



普通高等教育“十五”国家级规划教材

材料学

MATERIALS SCIENCE

主 编 张联盟

副主编 程晓敏 陈 文



高等教育出版社



材料科学

第 11 卷
第 1 期

材料科学 第 11 卷 第 1 期

普通高等教育“十五”国家级规划教材

材 料 学

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 张联盟 | | |
| 副主编 | 程晓敏 | 陈 文 | |
| 参 编 | 黄学辉 | 吴兴文 | 范晓明 |
| | 马保国 | 袁 坚 | 吴建锋 |
| | 徐晓虹 | 熊传溪 | 张超灿 |
| 审 阅 | 潘 伟 | | |

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是材料科学与工程专业的核心专业课程教材,是普通高等教育“十五”国家级规划教材。本书主要介绍材料的成分、组织、结构与性能之间的关系,在教材体系结构及内容上做了很大的改进和探讨,以适应 21 世纪高等教育发展的需要。

本书分上、下两篇,上篇介绍材料的组成与结构,着重反映材料的共性;下篇介绍材料的性能与应用,着重反映材料的个性。书中既详细介绍了材料学的基本概念和基础理论,也用一定篇幅介绍了材料学科的前沿研究成果。

本书可作为高等学校材料类各专业的本科教材,也可作为研究生的教学参考书,并可供从事材料科学与工程工作的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料学/张联盟主编. —北京:高等教育出版社,
2005.2

ISBN 7-04-013056-4

I. 材… II. 张… III. 材料科学-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 139842 号

策划编辑 龙琳琳 责任编辑 张春英 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 胡志萍 责任校对 康晓燕 责任印制 陈伟光

| | | | |
|------|----------------|------|---|
| 出版发行 | 高等教育出版社 | 购书热线 | 010-58581118 |
| 社 址 | 北京市西城区德外大街 4 号 | 免费咨询 | 800-810-0598 |
| 邮政编码 | 100011 | 网 址 | http://www.hep.edu.cn |
| 总 机 | 010-58581000 | | http://www.hep.com.cn |
| 经 销 | 北京蓝色畅想图书发行有限公司 | 网上订购 | http://www.landaco.com |
| 印 刷 | 北京印刷一厂 | | http://www.landaco.com.cn |
| 开 本 | 787×960 1/16 | 版 次 | 2005 年 2 月第 1 版 |
| 印 张 | 47.25 | 印 次 | 2005 年 2 月第 1 次印刷 |
| 字 数 | 890 000 | 定 价 | 58.00 元 |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 13056-00

前 言

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材,是按照教育部1998年颁布的新专业目录对材料科学与工程专业的业务培养要求编写的。本书编写的基本原则是加强基础,拓宽专业面,更新内容,体现最新研究成果。

材料学是材料科学与工程专业的核心专业课程,主要阐述材料的化学成分、组织、结构和性能之间的关系。结合各高校的实际情况,并考虑到具体教学内容和课时的不同,本书在编写时对内容进行了归类处理。全书分为上、下两篇。上篇着重介绍材料的共性,比较全面系统地介绍了材料的组成与结构;下篇着重介绍材料的个性,详细介绍了各类材料的性能与用途。上篇包括6章,分别介绍了材料的分类及其组成与结构,相的组成、结构与相变,材料的表面与界面,材料的强韧化机制,梯度结构及其效应,纳米结构及纳米材料。下篇由9章组成,其中4章介绍金属材料,3章介绍无机非金属材料,高分子材料和复合材料各占1章。从以上内容结构可以看出,本书打通了材料的理论体系中金属材料与非金属材料的界线,是按照材料科学与工程宽口径专业要求而编写的通用教材。同时,该教材也适合二级学科——金属材料专业和无机非金属材料专业使用。因此,本教材具有系统性和广泛适用性,这是本书的一个重要特点。

