

材料科学与工程系列

Foundations of Materials Engineering  
Tutorship and Experimental Guidance

# 材料工程基础 辅导与实验

王昆林 编著

清华大学出版社

材料科学与工程系列

# 材料工程基础 辅导与实验

Foundations of Materials Engineering  
Tutorship and Experimental Guidance

王昆林 编著

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书是《材料工程基础》第2版(王昆林编著,清华大学出版社出版,2009.9)的配套教材,内容包括《材料工程基础》教材的各章内容提要与习题、课堂讨论指导书和实验指导书三部分。

本书可作为高等院校材料科学、材料加工以及制造工程领域专业学生学习“材料科学与工程基础”、“工程材料”、“机械工程材料”、“材料学概论”、“金属材料及热处理”及“金属材料学”等课程的参考教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

材料工程基础辅导与实验 / 王昆林编著. —北京: 清华大学出版社, 2009.9  
(材料科学与工程系列)

ISBN 978-7-302-20961-4

I. 材… II. 王… III. 工程材料—高等学校—教学参考资料 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 163542 号

责任编辑: 宋成斌

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 杨 艳

出版发行: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编: 100084

邮 购: 010-62786544

印 装 者: 北京嘉实印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 175×245 印 张: 6.5 字 数: 132 千字

版 次: 2009 年 9 月第 1 版 印 次: 2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 13.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: 010-62770177 转 3103 产品编号: 031384-01

# 前 言

本书是《材料工程基础》第2版(王昆林编著,清华大学出版社出版,2009.9)的配套教材。内容包括《材料工程基础》各章的内容提要、习题、课堂讨论指导书和实验指导书三部分,是根据“材料工程基础”课程教学大纲和教学基本要求编写的。内容提要部分阐述《材料工程基础》各章的基本内容和学习重点。重要术语与概念列出了教材所涉及的基本概念。习题突出重点,既考虑有助于对基本理论的学习与掌握,又充分重视对实际生产问题的了解与分析,以逐渐培养学生分析问题和解决问题的能力。课堂讨论是组织学生有准备地讨论课程中的一些重点和难点,使学生掌握课程的重点、基本概念和基本理论,也是学生应用所学知识解决材料问题的一种模拟实践。书中拟定了3次课堂讨论的题目,供参考选用。实验指导书部分选编了5个实验。实验着重于培养学生的动手能力、材料显微组织的分析能力等。

本书可作为高等院校材料科学、材料加工以及制造工程领域专业学生学习“材料科学与工程基础”、“工程材料”、“机械工程材料”、“材料学概论”、“金属材料及热处理”及“金属材料学”等课程的参考教材。

本书在编写过程中参考了清华大学机械工程系原金属学教研组和一些兄弟院校的有关教学资料,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

王昆林

2009年3月

# 目 录

## 第 1 篇 内容提要、重要术语与概念和习题

<b>1 绪论</b> .....	3
1.1 内容提要 .....	3
1.2 重要术语与概念 .....	4
1.3 习题 .....	5
<b>2 原子结构与原子间结合键</b> .....	6
2.1 内容提要 .....	6
2.2 重要术语与概念 .....	7
2.3 习题 .....	9
<b>3 晶体结构</b> .....	10
3.1 内容提要.....	10
3.2 重要术语与概念.....	12
3.3 习题.....	14
<b>4 固体中的扩散</b> .....	16
4.1 内容提要.....	16
4.2 重要术语与概念.....	17
4.3 习题.....	18
<b>5 材料的固化</b> .....	19
5.1 内容提要.....	19
5.2 重要术语与概念.....	20
5.3 习题.....	22

<b>6 相图</b> .....	24
6.1 内容提要 .....	24
6.2 重要术语与概念 .....	26
6.3 习题 .....	28
<b>7 固态相变与金属热处理</b> .....	30
7.1 内容提要 .....	30
7.2 重要术语与概念 .....	32
7.3 习题 .....	33
<b>8 金属的力学性能及其他性能</b> .....	36
8.1 内容提要 .....	36
8.2 重要术语与概念 .....	38
8.3 习题 .....	39
<b>9 高分子材料的结构与性能</b> .....	41
9.1 内容提要 .....	41
9.2 重要术语与概念 .....	41
9.3 习题 .....	43
<b>10 陶瓷的结构与性能</b> .....	44
10.1 内容提要 .....	44
10.2 重要术语与概念 .....	45
10.3 习题 .....	45

