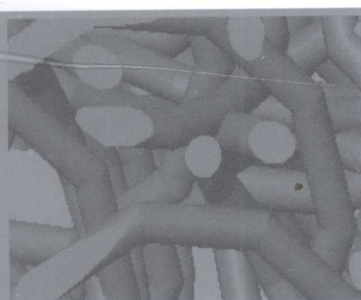




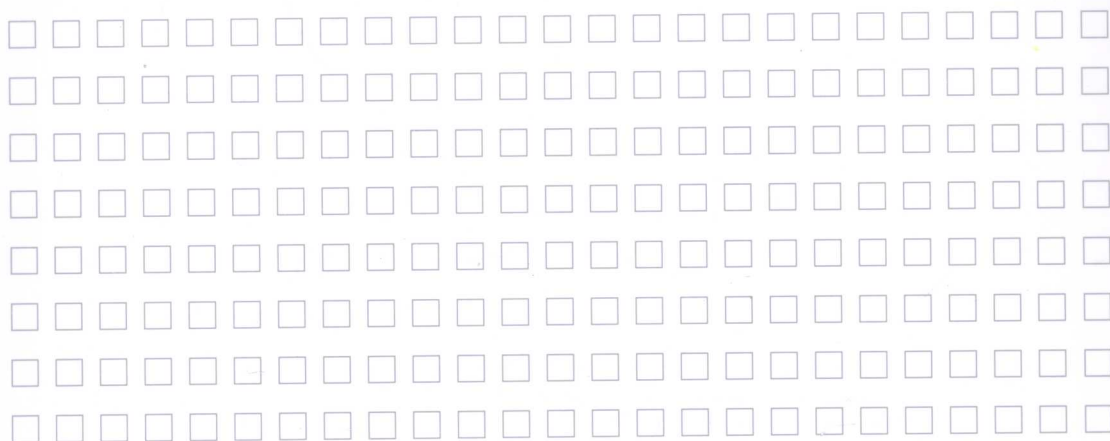
新型材料

金属橡胶建模及应用

董秀萍 张 力 著



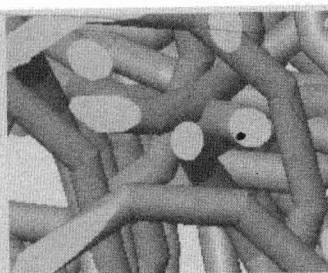
New material
Modeling and Application of
Metal-Rubber



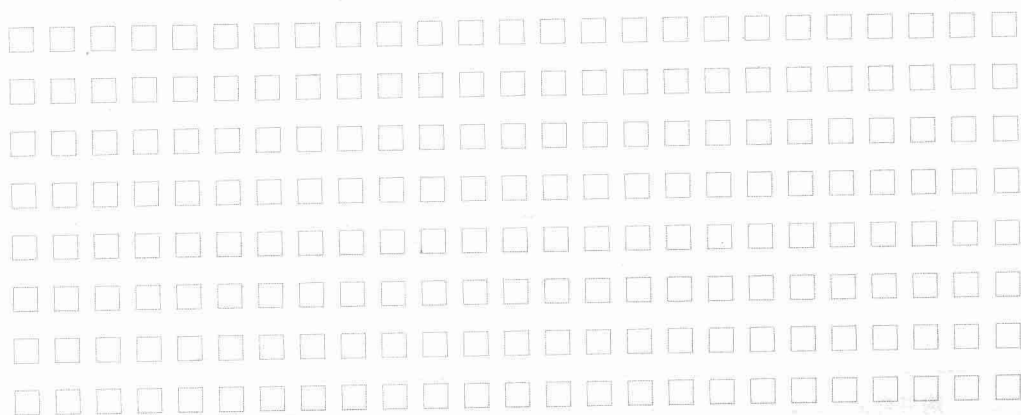
化学工业出版社

新型材料—— 金属橡胶建模及应用

董秀萍 张 力 著



New material
Modeling and Application of
Metal-Rubber



化学工业出版社

· 北京 ·

定价：10.00元

金属橡胶 (Metal-Rubber, MR) 材料是一种均质的弹性多孔物质, 经特殊的工艺方法, 将一定质量的、拉伸开的、螺旋状态的金属丝有序地排放在冲压或碾压模具中, 然后用冷冲压的方法压制成形, 再经必要的热处理工艺制备而成。因其具有类似橡胶材料的弹性和阻尼性能, 同时保持金属外观, 故而得名“金属橡胶”。

