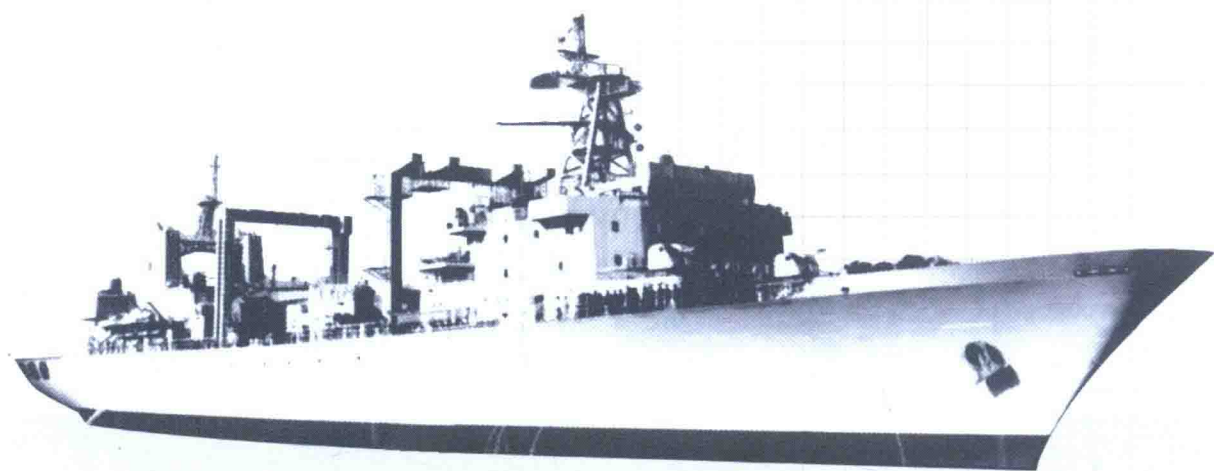


船舶工程材料 实验与学习指导

孔小东 陈 珊 苏小红 编



科学出版社

船舶工程材料 实验与学习指导

孔小东 陈 珊 苏小红 编

科学出版社

北 京

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

内 容 简 介

本书为“海军院校重点教材”，全书分三篇。内容包括章节内容提要、学习要点、习题、课堂讨论和实验。

本书可作为本科院校、高职高专等机械类、近机类、船舶与海洋工程等专业学生的学习辅导教材。

图书在版编目（CIP）数据

船舶工程材料实验与学习指导/孔小东，陈珊，苏小红编. —北京：科学出版社，2015.2

ISBN 978-7-03-043405-0

I. ①船… II. ①孔… ②陈… ③苏… III. ①船用材料—高等学校—教学参考资料 IV. ①U668

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 033206 号

责任编辑：吉正霞 罗 娟 / 责任校对：李晶晶

责任印制：高 嵘 / 封面设计：蓝 正

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本：787×1096 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张：11 3/4

字数：266 000

定价：28.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前 言

本书为“海军院校重点教材”，是《船舶工程材料》（孔小东主编，科学出版社出版）的配套教材，是根据“船舶工程材料”课程教学标准和教学基本要求编写的。

本书内容分为三个部分：①《船舶工程材料》各章的内容提要与习题；②课堂讨论教学设计与安排；③实验指导书。各章的内容提要部分主要阐述《船舶工程材料》各章的基本内容和学习重点，并在总结各章学习重点的基础上编列了大量习题，进一步突出重点，其中有填空、简答、判断、选择及综合类题，既促使学习者掌握课程的基本知识，又充分重视对实际生产问题的了解与分析。课堂讨论部分设计立足于组织学生有准备地讨论课程中的一些重点和难点，如铁碳平衡相图、钢的热处理、工业用钢及材料的选用等；通过课堂讨论，培养学生分析问题和解决问题的能力。实验指导书部分编写了 10 个实验，实验 1~实验 4 为基本实验，其余为选修实验；通过实验，促使学生在掌握理论知识的基础上，亲自动手检测材料常规性能，观察合金的微观组织，并根据材料的实际工作条件制订热处理工艺，以培养学生的实际操作能力、观察能力和分析问题能力等。