本书的另一个特色是注重内容的更新,反映了当代材料科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术和新工艺,反映了材料学的最新进展和发展动向。如梯度材料、纳米材料、新型金属合金、先进复合材料、功能陶瓷和功能高分子材料等在书中均有专门章节介绍。这些内容能开阔学生的视野,使他们的知识结构跟上时代发展步伐。

本书共15章,其中绪论和第5章由张联盟编写;第1章和第2章由黄学辉编写;第3章和第6章由陈文编写;第4章和第8章由程晓敏编写;第7章由吴兴文编写;第9章和第10章由范晓明编写;第11章由马保国编写;第12章由袁坚编写;第13章由徐晓虹和吴建锋编写;第14章由熊传溪编写;第15章由张超灿编写。全书由张联盟任主编,程晓敏、陈文任副主编。由清华大学潘伟教授审阅。

由于编者水平有限,加之该教材在体系与内容上有较大改变,书中必然有不少欠缺和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2003年11月

目 录

| | |
|----------|---|
| 绪论 | 1 |
|----------|---|

上篇 材料的组成与结构

| | |
|--------------------------------|------------|
| 第 1 章 材料分类及其组成与结构 | 6 |
| 1.1 材料的分类 | 6 |
| 1.2 材料的组成与键合特征 | 15 |
| 1.3 材料的结构特征 | 19 |
| 1.4 材料的缺陷 | 28 |
| 第 2 章 相的组成、结构与相变 | 34 |
| 2.1 相的组成和显微结构 | 34 |
| 2.2 扩散型相变 | 37 |
| 2.3 无扩散型相变 | 45 |
| 2.4 相变效应 | 61 |
| 第 3 章 材料的表面与界面 | 66 |
| 3.1 材料的表面结构 | 66 |
| 3.2 材料的界面结构 | 74 |
| 3.3 表面与界面化学 | 85 |
| 3.4 材料表面与界面研究方法 | 93 |
| 第 4 章 材料的强韧化机制 | 102 |
| 4.1 材料强韧化的位错机制 | 102 |
| 4.2 固溶强化 | 105 |
| 4.3 细晶强化 | 109 |
| 4.4 弥散强化 | 111 |
| 4.5 形变强化 | 117 |
| 4.6 相变强化 | 119 |
| 第 5 章 梯度结构及其效应 | 126 |
| 5.1 梯度结构 | 126 |
| 5.2 梯度复合原理 | 130 |
| 5.3 梯度材料的设计与优化 | 141 |
| 5.4 梯度材料的特性评价 | 150 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 5.5 梯度材料的应用领域与研究方法 | 153 |
| 第 6 章 纳米结构及纳米材料 | 159 |
| 6.1 纳米结构 | 159 |
| 6.2 纳米材料的特殊效应 | 167 |
| 6.3 纳米材料的性能及应用 | 171 |
| 6.4 纳米材料的研究方法 | 179 |

下篇 材料的性能与应用

| | |
|------------------------------|-----|
| 第 7 章 结构钢 | 186 |
| 7.1 钢的合金化 | 186 |
| 7.2 工程构件用钢 | 202 |
| 7.3 机器零件用钢 | 216 |
| 7.4 不锈钢 | 237 |
| 7.5 耐热钢 | 251 |
| 7.6 特殊用途钢 | 267 |
| 7.7 新型合金 | 270 |
| 第 8 章 工具钢 | 273 |
| 8.1 刀具用钢 | 273 |
| 8.2 冷作模具钢 | 287 |
| 8.3 热作模具钢 | 293 |
| 8.4 塑料模具用钢 | 303 |
| 8.5 量具钢 | 312 |
| 第 9 章 铸铁 | 314 |
| 9.1 铸铁的石墨化 | 315 |
| 9.2 灰铸铁 | 322 |
| 9.3 强韧铸铁 | 327 |
| 9.4 特种铸铁 | 338 |
| 第 10 章 有色金属及其合金 | 346 |
| 10.1 铝及其合金 | 346 |
| 10.2 铜及其合金 | 366 |
| 10.3 钛及其合金 | 379 |
| 10.4 镁及其合金 | 388 |
| 10.5 其他有色金属 | 393 |
| 第 11 章 陶瓷及耐火材料 | 398 |
| 11.1 普通陶瓷 | 398 |

