

XIANGJIAOJIAN DE GONGCHENG SHEJI JI YINGYONG

龚积球 龚震震 赵熙雍 编著

橡胶件的 工程设计及应用



上海交通大学出版社

TQ336
16

橡胶件的工程设计及应用

Engineering Design and Application with Rubber Components

龚积球 龚震震 赵熙雍 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书结合国内外橡胶件应用的发展现状和试验研究成果,介绍了它们的设计计算方法,并与实测结果进行对比,以验证计算方法的正确性。全书共分五章,即橡胶的基本特性及材料选择,橡胶件的设计计算,橡胶销套的压配合计算及试验,橡胶件的工程应用,橡胶件的隔振和降噪。其中对规则形橡胶件作了比较详尽的阐述,还对橡胶件的大变形计算及有限元分析作了介绍。

本书可供从事橡胶件设计、制造的工程技术人员参考,也可作为有关专业本科生的选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

橡胶件的工程设计及应用/龚积球,龚震震,赵熙雍编著.

—上海:上海交通大学出版社,2003

ISBN 7-313-03303-6

I. 橡… II. ①龚…②龚…③赵… III. 橡胶制品-设计
IV. TQ336

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007258 号

橡胶件的工程设计及应用

龚积球 龚震震 赵熙雍 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

立信会计出版社常熟市印刷联营厂印刷 全国新华书店经销

开本: 890mm×1240mm 1/32 印张: 6.5 字数: 183 千字

2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1~1 200

ISBN 7-313-03303-6/TQ·013 定价: 17.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

自 20 世纪 30 年代初,橡胶与金属件的粘结技术在国际上取得成功,后,橡胶件作为减振元件在工程上获得了愈来愈广泛的应用。

橡胶件在我国工业上的应用,很早就已经开始,但是依靠自己的技术,独立自主地发展产品,则是 20 世纪 50~60 年代的事。随着改革开放,我国工业取得了空前的发展。橡胶件在我国工程上,有了广泛的应用,例如机车车辆、船舶、汽车、飞机、桥梁及仪表等。有的已替代了金属弹簧,且性能良好,并有了可靠耐久的产品,远销国外。

开发新的产品,要求对橡胶件有一套设计计算方法,且能对尚未生产的产品特性作出预测。由于橡胶件的制造需要制作模具,成本较高,故对设计产品的特性作出理论测算,显得尤为必要。

自 20 世纪 30 年代以来,由于橡胶件的广泛应用,国外研究橡胶件的专家和学者,对它的设计计算进行了多方面的研究,取得了显著成果。对于一些规则形橡胶件(指简单的几何形状,如圆柱形、长方形、圆筒形及锥形套等)的计算,70 年代基本上已获得解决,并有一系列专著发表。

橡胶的剪切模数 G 是计算橡胶件的重要参数。它是随橡胶硬度的增大而增大的,但是由于各国的橡胶配方存在差异,对同一硬度的橡胶,它们的 G 值各不相同。因此,按不同方法计算求得的橡胶件刚度也存在较大差异,相对误差达 60%~70%,甚至更大。这往往使设计人员无所适从。因此,寻求适合于我国生产的橡胶件的设计计算方法,成为亟待解决的问题。这也是工厂橡胶设计人员所企盼的。编写本书,试图达到这个要求。

橡胶的硬度单位,目前采用的有两种:一是国际硬度单位(以 IRHD 表示),另一是肖氏硬度单位(以 HS 表示)。国际上,如美、英、德等国都采用前者,我国橡胶界习惯上仍采用肖氏硬度。幸而,在工程

上我国常用的橡胶硬度范围内(HS40~HS80),两种硬度单位的 G 值是相近的。

工程上应用的橡胶件,较多的是规则形橡胶件,但也有形状比较复杂的橡胶件。对于后者,发现可采用有限单元法来计算,这是 20 世纪 70 年代以后的事。但直至 90 年代初,美国出版的橡胶件设计专著才包含有这方面的内容。

