

兵器科学与技术丛书



金属橡胶材料

理论建模与实验研究

曹凤利 黄凯 白鸿柏 王怀光 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

金属橡胶材料理论 建模与实验研究

曹凤利 黄 凯 白鸿柏 王怀光 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以在减振缓冲领域广泛应用的金属橡胶材料为研究对象,针对金属橡胶制备工艺、性能表征的理论与技术难点,分析介绍了金属橡胶铺设工艺定位销优化设计和路径规划方法、金属橡胶冲压成型特性、金属橡胶数值模型及性能预测、金属橡胶压缩性能及变形机制、非线性刚度特性细观机理、干摩擦迟滞特性细观力学模型、疲劳损伤与失效判定等方面的研究成果,为金属橡胶材料的制备、性能优化以及在缓冲减振领域的工程应用研究提供了新的理论分析方法和途径。

本书可作为高等院校涉及减振缓冲的各专业的高年级学生、研究生、教师的参考用书,也可供从事金属橡胶研究与实践的工程技术人员阅读参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

金属橡胶材料理论建模与实验研究 / 曹凤利等著. —北京:北京理工大学出版社, 2021. 4

ISBN 978 - 7 - 5682 - 9688 - 5

I. ①金… II. ①曹… III. ①金属材料 - 合成橡胶 - 研究 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 062129 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 10.75

字 数 / 188 千字

版 次 / 2021 年 4 月第 1 版 2021 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 56.00 元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 张海丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

随着科技的迅猛发展，各种高技术装备趋于高速化、大型化、精密化和自动化，装备引起的振动和噪声问题也日益突出，采用阻尼减振材料是减振降噪的有效手段。橡胶是一种常用的减振材料，可满足一般条件下减振缓冲的需要，因而得到广泛的应用，但普通橡胶不能在高低温、强辐射等恶劣的环境中工作，且具有导热性差、易老化等缺点，显然普通橡胶不能满足恶劣、苛刻环境中的减振需要，例如：在强辐射、高低温、真空环境中工作的飞船、卫星等航天器的减振结构，在高温环境中工作的航空发动机、核潜艇内部管路系统的减振结构，在低温环境中工作的火箭发动机的减振结构等。

为满足以上特殊环境减振的需要，出现了许多新型减振器件，如金属橡胶 (Metal Rubber)、钢丝绳和多股螺旋弹簧等。金属橡胶材料制成的各种阻尼减振器是最具代表性的一类。金属橡胶是由细金属丝制造而成的类似于橡胶空间网状链接结构的多孔材料，因同时兼有橡胶的高弹性、大阻尼和金属的优异物理力学性能而得名。金属橡胶通过内部金属丝的弹性变形和金属丝之间的挤压滑移产生干摩擦而起到阻尼减振的作用，具有承载能力高、阻尼大、减振频带宽、耐高低温、耐腐蚀、抗疲劳、不易挥发、易维护等特性。因此，金属橡胶适合于国防、航空航天、交通运输等恶劣、苛刻的环境下的阻尼减振，可以在传统橡胶不能使用的有特殊要求的场合，从根本上弥补了普通橡胶的不足。这种新型阻尼减振材料在恶劣环境条件下具有不可比拟的优良特性，在减振降噪方面具有广泛的应用前景。

最早进行金属橡胶研究的国家是美国。20世纪60年代，美国军方首先将金属橡胶应用于军用飞机设备密封、缓冲和阻尼耗能减振器。20世纪70年

代,苏联截获美军军用飞机安装的金属橡胶产品,并对其开展了持续的理论 and 实验研究,研制的减振产品被广泛应用于军事和民用领域。此外,近期德、法、英等其他国家也有关于金属橡胶技术的报道。

由于苏联、美国等国家对金属橡胶技术的严密封锁,我国科技工作者对其知之甚少。20世纪90年代,通过中国和俄罗斯的技术交流,我国的一些专家才有机会接触到这种新型材料。2000年,俄罗斯契戈达耶夫的专著《金属橡胶构件的设计》在中国编译出版,使我国的科研人员全面了解了金属橡胶的制备工艺、物理性能、力学性能、弹性摩擦、阻尼特性、工程应用实例等内容,其工程应用价值也逐渐得到重视。

