## 金属橡胶热物理性能理论与试验研究\*

马艳红1) 仝小龙1) 朱彬2) 张大义1)\* 洪杰1)

1)(北京航空航天大学能源与动力工程学院,北京 100191)
 2)(中航商用发动机有限责任公司,上海 200241)

(2012年6月10日收到; 2012年9月10日收到修改稿)

针对金属橡胶材料在高温环境下的热稳定性能和热传导性能,基于金属橡胶的内部基本组分以及特殊的编织 制作工艺,构建了两种典型排列微元体结构,并以此描述微元体在三种接触状态下的热膨胀特性,提出了金属橡胶 热膨胀 Schapery 分析模型,从理论上解释了金属橡胶热膨胀的产生机理.根据金属橡胶基本组成单元的传热模式, 研究了金属橡胶的传热过程.利用热电比拟法和有限元法,分析微元体的导热性能,结合微元体的分布形式,提出了 金属橡胶的导热分析模型.试验测试了不同相对密度金属橡胶的热膨胀和热传导性能,验证了金属橡胶热膨胀和导 热特性分析理论模型的适用性.所得到的金属橡胶的热膨胀和热传导性能理论模型和试验结果,为金属橡胶材料在 高温环境下的热物理特性分析提供了理论基础和计算分析依据.

关键词:金属橡胶,热膨胀,热传导,金属丝螺旋卷 PACS: 81.05.Ni, 07.10.Fq, 46.25.--y, 46.40.Ff

DOI: 10.7498/aps.62.048101

#### 1 引 言

金属橡胶材料是将金属丝卷成螺旋形,经过 拉伸、编织、模压成型制得的弹性多孔材料,其密 度小、比强度高,具有极好的力学性能、热机械性 能、隔热性能、可塑性和环境适用性,广泛应用于 机械设备中的高温、高压、腐蚀性介质及剧烈振 动环境下的阻尼减振、热防护及降噪等领域<sup>[1–3]</sup>.

目前大多数学者的研究都集中在金属橡胶的 力学性能上,并取得了显著的成果,逐步形成了力 学性能的设计技术<sup>[4-6]</sup>;而热物理方面仅有极少的 研究资料,且均为试验研究<sup>[7]</sup>,尚未建立适用于分 析其热物理性能的理论模型.金属橡胶热膨胀性能 和热传导性能是衡量其长期工作在热循环载荷环 境下的稳定性以及评价隔热效果的两大重要参数, 因此开展对其热物理性能的研究,是将金属橡胶材 料应用于恶劣环境下的热防护领域中不可缺少的 基础理论工作.

金属橡胶一方面可看作是一种由金属丝和空 气组成的两相多孔材料,另一方面其编织工艺又类 似于编织型复合材料,其热物理热性与多孔材料和 复合材料具有一定的相似性.由于多孔材料的热膨 胀性能与组成材料自身的热学性能、内部结构形 式以及刚度分布等密切相关,目前还没有建立较为 完善的多孔材料热膨胀模型,多用试验来分析其热 膨胀性能.编织型复合材料的热膨胀性能研究目前 比较成熟,常用的混合定律<sup>[8]</sup>、Schapery 模型<sup>[9]</sup>等 在一定程度上都能较为准确地描述编织型复合材 料的热膨胀性能.对材料热传导性能的研究大多以 傅里叶定律为基础,采用热电比拟法<sup>[10]</sup>和有限元 法<sup>[11,12]</sup>等,根据比等效相同法则从细观到宏观进 行研究.

