



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工业设计材料 与表面处理

(第2版)

高岩 主编

国家级规划教材

作者权威,学术领先

面向21世纪教学改革

全国优秀出版社倾力打造



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工业设计材料与表面处理

(第2版)

主编 高 岩  
参编 朱 敏 刘 卅 周曦亚  
刘亚俊 欧阳波  
主审 朱 敏

国防工业出版社

北京·

## 设计材料表面处理 内 容 简 介

本书是普通高等教育工业设计专业的一门必修专业基础课。根据工业设计专业的特点,本书重点介绍三部分内容:一是各种常用工程材料(包括金属和非金属材料)的主要组成、性能和特点;二是各种常用工程材料的成型工艺;三是材料的各种表面处理方法。

本书在介绍这三部分内容时,贯穿各种常规材料和表面处理方法与工业产品造型设计的联系及大量应用实例与图片,以增强读者的感性认识。

本书可供工程设计专业的院校师生使用,也可供相关专业的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工业设计材料与表面处理 / 高岩主编. —2版. —北京:  
国防工业出版社, 2008.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-118-05905-2

I. 工... II. 高... III. 工程材料—高等学校—教材  
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 122366 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 插页 10 印张 16½ 字数 376 千字  
2008 年 9 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

工业设计作为一门新兴的专业,其毕业生不但要具有坚实的设计基础知识、先进的设计思想和熟练的设计表达能力,还要具有相当的工程基础知识,这样才能使其工业设计思想是有的放矢的。工业设计材料及其表面处理工艺是工业设计理念得以实施的有效载体之一。任何工业产品设计的实施都是建立在可选用的工程材料基础之上,因此在工业设计活动中必然要考虑材料的性质与特点,工业设计和材料工程有着密不可分的关系。

《工业设计材料与表面处理》是普通高等教育工业设计专业的一门必修专业基础课。根据工业设计专业的专业特点,本书重点介绍三部分内容:一是各种常用工程材料(包括金属和非金属材料)的主要组成、性能和特点;二是各种常用工程材料的成型工艺;三是材料的各种表面处理方法,因为材料的表面处理技术是赋予常规材料特殊的表面功能和性能的有效途径。本书在介绍这三部分内容时,应用大量实例与图片说明各种常规材料和表面处理方法及工业产品造型设计,以增强读者的感性认识。关于材料的机加工成型方法,本书作简要的介绍。

本书在再版的过程中进行了如下调整:

1. 结合工业设计专业的特点,精简了原教材中的文字部分,并对第一版中的粘结剂一节进行了较大的删减。
2. 在各种材料的介绍中增加了工业设计实例的介绍,并就设计实例中材料选择的依据及实际产品的成型特点进行了介绍。
3. 对全书的排版进行了较大幅度的调整,并对图片部分采用了彩色印刷,以便能更充分地表现设计产品的特点。

本书由华南理工大学材料加工工程专业高岩主编。参加编写工作的人员有:第一章由华南理工大学材料加工工程专业朱敏编写,第二章及第五章由华南理工大学材料加工工程专业高岩编写,第三章由华南理工大学高分子材料专业刘卅编写,第四章由华南理工大学无机材料专业周曦亚编写,第六章由华南理工大学机械制造及自动化专业刘亚俊编写。各章中有关各种材料及工艺方法与工业设计的关系及应用实例的小节由华南理工大学工业设计专业欧阳波统一编写。全书由华南理工大学朱敏主审。

需要指出的是,由于编者水平有限,且对工业设计专业的特点认识不够深入,因此本书在内容编排上可能有不当或不足之处。恳请本书的读者,特别是工业设计领域的专家和使用本书的学生对本书的内容多提宝贵的意见和建议,以便我们进一步完善此书,使它成为对工业设计专业的学生真正有实用价值的一本书。

编者  
2008年7月

# 目 录

第一章 引论	1
第一节 材料与工业设计的关系及其在工业设计中的地位	1
一、材料是工业设计的物质基础	2
二、材料与工业设计相互促进	2
三、材料科学与工程是工业设计的基础理论之一	2
第二节 材料的基本结构特征与一般性质	3
一、材料中原子键合的方式与材料的分类	3
二、材料的基本性质与材料内的原子结合键的关系	5
三、材料的基本结构	8
四、实际材料的结构特点	11
五、材料中的相变与组织结构变化	13
六、材料的性能与材料的组织结构的关系	18
第三节 工业设计中选用材料的基本原则	20
一、工业设计和工程设计的区别	20
二、材料选择的原则	21
参考文献	23
第二章 金属材料及其成型技术	24
第一节 钢铁材料	24
一、铁碳合金相图	24
二、典型的 Fe - C 合金的成分与组织	26
三、碳素钢	29
四、合金钢	31
五、不锈钢	35
六、铸铁	37
第二节 有色金属材料	39
一、铝及其合金	39
二、铜及其合金	41
三、镁和钛合金	43
第三节 金属材料的成型技术	45
一、金属的液态(铸造)成型工艺	45

