

材料科学与材料工程基础

[美]L.H.范 弗莱克 著

夏宗宁 邹定国 译

吕允文 校



机械工业出版社

译者的话

本书译自美国密执安大学 Lawrence H. Van Vlack 所著“材料科学与材料工程基础”一书（第四版，1980年），这是一本跨专业的综合性的“材料科学与材料工程”的入门教程。它由大学的物理和化学基础出发，从原子和电子的角度，统观各类材料（金属、陶瓷、聚合物等）的内部结构与其性能之间的关系，并扩展至材料的制造工艺和使用，从而将理论与实际结合起来。

作者富有教学经验，在选材及内容的编排上都有其独特之处。各章都提出了学习要求，给出了例题和大量的习题，特别注意培养学生进行计算的能力。此外，文后还附有课堂讨论及复习小结。全书各章相对独立，既便于教师组织教学，也便于自学。因此是一本较好的材料科学教学参考书，同时也可供从事材料工作的科学研究人员和工程技术人员参考。

全书共13章，其中第1、3、4、6、9、10、11由北京工业大学一分校邹定国翻译，其余部分由清华大学夏宗宁翻译。索引部分未译。全书由吕允文校对，在译校及誊写过程中，曾得到清华大学一些同志的帮助，在此一并致以谢意。

由于我们的业务水平有限，译文中难免存在错误和不确切之处，希望同志们予以指正。

前 言

近二十五年来，材料科学与材料工程（MSE）作为一个人人们为之奋斗的领域而赢得了应有的声誉。在它的发展过程中，始终围绕着这样一个概念，那就是认为材料的性能和行为与它的内部结构是密切相关的。因此，要改进材料的性能，必须适当地改变它的内部结构。同样，假如材料的制造工艺或使用条件改变了它的结构，那么它的性能就一定会随之而改变。

在这一发展过程中，各工科院校在向学生讲授材料科学与材料工程这门课程的方法上已有显著的改进。目前，这门课程是基于大学物理和化学的基础课程之上的，而不是象 15~25 年前那样只作为一个更高深的固体物理和固体化学的删节课本。本书 1964 年的第二版和 1975 年的第三版曾对这一发展趋势作出贡献。

同时，在教材内容的编写上还有另一种倾向，那就是为学生增加了学习辅导材料，使课本不仅仅停留在阐述条理化的概念和有用的关系式上。本书的前一版已显示了这一倾向。例如在每章的开头插入前言；更加强调计算作为一种学习方法；增加了课堂讨论题以及每章末了的复习与小结等等。国家科学基金会所赞助的关于材料科学与工程教育模式（简称 EMMSE）的发展计划表明，全国都在致力于编写有关“材料”所有课题的学习辅导材料。

新版的“材料科学与材料工程基础”继承了前一版的长处，即发扬了便于自学的特点，同时还力图保留前一版在课本编排上的许多原有的优点。例如，教材的完整性、简明性、每一章节的独立性以及介绍了参考资料的来源等等。在前一版中最受学生欢迎的一套例题，本版在数量上几乎增加了一倍，达 200 道之多。此外，为了明确学习方向，我们在每一章的开头加上了学习要求。根据不同教师的需要增编了课外习题，现已达 600 多道。这些习题可分为两种类型，一种是较基本的，（它们用明体字标明，例如 1-6.1），它们与课堂例题相似或者与公式直接有关。其目的是为了让学首先入门。第二类习题则需要对学过的内容作更深入的分析（和/或）综合才能解得（它们用黑体字标明，例如：1-6.2）。最后，我们对课堂上所用的讨论题也作了一些修改，并增加了数量，它可以作为讲课的一种补充。

前几版中的总的编排保持不变，那就是本书一开头首先给出材料在工程上的重要性能，接着在第二章中复习普通化学中已学过的有关化学键合的原理。第三章到第五章从原子和电子的角度上讲述材料的结构特性。它为以下三章研究单相材料的性能打下了基础。那就是：第六章的金属；第七章的聚合物和第八章的陶瓷。多相材料则在第九章到第十一章中叙述；依次着重讨论相图、材料的显微组织和如何通过控制显微组织来获得我们所希望的材料性能的方法。由于腐蚀问题的重要性，特在第十二章单独论述。第十三章作了重大的修改，这种修改主要是对四种广泛应用的材料给予特别的重视，它们是铸铁、混凝土、复合材料和木材。这些材料尽管复杂，但还是逐个地阐明了其性能与内部结构的关系。该章的内容，教师可以根据学时和课程需要，选择其中的某一小节或几小节进行讲授，也可以全部删掉。

另一些较大的修改是重新编写了第六章的晶粒度大小对材料性能的影响，介绍了退火与热加工时的再结晶动力学。工艺过程在本版各章节得到了进一步的重视，这样做并不是为了

IV

使本书成为一本制造工艺的课本，而是为了让学生看到材料结构与性能关系的概念，既可以用来分析材料的使用性能，也可以用来分析材料的加工过程。这样就使本书增加了和工艺相联系的“结合点”，它将使学生有许多机会将教师从实践中总结出来的例证与具体的工艺过程联系起来。

本版全部采用国际单位制作为基本量纲，但仍将它与常用的英制单位的关系保留在括弧中。这是因为许多工程师在同文化水平较低、但实践经验十分丰富的技术工人交往过程中，必须采用两种单位制的缘故，这种现象还要持续许多年。