金属橡胶的热膨胀和热传导性能受金属丝螺 旋卷的排列和孔隙分布的影响很大,而这两相的组 成形式相当复杂,这给理论上研究金属橡胶的热膨 胀行为和热传导性能带来一定的困难.本文以金属 橡胶材料内部微元体结构为基础,利用热膨胀理论 和热电比拟法,结合有限元法分析微元体结构的热 膨胀和热传导性能.以金属橡胶内部微元体的接触 状态为基础,分析不同接触状态下螺旋卷单元体的

<sup>\*</sup>国家自然科学基金(批准号: 51101008, 51105022)和"凡舟"青年科研基金(批准号: 20110402)资助的课题.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: dayi@buaa.edu.com

<sup>© 2013</sup> 中国物理学会 Chinese Physical Society

热物理关系,结合 Schapery 模型和比等效相同法则,从而建立金属橡胶材料的热膨胀和热传导分析模型,并结合相关热物理试验,为金属橡胶材料在热防护领域的应用提供了理论和试验基础.

## 2 金属橡胶微元体结构

金属橡胶加工成型后其内部由金属丝螺旋卷 交错而成,金属丝螺旋卷的排列取向不规则.由于 缠绕和编织等工艺,其内部将有两种最基本的排列 形式:纵向和横向螺旋卷排列(如图1),两者为金属 橡胶内部基本微元体结构<sup>[13]</sup>,两种微元体不同排 列构成了金属橡胶的基本单元.金属橡胶材料内部 横向和纵向螺旋卷微元体之间包含空气,因此从热 特性角度分析,金属丝卷和空气是组成金属橡胶的 两种介质.因此针对微元体特殊的空间结构,合理 地建立微元体热膨胀和热传导模型是分析金属橡 胶材料宏观热性能的基础.下面将以建立微元体结 构与热物理特性的关系方程为基础,建立细观结构 和宏观性能之间的转换关系,从细观结构上阐明金 属橡胶材料热物理性能的产生机理,进而建立相应 的热物理模型.



图 1 螺旋卷单元结构示意图 (*d*<sub>s</sub> 为金属丝的丝径 (mm); *D*<sub>L</sub> 为螺旋卷的直径 (mm); *L*<sub>J</sub> 为螺旋卷的螺距 (mm); α 为螺旋卷 轴线方向与载荷方向的夹角 (rad))

3 金属橡胶的热膨胀性能研究

#### 3.1 微元体结构热膨胀模型

(a)

首先采用有限元法对微元体结构的热膨胀行 为进行分析,图2所示为在受热时纵向和横向微元 体的热膨胀变形.由纵向和横向微元体热膨胀总变 形可以看出,微元体受热后,螺旋结构形状不变,微 元体的热变形变为在截面法向上被拉伸.由于微元 体特殊的螺旋结构,内部的热膨胀力都垂直于螺旋 卷的截面,热膨胀带来的热变形沿着螺旋卷旋向. 因此纵向微元体热变形主要来自于轴向方向变形, 横向微元体热变形主要来自于径向方向变形.

根据纵向和横向微元体的结构形式和热膨胀 沿各方向变形的分布情况,可认为当微元体结构的 温度变化 ΔT 时,纵向微元体沿着轴向及横向微元 体沿着径向的热变形为

$$\Delta l_{\rm V,S} = \Delta l_{\rm S} \sin a = a_{\rm S} l \sin a \Delta T, \qquad (1)$$
$$\Delta l_{\rm T,S} = 2 \int_0^{l/2} \cos a \sin \theta \, d\Delta l_{\rm S}$$
$$= \cos a \int_0^{\pi/2} D_{\rm S} \sin \theta \, d\theta$$
$$= a_{\rm S} D_{\rm S} \cos a \Delta T \qquad (2)$$



图 2 纵向和横向排列螺旋卷热膨胀总变形 (a) 纵向; (b) 径向

式中 $a_S$ 为金属丝材料的热膨胀系数 (10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>).

因此根据热膨胀理论,纵向和横向微元体在螺 旋轴向和径向的等效热膨胀系数为

$$a_{\rm V_S} = \Delta l_{\rm V_S} / (L_{\rm J} \Delta T) = a_{\rm S}, \qquad (3)$$

 $a_{T_S} = \Delta l_{T_S} / (D_L \Delta T)$  $= a_S D_S \cos a \Delta T / (D_L \Delta T) = a_S.$ (4)

由(3)和(4)式,结合有限元的热膨胀变形分析,得 到两种排列形式的微元体结构的热膨胀系数均与 金属丝材料的相同,与螺旋卷的丝径、螺旋径、螺 距以及排列形式无关.

