橡胶在工程中应用的理论与实践

[英] P.K.弗雷克利
A.R.佩　　恩 著

化学工业出版社

橡胶在工程中
应用的理论与实践

〔英〕P. K. 弗雷克利
A. R. 佩　　恩　著

杜承泽　唐宝华　罗东山　黄庙由　译

杜承泽　校

化学工业出版社

内 容 提 要

本书是橡胶在工程应用方面的理论与实践的权威著作。作者以橡胶最新弹性理论讨论了橡胶粘弹材料的特性及其静态和动态力学性质，并充分阐述了各种工程橡胶制件的受力变形、防震和缓冲原理、设计要求和计算方法。该书详细介绍了橡胶在包装、交通运输、机械设备、仪表、建筑物、桥梁等的防震和缓冲以及流体密封、噪音消减等方面的实际应用。

书中共有表34个、图343幅，内容极为丰富，是橡胶及机械、交通、建筑、国防等行业的工程技术人员和大专院校师生有用的参考书。

P. K. FREAKLEY and A. R. PAYNE
THEORY AND PRACTICE OF ENGINEERING WITH RUBBER
Applied science publishers Ltd.
London, 1978

橡胶在工程中应用的理论与实践
杜承泽 唐宝华 罗东山 黄庙由 译
杜承泽 校

责任编辑：张玉崑
封面设计：季玉芳

*

化学工业出版社出版
（北京和平里七区十六号楼）
顺义县赵全营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

开本850×1168 1/32印张18 5/8字数513千字印数1—4,570
1985年6月北京第1版1985年6月北京第1次印刷
统一书号15063·3682定价3.65元

序

近二十年，橡胶在工程中的应用已有显著的增长，但这种增长与其潜在用途相比还是很不够的。妨碍增长的主要原因是对橡胶的工程性能和依之提出的设计方法的估价不高所致。

保证橡胶合理应用于严格场合下所需的研究工作已大部完成，但尚有待于告知工程师们，并请他们相信这些都是可行的和可靠的。

英国有几个研究中心已进行了先驱工作，已故A. R. Payne博士是其中的先导，他的努力终至写成《工程应用橡胶》(Rubber in Engineering Practice) 一书（与A. B. Davey合著）。A. R. Payne博士是Loughborough工艺大学的工学教授，他临终前曾准备编写本书作为前书的修订版。面临着1976年8月20日这一悲痛日子之后所遗留的颇大困难，现由大学顾问部成员 Philip Freakley 担任新的合编者来完成这项工作是胜任的。

英国 Loughborough大学高聚物工艺学院

院长A. W. Birley

自　　序

在过去十年间，橡胶用于工程设计领域所开展的工作，有两条主要途径。一是按A. B. Davey和A. R. Payne合著《工程应用橡胶》一书的课题的引伸和整理；另一途径是向计算机发展，利用现代数字计算机的能力和速度以获得解决复杂问题的好处。

在本书构思时决定只用那些能用通常的数学方法或能用袖珍计算机处理的方法来叙述（虽然袖珍计算机灵巧程度的不断增加可能模糊了在速度上的分界线），从而为原书写出修订版。这一决定是因大部工程问题无须依靠计算机来解决以及本书是为工程人员从实际和潜在用途方面对工程用橡胶领域应用一般分析技巧给予清楚而准确的评论为根据的。确实，在从事本身远离通常工程的课题的单独课本中，将分析法和计算机法结合在一起会被认为是损害了由材料性能到应用的逻辑推理的要求的。

对工程用橡胶的数字计算机的应用已经扩充了本书详述的一些现有分析方法的能力。现已指出了最好用计算机解决的一些问题，因而希望它们将是不久的将来出版的这类书中的课题。

P. K. Freakley

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

符 号 表

本书所用符号并不完全是始终一致的，任一符号都会表示不止一个量。这是由于书中包括了好多领域，其所采用的符号各不相同。此外，还因所需表示的量范围太广所致。为了折衷，除受上述情况妨碍外，尽量做到始终一致。在这种情况下，偏离下列符号所表示的一般量，书中均清楚地指明，以免混淆。

