

汽 / 车 / 先 / 进 / 技 / 术 / 译 / 丛

轻量化

——原理、材料选择与制造方法

(奥) H. 德吉舍尔 S. 吕夫特 著
陈力禾 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术译丛

轻量化

——原理、材料选择与制造方法

(奥)H. 德吉舍尔, S. 吕夫特 著
陈力禾 译



机械工业出版社

前 言

轻量化是一个涵义非常广泛的设计准则，其目标是减轻工业品的重量。轻量化广泛应用于运动的机械零件、交通工具以及运动器械中。在这些领域中采用轻量化的动机主要有：达到更高的加速度、提高有效载荷以及减少能源消耗等。轻量化的应用领域非常广泛，从一般机械制造(如机器人、包装机械、体育用品等)、能源生产设备(如风力发电机)到汽车与飞机制造直至航天飞机与太空站的构造。传统上^[1]将轻量化分为：

- 材料轻量化(轻质材料)。
- 形状轻量化(如空心结构)。
- 制造轻量化(如整体构造或者连接构造)。
- 设计轻量化(节约材料)。
- 功能轻量化(如功能集成或者减少功能)。

这些轻量化方法相互间的交替作用可以用下面的例子来加以说明：车身长度尽可能短的轿车可以节约材料；引入中置发动机可以使轿车重量分配更均匀；由于施加于车轴上的载荷减少，则可以缩小承载横截面，从而可以采用功能集成的轻金属零件。采取以上种种措施，不仅可以降低整车的总重量，也使得车型的外观更有吸引力，并且增加了汽车功能的多样性。要实现轻量化的目标，需要对以上所列举的方法有一个全面的了解。一般来说，如果没有合适的设计，仅通过材料替代是无法达到预期的轻量化效果的。

在过去的几十年里，上面所列举的各种轻量化方法都得到了进一步的发展，并为创新提供了强大的动力。新材料(如高性能复合材料、高强钢)与材料复合物(如带有泡沫芯的三明治构件)以及新的成型方法(如内高压成型)使得构件具备了更高的效率。在计算机支持的构件开发、接近真实情况的制造仿真与应力载荷仿真中，设计人员采用了可靠的检测方法对性能进行测试。另外，产品的功能也得到了扩展(如安全)，同时也考虑到了新的边界条件(如环境承受能力)。不仅产品功能的范围变得更广了，而且实现这些功能的方法也更多了。

在市场经济时代，产品的使用必须要考虑到成本。由于高效的轻量化通常会导致更高的材料成本和生产成本，因此，对于创新来说，采用轻量化方法替代现有产品会面临着成本上的压力。举例来说，现今生产的轿车必须减重，以使得轿车的重量不高于十年前生产的同类产品的重量。不过，即使通过减重实现了每100kg节约0.3~0.5L燃油的效果，由于采用轻量化的方法会导致汽车的成本增

加,所以目前看来,工业界对轻量化还没有产生足够的需求。未来随着能源成本的增加,环境保护要求更加严格,将会增加工业界在轻量化方向上创新的压力。在航空航天与若干体育用品领域中,很久以前就应用轻量化的原则了。如今,在机械设备、道路车辆与有轨机车的开发中也越来越多地采用轻量化技术。本书将以产品实例来说明如何实现轻量化。书中的每个作者都阐述了提出的问题、解决的方案、直至生产出实际的产品。

几百万年以来,自然界就发展出了轻量化,这使得设计人员可以从自然中学习。例如,仿生学^[2]与生物拟态学^[3]就提供了新的创新方向。但是,这种学习绝不是简单的复制。为了让市场可以接受轻量化技术,在减轻产品重量的同时,要确保产品的使用性能相同或者更好。对产品开发工程师来说,要实现这一点,则有许多问题需要解决。迄今为止,在这方面已经有了很多非常出色的轻量化方案可供设计人员选择使用。作为强调设计理念的轻量化专著^[4-6]的补充,本书将展示现代轻量化方法的多样性和替代相关性,并以相应的实例加以说明。本书中所阐述的设计与计算原理、材料性能(包括复合材料与材料复合物)以及成型方法将会对创新有所启发。对于轻量化产品间或遇到的市场门槛,书中也讨论了创新的一般前提条件与成本因素。在考虑到成本-使用-收支平衡与环境承受能力的情况下,考察了产品的全部寿命周期。书中也阐述了目前可用于构件和材料的回收方法,这些方法有助于加强资源与环境的保护。

本书是“奥地利轻量化结构”^[7]项目的总结,希望通过本书能够将轻量化方法的基础知识介绍给工程专业的学生、研发领域的工作人员、设计人员、开发和制造工程师、专业销售人员、创新决策者以及所有对实现轻量化概念感兴趣的人,并激发他们的创造性实践。

