



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

# 轻量化手册 2

## HANDBUCH LEICHTBAU

# 轻量化 材料和属性

[德]弗兰克·亨宁 (Frank Henning) 主编  
[德]埃尔韦拉·穆勒 (Elvira Moeller)  
北京永利信息技术有限公司 译  
陈瑶 审



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

# 轻量化手册 ②

## HANDBUCH LEICHTBAU

# 轻量化 材料和属性

[德]弗兰克·亨宁 (Frank Henning) 主编  
[德]埃尔韦拉·穆勒 (Elvira Moeller) 译  
北京永利信息技术有限公司 陈瑶 审

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

轻量化材料和属性 / (德) 亨宁, (德) 穆勒主编; 北京永利信息技术有限公司译. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 3

(轻量化手册; 2)

ISBN 978-7-5682-0014-1

I. ①轻… II. ①亨… ②穆… ③北… III. ①汽车轻量化-研究 IV. ①U462.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 291353 号

---

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2014-0361 号

Copyright © 2011 Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

All rights reserved.

Authorized translation from the original German language edition

published by Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

82562903(教材售后服务热线)

68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17

彩 插 / 8

字 数 / 352 千字

版 次 / 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 128.00 元

责任编辑 / 梁铜华

文案编辑 / 梁铜华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前言

新产品开发中的很大一部分是基于特定应用而进行的新材料开发。在所谓的“轻量化材料”领域中,从20世纪初期的第一个研究方法开始至今,已经出现了许多创新的开发,而且其中的一部分目前仍被使用,另一些方法还需证明其具有适于轻量化方案和批量生产的潜力。从大约80000种基于金属和塑料的不同工程材料中寻找适合特定应用的某种材料是一件非常复杂的事。如果想另辟蹊径,就需要通过要求特性识别出最合适的材料,并且加以应用。出于这个原因,本书以下部分将用一个章节的内容对轻量化典型应用中材料的系统选择加以详细介绍。之后将对常用轻量化材料组进行详细介绍(图0.1)。在金属材料中,首先是钢材。虽然它属于较重的金属,但特别是经过高强度和超高强度改性之后,其相对于其他轻量化材料具有更卓越的轻量化潜力。随着近几年新型多相钢和复杂相钢的开发,这方面已经有了更进一步的发展。TRIP钢、TWIP钢或马氏体时效钢目前已经进入工业生产,并可以将钢材用于承受高机械载荷的轻量化结构。轻金属铝、镁和钛由于低密度的特性似乎已经具有减重潜力。然而,事实上,与钢材相比,其强度和刚度较低,所以只有在材料设计上继续不断地努力,才能扩展它们的应用范围。

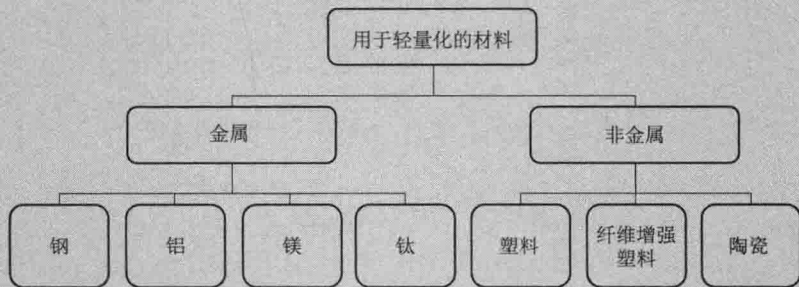


图 0.1 轻量化中所使用材料的概述

在20世纪30年代成功开发了应用于航空领域的铝和镁合金。这些基本上仍沿用至今,且在此期间逐渐渗透到了汽车领域。此外,已建立起了尤其是可用于最高工作温度的新合金体系。镁的易受腐蚀性被进一步降低,强度和密度之间的比率进一步增加。钛的相化学特性与钢类似,允许使用热机械处理调整金相组织状态。通过这种方式,可以对复杂的特性曲线进行特定的设置。相比之下,钛的处理比较严格。当铸件有气孔时需要通过高成本的热机械精加工来消除,因为只有这样才能使铸件具有良好的机械性能。出于这个原因,很早就已经对几何形状复杂的钛零件建立

