

绪 论

材料、能源和信息被人们称为现代技术的三大支柱。材料是人类制作各种工具和产品,进行生产和生活的基本物质基础,它是社会发展的基础和科学技术进步的关键。能源和信息的发展往往又依赖于材料的进步。例如,汽车涡轮增压发动机较自然吸气发动机在对缸体的强度和耐热性能上的要求要高一些,航空发动机要求更高;用新型陶瓷材料制成的高温结构陶瓷柴油机可节省柴油约 30%,效率提高约 50%。最近研制的涡轮发动机陶瓷叶片可在 1400℃左右工作,这是普通钢铁材料无法达到的。可见,开发新材料可提高现有能源的利用效率。同时,半导体材料、传感材料和光纤材料的开发,促进了信息技术的发展。新型产业的发展,无不依赖材料的进步。例如,开发海洋探测设备及各种海底设施需要耐压、耐蚀的新型结构材料;卫星宇航设备需要轻质高强的新材料;在医学上,制造人工脏器、人造骨骼、人造血管等要使用各种具有特殊功能且与人体相容的新材料。由于材料在人类社会中的重要作用,世界上许多发达国家均把材料科学作为重点发展的学科,材料的研究和生产水平是一个国家工业技术水平的重要标志。

0.1 材料的发展史



材料的发
展历史

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的物质,是人类进行生产和社会活动的物质基础。材料的研究和发展已成为衡量人类社会文明程度及生产力发展水平的重要标志,因此,历史学家按照人类使用材料的种类和性质差异把历史时代分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、钢铁时代,如图 0-1 所示。

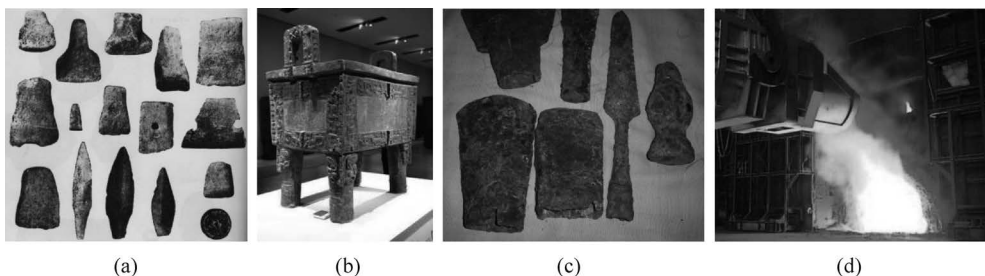


图 0-1 人类历史时代

(a) 石器时代; (b) 青铜器时代; (c) 铁器时代; (d) 钢铁时代

早在 100 万年以前,人类开始用石头做工具,使人类进入旧石器时代。大约 1 万年前,人们就知道对石头进行加工,使之成为精致的器皿或工具,人类从此进入新石器时代。公元

前约 5000 年,人类在不断改进石器和寻找石料的过程中发现了天然的铜块和铜矿石,在用火烧制陶器的生产中发明了冶铜术,后来又发现把锡矿石加到红铜里一起熔炼,制成的物品更加坚韧耐磨,这就是青铜,人类从此进入青铜器时代。公元前 14 世纪—公元前 13 世纪,人类开始使用并铸造铁器,当青铜器逐渐被铁器广泛替代时,标志着人类进入了铁器时代。到 19 世纪左右,人类发明了转炉和平炉炼钢,世界钢产量飞速发展,人类进入钢铁时代。此后不断出现新的钢种,铝、镁、锆、钛和很多稀有金属及合金都相继出现并得到广泛应用。如新中国成立后,我国用碳素结构钢(Q235,旧牌号为 A3)建造了武汉长江大桥,用强度较高的合金钢 Q345(16Mn)建造了南京长江大桥,用强度更高的低合金结构钢 16MnVN 建成了九江长江大桥,金属材料已成为当前最重要的工程材料。到 2007 年,全球的粗钢产量已超过 13 亿 t,我国钢铁材料年产量已超过 2 亿 t,成为世界上最大的钢铁生产和消费国家。但是,由于我国钢铁行业多年来积累的产能过剩、区域布局和产业结构不合理、环境污染严重等一系列问题,导致我国钢铁企业的生产存在传统产品过剩、高附加值钢铁产品竞争力不足等问题。

