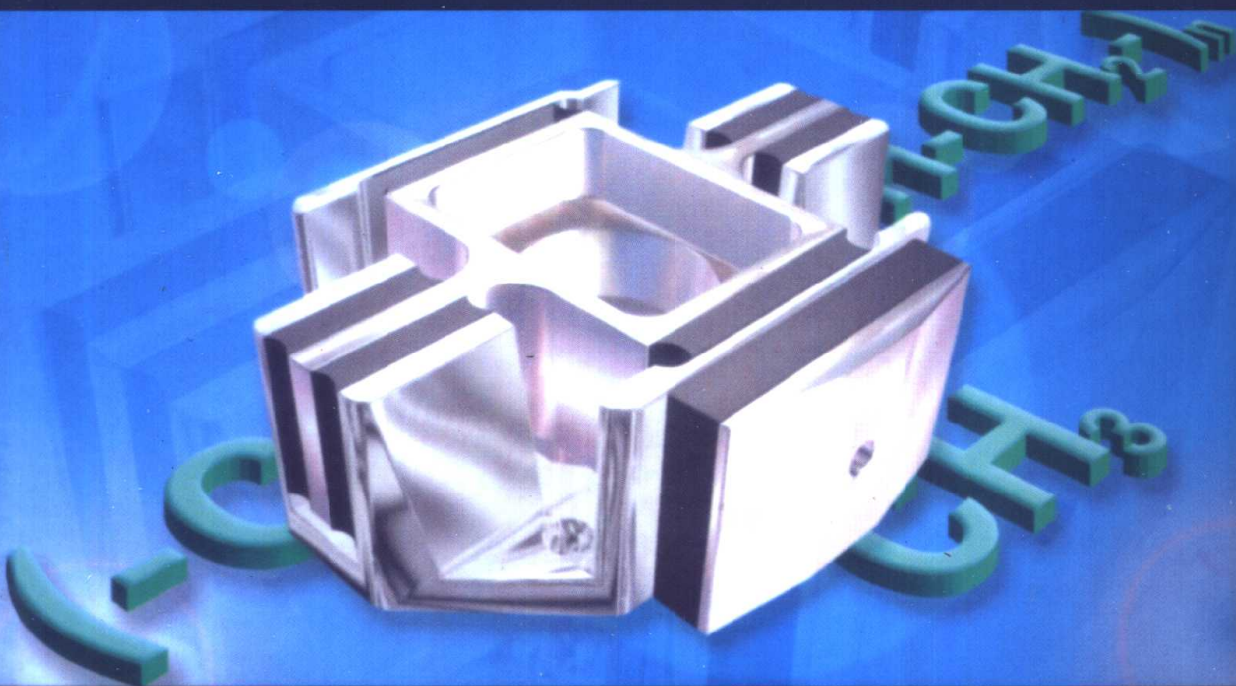


橡胶工程

——如何设计橡胶配件

[美] A. N. 詹特 主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

橡 胶 工 程

——如何设计橡胶配件

[美] A. N. 詹特 主编
张立群 田 明 刘 力 冯予星 译

化学工业出版社
材料科学与工程出版中心
·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

橡胶工程——如何设计橡胶配件/[美] A.N.詹特主编; 张立群等译. —北京: 化学工业出版社, 2002.10
ISBN 7-5025-4004-0

I. 橡… II. ①詹… ②张… III. 橡胶工业-研究
IV. TQ33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 070754 号

Engineering with Rubber-How to Design Rubber Components (2nd Edition)
Edited by Alan N. Gent
ISBN 3-446-21403-8

Copyright ©Carl Hanser Verlag, Munich 2001. All Rights Reserved.

本书中文简体翻译版由 Carl Hanser 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。
未经出版者许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。
北京市版权局著作权合同登记号: 01-2001-5267

橡 胶 工 程

——如何设计橡胶配件

[美] A.N.詹特 主编

张立群 田明 刘力 冯予星 译

责任编辑: 宋向雁 李晓文

责任校对: 郑捷

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市管庄永胜印刷厂印刷
三河市前程装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 11¼ 字数 291 千字

2002 年 11 月第 1 版 2002 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4004-0/TQ·1580

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

第 2 版 前 言

数年前，此书的作者们就理解了将橡胶作为工程材料的信息加以整合这个任务的重要性——这些信息既有广泛地分散在技术文献中的，也有当时未发表的。他们的努力导致了此书第 1 版的诞生。现在本书的第 2 版也将出版，此版提供了一个更正前一版漏印和错误的机会，作者们非常感谢指出这些错误的读者们，特别是贝克油田工具公司的杰米·古德森先生和上海铁道大学的龚积球教授。我们也极其愿意听到任何尚未发现的不当之处。