本书编写工作由孔小东、陈珊和苏小红共同完成，孔小东主编，负责内容设计、统稿；陈珊负责内容提要与习题、课堂讨论教学与安排部分的编写；苏小红负责实验指导书、部分习题的编写。

由于编者的知识和水平有限，书中难免存在不足，敬请读者批评指正，以便进行进一步的修改。

编 者

2015 年 1 月

目 录

第一篇 内容提要 and 习题

绪论	3
第一章 材料的力学性能	5
第二章 材料的结构与结晶	10
第三章 合金相图	18
第四章 塑性变形与再结晶	32
第五章 钢的热处理	41
第六章 碳钢与铸铁	58
第七章 合金钢	66
第八章 有色金属及其合金	77
第九章 高分子材料	83
第十章 陶瓷材料	87
第十一章 复合材料	90
第十二章 材料的失效与分析	93
第十三章 材料选材的基本规则	95
第十四章 典型的结构设计	96

第二篇 课堂讨论

课堂讨论一 铁碳合金相图	103
课堂讨论二 钢的热处理	106
课堂讨论三 工业用钢	108
课堂讨论四 材料的选择和使用	110

第三篇 实验指导书

实验一 金属材料的硬度和冲击实验	115
实验二 金属的结晶过程模拟观察实验	126
实验三 金相试样的制备	128
实验四 碳钢平衡组织显微观察	133
实验五 热膨胀法测定钢的连续冷却转变图	141
实验六 碳钢的热处理	145
实验七 碳钢非平衡组织显微观察	152
实验八 常用工程材料的显微组织观察	155
实验九 热处理综合实验	164

实验十 高分子材料的力学性能特点研究	167
习题参考答案	169
主要参考文献	178
附录 常用化学浸蚀剂	179

第一篇 内容摘要和习题

绪 论

本篇介绍我国对材料发展的重大贡献和新材料新工艺的发展现状。

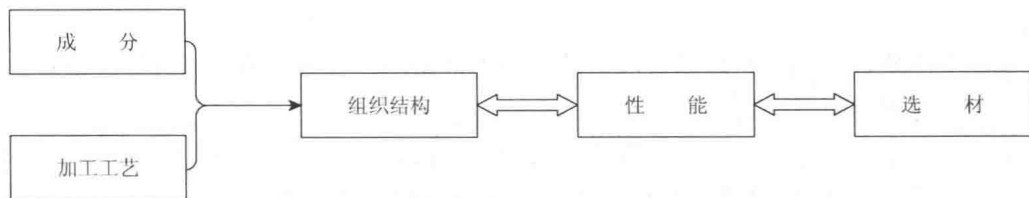
工程材料（学）是材料科学的实用部分，主要阐述用于制作工程结构和机器零件的结构材料的成分、组织、性能及应用方面的一般规律，其具体任务是为工程结构和机器零件的设计和使用提供正确选材和合理用材的基本原则、方法和知识；同时也为某些机械类、近机械类专业及相关学科提供必要的理论基础。

学习本课程的目的是：使学生获得有关工程材料的基本理论和基本知识，并初步了解材料分析的基本方法；了解常用工程材料的成分、工艺、组织和性能之间的关系；具备根据零件的工作条件和性能要求合理地选用机械工程材料的初步能力。

根据材料的本性或其结合键的性质可将工程材料分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类。

本门课程的学习内容：金属学基本理论，包括晶体学、相图、相结构、组织等；钢的热处理；常用的材料，包括碳钢、合金钢、有色金属、非金属材料；材料的失效分析与选用。

需要了解学习主线：



本章要求了解我国对材料发展的重大贡献以及材料的分类方法和类别。

各章重点要求论述如下。

第一章重点掌握各项力学性能指标的物理意义和工程意义。它们的单位及测试方法。了解各种硬度指标的定义及其区别，掌握洛氏硬度和布氏硬度、冲击吸收能量的测试方法。

第二章重点掌握关于晶体结构的基本概念、金属的三种典型晶格（体心立方、面心立方和密排六方晶格）和实际金属中的三类缺陷（点、线、面缺陷）。结晶是金属中各种转变的基础，结晶的形核和长大的概念、结晶的规律。本章应重点掌握结晶时形核和长大的过程、过冷度影响的规律和铸造时获得细晶的方法。

