

铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶动态力学及电学性能

吴 芳¹, 郑 超¹, 任子林¹, 张 卫^{1,2}, 薛 新¹

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116)

(2. 锐捷网络股份有限公司, 福建 福州 350028)

摘要: 针对航空飞行器、运载车辆电控箱等关键元件的轻量化、减振和导电等多功能需求, 设计和制备了一种具有双螺旋结构的铜-钢丝复合金属橡胶。采用有限元数值模拟分析了复合金属橡胶成型过程中的细观螺旋丝勾连网络结构组织演变, 搭建了变激励动态力学试验和电阻性能测试平台, 提出了采用损伤因子来评判试件疲劳破坏程度, 研究了不同铜-钢丝质量比对动态减振性能、疲劳损伤以及静动态电阻性能的影响。结果表明: 当频幅增大时, 试件动态刚度增加, 而损耗因子减小; 损伤因子越大, 试件的动态刚度和损耗因子变化越显著; 铜-钢丝质量比越大的试件对应的细观内部丝材动态磨损越严重; 静态压缩行程增大, 试件电阻值随之减小; 动态振动次数增加, 试件电阻值均有所增大, 铜丝比例越大电阻值增幅越显著。

关键词: 铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶; 动态力学; 损伤因子; 电阻性能; 疲劳特性

中图法分类号: TB334; V252.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)03-1103-10

随着新型的技术发展, 对于承载功能构件一般要求能够在力、热、声、振、粒子、电磁等多种复杂的耦合环境^[1]下工作。首先, 以飞行器的减隔振材料和结构件为例, 需有效地减缓因空气动力而产生的飞行器机身振动^[2-3]; 其次, 在承受较高电流的同时, 还能快速地将累计电荷传递至机身放电稍放电; 最后, 能够吸收来自元件、电路或系统等内外部干扰电磁波, 即要求材料和结构件具有良好减振和导电能力^[4-5]。单一的材料结构很难同时满足这一需求。因此, 双种或多种混杂结构材料应运而生, 其具备多功能材料特性。

近年来, 金属橡胶作为在极端环境条件下的减振材料受到越来越多的关注^[6-7]。金属橡胶是由金属丝通过特殊工艺制备而成, 其具有高弹性、耐疲劳、均质多孔弹性等特性^[8-9]。用于制备金属橡胶的原材料对其性能有很大的影响, 如 Ma 等以形状记忆合金为原材料^[10], 制备了一种具有横向各向同性、非线性刚度和形状记忆行为等性能特点的金属橡胶。He 等以钛丝为原材料, 制备了可应用于生物医学领域的具有柔韧性好, 强度高等特点的金属橡胶材料^[11-12]。Rodney^[13]等以粘弹性聚合物(聚酰胺)、超弹性形状记忆合金(镍-钛)以及弹塑性金属(铜)为原材料制备了金属橡胶, 并对比分析了不同原材料样件的泊松比力学特性差异性^[13]。同时, 人们对于多功能特性的复合材料研究也不断增多。如 He 等基于挤压铸造法将铝合金和金属

橡胶相结合, 获得了更高屈服强度的复合材料^[14]。李宇明等^[15]结合金属橡胶材料的编织工艺和电脉冲强化工艺提高了试件内部组织的均匀性、抗拉强度和使用寿命, 分析了材料电阻随放电时间的变化规律。Zhao 等^[16]结合三维螺旋铜丝嵌入弹性橡胶的制备工艺提升了整体结构的抗拉强度和导电率, 并研究了不同三维螺旋铜丝参数下试件的力学性能。杨凤彪等^[17]研究了脉冲电流通过金属橡胶时螺旋状金属丝产生的电感效应, 建立了阻感数学模型, 并通过电容宽脉冲放电试验对该模型进行了验证。

基于特殊环境下结构件对减振性能以及导电性能的多功能特性要求, 本研究提出了一种以铜丝和不锈钢丝作为原材料的复合金属橡胶, 并对铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶的动态、疲劳、电阻性能进行了试验分析。通过施加正弦激励, 测出 4 种铜-钢丝质量比试样在不同振动次数下的损伤因子, 并用扫描电镜观察了疲劳试验后不同结构试件微观损伤情况, 获得了铜-钢丝质量比对试件动态力学性能、细观损伤和电阻性能的影响规律。

1 铜-钢丝双螺旋缠绕复合金属橡胶材料

目前金属橡胶制备技术已较为成熟^[18-19], 因此, 本研究对复合金属橡胶材料的制备, 将参照单一结构进行, 主要包括绕制螺旋卷、制备毛坯和冲压成型。

收稿日期: 2022-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(52175162); 国防创新特区重点项目(XX-033-01)

作者简介: 吴 芳, 女, 1997 年生, 硕士生, 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116, E-mail: xin@fzu.edu.cn

考虑力学性能、环境适应性等问题, 选用 304 不锈钢和紫铜丝为制备原材料。为提高其稳定性, 保证试件中铜丝与不锈钢丝能分布均匀, 提出了一种由铜丝和不锈钢丝组成的复合金属丝结构, 其结构如图 1a 所示, 主要参数包括不锈钢丝直径 d_1 、铜线直径 d_2 、复合丝直径 d_3 、缠绕角度 α 。

为使复合金属丝更容易相互勾连和咬合, 需对其进行螺旋卷绕制, 并进行定螺距拉伸。通过调整无芯轴螺旋卷绕制设备加工参数, 从而完成复合螺旋卷的制备, 其结构如图 1b 所示, 图中参数包括螺旋卷公称中径 D 和螺距 P_1 。

定螺距拉升和毛坯制备通过全自动毛坯绕制设备完成, 考虑试件最终性能, 需保证绕制角度范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 如图 1c 所示。

完成毛坯绕制后, 依据所需试件尺寸和形状选取模具, 通过压力机将毛坯压制成型, 图 2 为具有不同铜-钢丝质量比的铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶试件。

2 性能表征及试验方法

2.1 动态损耗因子

金属橡胶材料作为一种典型的金属阻尼减振材料会受到持续动态载荷^[20], 由于其独特的微结构, 其动态力学特性势必表现出非线性特性, 因此, 需要对其动态性能表征开展必要的理论解析。金属橡胶承受外载荷时, 会表现出非线性弹性力和非线性阻尼力 2 个恢复力, 非线性弹性力可由最大恢复力处的动态平均

