

材料概论

(第二版)

施惠生 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

材 料 概 论

(第二版)

施惠生 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书全面地论述了材料在人类社会中的地位和作用以及材料科学的发展趋势;系统地阐述了各类材料的定义、分类、基本性能及其应用等。全书共分七章,除绪论外,分别介绍了金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料共四大类材料,以及发展中的新材料——功能材料。基于材料的发展必须考虑与人类生态环境的和谐性,故还介绍了材料与环境内容,重点介绍材料与生态环境的关系。

本书可作为高等院校材料科学与工程、土木工程、建筑工程等专业的基础课教材,也可作为高等院校其他相关专业的教学用书,还可供从事与材料有关的科研、设计、生产、施工、管理、监理等各类工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料概论/施惠生主编. —2版. —上海:同济大学出版社,

2009.8

ISBN 978-7-5608-4119-9

I. 材… II. 施… III. 工程材料—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 114722 号

材料概论(第二版)

施惠生 主编

责任编辑 解明芳 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15.25

字 数 380000

印 数 1—4100

版 次 2009 年 8 月第 2 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4119-9

定 价 26.00 元

第二版前言

本书第一版自 2003 年问世以来,受到了广大读者的好评,很多高校将本书作为教材使用,故第一版已连续印刷了几次。考虑到原书中涉及的一些国家标准已更新,部分内容已经不能很好地适应时代的需求。而且,材料工业的迅猛发展也带来了一系列的环境问题,保护环境、节约能源和资源已经成为全球的共识,可持续发展已成为人类的共同话题,世界各国都在为这一目标而努力。中国作为发展中的大国,在经济发展的同时也已逐步意识到了环境保护的重要性。近几年,我国一再强调,要大力发展循环经济和清洁生产,实现自然生态系统和社会经济系统的良性循环,为子孙后代留下充足的发展条件和发展空间。

节省能源、资源,达到与环境共生的目的,是 21 世纪材料发展的方向。因此,本书在第二版修订时适当增加了发展循环经济和保护生态环境的内容。全书共分 7 章,除了对第一版原有 6 章的部分内容进行了必要的修改外,还在第 1 章无机非金属材料中增加了建筑砂浆一节,在第 6 章功能材料中增加了新能源材料及外墙外保温材料这两节。此外,本书还增加了材料与环境这一章,重点介绍了材料与生态环境的关系,以使读者能充分了解并注意到材料的发展必须充分考虑与人类生态环境的和谐性。

本书仍由同济大学环境材料研究所所长、博士生导师施惠生教授主编;许碧莞、郭晓潞作为主要编写人员参加了本书第二版的修改和编写工作。此外,本书的第二版还得到了阚黎黎、邓恺、章萍、张思宇、吴凯、余永乐、黄小亚、王程、原峰、陈邦威、施京华、沙丹丹等的帮助,在此一并表示感谢!并对为本书第一版及第二版的出版付出了辛勤劳动的解明芳编辑表示衷心的感谢。

由于编者水平及时间有限,书中错漏及不当之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2009 年 7 月于同济园

前 言

在人类历史上,人们将石器、青铜器、铁器等当时的主导材料作为时代标志;在近代,钢铁材料的发展对于西方工业革命进程起了决定性的作用;半导体材料的发展把人类带入了信息时代。当今,人们把材料、信息、能源作为现代文明的三大支柱。材料是冶金、机械、化工、土木建筑、信息、能源、航天航空等工业的支撑,是社会发展与社会进步的物质基础和技术先导。

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济已见端倪,国力竞争日趋激烈。教育应与经济社会发展紧密地结合,为现代化建设提供各类人才支持和知识贡献,这是 21 世纪教育改革和发展的方向。为了适应新的形势,我们在进行课程体系改革的同时,组织编写了《材料概论》教材。《材料概论》将作为一门综合性的专业基础课程,全面系统地介绍各类材料的定义、分类、基本性能及其应用等,使学生通过本课程的学习,对材料有一定的了解,为后续专业课程的学习和今后从事材料的科研、生产、应用等奠定较为宽广的知识面和扎实的基础。

《材料概论》是为材料科学与工程专业的专业基础课而编写的教材,课内学时数为 36 学时。同时,也可作为与生产和使用材料有关的土木、建筑等高校其他专业的教学用书,本书收编内容较多,既可作为教材,也可作为教学参考用书,还可供从事与材料有关的设计、生产、施工、管理、监理等各类工程技术人员参考。为了方便读者的学习,各章末都列出了思考题。

本教材是同济大学“十五”规划教材,得到了同济大学教材、学术著作出版基金委员会的资助。全书由施惠生教授主编。各章的编写人员分工如下:第 1 章和第 3 章由施惠生教授编写;第 2 章由严彪高级工程师编写;第 4 章由王公善研究员和许乾慰副教授编写;第 5 章由叶枝荣教授编写;第 6 章由王公善研究员、施惠生教授及许乾慰副教授编写。

本教材是在使用多年的校内胶印教材的基础上修订和改编而成。由于时间仓促,而且国内外没有同类教材可参考或借鉴,因此,在本教材的编写中肯定存在不少的不足和谬误之处,恳请广大读者批评和指正,以期完善和提高。