维也纳,2009年8月

汉斯·彼特·德吉舍尔 西格丽·吕夫特

参考文献

- 1 Leichtbaustrategien, DVM-Bericht 675, DVM-Berlin, 2008
- 2 Nachtigall, W. (2003) *Bionik: Grundlagen und Beispiel für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Springer-Verlag, Berlin.
- 3 Elices, M. (ed.) (2000) *Structural biological materials – design and structure-property relationships*, Pergamon, Amsterdam.
- 4 Klein, B. (2007) *Leichtbau-Konstruktion*, 7. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden.
- 5 Hertel, H. (1980) *Leichtbau*, Springer-Verlag, Berlin.
- 6 Wiedemann, J. (2007) *Leichtbau – Elemente und Konstruktion*, 3. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- 7 Leichtbau-Seminar im Rahmen des Forschungsprojektes „Austrian Light Weight Structures“ koordiniert vom ARC Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH (LKR), gefördert von der Österr. Nationalstiftung, 2005–2007

目 录

前言

第1章 轻量化原理	1
1.1 自然界的样板	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 利用空心结构节省材料	2
1.1.3 有机纤维与纤维复合物	4
1.1.4 层级构造	8
1.1.5 功能导向的生长与适应	9
1.1.6 工程结构设计展望	10
1.2 轻量化的计算与设计概念	12
1.2.1 引言	12
1.2.2 几种轻量化计算方法	13
1.2.3 稳定性损失——压弯、倾斜、凸起、击穿	17
1.2.4 三明治结构与层合结构	27
1.2.5 轻量化设计原则	31
1.2.6 轻量化设计优化	36
1.3 构件失效	41
1.3.1 引言	41
1.3.2 疲劳过程	42
1.3.3 名义应力与实际应力	42
1.3.4 材料行为与额定参数	44
1.3.5 比较应力假设	48
1.3.6 应力载荷—时间变化曲线	50
1.3.7 结构强度—寿命计算	54
1.3.8 对沃勒线进行仿真	57
1.3.9 小结与展望	59
第2章 轻量化材料	62
2.1 材料	62
2.1.1 引言	62
2.1.2 材料种类	65

2.1.3	弹性性能	67
2.1.4	强度与塑性变形	70
2.1.5	温度升高的影响	75
2.1.6	材料损伤与断裂	78
2.1.7	与环境相关的损伤	81
2.1.8	小结与展望	83
2.2	聚合物基复合材料	85
2.2.1	引言	85
2.2.2	材料构造	86
2.2.3	纤维材料	86
2.2.4	聚合物基材料	92
2.2.5	材料参数	95
2.2.6	纤维毛坯、纤维基毛坯与支撑材料	97
2.2.7	材料性能	104
2.2.8	小结	108
2.3	材料选择	109
2.3.1	引言	110
2.3.2	在产品开发要求的框架内选择材料	111
2.3.3	材料效率	112
2.3.4	方法学	114
2.3.5	刚度与质量	115
2.3.6	几何形状	122
2.3.7	示例：自行车架的材料选择	124
2.3.8	示例：对四冲程发动机的多种要求	130
2.3.9	小结与展望	135
第3章	轻量化制造技术	137
3.1	铸造技术	137
3.1.1	引言	137
3.1.2	成型铸造方法	138
3.1.3	铸件的材料分类	141
3.1.4	铸造合金的性能	144
3.1.5	铸件的设计准则	147
3.1.6	铸件中的缺陷	147
3.1.7	铸件的连接技术与混合构造	149
3.1.8	发展需求与展望	150

3.2 粉末冶金轻量化产品	151
3.2.1 引言—粉末冶金(PM)	151
3.2.2 PM—铝	154
3.2.3 PM—钛	165
3.2.4 展望	167
3.3 成型技术轻量化	170
3.3.1 引言	170
3.3.2 材料轻量化对成型技术的挑战	171
3.3.3 轻量化设计原则在成型技术上的实现	173
3.3.4 基于薄板的轻量化成型技术	175
3.3.5 板材局部强化方法	177
3.3.6 基于管的方案	180
3.3.7 实心成型领域中的轻量化	186
3.3.8 采用数值仿真对方法与产品进行优化	192
3.3.9 小结与展望	193
第4章 构件制造	197
4.1 构件制造——聚合物基复合材料	197
4.1.1 引言	197
4.1.2 成型模具	198
4.1.3 层合构造	200
4.1.4 时效硬化	210
4.1.5 质量控制	212
4.1.6 组装	214
4.1.7 小结与展望	215
4.2 混合构造方式与多种材料零件	216
4.2.1 引言	216
4.2.2 应用示例与要求	217
4.2.3 小结	220
第5章 可回收性	222
5.1 金属材料的回收	222
5.1.1 引言	222
5.1.2 产品寿命周期	223
5.1.3 原生金属与再生合金	224
5.1.4 金属余料和旧料的利用	227
5.1.5 铝和镁的特殊情形	230

