

机械工程材料

王顺兴 编著

JIXIE
GONGCHENG
CAILIAO



化学工业出版社

JIXIE GONGCHENG CAILIAO

机械工程材料

王顺兴 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是为了适应在线开放课程或慕课教学需要而编写的教学用书。

《机械工程材料》为机械类和近机械类各专业的技术基础课教材。本书阐述了材料成分、组织结构与性能关系的基本原理和材料的应用。全书共分6章：材料的结构、材料的力学性能、合金的结晶和合金化原理、金属热处理、金属材料和非金属材料。本书除作为机械类专业的教材外，也可作为机械类工程技术人员参考书或培训用教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程材料/王顺兴编著. —北京：化学工业出版社，2019.3
ISBN 978-7-122-33677-4

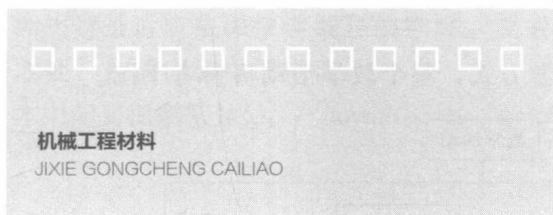
I. ①机… II. ①王… III. ①机械制造材料-高等学校-教材 IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 005854 号

责任编辑：邢 涛	文字编辑：李 玥
责任校对：王 静	装帧设计：韩 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：北京市白帆印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 398 千字 2019 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888 售后服务：010-64518899
网 址： http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。



《机械工程材料》是机械类各专业的一门重要技术基础课。为适应在线开放课程或慕课这一新的教学形式特编写本教材。读者可通过有关教学平台学习本课程。教师可通过出版社或直接与编者联系免费获取慕课视频、在线练习题、作业题、录制视频用的 PPT 和脚本，您可以在在此基础上建设自己的课程。

本教材架构和说明：

1. 课程目标

《机械工程材料》是面向机械类设计学员编写的，包括材料科学的基础知识、金属热处理、各类机械中常用的材料三方面内容。通过学习材料的结构、材料的力学性能、合金的结晶和合金化原理，掌握分析成分-工艺-结构（相结构和组织结构）-性能之间关系的基本原理。通过学习金属热处理的基本原理和工艺，掌握通过热处理发挥金属材料潜能，提高解决实际问题的能力。通过学习金属材料和非金属材料，掌握通过对零构件的受力分析、使用环境分析和可能的失效形式分析，提出对材料性能的要求，根据对材料性能的要求进行合理选材和制定冷热加工工艺的基本原理。在工作中，利用上述原理，将设计图纸变成实际的零构件，将零构件在实际工况下使用，发现使用中出现（如果存在）的问题，针对问题进一步改进，直到满足使用要求。

2. 教材构架

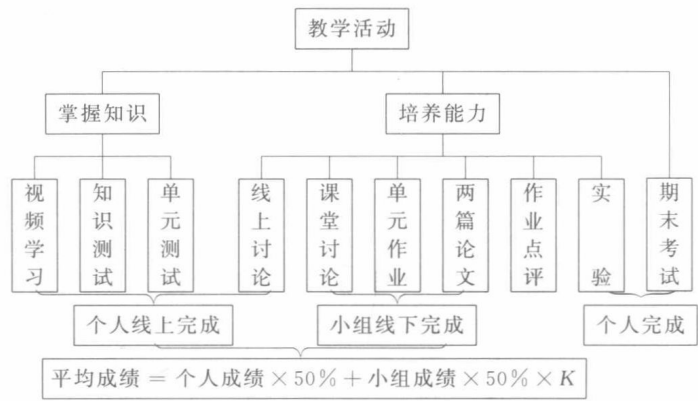
针对上述课程目标，本课程的构架如下。



第 1 章分三个层次，即结合键和结合能、相结构、组织结构展开介绍。第 2 章材料的力学性能包括弹性变形、永久变形、断裂和硬度四个方面介绍材料的力学行为。第 3 章合金的结晶和合金化原理包括扩散现象和扩散定律、纯金属的结晶、二元合金的结晶和合金化原理。第 4 章介绍金属热处理。第 5 章金属材料包括了合金钢、铸铁和有色金属材料。第 6 章非金属材料包括了工程塑料、橡胶、陶瓷材料和复合材料。