第三章重点掌握组元、相、组织、组织组成物等概念；固溶体和化合物的形成条件及结构、性能特点；匀晶相图和共晶相图的分析（包括杠杆定律的应用）及室温下的组织（会画示意图）；相图和性能的对应规律。重点掌握铁碳合金中的各种相和组织的本质

和特性；铁碳相图的分析（特别是 *ECF*、*PSK*、*GS* 和 *ES* 等线的意义，相图所反映的成分—组织—性能的规律；相图的应用。

第四章重点掌握塑性变形的一种方式——滑移的特点及位错机制；几种不同的强化方式——固溶强化、第二相强化、位错强化等；加工硬化的本质及实际意义；再结晶的概念和应用；冷热加工的区别。

第五章主要包括热处理原理和工艺两方面。热处理原理中重点掌握冷却转变曲线的意义及用途；冷却转变和回火转变后的各种组织的本质、性能和形态的特点。对热处理工艺应抓住各种工艺的工艺—组织—性能—应用的规律和特点，掌握淬透性概念。对大量实际问题，要求能分析和处理，不要死记硬背。

第六章内容包括碳钢和铸铁两部分。要求掌握碳钢中的杂质元素种类及作用、碳钢的分类、牌号及不同用途。铸铁主要需掌握铸铁的石墨化、影响石墨化的因素及各种铸铁的牌号—组织—性能—应用的特点。

第七章内容包括合金化原理和具体钢种两部分。合金化原理中重点掌握合金元素对铁碳相图、钢的热处理过程的影响规律，进而理解合金元素对钢的组织 and 性能的影响规律。特别是对钢热处理后的影响。在具体钢种中主要掌握各类钢（以结构钢为主）的成分—处理—组织—性能—应用的各自特点和规律。结合前面所学的金属学、热处理的理论知识，着重于对问题的理解，不要死记。

第八章主要要求知道常用铝合金、铜合金和轴承合金的性能及用途的一般特点。时效硬化是有色金属的重要强化手段，对其原理应有所了解，并和前面钢的强化手段区分开来。

第九章应掌握高分子材料的合成方法、分类及命名、高聚物的结构和性能特点、改性、常见高分子材料及应用。

第十章应掌握其分类、结构与性能、常用陶瓷材料及应用。

第十一章应理解复合材料的概念，重点掌握复合材料的特点和分类、常用复合材料。

第十二章应理解材料的失效形式及特点，如何进行失效分析。

第十三章应掌握材料选用的三大原则。结合常用的船体结构材料、轴类材料、齿轮材料进行合理选材和工艺制定。应结合前面所学热处理、材料学等方面的知识进行综合考虑，根据不同服役条件进行选材。

第十四章应掌握船体结构材料、齿轮、轴类零件、弹簧的工作条件、失效形式、性能要求。正确合理地选用材料，制定相应的热处理工艺和加工工艺路线。

第一章 材料的力学性能

第一节 学习目的与要求

材料的力学性能直接决定着材料的用途,需要弄清不同载荷下的力学性能评定指标。

- (1) 材料在受力时的变形阶段。
- (2) 在受静拉伸载荷作用时,用强度指标及塑性指标进行评定。
- (3) 在承受压力时,几种不同的硬度测试方法及指标。
- (4) 受到冲击载荷作用时,用冲击吸收能量或冲击韧性值等指标来衡量。

第二节 内 容 提 要

材料的使用性能包括力学、物理和化学性能等;材料的工艺性能包括铸造、锻压、焊接、热处理和切削性能等。

材料的力学性能是材料在承受各种载荷时的行为。材料受外力作用时,一般会出现弹性变形、塑性变形和断裂三个过程。根据载荷性质的不同(如拉伸、压缩、冲击等),这些过程的发生和发展是不同的,评价材料力学性能的指标也有其特定的物理意义。

力学性能指标有强度(屈服强度、抗拉强度)、塑性(延伸率和断面收缩率)、硬度(布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度)、冲击韧性(冲击吸收能量、冲击韧性值)和疲劳强度。

