



普通高等教育“十二五”规划教材
PUTONG GAODENGJIAOYU SHIERWU GUIHUAJIAOCAI

机械工程材料 学习指导与习题精解

◎主 编:樊湘芳 叶 江 吴 炜◎主 审:邱长军

JIXIEGONGCHENGCAILIAOXUEXIZHIDAOJIXITIJINGJIE



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

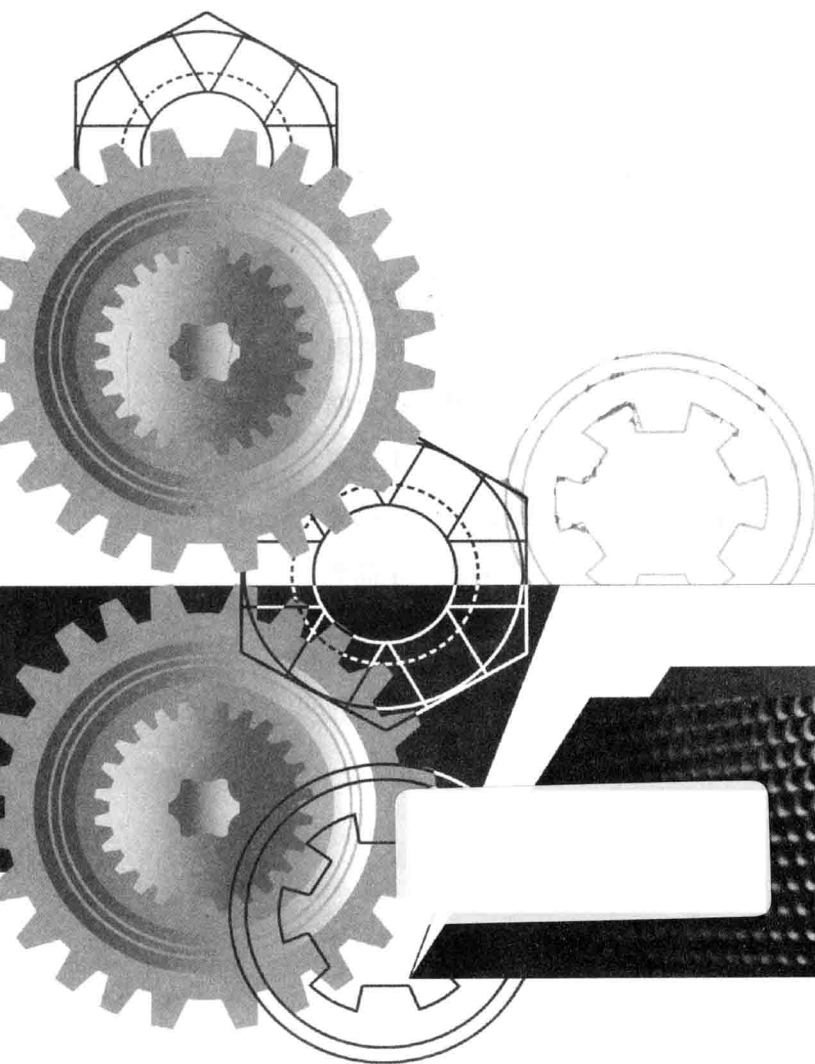


普通高等教育“十二五”规划教材
PUTONG GAODENGJIAOYU SHIERWU GUIHUAJIAOCAI

机械工程材料 学习指导与习题精解

◎主 编:樊湘芳 叶 江 吴 炜◎主 审:邱长军

JIXIEGONGCHENGCAILIAOXUEXIZHIDAOJIXITIJINGJIE



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料学习指导与习题精解/樊湘芳主编.
—长沙:中南大学出版社,2013.3
ISBN 978-7-5487-0819-3

I. 机... II. 樊... III. 机械制造材料—高等学校—教学参考资料 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 035461 号

机械工程材料学习指导与习题精解

樊湘芳 叶 江 吴 炜 主编

☐责任编辑 谭 平
☐责任印制 周 颖
☐出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482
☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 5 ☐字数 120 千字
☐版 次 2013 年 2 月第 1 版 ☐2013 年 2 月第 1 次印刷
☐书 号 ISBN 978-7-5487-0819-3
☐定 价 12.00 元

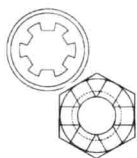
图书出现印装问题,请与出版社调换

内容简介

本书是中南大学出版社出版的《机械工程材料》教材第2版的配套教材。按教材章节顺序编写，习题紧扣教材内容，具有一定的覆盖面，难易程度，具有通用性、典型性、合理性和实用性。