本书的第 2 版含有更正和更新的信息，也包括许多处理具体实际案例的问题，读者可以通过解答问题测试他们对此书的掌握程度。实际上，现在几乎每一章的末尾都有问题提出，这种形式对学生特别有用。

此版的体系和格式与第 1 版相比没有过多变化，仍然是由在橡胶技术特别是工程应用上具有广博经验的作者们来阐述橡胶工程这个专题。我们希望此书能继续为必须与这种不寻常的、令人惊奇的和必需的工程材料打交道的学生们以及实际工程师们提供价值。

A.N. 詹特
阿克隆，俄亥俄

第 1 版 前 言

在工程和制品中，橡胶配件扮演着非常重要的角色，如弹簧、减震器、密封件、垫片、胶管、胶带、摩擦传动装置和胶辊等等。然而，尽管橡胶在工程上非常必要，并且使用非常广泛，但关于橡胶科学和技术的普适的工程知识的集成还是不多见的。由于仅有很少的信息和经验提供指导，设计工程师们倾向于将橡胶看作一种疑问较多且不易稳定的材料，如果可能的话，尽可能避免使用。但是，在许多情况下，橡胶部件的使用往往给主要的工程问题提供了一种简单和巧妙的解决方法。最近的例子有用于桥梁的橡胶支座，既可允许桥面进行热膨胀，又不对桥梁支撑体施加多余的负荷；有传递动力给直升机桨叶的橡胶弹簧，它同时能在各个方向上提供特定的刚度，允许桨叶变化倾斜方向；也有用于建筑物的橡胶支撑体，可以阻止地震中其表层的移动，保护建筑物结构。

橡胶配件的应用和设计知识应该是通用工程教育的一部分，与其他材料的学习并行，这可帮助新工程师们制定出更加聪明的设计方案。缺乏这种知识，他或她将完全依赖于橡胶制造商或者产品设计和技术的提供者。

这本书旨在满足人们的此种需要——教给新工程师关于橡胶科学和工程的原理：橡胶是什么材料，它的性能怎样，怎样设计简单的工程配件。这本书没有评述轮胎设计——一个复杂的既包含橡胶技术又涉及车辆和道路的问题。然而，轮胎设计者或许能从中受益，即使此书没有非常特定地针对他们的需要。

这本书重点阐述橡胶在工程中成功运用所依据的基本原理，如：

怎样选择一种弹性体和研究合适的配方？

为什么橡胶是高弹性的和相对高强度的？

怎样估算橡胶制品的耐久性、强度和刚度？

这些问题是任何希望理解橡胶制品设计原理的工程师所面对的。本书的作者们在橡胶科学和技术上有着广泛的个人经验。在本书的许多部分中，作者们提供了案例和问题，供读者们自行评价他们所掌握的程度。事实上，本书的内容也能够很好地纳入到高年级本科生和研究生的材料科学与工程课程体系中。

在很大程度上，这本书的面世归功于美国化学会橡胶分委员会，特别是归功于教育委员会前主席——丹尼尔·兰·赫兹先生的远见，是他认识到形成这样一个专题的必要性，并在召集编辑和作者上起到了领导者的作用。

A.N. 詹特

阿克隆，俄亥俄

译者序

橡胶是一种奇妙独特、具有战略性的高分子材料，其高弹特性奠定了它不可取代的位置。橡胶在通用和工程场所中的广泛应用是有目共睹的。没有橡胶，很难想像今天的交通事业、鞋业、传动运输业、密封业等会是怎样的。即使在没有必要使用橡胶的工程场合，正如此书的作者所言：“橡胶部件的使用也往往给主要的工程问题提供了一种简单和巧妙的解决方法”。

在橡胶配合、加工工艺、制品制造等领域有很多的著作，但我国尚缺乏涉及橡胶在工程中应用的理论与实践这类专著，以解答在工程应用中，是否可以应用橡胶材料解决问题，如何选择橡胶性能，或者说橡胶性能与各种工程应用间的关系是怎样的，如何进行橡胶配件设计等问题。这使得我国的橡胶制品制造业的技术水平和生产规模、制品种类等被动地受制于应用方，而应用方又由于此类知识的匮乏，往往提出外形相似但结构上或材料性能要求上可能完全错误的制品规范，工程界也会因为对橡胶材料的工程性能的不了解，甚至丧失使用橡胶件解决问题的机会。尽管传统的橡胶制品种类很多，但设计是否合理，所用的材料性能是否最佳，仍然令人怀疑。有关橡胶制品制造方面书籍中的内容虽然很具体，但经验性太多，理论性不足，也没有方法论的阐述，以至于读者很难真正抓住问题的实质并产生创新。