本书主要分析介绍了 MR 多孔材料用不锈钢钢丝的微观组织结构、MR 隔振材料中微丝的微动磨损行为与破坏特征、MR 材料内不锈钢微丝空间分布规律及其参数化结构模型、基于模型对材料内微丝接触点数及固相体积分数等参量的计算预报、MR 材料关键性能与其钢丝材料性能参数及钢丝结构特征参数的定量关系等关键技术。

本书可供从事新材料研究、开发的科研人员、高等院校相关专业师生学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型材料——金属橡胶建模及应用/董秀萍, 张力著.
北京: 化学工业出版社, 2010.7
ISBN 978-7-122-08648-8

I. 新… II. ①董…②张… III. 多孔性材料: 金属材料 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 093348 号

责任编辑: 张兴辉
责任校对: 顾淑云

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 装: 北京云浩印刷有限责任公司
720mm×1000mm 1/16 印张 9¼ 字数 114 千字
2010 年 7 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: 36.00 元

版权所有 违者必究

前言

P
R
E
F
A
C
E

现代工业的发展向人们提出了新的课题。在国防、宇航、船舶等高端技术领域，振动、冲击与噪声问题尤为突出。虽然阻尼材料已广泛地用于航海、航空、机械工程和宇航领域中结构的抗振保护，但由于多数阻尼材料的适用温度范围较窄、耐腐蚀能力有限而限制了其应用。在较差的环境条件下，选用干摩擦阻尼隔振器，可适用于较宽温度和具有一定频率范围的结构振动抑制和缓和冲击振动，是结构抗振保护的另一种有效途径。而金属橡胶材料的一些独特的性质正使其能在隔振器中作为干摩擦阻尼元件来使用。

所谓的金属橡胶（Metal-Rubber，MR）材料是一种均质的弹性多孔物质。经特殊的工艺方法，将一定质量的、拉伸开的、螺旋状态的金属丝有序排放在冲压或碾压模具中，然后用冷冲压的方法压制成形，采取必要的热处理工艺，因其具有类似橡胶材料的弹性和阻尼性能，同时保持金属外观，故而得名“金属橡胶”。

金属橡胶材料的内部结构是金属丝相互交错勾连形成的类似橡胶高分子结构那样的空间网状结构，在受到振动位移时可以耗散大量能量而起到阻尼作用，因为其本身是金属而非橡胶，故金属橡胶制品具有承载能力高、大阻尼、可在较宽频带内减振、抗冲击、抗油、抗腐蚀、耐高低温、抗湿、耐老化、不挥发、易维护、可以根据需要制成各种结构形状等优点，特别适合于制备航空航天、国防、机械、交通运输等在特殊工况下的阻尼减振、冲击防护、过滤、密封、噪声控制及热传导等构件，可以用在传统橡胶材料不能使用的有特殊要求的空间飞行器及其他构件上，以完成弹簧隔振器和橡胶减振、缓冲、阻尼元件无法承担和完成的任务。另外作为金属多孔材料，由于其具有承载能力高、抗堵塞能力强、孔隙度大小随压力变化且连续可调等特点，金属橡胶制品又适用