了粉末冶金的工艺。虽然相比之下该工艺较为昂贵,但是接近于成品形状的加工使得制造高性能组件成为可能。由于密度低且具有较高的热机械稳定性,陶瓷材料也同样适用于轻量化应用。只要在应用中其脆性不成为障碍,就可以将单片陶瓷本身应用于结构件中。此外,陶瓷纤维复合材料还具有一定的损伤耐受性,如今已经被用于汽车和航空航天领域中的轻量化制动盘中。聚合物是具有最低密度和最高产量一类材料的代表。在机械载荷和热载荷只发挥次要作用的领域中,它也可以作为整体材料来使用,否则的话,需要通过诸如碳纤维、玻璃纤维、芳族聚酰胺纤维以及天然纤维等广泛的纤维增强方式提高机械性能,从而使热固性或热塑性基体的绝对刚性达到轻金属的级别。

因此,系统轻量化中的各种应用需要采用理想材料,而混合结构需要采用不同的组合材料,然后从不同材料的组合过渡到材料复合或复合材料。在这种情况下,往往称其为混合材料,而在此之前其并没有确切的术语定义。复合材料的组合通常会被认为是与整体材料不同类型的材料。这里所出现的问题往往涉及不同材料连接界面上的特性。

# 目 录

## 1 轻量化材料的选择

Kay Weidenmann, Alexander Wanner / 1

- 1.1 材料及其特性 / 1
- 1.2 材料选择的一般问题 / 4
  - 1.2.1 信息来源 / 4
  - 1.2.2 材料特性的描述和对比 / 4
  - 1.2.3 产品形成过程中的材料选择 / 5
- 1.3 选择策略 / 6
  - 1.3.1 要求特性和材料评估 / 6
  - 1.3.2 用于材料评估的材料指数 / 8
- 1.4 通过材料指数进行材料选择 / 8
  - 1.4.1 轻量化结构相关的材料指数 / 12
  - 1.4.2 材料选择图表 / 13
- 1.5 多重边界条件和相互竞争的目标 / 15
  - 1.5.1 多重边界条件 / 15
  - 1.5.2 相互竞争的目标 / 16
- 1.6 部件形状的影响 / 19
  - 1.6.1 基本问题 / 19
  - 1.6.2 形状和效率 / 19
  - 1.6.3 形状因数 / 20
  - 1.6.4 选择材料时形状因数的作用 / 21
- 1.7 结构空间产生的限制 / 22
  - 1.7.1 基本问题 / 22
  - 1.7.2 有限结构空间下的选择策略 / 22
  - 1.7.3 其他部件和荷载条件 / 24
- 1.8 总结 / 26
- 1.9 附加信息 / 26

## 2 钢材

Wolfgang Bleck / 28

- 2.1 钢是多用途材料 / 28
- 2.2 高强度扁钢制品 / 29
  - 2.2.1 极薄钢板(<0.5 mm) / 29
  - 2.2.2 薄钢板(0.5~3 mm)用钢 / 31
  - 2.2.3 较厚钢板用钢 / 40
  - 2.2.4 冲压模具钢 / 45
- 2.3 锻件用钢 / 48

- 2.4 高强度钢丝用钢 / 51
- 2.5 高强度钢 / 51
  - 2.5.1 超高强度调质钢 / 52
  - 2.5.2 超高强度马氏体时效钢 / 53
- 2.6 钢的回收特性 / 53
- 2.7 附加信息 / 54

