

金属橡胶力学性能研究进展与展望

张大义^{1,2}, 夏颖¹, 张启成¹, 马艳红^{1,2}, 洪杰^{1,2}
(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 围绕金属橡胶力学性能,归纳和总结半个世纪的相关研究成果,对国内外技术研究现状和进展进行了详细阐述。重点对金属橡胶制备工艺、宏观力学特性及形成机理、力学模型、力学性能及影响参数、改进型金属橡胶及工程应用等方面的研究成果进行了系统而深入的讨论。研究表明:金属橡胶制备水平尚处于由实验室规模向工业化生产规模过渡阶段;金属橡胶在研究工作中需要关注的关键问题在于制定工艺流程、性能检测方法等统一的国家标准并建立金属橡胶力学性能数据库。
关 键 词: 金属橡胶; 多孔纤维材料; 减振; 力学性能; 制备工艺
中图分类号: V233 **文献标志码:** A

Researches on metal rubber mechanics properties in retrospect and prospect

ZHANG Dayi^{1,2}, XIA Ying¹, ZHANG Qicheng¹,
MA Yanhong^{1,2}, HONG Jie^{1,2}
(1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: The literature related to the metal rubber mechanics properties in the past half century were summarized, providing a comprehensive overview on the state of the art of this research area. Then the researches related to metal rubber were reviewed systematically and thoroughly from several aspects, such as manufacture technology, macroscopic mechanics property and formulation mechanics, mechanics modeling, mechanics property and its influence parameters, novel metal rubber, and engineering application. Results showed that metal rubber preparation was still in the transition stage from the laboratory to the industrial production. Furthermore, the key problems related to the metal rubber study were solved to develop unified national standards of preparation process as well as performance testing methods and establish a database of metal rubber mechanics properties.

Key words: metal rubber; porous fibrous material; vibration attenuation; mechanics properties; preparation process

收稿日期:2016-12-12

基金项目:国家自然科学基金(51475021,51475023,11672017)

作者简介:张大义(1979—),男,副教授,博士,主要从事航空发动机振动控制及阻尼材料研究。

引用格式:张大义,夏颖,张启成,等. 金属橡胶力学性能研究进展与展望[J]. 航空动力学报,2018,33(6):1432-1445. ZHANG Dayi, XIA Ying, ZHANG Qicheng, et al. Researches on metal rubber mechanics properties in retrospect and prospect[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1432-1445.

金属橡胶(metal rubber)是一种多孔结构的功能性金属材料,是由金属螺旋丝经过编织、模压等特殊工艺制备而成的。中文金属橡胶是沿用俄文 Металлорезина 的直译^[1],在一些英文文献中,其也被称为 metal mesh^[2], wire mesh^[3], metallic rubber^[4],或者 entangled metallic wire material^[5]。特殊的成型工艺使金属橡胶具有其他多孔材料无法比拟的特殊力学特性,如高阻尼、高弹性、刚度可设计、环境适应性强(耐高低温、抗老化、不挥发)、高吸声系数以及可制备成各种复杂形状等。

20世纪50年代,美国提出了金属橡胶构件^[6-7],并将其用于有特殊需求的减振/隔振设计。60年代初,前苏联在截获的美国军用飞机上发现金属减振器后,俄罗斯国立萨玛拉航空航天大学(简称萨航)开始致力于金属橡胶的设计与应用研究,解决了航空航天领域的诸多振动疑难问题^[1]。随后,美、俄双方都迅速封锁了金属橡胶材料研究和应用的资料。直至90年代初,随着前苏联解体及中俄技术交流增多,国内技术人员在俄“联盟”号飞船返回舱中发现了大量的金属橡胶零部件后,开始认识到金属橡胶技术的重要性。1997年,国内公开报道了北京航空航天大学朱梓根教授将金属橡胶应用于转子支承系统的研究工作^[8],有效解决了在低温环境工作的火箭发动机液氢液氧涡轮泵转子系统的振动问题。2000年,《金属橡胶构件的设计》译文出版后^[1],国内多家研究单位开始重视这项新技术,开展了大量技术基础与工程应用研究。

目前,美国在金属橡胶方面的研究报道主要集中在低/高温环境下转子支承结构的减振器设计,大多工作来自于转子动力学领域的研究人员,如美国 Texas A & M 大学(Texas Agricultural and Mechanical University)的 Choudhry、Alkhateeb 等^[9-10]、Andrés 等^[11],美国通用(GE)研究中心的 Ertas^[12]。与早期的专利报道^[6-7]对比可知,美国早已具备了系统而深入的金属橡胶的力学性能数据和分析方法,因此近年工作集中在极限环境和特殊需求的应用研究。俄罗斯的研究工作主要来自于萨航^[1,13-14],技术水平与美国相当,但其研究工作多为俄文报道^[15],技术借鉴受到很大限制。英、法在金属橡胶方面的研究工作更侧重于材料本身的力学特性,代表性工作包括,英国 Sheffield 大学^[16-17]对金属橡胶力学模型的建立,法国 Lyon 大学^[18-20]对金属橡胶变形机理解释和力学特性的试验标定。日、韩则充分借

鉴了美国现有技术,以应用研究为主,如日本国家宇航研发中心^[21]、韩国科学与技术研究中心^[22-23],在转子支承设计中均采用了金属橡胶。国内从事过金属橡胶研究工作的单位不少于30家,但建树性的研究成果主要来自于北京航空航天大学(简称北航)、哈尔滨工业大学(简称哈工大)、西安交通大学、西安工业大学、军械工程学院和上海交通大学。

国际科研机构对金属橡胶的研究工作已开展了六十余年(国内仅二十余年),取得了长足进展。本文紧密围绕金属橡胶的力学性能,对金属橡胶制备工艺、宏观力学特性及形成机理、力学模型、力学性能及影响参数、改进型金属橡胶、工程应用等方面研究工作进行综述,并分析金属橡胶技术发展及工程应用中需要关注的关键问题。

1 制备工艺

金属橡胶的制备过程包括选丝、绕丝、拉伸、编织毛坯、冷压成型以及后期处理6个步骤。各步骤中参数的选择对成品性能具有重要影响。

1.1 选 丝

选丝包括材料、丝径和截面形状的选择。①材料由金属橡胶成品的环境因素决定,如温度、湿度、介质侵蚀性等,并且会很大程度地影响成品的力学性能^[24-25]。②丝径的选取范围一般在直径为0.05~0.30 mm,成品的非线性弹性模量随丝径增大而增大^[24]。③金属橡胶一般采用圆形截面金属丝制备而成,但郝慧荣等^[26]提出采用非圆截面金属丝制备金属橡胶的工艺方法,试验表明,由于非圆截面带来金属丝之间的接触更加充分,由其制备的金属橡胶的比阻尼能力可提高30%~40%。但这类金属橡胶的内部金属丝磨损和宏观力学性能稳定性等问题还有待进一步研究。

1.2 绕 丝

螺旋卷直径是在绕丝过程中的主要技术参数,其值一般控制在金属丝直径的5~15倍,成品的非线性弹性模量随螺旋卷直径的增大而减小^[24]。为提高绕丝速度和缠绕均匀性,李宇燕等^[27]、李拓等^[28]分别对缠绕机构进行了改进,改善了成品结构及力学性能的一致性。

1.3 编织毛坯

螺旋卷经拉伸后,通过一定的编织方式制作成毛坯。文献^[1]指出,为提高金属橡胶的拉伸强度,可采用并排相互啮合的扁平状线卷的编织方

式;为提高金属橡胶的弹性阻尼性能,可将螺旋卷按波浪形路径铺设。夏宇宏等^[29]研究了螺旋丝走向对成品受压力学特性的影响,给出了螺旋丝缠绕方式对成品能量耗散特性和承载能力的影响规律。黄凯等^[30]提出以背景网格为基础的优化模型,并利用遗传算法建立了定位销设计和路径规划的优化方法,提高了金属橡胶制品中螺旋卷线匝的均匀程度。

1.4 冷压成型

毛坯被放入成型模具内,经过循环压缩和等压保载,以得到需求的形状和尺寸。在此过程中,成型压力、回弹量等都会影响成品的力学特性,目前这些参数的给定主要依赖于经验,并结合数值计算进行辅助预测^[30]。