通过我国科研工作者的不断努力,我国的金属橡胶技术得到快速发展,其研究成果在民用和军事领域都得到一定的应用。然而,由于金属橡胶的复杂制备工艺和内部的非连续结构,加之金属橡胶毛坯编织和冲压成型设备自动化程度不高,技术水平落后,金属橡胶制品的制备主要依靠经验进行设计和加工,导致金属橡胶制品尺寸及性能一致性、稳定性较差,严重制约了金属橡胶产品的推广和应用,使得该种材料的研究在很多方面仍处于探索和完善阶段,现有的研究成果对金属橡胶的设计指导较为有限,还不能全面揭示金属橡胶性能的物理本质,一些关键技术问题仍有待进一步突破,具体体现在以下几个方面:①金属橡胶密匝螺旋卷的定螺距拉伸,以及对拉伸后的螺旋卷进行排列铺放这两道工序,多采用手工方式进行处理,使金属橡胶构件的成型尺寸及性能的一致性难以得到保证,从而导致废品率较高,产品质量较差;②金属橡胶及毛坯内部线匝的几何构型、空间位置和接触状态难以获取,材料的制备多依靠经验及实验试凑,无法进行优化设计与性能预报;③学者们对金属橡胶的力学特性进行了深入的研究,并且得到一定的研究成果,但由于金属橡胶内部结构的复杂性及本身具有的非线性,对该种材料力学特性的分析非常困难,其研究至今还不完善,仍缺少能全面反映金属橡胶刚度阻尼特性物理本质的力学模型;④金属橡胶构件内部非连续复杂结构使得其疲劳特性的分析不能完全采用实体金属材料的疲劳分析理论,从而增加了其疲劳特性理论分析的难度。关于金属橡胶疲劳性能的研究相对较少,相关的研究也只是初步探讨其疲劳特性,并没有形成完备的理论和系统的分析方法。因此,迫切需要针对金属橡胶理论与实验研究的难点问题,对自动化制备设备与工艺、金属橡胶优化设计与性能预测、结构特性理论模型等关键问题展开进一步的研究。

本书是作者近年来从事金属橡胶材料制备工艺、力学特性分析和实验技术方面的科研学术工作经验及研究成果的总结。本书的研究成果对于金属橡胶制品的自动化缠绕和自动化铺设工艺、金属橡胶结构特性数值仿真计算、金属橡

胶细观结构分析与理论建模、金属橡胶构件的疲劳损伤评估等均有指导作用。同时本书提出的数值模拟与性能预报方法，为金属橡胶制品的设计提供了重要的技术支持，具有重要的工程应用价值。

本书由曹凤利、黄凯等合作完成，曹凤利负责第3、7、8章，黄凯负责第4、6章，白鸿柏负责第2、5章，王怀光负责第1章，全书由曹凤利定稿。课题组中，路纯红副教授、李玉龙博士、李拓博士、王尤颜博士等进行了数据处理、实验系统搭建等研究工作，在此一并表示感谢。另外，编写过程中参考和引用了国内外专家、学者的相关书籍和文献，以及相关学科工程技术人员和研究生的论文，在此对原作者表示感谢！

限于作者的知识水平和经验，书中的不足和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

著 者
2020年9月

目 录

第 1 章 金属橡胶概论	001
1.1 金属橡胶概念	002
1.2 金属橡胶制备工艺概述	003
1.3 金属橡胶技术研究概况	006
1.3.1 金属橡胶制备技术研究	006
1.3.2 金属橡胶力学性能研究	007
1.4 金属橡胶工程应用概况	008
第 2 章 金属橡胶毛坯制备路径规划	011
2.1 自动化工艺及设备	013
2.1.1 自动化缠绕工艺及设备	013
2.1.2 自动化铺设工艺及设备	014
2.2 金属橡胶路径规划构型	016
2.2.1 缠绕工艺	016
2.2.2 铺设工艺	016
2.3 缠绕工艺螺旋卷路径	017
2.4 铺设工艺简单构型路径规划	018
2.4.1 优化设计模型	018