### 3 铝材

**Jürgen Hirsch, Friedrich Ostermann / 55**

- 3.1 作为纯物质的铝 / 56
- 3.2 铝合金 / 58
  - 3.2.1 分类和专有名词汇总 / 58
  - 3.2.2 用于结构部件的可锻合金 / 61
  - 3.2.3 用于结构部件的铸造合金 / 70
- 3.3 铝材的处理和加工 / 72
  - 3.3.1 成型铸造——成型 / 72
  - 3.3.2 锻造铝合金材质的半成品——成型 / 73
  - 3.3.3 对铝制半成品的加工 / 76
  - 3.3.4 铝合金的分离 / 78
  - 3.3.5 表面处理 / 79
  - 3.3.6 连接 / 79
  - 3.3.7 维修可能性 / 81
- 3.4 结构设计方面 / 81
  - 3.4.1 减重原则 / 81
  - 3.4.2 弹性材料特性和轻量化程度 / 81
  - 3.4.3 冲击负荷下的特性 / 82
  - 3.4.4 抗疲劳强度原则 / 84
- 3.5 回收利用 / 84
- 3.6 铝材的应用 / 85
- 3.7 总结 / 87
- 3.8 附加信息 / 88

### 4 镁材

**Peter Kurze / 90**

- 4.1 纯金属镁 / 91
- 4.2 镁合金 / 93
  - 4.2.1 镁合金的分类和术语表 / 93
  - 4.2.2 合金元素的影响 / 94

- 4.3 镁合金的特性 / 95
  - 4.3.1 机械特性 / 95
  - 4.3.2 物理特性 / 96
  - 4.3.3 化学特性 / 99
- 4.4 腐蚀与腐蚀防护 / 100
  - 4.4.1 腐蚀 / 100
  - 4.4.2 腐蚀防护 / 101
- 4.5 镁合金的加工和处理 / 104
  - 4.5.1 成型 / 104
  - 4.5.2 变形 / 105
  - 4.5.3 镁合金的连接 / 106
- 4.6 镁合金的应用 / 109
  - 4.6.1 汽车制造 / 109
  - 4.6.2 电子设备 / 109
  - 4.6.3 机械制造 / 111
  - 4.6.4 航天 / 112
- 4.7 结论 / 113
- 4.8 详细信息 / 113
- 5 钛材
  - Heinz Sibum 和 Jürgen Kiese / 116**
  - 5.1 金属钛 / 117
  - 5.2 钛材的分类 / 118
    - 5.2.1 纯钛 / 118
    - 5.2.2 钛合金 / 119
  - 5.3 钛合金的特性 / 121
    - 5.3.1 物理和技术特性 / 121
    - 5.3.2 轻量化中采用合适材料且设计成本合理的效果 / 125
  - 5.4 钛材的加工和处理 / 126
    - 5.4.1 热处理 / 126
    - 5.4.2 连接工艺 / 129
    - 5.4.3 切削加工 / 134
    - 5.4.4 分离、冲压、钻孔及去除表面层 / 135
    - 5.4.5 成型 / 135
    - 5.4.6 表面加工 / 136
  - 5.5 安全性和回收利用 / 137



