

目 录

第一章 工程材料及其性能	1	二、高分子材料	40
§ 1-1 材料的性能与设计	1	三、复合材料	43
§ 1-2 工程材料类别	5	第四章 弹性模量与刚度	45
一、金属与合金	5	§ 4-1 材料的弹性模量	45
二、高分子材料	6	一、应力与应变	45
三、陶瓷材料	7	二、弹性模量的指标	47
四、复合材料	7	三、弹性模量的测定方法	47
§ 1-3 材料的价格及可得性	8	四、弹性模量的数据	48
第二章 工程材料的内部结构	10	§ 4-2 弹性模量的物理本质	50
§ 2-1 原子之间的结合键	10	一、晶体材料的弹性模量	50
一、一次键	10	二、聚合物的弹性模量	52
二、二次键	11	三、复合材料的弹性模量	52
§ 2-2 固体中的原子排列	12	§ 4-3 实例分析	53
一、晶体的原子排列	12	一、望远镜的反射镜材料选择	54
二、聚合物中的原子排列	15	二、梁的材料选择	56
三、非晶态玻璃的原子排列与玻璃化转变	15	第五章 强度与塑性	58
四、固相材料的密度	16	§ 5-1 工程材料的应力—应变行为	58
§ 2-3 晶体材料的显微组织	18	一、弹性行为	58
一、纯金属的组织	18	二、塑性行为	59
二、合金的组织	19	三、强度与塑性指标	60
三、合金状态图与组织	20	四、硬度试验	61
四、加工工艺与组织	21	五、工程材料的强度与塑性数据	61
第三章 常用工程材料简介	24	§ 5-2 晶体中的位错与屈服	63
§ 3-1 钢铁材料	24	一、理想晶体的强度	63
一、铁—碳状态图和慢冷时的组织与性能	24	二、晶体中的位错与滑移	64
二、钢的热处理	26	三、位错密度和强度	67
三、合金钢	31	四、位错阻力与屈服强度	67
四、铸铁	34	§ 5-3 提高工程材料强度的途径	68
§ 3-2 非铁金属材料	35	一、提高金属材料强度的途径	68
一、铝及铝合金	35	二、提高陶瓷、高分子材料强度的途径	70
二、铜及铜合金	37	§ 5-4 实例分析	71
三、钛合金及镁合金	37	一、弹簧材料的弹性设计	71
§ 3-3 非金属材料	38	二、压力容器材料的选择	73
一、工程陶瓷	38	第六章 断裂韧性	75
		§ 6-1 断裂与脆断的基本概念	75
		§ 6-2 快速断裂的能量判据	77

§ 6-3 快速断裂时的裂纹扩展机理	79	二、电化学腐蚀的驱动力	109
一、塑性撕裂	79	三、电化学腐蚀速率	110
二、解理	80	四、金属的局部腐蚀	110
三、复合材料的断裂	81	五、介质与应力联合作用下的腐蚀	111
§ 6-4 快速断裂的实例分析	81	§ 9-3 改善材料腐蚀抗力的措施	112
一、模具失效	81	一、改善介质的腐蚀条件	112
二、压力容器的安全设计	83	二、电化学保护	112
§ 6-5 根据断裂韧性选材	84	三、耐蚀合金	113
第七章 疲劳	86	四、表面涂层	113
§ 7-1 疲劳失效行为	86	五、合理选材	115
一、无裂纹构件的疲劳行为	87	§ 9-4 实例分析	115
二、带裂纹构件的疲劳行为	88	一、燃气轮机叶片的抗氧化性能与保护	115
§ 7-2 疲劳的内部过程 (机理)	89	二、水线腐蚀现象	117
一、疲劳裂纹的形成	89	三、紧固件材料的选用	117
二、疲劳裂纹的发展	89	第十章 摩擦和磨损	119
§ 7-3 提高材料疲劳性能的途径	90	§ 10-1 摩擦与磨损的基本概念	119
一、材料的静强度与疲劳性能	90	一、摩擦	119
二、材料的冶金质量	90	二、润滑	120
三、构件的应力集中	91	§ 10-2 材料的磨损	121
四、表面处理及残余内应力状态	91	一、粘着磨损	121
§ 7-4 实例分析	92	二、磨料磨损	122
一、喷油泵凸轮轴驱动端的断裂与防止	92	§ 10-3 摩擦与磨损的实例分析	123
二、蒸汽机安全寿命估算	93	一、滑动轴承的设计与选材	123
第八章 蠕变与断裂	95	二、高摩擦力的橡胶轮胎	124
§ 8-1 工程材料的蠕变	95	§ 10-4 提高磨损抗力的途径	125
一、蠕变现象	95	一、选用耐磨材料	125
二、蠕变试验和蠕变曲线	96	二、热处理	125
三、蠕变后果	97	三、表面处理	126
四、蠕变损伤与断裂	98	第十一章 工程材料的选用	128
§ 8-2 蠕变与扩散	98	§ 11-1 各种工程材料的力学性能比较	128
§ 8-3 蠕变机制	99	一、陶瓷的力学性能	128
§ 8-4 蠕变设计的实例分析	100	二、高分子材料的力学性能	130
一、对燃气轮机叶片的性能要求	101	三、复合材料的力学性能	131
二、镍基超合金	101	四、各类材料性能的比较表	133
§ 8-5 根据蠕变抗力选材	102	§ 11-2 工程材料的选用	134
第九章 氧化与腐蚀	104	一、安全可靠	134
§ 9-1 材料的高温氧化 (于腐蚀)	104	二、经济性	135
一、氧化物的形成能 (氧化能)	104	三、制造方法	135
二、氧化速率	104	§ 11-3 汽车中的选材问题	136
三、微观机理	106	一、汽车的能耗	136
§ 9-2 材料的电化学腐蚀 (湿腐蚀)	107	二、汽车材料的选用	137
一、电化学腐蚀反应过程	108	§ 11-4 对现阶段各种工程材料的评价	140

第一章 工程材料及其性能

一个工程设计人员,在着手进行某个设备或装置的设计时,往往只注意结构的设计与计算,而对使用什么材料更好却常常考虑不多,其实,如何正确地选用材料,使之既满足强度和耐久性的要求,又符合经济和美观的需要,以达到产品结构耐久与价廉美观的完美统一,这本是设计人员应该综合全面考虑的问题。设计人员在选择材料时,必须具备两方面的知识:首先应该了解材料各种性能和设计的关系,如在进行强度设计、刚度设计和断裂力学设计时,必须考虑材料的哪些力学性能或物理、化学性能,也应该懂得在设计中当改变结构、工艺以及外在因素时(如温度、环境介质),对材料性能的影响。其次是了解各种材料的基本特性和应用范围。只有把这两者结合起来,才能正确选用材料。否则,如果仅局限于从个别材料手册或只根据列举出的极少数材料和极有限的性能数据去选取材料,这种选择方法只能是狭隘的和保守的,在产品经济性上也可能失去竞争的优势。

