

# Materials Selection in Mechanical Design

全彩  
印刷

## 产品设计中的材料选择

Fourth Edition

原书第 4 版

[英] 迈克尔 F. 阿什比 (Michael F. Ashby) 著  
庄新村 向华 赵震 译

- 16 种图谱
- 18 种性能参数
- 7 种方法
- 48 个案例
- 15 种标准问题的可行解
- 90 个例题



附赠光盘

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 产品设计中的材料选择

(原书第4版)

[英] 迈克尔 F. 阿什比 (Michael F. Ashby) 著

庄新村 向华 赵震 译

机械工业出版社

本书提供了材料及其工艺选择的系统方法。

全书基于独特的数据结构，详细阐释了金属材料、陶瓷和玻璃材料、复合材料、聚合物材料等多类材料构成的材料性能图表，并结合公式对材料性能进行解读，确定不同加工工艺、不同材料的选用。

全书共分 17 章，包含设计过程、工程材料及其性能、材料性能图、材料选择的基本原则与案例等基础内容，多约束与冲突目标及案例、材料与形状的组合选择及案例、杂化材料设计及案例、工艺与工艺选择等专业内容，并从材料与环境、材料与工业设计，以及革新的动力三个方面做了阐述与展望。在光盘中提供了 5 个附录，介绍了多种材料的相关数据。

读者可以从本书的案例开始，依据自身经验的积累，逐级提升问题的复杂程度，直至针对新的设计问题进行建模，形成新的材料指标和新的材料选用。

本书可以帮助机械设计、工业设计等设计领域的读者掌握设计过程中材料的选择原则、方法，材料的性能、材料的设计思路，使其能够在设计过程中快速找到需要的相关数据，从而确定最佳的材料选择方案。

*Materials Selection in Mechanical Design, Fourth Edition.*

Michael F. Ashby

ISBN: 978-1-85617-663-7

Copyright © 2011 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2017 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and China Machine Press.

All rights reserved.

Published in China by China Machine Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macao and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予机械工业出版社在中国大陆地区（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2016-7266 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

产品设计中的材料选择：原书第 4 版/(英) 迈克尔 F. 阿什比 (Michael F. Ashby) 著；庄新村，向华，赵震译. —北京：机械工业出版社，2017.9

书名原文：Materials Selection in Mechanical Design, Fourth Edition

ISBN 978-7-111-57679-2

I. ①产… II. ①迈… ②庄… ③向… ④赵… III. ①机械制造材料-选择 IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 191530 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：孔 劲 责任编辑：孔 劲 责任校对：张晓蓉

封面设计：张 静 责任印制：李 飞

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

2018 年 01 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·24 印张·613 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-57679-2

ISBN 978-7-89386-148-2 (光盘)

定价：189.00 元 (含 1CD)

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

# 序 言

就材料本身而言，它对于我们的生活影响甚少。然而，我们使用材料的方式却深深影响着我们的生活。

——爱比克泰德（公元 50—100 年），*Discourses*，第 2 卷第 5 章

远在爱比克泰德的时代，材料就已经对人们的生活产生了重要影响，今天则更是如此。在那个时代，可供选择的材料数量还非常有限，而今这个数量已经相当庞大。因此，由材料促发的创新机会非常多。但是，只有当我们具备一种方法，使我们能理性地从这样一份庞大的材料清单中选出合适的材料，并且了解如何成形、连接和精加工这些材料的时候，这种创新的推进才能成为可能。本书提供了一种材料及其工艺选择的系统方法，以获取最为满足设计要求的材料子集。该方法采用一种独特的信息结构，在便于数据快速访问的同时赋予用户极大的自由度以挖掘潜在的选择。目前，这种方法已被开发成相应的软件。

本书所述的方法强调面向材料的设计而非材料科学本身，尽管这些基础科学无时无刻地被用于构建相应的选择标准。阅读本书前 6 章无需很多的预备知识，对材料及力学有初步的了解即可。书中涉及形状及多目标选择的章节对专业知识的要求相对要高一些，在首次阅读时可略过。本书尽可能地将材料选择与设计的其他方面加以结合，材料选择与设计优化阶段，以及材料力学的关系自始至终贯穿于全书每一个章节。就教学而言，本书可用于面向材料设计工程领域三年级和四年级学生的课程。第 1 章~第 6 章，以及第 13 章和第 14 章可构成 6~10 个教学课时；如果设计成 20 个教学课时（含使用软件完成课程设计），则全书所有章节都将有所涉及。

本书可以成为一本具有长久价值的参考书。书中的方法、图表以及性能指标在材料及工艺选择的实际问题中均有所应用。书中的表格数据以及附录 A 和 B 中所提供的信息及解决方案，对于建模非常有帮助，是优化设计的必要组成部分。读者可以从本书的案例开始，依据自身经验的积累，逐级提升问题的复杂程度，直至针对新的设计问题进行建模，形成新的材料指标、罚函数和新的甚至新奇的材料选择。读者还可以通过每一章节末尾处的扩展阅读以及附录 E 给出的涉及全书所有内容的系列练习来获得进一步提升。此外，附录 A、B、C 和 D 收集了一些有用的参考资料。附录 A~E 的内容均放至随书光盘中。

