

# 工 程 材 料

上 册

郑明新 主 编

清华大学出版社

1983

## 内 容 提 要

本书系统地阐述了金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料的成分、组织结构、性能和应用的一般规律及基本知识。

本书分上、下两册出版。上册一至七章：概论；金属晶体结构；金属的结晶；金属的塑性变形和再结晶；二元合金；铁碳合金和钢的热处理。下册八至十六章：合金钢；铸铁；有色金属及合金；高分子材料；陶瓷；复合材料；材料选用的一般原则；零件失效与选材；典型零件选材分析。

本书可作为机械、冶金类各专业的教学用书及科技人员的参考书。

## 工 程 材 料

郑明新 主编

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

冶金工业出版社印刷厂 排版

国防工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

☆

开本：787×1092 1/16 印张：10 1/2 字数：239千字  
1983年11月第一版 1983年11月第一次印刷

印数：1~120000

统一书号：15235·76 定价：1.10元

# 工 程 材 料

下 册

郑明新 主编

清 华 大 学 出 版 社

1983

## 编者的话

本书是根据我们几年来讲授《工程材料》课的教学材料编写的。

早先，我们只讲金属材料，但是几年来看到材料科学的迅速发展，考虑到在各类机器制造工业中塑料和陶瓷等非金属材料的应用日益增多，同时意识到在机器零件的选材和用材中失效分析的重要性，我们在传统的《金属材料 and 热处理》课程中增加了上述内容，并把课程改称为《工程材料》。

参照一些工业发达的国家关于《工程材料》著述的许多新写法，我们对过去讲授的材料课感到有必要从体系到内容上都作较大的改动。但是考虑到我国三十多年来业已形成的传统，以及先行课和后续课的配合，我们采取的办法是删减一点关于工艺和材料的某些冗长繁琐的陈述和有关各类转变细节的过多的描写，增加一些新的内容。显然，这只是一种简单的处理。因此这样编出的书的系统性和有机性以及内容的遴选都还需要继续通过实践不断总结提高，以求最后搞出一个适合我国情况的教本。

在本书金属材料部分的编写中，我们主要参考了1978年西安会议的大纲。个别章节的具体内容重点参考了史美堂主编的《金属材料及热处理》、吴培英主编的《金属材料学》和大连工学院编的《金属材料及热处理》。至于非金属材料 and 失效分析等新引进的内容，则是我们根据自己的教学体会主要参考国外的资料编写的。这是我们的第一次尝试，不一定全好，但希望能对课程的革新起到一点抛砖引玉的作用。

这本书主要是各类机器制造和机械设计类专业大学本科学生的机械材料课的教本，也可作选材和用材工作者的参考书。全书用60~64学时讲完，如果配合以实验和课堂讨论，全课需用74~78学时。

本书第一、二、三章由郑明新编写，第四章由张健编写，第五、十一、十二、十三章由梁光启编写，第六、十章由朱张校编写，第七章由田芝瑞编写，第八、十四、十五、十六章由曹维涤编写，第九章由王芸编写。全书由郑明新主编。在编写过程中得到了清华大学机械系金属学教研组和中央广播电视大学机械组的许多同志的指导和帮助，在此一并致谢！

由于编写的时间过于仓促，以及编者的水平不高，书中错误一定不少。恳祈广大读者和专家谅解并提出批评指教。

编者

# 目 录

<b>第一章 概 论</b> .....	1
第一节 工程材料及材料科学发展概况.....	1
第二节 物质的状态.....	2
第三节 固体中原子的结合键.....	5
一、离子键和离子晶体.....	6
二、共价键和共价晶体（原子晶体）.....	6
三、金属键和金属晶体.....	7
四、分子键（范特瓦尔斯力）和分子晶体.....	7
五、氢键及氢键晶体.....	8
第四节 固体材料的分类.....	9
一、金属材料.....	9
二、陶瓷材料.....	11
三、高分子材料.....	11
四、复合材料.....	12

## 第一篇 金属学及金属材料

<b>第二章 金属的结构</b> .....	13
第一节 金属的特性.....	13
第二节 金属的晶体结构.....	14
一、纯金属的典型晶体结构.....	14
二、金属晶体结构的一些重要概念.....	16
三、金属晶体中晶面和晶向的表示方法.....	19
四、金属晶体的各向异性.....	22
第三节 实际金属中的晶体缺陷.....	23
一、点缺陷.....	23
二、线缺陷.....	25
三、面缺陷.....	26
第四节 金属中的扩散.....	28
一、扩散的概念和机制.....	28
二、扩散定律.....	29
三、影响扩散的主要因素.....	31
<b>第三章 金属的结晶</b> .....	32
第一节 金属结晶的概念.....	32
一、结晶的概念.....	32
二、结晶的条件.....	32