## 第 2 篇 课堂讨论指导书

课堂讨论 1 晶体结构 .....	49
课堂讨论 2 铁碳相图 .....	50
课堂讨论 3 钢的热处理 .....	52

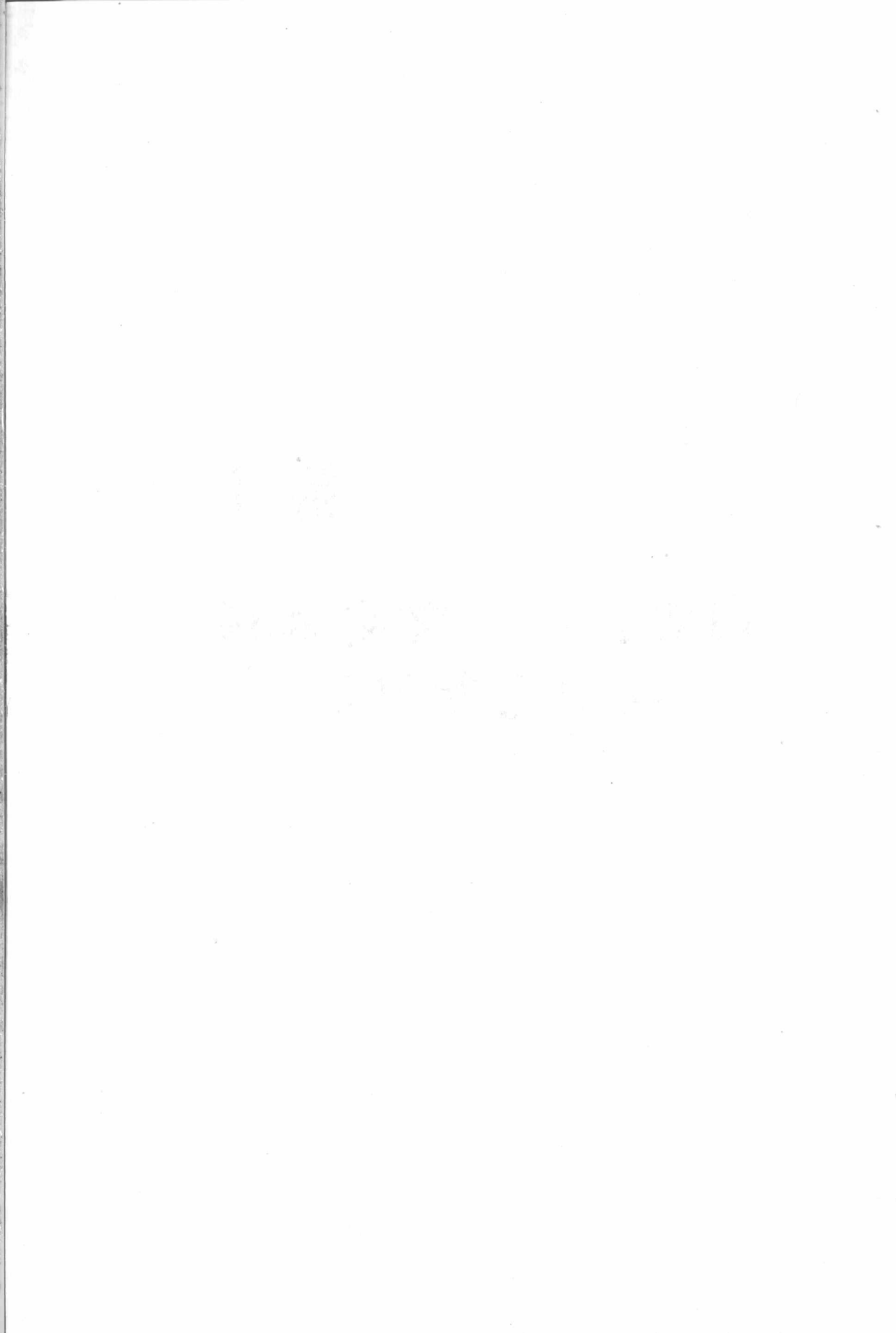
## 第 3 篇 实验指导书

实验 1 金相显微镜的构造及使用 .....	57
附录 1 钢的平均晶粒度测定 .....	63

实验 2 金相显微试样的制备 .....	66
实验 3 二元合金显微组织分析 .....	72
实验 4 铁碳合金平衡组织分析 .....	76
实验 5 钢的热处理及热处理后的显微组织观察 .....	81
附录 2 硬度计的使用 .....	88







