



赵连泽 编著

新型 材料学 导论

南京大学出版社

南京大学教材出版资助金项目

新型材料学导论

赵连泽 编著

南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新型材料学导论/赵连泽编. —南京: 南京大学出版社, 2000. 4

ISBN 7-305-03525-4

I. 新… II. 赵… III. 工程材料-概论 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 12261 号

书 名 新型材料学导论

编 著 者 赵连泽

责任编辑 丁 益

装帧设计 朱 蓝

责任校对 费 城

出版发行 南京大学出版社

(南京汉口路22号南京大学校内 邮编 210093)

印 刷 常熟市印刷二厂

经 销 全国各地新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 13.75 字数 343 千

2000年8月第1版 2000年8月第1次印刷

印 数 1—1000

定 价 20.00 元

ISBN 7-305-03525-4/T·5

声明:(1) 版权所有, 侵权必究。

(2) 本版书若有印装质量问题, 请与经销商联系调换。

发行部订购、联系电话: 3592317、3593695、3596923

序

在科学技术突飞猛进的时代里,能源、信息和材料这三者已被公认为社会产业发展的重要支柱。新型材料的不断涌现,给社会经济生活带来了巨大的好处和方便,由此亦推动着科学技术向更高的层次迈进。值得注意的是,材料科学目前已成为多学科相互渗透的一个领域,它不仅包含着广泛和丰富的学科内容,同时在理论和实践方面以及新产品的研究开发方面,都产生着不可估量的影响。

正因为上述原因,南京大学的老师们注意到天然矿物岩石的组成、形成过程、物相、结构以及理化性质等,在很多地方同材料科学的基本内容有着密切的关联,于是对理科地球科学专业的学生在修读本专业的原有课程之外,把材料学引入教学计划,以拓宽学生的视野和思路,这无疑对培养新时代的理科学生有很大好处,并将为他们在今后工作中发挥更大的创造力准备有利的条件。

南京大学地球科学系赵连泽老师以他勤奋不懈的努力和严谨的治学态度,从新材料的基本内容考虑,精选资料,安排教材体系,抒发自己之所得,积多年的心血,编写成《新型材料学导论》,即将付梓出版。不久以前,承他和系领导对我们的信任,使我们得有机会拜读,同时还要我们写一段文字作为序,这使我们既感到荣幸而又不安。于是在细读之后,感到本书所涉及的基础知识和基本理论是切近导论要求的。同时作者又从适合新材料实际角度出发,对材料的组成、物相、结构、性能、制备以及应用等方面作了简明的阐述。在取材方面,又有分寸地分别对金属材料、无机材料、陶瓷、高分子材料和复合材料进行介绍,有重点而又照顾到整体的一般要求,把新型材料在现代科学技术上所起的重要作用明确表达出来,文笔亦严谨流畅,是一部颇具特色的教科书。可以预想到,有心的读者即使来自于不同的专业,在读完本书之后,也会得到不少收获,甚至可激发起对材料科学的兴趣,而且会愿意为新材料的研究和制造贡献智慧和力量,这是我们作为读者之一所感受到的一点体会。

我们 10 余年前有幸在南京大学地质系进修过一段时期,感谢当时的多位师友给予指导和帮助,得益匪浅。此后,也常以岩石矿物学观点来对待无机材料的研究或分析材料工艺问题。在这里我们真诚地表示对赵连泽老师的钦佩,并祝愿他在今后的科学道路上取得更大的成就。这是我们之所以高兴地写上上面的几句话,并为之序。

诸培南 同济大学材料科学与工程学院

翁臻培 上海大学材料学院

1999 年 4 月

编者的话

在近万年人类社会发展的进程中,人们在实践中逐步认识了大自然提供的物质材料,并加以利用、提高和发展,建立了现代文明的基础。随着科学技术的迅猛发展,人们又设计、创造出许多新材料。新材料品种繁多,通常可分为金属类新材料、无机非金属类新材料、有机类新材料和复合材料等四大类。材料涉及的领域十分广泛,从人类的日常生活到工农业的各个领域,乃至高科技领域,无处不在。因此,材料尤其是新材料的研究、开发和应用,反映了一个国家科学技术和工业水平。

本书是根据我们这几年来讲授《新型材料学导论》课的教学材料编写的。首先,由于专业的特点,我们只讲无机非金属材料,随着国家经济建设的发展,无机非金属材料的开发利用日益显得重要,而金属材料、高分子材料和复合材料的发展同样令人瞩目。今天,乃至 21 世纪,将是多种材料并存的时代,不同类型的材料互相借鉴、替代和补充,又会促进材料科学体系的进一步发展。综观世界上发达国家的有关材料及教科书,也是就这四大类材料综合论述的。因此,我们对过去讲授的内容与体系作了较大的改动,除对新型材料作基本陈述外,尽可能增添新内容,让学生对材料科学和新型材料的全貌有较为全面的了解。

编者特别要感谢同济大学诸培南教授和上海大学翁臻培教授,承蒙他们审阅书稿和热情指导,提出宝贵意见,并欣然应允为本书作序。

本书的出版有幸得到南京大学教材出版基金的资助,还得到南京大学教务处、南京大学出版社以及南京大学地球科学系的大力支持;张稼锋、蔡元峰、段芸、黄小龙、周东山等同志对本书的文字润色和图件的计算机处理给予了帮助,在此一并致以衷心的感谢。