| | | |
|---------------|--------------|------------|
| 11.2 | 结构陶瓷 | 410 |
| 11.3 | 功能陶瓷 | 419 |
| 11.4 | 耐火材料 | 462 |
| 第 12 章 | 玻璃 | 473 |
| 12.1 | 玻璃的组成与结构 | 473 |
| 12.2 | 普通硅酸盐玻璃 | 478 |
| 12.3 | 光学玻璃 | 484 |
| 12.4 | 微晶玻璃 | 491 |
| 12.5 | 特种玻璃 | 500 |
| 12.6 | 玻璃纤维 | 515 |
| 第 13 章 | 水泥材料 | 523 |
| 13.1 | 硅酸盐水泥 | 523 |
| 13.2 | 高炉矿渣水泥 | 541 |
| 13.3 | 特种水泥 | 558 |
| 13.4 | 气硬性胶凝材料 | 575 |
| 13.5 | 水泥材料的应用 | 588 |
| 第 14 章 | 高分子材料 | 593 |
| 14.1 | 高分子的结构与性能 | 593 |
| 14.2 | 塑料 | 620 |
| 14.3 | 橡胶 | 637 |
| 14.4 | 化学纤维 | 644 |
| 14.5 | 涂料及胶粘剂 | 652 |
| 14.6 | 功能高分子材料 | 661 |
| 第 15 章 | 复合材料 | 669 |
| 15.1 | 复合材料设计 | 670 |
| 15.2 | 树脂基复合材料 | 680 |
| 15.3 | 金属基复合材料 | 703 |
| 15.4 | 陶瓷基复合材料 | 721 |
| 15.5 | 先进复合材料 | 729 |
| 参考文献 | | 740 |

绪 论

1. 材料与人类文明

材料、能源、信息是当代社会文明和国民经济的三大支柱，是人类社会进步和科学技术发展的物质基础和技术先导。新材料技术、新能源技术、信息技术和生物技术是全球新技术革命的四大标志。在一定历史时期，材料的发展水平左右着经济、政治、军事等活动，决定了历史的进程。在历史上，石器、青铜器、铁器等均成为一定时期的主导材料，后人将它们作为时代的标志，并将这些时期称为石器时代、青铜器时代和铁器时代。在近代，材料的种类极其繁多，各种新材料不断涌现，很难用一种材料来代表当今时代的特征。近三百年来，人类经历了两次世界范围的产业革命，每次产业革命的成功都离不开新材料的开发。第一次产业革命的突破口是推广应用蒸汽机。瓦特发明了蒸汽机，但只有在开发了铁和铜等新材料以后，蒸汽机才得以使用并逐步推广。第二次产业革命一直延续到 20 世纪中叶，以石油开发和新能源广泛使用为突破口，大力发展飞机、汽车和其他工业，支持这个时期产业革命的仍然是新材料开发。如合金钢、铝合金以及各种非金属材料的发展，镍基超级合金的出现，把金属材料的使用温度由 700 ℃ 提高到 900 ℃，使飞机能够以超音速飞行。高温合金可在 1 093 ℃ 以上工作。高温结构陶瓷的研究成功，促进了表面温度高达 1 000 ℃ 的航天飞机的发展。先进陶瓷发动机可以在 1 371 ℃ 高温下工作，此类发动机比普通发动机的效率高出 20 个百分点，达到 80%。半导体材料的发展，把人类带入了信息时代。如今人类正面临着以电子信息、材料、航空航天、生物工程、海洋开发、石油化工、原子能等工业为主体，具有更高水平且异常深刻的产业革命，新材料的作用更加明显，它既是当代高技术的重要组成部分，又是发展高技术的重要支柱和突破口。当前，信息技术、新能源技术、新材料技术、空间技术、海洋技术和生物技术成为全球公认的六大高技术产业。材料在支撑高新技术产业，发展国民经济和巩固国防等方面扮演着举足轻重的作用。