鉴于工程应用的需要,近 10 多年来,国内研究人员对橡胶件的设计计算也取得了一系列成果。例如有切口的圆筒形及锥形套的刚度计算,任意形状橡胶弹簧的刚度分析,橡胶堆旁承的横向刚度计算,橡胶销套的压配合研究及高圆柱形弹簧加橡胶垫的稳定性计算等。

橡胶件的计算主要是刚度和强度计算问题,有时还有稳定性估算,所以也是力学的一个分支。由于一般橡胶件都与金属件连结在一起,并且根据橡胶件与金属件的不同连结方式,如硫化粘结、压配合和摩擦接触等,它们的弹性特性存在很大的差异。因此,对公式的适用条件、形状系数的选取,必须特别注意。

在本书编写过程中,受到原上海铁道大学张定贤教授及上海交通大学徐敏教授的指导和帮助,在此表示衷心的感谢,并向本书所引用的文献的作者表示谢意。本书的出版,还得到了株洲电力机车研究所廖斌副所长等领导及原上海铁道大学沈培德教授的关心和支持,在此一并致以深切的感谢。

本书第 1、3 及 4 章为龚积球编写,第 5 章为龚震震编写,第 2 章由龚积球、赵熙雍、龚震震共同编写。初稿完成后,经龚积球汇总,并最后定稿。

编著者

目 录

第 1 章 橡胶的基本特性及材料选择	1
1.1 概述	1
1.2 橡胶的特点及基本特性	2
1.2.1 橡胶的特点	2
1.2.2 橡胶的基本特性	2
1.3 橡胶材料的选择	19
第 2 章 橡胶件的设计计算	21
2.1 设计橡胶减振件时的注意事项	21
2.2 橡胶减振件的强度特性及许用应力	22
2.2.1 橡胶减振件的强度特性	22
2.2.2 拉伸和压缩变形的最大允许载荷	23
2.2.3 橡胶的许用应力	24
2.3 矩形橡胶件计算	25
2.3.1 矩形橡胶减振件计算	27
2.3.2 矩形断面棒受扭转变形的计算	28
2.4 矩形橡胶堆计算	29
2.4.1 矩形橡胶堆的垂向刚度计算	29
2.4.2 矩形橡胶堆的水平向刚度计算	30
2.4.3 矩形橡胶堆水平向刚度计算并与实测结果对比	34
2.5 矩形橡胶垫的弯曲刚度计算	39
2.6 圆形橡胶垫的计算	40
2.6.1 圆形橡胶垫的垂向及横向变形	40
2.6.2 圆形橡胶垫的弯曲变形	41

2.6.3	中间有孔圆形橡胶垫的垂向、横向及扭转变形	42
2.6.4	圆断面棒受扭转变形计算	43
2.7	圆柱形橡胶堆计算	44
2.7.1	圆柱形橡胶堆的垂向刚度	44
2.7.2	圆柱形橡胶堆的水平向刚度	44
2.8	环形断面橡胶堆计算	45
2.8.1	环形断面橡胶堆的垂向刚度	45
2.8.2	环形断面橡胶堆的水平向刚度	46
2.9	具有等剪应力的扭转圆盘	47
2.10	橡胶销套	47
2.10.1	橡胶销套的结构形式及压装	47
2.10.2	球形橡胶连杆销套及系列产品举例	49
2.10.3	橡胶销套的轴向剪切变形	52
2.10.4	具有等剪应力的橡胶销套的轴向变形	53
2.10.5	橡胶销套的扭转变形	54
2.10.6	具有等剪应力的橡胶销套的扭转变形	55
2.11	橡胶销套的径向变形(方法之一)	55
2.12	橡胶销套的径向变形(方法之二)	58
2.13	橡胶销套的弯曲变形	61
2.14	多层圆筒形橡胶套非等值径向刚度计算	62
2.14.1	单层橡胶套的径向刚度计算	63
2.14.2	多层圆筒形橡胶套的径向刚度计算	64
2.14.3	计算实例及分析	65
2.15	椭圆形断面橡胶堆刚度计算	66
2.15.1	椭圆形断面橡胶堆的垂向刚度	66
2.15.2	椭圆形断面橡胶堆的水平向刚度	67
2.15.3	椭圆形断面橡胶堆的刚度计算实例及与实测值 对比	68
2.16	圆断面橡胶环的压缩变形(横向无约束)	72
2.16.1	接触宽度和最大应力	74