§ 1-1 材料的性能与设计

工程设计时所涉及的性能是很广泛的,它包括力学的、物理的、化学的以及制造工艺的,甚至是美学的各项性能。这些性能可概括地列于表 1-1 中。在机械设计中,首先考虑的是力学性能,这些性能将在以后各章里分别加以叙述和讨论。

表1-1 材料性能类别

价格及可得性	
硬度	
弹性模量、阻尼性能	} 力学性能
屈服强度、抗拉强度、硬度和塑性	
断裂韧性	
疲劳强度、热疲劳抗力	
蠕变强度	
热、光、磁、电的性能	→ 物理性能
氧化与腐蚀	} 表面性能
摩擦与磨损	
制造、加工、连接、修整	→ 工艺性能
外观	→ 美学性能

为了说明材料的各种力学性能与设计的关系,我们不妨先做些简单地概述,使之在初步建立概念之后,再在以后各章中去加深理解。

在机械设计中,有时刚度是第一位的。精密机床的主轴如果不具有足够的刚度,就不能保证零件的加工精度。若汽车拖拉机中的曲轴弯曲刚度不足,就会影响活塞连杆及轴承等重要零件的正常工作,若扭转刚度不足,则可能在工作转速范围内产生强烈的扭转振动。曲轴的结构和尺寸常常由刚度决定,然后作强度校核。通常由刚度决定的尺寸远大于按强度计算

的尺寸, 所以曲轴只有在个别情况下, 才从轴颈到曲柄的过渡圆角处发生断裂, 这一般是由制造工艺不当所致。通常曲轴的寿命常由轴颈磨损超过规定的限度来决定。弹性模量在本质上取决于原子间的结合力。不同类型的材料其弹性模量可以差别很大, 因而在给定载荷下, 产生的弹性挠曲变形就会十分悬殊。例如一个悬臂梁结构, 在梁的长度和截面尺寸相同的情况下, 如选用钢、铝合金和聚苯乙烯这三种材料进行比较, 当外加载荷是98N, 如钢梁弹性挠曲变形为1cm, 则铝合金为3cm, 而聚苯乙烯则为60cm。这里很容易看出选用钢梁最合适, 因为钢有最高的弹性模量。一般情况下这个结论是正确的。但是, 如果要在给定的变形量下, 要求重量最轻, 则就要按照比刚度进行选材了。比刚度决定于杆件受载荷的方式, 可以分别以 E/ρ 、 $E^{1/2}/\rho$ 或 $E^{1/3}/\rho$ 表示。加载方式对杆件(管子、容器)的比刚度和比强度的影响, 见表1-2。

表1-2 加载方式对杆件的比刚度和比强度的影响

加载方式	比刚度	比屈服强度	比断裂强度
拉伸	E/ρ	σ_y/ρ	$K_{1.0}/\rho$
扭转或管	$G^{1/2}/\rho$	$\sigma_y^{1/2}/\rho$	$K_{1.0}^{1/2}/\rho$
受弯的杆或管子、细长杆受压	$E^{1/2}/\rho$		
板的弯曲	$E^{1/3}/\rho$	$\sigma_y^{1/3}/\rho$	$K_{1.0}^{1/3}/\rho$
板的纵向受压	$E^{1/2}/\rho$		
圆柱壳体受内压或旋转	E/ρ	σ_y/ρ	$K_{1.0}/\rho$
球体受内压	$E(1-\nu)/\rho$	σ_y/ρ	$K_{1.0}/\rho$

K_{1.0} 为断裂韧性; E 弹性模量; G 剪切弹性模量; ρ 密度; ν 泊松比

在家具设计中, 比如一个桌子, 我们要求桌腿细而轻, 应该推荐什么材料呢? 桌腿要细, 则要求选用高弹性模量的材料, 才不致在压缩载荷下发生过大的弯曲变形。在给定载荷下, 又要求桌腿最轻, 由表 1-2 第一栏中, 细长杆受压保持稳定, 其比刚度应为 $E^{1/2}/\rho$ 。假如作弹性模量-密度图, 由受载方式可分别画出 E/ρ , $E^{1/2}/\rho$, $E^{1/3}/\rho$ 三条直线, 见图 1-1。如要求细长杆必须具有某一特定的 $E^{1/2}/\rho = C$ (以粗实线表示), 可以看出, 尽管钢铁材料具有很高的弹性模量, 但 $E^{1/2}/\rho$ 比值较低, 铝合金、钛合金的比值稍高些, 但总的来说, 用金属材料将使桌子较重, 而用高分子材料则因刚度不能满足要求, 不宜选用。落在 $E^{1/2}/\rho = C$ 这根粗实线上的材料, 是木材和碳纤维复合材料, 因为碳纤维复合材料很贵, 将使桌子成本大大增加, 所以一般均用木材作桌腿。假如对受压的细长杆有很高的要求, 限定 E 必须在某一数值以上, 如图中的粗实线 $E = C$, 又要最轻, 则木材已不能满足, 只有选用复合材料了。

进行强度设计时, 如果主要承受静载荷, 则工作应力以材料的屈服强度除以一安全系数。

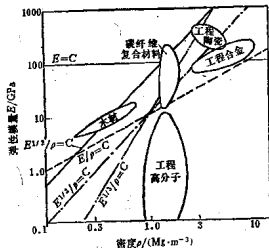


图1-1 材料的弹性模量-密度图

今以自行车赛车为例,如要求重量最轻,应选用什么材料最为合适?赛车上的细杆(见图1-2)主要承受弯曲载荷,如要求重量最轻,由表1-2中第二栏可知,其比强度应按 $\sigma_s^{2/3}/\rho$ 选取,即选用具有最大的 $\sigma_s^{2/3}/\rho$ 材料。作各种材料的屈服强度—密度图(图1-3),图中三条线分别表示 σ_s/ρ , $\sigma_s^{2/3}/\rho$, $\sigma_s^{1/2}/\rho = C$, 对于 $\sigma_s^{2/3}/\rho = C$ (以粗实线表示,在此线以上的材料较好,在此线以下者较差)。由图1-3可以看出,自行车赛车用高强度铝合金7075最合适,钛合金次之(较贵),若用钢材,除非个别的低合金高强度钢,一般都不宜采用。复合材料虽然是理想的材料,目前就国内外的生产水平来说,都是较昂贵的,只有在重大的比赛中,可以不考虑成本而采用它。