2. 本教材的编写目的

在人类社会迈入新世纪之际，知识经济时代的曙光和经济全球化趋势交织在一起，时空变迁错综复杂。经济振荡、军事冲突此起彼伏，科学技术、信息技术、国防领域的竞争日趋激烈，所有这些都依赖于新材料的研发水平，亦促进了材料科学与工程、材料学等学科的形成与发展。

近年来，国内高校根据高等教育发展的大众化、国际化、网络化和终身化趋势对学科及专业设置进行了大规模的重组与合并；转变教学思想与观念，形成了宽基础、重实践的办学思想；普遍提高专业涵盖面，由原来的三级学科向二级学科或一级学科过渡。由于材料正成为国民经济的支柱产业，国内很多原来没有设置材料专业的学校根据自己的办学实际，增设了材料及相关专业。在此背景下，建立相应的课程体系，编写适应专业发展方向，有利于学生独立获取知识和培养能力的教材已成为当务之急。

目前，国内尚未见到包括金属材料、无机非金属材料、高分子材料的一级学科内容的材料学教材。已有教材主要与金属材料学和无机非金属材料学相关。故有必要编写包含金属材料、无机非金属材料、高分子材料及复合材料的综合性材料学教材，以适应培养高素质综合人才的需要。

3. 材料学研究的内容与特点

材料学是材料科学与工程一级学科及其相关专业的一门重要的专业基础课或专业课。现代的材料学已从以往分门别类、相对独立的研究，发展为各类材料间相互渗透的交叉性综合学科。材料学是研究材料的组成与结构、合成与制备工艺、材料性质、使用性能之间相互关系的学科，是材料设计、制造、工艺优化和合理使用的理论依据。

材料学不同于材料科学基础，虽然它们在研究内容、研究范围等方面相似，但研究问题的层面和角度不同。材料科学基础主要在微观层次，即原子、分子、电子层次上阐述各种金属材料、无机非金属材料、高分子材料及复合材料的组成与结构、合成与加工性质及使用性能等方面的共性规律，而材料学侧重于显微结构层次，即在相结构、组织结构乃至宏观结构层次上研究上述四因素之间的相互关系及制约规律。在此层次上探讨材料的结构描述、性质表征等科学问题，能够更真实地再现材料的结构、性质和使用性能之间的相互关系。

材料学也不同于材料工艺学。材料工艺学主要介绍特定材料的制备原理及工艺条件、材料的加工与使用等，而材料学不会过多地涉及具体材料的制备原理及工艺，而是阐述材料的共性及共性与个性之间的关系。

本书具有如下特点：①内容全面。不仅涉及金属材料，而且涉及无机非金属材料、高分子材料和复合材料。②重点突出。以金属材料、无机非金属材料为重点，适度介绍高分子材料及复合材料。③主线明确。全书以组成—结构—性能—应用为主线，介绍材料的共性规律。④层次清晰。着力在显微结构和宏观结构层次上介绍材料的组成、结构、性能、应用诸因素间的相互关系及制约规律，主要适用于材料科学与工程一级学科本科专业学生学习。⑤介绍学科前沿。在介绍基础材料的同时，介绍了材料学领域的最新研究热点，如纳米材料、梯度功能材料等。⑥编排新颖。全书按上下两篇组织教材内容，上篇为材

料的组成与结构，下篇为材料的性能与应用。

本教材上篇介绍材料的组成与结构，内容包括材料分类及其组成与结构，相的组成、结构与相变，材料的表面与界面，材料的强韧化机制，梯度结构及其效应，纳米结构及纳米材料。下篇介绍材料的性能与应用，内容包括结构钢，工具钢，铸铁，有色金属及其合金，陶瓷及耐火材料，玻璃，水泥材料，高分子材料，复合材料。