与很多书籍一样，本书内容也涉及版权保护问题。通常而言，复制和分发受版权保护资料中的内容都属于侵权行为。但是，作为本书核心内容的图表，对于读者而言其最好的使用方式，是可以在这些清晰的图表上画线、尝试各种选择准则以及加以注释，等等。对于选择结论的呈现，图表标注也是最为直接有效的方式。因此，尽管本书本身受版权保护，但在注明出处的前提下，教师或读者可以无条件地复制书中的图表用以教学目的。

在本书的撰写过程中，很多同事都热情地参与讨论、评论，同时给予了很多有益的建议。在此，我要特别感谢法国格勒诺布尔大学的 Yves Brechet 教授，加州大学圣塔芭芭拉分校的 Anthony Evans 教授，哈佛大学的 John Hutchinson 教授，剑桥大学工程系的 David Cebon 教授、Norman Fleck 教授、Ken Wallace 教授、John Clarkson 教授和 Hugh Shercliff 博士，美国大学开罗分校的 Amal Esawi 教授，德雷赛尔大学的 Ulrike Wegst 教授，布里斯托大学航空工程系的 Paul Weaver 博士，以及英国剑桥卡尔迪什实验室的 Michael Brown 教授。

# 目录

## 序 言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....       | 1  |
| 1.1 引言 .....                | 1  |
| 1.2 设计过程中的材料问题 .....        | 2  |
| 1.3 工程材料的发展 .....           | 3  |
| 1.4 产品中材料的演变 .....          | 6  |
| 1.5 本章小结 .....              | 8  |
| 1.6 扩展阅读 .....              | 8  |
| <b>第 2 章 设计过程</b> .....     | 11 |
| 2.1 引言 .....                | 11 |
| 2.2 设计过程 .....              | 11 |
| 2.3 设计类型 .....              | 14 |
| 2.4 设计工具和材料数据 .....         | 15 |
| 2.5 功能、材料、形状和工艺 .....       | 16 |
| 2.6 案例分析：开瓶器 .....          | 17 |
| 2.7 本章小结 .....              | 19 |
| 2.8 扩展阅读 .....              | 20 |
| <b>第 3 章 工程材料及其性能</b> ..... | 23 |
| 3.1 引言 .....                | 24 |
| 3.2 工程材料的类别 .....           | 24 |
| 3.3 设计所需的材料信息 .....         | 26 |
| 3.4 材料性能及其单位 .....          | 28 |
| 3.4.1 基本性能 .....            | 28 |
| 3.4.2 力学性能 .....            | 28 |
| 3.4.3 热性能 .....             | 35 |
| 3.4.4 电性能 .....             | 38 |
| 3.4.5 光性能 .....             | 41 |
| 3.4.6 生态性能 .....            | 41 |
| 3.5 本章小结 .....              | 41 |
| 3.6 扩展阅读 .....              | 41 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| <b>第 4 章 材料性能图</b>     | 44 |
| 4.1 引言                 | 44 |
| 4.2 探究材料性能             | 44 |
| 4.3 材料性能图              | 47 |
| 4.3.1 弹性模量—密度图         | 47 |
| 4.3.2 强度—密度图           | 50 |
| 4.3.3 弹性模量—强度图         | 51 |
| 4.3.4 比刚度—比强度图         | 53 |
| 4.3.5 断裂韧度—弹性模量图       | 54 |
| 4.3.6 断裂韧度—强度图         | 55 |
| 4.3.7 损耗系数—弹性模量图       | 57 |
| 4.3.8 导热系数—电阻率图        | 58 |
| 4.3.9 导热系数—热扩散系数图      | 60 |
| 4.3.10 热膨胀系数—导热系数图     | 61 |
| 4.3.11 热膨胀系数—弹性模量图     | 63 |
| 4.3.12 最高工作温度图         | 64 |
| 4.3.13 摩擦和磨损           | 65 |
| 4.3.14 成本柱状图           | 67 |
| 4.3.15 弹性模量—相对成本图      | 69 |
| 4.3.16 强度—相对成本图        | 70 |
| 4.4 本章小结               | 70 |
| 4.5 扩展阅读               | 71 |
| <b>第 5 章 材料选择的基本原则</b> | 73 |
| 5.1 引言                 | 73 |
| 5.2 选择方法               | 74 |
| 5.2.1 材料属性             | 74 |
| 5.2.2 选择策略             | 74 |
| 5.2.3 解读               | 77 |
| 5.2.4 筛查：属性限制          | 78 |
| 5.2.5 排序：材料指标          | 78 |
| 5.2.6 文档查阅             | 79 |
| 5.2.7 现实条件             | 80 |
| 5.3 材料指标               | 80 |
| 5.4 选择过程               | 86 |
| 5.4.1 解读需求，提取材料指标      | 86 |
| 5.4.2 筛查：应用属性限制        | 86 |
| 5.4.3 排序：图表中的材料指标      | 87 |
| 5.4.4 文档查阅             | 89 |
| 5.5 计算机辅助选择            | 89 |

