

Engineered Rubber Products
Introduction to Design, Manufacture and Testing

工程橡胶制品

设计·制造·性能测试

[美] 约翰 G. 萨默 (John G. Sommer) 著

游长江 译



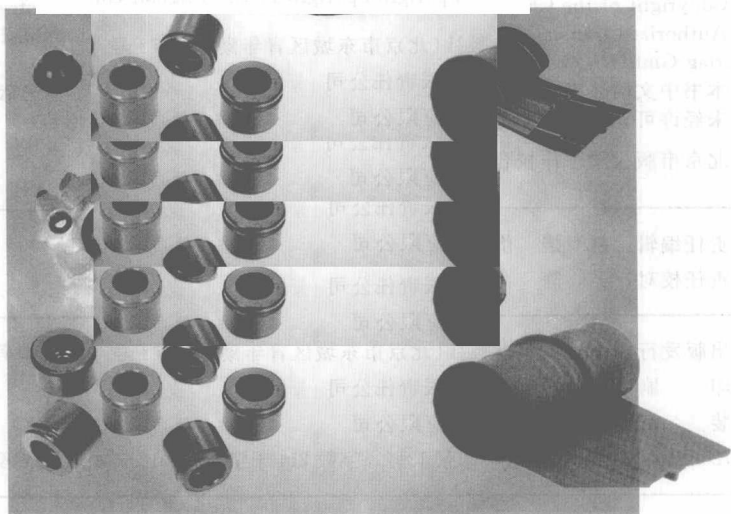
化学工业出版社

Engineered Rubber Products
Introduction to Design, Manufacture and Testing

工程橡胶制品

设计·制造·性能测试

[美] 约翰 G. 萨默 (John G. Sommer) 著
游长江 译



化学工业出版社

· 北京 ·

本书的重点在于工程橡胶产品的设计、制造及性能测试,同时介绍了与其相关的一些基础知识、基本理论和概念。主要内容包括弹性体与胶料、胶料混合与加工、测试与性能、产品设计、计算机在橡胶工业中的应用、非轮胎制品和轮胎的设计及制造实例。每章后面还附有大量的、实用的参考文献,可供有兴趣的读者获得进一步的相关信息。本书可供橡胶工业生产及科研的专家和技术人员,以及高等院校相关专业的教师、研究生、本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程橡胶制品——设计·制造·性能测试/[美] 萨默(Sommer, J. G.) 著;游长江译.—北京:化学工业出版社,2010.3

书名原文:Engineered Rubber Products: Introduction to Design, Manufacture and Testing
ISBN 978-7-122-07471-3

I. 工… II. ①萨…②游… III. ①橡胶制品-设计
②橡胶制品-制造③橡胶制品-性能试验 IV. TQ336

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第243806号

Engineered Rubber Products: Introduction to Design, Manufacture and Testing/by John G. Sommer
ISBN 978-3-446-41731-1

Copyright of the English edition©2009 by Carl Hanser Verlag GmbH& Co. KG, Munich/FRG. All rights reserved.

Copyright of the Chinese simplified translation©2010 Chemical Industry Press.

Authorized translation from the original German language edition published by Carl Hanser Verlag GmbH& Co. KG, Munich/FRG.

本书中文简体字版由 Carl Hanser Verlag 授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2010-0268

责任编辑:赵卫娟 仇志刚

装帧设计:韩 飞

责任校对:吴 静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张13½ 字数214千字 2010年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00 元

版权所有 违者必究

译者前言

在国际金融危机的影响下，世界橡胶工业进入了较为缓慢的增长时期。现代化经济的发展和环境保护的严格限制对橡胶制品的要求越来越高，市场竞争日趋激烈，技术进步越来越受重视。橡胶企业的主要注意力由扩大产量转移到努力提高产品质量及技术水平，积极利用高新技术，大力开发新产品、新材料、新设备、新工艺，不断开拓新的应用领域。随着世界范围内新技术革命的兴起，计算机的广泛应用，大大提高了橡胶生产的技术水平。橡胶制品的电子计算机辅助设计促进了橡胶应用从技术向科学的过渡。