2.16.2 橡胶密封环计算例题	74
2.17 厚壁圆柱形橡胶套的径向变形(两力相对作用于 外壁).....	76
2.18 橡胶球受压变形	77
2.19 半圆柱形和 D 型橡胶套的径向变形	78
2.19.1 半圆柱形橡胶套的径向变形	78
2.19.2 D 型橡胶套的径向变形	80
2.20 圆柱形筒的轴向压缩	81
2.21 橡胶件同时受压和受剪的计算	82
2.21.1 同时受压和受剪的橡胶垫	82
2.21.2 同时受压受剪的橡胶堆计算举例	83
2.22 锥形橡胶套计算	86
2.22.1 受轴向力的锥形橡胶套	86
2.22.2 锥形套受轴向力的例题	87
2.22.3 受径向力的锥形橡胶套	89
2.22.4 锥形套受径向力的例题	90
2.22.5 锥形橡胶套非等值径向刚度计算	91
2.22.6 锥形橡胶套非等值径向刚度的例题	92
2.22.7 带切口锥形橡胶套的轴向刚度计算	94
2.22.8 多层锥形橡胶套的非等值刚度计算	95
2.22.9 锥形橡胶套的扭转变形	99
2.23 刚性压头引起的橡胶块的凹痕.....	101
2.24 橡胶受压经刚性板上小孔的突出量计算.....	102
2.25 大变形橡胶件的计算.....	103
2.25.1 概述.....	103
2.25.2 橡胶制气球的膨胀.....	103
2.25.3 圆柱形橡胶管的膨胀.....	105
2.25.4 球形孔的膨胀.....	105
2.25.5 二次应力.....	107
2.25.6 大变形橡胶件的例题.....	109

2.26 橡胶件的有限元分析简介	110
2.26.1 材料的特性	110
2.26.2 材料举例	112
2.26.3 术语和验证	113
第3章 橡胶销套的压配合计算及试验	118
3.1 概述	118
3.2 橡胶套压配合的理论分析	118
3.2.1 计算公式	118
3.2.2 橡胶套的计算弹性模数 E'	120
3.2.3 橡胶套内外压力的计算	120
3.2.4 对系数 A 的确定及验证	123
3.3 橡胶套外圈压紧力 p' 的测定	124
3.3.1 测试装置、试验过程及方法	124
3.3.2 测试结果	125
3.4 压配合橡胶套的应力分布	125
3.5 橡胶套压配合的计算例题	128
3.6 橡胶销套压配合研究的结论	130
3.7 橡胶套的应力松弛测量	131
第4章 橡胶件的工程应用	133
4.1 概述	133
4.2 橡胶连杆销套	133
4.2.1 连杆纵向刚度计算	135
4.2.2 连杆横向刚度计算	135
4.2.3 连杆垂向刚度计算	136
4.3 橡胶连杆销套计算举例及与实测值对比	136
4.4 高圆弹簧加橡胶垫的刚度	140
4.4.1 高圆弹簧两端加橡胶垫的横向刚度计算	141
4.4.2 高圆弹簧两端加橡胶垫的计算例题及与实测值	