20 世纪初,由于物理和化学等科学理论在材料技术中的应用,从而出现了材料科学。在此基础上,人类开始了人工合成材料的新阶段。人工合成塑料、合成纤维及合成橡胶等合成高分子材料,加上已有的金属材料和陶瓷材料(无机非金属材料),构成了现代材料。目前,世界三大有机合成材料(树脂、纤维和橡胶)年产量逾亿吨。20 世纪 50 年代金属陶瓷的出现标志着复合材料时代的到来。人类已经可以利用新的物理、化学方法,根据实际需要设计独特性能的复合材料。20 世纪后半叶,新材料研制日新月异,出现了“高分子时代”“半导体时代”“先进陶瓷时代”和“复合材料时代”等提法,材料产业进入了高速发展新阶段。

随着科学技术的发展,尤其是材料测试分析技术的不断提高,如电子显微技术、微区成分分析技术等的应用,材料的内部结构和性能间的关系不断被揭示,对于材料的认识也从宏观领域进入微观领域。在认识各种材料的共性基本规律的基础上,人们正在探索按指定性能来设计新材料的途径。在认识各种材料的共性基本规律的基础上,人类正在探索在极端服役条件下按指定功能开发设计的新型材料。

0.2 工程材料的分类



工程材料
的分类

工程材料主要指应用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域中的材料,用于制造工程构件、机械零件、刀具夹具和具有特殊性能(耐酸、耐蚀、耐高温等)的材料。工程材料学作为一门材料学科,主要研究与材料相关的成分、结构、组织、工艺、性能及应用之间的关系。

工程材料种类繁多,有不同的分类方法,比较通用的分类方法是按照材料的结合键(离子键、共价键、金属键等)进行分类。按其结合键的性质,通常将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类,其中最基本的是金属材料,如图 0-2 所示。也有文献将工程材料按照用途或使用领域进行分类,如按照用途分类,可分为结构材料(如机械零

件、工程构件)、工具材料(如量具、刃具、模具)和功能材料(如磁性材料、超导材料等);按使用领域分类,可分为机械工程材料、建筑工程材料、能源工程材料、信息工程材料和生物工程材料等。

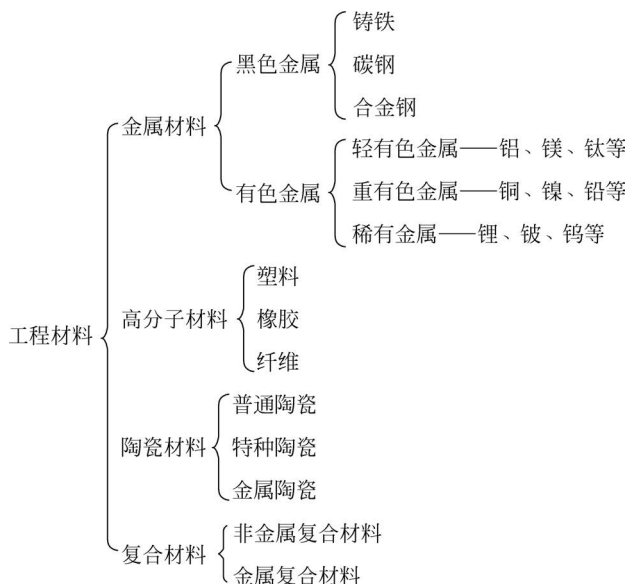


图 0-2 工程材料按结合键进行的分类

0.2.1 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,其次是过渡族金属。由于金属构成原子之间的结合键基本上是金属键,所以金属材料通常为金属晶体材料。

工业生产中把金属和合金分为两大类:

(1) 黑色金属——主要指铁、锰、铬及其合金。因为铁的表面常常生锈,盖着一层黑色的四氧化三铁与棕褐色的氧化铁的混合物,看上去就是黑色的,因此被称为黑色金属。常说的“黑色冶金工业”,主要是指钢铁工业。最常见的合金钢是锰钢与铬钢,实际上,铁、锰、铬都不是黑色的,纯铁是银白色的,锰是灰白色的,铬是银白色的。铁、锰、铬都是冶炼钢铁的主要原料,而钢铁在国民经济中占有极其重要的地位,也是衡量国家实力的重要标志。黑色金属的产量约占世界金属总产量的 95%。

(2) 有色金属——黑色金属以外的所有金属及其合金。有色金属是国民经济发展的基础材料,航空、航天、汽车、机械制造、电力、通信、建筑、家电等绝大部分行业都有以有色金属材料为原材料的制造单元。随着现代化工、农业和科学技术的突飞猛进,有色金属在社会和经济发展中的地位越来越重要。它不仅是世界上重要的战略物资和重要的生产资料,而且还是人类生活中不可缺少的消费物资的重要材料。