改革开放以来，我国橡胶工业取得了巨大的进步，已是现代国民经济中不可缺少的一个组成部门。我国已经成为橡胶制品的生产大国，成为世界橡胶工业竞争的焦点，从而迎来许多新的发展机遇。在金融危机的背景下，国际市场需求持续走弱，国际贸易摩擦愈演愈烈。在当前激烈的竞争中，对于为数众多的中国橡胶企业及其从业人员来说，系统地了解现代橡胶产品的设计和制造，特别是当前最新的技术进展，显得非常迫切。

《工程橡胶制品——设计·制造·性能测试》一书由美国著名橡胶专家约翰 G. 萨默主编，作者根据他在相关领域的丰富实践经验和教学经验编写而成。该书为如何进行经济有效的工程橡胶产品设计和制造，以及如何获得加工性能良好且能满足客户要求，并具有竞争力的橡胶制品提供了指南。

本书的重点是在工程橡胶产品的设计和制造方面，在一些章节也对一些重要的原理或概念作了解释。本书论述了弹性体与胶料、胶料混合与加工、测试与性能、产品设计、计算机在橡胶工业中的应用及有限元分析、非轮胎制品和轮胎等，内容很有特色和技术的先进性，可以帮助读者了解工程橡胶产品设计和制造的最新技术进展。每章还附有大量有用的参考文献，可供有兴趣的读者获得进一步的相关信息，作更深入的研究与开发。本书可供橡胶工业生产及科研的专家和技术人员，以及高等院校相关专业的教师、研究生、本科生阅读和参考。

本书由华南理工大学游长江翻译。翻译过程还得到多位研究生的协助。尽管全书经过认真校订，但限于译者的水平，难免有曲译和不妥之处，敬请读者指正。

译者于广州
2010年2月

致谢

我感谢许多同事和合作者多年来与我分享他们的知识和经验，特别要感谢 T. J. 杜德克博士审阅本书的手稿。

同时也鸣谢有关组织和个人同意我刊载挑选的图片。

前言与声明

前言

工程橡胶制品的成功制造是复杂的。它涉及不同的学科、材料、设备的类型和设计。这种看法是基于作者广泛参与橡胶的技术工作，在撰写本书前深入地查阅有关文献，加之同事们许多有益的意见和建议，以及从弹性体技术的若干课程的教学中的获得的。

从事橡胶产品开发和制造的有关人员之间沟通不良有时也会产生问题。本书的意图是帮助改善化学家与工程师等不同学科之间的交流。本书采用分类的方法，打算更深一层地向化学家、工程师和其他人员介绍在各式各样的轮胎和非轮胎制品中橡胶的独特性能。

这是作者几十年来教授几门与橡胶有关课程获得的经验，大量相关和有用的橡胶文献未能好好应用，导致工作的重复。最有价值的橡胶文献资料来源是设在阿克隆大学的美国化学学会的科学与技术图书馆，另一个是设在华盛顿特区的橡胶生产商协会。

本书的大多数章节标注了详尽的参考文献。参考文献可以在所感兴趣的各章查阅或全面查阅，鼓励读者获得有关参考文献并作进一步地研究。

声明

本书的资料是通过许多途径收集的，被认为是真实的和准确的。因为条件不同，因此不能保证得到相同的结果。没有暗示或表示保证此书的适合性、完整性或准确性。专利的参考不应视作是诱导使用或侵犯任何特定的专利。本书没有意图去推荐任何产品。本书的读者在使用任何原材料、工艺和设备前，始终要咨询供应商，以确定在特定的使用条件下没有健康与安全的危害。使用有效的健康与安全的做法也不会过分。本书中使用商品名称仅仅是为了识别。