美国橡胶界专家编著的《橡胶工程》这本书能够在一定程度上满足我们的需要。此书的主编是美国橡胶界的著名人物、美国工程院院士、阿克隆大学荣誉教授 A.N. 詹特博士，他曾协助发现了美国航天飞机挑战者号升空爆炸的原因。此书的众多作者在书中各章节涉及的各个领域也颇有建树。此中译本为原书的第 2 版，2001 年出版，内容很新。其特点是立足于工程应用展开论述，关注橡胶

材料在工程使用时的性能、行为和结构设计，理论与实践并重，提供的理论模型以简洁、实用为标准，所举实例和问题紧扣实际应用，同时总结了大量的经验和技巧。很适合从事橡胶制品生产和研发的技术人员、相关工程师阅读，对高等院校材料学和工程专业专业的本科生、研究生及教师等也有较好的参考价值。

译者们是怀着急迫和认真的心情翻译此书的，以图此书能尽早对我国的橡胶界和工程界有所裨益。第1~3章和附录由刘力副教授翻译，第4、5、9章由张立群教授翻译，第6~7章由冯予星副教授翻译，第8、10章由田明副教授翻译。研究生贾清秀、博士生张惠峰、本科生柴晓丽和耿海萍副教授在翻译过程中做了大量工作，北京化工大学橡塑工程中心的各位老师和化学工业出版社都给予了大力支持。由于教学和科研工作繁忙，翻译时间短，再加上水平有限，翻译中的错误必然存在，望读者谅解并及时指正。同时，此书的作者们也欢迎读者提出宝贵意见并指出其中可能存在的错误。

译 者

2002年8月北京化工大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 橡胶在工程中的应用	1
1.2 弹性体	1
1.3 动态应用	2
1.4 通用设计原理	3
1.5 热膨胀性、压力和溶胀	3
1.6 特殊应用和操作理论	4
1.7 密封寿命	7
1.8 密封摩擦	7
参考文献	8
第 2 章 材料与配合	9
2.1 引言	9
2.2 弹性体种类	9
2.2.1 通用类弹性体	9
2.2.1.1 丁苯橡胶 (SBR)	10
2.2.1.2 聚异戊橡胶 (NR, IR)	10
2.2.1.3 顺丁橡胶 (BR)	11
2.2.2 特种弹性体	12
2.2.2.1 氯丁橡胶 (CR)	12
2.2.2.2 丁腈橡胶 (NBR)	12
2.2.2.3 氢化丁腈橡胶 (HNBR)	12
2.2.2.4 丁基橡胶 (IIR)	13
2.2.2.5 乙丙橡胶 (EPR, EPDM)	13
2.2.2.6 硅橡胶 (MQ)	13
2.2.2.7 聚硫橡胶 (T)	13
2.2.2.8 氯磺化聚乙烯 (CSM)	14
2.2.2.9 氯化聚乙烯 (CPE)	14

2.2.2.10	乙烯-甲基丙烯酸酯橡胶 (AEM)	14
2.2.2.11	丙烯酸酯橡胶 (ACM)	14
2.2.2.12	氟橡胶 (FKM)	14
2.2.2.13	氯醚橡胶 (CO, ECO)	15
2.2.2.14	聚氨酯橡胶	15
2.3	配合	15
2.3.1	硫化与交联	15
2.3.1.1	硫黄交联	15
2.3.1.2	交联密度的测定	18
2.3.1.3	交联密度的影响	19
2.3.1.4	其他交联体系	20
2.3.2	增强	20
2.3.3	抗降解剂	22
2.3.3.1	臭氧老化	22
2.3.3.2	氧化	23
2.3.4	加工助剂	25
2.3.5	增容剂	25
2.3.6	增粘剂	26
2.4	典型的橡胶配合	27
	致谢	29
	参考书目	29
	问题	29
	答案	30
第3章	弹性	31
3.1	引言	31
3.2	小形变下的弹性性质	32
3.2.1	弹性常数	32
3.2.2	剪切模量 G 与复合物之间的关系	34
3.2.3	复合物的刚性	36
3.2.3.1	剪切模量的选择	36
3.2.3.2	键合的块状体与空的圆柱体的剪切变形	36
3.2.3.3	固定物体的小压缩或小拉伸	38
3.2.3.4	拉伸和压缩中的最大允许载荷	41