编 者

2002 年 10 月于同济大学

目 录

第二版前言

前 言

1 绪论	(1)
1.1 材料的定义和分类	(1)
1.2 材料的地位和作用	(2)
1.3 材料科学与材料的发展趋势	(7)
思考题	(11)
2 金属材料	(12)
2.1 概述	(12)
2.2 黑色金属材料	(13)
2.3 有色金属材料	(36)
2.4 新型金属材料	(53)
思考题	(57)
3 无机非金属材料	(58)
3.1 概述	(58)
3.2 天然矿物材料	(59)
3.3 玻璃	(64)
3.4 陶瓷	(73)
3.5 耐火材料	(78)
3.6 胶凝材料	(82)
3.7 建筑砂浆	(90)
3.8 混凝土	(96)
3.9 纤维材料	(101)
3.10 人工晶体材料	(105)
思考题	(108)
4 高分子材料	(109)
4.1 概述	(109)
4.2 天然高分子材料	(119)
4.3 塑料	(121)
4.4 橡胶与纤维	(132)
4.5 高分子材料的新进展	(135)
思考题	(137)
5 复合材料	(138)
5.1 概述	(138)
5.2 纤维增强复合材料	(143)

5.3	碎片增强复合材料	(149)
5.4	颗粒增强复合材料	(150)
5.5	填充骨架型复合材料	(154)
5.6	层合型复合材料	(157)
	思考题.....	(160)
6	功能材料	(161)
6.1	概述	(161)
6.2	光功能材料	(162)
6.3	超导材料	(168)
6.4	功能高分子材料和生物医用材料	(173)
6.5	新能源材料	(184)
6.6	低维材料和纳米材料	(189)
6.7	C ₆₀ ——富勒笼球	(192)
6.8	智能材料	(195)
6.9	无机高聚合胶凝材料	(200)
6.10	外墙外保温材料.....	(204)
	思考题.....	(211)
7	材料与生态环境	(212)
7.1	概述	(212)
7.2	材料与生态环境	(219)
7.3	材料与循环经济	(228)
	思考题.....	(232)
	参考文献.....	(233)

1 绪 论

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。材料与人类的出现和进化有着密切的联系,因而材料的名字已被认为是人类文明的一种标志。人类经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代,今天,正跨进先进材料的新时代。天然材料和人造材料已经成为人们生活中不可分割的组成部分,以至于人们常常认为它们的存在是理所当然的。人们的周围到处都是材料,材料不仅存在于人们的现实生活中,而且也扎根于人们的文化和思想领域。材料已与食物、居住空间、能源和信息并列一起组成人类的基本资源。现在,人们把信息、材料、能源作为社会文明的基础;又把新材料与信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。因为材料是在经济建设、国防建设与人民生活中所不可缺少的。

1.1 材料的定义和分类

材料一般是指人类用以制造生活和生产所需的物品、器件、构件、机器和其他产品的物质。材料是物质,但不是所有的物质都可以称为材料。如燃料和化学原料、工业化学品、食物和药物,一般都不算是材料。只有那些可为人类社会接受而又能经济地制造有用器件的物质,才叫做材料。但是这个定义也并不那么严格,如炸药、固体火箭推进剂,有人便称之为“含能材料”。

由于材料的种类繁多,用途广泛,因此它有许多不同的分类方法。依据材料的来源可将材料分为天然材料和人造材料两类。目前正在大量使用的天然材料只有石料、木材、橡胶等,并且用量也在逐渐减少,许多原先使用天然材料的领域正在日益被人造材料取代。如,铁道上的钢筋混凝土轨枕在代替枕木,人造橡胶在代替天然橡胶,化学纤维在代替植物纤维等。

从研究材料的角度来看,常按物理化学属性将材料分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类。金属材料、无机非金属材料、高分子材料因原子间的相互作用不同,在各种性能上表现出极大的差异。它们相互配合,取长补短,构成现代工业的三大材料体系。复合材料则是由上述三类材料相互之间复合而成,它结合了不同材料的优良性能,在强度、刚度、耐腐蚀性等使用性能方面比单一材料优越,具有广阔的发展前景。材料按物理化学属性分类的性能比较见表 1-1。

表 1-1 材料按物理化学属性分类的性能比较

材料种类	化学组成	结合键	主要特征
金属材料	金属元素	金属键	有光泽、塑性、导电、导热、较高强度和刚度
无机非金属材料	氧和硅或其他金属的化合物、碳化物、氮化物	离子键、共价键	耐高温、高强、耐蚀、具特殊物理性能(功能)、脆、无塑性
高分子材料	碳、氢、氧、氮、氯、氟等	共价键、分子键	轻、比强度高、橡胶具有高弹性、耐磨、耐蚀、易老化、刚度小、耐高温差
复合材料	两种或两种以上不同材料组合而成		比强度和比模量高、抗疲劳、高温和减震性能好、功能复合

按材料的用途分类,可分为电子材料、航空航天材料、土木工程材料、核材料、生物材料等。

更常见的分类方法有两种。一种是从材料的使用性能考虑,将材料分为结构材料和功能材料两类,前者以力学性能为基础,用于制造以受力为主的构件。当然,结构材料对物理性能和化学性能也有要求,如光泽、热导率、抗辐照、抗腐蚀、抗氧化能力等。对性能的要求因材料用途而异。功能材料则主要是利用物质独特的物理性质、化学性质或生物功能等而形成的一类材料。另一种是分为传统材料和新型材料(又称新材料、先进材料)。前者是指在工业中已批量生产并已得到广泛应用的材料,后者则是指刚刚投产或正在发展而且有优异性能和应用前景的一类材料。新型材料与传统材料之间并没有绝然的界限,传统材料可以发展成为新型材料,新型材料在经过长期生产与应用之后也就成为传统材料。传统材料是发展新型材料的基础,而新型材料又往往能推动传统材料的进一步发展。