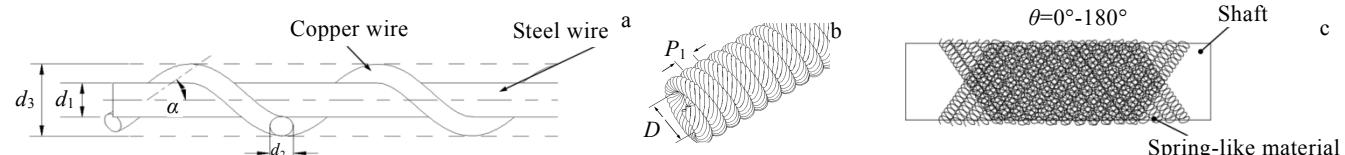


图 1 毛坯制备

Fig.1 Winding blank: (a) composite wire, (b) spiral coil, and (c) blank

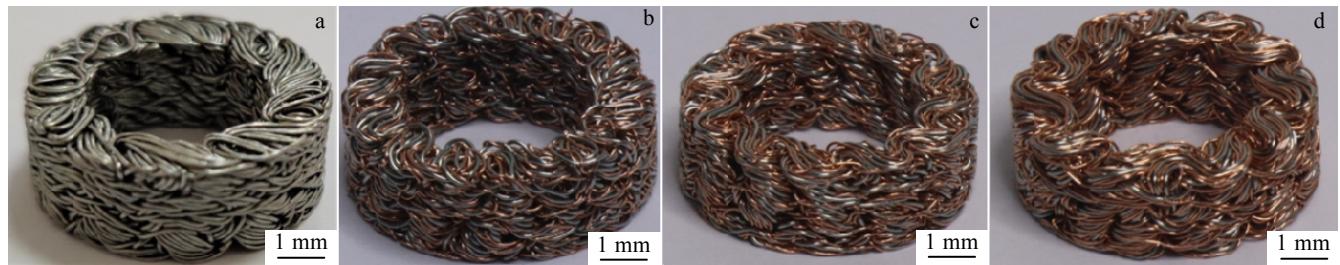


图 2 不同铜-钢丝质量比制备的铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶试件

Fig.2 Copper-steel wire composite metal rubbers prepared with double helix structure with different copper-steel wire mass ratios: (a) 0, (b) 0.5, (c) 1.0, and (d) 1.5

刚度表征, 非线性阻尼力可由阻尼耗能表征。本试验通过改变振动频率, 进而分析动态平均刚度和动态损耗因子变化规律。图 3 为铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶在正弦激励下的典型迟滞曲线, 一个周期内耗能和最大弹性势能分别用 ΔW 和 W 表示。

在实际采样中, 力-位移曲线由离散点组成, 而离散点数目 N 取决于采样频率 f_0 和加载频率 f , 即 $N=f_0/f$ 。实际测得的力与位移分别用 F_i , X_i ($i=1, 2, \dots, N$) 表示, 位移激励可以表示为式(1)。

$$X = X_0 \cos(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中, X 为位移幅值变量, α 为初始相位, X_0 为位移幅值峰值, ω 为加载周期, t 为时间。由此可知, 曲线中任一离散点的位移值 X_i 可表示为式(2):

$$X_i = X_0 \cos\left(\frac{2\pi i}{N} + \alpha\right) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

设曲线为关于位移 X 的函数 $F(X)$, 则 ΔW 可表示为式(3):

$$\begin{aligned} \Delta W &= \oint F dx \\ &= \oint F d[X_0 \cos(\omega t + \alpha)] \\ &= -\omega X_0 \int_0^T F \sin(\omega t + \alpha) dt \\ &= -\frac{2\pi X_0}{N} \sum_{i=1}^N F_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N} + \alpha\right) \end{aligned} \quad (3)$$

最大弹性势能 W 取决于加载位移, 可由非线性弹性力积分求得。设非线性弹性力为 F_x , 则 W 可表示为式(4)、式(5):

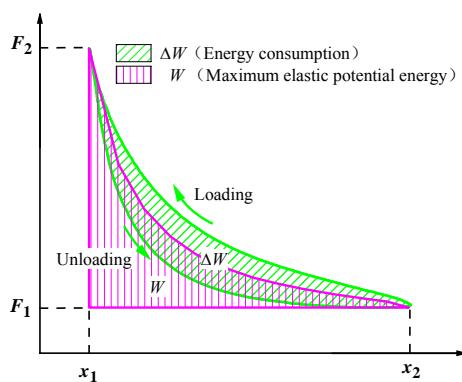


图3 铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶在受压-卸载过程中形成的迟滞曲线

Fig.3 Hysteresis curves of copper-steel wire composite metal rubber with double helix structure during compression-unloading process

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F_x dt \quad (4)$$

$$W = \frac{1}{2} K (x_2 - x_1)^2 \quad (5)$$

式中, x_1 和 x_2 分别为非线性弹性力起始点和终止点, K 为动态平均刚度。

由式(3)和式(4)可得动态损耗因子 η 计算公式, 如式(6)所示:

$$\eta = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (6)$$

2.2 动态疲劳损伤因子

金属橡胶在动态循环载荷作用下, 内部线匝在局部应力最大处易产生微小裂纹, 随循环周期不断增长, 该裂纹会持续扩大, 进而使得局部金属丝发生断裂, 最终导致金属橡胶宏观力学性能发生改变。因此, 本研究引入动态疲劳损伤因子 ∂ 来评判试件的疲劳破坏程度。

$$\partial = \left| \frac{K_0 - K_n}{K_0} \right| = \left| 1 - \frac{K_n}{K_0} \right| \quad (7)$$

式中, K_0 为试件初始动态刚度, K_n 为加载 n 次后试件动态刚度。

当动态疲劳损伤因子 ∂ 大于某个临界值时即可判断材料失效。试验采用设备与动态试验相同, 如表 1 所示, 设定振动频率为 8 Hz, 最大振动次数为 200 000 次, 每隔 20 000 次采集 1 次数据, 采样频率仍为 1000 Hz。对 4 组具有不同铜-钢丝质量比的试样进行测试, 每次进行疲劳试验前, 先对试件进行 5000 次预试验 (约 5 min), 待试件内部结构稳定后再进行正式试验。