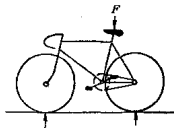


图1-2 自行车赛车

材料的弹性模量和屈服强度是材料本身固有的基本性能,它既是力学的性能,也有其明确的物理本质,这点我们将在以后的两章中分别叙述。需要注意的是,设计人员对零件或构件的性能要求,常常不是某一项基本性能,而是几个性能的综合。就常用的弹簧零件来说,不管弹簧的形状如何(是螺旋弹簧还是板弹簧),也不管弹簧的受力方式如何(是拉压还是弯扭),都要求其在弹性范围内(弹性极限以下)有尽可能高的弹性比功,其吸收的弹性能为弹性极限以下包围的面积: $\frac{1}{2} \sigma_E^2/E$ 。对弹簧的要求是,在受载时既要能吸收较多的弹性变形能,又不能发生永久变形。不能单纯地理解解弹簧的作用就是为了缓冲和消震,否则我们应选取高阻尼性能的材料,诸如高分子塑料,软金属和橡胶。以汽车板簧为例,它把车架所支承的汽车重量或载荷传递给车桥或车轮,也把驱动轮的动力传递给车架,这就要求材料具有尽可能高的 σ_s^2/E (因为弹性极限测定不方便,故以屈服强度代替),在汽车上,采用弹性模量大的硬钢(钢铁材料),以便减少在道路行驶中的颠簸,因此,选用经过热处理获得尽可能高的屈服强度的弹簧钢。

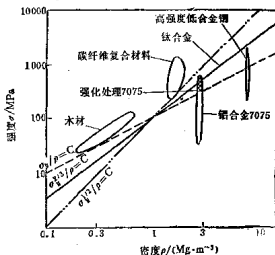


图1-3 材料屈服强度—密度图

对于脆性材料如铸铁陶瓷等,设计者以抗拉强度为依据,确定许用应力。而对于塑性材料,抗拉强度对于设计者没有直接的意义,但它为材料的疲劳强度、主要是高周次破坏下的疲劳寿命提供信息。经验证明:材料的疲劳极限 σ_r 和抗拉强度 σ_s 有一定比例关系。另外,它对在含氢介质和在应力腐蚀情况下,也有参考价值,材料抗拉强度越高,对氢脆和应力腐蚀就越敏感。

设计者对材料硬度的要求,有时是直接的,有时是间接的,如果是切削刀具或冷变形模具,自然要求刀具或模具本身具有高硬度,对于钢制零件或工具,其硬度高低还直接反映了抵抗磨损的能力,这些是硬度对其有直接影响的一面。而在更多的情况下,是因为硬度的测定方法简单,便于生产检验,同时硬度值的高低和材料的屈服强度、抗拉强度有着定量的关系。对零件截面不同位置的硬度要求,实际上反映了对强度的要求,所以我们常可看到设

计图纸上规定了硬度范围。

刚度设计是要求材料具有一定的抵抗弹性变形的能力。强度设计是要求材料不发生永久变形,或者是不发生整体屈服(这里仅就静强度而言)。但是,有时零件或结构件要求材料具有足够的断裂抗力。依据以前的概念,材料的断裂抗力是高于屈服强度的,按照屈服强度设计是不会发生断裂的。可是随后的实践证明,象焊接的构件(特别是在低温),我们在设计时规定的工作应力虽远低于材料的屈服强度(这似乎应该是安全的),但出乎意料的是,二次大战期间,成千艘焊接商船,在北大西洋航行时,发生了灾难性的事故,有的商船沿着焊缝裂为两半。同样,50年代初,美国发射北极星导弹,其壳体用屈服强度大于1400MPa的超高强度钢,设计时的工作应力远低于材料的屈服强度,可是一经点火就爆炸了。对这两起重大事故的研究表明,过去传统的设计没有考虑到材料内部有裂纹的情况。又由于断裂力学的发展,使人们在设计与选材上都有了新的认识。材料的断裂韧性 K_{Ic} ,作为一项新的性能指标被提出。断裂力学指出,当裂纹尖端的应力强度因子达到材料的断裂韧性时,裂纹立即失稳扩展。试验结果表明,材料的断裂韧性一般是随着强度的增加而减小,越是高强度材料,其断裂抗力越低,对零件或构件中存在的裂纹越敏感。

传统的疲劳设计方法是按照零件有无限寿命的情况计算的,在试验上求得一材料的疲劳极限 σ_{-1} ,然后考虑加载方式,由缺口造成的应力集中,以及表面质量因素、尺寸因素等,即乘以若干系数,规定其许用的工作应力。随着测试技术的发展,对带缺口的机械零件,其疲劳强度依照安全寿命计算。当一缺口零件原先不含有裂纹,在循环加载时,由于缺口根部局部的应力集中和应变集中,致使达到一定周次后,产生能扩展的疲劳裂纹,我们就规定这一周次为该零件的疲劳寿命。安全寿命的计算,关键是测定缺口根部的局部应力和应变,60年代以后,人们已经能通过低周次(10^5 周次以下)疲劳试验求得。另一方面,假如零件或构件原先已含有裂纹(如焊接构件),这时疲劳设计就要按照容许的损伤计算,即裂纹扩展到规定的尺寸就已是危险的,而我们需要知道的则是在给定的循环应力条件下,材料的疲劳裂纹扩展速率。

产生疲劳破坏的不一定是机械应力,在温度周期变化、使零件和构件的膨胀或收缩受到约束时,产生的交变热应力也会引起疲劳破坏,这叫热疲劳。比如蒸汽锅炉管,由于温度梯度会产生大的热应力,引起热疲劳裂纹。在核反应堆中,热疲劳也是个重要问题,例如快中子增殖反应堆在刚停止运转时,不锈钢零件的表面温度在不到1s内,由600℃降到400℃,而零件内部在几秒钟内仍维持高温,高的温度梯度会产生很大的热应力,为了保证绝对安全,要严格计算导致严重裂纹的热循环周次。

金属材料在高温时发生的变形,不仅与应力大小有关,而且和温度的高低、应力作用时间的长短有关。在恒定的温度和应力作用下,材料会因时间的增长,连续不断地变形,这种

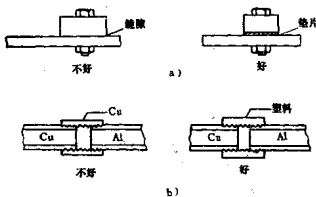


图1-4 防止缝隙腐蚀和电化学腐蚀

a) 防止缝隙腐蚀 b) 防电化学腐蚀

现象称为蠕变。在高温下工作的零件,如燃气轮机的叶片,可能在很小的蠕变量(如1%)下就会失效。因此在给定材料时,叶片的寿命由材料的蠕变速率决定。反之,在设计时,如规定了叶片的使用寿命,则要进行选材。同样,汽轮机汽缸上的紧固螺栓,也会因蠕变造成应力松弛,这都是设计中要考虑的问题。陶瓷材料由于其高熔点可以不考虑蠕变。而对多数高分子材料来说,在室温时就已经发生蠕变,因此他们不能在高温下使用。