2.4.2	遗传算法的应用	018
2.4.3	定位销优化设计算例	023
2.4.4	路径规划算例	025
2.5	复杂构型金属橡胶毛坯路径规划	030
2.5.1	遗传算法的应用	030
2.5.2	定位销优化设计算例	034
2.5.3	路径规划算例	036
2.6	复杂构型金属橡胶毛坯铺设轨迹生成方法	042
2.6.1	生成初始轨迹	042
2.6.2	初始轨迹修正	045
2.6.3	毛坯3D铺设轨迹	046
第3章	金属橡胶冲压成型特性研究	049
3.1	金属橡胶冲压过程分析	050
3.1.1	金属橡胶冲压实验	050
3.1.2	金属橡胶冲压特性	052
3.2	冲压对金属橡胶结构性能的影响	057
3.2.1	冲压对密度分布的影响	057
3.2.2	冲压对弹性恢复值的影响	059
3.3	金属橡胶双向混合冲压成型工艺	060
3.3.1	双向混合冲压工艺设计	060
3.3.2	双向混合冲压工艺对相对弹性恢复值的影响	061
3.3.3	双向混合冲压工艺对静态力学性能的影响	062
第4章	金属橡胶数值模拟与性能预报	065
4.1	空间弯曲螺旋线参数化模型	066
4.1.1	建模方法	066
4.1.2	参数化方程	067
4.2	毛坯数值模型	072
4.3	数值模型程序框图	074
4.4	冲压成型预报及实验验证	076
4.4.1	冲压实验	076
4.4.2	宏观组织结构对比	076
4.4.3	成型压力预估	077

4.4.4	摩擦力预估	077
4.4.5	模具应力预估	078
4.4.6	成型尺寸及回弹量预估	081
4.4.7	固相体积分数预估	082
4.4.8	接触点数预估	082
4.4.9	材料组织分布预估	083
4.4.10	细观组织结构预估	085
4.5	压缩变形数值模型实验验证	085
4.5.1	冲压成型压力曲线验证	086
4.5.2	材料组织结构形态验证	086
4.5.3	尺寸验证	087
4.5.4	静态刚度曲线验证	088
4.5.5	干摩擦特性数值模型实验验证	090
第5章	金属橡胶压缩性能及变形机制	093
5.1	金属橡胶压缩性能实验	094
5.1.1	金属橡胶构件与实验系统	094
5.1.2	金属橡胶压缩变形力学特性	095
5.2	金属橡胶压缩变形物理机制分析	096
5.2.1	金属橡胶典型细观结构	096
5.2.2	金属橡胶压缩变形细观物理机制	098
第6章	金属橡胶刚度特性细观机理研究	103
6.1	细观结构变形状态分析	104
6.1.1	金属橡胶组织结构分解	104
6.1.2	建立弹性微元局部坐标	105
6.1.3	弹性微元变形模式分析	106
6.2	刚度特性理论模型	111
6.2.1	弹性微元 z 向刚度	111
6.2.2	弹性微元 xoy 平面内刚度	112
6.2.3	非线性刚度的理论模型	113
6.2.4	确定 h 与 ε 的关系	115
6.2.5	模型的实验验证	117

第 7 章 金属橡胶迟滞特性细观力学模型研究	119
7.1 迟滞特性细观力学模型 I	120
7.1.1 接触对数量及滑动接触对比例	120
7.1.2 接触对形态及其力学模型	121
7.1.3 接触对力学模型 z 向等效刚度	124
7.1.4 接触对力学模型 y 向等效刚度	124
7.1.5 接触对在加载方向的等效刚度	127
7.1.6 金属橡胶非线性弹性模量模型	127
7.1.7 待定系数 C_N 、 C_L 、 C_U 的求解	129
7.1.8 确定 h 与 ε 的关系	130
7.1.9 模型的实验验证	132
7.2 迟滞特性细观力学模型 II	133
7.2.1 螺旋卷单元的变形分析	133
7.2.2 金属橡胶的弹性力	136
7.2.3 金属橡胶的迟滞恢复力	137
7.2.4 实验及验证	139
第 8 章 金属橡胶疲劳损伤力学特性研究	143
8.1 金属橡胶构件及实验系统	144
8.1.1 金属橡胶构件及夹具	144
8.1.2 疲劳实验系统	145
8.2 金属橡胶构件疲劳损伤分析	146
8.2.1 疲劳损伤宏观分析	146
8.2.2 疲劳损伤宏观表征参数	148
8.2.3 疲劳损伤演化机理	149
8.2.4 疲劳失效的判定	154
8.2.5 回火对疲劳特性的影响	155
参考文献	157