# 1 绪 论

## 1.1 内容提要

材料是人类用来制造各种产品的物质,是人类生产和生活的物质基础。人类社会的发展史表明,人类社会的发展伴随着材料的发明和发展,材料的发展推动着人类社会的进步,成为人类文明发展的里程碑。在石器时代人类使用石器作为工具,并发明了陶器、瓷器等;在青铜器时代和铁器时代炼铜、炼铁技术得到发展;在近代钢铁和有色金属材料得到迅速发展。现在人类已进入人工合成材料的新时代。先进复合材料、光电子信息材料、低维材料、新型金属材料、高性能塑料和先进陶瓷材料等各类新材料得到迅速的发展,为现代社会的发展奠定了重要的物质基础。在材料发展的历史过程中,我们勤劳智慧的祖先,创造了辉煌的成就,为人类文明、世界进步作出了巨大贡献。

在材料发展和科学技术进步的基础上,形成了材料科学与工程学科。它是关于材料制备与加工工艺、组成与结构、基本性能和使用性能之间相互关系的知识及应用的科学。材料科学与工程包括4个要素,即制备与加工、组成与结构、基本性能和使用性能,其核心内容是材料结构与性能的关系。该学科的主要特点是:多学科交叉的新兴学科;与工程技术有不可分割的关系;有很强的应用目的和明确的应用背景。

材料种类繁多,通常按材料的组成和结构特点,将其分为金属材料(包括黑色金属和有色金属)、高分子材料(包括塑料、合成纤维、橡胶和胶粘剂)、陶瓷材料和复合材料四大类。

材料科学研究材料的结构与性能的规律,材料加工的任务则是把材料加工成型,得到可供使用的产品,材料科学与材料加工紧密相关。材料加工是利用材料的基本知识对未经成型的坯料加工成所要求形状的零件。材料加工的方法很多,有铸造、焊接、锻造、粉末冶金和机械加工等。高速发展的科学技术促进了材料加工技术的进步与变革,材料加工技术逐渐走向综合化、多样化、柔性化、多学科化。新的发展趋势是:全新的加工方法与工艺,以及传统加工方法的改进与工序综合。材料加工的新技术、新工艺不断出现,包括精确成型加工技术、连铸连轧、喷射铸造、快速原形制造技术、材料电磁加工技术、激光加工技术和纳米材料的成型加工技术等。材料加工过程的计算机模拟仿真技术在铸造、塑性加工、焊接和热处理等领域中得到广泛应用,在提高产品质量、降低成本和深入开展材料组织结构研究等方面都发挥了重要作用。

材料加工技术的进步不仅推动了新材料的开发和应用,而且极大地提高了材料的性能和质量。只有掌握材料科学与工程的基本理论和基本知识,才能进一步学习、掌握各种材料加工技术,并为新材料的制备和加工,为合理地使用各种工程材料,奠定必要的基础。

## 1.2 重要术语与概念

1. 材料:人类用来制造各种产品的物质,是人类生产和生活的物质基础。

2. 低维材料:指超微粒子(零维)、纤维(一维)和薄膜(二维)材料。

3. 材料科学与工程:关于材料制备与加工工艺、组成与结构、基本性能和使用性能之间相互关系的知识及应用的科学。材料科学与工程包括4个要素,即制备与加工、组成与结构、基本性能和使用性能,材料科学与工程的核心内容是材料结构与性能的关系。

4. 材料的力学性能:主要指强度、塑性和刚度等,还包括冲击韧性、疲劳性能、蠕变性能和耐磨性能等。

5. 材料的物理性能:包括电学的、磁学的、光学的、热学的,以及化学的性能。

6. 材料的使用性能:材料在使用条件下表现出的行为,包括环境影响、受力状态、可靠性、耐用性、寿命预测及延寿措施、材料设计等内容。使用性能取决于材料的基本性能。

7. 材料的结构:包括材料的原子结构、原子在空间的排列、显微组织和多相结构4个层次。

8. 组织:用金相方法所观察到的材料内部的涉及晶体或晶粒的大小、方向、形状和排列状况等的微观形貌。

9. 材料的制备与加工:包括传统的冶炼、铸造、压力加工、焊接、热处理、烧结、表面技术、机械加工和对加工过程的模拟与仿真技术,也包括了新发展的高能束(激光束、电子束和离子束)表面改性技术、真空溅射、气相沉积、热喷涂、多种材料复合等新工艺。