表 1 疲劳试验分组

Table 1 The group of fatigue test

Batch	Mass ratio (copper/steel)	Amplitude/ mm	Vibration frequency/Hz	Number of vibration
1/2/3/4	0/0.5/1.0/1.5	0.4	8	200 000

2.3 动态测试方法

依据测试要求, 搭建用于测试铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶动态力学性能测试系统。该系统可以分为 3 大部分: 信号源 (函数发生器、功率放大器和激振器)、传感器和采集系统 (数据采集器和计算机)。动态试验的加载频率设置为 2~8 Hz, 振动幅值控制在 0.2~1.0 mm 范围内, 采样频率为 1000 Hz, 每 1 个试件在经过 5 min 的预试验后开始为时 30 s 的数据采集工作。圆环型试样的尺寸: 内径 12 mm, 外径 20 mm, 高度 8 mm; 平均相对密度 $(3.28 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3$ 。试验采用正弦激励加载金属橡胶并对其阻尼耗能进行数据采集和处理计算, 具体操作流程是将金属橡胶放置于试验工装内, 对样件进行预试验 (参数为最大振动幅值 1.0 mm 和扫频频带 0~1000 Hz) 以减少试验误差, 通过试验机对金属橡胶施加一定频率的正弦位移载荷, 并根据测量所得的恢复力响应信号, 绘制响应曲线用以计算动力学性能参数。

2.4 电阻性能表征及测试方法

铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶和其他金属材料一样, 也符合基本的电化学定律。由于铜-钢金属橡胶结构的不连续性、孔隙率及其内部丝线排列的随机性, 使得对该材料的电阻分析十分困难。基于侯军芳等^[21]的研究, 本研究假设铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶内部为层状结构, 层与层之间通过随机分布的金属丝相连。当材料内部有电流通过时, 电流流过层间导线和导线间的接触区域。因此, 材料的电阻可看成是由金属丝内阻与丝间接触电阻通过一系列串并联关系得到的。假定铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶具有宏观等效的固定电阻率, 则其电阻计算公式可表示为式 (8):

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (8)$$

式中, ρ 、 l 和 s 分别为试样的等效电阻率、长度和横截面积。

由于铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶力学性能改变与其损伤程度有着密切联系, 本研究借助扫描电镜 (美国 FEI, 型号 Nova NanoSEM 230) 对各组试件微观破坏前后及各个周期阶段进行表征分析。试件经疲劳试验后, 其内部组织会产生一些损伤, 该损伤不仅会改变试件力学性能, 还会对试件电学特性有所影响, 因此需每隔一段时间对试件导电能力进行测试, 试验测试装置如图 4 所示。

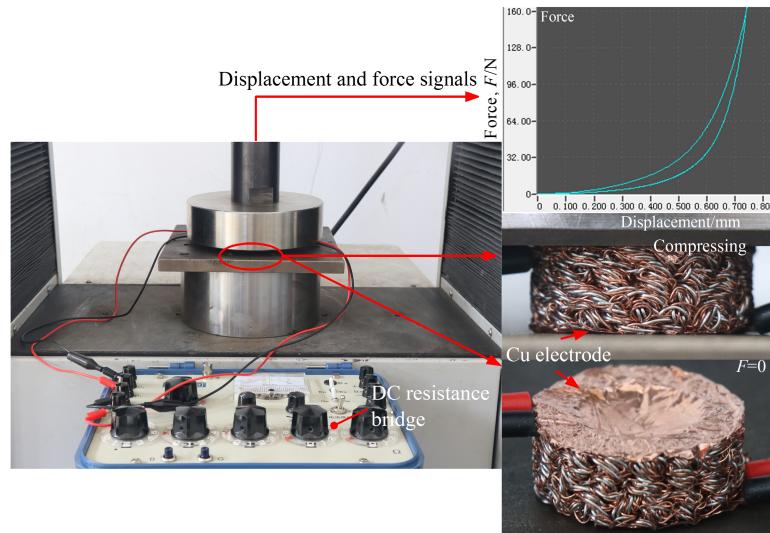


图 4 用于测试铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶电阻性能的装置

Fig.4 Experimental set-up for electrical resistance performance of copper-steel wire composite metal rubber with double-helix structure

3 微结构特征数值分析

本研究金属橡胶中铜丝和钢丝的受力状况的分析是针对材料成型制备过程, 以及达到最终产品定形状。此过程的金属橡胶中的铜丝和钢丝受力状况, 难以进行细观的原位表征分析。即使采用工业 CT 扫描技术和数字体图像相关法^[22-23], 也只能得到最终产品使役或受载前后的状态变化。因此, 本研究借助有限元细观数值仿真技术分析其勾连丝之间的变形特征和情况, 并辅助形貌分析来进行初步的验证。

3.1 有限元细观模型

铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶的结构组织一定程度上决定了其自身的力学性能, 为研究材料成型制备过程细观双螺旋丝结构的变形和受力状态特征, 采用有限元细观数值仿真模拟, 并辅助局部形貌对比分析和验证。

利用三维软件 UG 建立部分质量比为 1.0 的复合金属丝, 并将所建立的几何模型导入商业有限元仿真软件 Ls-dyna 中。因模具内壁、芯轴、上下压块不在分析范围, 为此在建立冲压模型时将这些结构件进行简化并设为刚体。复合丝材料属性定义参数见表 2, 主要参考单一材料金属丝材及铜-钢丝双螺旋金属橡胶元件的相关试验数据^[13,24]。

3.2 微结构接触特征

截取部分体积的复合金属丝进行结构分析, 图 5 为成型后的铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶的等效应力图。由图 5 可见, 成型后的铜丝螺旋程度相对钢丝而

表 2 材料属性定义

Table 2 Definition of material property

Material	Density/ ×10 ⁻⁹ t·mm ⁻³	Modulus of elasticity/MPa	Poisson's ratio	Yield stress/MPa
Steel wire	7.9	195000	0.249	300
Copper wire	8.9	10800	0.32	65