同前几版一样，本书的某些章节和段落，教师可以根据时间及补充课程内容的不同进行删节，这些部分均用黑点(·)标明，它对以后各章节(不带黑点的)的内容不是必需的前提。

我很抱歉，不能向那些对这次再版有过贡献的密执安大学的许许多多大学生们一一致谢，人们将高度评价他们为本书所作的贡献。为此，我谨以此书献给今天的大学生——明天的工程师们。

同时，对于在密执安大学及其它院校中和我共事过的各位教授也应表示谢意，其中特别是麻省理工学院的莫里斯·科恩和密执安大学的比奇洛，霍斯福德，胡克和田恩教授。由于我室的阿迪斯·伏格斯夫人和艾迪生-韦斯利出版公司的狄克·莫顿和马累恩·豪的帮助，大大地促进了修改工作的进展。最后要感谢的是弗朗，我们把他放在最后绝不是不重要，恰恰相反，他的耐心和鼓励是完成本书所必不可少的。

L.H.范 弗莱克

1979.9 于密执安

序言 人类事务中的材料

我们周围到处都是材料，它们不仅存在于我们的现实生活中，而且也扎根于我们的文化和思想领域。事实上，材料与人类的出现和进化有着密切的联系，因而它们的名字已作为人类文明的标志。例如：石器时代、青铜时代和铁器时代。天然材料和人造材料已成为我们生活中不可分割的组成部分，以至于我们常常认为它们的存在是理所当然的。材料已经与食物、居住空间、能源和信息并列一起组成人类的基本资源。材料确实是我们社会中的工作物质，它们不仅在我们的日常生活中，而且在国家的昌盛和安全中也起着举足轻重的作用。

但究竟什么是材料呢？我们如何才能了解、掌握和利用它们呢？材料当然是宇宙万物中的一部分，但更具体地说，材料指的是那样一些物质，这些物质的性能使其能用于结构、机器、器件或其它产品。例如：金属、陶瓷、半导体、超导体、聚合物（塑料）、玻璃、介电材料、纤维、木材、砂子、石块，还有许多复合材料都属于材料的范畴。在美国国民生产总值和就业人数中，生产这些材料并将其制成成品约占五分之一。

如果将人体看作一部机器、结构或器件，那么有关的食物、药物、生物物质、肥料等均可包括在材料的范畴之内，但现在习惯于把它们列入生命科学和农业科学。同样，尽管矿物燃料、水、空气也被看作广义的材料，但通常它们还是被归入其它领域。

人类使用的材料可以看作是流动在一个巨大的材料循环（一个全球性的、自始至终的循环系统）之中。通过采矿、钻探、挖掘或采集，从地下得到原材料，然后变为大块材料，如金属锭、碎石、石油化工材料和木材；接着再制成工程材料：象电线、钢材、混凝土、塑料和胶合板等，以满足社会对最终产品的要求。最后，当这些材料按预定的目的为人类用过，就作为废料又回到大地中，或者更确切地说，它们将为再加工和下一次被利用而重新进入循环，直到最后废弃为止。

材料循环概念的一个重要方面是它揭示了材料、能源和环境之间的许多强烈的交互作用，而且这三者都必须被纳入国家计划和技术规划内。这些问题的考虑越来越显得至关重要，因为正当人们对他们在这个星球上所生存的空间的质量进一步关心之时，能源和材料却更为短缺。举一例说明，假如铝屑能有效地进入再循环使用，那么，它需要耗费的能源只有从矿石中提炼出同样吨位的原生铝所耗费能源的二十分之一左右，而且地球也会因此而大大地减少由于开采给她带来的创伤。

因此，材料循环是一个把自然资源 and 人类需要联系在一起的循环系统，它包罗万象地形成一个全球性的联络网。它不仅使地球上各个国家和各种经济彼此联系在一起，而且还把它们与自然物质本身联系在一起。

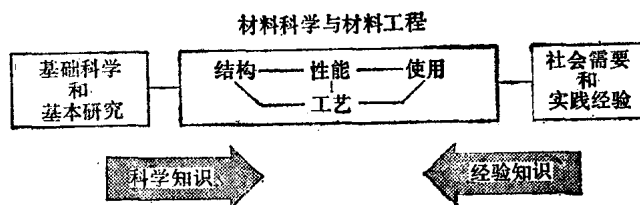
在人类知识的发展中，材料科学与材料工程在所有别的研究和探索——这扩展了人类的活动范围——中诞生了！显然，它的诞生是不足为奇的。简言之，材料科学与材料工程(MSE)是研究有关材料的成分、结构和制造工艺与其性能和使用间的相互关系的知识；研究这些知识的由来和应用。如图 I 所示，中间有一个枢纽，把材料的结构、性能、工艺、功能和使用联系在一起，而MSE的作用就象一条传导知识的带子，它从基础知识和基础研究（左边的）