随着现代科学技术的发展,材料的分类方法也在发展。现在,人们常将能源的开发、转换、运输、储存所需的材料统称为能源材料。信息储存和传播方面的进展,一点也离不开材料的发展。今天的社会,信息与材料也是相互依靠的,为了强调这种关系,也常将信息的接收、处理、储存和传播所需的材料统称为信息材料,与传统意义上的功能材料不同,人们又将通过光、电、磁、力、热、化学、生物化学等作用后具有特定功能的新材料称为功能材料。这种材料涉及面很广,大致有电功能、磁功能、光功能、分离功能、生体功能、形状记忆功能材料等。这一新兴功能材料的应用,对航天、导弹等先进技术的发展起着重要作用。

1.2 材料的地位和作用

材料、能源、信息是客观世界的三大要素,是构成现代文明的三大支柱。人类对它们的认识是逐步深化的。历史上,人类对材料认识的深入,导致了从石器时代、铜器时代走向铁器时代。简单回顾人类超越其他的历史,可以看到材料的重要性以及社会需要对于材料发展的巨大推动力。

1.2.1 材料是人类进步的里程碑

人类发展的历史证明,材料是社会进步的物质基础和先导,是人类进步的里程碑。纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看到,每一种重要材料的发现和利用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产力和人类生活带来巨大的变化,把人类物质文明和精神文明向前推进一步。

早在 100 万年以前,人类开始以石头做工具,称之为旧石器时代。1 万年以前,人类知道对石头进行加工,使之成为更精致的器皿和工具,从而进入新石器时代。在新石器时代,人类还发明了用粘土成型、再火烧固化而制成陶器。同时,人类开始用皮毛遮身;中国在 8000 年前就开始用蚕丝做衣服;印度人在 4500 年前开始培植棉花。人类使用的这些材料都是促进人类文明的重要物质基础。

在新石器时代,人类已经知道使用天然金和铜,但因其尺寸较小,数量也少,故不能成为大量使用的材料。后来,人类在寻找石料过程中认识了矿石,在烧制陶器过程中又还原出金属铜和锡,创造了炼铜技术,生产出各种青铜器物,从而进入青铜时代。这是人类大量利用金属的开始,是人类文明发展的重要里程碑。世界各地开始青铜时代的时期前后不一,希腊是公元前 3000 年以前,埃及是公元前 2500 年左右,中国是夏代(约公元前 22 世纪—约公元前 17 世

纪)。中国在商周(约公元前 17 世纪初—公元前 256 年)即进入青铜器的鼎盛时期,在技术上达到了当时世界的顶峰。如河南安阳殷墟出土的商代晚期的司母戊方鼎(重 875kg),就反映出当时中国青铜铸造的高超技术和宏大规模。又如在湖北随县曾侯乙墓出土的战国(公元前 475 年—公元前 221 年)初期制造的编钟,亦充分反映出当时中国在冶金方面已达到相当高的工艺和技术水平。冶金术的迅速发展,提高了社会生产力,推动了社会进步,并导致城市的诞生。城市最早出现于公元前 3000 年前的美索不达米亚,随后出现在埃及、印度河流域及中国华北地区。这标志着人类文明又向前跨进了一大步。

5000 年前,人类已开始用铁。公元前 12 世纪,在地中海东岸已有很多铁器。由于铁比铜更容易得到,更好利用,在公元前 10 世纪铁工具已比青铜工具更为普遍,人类从此由青铜器时代进入铁器时代。公元前 8 世纪,已出现用铁制造的犁、锄等农具,使生产力提高到一个新的水平。中国在春秋(公元前 770 年—公元前 476 年)末期,冶铁技术有很大突破,遥遥领先于世界其他地区。如利用生铁经退火制造韧性铸铁及以生铁制钢技术的发明,标志着中国生产力的重大进步。这些发明对战国和秦汉农业、水利与军事的发展起到了重大的作用,成为促进中华民族统一和发展的重要因素之一。这些技术从战国至汉代相继传到朝鲜、日本和西亚以及欧洲地区,推动了整个世界文明的发展。