环境介质的影响也是重要的,设计人员必须了解零件或构件是在氧化性的介质还是在还原性介质中工作,介质是酸性的、碱性的还是中性的,介质有无氯离子,气体中是否有 H_2S 、 H_2 等,这些条件在选材时都应考虑。例如,不锈钢虽然在氧化性的介质中耐蚀,但在海水或盐水中,常因点蚀而穿孔。在海水或盐水中,人们多选用铜合金,甚至宁可普通碳钢而不用合金钢,因为普通碳钢虽然腐蚀速度较快,但腐蚀是均匀的,而不是局部的点蚀。在考虑环境介质的影响时,选材固然是一个重要方面,但设计上的结构改进,也能大大减缓腐蚀。例如图1-4a所示的螺栓连接处,在氧化性的气氛中,常产生很局部的缝隙腐蚀。不锈钢和铝都对缝隙腐蚀敏感,假如在螺栓连接处加一合适的垫片,就可防止这种腐蚀。†再加铜和铝合金用铜螺栓连接,常会产生电化腐蚀,如改用绝缘的塑料连接,就可防止电化腐蚀,如图1-4b。

§1-2 工程材料类别

设计者对材料性能提出多种多样的要求,就需要有各种材料的类型去满足,工程材料的类型见表1-3。

一、金属与合金

在工程材料中,以金属材料(尤其是钢铁)使用得最广。据统计,在机械制造产品中,钢铁材料占95%,有色金属占4.5%,塑料占0.5%。在汽车制造业中,有色金属与塑料占的比例稍多些,以1985年美国福特汽车公司统计资料为据,钢铁占72%,铝合金占5.3%,塑料占8.5%。

在钢铁生产中,钢与铸铁的应用比例方面,在发达的资本主义国家,铁钢比约0.20~0.30:1,我国的机械制造业中,铁钢比为0.46:1,其中铁钢比特别高的行业是机床厂(3.08:1)、柴油机厂(1.96:1)、和锻压机械厂(1.5:1)。在铸铁中,铸铁件的75%是灰铸铁。

单就钢的生产来说,世界各国生产的碳钢约占80%,合金钢占20%。对合金钢的需要主要来自两方面,一是在常温下工作对力学性能要求较高(如强度、塑性、韧性等)的零件;二是要满足特殊性能要求的零件,如高温抗氧化、高温蠕变强度、高温硬度、耐腐蚀、抗低温脆断等性能。

钢铁之所以被用来大量制造机械产品,就是因其价格便宜和容易获得,而且是能提供多种性能、多种用途的材料。

除钢铁外,其它的金属材料均称为有色金属。有色金属中,铝及其合金用得最多,这主要是因为:①重量轻,只有钢的1/3,当按比刚度、比强度计算时,铝及铝合金便显示出优越性了。如不考虑重量,铝及铝合金的力学性能远不能与钢相比,其弹性模量只有钢的1/3,最高强度的铝合金,其强度还不如低碳钢,如果设计者把减轻重量放在性能要求的首位,最合适的就是铝合金,这就是飞机的机身和机翼为什么选用高强度铝合金的原因。②有好的导热和

导电性能,其导电性能为纯铜的60%,由于其重量轻,在远距离输送电线中可用铝线代替。
③对抗大气腐蚀特别适宜,因此在美国,25%的铝用来制作容器和包装品,还有20%的铝用作建筑结构,如门窗、框架、滑轨、挡板等。有10%的铝用作导电材料。

铜及铜合金除了良好的导电、导热性能外,还有两个重要的应用场合:抗磨损与抗腐蚀。铜合金在抗磨损方面并没有什么优越性,最硬的铜合金(约400HBS)还不如退火的低硬铜(180HBS)耐磨,在钢中,磨料磨损速度和材料的硬度是成反比例的,硬度提高磨损抗力也提高,但在铜合金中没有这种关系。铜合金具有优良的抗磨损性能,主要表现在铜合金与钢匹配时,特别是与硬度很高的钢(HRC60)相匹配,滑动摩擦较小。用粉末烧结的锡青铜,基体内多孔可储存润滑油,作轴承材料最为合适。例如造纸厂支承轧辊的轴颈,火车的轴承、轧钢厂的轴承等。铜合金也广泛用于海水中,如用于螺旋桨、套筒、热交换器等受盐水电腐蚀的零件。

钛及钛合金是自1952年后才用作结构材料的,它具有高的比强度及优良的高温力学性能,所以在航空工业上颇受设计者的注目。它在很多的介质中耐腐蚀,如在氧化性酸、氯化物的介质以及多数的自然环境中,均有极好的耐蚀性能,这是迄今在金属材料中发现的最好耐蚀材料,所以也广泛用于化工设备与食品工业中。钛合金开发较晚,最大的缺点就是价格昂贵。钛的生产量也较小,1984年世界钛材产量约4万t,我国钛材年产量约1500t。目前,在美国,钛材80%用于制造钛合金,供航空航天部门使用。如在80年代初,美国将Ti-10V-2Fe-3Al用于制作波音飞机的机身。与美国成明显不同的是日本,钛合金的生产只有4%用于飞机,而96%的钛合金用于化工设备和海洋开发等方面。

二、高分子材料

通常把高分子材料分成三大类型:塑料、合成纤维和橡胶。塑料受热时性能发生变化,因而分成热塑性和热固性的两种。前者是指塑料加热时变软,最后熔化,冷却时凝固加热时重又变软。利用这种特性可将热塑性塑料抽拉成细丝,压制成薄膜,可以反复成型使用。聚乙烯、聚丙烯、有机玻璃等都属此类型。热固性塑料一经加工成型后,受热时不发生软化和熔化,酚醛塑料(即电木)就属此类型。