5.6 半成品生产和半成品成型 / 138

5.7 应用示例 / 139

5.8 总结和展望 / 141

5.9 详细信息 / 142

## 6 塑料

**Axel Kauffmann** / 144

6.1 基本情况 / 145

6.2 热塑性塑料 / 149

6.2.1 标准塑料 / 154

6.2.2 工程塑料 / 155

6.2.3 高性能聚合物 / 155

6.3 热固性塑料 / 156

6.3.1 树脂体系、模塑材料 / 158

6.3.2 交联聚氨酯 / 159

6.4 弹性体材料 / 160

6.4.1 交联的弹性体(橡胶材料、橡胶) / 160

6.4.2 热塑性弹性体(TPE) / 161

6.5 发泡聚合物 / 163

6.5.1 软弹性发泡材料 / 164

6.5.2 半硬型多孔塑料 / 166

6.5.3 硬发泡材料 / 167

6.6 填充剂和添加剂 / 168

6.7 详细信息 / 171

## 7 纤维增强塑料

**Frank Henning** 与 **Klaus Drechsler** 及

**Lazarula Chatzigeorgiou** 合作编写 / 173

7.1 复合材料原理 / 174

7.2 作为基质的塑料 / 176

7.3 增强纤维及其特性 / 178

7.3.1 玻璃纤维 / 178

7.3.2 碳纤维 / 180

7.3.3 芳纶纤维 / 182

7.3.4 天然纤维 / 185

7.4 织物半成品 / 186

7.4.1 纤维毡垫和棉网 / 189

7.4.2 织物 / 189

- 7.4.3 纤维网 / 190
- 7.4.4 编织网 / 191
- 7.4.5 针织物 / 194
- 7.4.6 纤维补片预成型 / 196
- 7.4.7 缝制技术 / 197
- 7.4.8 粘接技术 / 201
- 7.5 浸渍的半成品 / 201
  - 7.5.1 热固性塑料系统 / 202
  - 7.5.2 不可流动的 (连续纤维增强) 热固性预浸带 / 204
  - 7.5.3 热塑性塑料系统 / 206
- 7.6 纤维增强塑料的特性 / 211
  - 7.6.1 基质和纤维之间的黏附 / 215
  - 7.6.2 对强度和刚性的影响 / 215
- 7.7 应用领域 / 220
- 7.8 详细信息 / 227

## 8 工业陶瓷

**Walter Krenkel / 231**

- 8.1 轻量化应用的结构陶瓷 / 232
  - 8.1.1 与其他结构材料相比的特性 / 232
  - 8.1.2 用于传动技术的陶瓷滚动轴承 / 234
  - 8.1.3 氮化硅材质轻量化陶瓷壳体 / 234
- 8.2 通过纤维复合陶瓷实现的轻量化 / 235
  - 8.2.1 陶瓷复合材料 / 235
  - 8.2.2 强化纤维 / 237
  - 8.2.3 CMC 部件的生产工艺 / 238
  - 8.2.4 CMC 材料的特性 / 240
  - 8.2.5 航天工业中的高温轻量化 / 241
  - 8.2.6 陶瓷轻量化制动器 / 243
- 8.3 总结和展望 / 244
- 8.4 详细信息 / 244

## 9 混合复合材料

**Frank Henning, Kay Weidenmann, Bernd Bader / 246**

- 9.1 复合材料与材料复合 / 246
- 9.2 材料混合的基本原理 / 247
- 9.3 轻量化相关的混合方案 / 250

- 9.3.1 塑料—金属混合技术 / 250
- 9.3.2 塑料—塑料混合技术 / 254
- 9.3.3 塑料—陶瓷混合技术 / 256
- 9.3.4 塑料—木材混合技术 / 256
- 9.4 总结 / 258
- 9.5 详细信息 / 259

# 轻量化材料的选择

Kay Weidenmann, Alexander Wanner

## 1.1 材料及其特性

据各种估算,目前工程师可使用 40 000~80 000 种通过非常具体的特性范围加以区分的材料和材料状态 (Ashby 等人, 2002)。除了诸如强度、刚度、延展性或者疲劳强度、韧性等机械性能之外,特性范围还包括对结构应用不那么重要的、通常被称为化学或物理性质的特征。这些化学或物理特性包括诸如磁化能力、电阻以及热容、耐腐蚀性等磁特性和电学特性。最后提到的特性正好说明,因为机械性能会受到非机械因素的影响,因此化学特性和物理特性也会对结构应用发挥重要的作用。

从机械学的角度来看,结构设计是产品设计中的一个较重要步骤,而另一个必要的步骤就是材料的系统选择过程。其最初的目标是确定所要使用材料的要求特性,然后进行实际材料的选择,以从多种可用材料中滤出最适合的候选材料。在 20 世纪 50 年代和 60 年代,在重量优化轻量化结构中第一次考虑到了材料的系统选择 (Gerard, 1956; Shanley, 1960)。