1.5 后期处理

金属橡胶的后期处理取决于工作环境,根据实际情况有选择的进行清洗、热处理、循环载荷训练、烧结、涂敷保护膜等。①清洗是为了剔除制备过程产生的金属屑和污物等,可采用清洁剂或超声波清洗。②热处理是通过回火和时效硬化,以消除冷压成型时的内应力,是提高金属橡胶刚度、阻尼稳定性和疲劳寿命的有效手段。对于 GH4169 制备的金属橡胶,经过去应力退火工艺处理后,其高温环境下弹性模量提高约 1.5 倍,但阻尼变化很小^[31]。对于 0Cr18Ni9Ti 不锈钢丝制备的金属橡胶,曹凤利等^[32]同样指出回火处理有助于稳定试件尺寸,提高其承载能力,并延长疲劳寿命,但对阻尼影响很小。③在金属橡胶成品投入使用前,采用小振幅循环载荷训练,有利于稳定其力学性能^[33]。曹凤利等^[34]通过疲劳试验,指出初始阶段的小振幅加载有助于改善内部金属丝的均匀性,进而提高金属橡胶制品的承载能力和耗能能力。④为应对特殊需求,有些研究对金属橡胶采用烧结处理以提高其结构稳定性^[35],但烧结会带来内部金属丝之间的摩擦副丧失,进而导致制品宏观阻尼性能和柔度的大幅度下降^[33]。这种烧结类金属橡胶的力学特性与无预螺旋的金属纤维多孔材料^[36-38]更为相似,不作为本文论述重点。⑤对于有耐腐蚀工作要求的金属橡胶制品,需涂敷具有防腐功能的保护膜。

2 宏观力学特性及形成机理

2.1 宏观刚度特性

马艳红等^[24], Zhang 等^[33], Zuo 等^[39], Liu

等^[40]在研究中均指出,金属橡胶具有非线性的宏观刚度,在无预压缩时,受压加载后应力-应变曲线呈现“线性 A-软特性 B-硬特性 C”三个阶段,如图 1 所示。在变形量较小时,应力-应变近似为线性关系;随着变形量增大,刚度特性呈现一段软特性,之后则表现为较强的硬特性。切线刚度(tangent modulus)是表述金属橡胶宏观刚度特性的重要参数,可通过准静态试验方法获得应变-切线刚度曲线^[33],用于指导工程设计。

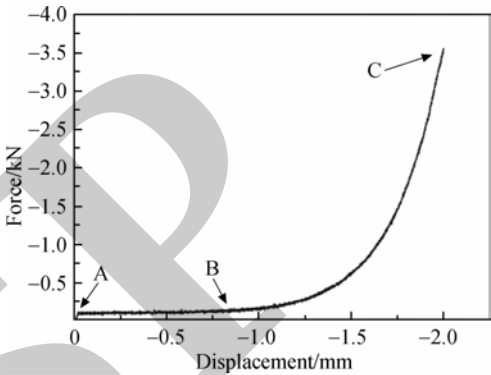


图 1 加载过程力-位移曲线^[39]
Fig. 1 Force-displacement curve during loading process^[39]

2.2 宏观阻尼特性

由于内部干摩擦作用,金属橡胶在加载-卸载过程中的力-位移曲线并不相同^[33],进而形成迟滞回线,如图 2 所示,显然加载过程与卸载过程外力做功之差 ΔW 即为金属橡胶消耗的能量。金属橡胶的阻尼特性可使用损耗因子(loss factor)进行表征。

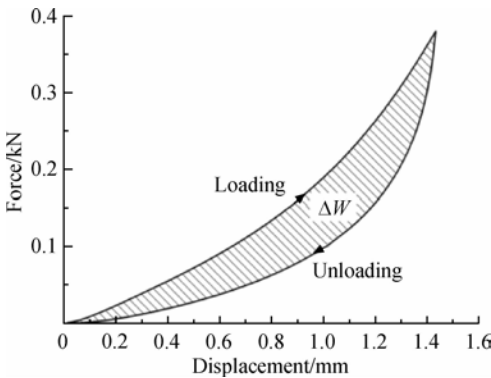


图 2 金属橡胶迟滞回线
Fig. 2 Hysteresis loop for metal rubber

2.3 微观组织及变形机理

Zhang 等^[33]以 GH4169 金属橡胶为例,给出

其外表面扫描电镜图 (SEM) 和内部微元体的电子计算机断层扫描 (简称 CT 扫描) 结果, 分别如图 3 和图 4 所示。可见, 金属橡胶可归为纤维多孔材料, 其内部组织为拉伸后不同形态金属螺旋丝卷的相互勾连、咬合, 错综交叉形成三维网状结构。螺旋丝卷之间存在着复杂的相互作用, 在外部载荷作用下, 螺旋丝卷之间将出现分离、滑移和黏着 3 种接触状态^[41], 如图 5 所示, 这些螺旋丝卷之间接触状态的相互转换是造成金属橡胶刚度

非线性以及迟滞回线的根本原因。由于滑移状态以干摩擦为主, 其耗散能量远远高于其他两种状态, 因此在受载过程中, 滑移状态所占比例是影响阻尼效果的重要因素。

3 力学模型

金属橡胶力学模型的建立可分为唯象 (phenomenology) 和本构 (constitutive) 两大类方法。唯象方法不关注金属橡胶受力变形的内在机理, 而是采用统计分析试验数据的方法得到关键影响参数和影响规律, 并进一步拟合出力学模型, 该方法局限性在于需要大量试验数据支持, 并且在模型外延使用时, 有可能带来无法预估的误差; 本构方法是通过抽取结构内部微结构代表体元 (representative volume element, RVE), 建立其数学描述, 并推演至宏观应力应变关系的方法, 该方法的准确性很大程度上取决于 RVE 模型与材料真实结构的一致性。

3.1 唯象方法

采用唯象方法构建金属橡胶模型时, 主要包括两个关键问题的解决, 一是用于模拟力-位移迟滞回线的数学模型的选择, 双线性迟滞模型被引入金属橡胶研究后^[42], 一直被广泛使用; 二是试验数据拟合方法的选择, 早期研究均使用最小二乘法, 随后逐步应用粒子群、神经网络^[43]等智能算法。唯象方法由于直观、简单易用等优势, 目前在很多工程问题中仍然被广泛应用, 神经网络等智能算法的引入无疑会对其样本数目依赖性强、外延使用精度低等局限性有所改善。

3.2 本构方法

采用唯象方法构建金属橡胶力学模型, 目前研究主要包括悬臂梁模型、角锥模型、微弹簧模型和多孔材料模型。前苏联萨航提出悬臂梁模型和角锥模型来描述金属橡胶的压缩变形^[1]。悬臂梁模型将受压变形的金属橡胶看作是彼此串联和并联的一系列根部固定的悬臂梁阻尼系统 (图 6 (a)), 其可以从总体上评估金属橡胶的弹性阻尼特性, 但不能描述材料内部接触点的摩擦力状态。角锥模型由一系列角锥摩擦元件副组成 (图 6 (b)), 外载荷通过摩擦副传递, 能量因接触对的相互移动而耗散。其比较理想地模拟了金属橡胶内部能量耗散过程, 但对摩擦副的空间分布特征描述不足。Ulanov 等^[44]改进的小曲梁模型, 虽然可以对金属橡胶在单向受压状态下的应力应变

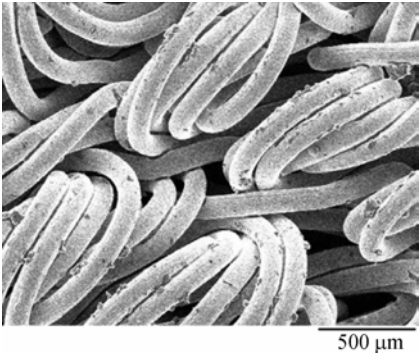


图 3 金属橡胶扫描电镜图 (放大 50 倍)^[33]
Fig. 3 SEM image of metal rubber
(50× enlargement)^[33]

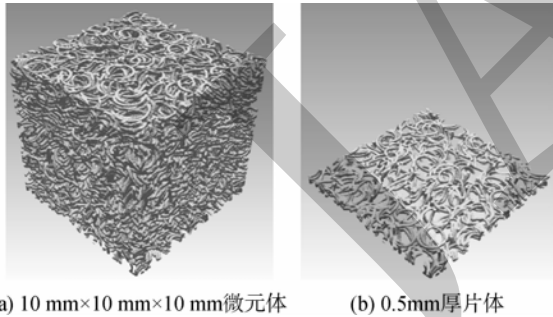


图 4 工业 CT 获得金属橡胶内部组织结构
Fig. 4 Internal organization structure of metal rubber
from an industrial μ -CT scan