前言

于制备各种节流器和过滤器。

金属橡胶材料的研制成功,不仅扩大了已有金属材料的适用范围,而且解决了某些构件在特殊工作环境中对材料提出的特殊性能要求,它可以满足国防和空间技术装备上的特殊需要,解决高温、高压、高真空、超低温及剧烈振动等环境下的减振、过滤、密封等问题。金属橡胶材料的弹性和毛细多孔结构同其他多孔材料相比,具有不可比拟的优良特性。由金属橡胶制成的弹性阻尼元件在苛刻条件(超低温、高温、超高真空)下仍然具有十分优良的性能,因此它在各个领域具有广泛的应用前景。

俄罗斯在金属橡胶技术的研究领域中处于领先地位,特别是作为金属橡胶技术发源地的俄罗斯萨玛拉国立航空航天大学,对金属橡胶技术的研究做出了巨大的贡献。我国对金属橡胶材料的研究工作开展得比较晚,近年来这种新型材料在我国才日益获得重视,同时国防工业、民品市场对金属橡胶材料的需求也十分迫切,例如将试制金属橡胶弹性阻尼元件用于某型自行火炮闭体挡杆缓冲装置、月球着陆器样机的缓冲腿,将金属橡胶与聚四氟乙烯或铜组合制成的金属橡胶密封环用于某型号直升机的起落架等。但总体来说,我国在该领域的研究工作尚处于起步阶段,国内外对金属橡胶材料的研究探索大多在机械制造和应用以及力学研究领域进行,而基于现代材料科学的研究工作基本上仍为空白,从制备金属橡胶材料的金属丝原材料入手对其进行原材料及工艺方面的研究目前还未见报道。本书依托所在学科优势拟在此领域做一些探索工作。另外以前的计算机建模多见于干摩擦机理的模拟分析,难以将单个微动单元的描述与金属橡胶材料的整体阻尼行为结合起来。本书希望借助所在学术团队多年来在材料优化设计及计算机在材料学领

前言

PREFACE

域中应用方面的研究优势,对 MR (金属橡胶) 多孔材料中金属丝在三维空间的排列规律建立数学模型,以实现金属橡胶材料内部结构特征参数化表征,进而建立 MR 多孔材料的循环脉动加压滞环变形回线、刚度、过滤性能等关键性能与其钢丝材料性能参数及 MR 材料结构特征参数的定量关系与预报模型,为未来研究异形丝和圆形丝的对比及 MR 多孔材料材料制备的优化设计以及 MR 多孔材料的关键性能设计与控制提供依据和必要的基础。

为了解决国内目前对此类新材料研究方面的有关问题,本书主要就 MR 多孔材料用不锈钢钢丝的微观组织结构、MR 隔振材料中微丝的微动磨损行为与破坏特征、MR 材料内不锈钢微丝空间分布规律及其参数化结构模型、基于模型对材料内微丝接触点数及固相体积分数等参量的计算预报、MR 材料关键性能与其钢丝材料性能参数及钢丝结构特征参数的定量关系等几个方面展开分析讨论。

首先,分析了制备 MR 的原材料即 18-8 系奥氏体不锈钢丝的生产工艺,以光学显微镜、扫描电镜、透射电镜和电子背散射衍射技术详细观察分析了不锈钢细丝径向和轴向的微观组织。由于冷拉拔不锈钢细丝过程的大量变形诱发 18-8 系奥氏体不锈钢发生马氏体转变,所生成的马氏体为 ϵ 相,其亚结构既有层错又有位错;钢丝轴向与径向截面上奥氏体晶粒碎化后的晶界在光学显微镜观察和扫描电镜观察试验中均不可见,但可通过电子背散射衍射技术观测到;轴向截面可见以硬质颗粒为核心、两端与基体脱开形成梭形孔洞的典型形貌。

其次,由于 MR 隔振构件内部耗散能量的最小单元是两段不锈钢细丝组成的微动摩擦副,本书改进传统的摩擦试验方法,实现了两段 400℃ 回火处理 Cr-Ni-Mn 系