由于编写时间仓促,加之囿于编者的水平,书中错误和疏漏在所难免,祈望得到广大读者和专家批评指教。

编者

1998. 12

目 录

第一章	绪 论	(1)
第一节	高技术与新型材料.....	(1)
第二节	新型材料的分类.....	(2)
第三节	材料结构与材料性质的关系.....	(7)
第四节	材料科学的发展趋势.....	(9)
第二章	金属材料	(12)
第一节	概述	(12)
第二节	金属材料的性能	(18)
第三节	金属材料的分类及主要类型	(27)
第三章	陶瓷材料的组织与显微结构	(43)
第一节	概述	(43)
第二节	陶瓷固体的结构与组织	(49)
第三节	固体的表面与界面	(59)
第四节	原子的迁移	(60)
第五节	陶瓷材料的物相组成与显微结构	(63)
第四章	陶瓷材料的性能	(69)
第一节	陶瓷材料的力学性能	(69)
第二节	陶瓷材料的热学性能	(79)
第三节	陶瓷材料的光学性能	(85)
第五章	陶瓷材料的制备	(94)
第一节	原料制备	(94)
第二节	坯料配方与坯料制备	(99)
第三节	成型.....	(103)
第四节	干燥与排塑.....	(105)
第五节	烧结.....	(105)
第六节	陶瓷件的机械加工与质量检验.....	(113)

第六章	新型陶瓷材料及其应用与发展趋势	(117)
第一节	概述.....	(117)
第二节	结构陶瓷.....	(118)
第三节	功能陶瓷.....	(133)
第七章	高分子材料	(150)
第一节	概述.....	(150)
第二节	聚合物的结构特点.....	(155)
第三节	高分子材料的性能.....	(163)
第四节	高分子材料简介.....	(173)
第八章	复合材料	(181)
第一节	概述.....	(181)
第二节	复合材料的性能特点.....	(184)
第三节	复合材料的主要类型和应用.....	(192)
第四节	复合理论简介.....	(208)

第一章 绪 论

第一节 高技术与新型材料

材料是人类生产活动和生活必需的物质基础,一切高技术的发展更离不开材料。自古以来,人类文明的进步都是以材料的发展为标志的,人类的历史也是按制造生产工具所用材料的种类划分的,由史前时期的石器时代,经过青铜器时代、铁器时代,而今正跨入人工合成材料的新时代。现代科学技术作为推动经济社会发展的巨大力量,已为世界各国所关注,并正在努力加速科技研究成果的商品化,推动高科技的产业化。

什么叫“高技术”?高技术是在相对意义上发展变化着的一个概念。在不同的国家和地区,不同的时空领域,不同的角度、立场,它的含义各有侧重,解释也不尽相同。发展中的国家对高技术的看法有着自己的特点,它可以分为三个层次:第一层次称作技术的改进;第二层次称作技术的复合;第三层次称作技术的创造。在这里,技术的改造、技术的复合也都属于高技术范围。所以高技术应该是根据各国的具体国情来制定的。

什么是“高技术产业”呢?应该说,产业和企业是有区别的,必须形成了企业的群、企业的集体,才可以称这个技术形成了产业。对整个社会来说,所谓高技术产业,是指某项高技术在这个领域里已经形成了企业群,形成了若干个企业集团,能够从生产到应用,进行全系统、全过程的活动,这才能说形成了高技术产业。

因此,在国际上,鉴定一个高技术企业有三个标志:第一是劳动生产率非常高;第二是高技术企业用于研究和开发的投入要比传统工业高得多;第三是高层次的研究人员一般为整个企业人数的1/3左右。综合起来说,高技术企业应该具有高效益、高技术、高竞争、高智力、高风险和高潜能(势能)六个鲜明的特点。

目前,国际上通用的高技术的定义是六大技术领域,九个技术产业。

六大技术领域包括:生物技术(标志技术是基因工程和蛋白质工程);信息技术(标志技术是智能计算机、智能机器人);新材料技术(标志技术是材料设计和分子设计);新能源技术(标志技术是核聚变和太阳能);空间技术(标志技术是航天飞机和永久性空间站);海洋技术(标志技术是深海挖掘和停留,海水淡化技术)。

这六大技术形成后,由于它的组合和交叉,就形成了生物工程产业、生物医药产业、光电子信息产业、智能机械产业、软件产业、超导产业、太阳能产业、空间产业和海洋产业这九个技术产业,这些高技术产业几乎都与材料密切相关。

新型材料(advanced materials)是指那些新近发展或正在发展的,具有优异性能和应用前景的一类材料。其中包括金属材料、有机合成材料、无机非金属材料 and 复合材料等。根据其性质与用途,又可分为结构材料和功能材料。

结构材料以力学性能为基础,用以制造以受力为主的构件。是机械制造、建筑、交通运输、能源开发及有效利用的物质基础。这类材料正向更高强度及能在更苛刻介质或条件(高温、高磨损、高腐蚀、高辐照等)下工作的方向发展,其中以金属、陶瓷和复合材料为代表。

功能材料则是利用物质独特的物理、化学特性或生物功能发展起来的材料,这类材料正向着多样化、高灵敏度、高精度度和高稳定性方向发展。功能材料是发展信息技术和自动化控制的基础,没有功能材料,大规模集成电路、电子计算机就生产不出来。没有灵敏度高、性能稳定的敏感元件材料,自控和遥感便无法实现。如光导通讯就是在光导纤维发展的基础上实现的。