北京科技大学新金属材料国家重点实验室主要从事新金属结构材料的基础研究、新金属功能材料的基础研究、材料制备新技术与新工艺的基础研究等。

0.2.2 高分子材料

高分子材料为有机合成材料,亦称聚合物。它具有较高的强度、良好的塑性、较强的耐腐蚀性、很好的绝缘性以及重量轻等优良性能,在工程上是发展最快的一类新型结构材料。

和无机材料一样,高分子材料按其分子链排列有序与否,可分为结晶聚合物和无定型聚合物两类。结晶聚合物的强度较高,结晶度取决于分子链排列的有序程度。

高分子材料种类很多,工程上通常根据机械性能和使用状态将其分为三大类:

(1) 塑料——指强度、韧性和耐磨性较好、可制造某些机械零件或构件的工程塑料,分为热塑性塑料和热固性塑料两种。

(2) 橡胶——指经硫化处理、弹性特别优良的聚合物,有通用橡胶和特种橡胶两种。

(3) 合成纤维——指由单体聚合而成、强度很高的聚合物,通过机械处理所获得的纤维材料。

四川大学高分子材料工程国家重点实验室主要围绕高分子材料的高性能化和加工开展应用基础研究。

0.2.3 陶瓷材料

陶瓷材料是人类应用最早的材料。硬度高,性能稳定(熔点高、耐腐蚀),但脆性大,可以制造工具和模具;在特殊情况下也可以用作结构材料。

除了金属材料之外的无机材料都属于无机非金属材料,在众多的无机非金属材料中,以陶瓷的种类最多,应用最广。无机非金属材料是 20 世纪 40 年代以后,随着现代科学技术的发展从传统的硅酸盐材料演变而来的,由于大部分无机非金属材料含有硅和其他元素的化合物,所以又叫作硅酸盐材料。硅酸盐是指硅、氧与其他化学元素(主要是铝、铁、钙、镁、钾、钠等)结合而成的化合物的总称。它在地壳中分布极广,是构成多数岩石(如花岗岩)和土壤的主要成分。如以硅酸盐为主体,无机非金属材料有陶瓷、玻璃、搪瓷、水泥、耐火材料、砖瓦等各种制品。

陶瓷材料按照成分和用途,可分为:

(1) 普通陶瓷(或传统陶瓷)——主要指硅、铝氧化物的硅酸盐材料。

(2) 特种陶瓷(或新型陶瓷、高技术陶瓷、精细陶瓷、先进陶瓷)——主要指高熔点的氧化物、碳化物、氮化物、硅化物等烧结材料。

(3) 金属陶瓷——主要指用陶瓷生产方法制取的金属与碳化物或其他化合物的粉末制品。

武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室主要从事水泥与胶凝材料、浮法玻璃、建筑节能围护材料、高性能混凝土、环保陶瓷等方面的研究。

0.2.4 复合材料

复合材料就是两种或两种以上不同材料的组合材料,其性能是它的组成材料所不具备的。复合材料可以由各种不同种类的材料复合组成,它的结合键非常复杂,在强度、刚度和耐腐蚀性方面比单纯的金属、陶瓷和聚合物都优越,是一种特殊的工程材料,具有广阔的发展前景。

武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室主要开展面向国家重大工程和支柱产业的先进复合材料、面向新能源技术的高效能源转换和储存材料、面向生命科学的纳米复合生物材料、面向信息技术的信息功能材料和面向变革性技术的前沿新材料等方面的研究。

0.3 工程材料与机械工程

机械工程是一门利用物理定律为机械系统作分析、设计、制造及维修的工程学科。机械工程是以有关的自然科学和技术科学为理论基础,结合生产实践中的技术经验,研究和解决在开发、设计、制造、安装、运用和维修各种机械中的全部理论和实际问题的应用学科。机械工程在工业领域扮演着越来越重要的角色,涉及传统制造业、交通行业、医疗行业、机器人与智能制造行业等。机床、汽车、超声仪等机械产品通常是由上万个形状不同的零件组装而成,这些零件是用各种不同的材料制造而成的。