如图 1.1 所示,工程材料可被划分为不同的材料等级 (Ashby、Jones, 2005)。除了金属、聚合物、陶瓷和玻璃之外,还包括天然材料以及按照文献 (Ashby, 2006) 的理论分类的弹性体。这种材料是具有热固性塑料和热塑性塑料 (塑性体) 特性聚合物子类的典型代表。同一种材料类型的材料具有一定的共同点: 它们往往具有相似的化学结构,因此也具有相似的化学性质。它们可以通过类似的方式进行加工,并且通常还拥有类似的应用领域。将不同类型的材料结合在一起可以得到具有特定材料等级的复合材料。泡沫体往往具有特定的材料等级 (Gibson、Ashby, 1997), 但严格来说,其只是泡沫构成基质的一种形态 (金属、聚合物或陶瓷)。

### 金属

金属具有极高的刚度,因而也具有非常高的弹性模量。通过适当的合金元素和

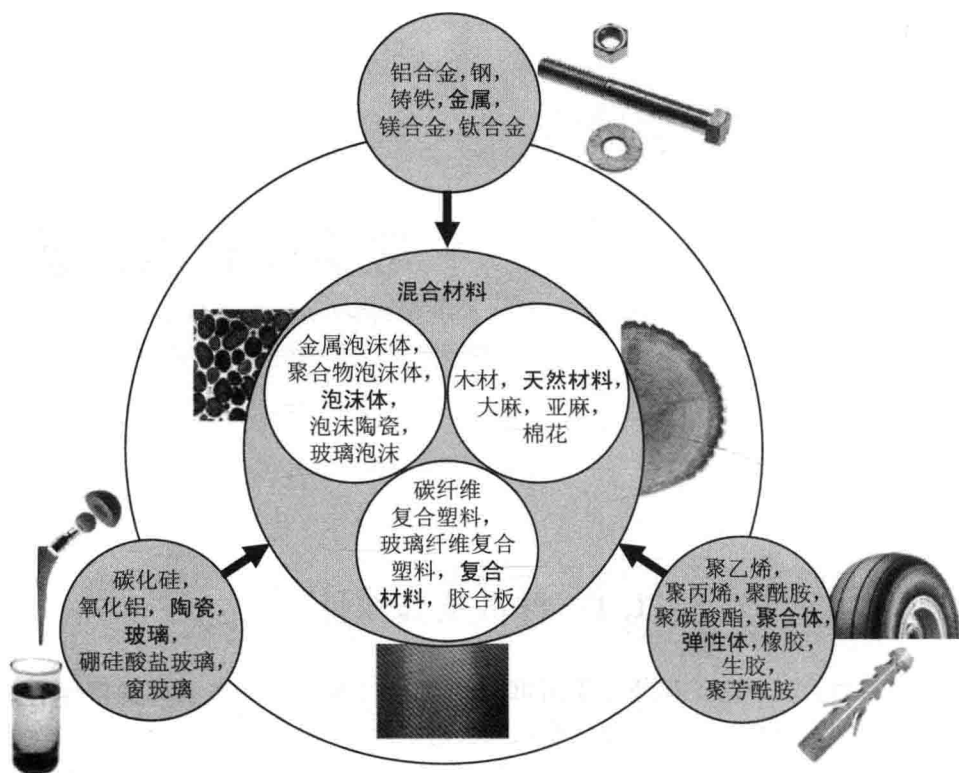


图 1.1 材料等级概览

相应的热处理，金属的机械性能可以在很宽的边界内发生改变。这主要会影响到机械性能。这也是人们为什么很少寻找特定的金属，而是更多寻找特定热处理状态下的合金的原因。通常可以通过热处理调整强度和延展性之间的平衡。特别是金属成型加工工艺，它需要材料具有足够的塑性变形能力。与此相反，在断裂伸长率较低时，也就需要材料处于高强度的状态。由于其延展性，金属会趋于疲劳。此外，它们还具有所有材料类型中最差的耐腐蚀性。这些方面在轻量化中都起着重要的作用。