一直延伸到社会需要和实践经验（右边的）。科学知识和经验知识从两个不同的方向分别流入MSE，并在其中非常协调地结合起来。

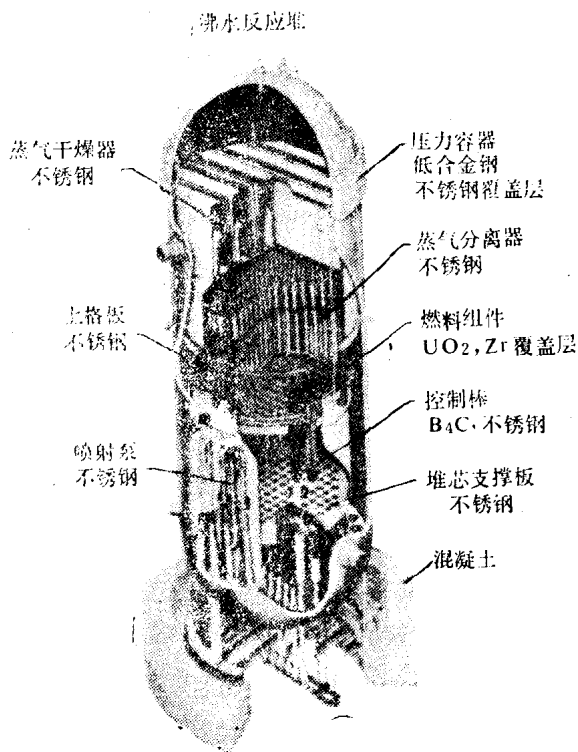
如果我们希望着重研究这一领域中的材料科学部分，那么我们应该集中了解材料的本质，提出有关的理论和描述，说明材料结构是如何与其成分、性能以及行为相联系的。而另一方面，这一领域中的材料工程部分则涉及到对基础科学和经验知识的综合和运用，以便发展、制备、改善和使用材料，满足具体的需要。显然，材料科学和材料工程之间的区别主要在于着眼点的不同或者说是各自强调的中心不同；它们当中并没有一条明确的分界线。我们为其采用一个复合名词——材料科学与材料工程，这一命名已日益显示出它的合理性。由于在使用材料科学这一术语时，一般都包含了材料工程的许多方面，所以本书实际上在题目和内容两方面都是将两者结合在一起的。

图II和图III分别说明了两种不同应用中的材料的选用及其功能的情况，每一种情况都需要对材料的使用情况、可靠性、持久性、经济权衡和环境因素的考虑作出大量的内行的判断。在核反应堆中，构成燃料的片状氧化铀被包在锆合金中，锆合金不仅能耐高温而且节省中子，利用碳化硼元件控制中子通量（即控制运行温度），因为碳化硼能吸收中子，但它又必须用不锈钢来防止腐蚀。所产生的蒸气储于一个外层由低合金钢制成的高压容器内，因为低合金钢具有一定强度而又价格合理，但在容器的里面衬了一层较贵重的不锈钢以防止腐蚀。这种核能转换装置包含了一个复杂的材料体系，其中被选用的材料在使用时必须考虑其相互依赖的关系，并将这一点置于其各自特有的功能之上。这是一个能源生产方面的材料应用的突出范例。反过来，在美国制造工业所消耗的能源中，又有一半之多用于材料的生产和成形上。

另一个材料体系由图III表明，它说明材料和住宅设施的关系。虽然在住房建筑中对材料



图I. 关于科学知识与经验知识对流的材料科学中心环节的示意图



图II. 能量转换的材料体系。任何一个诸如沸水型核反应堆的完整设计都需要有各种材料起专门的作用。希望设计一个可以正常运行、安全、有经济效益、且环境可靠的系统的科学家和工程师都必须了解每种材料的作用、性能和它们的局限性 (General Electric Company.)

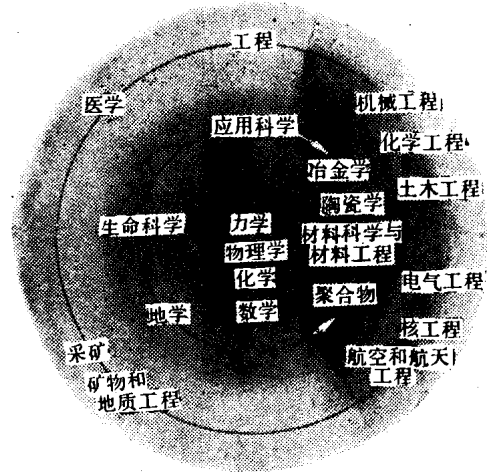
科学和材料工程这门科学的应用似乎不如在核反应堆中那么复杂，然而这里给出的例子却展示了一种前景和可能；因为这所房屋几乎完全是由再生材料建成的，因此它能节省自然资源和能源，同时也减少了对环境的破坏。要制造再生的金属、玻璃、混凝土、屋面板、柏油纸、隔热层和木制品等，必须具有高度的材料开发水平和技术水平，而且要在质量和成本上能够与常规材料相竞争[⊖]。

因此，我们知道MSE是一个有意义的事业，它深入到原子和电子的微观世界，将物质的凝聚态与材料功能和使用的宏观世界联系起来，使其为满足社会需要而服务。图IV所展示的环形图描绘了人类知识的很大一部分。由中心的基础科学向外扩展，通过中间一圈的应用科学到外缘的各工程领域。图的中心是物理和化学，它们的两侧分别是数学和力学，呈放射状地由中心向外扩展，穿过了各种不同的应用性学科。图右边的扇形阴影部分是材料科学与材料工程，它可与另一侧的扇形部分——生命科学和地学相比较。从广义上看，MSE是一门跨学科的科学，它包含（但并不代替！）了某些学科（如冶金学和陶瓷学），及某些学科分支（如固体物理和聚合物化学），并与一些工程学科相重叠。

当然，有许多科学家和工程师，他们是材料专家——冶金学家、陶瓷学家和聚合物化学家——他们全力从事材料科学和材料工程的工作。

同时，根据政府资料分析表明，在所有非本专业的工程师所完成的每六小时的业务工作中，就有一小时的工作是与材料及材料的使用直接有关的。对化学家和物理学家来说，这个比重还要高一些。这样在我国近二百万名科学家和工程师中，就有相当于五十万名人员献身于这个对我们国家的生产和福利都是十分重要的部门。

因此，材料科学与材料工程构成了这样一种体系，在这个体系中，许多学科的专业人员正在为探求大自然的发展过程，同时为增进与人类的需要相适应的知识而创造性地工作着。



图IV. 材料科学与材料工程。本文是由物理和化学的基本原理引伸而来的，它将材料的性能和使用行为与其成分和结构联系起来，这对于工程师是很重要的。在美国，有四分之一以上的技术力量在从事材料开发和材料工艺工作。这些力量来源于物理学科和其它所有的工程部门

(National Academy of Science.)