4. 材料在工业部门的重要性及应用

材料是国民经济建设和国防建设的基础，材料的发展水平直接关系到国民经济实力的增长、国防力量的增强和人类生活质量的提高。因此，当前世界各国政府都很重视材料的研制与开发，把其放在优先发展的位置，制定具体发展规划，拨巨资支持高新技术材料的发展。

化学工业主要供应原料，包括把原材料加工成新的高附加值的材料，提供需要承受极端条件的高强度、耐腐蚀的材料以及催化剂、电极等能使化学过程顺利进行的材料。金属工业主要涉及结构材料及功能材料，目前研制开发的重点是通过新技术改进传统金属材料性能，开发功能型金属材料及非平衡态金属材料。例如非晶态合金、非晶态铁基软磁合金具有磁导率高，矫顽力小，电阻率大，高频性能好，生产时耗能低等优点，是当前节能技术的重要材料之一。其技术关键是如何经济地生产出宽度 ≥ 200 mm的薄带。汽车工业是发达国家材料消耗最大的领域之一。汽车中使用了金属材料、无机非金属材料、聚合物材料、复合材料等11大类材料，要求开发可靠性高，成本低，功能先进，耐久性好，能够重复利用的新型材料。能源工业涉及传统能源(煤、石油、天然气、核能)与新能源(太阳能、高级煤、核聚变)，重点是通过改进精炼、制造和维护技术来显著提高材料性能和可靠性，需要开发能源转换率高的新型材料，使新能源系统性能得到改善。如利用超导输电，每年可节电750亿千瓦时，经济效益达50亿美元。电子工业是全球经济中最有活力的工业部门之一，涉及半导体材料、微电子材料、磁性材料等。微电子技术已进入亚微米尺寸，在此尺寸范围的新物理现象和材料结构决定了器件的性能。通信工业是全球经济的领头羊，是新型电子材料和光学材料的主要使用者和开发者，属于特别依赖于新材料的高技术产业。计算机和通信的结合造就了现代以信息为基础的社会。从电子技术向光学技术的转移需要研制、生产和加工许多新材料。航空航天工业既是高性能材料的使用者，也是它的开发者，涉及军用、民用、航天飞机材料、发动机材料、航空用电子材料等，需开发新型合金、金属间化合物等各种复合材料。生物材料工业涉及的人造器官、生物传感器、设备器械、矫形外科等材料在疾病诊治、临床治疗等领域得到广泛应用。

总之，材料既是一个独立的领域，又与几乎所有其他新兴产业密切相关。

这些新兴产业对材料的发展和應用提出更高、更迫切的要求，其发展亦更强烈地依赖于材料的发展。

5. 材料研究的机遇与挑战

信息技术、新能源技术、新材料技术、空间技术、海洋技术和生物技术等高新技术产业领域对各类材料的消耗与使用，为材料研发提供了广泛的市场需求。科学技术的进步与实验手段的完善为材料研发提供了强有力的制备手段和检测方法。材料研究机遇与挑战并存，要面对超高温、超高压、超高真空、超净、微重力、强磁场、强辐射、快速冷却等极限条件的挑战，以适应应用的极限环境。今后材料研究的方向应该是充分利用和发掘现有材料的潜力，继续开发新材料，以及研究材料的再循环工艺。在利用现有材料和开发新材料方面，预计在今后一个时期内，结构材料仍然是材料的主体部分，而今后 30 年可能是复合材料的世界。在功能材料方面，预计今后 20 年需要重点发展应用于计算机、集成电路、激光技术等领域的电子材料。关于材料再循环的研究不仅是为了节约原材料，而且是减少能耗、保护环境的需要。