前言

不锈钢 $\phi 0.3\text{mm}$ 细丝的微动对磨。研究发现,“微动单元”的磨损可以划分为表面打磨、接触面黏着、第三体床形成和稳定磨损 4 个阶段,其中的稳定磨损阶段持续时间最长,摩擦因数也比较稳定。磨痕表面光滑程度高于基体的原始表面,在载荷 10N ,频率 5Hz ,振幅 0.4mm ,夹角 30° 的摩擦条件下,经历 144000 个振动周次时,钢丝磨损深度介于 $50\sim 60\mu\text{m}$ 之间。微动疲劳引发的钢丝断裂断口附近没有宏观的塑性变形,属于脆性断口;不锈钢丝表面的每圈周长上平均存在 50 余个微米量级的凹凸体,其高度的算术平均偏差 R_a 为 $3.447\mu\text{m}$,在交变应力作用下,较大的凹凸体充当原始裂纹向心部逐渐扩展;疲劳裂纹起源于表面,并且呈现“多源”特征;进一步的分析说明,提高钢丝的表面光滑程度更有利于显著增加隔振构件的疲劳寿命。

基于上述试验数据,结合 MR 材料的典型制备工艺,提取钢丝直径 d 、螺旋卷直径 D 、螺旋卷螺距 h_j 、编织二维毛坯的点阵边长 a 、 b 及其夹角 α 、二维毛坯宽度 W 、长度 L 、构件外形尺寸高度 H_{MR} 和直径 D_{MR} ,共计 10 个描述 MR 材料中钢丝空间结构的特征参数,归纳了 5 种编织二维毛坯的点阵类型,在均匀性假设和构件冲压过程中钢丝径向拓扑关系不变的假设基础上,建立了 MR 材料内钢丝空间分布的参数化结构模型。利用该种材料特有的固相体积分数与相对密度相等的物理原理,验证了模型的可靠性。

最后,在现有 A. И. Белоусов 模型、接触作用模型和能量耗散模型思想的基础上,摒弃现有模型将螺旋线匝假设为在三维空间均匀分布的做法,从所建立的参数化三维钢丝空间分布模型出发,量化了 MR 材料内部固相体积分数(相对密度)、钢丝接触点数与材料制备参数的关系。结果发现 MR 材料内部固相体积分数 k 与钢

前言

丝直径的平方 d^2 成正比关系，与材料的压缩比 $\bar{H}$ 成正比关系，固相体积分数 $k=0.3$ 左右时，对应着构件高度 H_{MR} 的变化平台，此时固相体积分数对构件高度变化处于不敏感阶段；钢丝接触点数 N 与 MR 材料的固相体积分数近似成正比关系。最后，利用钢丝微动试验分析结果和钢丝接触点数模型，统计分析了 MR 多孔材料的循环脉动加压滞环变形回线，推知 MR 隔振材料迟滞曲线包围面积，即因摩擦而耗散的能量，与其相对密度近似成线性关系；利用弹簧的串并联模型进一步建立了 MR 多孔材料的静态力学性能预报模型；以模型中固相体积分数推知其孔隙度，预报了 MR 多孔材料的过滤性能。

综上所述，MR 材料的微观结构和宏观结构都对其关键性能有重要影响，其宏观结构对关键性能的影响更加直接，本书的预报模型建立了此类新型多孔金属材料结构特征参数与其关键性能的定量关系。