10. 黑色金属:铁和以铁为基的合金,包括钢、铸铁和铁合金。

11. 有色金属:黑色金属以外的所有金属及其合金,如铝、铜、钛和镍等金属及其合金。

12. 陶瓷材料:由一种或多种金属元素同一种非金属元素(通常为氧)的化合物组成的材料,其中尺寸较大的氧原子为陶瓷的基质,较小的金属(或非金属如硅等)原子处于氧原子之间的空隙里。陶瓷的硬度很高,但脆性很大。

13. 复合材料:由两种或两种以上不同材料组合而成的材料,如玻璃纤维增强聚合物。

14. 材料加工:利用材料的基本知识将未经成型的坯料加工成所要求形状的零

件。材料加工的方法很多,有铸造、焊接、锻造、粉末冶金和各种机械加工方法等。

### 1.3 习题

1. 什么是材料? 列出 6 种常见的工程材料。
2. 简要说明材料的发展历史。
3. 目前工程上应用最广泛的材料有哪些? 以某一工业部门为例, 简要说明各类材料的应用状况。
4. 举例说明两种新材料的特点及其应用。
5. 什么是材料科学与工程? 它包括哪些内容?
6. 材料的性能有哪些? 决定材料性能的因素有哪些?
7. 什么是材料的组织?
8. 简要说明几种常用材料的主要特点。
9. 常见的材料加工工艺有哪些? 试举例说明各工艺的主要作用。
10. 材料加工新工艺有哪些?
11. 材料加工过程的计算机建模与仿真技术有何作用和意义?
12. 材料加工对材料组织和性能有何影响? 试举例说明。

## 2 原子结构与原子间结合键

### 2.1 内容提要

原子主要由质子、中子和电子 3 种粒子构成。原子核带正电荷,通过静电吸引,将带负电荷的电子束缚在其周围,从整体看,原子是电中性的。原子核直径很小,但原子质量大部分集中在原子核内;电子占据了几乎所有原子体积,但仅占据很小的原子质量。电子,特别是外层电子,决定了原子的电学、力学、化学和热性能等主要性能。

原子中核外电子的运动状态(或分布情况),用 4 个量子数加以描述。这 4 个量子数是:主量子数  $n$ ,角量子数  $l$ ,磁量子数  $m$  和自旋量子数  $m_s$ 。多电子的原子中原子轨道的能量高低由近似能级图给出。

原子处于基态时,核外电子的排布必须遵循三条规律:泡利不相容原理、能量最低原理和洪特规则,据此可以确定大多数元素基态原子中电子的排布情况,即其电子层结构。通常表示电子层结构有两种方法:原子轨道式和电子排布式。

元素周期律即元素的性质随着原子序数(核电荷数)的递增而呈周期性的变化。随着核电荷数的递增各元素原子的外电子层结构呈周期性的重复排列。因此,原子核外电子排布的周期性变化正是元素周期律的本质原因,元素周期表则是各元素原子核外电子排布呈周期性变化的反映。元素周期表中的周期、族和元素分区等均与元素原子的外电子层结构有关。

元素的一些基本性质,如原子半径、电离能、电子亲和能和电负性等,都与原子电子层结构的周期性变化密切相关,它们在元素周期表中呈规律性的变化。

原子、离子或分子间的结合力称为结合键。一般把结合键分为一次键(离子键、共价键和金属键)和二次键(范德华键和氢键)。大部分材料的原子结合键往往是不同键的混合。不同的结合键具有不同的结合力,因而具有不同结合键的材料具有不同的性能特点。如离子键的结合力很大,因此离子晶体的硬度高,强度大,热膨胀系数小,但脆性大;离子键中很难产生可以自由运动的电子,所以离子晶体都是良好的绝缘体。共价键结合具有明显的方向性,不允许改变原子间的相对位置,所以材料不具有塑性且比较坚硬;共价键的结合力很大,使其熔点高,沸点高,挥发性低。金属键无所谓的饱和性和方向性,由金属键结合的金属具有良好的导电性和导热性、正的温度系数、不透明并呈现特有的金属光泽、具有良好的塑性变形能力等性能特点。

## 2.2 重要术语与概念

1. 原子序数：原子核中的质子数或核外电子数。

2. 核素：原子核中具有一定质子数和一定中子数的原子。

3. 质量数：原子核内质子数和中子数之和。例如，一种碳原子的原子核中有6个质子和6个中子，它的质量数为12；另一种碳原子的原子核里有6个质子和7个中子，质量数为13。