#### 3.2 基本单元的热膨胀模型

由上节的分析可知,如果将金属橡胶材料同样 视为由螺旋卷构成的连续均匀框架结构材料,则可 近似地认为金属橡胶的膨胀系数与金属丝材料相同<sup>[14]</sup>,即 *a*<sub>MR</sub> = *a*<sub>S</sub>.实际上纵向和横向微元体组成的基本单元相互接触构成了金属橡胶的宏观框架结构,因此分析孔隙对基本单元热膨胀性能的影响成为揭示金属橡胶热膨胀机理的重要基础.

基本单元在成型压力作用下存在三种接触状态:未接触、滑移接触和挤压接触<sup>[13]</sup>.图3所示为加热后未接触和接触状态基本单元的热膨胀变形. 对于未接触状态的基本单元,由于纵向和横向微元 体之间轴向有间隙 Δl'<sub>V</sub>,下端横向螺旋卷的热变形 首先要抵消其间的间隙,因此微元体间热变形相互 不传递.对于接触状态的基本单元,此时两微元体 间由于接触点的存在,横向微元体的热膨胀变形可 以通过接触点的作用传递到纵向的微元体上,两者 共同作用形成接触状态的热膨胀变形.



图 3 未接触和接触状态基本单元的热膨胀变形 (a) 未接触状态; (b) 接触状态

根据对未接触和接触状态基本单元的结构形 式和热膨胀的分析,结合微元体的热变形公式,可 知未接触状态基本单元后热膨胀系数为

$$a' = \frac{\Delta l'_{\rm S}}{l'_{\rm S} \Delta T} = \frac{\Delta l_{\rm V.S}}{(L_{\rm J} + \Delta l'_{\rm V} + D_{\rm L}) \Delta T}$$
$$= \frac{a_{\rm S} L_{\rm J} \Delta T}{(L_{\rm I} + \Delta l'_{\rm V} + D_{\rm I}) \Delta T} = s' a_{\rm S}, \tag{5}$$

式中 $l'_{s}$ 为未接触状态下两螺旋卷在成型方向上的 有效长度, $s' = \frac{L_{J}}{L_{J} + \Delta l'_{V} + D_{L}}$ 为沿成型方向有效热 膨胀长度与有效总长度的比值.

滑移接触和挤压接触两种接触状态基本单元 的热膨胀系数为

$$a'' = \frac{\Delta l''_{\rm S}}{L''_{\rm S}\Delta T} = \frac{a_{\rm S}L''_{\rm T,S}\Delta T + a_{\rm S}L''_{\rm V,S}\Delta T}{(L''_{\rm T,S} + L''_{\rm V,S})\Delta T} = a_{\rm S}, \quad (6)$$

式中 $L''_{S}$ 为一组螺旋卷在成型方向上的等效长度,  $D_{L}, L_{J} \leq L''_{S} \leq L_{J} + D_{L}, \Delta l''_{T,S}, \Delta l''_{V,S}$ 分别为滑移接触 时横向和纵向螺旋卷的热变形, $L''_{T,S}, L''_{V,S}$ 分别为滑 移接触时横向和纵向螺旋卷在成型方向上的等效 长度.

由上述热膨胀系数公式可以看出,由于间隙的存在,未接触状态基本单元热膨胀系数小于金属丝材料本身,即 a' < as. 对于接触状态基本单元,其热膨胀系数等同于金属丝材料本身.

可见,对于金属橡胶基本单元的热膨胀来说, 在未接触状态基本单元轴向间隙的存在使得轴向 热膨胀不能传递,导致金属橡胶宏观热膨胀性能下 降;而当基本单元存在接触点时,接触状态基本单 元间的孔隙将不影响其热膨胀性能.