前 5 章内容主要以小节为题制作视频，少数以节为题制作视频。在教材中，在制作一个视频的内容后有“知识巩固”，将本视频内容出成选择题和判断题，以检验学习效果，这些题可作为慕课的在线练习题。每章后有讨论题。书后附有作业题，每章一次作业，满分 100 分。

如果您采用的是在线开放课教学方式，整个教学活动可参考下图。



每个学生独立完成视频学习、知识测试、单元测试、线上讨论、实验和期末考试。在课堂进行分组学习，每组 5~7 人，以完成作业为目标展开相关讨论，同组同学共同完成作业，每组提交一份作业。作业在交给老师前由另一组同学批改作业，根据作业完成质量进行打分。

过程性考核可参考下表进行。

序号	内容	评价依据和内容	满分比例	备注
1	前 5 章视频学习	每章按规定时间完成学习任务得 3 分,未按规定时间完成不给分	15%	个人得分
2	第 6 章视频后知识测试题	答对率×15	15%	个人得分
3	单元测试(6 章每章测试 1 次)	答对率×15	15%	个人得分
4	线上讨论	参与 1 次(发表问题或回答问题)0.5 分	5%	个人得分
5	单元作业	每个小组集体完成 1 份作业(打印稿),按时交给另 1 小组批改并打分(质量分 90 分,按时完成+5 分),批改小组批改后向被批改小组反馈扣分原因,给批改小组打分(满分 5 分) 成绩=作业质量满分 90 分(教师打分) +按时完成作业 5 分(批改小组打分,未按时完成 0 分) +互动交流满分 5 分(批改小组向被批改小组说明扣分的原因,小组给批改作业小组打分) - 作业质量分一批改小组打的质量分 (减批改小组的成绩) +奖励分 5 分(行政班得分最高的 1 个小组加 5 分,超过 1 个组不加分) 5 章作业平均成绩×40	40%	小组得分
6	两篇论文	按评分标准小组相互打分(每篇满分 100 分)	10%	小组得分
	合计		100%	

个人平时成绩=个人成绩+小组成绩×(本人考试得分)/(本组考试最高分)

最后，感谢河南科技大学材料科学与工程学院材料基础系同仁在本教材编写过程中提供的大力帮助和在视频制作过程中付出的辛勤劳动以及河南科技大学出版基金提供的赞助。

因为这是适应慕课教学编写的教材，编者进行了大胆尝试，由于水平有限，不当之处，恳请读者批评指正。

本书配套视频见 <http://download.cip.com.cn/html/20190227/413161355.html>。

编著者

2018 年 10 月



机械工程材料
JIXIE GONGCHENG CAILIAO

目 录

第 1 章 材料的结构

1

1.1 原子结合键和结合能	1
1.1.1 原子结合键	2
1.1.2 结合能	5
1.2 相结构	7
1.2.1 相概念及其分类	7
1.2.2 三种常见的晶体结构	9
1.2.3 晶向指数和晶面指数	13
1.2.4 晶体缺陷	19
1.2.5 合金相结构	23
1.2.6 高分子的相结构	26
1.3 组织结构	29
1.3.1 单相组织	30
1.3.2 双相组织	31
1.3.3 织态结构	33
1.3.4 成分-工艺-组织-性能关系	34

第 2 章 材料的力学性能

37

2.1 弹性变形	38
2.1.1 弹性变形性能指标	38
2.1.2 弹性变形机理	38
2.1.3 影响因素	39
2.2 永久变形	40
2.2.1 强度、塑性和韧性	40
2.2.2 金属单晶体的塑性变形	43

2.2.3	金属多晶体的塑性变形	50
2.2.4	金属强化原理	53
2.2.5	黏弹性变形	56
2.3	材料的断裂	58
2.3.1	断裂的类型及断口特征	58
2.3.2	缺口效应、冲击韧性和断裂韧性	61
2.3.3	低应力延时断裂	64
2.3.4	磨损	68
2.4	硬度	70
2.4.1	布氏硬度	71
2.4.2	洛氏硬度	71

