

橡胶密封

〔苏〕 Б. X. 阿弗鲁辛科 著

РЕЗИНОВЫЕ
УПЛОТНИТЕЛИ

机械工业出版社

橡 胶 密 封

〔苏〕B.X.阿弗鲁辛科 著

刘耀祖 译

王天佑 校



机 械 工 业 出 版 社

本书探讨了各种橡胶密封件,介绍了橡胶密封件的结构,计算及其寿命的测定方法,并探讨了用于真空和腐蚀性液体介质的密封件选择上的特点。

本书可供从事密封件设计、制造、使用的工程技术人员和科学研究工作者参考,还可作为高等院校、中等技术学校工业橡胶件设计计算专业的教材。

РЕЗИНОВЫЕ УПЛОТНИТЕЛИ

Б. Х. Аврущенко
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»

Ленинградское отделение. 1978

* * *

橡 胶 密 封

〔苏〕 Б. Х. 弗鲁辛科 著

刘耀祖 译

王天佑 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $5 \frac{3}{8}$ ·字数 112 千字

1983 年 10 月北京第一版·1983 年 10 月北京第一次印刷

印数 0,001—8,400·定价 0.70 元

*

统一书号: 15033·5582

译者的话

在机器制造业中，为了保证产品的密封性，应用了不同材质的各种密封元件，其中尤以各种橡胶密封件应用最广，在飞机、船舶、汽车、拖拉机、泵、管道管件、各种控制测量仪表和其他一切工业装置的结构中，几乎到处可见。在这些机械设备中，如果密封件选择不当，密封性能差，就会发生三漏（漏水，漏气，漏油），这不仅严重影响其运转性能，往往还会造成很大浪费，污染环境，甚至酿成重大事故，危及人身安全。

所以机械设备的密封性是一个有关国计民生的重大问题，不容忽视。

但国内由于对橡胶密封的工作机理、运转中各种因素的影响，尚缺乏全面细致的研究，在橡胶密封的设计、计算和测试上，采用的许多方法和计算公式中忽略了一些对橡胶密封性能有重大影响的因素，致使生产出来的密封件质量不高，寿命不长，满足不了工业发展上越来越高的要求。为此，我们翻译了苏联 1978 年出版的这本《橡胶密封》，借鉴国外取得的科学成果为我所用。

本书对橡胶密封的分类及其设计、寿命的计算和测定方法都作了详尽探讨，并列出了大量计算公式和简化计算手续的一系列曲线图表，可供从事密封设计、制造和操作使用的工程技术人员和科学研究工作者参考，还可作为高等院校、中等技术学校工业橡胶件设计计算专业教材之用。

1982.5

前 言

在现代化机器、设备和各种仪器中,广泛地应用了气压、液压和真空系统,这些系统的功能好坏,都与不同介质或不同压力的腔室密封的可靠性有密切关系。

人们采用由金属、塑料、皮革、橡胶以及其他材料制造的各种密封件,作为密封元件使用。橡胶具备了作密封件必不可缺少的许多特性,如弹性好,寿命长,耐腐蚀性好,制造简单、经济,因而是最理想的密封材料之一。

橡胶密封件在现代化飞机、船舶、汽车和拖拉机、泵和管道配件、检测仪表等的结构上,占据了牢靠的地位。

随着橡胶密封件的广泛使用,对其材质和结构两方面的运转指标和性能指标,又提出了新的更高的要求。人们要求橡胶密封件与不同的介质接触时(从惰性气体到高浓酸、制冷剂 and 载热剂、油类及燃料),温度在 -60° 到 $+300^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,从几千个大气压到高真空下,受到摩擦作用、冲击作用和振动作用时,都能保持其工作能力不变。橡胶密封件应不会引起与其接触的材料发生腐蚀;应不会分解出对人体有害的物质。橡胶密封件的工作寿命,用于设备上可运转几十年、用于汽车上可行驶几十万公里、可经受多变负荷几百万次。

象这样的一套要求,并非一种材料、一个万能密封结构就能满足得了。因此,出现了大量的各种品种的橡胶和配合剂^[1],供橡胶工业制造各种密封件;工业橡胶制品厂制造了名目更为繁多的各种类型、不同规格的密封件和组合件。

橡胶密封的生产和应用，已有一百多年的历史，然而对其设计原则开始深入研究和科学探讨，只不过是二、三十年前的事情。即使是现在，密封上的好多实际问题，也还得通过长期的以致延缓整个机器研制速度的繁重实验才能解决。