著者

PREFACE

符号说明

d ——钢丝直径, mm

D ——螺旋卷中钢丝中心线直径, mm

h_j ——螺旋卷的螺距, mm

θ_j ——制备螺旋卷时钢丝的缠绕角度, rad

ω_j ——制备螺旋卷时钢丝的缠绕角速度, rad /s

t ——时间, s

a ——螺旋卷平面编织时其点阵单元的边长, mm

b ——螺旋卷平面编织时其点阵单元的边长, mm

α ——螺旋卷平面编织时其点阵单元两边所夹角, rad

W ——二维毛坯的宽度, mm

L ——二维毛坯的长度, 即制备三维毛坯时卷绕形成阿基米德螺旋线的弧长, mm

ρ_s ——试验用不锈钢丝的密度, g/mm³

ρ_{MR} ——金属橡胶材料的密度, g/mm³

$\bar{\rho}$ ——金属橡胶的相对密度, $\bar{\rho} = \rho_{MR} / \rho_s$

S_s ——钢丝的径向截面积, mm²

L_s ——构件内部钢丝的总长, mm

V_s ——构件内部钢丝的总体积, mm³

$L_{2\pi}$ ——每匝螺旋卷的弧长, mm

k ——钢丝固相体积分数, $k = V_s / V_{MR}$, 钢丝在材料中占有的有效体积, 与材料的相对密度 $\bar{\rho}$ 相等

S_{MR} ——圆柱形金属橡胶构件的底面积, mm²

H_{MR} ——圆柱形金属橡胶构件的高度, mm

D_{MR} ——圆柱形金属橡胶构件的截面直径, mm

H_R ——圆柱形毛坯的高度, 与二维毛坯宽度 W 相等, mm

$\bar{H}$ ——圆柱形构件冲压时的轴向压缩比, 即 H_{MR} / W 或 H_{MR} / H_R

V_{MR} ——圆柱形金属橡胶构件的体积, mm³

N_{FC} ——单位体积内接触点的数量

Δ ——判定钢丝接触的判据, 阈值, mm

ϵ ——孔隙度

μ ——摩擦因数

角 标

j——螺旋卷

s——钢丝

R——毛坯

MR——金属橡胶

FC——微动单元

符合说明

第1章 概述 1

1.1 金属橡胶材料概述	1
1.1.1 金属橡胶材料简介	1
1.1.2 金属橡胶材料的制备	3
1.1.3 金属橡胶材料的应用	5
1.2 国内外对金属橡胶材料的 研究现状	7
1.2.1 对金属橡胶材料制备工艺 的研究	9
1.2.2 对金属橡胶材料结构参数与 关键性能关系的研究	10
1.2.3 金属橡胶材料的建模和 仿真研究	12
1.2.4 目前存在的问题	16
1.3 金属橡胶材料的材料学问题概述	18
1.3.1 18-8 系奥氏体不锈钢概述	18
1.3.2 18-8 系奥氏体不锈钢冷变形 强化机制	19
1.3.3 18-8 系不锈钢准微丝结构特点对其疲 劳性能的影响	20
1.4 不锈钢丝摩擦、磨损现象研究	22
1.4.1 摩擦学问题	22
1.4.2 磨损问题	24
1.4.3 微动问题	25
1.4.4 摩擦学白层	28

第2章 奥氏体不锈钢丝的制备 工艺及微观组织 31

2.1 不锈钢丝的制备	31
-------------------	----

目录

2.1.1	钢丝拉拔时受力分析	32
2.1.2	拉拔变形区内金属流动特点	32
2.1.3	钢丝变形程度表示及计算	34
2.1.4	拉拔条件对钢丝力学性能的影响	35
2.1.5	钢丝的热处理	37
2.2	试验材料与试验方法	38
2.3	钢丝微观组织观察试验结果与分析	38
2.3.1	冷拉拔不锈钢丝的显微组织变化	38
2.3.2	冷拉拔不锈钢丝的 SEM 分析	38
2.3.3	冷拉拔不锈钢丝的 TEM 分析	40
2.3.4	冷拉拔不锈钢丝的 EBSD 分析	42
2.4	关于金属橡胶用奥氏体不锈钢丝化学成分的分析	44
2.5	本章小结	44

第 3 章 MR 材料中微动单元的分析 46

3.1	概念引入——“微动单元 (Fretting Cell)”	46
3.2	隔振构件疲劳试验	48
3.2.1	试验材料与试验方法	48
3.2.2	试验结果与分析	50
3.3	试验用不锈钢丝表面激光扫描共焦 (LSCM) 观察与分析	52
3.3.1	试验材料与试验方法	53
3.3.2	试验结果与分析	53
3.4	FC 模拟试验——钢丝对磨试验	54
3.4.1	试验材料与试验方法	56
3.4.2	试验结果与分析	57