本书内容包括《机械工程材料》教材各章的主要内容、教学基本要求、重点难点、习题及解答。

本书可作为普通高等学校机械类、近机械类专业学生学习《机械工程材料》、《金属学及热处理》等课程的辅助教材，亦可作为相关学科以及机械设计、材料加工等行业的工程技术人员的学习参考资料及考研学生的复习资料。



普通高等教育机械工程学科“十二五”规划教材编委会

主 任

(以姓氏笔画为序)

王艾伦 刘舜尧 李孟仁 尚建忠 唐进元

委 员

(以姓氏笔画为序)

丁敬平	万贤杞	王剑彬	王菊槐	王湘江	尹喜云
龙春光	叶久新	母福生	朱石沙	伍利群	刘吉兆
刘先兰	刘忠伟	刘金华	安伟科	杨舜洲	李必文
李 岚	李 岳	李新华	何国旗	何哲明	何竞飞
汪大鹏	张敬坚	陈召国	陈志刚	林国湘	罗烈雷
周里群	周知进	赵又红	胡成武	胡仲勋	胡争光
胡忠举	胡泽豪	钟丽萍	贺尚红	聂松辉	莫亚武
夏宏玉	夏卿坤	夏毅敏	高为国	高英武	郭克希
龚曙光	彭如恕	彭佑多	蒋寿生	曾周亮	谭援强
谭晶莹	潘存云				

总序 FOREWORD.

机械工程学科作为联结自然科学与工程行为的桥梁，它是支撑物质社会的重要基础，在国家经济发展与科学技术发展布局中占有重要的地位，21 世纪的机械工程学科面临诸多重大挑战，其突破将催生社会重大经济变革。当前机械工程学科进入了一个全新的发展阶段，总的发展趋势是：以提升人类生活品质为目标，发展新概念产品、高效高功能制造技术、功能极端化装备设计制造理论与技术、制造过程智能化和精准化理论与技术、人造系统与自然界和谐发展的可持续制造技术等。这对担负机械工程人才培养任务的高等学校提出了新挑战：高校必须突破传统思维束缚，培养能适应国家高速发展需求的具有机械学科新知识结构和创新能力的高素质人才。

为了顺应机械工程学科高等教育发展的新形势，湖南省机械工程学会、湖南省机械原理教学研究会、湖南省机械设计教学研究会、湖南省工程图学教学研究会、湖南省金工教学研究会与中南大学出版社一起积极组织了高等学校机械类专业系列教材的建设规划工作，成立了规划教材编委会。编委会由各高等学校机电学院院长及具有较高理论水平和教学经验的教授、学者和专家组成。编委会组织国内近 20 所高等学校长期在教学、教改第一线工作的骨干教师召开了多次教材建设研讨会和提纲讨论会，充分交流教学成果、教改经验、教材建设经验，把教学研究成果与教材建设结合起来，并对教材编写的指导思想、特色、内容等进行了充分的论证，统一认识，明确思路。在此基础上，经编委会推荐和遴选，近百名具有丰富教学实践经验的教师参加了这套教材的编写工作。历经两年多的努力，这套教材终于与读者见面了，它凝结了全体编写者与组织者的心血，是他们集体智慧的结晶，也是他们教学教改成果的总结，体现了编写者对教育部“质量工程”精神的深刻领悟和对本学科教育规律的把握。

这套教材包括了高等学校机械类专业的基础课和部分专业基础课教材。整体看来，这套教材具有以下特色：

(1)根据教育部高等学校教学指导委员会相关课程的教学基本要求编写。遵循“重基础、宽口径、强能力、强应用”的原则，注重科学性、系统性、实践性。

(2)注重创新。本套教材不但反映了机械学科新知识、新技术、新方法的发展趋势和研究成果，还反映了其他相关学科在与机械学科的融合与渗透中产生的新前沿，体现了学科交叉对本学科的促进；教材与工程实践联系密切，应用实例丰富，体现了机械学科应用领域在不断扩大。

(3)注重质量。本套教材编写组对教材内容进行了严格的审定与把关，教材力求概念准确、叙述精练、案例典型、深入浅出、用词规范，采用最新国家标准及技术规范，确保了教材的高质量与权威性。

(4)教材体系立体化。为了方便教师教学与学生学习，本套教材还提供了电子课件、教学指导、教学大纲、考试大纲、题库、案例素材等教学资源支持服务平台。

教材要出精品，而精品不是一蹴而就的，我将这套书推荐给大家，请广大读者对它提出意见与建议，以利进一步提高。也希望教材编委会及出版社能做到与时俱进，根据高等教育改革发展形势、机械工程学科发展趋势和使用中的新体验，不断对教材进行修改、创新、完善，精益求精，使之更好地适应高等教育人才培养的需要。

衷心祝愿这套教材能在我国机械工程学科高等教育中充分发挥它的作用，也期待着这套教材能哺育新一代学子茁壮成长。

中国工程院院士 钟 掘

2013年2月

前言 PREFACE.