随着我国社会主义现代化建设的不断发展,现代机械装备正朝着大型、高速、耐高温、耐高压、耐低温、耐受恶劣环境影响等方向发展。在这样复杂苛刻的工况条件下,要求各种机械装备的性能优异,产品质量稳定,能安全地运行和使用。一台机器要真正发挥这些优异的技术功能,除了要有合理的设计及正确的使用保养外,合理的选材和加工是至关重要的一步。如果选材和加工不当,轻则使机械的质量性能下降,重则使装备断裂失效甚至酿成安全事故,因此工程技术人员在设计机械产品时,要根据零件的使用工况选用合适的材料,制订材料正确的加工工艺,限定使用状态下零件内部的显微组织,校核能否在规定的寿命期限内正常服役,等等。

如果工程技术人员没有工程材料的知识背景,不考虑服役条件,照抄别人的用材方案,或者在设计零件时,大量选用所谓的“万能”材料,如45钢,这样的选材方法会给产品埋下安全隐患,这已被许多安全事故所证实。在材料选用和处理过程中,零件材料使用状态下的微观组织是决定机器能否正常服役的重要因素。例如,改革开放初期,国内某企业生产的电冰箱,产品设计合理,各项性能指标都不低于甚至超过国外某同款电冰箱,但用户反映不耐用,压缩机常常出现故障。后来把两种电冰箱制冷泵中的柱塞用金相显微镜和电子显微镜检查分析后发现,国外某同款电冰箱制冷泵的柱塞用优质球磨铸铁制成,其显微组织是在珠光体基体上分布着球状石墨,而国内某企业生产的电冰箱使用的是没有经过任何处理的普通碳素钢,其组织为耐磨性较差的铁素体和珠光体。如果设计人员不具备工程材料的专业知识而草率选择产品所使用的材料,将给产品的质量和公司声誉带来不良的影响。例如,2013

年3月15日,某知名汽车公司的“生锈门”事件导致其公司形象严重受损。因此,机械工程设计 and 制造人员必须具备工程材料的基本知识。

目前,机械工业正朝着高速、重载、高效、节能、自动化程度高和使用寿命长的方向发展。在机械产品设计及其制造和维修过程中,所遇到有关机械工程材料的选用和热处理工艺路线方面的问题日趋增多,机械工业的发展与工程材料学科之间的关系更加密切。新型先进材料的发展是开发新产品和提高其质量的支撑基础。机械产品的可靠性和先进性,除设计因素外,在很大程度上取决于所选用材料的质量和性能。新材料的发展是开发新型产品和提高产品质量的物质基础。各种高强度材料的发展,为发展大型结构件和逐步提高材料的使用强度等级、减轻产品自重方面提供了条件;高性能的高温材料、耐腐蚀材料为开发和利用新能源开辟了新的途径。现代发展起来的新型材料有新型纤维材料、功能性高分子材料、非晶质材料、单晶体材料、精细陶瓷和新合金材料等,对于研制新一代的机械产品有重要意义。如碳纤维比玻璃纤维的强度和弹性更高,用它制造飞机和汽车等结构件,能显著减轻自重而节约能源。精细陶瓷如热压氮化硅和部分稳定结晶氧化锆,有足够的强度,比合金材料有更高的耐热性,能大幅提高热机的效率,是绝热发动机的关键材料。还有许多与能源利用和转换密切相关的功能材料,它的突破会引起科技的巨大变革。

0.4 “工程材料”课程的任务与内容

“工程材料”课程是机械类专业(机械工程及自动化、车辆工程、材料成型及控制工程、汽车服务工程、能源与动力工程、测控技术与仪器、工业工程等)和近机械类专业(自动化、电气工程及自动化等)的一门专业基础课。其目的是让学生从微观上认识工程材料,学习工程材料的基本理论知识,掌握材料的成分、结构、组织与性能之间的关系,根据零件服役条件和失效方式合理选择和使用材料,正确制定零件的加工工艺路线。

工程材料的内容包括:

- (1) 工程材料的基础理论。即材料的性能、材料的结构、材料的凝固、二元合金及铁碳相图、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理。
- (2) 工程材料的具体分类。即合金材料(含工业用钢、铸铁、有色金属及合金)、高分子材料、无机非金属材料、复合材料、功能材料、纳米材料。
- (3) 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用。

工程材料是一门从生产实践中发展起来,又直接为生产服务的科学,在学习时不仅要注意学习基本理论,还要重视本课程的相关实验和课堂讨论,注意理论联系生产实际。从而培养学生对工程材料及其加工工艺的兴趣,提高学生的实践能力和创新意识。

复习思考题

1. 现代技术的三大支柱是什么?
2. 工程材料的定义是什么? 主要研究哪些内容?