聚氯乙烯是日常生活中常用的材料,农业上用的塑料薄膜、家用电器上的电线电缆、塑料雨衣、拖鞋等都是用聚氯乙烯材料做成的。

聚苯乙烯做成的泡沫塑料也是我们所熟悉的,如精密仪器、电子器件的包装外壳,为了防震隔热,就是用这种材料制成。

有机玻璃和普通玻璃不同,前者是人工合成的一种高分子聚合物,后者则是由陶瓷类的硅酸盐组成。有机玻璃比普通玻璃,但强度高,不易破碎,且透光性能很好。

聚四氟乙烯有许多优良的性能,有塑料王之称,它在液态空气中不会变脆,在沸水中不

表1-3 材料的类别

金属与合金	金属与合金
钢与铁	钢及其合金
铝及其合金	铜及其合金
镍及其合金	钛及其合金
高分子	高分子
聚乙烯(PE)	聚乙烯(PE)
有机玻璃(PMMA)	有机玻璃(PMMA)
尼龙	尼龙
聚苯乙烯(PS)	聚苯乙烯(PS)
聚氨酯(PU)	聚氨酯(PU)
聚氯乙烯(PVC)	聚氯乙烯(PVC)
橡胶	橡胶
陶瓷和玻璃	陶瓷和玻璃
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
MgO	MgO
SiO ₂ 和硅酸盐	SiO ₂ 和硅酸盐
SiC	SiC
Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄
水泥和混凝土	水泥和混凝土
复合材料	复合材料
木材	木材
玻璃纤维增强复合材料(GFRP)	玻璃纤维增强复合材料(GFRP)
碳纤维增强的高分子(CFRP)	碳纤维增强的高分子(CFRP)
碳纤维增强复合材料(BFRP)	碳纤维增强复合材料(BFRP)
填充的高分子	填充的高分子
金属陶瓷	金属陶瓷

会变软，工作温度可从液氮的温度直到250℃高温。聚四氟乙烯又非常耐蚀，其化学稳定性超过了玻璃、陶瓷、不锈钢以至金铂。因为玻璃陶瓷易受碱的腐蚀，金铂在王水中也被溶解，而它在任何强酸、浓碱中都不受腐蚀。聚四氟乙烯在冷冻设备、化工设备中得到了广泛应用。

高分子材料发展迅速，据统计，1955~1975这20年间，每年增长率为：塑料13%，合成纤维17.2%，而铜和铝分别是4.4%和8.1%，将来产量可能超过钢铁。但是高分子材料有三个主要缺点：不能耐高温(<300℃)，容易老化，易燃烧。其力学性能也不能与钢铁相比。

三、陶瓷材料

今天的陶瓷产品已不是人们往日印象中杯碟罐以及诸如此类的瓷器了，其原料也不再是粘土、石英、长石等。作为工程陶瓷结构材料，其化学组成与制造工艺都有了很大的改变。作为高温结构陶瓷，主要的化学组成是 Si_3N_4 和 SiC 。作为陶瓷刀具，使用较多的是 Al_2O_3 、人造金刚石等。

Si_3N_4 是国外50年代中期发展起来的高温结构陶瓷材料，与 Al_2O_3 相比，在力学与热学性能上均较优越，其抗弯强度、耐热冲击性能比 Al_2O_3 高2~3倍，而热膨胀系数只有其1/3，于是各国都在开发研制这种“象钢一样强，象金刚石一样硬，象铝一样轻”的新型陶瓷材料。经过20多年的努力， Si_3N_4 陶瓷在性能上有了很大的提高，工艺上也有了新的突破。日本已经研制成小型陶瓷柴油机，其燃烧室、排气和阀门系统的20多个零件全部用氮化硅陶瓷制造，完全取消了冷却系统，预计燃料消耗可减少30%，热效率可提高50%。在燃气轮机中的应用尚在研究中。

与 Si_3N_4 相比， SiC 的室温强度稍低，但高温时强度下降较少，并可一直保持到1600~1700℃， SiC 的抗蠕变、抗氧化、耐磨损和耐腐蚀性能均比 Si_3N_4 好，其缺点是热导率高，较脆，断裂韧性低，在燃气轮机中应用的可能性较大。

除了作高温结构陶瓷外，陶瓷的一个重要发展方向就是用作切削工具、滚珠轴承和密封磨环等。作为切削工具，材料由高速钢进展到硬质合金，继而进展到陶瓷，这是一巨大的变革。目前美国硬质合金每年耗用量7000~9000 t，其中一半用作切削刀具。预计在近期内，陶瓷刀具可发展到代替20%的硬质合金的程度。

四、复合材料

复合材料利用了陶瓷的高弹性模量、高硬度和高的屈服强度及塑料或金属的塑性与韧性，用一定工艺使这两种材料复合起来，获得了较理想的力学性能。第一代复合材料是40年代研制成功的玻璃纤维增强塑料，又叫玻璃钢。它是目前生产用量最大的复合材料。1984年统计，世界总产量近200万 t，现每年仍以较高的生产速率递增。1978年，在日本有42%玻璃钢用于建筑，25%用于造船。日本有一半以上的渔船用的是玻璃钢。

碳纤维增强塑料作为第二代复合材料，其强度、弹性模量较玻璃纤维高，而重量更轻。如与钢比较，其比强度是钢的3~5倍，比模量是钢的3~4倍。在美国，碳纤维主要用于航空部门，在飞机中，燃料消耗占运输费用的50%，用1 kg的碳纤维增强塑料可代替3~5 kg的铝合金，飞机发动机每减轻1 kg，就相当于减轻3~5 kg时的能量消耗。因此，在美国的先进战斗机中，碳纤维复合材料占40~50%，对垂直起飞的飞机(包括直升飞机)，所占比例就更高，可达60~65%。而在日本，这类复合材料一直以民用为主，在体育娱乐业中占76%，如制作高尔夫球棒、网球拍、赛艇、划船桨等。

树脂基复合材料的耐热性差,使用温度不超过300℃,且不导电,导热性能也差,金属基复合材料可克服这些缺点,且有更高的疲劳强度和耐磨性能。在日本,用SiC纤维增强铝基的复合材料,已成功地用于制造汽车中的活塞和连杆等零件,特别值得注意的是,生产成本也降低了。

§ 1-3 材料的价格及可得性

材料的价格见表1-4。

表1-4 所列的各种材料价格,是1980年国际市场价格,并以1英镑折合2.2美元计算。近几年,原材料的价格又在看涨,美元兑换率也在变化,所以材料价格只可作为相对比价的参考。

表1-4 材料价格 (以美元/t计, 1980年1月价格表)