三、过冷度·····	33
第二节 金属的结晶过程·····	34
一、结晶过程·····	34
二、晶核的生成·····	34
三、晶核的长大·····	35
四、晶体的长大方式·····	36
第三节 晶粒大小·····	38
一、晶粒度的概念·····	38
二、晶粒度的控制·····	38
第四节 铸锭的结构·····	39
一、铸锭结构的形成·····	39
二、铸锭结构的特性·····	40
三、铸锭的缺陷·····	40
<b>第四章 金属的塑性变形和再结晶·····</b>	<b>41</b>
第一节 金属的塑性变形·····	41
一、静拉伸试验和应力-应变曲线·····	41
二、金属塑性变形的的基本方式·····	44
三、滑移与位错·····	48
四、实际金属的塑性变形·····	50
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响·····	52
一、加工硬化·····	52
二、金属组织和结构的变化·····	53
三、残余内应力·····	55
第三节 变形金属在加热时组织和性能的变化·····	56
一、回复与再结晶·····	56
二、再结晶温度与晶粒度·····	58
第四节 金属的热加工·····	60
一、热加工的概念·····	60
二、金属热加工时组织和性能的变化·····	61
<b>第五章 二元合金·····</b>	<b>63</b>
第一节 合金中的相·····	63
一、相的概念·····	63
二、合金相的形成条件及种类·····	64
三、固溶体·····	64
四、金属化合物·····	67
第二节 二元合金相图·····	68
一、相图概述·····	68
二、二元合金相图的建立·····	69
第三节 匀晶相图·····	70

一、相图特征及形成条件	70
二、合金的结晶过程及杠杆定理	71
三、枝晶偏析的产生与消除	72
第四节 共晶相图	73
一、相图特征及形成条件	73
二、典型合金的结晶过程	74
三、相图与组织组成物	77
第五节 包晶相图	78
一、相图特点及形成条件	78
二、结晶过程及组织特征	79
第六节 其它相图	79
一、形成稳定化合物的相图	79
二、共析相图	80
第七节 合金的性能与相图的关系	81
一、合金的使用性能与相图的关系	81
二、合金的工艺性能与相图的关系	81
<b>第六章 铁碳合金</b>	<b>83</b>
第一节 铁碳相图	83
一、铁碳合金的组元	85
二、铁碳合金中的相	86
三、相图中重要的点和线	86
第二节 典型铁碳合金的平衡结晶过程	88
一、工业纯铁	88
二、共析钢	89
三、亚共析钢	90
四、过共析钢	92
五、共晶白口铸铁	93
六、亚共晶白口铸铁	94
七、过共晶白口铸铁	96
第三节 铁碳合金的成分-组织-性能关系	98
第四节 Fe-Fe <sub>3</sub> C相图的应用和其局限性	100
一、铁碳相图的应用	100
二、铁碳相图的局限性	101
第五节 碳钢	101
一、碳钢中的常存杂质	101
二、碳钢的分类	102
三、碳钢的牌号及用途	103
<b>第七章 钢的热处理</b>	<b>107</b>
第一节 钢在加热时的转变	107

一、转变温度	107
二、奥氏体的形成	108
三、奥氏体晶粒大小及其影响因素	110
第二节 钢在冷却时的转变	113
一、过冷奥氏体的等温转变	113
二、过冷奥氏体的连续冷却转变	122
第三节 钢的退火和正火	124
一、退火	124
二、正火(常化)	127
第四节 钢的淬火	127
一、钢淬火过程中的马氏体转变	127
二、钢的淬火工艺	131
第五节 钢的回火	135
一、钢在回火时的组织转变	135
二、淬火钢回火后的组织和性能	136
三、回火的分类和应用	138
四、回火脆性	138
第六节 钢的淬透性	139
一、工件截面冷却速度和淬透层深度	139
二、影响钢淬透性的因素	141
三、淬透性的测定方法	141
四、淬透性曲线的应用	142
第七节 钢的表面热处理和化学热处理	146
一、钢的表面热处理	146
二、钢的化学热处理	147
三、各种表面热处理和化学热处理的比较	154
第八节 钢的热处理新技术	155
一、可控气氛热处理和真空热处理	155
二、变形热处理	158