此外，国内实践中积累起来的资料，尚未得到应有的综合整理，系统性差，难以在新的设计上参考应用。发表的一些文献〔2~6〕，其内容多限于各种类型橡胶密封件的设计、计算法和应用条件方面的一些简略资料。

一个机械设计人员在设计密封结构时，照例总是想选用一个在以前的设计中经过考验并在工业上成批生产的某一种橡胶密封件。在这种情况下，就往往容易忽略与之配合的零件、机械运动学上，被密封压力的大小等因素的变化，乍看起来即使是极微小的差异，也是不容忽视的。

毫无疑问，在任何一个密封结构的密封中，起主要作用的是装在这一密封结构中的橡胶元件。它要承受压力、介质和温度以及各种载荷的作用。但是，橡胶元件是与密封结构的其它零件直接接触起作用的。因此，它们结构上的匹配是否合适，关系到整个系统的工作能力。同一个橡胶密封件，视其应用的具体条件的不同，对配合件的设计需要区别对待，不能硬套。可是机械设计人员和介绍密封装置的编著者，却往往忽视了这一点。

另一方面，由于材料、结构规格的统一化和标准化不够，致使密封件的类型五花八门，密封件的安装部位和使用条件也多不相同，这就给密封件的选择上造成了困难。规格统一化不够的原因之一是密封件不易分类。这就需要定出几个据以进行其分类的重要特征：功用、结构、材质、被密封介质的种类、制造方法等等。

按功能特征，密封件可以分为：

1. 用于静密封结构的密封件：这种密封件工作时受到轴向与径向压缩，或径向拉伸。
2. 用于动密封结构的密封件：被密封的机件做往复运动、旋转运动、旋转-摆动和螺旋运动。
3. 间歇作用的密封件。

按结构特征，各式各样的密封件可以分为下列几个主要类型：

1. 环形密封垫圈：这种密封垫圈的截面可以是矩形、方形、圆形、椭圆形、梯形、T形、X形、Π形和其他等形状。
2. 周边形状复杂的各种截面的密封垫：其周边形状可以是矩形、椭圆形、梯形和三角形等。
3. V形密封碗。
4. 人字形密封件。
5. 金属骨架密封碗(油封)。
6. 橡胶金属阀。
7. 隔膜密封。
8. 管状密封件。
9. 密封片，密封盘。

按被密封介质的种类，密封件可分为：

1. 气态介质的密封件。
2. 液态介质的密封件(物理性腐蚀介质和化学性腐蚀介质)。
3. 真空密封件。

在以后介绍密封材料时，将利用上述分类法，对一些主要类型的橡胶密封件的设计、计算及其应用上的一般特征和个别情况进行探讨。

符 号 含 义

第一章

- $\epsilon_{\text{эл}}$ ——高弹性变形
- $\epsilon_{\text{пл}}$ ——塑性变形
- $\epsilon_{\text{уп}}$ ——弹性变形
- S_{ϕ} ——实际接触面积
- S_n ——名义接触面积
- v_n ——橡胶复原速度
- R_z ——表示加工面光洁度的不平度平均高度
- $F_{\text{тр}}$ ——摩擦力
- $\mu_{\text{тр}}$ ——摩擦系数
- $P_{\text{кр}}$ ——临界压力
- $\sigma_{\text{ж}}$ ——液体压强
- $\sigma_{\text{а}}$ ——空气压强
- $v_{\text{ж-а}}$ ——液体表面张力
- K_n ——橡胶复原系数
- σ_{yc} ——收缩应力
- $K''_{\text{ж}}$ ——橡胶低温下刚性增长系数
- E_3 ——橡胶低温下模量

第二章

- $\epsilon_{\text{ост}}$ ——残留变形
- $\epsilon_{\text{эл}}$ ——高弹性变形
- K_c ——老化系数
- $K'_{\text{ж}}$ ——橡胶刚性增长系数
- L_c ——橡胶老化后刚性
- Q_c ——高温下橡胶老化后的试样能经受的载荷
- $K_{\text{жж}}$ ——刚性增长综合系数
- $Q_{\text{с.с}}$ ——低温时加到老化试样上的负荷