#### 3.3 金属橡胶材料的宏观热膨胀模型

对于常用的编织型复合材料而言,其宏观热膨胀性能不仅与各组分材料的热膨胀性能有关,还与各组分的弹性性能相关,Schapery模型<sup>[9]</sup>基于能量理论阐述了各组分之间热膨胀的相互影响.根据金

属橡胶加工成型的方式可知,其由三种不同接触状态的螺旋卷基本单元按照一定的编织方式制作而成,类似于编织型复合材料.各接触状态单元体可看作为不同组分的材料,在不同相对密度下,在金属橡胶内部其各自的热膨胀性能、体积分数和弹性性能都不相同,对金属橡胶材料宏观热膨胀的贡献也不同.因此综合考虑几种接触状态之间的相互作用对金属橡胶热膨胀行为的影响,根据编织型复合材料热膨胀性能常用预测模型——Schapery模型对金属橡胶的热膨胀性能进行预测,得到金属橡胶 材料的热膨胀系数 *a*MR 为

$$a_{\rm MR} = \frac{n'a'E' + n''a''_{\rm S}E'' + n'''a''_{\rm S}E'''}{n'E' + n''E'' + n'''E'''} = \frac{n's' + n''/2.56 + n'''/0.59}{n' + n''/2.56 + n'''/0.59}a_{\rm S},$$
(7)

式中 E<sup>i</sup> 为三种不同接触状态基本单元的等效弹性 模量, 其中 E' ≈ 2.56E" ≈ 0.59E<sup>''' [13]</sup>; n<sup>i</sup> 为不同相 对密度下三种不同接触状态基本单元的体积分数. 由对金属橡胶宏观热膨胀性能的分析可知,其 不仅与不同接触状态基本单元自身的热膨胀性能 有关,还与其体积分数和弹性模量有关.其中接触 状态基本单元的热膨胀系数和各基本单元弹性模 量不受金属橡胶材料参数的影响,而未接触状态基 本单元的热膨胀系数和各基本单元的体积分数将 直接受到相对密度的影响,这两个参数的变化规律 将成为衡量金属橡胶热膨胀性能的主要因素.

#### 3.4 金属橡胶热膨胀系数性能试验

试验研究采用 DIL402PC 型热膨胀仪对不同相 对密度下的金属橡胶材料进行热膨胀性能测试, 温 度范围为 20°C—600°C, 升温速率为 2°C/min, 如 图 4 所示.试验中采用高纯氩气进行气氛保护, 利 用计算机和智能仪表对温度和热变形量进行控制 和测量记录.根据 B4339-84 标准计算金属橡胶的 热膨胀系数<sup>[15]</sup>.



图 4 试验仪器 402-PC 和热膨胀试验样件

金属橡胶材料采用圆柱体结构,金属丝材料为 GH4169, 直径为 9.6 mm, 高度为 34—37 mm, 具体 样件的材料参数见表 1.

样件编号	高度/mm	相对密度	质量/g	
P-1	32.48	0.112	2.17	
P-2	35.49	0.148	3.14	
P-3	31.97	0.219	4.17	
P-4	34.35	0.251	5.14	

表 1	金属橡	胶热膨胀i	试验样件	参数

图 5 为不同相对密度下热膨胀系数随温度变 化的曲线.不同相对密度下的金属橡胶热膨胀系数 都随温度的升高而变大,但都比原金属丝材料的热 膨胀系数小;并随着相对密度的增加热膨胀系数逐 步变大,最后越来越接近金属丝材料本身的热膨胀 系数.当温度在 100 °C 到大约 300—400 °C 之间范 围内时,金属橡胶热膨胀系数值随温度的升高急剧 增加,并且为金属丝材料热膨胀系数的 0.5—0.7.当 温度在 300—400 °C 以上,金属橡胶的热膨胀系数 随温度升高的增大趋于平缓,并且为金属丝材料热膨胀系数的 0.85—0.9.