|            |                      |            |
|------------|----------------------|------------|
| 5.6        | 结构指标                 | 90         |
| 5.7        | 本章小结                 | 91         |
| 5.8        | 扩展阅读                 | 92         |
| <b>第6章</b> | <b>案例分析：材料选择</b>     | <b>93</b>  |
| 6.1        | 引言                   | 93         |
| 6.2        | 船桨材料                 | 94         |
| 6.3        | 大型望远镜的反光镜            | 96         |
| 6.4        | 桌腿材料                 | 99         |
| 6.5        | 建筑用结构材料              | 102        |
| 6.6        | 飞轮材料                 | 105        |
| 6.7        | 弹簧材料                 | 108        |
| 6.8        | 弹性铰链和联轴器             | 112        |
| 6.9        | 弹性填料材料               | 114        |
| 6.10       | 脆性聚合物的极限变形量设计        | 116        |
| 6.11       | 安全压力容器               | 118        |
| 6.12       | 用于振动台的高刚性、高阻尼材料      | 121        |
| 6.13       | 短时恒温容器的隔热层           | 124        |
| 6.14       | 节能炉壁                 | 127        |
| 6.15       | 被动式太阳能供暖装置用材料        | 129        |
| 6.16       | 用于精密仪器的低热变形材料        | 132        |
| 6.17       | 换热器材料                | 134        |
| 6.18       | 芯片散热器                | 138        |
| 6.19       | 雷达天线罩材料              | 140        |
| 6.20       | 本章小结                 | 143        |
| 6.21       | 扩展阅读                 | 143        |
| <b>第7章</b> | <b>多约束与冲突目标</b>      | <b>145</b> |
| 7.1        | 引言                   | 145        |
| 7.2        | 多约束情况下的选择            | 146        |
| 7.3        | 冲突目标                 | 149        |
| 7.4        | 本章小结                 | 155        |
| 7.5        | 附录：权重因子和模糊方法         | 156        |
| 7.6        | 扩展阅读                 | 158        |
| <b>第8章</b> | <b>案例分析：多约束与冲突目标</b> | <b>161</b> |
| 8.1        | 引言                   | 161        |
| 8.2        | 多约束：轻质压力容器           | 162        |
| 8.3        | 多约束：高性能发动机连杆         | 164        |
| 8.4        | 多约束：高强磁场线圈           | 167        |
| 8.5        | 冲突目标：桌腿              | 171        |
| 8.6        | 冲突目标：必备电子产品的超薄外壳     | 173        |

|             |                         |            |
|-------------|-------------------------|------------|
| 8.7         | 冲突目标：制动钳材料 .....        | 176        |
| 8.8         | 本章小结 .....              | 178        |
| <b>第9章</b>  | <b>材料与形状的组合选择 .....</b> | <b>179</b> |
| 9.1         | 引言 .....                | 179        |
| 9.2         | 形状因数 .....              | 181        |
| 9.3         | 形状效率的限制条件 .....         | 189        |
| 9.4         | 材料—形状的最佳组合 .....        | 192        |
| 9.5         | 考虑形状因数的材料指标 .....       | 195        |
| 9.6         | 基于指标的图表选择法 .....        | 198        |
| 9.7         | 结构材料：微观形状 .....         | 200        |
| 9.8         | 本章小结 .....              | 203        |
| 9.9         | 扩展阅读 .....              | 204        |
| <b>第10章</b> | <b>案例分析：材料与形状 .....</b> | <b>205</b> |
| 10.1        | 引言 .....                | 205        |
| 10.2        | 人力飞机翼梁 .....            | 206        |
| 10.3        | 竞赛用自行车前叉 .....          | 209        |
| 10.4        | 楼板搁栅：木材、竹子还是钢？ .....    | 212        |
| 10.5        | 再论桌腿：细和轻哪个更重要？ .....    | 214        |
| 10.6        | 钢板刚度的增加 .....           | 215        |
| 10.7        | 弯曲形状：片式和股式 .....        | 217        |
| 10.8        | 超高效弹簧 .....             | 218        |
| 10.9        | 本章小结 .....              | 221        |
| <b>第11章</b> | <b>杂化材料设计 .....</b>     | <b>223</b> |
| 11.1        | 引言 .....                | 223        |
| 11.2        | 材料性能空间中的空缺 .....        | 225        |
| 11.3        | 设计方法：A+B+构型+尺寸 .....    | 227        |
| 11.4        | 复合材料 .....              | 228        |
| 11.5        | 夹层结构 .....              | 236        |
| 11.5.1      | 借助试验确定结构材料的等效性能 .....   | 237        |
| 11.5.2      | 基于分析的夹层结构的等效性能 .....    | 238        |
| 11.6        | 多孔结构：泡沫和晶格 .....        | 244        |
| 11.6.1      | 泡沫：弯曲主导型结构 .....        | 245        |
| 11.6.2      | 晶格：拉伸主导型结构 .....        | 248        |
| 11.7        | 分段结构 .....              | 251        |
| 11.8        | 本章小结 .....              | 253        |
| 11.9        | 扩展阅读 .....              | 254        |
| <b>第12章</b> | <b>案例分析：混合物 .....</b>   | <b>257</b> |
| 12.1        | 引言 .....                | 257        |
| 12.2        | 金属基复合物设计 .....          | 257        |