材 料	价格/(美元·t ⁻¹)	材 料	价格/(美元·t ⁻¹)
工业用金刚石	50000000	MgO	1990
铂	2800000	Al ₂ O ₃	1100~1760
金	1910000	铸, 加工的板料、棒材、管材	950~1740
银	1140000	铸锭	733
碳-环氧树脂复合材料 (基体占成本60%, 纤维占40%)	330000	铝, 加工的板料、棒材、管材	1100~1670
CFRP(基体占成本30%, 纤维 占60%)	200000	铝锭	961
Co/WC金属陶瓷(即硬质合金)	66000	环氧树脂	1650
钨	26000	玻璃	1500
钽	17200	泡沫塑料	880~1430
钛合金	10190~12700	天然橡胶	1430
聚酰胺	10100	聚丙烯	1280
镍	7031	聚乙烯(高密度)	1250
有机玻璃	5300	聚丙烯	1330
高速钢	3995	硬木	1300
尼龙66	3289	聚乙烯(低密度)	1210
GFRP(基体占成本60%, 制造 成本40%)	2400~3300	SiC	440~770
不锈钢	2400~3100	聚氯乙烯	790
铜, 加工的板料、管材、棒材	2253~2999	胶合板	750
铜锭	2253	低合金钢	385~350
聚碳酸酯	2550	低碳钢, 加工的角钢、板料、棒材	440~480
铝合金, 加工的板料、棒材	2000~2440	铸铁	260
铝锭	2000	铝锭	238
黄铜, 加工的板料、管材、棒材	1650~2336	软木	431
黄铜锭	1505	钢筋混凝土(梁、柱、板)	275~297
		燃油	200
		煤	84
		水泥	53

我国的材料价格暂时还不能与国际市场一致,其中影响因素很多,例如计划经济与商品经济双轨制的影响,我国原材料的生产技术水平以及我国资源情况等,致使钛合金、不锈钢、镍、钴等的价格偏高;即使是我国富有的钨,由于难加工成钨丝,不得不出口成吨的钨砂,换回少量的钨丝成品;塑料在汽车中应用的比例亦较低。

从表1-4中可以看出,尽管碳纤维复合材料性能好,但价格是玻璃纤维的80倍,这就是

玻璃钢普遍被应用，而碳纤维塑料用得较少的原因，至于碳纤维则用得更少。同样，钛合金在许多方面性能优于铝合金，但前者的价格比后者高5倍，钛合金也只有在特殊场合下应用。

从产品的经济性考虑，选材中不仅需考虑原材料的价格，还应注意材料的利用程度。在机械制造业中，我国钢材利用率平均为65%，而美国已达到80%，各种工艺环节造成的材料损失较多，如采用精锻、冷挤压等少、无切屑工艺，可显著提高材料的利用率。另外，材料的质量差，零件的寿命低，也使用户的费用大大增加。例如，1978年统计，我国的汽车、拖拉机用钢约60万t，而备件生产用钢也需60万t左右，其中齿轮配件用钢占13万t。全国轴承用钢中也有近一半（约10万t）作为备件。材料费用在机械产品成本的比例，普遍比国外同类型产品占的比例要高。据统计，在锅炉生产中，原材料成本占67.9%，中小型拖拉机的材料费用占产品成本的60~70%，载重汽车材料费用约占70%。

只有将正确的选材、合理的设计、先进的生产技术这三方面结合起来，才能使材料的价格及可得性与产品的经济性达到完美地统一。

第二章 工程材料的内部结构

材料的成分、加工工艺、内部结构与其宏观性能之间存在着内在联系。材料之所以表现出各种各样的性能,正是由于材料的成分与工艺改变了内部结构,这种联系是材料科学与工程的基础。为了使读者更好地了解材料的基本性能,本章先从三个不同层次—原子间的结合键(力)、原子的排列及晶体材料的显微组织,介绍材料内部结构的基本概念。

§ 2-1 原子之间的结合键

固态材料中原子之间存在着结合力,好像有很多小弹簧把原子联接在一起,使材料保持一定的几何形状,这种结合力又称结合键。原子之间结合力的大小对材料的熔点、弹性模量及其他力学性能有显著的影响,结合力越大,材料的熔点越高,弹性模量越大。根据结合力的强弱可把结合键分为两大类:

(1) 一次键——包括离子、共价和金属键,一次键的结合力比较强,通常在1000~5000 K的温度范围内熔化。

(2) 二次键——指范德瓦耳斯键和氢键,结合力比较弱,一般在200~500 K的温度范围内熔化。

应该注意:实际材料中原子可以由单一的键结合而成,但更多的则是由两种以上的键力结合而成(混合键)。

一、一次键

陶瓷和金属完全靠一次键把原子结合在一起,陶瓷材料的结合键为离子键或共价键,金属则为金属键和共价键。

1. 离子键

氯化钠是离子键结合的典型例子,其余的碱性卤化物(LiBr)、氧化物(Al_2O_3 , MgO)、水泥的组成物(碳酸盐的水化物及氧化物)则全部或部分地由离子键结合而成。

以氯化钠为例,钠原子的原子序数为11,最外层电子数为1,氯原子的原子序数为17,最外层电子数为7。当两种原子接近时,为使体系的能量下降,钠的最外层电子转移至氯原子的最外层电子壳层上,分别形成正离子和负离子,离子键力正是来源于正负电荷的互相吸引。根据库仑定律,两个相反点电荷之间的吸引力与它们之间距离的平方值成反比,所以正负离子的间距缩小,将引起体系能量下降(图2-1),然而正负离子之间并不会在吸引能的作用下无限接近,而是保持一定的平衡距离,这是由于随着正负离子的逐渐接近,它们的电子轨道开始重叠,这种排斥作用使体系的能量重

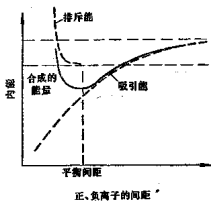


图2-1 从能量的观点分析离子键的形成

新升高, 于是, 如图 2-1 所示, 两种离子在某一平衡距离下, 体系的总能量最低, 形成稳定的离子键结合。

2. 共价键

金刚石、硅和锗是以单一的共价键结合而成, 它们都有很高的弹性模量, 其中以金刚石为最高。在硅酸盐玻璃和陶瓷中 (包括石头、瓷器、陶器、砖、普通玻璃及水泥的组成物), 共价键起着支配的作用。一些难熔金属如钨、钼、钽等也含有共价键的结合。聚合物中的长链分子也是由共价键结合而成, 当然, 聚合物的低模量值并非共价键所致, 在聚合物中, 还含有大量结合力很弱的二次键。

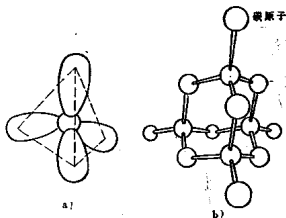


图 2-2 金刚石的方向性共价键

氢分子是共价键结合的最简单例子, 两个相同的原子核建立了一个新的公用电子轨道, 各自的电子进入这一轨道后, 降低了体系的能量, 使两个原子核结合在一起。在工程材料中, 金刚石是一个典型的例子, 它的结构如图 2-2 所示。因为碳原子有四个价电子, 可以和周围四个碳原子建立四个公用电子轨道。这些电子轨道所占有的区域, 在空间构成一个以碳原子为中心的正四面体 (图 2-2 a), 每一轨道从中心指向顶角, 高度对称的轨道形状使金刚石的共价键带有明显的方向性 (图 2-2 b)。其他材料的共价键也表现出不同的方向性特点, 它取决于公用电子对的数目, 这种方向性决定了晶体中原子排列的特征。