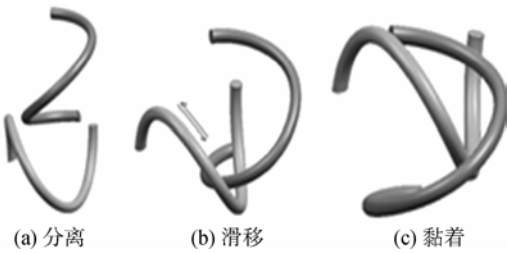


图 5 内部金属丝 3 种作用关系^[41]
Fig. 5 Three types of interaction for internal
metal wires^[41]

关系进行较好模拟,但却无法描述金属橡胶迟滞回线和阻尼特性。曹凤利等^[45]基于变长度悬臂曲梁,建立了精度更高的力学模型,其可以考虑金属丝直径、弹性模量、螺旋卷直径、相对密度等基本结构参数对金属橡胶迟滞特性的影响,实现了金属橡胶加载和卸载过程的描述^[46]。

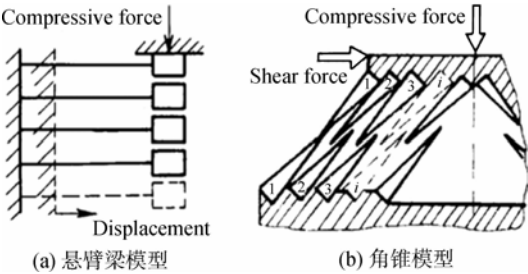


图 6 前苏联学者提出微元体模型^[1]
Fig. 6 Representative elemental volume model proposed by the Soviet Union researchers^[1]

郭宝亭等^[47]提出微弹簧模型,将金属橡胶视为由多个分层微小弹簧组成,以微元弹簧为基础,建立了金属橡胶成型方向和非成型方向的本构关系。在此基础上,彭威等^[48]将金属橡胶宏观变形处理为微弹簧的径向和轴向的组合变形。通过分析微弹簧沿轴向和径向变形的规律,并引入铺层比例系数来表征金属橡胶的细观结构。此模型不仅可以较好地反映金属橡胶压缩性能,而且较好地刻画了金属橡胶内部铺层与各向异性的内在联系。李宇燕等^[49]进一步考虑内部金属丝间的摩擦作用,提出弹簧摩擦模型,该模型能够更好地反映金属橡胶在各种单向载荷作用下,内部螺旋卷线匝的变形及其相互的干摩擦作用,见图 7。Zhu 等^[41]进一步发展了可考虑内部接触状态变化的弹簧摩擦模型(图 5),并通过层间均匀化分布和接触状态贡献系数线性演变规律的假设,建立了金属橡胶的加载/卸载本构关系模型,此模型具有输入参数少、适用性强的特点。

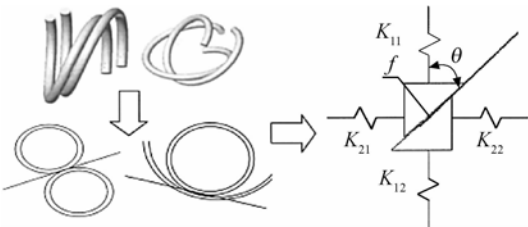


图 7 金属橡胶内部微元体及力学模型^[49]
Fig. 7 Internal representative elemental volume for metal rubber and its mechanics model^[49]

Li 等^[50]另辟蹊径以多孔材料各向同性 Gibson-Ashby 模型为基础,建立了反映金属橡胶非线性特征的本构关系。借鉴多孔材料研究经验,实现金属橡胶本构关系的建立是一个可行思路,但此模型对内部螺旋卷相互作用机理考虑不足,并且模型中待定系数没有实际物理意义,不同参数时其值的确定尚依赖于试验数据,属于本构与唯象相结合的力学模型构建方法。

Ma 等^[51]依据金属橡胶工艺过程和细观结构特征,构建了可以同时弹性性能和耗能特性进行定量描述的“倾斜弹簧微元体-摩擦角锥”的微结构代表体元,所推导模型可以全面准确地考虑丝材弹性模量、泊松比、丝径、螺旋径、相对密度、成型压缩比、预应变、应变加载幅值、温度等 9 个参数对其宏观性能的影响规律,参见图 8。

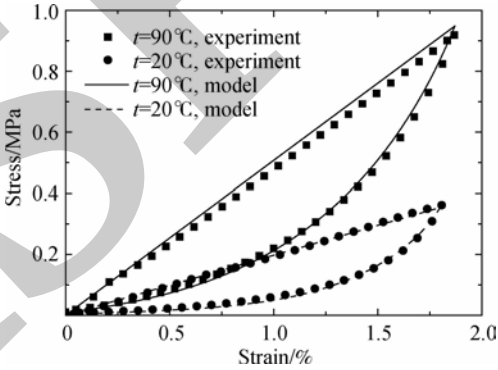


图 8 迟滞回线的理论计算与试验结果对比^[51]
Fig. 8 Hysteresis loop comparison between theoretical calculation and experimental results^[51]

此模型的局限性在于输入参数较多,计算过程繁复,但可通过编制求解程序方便地指导样品制备和工程设计。

由于金属橡胶的宏观迟滞回线与十几个参数具有强相关性,因此不可能存在既简单又精准的本构模型。精准的本构模型往往带来计算过程繁复,工程应用受到限制等问题,但通过本构分析,可以深入了解金属橡胶力学特性与丝材参数、制备工艺参数、装配参数、载荷参数之间的关联,对经验公式中的系数确定,以及唯象方法中试验数据的预判及选用等也无疑大有裨益。

4 力学性能及影响参数

由于金属橡胶力学模型建立困难,国内外研究机构更多的工作是采用试验方法获得金属橡胶的力学性能,并对其影响参数进行分析。

4.1 准静态力学特性

美国 Texas A&M 大学^[11]、GE 研究中心^[12]，俄罗斯萨航^[1]，英国 Sheffield 大学^[17]，法国 Lyon 大学^[20]，国内各研究团队^[24,52] 针对不同结构形式金属橡胶的常温准静态力学特性均开展了大量试验工作，研究表明：变形量、相对密度、丝径、螺旋径、丝材、装配预压变形量、外形结构、温度等是影响金属橡胶宏观力学性能的重要参数。

1) 变形量

由于金属橡胶应力-应变关系呈现强非线性，如图 1 所示，因此在研究中应关注随应变(或变形量)变化的力学性能，在此基础上，根据实际工作的应变范围，设计和制备金属橡胶。值得说明的是，不同的制备工艺和参数，会带来应力-应变关系的显著不同，一些制品的试验测试结果并不存在图 1 中的线性段 A^[53]。

2) 相对密度

指金属橡胶成品密度与丝材密度之比，部分研究中采用孔隙率反映其影响^[52,20]，两个参数之和为 1。随相对密度增大，金属橡胶切线模量增大，损耗因子和泊松比减小，如图 9 所示^[33]。其机理在于相对密度增大时，金属橡胶内部更多处于滑移状态的螺旋卷转化为黏着状态，进而带来等效刚度的增大和摩擦耗能的减小。由图 9(b)可见，金属橡胶在小变形时，近似为零泊松比材料。

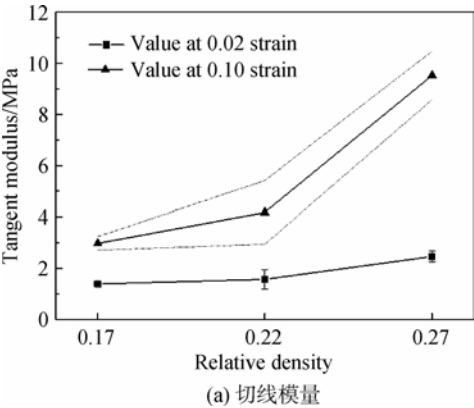
3) 丝径

随丝径 d_s 增大，金属橡胶弹性模量增大(近似与 $d_s^{4/3}$ 成正比)，而损耗因子减小(近似与 $d_s^{-0.4}$ 成正比)^[54]。

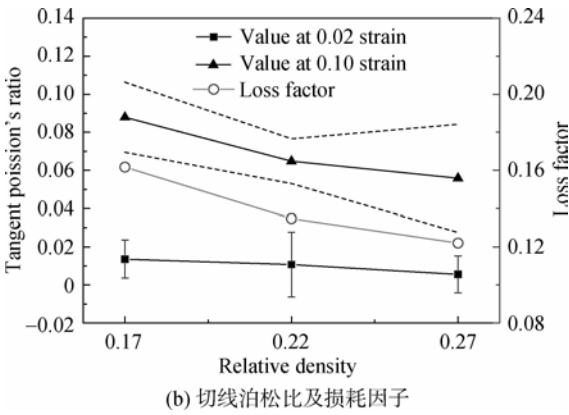
4) 螺旋径

随螺旋径 D_s 增大，金属橡胶弹性模量减小(近似与 $D_s^{-4/3}$ 成正比)，而损耗因子增大(近似与 $D_s^{1/2}$ 成正比)^[54]。

5) 丝材



(a) 切线模量



(b) 切线泊松比及损耗因子

图 9 力学性能随相对密度变化曲线^[33]