		单位
a	半径	米(m)
a_f	脆度系数	
a_m	最大允许加速度	米/秒^2，g(ms^{-2}，g)
a_T	松弛时间的比值	
a_0	原横截面积	米^2(m^2)
b	宽度	米(m^2)
c	割口或裂口尺寸	米(m)
c_1	以长度为量纲的常数(A/h)	米 (m)
d	直径	米 (m)
e	抗张应变	
e_c	压缩应变	
e_{cr}	临界扭曲应变	
e_0	原应变	
e'	填充胶料中橡胶相的应变	
g	加速度常数	9.81米/秒^2(9.81ms^{-2})
h	高度	米 (m)
j	$\sqrt{-1}$	
k	转动半径	米 (m)
l	长度	米 (m)
n	循环次数	
n_0	臭氧浓度	

r	半径	米（m）
r_0	裂口增长速度	米/秒(ms^{-1})
s	柔性复合材料的弧长	米（m）
t	时间	秒（s）
t	厚度	米（m）
t_1、t_2、t_3	主应力	牛顿/米^2(Nm^{-2})
v	速度	米/秒(ms^{-1})
x	变形量	米（m）
y	log(应变能)	焦耳（J）
x、y、z	在X、Y和Z轴上的线位移	米(m)
A	横截面积	米^2(m^2)
C	阻尼系数	
C_c	临界阻尼系数	
C_1、C_2	弹性常数	
D	直径	米（m）
E	内能	焦耳（J）
E_0	杨氏模量	牛顿/米^2(Nm^{-2})
E_c	压缩模量	牛顿/米^2(Nm^{-2})
F	力	牛顿（N）
G	剪切模量	牛顿/米^2(Nm^{-2})
G_w^*	随频率而变的复数动剪切模量	牛顿/米^2(Nm^{-2})
G_w'	复数动模量的同相组分	牛顿/米^2(Nm^{-2})
G_w''	复数动模量的异相组分	牛顿/米^2(Nm^{-2})
I	二次转动面积，转动惯量	米^4，公斤米^2(m^4, kgm^2)
J	柔量（模量G的倒数）	米^2/牛顿(m^2/N^{-1})
K	刚度(单位变形的力)	线性 牛顿/米(Nm^{-1}) 转动 牛顿米/弧度($Nm\ rad^{-1}$) 牛顿米/度($Nm\ deg^{-1}$)
L	长度	米（m）
M	质量	千克（kg）
N	疲劳损坏次数	
P	压力	牛顿/米^2(Nm^{-2})
P_c	临界扭曲力	牛顿（N）

Q	热能	焦（J）
R	半径	米（m）
S	形状因数	
T	绝对温度	K
T	透过度	
T_g	玻璃化温度	℃，K
T_s	驻波效应的透过度	
U	应变能	焦耳（J）
V_x	基础速度	米/秒(ms^{-1})
W	功	焦耳（J）
X	填充胶模量对未填充胶模量之比	
Y	动态吸收器的质量比$M_1/(M_1+M_2)$	
Z	频率比(ω/ω_n)	
Z	阻抗	公斤/米^2·秒($kgm^{-2}s^{-1}$)
α	传热系数	
γ	剪切应变（$=\tan\phi$）	
δ	相角（$=\tan^{-1}G''_\omega/G'_\omega$）	度
Δ	具有并列支座系统的相角	度
ζ	临界阻尼分数	
η	粘度	牛顿秒/米^2(Nsm^{-2})
θ	角位移	弧度，度（rad,deg）
λ	伸长比（$=1+e$）	
μ	摩擦系数	
μ^*	动态吸收器的调谐参数	
υ	泊松比	
ρ	密度	千克/米^3
σ	抗张应力	牛顿/米^2
σ_c	压缩应力	牛顿/米^2
τ	剪切应力	牛顿/米^2
ϕ	剪切角	弧度，度(rad,deg)
ψ	名义剪切应变	
ω	角频	秒$^{-1}$
ω_n	自然频率	秒$^{-1}$
ω_c	偶合振动频率	秒$^{-1}$