3. 金属键

是金属及合金中的主要结合键, 固态金属 (或液态金属) 中具有最高能量的外壳层电子, 倾向于离开自身原子成为公有化的自由电子, 它们在正离子周围自由游荡形成“电子云”, 依靠电子云和金属正离子的吸引力, 把金属原子结合在一起, 这就是金属键 (图 2-3)。

由于电子的自由运动, 金属具有高的导电率。此外, 金属键没有方向性, 所以金属内部的原子总是趋于密集排列, 就像盒子中的小球经反复摇晃后的排列情况一样, 而得到简单的、高原子密度的结构。

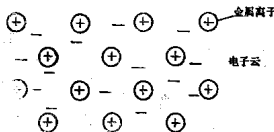


图 2-3 金属键结合示意图

二、二次键

二次键比一次键要弱得多, 然而它仍是材料结合键的重要组成部分。它使聚合物 (例如聚乙烯) 的大分子结合起来成为固态, 这正是聚乙烯具有良好可塑性的内部原因。没有二次键, 水在 -80°C 就会沸腾, 地球上所有的生命也就不再存在。

1. 范德瓦耳斯键

这种键力的本质是一对不带电荷的原子 (或分子) 之间的偶极吸引力。如图 2-4 所示,

原子（或分子）上的电荷永远处于运动的状态，从统计的角度看，电荷在原子核周围的分布具有球形对称的性质，然而在任一瞬时，它相对于原子核是非对称的，这种瞬态分布产生一个偶极矩，它使邻近原子诱生同样大小的偶极矩，两个偶极子互相吸引。显然，范德瓦耳斯吸引力很弱，且随原子距离的增大迅速下降。液氮在 -198°C 保持液态正是靠共价结合的氮分子之间的范德瓦耳斯键力，若将液氮倒在地面上，室温下的热扰动就足以破坏这一键力，液氮便转化为气体，由此可见这种键力之微弱。然而，如果没有这种键，大部分气体就不能液化，人们也就不能从大气中分离出工业用气体来。

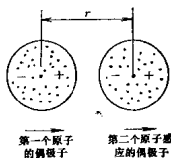


图2-4 范德瓦耳斯键

2. 氢键

是氢原子与两个电负性很强的原子（或原子团）之间形成的键力。水是一个典型的例子，氢键使水在室温下保持液态，冰也是由氢键结合而成的，冰中的每个氢原子把它仅有的一个电子转移给最相邻的氧原子上，使氧获得负电荷，于是，带正电的氢原子（实际为质子）和另一个水分子中的氧原子相互吸引，这一氢原子在相邻水分子的氧原子之间起了桥键的作用（图2-5）。有些聚合物内也存在氢键，它和范德瓦耳斯键一样，使长链分子结合成固态材料。

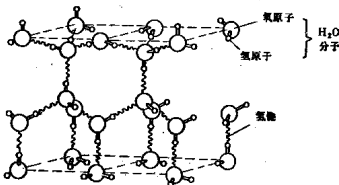


图2-5 冰中水分子的排列及氢键的作用

§ 2-2 固体中的原子排列

本节将讨论固体材料中原子是如何排列的。原子的排列方式对材料的机械性能有着重要的作用，根据固体材料中原子排列规则与否，可将材料分为晶体和非晶体两大类，大多数工程材料，如所有的金属及大部分陶瓷，都是晶体，其中的原子在材料内部按一定的规则在三维空间排列；玻璃以及大部分聚合物都属非晶体，其中的原子没有确定的排列方式，而是无序地堆垛。

一、晶体的原子排列

晶体中以金属晶体的原子排列最为简单且典型，本章以金属晶体为主，介绍晶体的原子排列及有关性能。

1. 原子的密排结构

如前所述，金属键的性质使晶体中的原子尽可能地紧密排列，为简化起见，在讨论金属晶体的结构时，可把原子看成为刚性小球，晶体就是由这些小球堆垛而成。为了得到密排结

构,可先把小球在桌面上尽可能地紧密排列,形成密排原子面(或称晶面),这种排列方式是唯一的,如图2-6所示,每个小球与周围六个小球相接触,该面上有三个方向原子是密排的。密排晶体就是由这些密排晶面在空间一层层平行地堆垛而成,如何堆垛才能得到密排结构呢?从图中可以看出:密排面上每三个相邻原子之间就有一个低谷,相邻的密排面上的原子,必须坐落在这些低谷位置上,才能使晶体真正紧密地排列。仔细观察这些低谷位置的发现,该面上有两套不同的低谷位置,在图2-6中分别用○、●两种符号表示,相邻密排面的原子只能处于其中一套位置上,如果把原始密排面上的原子位置作为A,两套低谷位置分别为B和C,那么密排晶体中,密排面的排列方式只有两种可能性,一种是以 $ABAB\cdots$ 两种位置在空间重复堆垛而成,另一种是以 $ABCBAC\cdots$ 的排列方式堆垛,这两种排列方式正是金属晶体中常见的两种晶体结构。

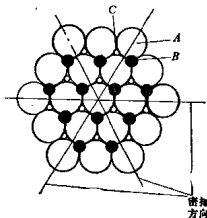


图2-6 原子球的密排排列

2. 三种简单的结构类型

这里,采用另一种形式来描述晶体中原子排列的特征,就是在晶体中取出一个基本组成单元(称为晶胞),因为晶体中的原子以简单的方式在空间重复排列,所以晶胞可以代表晶体结构的特征。

金属晶体中常见的晶胞有面心立方、体心立方及密排六方。图2-7 a 为面心立方晶胞,面心立方晶胞为立方体,立方体的顶角以及立方体六个面的面心上都有一个原子,这样的晶胞在空间三维方向堆垛构成面心立方晶体。实际上,面心立方晶体就是前面所描述的密排面按 $ABCBAC$ 位置堆垛的密排晶体。从图中可以看出:晶胞的三个立方体面的对角线是原子密排方向,它们组成晶体的原子密排面。如果沿着密排面的法线方向,即立方体的对角线方向,观察这个晶胞,并把所有原子位置投影在同一平面上(图2-7 a),那末,体对角线的端点,即晶胞原点的原子处于中心位置,晶胞内的两个密排面上的原子位置与顶角原子不重合,且它们彼此间也错开一定位置,对角线另一端点上的原子则又与原点重合,所以它们的排列方式就是 $ABCBAC\cdots$ 。