言更为严重, 进而一定程度上使得复合金属丝之间的接触对数增多, 阻尼能力变强, 并由此可推测随着铜-钢丝质量比的增加, 复合金属丝之间的接触对数增多, 阻尼能力逐渐变强。双螺旋金属丝内部接触按对象可分为钢丝之间、铜丝之间以及铜-钢丝之间的接触; 而按照接触形式主要又可分为平行和正交 2 种接触, 如图 6 所示。

3.3 微结构形貌对比分析

图 7 为铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶毛坯的冲压成型仿真结果与实物的整体以及局部对比图。由图 8 可见, 模型较为精确地模拟了铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶。同时仿真结果体现了铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶的多孔、丝线交错勾连等特点, 此外, 可以看到仿真结果模型中出现应力集中区域, 而这也符合实际情况, 因为毛坯在冲压过程中与模具芯轴表面不断摩擦, 导致与芯轴接触区域的金属丝受到的力较其他部位会更大。

4 结果与讨论

4.1 动态力学性能

4.1.1 激励水平对动态力学特性的影响

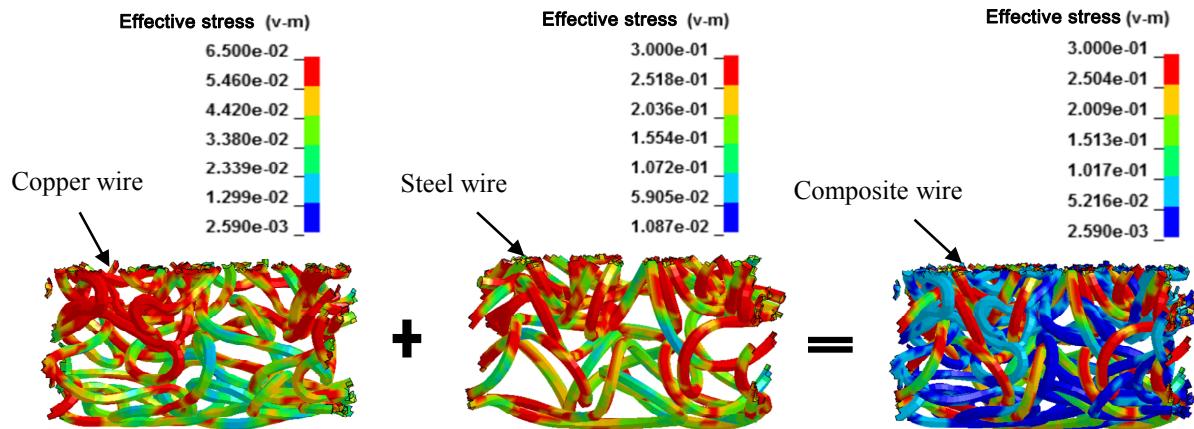


图 5 成型后的铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶的等效应力云图

Fig.5 Equivalent stress cloud images of copper-steel wire composite metal rubber with double-helix structure after forming process

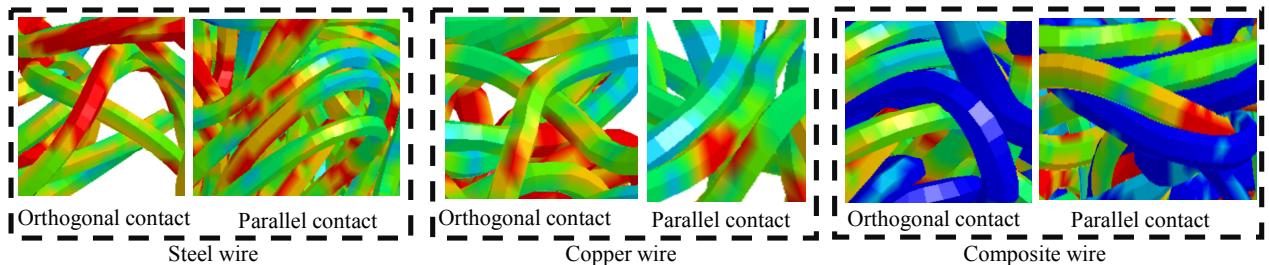


图 6 金属丝的接触类别

Fig.6 Contact category of metal wires

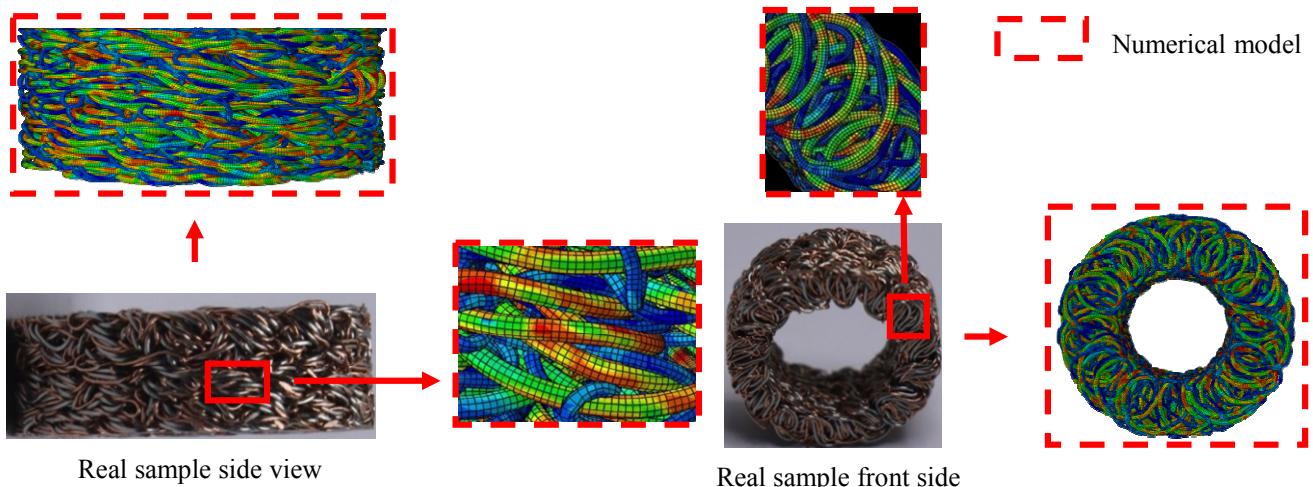


图 7 铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶仿真结果与实物整体对比情况

Fig.7 Comparison of appearance between numerical model and real sample for copper-steel wire composite metal rubber with double-helix structure