莫里斯·科恩

1979.9于麻萨诸塞州、坎布里奇

⊖ 原文为Complete, 似为Compete之误。——译者注

目 录

译者的话

前 言

序 言

第一章 材料引论：常用特性 1

1-1 结构 \leftrightarrow 性能 \leftrightarrow 加工工艺 1

1-2 力学行为 4

1-3 热学特性 9

1-4 材料对电场的响应 11

1-5 性能表示 13

复习与思考 15

第二章 材料引论：化学键的再研究 21

2-1 单个原子和离子 22

2-2 强键力（主价键） 25

2-3 分子 29

• 2-4 次价键力 32

2-5 原子间距 35

2-6 配位数 39

2-7 材料的类型 41

复习与思考 42

第三章 固体中的原子有序 47

3-1 结晶特性 48

3-2 立方点阵 50

3-3 六方晶体 53

3-4 多晶型 55

3-5 晶胞几何学 56

3-6 晶向 59

3-7 晶面 62

• 3-8 X射线衍射 67

复习与思考 70

第四章 固体中的原子无序 78

4-1 固体中的杂质 79

4-2 金属中的固溶体 79

• 4-3 化合物中的固溶体 81

4-4 晶体缺陷 83

4-5 非晶材料 89

4-6 原子的振动 91

4-7 原子的扩散 95

• 4-8 扩散过程 99

复习与思考 101

第五章 固体中的电子迁移 107

5-1 电荷载流子 108

5-2 金属导电性 109

5-3 绝缘体 113

5-4 本征半导体 113

5-5 杂质半导体 119

• 5-6 半导体器件 123

复习与思考 126

第六章 单相金属 131

6-1 单相合金 132

6-2 单相合金的工艺过程 135

6-3 弹性形变 136

6-4 单晶体内的塑性形变 139

6-5 塑性形变后的金属性能 144

6-6 再结晶 146

6-7 多晶金属的行为 150

• 6-8 断裂 154

• 6-9 辐照损伤 157

复习与思考 158

第七章 分子相 164

7-1 大分子 165

7-2 线型聚合物 170

7-3 分子的不规则性 175

7-4 三维聚合物 178

7-5 聚合材料的形变 181

7-6 聚合物的电学行为 186

• 7-7 聚合物的稳定性 189

复习与思考 191

第八章 陶瓷材料 197

8-1 陶瓷相 198

8-2 陶瓷晶体 (AX) 199

8-3 陶瓷晶体 (A_mX_p) 203

8-4 复杂化合物 205

8-5 硅酸盐.....	206	11-3 析出工艺	288
8-6 陶瓷的电磁行为.....	209	11-4 $\gamma \rightarrow (\alpha + \bar{C})$ 反应速率.....	291
8-7 陶瓷的力学行为.....	216	11-5 工业用钢的热处理工艺	297
• 8-8 陶瓷材料的工艺过程.....	219	• 11-6 淬透性	302
复习与思考	222	复习与思考	307
第九章 多相材料: 平衡图.....	229	第十二章 金属的腐蚀	314
9-1 相的定性关系.....	230	12-1 电镀: 腐蚀的逆反应	314
9-2 相图.....	234	12-2 伽伐尼电偶	316
9-3 相的化学成分.....	237	12-3 伽伐尼电池的类型	319
9-4 相的数量.....	238	• 12-4 腐蚀速率	323
9-5 工业合金和陶瓷.....	241	12-5 腐蚀的控制	326
9-6 铁-碳系的相	246	复习与思考	330
9-7 Fe-Fe ₃ C相图	248	第十三章 铸铁、混凝土、木材和复合	
9-8 奥氏体的分解.....	251	材料 (广泛使用的、更复杂	
9-9 普通碳钢和低合金钢.....	253	的材料)	333
复习与思考	255	• 13-1 铸铁	334
第十章 多相材料: 显微组织及其性能	262	• 13-2 混凝土及其有关制品	339
10-1 固相反应	262	• 13-3 木材	346
10-2 多相显微组织	270	13-4 复合材料	349
10-3 显微组织: 力学性能	273	复习与思考	351
10-4 显微组织: 物理性能	277	附录	356
复习与思考	280	A 部分常数及其换算	356
第十一章 多相材料: 热处理工艺	284	B 常用元素表	358
11-1 退火工艺	284	C 常用工程材料的性能 (20°C)	360
11-2 正火工艺	287	D 材料专用术语 (按英文字母顺序排列)	361

第一章 材料引论：常用特性

前言

工程师将材料和能量改作成产品时总要力图选择最佳性能的材料。本章将介绍材料的最基本的常用特性，其它性能将在以后章节讨论。

本书的主题是材料的性能和行为取决于它们的内部结构。这一章中所介绍的材料在力学、电学和热学等方面的性能和特征，将作为以后各章中研究结构与性能关系的基础。本章对于数据表达，它们的偏差及在计算中所能确保的精度也作了简明的阐述。