新型材料大致有以下几个特征:

1. 新型材料的生产制备是知识密集、技术密集和资金密集的一种新兴产业,有许多新型材料出自固体物理、固体化学、有机合成和冶金学等学科的新成就。科学技术化、科学与工程化技术紧密结合、互相促进。

2. 新型材料的发展与新工艺、新技术密切相关,在很多情况下是通过极端条件(如超高压、超高温、超高真空、超低温、超高密度、超高频、超强磁场、超高纯和超高速快冷等)形成的。新材料、新工艺与新技术相互结合,从而为探索、研制新型材料与新元件开辟一条新途径,同时也为研究在极端条件下所出现的新的物理现象和效应开拓新的研究领域。

3. 新型材料不像常规材料那样靠大规模、连续生产维持竞争能力,它们一般生产规模小,经营分散,更新换代快,而且品种变化频繁。

4. 学科之间相互交叉、渗透和互相促进,基础学科(物理、化学、生物、数学等)与理化技术(微电子、计算机等)新成果交织在一起。

以新材料为例,新一代材料常常是与化学工程紧密相连、密切相关的。化学工程的研究对象是化学工业中不同行业、不同产品制造过程中一些共同的化学、物理过程的规律。如在微电子器件加工中,许多化工电子材料是由化学工业提供的,器件加工的许多关键技术也是化工技术。在集成电路制作的工艺流程中都有“CVD”三个字,这是“化学气相沉积”方法的英文缩写(chemical vapour deposition),它是利用气相化学反应来形成粒子,从而在固体表面上沉积成一种很薄的膜,集成电路的制备就利用了这种技术。又如许多机械零配件表面有损伤时,在其表面涂上一层特种薄膜,这种涂膜技术也是化学气相沉积。此外,在制备单晶硅、多晶硅、氮化硅、碳化硅等各种新型材料产品时,“化学气相沉积”同样也是一个很重要的技术,这一技术在高新技术领域中的应用已越来越广泛。

应该指出,新型材料和常规(传统)材料并没有明确的界限,新型材料的发展必须以常规材料为基础,而且从数量和影响看,常规材料仍将占有十分重要的地位,但是要实现质量的不断提高,品种的不断增长,性能的不断改进和成本的不断下降,就必须对常规材料开展更多更深入的研究工作。常规材料在很多情况下会发展成为新材料,而新型材料又推动了传统材料的进一步发展。目前新型材料已成为各种新技术发展的关键,如高效燃气轮机和内燃机,太阳能的利用,磁流体发电、高能蓄电、超导输电等,均需使用各种新型材料。因此,加强新型材料的研究和开发势在必行。

第二节 新型材料的分类

我们这里所说的材料是指固体材料。材料多种多样,分类方法也没有一个统一的标准,通

常按其物理、化学属性,可以分为四类:即金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料。另一种分法是:1. 化学新材料(包括有机质系和无机质系);2. 金属新材料;3. 新型复合材料;4. 电子新材料。国外也有把固体材料分成金属、陶瓷(和玻璃)、聚合物、复合材料、半导体材料等五类,还有从用途来分,如电子材料、航空航天材料、核材料、建筑材料、能源材料、生物材料等。

对于刚接触材料学科的人,一个最显而易见的问题就是“对我们来说,哪些材料是有价值的”材料,尤其是新型材料的研究、开发与应用,反映一个国家的科学技术与工业水平。

一、金属材料(metallic materials)

由金属元素或以金属元素为主形成的具有金属特性的材料的统称。包括金属和金属合金(alloy),金属间化合物以及金属基复合材料等。最简单的金属材料是纯金属,周期表中的金属元素分为简单金属与过渡金属两种,凡是内电子层完全填满的那些元素属于简单金属,内电子层未完全填满的元素属过渡金属,简单金属的结合键均为金属键,过渡金属的结合键为金属键和共价键的混合,但以金属键为主。金属是最重要的工程材料之一,绝大多数为结晶质材料。

工业上把金属及其合金分成两大部分:

1. 黑色金属——铁和以铁为基的合金(钢、铸铁和铁合金)。
2. 有色金属——黑色金属以外的所有金属及其合金。

黑色金属应用最广,以铁为基的合金材料占整个结构材料和工具材料的90%以上,黑色金属的工程性能比较优越,价格也比较便宜。铁族金属有Mn、Fe、Co、Ni等。

按照性能的特点,有色金属大致可分成:

轻金属:Be、Mg、Al等;

易熔金属:Zn、Ga、Ge、Cd、In、Sn、Sb、Hg、Ti、Pb、Bi;

难熔金属:Ti、V、Cr、Zr、Nb、Mo、Tc、Hf、Ta、W、Re;

贵金属:Cu、Ru、Rh、Pd、Ag、Os、Ir、Pt、Au;

稀土金属:Y、La、镧系(58~71号);

铀金属:Ac、锕系(90~103号);

碱金属及碱土金属:Li、Na、K、Rb、Cs、Fr、Ca、Sr、Ba、Ra、Sc。

新型金属材料除黑色金属、有色金属外,还包括特种金属材料,即指那些具不同用途的结构和功能金属材料。其中有急冷形成的非晶态、准晶、微晶、纳米晶等金属材料和用于隐身、抗氢、超导、形状记忆、耐磨、减振阻尼等的金属材料。