5.1.6	循环经济	236
5.1.7	小结	238
5.2	未增强塑料与纤维增强塑料的回收	240
5.2.1	物料流与法律框架	241
5.2.2	塑料废料的评估	242
5.2.3	纤维复合材料的回收	243
5.2.4	聚氨酯类材料的回收	250
5.2.5	展望	250
第6章	交通工具示例	253
6.1	原型跑车“MILA 概念”	253
6.1.1	引言	253
6.1.2	设想	254
6.1.3	虚拟演变	254
6.1.4	动力设计规划	257
6.1.5	模块化空间框架	258
6.1.6	材料选择与应用	259
6.1.7	方案的基本结构	260
6.1.8	展望	260
6.2	原型车“CLEVER”	262
6.2.1	引言	262
6.2.2	技术发展的历史与现状	263
6.2.3	CLEVER 构造的选择	266
6.2.4	总装图与设计	267
6.2.5	型材的加工与空间框架的组装	268
6.2.6	项目单位的进一步工作	269
6.2.7	CLEVER 汽车的技术参数	271
6.3	“R2R” 摩托车	271
6.3.1	引言	272
6.3.2	要求与产品	272
6.3.3	重要参数	273
6.3.4	开发目标	274
6.3.5	特殊装置	276
6.3.6	开发需求与展望	278
6.4	在飞机制造中采用纤维增强聚合物	279
6.4.1	引言	279

6.4.2 结构件	280
6.4.3 发动机件	285
6.4.4 舱内件	286
6.4.5 小结与展望	287
第7章 创新与创新管理	289
7.1 创新	289
7.1.1 创新以及将创新作为中心管理任务的责任	290
7.1.2 竞争与创新过程	291
7.2 成功因素研究及其结果	293
7.3 选择性环境与管理导向创新概念的作用	295
7.4 经济性考虑	299
7.4.1 创新的扩散	299
7.4.2 产品寿命周期	301
7.4.3 关联分析	302
7.4.4 学习曲线	303
附录 缩略语	308

第1章 轻量化原理

1.1 自然界的样板

黑尔伽·黎希腾艾格尔

提要

在自然界中，轻质结构形式与材料的节约使用起着非常重要的作用。轻量化的一个方法是有目的地利用空心结构，例如从材料的角度看到的树木或者骨的胞状结构。胞状结构也可以与实体材料结合，如作为三明治结构形式或者管的结构形式出现。除此之外，还有很多由轻质基本元件构成的生物材料。作为有机纤维复合物的例子，本节中详细描述了木和骨。生物材料的另一个特征是其层级构造。通过简化的分级结构可以看出，层级平面数量的增加会提高材料的使用效率。另外，生物结构还具有适应载荷变化的能力，甚至还可以节约所需的后续材料。例如在骨中，可以通过增加和去除组织，从而不断地进行结构优化。

1.1.1 引言

由于技术的不断分化，在很多领域(如建筑、汽车制造、航空航天等)中，轻量化设计和轻量化材料所起的作用变得越来越重要。好处是显而易见的：轻量化一方面可以节省材料，另一方面可以在运动结构的动力系统中节省能源。

自古以来，自然界就广泛采用轻量化的概念了。其原因在于：一方面是由于可以获得的基础资源极其有限，因此必须节约材料；另一方面也是因为生物有机体需要新陈代谢能量用来进行材料合成。另外还有功能上的原因，例如：飞行的有机体为了能适合飞行，从本质上讲就应当是轻量化的。轻量化也可以改善大的结构形式的稳定性，这些结构往往必须承载自身的重量(如：树干)。

生物有机体往往还必须满足其他的要求。而对于人造的构件和结构来说，绝大多数情况下这些要求都是无所谓的。不论环境的条件如何变化，生物有机体必须在整个寿命期间内都保持功能的正常运转。生物有机体排除机体的任何损坏部分或者对机体进行任何适应性的调整都必须是在“机体运转”的情形下完成的，而不可能像对人造设备那样进行维护、修复或者更换替代件。为了满足这些要求，自然界选择出了高度复杂的、可以非常好地适应典型载荷的结构形式，这些

结构形式是经过漫长的岁月选择进化而得来的，它们的组成、结构与力学性能都能够很好地、持续地相互适应。在参考文献[1]~[4]中可以了解到生物材料的结构和性能。在本章节中，主要从材料的层面上简要介绍一些生物学轻量化的例子。

1.1.2 利用空心结构节省材料

将某个物体做得更轻的一个常用策略是去除承受最小载荷部位的材料。在桁架建筑结构和骨架建筑结构中就采用了这种方式的设计。另外，材料自身还可以采用泡沫状或者胞状的结构方式。除了可以节省材料和减轻重量，胞状构造的空心结构还可以实现诸如材料运输或者新陈代谢等方面的功能。

