

材料科学与工程系列

材料科学与工程概论

Introduction of Materials
Science and Engineering

顾家琳 杨志刚 邓海金 曾照强 编著

清华大学出版社

材料科学与工程系列

材料科学与工程概论

Introduction of Materials
Science and Engineering

顾家琳 杨志刚 邓海金 曾照强 编著

PAT 08/15

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

材料科学与工程有四要素,即材料的成分与组织结构、性能、工艺和使用条件下的性能。本书将从各种不同材料所具有的共性规律的角度,阐述上述四方面的基本知识,并着重说明它们彼此之间的本质联系及综合运用的方法。另外,也将从人类文明社会可持续发展的角度,阐明材料科学与工程四要素和环境之间的关系。本书内容安排有一定的系统性和深度,并介绍了一些材料科学与工程的前沿研究。本书将为非材料专业的学生以及广大对材料感兴趣的读者从整体上理解材料科学与工程,认识和使用材料打下基础。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

材料科学与工程概论/顾家琳等编著. —北京:清华大学出版社, 2005. 3

(材料科学与工程系列)

ISBN 7-302-10348-8

I. 材… II. 顾… 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(2005)第 004155 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 宋成斌

文稿编辑: 赵从棉

印 装 者: 北京嘉实印刷有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 172×246 印张: 17.5 字数: 349 千字

版 次: 2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-10348-8/TB·88

印 数: 1~3000

定 价: 32.00 元

前言

在人类社会发展的进程中,材料是社会进步的物质基础和先导。现在,材料、能源和信息被誉为现代文明社会的三大支柱,对国计民生起着举足轻重的作用。美国 MIT 的 Eager T W 教授指出:非材料专业的技术人员,在他们的工作中与材料应用有关的部分可达六分之一。另外,当今社会更需要的是知识面宽的“通才”,因此清华大学为全校非材料专业的学生开设了“材料科学与工程概论”课,这可以为他们理解材料科学与工程,认识和使用材料打下基础。自开课以来,每次选课一年级学生人数最多,二年级次之,个别也有三年级的学生。校内建筑学院、土木水利学院、机械学院、信息科学技术学院、理学院、医学院、经济管理学院、人文社会科学学院、新闻与传播学院以及工程物理系、化学工程系都有学生选修此课。本书是这门课程的教学参考书。

材料科学与工程有四要素,即材料的成分与组织结构、性能、工艺和使用性能。该书从不同材料所具有的共性规律的角度阐述上述四方面的基本知识,并着重说明它们彼此之间的本质联系及综合运用的方法。其内容涉及面广,既有一定的理论性,又有很多工程方面的知识。

书中内容的具体安排分四部分:1. 材料的微观世界;2. 材料的组织结构与性能的关系(结构材料、功能材料分两章论述);3. 材料工艺;4. 零件失效分析与选材原则。第1、2部分除介绍材料科学最基本的知识外,也介绍一些前沿的研究成果,如准晶、纳米材料、高温超导材料、新型复合材料等。在材料工艺部分,主要讲解最基本的概念和一些新工艺技术。第4部分在内容安排上也兼顾了基础性和与实际应用结合两方面。读者只需具有高中数理化基础,便可读懂本书。

每部分都包括内容概要、学习要求、正文、基本概念、思考题、课堂讨论题和作业。教师可先介绍内容概要,让学生明确学习要求,然后精讲正文。学生可通过基本概念和思考题自我检查掌握的情况。在上讨论课前,学生要将讨论题准备好。通过讨论课上师生间的互相切磋,可帮助学生们更好地掌握所学内容。在讨论课后,学生通过完成作业可进一步巩固所学知识。在这样的学习过程中,对培养学生的自学能力和分析解决问题的能力是有帮助的。