二、金属的塑性成型工艺 .....	49
三、金属的固态成型(连接成型) .....	53
第四节 金属材料的热处理 .....	58
一、热处理的基本原理 .....	59
二、钢的普通热处理 .....	62
三、钢的表面处理与化学热处理 .....	64
第五节 金属材料与产品设计的关系 .....	65
一、金属材料的艺术特性 .....	65
二、金属材料的造型特点 .....	67
三、金属材料在产品设计中的实际运用 .....	68
参考文献 .....	71
<b>第三章 高分子材料及其成型技术</b> .....	72
第一节 高分子材料概述 .....	72
一、高分子材料的力学性能特点 .....	73
二、高分子材料的理化性能特点 .....	73
三、高分子材料的分类 .....	75
第二节 工程塑料及其成型工艺 .....	76
一、塑料的分类与应用 .....	76
二、工程塑料的性能特点 .....	91
三、工程塑料的成型工艺 .....	95
四、塑料制品的二次加工 .....	103
五、某些功能塑料制品的制备工艺 .....	104
第三节 木材及其成型工艺 .....	106
一、木材的性质 .....	106
二、木材加工工艺 .....	111
三、木制品的生产与装饰 .....	116
第四节 胶黏剂 .....	119
一、胶黏剂概述 .....	119
二、粘接原理及胶接工艺 .....	122
第五节 高分子材料与产品设计的关系 .....	127
一、高分子材料的艺术特性 .....	127
二、高分子材料的成型特点 .....	130
三、高分子材料在产品设计中的实际运用 .....	131
参考文献 .....	133
<b>第四章 无机非金属材料及其成型技术</b> .....	134
第一节 陶瓷材料及其成型工艺 .....	134
一、陶瓷材料的分类、性能及应用 .....	134
二、陶瓷材料的制备工艺 .....	149

第二节 玻璃及其成型工艺	159
一、玻璃的分类、性能和应用	159
二、玻璃的成型工艺	167
第三节 无机非金属材料与产品设计的关系	178
一、玻璃材料与产品设计的关系	178
二、陶瓷材料与产品设计的关系	179
参考文献	182
<b>第五章 材料表面处理技术</b>	<b>183</b>
第一节 绪论	183
一、表面工程技术发展概况	183
二、表面工程技术的含义和作用	184
三、表面工程技术的分类	185
第二节 热喷涂技术	186
一、热喷涂的一般原理	186
二、热喷涂技术的特点	188
三、热喷涂技术的分类及特点	188
四、热喷涂技术的应用与涂层设计	190
第三节 电镀	192
一、电镀的一般原理	192
二、电镀液的组成	193
三、影响电镀层质量的因素	193
四、电镀的种类、特性及应用	195
第四节 化学镀	202
一、化学镀的一般原理	202
二、化学镀镍溶液与工艺条件	203
三、化学镀镍磷层的组织结构和性能	204
四、影响化学镀层质量的因素	206
五、化学镀的种类、特性及应用	207
第五节 气相沉积镀膜技术	209
一、物理气相沉积及其应用	209
二、化学气相沉积及其应用	216
三、PVD 与 CVD 两种工艺的对比	218
第六节 化学转化膜与金属表面彩色化	218
一、铝的阳极氧化	219
二、化学氧化工艺	222
三、磷化处理工艺	223
四、金属表面着色工艺	225
第七节 涂料与涂装工艺	227

一、涂料的性能、特点和分类 .....	227
二、涂料品种简介 .....	229
三、涂装方法简介 .....	232
第八节 产品设计中的表面处理 .....	235
一、表面纹理和产品的艺术表现 .....	235
二、表面纹理和产品的艺术表现的形式美法则 .....	236
三、表面处理在产品设计中所起的作用 .....	236
四、表面处理在产品设计中的合理运用 .....	239
参考文献 .....	239
<b>第六章 机械加工</b> .....	<b>240</b>
第一节 金属切削加工方法 .....	240
一、车削、铣削、刨削、磨削 .....	241
二、钳工工艺 .....	243
第二节 特种加工技术 .....	244
一、电火花加工 .....	244
二、电火花线切割加工 .....	246
三、电化学加工 .....	247
四、激光加工 .....	248
五、电子束和离子束加工 .....	249
六、超声加工 .....	250
七、其他特种加工工艺 .....	251
第三节 现代机械加工方法的发展趋势 .....	252
一、精度是制造业永恒不息的追求 .....	253
二、超高速加工 .....	253
参考文献 .....	254



## 第一章 引 论

设计是一种造型行为,是人们在生产、生活中有意识地运用各种工具和手段,将材料加工塑造成可视的或可触及的具有一定形状的实体,使之成为具有使用价值或具有商品性的物质的过程。可见,设计与材料具有密不可分的关系。因此,设计师必须熟练掌握并合理有效地利用各种材料的特性及其加工技术,从经济、可行、美观的角度出发,设计出实用的新产品。

本章首先结合材料发展的进程,简要论述材料与工业设计的关系及在工业设计中的地位。然后,以材料的结构为线索,重点介绍材料的结构、分类和基本特性等内容,扼要地分析材料的结构—性能—使役性能三者之间的关系。最后,讨论在工业设计中材料使用的基本原则。

### 第一节 材料与工业设计的关系及其在工业设计中的地位

人类从制造产品之始,就在不断追求产品的内容与形式的完美结合。从考古发现的青铜器时代的许多文物上,我们都能看到精美的图案,这种对产品外观形式的美学追求可以认为是工业设计(Industrial design)的起源。材料是人类社会的物质基础,一切机器、建筑、交通工具、生活用品等无不是由材料制成。工业设计就是要根据对产品的功能和外观的需求,选择合适的材料,设计它们的结构与形式,确定它们的组合方式等。因此,在工业设计活动中必须考虑材料的性质与特点。