1. 胞状材料

自然界中胞状材料的例子极其繁多，例如：木材、焦炭、骨小梁等。在这些例子中，材料和空心的形态、典型细胞尺寸与相对体积比例的变化可以非常大。实体材料的相对体积比例(相对密度 ρ^*/ρ_s ，其中 ρ^* 为表征密度， ρ_s 为实体材料密度)对于骨小梁为 0.05~0.3，对于西印度木(轻木)为 0.2，对于密度最大的木种(乌檀木与愈疮木)为 0.8。典型的胞尺寸在几毫米到几百毫米之间^[5]。

(1) 木细胞：棱柱状蜂窝结构 木是由沿着树干或者树杈轴向排列的管状木胞构成的。根据木的种类不同，管状木胞直径在 10~500 μm ，壁厚在 1~8 μm (图 1-1-1c)^[6]。木胞一方面要传输水和养料，另一方面则起着力学支撑作用。管的横截面形状从圆形到六角形都有，通常管的长度大于宽度(大约 1mm 长)，因此，木的结构接近棱柱状蜂窝结构(图 1-1-1e)^[7]。在轴向上，木具有很高的刚度(弹性模量 E)，该刚度与密度 ρ 相关。特别是木的材料参数 $\xi = E^{1/2}/\rho$ 的值很高，在建造一个尽可能轻的刚性梁时，这个参数是起着决定性作用的材料标准。这样的桁梁很少会发生弹性弯曲(参见章节 2.1 与 2.3)^[7]。西印度木在轴向的值为 $\xi = 14.1\text{GPa}^{1/2}(\text{Mg m}^{-3})^{-1}$ ，甚至超过了人造高性能材料的值，如单向碳纤维复合材料的值^[8]。

以木为例，可以非常清楚地看出单个胞构造的优点。与一个(假定的)密度为 ρ_s 的实体材料相比较，随着密度下降，胞构造的参数 ξ (用来标识材料效率)会增大(图 1-1-1b)。当相对密度 $\rho^*/\rho_s = 0.3$ 时(松木的典型值)，胞构造材料的效率是实体材料的两倍。

(2) 三维性：骨小梁 骨小梁可以在多个方面归类为轻量化材料。首先在宏观上，一个密质的外壳将密度很低的芯包围起来。骨的内部由骨髓和部分海绵状骨质结构填充，也称为骨小梁或者海绵状骨。骨小梁是由桁梁状或平板状的斜撑作为承载单元构成的，是三维胞状结构的典型例子。骨小梁厚度在 100~300 μm 。

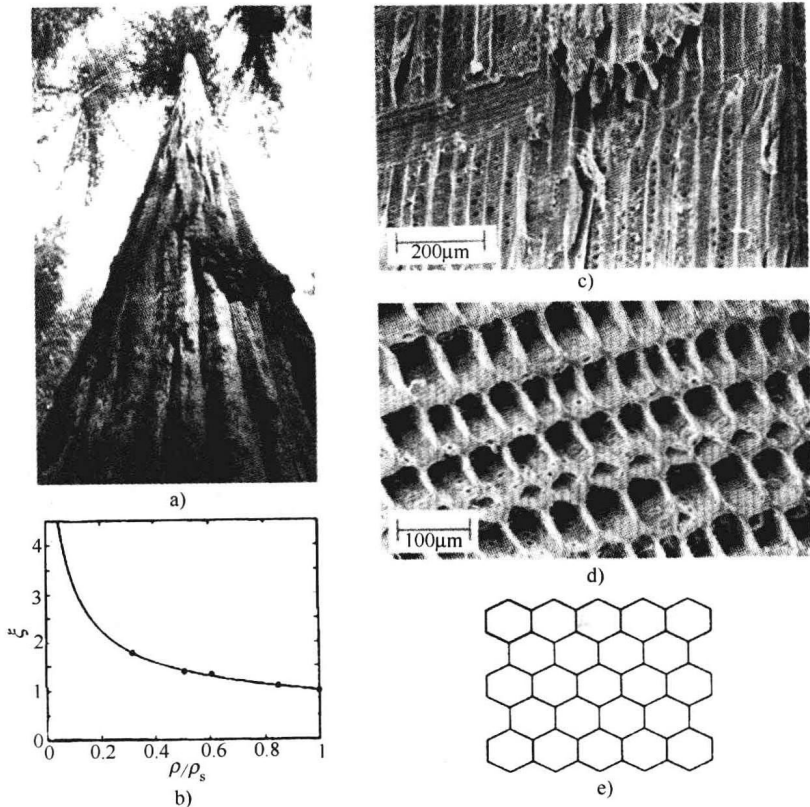


图 1-1-1

- a) 海岸红杉(加州红木) b) 用于受压载荷的材料效率与相对密度的对比(1 对应于实体材料), 实验数据来自模型结构 c) 纵向截面上的木胞 d) 横向截面上的木胞
e) 理想化的蜂窝结构(图 b~e 来自参考文献[10])