表中单位按照国际单位制，书中在适当场合采用其倍数量或小数量。

目　　录

第一部分　弹性体材料的性质

第一章　概论及性能综述 …… 1

1.1　“橡胶”的定义 …… 1

1.2　橡胶的分子特性 …… 1

1.3　应力-应变性质的预测 …… 4

1.4　变形的时间、温度和速度间的关系 …… 5

1.5　能量的吸收和损失 …… 6

1.6　其它性质 …… 7

1.7　各种生胶材料 …… 11

1.8　硫化和配合 …… 14

1.9　加工技术 …… 16

第二章　静负荷-变形性质 …… 19

2.1　概述 …… 19

2.2　橡胶弹性的统计理论或动力理论 …… 19

2.3　橡胶弹性的唯象理论 …… 24

2.4　炭黑对泊松比的影响以及E_0、G和K（本体模量）间的关系 …… 26

2.5　蠕变和应力松弛 …… 23

2.6　橡胶的断裂 …… 42

2.7　臭氧的影响 …… 45

第三章　动态力-变形性质 …… 48

3.1　概述 …… 48

3.2　线性粘弹行为 …… 48

3.3　非线性粘弹行为 …… 63

3.4　橡胶件中的能量损耗和生热 …… 73

3.5　橡胶中波的效应 …… 76

3.6　抗张强度和伸长率对拉伸速度、温度和滞后损失的依赖性 …… 79

3.7　循环负荷条件下橡胶的损坏——疲劳 …… 83

第二部分　设计的理论和实践

第四章　橡胶制件在平衡负荷状态下的变形分析 ……96

4.1　变形理论的应用 ……96

4.2　橡胶板的压缩 ……96

4.3　橡胶板的剪切 …… 101

4.4　压缩和剪切的结合 …… 102

4.5　扭转圆盘 …… 105

4.6　轴向剪切的环状橡胶制件 …… 106

4.7　衬套的转动剪切 …… 110

4.8　橡胶衬套的径向压缩 …… 115

4.9　斜向负荷下的橡胶衬套 …… 119

4.10　橡胶压缩试件的弹性稳定性和扭曲 …… 121

4.11　侧面不受限制的复曲面橡胶圈的压缩 …… 127

4.12　长中空圆筒的径向压缩 …… 129

4.13　挂胶辊筒的径向变形 …… 135

4.14　平板间橡胶球的压缩 …… 137

4.15　半圆筒和D断面制件的径向压缩 …… 139

4.16　中空圆筒的轴向压缩 …… 142

4.17　结论 …… 144

第五章　振动的隔离和透过度 …… 147

5.1　概述 …… 147

5.2　简单的单一自由度系统的振动 …… 147

5.3　具有并列支座系统的振动 …… 156

5.4　安装在非刚性基础上的系统的振动 …… 159

5.5　具有两个自由度的系统的振动 …… 163

5.6　多自由度系统的振动 …… 166

5.7　质量分配开的系统的振动 …… 168

5.8　安装在非线性元件上的系统的振动 …… 173

5.9　具有动力吸收器系统的振动 …… 176

5.10　振动波长对橡胶支座的影响 …… 181

第六章　冲击和短暂振动的隔离 …… 186

6.1 概述 …… 186
6.2 简单线性系统的短暂振动 …… 186
6.3 非线性简单系统的短暂振动 …… 194
6.4 支座使用性能的概念 …… 199
6.5 对冲击隔离的实际考虑 …… 206
第七章 橡胶支座的实际设计详图及典型形状 …… 211
7.1 概述 …… 211
7.2 避免橡胶中的应力集中 …… 211
7.3 尺寸公差和间隙 …… 217
7.4 稳定性设计 …… 222
7.5 制造上的设计要求 …… 228
7.6 装配时的注意事项 …… 230
7.7 损坏原因及其解决办法 …… 231
7.8 橡胶支座的一般形式 …… 235
7.9 摘要 …… 263
第八章 橡胶弹簧的实际布置 …… 264
8.1 并列布置 …… 264
8.2 "并列环形"式（传统式） …… 266
8.3 收敛式布置 …… 267
8.4 其它布置形式 …… 272
8.5 支座装置的相对刚度 …… 275
8.6 外部连接 …… 275

第三部分 应 用

第九章 包装用橡胶 …… 278
9.1 概述 …… 278
9.2 运输时的冲击和振动情况 …… 279
9.3 疏松缓冲材料 …… 281
9.4 实体橡胶垫 …… 293
9.5 疏松缓冲垫和胶垫的附加空气阻尼 …… 300
9.6 扭曲杠杆系统 …… 301
9.7 实体橡胶支座 …… 305