对比	142
4.4.3 高圆弹簧所加橡胶垫厚度的合理选择	147
4.4.4 高圆弹簧一端加橡胶垫的横向刚度计算	148
4.4.5 圆弹簧一端加橡胶垫的横向刚度计算例题及与 实测值对比	148
4.5 高圆弹簧加橡胶垫的稳定性	150
4.5.1 高圆弹簧加橡胶垫的临界载荷的确定	151
4.5.2 高圆弹簧加橡胶垫的稳定性计算例题及实测	156
4.6 桥梁橡胶支承	159
4.6.1 计算例题	159
4.6.2 桥梁橡胶支承耐久性的实例	161
4.7 风洞分流门的橡胶转轴	162
4.8 人字形橡胶弹簧	163
4.9 车钩缓冲橡胶件	166
4.9.1 剪切刚度	166
4.9.2 径向刚度	167
4.9.3 橡胶件刚度的计算值与实测值的对比	169
4.10 橡胶弹性联轴节	170
4.11 矩形橡胶堆及系列产品举例	171
第5章 橡胶件的隔振和降噪	173
5.1 振动的基本理论	173
5.2 隔振设计举例	176
5.2.1 仪器设备的隔振	176
5.2.2 柴油机隔振	183
参考文献	188

第 1 章 橡胶的基本特性及材料选择

1.1 概述

橡胶作为一种工程材料,在工业上得到了广泛的应用,诸如机车车辆、船舶、汽车、仪表、航空及桥梁等,大多用作减振元件,故把它称作橡胶弹簧,也有用作密封件的。

橡胶件在工程上的实际应用,可追溯到 20 世纪的 30 年代初,当时由于金属与橡胶的粘结技术取得成功,而使它的工程应用成为可能。近 20 多年来,为了减缓车辆(含机车车辆及汽车)、船舶及飞机等运行中的振动和噪声,橡胶减振元件在我国工程上获得了愈来愈广泛的应用,发展了一批颇具规模的橡胶件的专业生产工厂。

工程用橡胶件,如何设计它的几何尺寸以满足运用要求,并保证它的持久工作,这是有关设计师的任务,即要求对橡胶件进行刚度及强度计算。这正是本书所试图解决的问题。由于橡胶件受载荷后,有变形大等一系列特性,它的刚度及强度不能用通常的材料力学方法来计算。至 20 世纪 70 年代,国际上逐渐形成一套橡胶件的独特的设计计算方法,已成为力学的一个分支。

至于如何提供优良的橡胶件产品,如优化配方及制作工艺等,则属于橡胶工厂专业人员的努力目标。

工程上通常应用的橡胶件,比较多的是具有简单的几何形状,例如矩形块、圆柱形、圆筒形及锥形套等,或称为规则形橡胶件。对这种规则形橡胶件,国内外的研究人员进行了大量的试验研究,并提出了相应的计算方法。近年来,对有切口的锥形橡胶套,它的径向及轴向刚度的计算方法,也获得了突破。

可能由于各国橡胶材料的配方不同,即使相同硬度的橡胶,它的剪

切模数 G 值也各不相同。实践表明,各种计算方法所获得的结果,有时有较大的差别,相对误差可以达 $60\% \sim 70\%$,甚至更大。因此,寻求适合于我国生产的橡胶件的设计计算方法,以满足工程应用的需要,是有关工程设计人员亟待解决的问题。橡胶件的生产需要制作模具,成本较高,所以进行近似计算,取得合适的几何尺寸,更属必要。通常的方法是对橡胶的硬度稍加调整,以改变它的刚度特性,从而满足设计要求。

1.2 橡胶的特点及基本特性

1.2.1 橡胶的特点

橡胶的特点可归纳如下:

(1) 衰减振动、隔离噪声。橡胶是通过内摩擦来起衰减作用的,特别具有衰减高频振动的优异特性,因随着振动频率的增高,橡胶的内阻力也增大。

(2) 重量轻。密度仅为钢的 $1/6$,与钢弹簧相比,它的单位重量所吸收的变形能较大。

(3) 采用橡胶件,有时可避免金属的磨耗,维护保养方便。

以上是橡胶的优点,它当然也有缺点。其缺点有:制造工艺比较复杂,成本有时偏高(生产橡胶件,需要制作模具。小量生产,则成本较高,如成批生产,单价并不贵),工作温度大于 60°C 会逐渐老化,温度过低又会变硬、脆化。