本书是中南大学出版社出版的《机械工程材料》(主编高卫国、钟利萍)教材第2版的配套教材,按照“机械工程材料”课程教学大纲组织编写。主要作为普通高等学校本科机械类、近机械类专业“机械工程材料”课程的教学辅导,亦可作为材料类相关课程学习的参考书。

本书内容涵盖常用机械工程材料的成分、结构、组织、工艺、性能及选材。在编写过程中,立足于机械工程材料基础知识的训练,注重培养工程实践应用能力和综合分析与解决工程实际问题的能力。书中选编的习题难易度适中,有代表性,充分考虑到本课程内容多、概念抽象、难理解、难掌握的特点,答案确切、简明扼要,以帮助学生记忆。本书中全部采用最新的国家标准,并使用法定计量单位。

本书第1章、第2章、第8章由南华大学樊湘芳编写,第3章、第4章由南华大学吴炜编写,第5章、第6章、第7章由南华大学叶江编写。全书由南华大学邱长军教授主审。

本书在编写过程中参阅了一些其他版本的同类教材、相关的技术标准和资料等,中南大学出版社给予了指导和帮助,在此特向有关编者、作者和单位表示衷心的感谢!

由于编者的水平有限,加之编写时间仓促,书中不足之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2013年2月

CONTENTS 目录

第1章	材料的结构与凝固	(1)
第2章	材料的性能与力学行为	(10)
第3章	二元合金相图与铁碳合金	(19)
第4章	钢的热处理	(28)
第5章	合金钢与铸铁	(41)
第6章	非铁金属材料	(51)
第7章	非金属材料	(57)
第8章	失效分析、材料选择及热处理工艺	(63)
参考文献		(69)

第1章

材料的结构与凝固

一、教学基本要求、重点与难点

(一) 基本要求

1. 了解晶体结构的基本概念和常见类型；
2. 掌握原子数、原子半径、配位数和致密度的概念；
3. 掌握晶面和晶向的表示方法；
4. 了解晶体缺陷的类型及几何特征；
5. 了解合金的基本概念及固态合金的相结构；
6. 了解高分子材料及陶瓷材料的结构；
7. 掌握金属结晶原理及结晶过程控制方法；
8. 掌握金属同素异构转变特性。

(二) 重点

1. 三种常见的金属晶体结构及特征；
2. 固态合金的相结构及固溶强化机理；
3. 结晶的热力学条件及过冷度概念；
4. 金属结晶后的晶粒大小及其控制；
5. 金属同素异构转变过程及特点。

(三) 难点

1. 晶向指数、晶面指数的表示方法；
2. 金属结晶过程；
3. 金属固态转变过程。

二、主要内容

1. 金属的晶体结构

在纯金属中，最常见、最典型的晶体结构有三种类型：体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。其特征如下：

(1) 晶胞中的原子数

晶体是由大量的晶胞堆砌而成，处于晶胞顶角或晶面上的原子不会为一个晶胞所有，只有晶胞中心的原子才完全为这个晶胞所有。三种常见晶体晶胞的原子数分别为：

$$\text{体心立方: } n = 8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$$

$$\text{面心立方: } n = 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$$

$$\text{密排六方: } n = 12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$$

(2) 原子半径

在体心立方晶胞中, 原子沿立方体对角线紧密接触。设晶胞的晶格常数为 a , 立方体对角线的长度为 $\sqrt{3}a$, 等于 4 个原子半径, 所以, 体心立方晶胞中的原子半径 $r = \sqrt{3}/4a$ 。同样可分别算出面心立方晶胞和密排六方晶胞中的原子半径分别为 $r = \sqrt{2}/4a$ 和 $r = \frac{1}{2}a$ 。