二、无机非金属材料(inorganic nonmetallic materials)

以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料。无机非金属材料是20世纪40年代以后,随着现代科学技术的发展从传统的硅酸盐材料演变而来的。目前已与金属材料、高分子材料一起并列为经济建设的三大材料。

无机非金属材料就其组成物质的形态、性质可分为单晶体(各种宝石、工业用矿物晶体、人工合成晶体等)、多晶体(陶瓷、水泥、废渣、粉煤灰、烧结矿等),以及非晶质体(玻璃)等三类物质状态。实际上许多已开发使用的材料属于复杂的物质状态和复杂体系,其组成既可以有晶

体,同时亦可有非晶质体存在。欧美把无机非金属材料统称为陶瓷材料(ceramics materials)、新型无机材料,也有人称之为新型陶瓷或特种陶瓷(advanced ceramics)。狭义的陶瓷又称传统陶瓷(traditional ceramic)。前苏联则笼统地称之为无机材料,日本将普通陶瓷统称为“窑业制品”,新型材料又称“精细陶瓷”。

陶瓷是人类应用最早的固体材料,陶瓷坚硬、稳定,可制造工具、用具,在一些特殊情况下可作结构材料。陶瓷材料就化学组成而言是一种或多种金属与一种非金属元素(通常为氧)组成的化合物,其中较大的氧原子为陶瓷的基质,较小的金属(或半金属如硅)原子处于氧原子之间的空隙中,氧原子同金属原子化合时形成很强的离子键,同时存在着一定成分的共价键,但离子键是主要的,这些化学键的特点是高的键能、键强。离子键、金属键性强的材料常呈结晶态,而某些共价键性强的材料容易形成无定形或玻璃质。因此,陶瓷的硬度和稳定性高,而脆性大。图 1-1 是结晶质陶瓷与非晶质玻璃的原子结构示意图。

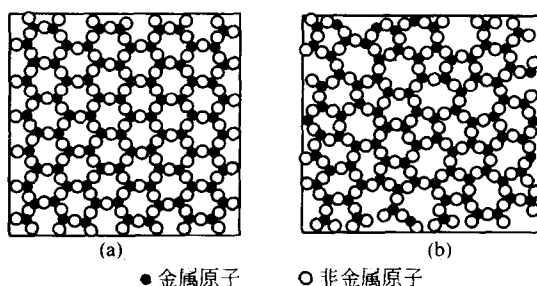


图 1-1 结晶质陶瓷(a)与非晶质玻璃(b)的原子结构示意图

按照组成成分和用途,工业陶瓷材料又可分为:

1. 普通陶瓷(传统陶瓷):主要为硅、铝氧化物的硅酸盐材料。
2. 特种陶瓷(新型陶瓷):主要为纯氧化物、碳化物、氮化物、硅化物等的烧结材料。按应用可分为结构陶瓷、功能陶瓷和生物陶瓷等。
3. 金属陶瓷:指用陶瓷生产方法制造的金属与碳化物或其他化合物构成的粉末材料,也是一种复合材料。

举例来说,铝是一种金属,但铝的氧化物 Al_2O_3 却是一种典型的陶瓷材料,由于 Al_2O_3 具化学上的稳定性,熔点高达 $2020^{\circ}C$ (金属铝 $660^{\circ}C$),可以被用于各种恶劣的环境下,而金属铝就容易被氧化。利用这些特性, Al_2O_3 被广泛用作耐火材料、高温支撑材料和工业窑炉材料。而 Al_2O_3 陶瓷的这些优良性质,不由得又促使人们产生新的想法:为什么不能用 Al_2O_3 来取代金属铝或其他金属作发动机?答案就在于其脆性,而铝及其他金属有良好的延展性,不易产生断裂。近年来陶瓷技术的发展,使之扩大应用到结构材料中去,并不是通过改变其固有的脆性,而是将它们的强度提到足够高,典型的一般大于 $700MPa$ (兆帕),经得起机械负荷而不产生断裂,为此研究设计出的新材料,如 Si_3N_4 被选择来作为耐高温、能效高的发动机材料,这对于传统陶瓷来说是一种无法想象的应用。

典型的传统陶瓷除 Al_2O_3 外,还有 MgO 、 SiO_2 等,此外 SiO_2 还是硅酸盐这一复杂大家庭的基础,这个大家庭也包括粘土和似粘土矿物。而上面提到的 Si_3N_4 是一种重要的非氧化物陶瓷,在商业上有重要价值的陶瓷中绝大多数是由至少一种金属元素和五种非金属元素(C、N、O、P 或 S)中的一种组成的化合物,许多商业(工业生产的)陶瓷既包括化合物,也包括那些由

超过二种以上的元素组成的固溶体,就如金属合金由多种元素组成一样。在原子范围内,通常来说,陶瓷和金属有相似的结构特点,它们的原子组成为规则的排列,呈结晶质,但如果经过简单的加工,许多陶瓷就可以是非晶质组成,它们的原子呈不规则排列,这种非晶质的固体相对结晶质陶瓷而言,被称为玻璃。大多数普通玻璃是硅酸盐,如普通窗玻璃由 72%(重量)的 SiO_2 再加上 Na_2O 、 CaO 组成,玻璃具有与结晶质陶瓷相似的脆性,由于玻璃具有透光性和化学上不活泼性,所以也是一种重要的材料。