本书“材料工艺”部分由杨志刚教授编写,“复合材料”部分由邓海金教授编写,“无

机非金属材料”部分由曾照强副教授编写,全书由顾家琳教授统编。由于编著者水平有限,本书难免有欠缺及不当之处,真诚希望各界读者批评指正,以便进一步修改补充。

编著者

2004年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 元素、物质、材料	1
1.2 材料对人类文明进步的意义	2
1.2.1 材料与人类的日常生活	2
1.2.2 材料与新技术革命	3
1.2.3 材料与国防现代化	6
1.3 怎样得到新材料	7
1.4 材料科学与工程基本要素	8
基本概念	10
思考题	10
作业	10
第 2 章 材料的微观世界	11
2.1 固体原子间的相互作用和材料分类	11
2.1.1 元素周期表及电负性	11
2.1.2 原子结合能与结合力	12
2.1.3 化学键	13
2.1.4 材料分类	18
2.2 固体中原子的排列	20
2.2.1 晶体结构	20
2.2.2 准晶、非晶、液晶结构	33
2.2.3 晶体缺陷	36
2.3 相与组织	44
2.3.1 相与组织的定义	44
2.3.2 相的分类	46
2.3.3 相图	47
2.4 固体中的电子	54

2.4.1 单个原子的电子分布	54
2.4.2 晶体中的电子	55
2.4.3 导体、半导体和绝缘体	56
2.5 小结	57
基本概念	58
思考题	58
课堂讨论题	58
作业	59
 第3章 结构材料的组织结构与性能的关系	60
3.1 材料在承载时发生的变化	61
3.1.1 弹性、塑性、强度、韧性	61
3.1.2 硬度	63
3.1.3 断裂韧性	64
3.2 金属材料	66
3.2.1 金属材料在国民经济中的作用	66
3.2.2 金属材料的强化方式	66
3.2.3 金属材料的热处理	74
3.2.4 新金属材料	81
3.3 无机非金属材料	93
3.3.1 结构陶瓷	93
3.3.2 水泥	99
3.3.3 玻璃	100
3.4 有机高分子材料	101
3.4.1 有关高分子材料的一些基本概念	102
3.4.2 高分子材料的合成反应	104
3.4.3 高分子化合物的命名	105
3.4.4 高分子化合物的结构	106
3.4.5 温度对高聚物力学状态的影响	112
3.4.6 高分子材料的性能与结构	114
3.4.7 常用塑料	117
3.5 复合材料	123
3.5.1 概述	123
3.5.2 复合材料复合原理	126

3.5.3 增强材料·····	129
3.5.4 典型的复合材料及应用·····	136
基本概念·····	144
思考题·····	145
课堂讨论题·····	146
作业·····	146
第4章 功能材料的组织结构与性能的关系 ·····	148
4.1 功能材料性能简介·····	148
4.2 电性能与微观结构的关系·····	150
4.2.1 材料电性能的特征·····	150
4.2.2 电导的微观机制·····	151
4.2.3 电导体功能材料·····	154
4.2.4 半导体材料·····	160
4.2.5 超导材料·····	161
4.2.6 无机材料的介电性能·····	165
4.3 光性能与微观结构的关系·····	169
4.3.1 材料的光学性能·····	169
4.3.2 光学性能的本质·····	171
4.3.3 各种材料的光学性质·····	171
4.3.4 光功能材料·····	175
4.4 磁性能与微观结构的关系·····	183
4.4.1 物质磁性的表征·····	183
4.4.2 磁性分类·····	183
4.4.3 磁性的本质·····	184
4.4.4 铁磁材料的磁滞现象·····	187
4.4.5 磁性材料·····	188
基本概念·····	196
思考题·····	197
课堂讨论题·····	197
作业·····	197
第5章 材料工艺 ·····	198
5.1 材料工艺概述·····	198

材料科学与工程概论

5.1.1	材料工艺的重要性	198
5.1.2	材料工艺的创新途径	199
5.1.3	材料工艺的经济性、稳定性和环境兼容性	200
5.2	材料的生产工艺	201
5.2.1	金属材料	201
5.2.2	陶瓷材料	205
5.2.3	高分子材料	210
5.2.4	单晶材料	211
5.3	材料的加工工艺	213
5.3.1	金属材料的加工工艺	213
5.3.2	塑料和橡胶的加工工艺	220
5.3.3	复合材料的加工工艺	224
5.4	材料工艺性能的表征	225
5.4.1	直接实验法	226
5.4.2	相关法	226
5.5	新工艺新技术	227
5.5.1	表面改性	227
5.5.2	金属雾化喷射沉积	229
5.5.3	金属半固态加工	231
5.5.4	自蔓延高温合成技术	232
	基本概念	234
	思考题	234
	作业	234