### 陶瓷和玻璃

由于晶格中很强的离子键或共价键结合力，陶瓷和玻璃同样也具有较高的刚性，从而具有较高的弹性模量。陶瓷不能塑性变形，且无法防止裂纹扩展。最后所提到的这个方面导致了其拉伸强度与抗压强度之间的明显差异。因为只有非常高的压力载荷下才会产生裂缝和裂纹扩展，因此陶瓷的抗压强度比它的抗拉强度要高 15 倍左右。这种耐高压及其高硬度的特性所以陶瓷主要被作为耐磨轴承材料来使用。由于它们的机械特征值散射带都非常宽，所以陶瓷在其他结构中的应用很有限。脆性材料的失效是由固有缺陷决定的，不像金属能够通过塑性变形来稳定。因此，对于陶瓷，载荷下的体积尺寸也起着重要的作用。体积越大，它存在较大缺陷的概率就越高，并且拉伸强度也就越低。由于散射带很宽，因此陶瓷材料结构的运行可靠性

也很难设计。尽管如此，陶瓷还是具有一个轻量化应用感兴趣的特性范围。

### 聚合体和弹性体

与上述等级的材料相比，聚合体是材料范围另一端的代表。其弹性模量相对较低，在 0.1~10 GPa（热塑性塑料和热固性塑料），甚至更低（弹性体）。由于聚合体同时具有良好的强度和大约  $1 \text{ g/cm}^3$  的低密度，这些轻量化相关的具体特征值仍然非常有吸引力。相对于其他工程材料，热塑性塑料的熔融温度或热固性塑料和弹性体的分解温度也较低。这使其应用条件被限制在接近室温的环境下。另一方面，材料具有较强的蠕变趋势，从而导致在室温下就会影响到其机械特性。此外，一些聚合物材料还显示出在冰点温度左右时会过渡到脆性材料的特性。如果遵守这些边界条件或计划的应用不太重要，则聚合物材料还是有很大优势的。这种优势还包括，即使是几何形状非常复杂和功能集成的情况下，也较易于加工和成型。另外，聚合物具有非常高的耐腐蚀性，并且可以被染色。这非常有助于产品设计。



图 1.2 聚合物复合材料使得刚度优化后轻量化组件的大批量生产更具成本效益<sup>①</sup>

### 复合材料

如果要求实现某种材料等级中的一种材料无法实现的特性，则复合材料可以提供这种可能性。它可以产生组合特性，从而符合给定特性的要求。然而，应当记住的是，复合材料还具有一些不利的特性。其中包括必须通过应用可能性证实合理性的原则上较高的价格。复合材料一般是通过其基质来进行分类的，因此被划分为聚合物基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料。前者目前在轻量化中具有最高的应用潜力，因为与未增强的基体相比，通过诸如玻璃纤维或碳纤维等增强元素可以使聚合物的机械性能提高到最高水平。这一点在代表工程技术重要设计变量的刚度上体现得尤其明显。因为此类复合材料可以使用常规的聚合物加工方法，所以它们具有最佳加工性的优点。陶瓷基复合材料在建筑业中被广泛用作钢筋混凝土。另外，其还被用于高温应用场合的制动盘或加热元件。由于这些材料的制造成本相当高，金属基复合材料在轻量化中的应用还未被很好地开发。然而，特性范围表明，特别是在散热器、发动机制造和摩擦学应用中，其制造成本相对较高。

<sup>①</sup> 图片来源：德国弗劳恩霍夫化学技术研究所。

由于材料特性的范围较大，原则上来说，总是可以找到针对特定应用的解决方案，而且往往不止一个；但遗憾的是，材料的选择通常会由于缺乏基础知识而无法系统地进行，大部分情况下是根据经验来选择材料。在下面的章节中，将对选择策略以及根据这个策略如何系统地选择材料并如何同时通过外部约束解决材料选择问题加以讨论。为此，首先需要从多个侧面观察所有材料类型的材料特性并客观地加以比较，以系统地选择材料。

## 1.2 材料选择的一般问题

### 1.2.1 信息来源

目前在像 MatWeb 这样不同的开放数据库中至少已经有与材料的密度、机械性能、热性能和其他物理性能相关的数据。此外，例如在德国，还有铝和钢工业协会，近年来一直在收集详细材料数据库并提供使用。在文献 (Reuter, 2008) 中可以找到关于数据库和数据源的一个很好的概述。然而，这种被限制在单个材料组的数据库仍有缺点，即缺乏系统选择所需材料的总体性考虑。