第 1 章

金属橡胶概论



| 1.1 金属橡胶概念 |

金属橡胶 (Metal Rubber) 是一种具有非线性刚度、大阻尼的弹性多孔材料,最早出现于 20 世纪 60 年代,美国将其应用在军用飞机上。20 世纪 70 年代,苏联开始从事金属橡胶材料的研究,解决了许多国防领域的重大技术难题。20 世纪 90 年代,随着中俄技术交流的增多,我国才接触到金属橡胶制品^[1]。

在金属橡胶内部,金属丝相互交错勾连形成了空间网状结构,类似于橡胶的大分子结构,同时具有橡胶般的弹性和阻尼性能,因此而得名。冲压成型后不同形状的金属橡胶制品如图 1-1 所示。



图 1-1 金属橡胶制品

金属橡胶材料具有一些优异的物理性能，如：

(1) 良好的阻尼耗能性能。由于金属橡胶材料内部为金属丝相互勾连的空间网状结构，这种材料在受到动态载荷作用产生变形时，细观上表现为金属丝之间的滑移、摩擦、挤压、变形，会耗散大量的振动能量，起到阻尼减振作用。另外，金属橡胶材料具有变阻尼性能，可以同时满足隔振器共振时要求高阻尼、隔振时对低阻尼的设计需求。

(2) 优异的冲压成型能力。通过合理设计冲压模具和毛坯缠绕形状，可以得到各种形状的金属橡胶元件，以适应不同应用领域的需要。

(3) 较强的环境适应特性。与传统的橡胶材料相比，通过合理选择金属丝的牌号，可以使制备的金属橡胶元件在高低温、酸腐蚀、油污染、盐雾、强辐射等极其恶劣的环境中工作，同时具有疲劳寿命长、性能稳定等显著的优点。

(4) 优良的高连通孔隙性能。金属橡胶材料是一种具有优良孔隙连通特性的低成本弹性多孔材料，通过合理选择工艺参数，其孔隙度可达到90%以上。

金属橡胶材料具有的优异性能，使其应用领域非常广阔，涉及航空航天、武器装备、石油、化工、机械、电子设备的减振缓冲，以及密封、流体调压过滤及抑制噪声等领域。

| 1.2 金属橡胶制备工艺概述 |

金属橡胶由细金属丝经螺旋卷缠绕、定距拉伸、制备毛坯、模压成型以及后处理等工艺制备而成^[2]，其制备工艺流程如图1-2所示。

1. 选用金属丝

金属丝（图1-3）的材质由制品的工作条件决定，例如，在无腐蚀环境中，通常采用50VCr或30VMnSi等；在腐蚀环境中，通常采用304或316不锈钢。材质的弹性模量和强度也直接影响金属橡胶制品的力学性能。强度大但弹性模量小的材料不适合作为原材料，因为使用其制备的元件在承载后会产生较大的残余变形。奥氏体不锈钢是生产中应用较多的原材料，使用其制备的金属橡胶元件具备耐高/低温、耐腐蚀、疲劳寿命长等优点。