(3) 配位数和致密度

配位数是晶体结构中 与任一原子周围最邻近且等距离的原子数。配位数表示原子排列的紧密程度。配位数越大, 晶体中原子排列就越紧密。

在体心立方晶格中, 与其最邻近且等距离的原子是周围顶角上的 8 个原子, 所以, 配位数为 8。在面心立方晶格中, 以面中心的原子来看, 与其最邻近且等距离的原子是周围顶角上的 4 个原子, 这 5 个原子构成一个平面。这样的平面共有 3 个。所以, 面心立方晶格的配位数是 12 个。在密排六方晶格中, 以晶格上底面中心的原子为例, 它不仅与周围 6 个角上的原子紧密接触, 还与其下面的 3 个位于晶胞之内的原子及其上面相邻的晶胞内的 3 个原子紧密接触, 故配位数为 12。

晶体的致密度是指该晶体晶胞中所含原子的体积与晶胞体积的比值。晶体的致密度越大, 晶体中原子排列密度越高, 原子结合越紧密。致密度 K 可用下式表示:

$$K = \frac{nU}{V}$$

式中, n 为一个晶胞中包含的原子数, U 为晶胞中一个原子的体积, V 为晶胞的体积。

经该式计算可得: 体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格的致密度分别为 0.68、0.74、0.74。

2. 晶体缺陷

由于各种因素的作用, 实际金属的晶体结构不像理想晶体那样规则和完整, 晶体中存在许多不完整的部位, 这些部位称为晶体缺陷。根据几何特征, 晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三种类型。

(1) 点缺陷

点缺陷是指在三维尺度上都是很小的、不超过几个原子直径的缺陷。如晶格空位、间隙原子和异类原子等。

(2) 线缺陷

晶体中的线缺陷主要是位错。位错是在晶体中某处有一列或若干列原子发生有规律的错排现象。位错最基本的类型有两种, 即刃型位错和螺型位错。

刃型位错: 由于某种原因, 晶体的一部分相对于另一部分错开, 出现一个多余的半原子面, 犹如切入晶体的刀片, 刀刃线即位错线。刃型位错的特征: 有一额外半原子面; 位错线可理解为已滑移区与未滑移区的边界线; 晶体存在刃型位错时, 位错周围的点阵发生晶格畸变, 既有正应变也有切应变。位错线与晶体滑移的方向垂直。

螺型位错：晶体的上下部分发生错动，若将错动区的原子用线连接起来，则具有螺旋形特征。螺型位错的特征：无额外半原子面；只有切应变无正应变；位错线与滑移方向平行，位错线运动的方向与位错线垂直。

(3) 面缺陷

晶体中的面缺陷是指二维尺度很大而第三维尺度很小的缺陷，包括晶体的表面、晶界、亚晶界、相界等。

3. 固溶体和中间相

(1) 固溶体

合金组元通过溶解形成一种成分和性能均匀、且结构与其组元之一相同的固相为固溶体。与固溶体结构相同的组元称为溶剂，另一组元称为溶质。固溶体主要包括置换固溶体和间隙固溶体两种形式。

在溶剂晶格的某些结点上，其原子被溶质原子所替代而形成的固溶体称为置换固溶体。若溶质与溶剂能以任何比例相互溶解，则形成无限固溶体。若溶质超过某个溶解度有其他相形成、即两个元素之间的相互溶解度有一定的限度，则形成有限固溶体。

溶质原子进入溶剂晶格的间隙中形成的固溶体称为间隙固溶体。间隙固溶体必然是有限固溶体。

(2) 中间相

合金组元之间相互作用形成的、晶格类型和特性均不同于任一组元的新相称为中间相，或称为金属化合物，可用分子式表示其组成。金属化合物具有较高的熔点、硬度和较大的脆性。根据其结构特点，分为正常价化合物、电子化合物、间隙相和间隙化合物。当合金中出现金属化合物时，其强度、硬度和耐磨性提高，但塑性下降。

4. 结晶

(1) 结晶概述

物质从液态冷却转变为固态的过程称为凝固。若凝固后的物质为晶体，则这种凝固称为结晶。

液态物质要结晶，就必须冷却到 T_0 (理论结晶温度) 以下的某个温度 T_n (实际结晶温度) 才能结晶，这种现象称为过冷现象。 T_0 (理论结晶温度) 与 T_n (实际结晶温度) 之差称为过冷度。过冷度越大，液态与固态之间的能量差越大，结晶的驱动力就越大。只有当驱动力达到一定程度时，液态金属才能开始结晶。结晶的必要条件是液态金属具有一定的过冷度。

(2) 结晶过程

当液态金属过冷到一定温度时，一些尺寸较大的原子集团开始变得稳定而成为结晶的核心，称为晶核。形成的晶核都按各自方向吸附周围的原子而自由长大，在长大的同时又有新的晶核出现和长大。当相邻晶体彼此接触时长大被迫停止，而只能向尚未凝固的液态部分生长，直到全部结晶完毕。