人类自有史以来,材料在促进人类物质与精神文明方面的事例不胜枚举。18 世纪蒸汽机的发明和 19 世纪电动机的发明,使材料在新品种开发和规模生产等方面发生了飞跃。如 1856 年和 1864 年先后发明了转炉和平炉炼钢,使世界钢的产量从 1850 年的 6 万 t 突增到 1900 年的 2800 万 t,大大促进了机械制造、铁路交通的发展。随之不同类型的特殊钢种也相继出现,如 1887 年的高锰钢、1890 年的 18-4-1 高速钢、1903 年的硅钢及 1910 年的铬镍不锈钢等。这些都是现代文明的标志,使人类进入了钢铁时代。在此前后,银、铅、锌也得到大量应用,而后铝、镁、钛和稀有金属相继问世,从而金属材料在 20 世纪中占据了材料的主导地位。20 世纪初,人工合成高分子材料问世,如 1909 年的酚醛树脂(胶木),1925 年的聚苯乙烯,1931 年的聚氯乙烯以及 1941 年的尼龙等,发展十分迅速,如今世界人工合成高分子材料年产量在 1 亿 t 以上,论体积已超过了钢。有些工业发达国家,如美国高分子材料年产量的体积已是钢的两倍。所以有人说现在是高分子材料时代。应该指出,有些材料,如木材、砖瓦、石料、水泥及玻璃等,一直占有十分重要的地位,因为这些材料资源丰富,性能价格比在所有材料中最有竞争能力。20 世纪 50 年代,通过合成化工原料或特殊制备方法,制造出一系列先进陶瓷。由于其资源丰富、比重小、耐高温、耐磨等特点,很有发展前途,成为近三四十年来研究工作的重点,且用途在不断扩大,有人甚至认为“新陶瓷时代”即将到来。因为高分子材料及先进陶瓷材料的迅猛发展,使得金属材料相形见绌,甚至有人把钢铁工业称之为“夕阳工业”。其实,高分子材料、现代陶瓷与金属材料,各有不可替代的性能和功能。从资源情况来看,陶瓷原料(硅、氮、碳等)可以说取之不尽、用之不竭,高分子原料有再生的优势,金属矿产资源虽只有几百年的寿命,但如果考虑海洋及地壳深处的资源,也可以说是永无止尽的。所以,21 世纪将是多种材料并存的时代。随着科学技术的发展,它们之间互有消长。但是更有发展前途的是复合材料,因为这类材料具有每种单质材料所不具备的性能,而且可以节约资源,是今后材料发展的主要方向。事实上,人类很早就利用复合材料,如泥巴中混入碎麻或麦秆用以建造房屋。钢筋混凝土是脆性材料与韧性材料、抗拉材料与抗压材料的结合,玻璃钢是玻璃纤维与树脂的复合,还有碳纤维增强的树脂基复合材料,都是为了提高材料的强度和模量而采取的措施。此外,人们还在发展更高级的复合材料,如金属基、陶瓷基复合材料等。经过仔细分析,可以发

现,几乎所有生物体,如内脏、牙齿、皮肤以及木材、竹子等都是以复合材料的方式构成的,说明这是一种最合理的结构,大有发展前途。

英国学者 M. 阿石贝(Ashby)对机械制造和土木工程材料在演化过程中各类材料的相对重要性进行了估计,认为自现代炼钢技术出现以后(1860年前后),金属材料的重要性急剧增加,一直到20世纪中叶,人工有机合成材料、工程陶瓷及现代复合材料迅速发展,金属材料的重要性逐步下降了。到21世纪初,四类材料的重要性已经是平分秋色。

前面所述,主要指的是结构材料。随着科学技术的发展,功能材料愈来愈重要,特别是半导体材料出现以后,促进了现代文明的加速发展。1948年发明了第一只具有放大作用的晶体管,10年后,又研制成功集成电路,使计算机的功能不断提高,体积不断缩小,价格不断下降;加之高性能的磁性材料不断涌现,激光材料与光导纤维的问世,使人类社会进入了“信息时代”。因此,功能材料占据了更重要的地位。特别是功能材料品种多,包括了金属、陶瓷、高分子和复合材料所构成的各种功能材料,且应用范围广,发展非常迅速,成为研究与开发的重点。

总之,人类社会的进步,几乎无不与材料密切相关。相反,有些技术,因为没有合适的材料而进展迟缓。如太阳能是一种永恒能源,量大面广,又无污染,但是由于没有发展成效率高、寿命长、价格低廉的光电转换材料而使太阳能在能源中的地位一直很低;磁流体发电装置的效率可达50%~60%,远远高于现有热机,而且可以燃烧劣质燃料,污染也小,但是由于有些关键材料没有得到解决,至今未能实现工业化。如此种种,都说明新材料的研究与开发、材料科学与技术的基础和应用研究至关重要。

1.2.2 材料是社会现代化的物质基础与先导

材料既是人类社会进步的里程碑,又是社会现代化的物质基础与先导。因此,新材料的研究、开发与应用反映着一个国家的科学技术与工业水平。20世纪40年代,英、美对核材料的研究与开发给予高度重视,在美国的曼哈顿计划中专门设立了有关材料的研究与开发机构,从而取得很大的突破,也促进了核能利用的发展。下面就现代科学技术的发展与新材料的关系举几个典型例子予以说明。

1. 电子技术的发展

追溯电子技术的发展,可见新材料的研制与开发起着举足轻重的作用。1906年发明了电子管,从而出现了无线电技术、电视机、电子计算机;1948年发明了半导体晶体管,导致电子设备的小型化、轻量化、省能化及成本的降低、可靠性的提高与寿命的延长;1958年出现了集成电路,使计算机及各种电子设备发生一次飞跃。此后,集成电路的发展十分迅速,这是以硅为主的半导体材料的相应发展的结果。

进入20世纪90年代,集成电路的集成度进一步提高,加工技术达到 $0.3\mu\text{m}$ (研究水平已达 $0.1\mu\text{m}$),每位存储器的价格就更低了。这些都与硅单晶的生长和晶片的加工技术密切相关,即对单晶纯度与缺陷的要求不断提高,单晶直径不断增加,晶片的加工精度和表面质量不断提高,从而芯片成品率大为提高,每位存储器的价格急剧下降。这就是为什么计算机的功能愈来愈好而其价格却不断下降的重要原因。集成电路的发明与发展,使人类文明发生了一个飞跃,成为人类进入“信息时代”的里程碑。这是因为微型计算机可以普及到世界的每一个角落,如果仍采用电子管计算机的话,这就不可能了。表1-2中所列数据便说明了这个问题。