3. 根据原子结合键的不同,工程材料是如何分类的? 列出生活中至少 10 种常见的物品,它们分别主要由哪一类工程材料所构成?



自测题 0

材料的原子结合方式及性能

随着科学技术的发展和工程应用领域的不断拓展,新材料和新工艺不断涌现,工程材料的性能也在不断改善和提高,日益增长的工程材料不断地满足着持续增长的工程应用需要。无论是通过改性来提高现有工程材料的性能水平,还是研发新的工程材料,都必须建立在对材料基础科学理论认识基础之上,只有从理论上阐明其本质,掌握其规律,才能指导工程实践。

工程材料所涉及种类繁多,包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料等。尽管不同类别材料有其自身的特点及应用场景,但追根溯源,它们总有许多共性和相通之处。材料的性能主要取决于其化学成分、组织结构和加工工艺等,成形技术对毛坯材料组织结构的形成和状态有着直接的影响。因此,学习材料的原子结合方式、结合力与结合键、宏观和微观组织结构与材料性能之间关系的理论对于掌握工程材料及其应用十分重要。

1.1 材料的结合方式与结合键

中学物理提到,物质是由原子、分子、离子构成的。原子是化学变化中的最小粒子,原子包含原子核和核外电子,原子核中有质子和中子;分子是原子通过共价键结合而形成的;离子是原子通过离子键结合而形成的。组成物质的基本单元——原子、分子或离子材料在三维空间有规则地周期性排列的固体称为晶体。金属材料通常都是晶体材料,但为什么同样以金属键结合的晶态铁与晶态铝在塑性上有很大的差异呢?研究表明,材料的性能不仅与其组成原子的性质及原子间结合键的类型有关,还与晶体中原子、分子或离子在三维空间长程有序的排列方式有关。

1.1.1 晶体和非晶体

固态物质按照其原子、分子或离子的聚集状态可分为两大类:晶体和非晶体。晶体是指原子、分子或离子在三维空间有规则地周期性重复排列的一类物质,晶体中原子的规律性排序又称“长程有序”。自然界中除少数物质,如普通玻璃、松香(以松树松脂为原料,通过不同的加工方式得到的非挥发性天然树脂)、石蜡、沥青、赛璐珞(硝化纤维塑料,是塑料的一种,透明,可以染成各种颜色,容易燃烧,用来制造玩具、文具等,旧称假象牙)外,包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。

晶体的特点:①结构有序;②有固定的熔点;③物理性质表现为各向异性;④在一定条件下有规则的几何外形。常见的晶体有石英、明矾、云母、结晶盐、水晶、糖、味精等。

非晶体是指原子、分子或离子在其内部沿三维空间呈紊乱、无序排列的一类物质。虽然非晶体在整体上是无序排列的,但在很小范围内原子排列还是有一定规律的,原子的这种规律排列称“短程有序”。典型的非晶体有玻璃、松香、石蜡、沥青、赛璐珞等,如图 1-1 所示。

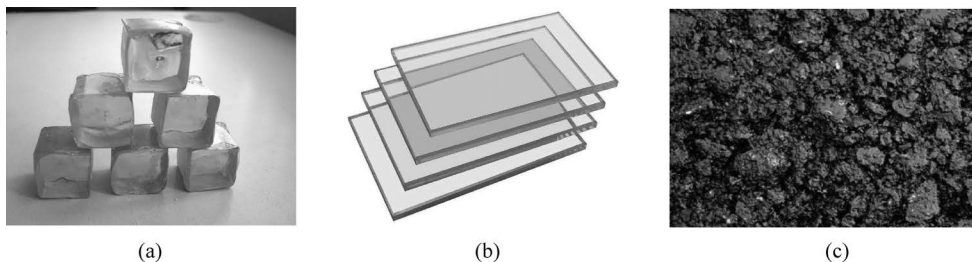


图 1-1 常见的非晶体
(a) 松香; (b) 普通玻璃; (c) 沥青

非晶体的特点: ①结构无序; ②没有固定的熔点; ③物理性质表现为各向同性; ④热导率和膨胀性小; ⑤塑性变形大; ⑥组成非晶体的化学成分变化范围大。

晶体具有长程有序的特点,但在较小范围内存在缺陷,即在较小范围内可能存在无序性;非晶体可能具有短程有序的特点,即在很小的范围内存在有序性。晶体和非晶体在一定的条件下是可以相互转化的。如通常是晶体的金属,如果将它从液态骤冷(10^6℃/s)到固态,便可使其具有非晶体的特征。这种非晶态金属被称为玻璃态金属;玻璃态金属经过长时间高温也可形成晶态玻璃。绝大部分的工程材料均为晶体物质。