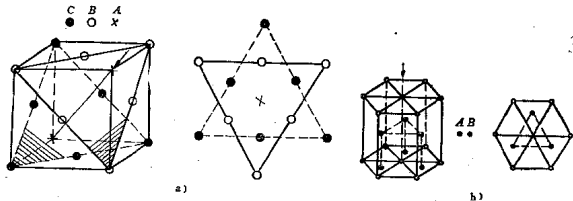


图2-7 面心立方和密排六方晶胞结构

密排六方晶胞的结构如图2-7b所示。在六方柱体的每个顶角上和、下底面的中心都有原子存在，此外晶胞的中心还有三个原子。显然，此晶胞的上、下底面都是原子密排面，上、下底面的原子位置重合，晶胞中间的三个原子正好坐落在底面三个原子的间隙之间，实际上这三个原子与相邻晶胞的原子连在一起也构成一个密排面，所以密排六方结构就是由密排面为 $ABABAB$ 的方式堆垛而成。

体心立方的结构如图2-8所示，除了立方体顶角上有原子外，立方体的中心还有一个原子，故称体心立方。这种晶体的立方体对角线上的原子是密排的，但找不到一个原子完全紧密排列的原子面，所以它的原子排列密集程度不如面心立方和密排六方，只是一个比较密排的晶体。

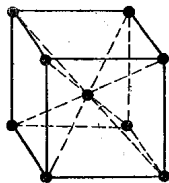


图2-8 体心立方的晶体结构

3. 实际金属的晶体结构及同素异构转变

实际金属晶体大都为上述三种结构类型，例如：铜、银、金、铝、镍等都是面心立方晶体，面心立方结构赋予材料优异的塑性，因此这些金属可以加工成极薄的金属箔。镁、锌、镉是密排六方的晶体结构，它们的塑性都很差，可见金属的晶格类型是影响材料塑性的主要因素。铁、钨、钼、铬以及910℃以下的纯铁都是体心立方结构，这些材料的塑性往往介于面心立方及密排六方之间。

为什么不同的金属有不同的晶体结构呢？为什么铝是面心立方，而铁是密排六方呢？问题的答案是：面心立方晶体使铝具有最低的能量，而密排六方使铁晶体具有最低的能量，也就是说，任何材料都是选择各自能量最低的结构作为其存在的状态。在大多数情况下，金属取密排或较密排的结构，但在少数情况下，非密排结构也能使金属具有最低的能量。

金属以不同的结构存在时，它们在能量上的差别往往是很小的，因此同一金属在不同的温度范围可能得到不同的晶体结构，这种现象称为同素异构现象。材料在冷却或加热时，发生的晶格类型变化就是同素异构转变，这一转变给金属带来一些特殊的行为，例如：锡在低温时会发生晶体结构转变，低温下的锡晶体性质极脆，因此由于转变产生的应力，可使低温下的锡晶体破碎为粉末，这一现象曾给1912年南极探险队带来灾难性的后果，他们的燃料全部从燃料箱的焊锡处渗漏，以至全队覆灭在南极。此外，纯铁在910℃的同素异构转变——从面心立方转变为体心立方，这一固态转变是钢铁材料能通过热处理而大幅度地改变性能的基础。其他一些金属如钛及钛合金、钴及钴合金也存在同素异构转变及类似的热处理特性。

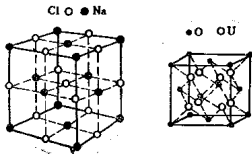


图2-9 晶体结构

a) NaCl b) UO_2 的晶体结构

4. 其他晶体的原子排列

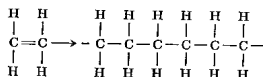
离子晶体是由两种不同种类的原子堆垛而成的，例如氯化钠 ($NaCl$) 和氟化钙 (CaF_2) 晶体。但是这些化合物的晶体结构仍是简单的，如图2-9a中的 $NaCl$ 晶胞属于面心立方结构， KCl 和 MgO 的结构与它相同。当两类原子的比值不是1:1，如核燃料 UO_2 ，其结构就更为复

杂一些,但仍属立方晶体。共价键的金刚石也属于立方晶体。在离子和共价晶体中,结合键的性质常对性能起着更重要的作用;而原子排列方式的影响成为次要的,因此这里不予详细讨论。

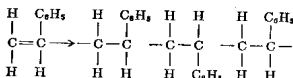
二、聚合物中的原子排列

聚合物的结构要比金属复杂得多,正由于如此,聚合物表现出非常特殊和多变的机械性能,例如橡皮筋的高弹性及聚乙烯的高成型能力都与其原子排列有关。

聚合物的结构是由一个大的链状分子所组成,主链上的原子常以共价键结合,大多数主链上的原子为碳原子(现在人们已开始合成硅基聚合物),典型的高分子聚合物是聚乙烯,它是通过催化聚合作用将乙烯聚合构成大分子,可以写成:



同样,聚苯乙烯是由苯乙烯聚合而成:



聚合物的长链分子犹如面条,是柔软的,可以任意弯折(图2-10),图2-11表示了聚合物分子是如何堆成实际材料的,根据长链分子在材料内的排列特征,可以把聚合物分为晶态和非晶态两大类,长链分子规则地反复折叠构成晶态聚合物,而任意折叠的为非晶态聚合物。大多数聚合物都是非晶态的,晶态聚合物仅能以与非晶态混合的形式出现(图2-11 a),很难得到单一的晶态聚合物。此外,相邻的分子链是靠范德瓦耳斯键力“凝聚”在一起(图2-11 b),有时链与链之间也会形成共价键结合,称它为交联,在温度较高时,分子链熔化,交联便是分子链间结合的主要方式(图2-11 c),共价交联数越多,则聚合物的硬度越高,环氧树脂的高硬度正是内部大量的共价交联所致。

三、非晶态玻璃的原子排列与玻璃化转变

玻璃的主要组成为氧化硅,如果液态氧化硅从高温冷却得极为缓慢,可能形成晶态的氧化硅,氧化硅晶体的原子排列如图2-12 a所示。它与金属的凝固一样,有一个确定的凝固温度 T_s ,形成晶体后,体积发生突变(图2-13)。然而,在大多数情况下,熔融的氧化硅冷却时的变化情况与此不同,液体可以过冷至 T_s 以下而不发生晶态转变,保持过冷液体的状态,由于温度的下降使液体的粘度急剧增加,在到达图中的 T_g 温度时,液态完全固化,但内部仍然保留液态的结构,原子排列没有一定的周期性(图2-12 b),这种固态称为玻璃态, T_g 称为玻璃化转变温度。如图

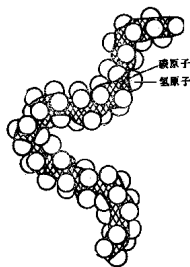


图2-10 聚乙烯的分子示意图