在提出问题时，似乎很难进入具体步骤：很难获得关于硬化特性、疲劳特性或超出室温时特性的相关信息。对此通常只有分散而非结构化的信息，例如在科学期刊或材料制造商客户信息中的论文中。

下面的 1.2.2 和 1.2.3 节所示系统方法并不仅限于所提出问题的范围和材料，但是结果的质量始终是通过数据库确定的。在这个数据库的基础上可以系统地进行材料选择。

### 1.2.2 材料特性的描述和对比

描述材料特性的最简单方式就是表格。原则上，可以通过表格对几种材料进行相互比较，但在处理大量信息时，表格马上就显现出无法一目了然的缺陷。此外，表格中首先并不包含判断字符，只是简单地将特性列在一起。当然，可以设想创建特定特性的分级列表，但某特定应用通常需要的是各种有利特性的组合，而不仅仅是某一种确定的特性。在过去的近 20 年中，Ashby 已经开发出材料特性和材料特性曲线的图示对比表示形式，通过这种形式可以进行材料选择 (Ashby, 1989; Ashby, 2006)。例如：在双对数图中相对列出两个相关的特性，对于材料的选择是非常有用的。比强度就是这样的一个例子。它是材料轻量化的关键特征值，被表示为强度与密度的比值 ( $\sigma_f/\rho$ )。将它们列入后，就会得到一个包含不同信息密度的图表 (图 1.3)。通过图示法符号最初只能看到具有较低密度和强度的诸如软木的天然材料；与之相反，钨 (例如用于灯丝) 在较高密度下具有较高的强度。

此外，如果要将所有材料的特性定量地填入图表中，则可以首先将其简化后划分到不同主要材料组 (金属、聚合物等) 的特性区域中。在图 1.3 中，在图像背景

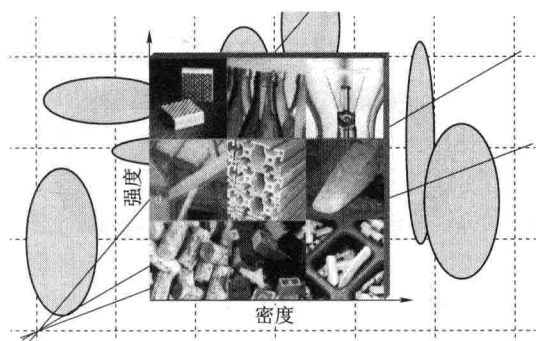


图 1.3 特性示意图：密度与强度的关系

本文后面还将对特性图表加以详细讨论。

### 1.2.3 产品形成过程中的材料选择

在产品形成过程中，选择合适的材料是非常关键的。材料和加工工艺自然有着直接关系，并且在对部件和系统进行功能设计和布局设计时会同时影响到其可能性和限制。图 1.4 以一个四面体的形式给出了材料选择与产品开发其他方面的相互关系。

现在以自行车车架为例来说明这种关系。极轻型自行车车架可使用高强度铝合金或碳纤维增强塑料（CFRP）来制造（图 1.5）。铝合金车架可以用市场上作为半成品的棱柱形管焊接而成。在技术上，高强度焊接对于铝合金来说是可行的，但不能用于碳纤维增强塑料材料。在所示的例子中，碳纤维复合材料的车架结构是由整体生产工艺来制造的。其重点是在一个芯结构上卷绕碳纤维，通过卷绕碳纤维而形成整个车架的形状。由此可以使增强组件（即碳纤维）几乎连续地卷绕在整个框架上，并且可以完全避免像焊接或粘接接缝那样的传统连接点。这两个自行车车架在很多方面都有区别，并且所有主要区别都以某种方式与材料的选择有着因果关系或与其密切相关。