Fig. 9 Variation curve of mechanics properties with relative density^[33]

随丝材弹性模量增大，金属橡胶弹性模量增大，并且近似呈线性正比关系，而损耗因子几乎不变^[54]。

装配预压变形量：金属橡胶在实际装配于减振结构时，往往在承载方向有一定的预压缩变形，合适的预压变形可以提高金属橡胶的使用寿命和力学稳定性^[55]。此外，必须格外注意承载方向预压变形会带来金属橡胶初始切线模量的显著增大，如图 10 所示，但当应变进一步增大时，切线模量将逐渐趋近于无预压状态的切线模量值^[56,13]。Ma 等^[57] 进一步对非承载面存在预压变形时，金属橡胶的力学性能进行研究，指出非承载面预压量越大，金属橡胶刚度越大，非线性越明显。

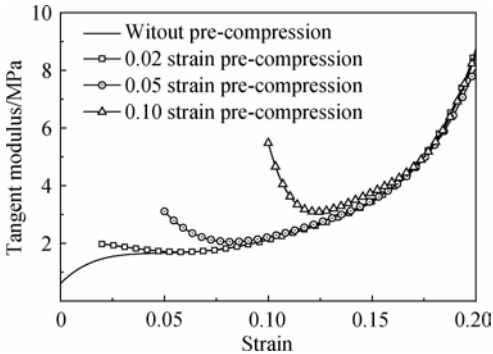


图 10 不同预压变形时的切线模量-应变曲线^[56]

Fig. 10 Tangent modulus-strain curve for different pre-compression deformation^[56]

6) 外形结构

受制备工艺限制，金属橡胶边界层螺旋卷的分布及啮合状态与内部会存在显著差别，进而带来装配后的边界层效应，因而有必要研究外形结构对其宏观力学性能的影响。李宇燕等^[58] 采用形状因子

对其描述,建立了高度、承载面积对其本构模型中相关参数的影响关系。Ma 等^[59]指出承载面积、承载面形状对金属橡胶力学性能影响很小,不大于 10%;但高度(指承载方向长度)可能存在较大影响,尤其是高度小于 10 mm 时,金属橡胶受上下边界层影响较大,随高度减小,弹性模量会显著减小。

7) 温度

由于金属橡胶是低温/高温环境下被广泛使用的阻尼元件,因此其低温/高温力学特性受到格外关注。对于自由状态的金属橡胶,温度影响主

要是体现其在对金属丝本身机械性能的影响。Ertas 等^[60]、Zarzour 等^[2]针对低温旋转机械转子支承系统的设计需求,试验测试得到了金属橡胶在-170℃以下的低温力学性能,部分数据如表 1 所示。可见,由于其干摩擦耗能机理几乎不受温度影响,因此即使在-170℃时,金属橡胶仍然具有优异的阻尼特性。刘宝龙等^[31]的研究也指出金属橡胶减振器在-70℃~300℃温度范围内具有良好而稳定的阻尼性能,其对温度的依赖性远小于黏弹性阻尼材料。

表 1 金属橡胶力学性能常温/低温试验数据^[60]

Table 1 Experimental date for mechanics properties of metal rubber at room/low temperature^[60]

材料	相对密度/%	常温 15℃		低温		
		刚度/(kN/m)	阻尼/(N·s/m)	温度/℃	刚度/(kN/m)	阻尼/(N·s/m)
钢	41	1189	529	-175	1675	506
钢	22	1486	648	-170	3203	669
铜	26	741	492	-190	1184	620

4.2 动态力学特性

杨春香等^[61]、Zhang 等^[62]、Hou 等^[63]分别对金属橡胶动态力学性能开展了试验研究,得到相对密度、振动幅值和振动频率等参数对金属橡胶材料迟滞特性的影响。金属橡胶在动态激励力下的储能模量(用于描述动态刚度)和损耗因子与准静态试验结果明显不同。试验结果图 11 表明,随振幅增大,金属橡胶储能模量减小,而损耗因子呈现先增大后减小的趋势;随激励频率增大,其储能模量增大,而损耗因子呈现减小趋势。值得注意的是,在小应变或高频时,金属橡胶的阻尼特性会大幅度降低,这是由于在极小振幅时,其内部金属丝大多处于黏着或分离状态,滑移状态比例偏小进而带来干摩擦耗能减少,在工程使用中应给予重视。

抗冲击能力是金属橡胶在工程应用中的另一关注点,但目前在此方面的研究成果还不够系统和深入。Liu 等^[64]指出随金属橡胶孔隙率减小(相对密度增大),冲击韧性增大;并进一步给出冲击载荷作用下内部金属丝损伤的电镜扫描结果,对失效模式进行了分析。魏浩东等^[65]指出,金属橡胶利用干摩擦和弹性变形可以有效消耗冲击能量,冲击隔离系数随冲击载荷的增加而增大;针对套筒型和草帽型金属橡胶隔振器,对比研究了各自适用的冲击条件。

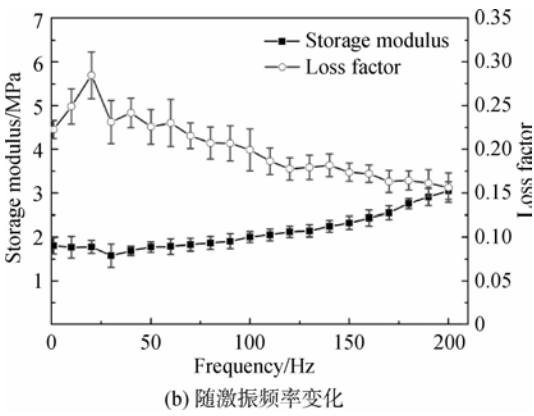
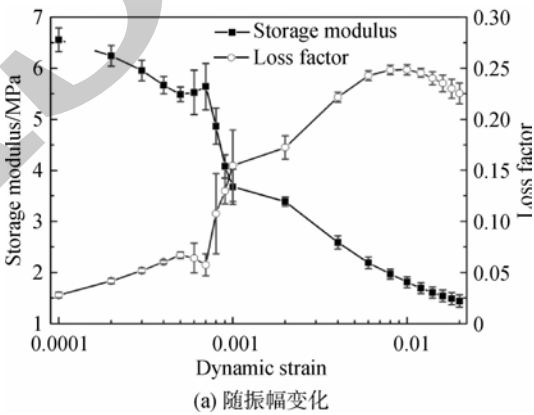


图 11 金属橡胶动态力学性能^[62]
Fig. 11 Dynamic mechanical properties of metal rubber^[62]

4.3 疲劳寿命

金属橡胶的疲劳寿命及耐久性一直是影响其在长寿命机械中使用的关键问题。哈工大 Jiang 等^[66]在此方面进行了研究,针对环形金属橡胶隔振器,试验获得了其疲劳寿命曲线,指出金属橡胶隔振器疲劳寿命随相对密度、金属丝直径和预应力的增大而增大,随工作载荷的增大而减小^[67-68]。2014 年,李国富等^[69]基于金属橡胶元件在不同应力水平下的疲劳试验结果,提出两种失效模式:干摩擦失效和结构性疲劳失效。干摩擦失效发生在小应力、长时间的工况下,失效机理是内部金属丝之间的干摩擦造成局部点蚀(图 12(a)),进而断裂形成碎丝。结构性疲劳失效发生在较大工作载荷下,金属橡胶内部金属丝会绕其接触点振动,导致局部应力过大甚至超过材料疲劳极限,长时间工作出现裂纹,逐渐扩展至断裂,如图 12(b)、图 12(c)所示。

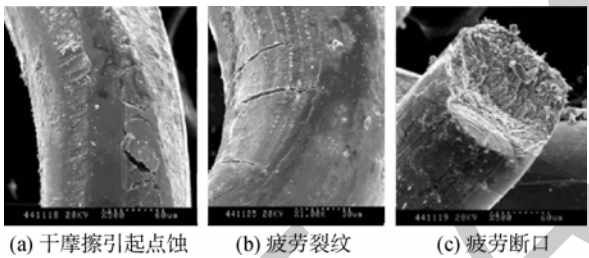


图 12 金属橡胶失效机理^[69]

Fig. 12 Failure mechanism for metal rubber^[69]