第3章 合金的结晶和合金化原理

73

3.1	扩散现象和扩散定律	73
3.1.1	扩散现象	73
3.1.2	扩散定律	74
3.2	纯金属的结晶	76
3.2.1	结晶的热力学条件	77
3.2.2	形核和长大	78
3.2.3	同素异构转变	79
3.3	二元合金的结晶	80
3.3.1	二元合金结晶的热力学条件和相图	80
3.3.2	匀晶转变	84
3.3.3	恒温转变	89
3.3.4	固态相变	92
3.3.5	Fe-C 合金	96
3.4	合金化原理	103
3.4.1	有色金属合金化原理	103
3.4.2	钢铁合金化原理	107

第4章 金属热处理

111

4.1	合金的固溶和时效	112
4.1.1	定义	112
4.1.2	组织和性能变化	112
4.1.3	应用	114
4.2	奥氏体的形成	115
4.2.1	共析钢奥氏体 (A) 形成过程	115

4.2.2	亚(过)共析钢奥氏体形成过程	117
4.2.3	奥氏体等温形成动力学	117
4.2.4	奥氏体的晶粒度	118
4.2.5	影响奥氏体形成的因素	119
4.3	过冷奥氏体等温转变	122
4.3.1	过冷奥氏体等温转变图(TTT图)	122
4.3.2	影响等温转变图形状和位置的因素	124
4.3.3	珠光体的组织与性能	127
4.3.4	贝氏体的组织与性能	131
4.3.5	马氏体的组织和性能	134
4.4	连续冷却转变和钢的淬透性	139
4.4.1	过冷奥氏体连续冷却转变图	139
4.4.2	钢的淬透性	140
4.5	金属的退火和正火	143
4.5.1	退火	143
4.5.2	正火	150
4.6	淬火和回火	152
4.6.1	淬火	152
4.6.2	回火	155
4.7	表面淬火	166
4.7.1	感应加热表面淬火	166
4.7.2	其他表面淬火方法	168
4.8	化学热处理	169
4.8.1	钢的渗碳	169
4.8.2	钢的渗氮	173
4.8.3	复合渗	174

第5章 金属材料

177

5.1	机器零件用钢	177
5.1.1	渗碳钢	177
5.1.2	调质钢	180
5.1.3	弹簧钢	184
5.1.4	滚动轴承钢	186
5.2	刀具钢	188
5.2.1	碳素及低合金刀具钢	189
5.2.2	高速钢和硬质合金	191

5.3	模具钢	195
5.3.1	热作模具钢	195
5.3.2	冷作模具钢	196
5.4	不锈钢和耐热钢	198
5.4.1	不锈钢	198
5.4.2	耐热钢	200
5.5	耐磨材料	202
5.5.1	高锰钢	202
5.5.2	高铬铸铁	203
5.6	铸铁	204
5.6.1	灰铸铁	204
5.6.2	可锻铸铁	206
5.6.3	球墨铸铁	207
5.6.4	蠕墨铸铁	209
5.7	常用有色金属材料	210
5.7.1	铝合金	210
5.7.2	铜合金	213
5.7.3	钛合金	215
5.7.4	镁合金	216
5.7.5	滑动轴承合金	219

第6章 非金属材料

222

6.1	工程塑料	222
6.1.1	塑料的组成和分类	222
6.1.2	热塑性塑料及应用	223
6.1.3	热固性塑料及应用	225
6.2	工程橡胶	226
6.2.1	橡胶的组成和性能	226
6.2.2	常用橡胶材料及应用	227
6.3	工程陶瓷	228
6.3.1	陶瓷材料概述	228
6.3.2	常用工程陶瓷及应用	230
6.4	复合材料	231
6.4.1	复合材料概述	231
6.4.2	常用复合材料	232