3.5 金属橡胶减振构件中钢丝的疲劳	
断裂分析	68
3.5.1 试验材料和试验方法	69
3.5.2 试验结果与分析	69
3.5.3 钢丝微动疲劳特征分析	74
3.6 本章小结	74

第4章 MR材料三维结构模型的研究 77

4.1 MR材料的典型制备过程	78
4.2 基本假设	78
4.2.1 均匀性假设	78
4.2.2 冲压过程径向拓扑关系	
不变假设	79
4.3 螺旋卷模型建立	79
4.4 二维毛坯模型建立	80
4.4.1 三种编织二维毛坯的	
方法描述	80
4.4.2 模型参数提取	82
4.4.3 模型实例	83
4.5 三维毛坯模型的建立	84
4.6 三维毛坯冲压模型的建立	86
4.7 三维模型的评价	88
4.8 MR材料计算机辅助设计 (CAD)	
系统的开发	92
4.8.1 开发环境	92
4.8.2 数学基础	93
4.8.3 螺旋弹簧的创建	94
4.8.4 阿基米德螺旋线的创建	95
4.8.5 三维构件的建立	95
4.9 本章小结	96

目录

第5章 基于结构模型的应用 98

- 5.1 现有金属橡胶材料模型的分析 98
 - 5.1.1 А. И. Белоусов 模型 98
 - 5.1.2 接触作用模型 101
 - 5.1.3 能量耗散计算模型 102
- 5.2 参数化三维模型对材料几何参数的预报预测 103
 - 5.2.1 模型固相体积分数与 MR 材料的相对密度计算 103
 - 5.2.2 模型固相体积分数与构件高度的关系 104
 - 5.2.3 模型固相体积分数与 MR 材料中钢丝直径的关系 105
- 5.3 模型中钢丝接触点数与循环脉动加
压滞环变形回线面积的关系 107
- 5.4 刚度特性和本构关系的
建模研究 112
- 5.5 过滤性能的建模研究 115
- 5.6 本章小结 119

结束语 121

参考文献 126

第 1 章 概 述

1.1 金属橡胶材料概述

金属橡胶材料兼有金属与橡胶双重特性。它既能像橡胶那样大量损耗能量，又因为以金属为原料，具有极大的环境适应能力，耐高温、耐低温、耐腐蚀，大阻尼特性不随温度而改变，从根本上弥补了普通橡胶的不足。金属橡胶减振器适应于机载、舰载、弹载、星载仪表和重型民用设备的减振保护，适用于坦克、火车减振台等恶劣环境中的减振器件。用金属橡胶技术开发的多种产品可代替现有减振器，克服现有的减振器件易挥发、储存时间短、易老化、温度范围窄等缺陷。金属橡胶减振器及其金属橡胶技术具有广阔的应用前景。

1.1.1 金属橡胶材料简介

金属橡胶是橡胶的模拟制品，用金属螺旋细丝压制而成。具有疏松的金属结构，其内部呈网状，类似天然橡胶的大分子结构。在交变的应力应变作用下能耗散大量的振动能量，其阻尼特性与施加于其上的应变有关。对大振幅运动阻尼很大，而对小振幅运动阻尼适中，阻尼比达 0.2~0.3。其刚度特性也随振幅增加呈现线性—软特性—硬特性变化的非线性特性。可以说金属橡胶是一种具有高弹性和良好阻尼特性的疏松结构材料，其密度仅为金属的 0.3 左右。

