

工程橡胶制品设计

傅 政 编著

GONGCHENG XIANGJIAO ZHIPIN SHEJI



化学工业出版社

工程橡胶制品设计

傅 政 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书分6章,依据理论与实践相结合的原则,在介绍制品的破坏与寿命相关理论的基础上,对工程技术领域比较典型的橡胶制品,诸如密封制品、防振减噪制品、缓冲制品和动力传递制品等,就其基本设计原理与参数、结构特征与类型、材料设计原则与加工过程要点等方面进行了论述,并简要介绍了制品模具设计。

本书可作高等院校橡胶相关专业的本(专)科学生的教学参考书,或有关科研和工程技术人员的基础性读物。

图书在版编目(CIP)数据

工程橡胶制品设计/傅政编著. —北京:化学工业出版社, 2018.1

ISBN 978-7-122-30953-2

I. ①工… II. ①傅… III. ①橡胶制品-设计
IV. ①TQ336

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第274234号

责任编辑:赵卫娟
责任校对:边涛

装帧设计:王晓宇

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:三河市延风印装有限公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张10 $\frac{1}{4}$ 字数160千字 2018年2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:68.00元

版权所有 违者必究

橡胶制品种类规格繁多, 据统计世界橡胶制品的品种规格总数约有 10 万种之多, 其中大多数是在工程技术领域中应用的工程橡胶制品。橡胶材料具有高弹性和高阻尼性的特异性能, 使橡胶制品作为配件、部件或零件在工程技术领域得到广泛的应用。工程橡胶制品的设计应用往往会给工程技术中的难题提供一种简单而巧妙的解决方案, 例如可传递动力的橡胶弹簧在直升飞机中能在各个方向上提供特定的刚度, 允许飞机桨叶变化倾斜方向。众所周知的美国“挑战者”号航天飞机因密封圈失效而发生故障, 导致世界航天史上重大的悲惨事件, 令人唏嘘。由此可见, 工程橡胶制品在汽车、机车车辆、机械、航空航天、核能、建筑、石油与海洋工程以及电子信息等高端产业中起着“千钧重负”不可替代的作用。工程橡胶制品具有复杂性和多样性的特征。复杂性体现在制品结构与性能方面, 是材料学、化学、力学、摩擦与润滑等多学科的交叉与综合, 其结构具有细观和宏观复合结构的特征, 涉及结构分析、形变与强度、加工与使用过程中物理和化学变化、新的成型理论与技术以及制品的失效评价等多方面。多样性体现在原材料的种类繁多、制品的种类规格迥异、加工技术与工艺千差万别等, 其应用几乎遍及国民经济的各个部门。若从制品的形状大小和尺寸精度角度, 大型工程橡胶制品的质量有的可以按千克计量, 而小型产品质量有的仅以克计量且精度可达 $10\mu\text{m}$ 。正是这种复杂性和多样性特征, 随着科技的进步, 形成了橡胶制品的基础研究、应用研究、技术开发与产品制造紧密结合的学科体系, 借此提高制品的技术含量和更新换代, 以达到预测、控制和优化制品的使用性能。

18 世纪末蒸汽机的出现产生了第一次工业革命, 经过工业经济时代的发展, 工程橡胶制品行业经历了形成与发展的历史时期。特别是 20 世纪后期, 世界高新技术的重大发展, 新材料、新工艺不断涌现, 促使工程橡胶制品跨入高科技领域, 向着精细化、高性能和功能化方向发展。目前我国合成橡胶的产量、橡胶消耗量和橡胶制品的产量等各项指标均居世界首位, 成为名副其实的橡胶工业大国, 但是包括工程橡胶制品在内的各类产品在原材料质量、技术与装备、生产效率与经济效益和高新技术的应用等方面与先进国家仍有较大差距。20 世纪末以来, 世界制造业和工程技术领域进入了数字化

制造及新材料新技术为代表的新的工业革命时代，对橡胶制品提出了更加苛刻的性能要求。我国的橡胶工业只有依靠科技进步和技术创新，充分利用高新技术向技术密集型生产转变，不断提高制品的高科技含量，才能从根本上提升产品的市场竞争实力。