第6章 零件失效分析与选材原则 235

6.1	产品、工程的质量与材料	235
6.2	失效分析及其重要性	236
6.3	选材原则及方法	237
6.3.1	选材原则	238
6.3.2	选材方法	241
6.4	零件失效分析	246
6.4.1	失效过程及产生失效原因的特点	246
6.4.2	失效分析的正确思路	247
6.4.3	断裂失效	248

6.4.4 磨损失效	253
6.4.5 环境介质作用下的失效	254
6.4.6 金属失效的预防	260
基本概念	261
思考题	261
课堂讨论题	262
作业	262
附录	263
附录一 物理学基本常数	263
附录二 国际单位制(SI)单位	264
附录三 常用材料的力学性能	265
附录四 常用工程材料的物理性能(20℃)	267
参考文献	269

第1章 绪论

内容概要

本章首先阐明元素、物质、材料的区别与联系；进而从材料与人类日常生活的关系，材料科学与工程对新技术革命的推动作用，以及材料科学与工程在国防现代化中的重要作用三方面介绍材料科学与工程在人类社会文明进步史上的作用，说明在现代生活中无论是哪个专业的科技人员，掌握一些材料科学与工程方面的基本知识都是十分必要的；然后介绍了获得新材料的思路以及材料科学与工程的四个基本要素。

学习要求

1. 认识什么是材料。
2. 认识材料是人类社会文明的基础与前导。
3. 了解人类获得新材料的思路。
4. 明确材料科学与工程的四要素及其相互关系。

1.1 元素、物质、材料

大家在高中化学中都学过“元素周期表”，表中按一定规律汇集了自然界所有发现的元素，以及经过人工方法合成的元素，如原子序数从 93 到 103 号的所有元素都是人造元素，它们的寿命大部分都很短。此外，人们还人工合成了元素周期表上没有的 104~113 号元素，现在正在探索创造 114 号元素。这些就是当代物质文明的基础。不同族的元素有较大的性能差异。由不同元素构成的物质性能也不同，如自然界存在量最多的水和石头，水由氢元素和氧元素组成；许多石头的主要成分是 SiO_2 ，由硅元素和氧元素组成，它们的性能完全不同。物质是元素的载体，物质的种类不计其数，物质还不完全是材料。

我们说“材料是能为人类经济地、用于制造有用物品的物质。”这就是说，物质中只有一部分是材料，材料的一大特点就是能为人类使用，另外，经济性也很重要。比如，天然金刚石很硬，这个性能很有用，但由于它的稀有和昂贵一般就不将其作为材料使用。由于要使用材料，人类必须熟悉了解材料。这门课就是围绕材料的最基本问题

展开,也就是告诉大家应该怎样去了解材料,怎样才能获得性能满足我们使用要求的材料。

1.2 材料对人类文明进步的意义

为使大家对材料的重要性有更深刻的认识,我们从以下 3 方面来概括一下材料的作用。

1.2.1 材料与人类的日常生活

从古到今,材料与人类的日常生活密切相关。材料的发展与进步不断改善与提高人类的生活质量,从人类社会发展进程的简图(图 1.1)可以看到,历史学家早就按人类使用材料的特点来划分历史发展的阶段。远古时代,人类只能使用天然的石头作为工具,故称之为石器时代。火的发现使人类多了一种改造自然的武器,人类对材料的使用由天然材料向人造材料发展,开始了陶器时代,接着是铜器时代、铁器时代、钢铁时代和新材料时代(也即信息时代)。



图 1.1 人类社会发展进程的简图

就现代生活来讲,人们的衣、食、住、行、休闲、娱乐更是样样离不开材料,新材料的出现使人们的生活质量发生了极大的变化。以穿衣为例,衣料早已由天然的棉、毛、丝、麻发展到各种人造纤维(人造棉)与合成纤维(尼龙、的确良、腈纶等)。现在世界上编织纤维中已有约 54% 是化学纤维。化学纤维不仅具有耐磨损、不起皱、色泽鲜艳等优点,而且不占用耕地。日常生活中,尼龙袜子给我们带来的方便,大家都有所体会。其他方面的例子还很多。