|               |                            |            |
|---------------|----------------------------|------------|
| 12.3          | 软导体和渗流 .....               | 259        |
| 12.4          | 热传导与电传导的极端组合 .....         | 261        |
| 12.5          | 冰箱内壁 .....                 | 263        |
| 12.6          | 微波透射屏蔽罩材料 .....            | 265        |
| 12.7          | 握力不会减小的连接器 .....           | 266        |
| 12.8          | 各向异性的应用：散热面 .....          | 268        |
| 12.9          | 天然材料的机械效率 .....            | 270        |
| 12.10         | 扩展阅读 .....                 | 275        |
| <b>第 13 章</b> | <b>工艺与工艺选择 .....</b>       | <b>277</b> |
| 13.1          | 引言 .....                   | 277        |
| 13.2          | 工艺分类 .....                 | 278        |
| 13.3          | 成形、连接和精饰工艺 .....           | 281        |
| 13.3.1        | 成形工艺 .....                 | 281        |
| 13.3.2        | 连接工艺 .....                 | 289        |
| 13.3.3        | 精饰工艺 .....                 | 290        |
| 13.4          | 工艺对性能的影响 .....             | 292        |
| 13.5          | 系统的工艺选择 .....              | 295        |
| 13.5.1        | 选择策略 .....                 | 295        |
| 13.5.2        | 执行策略 .....                 | 296        |
| 13.6          | 排序：工艺成本 .....              | 306        |
| 13.7          | 计算机辅助工艺选择 .....            | 310        |
| 13.8          | 本章小结 .....                 | 311        |
| 13.9          | 扩展阅读 .....                 | 312        |
| <b>第 14 章</b> | <b>案例分析：工艺选择 .....</b>     | <b>315</b> |
| 14.1          | 引言 .....                   | 315        |
| 14.2          | 铝合金连杆铸造 .....              | 316        |
| 14.3          | 风扇成形 .....                 | 318        |
| 14.4          | 火花塞绝缘体 .....               | 326        |
| 14.5          | 歧管管套 .....                 | 328        |
| 14.6          | 钢制散热器的连接 .....             | 329        |
| 14.7          | 球轴承内、外圈的表面硬化 .....         | 331        |
| 14.8          | 本章小结 .....                 | 332        |
| <b>第 15 章</b> | <b>材料与环境 .....</b>         | <b>333</b> |
| 15.1          | 引言 .....                   | 333        |
| 15.2          | 材料生命周期 .....               | 334        |
| 15.3          | 材料与能量的消耗系统 .....           | 335        |
| 15.4          | 材料的生态性能 .....              | 337        |
| 15.4.1        | 材料生产：能量和排放 .....           | 337        |
| 15.4.2        | 材料加工能量的评估（总转化效率 15%） ..... | 338        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 15.4.3 生命周期终结 .....         | 339        |
| 15.5 生态选择 .....             | 340        |
| 15.6 案例分析：饮料瓶和防撞护栏 .....    | 344        |
| 15.6.1 饮料瓶 .....            | 344        |
| 15.6.2 防撞护栏 .....           | 345        |
| 15.7 本章小结 .....             | 347        |
| 15.8 扩展阅读 .....             | 348        |
| <b>第 16 章 材料与工业设计 .....</b> | <b>351</b> |
| 16.1 引言 .....               | 351        |
| 16.2 需求金字塔 .....            | 352        |
| 16.3 产品特性 .....             | 353        |
| 16.4 利用材料与工艺创造产品个性 .....    | 355        |
| 16.4.1 材料和感官：美学属性 .....     | 355        |
| 16.4.2 材料和心理：关联与感知 .....    | 359        |
| 16.5 本章小结 .....             | 362        |
| 16.6 扩展阅读 .....             | 362        |
| <b>第 17 章 革新的动力 .....</b>   | <b>365</b> |
| 17.1 引言 .....               | 365        |
| 17.2 市场拉动与科学推动 .....        | 366        |
| 17.2.1 来自市场的动力和竞争 .....     | 366        |
| 17.2.2 新的科学点：好奇心驱动的研究 ..... | 369        |
| 17.3 人口与财富的增长和市场饱和 .....    | 370        |
| 17.4 产品责任和服务提供 .....        | 371        |
| 17.5 小型化和多功能化 .....         | 371        |
| 17.6 关注环境与个人 .....          | 372        |
| 17.7 本章小结 .....             | 374        |
| 17.8 扩展阅读 .....             | 374        |