附录 1 知识巩固题参考答案	234
附录 2 作业题	236
参考文献	249

第 1 章

材料的结构

材料是由原子组成的有用聚集体。材料是由哪些原子组成的？原子是如何聚集起来的？材料的性能如何？这是学习材料时必须搞清楚的三个问题。通常，用材料的成分（指化学成分）表征材料是由哪些原子组成的，用结构表征材料中原子是如何聚集起来的。另外，材料的结构与制备（加工）材料的工艺有关，这就形成了成分-工艺-结构-性能的关系链。本章介绍这个关系链中的结构问题。

材料的**结构**是指组成材料的原子在聚集体内的内在关系，即原子在三维空间的排列关系。这种关系分为三个层次，即原子结合键、相结构和组织结构。这三个层次的关系是：原子通过结合键结合在一起组成相，相组成组织，大量的组织聚集在一起就是我们“看到”的材料。材料的结构决定了材料的性能，组成材料的原子相同，如果结构不同，则性能也会相差悬殊，如众所周知的石墨和金刚石，二者都是纯碳形成的具有不同结构的晶体，由于晶体结构不同，前者硬度低，可作为固体润滑剂使用，而后者是到目前为止已知材料中最硬的材料。

本章从原子结合键、相结构和组织结构三个层次对材料的结构进行阐述，为表征材料、分析材料的性能打下基础。

学习目标

1. 掌握结合键和结合能基本概念并能用于分析金属材料、陶瓷材料和高分子聚合物的基本性能。
2. 掌握晶体、非晶体、单晶体、多晶体基本概念并能用于分析材料的性能。
3. 了解布拉菲点阵，掌握体心立方晶胞、面心立方晶胞和密排六方晶胞及晶向指数、晶面指数的标定，立方晶系晶向原子间距、晶面间距的计算并具有综合分析应用能力。
4. 掌握点缺陷、线缺陷、面缺陷基本概念和各种晶体缺陷类型并能用于分析对材料性能的影响。
5. 掌握合金相结构和高分子相结构的基本知识。
6. 掌握组织基本概念和组织与强度的映射关系并能用于分析组织与力学性能之间的关系。

1.1 原子结合键和结合能

物质之间是通过力联系在一起的。原子间存在吸引力和排斥力，当原子间的吸引力和排

斥力达到平衡时，原子处于相对的“静止”状态。我们分析材料时，首先要考虑两个或数个原子之间的相互作用力问题，这种作用力用化学键来描述。作用力的大小用结合能来衡量。

1.1.1 原子结合键

在材料领域，原子结合键分为两个层次：一是两个或多个原子之间的结合键即化学键；二是主要存在于分子之间的结合键即物理键。化学键分为金属键、离子键和共价键；物理键即次价键，包括分子键（也称范德瓦尔斯键）和氢键。组成材料的原子不同，原子间的结合力就不同，使材料具有不同的性能。

1.1.1.1 金属键

金属键是化学键的一种，主要在金属中存在。处于凝聚态的金属原子，将它们的价电子贡献出来，作为整个原子基体的共有电子。金属键本质上与共价键有类似的地方，只是此时其外层电子共有化程度远远大于共价键。这些共有化电子称为**自由电子**，自由电子组成所谓的电子云或电子气，在点阵的周期场中按量子力学规律运动。而失去了价电子的金属原子成为正离子，镶嵌在这些电子云中，并依靠与这些自由电子的静电作用而相互结合，这种结合方式就称为**金属键**。

金属键没有方向性，正离子间改变相对位置并不会破坏自由电子与正离子间的结合，因而金属具有良好的塑性。同样，金属正离子被另外一种金属正离子取代也不会破坏结合键，因而金属之间具有相互溶解的能力，容易形成固溶体也是金属的重要特性。

由于金属只有少数价电子能用于成键，金属在形成晶体时，倾向于构成极为紧密的结构，使每个原子都有尽可能多的相邻原子，金属晶体一般都具有高配位数和紧密堆积结构，多数金属晶体属于体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。