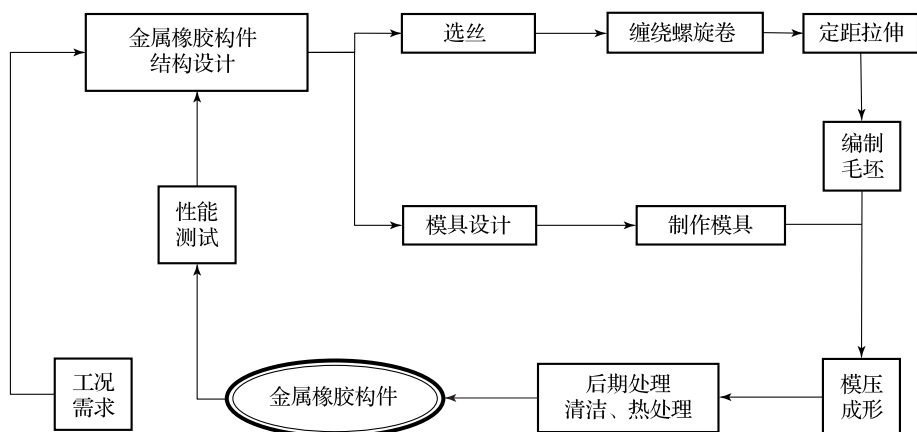


图 1-2 金属橡胶制备工艺流程

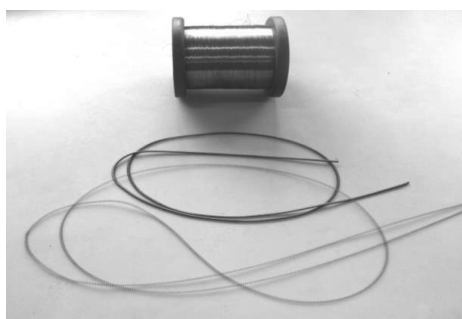


图 1-3 金属橡胶用细金属丝

金属丝的直径取决于制品的尺寸及所要求的力学性能，是影响制品弹性及阻尼性能的重要因素之一。制品承载能力要求越高，金属丝的强度、直径也应该增大，金属丝直径一般选择 0.1 ~ 0.3 mm。

2. 绕制螺旋卷

选定金属丝的材质和直径后，要在专用设备上将其绕制成螺旋卷（图 1-4），螺旋卷的直径同样会对制品的力学性能产生影响。一般螺旋卷直径选为金属丝直径的 5 ~ 15 倍，然后对螺旋卷进行等螺距拉伸，使拉伸后的螺距与螺旋卷直径大致相等，从而保证制作毛坯时线匝间咬合勾连良好，提高制品的稳定性。

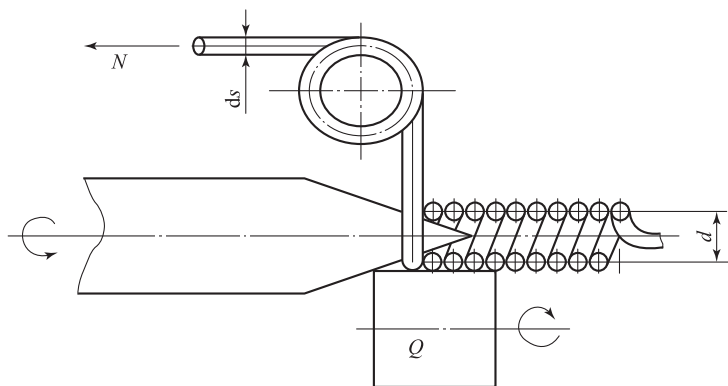


图 1-4 螺旋卷缠绕示意图

3. 制备毛坯

制备毛坯时，一般先按毛坯质量对螺旋卷进行配料，如图 1-5 所示。金属橡胶制品的尺寸、孔隙度和力学性能在很大程度上与配料有关。金属橡胶制品的密度不同，制备时的成型压力也不同，导致制品的最终力学性能不同。配料时，应使螺旋卷的根数尽量少，这样可以使毛坯内部没有约束的螺旋卷线头尽量少，以保证制品的强度和阻尼性能。



图 1-5 拉伸的螺旋卷及毛坯示意图

目前，毛坯的成型方法主要有手工铺砌毛坯、螺旋卷缠绕毛坯、螺旋卷铺设毛坯、螺旋卷编织毛坯、铠装毛坯等。

4. 冲压成型

金属橡胶毛坯的冲压成型是金属橡胶制品制备过程中最重要的工序之一，而冲压模具设计是否合理、功能是否完善，又将直接影响金属橡胶制品的成型质量及废品率。

在进行冲压模具设计时，首先应根据金属橡胶制品的结构形状对冲压模具进行构形设计，这是决定金属橡胶制品能否成型，以及成型质量（包括几何尺寸、力学性能、内部组织结构等）能否满足设计要求的关键。对于较常用

的圆柱形、圆环形、正方形等规则形状的金属橡胶制品的冲压模具设计相对较容易，而特殊形状的金属橡胶制品在冲压模具设计时，还要考虑工位安装、限位保护、脱模及尺寸精度控制等一系列技术问题。

5. 后处理

金属橡胶后期处理主要包括金属橡胶制品的清洗处理和热稳定处理。清洗处理主要清除制品内部的金属屑和污物等杂质，可采用超声波清洗。热稳定处理主要采用回火、退火等对金属橡胶构件进行热处理。此外，对有耐腐蚀工作要求的构件还可以通过涂敷保护膜进行处理。

| 1.3 金属橡胶技术研究概况 |

1.3.1 金属橡胶制备技术研究

金属橡胶的优良性能使其在军事、航空航天等领域具有很大的应用价值。国外，金属橡胶制备工艺方面的研究报道主要是俄罗斯萨马拉国立航空航天大学相关专家提出的金属橡胶的制备工艺技术，该工艺对金属丝处理技术、螺旋卷卷绕技术、毛坯缠绕和冲压技术以及后处理技术都进行了详细的介绍，这为我国金属橡胶材料技术的研究与开展奠定了基础。