编者在多年教学工作的基础上整理并收集了近年来相关著作与文献资料编撰了此书，旨在为读者提供一本关于工程橡胶制品方面的基础性读物，力求理论与实践并重，较系统地阐述工程橡胶制品的设计理论与技术，注重出现的新材料和新技术。本书在介绍制品破坏与寿命相关理论的基础上，主要对比较典型的工程橡胶制品，如密封制品、防振减噪制品、缓冲制品和动力传递制品，就其基本设计原理、结构特征、材料设计原则与加工过程要点等方面进行重点介绍，希望通过这些典型的制品达到“触类旁通”的效果，为其他工程制品的设计提供可借鉴的理论与方法，并在一定程度上反映当前工程橡胶制品领域的水平和概貌。本书是基础性读物，适合高等院校相关专业的高年级学生和研究生作为教学参考书或者相关工程技术人员和管理人员参考阅读。

本书编撰过程中恰逢中国橡胶工业百年华诞，从广州兄弟橡胶公司(1915年)创立至今，橡胶工业经过曲折的发展历程，取得令人瞩目的业绩，在此祝愿我国早日由橡胶工业大国跃升为世界橡胶工业强国。

由于编者水平有限，纰漏在所难免，恳请读者批评指正。

在此，感谢青岛科技大学高分子科学与工程学院同仁的鼓励和帮助，感谢化学工业出版社的关怀与支持。

编者

2017年10月于青岛

第 1 章 制品的破坏与寿命 001

1.1 引言	001
1.2 制品的弹性形变	001
1.2.1 线性弹性形变	002
1.2.2 非线性弹性形变	007
1.3 强度性能破坏	009
1.3.1 断裂能	009
1.3.2 影响断裂能的因素	010
1.4 疲劳性能破坏	012
1.4.1 疲劳裂纹的引发与扩展	012
1.4.2 影响疲劳性能的因素	014
1.5 耐久性能破坏	015
1.5.1 力学松弛与化学松弛	015
1.5.2 老化作用	016
1.5.3 工作介质	017
1.5.4 骨架材料的黏合与失效	023
1.6 制品寿命的评估	027

第 2 章 密封制品 029

2.1 引言	029
2.2 O 形密封圈	030
2.2.1 结构特征与密封原理	030
2.2.2 密封装置设计要素	031
2.2.3 异形截面 O 形圈	033
2.3 油封	034
2.3.1 结构特征与密封原理	034
2.3.2 结构设计要素	036
2.4 唇形密封圈	039

2.4.1	Y形密封圈	039
2.4.2	V形密封圈	041
2.5	其他密封制品	042
2.6	胶料配方设计	043
2.6.1	胶料性能要求	043
2.6.2	胶料配方解析与示例	048
2.7	加工过程要点	053
2.7.1	混炼	054
2.7.2	成型和骨架的黏合处理	055
2.7.3	硫化	056
2.7.4	后加工	057

第3章 防振减噪制品 058

3.1	引言	058
3.2	基本设计原理	059
3.2.1	阻尼振动系统	059
3.2.2	阻尼	060
3.3	橡胶隔振器	062
3.3.1	结构特征与类型	062
3.3.2	主要设计参数与步骤	067
3.4	橡胶支座	070
3.4.1	结构特征与类型	070
3.4.2	主要设计参数	073
3.5	胶料配方设计原则	076
3.6	加工过程要点	081

第4章 缓冲减振制品 084

4.1	引言	084
4.2	橡胶空气弹簧	084
4.2.1	结构特征与类型	084
4.2.2	主要设计参数	088
4.2.3	胶料配方设计原则	090

4.2.4 加工过程要点	092
4.3 橡胶护舷	094
4.3.1 结构特征与类型	094
4.3.2 胶料配方设计原则	099
4.3.3 加工过程要点	100
4.4 橡胶弹性联轴器	101

第5章 动力传递制品 107

5.1 引言	107
5.2 平型传动带	108
5.2.1 结构特征与类型	108
5.2.2 材料设计原则	111
5.2.3 加工过程要点	113
5.3 V型传动带	116
5.3.1 结构特征与类型	116
5.3.2 材料设计原则	122
5.3.3 加工过程要点	124
5.4 同步传动带	126
5.4.1 梯形齿同步带	126
5.4.2 曲线齿同步带	128
5.4.3 材料设计与加工过程要点	130
5.5 液压胶管	132
5.5.1 结构特征与类型	132
5.5.2 设计参数与计算	134
5.5.3 材料设计原则	136
5.5.4 加工过程要点	139