目录

1-1 结构↔性能↔加工工艺

1-2 力学行为：

形变，强度（和硬度），韧性和计算实例。

1-3 热学特性：

热容量，热膨胀，热传导和计算实例。

1-4 材料对电场的响应：

电导率（和电阻率），介电行为和计算实例。

1-5 性能的表现：

定性信息，定量数据和数据的方差。

本章与其它各章一样，都是以复习和思考部分为结束，它包括总结、重要术语和概念一览表，课堂讨论题及习题。

学习要求

1. 牢固地建立各种材料都具有不同的内部结构这一概念（各种内部结构的详细内容将在以后各章讨论）。
2. 熟悉常用的术语和概念，这些术语和概念在本书以后各章节及你在未来的工作中与其它工程师交往时将经常碰到。
3. 了解材料的各种不同力学性能之间的相互关系，特别是对表1-2.1中引用的性能。
4. 复习物理学中学过的有关热和电的最基本特性，并通过电荷载流子来加深对导电性概念的理解。
5. 通过简单的计算来说明你所掌握的关于性能的知识（每章末尾的习题用于此目的）。
6. 复习平均值，中位数及标准差的概念，并能用适当的有效数字表达你的答案。
7. 学会使用两种单位制（对美国学生而言）。

1-1 结构↔性能↔加工工艺

每一个应用科学家和工程师（机械的、土木工程的、电气的或其它方面的）都必不可少地要用到材料，不论产品是桥梁、计算机、宇宙飞船、心脏起搏器、核反应堆、还是汽车

的排气装置，工程师们都必须完全了解他们所用材料的性能和行为特征。下面，我们就要考虑汽车制造中用到的各种各样的材料：铁、钢、玻璃、塑料、橡胶等，这里只不过是列举出几种材料（图 1-1.1）。而仅仅对钢材一项而言，就有 2000 多种不同种类和型号的品种。那么，要制造一个特定的零件，应根据什么原则来选择材料呢？

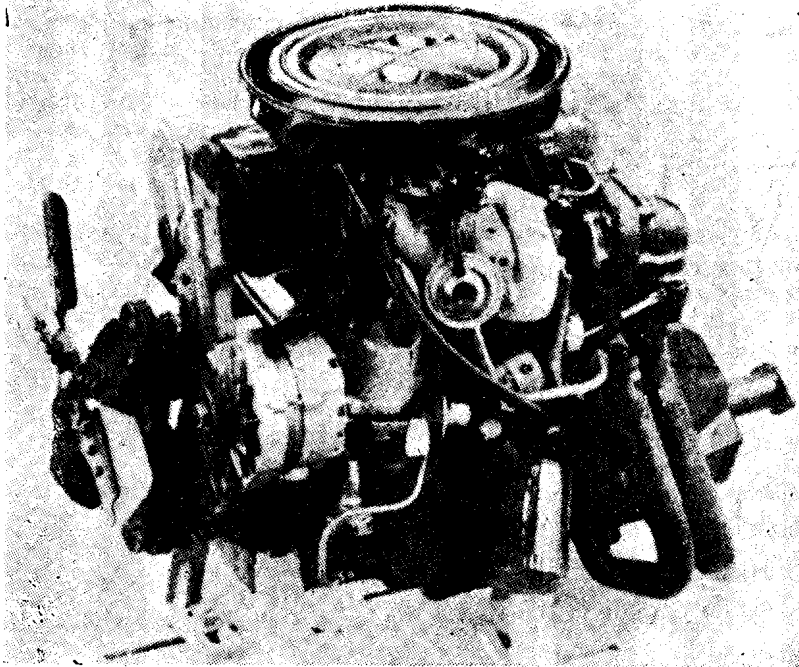


图1-1.1 这是一个汽车发动机，里面有几百种不同的材料，（对那些图上看得见的材料，要求读者能够识别）。设计师根据每种材料的可加工性，物理化学性能、使用行为、成本以及材料来源来进行选择。由于对材料重量的限制日趋重要，由于必须重新设计发动机以更有效地实现能量转换，以及由于原材料供应的日趋短缺，在未来的十年中，材料改进势在必行（The Ford Motor Company.）

在进行材料选择时，设计师必须首先考虑强度、导电性和/或导热性，密度及其它性能。然后，再考虑材料的加工性能和使用行为（其中材料的可成形性、机械加工性、电稳定性、化学持久性及辐照行为是重要的）以及成本和材料来源。例如生产变速齿轮用的钢必须是易机械加工的，但又要有足够的韧性以经受猛烈的冲击。生产挡板用的金属必须是易成形的，但又有抗冲击形变的能力。电线必须能经受过高或过低的温度，而半导体必须在长时期内保持稳定的安培/伏特特性。

许多设计的改进取决于新材料的发展。比如，仅在几年前，晶体管还不能用当时已有的材料制成；激光技术的发展需要各种新的晶体和玻璃；燃气轮机的设计虽然已大有改进，但仍需要一种既便宜又能承受日益增高的温度的材料来作为涡轮机的叶片。

内部结构与性能 要工程师或科学家们对成千上万种已有材料都具有详细的知识，并始终能与新材料的发展保持并驾齐驱的状态显然是不可能的，他们必须牢牢地把握住支配各种材料性能的基本原则。这个原则就是材料的性能来源于该材料的内部结构，这是对工程师和科学家们最具有重要价值的一个原则。这与下述说法相似：电视机或其它电子产品（图 1-1.2）



图1-1.2 电子计算器。计算器的性能取决于内部线路中各元件的排列。同样，材料的行为也取决于它内部各组元的结构排列。我们将会看到这些排列包括原子周围的电子结构，原子的配位，晶体结构及相邻晶体的显微组织。工程师和科学家能够根据需要来选择和改变这些内部结构，正象线路设计师修改电子元件一样。要正确地做到这些我们必须了解材料的结构与其性能之间的关系

(The Arnold Engineering Company.)