国内，哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、西安交通大学、陆军工程大学等单位的专家们均开展了金属橡胶制备工艺的理论 and 实验研究，并取得一定的研究成果。

金属丝制备是金属橡胶制备的首要环节，众多学者对金属丝的制备进行了研究，取得了显著成果。研究成果主要涉及异形金属丝制备工艺、金属丝微动磨损实验、奥氏体不锈钢丝冷拔拉观测等方面^[3-7]。

螺旋卷制备工艺较为成熟，目前工艺可以较好地控制螺旋卷的直径和成型质量，基本实现了螺旋卷卷绕成型的自动化。研究成果主要集中在螺旋卷成型、螺旋卷直径控制、拉伸机构设计、金属丝线张力在线测试等方面^[8-10]。

金属橡胶制品的结构及性能不同，具体的毛坯制备方法亦有不同。俄罗斯学者针对不同的制品性能，提出了螺旋卷线段和细丝线束制备毛坯，编织带扁平状的线卷铺设毛坯，旋转芯轴上波浪形路径铺设毛坯等方法^[2]。国内学者设计了金属橡胶毛坯缠绕专用设备，提出了圆环交叠网、井字铺设网、交叉勾连

网、细针定位铺设等铺设方式,提高了毛坯的成型水平^[11-15]。

冲压成型是影响毛坯密度、孔隙度、刚度阻尼性能的重要环节。冲压成型相关的研究成果较少,文献[16]指出在进行冲压工艺设计时,对于尺寸较小、外形结构简单的制品可以一次冲压成型,对于尺寸较大、外形结构复杂的制品一般需要分步多次成型。文献[17]提出了金属橡胶双梯度冲压成型工艺,实验证实该工艺可显著提高金属橡胶制品的承载能力。

后处理对制品的强度、刚度、耐腐蚀性等性能都会产生影响,合适的后处理方式是获得合格制品的前提保障。研究成果主要包括金属橡胶电脉冲放电烧结工艺、金属橡胶的耐磨性和抗腐蚀性工艺、去应力退火及回火工艺等^[18-22]。

经过多年的发展,金属橡胶的制备工艺从最初的手工制作,向机械化、自动化转变,材料的制备工艺也逐渐丰富,不仅增强了金属橡胶制品的多样性,还让金属橡胶解决了越来越多的工程问题。随着金属橡胶制备工艺水平的提高,金属橡胶制品的工艺参数、组织结构、力学性能的稳定性和也会越来越好。

1.3.2 金属橡胶力学性能研究

金属橡胶的诸多优点使其在很多领域得到应用。当前,金属橡胶在减振缓冲领域的应用最为广泛,国内外学者对金属橡胶的力学特性做了大量研究,取得了丰硕的科研成果。

1. 力学特性实验研究

力学特性实验研究主要集中在刚度特性、阻尼特性、扫频、冲击、疲劳寿命等方面。其中,金属橡胶刚度特性、阻尼特性的研究方面成果最为显著。

金属橡胶刚度特性研究成果主要包括金属橡胶非线性刚度特性实验研究,金属丝材质、金属丝直径、螺旋卷直径、相对密度、预压缩载荷等对刚度特性的影响研究^[23-28]。

金属橡胶的阻尼特性研究成果主要包括阻尼特性实验研究,金属丝截面形状、金属丝直径、金属丝材质、相对密度、温度、元件构型尺寸、载荷幅值、频率、多维载荷、预压缩量、外部约束等对材料阻尼特性的影响研究^[29-33]。

金属橡胶制品的减振特性与刚度、阻尼都相关,一些学者对金属橡胶进行扫频实验,绘制传递率曲线,用传递率曲线对材料的减振性能进行描述^[34-36]。

抗冲击实验表明,金属橡胶材料具备优良的抗冲击性能,金属橡胶经过若干次冲击后性能趋于稳定,适合作为缓冲材料多次使用^[37-40]。

疲劳实验表明,动载荷长期加载使金属橡胶材料内部金属丝局部断裂和磨损,细观累计损伤最终体现为宏观弹性、阻尼性能的衰退,金属丝断裂与冷拔