骨小梁的力学性能很大程度上取决于其密度。当骨小梁发生弯曲或者骨在相应的高负载作用下发生压弯时, 可以观察到, 骨小梁会产生变形。由此可以推导出, 骨小梁的弹性模量和抗压强度与骨小梁密度的平方成正比^[7]。根据经验也可以得出相应的内在关系, 不过要注意结果的离散度。这是因为即使在相同的密度下, 骨小梁的结构也会有很大的不同^[9]。骨小梁可近似为圆柱形梁或者打孔平板(图 1-1-2c、d), 前一种结构形式主要是位于骨内部(较少负载)深处的、密度低的骨小梁, 后一种结构形式则位于密质的外皮下方。通过从优极化方向, 骨小梁在载荷方向上会表现出结构和力学上的各向异性, 由此会使得弹性模量及抗压强度与密度之间的内在关系发生改变。在特别强的从优极化方向(棱柱状结构)下, 弹性模量及抗压强度与密度在纵向上成线性关系^[9]。

2. 三明治结构与管结构

另外两个广泛普及的天然轻量化结构为三明治结构和管结构。第一个结构由

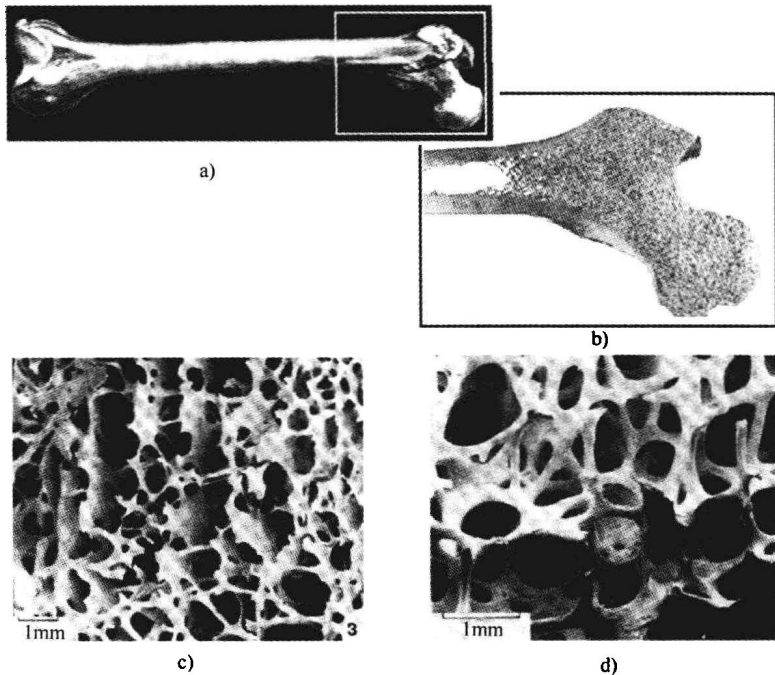


图 1-1-2

- a) 人的股骨 b) 股骨头纵向截面：外部为密质的骨，内部为骨小梁
c) 膝盖方向关节的骨小梁：定向平板状结构 d) 股骨头的骨小梁：

方向随机的杆状骨小梁(图 a、b 来自参考文献[3],图 c、d 来自参考文献[7])

两个紧密的外层和一个不那么紧密的中间层(常采用胞状材料填充)构成,例如植物叶子(图 1-1-3e、f)和人的颅骨(图 1-1-3d)就是这样的结构。与实体材料相比,紧密的外层与胞状中间层连接在一起增加了面积矩,从而提高了抵抗弯曲和压弯的能力。反过来,在假定了抗弯刚度后,与实体材料或者胞状材料的结构形式相比,采用三明治结构形式可以降低结构的总重量。

管结构主要见于植物的茎秆。茎秆有紧密的外壳,内部为蜂窝结构或者泡沫结构。泡沫结构可以看作双壁之间的中间层(图 1-1-3a、b),或者是填充了结构的整个内腔。在动物世界里,也经常见到这种结构形式,例如动物的羽茎或者刺(图 1-1-3c)。在这种结构形式中,胞状芯相当于外壳的弹性支撑,可以吸收变形,增加抵抗压弯的能力^[7,10]。

1.1.3 有机纤维与纤维复合物

除了合适的构造外,轻量化结构还要求有尽可能轻的基本组件。在生物材料中,这些基本组件主要是由有机纤维复合物构成的,例如皮肤、头发、肌腱或者植物胞壁。这些组件由在纵向上不易弯曲的有机纤维构成,并将这些纤维植入较