目录

第 1 章 导论 1

 参考文献 14

第 2 章 弹性体和胶料 17

 参考文献 27

第 3 章 胶料混合与加工 29

 3.1 压延 34

 3.2 压出 34

 3.3 成型 38

 3.3.1 压缩成型 40

 3.3.2 传递模塑 46

 3.3.3 热塑性弹性体注射成型 55

 参考文献 58

第 4 章 测试与性能 61

 4.1 黏度与焦烧时间 62

 4.2 硬度 64

 4.3 应力-应变性能 65

 4.3.1 单轴向变形 65

 4.3.2 双轴向变形 67

 4.3.3 三轴向变形 70

 4.3.4 三轴向拉伸 72

 4.4 黏弹性能 77

 4.4.1 蠕变 77

4.4.2	应力松弛·····	77
4.4.3	压缩永久变形·····	78
4.5	动态性能·····	78
4.5.1	疲劳与缺口扩展·····	82
4.5.2	拉伸断裂·····	83
4.5.3	滞后现象和回弹性·····	83
4.5.4	磨耗·····	83
4.5.5	摩擦力·····	84
4.6	其他橡胶性能·····	85
4.6.1	测试温度的影响·····	85
4.6.2	导电性·····	86
4.6.3	黏合性·····	86
4.6.4	渗透性·····	87
4.7	降解性能·····	88
4.7.1	耐候性·····	88
4.7.2	抗臭氧性·····	88
4.7.3	耐高能辐射性·····	89
4.7.4	耐高温性·····	90
4.8	橡胶配料的相容性·····	90
4.9	电性能·····	92
4.10	非破坏性测试·····	93
4.11	测试和计算机的应用·····	93
	参考文献·····	95

第5章 产品设计····· 99

5.1	橡胶隔震支座·····	100
5.2	胶管·····	108
5.3	胶带·····	113
5.4	等速万向节保护罩·····	114
5.5	胶垫和橡胶支座·····	116

5.5.1	形状因子	116
5.5.2	桥梁支座	116
5.5.3	隔震支座	117
5.5.4	测试和质量控制	118
参考文献		126
第 6 章 计算机和有限元分析在橡胶中的应用		129
6.1	配合	132
6.1.1	硫化	132
6.1.2	胶料开发	132
6.2	哑铃形拉伸试样中的应力	132
6.3	有限元分析和热扩散	134
6.4	橡胶抗小缺口的能力	134
6.5	有限元分析在不同领域的应用	134
参考文献		140
第 7 章 非轮胎制品		143
7.1	黏合	143
7.2	胶管和胶带	146
7.2.1	胶管	147
7.2.2	胶带	148
7.3	橡胶隔震支座、轴承和衬套	150
7.3.1	橡胶隔震支座	150
7.3.2	轴承和衬套	151
7.4	能量存储与耗散	155
7.5	胶辊	156
7.6	密封圈	157
7.6.1	泵密封圈	158
7.6.2	汽车传动密封圈	158
7.6.3	容器密封圈	159

7.6.4 汽车门密封条	159
7.7 其他用途	161
参考文献	164
第8章 轮胎	169
8.1 引言	169
8.2 原材料	170
8.3 轮胎的种类	172
8.4 轮胎增强	176
8.5 轮胎结构	178
8.6 组成部件的相关关系	180
8.7 组成部件的制备和轮胎成型	181
8.7.1 组成部件的制备	181
8.7.2 轮胎成型	182
8.8 轮胎老化	187
8.9 使用中轮胎的损坏和安全措施	188
8.10 跑气胎	189
8.11 乘用车胎的设计	189
8.12 卡车胎	191
8.13 超大轮胎	192
8.14 飞机轮胎	192
8.15 实心轮胎	193
8.16 半实心轮胎	194
8.17 非传统轮胎	194
参考文献	196
附录1 物理量单位换算表	200
附录2 英文缩略语	201

第 1 章 导论

橡胶由于具有独特的性能，如高延伸性、高强度、高能吸收和优异的耐疲劳性，因此在工程方面应用越来越广泛。

橡胶其他的性能还有良好的环境抵抗力和高回弹力。工程橡胶制品全部由橡胶组成，或是橡胶与其他材料结合。产品范围从简单的橡胶圈到复杂的复合材料，如子午线轮胎或在航空上应用的橡胶-金属支座。