表 1-2

1946 年电子管计算机与 1976 年微型计算机一些指标的对比

指 标	电子管计算机	微型计算机	对 比
体积/ ft^3 ^①	30 000	0.011	$\sim 10^6$
功耗/kW	140	0.0025	5.6×10^4
质量/t	30	0.005	6.0×10^3
平均故障间隔时间	几个小时	几年	$\sim 10^4$

注:① 是引用文献原始数据。

随着计算机容量与速度的增加,以电子作为传输媒介受到了限制。一是因其有一定质量而传输不能太快;二是在传输过程中易受电、磁场的干扰,而且当尺寸接近纳米级时还要产生量子效应。因而考虑用光传输更为理想,即利用光子而不是电子作为携带信息的载体,于是在电子学基础上发展了光子学。第一步先利用光子与电子相结合,形成了光电子学,与之直接相关的材料就称之为光电子材料。用光子器件制成的光计算机具有大容量、高速度,而且有助于向智能化方向发展。计算机发挥作用,还要解决相应的信息存储问题,一要容量大、密度高,二要易于快速随机存取,三要任意擦除和反复使用。这些要求都要靠材料的不断改进来满足,迄今已出现磁存储器(磁芯、磁带、磁盘等)、半导体存储器和光盘等。如一张光盘可以存储超过 10 万幅图像或 50 万页文字信息,比磁盘高几百倍。计算机是工业自动化的关键设备,但是没有精度很高、性能稳定的传感器,自动化控制也不可能实现。因此,开发各种用途的敏感材料便成为重要环节。

2. 光通信的产生

通常一般采用微波、电缆来传输信号。可是自从 1966 年在理论上提出可用光波进行通信后,经过 10 年研究,1976 年出现了国际上第一条试验性光纤通信线路。由于光纤传输信号的容量大(如一根 0.01mm 的光导纤维可传输数以千门计的电话,比一般同轴电缆有数量级的提高),且具有造价低、中继站少、保密性强等优点,到 1980 年年初,光通信的容量超过了同轴电缆。1988 年建成第一条横贯两洋的海底光缆,其造价只是 1956 年所建同轴电缆的 1%。由于光导纤维的研制成功,改变了整个通信体系,为信息的传输做出了重要贡献。

光通信的迅速发展,除了光导纤维以外,激光技术与光电子技术的发展是其重要促成因素。而这些都与材料密切相关。也正是由于材料的发展,使 20 世纪 90 年代初期提出来的“信息高速公路”的设想能成为现实。

3. 磁学技术的广泛应用

磁性材料的用处十分广泛,是现代化社会不可缺少的材料。收音机、电视机、收录机、计算机与通信设备等都离不开磁性材料。对于动力装置,如电动机、发电机及变压器,磁性材料也占有十分重要的位置。磁性材料分为软磁和硬磁两类。用于变压器的硅钢片属于前者。如以 20 世纪 60 年代发展出来的金属玻璃来代替,其铁损为定向硅钢片的 1/4。硬磁发展出的品种更是多种多样,而且用途广泛,凡磁记录及动力机械都离不开它。正因为如此,硬磁材料的发展十分迅速。如 20 世纪 30 年代中期主要是高碳钢;20 世纪 40~50 年代出现了铝镍钴系永磁合金;20 世纪 60 年代发明了钐钴合金;20 世纪 80 年代又出现了钕铁硼铁氧体,其磁能积比钢提高了近 100 倍。采用钕铁硼材料后,音响设备体积变得更小了,电机功率提高了,如做成起重装置的磁吸盘,不但本身重量减轻,而且能耗明显降低。据估计,到 20 世纪末永磁材料增长 3 倍,其中钕铁硼占 1/3。

4. 超导技术的开发

超导技术是人们努力发展的另一种技术。可是自 1911 年发现物质的超导现象以后,经过 70 多年的发展,超导材料达到的最高临界温度只有 23.2K,没有脱开液氮温度,而液氮价格昂贵,冷却效率低,很难普遍推广。1986 年出现氧化物超导体,其临界温度超过了 125K,步入液氮温度区域。但要达到工业化,还有大量工作要做。因此,高温超导体的研究将成为今后若干年内研究与开发的重点。超导技术的引入,将会使许多方面发生飞跃式发展。在电子学方面,做成超导量子干涉器(SQUID),用于电磁测量,具有极高的灵敏度,可测出极弱的磁场。如装在飞机或卫星上,可大面积探测某些矿藏的分布;用于医学,可检测微弱的生物磁效应。超导材料用于制造超导计算机、红外探测器或微波器件都会有突破性进展。在强电方面,超导的作用就更广泛。凡是需要通过大电流而形成强磁场的地方,超导材料都有用武之地。如用于磁共振,比用铌钛低温超导材料可降低成本 15%;用于高能加速器、磁分离与磁过滤等效果更好,如用于磁悬浮列车,列车时速可达 500km,而震动与噪声可减少到最低限度;用于电子装置,又是磁流体发电及受控热核反应装置的重要组成部分;做成超导电路,不但效率可以提高,电机容量也可大幅度增加。超导材料最诱人的应用为输电与储能。由于其为零电阻,用于输电基本上无损耗,而且可以输到任何远的地方。这对中国今后的水电开发特别重要。中国水力资源丰富的地区大多是人烟稀少的地方,如大西南。目前,中国约有 15% 的电能损耗在输电网路上。因此,高温超导电缆对中国有特殊的意义。超导储能的效率(93%~95%)比用泵抽水储能的效率(约 75%)要高得多。超导变压器在相同容量下,其体积和损耗都减少和降低到一般变压器的 1/5~1/6。如此等等,都说明超导材料对现代文明的影响是巨大的。