由于在金属晶体中，自由电子在金属中做穿梭运动，在外电场作用下，自由电子定向运动，产生电流，所以金属具有良好的导电性。加热时，因为金属原子振动加剧，阻碍了电子做穿梭运动，因而金属电阻率一般和温度呈正相关。自由电子很容易被激发，它们可以吸收在光电效应截止频率以上的光，所以大多数金属呈银白色。温度是分子平均动能的量度，而金属原子和自由电子的振动很容易一个接一个地传导，故金属局部的热振动能快速地传至整体，所以金属的导热性能很好。

1.1.1.2 离子键

当金属原子和非金属原子结合时，金属原子失去电子成为阳离子，而非金属原子得到电子成为阴离子。阳离子和阴离子间通过静电作用，也就是静电引力结合形成的化学键称为**离子键**。

在离子键结合的晶体中，阳离子的周围是阴离子，而阴离子的周围是阳离子，如图 1-1 所示的 NaCl 晶体。从图 1-1 中，你能分出哪个 Na^+ 和 Cl^- 结合成 NaCl 分子了吗？不能。所以，当两种元素通过离子键结合成固体时，也不存在分子的概念，不存在分子间的结合问题。因而，就结合键层面上说，离子键结合的材料性能是由离子键的强弱决定的，而离子键的强弱是

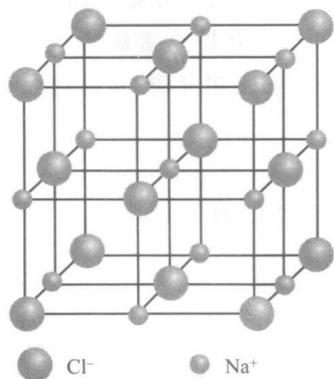


图 1-1 NaCl 离子晶体

由金属原子和非金属原子的本性决定的，即不同的金属原子与不同的非金属原子结合在一起表现出不同的性能。O、C、N 等与金属结合往往具有很强的结合力，如 Al_2O_3 、TiC、WC、TiN 等，在金属材料 and 陶瓷材料中有非常重要的应用价值。

由于离子键的结合力很大，所以离子键结合的晶体往往具有高熔点、高强度、高硬度和高的耐磨性以及小的热膨胀系数。我们可以利用这一性能特点，在金属中加入这些化合物提高金属的这些性能。又由于没有自由电子，所以无机非金属材料具有良好的绝缘性，解决高温下的绝缘问题就要依赖于陶瓷材料了，如 Al_2O_3 、MgO 等都是很好的高温绝缘材料。由于离子键具有方向性，所以离子晶体通常具有低塑性和高脆性。这是离子键结合的材料即无机非金属材料的短板。

1. 1. 1. 3 共价键

两个或多个原子共同使用它们的外层电子，在理想情况下达到电子饱和状态，由此组成比较稳定和坚固的化学结构叫作**共价键**。共价键结合的材料可以分为两大类，一类是同种原子形成的共价键，如具有金刚石结构的 C、Si 和 Ge 等，如图 1-2 所示的金刚石，自身通过共价键结合形成空间网状结构，如同金属键和离子键结合的固体一样，也不存在分子间的结合问题，因而就结合键层面上说，这类共价键结合的材料性能是由共价键的强弱决定的，往往表现出一些特殊的性能，如金刚石是最硬的材料，碳纤维具有非常高的比强度和比刚度，碳纳米管、石墨烯和石墨炔是重要的功能材料，而 Si 和 Ge 是半导体材料。另一类是以 C、H 为主并有 O、Cl、F、N 等参与形成的有机物，是典型的分子，如图 1-2 所示的甲烷、丙烷。有些有机物小分子可以通过聚合和缩聚反应生成大分子即高分子聚合物，形成了高分子材料的大家族。高分子材料中分子与分子之间的结合就要靠分子间的作用力——范德瓦尔斯键和氢键了。