## 绪论

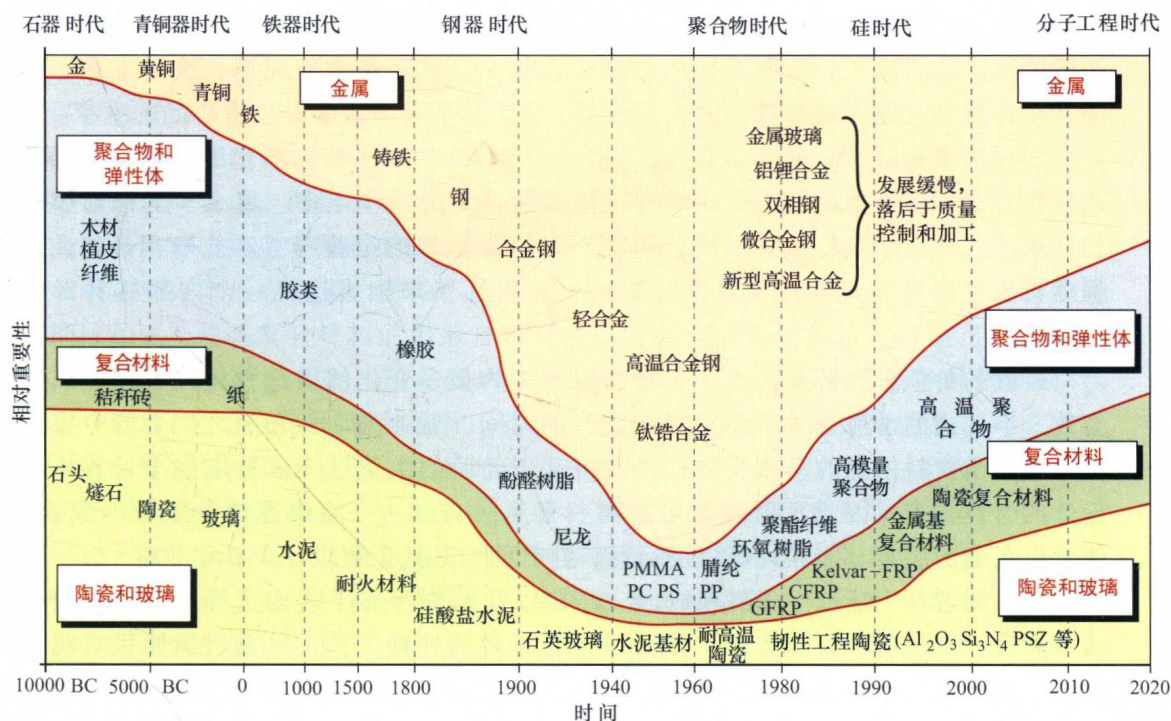


图 1.0 材料发展及其各阶段图解

随着时间的推移，工程材料在不断地进行演化。对于各种工程材料的“相对重要性”，本书的主要依据来源于“扩展阅读”中列举书籍所提供的信息。从1960年开始，又增加了英国和美国大学对各类材料分配的教学时间作为依据之一。对于2020年的预测，则依赖于汽车及飞机制造商对材料应用的评估。从时间尺度上看，整个演化过程是非线性的。现如今工程材料的发展比以往任何时候都要迅速。

## 1.1 引言

设计，对于不同的人而言，其含义不尽相同。凡是制造出来的东西，无论是充满诗意的女士帽子，还是充满油污的齿轮箱，在某种程度上都可以称为设计，且可以意味更多。有人认为大自然是上帝设计的，也有人认为它是自然形成的。对于读者而言，缩小领域范畴是非常有必要的。

本书主要涉及机械设计领域及材料在其中的作用。机械部件种类繁多，用途广泛，有的承载，有的导电、导热，有的直接暴露在磨损或腐蚀环境中。它们通常由一种或多种材料构成，具有一定的形状，且必须加以制造。本书主要描述这些行为之间的相关性。

从人类开始制衣、建造房屋到发动战争，对材料就有了一定的设计。现今更是如此，材料及其成形工艺的发展速度比历史上任何时期都要迅猛，所以相应的机遇和挑战也更大。本书寄望于提供一种方法来帮助读者面对挑战并抓住机遇。

## 1.2 设计过程中的材料问题

设计是把新想法或者市场需求转化为产品制造所需具体信息的过程。设计的每一个阶段都需要明确产品所要采用的材料以及加工工艺。通常情况下，设计主导了材料的选择，但有时候，新材料的出现又催生了新产品的研发或者是已有产品的变革。

工程师可选的材料种类非常多，至少有 160000 种。尽管标准化试图缩小可供选择的材料数量，但是新材料的不断涌现，使得选择又进一步增多。那么，工程师如何从如此众多的材料中选出最合适的材料呢？是依靠积累的经验吗？以前确实是如此，工程师将宝贵的经验传给徒弟，多年以后，又由徒弟来担当这样一个内部材料专家的角色。

经验的价值毋庸置疑，但是工程领域发生的很多变化使得这种模式不再那么行之有效。学徒式的学习方式需要花费相当长的时间。就业流动性和随之产生的专家的不稳定性以及材料信息的飞速发展，都使得基于经验的决策已无法适应如今计算机辅助设计的时代要求。因此，我们迫切需要一个系统方法——能快速消化吸收专家经验、能做出正确的决策、能在计算机上运行，并且能与其他工程设计工具相兼容。

材料的选择不能孤立于材料成形、连接以及精饰所需工艺的选择而独立进行。就成本而言，不仅包含材料本身，同时还包含材料的处理工艺，以及材料使用对我们生存环境的影响。不得不承认，仅仅是好的工程设计并不足以扩大产品的市场份额。从家用电器到汽车、航空领域，基本上所有商品，其款式、质地、手感、颜色、外观、产品的内涵，以及消费者的满意度，都十分重要。这就是我们常说的工业设计，如果忽视了工业设计，也就失去了市场竞争力。好的设计能有效发挥作用，而优秀的设计甚至能带来愉悦。

设计无极限，没有唯一或者说“正确的”解决方案，尽管有些方案会明显好于其他的方案。它们不同于机械力学、结构力学或者热力学教学中所涉及的解析问题，那类问题往往具有唯一的正确的答案。所以，设计者首先要思路开阔，考虑各种可能性。然而，一网捞众鱼，我们需借助一种手段从众多好的方案中选出最合适的方案。