上 篇

材料的组成与结构

第 1 章 材料分类及其组成与结构

世界万物，凡于人类有用者，皆谓之材料。材料是具有一定性能，可以用来制作器件、构件、工具、装置等物品的物质。材料存在于人类的周围，与人类的生活息息相关。材料是人类文明、社会进步、科技发展的物质基础。之所以用石器时代、青铜器时代、铁器时代等来标志人类历史进程，是因为材料在社会发展和人类文明进程中起到物质基础和技术先导的作用。如今，信息技术、新能源技术、空间技术、海洋技术和生物技术等高新技术的迅速崛起与发展，刺激和带动了新材料技术的研究与开发。新材料的不断涌现为高新技术发展奠定了坚实的物质基础；高新技术的成长与发展为新材料的研制提供了强有力的制备方法与制备手段。两者相互促进，极大地带动了材料这一国民经济支柱产业的开发与发展。本章主要介绍材料的分类方法、材料的基本组成与键合特征、材料的结构特征及实际材料中的缺陷。

1.1 材料的分类

材料的种类繁多，发展也非常迅速，新材料种类正以每年 12 500 多种的速度递增，但人们可以根据材料的基本组成、性质特征、存在的状态、物理性质、物理效应、用途等对材料进行分类。

1.1.1 材料按化学组成分类

材料按其化学作用或基本组成可分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类。

1. 金属材料

金属材料是由化学元素周期表中的金属元素组成的材料，可分为由一种金属元素构成的单质(纯金属)及由两种或两种以上的金属元素或金属与非金属元素构成的合金。

在 109 种元素中，除 He、Ne、Ar 等 6 种惰性元素和 C、Si、N 等 16 种非金属元素外，其余 86 种为金属元素。在金属元素中有 Li、Na、K、Ca 等 16 种碱金属和碱土金属，Be、Mg、Al 等 3 种轻金属，Fe、Co、Ni、Mn 等 4 种铁族金属，Zn、Cd、Sn、Sb 等 12 种易熔金属，W、Mo、V、Ti 等 11 种难熔金属，Cu、Ag、Au、Pt 等 9 种贵金属，Ce、La、Nd 等 16 种稀土金属，U、Th、Pa、

Pu 等 15 种铀族金属。除 Hg 之外，单质金属在常温下呈现固体形态，外观不透明，具有特殊的金属光泽及良好的导电性和导热性；在力学性质方面，具有较高的强度、刚度、延展性及耐冲击性。金属主要应用于结构或承载构件。纯金属一般使用得不多，很多情况下使用的是合金。

合金是由两种或两种以上的金属，或金属与非金属熔合在一起形成的具有金属特性的新物质。由于合金具有金属特征，故广义地称为金属。合金的性质与组成合金的各个相的性质有关，同时也与这些相在合金中的数量、形状及分布有关。当金属的晶体结构保持溶剂组元的晶体结构时，这种合金称为一次固溶体或端际固溶体，简称为固溶体。根据溶质原子在溶剂晶体结构中的位置，一次固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体。在置换固溶体中，溶质原子位于溶剂晶体结构的晶格格点上；在间隙固溶体中，溶质原子位于溶剂晶体结构的晶格间隙。溶质原子在固溶体中的分布可以是随机的（即呈统计分布），也可以是部分有序或完全有序的。在完全有序固溶体中，异类原子趋于相邻，这种结构亦称为超点阵或超结构。此外，合金中溶质原子还可能形成丛聚，即同类原子趋于相邻。丛聚可以呈随机弥散分布。事实上，在实验中还没有见到溶质原子呈完全随机分布的固溶体。因此，只能在宏观尺度上认为处于热力学平衡态的固溶体是真正均匀的，而在原子尺度上并不要求它也是均匀的。不同类型固溶体中的原子排列情况示于图 1.1。