从工业设计和材料科学与工程这两个学科发展的历史进程看,工业设计和材料工程一直有着十分密切的关系。如果我们观察一下人类在不同时期使用的刀具,就会发现材料的进步推动着设计的创新与进步,设计的要求也推动着材料的进步。图 1-1(见彩页)给出的是石刀、青铜刀、不锈钢刀的照片。在石器时代,人类使用的是用特殊的石头制作的石刀等工具,显然很难想象当时的工具制造者会很多地考虑美观性的问题,即使如此,制作者还是设法在其使用的器具上雕刻上特殊的图案,也许是作为制造或使用者的标记,也许是为了美观。随着青铜冶炼和铸造技术的出现和提高,工匠不仅可以制作出性能优良的器具,满足使用的性能要求,而且能够较好地制出漂亮的外观形状、细致的图案等让使用者获得观赏的愉悦。但是用一般的青铜器和以后发展的普通钢制造的刀具通常会发生锈蚀,既影响美观,也会使刀具失去用处。不锈钢的发明为刀具提供了一种非常好的材料,它既有很好的硬度、韧性可以满足刀的切割性能要求,又具有银子般的光泽,且在潮湿的环境中不会生锈,实现了内容与形式的完美结合。因此,不锈钢刀具很快成为刀具市场的主流产品。

材料科学与工程(Materials Science and Engineering)是关于材料的制造与加工工艺、材料的组织结构、材料的性能和材料的使用及其相互间关系的一门独立学科。从前述的刀具的设计随时代的变化,可以体会到工业设计与材料科学与工程之间的密切关系。总结起来,材料与工业设计之间的关系主要有以下三方面的特点。

## 一、材料是工业设计的物质基础

由于产品都是由各种材料组合而成,任何一个产品的工业设计必须建立在可選用材料的基础之上,因此设计师在提出设计的美学概念时,必须同时考虑如何去实现这样的概念,现有材料是否能够通过一定的制作工艺达到设计的要求。比如设计一个笔记本电脑的外壳,设计师想设计成由红、黄、蓝三种色块拼成的图案。这时要考虑的问题不仅是颜色,还要考虑外壳在使用中的磨损与锈蚀、外壳需要的强度、外壳的轻量化以及制造工艺上是否可行等一系列问题,我们是否有合适的材料满足这些要求。如果选择在表面涂上颜色,很简单,但可能满足不了长期使用的耐磨损要求。如果选择彩色塑料,其强度与抗老化性能可能不佳。如果选择金属,如何获得三种彩色的拼图是个困难。因此,工业设计的美学概念必须以可适用的材料为前提,材料是工业设计的物质基础。图 1-2(见彩页)是照相机中使用材料的演变过程,可以看到随着材料的发展和进步,照相机的材料也从金属—高分子—纸—高分子表面镀金属膜一步步发生着演变。高分子材料表面镀金属膜的设计既继承了高分子材料质量轻、价格低廉的优点,又保持了金属的表面光泽度和高贵的品质。同时,相机表面不同部位不同膜层的选择,也为产品提供了层次的变化和视觉的美感。

## 二、材料与工业设计相互促进

材料的发展,特别是新材料的出现常常会给工业设计思想带来突破性的发展,这种事例不胜枚举。例如:埃菲尔(Eiffel)铁塔的设计就是一例。当时人们已对钢铁的高强度等性质有较清楚的认识,钢铁工业也已步入大规模的工业化生产,能够提供充足的、价格合理的各种钢铁型材。设计师充分利用钢铁材料具有极高的强度这一性质,提出在当时是全新的一个设计理念,最终建造出迄今仍是巴黎的地标性建筑的铁塔。该塔高达 324m,用钢材 7300t。如今,各类高塔型建筑,已成为一种十分流行的设计思想。

另一方面,新的重要设计思想的提出,对材料的发展提出了新要求,也有力地促进材料研究人员探索和发展新材料。例如,用黄金装饰产品表面是设计师和消费者长期的一种喜好,它不仅满足了人们审美的要求,而且黄金的化学稳定性极好,不会锈蚀。但是由于黄金十分昂贵,难以大量地使用。在此推动下,材料研究人员大量地开展了仿金装饰镀的研究,发展了一系列的技术,解决了这个问题。例如:采用化学气相沉积技术(简称 CVD),在产品的表面沉积一层 TiN,该沉积层的颜色与黄金相仿,且硬度高、耐磨损也较耐蚀,该技术曾大量应用于手表外壳、眼镜框等产品的表面修饰。可以说材料与工业设计这两个领域的发展具有相互促进的关系。

## 三、材料科学与工程是工业设计的基础理论之一

材料科学与工程是认识材料的制造与加工工艺、材料的组织结构、材料的性能和使用、材料的环境性能及这些方面之间相互关系的一门学科。图 1-3 给出了材料科学与工程要素及它们之间关系。

用材料科学与工程理论可以指导新材料的研制、材料的制造与加工以及材料的使用。当设计师进行一个工业产品的设计时,不仅要有美学上的考虑,还要考虑设计的合理性和可行性。这里的合理性和可行性指设计选用的材料除了满足美学的要求之外,是否能够满足