的运行取决于元件，器件和产品内部的线路。任何人都能转动旋钮，但电子技术人员就要了解它的内部线路，以便能有效地进行修理，而电气工程师和物理学家就必须了解线路中每个元件的特性，以便设计或改进这些产品的性能。

材料的内部结构包括原子、原子在晶体中、分子中与邻近原子的结合方式以及显微结构。今后，我们将更加注意这些结构，因为技术人员在生产和使用材料时必须了解这些结构，正象机械工程师们为满足今后十年内的要求而对汽车进行重新设计或改进时必须了解内燃机的运行一样。

加工工艺与性能 材料必须进行加工，以满足工程师对所设计产品的要求。最常见的加工方法是单纯改变材料的几何形状，例如机械加工或锻造。当然材料的性能对加工过程是十分重要的。特别硬的材料会打坏切削工具的刀刃，而象铅那样的软材料又会“粘住”锯条，砂轮及其它工具。同样，高强度材料尤其是脆性材料是不适于塑性形变的。例如，制造汽车挡板的金属板如果不用最软的钢那必定是极大的浪费。

通常，在机械加工或塑性形变时，不只是包含材料形状的改变，而且也伴随着材料性能的改变。例如，一根金属丝当它通过模具拉拔时，它的直径减小了，同时本身也强化和变硬了。在一般作为导体用的铜丝中是不希望这种硬化的，而在制造有缓冲层的子午线轮胎中的钢丝时，工程师们恰恰是利用这个过程来实现材料的强化。但是，不管愿望如何，只要制造过程中改变了材料的内部结构，那么它的性能也必定随之而改变。材料在形变时，它的内

部结构发生了变化；因而其性能也跟着发生变化。

热加工工艺也同样影响材料的内部结构，它们包括退火，高温淬火及其它热处理。我们的目的是要了解结构变化的本质，以便像工程师一样制订适当的工艺流程。

使用行为 在成品中的材料具有一整套满足设计需要的性能——强度、硬度、导电性、密度、色彩等等。倘若在使用过程中，材料的内部结构没有变化，那么它将永远保持这些性能。但是，如果产品遇到使材料内部结构发生变化的使用情况，那么，我们可以肯定地说材料的性能与行为也会发生相应的变化。这就解释了为什么当橡胶暴露在阳光和空气中时会逐渐地硬化；为什么铝不能用在超音速飞机中；为什么金属在周期性载荷的作用下会产生疲劳；为什么普通钢的钻头不能象高速钢钻头那样飞快地切削；为什么磁体在射频场中会失去它的磁性；又为什么半导体在核辐射下会损坏。这类例子是数不清的。工程师的结论是：不仅要考虑初始要求，而且要考虑那些将使材料内部结构发生变化，因而也导致材料性能发生变化的使用条件。

本教程的模式 本书设计的“结构”是：第一章讨论一些性能术语和性能的测量，第二章复习化学和物理引论中的一些基础科学知识，它们是直接说明结构-性能关系的，从第三章开始我们将依次讨论各种不同的结构特征，（从原子到复合材料）它们是决定材料性能的。我们将随时提到工艺过程和使用条件的作用，因为这是设计时必须经常考虑的因素。

例题和习题的目的是①说明结构和/或性能的原理；②扩大解题能力，这对于工程师和应用科学家是十分重要的[⊖]。

1-2 力学行为

材料受力后就会产生变形。应变 e 是单位长度的变形，而应力 s 是单位面积上的作用力。材料在形变时吸收了能量，因为力沿着形变方向作了功。强度是使材料破坏的应力大小的度量。延性是材料在破坏前永久应变的数值，而韧性却是材料在破坏时所吸收的能量数值。（表 1-2.1）。

设计师们对这些力学性能制订了各种各样的规范，通常，例如对一种钢管，人们要求它有较强的强度，但也希望它有较高的延性，以增加韧性，由于在强度和延性二者之间往往是矛盾的，工程师们要做出最佳设计常常需要在二者中权衡比较。同时，还有各种各样的方法确定材料的强度和延性。当钢棒弯曲时就算破坏，还是必须发生断裂才算破坏？答案当然取决于工程设计的需要；但是这种差别表明至少应有两种强度判据——一种是开始屈服，另一种是材料所能承受的最大载荷。要做到这一点，我们应当研究材料的应力-应变 ($s-e$) 曲线（图 1-2.1），并依次讨论材料的形变、强度、硬度和韧性。

形变 材料的初始应变基本上是与应力成正比的，而且是可恢复的。应力消除以后，应变也跟着消失。我们称这种线性的，可恢复的应变为弹性应变。弹性模量（杨氏模量）就是应力 s 与这种可恢复的应变 e 之间的比值：

$$E = s/e \quad (1-2.1)$$

⊖ 本书将全部采用国际单位制，但也附带地包括某些英制单位和非国际公制单位。这些地方要求工程师们会使用两种单位制。这样做不仅使工程师们能用国际单位制方便地解决各种问题，而且他们还将发现在今后的一定时期内要与某些还不能熟练地掌握国际单位制的人打交道，而这些人技术在技术上却积累了大量的宝贵经验。

表1-2.1 材料的力学性能

性能或参数	符号	定义 (或注释)	常用单位	
			SI	英制
应力	σ	单位面积上的作用力 (F/A)	Pa ^① (N/m^2)	psi ^① lb _f /in. ²
应变	ϵ	相对变形 ($\Delta L/L$)	—	—
弹性模量	E	应力/弹性应变	Pa	psi
强度		破坏应力		
屈服	S_y	对初始塑性变形的抗力	Pa	psi
抗拉	S_t	最大强度 (以原始尺寸为基础)	Pa	psi
延性		破坏时的塑性应变		
延伸率	e_f	$(L_f - L_o)/L_o$	% ^④	%
断面收缩率	R of A	$(A_o - A_f)/A_o$	%	%
韧性		断裂破坏所需要的能量	J	ft-lb
硬度 ^③		对塑性压入的抗力	经验单位制	