钢、铝、塑料、织物和帘线等材料通常与橡胶结合构成复合材料。使用这些材料的目的一般是为了提高强度、减少变形、延长耐用性、简化复合材料的安装。

在力学性能良好的橡胶-钢产品中，橡胶保证了柔顺性，钢保证了复合材料的固定连接点。复合材料如支座在设计、尺寸大小和形状上都有很大的变化。

图 1-1 是平板式复合材料支座，黏合在两块刚性钢板中间的橡胶保证在剪切时的柔顺性^[1]。图 1-2 是管状复合材料支座，橡胶被封闭在内管和外管之间^[2]，这种复合材料保证了

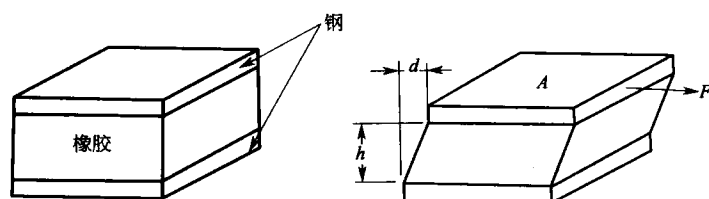


图 1-1 平板式支座（橡胶黏合在两块刚性板之间）

剪切时的柔顺性，产品广泛应用于汽车悬挂系统的衬套。这些产品和其他产品一样需要一系列制造步骤。

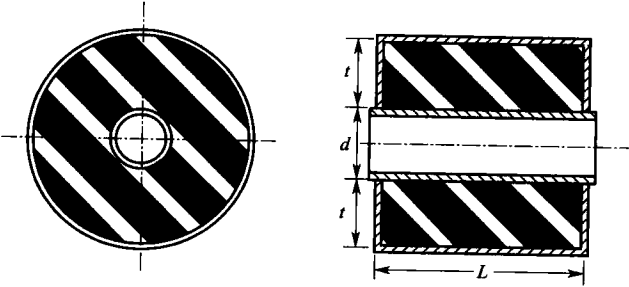


图 1-2 管状支座

图 1-3 列出了一些材料以及橡胶产品制造过程的后续步骤。

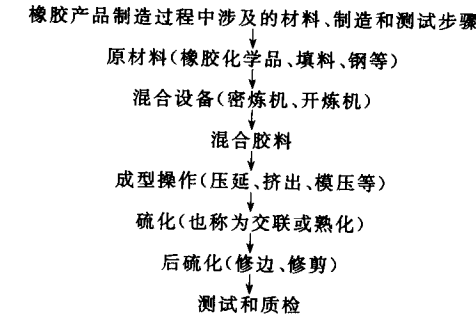


图 1-3 材料以及橡胶产品制造过程的后续步骤

加工高黏度橡胶胶料的设备必须非常坚固，才能在加工、模压和其他操作过程中承受巨大的应力。昂贵的设备以及生产橡胶所必需的一些处理工艺，意味着橡胶产品的制造是高投入和劳动密集型的。由于这些因素以及原材料价格的不断上涨，橡胶工业的竞争极为激烈，日益苛刻的服务要求也加大了橡胶制品生产商在经济上和技术上的需求。

以前，橡胶技术人员把重点放在降低胶料的成本以及降低产品的价格，现在，更多的精力是放在减少产品重量，减少甚至减去一些操作步骤，采用新方法将刚性和柔性的材料结合以降低费用。轮胎和非轮胎产品都要考虑到这些方面。