图 5 不同相对密度下金属橡胶热膨胀系数与温度的关系

温度较低时,金属橡胶内部主要以未接触状态的基本单元为主,即未接触状态的基本单元的体积 分数较大.根据(5)和(7)式,未接触状态基本单元 的热膨胀性能对金属橡胶宏观热膨胀性能的影响 起主要作用,因此温度较低时明显阻碍了金属橡胶 的热膨胀. 当温度逐渐升高时, 微元体自身热膨胀 的变形开始逐步增加, 热变形填充了未接触螺旋卷 之间的孔隙, 即未接触的螺旋卷开始转换为接触状态<sup>[10]</sup>, 接触状态的体积分数开始增多. 根据 (6) 和 (7) 式, 未接触状态基本单元之间的间隙对宏观热 膨胀变形的阻碍能力有限, 金属橡胶热膨胀的变化 趋势开始和金属丝材料一致, 越来越接近金属丝材 料本身的热膨胀系数. 随着相对密度的增加, 内部 未接触的基本单元的体积分数越来越少<sup>[10]</sup>, 其对 金属橡胶材料的热膨胀抑制作用也降低, 因此热膨 胀系数增大.

4 金属橡胶材料的导热性能研究

#### 4.1 金属橡胶的传热过程

金属橡胶多孔介质中含有气体和金属丝,其内 部的传热途径主要有以下三种模式:相互接触的金 属丝及空隙中气体的导热;空隙中气体的对流换热; 金属丝或气体之间的辐射换热,如图6所示.

大量试验研究和理论分析结果表明, 当多孔介 质中含湿量较低时, 且内部孔隙中流体处于静止状 态或流动甚微时, 空隙中流体的对流换热贡献可忽 略不计<sup>[16]</sup>. 而辐射换热贡献只是在温度较高、且 空隙为真空或由气体占据时才比较明显<sup>[17]</sup>. 鉴于 金属橡胶材料的传热过程非常复杂, 为便于传热方 程的联立及求解, 可把金属橡胶的传热过程考虑成 纯导热过程. 对于金属橡胶多孔材料的纯导热过程, 一般包括: 金属丝的导热过程; 金属橡胶中空气和 金属丝与空气之间的导热过程; 金属丝之间存在接 触热阻时的导热过程.



图 6 金属橡胶材料内部传热过程

金属橡胶内部导热过程非常复杂,很难求得导

热问题的解析解,因此有必要从内部微元体热导过 程入手研究,建立导热单元体.每个导热单元体都 是一个含有导热金属丝的立方体,根据比等效导热 系数法则,金属橡胶材料的有效导热系数近似等于 单元体的导热系数.

#### 4.2 微元体结构导热模型

金属橡胶是一种多孔材料,内部由金属丝螺旋 卷交错而成,并且金属丝螺旋卷始终贯穿于整个金 属橡胶之中,形成了各个方向的导热网链.当金属 橡胶的成型方向为热流方向时,纵向微元体排列形 式为螺旋卷的轴向方向与热流方向平行,横向微元 体排列形式则为轴向方向与热流方向垂直.

图 7(a) 所示为采用有限元法<sup>[11]</sup> 得到的纵向微 元体和螺旋卷的热流分布图.由于螺旋卷微元体的 特殊的螺旋上升卷结构, 热流进入纵向和横向螺旋 卷微元体后, 与加载热流方向成一定的角度, 主要 通道为沿着纵向螺旋卷中心线的切平面.