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

9.8 束绑系统 …… 315
第十章 挠性联轴节 …… 317
10.1 概述 …… 317
10.2 二质系统的振动 …… 318
10.3 联轴节的规格和选择 …… 320
10.4 动态扭矩-偏转的关系 …… 326
10.5 联轴节的类型 …… 333
第十一章 桥梁支座 …… 353
11.1 概述 …… 353
11.2 桥梁支座的类型 …… 353
11.3 布局设计 …… 360
11.4 桥梁膨胀节 …… 361
11.5 一些安装在橡胶支座上的桥梁实例 …… 361
第十二章 码头和护舷 …… 366
12.1 概述 …… 366
12.2 径向压缩下的管状护舷 …… 366
12.3 轴向压缩下的管状护舷 …… 367
12.4 能扭曲的柱状护舷 …… 368
12.5 Raykin式护舷 …… 368
12.6 充气护舷 …… 369
12.7 剪切式护舷 …… 369
12.8 结论 …… 369
第十三章 橡胶在建筑上的应用 …… 371
13.1 概述 …… 371
13.2 建筑物隔振的概念 …… 372
13.3 建筑地基的勘测 …… 372
13.4 弹性支承的建筑物的结构要求 …… 373
13.5 风力摇摆 …… 374
13.6 支座的设计、安装和防火 …… 374
13.7 服务设施的连接 …… 376
13.8 几个隔振设计的实例 …… 376
13.9 地震的防护 …… 379
第十四章 运输工程 …… 382

14.1 概述 …… 382
14.2 汽车和商用车辆 …… 382
14.3 铁路车辆 …… 401
14.4 海运船舶 …… 411
14.5 飞机 …… 420
第十五章 工业冲击与振动的隔离 …… 433
15.1 概述 …… 433
15.2 仪表和对振动敏感装置的支座 …… 433
15.3 机床支座 …… 435
15.4 往复式机器 …… 438
15.5 金属压型机 …… 439
15.6 注射成型机 …… 440
15.7 锻锤 …… 440
第十六章 噪音控制与结构阻尼 …… 443
16.1 概述 …… 443
16.2 噪音量度及其影响的评定 …… 443
16.3 噪音控制处理的频率相关性 …… 447
16.4 在阻尼嵌板和结构件中的橡胶 …… 448
16.5 高阻尼聚合物材料 …… 470
16.6 噪音控制处理的应用 …… 484
第十七章 橡胶用于流体密封 …… 492
17.1 概述 …… 492
17.2 静态密封 …… 492
17.3 在润滑条件下橡胶的摩擦特性 …… 502
17.4 往复密封性能的研究 …… 507
17.5 旋转轴的杯形密封圈 …… 513
17.6 动态用密封圈 …… 521
第十八章 柔性复合材料制品 …… 528
18.1 概述 …… 528
18.2 隔膜 …… 528
18.3 空气弹簧 …… 533
18.4 气垫船围裙 …… 545
18.5 充气船 …… 548

附录Ⅰ　硫化胶的性质 …… 558
附录Ⅱ　阻尼表示法的注释 …… 563
附录Ⅲ　分贝系统的注释 …… 564
附录Ⅳ　橡胶硬度测试 …… 565
索引 …… 568

第一部分　弹性体材料的性质

第一章　概论及性能综述

1.1　“橡胶”的定义

“橡胶”一词包括了一类独特的材料，其特征是具有在一定条件下产生很大的变形和当变形力除去后几乎立即完全复原的能力。

高弹性并非特定化学物质的特征，而是来源于其特殊的分子结构。起初认为，这种性能只能得自巴西三叶橡胶树，因能擦去铅笔字迹而被命名为“rubber”或“india rubber”的天然胶才有这种特性。后来才把它应用到范围广阔的、化学性质各异的多种物质。

1.2　橡胶的分子特性

橡胶属于高分子材料，是重复单元（链节）构成的长链分子。因此橡胶还引伸出一个名称——弹性体。概括的说，一种属于弹性体的材料需具备：（a）其分子必须很长，而且能够围绕其中相邻两单元的键自由旋转；（b）分子之间必须有一些部位由化学键或由物理缠结（通称横键）相连接，以形成三维分子网；（c）除这些横键外，分子彼此间必须能够易于相对运动——即分子间的吸引力（次价力或范德华力）要小。

橡胶的弹性可用热力学第一定律给出定量的解释。

组成长链分子的原子由于热振动而处于不断运动中，使整个分子呈现不规则的曲折形状，从而使分子两末端距离大大小于伸直的长度。一块未拉伸的橡胶是一团长而不规则的分子的缠结物。当橡胶受拉伸时，其分子在拉伸方向上以不同程度排列成行。热力学定