图 8 为当频率为 2 Hz 时, 铜-钢丝质量比分别为 0 和 1.5 的试件在不同振幅时的迟滞曲线。随着振动幅值的增加, 铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶迟滞曲线非线性均都有所增加, 曲线滞环包络面积随着振幅增加也

有所增大, 表明试件消耗的能量随着幅值的增大而增加。此外, 幅值不变, 可看到铜-钢丝质量比为 1.5 的试件, 其迟滞曲线包络的面积增大, 表明铜丝可提高试件的耗能能力。

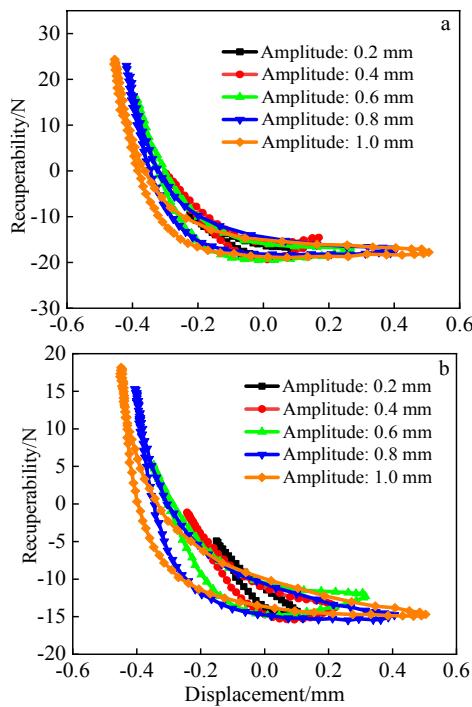


图 8 不同振幅下金属橡胶动态试验测得的迟滞曲线

Fig.8 Hysteresis curves measured by dynamic experiments of metal rubber with different amplitudes: (a) the mass ratio of copper to steel wire is 0 and (b) the mass ratio of copper to steel wire is 1.5

图 9 为振动幅值为 0.6 mm, 2 组试件的迟滞曲线。不同振动频率下的迟滞曲线表明振动频率对试件动态力学性能影响不明显。从该 2 组曲线可得出类似结论, 即当试件振动幅值相同时, 含铜试件的阻尼性能优于纯不锈钢试件。而在相同振幅下, 纯不锈钢试件恢复力大于含铜元素恢复力, 表明前者较后者具有更大刚度。

4.1.2 铜-钢丝质量比对动态特性的影响

图 10 为当频率为 2 Hz, 振动幅值改变时, 试件动态平均刚度和损耗因子的变化情况。由图 10 可知, 幅值增大, 试件动态刚度和损耗因子均增大, 且增加速率相近, 其原因为试件受到压缩量增加导致试件经历了软特性阶段和硬化阶段。当振动幅值较小时, 试件处于软特性阶段, 其内部线匝在接触时先产生滑动, 此时线匝承载能力较弱; 随压缩量的增大 (振动幅值 >0.8 mm 进入变形硬化阶段), 试件内部线匝间接触载荷增大, 线匝几何位置受到其它线匝限制, 导致试件刚度快速增大。

图 11 为动态平均刚度和损耗因子随频率变化的情况。图 11 中可知, 随着频率的增大, 试件动态刚度和损耗因子均出现不同程度的增加和减小, 表明在一定承载条件下, 随频率增大, 试件抵抗动载荷的能力

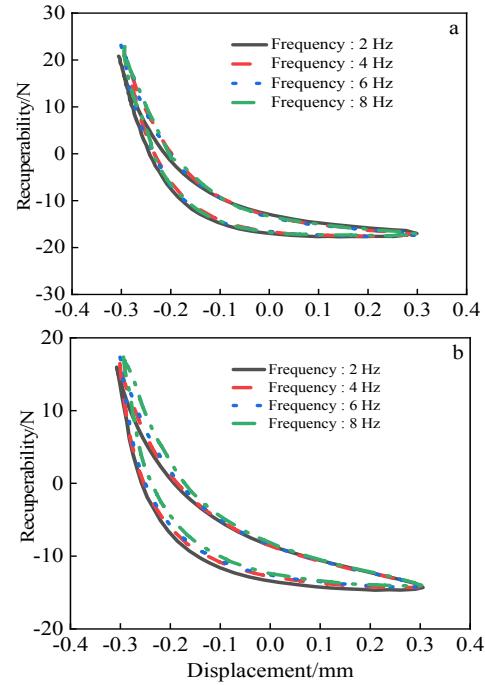


图 9 不同振动频率下金属橡胶动态试验测得的迟滞曲线

Fig.9 Hysteresis curves measured by dynamic experiments of metal rubber varies with different frequencies: (a) the mass ratio of copper to steel wire is 0 and (b) the mass ratio of copper to steel wire is 1.5

增强, 而阻尼能力减弱。此外, 对比图 10 和图 11, 发现振动幅值相较于频率对试件的力学性能影响更大。

4.2 动态疲劳性能

图 12 为试件动态刚度和损耗因子随着动态循环振动周次增加的变化情况, 虽然曲线局部点出现异变, 但 2 组曲线均表现出一定变化趋势: 随振动次数增多, 4 组试件动态平均刚度和损耗因子均略减小。其原因为: 随动态循环载荷周期延长, 内部线匝从开始咬合状态转变为脱钩状态, 脱钩现象将使局部组织松动, 导致局部刚度减小。

此外, 长时间载荷使线匝表面产生裂纹、磨损、断裂, 均会退化材料力学性能。由图 12b 可以看出, 铜含量越少其动态损耗因子减小量越大。其原因为: 铜丝比例越少, 则单位体积线匝数目越少, 孔隙越大, 进而在持续载荷作用下, 其内部丝线松动程度越严重, 靠丝线摩擦耗散能量越少。相反铜丝比例较多, 则单位体积丝线数较多, 虽然连续载荷使相互勾连线匝松动, 但振动幅值不加大时, 其松动程度有限, 因此该类试件耗能能力衰减主要归结于丝线自身损伤, 如裂纹、磨损、断裂。