形核有两种方式：均匀形核和非均匀形核。在结晶过程中，晶核完全由纯净的过冷液态中瞬时短程有序的原子团形成，称为自发形核，又称均匀形核。依附于模壁或液相中未熔固相质点表面形核，称为非自发形核，又称非均匀形核。

一旦晶核形成，晶核就要继续长大成晶粒。系统总自由能随晶体体积的增加而下降是晶体长大的驱动力。晶体生长有两种常见的形态：平面状态生长和树枝状态生长。

5. 同素异构转变

多数固态纯金属的晶格类型不会改变,但是有些金属在固态下其晶格类型会随温度变化而发生变化。固态金属在不同的温度区间具有不同晶格类型的性质,称为同素异构性。在金属晶体中,最典型的、也最重要的是铁的同素异构转变,锡、锰、钴、钛等也存在这种现象。

同素异构转变遵循形核、长大的规律。但与结晶的特点有所不同,形核一般在某些特定部位,如晶界、晶内缺陷、特定晶面等,这是因为固态下原子扩散困难,转变需要较大的过冷度;同时由于晶格类型的变化导致金属的体积发生变化,转变时会产生较大的内应力,严重时会产生变形或开裂。

三、习题及解答

1. 解释名词: 晶格、晶胞、配位数、致密度、多晶体、晶粒、晶界、位错、合金、组元、相、固溶体、中间相、高聚物、单体。

答: (1) 晶格: 描述晶体中原子排列规律的空间格架。

(2) 晶胞: 反映晶格特征的最小单元体。

(3) 配位数: 晶体结构中 与任一原子周围最邻近且等距离的原子数。

(4) 致密度: 晶体中原子排列的紧密程度。可用该晶体晶胞中所含原子的体积与晶胞体积的比值来表示。

(5) 多晶体: 由许多外形不规则的、杂乱无章排列着的小晶体即晶粒组成的物质。

(6) 晶粒: 在多晶体中彼此方位不同、外形不规则的小晶体。

(7) 晶界: 晶粒与晶粒之间的交界面。

(8) 位错: 晶体中某处有一列或若干列原子发生有规律的错排现象。

(9) 合金: 一种金属元素同另一种或几种金属(或非金属)元素通过熔化或其他方法结合在一起所形成的具有金属特性的物质。

(10) 组元: 组成合金最基本的独立物质。

(11) 相: 合金中具有同一化学成分、同一结构和原子聚集状态,并以明显的界面互相分开的、均匀的组成成分。

(12) 固溶体: 合金组元通过溶解形成一种成分和性能均匀、且结构与其组元之一相同的固相。

(13) 中间相: 合金组元之间相互作用形成的、晶格类型和特性均不同于任一组元的新相,或称为金属化合物。

(14) 高聚物: 通过单体相互连接形成的高分子化合物。

(15) 单体: 能相互连接形成高分子化合物的低分子化合物。

2. 实际金属晶体中包含有哪些类型的晶体缺陷? 对金属的力学性能有何影响?

答: 晶体缺陷主要分为点缺陷、线缺陷、面缺陷三种类型。

如果金属中无晶体缺陷时,通过理论计算具有极高的强度;随着晶体中缺陷的增加,金属的强度迅速下降;当缺陷增加到一定值后,金属的强度又随晶体缺陷的增加而增加。无论点缺陷、线缺陷或面缺陷都会造成晶格畸变,从而使晶体强度增加。例如,加入合金元素形成固溶体可以产生固溶强化,这是因为增加了点缺陷。金属经塑性变形产生加工硬化,主要原因是晶体内部存在位错源,变形时发生了位错增殖,变形量增加,位错密度增加,位错之

间的交互作用,使变形抗力增加。此外,常温下,金属细化晶粒,增加了晶粒数目,晶界相应增多,产生细晶强化效果。晶体缺陷的存在会增加金属的电阻率,降低金属的抗腐蚀性能等。

3. 在立方晶系中, $\{120\}$ 晶面族包含有哪些晶面?

答: $\{120\}$ 晶面族包含有 (120) 、 (102) 、 (012) 、 (021) 、 (201) 、 (210) 。

4. 何谓晶体结构? 常见的金属晶体结构有哪三种? 试述每种常见金属晶体结构的基本特征。 α -Fe、 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Pb、Cr、V、Mg、Zn 各属于何种晶体结构?