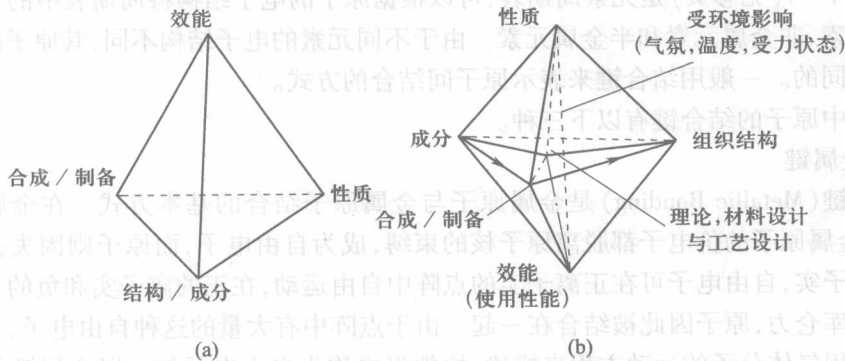


图 1-3 材料科学与工程要素及它们之间的关系  
(a) 材料科学与工程四要素; (b) 材料科学与工程五要素。

特定的使用性能、加工工艺、价格、环境友好等各方面的要求。例如:移动电话的外壳就需要考虑一定的韧性,以免不小心掉到地上会摔裂;电视机外壳要考虑抗电磁干扰的电磁屏蔽性能,以免外界电磁场对其图像造成影响;洗衣机要考虑抗锈蚀的性能,以保证其外壳在潮湿的使用环境下不会生锈。对工业设计而言,需要考虑的性能是多种多样的,如强度、硬度、韧性、耐磨性、耐蚀性、光泽、耐热性、抗电磁辐射等,还需要考虑长期使用过程中上述性能的稳定性。另外,设计师的设计能否实现还要看是否能通过一定的成型、加工技术完成对材料的加工。因此,设计师还必须对不同材料的成型技术与加工性能有一定的认识。

材料的成型技术有很多种,对金属材料而言,有铸造(液态成型,包括砂型铸造、压铸等)、压力加工(塑性成型,包括锻压、轧制、挤压等)、连接(固态成型,包括焊接、铆接、粘接等),并可进行后续的机械加工、热处理、表面涂覆等;对陶瓷材料而言,有注浆成型、可塑法成型、模压成型、等静压成型等,并经烧结过程获得最终成品,陶瓷制备还可进行适当的研磨、抛光等加工;对玻璃而言,成型方法有吹制法、压制法、压延法、浇铸法、拉制法、离心法、烧结法、喷吹法、浮法、焊接法等;对高分子塑料而言,可采用注射、挤出、压制、压延、铸塑、缠绕、烧结和吹塑等方法成型,也可采用喷涂、浸渍、粘结等方法将塑料覆盖在金属或非金属材料上,还可像金属那样采用车、铣、刨、磨、刮、挫、钻以及抛光等方法进行机械加工。

需要指出的是,材料的性能取决于材料内部的微观组织结构,而材料内部的微观组织与结构又取决于材料的化学组成和材料的制备与成型加工工艺。关于这三者的规律及其相互之间的关系是材料科学与工程理论的核心内容。显然,它是进行工业设计时必须掌握的基础理论知识。

## 第二节 材料的基本结构特征与一般性质

### 一、材料中原子键合的方式与材料的分类

#### (一) 原子间结合键的基本类型

材料是由一种或一种以上的元素组成,例如:在忽略杂质的假定下,纯金可以看作是完全是由金的原子结合在一起的一种金属材料;聚乙烯可以看作是由碳和氢两种元素结合在一起的一种高分子材料。原子的性质由原子的结构所控制,其中起主要作用的是电子

结构。图 1-4(见彩页)是元素周期表,可以根据原子的电子结构将周期表中的元素分类为金属元素、非金属元素和半金属元素。由于不同元素的电子结构不同,其原子的结合方式也是不同的。一般用结合键来表示原子间结合的方式。

材料中原子的结合键有以下三种。

### 1. 金属键

金属键(Metallic Bonding)是金属原子与金属原子结合的基本方式。在金属键结合中,所有金属原子的价电子都脱离原子核的束缚,成为自由电子,而原子则因失去电子成为正的离子实,自由电子可在正离子实的点阵中自由运动,在正的离子实和负的自由电子之间存在库仑力,原子因此被结合在一起。由于点阵中有大量的这种自由电子,其运动规律可近似用气体分子的运动方程来描述,故常称之为自由电子气。以金属键结合为主的材料统称为金属材料。常见的金属材料有钢铁、铜、铝、镁及其他的合金等。

### 2. 离子键

离子键(Ionic Bonding)是金属原子与非金属原子结合的基本方式。在离子键结合中,金属原子失去价电子使最外层电子带为满带而成为正离子,非金属原子获得金属原子失去的价电子使最外层电子带为满带而成为负离子,正离子和负离子间的库仑力使原子结合在一起。由于总电荷数必须为零,金属原子失去的价电子数须与非金属原子获得的电子数彼此相等,因此,正离子和负离子的数量有确定的比例,即以离子键结合的材料组成较严格地满足离子化合物的化学式配比。例如,玻璃的主要组成之一  $\text{SiO}_2$ 、钝化处理在铝表面形成的保护层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  都是离子键型的化合物。以离子键结合为主的材料统称为陶瓷材料。常见的陶瓷材料有玻璃、瓷砖、水泥等。