X

Q_s ——低温时加到试样上的负荷

E_c ——橡胶老化后模量

$E_{s,c}$ ——橡胶老化后 低温下模量

$\left(\frac{\tau_{t_1}}{\tau_{t_2}}\right)_{cp}$ —— t_1 和 t_2 温度下达到同一相对残留变形值的平均时间比

U_{cp} ——常数 U 平均值

Z_{ti} ——与 t_1 温度相应的时间轴比例尺为 Z_n

H ——相对残留变形值

β ——相对残留弹性

a ——松弛过程速度常数

K ——橡胶耐久系数

第三章

h_{min} ——密封垫圈变形后最小高度，即最小密封槽高

ε_{max} ——最大变形量

h_{max} ——密封垫圈变形后最大高度，即最大密封槽高

ε_{min} ——最小变形量

E_{np} ——橡胶密封垫圈的模量

P_{xp} ——密封垫发生移动时的极限应力

V_{rn} ——密封槽容积

V_{np} ——密封垫容积

$\tau_{общ}$ ——总工作时间

$\tau_{кв}$ ——换算后相当某一温度下的工作时间

$H_{пасч}$ ——打上保险系数后的残留变形值

第四章

ε'_{max} ——O形密封圈最大变形量

ε'_{min} ——O形密封圈最小变形量

S_{nn} ——O形密封圈未变形前截面积

S_n ——O形密封圈变形后的截面积

σ_{omax} ——轴向变形时最大应力

σ_{maxc}^* ——径向变形时最大应力

$F_{\text{к}}$ ——接触力

D_{cp} ——平均直径

$v_{\text{к}}$ ——被密封面的运动速度

$\Delta\sigma(t)_{\text{pen}}$ ——因松弛引起应力下降量

$\Delta\sigma(t)_{\text{нзн}}$ ——因磨损引起应力下降量

$\sigma_{\text{кп}}$ ——临界接触应力

第五章

$D_{\text{н}}$ ——外径

$D_{\text{в}}$ ——内径

$D_{\text{н}}$ ——缸体直径

$D_{\text{м}}$ ——拉杆直径

$F_{\text{к}}$ ——单位长度接触力

σ_{maxc} ——最大应力

$h_{\text{нп}}$ ——密封碗顺行时最大接触应力点处介质膜厚度

$h_{\text{ог}}$ ——密封碗倒行时最大接触应力点处介质膜厚度

σ_{ict} ——静止时某一 i 点上接触应力值

σ_{fpen} ——换向时某一 i 点上接触应力值

$|v_i|$ ——换向运动时某一 i 处接触应力相对变化

$F_{\text{к.кп}}$ ——单位长度接触力达到临界值

$\sigma_{\text{ст. maxc}}$ ——静止时最大接触应力

$\sigma_{\text{pen maxc}}$ ——换向时最大接触应力

$\beta_{\text{pacч}}$ ——相对残留弹性计算值

$\beta_{\text{н}}$ ——换向运动时的相对残留弹性

第六章

$v_{\text{нат}}$ ——介质通过密封件的泄漏速度

$K_{\text{н}}$ ——克努森数，衡量设备中气体流动状况的一个主要标准

$v_{\text{эфф}}$ ——有效抽气速率

$Q_{\text{pacч}}$ ——气体计算流量

Ⅷ

$Q_{\text{гасп}}$ ——气体实验流量

第八章

S_{np} ——纵截面

$e_{\text{гон}}$ ——允许变形量

$r_{\text{нап}}$ ——外圆半径

$r_{\text{вн}}$ ——内圆半径

$l_{\text{к}}$ ——管囊长度

$D_{\text{к}}$ ——管囊直径

第九章

$S_{\text{эфф}}$ ——有效面积

$V_{\text{эфф}}$ ——有效容积

W ——隔膜挠曲度

P_{w} ——达到挠曲度 W 所需之压力

$P_{\text{н}}$ ——隔膜与割刀接触时的压力

$P_{\text{р}}$ ——隔膜割破时的压力

第十章