由此分析得到纵向微元体传导形式和热阻模型如图 7(b), (c) 所示. 根据傅里叶定律, 纵向排列的螺旋卷等效热阻为 *R*<sub>1V-h</sub>, 其为一根与热流方向成一定角度的金属丝的等效热阻, 因此通过纵向排列螺旋卷的热流为

$$q_{1\mathrm{V}\_\mathrm{h}} = \bar{q}_{1\mathrm{V}\_\mathrm{h}} \sin \alpha = \lambda_{\mathrm{w}} \frac{d_{\mathrm{s}}^2 \sin \alpha}{4\pi D_{\mathrm{L}}} \Delta T. \qquad (8)$$

式中  $q_{1V_h}$  为投影到热流方向上的热流,  $\bar{q}_{1V_h}$  为通 过螺旋卷截面的热流,  $\lambda_w$  为金属丝材料的导热系 数,  $\alpha = \arctan(L_J/\pi D_L)$  为螺旋卷纵向排列时热流 方向与螺旋升线的夹角.

因此其在热流方向的等效热阻为

$$R_{1\rm V\_h} = \frac{4\pi D}{\lambda_{\rm w}\pi d_{\rm s}^2 \sin\alpha} = \frac{4D_{\rm L}}{\lambda_{\rm w} d_{\rm s}^2 \sin\alpha \cos\alpha}.$$
 (9)

横向排列螺旋卷中热流的主要通道为两个相互并 联的 1/2 横向微元体,与加载的热流方向成一定角 度,如图 8 所示.由此分析得到的纵向微元体的传 导形式和热阻模型如图 8(b), (c) 所示.根据 (8) 式, 其在热流方向的等效热阻为

$$R_{1T_{\rm L}h} = \frac{\pi D}{\lambda_{\rm w} \pi d_{\rm s}^2 \sin \beta} = \frac{D_{\rm L}}{\lambda_{\rm w} d_{\rm s}^2 \sin \beta \cos a}, \qquad (10)$$

式中:  $\beta = \arctan\left(\frac{2L_J}{\pi D}\right)$  为螺旋卷横向排列时热流 方向与螺旋升线的夹角.



图 7 纵向排列微元体的热传导形式和热阻模型 (a) 热流分布; (b) 传导形式; (c) 热阻模型



图 8 横向排列微元体的热传导形式和热阻模型 (a) 热流分布; (b) 传导形式; (c) 热阻模型

#### 4.3 基本单元的导热模型

对于金属橡胶的导热过程而言,不同接触状态 下的微元体力学性能和热膨胀性能不同,但是微元 体之间具有相互串联和并联的关系,可以传递热量, 因此接触状态的不同并不影响热量的传递.因此分 析金属橡胶的热传导过程时,可以把单位体积内一 定数量的螺旋卷看作为均匀的金属橡胶导热单元 体,金属橡胶考虑为由一系列导热单元体(立方体) 连接而成.由金属橡胶毛坯的编织和模压成型工艺 可知,成型方向上毛坯的高度为成型后高度的r倍. 金属橡胶导热单元体内具有 2r个螺旋卷,r个纵向 排列微元体为串联结构,而r个横向排列微元体表 现为并联结构,见图9.

因此在长度为 *D*<sub>L</sub> 的单位立方体内, 根据 (9) 式 可得导热单元体内串联后的纵向螺旋卷在热流方 向的等效热阻<sup>[10]</sup> 为

$$R_{1,h} = rR_{1V,h} = \frac{4rD_{\rm L}}{\lambda_{\rm w}d_{\rm s}^2\cos\alpha\sin\delta},\qquad(11)$$

式中  $\delta = \arctan(L_{\rm J}/r/\pi D)$ .

根据 (10) 式微元体内纵向螺旋卷串联结构在 热流方向的等效热阻为

$$R_{2\_h} = \frac{R_{1T\_h}}{r} = \frac{D_{\rm L}}{r\lambda_{\rm w}d_{\rm s}^2\sin\beta\cos a},\qquad(12)$$

空气的等效热阻为

$$R_{3\rm h} = \frac{D_{\rm L}}{\lambda_{\rm a}(D_{\rm L}^2 - 2r\pi d_{\rm s}^2/4)},$$
(13)

 $\lambda_a$ 为空气的导热系数.

