥体压头,在规定试验力 F 作用下压入被测试样表面,保持规定时间后卸除试验力,然后再测量压痕对角线长度,如图 1-13 所示,并计算出压痕的表面积 S ,最后按下式计算维氏硬度:

$$\begin{aligned}\text{维氏硬度} &= \text{常数} \times \frac{\text{试验力}}{\text{压痕表面积}} \\ &= 0.102 \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0.1891 \frac{F}{d^2}\end{aligned}\quad (1-2)$$

其中,试验力 F 的单位为 N,两对角线的平均长度 d 的单位为 mm。与布氏硬度值一样,习惯上也只写出其硬度数值而不标出单位。维氏硬度符号为 HV, HV 之前的数值为硬度值, HV 后面的数值依次表示试验力和试验力保持时间(保持时间为 10~15 s 时不标注)。例如,640HV30 表示在 294.3 N (30 kgf) 试验力作用下保持 10~15 s 测得的维氏硬度值为 640, 640HV30/20 表示在 294.3 N (30 kgf) 载荷作用下保持 20 s 测得的维氏硬度值为 640。

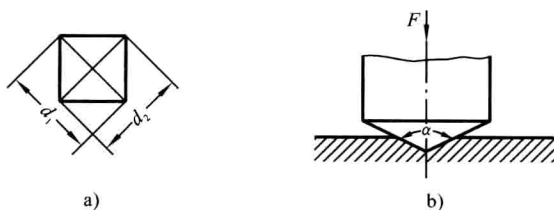


图 1-13 维氏硬度试验原理

a) 压痕 b) 压头(金刚石锥体)

测定维氏硬度常用的试验力有 49 N、98 N、196 N、294 N、490 N、980 N 等几种。试验时,应根据试样的硬度与厚度来选择试验力。一般在试样厚度允许的情况下尽可能选用较大试验力,以获得较大压痕,提高测量精度。在实际测试时,一般是用装在机体上的测量显微镜,测出压痕两对角线的平均长度 d ,然后用式(1-2)计算硬度值。维氏硬度试验方法适用于各种金属材料,尤其是表面硬化层的硬度测量,如化学热处理渗层、电镀层。此法压痕清晰,又是在显微镜下测量对角线的长度,从而保证