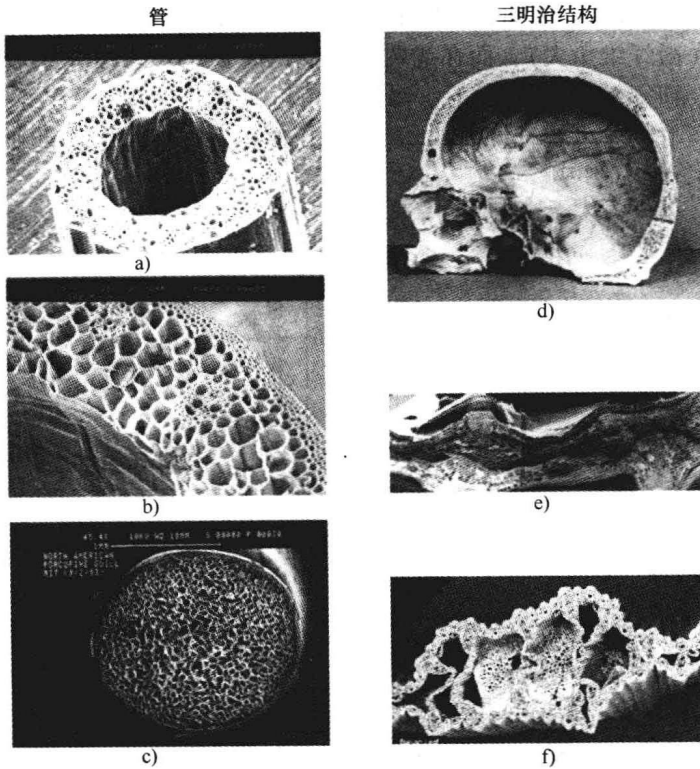


图 1-1-3 自然界中管结构形式与三明治结构的例子

a)、b) 草茎(常见冰草) c) 豪猪的刺 d) 人的颅骨 e) 鸢尾草叶片横截面
f) 香蒲草叶片横截面 来自参考文献[7]

软的、有机的基体中。根据胞组织的不同，纤维可以由蛋白质(如:骨胶原、角蛋白)或者多糖(纤维素、甲壳质)构成。二者的相同之处是密度相对较低，密度值为 $1.2 \sim 1.4 \text{g/cm}^3$ 。纤维复合物的优点很多，例如：在生长过程中容易制造，基本组件相同的纤维复合物的力学性能值范围也很广。纤维复合物的缺点则是由于纤维易压弯，在压力作用下材料会有失效的危险。自然界有很多消除这些缺点的策略，如纤维在拉伸下(通过在植物胞壁中的生长过程和胞的内压力)产生预应力或者采用力学上稳定的基体给予侧面支撑。

1. 在木胞壁中的纤维素纤维复合物

天然纤维复合物的一个典型例子是木胞壁。木胞壁由厚度约为 2.5nm 、部分结晶的纤维素纤维质植入由半纤维素和木质素构成的非结晶基体中。细胞壁由多个层构造而成，其中纤维素纤维质在各个层中的定向不同^[6](图 1-1-4a)。在最厚的层中(二次壁 2, 也就是 S2)，纤维素纤维质围绕着管状木胞螺旋形上升。在同一棵树中，与轴向相对的偏转角(微纤维角, MFA)在不

同的位置上变化很大。例如，在树干的中心处和树枝底部木胞的纤维素纤维质螺旋角很平坦(微纤维角大)，而在老树干外侧的木质的微纤维角则较小^[11]。实际中，在结构和形态相同的情况下，微纤维角可以从几乎 0° (几乎垂直的纤维质)变化到 50° ，其宏观的弹性模量可以降低10倍左右，而最大应变则可以增加12倍左右(图1-1-4b)^[12,13]。