军械学院侯军芳等^[70]将金属橡胶疲劳破坏的内因分为磨损和金属丝断裂,宏观上表现为试件的刚度衰减,试验表明金属橡胶刚度衰减速度随环境温度的降低而加快,并且在整个疲劳试验过程中,阻尼性能变化很小。董秀萍等^[71]通过疲劳试验测试和金属丝磨痕表面分析,将金属橡胶内部微动单元的磨损进一步分为表面打磨、接触面黏着、第三体床形成和稳定磨损 4 个阶段;随后,总结了金属橡胶构件在低温(−70℃)、常温(25℃)和高温(300℃)下的疲劳特性,提出以刚度衰减作为金属橡胶的疲劳失效判据^[72]。王尤颜等^[73]使用刚度损伤和阻尼损伤描述金属橡胶的疲劳过程,并提出综合损伤因子作为疲劳失效判据。

北航 Hong 等^[74]实测了金属橡胶转子支承结构的疲劳寿命,指出通过优化设计金属橡胶试件的疲劳寿命可达 1.17×10^7 次;马艳红等^[75]针对金属橡胶产品在存储和工作中的寿命问题,试验研究了稳态载荷作用下的金属橡胶耐久性,指

出金属橡胶的宏观结构尺寸和力学性能在稳态载荷作用下具有蠕变特征,且呈现阶段性变化;各阶段持续时间及变化幅度与载荷大小相关;宏观特征的变化机理是内部金属丝接触状态的改变。

目前,针对金属橡胶寿命问题,国内各研究团队均在宏观尺度提出了失效判据,在微观尺度给出了失效机理解释,并对金属橡胶寿命的影响参数及影响规律有所掌握,但在试验数据积累、共享和数据库建立方面还有待长足发展。

4.4 吸声性能

金属橡胶内部组织(图 4)具备多孔吸声材料的结构特征,可视为纤维类多孔吸声材料。前苏联萨航、哈工大、北航分别试验研究了金属橡胶材料的吸声特性,研究结果表明其具备与典型多孔吸声材料相似的吸声特性^[76-77],如①频率:随频率增大,吸声系数呈现整体增大趋势,且在中高频段波峰波谷交替出现,如图 13,图中 h 表示厚度, α 表示吸声系数;低频段吸声系数较小,而高频段可达到 0.99。②厚度:增加材料厚度可以显著提高低频吸收,但对高频段影响较小。③孔隙率(或相对密度):随孔隙率减小,金属橡胶流阻增大,进而调节材料的吸声性能。流阻值过高或过低,都不能使材料具有良好的吸声性能。④背腔厚度:在金属橡胶背侧设置空气层,其作用相当于增加了材料厚度,可以改善低频吸收,又可节省材料。⑤金属丝直径:减小金属丝直径,可使金属橡胶在整个吸声频带的吸声系数有所提高。

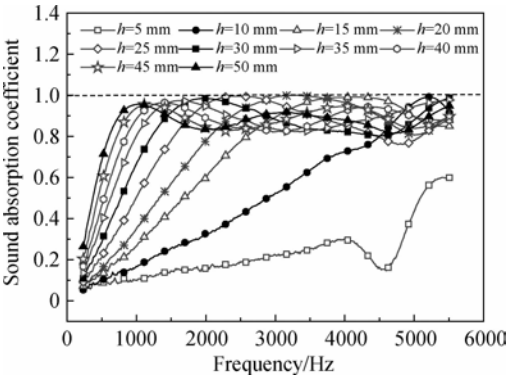


图 13 不同厚度金属橡胶吸声系数随频率变化曲线

Fig. 13 Variation curve of sound absorption coefficient with frequency for metal rubber with different thicknesses

就目前已公开发表的试验数据来看,与其他多孔吸声材料相比^[78],金属橡胶并未表现出鲜有其比的吸声性能。相反,在达到相同吸声效果的

前提下,金属橡胶的制造成本、质量、适用温度等方面很难超越金属纤维毡、泡沫金属等多孔金属基吸声材料。因此,后续相关研究应针对有减振、抗冲击、高承载等特殊需求的降噪问题,有的放矢地开展其吸声特性研究;在微观尺度应注重其摩擦耗能可能带来的降噪机理的特殊性。

5 改进型金属橡胶

5.1 颗粒金属橡胶

Hong 等^[79]提出一种更为轻质、且便于应用在复杂结构填充使用的颗粒金属橡胶,如图 14 所示,其具有与普通金属橡胶相近的损耗因子,但相对密度仅为 0.10~0.13;随后,将其应用于负泊松比结构设计^[80]以及板壳结构的减振设计,实现了轻质、高阻尼和高承载能力的设计目标。

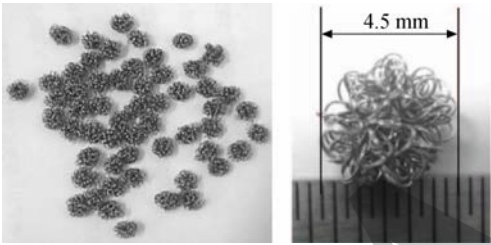


图 14 颗粒金属橡胶^[79]
Fig. 14 Particle metal rubber^[79]

5.2 智能金属橡胶

Yan 等^[81]采用 Ni-Ti 形状记忆合金制备了金属橡胶,试验研究了其马氏体/奥氏体下的力学性能,但未解决其在加热过程中的结构失稳问题。Ma、洪杰等^[51,53,82]进一步将金属橡胶本构模型引入其热定型工艺设计,克服了记忆合金丝材形状记忆效应对金属橡胶模压定型的破坏,成功研制了弹性模量可主动变化 2.6 倍(图 8),同时具有优异阻尼性能的形状记忆合金金属橡胶(shape memory alloy metal rubber, SMAMR);随后将其作为作动元件设计出智能转子支承结构^[83],并将其应用于转子系统的振动主动控制^[84],实现了全转速范围内低振动响应的智能转子设计,如图 15 所示。

基于软磁特性, Ma 等^[85]提出了一种磁性智能金属橡胶,在 500 mT 磁场作用下,其切线模量可增大 2~7 倍,而损耗因子保持在 0.1~0.3,在振动控制领域具有良好的应用前景。

5.3 负泊松比金属橡胶

试验研究表明^[17,33],普通金属橡胶的泊松比

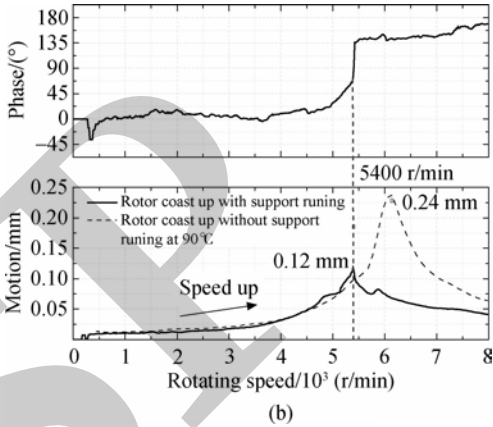


图 15 智能支承结构及转子振动控制试验结果^[84]
Fig. 15 Smart support structure and experiments results for the vibration control on rotor^[84]

接近零。鉴于负泊松比结构在提高材料剪切模量、抗缺口性能、抗断裂性能以及回弹韧性等方面的独特优势,以及在各工程领域巨大的潜在应用前景, He 等^[35]提出负泊松比金属橡胶的制备方法,并对泊松比值达到-1.5 的金属橡胶样本,试验与理论相结合,给出了其内在变形机理; Ma 等^[80]则将金属橡胶与负泊松比金属框架相结合,提出了高阻尼特性的负泊松比结构; Rodney 等^[19]指出金属橡胶类制品的泊松比可设计性、高延展性、可恢复性,以及其广泛的应用前景。

5.4 梯度金属橡胶

鉴于梯度材料可能带来的性能增益, Jiang 等^[86]尝试制备了钛合金与镁合金复合的金属橡胶,试验测试其力学性能,并探讨其在生物医学中的应用;马艳红等通过不同相对密度金属橡胶制品的组合设计,大幅度提高了金属橡胶的吸声特性。

6 工程应用

自 20 世纪 50 年代起,金属橡胶在多个工程领域已得到广泛应用,并且成为某些产品设计中不可替代的关键元件。

6.1 减振/隔振

金属橡胶作为恶劣环境中的减振/隔振元件,如图 16 所示,在航天、航空、武器装备、汽车、机械加工、土木、生物医学等军民工程领域得到了广泛应用^[87]。

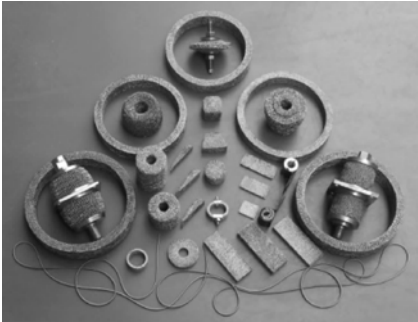


图 16 典型金属橡胶减振/隔振结构
Fig. 16 Typical attenuators/isolators with metal rubber element