第6章 制品模具设计 144

6.1 引言	144
6.2 模具种类与结构特征	144
6.2.1 压制模具	144
6.2.2 压铸模具	145

6.2.3 注射模具	146
6.3 模具设计要素	147
6.3.1 模具材质及热处理	148
6.3.2 胶料收缩率的确定	148
6.3.3 模具各部位尺寸与配合	150
6.4 模具的维护清洗	153
6.4.1 模腔表面的污染侵蚀	153
6.4.2 模腔的维护与清洗	153
参考文献	156

第 1 章

制品的破坏与寿命

1.1 引言

橡胶制品都是在特定的环境和载荷下作用，会涉及形变、强度、破坏及寿命的问题。形变是指线性和非线性形变；强度是指制品抵抗变形或破损的能力；破坏是泛指制品使用中产生疲劳、磨损、老化、断裂等物理和化学因素造成制品的结构（或材料）损坏而失效的行为。进行制品设计时，须评估其强度和破坏行为，了解对力学加载的响应以及对温度和时间的依赖性等。在此基础上，评价制品使用中的性能劣化、失效和损坏性断裂，从而确保制品服役中的可靠性、稳定性及耐久性，达到其设计寿命的目标。

制品的破坏是非常复杂的，是由呈弥散分布的微观（ 10^{-10} m 量级）和细观（ 10^{-6} m 量级）的缺陷与损伤在使用中发展与汇合成宏观破损或裂纹，进而失效破坏或断裂的过程，是多种破坏机制相耦合而发生或发展的不可逆耗能过程。研究表明，在整个破坏过程中，微观和细观缺陷与损伤的发展演变过程占制品寿命的 80%~90%，而宏观裂纹扩展至破坏的演变过程只占制品寿命的 10%~20%。

影响制品寿命的因素主要可归纳为强度性能破坏、疲劳性能破坏和耐久性能破坏。

1.2 制品的弹性形变

橡胶的高弹性使制品具有承受较大弹性形变的能力，在实际应用中可产生线性弹性形变（小形变）和非线性弹性形变（大形变）。

1.2.1 线性弹性形变

制品由于载荷而产生形变，所以应力和应变是伴生的，二者间的关系很复杂。只有理想弹性体，应力与应变之间呈线性关系，理想弹性体是均匀的、各向同性的，其弹性模量为常数。橡胶制品在拉伸或者压缩形变小于 30%、剪切应变小于 75% 的条件下，均可近似看作线性弹性体。

制品设计中常用模量、刚度和硬度表征其弹性形变能力的大小。

(1) 模量

线性弹性体的模量是材料常数，表征了材料抗抵变形能力的大小，模量值越大，越不易变形，定义为：

$$\text{模量} = \frac{\text{应力}}{\text{应变}}$$

其单位是 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ (Pa)。图 1-1 显示了三种简单力学形变的弹性模量，分别称为拉伸模量（杨氏模量） E 、剪切模量 G 和本体模量（压缩模量） K 。