① $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 0.145 \times 10^8 \text{ psi}$; $1000 \text{ psi} = 6.894 \text{ MPa}$

② 1 kg质量的载荷由重力产生9.8 N的力

③ 有三种常用的决定硬度值的方法:

布氏硬度 (BHN): 用一个大的压头。硬度值取决于压痕的直径 (1 - 4 mm)。

洛氏硬度 (R): 用一个小压头。硬度值取决于压陷深度, 根据压头及施加载荷的大小可采用几种不同的标度。

维氏硬度 (DPH): 用金刚石锥体为压头。通常用它来测量微小区域内的硬度值, 此时所用的载荷是很小的。

④ % 无量纲, 根据初始值 (o), 最终值或破坏值 (f) 来度量, (通常用百分比表示)。

杨氏模量 E 的公制单位是帕斯卡 (或者更通用兆帕斯卡MPa), 如表 1-2.1 中所示, 相应的英制单位是 psi, 磅/平方英寸。常用材料的杨氏模量值列在附录 C 中, 我们在第二章中将会看到弹性模量 (杨氏模量) 是原子间键合力的度量。工程师们必须充分重视这个性能, 因为它与工程制品的刚度直接有关。

当应力再增加时, 材料内部除了弹性应变以外, 原子间还会产生永久的变形, 这种永久变形在作用力去除以后是不可恢复的, 我们称它为塑性应变。这种应变在材料的加工过程中是十分必要的 (例如, 在铝板的轧制过程中, 我们先将它轧制成较薄的铝板, 然后再将它轧制成很薄的铝箔)。可是, 在产品应用时, 我们的设计常常要避免塑性变形, 因此我们所设计的应力常在图 1-2.1(b)和(c)所示的弹性 (正比) 范围之内。

弹性应变, 当应力低于屈服强度时它是唯一的形变方式, 当应力不断增加而出现塑性应变时, 弹性应变也随着继续增加。这个弹性应变 (不是塑性应变) 当材料断裂 (或只是卸载) 后也是可恢复的。

延性 材料在断裂前的塑性应变 e_f 可以用延伸率百分数来表示。象所有的应变一样它是无量纲的 $(L_f - L_o)/L_o$ 或者 $\Delta L/L_o$ 。但从图 1-2.2 中可以看出, 由于塑性形变通常发生在局部的颈缩区内, 因而延伸率百分数还与标距有关。所以不论何时, 只要给出延伸率, 就必须标明其标距。

延性的第二种度量是断裂时的断面收缩率 $(A_o - A_f)/A_o$ 。高韧性材料在断裂前有很大的截面收缩。延伸率是塑性“伸长”的度量, 而断面收缩率却是塑性“收缩”的度量。有些工程师优先用断面收缩率作为延性的度量, 因为它不需要标距, 而且还能用它来确定断裂时的真应变 (见例 1-2.4 的注释)。人们还不能精确地建立延伸率和断面收缩率之间的关系, 因

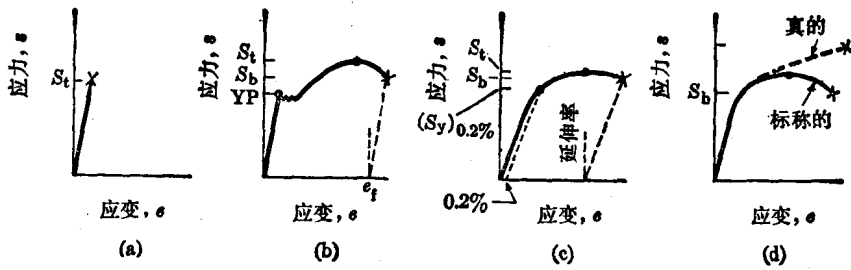
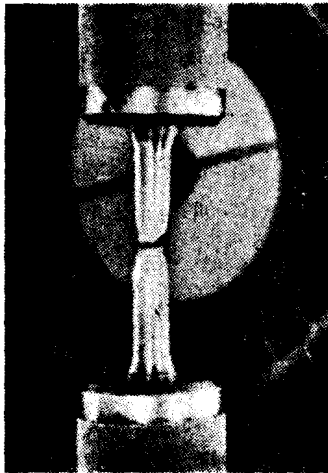
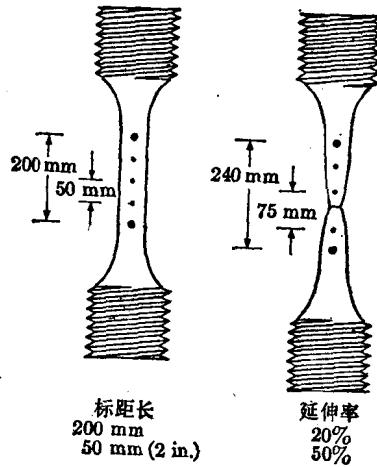


图1-2.1 应力-应变图

(a) 无塑性变形的脆性材料 (例如铸铁) (b) 有明显屈服点的延性材料 (例如低碳钢) (c) 没有明显屈服点的延性材料 (例如铝)
 (d) 真应力-应变曲线与标称应力-应变曲线的比较图 S_b = 断裂强度; S_t = 抗拉强度; S_y = 屈服强度; e_f = 延伸率 (断裂前的应变); X = 断裂; YP = 屈服点



(a)



(b)

图1-2.2 拉伸试验

(a) 圆试件试验结束 (b) 延伸率与标距的关系。既然最终的变形高度集中, 故不标明标距的延伸率是无意义的, 在常规试验中, 一般使用50mm (2in.) 的标距, (以英寸为单位, 对于50%和20%的延伸率, 标距分别为2.0in. \rightarrow 3.0in. 和7.9in. \rightarrow 9.5in.)