1.1.2 结合力与结合能

理论上,当元素的原子相互距离为无限远时,彼此间是不存在相互作用的。当它们相互靠近时,便会发生相互作用。这种相互作用既有吸引,也有排斥。无论采取什么方式结合,吸引都是来自异号电荷的库仑相互作用;排斥则一方面来自同号电荷的库仑相互作用,另一方面来自泡利不相容原理决定的电子间相互作用。原子间结合键的强弱对材料的性能有着直接的影响。为了定量地描述结合键的强弱,通常可以计算得到原子间的结合力和结合能。

下面以离子键为例简要介绍原子间的结合力与结合能。在离子键结合中,正离子和负离子之间的库仑力使二者相互吸引,库仑力 $F_c(N)$ 为

$$F_c = -k_0 \frac{(Z_1 q)(Z_2 q)}{a^2}$$

式中, k_0 为静电力常量, $k_0 = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$; Z_1 为正离子的价数; Z_2 为负离子的价数; q 为电子的电量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; a 为正离子和负离子之间的距离, m 。

当正离子和负离子相距过近时,电子云的场发生相互排斥,该排斥力 $F_r(N)$ 为

$$F_r = -\frac{bn}{a^{n+1}}$$

式中, b 、 n 为经验常数,对离子键化合物, $n=9$ 。

两离子间的作用力 F 为库仑力 F_c 与排斥力 F_r 之和,即

$$F = -k_0 \frac{(Z_1 q)(Z_2 q)}{a^2} + \left(-\frac{bn}{a^{n+1}} \right)$$

将作用力对距离积分,即得到正离子和负离子间的相互作用能 $E(\text{eV})$ 为

$$E = \int_0^{+\infty} F da$$

图 1-2 与图 1-3 分别显示了两离子之间的作用力和作用能与离子间距的关系。对于金属键和共价键,上述关系式会发生变化,但基本规律是一致的。因此,图 1-2 与图 1-3 可作为描述材料内部原子间结合力与结合能的基本规律。

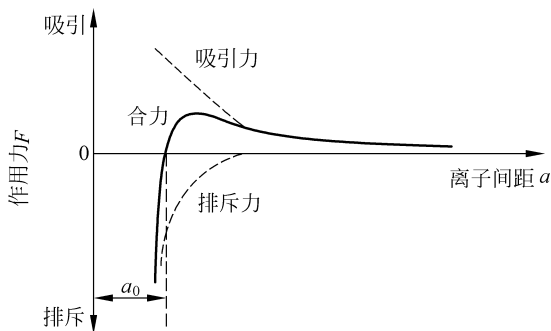


图 1-2 两离子间的作用力与离子间距的关系

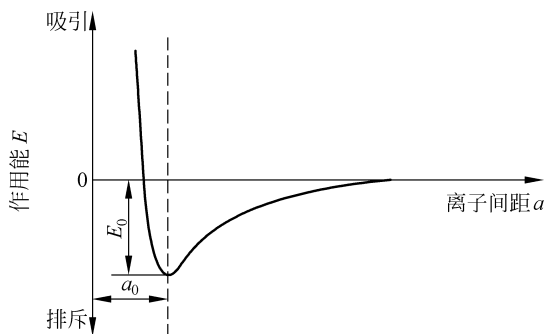


图 1-3 两离子间的作用能与离子间距的关系

由图 1-2 和图 1-3 可知,当两个原子之间的距离为 a_0 时,吸引力与排斥力相等;当两个原子之间的距离小于 a_0 时,排斥力大于吸引力,两原子被推开;当两个原子之间的距离大于 a_0 时,吸引力大于排斥力,两原子被拉近。因此, a_0 为两原子的平衡距离。此时,相互作用能处于最小值,即系统处于能量最小的状态,这是最稳定的状态,也是平衡状态。原子间距大于或小于这个间距均会导致系统能量升高,使之处于不稳定状态。材料的许多性质受结合能的影响,材料的结合能不同,其性质也不同。

1.1.3 材料的结合键

工程材料种类繁多,可以有不同的分类方法。比较科学的方法是根据材料的结合键进