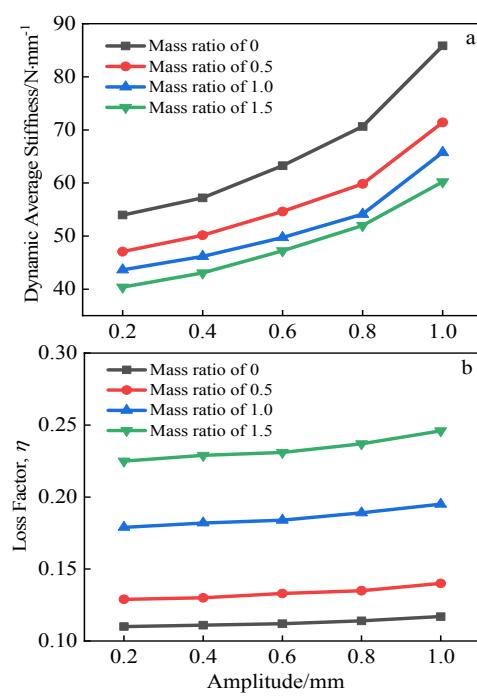


图 10 铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶动态平均刚度和损耗因子随振动幅值的变化关系

Fig.10 Variations of dynamic average stiffness (a) and loss factor (b) with vibration amplitude for copper-steel wire composite metal rubber with double helix structures

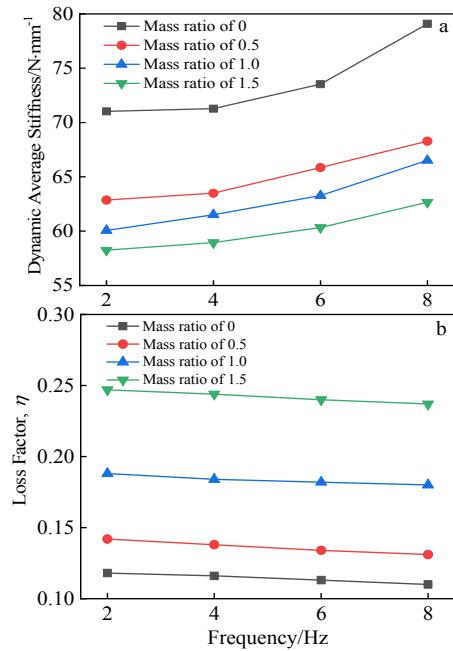


图 11 铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶动态平均刚度和损耗因子随频率的变化关系

Fig.11 Variations of dynamic average stiffness (a) and loss factor (b) with frequency for copper-steel wire composite metal rubber with double helix structures

图 13 为经过动态力学实验后的铜-钢丝双螺旋复合金属丝的 SEM 照片, 发现其主要破坏形式有 5 种: 裂纹、挤压、磨损、断裂和摩擦碎屑。由于铜丝硬度远弱于不锈钢丝, 造成铜丝表面更易磨损, 进而相对纯不锈钢丝金属橡胶材料, 双螺旋复合的金属橡胶材料在相同循环周次下更容易疲劳破坏, 且这种现象随着金属橡胶铜丝比例的增多更加明显。

图 14 为铜-钢丝双螺旋金属橡胶损伤因子随振动周次的变化情况。图 14 中可看到, 随着铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶胶循环振动次数的增加, 同一质量比的金属橡胶的损伤因子呈上升趋势。这与试件力学性能变化情况相符, 表明损伤累积是导致金属橡胶材料宏观力学性能改变的重要因素。

表 3 为疲劳试验前后试件质量变化情况, 通过对比试验前后各组试件质量, 发现试件铜-钢丝质量比越大, 其质量变化率越大, 因质量主要是以磨损和摩擦碎屑 2 种形式损失, 则可推断铜-钢丝质量比越大, 试件内部摩擦碎屑越多。

4.3 电学性能

4.3.1 铜-钢丝质量比对静态电学性能的影响

图 15 为不同铜-钢丝质量比在自然状态(压力为 0)

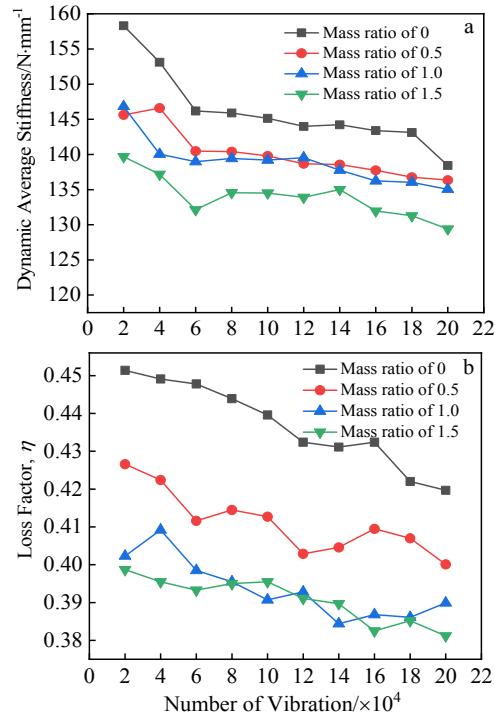


图 12 铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶动态平均刚度和损耗因子随振动周次的变化关系

Fig.12 Variations of dynamic average stiffness (a) and loss factor (b) with vibration period for copper-steel wire composite metal rubber with double helix structures