某些合成橡胶能对天然橡胶的耐高温、耐油性能的不足加以改善。此外,设计橡胶减振件时,应注意它的散热不良的特性,可采用橡胶与钢板结合的夹层结构,以增强散热效果,不宜把橡胶件做成很厚的一整块。

一般橡胶件在 $-30 \sim +70^{\circ}\text{C}$ 范围内,弹性特性比较稳定,故能适应铁路车辆及汽车、船舶等的运用要求。

1.2.2 橡胶的基本特性

橡胶的特性有:温度、阻尼、硬度、弹性模数、刚度、老化及蠕变等,

分述如下。

1.2.2.1 温度特性

橡胶的弹性特性和耐久性与温度有关。以常温(20℃)时的橡胶强度为准,温度增加,则强度下降;温度降低,则强度上升。在150℃以内,大多数橡胶的弹性模数与剪切模数变化不大,高于150℃时就会下降,且橡胶同时软化。当温度升高到230℃时,橡胶开始发粘。达240℃时,橡胶就完全失去弹性^[1]。在低温下,橡胶刚度急剧增加,因而变硬,从而导致弹性下降,阻尼增加。在-50~-60℃时,由于分子结构发生变化,橡胶变脆。较高和较低的温度都影响橡胶的耐久性。

图1-1所示为随温度变化的橡胶性能的改变情况。图中:

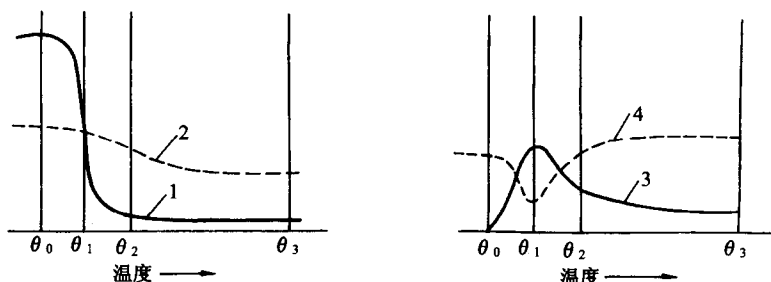


图1-1 随温度变化的橡胶性能改变^[2]

1—动态弹性模数 E_d ; 2—硬度; 3—阻尼; 4—回弹性能

θ_0 —玻璃状转折点,℃;

θ_1 —弹性模数曲线的突变点,℃。此温度时阻尼最大,回弹性能最小;

θ_2 —此温度时,温度下降,橡胶阻尼上升,弹性模数开始增加。

对高弹性的天然橡胶有以下数值:

$\theta_0 = -75^\circ\text{C}$, $\theta_1 = -55^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 0^\circ\text{C}$, $\theta_3 = 80^\circ\text{C}$ 。

当环境温度改变时,受载的软橡胶(硬度低的橡胶,如HS=40)的挠度会发生不大的变化,此现象称为焦耳效应。例如温度每减小1℃,橡胶的挠度约增加0.4%^[3]。如由夏天到冬天温度下降40℃,则橡胶

挠度会增加 16%。当温度上升,则挠度按同样比例减小。

焦耳效应(即随着环境温度的降低,橡胶的刚度会减小)只适用于软橡胶的原因可由以下关系式来说明^[4]:

$$G = NKT \quad (1-1)$$

式中, G —橡胶的剪切模数;

N —材料单位容积的分子交联数目;

T —绝对温度;

K —波尔茨曼(Boltzmann)常数。

式(1-1)表示,橡胶的剪切模数 G 与环境温度 T 呈正比关系,即温度高,则橡胶的刚度大。如环境温度下降 40 °C, 设由 $T_1 = 273 + 40 = 313$ K, 下降至 $T_2 = 273$ K, 则由