根据三部分热阻的并联关系,金属橡胶导热单 元体在热流方向上总等效热阻为

$$R_{\rm h} = 4r D_{\rm L} \left[ \lambda_{\rm S} d_{\rm S}^2 \cos \alpha (\sin \delta + 4r^2 \sin \beta) + 4r \lambda_{\rm A} (D_{\rm L}^2 - 2r \pi d_{\rm S}^2/4) \right]^{-1},$$
(14)

因此单元体等效导热系数 λ<sub>h</sub> 为

$$\begin{split} \lambda_{\rm h} &= \frac{D_{\rm L}}{D_{\rm L}^2 R_{\rm h}} \\ &= \frac{d_{\rm s}^2 \cos \alpha (\sin \delta + 4r^2 \sin \beta)}{4r D_{\rm L}^2} \lambda_{\rm w} \\ &+ \frac{(D_{\rm L}^2 - 2r \pi d_{\rm s}^2/4)}{D_{\rm L}^2} \lambda_{\rm a}. \end{split} \tag{15}$$



图 9 单元体热传结构示意图和热阻模型

#### 4.4 金属橡胶材料导热模型

金属橡胶螺旋卷的数量为在一定相对密度下 在图 9 中所示排列基础上,按照成型方式成比例均 匀地增加得到的螺旋卷数目,单位螺旋卷体积内, 相对密度与金属橡胶螺旋卷的几何参数的关系可 表示为

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{\rm MR}}{\rho_{\rm S}} = \frac{1/D_{\rm L}^3}{1/\left(N\frac{\pi d_{\rm s}^2}{4} \times \frac{\pi D_{\rm L}}{\cos\alpha}\right)}$$
$$= N\frac{\pi^2 d_{\rm s}^2}{4D_{\rm r}^2 \cos\alpha}, \tag{16}$$

式中:  $\rho_{MR}$  为单位体积内金属橡胶的密度,  $\rho_{S}$  为金属丝的密度, N 为一定相对密度下螺旋卷微元体的数目.

一定相对密度的金属橡胶模压成型后,在单位体积内由 N/2r 个微元体并联而成.因此根据 (15) 和 (16) 式,金属橡胶等效导热系数 λ<sub>MR</sub> 公式可表示为如下形式:

$$\begin{aligned} \lambda_{\rm MR} &= \frac{N}{2r} \lambda_{\rm h} \\ &= \bar{\rho} \left( \frac{(\sin \delta + 4r^2 \sin \beta)}{2r^2 \pi^2} \lambda_{\rm w} \right. \\ &+ \frac{2 \cos \alpha (D_{\rm L}^2 - 2r \pi d_{\rm s}^2/4)}{r \pi^2 d_{\rm s}^2} \lambda_{\rm a} \right). \end{aligned} \tag{17}$$

由 (17) 式可知, 金属橡胶的导热系数由金属螺旋丝 和空气的热导系数组合而成, 其相互所占的比例与 金属橡胶的细观结构和工艺参数有关, 即与相对密 度、螺旋丝卷直径及金属丝材料参数有关. 在金属 橡胶内部螺旋卷微元体结构形式不变的情况下, 金 属橡胶的导热系数与相对密度和金属丝材料的导 热系数成一次线性关系, 微元体结构参数将影响此 线性关系的比例系数. 金属丝材料本身的导热系数 决定了金属橡胶导热系数的大致范围; 相对密度和 微元体结构参数的影响使得导热系数在这一范围 区间内变化.

#### 4.5 金属橡胶导热性能

采用了 LFA427 激光热导测试仪测试不同相 对密度的金属橡胶材料的导热系数随温度的变化 规律,试验仪器和试验件见图 10,金属丝材料均为 GH4169,厚度 1.5 mm,直径 12.7 mm,样件参数见 表 2.