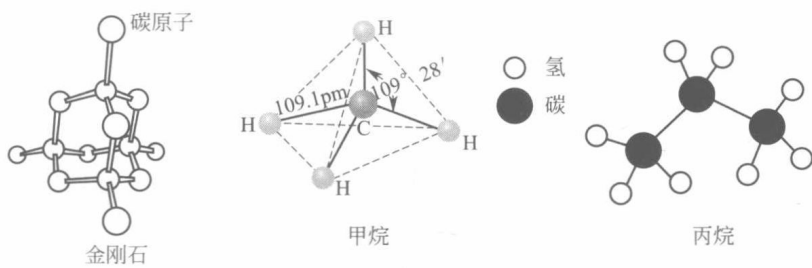


图 1-2 金刚石、甲烷、丙烷分子结构模型

1. 1. 1. 4 范德瓦尔斯键

对原来就具有稳定电子结构的分子，例如，具有满壳层结构的惰性气体分子，或价电子已用于形成共价键的饱和分子，在低温下组成晶体时，粒子间有一定的吸引力，即分子力，称为**范德瓦尔斯键**。低分子晶体的结合很弱，导致硬度低，熔点低，易于挥发，多为透明的绝缘体，这是低分子晶体的特点。以烷烃类有机物为例，甲烷、丙烷通常是气态，这是因为它们的分子间作用力很小。而丙烷经过压缩可以成为液态，外加压力相当于增大了范德瓦尔斯键的作用力。随着分子量的增大，每摩尔原子中共价键的数量增多，分子数量减少，原子间作用力增大，可以从气态变为液态直至固态。因而，在有机物中，随分子量增大，其聚集态从气态变为液态和固态。在固态中也随分子量增大强度提高，成为高分子材料。高分子材

料中分子间的结合，主要靠范德瓦尔斯键和氢键，这两种键的结合力都比共价键小得多，所以，高分子材料与金属材料、无机非金属材料相比往往表现出强度低、耐热性差的特点。所以耐热性差，是因为随着温度升高，原子振动加剧，很容易逃脱范德瓦尔斯键束缚而可以流动甚至气化。

各种溶剂的本质是减小范德瓦尔斯键的键力，一些低分子物质加到高分子材料中因为减小范德瓦尔斯键的键力而增加了高分子材料的流动性，许多塑料在成型时要加增塑剂提高其流动性就是这个道理。

范德瓦尔斯键不仅在高分子材料中很重要，在材料的其他领域，如粘接剂、电镀层与基体的结合、喷涂层与基体的结合等也起着非常重要的作用。粘接剂是由具有较大范德瓦尔斯键的分子和低分子溶剂混合而成的，当低分子挥发后靠较强的范德瓦尔斯键的键力将两种材料结合在一起。

1.1.1.5 氢键

氢原子与电负性大、半径小的原子 X (F、O、N 等) 以共价键结合，若与电负性大的原子 Y (与 X 相同也可以不同) 接近，在 X 与 Y 之间以氢为媒介，生成 $X-H\cdots Y$ 形式的一种特殊的分子间或分子内相互作用，称为**氢键**。值得一提的是，氢键具有饱和性和方向性。氢键可以存在于分子内或分子间。氢键在高分子材料中特别重要，纤维素、尼龙和蛋白质等分子有很强的氢键，并显示出非常特殊的结晶结构和性能。分子间有氢键的液体，一般黏度较大，例如甘油、磷酸、浓硫酸等，由于分子间可形成众多的氢键，这些物质通常为黏稠状液体。形成分子内氢键的材料，熔点和沸点高。这是因为分子内形成氢键的氢元素距离较近，分子内氢键的键能比较高，从而使熔点和沸点升高。

由于有 F、O、N 等元素的分子才能形成氢键，氢键又显著提高分子间的作用力，所以分子中包含 F、O、N 等元素的高分子材料的强度、耐热性都比较高。

1.1.1.6 混合键

初看起来，上述各种键的形成条件完全不同，故对于某一具体材料而言，似乎只能满足其中的一种，只具有单一的结合键，如金属应为金属键，IV A 族元素应为共价键，电负性不同的元素应结合成离子键……然而，实际材料中单一结合键的情况并不是很多，前面讲的只是典型的例子，大部分材料内部原子结合键往往是各种键的混合。