### 3. 共价键

共价键(Covalent Bonding or Electron-pair Bonding)是非金属原子与非金属原子结合的基本方式。在共价键结合中,原子与相邻的原子通过共有电子使最外层电子带达到满带的电子数。例如:碳原子最外层有 4 个价电子,它与相邻的 4 个碳原子各共有 1 个价电子,使最外层电子带达到满带 8 个电子的要求。两个原子共有的价电子对,使原子结合在一起。共价键具有很强的键合力和方向性。

非金属原子与非金属原子凭借共价键的强键合力形成结构稳定的分子,而分子与分子之间又可通过适当的方式结合成由上百、上千个原子构成的大分子。分子与分子之间又凭借分子键的作用结合在一起。由于分子键的键合作用很弱,凭借分子键结合的各个分子的行为相对较自由独立,受与之键合的其他分子的作用较小。高分子材料是指由大量的许多重复单元构成的高分子组成的材料。常见的高分子材料有塑料、树脂、木材等。

## (二) 材料的分类

在自然界存在着大量的人类可以利用的材料,人类在长期的生产活动中更是发展了数不胜数的材料。由于材料种类的数量极其庞大,为方便起见,通常将材料进行分类,常用的分类方法有如下几种。

(1) 按材料的物质属性分类:在这种分类方法中材料被分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料四大类。其中,复合材料是将金属材料、无机非金属材料、高分子材料中的两种或两种以上复合在一起制成的材料。材料每大类又可进一步分为若干小类,例如金属材料又可分为钢铁材料、有色金属材料等。每个小类还可进一步细分。

(2) 按材料的用途分类:在这种分类方法中材料被分为结构材料、功能材料两大类。结构材料又可细分为建筑材料、工业用钢等小类。功能材料又可分为光学材料、电子材料、能源材料、传感材料等小类。每个小类还可进一步细分。