为塑性应变可能是高度集中的。当然, 延性材料的这两个值都很高, 而脆性材料的这两个值都几乎接近零。

强度(和硬度) 材料抵抗塑性形变的能力称为屈服强度, S_y , 它是用开始屈服的外力除以横截面积而得到的。象软钢一类的材料, 其屈服强度由确定的屈服点决定 (图 1-2.1b), 在比例极限不明显的其它材料中, 屈服强度通常定义为引起0.2%的塑性变形 (或者由设计师专门规定另一个值) 所需要的应力 (图 1-2.1 c)。

材料的抗拉强度 S_t 是最大的外力除以原始横截面积的值。这个强度与别的强度一样, 它的单位与应力相同。要特别注意抗拉强度是以原始截面为基准的。这一点很重要, 因为延性

材料当载荷超过最大值时，它的横截面积还会有所减小。

在表 1-2.1 中，强度被描述为造成破坏的应力。然而很明显，破坏是有不同定义的。例如，在无线电发射塔中的角钢，使用时一旦发生弯曲便认为是破坏了，因为这可能引起塔的倒塌。既然弯曲意味着塑性变形，故工程师们在设计无线电塔的构件时要保证应力低于角钢的屈服强度 S_y 。然而，在制作无线电塔的缆绳时，要通过模具拉拔金属丝，此时塑性变形又是必不可少的。这个塑性变形不会造成钢绳的破坏，尽管它的应力超过了屈服强度。在这种情况下，设计计算中使用的正是钢丝在使用时所能承受的最大载荷（只要不断裂）。用抗拉强度 S_t 去除最大的载荷，工程师们就能得到钢绳免遭破坏所必须的横截面尺寸。它们在任何可能的塑性变形发生以前的原始设计尺寸。

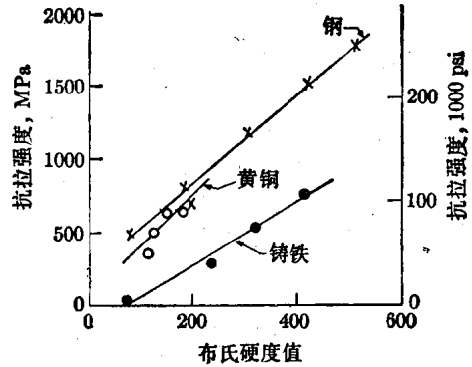


图1-2.3 抗拉强度与布氏硬度值的关系，以钢、黄铜和铸铁为例

如有需要，工程师们还可以计算真应力 σ ，它是外力除以实际面积的值。当然，对于已经塑性变形的试件来说，这个值是沿其长度方向变化的，并在颈缩区达到最大（图 1-2.2）。这说明断裂的真应力 σ_f 总是大于以原始截面为基准的断裂强度 S_t （参阅图 1-2.1c 和 1-2.1d）。真应力使我们能够分析材料在形变和破坏时的真实作用力；然而以原始截面为基准的标称应力对工程师却更加有用，因为他们必须以原始尺寸作为设计的基准。

硬度被定义为材料对压入其表面的抗力，如预期的那样，材料的硬度与强度有着密切的关系，如图 1-2.3 中所示。布氏硬度值（BHN）是用大的球形压头所形成的压痕面积来计算的硬度值。打压痕是用很硬的钢或碳化钨制成的球体在标准化的负荷下进行的。此外还有几种工程师们常用的硬度指标，其中之一是洛氏硬度（R）它与 BHN 有关，但用一个小的标准压头通过压痕深度来测定。对于不同硬度范围的材料可选用不同的洛氏硬度规范（相应地选择不同形状的压头和负荷）。

韧性 这是材料断裂时所需能量的度量（图 1-2.4）。它与强度显著不同，强度是使材料变形或断裂所需应力的度量，能量是力和距离的乘积，用焦耳或者英尺·磅来表示；它与应力-应变曲线下的面积有密切的关系。在强度相等的情况下，延性材料断裂时所需要的能量比脆性材料多，因此它的韧性也比脆性材料高。标准的夏氏冲击试验及埃左冲击试验是几种韧性测量方法中最常用的两种，两者的区别在于试样的形状和施加能量的方式不同。因为韧性还与应力集中情况有关，所以人们必须仔细地识别所用的试验方法。

学习辅导材料（应力-应变曲线）读者如果对应力-应变曲线或有关的术语有疑问，可以参阅“材料基础教程学习辅导材料”[⊖]一书。书中用载荷、应力、应变等术语详细地描述了材料的应力-应变曲线，此外还介绍了真应力和真应变作为选读。后者与详细讨论应变硬化计算的后续课程有着密切的关系。

例1-2.1 在以下两种情况下，哪一种的应力较大？

(a) 截面为 $24.6\text{mm} \times 30.7\text{mm}$ ($0.97\text{in.} \times 1.21\text{in.}$) 的铝棒承受载荷 7640kg ，即 7500N

[⊖] “材料基础教程学习辅导材料”一书是麻省理工学院教材，艾迪生-韦斯利出版公司1977年出版。