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{313}{273} = 1.15$$

计算表明,环境温度下降 40 °C, 橡胶刚度下降 15%, 即挠度增加 15%, 与上例的估算基本接近。

应该指出的是,式(1-1)只适用于无填充物的橡胶。实际上,大多数的橡胶都含有增强填料,一般加入碳黑,而碳黑在温度增加时会失去硬化功能。因而对含填料少的橡胶,如 HS=40 时,才会有焦耳效应。对于含填料多的橡胶(如碳黑按质量为 50%, 而橡胶按质量为 100%), 具有剪切模数 $G = 2\text{N/mm}^2$, 则刚度随环境温度上升非但没上升,反而轻微地下降。

通常,橡胶的刚度是随着它的硬度的增大而增大。而橡胶的硬度随温度的变化关系,示于图 1-2。

图中 t_E 为硬度修正系数,试验时以 $t = 15^\circ\text{C}$ 为标准,即在此温度下 $t_E = 1$ 。由图可见,在低温下,橡胶硬度急剧增加,当温度 $> 15^\circ\text{C}$ 时,橡胶硬度逐渐有所降低,也就是橡胶

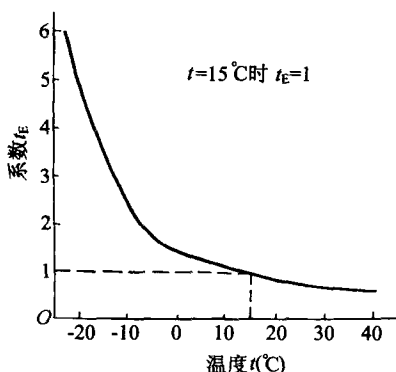


图 1-2 橡胶硬度随温度的变化关系

刚度随温度上升,稍有下降。

1.2.2.2 阻尼特性(能量的吸收)

橡胶在变形时显示出一种重要的性能,即吸收机械能,特别是吸收高频振动的能量。橡胶的这种性能,用以减振。

橡胶吸收振动能量是由于在它变形时产生内部摩擦所致。被吸收的机械能转化为热能后,其中一部分使橡胶升温;另一部分在橡胶的振动过程中,通过热辐射和热传导的方式消散了。由于橡胶的导热系数(天然橡胶为 $167.47 \sim 334.94 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$),而钢为 $54.428 \times 10^3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)比钢小2个数量级,因而橡胶的局部温升有可能达到不能允许的程度,所以承受振动的橡胶件单元尺寸不可过大。

橡胶使机械能转化为热量,通常用橡胶的损失系数 ϵ 来表示。阻尼与发热都随橡胶的 ϵ 值增大而增大。

为了防止橡胶过热,使 ϵ 小些,但在冲击情况下,为了获得高的阻尼效果,则应增大 ϵ 值。而 ϵ 值主要取决于所选择橡胶的种类,因此应根据具体情况,选择橡胶材料,以便调节和控制它的 ϵ 值。

表1—1所示是各种橡胶的损失系数 ϵ 值。

表1—1 橡胶的损失系数 ϵ ^[5]

橡胶种类	天然橡胶	丁苯胶	氯丁胶	丁腈胶	丁基胶
ϵ 值	0.05~0.15	0.15~0.3	0.15~0.3	0.25~0.4	0.25~0.4

应该指出的是, ϵ 值是随温度而变化的。图1—3是天然橡胶与温度的关系曲线。可见,在 0°C 以下,变化很大,而 0°C 以上变化不大。

受压橡胶的吸振率,随振动频率的增高而增大。

温度越低,橡胶的阻尼越大,但在 0°C 以上时,阻尼值几乎为常数,见图1—3。

在振动计算中,橡胶的阻尼值多采用无因次的“阻尼因数”(damping factor)表示。这个参数的定义可见5.2.1例3所述。

应该指出,当橡胶件的阻尼不够时,应另设减振器来衰减振动。

设弹簧单位质量所吸收的能量 U_{sp} 以下式表示:

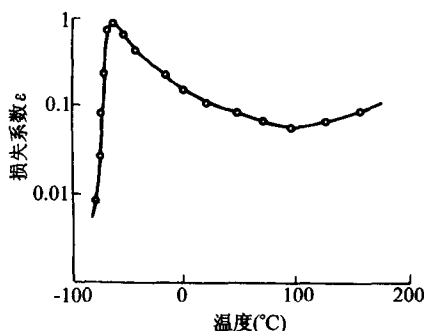


图 1-3 天然橡胶的损失系数 ϵ 与温度的关系^[6]

$$U_{SP} = u/m \text{ (J/kg)} \quad (1-2)$$

式中, m —弹簧的质量。

表 1-2 所示是橡胶减振件的吸能率大多高于钢弹簧, 这意味着使用橡胶减振件能减轻质量。由表还可看出, 橡胶剪切变形时的吸能率大于受压缩时的吸能率, 而更好的变形形式是同时承受压缩和剪切变形。

表 1-2 橡胶减振件和钢弹簧的吸能率比较^[2]

材 料	变形型式	吸能率(J/kg)
橡胶减振件	压 缩	150~250
	平 行 剪 切	300
	受压和受剪	400~500
	旋转剪切*	700~1000
钢弹簧	板 弹 簧	50
	扭 杆**	250

* 是金属外套相对于同轴内套转动时所产生的橡胶剪切变形。

** 具有剪应力 $\tau=800 \text{ N/mm}^2$ 。

橡胶的隔音能力是由对声音的传播缓慢来验证的, 橡胶对声音的传播速度约为钢的 $1/70$ ^[2]。橡胶的隔音性质是橡胶吸收声频振动性能的表现, 这种能力决定于橡胶层的厚度和硬度。橡胶越软和越厚, 隔音性能越好。

1.2.2.3 硬度及弹性模数

硬度是橡胶的一个重要参数。试验结果表明,橡胶的剪切模数和杨氏弹性模数主要取决于橡胶的硬度。硬度的单位,国外多采用国际标准,即 IRHD(International Rubber Hardness),我国通用的还是肖氏硬度(A 硬度计)。在常用的硬度范围内,两者几乎是相等的。文献[2]指出,除了低于 30IRHD 外,肖氏硬度(HS)值与 IRHD 值是近似相等的。而文献[4]显示,除了低于 50IRHD 外,两者是近似相等的。当小于 50IRHD 时,IRHD 的 G 值要大于 HS 的值,且度数越小,差别越大(图 1-5)。应该指出,由于各国根据试验求得的随硬度变化的剪切模数 G 值都存在差异,故以上有 30IRHD 与 50IRHD 之差别是正常的。英国也采用国际硬度标准,并与美国的 ASTM/D/1415-56. T 和德国的 DIN53519 硬度标准相一致。

橡胶生产工厂提供的橡胶硬度,是以试样测定的。通常由产品实际测定的硬度要稍低些,约低 HS2 上下。我国机车工程上所用的橡胶件,一般硬度都在 HS50 以上,大多在 HS60 上下。

橡胶具有大的弹性变形能力,而实际上橡胶减振件仅处于相对不大的变形范围内。如拉、压变形不超过 25%,而纯剪切变形不超过 75%,故把它称为橡胶的小变形^[4]。在橡胶小变形时,可认为它的应力与应变呈线性关系,即可用单一的弹性常数 G 来描述,因而用常规的弹性分析来计算相应的应力,能获得较好的吻合。

对于大变形的橡胶,必须考虑非线性弹性材料的弹性特性,而简单的弹性模数已不再适用。这将在 2.25 节中讨论。

通常,橡胶剪切模数的测定是用间接方法求得的。采用规定尺寸及形状的(锥形或球形)硬的压头,用一定的载荷压在橡胶表面,产生凹痕,并测量此弹性凹痕的数值,再推导出硬度。具体的关系式见 2.23 节。

根据不同的硬度试验求得的橡胶剪切模数 G ,是橡胶件设计计算的原始依据。图 1-4 表示橡胶的剪切模数、杨氏弹性模数与硬度 HS 的关系曲线,其中数据是属于静态剪切模数 G_s 和静态杨氏弹性模数