(3) 按材料的性能特点分类:在这种分类方法中材料被分为半导体材料、导电材料、磁性材料、绝缘材料、耐热材料、高强度材料等。每个小类也可进一步细分。

材料还可按其他方法分类。此外,几种分类方法常常混合使用。图 1-5 以分类的方式列出了常见的材料种类。

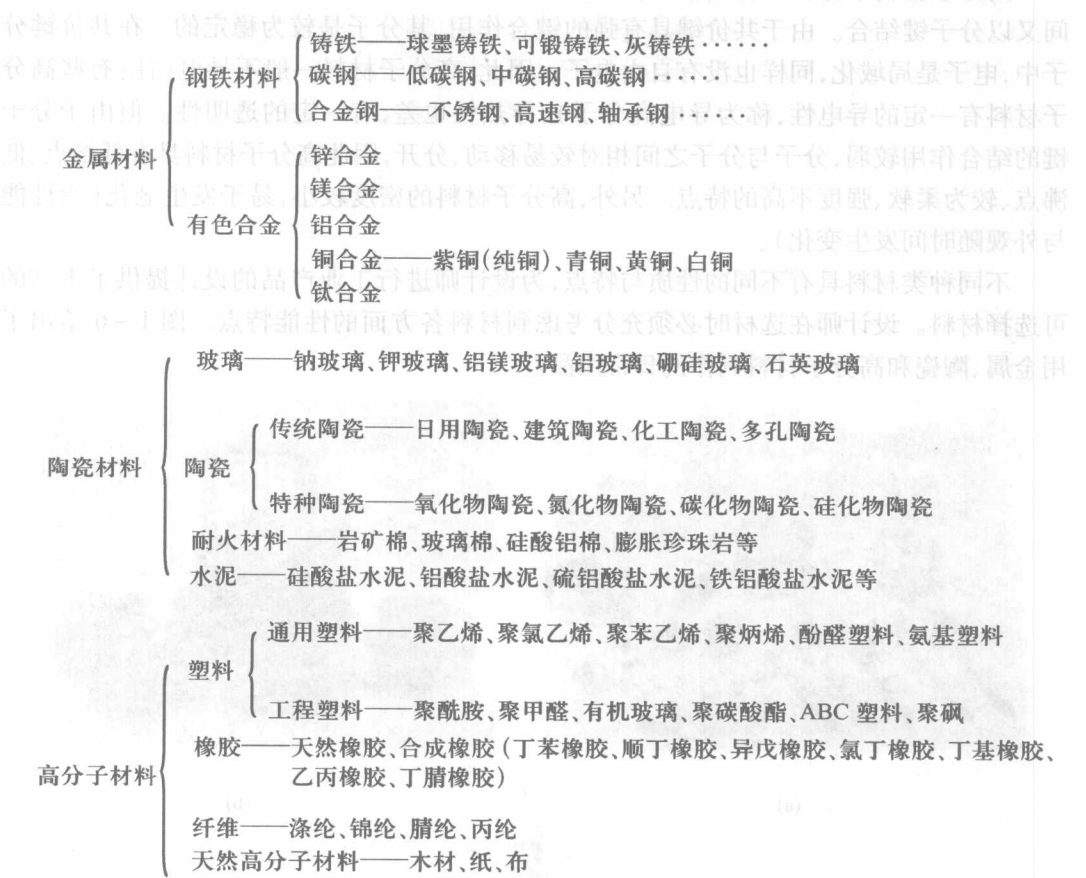


图 1-5 常见的材料分类

## 二、材料的基本性质与材料内的原子结合键的关系

### 1. 金属材料、无机非金属材料和高分子材料的基本性质

材料的基本性质取决于材料内的基本单元(原子或分子)的结合状态。一方面,金属材料内部的原子以金属键结合为主,在这种结合方式中,原子的点阵中存在大量的自由电子,自由电子能够在外场的作用下产生相应的效应。例如:在电场的作用下,自由电子会沿势场的方向定向运动,从而产生电流;在光的照射下,电子发生跃迁,产生辐射。因此,金属材料通常具有良好的导电性、导热性;它还具有金属光泽,不透明等特点。另一方面,由于自由电子与正离子实之间有较强的结合力,而自由电子在离子实的点阵中又可自由

运动,因此,金属材料通常具有较高的强度、硬度和较好的塑性变形能力。

无机非金属材料内部的原子主要以离子键结合为主,在这种结合方式中,必须有非金属和金属两类原子,并且有严格的配比以保证形成离子键,因此陶瓷材料都是化合物。由于形成离子键后,点阵中无自由电子,因此,无机非金属材料一般是绝缘体、导热性较差、化学稳定性高、有一定的透明性。由于离子键的键合很强,因此无机非金属材料的熔点很高、硬度很高,但其变形能力差,不能用一般的机械加工方法加工。

高分子材料中存在两种结合键,首先是原子之间是以共价键相结合形成分子,分子之间又以分子键结合。由于共价键具有强的键合作用,其分子是较为稳定的。在共价键分子中,电子是局域化,同样也没有自由电子。因此,高分子材料一般不导电(注:有些高分子材料有一定的导电性,称为导电高分子),导热性也差,有一定的透明性。但由于分子键的结合作用较弱,分子与分子之间相对较易移动、分开,因此高分子材料具有低熔点、低沸点、较为柔软、强度不高的特点。另外,高分子材料的密度较小,易于发生老化(指性能与外观随时间发生变化)。

不同种类材料具有不同的性质与特点,为设计师进行工业产品的设计提供了丰富的可选择材料。设计师在选材时必须充分考虑到材料各方面的性能特点。图 1-6 给出了用金属、陶瓷和高分子材料制作的日常用品。

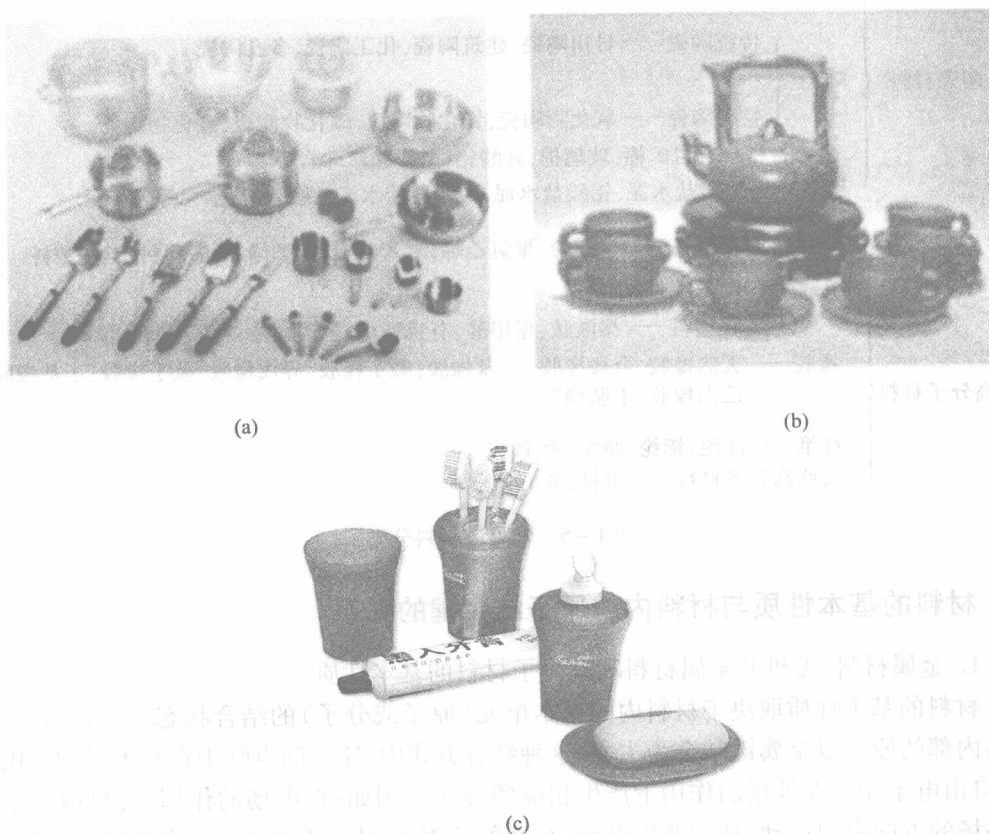


图 1-6 用金属、陶瓷、塑料制作的日常用品

(a) 不锈钢制品; (b) 陶瓷制品; (c) 塑料制品。

## 2. 结合能与材料的基本性能的关系

原子间结合键的强弱决定着材料的许多基本性能。通常用结合能和结合力来定量描述结合键的强弱。下面以离子键为例简要介绍结合能和结合力的概念。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( $F_c$ )为

$$F_c = -k_0(Z_1q)(Z_2q)/a^2 \quad (1-1)$$

式中: $k_0$ 为常数; $Z_1$ 为正离子的价数; $Z_2$ 为负离子的价数; $q$ 为电子的电量( $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ); $a$ 为正离子和负离子的间距。