$P_{\text{отж}}$ ——使密封件与被密封面产生间隙之挤压压力

$P_{\text{комп}}$ ——密封件与被密封面之间间隙封闭，介质停止泄漏时之压力，又称补偿压力

目 录

译者的话

前言

符号含义

第一章 橡胶密封件的工作机理	1
一、密封原理	1
二、密封结构类型的影响	5
三、被密封表面形态的影响	7
四、压力的影响	11
五、被密封介质的影响	13
六、低温的影响	16
七、密封件的一般设计原则	20
第二章 橡胶密封件的寿命	22
一、确定寿命的理论基础	22
二、运转(使用)因素的影响	25
三、残留变形累积的“综合曲线”预测法	33
四、用应力松弛曲线图分析预测应力松弛的方法	38
五、各种橡胶长期应力作用下寿命、耐久性的快速 预测法	40
六、密封件的强化加速试验	43
第三章 矩形密封垫圈	45
一、密封结构的类型及其计算	45
二、矩形密封垫圈寿命的计算	54
三、矩形密封垫圈橡胶的选择	55
四、计算实例	56
第四章 O形密封圈	61
一、密封的装配结构	61
二、O形密封圈工作能力的计算	66

三、往复运动式密封结构中密封圈的工作能力及其寿命	69
四、计算实例	75
第五章 密封碗	79
一、结构和作用原理	79
二、往复运动换向对密封碗工作能力的影响	85
三、运转因素对密封碗工作能力的影响	90
四、密封碗寿命的预测	94
第六章 真空密封结构的密封	99
一、真空密封结构的特点	99
二、真空密封件密封性能的检查	103
第七章 侵蚀性液体介质的密封	108
一、密封件在油类中的工作能力指标	108
二、水对橡胶的作用机理	110
三、密封件单面受碱液作用时的工作能力	113
第八章 管状密封件	115
一、结构类型及其用途	115
二、橡胶管与刚性接管套接的计算	117
三、充气密封件的计算	121
四、充气密封件密封片强度的计算	128
第九章 橡胶隔膜	133
一、橡胶隔膜的用途及其结构	133
二、隔膜的密封能力	141
三、平面隔膜的强制破裂	145
第十章 密封件的测试仪器及其测试法	148
一、静变形密封件接触应力的测定	148
二、测量橡胶密封件泄漏量的装置	150
三、密封件往复运动时接触应力的测定法	151
四、挤压负荷消除后橡胶复原速度测定仪	155
参考文献	158

第一章 橡胶密封件的工作机理

一、密封原理

承受压力或者真空作用的任何密封结构的密封，不外乎是对彼此相配合的两表面之间的间隙进行可靠的封闭。联接件之间留有间隙，或者是出于力的原因结构设计上的需要；或者由于加工彼此相接两零件尺寸的允许公差范围及其给定的表面光洁度等原因造成的，这是不可避免的。这些间隙的大小，从几分之一毫米到几毫米不等，并且在密封结构工作过程中，它会因联接件受压变形、摩擦表面磨损与磨合、腐蚀及其他原因而增大或减小。

使间隙封闭可靠，不至于破坏密封结构的功能，是一个复杂的技术课题，要用不同的方法去解决。方法之一是接触密封法：在彼此相接的二表面之间，夹一材质较软的辅助元件，将已有间隙塞满，阻止有压力的介质通过间隙从一个容腔串到另一个容腔。显然，这种材质的压变性越高，则对间隙的堵闭越紧，密封结构的密封性就越可靠。但在压力的作用下，这种材料不应有从间隙中被挤出现象，不会因机械作用而破坏。此外，这种材质还能“跟踪”间隙可能发生的偶然变化和规律性变化而自行补偿。

因此，密封元件的材料，除了压变性外，还应具备很高的机械强度和弹性，具有相当大的恢复变形的能力，即高弹性。这种材料的总变形率 ϵ^* 由三个分量合成：可逆性高弹性变形、不可逆性塑性变形、弹性变形，即

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\text{гн}} + \varepsilon_{\text{нн}} + \varepsilon_{\text{гнп}}$$

针对密封件的具体应用条件，其制造材料可以只具备上述某一性能，也就是说，上式中每一项所占的比重可以各不相同。

硫化橡胶就是一种弹性显著的高弹性材料，能在外力的作用下，大大改变自己的尺寸，发生很大的可逆变形。橡胶的这一性能使其成为主要密封结构材料之一，实际上可用作任何一种密封结构的接触密封件。