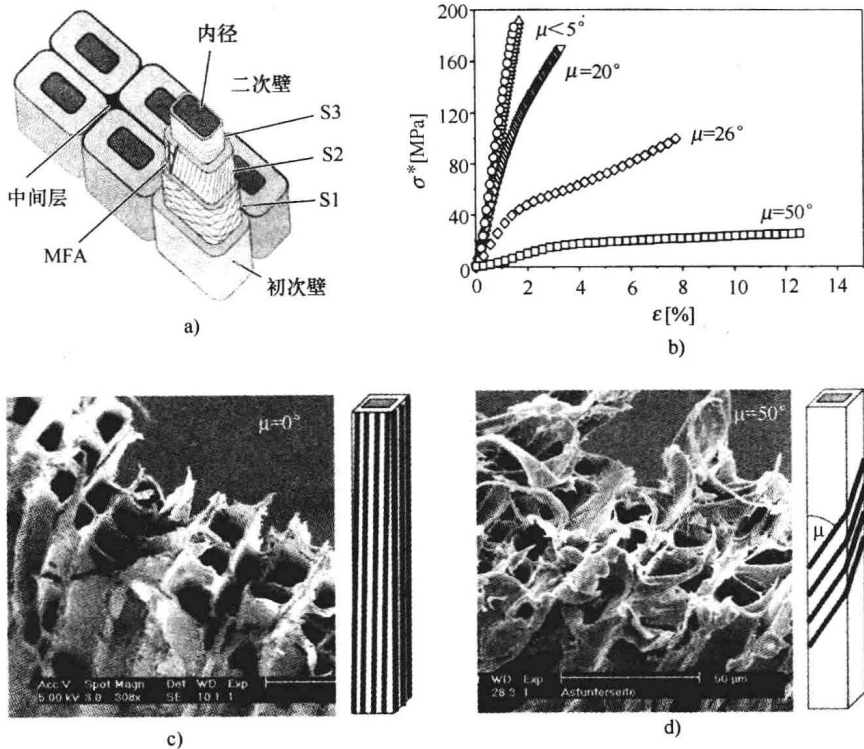


图1-1-4 木胞壁中的纤维素纤维复合物

- a) 木胞的层状构造，在S2中纤维素纤维质的定向，标识为MFA(源自参考文献[29])
 b) MFA不同的松木拉伸试验应力-应变曲线(源自参考文献[13]) c)、d) 拉伸试验中的松木断面，MFA = 0° 与MFA = 50° (原则上，纤维素纤维方向向右)(源自参考文献[14])

同样地，木质的断裂行为变化也很大：在MFA = 0° 时，木质产生弹性变形，直到脆性断裂(图1-1-4c)；当MFA = 50° 时，木质产生很强烈的塑性变形，而且伴随着拔出来的螺旋形碎片；因此，这样的构造提高了材料的韧性^[14](图1-1-4d)。以此推理，在新的树木和树枝上，MFA比较大，其构造也是灵活的^[11]。MFA较大的木质更适合承受压载荷，这是因为木胞的螺旋构造提高了压弯的稳定性。针叶树树枝下端的承压木MFA特别大，木质素(在木胞壁中硬的胶粘剂)所占的比例更大，而木质素还可以进一步提高木质侧面的稳定性。

2. 昆虫甲壳：壳肌纤维从硬到软

有机纤维复合材料的另一个例子是昆虫的甲壳。昆虫甲壳的力学性能范围变化很大。壳肌是像纤维素一样的多糖材料。如同天然纤维素一样，壳肌形状也是刚性结晶的纤维(弹性模量约为 $150\text{GPa}^{[15]}$)。与植物细胞组织不同，昆虫甲壳的基体是由蛋白质构成的。与树木一样，纤维方向在很大程度上决定了甲壳的力学性能。例如，蝗虫肌腱中的壳肌纤维几乎完全与轴向平行(因为肌腱只承受拉载荷)。参考文献[1]中给出了蝗虫肌腱的弹性模量，轴向的弹性模量 $E = 11\text{GPa}$ ，横向的弹性模量 $E = 0.15\text{GPa}$ 。相反地，由于必须承受不同类型的载荷，蝗虫外骨板平板形单元的结构为层状构造，每一层的纤维方向都不相同(通常在相邻层之间有一个准确定义的角:螺旋形构造形状,见图 1-1-5a)，这样可以将外骨板结构的弹性模量减小为肌腱弹性模量的 $3/8$ 。通过这种方式，可以在平面上获得各向同性，尤其可以提高外骨板结构的断裂韧性^[1]。