当正离子和负离子相距过近时,电子云的场相接近发生相互排斥,该排斥力使两离子被排斥。排斥力( $F_r$ )为

$$F_r = -bn/a^{n+1} \quad (1-2)$$

式中: $b$ 、 $n$ 为经验常数;对于离子键化合物, $n=9$ 。

两离子间的作用力( $F$ )与其间距的关系为  $F_c$  与  $F_r$  之和,即

$$F = -k_0(Z_1q)(Z_2q)/a^2 + (-bn)/a^{n+1} \quad (1-3)$$

将力对作用距离积分,即得到正离子和负离子间的相互作用能( $E$ ),如式(1-4)所示:

$$E = \int_a^{+\infty} F da \quad (1-4)$$

对于金属键和共价键,上述关系式会有所变化,但基本的规律是一致的。

图1-7、图1-8分别示意给出了由式(1-3)和式(1-4)得出的两离子间的作用力和作用能与离子间距的关系。

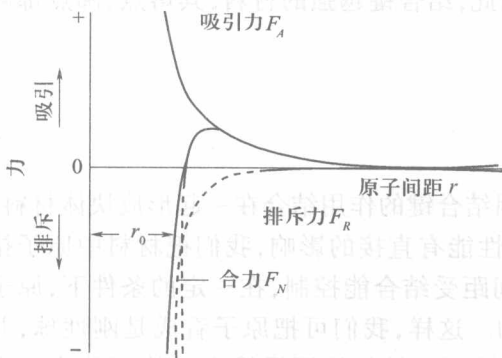


图1-7 双原子模型两原子间相互作用力与原子间距的关系图

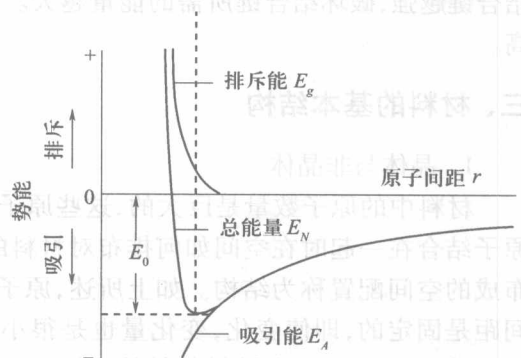


图1-8 双原子模型两原子间相互作用能与原子间距的关系图

由图1-7和图1-8可见,两个原子的距离为 $r_0$ 时,吸引力和排斥力相等,如果原子相距更近,排斥力增加,将原子推开。如果原子相距更远,吸引力增加,将原子拉近。 $r_0$ 为两原子的平衡距离,此时,相互作用能处于最小值,即体系处于能量最小的最稳定状态。原子间距大于或小于这个间距都会导致能量升高,使体系处于不稳定状态。不同的材料

其结合能与原子间距关系的形式都与图 1-8 基本一致,但具体的形状会有所不同。材料的许多性质都受结合能的控制,材料的结合能不同,其性质也不同。下面讨论材料的几个基本性质与结合能的关系。

只有在绝对零度时,原子才会处于绝对静止的状态。也就是说,只有在 0K 时,原子间距才为  $r_0$ 。当温度升高,原子发生热振动,热振动使原子间距变得大于或小于  $r_0$ 。但是要注意到,图 1-8 中的峰谷是不对称的。原子间距减小时能量增加较快,而原子间距增加时能量增加较慢,但原子热振动的振幅是固定的,即原子振动时,原子间距变大和变小的幅度相同。同时,原子还必须满足在最大原子间距和最小原子间距处的结合能相等。在这种条件下只有使原子的中心位置移动到  $r_0$ 。因此,随温度的升高,原子间距沿图 1-8 中虚线向上移动,即原子间距增大,这就是物质有热膨胀现象的原因。结合键强的材料其结合能峰谷深而窄,随温度的升高,其原子间距变化较小,即热膨胀较小。相反,结合键弱的材料的结合能峰谷浅而宽,随温度的升高,其原子间距变化较大,即热膨胀较大。

材料的弹性模量也与结合能相关。当材料受力发生弹性变形时,原子间距变大(拉伸时)或缩小(压缩时),使原子间距发生变化就要克服这种变化带来的能量增加。此时,就需外界施力。结合键弱的材料的结合能峰谷浅、宽,只需较小的力,就能达到使原子间距变化较大所需的能量,即弹性变容易,材料的弹性模量小。相反,结合键强的材料的结合能峰谷深、窄,要达到同样的原子间距变化,需较大的力,才能达到克服原子间距变化所需的能量,即弹性变形难,材料的弹性模量大。另外,材料的塑性变形也与结合能有关。虽然塑性变形不像弹性变形那样有原子间距的变化,但其变形所需的位错运动阻力与结合能有关,同样地,结合键强不易塑性变形,结合键弱易塑性变形。