金属橡胶产生于 20 世纪 70 年代初期的苏联，是一

种均质的弹性多孔材料，其内部结构是金属丝之间相互嵌合、勾连而形成的类似于橡胶分子结构的网状结构。当受到外界振动位移影响时，金属丝之间产生滑移，由此产生的干摩擦力耗散了大量能量而起到阻尼作用。由于金属橡胶材料可以耐高温、高压、高真空、超低温，在空间环境下不蒸发，不怕空间辐射和粒子的撞击，选择不同的金属还可以工作在腐蚀环境中，不产生老化现象^[15]，因此，由其制成的各种元件不仅可以工作在上述苛刻的环境下，并且在该环境下仍然保持十分优良的性质，能够满足国防用空间飞行器上的特殊需要及某些在特殊工作环境中对构件材料提出的特殊要求。以其代替橡胶做减振、阻尼和密封件对提高航空航天产品的寿命、可靠性和性能有很大好处。其干摩擦阻尼特性可以用“宏观滑移”和“微观滑移”来描述，它们分别用来表征材料表面之间相互滑移黏结及接触区内部分接触点滑移部分接触点黏结的情况^[16]。

资料表明，外界载荷的不同状态^[17]，即不同大小、不同的作用方向、不同的变化过程，都将对材料的干摩擦阻尼特性产生一定的影响^[18]。

用金属橡胶制成的减振、隔振元件，特点是体积小、重量轻，可做成用于多轴减振隔振器，适用于各类电子仪器、动力设备和管路的减振隔振，尤其适用于航空、航天、航海、化工等恶劣环境。金属橡胶是全金属材料，可以在高、低温，腐蚀环境下工作，没有老化问题。同时由于金属橡胶具有毛细疏松结构，它除了可以用于减振以外还可以应用于降噪、过滤及热管系统。

金属橡胶材料具有材料性能（钢丝的材料性能）、物理性能、力学性能和化学性能等四大性能，可以用图 1-1 来表示。

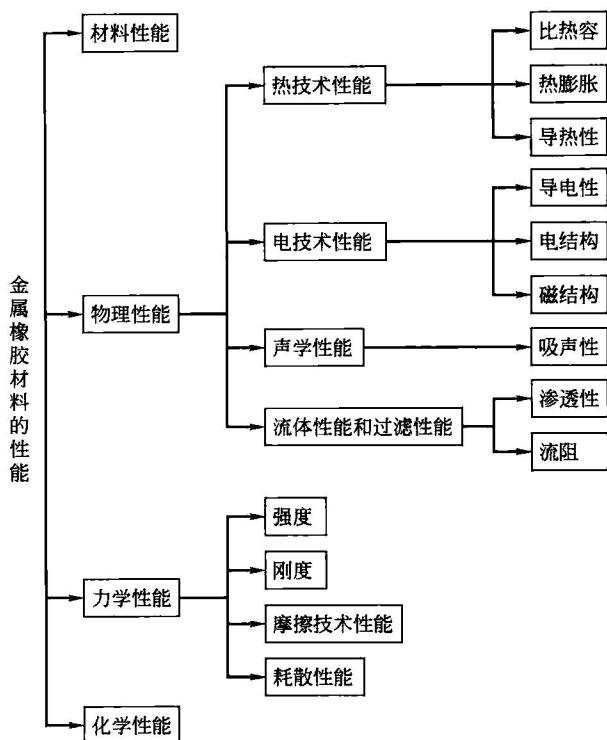


图 1-1 金属橡胶材料的性能

1.1.2 金属橡胶材料的制备

金属橡胶是一种均质的弹性多孔物质，原材料是金属丝，用一定的方法将质量配好的拉伸开的螺旋状态的金属丝堆放好，然后用冷冲压工艺成形，其主要制备工艺流程如下。

(1) 金属丝的选择

制造金属橡胶的重要原材料为金属丝，具体化学成分由工作条件（如温度、湿度、侵蚀性介质、载荷等因素）决定。目前使用和研究最多的金属丝材料是奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和 0Cr18Ni9Ti。

(2) 确定金属丝的牌号和直径

作为金属橡胶的最基本单元，丝线的弹性模量与强度