玻璃陶瓷是近代发展起来的一个新品种,一些特种成分的玻璃经过热处理,可通过核化与晶化的转变过程,形成含有大量结晶相以及部分残余玻璃相的陶瓷状材料。这样得到的晶化产物有些可能产生特殊的显微结构,使得新产品具有许多传统结晶陶瓷所无法达到的机械强度、可切削性、电绝缘性、热膨胀性以及其它声、光、磁等特性。例如,含锂铝硅酸盐化合物具有低热膨胀系数,提高了它们在温度快速变化时抵抗断裂的能力,而且强度高,亦可具有透明性等,可供制造日用餐具、炊具和军工方面的需要。

新型无机非金属材料是指 20 世纪中期以后发展起来的、具特殊性能与用途的材料。它们是现代新技术、新兴产业和传统工业技术改造的物质基础。主要有新型陶瓷、非晶态材料、人工晶体、无机涂层、无机纤维等。

三、高分子材料(polymer materials)

又称聚合物材料。高分子材料主要指以高分子化合物为基础制得的材料,它是由许多分子量特别大的大分子所组成,每个大分子由大量结构相同的单元(链节)相互连接而成。“polymer”中的“mer”是指单个碳氢化合物分子,如乙烯(C_2H_4),polymer 即是由许多“mer”连接在一起形成的长链分子群。最普通的例子就是聚乙烯(C_2H_4)_n(polyethylene),这里的 n 大致可以为 100~1000。许多重要的聚合物(包括聚乙烯)是简单的碳与氢的化合物,另一些可含氧(如聚丙烯酸 acrylic)、含氮(尼龙 nylon)、含氟(氟塑料 fluoroplastic)和含硅(聚硅酮或称硅树脂 silicone)。与聚合物有关的元素并不多,有 C、N、Si、F、Cl、Br、I 和 At 等。大部分情况下,碳元素形成大分子的主链,大分子内的原子之间由很强的共价键结合,而分子之间的结合力为范特瓦尔斯力(物理键),作用力不大,但由于大分子链很长,分子间接触面较大,特别当分子链交缠时,分子与分子之间结合力不容忽视,它对材料的强度有很大的作用。与无机材料一样,聚合物按其分子链排列有序与否,可以分成结晶聚合物和无定形聚合物两种,聚合物的结晶度决定于分子链排列的有序程度。

高分子材料种类多样,分类繁杂,通常根据工程应用中的机械性能和使用状态分为三类:

1. 塑料:以合成树脂或化学改性的天然高分子为主要成分,加入(或不加入)填料、增强剂和其他添加剂,在一定温度和压力下成型的高分子材料。主要指强度、韧性、耐磨性好的、可制造机器零部件的工程塑料,又可分热塑性塑料和热固性塑料两种。

2. 橡胶:主要指经过硫化处理,弹性优良的高分子材料,有天然橡胶和合成橡胶之分。橡胶具有良好的物理机械性能和化学稳定性。

3. 合成纤维:指强度很高的单体聚合而成的、呈纤维状的高分子材料,分天然纤维和化学纤维两种。

高分子材料有像金属一样良好的延展性,有无机非金属材料那样优良的绝缘性、耐腐蚀性,还具有价格低廉、密度小的优点。其缺点是强度比金属差,熔点低和化学活动性高,稳定性

也不及无机非金属材料。尽管有这些不足之处,高分子材料仍是一种用途非常广泛的材料,在工程上是发展较快的一类新型结构材料。

四、复合材料(composite materials)

前面介绍的三类材料,它们的元素和化合物可用化学键来分类,并且广泛地被选择作为结构材料,但随着科学技术的发展,人们仍在不断地寻找新的更优良的材料,于是人们发明了复合材料。

复合材料是一个比较宽泛的概念,一般认为,复合材料是由两种或两种以上化学本质不同的材料组合在一起,使之互补性能优势,从而制成的一类新型材料。其结构为多相,一类组成(或相)为基体,起粘结作用,另一类为增强体或功能体组元,起增加强度或功能的作用,除惰性气体外其他元素均可作为复合材料的组成成分,其结合键非常复杂,它的某些性能比各组成相的性能都好,用两句话可以形容其优良性质:“复合材料具有组成这种复合物的每种材料的最优良的性质,同时,这种新材料的总体性质又优于组成它的每一种材料。”另一方面,复合材料还具有可设计性的特点。

自然界的许多物质都可看作是复合材料,竹材和木材是纤维素(抗拉强度大)和木质素(把纤维素粘结在一起)的复合物,动物的骨骼是由硬而脆的无机磷酸盐和软而韧的蛋白质骨胶复合而成的既强又韧的物质。人类很早就仿效自然,利用复合的原理,在生产和生活中创制了许多人工复合材料,例如在泥浆中掺入麦秸作为原始的建筑用复合材料;混凝土是水泥、砂、石子组成的复合材料,砂石增强了硅酸盐水泥基体;轮胎是纤维和橡胶的复合体等。

玻璃纤维是复合材料又一个很好的例子。直径很小的玻璃纤维具有高强度特点,将玻璃纤维嵌在聚合物的基体(母体)中,构成了新的复合材料,既有玻璃纤维的高强度,又保留了聚合物特有的延展性。这样构成的高强度、高韧性的新材料,足以抵抗作为结构材料所需承受的高负荷。玻璃纤维是许多人造纤维增强材料(fiber-reinforced materials)中最典型的一种。