5. 航空航天技术的进步

现代文明的另一标志是航空航天技术的发展。由于战争的需要,20 世纪 40 年代出现了喷气技术。而这种技术的实现,是以高温材料及高性能结构材料为依托的。特别是高温合金材料的不断发展,不但提高了歼击机的性能,而且为今天大型客机的安全及有效载荷的提高、续航时间的延长以及飞机与发动机的长寿命提供了可能性。作为航空航天所用的材料,其比强度、比刚度尤为重要,因为飞机发动机每减重 1kg,飞机可减重 4kg;航天飞行器每减重 1kg,就可使运载火箭减轻 500kg。所以对高速飞行器来说,不惜代价以减轻其重量。新发展出来的高强度高分子纤维芳纶,其比强度较之高强度钢高出近 100 倍。有人设想用这种材料制成飞机,飞行速度可达 Ma15.0,从纽约到东京只需 2h。比刚度对于飞行器也是十分关键的。高比刚度材料,在相同受力条件下变形量小,从而保证原设计的气动性能。这就是为什么要大力发展纤维增强的树脂基及金属基复合材料的重要原因。另外,热机的工作温度愈高,其效率也愈高,但是目前所用的金属材料由于熔点及抗氧化能力所限,不能保证更高的使用温度。因此,现代工程陶瓷就成为当前研究的重点。

上述种种,说明材料特别是新材料与现代文明的关系十分密切。新材料为提高人民生活、增加国家安全、提高工业生产率与经济增长提供了物质基础。因此,新材料的发展十分重要。1991 年美国商业部公布的一个资料表明,到 2000 年,先进材料在美国 12 项新兴技术中的产值居首位,即在 3560 亿美元中,先进材料占 1500 亿美元,占 42%。从全世界来看,先进材料产值为 4000 亿美元,占整个新兴技术产值 10000 亿美元的 40%。这里所说的“新兴技术”,就是指那些目前正在发展、预期在 10 年内将占有重要市场的技术,包括新兴电子与信息系统、新兴生产系统及与生命科学相关的生物技术与装置。如果把国民经济各部门因采用新材料而得到的附加产值计算在内,将 10~100 倍于此。

1.3 材料科学与材料的发展趋势

长期以来,人们对材料本质的认识是表面的、肤浅的。最初,每种材料的发展、制造和使用都是靠工匠人的经验,如听声音、看火候,或靠祖传秘方等等。后来,随着经验的积累出现了“材料工艺学”,这比工匠的经验进了一大步,但它只记录了一些制造过程和规律,一般还是知其然不知其所以然。因此,长期以来,材料的发展十分缓慢,只有在“材料科学”形成之后,材料才得到了迅速的发展。

1.3.1 材料科学的形成与内涵

“材料”是早已存在的名词,但“材料科学”的提出只是20世纪60年代初的事。1957年前苏联人造卫星首先上天,美国朝野上下为之震惊,认为自己落后的主要原因之一是先进材料落后,于是在一些大学相继成立了十余个材料科学研究中心。为此,“材料科学”这个名词便广泛地被引用了。

事实上,“材料科学”的形成是科学技术发展的必然结果。

第一,固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展,对物质结构和物性的深入研究,推动了对材料本质的了解;同时,冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等的发展也使对材料本身的研究大大加强,从而对材料的制备、结构与性能以及它们之间的相互关系的研究也愈来愈深入,为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

第二,在“材料科学”这个名词出现以前,金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系,目前,复合材料也正在形成学科体系。但它们之间存在着颇多相似之处,不同类型的材料可以相互借鉴,从而促进本学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的,而且广泛地被用来作为钢热处理的理论基础;但在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象,并用来作为陶瓷增韧的一种有效手段。又如材料制备方法中的溶胶-凝胶法,是利用金属有机化合物的分解而得到纳米级高纯氧化物粒子,成为改进陶瓷性能的有效途径。复合材料更需要借鉴并利用其他材料的基础知识和制备方法。

第三,各类材料研究所需的设备与生产手段有颇多的共同之处。虽然不同类型的材料各有其专用测试设备与生产装置,但许多方面是相同或相近的,如显微镜、电子显微镜、表面测试及物性与力学性能测试设备等。在材料生产中,许多加工装置也是通用的。如挤压机,对金属材料可以用来成型及冷加工以提高强度;而某些高分子材料,在采用挤压成丝工艺以后,可使有机纤维的比强度和比刚度大幅度提高。研究设备与生产设备的通用不但节约资金,更重要的是相互得到启发和借鉴,加速材料的发展。

第四,许多不同类型的材料可以相互代替和补充,能更充分发挥各种材料的优越性,达到物尽其用的目的。但长期以来,金属、高分子及无机非金属材料相互分割,自成体系。由于互不了解,习惯于使用金属材料的,便想不到采用高分子材料,即使是想用,又因对其不太了解,而不敢用;相反,习惯于用高分子材料的,也想不到用金属材料或陶瓷材料来代替。设计人员的“因循守旧”,对采用异种类型的新材料持怀疑态度,这既不利于材料的推广,又有碍于使用材料的行业的发展。