在选择和设计产品时要考虑以下因素：

磨耗	耐酸、耐化学品
臭氧龟裂	拉伸和撕裂性能
老化	低温柔顺性
紫外光照射	渗透性
蠕变	动态性能
耐油、耐水和耐化学品	电性能
颜色	模量和硬度

材料中的模量定义为施加应力（力/单位面积）与相应的应变（长度变化/原长度）之比，变化范围很大。高模量的材料如钢强烈地抵抗变形，而低模量的橡胶则易于变形。

表 1-1 列出了钢和橡胶的模量值。这两种材料常常结合使用，形成各种各样的橡胶-金属复合材料^[3]。

表 1-1 钢和橡胶的典型模量值

单位：MPa

模 量	钢	橡 胶
杨氏模量	203000	6
剪切模量	79300	1.5
体积模量	159000	1100

图 1-4 是典型的橡胶胶料的杨氏模量和剪切模量与国际橡胶硬度的关系^[4]。硬度比较容易获得，是在特定条件下对针入的抵抗，它的值在 $\pm 2^\circ$ 的范围内。剪切模量相对不容易获得，其值显然更为精确，是工程橡胶制品设计中最有用的性能之一。这一数据更适合设计计算，特别是对填充橡胶，其剪切模量更取决于应变。

既了解模量，又了解影响模量的其他因素是有用的。

在不同材料中，原子或分子的键合力的不同也是模量值有很大

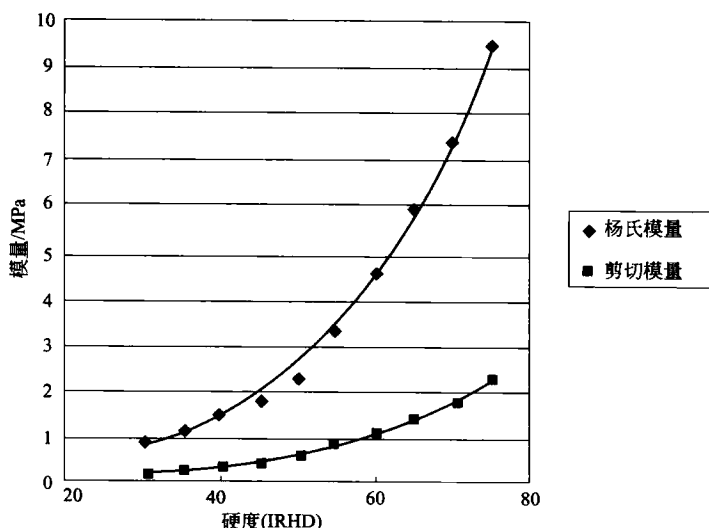


图 1-4 杨氏模量和剪切模量与国际橡胶硬度 (IRHD) 的关系

差别的原因^[5]。原子间的力很强是钢具有高模量的原因。橡胶的分子间存在较弱的力，这是橡胶行为的必要条件之一，橡胶是由一种单体或不同单体形成的非常长的分子组成的聚合物，单体是与同类分子或不同类分子反应的小分子。

在室温下，经过很大的变形后橡胶能基本回复到原来的形状，如橡胶带被拉伸后释放。在一条松弛的橡胶带中，长链分子处于无规线团构象。拉伸的橡胶带在变形力卸除后能够回复是因为在橡胶结构中非常长的分子链绕单键旋转，分子链回复到原来的无规线团构象，给橡胶带回复到原来的形状提供了驱动力。

一些橡胶的行为是违反直觉的。例如，当已交联的橡胶在恒定负荷下拉伸超过临界值时，其长度会随着温度的升高而降低^[7]。这一行为是因为在松弛的交联橡胶中，无规线团分子链比在拉伸橡胶中的分子链具有更高的熵。拉伸降低了熵，当分子链两端的直线距离大于零时，末端距是分子链卷曲程度的量度。收缩力使拉伸的分子链趋向于回复原来无序的状态。

表 1-2 是拉伸的橡胶带的长度随温度变化的情况。

表 1-2 长度随温度的变化

温度/℃	长度/mm	温度/℃	长度/mm
20	163. 0	48	154. 0
35	158. 5	57	151. 0
45	155. 5	61	149. 0

“橡胶”和“弹性体”的术语在本书是可互换的。最初仅有一种天然橡胶（NR），它是异戊二烯单体形成的均聚物。随着合成橡胶的发明，引入了“弹性体”的术语。弹性体的例子是丁苯橡胶（SBR），它是苯乙烯和丁二烯单体形成的共聚物。重要的是注意到一些要素，如不同苯乙烯-丁二烯单体的比例和聚合条件可产生出许多不同类型的 SBR。