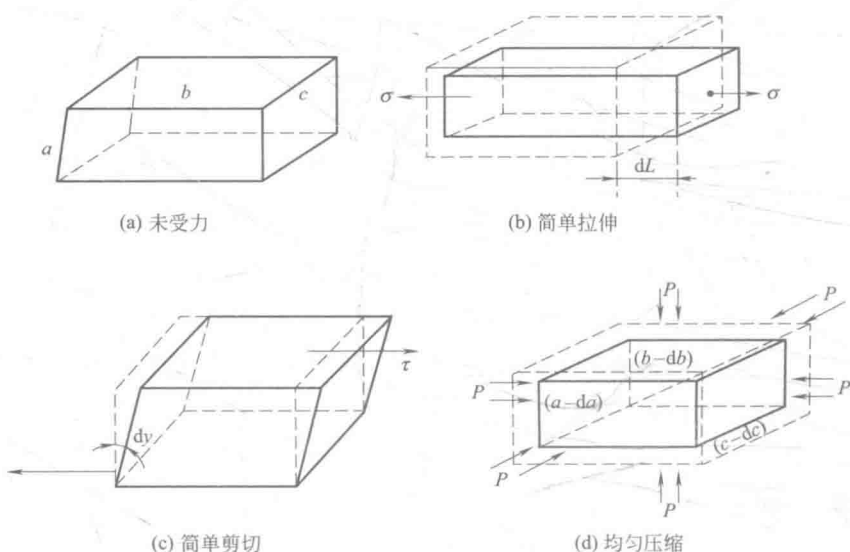


图 1-1 力学形变的类型

对于各向同性材料, 上述三种模量之间的关系为:

$$E=2G(1+\mu)=3M(1-2\mu) \quad (1-1)$$

式中, μ 为泊松比, 定义为拉伸时试样的横向收缩应变与纵向应变之比, μ 值在 0~0.5 范围内变化。橡胶材料的 $\mu=0.499$, 故 $E\approx 3G$, $M\approx\infty$, 即橡胶材料线性弹性形变时, 不发生体积形变, 具有不可压缩性。

由橡胶弹性分子理论, 可推导出剪切模量为:

$$G=kT\frac{\rho}{M_c} \quad (1-2)$$

式中, ρ 为试样密度; M_c 为网链的数均分子量; k 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度。

可见, 橡胶材料的模量有明显的物理意义, 与单位体积试样中的网链数有关。模量与热力学温度成正比, 与网链的分子量成反比, 反映出网链热运动和硫化结构的特征。 M_c 值减小, 表明交联密度增大, 网链柔性下降, 故模量增大, 材料变硬, 甚至失去高弹性能。一般情况下, M_c 值在 2000~100000。

(2) 刚度

工程制品设计中常用到参数刚度 (K), 刚度 (亦称回弹速率) 定义为单位变形 (位移) 所需要的力, 单位为 $N\cdot m^{-1}$, 即:

$$\text{刚度} = \frac{\text{作用力}}{\text{形变}}$$

K 值与制品的应力应变状态和模量有关, 因此可以把力、面积、厚度和材料模量等参数与 K 关联起来, 进行设计计算。

$$\text{拉伸时} \quad K = \frac{AE}{h} \quad (1-3)$$

$$\text{剪切时} \quad K = \frac{AG}{h} \quad (1-4)$$

$$\text{压缩时} \quad K = \frac{AE_c}{h} \quad (1-5)$$

式中, A 为有效载荷面积, m^2 ; h 为未变形弹性体的厚度, m ; E 、 G 、 E_c 分别为杨氏模量、剪切模量和有效压缩模量, kPa 。

实际应用中, 压缩条件下制品的刚度计算比较复杂, 如图 1-2

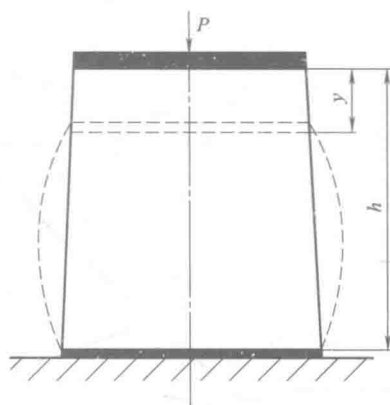


图 1-2 受压缩橡胶件的变形

所示。制品在压力 P 作用下产生鼓形应变，表明垂直于轴线的各截面上的横向应变并不相同，由于橡胶的不可压缩性，在厚度方向的 $1/2$ 处变形最大。有效压缩模量 E_c 亦称表观弹性模量，是材料特性和制品几何形状的函数，可由经验公式近似求算：

$$E_c = E(1 + 2\Phi S^2) \quad (1-6)$$

式中， E 为杨氏模量； Φ 为压缩系数，是由经验决定的材料参数，见表 1-1； S 为形状因子，取决于制品的几何形状，表 1-2 列出了简单几何形状的 S 的计算公式。