4. 同位素：质子数相同而中子数不同的同一元素的不同原子互称为同位素， $^{12}\text{C}$ 和 $^{13}\text{C}$ 是碳的同位素。

5. 原子质量：某核素一个原子的质量。采用 $^{12}\text{C}$ 一个原子质量的 $1/12$ 作单位，称为“原子质量单位”，用“u”表示( $1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-24}\text{ g}$ )，因此 $^{12}\text{C}$ 的原子质量也就等于 $12\text{ u}$ 。

6. 元素原子的相对原子质量：元素的平均原子质量与核素 $^{12}\text{C}$ 原子质量的 $1/12$ 之比。所谓元素的平均原子质量，是对一种元素含有多种天然同位素而说的，平均原子质量可由这些同位素的原子质量和丰度(指某同位素在所属的天然元素中所占的摩尔分数)来计算。元素的相对原子质量用符号 $A_r(\text{E})$ 表示，E代表某元素，如氧的相对原子质量等于16.00，可表示为 $A_r(\text{O}) = 16.00$ 。

7. 主量子数 $n$ ：描述核外电子的能量和电子离核平均距离的参数，是决定电子能量大小的主要量子数。 $n$ 值越大，电子离核的距离越远，电子的能量愈高。主量子数 $n$ 可取零以外的正整数，即 $n = 1, 2, 3, \dots$ 。每一个 $n$ 值代表一个电子层或主能级层(主层)。

8. 角量子数 $l$ ：描述原子轨道或电子云的形状，并在多电子原子中和主量子数 $n$ 一起决定电子的能量，故又称为副量子数。原子轨道是原子中一个电子的可能的运动状态。 $n$ 确定后，角量子数 $l$ 可取0到 $(n-1)$ ，即 $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$ 。 $l$ 的数值不同，原子轨道或电子云的形状就不同，代表了不同的电子亚层或能级层。

9. 磁量子数 $m$ ：决定原子轨道在磁场中分裂，在空间伸展的方向。其取值受角量子数 $l$ 的限制，当 $l$ 一定， $m$ 可取 $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ，共有 $(2l+1)$ 个数值，即原子轨道或电子云可以沿着 $(2l+1)$ 个不同方向伸展，常用符号 $\circ$ 或 $\square$ 表示。磁量子数与电子能量无关。 $l$ 相同， $m$ 不同的原子轨道，即形状相同，空间取向不同的原子轨道，其能量是相同的。

10. 自旋量子数 $m_s$ ：用于描述电子自旋方向的量子数称为自旋量子数。自旋方向只有顺时针和逆时针两种，故 $m_s = \pm \frac{1}{2}$ ，通常用符号 $\uparrow$ 、 $\downarrow$ 表示。自旋量子数 $m_s$ 对电子所处的能量没有影响。

11. 泡利不相容原理：在同一原子中，不可能有运动状态(亦即4个量子数)完全

相同的两个电子存在。这一原理也可表达为：在同一原子轨道中最多只能容纳两个自旋方向相反的电子。

12. 能量最低原理：处于基态的多电子原子，在不违背泡利不相容原理的前提下，核外电子总是优先占据能量最低的轨道，然后才依次进入能级较高的原子轨道，使整个原子体系处于最低的能量状态。

13. 洪特规则：电子在同一亚层能量相同的等价轨道上排布时，总是尽可能分占不同的轨道，并且自旋方向相同；在能量相同的等价轨道中，电子处于全充满( $p^6$ 、 $d^{10}$ 、 $f^{14}$ )，半充满( $p^3$ 、 $d^5$ 、 $f^7$ )和全空( $p^0$ 、 $d^0$ 、 $f^0$ )时，原子的能量较低，体系稳定。

14. 电子层结构：电子在核外的排布情况。通常有两种表示方法：原子轨道式和电子排布式。

15. 原子实：原子中的内层电子结构与某一稀有气体元素的电子层结构相同的部分，用该稀有气体的元素符号加方括号来表示。如 Ne (氖) 的电子层结构为  $1s^2 2s^2 2p^6$ ，因此： $^{14}\text{Si}$  电子层结构  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$  可表示为  $[\text{Ne}] 3s^2 3p^2$ 。

16. 元素周期律：元素的性质随着原子序数(核电荷数)的递增而呈周期性的变化。随着核电荷数的递增各元素原子的外电子层结构呈周期性的重复排列。因此，原子核外电子排布的周期性变化正是元素周期律的本质原因，元素周期表则是各元素原子核外电子排布呈周期性变化的反映。