答: 晶体中原子(离子或分子)规则排列的方式称为晶体结构。

常见的金属晶体结构有体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格。

体心立方晶格: 晶胞的三个棱边长度相等, 三个轴间的夹角均为 90° , 构成立方体, 除了在晶胞的 8 个角上各有 1 个原子外, 在立方体的中心还有 1 个原子。

面心立方晶格: 晶胞的三个棱边长度相等, 三个轴间的夹角均为 90° , 构成立方体, 除了在晶胞的 8 个角上各有 1 个原子外, 在立方体的 6 个面的中心各有 1 个原子。

密排六方晶格: 在晶胞的 12 个角上各有 1 个原子, 构成六方柱体, 上底面和下底面的中心各有 1 个原子, 晶胞内还有 3 个原子。

α -Fe、Cr、V 属于体心立方晶格; γ -Fe、Cu、Ni、Pb、Al 属于面心立方晶格; Mg、Zn 属于密排六方晶格。

5. 何谓大分子链结构? 按其几何形状不同可分为哪几类? 其性能特点如何?

答: 大分子链结构是由许多结构相同的基本单元(链节)重复连接构成。

按几何形状分为线型结构、支链型结构、网状型结构。

线型结构: 为卷曲成线团状的长链。这种结构的高聚物弹性、塑性好, 硬度低, 是热塑性材料, 如聚氯乙烯、尼龙等。

支链型结构: 主链上带有支链。其性能接近线型分子结构, 支链对高聚物性能的影响往往是不利的, 支链越复杂和支化程度越高, 影响越大。

网状型结构: 分子链之间有许多链节互相交联, 构成网状。交联程度低时, 弹性较好, 如橡胶; 交联程度高时, 硬度高, 脆性大, 无弹性和塑性, 是热固性材料, 如环氧树脂。

6. 工业纯铁从 γ -Fe 转变成 α -Fe 时, 其体积有何变化? 简述其原因。

答: 铁从 γ -Fe 转变成 α -Fe 时, 铁的体积会膨胀约 1%。

铁从 γ -Fe 转变成 α -Fe 时, 其晶格类型从面心立方晶格转变为体心立方晶格, 这两种晶格排列紧密程度不同, 导致金属的体积发生变化, 转变时产生较大的内应力。

7. 金属单晶体存在各向异性, 多晶体是否存在各向异性呢? 为什么?

答: 多晶体不存在各向异性, 因为多晶体内部是由许许多多多个晶粒组成, 每个晶粒在空间分布的位向不同。正是由于晶粒在空间方位上排列无规则, 导致多晶体在宏观上表现为沿各个方向上的性能趋于相同, 晶体的各向异性就显示不出来了。

8. 高分子化合物与低分子化合物有何区别? 其相对分子质量如何计算?

答: 高分子化合物的相对分子质量很大, 由许多结构相同的基本单元重复连接而成。

相对分子质量: $M = n \times m$ (n 为聚合度, m 为链节的相对分子质量)

9. 陶瓷材料的典型组织由哪几部分组成? 对陶瓷材料的性能有何影响?

答: 陶瓷一般由晶体相、玻璃相和气相组成。

晶体相由某些金属化合物或固溶体组成，是陶瓷材料的主要组成相，一般数量较多。其晶粒大小对陶瓷材料的性能影响较大，晶粒越细，晶界越多，裂纹越不容易扩展，强度越高。

玻璃相将分散的晶体相黏在一起，填充气孔空隙，使瓷坯致密，抑制晶体长大，防止晶格类型转变，降低陶瓷烧结温度，加快烧结过程以及获得一定程度的玻璃特性。如玻璃相组成不均匀，会使陶瓷的物理、化学性能有所不同。玻璃相的强度低，脆性大，热稳定性和电绝缘性差。

气相是指陶瓷组织结构中的气孔。气相的存在使材料的强度降低，热导率、抗电击穿能力下降，介电损耗增大，而且它往往是产生裂纹的原因。气相对光有散射作用，会降低陶瓷的透明度。

10. 解释下列名词：理论结晶温度；过冷度；同素异构转变；变质处理。

答：理论结晶温度：液态自由能与固态自由能变化曲线相交的对应温度，此时液态和固态的能量状态相等，处于动态平衡状态。

过冷度：理论结晶温度与实际结晶温度的差值。

同素异构转变：材料在固态下改变晶格类型的过程。

变质处理：向液态金属加入某些变质剂，以细化晶粒和改善组织，达到提高材料性能的目的。

11. 为什么液态金属结晶时必须过冷？

答：无论液体还是晶体，其自由能均随温度升高而降低，并且液体自由能下降的速度更快。两条自由能的交点温度，即为理论结晶温度。在该温度下，由液体转变成晶体的速度和由晶体转变成液体的速度是相等的，即液态金属与其晶体处于热力学平衡状态，既不结晶又不熔化。按照热力学定律，在等压条件下，一切自发过程都是朝着系统自由能降低的方向进行，当温度降到 T_0 以下某一温度 T_n 时，晶体的自由能低于液体的自由能，故结晶能有效进行。