例如：金刚石具有单一的共价键，那么同族元素 Si、Ge、Sn、Pb 也有四个价电子，是否也可形成与金刚石完全相同的共价结合呢？由于周期表中同族元素的电负性自上而下逐渐下降，即失去电子的倾向逐渐增大，因此这些元素在形成共价结合的同时，电子有一定概率脱离原子成为自由电子，意味着存在一定比例的金属键，因此，IV A 族的 Si、Ge、Sn 元素的结合是共价键与金属键的混合，金属键所占比例按此顺序递增，到 Pb 时，由于电负性已很低，就成为完全的金属键结合。此外，金属主要是金属键，但也会出现一些非金属键。如过渡族元素（特别是高熔点的 W、Mo 等）的原子结合中也会出现少量的共价键结合，这正是过渡族金属具有高熔点的原因。又如金属与金属形成的金属间化合物，尽管组成元素都是金属，但是两者的电负性不一样，有一定的离子化倾向，因此它们不具有金属特有的塑性，往往很脆。再如金刚石和石墨，可以认为金刚石的化学键是百分之百的共价键，没有自由电子不导电。而石墨是导电的，在冶金行业、干电池中作导电电极使用，显然石墨中有金属键

的成分在内。

陶瓷化合物中出现离子键与共价键混合的情况更是常见，通常金属正离子与非金属离子所组成的化合物并不是纯粹的离子化合物，它们的性质不能仅用离子键予以理解。化合物中离子键的比例取决于组成元素的电负性，电负性相差越大，则离子键比例越高。

1.1.1.7 材料的四大家族

材料品种繁多，数以十万计。为了便于认识和应用，人们从不同角度对其进行分类。按化学成分、生产过程、结构及性能特点，材料可分为三大类，即金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料。三大材料互相交叉、相互融合。由三大材料中任意两种或两种以上复合而成的材料称为复合材料。如果把复合材料作为一类便可称为四大类材料。

金属材料是以金属键为主形成的材料，分为两大类：钢铁材料和非铁（有色）金属材料。除钢铁外，其他金属材料统称为非铁金属材料，主要有铝、铜、钛、镍、镁及其合金等。

无机非金属材料是以离子键和共价键为主形成的材料，主要包括陶瓷、水泥、玻璃及非金属矿物材料。陶瓷是应用历史最悠久、应用范围最广泛的非金属材料。传统的陶瓷材料由黏土、石英、长石等组成，主要作为建筑材料使用。新型陶瓷材料主要以 Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 等为主要组分，已用作航空航天领域中航天发动机的热绝缘涂层、发动机的叶片等，还作为先进的功能材料用于制作电子元件和敏感元件。

有机高分子材料是以共价键为主，氢键和范德瓦尔斯键为辅结合而成的材料，又称高分子聚合物，按用途可分为塑料、合成纤维和橡胶三大类。塑料通常又分为通用塑料和工程塑料。通用塑料主要用来制造薄膜、容器和包装用品，PE（聚乙烯）是其代表。工程塑料主要是指力学性能较高的塑料，俗称尼龙的聚酰胺、聚碳酸酯是这类材料中的代表。最近，功能高分子材料得到了迅速发展，如将取代液晶材料的有机电致发光材料等。

复合材料是由两种或两种以上不同原材料组成，使原材料的性能得到充分发挥，并通过复合化而得到单一材料所不具备的性能。按基体可分为金属基复合材料、有机高分子材料基复合材料、无机非金属材料基复合材料。

1.1.2 结合能

用原子结合能表示原子结合键的键能大小。当两个原子无限远时，原子间不发生作用，作用能可视为零，如图 1-3 所示。当两个原子在吸引力作用下靠近时，体系的位能逐渐下降，到达平衡距离，即当两原子间排斥力和吸引力相等时，位能最低；当原子距离进一步接近时，就必须克服反向排斥力，使作用能重新升高。通常把平衡距离下的作