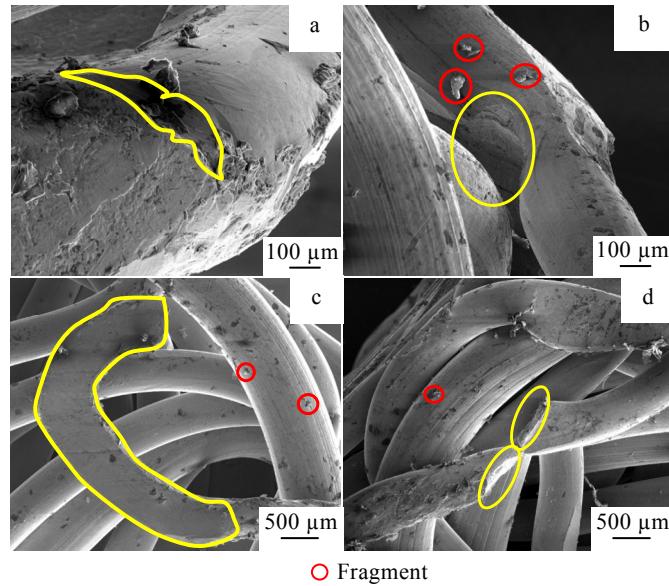


图 13 铜-钢丝双螺旋金属橡胶主要破坏形式

Fig.13 Main damage modes of copper-steel composite metal rubber with double helix structures: (a) crack, (b) extrusion, (c) abrasion, and (d) fracture

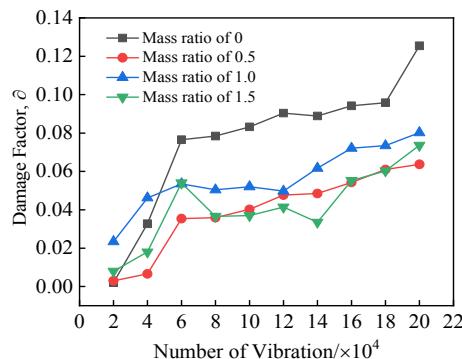


图 14 铜-钢丝双螺旋金属橡胶损伤因子随振动周次的变化情况

Fig.14 Variations of damage factor with vibration period for copper-steel composite metal rubber with double helix structures

表 3 疲劳试验前后试件质量变化

Table 3 Mass change of specimen before and after fatigue test

Mass ratio of copper-steel wire	Number of vibration	Mass before test/g	Mass after test/g	Mass change/%
0	200 000	5.31	5.15	3.0
0.5	200 000	5.29	4.96	6.1
1.0	200 000	5.30	4.92	7.2
1.5	200 000	5.29	4.86	8.0

下的电阻值。从图可以得出当铜-钢丝质量比从 0 增加到 1.5 时, 试件的电阻值从 $4.84 \times 10^{-3} \Omega$ 下降到 $8.04 \times 10^{-4} \Omega$ 。因此在试件密度和制备工艺一致的前提下, 铜丝比例越高的电阻值越小。

图 16 为不同压缩量下铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶电阻变化曲线。结果表明, 随着压缩行程的增加, 试件的电阻值逐级递减。值得一提的是, 理想情况下, 类似于金属橡胶这种弹性多孔材料的电阻最小值出现在内部丝线间的空隙为零时的状态, 这时丝线间接触数目趋于无穷大。因此, 随着变形的增大, 丝线接触数目越来越多, 丝线之间的空隙越来越少, 试件的电阻值也随之减小。

4.3.2 铜-钢丝质量比对动态电学性能的影响

图 17 为电阻值随振动周次的变化情况。可知, 随着振动次数的增加, 4 组试件电阻值均有不同程度增大,

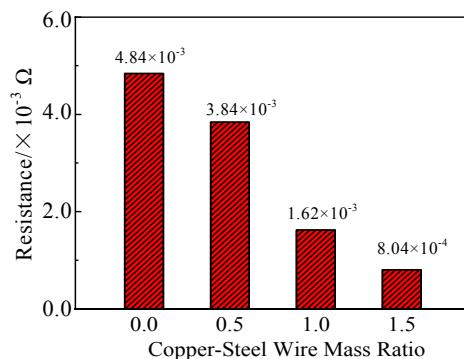


图 15 自然状态下铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶的电阻值

Fig.15 Resistance values of copper-steel wire composite structure with double-helix structure in the natural state

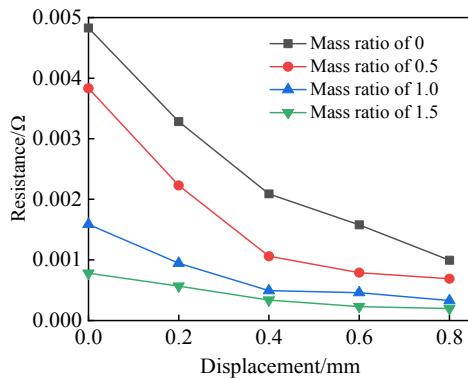


图 16 不同压缩量下铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶的电阻变化曲线

Fig.16 Resistance change curves of copper-steel wire composite metal rubber with double helix structures under different compression amounts

且铜丝比例越大, 趋势越明显。其原因为铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶导电能力不仅与材料本身有关, 还与内部组织结构有关, 如铜丝比例大的试件导电能力比不含铜试件强, 丝线接触数目多的试件比接触数目少的试件强。

铜丝比例少的试件单位体积线匝数目较少, 孔隙较大(即丝线接触数目更少), 在持续载荷的作用下, 其内部丝线产生松动使得孔隙变大, 将严重削弱试件导电能力。相反, 铜丝比例较大试件, 内部丝线接触数目足够(尤其是铜丝比例大), 其松动程度有限, 因此该试件导电能力变化并不显著, 其增加电阻值一方面为丝线本身损伤; 另一方面为丝线间不断摩擦而产生不连续磨屑, 减弱了线匝间导电能力。

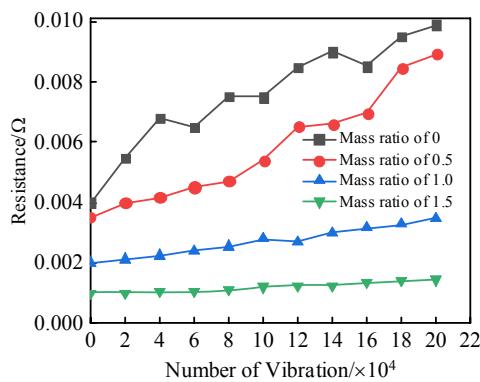


图 17 铜-钢丝双螺旋复合金属橡胶电阻值随振动周次的变化情况

Fig.17 Variations of electrical resistance of copper-steel wire composite metal rubber with double helix structures with vibration cycle