12. 在实际生产中，为什么金属结晶时常以枝晶方式长大？

答：在实际生产中，液态金属中混有某些未熔的杂质或者生成的晶核表面比较粗糙，晶核在向液体中温度较低的方向生长时，晶核上那些尖凸的形状过冷度最大，生长速度最快，这样，晶体的生长就如同树枝的生长一样，先生长出主干再形成分枝，在长大的同时又有新晶核形成、长大，当相邻晶体彼此接触时被迫停止生长，而只能向尚未凝固的液体部分伸展，直到全部结晶完毕，成为树枝状的晶体。

13. 试分析过冷度对形核率和晶体长大速率的影响。

答：在一定过冷度 ΔT 范围内，形核率 N 和长大速率 G 随 ΔT 的增加而增加。达到某一过冷度 ΔT 时， N 和 G 达到最大值；而后随 ΔT 的增加， N 和 G 都减少。产生这种现象的原因是，在结晶过程中，晶核形成和长大的驱动力与过冷度 ΔT 成正比，而晶核形成后长大所需要的必要条件——原子的迁移和扩散能力，却与 ΔT 成反比，即随着过冷度 ΔT 的增加，原子的活动能力逐渐减少，并逐渐成为影响形核和长大的主导因素。这两种因素综合作用的结果，使形核率 N 和长大率 G 与过冷度 ΔT 的关系出现一个极大值。

14. 为什么一般希望金属材料获得细晶粒？细化晶粒的措施有哪些？

答：在常温下，金属的晶粒度越细小，强度和硬度则越高，同时塑性和韧性也越好。因此，细化晶粒是提高金属材料力学性能的重要途径之一。

细化晶粒的措施：增大过冷度、变质处理、振动和搅拌。

15. 结晶的基本条件是什么？基本规律是什么？

答：结晶的基本条件：液态金属要有一定的过冷度。

基本规律：结晶过程都是由晶核形成和晶核长大两个基本过程组成。

16. 试以纯铁为例说明何谓金属的同素异构转变，有何实际意义。

答：纯铁在 1538℃ 时进行结晶，得到具有体心立方晶格的 $\delta\text{-Fe}$ 。继续冷却到 1394℃ 时发生同素异构转变，成为面心立方晶格的 $\gamma\text{-Fe}$ 。再冷却到 912℃ 时又发生一次同素异构转变，成为体心立方晶格的 $\alpha\text{-Fe}$ 。

纯铁的同素异构转变，是钢铁能够进行热处理的内因和依据，也是钢铁材料性能多种多样、用途广泛的主要原因之一。

四、难题详解

1. 何谓均匀形核？何谓非均匀形核？有什么异同点？为什么非均匀形核比均匀形核更容易进行？

答：均匀形核是纯净的过冷液态金属依靠自身原子的规则排列形成晶核的过程。

非均匀形核是液态金属原子依附于模壁或液相中未熔固相质点表面优先形成晶核的过程。

异同点：都需要过冷和通过能量起伏、结构起伏使近程有序的原子团达到某一临界尺寸后才能形成晶核。但非均匀形核所需要的能量起伏小。

因非均匀形核是依附在现有固体表面（称为形核基底或衬底）形核，新增的液固界面积小，界面能低，结晶阻力小，所以非均匀形核所需的过冷度小，当 $\Delta T = 0.02T_0$ 时，就能有效形核。因此，非均匀形核比均匀形核更容易进行。

2. 铝具有面心立方结构，其原子半径为 0.1432 nm，试计算其密度。（Al 的相对原子质量为 26.98）

解：因为 $r = \sqrt{2}/4a$

所以 $a = 4/\sqrt{2}r = 0.4050 \text{ nm}$

$$\begin{aligned}\rho &= \text{质量}/\text{体积} = 4 \times (26.98/0.602 \times 10^{24}) / (0.4050 \times 10^{-9})^3 \\ &= 2.699 \text{ (mg/m}^3\text{)} = 2.699 \text{ (g/cm}^3\text{)}\end{aligned}$$