总之,材料与食物、居住空间、能源、信息共同组成了人类生活的基本资源。

1.2.2 材料与新技术革命

制造大规模集成电路的主要材料是单晶硅片。集成电路的功能特性每年都在提高,1965年,摩尔提出了摩尔定律,预言芯片的容量每18个月就要加倍。1971年,一个芯片上有3000个晶体管,1998年已达 10^7 个。芯片除用于制造计算机外,还可以制作其他各种电器,如录像机、洗衣机等各种家用电器,以及各种自动控制设备(图1.2)。现在,在生物技术方面又研制成功了生物芯片。在芯片所用的材料上,人们也在继续探索。1999年,德国汉诺威大学的研究人员研制成了锗处理器,运算速度比目前的硅处理器可提高一倍。可以说,半导体材料是整个电子技术和计算机产业的基础,一个国家在芯片技术方面的成就决定着这个国家在整个战略产业、高技术产业方面的成就。

若只有计算机没有远程通信技术,整个世界的发展不会有今天这样快,而远程通信技术的发展又与光导纤维的问世密切相关。虽然美国著名的科学家贝尔一百年前就做过用光传输语言的实验,但现代光纤是在英籍华人高琨博士的研究工作基础上发展起来的。1966年高琨博士发现提高玻璃的纯度可以减少光传播过程中的损耗。1970年美国康宁公司将这一科研成果开发为商品,用高纯石英玻璃制造出了现代光导纤维。光导纤维被誉为百年不遇的发明。这种光纤是一种比头发还细的高纯度玻璃丝(图1.3),一根细丝就能同时传输2000路通话,并且不失真、不受环境干扰、不易被窃听,此外,信号还传输特别快,光缆一秒钟传输的距离若改用铜缆则要花上20个小时,快了72000倍。因此,光导纤维的出现使信息传输发生了巨大变化,对国民经济、国防、科学文化以及社会生活都产生了巨大的影响。现在,世界各国都相继建起了大规模光纤电话网和长途干线,并且还铺设了数万公里的跨海洲际通信光缆。光纤传输过程示意

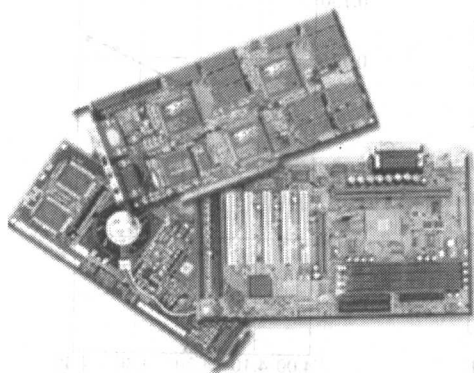


图1.2 各种芯片

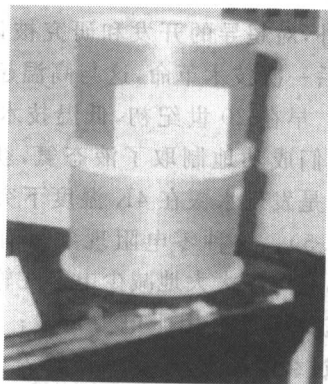


图1.3 光导纤维

见图 1.4。从图中可以看出,光纤通信的实现除了依赖光导纤维以外,还需要有强大能量密度的单色光源。最适合的光源就是各类激光,这又涉及到激光工作物质,也就是固体激光材料,一般用的较多的是刚玉($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)中掺入 Cr^{3+} 质量分数 0.05% 的红宝石。在光纤通信中用得较多的是 GaAs 半导体激光器,其波长为 $0.85\mu\text{m}$,在传输中衰减为 5dB/km 。