本章要求掌握不同载荷下的性能评价指标及物理意义,各力学性能见表 1-1。

表 1-1 力学性能总表

性能名称	符号意义	单位	获得方法或含义	应用
弹性模量	正弹性模量 E	Pa (MPa)	在应力与应变的关系符合胡克定律时,应力与应变的比值 $E = \frac{R}{\varepsilon}$	用于刚度计算
	切弹性模量 G			
刚度	EF (拉压) EJ (弯曲) GJ (扭转)		材料抵抗弹性变形的能力。在比例极限以内计量	工程技术上,根据情况常以挠度(f)或扭转角(θ)来核算刚度,以免因零件过量弹性变形而失去精度或效用
强度	弹性极限 R_p	Pa (MPa)	试样能保持纯弹性变形的最大应力	弹性零件要求材料有高的弹性极限,一般零件不要求
	屈服极限 上屈服极限 R_{eH} 下屈服极限 R_{eL}		试样出现应力不再增加而变形仍在进行的现象时的应力。现在还规定了非比例延伸强度(R_p)、总延伸强度(R_t)、残余延伸强度(R_r)。	工具、模具和机械零件所受应力均小于屈服极限,否则将因塑性变形而失效,所以是强度计算的重要依据
	抗拉极限 R_m		能使试样保持最大均匀变形的极限应力 $R_m = \frac{F_m}{S_0}$	是强度计算的重要依据。零件所受应力超过 R_m 将产生断裂

续表

性能名称	符号意义		单位	获得方法或含义	应用
疲劳	疲劳强度 S		Pa (MPa)	试样在交变应力作用下, 经无限次循环而不断裂的最大应力	从理论上讲, 零件所受应力低于疲劳极限时, 其疲劳寿命是无限的; 在工程上规定钢铁材料经 10^7 次循环, 有色金属经 10^8 次循环以上, 视为无限次循环
塑性	延伸率 A		%	试样被拉断后全标距长的伸长量与原标距长比值的百分率	A 与 Z 的数值越大, 材料的塑性就越好; 一般零件, 均具有一定的塑性储备, 以提高安全性; 对于冲压件等, 则要求有较高的塑性
	断面收缩率 Z			试样被拉断后, 缩颈处横截面积的收缩量与原横截面积比值的百分率 $Z = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\%$	
韧性	冲击吸收能量 KV_2		J	冲断试样后所消耗的冲击吸收能量	KV_2 值越大, 冲击韧性越好
	多冲抗力		以抗冲次数或抗冲能力表示	试样由原始至断裂全过程所消耗的冲击吸收能量	反映材料抵抗小能力的多次冲击的能力, 耐冲次数越多, 韧性越好
硬度	布氏硬度 HBW		不注单位	在一定压力下将直径为 D 的钢球压入被测金属表面, 测出压坑直径后, 查表得硬度值	测量硬度为 $8 \sim 450\text{HBW}$ 范围的钢铁、有色金属及其合金材料
	洛氏硬度	HRC	不注单位	在 1500N 压力下, 将 120° 金刚石锥体压入被测金属表面, 去除主加载荷后, 直接读出硬度值	
		HRA	不注单位	只是载荷为 600N , 其他同 HRC	
		HRB	不注单位	载荷 1000N 压头为 $\phi 1.588$ 钢球, 其过程同 HRC 的测定	
	维氏硬度 HV		不注单位	在规定压力下, 将 136° 的金刚石正四棱锥压入被测金属表面, 测出压痕对角线平均长度后, 查表得硬度值	主要用于测极薄件及薄层表面硬度件等

第三节 习 题

一、填空题

1. 材料的物理性能包括_____、_____、_____、_____、_____、_____等。
2. 屈服点表示的是材料抵抗_____的能力; 抗拉强度表示的是材料抵抗_____的能力; 刚度表示的是材料抵抗_____的能力。
3. 圆形标准拉伸试样分为_____和_____。长试样为_____, 短试样为_____。
4. 常用的测试硬度的方法有_____、_____、_____。
5. 屈服点用符号_____表示; 抗拉强度用符号_____表示; 断后伸长率用符号_____表示; 断面收缩率用符号_____表示; 洛氏硬度用符号_____表示; 布氏硬度用符号_____表示; 维氏硬度用符号_____表示; 冲击韧性用符号_____表示。
6. 检验淬火钢成品件的硬度一般用_____硬度, 检测退火件、正火件和调质件的