本书主要针对设计过程中的材料问题，提供一套合理的方法，用于指导设计者如何面对林林总总复杂的选择。通过在“材料和工艺选择图”上引入材料及工艺属性的概念，能够显示出材料的重要信息，有助于简化潜在备选材料的搜索过程。实际的设计过程常常存在一些相互矛盾的目标，比如要求质量最轻的同时，还要成本最低，这时就要采用权衡利弊的方法。材料和形状的相互影响就是该方法的重要组成部分。综合考虑，通过两种甚至多种材料、形状以及独特的属性配置组合，可以实现原本材料

所不具备的性能。然而，如果没有材料性能及工艺属性的相关数据，上述工作也就无从谈起。因此，本书将详细介绍如何来寻找这些数据。此外，本书还将阐述美学在工程设计中的作用，以及改善材料的动力因素，其中大部分驱动力都与环境问题相关。附录提供了一些额外的有用信息。

上述方法的内涵使之易于以计算机辅助工具的形式存在，本书的大多数案例和图表正是基于 CES Edu 这样一款材料选择平台来实现的。这类工具通常与计算机辅助设计、有限元分析、优化程序以及产品数据管理等软件具有良好的接口。

上述内容会在后续章节中加以详述，并给出专题应用。接下来，我们先看一下材料的发展历程。

### 1.3 工程材料的发展

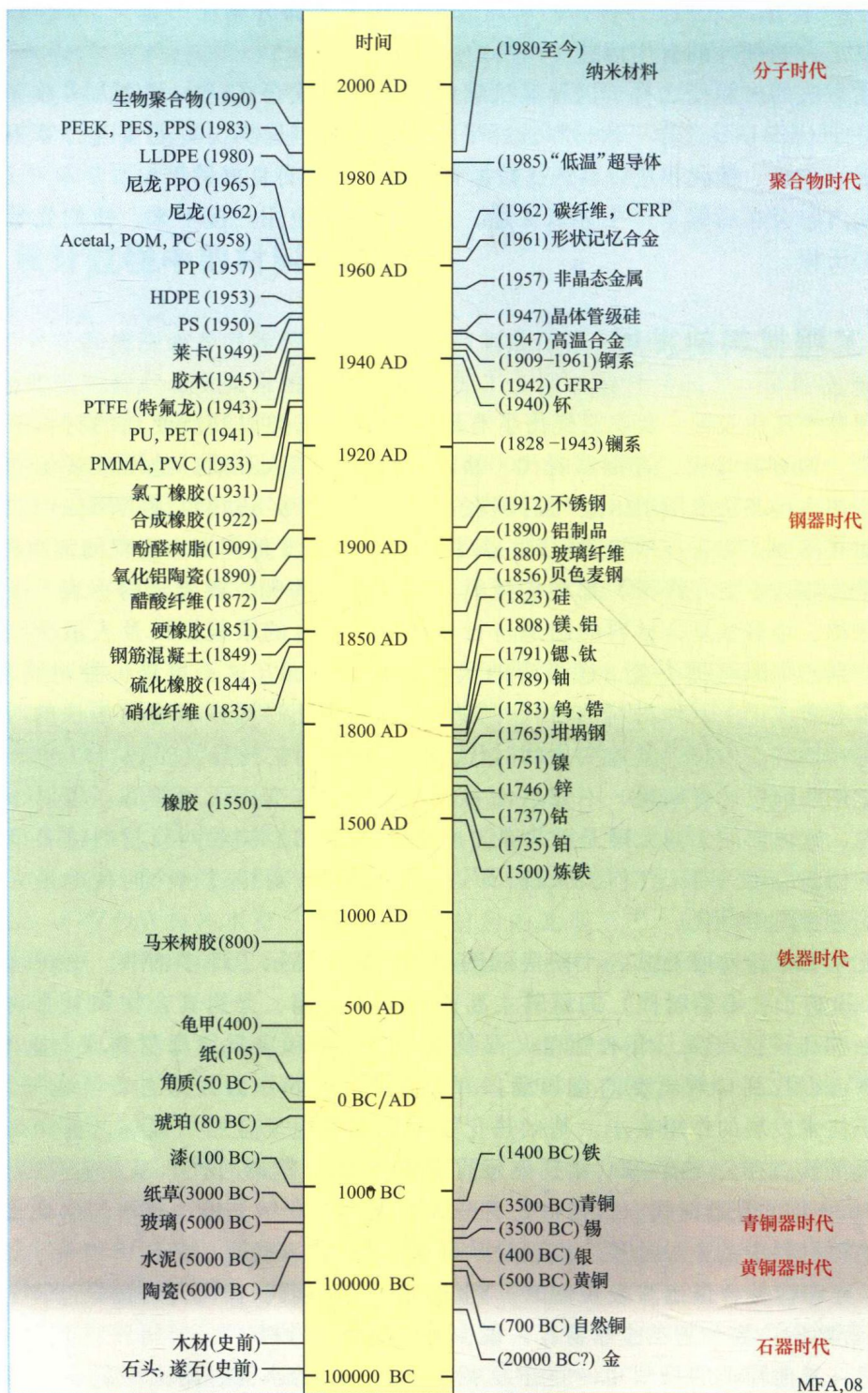
纵观整个历史长河，材料只经历了有限的设计。人类以其所使用的材料来命名相应的时代，如石器时代、青铜器时代、铁器时代。当某人死后，他所珍爱的物件将为其陪葬，如古埃及法老图坦卡蒙死后葬在彩绘的石棺中，迈锡尼国王阿伽门农用青铜剑和金面具陪葬，海盗首领与船同葬。每件珍品都代表了他们那个时代的最高科技。