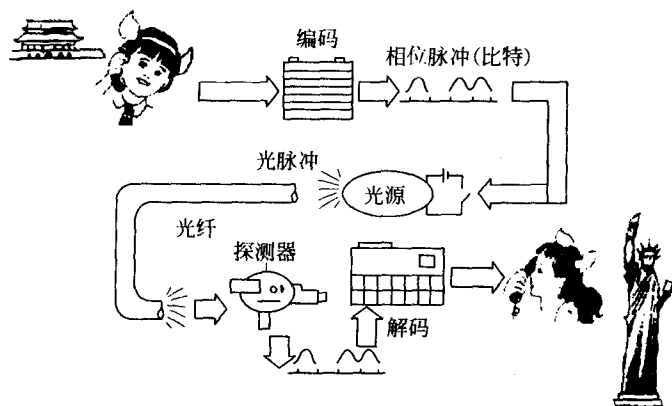


图 1.4 光纤传输过程示意图

各种激光材料的研究,使得激光技术渗透到了许多新技术领域。如用掺铝的钕钇石榴石激光器可以预报地震;在制造业中,激光可以用来加工其他方法难以加工的材料;在医学上,激光手术的应用也越来越广泛;激光雷达已成功地用于工业自动化和无接触的自动测距,激光武器也被投入使用,如激光制导炸弹就是使用最多的精确制导武器。

另外,对超导的开发和研究被认为是 20 世纪的最后一次技术革命,这与高温超导材料的发现有关。早在 20 世纪初,低温技术获得了重大突破,人们成功地制取了液态氮,获得了 4K 的低温,于是发现水银在 4K 温度下突然没有了电阻(图 1.5)。这种零电阻现象具有非常大的实用价值,它可以大大地减少电能输送过程中的损耗,这种优点可用于电力传输;另外,也可用于制造过载限流器、超导变压器等。因而人们在不断地探索具有超导性的材料,希望得到超导性的温度能高一些。

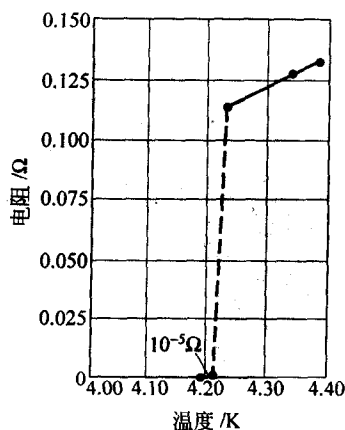


图 1.5 水银样品的电阻与温度的关系

图 1.6 展示了超导材料的发展历程,可以看到从 20 世纪初到 80 年代约 70 年间,出现超导性的温度只提高了不到 30K。但在 20 世纪 80 年代末,超导材料的研究有了突破性的进展,超导临界温度提高到了 125K,已在液氮温度以上。这意味着超导材料的实用化向前迈进了一大步。这一突破的取得是由于起初超导的研究主要集中在金属和金属间化合物上,在长时间举步不前之后,人们的目光转向了陶瓷材料,于是,有了新的发现。在高温超导材料的研究方面,我国处于世界领先水平。中国科学院赵忠贤院士 1987 年在世界上率先研制出了超导临界温度 90K~100K

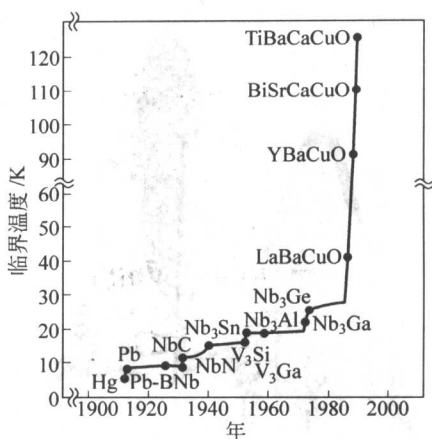


图 1.6 超导材料的进展

的 Y-Ba-Cu-O 高温超导体。2000 年 11 月北京有色金属研究院又试制成功了第一根 116m 长的高温超导带材,清华大学超导中心于 2001 年 4 月又试制成功 500m 的高温超导带材,使我国成为世界上少数几个拥有这类高科技产品的国家之一。生产出百米长超导带意味着超导体从实验室进入产业化。高温超导带材的产业化将改变这个世界的面貌,它的价值无异于半个世纪前生产出半导体。