橡胶所以能将密封的两个表面之间的间隙堵闭，是由于其在一定实际接触面上相互作用的结果。为了形成紧密接触，密封件的变形量应符合下式的要求：

$$e = (h_0 - h) / h_0$$

式中 h_0 、 h ——分别是密封件变形前、后沿变形方向上的尺寸。

橡胶密封件变形时，易向安装空间方向变形，将与它接触的两表面之间的间隙和微隙塞满(图1)。

如果使密封件变形所施加的外力为 Q ，则其接触部位就会相应产生名义应力 $f = Q / S_0$ 。式中的 S_0 为变形前密封件几何接触面积。假定橡胶变形时体积不变，则得下式：

$$S_0 h_0 = S_n h \quad \text{或} \quad S_n = S_0 h_0 / h = S_0 / \lambda$$

式中 $\lambda = h / h_0$ ——变形倍数(对压缩变形， $\lambda = 1 - e$)；

S_n ——密封件变形后的名义接触面积。

由此可得接触面上产生的实际接触应力 σ ：

$$\sigma = Q / S_n = Q \lambda / S_0 = f \lambda$$

应力的大小是密封件变形量与橡胶组织结构的函数。对橡胶而言，应力与变形之间的关系，在整个变形范围内，实际上并不是直线关系。

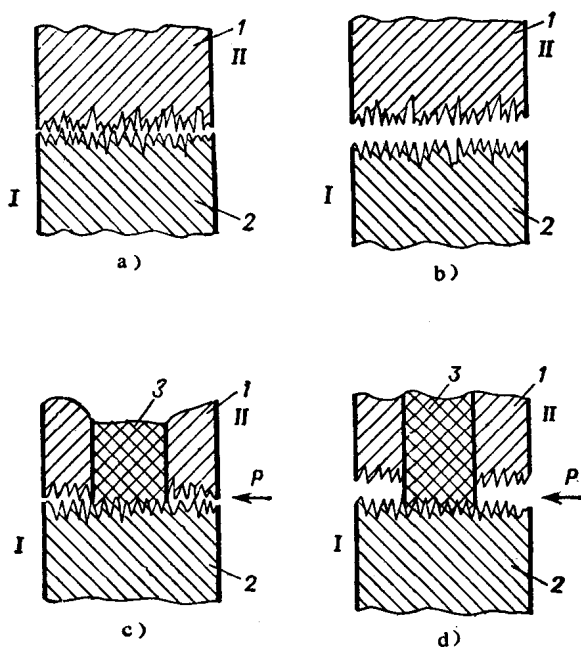


图1 橡胶密封件的工作原理图

a) b) 无密封件时两表面的接触 c) d) 有密封件时二表面的接触

a) c) 紧配合接触 b) d) 有保证间隙时的接触

1、2—被密封的两表面 3—橡胶密封件 I、II—被密封件隔离开的两空腔 P—被封闭压力的作用方向

对各种应力状态下的加填充剂橡胶和未加填充剂橡胶的实验研究〔7、8〕表明，在橡胶件的实际计算上，对于单轴向变形时最适用的是巴尔钦涅夫-哈扎诺维奇（Баргинеv-Хазанович）方程，其式为

$$\sigma = A \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - \lambda \right) \quad (1)$$

上式中，常数 A 取决于材料的组织结构，是有因次的，是表示橡胶高弹性模量的一个物理概念。在工程计算上可以取 $A = 2/3 E$ 。式中的 E 代表橡胶的静高弹性模量，可以按 ГОСТ11053-64 的标准确定。

橡胶的机械性能(模量)、负荷(接触应力)大小及其作用时间，决定着接触面积的大小。实际接触面积^[9]，可按下列关系式求出：

$$S_{\Phi} = S_n \left(1 - e^{-\frac{j}{E} \sigma} \right)$$

式中 j —— 表面光洁度系数。

然而，还有大量的其他因素，对接触面的形成和变化，即对密封的程度也有影响。查明这些因素及其对密封性的影响，就是研究橡胶密封件工作机理的实质，密封件的计算是为了选定密封件的材料和结构。

影响密封结构密封性的因素可区分为两类。

1. 决定密封件工作能力的因素，即对一次作用或非连续作用的能力；

2. 决定密封件工作寿命(耐久性)的因素，即对多次作用或长期作用的能力。

首先让我们来探讨一下第一类中的一些主要因素。正如前面已经指出过的，密封过程不外乎是用橡胶使联接头之间的微隙堵闭，达到一定密封程度，也就是使之形成一定的接触密封面。这一接触面越大，则接合面之间不严密的可能性就越小。因而，凡有助于接触面形成的各个因素，对密封件的工作能力都是有利因素。凡有碍于接触面形成或起破坏作用的因素，都是不利因素，会使密封件的功能降低或丧失。正如下面将要指出的，同样的一些因素却会因各种具体条件，