硬度常用_____硬度, 检验氮化件和渗金属件的硬度采用_____硬度试验。

7. 表征材料抵抗冲击载荷能力的性能指标是_____, 其单位是_____。

8. 材料常用的塑性指标有_____和_____两种, 其中_____表示塑性更接近材料的真实变形。

9. 材料主要的工艺性能有_____, _____、_____和_____。

二、判断题 (正确的在括号内画“√”, 错误的在括号内画“×”)

() 1. 机器中的零件在工作时, 材料强度高的不会变形, 材料强度低的一定会产生变形。

() 2. 屈服点是表征材料抵抗断裂能力的力学性能指标。

() 3. 所有的金属材料均有明显的屈服现象。

() 4. 屈服点是材料发生屈服时的平均应力。

() 5. 抗拉强度是材料断裂前承受的最大应力。

() 6. 某材料的硬度为 250~300HBW。

() 7. HRA 表示的是洛氏硬度的 A 标尺。

() 8. 材料的强度高, 其硬度一定高, 刚度一定大。

() 9. 强度高的钢, 塑性、韧性一定差。

() 10. 弹性极限高的材料, 所产生的弹性变形大。

() 11. 洛氏硬度的单位是 mm。

() 12. 材料韧性的好坏只取决于材料的成分, 与其他因素无关。

() 13. 测试 HBW 用硬质合金球做压头。

() 14. 布氏硬度可以用来测成品或半成品的硬度。

() 15. 降低零件的表面粗糙度和高频淬火可以提高疲劳强度。

() 16. 金属在外力作用下产生的变形都不能恢复。

() 17. 一般低碳钢的塑性优于高碳钢, 而硬度低于高碳钢。

() 18. 低碳钢、变形铝合金等塑性良好的金属适合于各种塑性变形加工。

() 19. 硬度试验测量简便, 属非破坏性试验, 且能反映其他力学性能, 因此是生产中最常用的力学性能测量法。

() 20. 材料韧性的主要判据是冲击吸收能量。

() 21. 一般金属材料在低温时比高温时的脆性大。

() 22. 金属的工艺性能好表明加工容易, 加工质量容易保证, 加工成本也较低。

() 23. 低碳钢的焊接性能优于高碳钢。

() 24. 材料综合性能好, 是指各项力学性能指标都是最大的。

() 25. 材料的强度与塑性只要化学成分一定, 就不变了。

三、选择题 (单选)

1. 下列力学性能指标中, 对组织不敏感的是 ()。

A. 硬度

B. 刚度

C. 塑性

D. 抗拉强度

2. 测试 HRC 时, 压头应选择 ()。
A. 顶角为 120° 的金刚石圆锥体 B. 直径为 1.588mm 的淬火钢球
C. 直径为 10mm 的硬质合金球 D. 直径为 10mm 的淬火钢球
3. 断后伸长率用符号 () 表示。
A. R_{eH} B. R_m C. A D. Z
4. 测试洛氏硬度时, 用 () 计算硬度值。
A. 压痕直径 B. 压痕面积 C. 残余压痕深度增量 D. 压痕深度
5. 材料抵抗塑性变形和断裂的能力称为 ()。
A. 强度 B. 硬度 C. 塑性 D. 弹性
6. 用拉伸试验可测定金属的 ()。
A. 强度 B. 硬度 C. 塑性 D. 强度和塑性
7. 一般工程图样上常标注材料的 (), 作为零件检验的主要依据。
A. 强度 B. 硬度 C. 塑性 D. 疲劳强度
8. 承受 () 作用的零件, 使用时可能出现疲劳断裂。
A. 静拉力 B. 静压力 C. 冲击力 D. 交变应力
9. 金属材料抵抗塑性变形的能力主要取决于材料的 ()。
A. 冲击韧性 B. 弹性 C. 塑性 D. 强度
10. 现有一碳钢支架刚性不足, 可有效解决此问题的方法是 ()。
A. 改用合金钢 B. 改用另一种碳钢
C. 进行热处理改性 D. 改变该支架的截面与结构形状尺寸
11. 金属材料的力学性能指标中, “200HBW” 是指 ()。
A. 硬度 B. 弹性 C. 强度 D. 塑性
12. 有关零件图图纸上, 出现了几种硬度技术条件的标注方法, 正确的标注是 ()。
A. HBS650~700 B. HBS=250~300kg·f/mm²
C. HRC15~20 D. HRC45~70
13. 在设计拖拉机缸盖螺钉时应选用的强度指标是 ()。
A. R_m B. R_{eH} (R_{eL}) C. $R_{t0.2}$ D. R_p
14. 疲劳试验时, 试样承受的载荷为 ()。
A. 静载荷 B. 冲击载荷 C. 交变载荷
15. 洛氏硬度 C 标尺使用的压头是 ()。
A. 淬硬钢球 B. 金刚石圆锥体 C. 硬质合金球