二、机床零件的用材分析·····	352
三、汽车零件的用材分析·····	356
四、热能装置的用材分析·····	360
五、轴类零件的选材·····	363
六、齿轮类零件的选材·····	368
<b>主要参考文献</b> ·····	<b>373</b>
<b>附录</b> ·····	<b>376</b>
录附 I 强度指标换算表·····	376
附录 II 冲击韧性指标换算表·····	376
附录 III 钢热处理工艺的代号与技术条件的表示方法·····	377
附录 IV 有色金属及合金产品状态及其代号·····	377
附录 V 国内外常用钢号对照表·····	378

# 目 录

<b>第八章 合金钢</b> .....	161
<b>第一节 概论</b> .....	161
一、合金钢的种类及基本用途.....	161
二、合金钢的编号原则及方法.....	162
三、合金钢的发展趋势.....	163
<b>第二节 合金元素在钢中的作用</b> .....	164
一、合金元素对钢中基本相及其平衡关系的影响.....	164
二、合金元素对钢中相变过程的影响.....	167
三、合金元素对钢的机械和工艺性能的影响.....	170
<b>第三节 合金结构钢</b> .....	180
一、低合金高强度钢.....	180
二、合金调质钢.....	183
三、合金渗碳钢.....	187
四、弹簧钢.....	188
五、滚珠轴承钢.....	190
<b>第四节 合金工具钢</b> .....	193
一、合金刀具钢.....	193
二、合金模具钢.....	197
三、量具钢.....	199
四、其它工具材料.....	201
<b>第五节 特殊性能钢及合金</b> .....	201
一、不锈钢.....	201
二、耐热钢及合金.....	206
<b>第九章 铸铁</b> .....	214
<b>第一节 概论</b> .....	214
一、铸铁中的石墨化过程和组织特点.....	214
二、铸铁的性能特点及其应用.....	216
<b>第二节 常用铸铁</b> .....	220
一、灰口铸铁.....	220
二、球墨铸铁.....	223
三、蠕墨铸铁.....	228
四、可锻铸铁.....	228
五、特殊性能铸铁.....	231
<b>第十章 有色金属及其合金</b> .....	233
<b>第一节 铝及铝合金</b> .....	233

一、纯铝	233
二、铝合金	235
第二节 铜及铜合金	243
一、纯铜	244
二、铜合金	244
第三节 钛及钛合金	255
一、纯钛	255
二、钛合金	255
三、钛及钛合金的热处理	258
第四节 轴承合金	258
一、锡基轴承合金	259
二、铅基轴承合金	260
三、铜基轴承合金	261
四、铝基轴承合金	261

## 第二篇 非金属材料

<b>第十一章 高分子材料</b>	263
第一节 高分子概述	263
一、名词、概念及重要术语	263
二、高分子材料的人工合成	265
三、高聚物的分类和命名	266
第二节 高分子结构的特点	267
一、大分子链的组成	267
二、大分子链中结构单元链接顺序和构型	267
三、大分子链的构象——链的柔性及热运动特点	269
四、高聚物中大分子链间作用力及聚集状态	270
五、高聚物中的填料	272
第三节 高聚物的流变行为	272
一、线型无定型高聚物的三种物理状态	272
二、结晶高聚物的流变行为——结晶度的影响	274
三、交联后高聚物的流变行为——交联密度的影响	274
第四节 高聚物的机械性能	275
一、高弹性	275
二、粘弹性	275
三、强度与断裂	278
第五节 高聚物的其它性能	281
一、高聚物的耐腐蚀性能	282
二、高聚物的老化	282
第六节 工程高聚物材料简介	283

一、塑料	283
二、橡胶	284
三、合成纤维	284
四、胶粘剂	284
<b>第十二章 陶瓷</b>	287
<b>第一节 陶瓷材料概述</b>	287
一、陶瓷的概念	287
二、陶瓷材料的特点	287
三、陶瓷材料的分类	288
<b>第二节 组成陶瓷的基本相及其变化</b>	289
一、晶体相	289
二、玻璃相	293
三、气相	295
<b>第三节 陶瓷的性能</b>	295
一、陶瓷的机械性能	295
二、陶瓷的热性能	297
三、陶瓷的其它性能	297
<b>第十三章 复合材料</b>	299
<b>第一节 概述</b>	299
一、复合材料的概念	299
二、复合材料的种类	300
<b>第二节 复合材料的特点</b>	300
一、比强度和比模量	300
二、抗疲劳性能	300
三、减震性能	301
四、耐高温性能	301
五、断裂安全性	301
<b>第三节 复合理论简介</b>	302