航天飞行器涡轮泵转子支承系统的工作环境温度往往低于 $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$,挤压油膜阻尼器以及其他黏性阻尼材料的使用受到限制,因此,早在 1977 年,金属橡胶就被用于解决转子系统的动力学稳定性问题^[88]。直至目前,其仍然是低温环境中转子支承阻尼结构最佳选择^[89,12,60]。近年来随着“无油”转子支承结构日益受到重视,国际上部分学者尝试将动压气体轴承与金属橡胶相结合,以解决其面临的承载能力、初始静载及稳定性等一系列问题,成为新一代高速转子的非接触支承。此类研究的典型案例是美国 Texas A&M 大学的 Andrés 等^[90]和美国 GE 研究中心的 Ertas 等^[12]研制的带金属橡胶自适应外环的箔片式动压气体轴承,如图 17 所示。国内在此方面有应用报道的主要是北航和哈工大。此外,航天器的仪表板缓冲垫、火箭发动机压力信号发生器隔振装置、太阳能帆板减振器、月球着陆器等多种设备中均采用

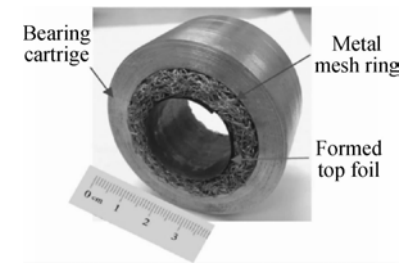


图 17 带金属橡胶的气体轴承^[90]
Fig. 17 Gas bearing with metal rubber^[90]

金属橡胶作为减振/隔振元件。

一台俄制或国产航空发动机往往在近百个位置采用金属橡胶进行振动抑制,如发动机安装节、外部管路弹性支承、导线插头支座、航行灯座、成附件系统,此外在飞机光电吊舱中也有金属橡胶隔振器的应用。

武器装备,如装甲战车发动机电控系统,火炮缓冲器、导弹武器系统、鱼雷发动机在采用金属橡胶制品后也取得了良好的振动隔离效果。

随着金属橡胶技术发展,其应用领域由军用逐步进入民用。如汽车工程的环形车用金属橡胶隔振环、汽车发动机隔振器等;机械加工领域的传输辊筒、冷锯机等;土木工程的高架桥梁缓冲器、剪力墙抗震器、楼体抗震设计等;生物医学的人工颈椎间盘植入结构等^[91-93]。

6.2 其他方面

除作为弹性阻尼元件,金属橡胶在吸声降噪、密封、节流过滤等方面也有所应用。①吸声降噪:如文中第 6.4 节所述,金属橡胶吸声性能已获得了充分重视,但用其解决实际工程问题的案例并不多,目前仅限于一些机械加工设备和鱼雷发动机降噪设计的报道。②密封:哈工大姜洪源等将金属橡胶弹性元件用聚四氟乙烯或铜皮做包皮制成的金属橡胶密封件,具有耐高低温、大温差、腐蚀及老化的优点,在航空航天产品中得到了广泛应用。③节流过滤:金属橡胶具备纳污力强、过滤寿命长、可承受压力变形、过滤精度可调整等优点,已被应用于食品加工、线切割机床的过滤系统。④其他:金属橡胶在隔热、电磁屏蔽等方面的特性也被日益重视,并且开展了探索性应用研究。

7 总结与展望

目前金属橡胶在诸多工程领域被广泛应用,其制备水平尚处于由实验室规模向工业化生产规模过渡阶段,后续工作中应对以下几个问题给予重视:

1) 制备工艺仍然是限制金属橡胶技术发展和工程推广使用的关键技术问题,尤其是在减小成品力学性能分散性、降低制备成本、提高产品疲劳寿命及耐久性方面,需国内各研究机构加强技术协作,齐力制定工艺流程、性能检测方法等统一的国家标准。

2) 力学性能试验应按美国材料与试验协会 (ASTM) 标准或国家标准进行,并格外关注对力学性能分散性的分析。由于国内大部分从事金属

橡胶研究的人员来自于机械振动专业,因此在很多报道中,材料性能标定方法不规范,试验件样本数量不足,试验数据以定性描述为主,这不仅导致研究成果的可借鉴性差,而且带来各团队大量的重复性研究。

3) 进一步加强金属橡胶准静态、动态、疲劳、吸声等方面试验数据的积累和共享,逐步建立行业亟需的金属橡胶力学性能数据库。

4) 力学模型方面已开展了大量而系统的研究工作,在这些模型基础上,进一步考虑制备过程各参数的影响,并实现力学特性分散性的量化表述,无疑可以更好地指导金属橡胶产品的制备和工程应用。

5) 金属橡胶应用领域的扩展以及智能金属橡胶的提出,应切实的面对工程需求,并关注目前已应用的其他材料的性能参数,避免研究工作无的放矢。

参考文献:

- [1] 契戈达耶夫. 金属橡胶构件的设计[M]. 李中鄂,译. 北京: 国防工业出版社,2000.
- [2] ZARZOUR M, VANCE J. Experimental evaluation of a metal mesh bearing damper[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*,1999,122(2):326-329.
- [3] ERTAS B H, LUO H. Nonlinear dynamic characterization of oil-free wire mesh dampers[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*,2008,130(3):1225-1234.
- [4] LI Y, LI X, HUANG X. Research on factors influencing the mechanical properties of metallic rubber[J]. *Mechanics of Composite Materials*,2011,47(5):571-580.
- [5] TAN Q, HE G. Stretching behaviors of entangled materials with spiral wire structure[J]. *Materials and Design*,2013,46(4):61-65.
- [6] WESTERGAARD R H, YORK O H. Elastic metal mesh tubular bellows:US2755079[P]. 1956-07-17.
- [7] CREDE C E. Vibration isolator:US2610016[P]. 1952-09-09.
- [8] 王新,朱梓根. 环形金属橡胶减振器[J]. *航空动力学报*,1997,12(2):143-145.
WANG Xin, ZHU Zigen. Ring metal rubber vibration damper[J]. *Journal of Aerospace Power*,1997,12(2):143-145. (in Chinese)
- [9] CHOUDHRY V V, VANCE J M. Design equations for wire mesh bearing dampers in turbomachinery[R]. ASME Paper GT2005-68641,2005.
- [10] AL-KHATEEB E M, VANCE J M. Experimental evaluation of a metal mesh bearing damper in parallel with a structural support[R]. ASME Paper 2001-GT-0247,2001.
- [11] ANDRÉS L S, CHIRATHADAM T A, ANDRÉS L S, et al. Metal mesh foil bearing:effect of motion amplitude, rotor speed, static load, and excitation frequency on force coefficients[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*,2011,133(12):1201-1228.
- [12] ERTAS B H. Compliant hybrid journal bearings using integral wire mesh dampers[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*,2009,131(2):1215-1226.
- [13] LAZUTKIN G V, ULANOV A M, BOYAROV K V. Comparison of mechanical characteristics of vibration isolators made of wire pressed materials [J]. *International Journal of Engineering and Technology*,2014,6(5):2201-2208.
- [14] ULANOV A M, LAZUTKIN G V. Description of an arbitrary multi-axial loading process for non-linear vibration isolators[J]. *Journal of sound and vibration*. 1997,203(5):903-907.
- [15] ПОНОМАРЕВ Ю. К., УЛАНОВ А. М. Сравнение российских и зарубежных виброизоляторов из проволочных демпфирующих материалов[R]. Самара:Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук,2009. (in Russian)
- [16] ZHANG B, LANG Z Q, BILLINGS S A, et al. System identification methods for metal rubber devices[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*,2013,39(1/2):207-226.
- [17] WANG H, RONGONG J A, TOMLINSON G R, et al. Nonlinear static and dynamic properties of metal rubber dampers[R]. Leuven, Belgium; International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA),2010.
- [18] COURTOIS L, MAIRE E, PEREZ M, et al. Mechanical properties of monofilament entangled materials [J]. *Advanced Engineering Materials*,2012,14(12):1128-1133.
- [19] RODNEY D, GADOT B, MARTINEZ O R, et al. Reversible dilatancy in entangled single-wire materials[J]. *Nature Materials*,2015,15(1):72-77.
- [20] GADOT B, MARTINEZ O R, ROSCOAT S R D, et al. Entangled single-wire NiTi material: A porous metal with tunable superelastic and shape memory properties[J]. *Acta Materialia*,2015,96:311-323.
- [21] KAMIJO K, YOSHIDA M, TSUJIMOTO Y. Hydraulic and mechanical performance of LE-7 LOx pump inducer [J]. *Journal of Propulsion and Power*,1993,1(6):819-826.
- [22] LEE Y B, CHANG H K, KIM T H, et al. Effects of mesh density on static load performance of metal mesh gas foil bearings[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*,2011,134(1):675-683.
- [23] LEE M G, LEE K W, HUR H K, et al. Mechanical behavior of a wire-woven metal under compression[J]. *Composite Structures*,2013,95(1):264-277.
- [24] 马艳红,郭宝亭,朱梓根. 金属橡胶材料静态特性的研究[J]. *航空动力学报*,2004,19(3):326-331.
MA Yanhong, GUO Baoting, ZHU Zigen. Static characteristics of metal rubber [J]. *Journal of Aerospace Power*,2004,19(3):326-331. (in Chinese)