3.2.3.5	用硬度测试计测橡胶块的印痕	42
3.2.3.6	突出于刚性平面孔洞的橡胶	43
3.3	大形变	44
3.3.1	大弹性形变的通用理论	44
3.3.2	应力-应变关系	45
3.3.2.1	应力-应变间通常的关系	45
3.3.2.2	简单拉伸	45
3.3.2.3	形变能量函数的计算	46
3.3.2.4	填充橡胶硫化胶的弹性行为	48
3.3.2.5	等轴拉伸	50
3.3.2.6	受限拉伸(纯剪切)	51
3.3.2.7	球形壳体的膨胀(气球)	52
3.3.2.8	一个球形孔洞的膨胀	53
3.3.3	二次方应力	54
3.3.3.1	简单剪切	54
3.3.3.2	扭曲形变	56
3.4	橡胶弹性分子理论	57
3.4.1	单分子链的弹性行为	57
3.4.2	一个分子网络的弹性	58
3.4.3	网络分子链的有效密度	59
3.4.4	形变能量函数中的第二项	60
3.4.5	分子理论总结	61
	参考文献	62
	问题	63
	部分答案	64
第4章	动态机械性能	65
4.1	引言	65
4.2	粘弹性	65
4.3	动态试验	68
4.4	能量问题	72
4.5	悬浮体系的运动	73
4.6	实验技术	76
4.6.1	受迫非共振振动	76

4.6.2	受迫共振振动	76
4.6.3	自由振动	76
4.6.4	回弹性	77
4.6.5	静态和动态应变水平的影响	77
4.7	动态机械测量的应用	77
4.7.1	橡胶元件的生热	77
4.7.2	隔震材料	78
4.7.3	缓冲器	78
4.8	温度和频率的影响	79
4.9	填充混炼胶的触变效应	82
	致谢	84
	参考文献	84
	问题	84
	答案	85
第5章	强度	87
5.1	引言	87
5.2	断裂力学	87
5.2.1	试样分析	89
5.2.2	裂纹尖端的应变能集中	91
5.3	撕裂行为	92
5.4	交变载荷下的裂纹增长	98
5.4.1	疲劳极限与臭氧老化作用	99
5.4.2	G_0 的物理解释	100
5.4.3	弹性体和填料种类的影响	101
5.4.4	氧气的作用	102
5.4.5	频率和温度的影响	103
5.4.6	非松弛影响	103
5.4.7	时间依赖性断裂	104
5.5	臭氧侵蚀	104
5.6	拉伸强度	107
5.7	剪切和压缩中的裂纹扩展	109
5.8	空化现象和相关断裂	111
5.9	结论	113

参考书目	113
问题	116
答案	117
第 6 章 机械疲劳	123
6.1 引言	123
6.2 断裂力学在橡胶机械疲劳中的应用	124
6.3 裂纹的引发与扩展	127
6.3.1 疲劳裂纹引发	127
6.3.2 疲劳寿命与裂纹增长	128
6.3.3 疲劳裂纹扩展: 疲劳裂纹增长特性	129
6.3.4 由裂纹增长特性测定疲劳寿命	131
6.4 疲劳裂纹增长测试方法	133
6.4.1 疲劳裂纹扩展动态撕裂能的实验测定	133
6.4.2 裂纹增长动力学	134
6.4.3 测试条件对疲劳裂纹增长特性和动态疲劳寿命的影响	134
6.4.3.1 波形	134
6.4.3.2 频率	135
6.4.3.3 温度	135
6.4.3.4 静态应变/应力	135
6.5 各种不同材料及其对疲劳裂纹增长的影响	138
6.5.1 补强剂和复合材料模量	138
6.5.2 弹性体类型	140
6.5.3 硫化体系	141
6.6 橡胶在双轴应力下的疲劳和裂纹增长	142
6.7 橡胶复合材料的疲劳	144
6.7.1 金属丝、帘线及其间距对疲劳裂纹扩展的影响	144
6.7.2 最小应变和应力的影响	144
6.7.3 橡胶-钢丝复合材料的 S-N 曲线和疲劳裂纹增长 常数的比较	147
6.7.4 双层橡胶-帘线层状物的疲劳	148
6.8 压缩及剪切作用下的橡胶疲劳	149
6.8.1 压缩裂纹增长	149
6.8.2 剪切裂纹增长	152