17. 结合键：材料是由不同的原子、离子或分子结合而成的，原子、离子或分子间的结合力称为结合键。一般把结合键分为一次键(离子键、共价键和金属键)和二次键(范德华键和氢键)。

18. 离子键：正电性元素原子和负电性元素原子接触时，前者失去最外层价电子变成正离子，后者获得电子变成满壳层负离子，正、负离子由静电引力相互吸引；当它们十分接近时发生排斥，引力和斥力相等即形成稳定的离子键。

19. 共价键：元素原子之间或与邻近元素原子形成分子或晶体时，以共用价电子形成稳定的电子满壳层的方式实现结合，这种由共用价电子对产生的结合键叫共价键。

20. 金属键：原子丢失其价电子而成为正离子；被丢失的价电子不为某个或某两个原子所专有或共有，而是为全体原子所公有，这些公有化的电子叫做自由电子，它们在正离子之间自由运动，形成所谓电子气；正离子和电子气之间产生强烈的静电吸引力，使全部离子结合起来。这种结合力就叫做金属键，金属材料原子间的结合键以金属键为主。

21. 范德华键：由原子(或分子、原子团)的偶极吸引力产生的结合键。

22. 氢键：一个氢原子可同时和两个与电子亲合能力大的、半径较小的原子(如 F、O、N 等)相结合，形成氢键。氢键是一种较强的、有方向性的范德华键。

## 2.3 习题

1. 什么是①核素；②同位素？
2. 什么是①原子质量；②相对原子质量？
3. 说明 4 个量子数的取值规定，并说明其物理意义。
4. 原子中的电子是按照什么规律排列的？原子核外电子分布服从哪些基本规则？
5. 写出下列元素基态原子的电子排布式(括号内为原子序数)：C(6)；P(15)；Cl(17)；Cr(24)。
6. 形成离子键和共价键的条件是什么？
7. 什么是金属键？金属的性能与金属键有何关系？
8. 范德华键和氢键有何特点？有何区别？



## 3 晶体结构

### 3.1 内容提要

固态物质按其原子或分子的排列特征,可分为晶体和非晶体两大类。晶体中的原子(离子或分子)在三维空间呈有规律的周期性排列,非晶体中的原子则呈无规则排列,至多有局部区域呈短程规则排列。由于晶体与非晶体的原子排列方式不同,二者在性能上有一些重要区别。

为了研究晶体中原子排列的规律性,可以将原子抽象为几何点,用空间点阵、晶格和晶胞来代表原子规则排列的状况。晶胞的几何特征可以用晶胞的3条棱边长 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 和3条棱边之间的夹角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 6个参数来描述,其中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 称为晶格常数或点阵常数, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 表示轴间角。

根据晶胞的3条棱边是否相等、3个夹角是否相等以及是否为直角等关系,晶体学将所有晶体分为7个晶系,而这7个晶系只能有14种空间点阵。虽然晶体只有14种空间点阵,但点阵中的每一个阵点可以由一个或一个以上的质点(原子、离子或分子)所组成,而这些质点的组合和排列又可以有多种不同的形式。因此,每种空间点阵都可以形成无限多的晶体点阵(晶体结构)。

晶向是晶体中任意两原子间连线所指的方向,其位向用晶向指数来确定。由于晶体的对称性,某些晶向上的原子排列相同但空间位向不同,它们在晶体学上属等同晶向,可归并为一个晶向族,用 $\langle uvw \rangle$ 表示。在立方晶系中,晶向族各晶向指数可通过改变指数顺序和正负号的排列组合方法求出。六方晶系的晶向指数通常采用专用的四指数标定方法确定。

晶面是晶体中一系列原子所组成的平面,其位向用晶面指数来确定。立方晶系的晶面指数通常采用密勒指数法确定,即晶面指数是根据晶面与3个坐标轴的截距来决定的。在立方晶系中,由于对称性很高,存在许多空间位向不同但原子排列相同的晶面,它们在晶体学上等同,可归并为一个晶面族,用 $\{hkl\}$ 表示。在立方晶系中,同一晶面族的各晶面指数也可通过改变指数顺序和正负号的排列组合方法求出。六方晶系的晶面指数通常也采用四指数标定方法。

所有相交于某一晶向直线或平行于此直线的晶面构成一个晶带,此直线称为晶带轴,这些晶面是属于此晶带的晶面,称为共带面。晶带轴 $[uvw]$ 与该晶带的晶面 $(hkl)$ 之间存在以下关系: $hu+kv+lw=0$ ,凡满足此关系的晶面都属于以 $[uvw]$ 为