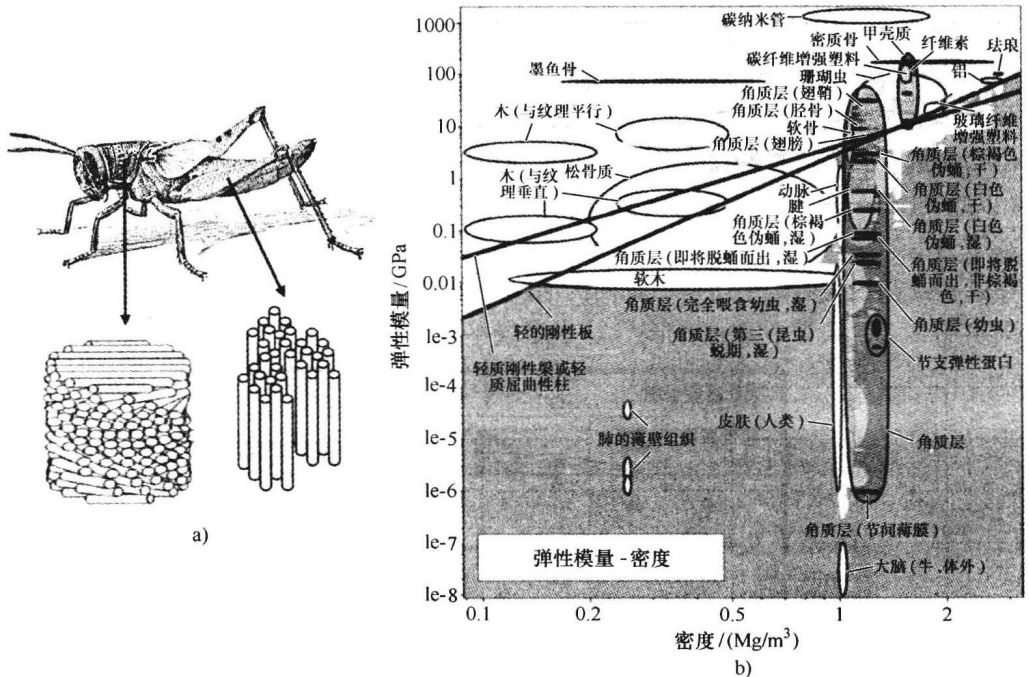


图 1-1-5

a) 蝗虫的壳肌纤维组织：外甲壳中螺旋纤维方向；蝗虫肌腱中平行纤维方向 b) Ashby 图：昆虫壳肌纤维组织与其他有机材料相比较的弹性模量与密度对比图(见 3.3 节源自参考文献[15])

与木相比，壳肌纤维组织的力学性能范围变化更广：其弹性模量的变化可以达到 7(!) 个数量级，内部薄膜的弹性模量为 1kPa ，翅膀或者颅骨的干壳肌组织的弹性模量则达到 20GPa (图 1-1-5b)^[15]。从生态学的角度来看，这样的变化是必要的，因为整个昆虫从外甲壳到所有的器官都是由壳肌纤维组织构成的。除了

纤维方向(见上面)之外,其他的参数也是可以变化的,如:刚性纤维(壳阮)和基体(蛋白质)的相对比例。另外,还可以通过组成成分和蛋白质基体的网格度来设置力学性能^[15,16]。

1.1.4 层级构造

很多天然材料在多个不同的纵向尺度上具有特征鲜明的结构,可以将其标识为“层级”构造。典型的例子有木、骨或肌腱。层级平面通常以非常不同的构造形式连接在一起,构成一个层级复合物,可以满足高度复杂的、形式多样的功能性要求。一般来说,层级构造对有机材料所具有的极其优异的力学性能起着非常重要的作用^[4,17-19]。不过,目前对层级平面相互之间作用的了解还很少,因为在试验中很难将单个的结构平面分离出来。

对于轻量化概念来说,特别令人感兴趣的是:一个层级构造是否可以提高材料的力学性能。如果是的话,那么它是如何提高材料力学性能的。首先可以用基于简化分级模型结构的数学公式来进行研究。分级模型具有结构化的层级平面。与有机材料中的层级平面不同,分级模型中的结构化层级平面彼此相似。以蜂窝结构为例,其胞壁也是由蜂窝构成的,而蜂窝的胞壁则是由更小的蜂窝构成的(以此类推)。雷克斯^[19]展示了一个分级蜂窝结构,增加层级平面的数量可以提高压力下的相对强度(对应于实体材料的强度)(图 1-1-6)。造成这一现象的原因是这种结构形式阻碍了压弯。定向的泡沫结构显示出了类似的积极效果,只是效果不那么,如骨小梁的情形^[19]。当层级平面的数量增加时,在弯曲载荷作用

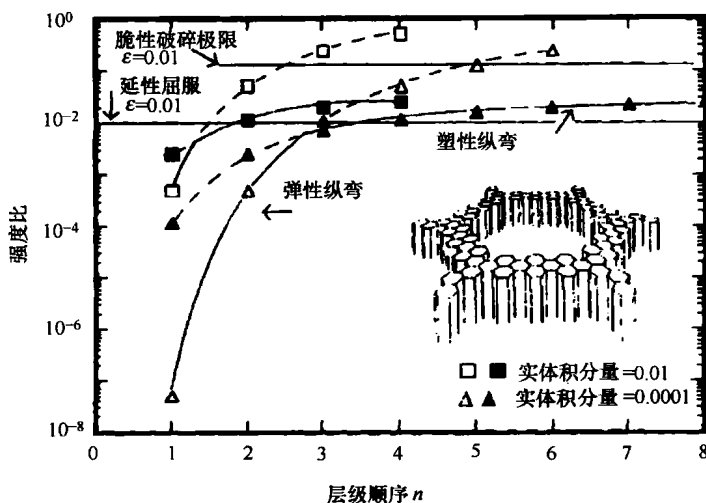


图 1-1-6 层级材料(相对密度为 $\rho^*/\rho_s = 0.01$)强度与实体材料强度的比例关系,对应层级平面数量(根据参考文献[19])