材料的熔化、升华是原子(或分子)的结合键被破坏而失去键合作用的结果。显然,结合键越强,破坏结合键所需的能量越大。因此,结合键越强的材料,其熔点、沸点都越高。

### 三、材料的基本结构

#### 1. 晶体与非晶体

材料中的原子数量是巨大的,这些原子因结合键的作用结合在一起形成块体材料。原子结合在一起时在空间如何排布对材料的性能有直接的影响,我们把材料中原子排布成的空间配置称为结构。如上所述,原子间距受结合能控制,在一定的条件下,原子间距是固定的,即使变化,变化量也是很小的。这样,我们可把原子看成是刚性球,并用刚球的堆砌来描述材料的结构,称为刚球模型。材料的原子堆砌结构可分为两大类:一类为晶体结构(Crystalline Structure);另一类为非晶体结构(Amorphous Structure)。晶体结构是指原子的排列具有严格的对称性结构。非晶体结构是指原子排列长程无序,但存在局部短程有序的结构。图 1-9 给出了晶体结构中原子在三维空间的长周期排列示意图。

图 1-10 是在高分辨电子显微镜上拍摄的一种 Cu-Zn-Al 合金的点阵结构像,可以清楚地看到晶体点阵的周期性排列。



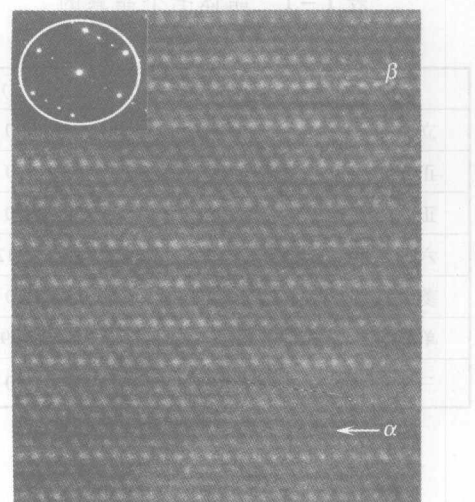
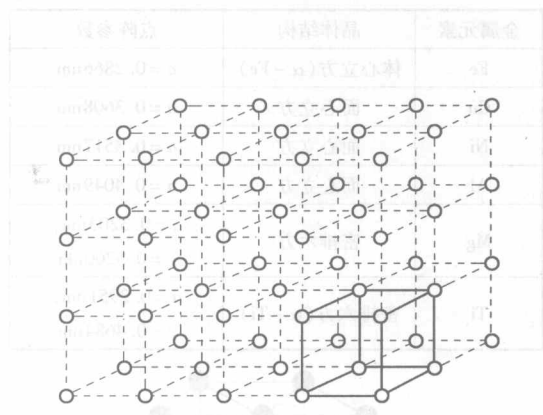


图 1-9 原子在三维空间的长周期排列

图 1-10 Cu-Zn-Al 合金的高分辨点阵结构像

常见的纯金属和多数的合金一般都是晶体结构,一些特殊成分的、经过特殊工艺制备的合金具有非晶结构。陶瓷材料的情况较复杂,玻璃多数是非晶结构,但结晶玻璃(人造水晶)具有晶体结构。特种陶瓷通常是晶体结构。高分子聚合物材料的聚集态既有非晶态的也有结晶态的,但结晶态的高分子聚合物材料一般不可能完全结晶,其实际结构是由晶区和非晶区组成。

## 2. 晶体结构和晶体缺陷

材料的晶体结构千差万别,但它们又有一定的共性。晶体中原子在三维空间具有长程有序的周期性排列,这种排列称为晶体点阵。由于平移对称的特点,我们总可以在原子排列的点阵中取出一个在三维方向都具有最小平移周期的平行六面体,用该平行六面体在空间堆砌就可构造出原子点阵。最小平行六面体称为点阵的单胞(Unit Cell),也称为晶胞。图 1-9 示意给出了一个空间点阵和它的单胞。

如图 1-9 所示的晶胞的三个基矢( $a, b, c$ )和三个基矢间的夹角( $\alpha, \beta, \gamma$ )这六个几何参量可以准确地描述晶胞。这六个几何参量统称为晶胞参数。虽然材料的晶体结构千差万别,但按晶胞参数的几何特征可将它们归为七种类型,称为七个晶系。

表 1-1 列出了七个晶系的名称、晶胞参数的几何关系和单胞的结构。根据晶体结构的特征,七个晶系可更进一步细分为 14 个布拉菲点阵(Bravies Lattice)。例如:立方晶系分为简单立方、体心立方和面心立方。

金属中最常见的晶体结构有三种,即体心立方(Body centered cubic, 简写为 b. c. c.)、面心立方(Face centered cubic, 简写为 f. c. c.)和密排六方(Close packed hexagonal, 简写为 h. c. p.)。图 1-11 给出了这三种结构的原子钢球模型。表 1-2 列出了常见的纯金属的晶体结构和相应的晶胞参数。

陶瓷材料主要为离子晶体结构。在离子晶体中一般金属正离子尺寸较小,负离子尺寸较大。图 1-12 是 NaCl 和  $TiO_2$  的晶体结构。NaCl 结构可看成是分别由  $Na^+$  离子和  $Cl^-$  离子构成的两个相同的面心立方点阵穿插在一起。 $TiO_2$  的结构则可以看成是由八面体堆垛而成,八面体由六个氧离子构成,金属原子则位于八面体中间的间隙。