- [25] ERTAS B, LUO H, HALLMAN D. Dynamic characteristics of shape memory alloy metal mesh dampers[R]. AIAA-2009-2521, 2009.
- [26] 郝慧荣, 白鸿柏, 张慧杰. 非圆截面丝金属橡胶与普通金属橡胶阻尼性能比较[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(2): 210-213.
- HAO Huirong, BAI Hongbai, ZHANG Huijie. Comparison of damping capacities between non-circular section wire metal rubber and ordinary metal rubber[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(2): 210-213. (in Chinese)
- [27] 李宇燕, 黄协清, 王刚. 一种金属橡胶绕丝机: CN201817156[P]. 2011-05-04.
- [28] 李拓, 白鸿柏, 路纯红, 等. 金属橡胶的研究进展及其应用[J]. 新技术新工艺, 2013(3): 85-90.
- LI Tuo, BAI Hongbai, LU Chunhong, et al. Recent advance and application of metal rubber technology[J]. New Technology and New Process, 2013(3): 85-90. (in Chinese)
- [29] 夏宇宏, 姜洪源, 敖宏瑞, 等. 簧丝走向对金属橡胶构件性能的影响分析[J]. 中国机械工程, 2002, 13(10): 880-883.
- XIA Hongyu, JIANG Hongyuan, AO Hongrui, et al. Research on the effect of wire distribution on the characteristics of metal rubber element[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(10): 880-883. (in Chinese)
- [30] 黄凯, 白鸿柏, 路纯红, 等. 金属橡胶冲压成形数值模拟分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(3): 681-687.
- HUANG Kai, BAI Hongbai, LU Chunhong, et al. Numerical simulation analysis of metal rubber stamping[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(3): 681-687. (in Chinese)
- [31] 刘宝龙, 马艳红, 张大义, 等. 金属橡胶力学特性的热处理工艺影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(2): 259-263.
- LIU Baolong, MA Yanhong, ZHANG Dayi, et al. Experiment investigation on the effect of heat treatment on metal rubber mechanical properties[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(2): 259-263. (in Chinese)
- [32] 曹凤利, 白鸿柏, 李国璋, 等. 回火对金属橡胶力学性能及宏观结构尺寸的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(8): 189-191.
- CAO Fengli, BAI Hongbai, LI Guozhang, et al. Impact analysis of tempering on mechanical characteristic of metal-rubber material[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(8): 189-191. (in Chinese)
- [33] ZHANG D, SCARPA F, MA Y, et al. Compression mechanics of nickel-based superalloy metal rubber[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 580(37): 305-312.
- [34] 曹凤利, 白鸿柏, 王尤颜, 等. 振幅对金属橡胶材料疲劳寿命的影响分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(5): 671-675.
- CAO Fengli, BAI Hongbai, WANG Youyan, et al. Research on effects of loading amplitude on fatigue life of metal rubber material[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(5): 671-675. (in Chinese)
- [35] HE G, TAN Q, JIANG G, et al. A novel mechanism for auxetic behavior in entangled materials with a spiral wire structure[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(9): 639-650.
- [36] ZHOU W, TANG Y, LIU B, et al. Compressive properties of porous metal fiber sintered sheet produced by solid-state sintering process[J]. Materials and Design, 2012, 35: 414-418.
- [37] LIU S F, XI Z P, TANG H P, et al. Sintering behavior of porous titanium fiber materials[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 21(9): 849-854.
- [38] LIU P, ZHAO Q, HE G, et al. Fabrication of entangled tough titanium wires materials and influence on three-dimensional structure and properties[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(3): 954-966.
- [39] ZUO H, CHEN Y H, BAI H B, et al. The compression deformation mechanism of a metallic rubber[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2005, 2(3/4): 269-277.
- [40] LIU P, TAN Q, WU L, et al. Compressive and pseudo-elastic hysteresis behavior of entangled titanium wire materials[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(15): 3301-3309.
- [41] ZHU B, MA Y H, ZHANG D Y, et al. A constitutive model of metal rubber based on hysteresis property[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(7): 191-191.
- [42] 白鸿柏, 黄协清. 三次非线性粘性阻尼双线性滞迟振动系统 IHB 分析方法[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(10): 35-38.
- BAI Hongbai, HUANG Xieqing. An IHB method for the analysis of cubic nonlinear viscous damping and bilinear delayed vibration system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(10): 35-38. (in Chinese)
- [43] 李宇燕, 黄协清, 李福林. 基于 BP 神经网络的金属橡胶本构关系的预估方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1128-1134.
- LI Yuyan, HUANG Xieqing, LI Fulin. Prediction for constitutive relationship of metallic rubber based on BP neural net[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1128-1134. (in Chinese)
- [44] ULANOV A M, PONOMAREV Y K. Finite element analysis of elastic-hysteretic systems with regard to damping[J]. Russian Aeronautics, 2009, 52(3): 264-270.
- [45] 曹凤利, 白鸿柏, 任国全, 等. 基于变长度悬臂梁的金属橡胶材料本构模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 61-66.
- CAO Fengli, BAI Hongbai, REN Guoquan, et al. Constitutive model of metal rubber material based on curved cantilever beam of variable length[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 61-66. (in Chinese)
- [46] CAO F, BAI H, LI D, et al. A constitutive model of metal rubber for hysteresis characteristics based on a meso-mechanical method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(1): 1-6.
- [47] 郭宝亭, 朱梓根, 崔荣繁, 等. 金属橡胶材料的理论模型研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 314-319.
- GUO Baoting, ZHU Zigen, CUI Rongfan, et al. Theoretical