近代科学技术的发展,特别是航天、导弹火箭、原子能工业等对材料提出越来越高的性能要求(高比强度、高比刚度、耐热、耐磨损、耐腐蚀等),促进了复合材料的快速发展,由于其性能比单纯的金属、陶瓷或聚合物都优越,是一类独特的材料,具有广阔的发展前景,它将可能成为21世纪的“钢”。

五、半导体材料(semiconductors)

如果说高分子材料作为一种新材料的出现,对现代社会产生了巨大的冲击力,那么半导体材料的发现相对来说并不那么引人注目,但对现代社会同样也有一定的冲击力。“技术明显地改变了社会,而电子仪器又改变了技术本身。”极少的元素和化合物却有着重要的电性质——半导性,它既不是电的良好导体,也不是良好的绝缘体,它们的导电能力居于中间(电导率为 $10^5\text{S}\cdot\text{m}^{-1}\sim 10^{-7}\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)。一般来说,半导体不同于上面所提到的四类材料,而这些材料是以原子键为基础的,金属是电的良好导体,非金属(陶瓷和聚合物)导电性很差,是绝缘体。元素周期表上有三个半导体元素 Si、Ge、Sn,它们位于金属元素和非金属元素的分界上。Si、Ge 广泛用作元素半导体,它们是半导体材料的优秀代表。硅是最重要的、用途最广的半导体材料,硅器件占半导体器件总数的90%以上,锗的重要性次之。如果能精确控制化学纯度,就能精确控制电性,现代技术已经能做到在某种物质里的微小区域造成化学纯度的变化,导致了在这微区内产

生复杂的电子环流,这种微环流(microcircuitry)就是当代技术革命的基础。

除去 Si、Ge、Sn 半导体元素外,还有其周围的元素可形成半导性化合物,在元素周期表上这些半导性化合物由 III A 与 V A 族或 II B 与 VI A 族元素对组成(如表 1-1)。GaAs 可被用来作为一种高温检波器(整流器)和激光材料,CdS 被用来作为太阳能电池,价格低廉,可将太阳能转变为有用的电能,这些不同的化合物

表 1-1 周期表上的元素半导体和可以形成半导性化合物的元素

←B		A→			
I B	II B	III A	IV A	V A	VI A
					O
		Al	Si	P	S
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Cd	In	Sn	Sb	Te
	Hg				

有时表现出与许多陶瓷化合物相似的性质,某些陶瓷材料经适宜的掺杂,将可显示半导性,例如 ZnO 广泛用作彩电屏幕的荧光物质。

典型的半导体是以共价键结合为主,其晶体大多为四面体结构。大量的研究工作表明有各种类型的半导体存在,包括元素、化合物、固溶体、非晶材料、有机材料等。人们还设计并制造出人工半导体超晶格材料。半导体材料制成的半导体电子器件和集成电路、光电子器件和光电子集成电路、电力电子器件,以及各种传感器等,已进入到电子产品的各个领域。

其他处于发展中的新型材料还有光学光电子材料、磁性材料、超导材料、生物医学材料和核材料等。

第三节 材料结构与材料性质的关系

从上节我们知道,各式各样材料主要可以分成五大类,即金属、陶瓷(和玻璃)、高分子材料、复合材料和半导体材料等。前面三种可由原子键性的不同而区别,金属以金属键为主,陶瓷以离子键和共价键为主,高分子材料分子内结合键是共价键,而分子间则以范德瓦尔斯键相联结。第四种材料是由前三类材料中的二种或多种材料复合而成,第五种材料(半导体)以其特有的半导性被划为单独的一类——电子材料类。要了解这些不同材料的性质、特征,就需要考察研究它们的显微结构,甚至亚显微结构。实际上材料的每一项特性都直接与其组成的原子结构、显微结构有着密切的关系,结晶质材料与非晶质材料因其内部原子结构排列有序或无序,重复与否,表现出不同的性质。而在高强复合材料中由于增强玻璃纤维和其周围的聚合物基体的结构形成的鲜明对照,它们各具有不同的特性。

结构对性质的影响可以用下列两个实例来说明:一个属原子结构的范畴,另一个属显微结构范畴。

在工程上选用各种金属时必须注意到有些合金延展性比较好,铝合金是典型的例子,而有些则比较差,甚至相对是具脆性的,如钛合金,这一明显的差别与铝和钛的晶体结构直接有关(见图 1-2)。铝是面心立方结构,而钛则为密排六方结构,材料的延展性则与原子结构内部发生机械变形的难易程度有关,因而与晶体结构中具高原子密度的面或方向有关。在铝的原子结构中这样的面(或方向)有 12 个,而钛只有 3 个,也就是说,铝抵抗机械变形的能力比钛强 4 倍,因此铝合金的延展性相当于钛合金的 4 倍。