四、简述题

1. 什么是力学性能? 金属的力学性能包括哪些方面?
2. 什么是强度和塑性? 在拉伸实验中表示强度和塑性的指标主要有哪几种? 说明各种指标的物理意义及其单位。
3. 力学性能的强度指标中, 有了 R_p 为何还要制定出 $R_{p0.2}$? 有了 $R_{p0.2}$, 为什么还要

制定 R_m ?

4. 有一低碳钢试样, 原试样长为 100mm, 直径为 10mm, 在载荷为 21000N 时屈服, 试样断裂前的最大载荷为 30000N, 拉断后长度为 133mm, 断裂处最小直径为 6mm, 试计算 R_{eH} (R_{eL})、 R_m 、 A 、 Z 。

5. 什么是韧性? KV_2 表示什么意义? 量纲是什么?

6. 机械零件在工作条件下可能承受哪些负荷? 这些负荷对零件产生什么作用?

7. 能否通过增加零件的尺寸来提高其弹性模量?

8. 常用哪几种硬度实验? 如何选用? 硬度实验的优点何在?

9. 如果在图纸上出现下面几种硬度技术指标的标注, 判断是否正确? 原因何在?

①HBS250~280

②30~50HRC

③240~280HRC

④600~650HBS

10. 下列几种工件应该采用何种硬度实验法测定硬度?

①锉刀

②供应状态的各种碳钢钢材

③硬质合金刀片

④耐磨工件的表面硬化层

11. 设计刚性好的零件, 应根据何种指标选择材料? 采用何种材料为宜?

12. 常用的硬度方法有哪几种? 其应用范围如何? 这些方法测出的硬度值能否进行比较?

13. 有一碳钢制支架刚度不足, 有人要用热处理强化方法; 有人要另选合金钢; 有人要改变零件截面形状解决。哪种方法合理? 为什么?

14. 试比较布氏、洛氏、维氏硬度的特点, 指出各自最适用的范围。下列几种工件的硬度适宜哪种硬度法测量: 淬硬的钢件、灰铸铁毛坯件、硬质合金刀片、渗氮处理后的钢件表面渗氮层的硬度。

第二章 材料的结构与结晶

第一节 学习目的与要求

金属的结构影响金属的性能。这方面的概念是本章最基本的概念，必须理解掌握。

- (1) 材料中的结合键定义及种类。
- (2) 建立金属的理想晶体模型。
- (3) 熟知三种常见的金属典型晶格及其重要参数。
- (4) 解释单晶体和多晶体结构和性能的特点。
- (5) 知道实际晶体中的缺陷及其对性能的影响。
- (6) 清楚结晶的条件、概念和基本过程。
- (7) 知道影响结晶过程的主要因素及获得细晶粒的方法。
- (8) 了解实际铸锭组织的特点及形成原因。

第二节 内 容 提 要

一、材料的结构

组成物质的质点（原子、分子或离子）靠彼此之间相互作用联系在一起，这种使其稳定结合在一起的作用力称为结合键。工程材料的结合键分为离子键、共价键、金属键和分子键四种，还有特殊的分子键-氢键。金属材料由金属键结合，其内部的金属离子在空间有规则的排列，因此固态金属一般情况下均是晶体。固态金属有下列特性：良好的导电、导热性；良好的塑性；不透明、有光泽；正的电阻温度系数。高分子材料的结合键是共价键和分子键。复合材料可以有三种或三种以上的结合键存在。