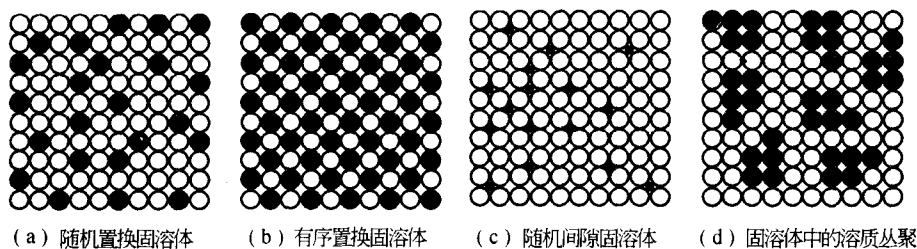


图 1.1 不同类型固溶体中原子排列示意图

金属元素与其他金属元素或非金属元素之间形成合金时，除固溶体外，还可能形成金属间化合物。金属间化合物可分为三类，即由负电性决定的原子价化合物（简称价化合物）、由电子浓度决定的电子化合物（亦称为电子相）以及由原子尺寸决定的尺寸因素化合物。除了这三类由单一元素决定的典型金属间化合物外，还有许多金属间化合物，其结构由两个或多个因素决定，称之为复杂化合物。

价化合物是指符合原子价规则的化合物，即正负离子通过电子转移（离子键）和（或）电子共用（共价键）而形成稳定的 8 电子组态 $ns^2 np^6$ 化合物。

按照结合键的性质，价化合物可分为离子化合物、共价化合物和离子-共

价化合物。在离子-共价化合物中，价电子既没有从正离子转到负离子，也不位于两种离子的中间位置，而是偏向于(或更接近于)一种离子。

按照价电子是否都是键合电子，又可将价化合物分为正常价化合物和一般价化合物，前者的价电子都是键合电子，后者只有部分价电子是键合电子。

正常价化合物一般由周期表中相距较远、电化学性质相差较大的两元素形成。其特点是元素化合符合一般化合物的原子价规律，成分固定，并可用化学式表示，如 Mg_2Si 、 Mg_2Sn 、 Mg_2Pb 等。由于价化合物的结合键主要是离子键和(或)共价键，故这类化合物主要呈现非金属性质或半导体性质。正常价化合物一般具有较高的硬度和脆性，在合金中如能弥散分布在固溶体基体上，将使合金得到强化。正常价化合物在合金中数量较少。

电子化合物(亦称为电子相或 Hume-Rothery 化合物)是指具有一定(或近似一定)电子浓度值且结构相同或密切相关的相。电子化合物中各元素不按正常的化合价规律化合，而按价电子数与原子数的一定比值(即一定的电子浓度)化合。电子化合物中一定的电子浓度对应一定的晶格类型。例如，当电子浓度为 $3/2$ 时，形成具有体心立方结构的电子化合物，称为 β 相，如 $CuZn$ 、 $FeAl$ 、 $NiAl$ 等；当电子浓度为 $21/13$ 时，形成具有复杂立方结构的电子化合物，称为 γ 相，如 Cu_5Zn_8 、 Cu_3Sn_8 等；当电子浓度为 $7/4$ 时，形成具有密排六方结构的电子化合物，称为 ϵ 相，如 $CuZn_3$ 、 Cu_3Sn 等。

价电子浓度为 $3/2$ 的电子相有三种可能结构，即 BCC 结构(β 相)、复杂立方的 β -Mn 结构(μ 相)和密排六方结构(ζ 相)。这表明，即使是电子相，其电子浓度 e/a (合金中价电子数与原子数之比)也不是决定结构的唯一因素。一般来说，B 族元素的价越高，尺寸越小，温度越低，均越有利于 ζ 或 μ 相的形成，而不利于 β 相的形成。大多数典型的电子相都出现在较宽的浓度范围内。以 $Cu-Zn$ 系为例， β 相的最大固溶范围为 $36\% \sim 55\%$ 的 Zn (质量分数)， γ 相为 $57\% \sim 70\%$ 的 Zn (质量分数)， ϵ 相为 $78\% \sim 86\%$ 的 Zn (质量分数)。因此，电子相是典型的金属间化合物而不是化学意义上的化合物，将它表示成具有特定 e/a 值的化学式并没有多大意义。