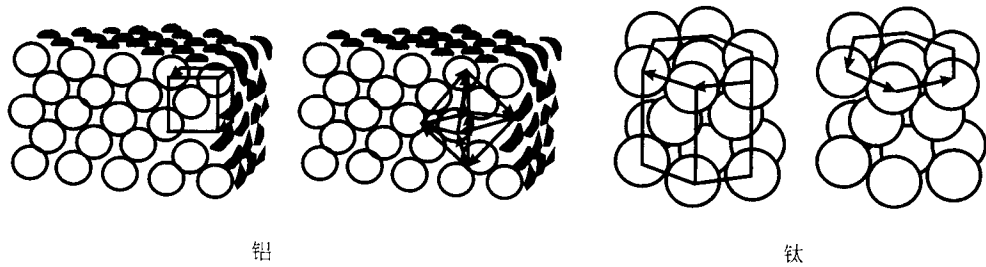


图 1-2 铝和钛的晶体结构图
(铝具有 12 个高原子密度面/方向, 而钛只有 3 个)

另一个例子是近几十年来材料技术上的一个重要进展, 即透明陶瓷的发明。将传统的不透明陶瓷如 Al_2O_3 通过显微结构的改变, 使之成为一种能透过可见光的陶瓷。陶瓷都是由粉料 (一般结晶质) 经过高温焙烧使之具有高的强度和致密度, 用这种方法制备的传统陶瓷总会有许多空隙, 相应形成气孔, 这与原料粉末之间的开放空间有关, 这种孔隙使光线散射, 因而不透光, 每一个孔隙表面上 Al_2O_3 -空气的界面是光的折射源。研究发现, 陶瓷材料中只含 0.3% 孔隙, 则可使 Al_2O_3 陶瓷呈半透明状 (translucent), 而当气孔率达到 3% 时则完全不透明。经过反复试验, 发现只要添加少量 MgO (0.1% 重量), 可使 Al_2O_3 粉末在高温致密化过程中消除或减少气孔, 这样无气孔显微结构的制备, 导致了一种重要的透光材料的诞生, 而且这种透光陶瓷还有一个重要特性, 即可抵抗高温钠蒸气的化学腐蚀, 在工业上被用来制造高温钠灯 (1000°C), 照度达到 100lm/W 。

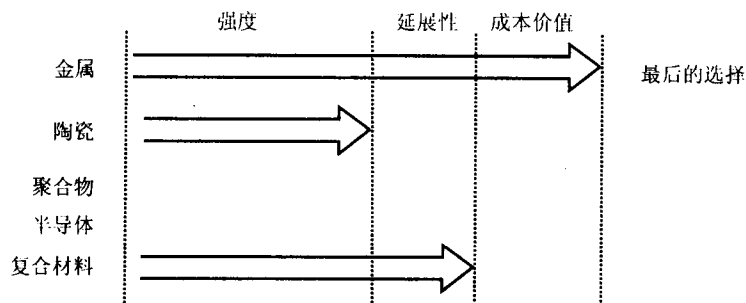


图 1-3 储气气瓶材料 (要求能储存 12MPa 气压的气体) 的选择顺序

这两个例子说明了材料性质与材料结构的直接关系和重要性。一旦材料的特性已经了解, 紧接着就是要进行材料的选择。材料的选择要在两个水平上进行, 一是在不同类材料中挑选 (如金属还是陶瓷), 二是在已选中的大多数适宜材料中再次精选最佳的、有特效的 (或特殊的) 材料 (如一种镁合金, 合金成分是用铝还是用钢?)。在工程设计过程中, 材料的选择是最后的决定, 这将直接影响到设计的成败。

陶瓷脆性大, 有危险。

聚合物、半导体, 强度明显不够。

复合材料虽然强度、延展性符合要求, 但成本太高。

金属材料最合适,在金属材料中再比较其特性,良好机械性能优先考虑,成本也是经常要考虑的。

材料设计作为一门分支学科,尚处于初创阶段。1985年日本出版了世界上第一本专著《新材料开发与材料设计学》,介绍材料设计前期的研究和应用情况。材料设计是应用已知理论和信息,预报具有预期性能的材料,并提出其制备合成方案。根据设计对象涉及的空间尺度,一般可分为显微结构层次($1\mu\text{m}$)、原子分子层次($1\text{nm}\sim 10\text{nm}$)和电子层次($0.1\text{nm}\sim 1\text{nm}$)等若干层次,后两个层次又称微观结构设计,从材料科学发展趋势来说,将是材料设计的重点。材料设计方法主要是在经验规律基础上归纳、计算。随着计算机技术的发展,已开始引进材料设计的计算机模拟和计算机辅助材料选择,建立材料数据库等新兴技术。近年来,越来越多的材料科学家、物理学家、化学家、计算机科学家和生物学家等从各自角度介入材料设计领域,并已取得多方面的成就。

第四节 材料科学的发展趋势

“材料”这一名词已延用了很长时间,但“材料科学”的提出仅是20世纪60年代初的事。1957年苏联人造卫星首先发射成功,美国朝野上下为之震惊,剖析自己落后的原因之一乃是先进材料的落后,因此从20世纪60年代初,一些大学相继成立“材料科学研究中心”或“材料科学系”,这标志着人们开始把材料的研究作为自然科学的一个分支,事实上“材料科学”的形成是科学技术发展的必然结果。