由于材料的选择是与产品形成过程中的所有其他方面交织在一起的，它通常不会发生在工艺的开始时或结束时，而是伴随于所有阶段中。在方案设计阶段就进行预选是非常有帮助的，这样可以在随后的过程中对其不断加以细化。下面将以轻量化相关问题的例子就此预选过程中所采用的系统方法加以讨论。

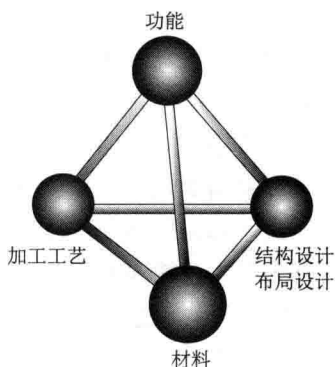


图 1.4 材料选择与产品开发其他方面的互相作用



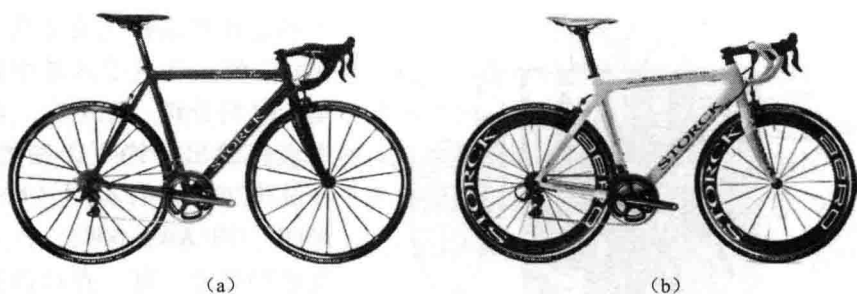


图 1.5 自行车车架实例中材料选择对外形和尺寸的影响<sup>①</sup>

(a) 铝合金棱柱形管件，通过焊接连接；(b) 碳纤维/环氧树脂纤维复合材料，采用整体生产工艺

## 1.3 选择策略

### 1.3.1 要求特性和材料评估

面临的挑战是，在一个确定的要求特性的基础上，从众多可用的材料中筛选出最有前途的候选者。相应的选择策略包括两个步骤：

- 设立评估标准，然后在其辅助下评估材料是否符合要求。
- 根据这些标准评估材料，从而能够对所选择材料的适宜性进行分类。

可以采用文献 (Farag, 1989) (Lewis, 1989) (Dieter, 1991) (Bréchet 等人, 2001) 或 (Charles 等人, 1997) 建议的不同选择策略。图 1.6 是显示了所有这些策略的简图：一个输入数据集 (要求特性) 被传输到输出的数据集中 (材料和可能制造工艺的选择)。选择策略相当于传输例程。下面将对这 3 种选择策略分别加以介绍 (Ashby 等人, 2002)。

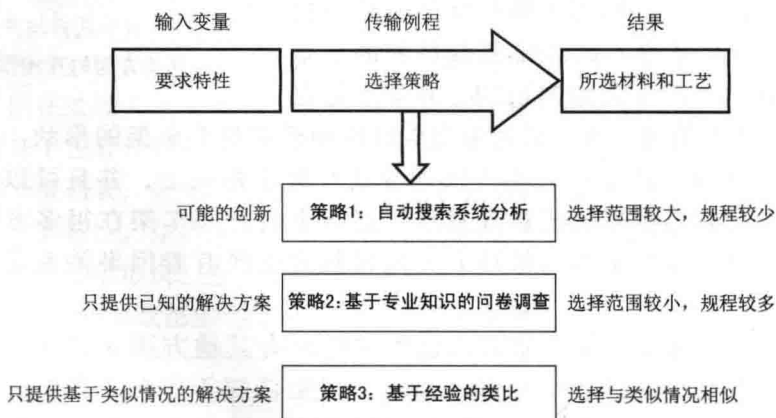


图 1.6 选择过程的流程图：选择策略作为要求特性和候选列表之间的传输例程<sup>②</sup>

① 图片来源：Storck 自行车。

② Ashby 等人, 2002。