- model of metal-rubber[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(3): 314-319. (in Chinese)
- [48] 彭威, 白鸿柏, 郑坚, 等. 金属橡胶材料基于微弹簧组合变形的细观本构模型[J]. *实验力学*, 2005, 20(3): 455-462.
- PENG Wei, BAI Hongbai, ZHENG Jian, et al. A micromechanics constitutive model of the metal rubber materials based on the radial and axial combined deformation of the micro-springs[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(3): 455-462. (in Chinese)
- [49] 李宇燕, 黄协清, 宋凯, 等. 金属橡胶非线性干摩擦副的接触作用机理及其仿真结果分析[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(7): 77-81.
- LI Yuyan, HUANG Xieqing, SONG Kai, et al. Contacting mechanism of nonlinear friction pair for metallic rubber and its simulation results[J]. *Vibration and Shock*, 2011, 30(7): 77-81. (in Chinese)
- [50] LI Y, HUANG X, MAO W. A theoretical model and experimental investigation of a nonlinear constitutive equation for elastic porous metal rubbers[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2005, 41(4): 303-312.
- [51] MA Y, ZHANG Q, ZHANG D, et al. The mechanics of shape memory alloy metal rubber[J]. *Acta Materialia*, 2015, 96: 89-100.
- [52] LIU P, HE G, WU L. Uniaxial tensile stress-strain behavior of entangled steel wire material[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 509(1): 69-75.
- [53] 洪杰, 刘宝龙, 张大义, 等. 具有形状记忆效应的新型智能阻尼材料及其热弹性力学性能研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(16): 466-474.
- HONG Jie, LIU Baolong, ZHANG Dayi, et al. Research on the shape memory effect and thermalelasticity of a novel intellectual damping material[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(16): 466-474. (in Chinese)
- [54] 朱彬. 金属橡胶受压力学性能和热物理性能理论与试验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- ZHU Bin. Theoretical and experimental investigation on thermos-physical properties of metal rubber[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [55] 敖宏瑞, 孟庆鑫, 姜洪源, 等. 安装预紧量对金属橡胶构件干摩擦阻尼的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2005, 13(3): 225-227.
- AO Hongrui, MENG Qinxin, JIANG Hongyuan, et al. Effects of preloading of metal rubber elements on its dry friction damping characteristics[J]. *Materials Science and Technology*, 2005, 13(3): 225-227. (in Chinese)
- [56] MA Y, ZHANG Q, ZHANG D, et al. Size-dependent mechanical behavior and boundary layer effects in entangled metallic wire material systems[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(7): 3741-3756.
- [57] MA Y, GAO D, ZHANG D, et al. Compressive and dissipative behavior of metal rubber under constraints[J]. *Physica Status Solidi*, 2015, 252(7): 1675-1681.
- [58] 李宇燕, 黄协清. 形状因子变化时金属橡胶结构的静力学性能分析[J]. *应用力学学报*, 2009, 26(1): 82-86.
- LI Yuyan, HUANG Xieqing. Static characteristics for metal-rubber structure with different shape factor[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2009, 26(1): 82-86. (in Chinese)
- [59] MA Y, GAO D, HONG J. Investigation on the effect of dimension on the compression mechanics of metal rubber[R]. ASME Paper GT2014-25373, 2014.
- [60] ERTAS B, ALKHATEEB E, VANCE J. Cryogenic Temperature effects on metal mesh dampers and liquid hydrogen turbopump rotordynamics[R]. AIAA-2002-4164, 2002.
- [61] 杨春香, 周易, 张虎. 金属橡胶动态隔振性能的实验研究[J]. *航空学报*, 2006, 27(3): 536-539.
- YANG Chunxiang, ZHOU Yi, ZHANG Hu. Research on dynamic performance of metal rubber damper[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(3): 536-539. (in Chinese)
- [62] ZHANG D, SCARPA F, MA Y, et al. Dynamic mechanical behavior of nickel-based superalloy metal rubber[J]. *Materials and Design*, 2014, 56(4): 69-77.
- [63] HOU J F, BAI H B, LI D W. Damping capacity measurement of elastic porous wire-mesh material in wide temperature range[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 206(1): 412-418.
- [64] LIU P, HE G, WU L H. Impact behavior of entangled steel wire material[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(8): 900-906.
- [65] 魏浩东. 金属橡胶构件抗冲击性能的理论及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- WEI Haodong. Theoretical and experimental research on metal rubber element anti-shock performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007 (in Chinese)
- [66] JIANG H, XIA Y, AO H, et al. Lifetime of metal rubber isolator with different vibration amplitudes[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2005, 12(2): 181-185.
- [67] 陈亮. 环形金属橡胶隔振器的疲劳寿命及其试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- CHEN Liang. Fatigue life of annular metal rubber isolator and its experimental research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [68] AO H R, JIANG H Y, ULANOV A M. Estimation of the fatigue lifetime of metal rubber isolator with dry friction damping[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 326: 949-952.
- [69] 李国富. 随机振动下金属橡胶隔振器寿命影响因素分析及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LI Guofu. Experimental study and analysis of influencing factors on lifetime of metal rubber isolator under random vibration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [70] 侯军芳, 白鸿柏, 李冬伟, 等. 高温环境下金属橡胶材料疲劳特性试验研究[J]. *宇航材料工艺*, 2007, 37(2): 77-80.
- HOU Junfang, BAI Hongbai, LI Dongwei, et al. Experimental investigation on fatigue characteristics of metal rubber

- ber material at high & low temperature[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2007, 37(2): 77-80. (in Chinese)
- [71] 董秀萍, 刘国权, 牛犁, 等. 金属橡胶隔振构件中不锈钢丝的微动摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学报*, 2008, 28(3): 248-253.
- DONG Xiuping, LIU Guoquan, NIU Li, et al. Fretting wear of stainless steel wires in metal rubber damping component[J]. *Tribology*, 2008, 28(3): 248-253. (in Chinese)
- [72] 董秀萍, 刘国权, 杨建春, 等. 金属橡胶隔振构件中不锈钢丝疲劳断裂的原因[J]. *机械工程材料*, 2009, 33(4): 35-38.
- DONG Xiuping, LIU Guoquan, YANG Jianchun, et al. Fatigue fracture of stainless steel wires in metal rubber damper[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2009, 33(4): 35-38. (in Chinese)
- [73] 王尤颜, 白鸿柏, 侯军芳. 金属橡胶材料疲劳损伤性能研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2): 65-71.
- WANG Youyan, BAI Hongbai, HOU Junfang. Fatigue damage performance of metal rubber material[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2011, 47(2): 65-71. (in Chinese)
- [74] HONG J, WANG H, MA Y, et al. Experimental investigation on durability of a combined rotor bearing support with metal rubber material under dynamic loadings[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 287: 573-576.
- [75] 马艳红, 张启成, 张大义, 等. 静载荷作用下金属橡胶失效判据及耐久性试验[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(2): 227-235.
- MA Yanghong, ZHANG Qicheng, ZHANG Dayi, et al. Failure criterion and durability characteristics of metal rubber under static compression load[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(2): 227-235. (in Chinese)
- [76] 武国启. 金属橡胶吸声降噪性能分析及研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- WU Guoqi. The analysis and research of metal rubber's performance in sound absorption and reduction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [77] WU G, AO H, JIANG H, IZZHEUROV E A. Calculation of resonant sound absorption parameters for performance evaluation of metal rubber material[J]. *Science China Technological Sciences*, 2009, 52(12): 3587-3591.
- [78] ARENAS J P, CROCKER M J. Recent trends in porous sound-absorbing materials[J]. *Sound and Vibration*, 2010, 44(7): 12-17.
- [79] HONG J, CHEN L L, MA Y, et al. Hysteretic properties of metal rubber particles[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 2013, 227(4): 693-702.
- [80] MA Y, SCARPA F, ZHANG D, et al. A nonlinear auxetic structural vibration damper with metal rubber particles[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(8): 275-284.
- [81] YAN X J, NIE J X. Study of a new application form of shape memory alloy superelasticity[J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, 12(6): 14-23.
- [82] HONG J, LIU B, ZHANG D, et al. Shape memory effect and hysteresis behavior of shape memory alloy metal rubber[R]. *ASME Paper GT2012-69244*, 2012.
- [83] MA Y, ZHANG Q, ZHANG D, et al. A novel smart rotor support with shape memory alloy metal rubber for high temperatures and variable amplitude vibrations[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(12): 125016. 1-125016. 8.
- [84] MA Y, ZHANG Q, ZHANG D, et al. Tuning the vibration of a rotor with shape memory alloy metal rubber supports[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 351: 1-16.
- [85] MA Y, HU W, ZHANG D, et al. Tunable mechanical characteristics of a novel soft magnetic entangled metallic wire material[J]. *Smart Material Structures*, 2016, 25(9): 095015. 1-095015. 11.
- [86] JIANG G, LI Q, WANG C, et al. Fabrication of graded porous titanium-magnesium composite for load-bearing biomedical applications[J]. *Materials and Design*, 2015, 67: 354-359.
- [87] MA Y, WANG H, LI H, et al. Study on metal rubber material's characteristics of damping and sound absorption[R]. *ASME Paper GT2008-50961*, 2008.
- [88] CHILDS D W. The space shuttle main engine high pressure fuel turbopump rotordynamic instability problem[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1977, 100(1): 48-57.
- [89] OKAYASU A, OHTA T, AZUMA T, et al. Vibration problem in the LE-7 LH₂ turbopump[R]. Orlando: The 26th Joint Propulsion Conference, 1990.
- [90] ANDRÉS L S, CHIRATHADAM T A, KIM T H. Measurement of structural stiffness and damping coefficients in a metal mesh foil bearing[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(3): 763-771.
- [91] 柏传毅, 卫文博, 侯德门, 等. 新型钛合金金属橡胶颈椎间盘假体生物力学分析[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2014, 24(8): 752-756.
- BO Chuanyi, WEI Wenbo, HOU Demen, et al. Biomechanical analysis of a new titanium rubber cervical disc prosthesis[J]. *Chinese Journal of Spine and Spinal Cord*, 2014, 24(8): 752-756. (in Chinese)
- [92] JIANG G, WANG C, LI Q, et al. Porous titanium with entangled structure filled with biodegradable magnesium for potential biomedical applications[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2015, 47: 142-149.
- [93] WANG Q, CHENG M, HE G, et al. Surface modification of porous titanium with microarc oxidation and its effects on osteogenesis activity in vitro[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2015, 16(1): 408634. 1-408634. 10.