1) 晶体与非晶体

金属晶体的空间排列方式，是通过原子中心假想连线构成的空间格子（晶格又称点阵）来描绘。晶格结点为原子所处的平衡位置。组成晶格的最小单元称为晶胞。晶胞在空间重复排列，形成整个晶体。

2) 三种常见金属的晶体结构

金属材料的结合键主要是金属键。金属材料基本都是晶体，绝大多数金属由体心立方、面心立方和密排六方这三种典型结构构成。

体心立方晶格（胞）：晶格常数 $a=b=c$ 、 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，晶胞原子数为 2 个，原子半径 $r=\frac{\sqrt{3}}{4}a$ ，致密度为 68%，典型代表金属有： α -Fe、Cr、Mo、W、V 等。

面心立方晶格（胞）：晶格常数 $a=b=c$ 、 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，晶胞原子数为 4 个，原子半径 $r=\frac{\sqrt{2}}{4}a$ ，致密度为 74%，典型代表金属有： γ -Fe、Al、Cu、Au 等。

密排立方晶格（胞）：晶格常数 $a=b$, $c/a=1.633$, $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$ 晶胞原子数为 6 个，原子半径 $r=\frac{1}{2}a$ ，致密度为 74%，典型代表金属有 Zn、Mg、 α -Ti 等。

3) 晶面与晶向

晶面与晶向可用晶面指数与晶向指数来表达。不同晶面、不同晶向上的原子排列情况不同。

体心立方晶格的最密面为 $\{110\}$ ，最密方向为 $\langle 111 \rangle$ 。

面心立方晶格的最密面为 $\{111\}$ ，最密方向为 $\langle 110 \rangle$ 。

密排六方晶格的最密面为 $\{0001\}$ ，最密方向为 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 。

4) 实际金属中的缺陷

实际金属中含有点缺陷（空位、间隙原子、置换原子）、线缺陷（位错）和面缺陷（晶界、亚晶界）三类晶体缺陷。缺陷具有以下特征。

几何特征：从物质粒子的排列角度来看，所有缺陷都导致晶体点阵的局部破坏。在缺陷区及缺陷附近造成了点阵的畸变。严重时造成局部的无序排列。

能量特征：缺陷的畸变区，原子离开了它们的平衡位置，致使这个区域的能量升高，相对于无畸变区是不稳定的区域。位错密度增加，材料强度增加。

二、金属的结晶

1. 材料的凝固过程

材料由液态变成固态有两种形式。一种是以金属及其化合物和陶瓷等材料为代表，具有固定的熔点和凝固点，凝固后的固体是晶体，这种凝固过程称为结晶。另一种材料以玻璃、聚合物为代表，这类液体在冷却过程中逐渐变硬，固化后的物质是非晶体。不同物质所发生的凝固过程是随条件而变化的。从理论上讲，任何物质都有可能出现两类凝固过程。液态金属的结构不同于气体，是短程有序的。金属的结晶过程是原子之间由短程有序过渡为长程有序的过程。金属材料实际结晶温度总是低于该金属的熔点。这样，理论结晶温度（凝固点）与实际结晶温度之差称为过冷度。过冷度就是结晶过程的驱动力。液态金属结晶的条件是要有一定的过冷度，结晶过程的推动力是液相和固相之间的自由能差。

液态金属结晶由两个基本过程构成：结晶核心的形成和核心的长大。在一定的过冷度下，从金属液体中以一定的速度产生晶核，同时生成的晶核以一定的线速度长大，在已有晶核不断长大的同时，又不断出现新的晶核并长大，直到整个体积的金属结晶完毕。

晶核的形成有两种方式：自发形核和非自发形核。自发形核的速度与过冷度的大小有关，过冷度越大，形核率 N 越大。非自发形核是按“结构相似，大小相当”的原则，利用金属液中未溶的固体微粒或加入的变质剂而形核的，所以非自发形核比自发形核容易。在实际金属和合金中，非自发形核往往起优先主导的作用。

晶体的长大有平面长大和树枝状长大两种方式。晶体的长大方式决定于散热条件。如果铸模壁温度较低，晶体长大时，通过固相模壁散热，固液界面是等温的，晶体按平