关于超导应用特别要提到的是磁悬浮列车,它是利用超导体中强电流引起的强磁场间同性相斥的作用浮起来的。日本、德国都已投入试用,时速达 500km。我国西南交通大学也已于 1994 年 10 月做成了 43m 长的磁悬浮列车试验线,车重 4t。我国已在上海浦东开发区建造首条磁悬浮列车示范运营线,北京、四川等地也将建设磁悬浮列车运营线。图 1.7 为磁悬浮列车的照片。

另外,航空航天技术的发展也离不开新材料。目前已投入使用的各种载人、载物航天

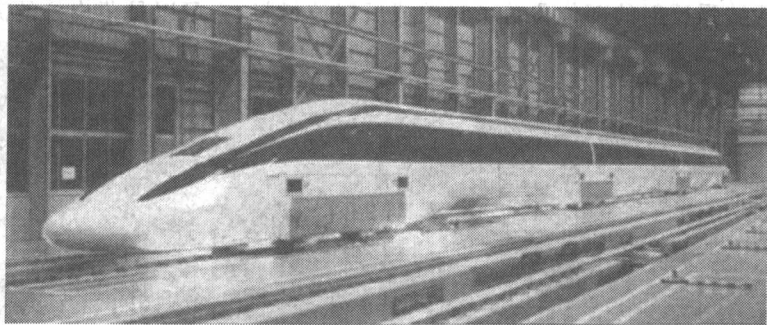


图 1.7 磁悬浮列车

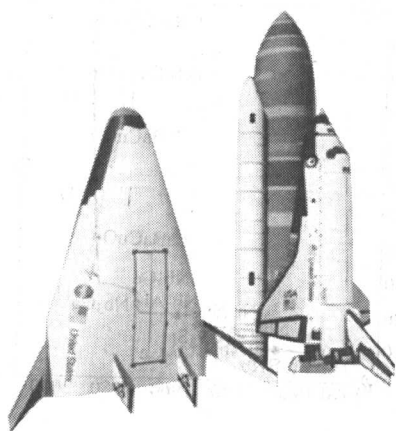


图 1.8 航天飞机

飞机每运载 1kg 有效载荷成本费为 1 万美元,这样昂贵的费用使人类征服太空受到了很大限制,所以用尽量轻的满足性能要求的新材料来制作各种航天器势在必行。图 1.8 右侧展示的是美国现役航天飞机,这种设计每次升空要丢掉一些部件,如两个大的作为助推器的辅助火箭和外部的储箱(图中深色部分);左侧是未来的新式航天飞机,它除了在结构上采用单级火箭式全部回收利用的方案外,在材料使用上也有很大的改进,主结构用合成材料。特别要指出的是,航天飞机返回地球时,机身温度超过 1000°C 。以前的航天飞机外表面使用的是碳陶瓷片,在二次飞行时许多碳陶瓷片需更换,很麻烦。新的航天飞机

外壳用 Ni-Cr-Fe 合金制造,外层的隔热板由一层 TiAl 合金与一层绝热材料组成。在上述例子中可以清楚地看到:高新技术是推动现代经济和社会发展的强大动力,而新材料是高新技术的基石,新材料的发现推动了高新技术的发展。

1.2.3 材料与国防现代化

随着科学技术的发展,当代战争也表现出了高技术的特点,如美国对伊拉克作战、对科索沃的空中打击都使用了隐形飞机、反辐射导弹、巡航导弹等,实行高密度精确打击,夺取了战场主动权,使伊拉克始终处于被动挨打的地位,对南联盟的轰炸也给南斯拉夫带来了巨大的灾难。为更好地捍卫我国的领土、领空,保障人民安全,我们必须加强国防的现代化,这也与材料的发展密切相关。图 1.9 所示为美国轰炸伊拉克时使用的 B-2 幽灵式轰炸机,是一种隐形飞机。它的隐形功能一方面是由其外观设计来保证的,另一方面就是在飞机对雷达波强反射的部位覆盖了吸波或反射波材料,它可以是蒙皮外的涂料,也可以