电子化合物具有高的硬度，但塑性差，是合金中重要的强化相。电子化合物常见于有色金属合金中。

尺寸因素化合物的晶体结构主要取决于组成元素的原子半径比。它包括两类，一类是由金属与金属元素形成的密排相，另一类是金属与非金属元素形成的间隙相。

密排相分为几何密排相(GCP 相)和拓扑密排相(TCP 相)。几何密排相是由密排原子面[FCC 晶体中的(111)面或 CPH 晶体的(001)面]按一定次序堆垛而成

的结构。其堆垛次序可以有多种，如 ABCABC…(c 型)、ABABAB…(h 型)、ABCACB…(cch 型)等。GCP 相中近邻原子彼此相切，配位数为 12，结构中有两种间隙，即四面体间隙和八面体间隙。

拓扑密排相是由密排四面体按一定次序堆垛而成的结构。其每个四面体的 4 个顶点均被同一种原子占据，且彼此相切。不同种类原子所占四面体的大小和形状不相同。具体形状可以是规则的，也可以是不规则的。三种典型的拓扑密排相分别为 laves 相、 σ 相和 Cr_3Si (即 Al5) 相。

间隙化合物(或间隙相)是由原子半径较大的过渡金属元素(Fe、Cr、Mn、Mo、W、V 等)和原子半径较小的非(准)金属元素(H、B、C、N、Si 等)形成的金属间化合物。在这种化合物中非(准)金属原子位于金属结构的间隙中。因为 Gunnar Hägg 对这类化合物进行过系统的研究，故间隙相也称为 Hägg 相。

2. 无机非金属材料

无机非金属材料是由硅酸盐、铝酸盐、硼酸盐、磷酸盐、锆酸盐和(或)氧化物、氮化物、碳化物、硼化物、硫化物、硅化物、卤化物等原料经一定的工艺制备而成的材料，是除金属材料、高分子材料以外所有材料的总称。它与广义的陶瓷材料有等同的含义。无机非金属材料种类繁多，用途各异，目前还没有统一完善的分类方法，一般将其分为传统(普通)和新型(先进)的无机非金属材料两大类。

传统的无机非金属材料主要是指由 SiO_2 及其硅酸盐化合物为主要成分制成的材料，包括陶瓷、玻璃、水泥和耐火材料等。此外，搪瓷、磨料、铸石(辉绿岩、玄武岩等)、碳素材料、非金属矿(石棉、云母、大理石等)也属于传统的无机非金属材料。先进(或新型)的无机非金属材料是用氧化物、氮化物、碳化物、硼化物、硫化物、硅化物以及各种无机非金属化合物经特殊的先进工艺制成的材料，主要包括先进陶瓷、非晶态材料、人工晶体、无机涂层、无机纤维等。

陶瓷按其概念和用途的不同，可分为两大类，即普通陶瓷和特种陶瓷。普通陶瓷即传统陶瓷，是指以粘土为主要原料，与其他天然矿物原料经过粉碎混炼、成型、煅烧等过程而制成的各种制品，包括日用陶瓷、卫生陶瓷、建筑陶瓷、化工陶瓷、电瓷及其他工业用陶瓷。特种陶瓷是用于各种现代工业及尖端科学技术领域的陶瓷制品，包括结构陶瓷和功能陶瓷。结构陶瓷主要用于耐磨损、高强度、耐高温、耐热冲击、硬质、高刚性、低膨胀、隔热等场所；功能陶瓷主要包括电磁功能、光学功能、生物功能、核功能及其他功能的陶瓷材料。

常见高温结构陶瓷包括高熔点氧化物、碳化物、硼化物、氮化物、硅化物。功能陶瓷包括装置陶瓷(即电绝缘陶瓷)、电容器陶瓷、压电陶瓷、磁性陶