律表明，有序排列的几率小于原来的任意排列，为保持此定向排列需对其作功。因此橡胶是抵制受伸张的，如除去外力，则将收缩。橡胶在未变形状态有最大的熵，在不受外界约束时，总是回到这一状态，这可用下式表示：

$$dE = dQ + dW \tag{1.1}$$

即内能的变化等于输入的热能加上输入的功。因为：

$$dQ = TdS \tag{1.2}$$

和

$$dW = Fdl \tag{1.3}$$

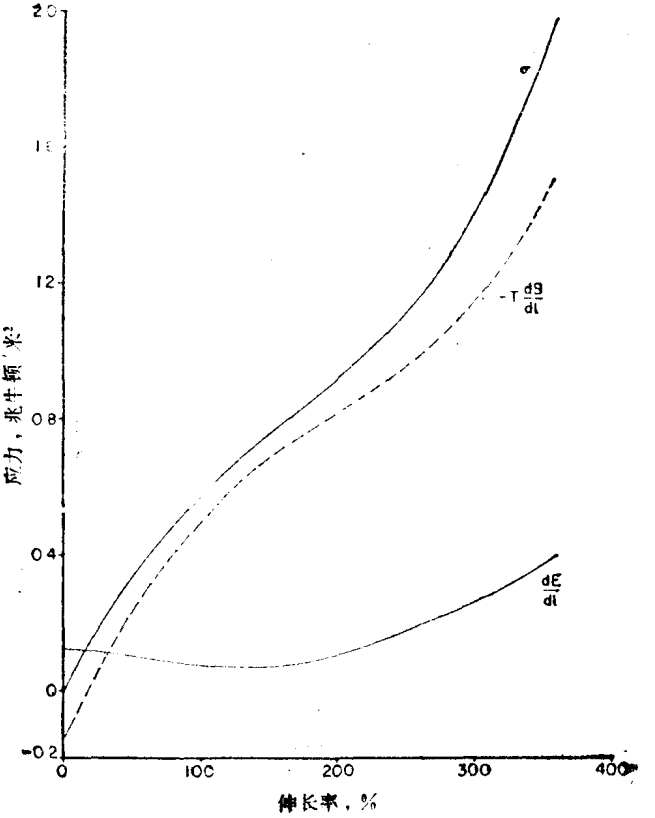

图 1.1　拉伸应力的内能组分和熵组分与伸长率的关系
（引自Anthony、Caston和Guth，1942）

所以：

$$dE = TdS + Fdl$$

移项得：

$$F = \frac{dE}{dl} - T\frac{dS}{dl} \qquad (1.4)$$

式中，dE/dl表示变形时内能的变化率，而T(dS/dl)表示变形时熵的变化率。

假定横断面积为一单位面积，则式（1.4)中的F变为应力σ。图1.1中的应力-应变曲线是一伸长结晶橡胶的典型曲线；其主要组分是由于体系变得有序而引起的熵变。然而，随着分子的被拉直，使得分子链上庞大支链的隔离作用消失，分子间吸引力变得显著起来，从而有助于对进一步变形的抵抗。

式（1.4）中T(dS/dl)项表明应力将随温度的升高而成比例地

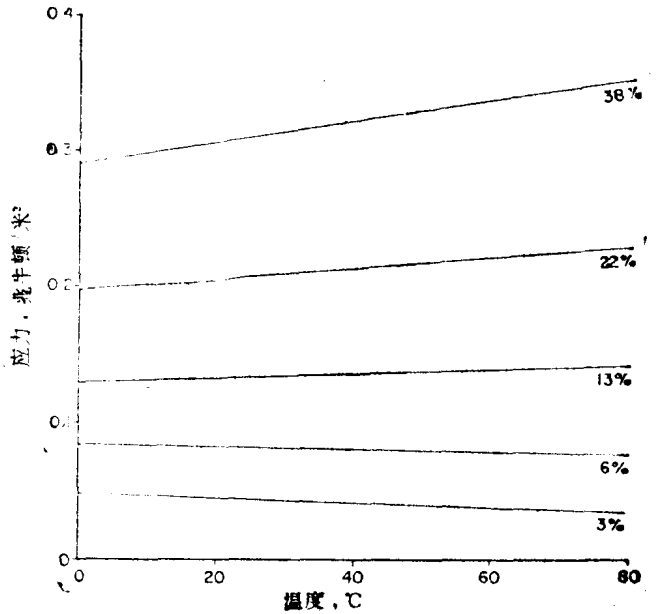

图 1.2 在恒定伸长下应力与温度的关系
（引自Anthony、Caston和Guth，1942）

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com