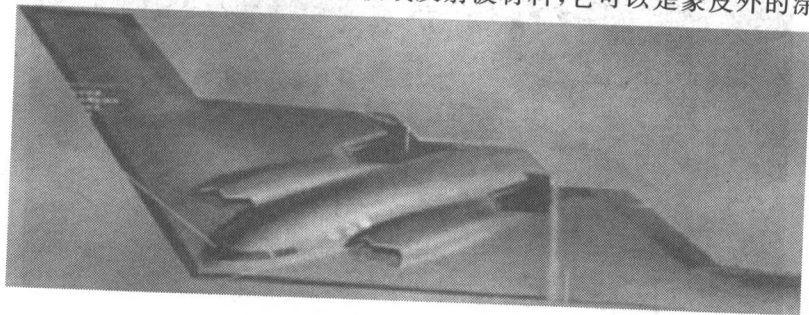


图 1.9 B-2 幽灵式轰炸机

是贴或镀上去的材料。这种 B-2 型飞机机身的涂覆物厚达 10mm, 窗户上镀有金属薄膜, 整个机身呈黑色是由于采用了碳纤维复合材料。

在陆地战中, 坦克是把陆地战斗的三要素(火力、机动力和防护力)组合在一起的系统武器。坦克用材料应尽量满足以下要求: 机身要轻, 这样灵活性才好; 装甲外壳要坚固、能防爆破, 最好还有隐身功能。目前英国正在研制塑料坦克, 这种坦克外表面有一层聚合物, 能根据外部环境改变颜色, 因而有好的隐蔽性; 另外, 采用多层增强塑料装甲用以抵御高爆炸药或高速炮弹的攻击。

为了提高单兵战场防护能力, 防弹衣的高技术化是各国军需装备发展的重点。纵观历史的发展, 防弹衣的不断进化清晰可见。在第一次世界大战期间, 防弹衣实际是钢制的铠甲, 重 9kg; 后来发展为用尼龙和铝片制作, 然后是用玻璃钢(一种高分子基复合材料); 现在可完全用化学纤维制作, 一种用 18 层尼龙和凯芙拉纤维(一种芳香族纤维, 强度很高)制成的防弹衣只有 1.03kg。这种凯芙拉纤维在极热的情况下, 不熔化也不流淌, 而是凝固起来增加厚度, 可以在身体周围形成免致烧伤的保护层。

在现代国防中, 应用新材料的例子不胜枚举, 在此列举的几例只是作一简要说明, 从中可以清楚地看到新材料在国防现代化中的重要作用。

1.3 怎样得到新材料

新材料粗略地可以分为两类: 一类是设法将以前从未结合在一起的元素结合成新材料; 另一类是改进现有的材料。从前面我们所粗略介绍过的新材料可见, 更多的新材料属于第二类。当对已有材料改进时, 如提高纯度(光纤)、改变其存在形态(单晶硅)或控制其使用条件(低温超导), 材料的性能会发生质的变化。因此, 对已有材料的认识也是相当有必要的。前面所涉及的材料中只有陶瓷高温超导材料的发现属于第一类。

对现有材料改进可以有多种思路。

首先是使用的要求促进了材料的发展, 如针对飞机用轻型材料, 研制成了 Al-Li 合金; 考虑到发动机需要耐高温材料, 研制新型精密陶瓷; 还有许多场合要求材料心部要有高的韧性, 表面要耐磨、耐腐蚀, 因而必须进行材料的表面改性等。

其次是工艺手段的进步, 使材料改进成为可能, 新材料才能由理想变成现实。石英玻璃纯度提高, 大直径单晶硅片的制造都涉及工艺问题。

第三是向大自然学习, 大自然千姿百态, 各种物质琳琅满目。虽然人类改造自然征服宇宙取得了巨大成功, 但人类对自然的认识和模拟还远远不够。众所周知, 细胞是具有传感、处理和执行 3 种功能的融合材料, 它是在原子、分子水平上进行材料控制, 在不同层次上赋予自检测(传感功能)、自判断、自结论(处理功能)和自指令、自执行(执行功能)等各种功能, 是人类模仿制造智能材料的蓝本。另外, 像木头、竹子、贝壳等都具有独特的结