材料科学是一门应用科学,研究和发展材料的目的在于应用,为经济建设服务。必须通过合理的工艺流程才能制备出具有实际应用价值的材料来,并通过批量生产才能成为工程材料,投入实际使用中。因此在“材料科学”这一名称出现不久,就提出了“材料科学与工程”的名称,不少“材料科学系”改名为“材料科学与工程系”。1986年英国出版的第一部《材料科学与工程百科全书》,为材料科学与工程下了如下定义:材料科学与工程是研究有关材料组成、结构、制备工艺流程、材料性能和用途的关系及其知识的产生与运用。换句话说,材料科学的研究对象是材料组成、结构、性能、生产流程和使用效能以及它们之间的关系(图1-4)。使用效能是指材料在使用条件下的表现,如使用环境、受力状态对材料特征曲线以及寿命等的影响。效能决定着材料能否得到发展或大量使用。所以材料科学与工程既包括基础研究和应用研究两个方面,同时还具有多学科交叉的特点。

20世纪以来,现代科学技术与生产的发展日新月异,材料、信息与能源已成为当代文明的三大支柱。材料,特别是新型材料,在国民经济中具有举足轻重的地位,高技术的发展不仅需要多品种、多规格、性能特殊的材料,而且对材料的要求也越来越严格。目前,人们对新一代材料大致有四个要求:

第一,材料的结构与功能要结合起来,做到多功能应用。

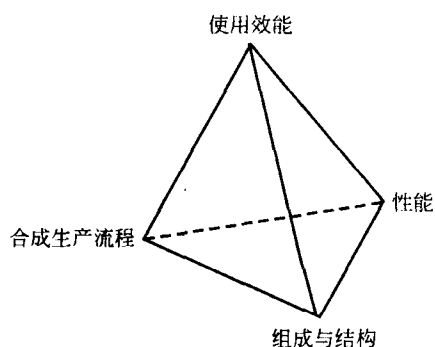


图1-4 材料科学与工程的四要素及其间的关系

第二,开发智能性材料。要称为智能材料,必须具备对外界反应能力可以达到定量的水平,由于技术水平所限,现在还只能提机敏材料,因为智能材料与机敏材料是不同档次的材料。机敏材料目前还只能做到对外界反应有定性的适应。

第三,要求材料本身少污染,生产过程也要少污染,而且能够再生。

第四,要求制造材料的能耗少,而且本身最好又能创造新能源或能够充分利用能源。

随着金属、非金属等多种材料的迅速发展,以及彼此间相互渗透、相互结合,已经形成了一个完整的材料体系。在现代物理学和化学等学科的基础上,材料科学已成为一门新兴的综合性学科。从科学技术发展历史来看,对材料的研究与开发,往往是新技术发展成败的关键。因此,随着高技术发展给材料研究提出了新的要求,首先是要重视材料科学的发展,强调基础研究在工艺中的重要性,因为基础研究是为工艺作指导的。所谓的基础并不是纯粹的基础,而是应用基础,其最终目的是要能够进行材料设计。这种设计包括材料组成上的设计和材料显微结构的设计两部分,进而向分子设计前进。第二要研究材料组成、材料显微结构与材料性能之间的关系。第三是要研究材料的相的关系,因为在不同的相中,材料所表现出的性能是完全不同的。第四要研究材料的缺陷和损坏规律。第五要研究材料的无损检测和寿命预测,因为材料总是要坏的,预测材料的使用寿命,以及怎样来延长使用寿命,同时不断研究开发具有特殊性能的新材料,这些都是材料研究要做的工作。

当前,材料科学发展和材料研究的趋向是:

1. 研究多相复合材料,这里的多相是指两个主品相或三个主品相都在一个材料之中,例如多相复合陶瓷材料,多相复合金属材料,多相复合高分子材料,无机和有机复合材料、金属-陶瓷、金属-有机物以及梯度功能材料(表面材料和内层材料是完全不一致的,功能上的变化却是渐变的,可以缓和因热膨胀率不同而产生的热应力)等。

2. 研究并开发纳米材料,它指的是原料及最终的显微结构都是纳米(nanometre,毫微米)量级的,把这种纳米量级(大小约1nm)晶粒混合到材料中,以改善材料脆性。而且纳米材料本身由于具有巨大的表面能,可以表现出完全意想不到的优异性能,极有发展前途。

3. 开发机敏材料,这种材料同时具有感知外界环境或参数变化和驱动的双重功能,机敏材料最简单的例子就是变色眼镜,机敏材料还包括那些具有热敏感、化学敏感、光敏感以及电磁敏感等功能材料。

4. 研究开发生物医学材料(又称生物材料),用以和生物系统结合,以诊断、治疗或替换机体中的组织、器官或增进其功能的材料。这是一项典型的跨学科的工作,它将由医学家提出建议与要求,材料学家进行材料设计与研制,整个研究过程必须由两方面的科学家紧密合作才能奏效。

据报道,日本TDK公司和东京医学院联合研制成功一种新型的牙科和骨科材料,这是一种无磷酸盐的透辉石类陶瓷,具高强度、生物相容性好等多种优点。这些陶瓷材料由钙、镁及硅的氧化物混合后烧结而成。测试结果表明,其机械强度比用碱式磷灰石制造的传统骨科材料大2倍,而其抗压强度为300MPa,与正常的天然人骨差不多,研制人员对这种材料做过动物试验,他们将它植入兔子的股骨中,手术后两周内可看到植入的透辉石与股骨的相接处有新骨形成,4周后透辉石已完全被新骨覆盖,而植入传统的碱式磷灰石材料则需12周才能达到这样的效果。目前正进入临床试验阶段,不久将会有产品投放市场。

5. 材料制备工艺、检测仪器和计算机的应用研究将是今后材料科学技术发展的重要内