第五,复合材料在多数情况下是不同类型材料的组合,特别是出现超混杂复合材料以来更为如此。如果不同类型材料没有一个全面的了解,复合材料的发展必然受到影响。而复合

材料又是今后新材料发展重点之一。因此,发展材料科学,对各种类型材料有一个更深入的了解,是复合材料发展的必要基础。

材料科学所包括的内容往往容易理解为研究材料的组织、结构与性质的关系,探索自然规律。这属于基础研究。实际上,材料是面向实际、为经济建设服务的,是一门应用科学,研究与

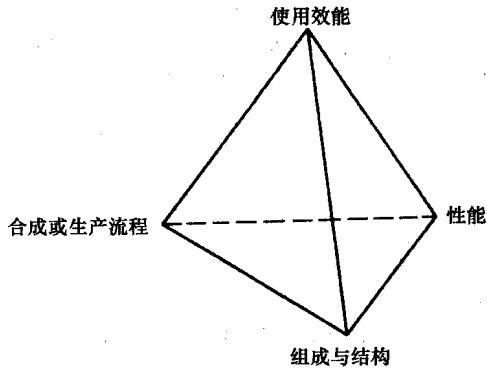


图 1-1 材料科学与工程的四要素及其间的关系

发展材料的目的在于应用,而材料又必须通过合理的工艺流程才能制备出具有实用价值的材料来,通过批量生产,才能成为工程材料。所以,在“材料科学”这个名词出现后不久,就提出了“材料科学与工程”。工程是指研究材料在制备过程中的工艺和工程问题。1986年由英国 Pergamon 出版的《材料科学与工程百科全书》对材料科学与工程下的定义为:材料科学与工程就是研究有关材料组成、结构、制备工艺流程与材料性能和用途的关系的知识的产生及其运用。换言之,材料科学与工程是研究材料组成、结构、性能、生产流程和使用效能以及它们之间的关系(图 1-1)。

这里应该强调指出的是使用效能(或称为使用性能或效果)。它是指材料在使用条件下的表现,如使用环境、受力状态对材料特性曲线以及寿命等的影响。效能往往决定着材料能否得到发展或大量使用。有些材料的实验室测定值是有吸引力的,而在实际使用过程中却表现很差,从而也就难以得到推广。只有不断调整组成、改变工艺条件或采用其他有效措施来改进材料的使用性能,材料才能真正得到发展。

材料科学与工程具有物理学、化学、冶金学、陶瓷学、计算数学等多学科交叉与结合的特点;实验室的研究成果必须通过工程研究与开发以确定合理的工艺流程,经过中间试验后才能生产出符合要求的工程材料。各种工程材料用于信息、交通运输、能源及制造工业等方面,而后根据使用情况,把需要改进的地方反馈于研究与开发,进行改善,再回到各应用领域。如此通过应用与改进多次反复,才能成为成熟的材料。即使是成熟材料,随着科学技术的发展与需求的推动,还需不断加以改进。

1.3.2 传统材料的地位及其发展方向

传统材料,特别对发展中国家来说,往往较新材料更为重要。这是因为,传统材料是国民经济的基础,与人民基本生活的关系至为密切;传统材料量大面广,即使有一点改进,收益也很可观。例如,美国道路与桥梁的使用寿命增加 1%,其收益可达 300 亿美元。因此,各国对传统材料都给以足够的重视。材料和其他商品一样,是否受到重视或得到发展,决定于其性能价格比(一些特殊产品,如国防用少数产品,主要决定于性能)。从表 1-3 可以看出几种结构材料的价格(1981 年日本市场价格)与比强度的关系。除了水泥与木材外,钢是最便宜的,所以钢铁是一种难以代替的传统材料,至少在可预见的若干年内是如此,何况钢铁本身也在不断发展和改进。随着工艺的不断改进和新技术的应用,劳动生产率在不断提高,因而保持着钢铁相对于其他材料有很强的竞争能力。相反,汽车制造业也是许多国家的传统支柱产业,因此,汽车材料也不断推陈出新。如果单从性能来看,以碳纤维增强树脂基复合材料制作车体当属十分理想,但由于其价格与成型工艺等原因,虽然全复合材料汽车制造成功已有 20 多年,但至今仍

难以推广。钛的资源丰富,性能也十分优越,由于生产成本太高,因此难以推广应用。

表 1-3 一些结构材料的价格与比强度的关系

结构材料	钢	铝	钛	水泥	陶瓷 (Al ₂ O ₃)	碳纤维	木材	聚丙烯
比强度(强度/密度)	5.2	11.1	13.3	0.8	97.4	160.9	12.5	3.9
价格/比强度(相对值)	1	3.9	16.7	0.4	4.0	5.2	0.8	3.8

发展传统材料产业也存在着大量材料科学技术问题,特别是对不发达国家来说,其任务十分繁重。

第一,除了努力增产,增加品种规格以外,更多的力量应该放在改进产品质量,做好资源的综合利用。不能认为老材料就难有新的发展。像水泥已有很长的历史,近几年来,国际上对水泥及其增强体的研究却十分活跃,特别是结合本地资源的综合利用,大有可为。钢铁与有色金属也是一样。

第二,要改进生产工艺,提高收益率,降低能耗,提高经济效益。中国材料生产的能耗,吨纸耗标煤 1.20t(发达国家为 0.59t),吨标准箱平板玻璃耗标煤 0.046t(0.02t),吨钢耗标煤 1.35t(0.68t),吨水泥熟料耗标煤 0.21t(0.12t),均比发达国家高出 1 倍左右。为了改变这种状态,一是改进单项技术,如在炼钢中尽量采用吹氧转炉、近形铸造等;二是优化工序,使热效率达到合理的速度。这样,在不增加能源的情况下,可以使产量大幅度提高。