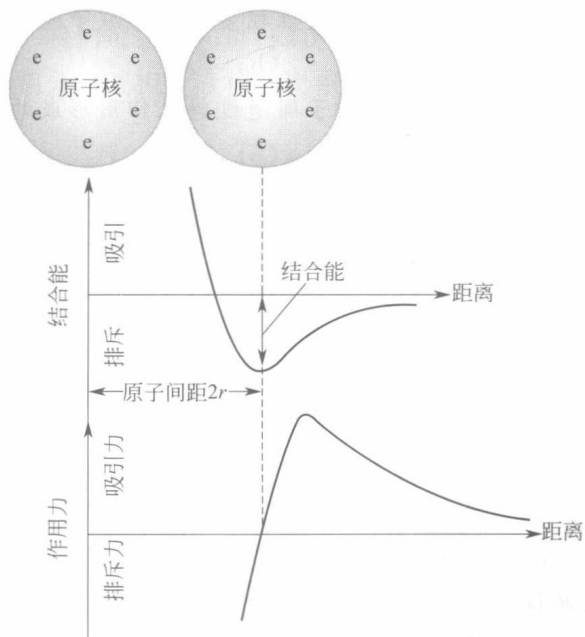


图 1-3 原子间作用力和结合能

用能定义为原子的结合能。

用原子结合能表示原子结合键的键能大小。结合能越大，原子结合越稳定，熔点越高，弹性模量越大。表 1-1 是不同类型结合键的结合能，可以看出，从离子键、共价键、金属键到范德瓦尔斯键，结合能依次减小。不同物质的结合能和熔点见表 1-2。从表 1-2 中可以看出，结合能越大，熔点越高。

表 1-1 不同键型的结合能

键型	结合能/(kJ/mol)	键型	结合能/(kJ/mol)
离子键	630~1550	金属键	100~830
共价键	520~1250	范德瓦尔斯键	<40

表 1-2 不同物质的结合能和熔点

键型	物质	结合能/(kJ/mol)	熔点/℃	键型	物质	结合能/(kJ/mol)	熔点/℃
离子键	NaCl	640	801	金属键	Fe	406	1538
	MgO	1000	2800		W	849	3410
共价键	Si	450	1410	范德瓦尔斯键	Ar	7.7	-189
	C(金刚石)	713	>3550		Cl ₂	3.1	-101
金属键	Hg	68	-39	金属键	NH ₃	35	-78
	Al	324	660		H ₂ O	51	0

共价键的键能尽管很高，但以共价键结合为主的高分子材料的强度却比较低，耐热性也比较差，其原因在于高分子间的结合能即范德瓦尔斯键和氢键的结合能非常小。

知识巩固 1-1

1. 金属中正离子与电子气之间强烈的库仑力使金属原子结合在一起，这种结合键叫作_____。
- (a) 离子键 (b) 共价键 (c) 金属键 (d) 氢键
2. 两个或多个电负性相差不大的原子间通过共用电子对而形成的化学键叫作_____。
- (a) 离子键 (b) 氢键 (c) 共价键 (d) 金属键
3. 阴离子、阳离子间通过静电作用形成的化学键叫作_____。
- (a) 离子键 (b) 氢键 (c) 共价键 (d) 金属键
4. 金属材料以_____为主结合在一起。
- (a) 离子键和金属键 (b) 氢键和共价键 (c) 金属键 (d) 金属键和共价键
5. 陶瓷材料以_____为主结合在一起。
- (a) 离子键和共价键 (b) 氢键 (c) 共价键 (d) 金属键和共价键
6. 高分子材料以_____为主结合在一起。
- (a) 离子键和共价键 (b) 氢键 (c) 共价键和氢键 (d) 金属键和共价键
7. 金属具有良好的导电性和导热性与_____有密切关系。
- (a) 金属有光泽 (b) 金属不透明 (c) 金属塑性好 (d) 金属中自由电子数量多
8. 金属键没有方向性，对原子没有选择性，所以在外力作用下发生原子相对移动时，金属键不会被破坏，因而金属表现出良好的_____。
- (a) 脆性 (b) 塑性 (c) 绝缘性 (d) 刚性
9. 金属加热时，正离子的振动增强，原子排列的规则性受到干扰，电子运动受阻，电