### 第三篇 工程材料的选用

<b>第十四章 材料选用的一般原则</b>	303
一、改锥的选材问题——从实例看选材的基本原则	303
二、材料的使用性能与选材	304
三、材料的工艺性能与选材	307
四、材料的经济性与选材	311
<b>第十五章 零件失效与选材</b>	313
<b>第一节 零件的失效与失效分析</b>	313
一、零件失效的原因	313
二、零件失效方式的分类	314

三、失效分析的一般方法·····	315
第二节 弹性变形失效与选材·····	317
一、定义与分类·····	317
二、力学分析·····	317
三、控制性性能指标及其比较·····	318
四、弹性变形失效的鉴别·····	318
五、抗弹性变形失效的选材·····	319
第三节 塑性变形失效与选材·····	320
一、定义·····	320
二、力学分析·····	320
三、控制性性能指标及其比较·····	321
四、塑性变形失效的鉴别·····	321
五、抗塑性变形失效的选材·····	322
第四节 快速断裂失效与选材·····	326
一、定义与分类·····	326
二、力学分析·····	326
三、控制性性能指标及其比较·····	329
四、低应力脆性断裂的鉴别·····	331
五、抗断裂失效的选材·····	333
第五节 疲劳断裂失效与选材·····	334
一、定义与分类·····	334
二、力学分析·····	334
三、控制性性能指标及其比较·····	337
四、疲劳断裂失效的鉴别·····	338
五、抗疲劳失效的选材·····	339
第六节 蠕变失效及选材·····	341
一、定义与分类·····	341
二、力学分析·····	341
三、控制性性能指标及其比较·····	342
四、蠕变失效的鉴别·····	344
五、抗蠕变失效的选材·····	344
第七节 表面损伤失效及选材·····	346
一、定义与分类·····	346
二、力学分析·····	347
三、控制性性能指标及其比较·····	349
四、表面损伤的鉴别·····	349
五、抗表面损伤失效的选材·····	351
第十六章 典型零件选材分析·····	352
一、工程材料应用概况·····	352

# 第一章 概 论

## 第一节 工程材料及材料科学发展概况

材料是人类生产的物质基础。人类社会的发展史证明,生产中使用的材料的性质直接反映人类社会的文化水平。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。而今人类正跨进人工合成材料的新时代。

大约二、三百万年前人类在地球上出现之后,最先使用的工具是石头。由古猿到原始人的漫长发展过程中,石器一直是主要的工具。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 $950^{\circ}\text{C}$ 温度下烧制红陶,在还原性炉气中 $1050^{\circ}\text{C}$ 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 $1200^{\circ}\text{C}$ 。到东汉出现了瓷器,并于九世纪传至非洲东部和阿拉伯,十三世纪传到日本,十五世纪传至欧洲。瓷器成了中国文化的象征,对世界文化有很大的影响。

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。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。湖北江陵楚墓中发掘的两把越王勾践的宝剑,长55.6cm,至今仍异常锋利,是我国古青铜器的杰出代表。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。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成分和性能之间的关系。他们在青铜材料的冶炼和使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—475年)开始大量使用铁器,推动了奴隶社会向封建社会的过渡。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进入铁模铸造的高级阶段。到西汉时期,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、八百年。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,可见当时生产规模之壮观。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的自然钢。用这种钢作的剑在东方各国享有盛誉,东汉时传入欧洲;第二种是西汉时期经过“百次”冶炼锻打的百炼钢;第三种是南北朝时期的灌钢。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,我国钢铁生产的技术远远超过世界各国。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历史文献。

在材料领域中还值得提到的是丝绸。丝绸是一种天然高分子材料。它在我国有着悠久的历史，十一世纪通过著名的“丝绸之路”传到波斯、阿拉伯、埃及，1470年传到意大利威尼斯，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。