表 1-1 Φ 值与模量关系

剪切模量 G/kPa	杨氏模量 E/kPa	材料压缩系数 Φ
296	896	0.93
365	1158	0.89
441	1469	0.85
524	1765	0.80
621	2137	0.73
793	3172	0.64
1034	4344	0.57
1344	5723	0.54
1689	7170	0.53
2186	9239	0.52

表 1-2 S 值的计算公式

名 称	S	注解
圆柱体	$d/4h$	d 表示直径
长方体	$ab/2h (a+b)$	d' 表示内径
正方体	$a/4h$	a 表示短边
圆筒体	$(d-d')/4h$	b 表示长边
		h 表示厚度

实验证明，制品动态条件下的刚度是静态刚度的 1~2.5 倍。

以上所述适用于简单几何形状制品刚度值的近似估算。若要估算更复杂几何形状或非线性特性，须修正基本公式，借助有关文献手册或有限元分析法确定制品的刚度。

(3) 硬度

硬度是橡胶制品的重要参数。ASTM 将硬度定义为在规定的测试条件下橡胶材料的耐压陷性能。Gent 弹性经典理论推导出硬度计针尖的刺入深度与模量间的理论关系式：

$$\frac{F}{E} = 1.78 p^{1.5} r^{0.5} \quad (1-7)$$

式中， F 为针尖力，N； E 为杨氏模量，MPa； p 为刺入深度，mm； r 为针尖半径，mm。

应指出，式 (1-7) 仅描述了硬度与杨氏模量间的近似关系，说明硬度与模量间有较好的相关性，但不宜简单地计算确定 E 值，会产生较大误差。图 1-3 实验数据反映出 NR 和 NBR 两种橡胶的弹性模量和硬度的关系。

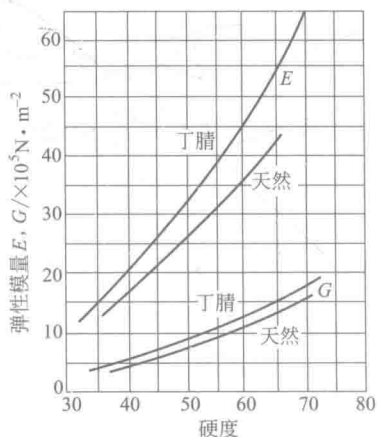


图 1-3 弹性模量与硬度的关系

橡胶材料的硬度分为邵尔硬度和国际橡胶硬度（IRHD）两种，在邵尔 A 和 IRHD 等级中规定：模量值为 0 时硬度为 0，硬度值范围为 0~100，模量无限大时硬度是 100，表 1-3 是这两种硬度指标与对应的杨氏模量值。

表 1-3 常用硬度标度与杨氏模量之间的关系

硬度/度	E (邵尔)/MPa	E (IRHD)/MPa	硬度/度	E (邵尔)/MPa	E (IRHD)/MPa
10	0.4	0.3	60	3.8	3.6
20	0.7	0.6	70	6	5.5
30	1.2	1.0	80	10	9.5
40	1.7	1.5	90	23	20
50	2.5	2.3			

橡胶工业中往往把制品对模量和刚度的要求，转化为材料的硬度指标。实际应用中，胶料的模量有一个很宽的数量范围，纯胶的 G 值为 0.2~0.8MPa，加入补强剂可达到 2~5MPa，同时会出现应力软化效应，如图 1-4 所示，这种不确定性对制品的刚度有重要的影响。因此设计制品时，应对硬度要求确定一个合理的误差范围，特别是高填充制品的应力软化效应较为明显。一般情况下，软质制品硬度值与设计硬度值之间的误差范围控制在 10% 以内；硬质制品的误差范围控制在 25% 以内。

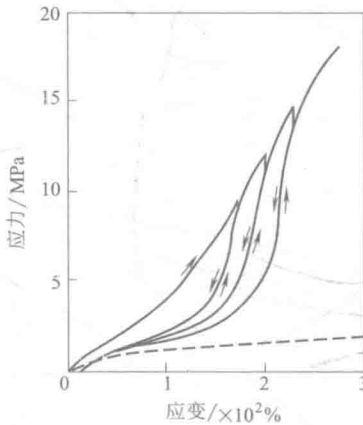


图 1-4 高填充橡胶的应力软化

1.2.2 非线性弹性形变

非线性弹性形变包括较大形变（有限形变）和大形变两种情况。图 1-5 是天然橡胶的应力-应变曲线，其中理论曲线为线性弹性。可以看出弹性形变较小时，拉伸比 $\lambda < 1.5$ ，实验值与理论值相近，反映了交联橡胶小形变时应力-应变的线性关系；在 $\lambda = 1.5 \sim 5$ 时，理论值高于实验值，特别当 $\lambda > 5$ 时实验值大大超过理论值，说明较大形变和大形变下，其应力-应变呈非线性关系。