如果这些人生活在今天，那他们死后会用什么陪葬呢？钛合金的手表、碳纤维强化的网球拍、金属基复合材料的山地自行车、记忆合金的眼镜框以及人造金刚石镀层的镜片、聚乙烯酮防护头盔，还是碳纳米管强化的 iPod？这不再是一种材料的时代，而是一个有着成千上万种材料的时代，是一个迄今为止材料发展速度最快的时代，更是一个材料性能发生翻天覆地变化的时代。材料种类的扩充异常迅速，以至于对于 20 年前大学毕业的设计者来说，不知道许多新材料的存在变得无可厚非。但对于一个设计师来说，这方面的无知无疑是致命的。创新设计通常意味着对新材料或者改进材料的特性的创新应用。对于任何人来说，不去求知就意味着错过这个时代的最大发展之一，即先进材料的时代。

图 1.0 为材料发展及其各个阶段的图解，图 1.1 展示了许多细节。史前时代（公元前 10000 以前，石器时代）的材料主要是陶瓷、玻璃、天然聚合物和复合材料。武器作为一种高科技产品，由木材和火石制成，而桥梁和房屋的原材料是石头和木材。少数地区可以找到自然出现的金和银。由于稀少，它们作为货币有着巨大的影响力，然而对于技术发展的作用很小。基础热化学的发展催生了金属的提炼，首先是铜和青铜，随后是铁。在公元前 4000 年到公元前 1000 年的青铜器时代，以及公元前 1000 年到公元 1620 年的铁器时代，科技得到了迅猛发展。1620 年，铸铁技术的出现，确立了金属在工程材料中的主导地位，也就是从那时候开始，钢铁（始于 1850 年）、轻合金（1940 年）和特种合金逐步发展起来。到 20 世纪 50 年代，“工程材料”即特指“金属”。工程师们主要学习冶金学课程，很少再提到其他材料。

当然，其他种类的材料也一直在发展，例如改良的水泥、耐火材料以及玻璃，橡胶、人造树胶和聚合物中的聚乙烯，但是它们在整个材料市场中的份额很小。从 1950 年起，整个材料领域发生了巨大的变化。一方面新合金的发展速度有所减缓，这与一些国家对于钢和铸铁的需求降低息息相关。另一方面，聚合物和复合材料工业迅速发展，从新型高性能陶瓷产量的预测就可以发现这种持续的扩张趋势。