聚苯乙烯（一种硬塑料）中的分子链缺少在室温下旋转和给予聚合物柔顺性的能力。要成为橡胶态，聚苯乙烯必须加热到约 121℃，在此温度下，分子链开始绕单键旋转。此时，软化的聚苯乙烯的行为类似橡胶。在高温下熔融聚苯乙烯和其他热塑性塑料，如橡胶一样成型，然后冷却和变硬，形成有用的塑料制品。

相反，在足够低的温度下，分子链绕单链的旋转停止，橡胶会转变为玻璃态。聚合物的玻璃化转变温度（ T_g ）是橡胶变硬而脆的温度，或是硬塑料如聚苯乙烯变为橡胶态的温度。温度低于 T_g ，聚合物的行为像玻璃状的固体，因为它们缺乏足够的热能去克服能垒。

不同弹性体的 T_g 值范围约 $-40 \sim -123^\circ\text{C}$ 。大多数弹性体的 T_g 为 -50°C 或更低。不过一些硅弹性体的 T_g 为 -123°C ，此值使硅橡胶在极低的温度下仍保持柔顺。硅橡胶优异的低温性能使其可用作高海拔极冷条件下的航空器密封圈。

1986 年，“挑战者”号航天飞机上 O 形密封圈的灾难性破坏说明 T_g 在关键应用方面的重要性^[7]。密封圈的损坏归于两个影响因素的结合，一是用于密封圈的氟橡胶的 T_g 比较高（ $-10 \sim -20^\circ\text{C}$ ），二是航天飞机发射当天的温度低。用于冰箱和冷冻机的密封圈和垫

片也会产生不同的问题^[8]。在密封圈和垫片中加入的纳米银粒子提供了抗微生物的性能,曾报道有助于延长食品的保存期。

应用在工程方面的大多数弹性体是热固性弹性体(TSE),而热塑性弹性体(TPE)在数量、用途、类型和重要性方面日益增加。与热固性弹性体分子的化学交联相比,在TPE中是物理交联把分子链连接起来。因此,TPE可以加热和重新加工,很像聚苯乙烯和其他塑料,这是TPE的显著特点。

理想的橡胶可以定义为这样的物质,它在变形的过程中储存所有的能量,在变形力去除后释放能量。但我们没有生活在一个理想的世界,因此也没有理想的橡胶。一个超级球显示了几乎理想的行为,当弹起时,它几乎回到原来的下落高度。高度的损失反映了在冲击变形过程中能量的损失,是阻尼的量度。阻尼是在变形周期中能量的损失,它在许多工程应用中是很重要的,并取决于许多因素^[9]。这些因素包括弹性体的种类、加入弹性体中的配料的种类和用量、加工条件以及长链分子在弹性体中的交联度。长的聚合物分子链要形成稳定的结构,就需要沿着分子链交联^[10]。引入非常大量的交联点会产生硬橡胶以及非常低的延伸性。对于一定应用范围的橡胶制品,这些因素起重要的作用。

在填充和非填充工程橡胶制品中所观察到的应力软化现象是另一个重要因素。它反映了在聚合物材料中长链分子的构象变化,使其后的变形更为容易。因此,橡胶胶料在第一次应变周期会显示出最高的模量,其后在给定的应变(应力软化)条件下,每一次应变周期的应力逐渐降低。

图1-5表示应力软化对硫化轮胎面的影响^[11]。经过足够次数的应力应变周期后,模量会达到平衡。

当橡胶用于可能发生共振的部位如汽车发动机的支座等的隔震时,就需要不同程度的阻尼。在一条橡胶带上悬挂一个重物,然后以不同的速率(不同干扰频率)升高和降低橡胶带可以用来说明共振。当橡胶带-重物体系中干扰频率(f_d)与自然频率(f_n)相等时,就会发生共振。悬挂重物的自然频率是对一个重