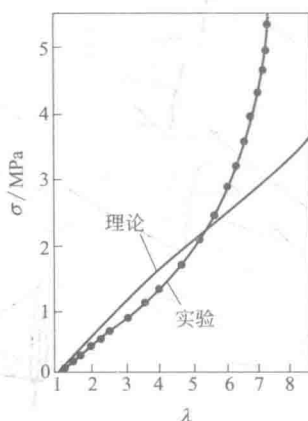


图 1-5 天然橡胶的应力-应变曲线

(1) 较大形变下的应力-应变

已知 $\lambda = 1.5 \sim 5$ 时，应力-应变呈非线性关系，理论上称为较大形变或有限形变。制品在较大形变下，仅仅用弹性模量已经不能描述其应力-应变关系，制品的形变受其结构和形状的限制较为明显。

目前工程上用唯象学理论描述较大形变下的应力-应变关系。假设物体的形变是均匀纯形变，是各向同性的，是不可压缩的，形变时体积不变。当物体形变时，外力对物体做功的能量储存于物体中作为弹性复原的能量，称为弹性应变能（即弹性储能），通常用应变能 W （单位体积内储存的应变能）的函数表示，函数 W 是标量，与坐标系的选择无关，即 W 对坐标变换是不变量，可表示为应变不变量 (I) 的函数。据此，Rivlin 提出包含两个不变量函数的交联橡胶的 W 函数式：

$$W = c_1(I_1 - 3) + c_2(I_2 - 3) \quad (1-8)$$

式中, c_1 和 c_2 是材料参数; $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$; $I_2 = (\lambda_1\lambda_2)^2 + (\lambda_2\lambda_3)^2 + (\lambda_3\lambda_1)^2$ 。

对于简单拉伸, 如图 1-6 所示, 根据 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ 和 $dW = \sigma d\lambda$ 关系, 推导出 Rivlin 方程:

$$\sigma = 2(c_1 + c_2\lambda^{-1})(\lambda - \lambda^{-2}) \quad (1-9)$$

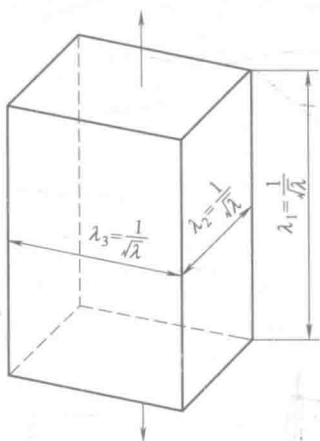


图 1-6 简单拉伸时的主拉伸比

如果把实验结果 $\sigma/2(\lambda - \lambda^{-2})$ 对 λ^{-1} 作图则得到截距为 c_1 、斜率为 c_2 的直线。实验证明, 式 (1-9) 在一般情况下可近似描述较大形变下制品的应力-应变关系。

(2) 大形变下的应力-应变

实验证实天然橡胶的伸张比 $\lambda > 5$ 时, 产生大形变。随 λ 值增大体积明显减小, 呈现明显的可压缩性。同时, 由于橡胶分子链的取向或结晶, 呈现明显的各向异性, 形变是不均匀的。因此, 橡胶制品的大形变下的应力-应变关系是复杂的非线性弹性力学问题。目前研究工作集中在两个方面: 一方面是对 Rivlin 公式进行扩展修正, 提出含有高阶项的幂指数应变能函数; 另一方面是研究其他应变能函数在橡胶制品中的应用。Yeoh 根据实验提出了只含有应变不变量 I_1 的应变能函数:

$$W = c_{11}I_1 + c_{12}I_1^2 + c_{13}I_1^3 \quad (1-10)$$