在图 1.1 所示的时间轴上，材料发展的原动力就是对材料更高性能的追求，这可以从“材料性能表”中性能的不断改进体现出来。图 1.2 显示了一种“材料性能表”，



注: BC——公元前, AD——公元。

图 1.1 材料大事件年表

注: 时间刻度是非线性的, 底部时间跨度较大, 顶部时间跨度较小。标星号 (\*) 的年份表示发现了新元素, 没标星号 (\*) 的年份表示材料已进入应用阶段。

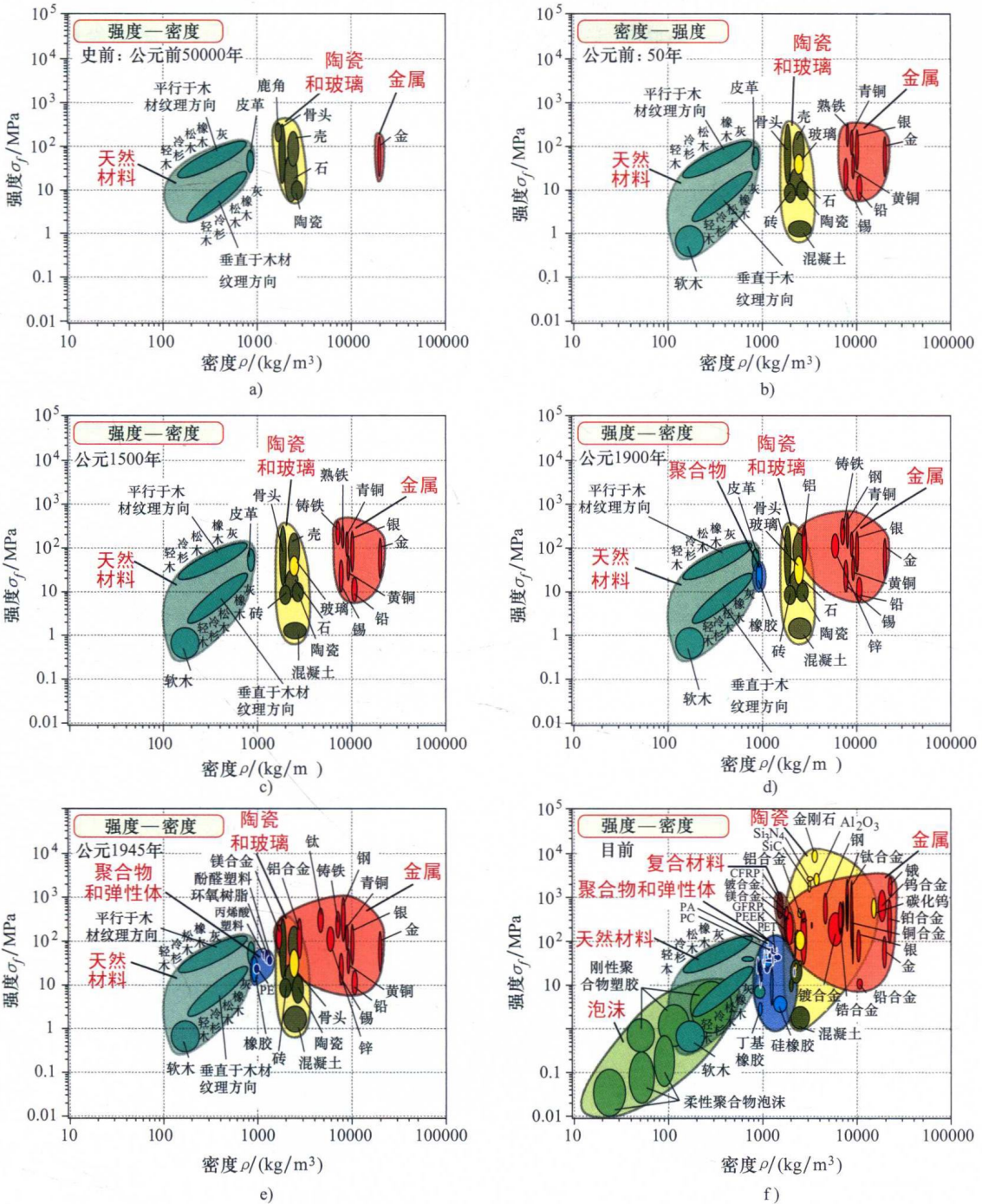


图 1.2 各类材料随着时间推移 (图左上角给出了时间) 在材料性能空间中的覆盖区域变化 (体现了材料不断满足强度和密度要求的发展历程, 以及同一时段不同材料的覆盖区域。)

注: 图中材料的简称详见表 4.1。

a) 史前: 公元前 50000 年 b) 公元前 50 年 c) 公元 1500 年 d) 公元 1900 年 e) 公元 1945 年 f) 目前

即“强度—密度表”。图中, 椭圆形泡影代表材料强度和密度的变化范围, 同一类材料被归在相对较大的彩色外壳内。整个图表基于直到目前为止的六个连续的历史时刻点绘制而成。从图 1.2a 可以看出, 史前材料仅仅占据强度—密度空间的很小一部分, 而

在图 1.2b 所示的公元前 50 年左右，即罗马帝国的鼎盛时期，金属所占的区间迅速增大，从而使罗马人在武器和防御上具有得天独厚的优势。自那以后，金属的发展速度相对开始缓慢。尽管当时铸铁已开始出现，但历时 1500 多年的发展，“强度-密度表”仍未发生显著变化（见图 1.2c）。甚至又过了 500 年（见图 1.2d），表中各区域的扩张仍旧很小，只有铝合金有了初步的发展。随后，材料发展加速进行。到 1945 年，金属所占的区间得到显著的扩大，且出现了一种新的材料种类——人工合成聚合物开始占据重要位置。直至今日，这种新的材料种类所占据区间的扩张仍是相当引人注目的。但是，这类材料现在也已遭遇一些发展的瓶颈。

材料性能空间的任何一个切片都能展示出类似的发展历程。那么，怎样才能进一步扩大填充区域呢？如果做到了，我们又能得到什么？这些问题将会在第 13 章和第 14 章进行详细解答。现在，我们来看一看材料的发展是如何被引入产品中的，以此来结束本章。

## 1.4 产品中材料的演变

本节介绍了四个关于材料应用方式改变的实例，每个实例的时间跨度大约为 100 年——比人类寿命长不了多少。但请铭记，在史前时代，材料的变化远比现在慢得多。马车已拥有 2000 年的历史，而汽车的出现才仅仅是 100 多年。

壶是最古老的家用器具，比任何其他家用器具都更为普及。有证据表明（未完全证实），4000 多年前就已经有了壶。早期的壶直接通过火焰加热，是由传热好且耐明火的材料，如铁、铜、青铜（见图 1.3）所制成。1890 年发展起来的电水壶，以外部加热装置取代火焰加热，整体和先前的水壶很相像。1922 年斯旺公司做了进一步改进，将加热元件密封在金属管内置于盛水容器内部。这样，壶身不再需要传热。实际上，为了安全起见和使用简便，壶身最好由绝热绝缘材料制成。现在，大多数壶都由塑料制成，既可以自由地选择样式和颜色，又能最大限度地降低成本。



图 1.3 茶壶（分别为铸铁、青铜、聚丙烯材料）

“打扫和除尘是对健康危害极大的工作。灰尘从地板上扬起来，混入空气中，再被人呼吸到体内。因此，现实生活中最好对灰尘置之不理。”

上面这段话是 100 年前一个医生所写。超过以往任何一代人，维多利亚时代以及其他同时代的其他国家的人都担心过灰尘问题。他们确信灰尘携带病菌，除尘只是分散灰尘罢了，正如医生所说，除尘之后灰尘更具感染性。在上述背景下，如图 1.4 所示的真空吸尘器应运而生。

最初的真空吸尘器是靠人力驱动的。按照今天的标准，当时的材料相当原始。吸