3. 指出 $\text{Fe}_{(a)}\text{C}$ 、 $\text{Fe}-2\%\text{Si}$ 、 CuZn 、 Fe_3C 、 TiC 各是什么类型的合金相，有什么特点。

答： $\text{Fe}_{(a)}\text{C}$ 为间隙固溶体，晶格类型与溶剂同，溶质碳原子溶于晶格间隙中。

$\text{Fe}-2\%\text{Si}$ 为置换固溶体，晶格类型与溶剂同，溶质硅原子处于晶格结点上。

CuZn 为电子化合物，属于复杂晶型。

Fe_3C 为间隙化合物，属于复杂晶型。

TiC 为间隙相，面心立方结构，碳原子位于晶格间隙中。

$\text{Fe}_{(a)}\text{C}$ 、 Fe_3C 、 TiC 都是由过渡族元素与原子半径较小的非金属碳原子组成，都是尺寸因素起主要作用。其形成条件不同之处在于 $\text{Fe}_{(a)}\text{C}$ 形成时溶质碳量少，晶型不变，而后两种碳量较多，晶型改变。

4. 碳可溶入铁中形成间隙固溶体。试分析 $\alpha\text{-Fe}$ 和 $\gamma\text{-Fe}$ 溶解碳原子能力差异的原因。

答： $\alpha\text{-Fe}$ 为体心立方晶体，而体心立方有八面体间隙和四面体间隙两种，其中四面体

间隙相对较大； γ -Fe 为面心立方晶体，其也有八面体间隙和四面体间隙两种，其中八面体间隙较大。但面心立方的八面体间隙比体心立方的四面体间隙要大很多，因此溶解碳原子的能力也大很多。

5. 何谓过冷、过冷度、动态过冷度？它们对结晶过程有何影响？

答：过冷是指金属结晶时实际结晶温度比理论结晶温度低的现象。

过冷度是指实际结晶温度与理论结晶温度的差值。

动态过冷度是指晶核长大时的过冷度。

金属形核和长大都需要过冷，过冷度增大通常使形核半径、形核功减少、形核过程容易、形核率增加、晶粒细化。

6. 选择题。

(1) 属于面心立方晶格的金属有 (C)。

A. α -Fe、铜 B. α -Fe、钒 C. γ -Fe、铜 D. γ -Fe、钒

(2) 属于体心立方晶格的金属有 (B)。

A. α -Fe、铝 B. α -Fe、铬 C. γ -Fe、铝 D. γ -Fe、铬

(3) 在晶体缺陷中，属于点缺陷的有 (A)。

A. 间隙原子 B. 位错 C. 晶界 D. 缩孔

(4) 在立方晶系中，指数相同的晶面和晶向 (B)。

A. 相互平行 B. 相互垂直 C. 相互重叠 D. 毫无关联

(5) 在面心立方晶格中，原子密度最大的晶面是 (C)。

A. (100) B. (110) C. (111) D. (122)

7. 填空题。

(1) 每个面心立方晶胞在晶核中实际含有 (4) 原子，致密度为 (0.74)，配位数为 (12)。

(2) 每个体心立方晶胞在晶核中实际含有 (2) 原子，致密度为 (0.68)，配位数为 (8)。

(3) 每个密排六方晶胞在晶核中实际含有 (6) 原子，致密度为 (0.74)，配位数为 (12)。

(4) 面缺陷主要指的是 (晶界) 和 (亚晶界)。

(5) 最常见的线缺陷有 (刃型位错) 和 (螺型位错)。

(6) 纯铁在 1200℃ 时晶体结构为 (面心立方结构)，在 800℃ 时晶体结构为 (体心立方结构)。

(7) 在金属结晶过程中，细化晶粒的主要方法有 (①控制过冷度；②变质处理；③振动、搅拌)。

8. 从晶体结构的角度、说明间隙固溶体、间隙相及间隙化合物之间的区别

答：间隙固溶体是溶质原子分布于溶剂晶格间隙而形成的固溶体。形成间隙固溶体的溶质原子通常是原子半径小于 0.1 nm 的非金属元素，间隙固溶体保持母相溶剂的晶体结构，不能用分子式表示。间隙相和间隙化合物属于原子尺寸因素占主导地位的中间相，它们也是原子半径较小的非金属元素占据晶格间隙，然而间隙相，间隙化合物的晶格与组成它们的任一组元晶格都不相同，它们的成分可在一定范围内波动，组元具有一定的原子比组成，可以用化学式表示。

9. 从结合键的角度，分析工程材料的分类及其特点。

答：工程材料按结合键的特点分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料。