第三,采用新技术,使传统材料的生产不断更新换代。新技术不但可以改进生产流程,而且可以使传统材料的性能明显提高。如刀具材料经过立方氮化硼或金刚石涂层以后,车削速度提高 100 倍,精度也大为提高;硅钢片改为非晶铁基合金,铁损可降低 1/3。工艺流程中自动化技术的大量采用,不但可以节约人力,而且对质量的稳定性也提供了保证。

第四,要十分重视环境保护。传统工业往往污染严重,传统材料工业中的乡镇企业更是如此。因此,在鼓励发展传统材料的同时,还要非常重视环境污染问题,否则,后果将不堪设想。

总之,传统材料科学技术还有不少值得深入研究探索的问题,即使在发达国家,也仍投入大量的人力财力,如每年都召开与之有关的学术会议,出版大量资料与文献等就是例证。对中国科技工作者来说,除了借鉴别国已取得的成果,如何结合本国情况使传统材料工业得到改造和发展,使已取得的科研成果转换为生产力,更是当务之急。可喜的是,我国已将钢铁、水泥等传统材料的研究列入了国家重点基础研究发展规划项目(973 项目),投入巨资进行研究。相信在本世纪,这些传统材料的研究、生产和应用必将取得突破性的进展。

1.3.3 开发新材料和发展高技术

高技术在当今社会的地位和作用十分重要,是不容置疑的。高技术的发展,使整个生产方式、组织形式都在发生本质性的变化,从而改变着产业结构,促进经济和社会的发展。高技术和高技术产业已经成为综合国力竞争的热点。无论是发达国家还是发展中国家,都全力以赴参与了高技术的竞争。为此,各国都在努力增加科技投入,加强科技尤其是高技术的宏观管理,并加速人才的培训,以适应时代的需要。

新材料是发展高技术的基础和先导,新材料研制与开发本身又是高技术的一部分。因此,发展高技术,必须重视开发新材料。根据目前的情况,新材料的发展重点主要有以下几种类型。

1. 复合材料

复合材料是结构材料发展的重点。其中,主要包括树脂基与高强度、高模量纤维的复合,以及金属基复合材料、陶瓷基复合材料和碳基复合材料等。表面涂层或改性是另一类复合材料,量大面广,经济实用,将有更大的发展前景。对有机材料来说,分子复合是提高性能的有效途径,也将会有很大发展。另外,由于复合材料的设计自由度大,特别有利于发展新型功能复合材料和多功能复合材料。

2. 功能材料

功能材料与器件相组合,并趋向于小型化与多功能化。特别是外延技术与超晶格理论的发展,使材料与器件的制备可以控制在原子尺度,将成为今后发展的重点。其他信息功能材料发展也很快,品种日益增加,性能不断提高。这里主要指的是半导体、激光、光电子、液晶、敏感及磁性材料等。它们是发展信息产业的基础,在材料中无疑占有十分重要的地位。特别是高温超导材料将会继续得到重视。一方面是使氧化物超导体达到实用化乃至产业化,另一方面是探索更高温度(如室温)下有超导性能的材料。

3. 低维材料和亚稳材料

低维材料具有目前主体材料所不具备的性质。如作为零维的纳米级金属颗粒是电的绝缘体及吸光的黑体;以纳米微粒制成的陶瓷具有较高的韧性和超塑性;纳米级金属铝的硬度为块体铝的8倍,等等。这些都是待开发的领域。作为一维材料的高强度有机纤维、光导纤维,作为二维材料的金刚石薄膜、超导薄膜都已显示出广阔的前景。非晶材料是亚稳材料的一种,具有很多优异性能,将会得到很大发展。

4. 生物材料

这类材料将得到更多的重视。一是生物医学材料,用以代替或修复人的各种器官、血液及组织等;二是生物模拟材料,即模拟生物的机能,如反渗透膜、高效率的物质能量转换,以改变现行工业流程。前者有些已达到实用化或产业化的程度,而后者大部分处于探索阶段。

5. 新金属材料

以其高性能价格比、成熟的工艺、现有装备的优势,以及新金属材料不断涌现等原因,在今后若干年内仍将占有重要位置。美国联邦政府经过仔细调查分析之后,对材料的投资中用于金属材料的仍居首位(13%),依次为复合材料(11%)、电子材料(10%)及生物材料(10%)等,说明金属材料仍有很强的生命力。

6. 高性能陶瓷

高性能陶瓷当前正处于发展阶段。随着热机的发展,对工程陶瓷的需求愈来愈迫切;信息功能材料的品种不断增加,性能不断提高,对功能陶瓷的研究愈来愈深入。因而高性能陶瓷研究与开发将成为今后重点之一。

7. 高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为基础制得的一类新型材料。包括橡胶、塑料、纤维、涂料、胶粘剂和高分子复合材料。高分子是由成千上万个分子单体通过加聚或缩聚反应以共价键结合起来的长链分子。独特的结构使高分子材料具有易改性、易加工性及许多其他材料所无法比拟和取代的优异性能。如新型高性能工程塑料,坚韧,机械强度高,使用温度范围广,耐低温又耐高温,介电性能优异,耐老化,对大多数化学介质稳定,成型加工性能好,用途广泛。因此,高分子材料近几十年来一直发展很快,今后还会有更优异性能的高分子材料出现。特别是功能高分子材料正待开发,将会有很大发展。