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。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。其主要任务在于探讨金属的组织 and 性能之间的关系。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出现和发展，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的发展一日千里。材料、能源与信息作为现代技术的三大支柱发展格外迅猛。在材料科学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。1970年其世界总产量已达四千万吨，超过了铝的产量，成为一种重要的新型工程结构材料。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，组成一完整的材料体系。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，例如切削加工性能、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和知识。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。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。工程材料（学）也为某些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（图1-2）物质不多，元素多以复合的形式存在于物质中，构成各种固体、液体和气体。

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。作为物质体系基本构成单元的原子或分子等粒子，在组成具体物质中，相互之间要发生一定的联系，因而产生相互作用的势能。同时本身也处于不停的运动之中，因而具有动能。原子或分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，结合得越紧；原子、分子的运动则相反，使粒子间约束削弱。影响运动的主要因素是温度。温度越高，原子、分子的运动越剧烈，吸引力越小，彼此分离的趋势就越大。

所以，物质的状态决定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（原子或分子）具有完全确定的动能，其值远远超过

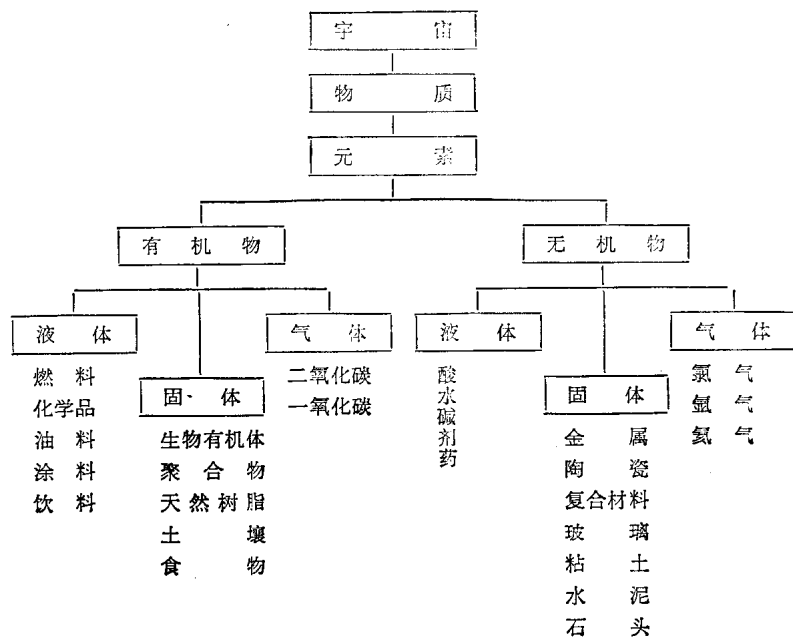


图 1-1 元素是组成各种物质的基础

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。

温度降低，粒子的无规则热运动变慢，粒子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。

在聚合状态下，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。在某种意义上看，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，延绵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的材料，具有重要的工程价值。

晶体中的原子（离子或分子等）为什么能够结合成规则排列的稳定晶体呢？这是因为电子-原子核形式的原子之间相互作用的结果。当两个原子接近时，原子核不发生变化，



IA	IIA	IIIA	IVA	VIA	VII	VIII	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	0			
1 H 1.008														2 He 4.003			
3 Li 6.940	4 Be 9.013													10 Ne 20.182			
11 Na 22.997	12 Mg 24.32													18 Ar 39.944			
19 K 39.10	20 Ca 40.00	21 Sc 45.10	22 Ti 47.90	23 V 50.95	24 Cr 52.01	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.94	28 Ni 58.69	29 Cu 63.54	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.60	33 As 74.91	34 Se 78.96	35 Br 79.916	36 Kr 83.8
37 Rb 85.46	38 Sr 87.63	39 Y 88.92	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc 99	44 Ru 101.1	45 Rh 102.91	46 Pd 106.4	47 Ag 107.88	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.70	51 Sb 121.76	52 Te 127.61	53 I 126.92	54 Xe 131.3
55 Cs 132.91	56 Ba 137.36	57 La 138.92	72 Hf 178.5	73 Ta 180.88	74 W 183.86	75 Re 186.31	76 Os 190.2	77 Ir 193.1	78 Pt 195.09	79 Au 197.2	80 Hg 200.61	81 Tl 203.39	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 210.0	85 At 210.0	86 Rn 222
87 Fr 223	88 Ra 226.05	89 Ac 227															

过渡族金属

难熔金属

贵金属

金属键

← 共价键金属 →

← 共价键非金属 →

↑ 惰性气体

稀土或镧系元素 Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu  
 锕系元素 Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lw

图 1-2 元素周期表