5 结 论

1) 对比试验前后参数变化率, 发现在给定频率和振幅范围内, 振动幅值相较于频率对试件的力学性能影响更大。表明铜-钢丝质量比更大的试件具有更低动态刚度和更大损耗因子。表明在动态载荷作用下, 引入铜元素可减弱材料的承载能力, 且提升材料的阻尼能力。

2) 试件力学性能改变与其损伤程度联系较大, 即损伤因子越大, 试件的动态刚度和损耗因子变化越显著。铜-钢丝质量比越大的试件磨损越严重, 其内部摩擦碎屑越多。

3) 静态压缩行程增大, 试件电阻值随之减少。动态振动次数增加, 试件电阻值均有所增大, 铜丝比例越大电阻值增幅越显著。

参考文献 References

- [1] Wang Changqing(王长青). *Journal of Astronautics*(宇航学报)[J], 2021, 42(7): 807
- [2] Gao Yongyi(高永毅), Chen Anhua(陈安华), Guo Yuanjun(郭源君). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2009, 19(12): 2216
- [3] Hou Yingyu(侯英昱), Li Qi(李齐), Ji Chen(季辰) et al. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2022, 43 (3): 626 454
- [4] Zhang F, Hu Z D, Pan Z X et al. *Composite Structures*[J], 2021, 274: 114 354
- [5] Wang Jianzhong(王建忠), Xi Zhengping(奚正平), Tang Huiping(汤慧萍) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(9): 1688
- [6] Chen Qixin(陈祺鑫), Huang Wei(黄伟), Ren Zhiying(任志英) et al. *Tribology*(摩擦学学报)[J], 2021, 41(3): 293
- [7] Huang Kai(黄凯), Bai Hongbai(白鸿柏), Lu Chunhong(路纯红) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(11): 3451
- [8] Li Min(李敏), Bai Hongbai(白鸿柏), Xue Xin(薛新). *Journal of Vibration and Shock*(振动与冲击)[J], 2020, 39(22): 119
- [9] Zhang Bin(张彬), Ren Zhiying(任志英), Bai Hongbai(白鸿柏) et al. *Journal of Vibration and Shock*(振动与冲击)[J], 2021, 40(4): 243
- [10] Ma Y H, Zhang Q C, Zhang D Y et al. *Journal of Materials Science*[J], 2016, 52: 3741
- [11] He G, Liu P, Tan Q B. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2012, 5(1): 16
- [12] He G, Liu P, Tan Q B et al. *Journal of the Mechanical*

- Behavior of Biomedical Materials*[J], 2013, 28: 309
- [13] Rodney D, Gadot B, Oriol R et al. *Nature Materials*[J], 2016, 15(1): 72
- [14] Tan Q B, He G. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 546(6): 233
- [15] Li Yuming(李宇明), Bai Hongbai(白鸿柏), Zheng Jian(郑 坚) et al. *Mechanical Engineer*(机械工程师)[J], 2007, 39(1): 52
- [16] Zhao Y, Yang W D, Tan Y J et al. *APL Materials*[J], 2019, 7(3): 031 508
- [17] Yang Fengbiao(杨凤彪), Sun Shiyu(孙世宇), Wang Ning(王 宁). *Fire Control & Command Control*(火力与指挥控制)[J], 2019, 44(7): 126
- [18] Zhang Dayi(张大义), Xia Ying(夏 颖), Zhang Qicheng(张启成) et al. *Journal of Aerospace Power*(航空动力学报)[J], 2018, 33(6): 1432
- [19] Hu Jialin(胡嘉麟). *Theoretical and Experimental Study on Mechanical Properties of Compound Metal Rubber with Double-Helix Structure*[D]. Beijing: University of Chinese Academy Sciences, 2018
- [20] Yu Huijie(余慧杰), He Tao(贺 涛). *Journal of Materials Science and Engineering*(材料科学与工程学报)[J], 2021, 39(1): 52
- [21] Hou Junfang(侯军芳), Liu Zhenguang(刘振广), Bai Hongbai(白鸿柏) et al. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*(机械科学与技术)[J], 2006(6): 753
- [22] Huang Mingji(黄明吉), Li Bin(李 斌), Dong Xiuping(董秀萍). *Materials Reports*(材料导报)[J], 2022, 36(1): 178
- [23] Ma Y H, Zhang Q C, Wang Y F et al. *Materials & Design*[J], 2019, 181: 108 067
- [24] Zhang W, Xue X, Bai H B. *Composite Structures*[J], 2020, 255: 112 886

Dynamic Mechanical and Electrical Properties of Copper-Steel Wire Composite Metal Rubber with Double-Helix Structure

Wu Fang¹, Zheng Chao¹, Ren Zilin¹, Zhang Wei^{1,2}, Xue Xin¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

(2. Ruijie Networks Co., Ltd, Fuzhou 350028, China)

Abstract: Driven by the need to develop the key components with multifunctional performances such as lightweight, vibration-reduction and electrical conductivity for aviation aircraft, electric control box of vehicle, a copper-steel wire composite metal rubber with double-helix structure was designed and fabricated. The internal crosslinked meso-structure evolution of composite metal rubber was analysed by finite element simulation. In order to better understand the dynamic mechanical and the electrical properties of the copper-steel wire composite metal rubber, the experimental platforms for the dynamic loading test with variable excitation condition and the electrical resistance test were established. The damage factor was proposed to evaluate the fatigue failure of composite metal rubber. The effects of copper-steel mass ratio on the dynamic vibration reduction performance, fatigue damage and static/dynamic electrical resistance were investigated. The results show that the dynamic stiffness increases and the loss factor decreases with the increase of frequency and amplitude. The larger damage factor, the more sensitivity of dynamic stiffness fluctuation and loss factor fluctuation. The larger copper-steel mass ratio leads to the more serious dynamic wear of internal crosslinked wires. The electrical resistance decreases with the increase of static compression. With the increase of dynamic vibration cycle, the electrical resistance exhibits the increasing evolution, especially for the larger ratio of copper wire.

Key words: copper-steel wire composite metal rubber with double-helix structure; dynamic mechanical properties; damage factor; electrical resistance; fatigue failure

Corresponding author: Xue Xin, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, P. R. China, E-mail: xin@fzu.edu.cn