6.9	环境因素的影响	152
6.10	弹性组件的模型化及寿命预测	154
6.11	热塑性弹性体的疲劳裂纹扩展	154
6.12	热塑性弹性体的耐久性	155
6.13	结论	156
	致谢	157
	参考文献	157
	问题	159
	答案	160
第7章	耐久性	162
7.1	引言	162
7.2	蠕变、应力松弛和变形	164
7.2.1	蠕变	164
7.2.2	应力松弛	165
7.2.3	物理松弛	165
7.2.4	化学松弛	167
7.2.5	压缩变形和回复	167
7.2.6	实例分析	169
7.3	弹性体在空气中的寿命	170
7.3.1	室温下的耐久性	170
7.3.2	日光和天候	171
7.3.3	臭氧开裂	171
7.3.4	建筑支座：实例研究	172
7.3.4.1	使用100年后的铁路高架桥天然橡胶垫	172
7.3.4.2	使用20年后的层合桥梁支座	173
7.4	低温影响	176
7.4.1	玻璃化转变	176
7.4.2	结晶	176
7.4.3	低温影响的可逆性	177
7.5	高温影响	178
7.6	流体环境的影响	179
7.6.1	水成液	183
7.6.2	烃类液体	186

7.6.3 烃类及其他气体	188
7.6.4 温度和化学侵蚀的影响	192
7.6.5 辐射的影响	193
7.7 橡胶-金属结合的耐久性	194
7.7.1 粘合实验	195
7.7.2 橡胶-金属粘合体系	196
7.7.3 盐水中的耐久性：电化学位的影响	197
7.8 寿命预测方法	200
致谢	202
参考文献	202
问题	203
答案	205
第 8 章 橡胶配件的设计	208
8.1 引言	208
8.2 剪切和压缩支座	210
8.2.1 平面三明治形状	211
问题 8.2.1.1	214
8.2.2 层合支座	215
问题 8.2.2.1	215
8.2.3 管状轴承和支座	216
问题 8.2.3.1	217
问题 8.2.3.2	220
8.2.4 有效形状因子	220
8.3 振动和噪声控制	222
8.3.1 振动背景信息	222
8.3.2 设计要求	224
8.3.3 实例问题	225
问题 8.3.3.1	225
问题 8.3.3.2	228
问题 8.3.3.3	229
8.4 实际设计指导	232
8.5 结论和致谢	233
术语	234

参考文献	235
问题	235
答案	236
第 9 章 有限元分析	239
9.1 引言	239
9.2 材料分类说明	241
9.2.1 金属	241
9.2.2 弹性体	241
9.2.2.1 线性	241
9.2.2.2 非线性	245
9.2.3 弹性体材料模型相关性	253
9.2.3.1 ASTM-412 拉伸相关性	253
9.2.3.2 纯剪切相关性	254
9.2.3.3 双轴相关性	254
9.2.3.4 简单剪切相关性	255
9.3 术语和校正	255
9.3.1 术语	255
9.3.2 FEA 模型的类型	257
9.3.3 模型的构建	257
9.3.4 边界条件	259
9.3.5 解	260
9.3.5.1 正切刚度	260
9.3.5.2 Newton-Raphson 方法	261
9.3.5.3 非线性材料行为	261
9.3.5.4 粘弹性 (见第 4 章)	261
9.3.5.5 模型核实	262
9.3.6 结果	262
9.3.7 线性校正	264
9.3.8 经典的非线性校正	264
9.4 应用举例	266
9.4.1 正驱动调速传动带	266
9.4.2 橡胶护舷	267
9.4.3 橡皮套	269

9.4.4	缓冲器设计	269
9.4.5	层合支座	273
9.4.6	穿孔塞	274
9.4.7	粘接式夹层支架	276
9.4.8	O形圈	277
9.4.9	胶管模型	277
9.4.10	FEA 测评样品带	278
	参考文献	280
第 10 章 测试与规范		283
10.1	引言	283
10.1.1	标准测试方法	283
10.1.2	测试目的	283
10.1.3	测试样片的制备	284
10.1.4	硫化和测试之间的时间	284
10.1.5	本章的范围	285
10.2	设计参数的测量	285
10.2.1	杨氏模量	285
10.2.2	剪切模量	287
10.2.3	蠕变与应力松弛	289
10.2.3.1	蠕变	290
10.2.3.2	应力松弛	291
10.3	质量控制测试	291
10.3.1	硬度	291
10.3.1.1	硬度计	292
10.3.1.2	国际橡胶硬度	293
10.3.2	拉伸性能	294
10.3.3	压缩变形	296
10.3.4	加速老化	297
10.3.4.1	热空气老化	297
10.3.4.2	臭氧龟裂	298
10.3.5	耐液体介质性	299
10.3.5.1	溶胀的影响因素	300
10.3.5.2	溶胀测试	300