表 2 金属橡胶导热系数试验件各项参数					
样件编号	相对密度	质量/g			
C-1	0.13	0.201			
C-2	0.14	0.225			
C-3	0.16	0.255			
C-4	0.20	0.319			

图 11 所示为不同温度下采用理论模型分析以 及试验测试得到的金属橡胶导热系数和金属丝材 料本身导热系数的对比,采用 C-4 试验件.试验结 果与理论模型结果都表明金属橡胶导热系数随着 温度的升高成比例地增大.不同温度下的试验测量 值稍小于理论分析值,误差为 15%以内.



图 10 LFA427 试验仪器和金属橡胶样件



图 11 金属橡胶导热系数随温度的变化

由金属橡胶的受压力学性能和导热性能分析 可知,随着温度的升高,金属橡胶内部的螺旋卷接 触状态发生变化,但是从理论公式(17)和试验结果 来看,金属橡胶导热系数的增大和金属丝材料的导 热系数成正比,说明温度升高导致接触状态的变化 并不影响螺旋卷热传导过程,证明了模型中金属橡 胶材料内部导热单元均匀的热传导假设的正确性.

图 12 所示为当温度低于 80 °C 时,采用理论 模型分析和试验测量结果得到的金属橡胶导热系 数随相对密度的变化规律.理论和试验结果均表明 金属橡胶的等效导热系数随相对密度的增加近似 成线性增大,在此相对密度范围内误差小于 20%, 相对于评定金属橡胶导热性能和金属丝材料的导 热系数相比影响可以忽略.结合金属橡胶导热系 数随温度和相对密度的变化规律,可得相对密度在 0.1—0.25 区间内,金属橡胶等效导热系数相当于金 属丝材料的 1%—3%.

相对密度增加时,金属丝材料质量增加,更多 金属丝参与导热,由于金属丝导热系数远大于空气, 因此根据 (17) 式金属橡胶导热系数近似线性增加. 另一方面热量自外传入金属橡胶进行热传导, 当遇 到金属丝时, 其导热系数大, 大部分热量通过金属 丝传递, 而小部分热量则绕过金属丝通过孔隙传递. 由于内部金属丝含量较低, 且螺旋卷结构传热的路 径相对较长和复杂, 导致金属橡胶材料的导热性能 下降, 根据 (17) 式

$$\lambda_{
m MR}pprox \left(rac{\sin\delta+4r^2\sineta}{2r^2\pi^2}
ight)ar{
ho}\,\lambda_{
m w}$$

微元体特殊的结构参数和工艺参数导致金属橡胶 的导热系数远小于丝材的热导系数与相对密度的 乘积, 即  $\lambda_{MR} \ll \bar{\rho} \lambda_{S}$ .



图 12 金属橡胶导热系数随相对密度的变化

## 5 结论

本文针对恶劣环境下金属橡胶热防护构件的 设计和热稳定问题,基于螺旋卷微元体结构,提出 并建立了金属橡胶的热膨胀模型和热传导模型,并 进行了试验验证,为金属橡胶材料在高温环境下的 应用及其在热防护方面的设计提供了理论基础. 得 到以下结论.

1) 金属橡胶的宏观热膨胀行为主要由相互接触的螺旋卷单元体的细观热膨胀变形产生. 未接触状态微元体间的间隙和接触状态间的相互转换, 是金属橡胶热膨胀系数较低和随相对密度变化的本质原因. 金属橡胶内部的孔隙只在温度 (小于大约300—400 °C) 较低时, 对热膨胀起到一定的阻碍作用.

2) 金属橡胶的导热系数由金属丝和空气的导 热系数组合而成, 二者的组成比例与微元体的细观 结构和金属橡胶的工艺参数有关.较低的相对密度 使得金属橡胶内部的金属丝含量低;微元体特殊的 螺旋结构使得其导热路径较长和复杂,从而使金属 橡胶导热性能下降.金属橡胶导热系数为金属丝材 料本身的1%—3%.

3) 理论与试验结果均证明了金属橡胶材料热 膨胀系数低于金属丝材料本身,并具有较低的导热 系数,可作为一种良好的热防护材料.本文的理论 和试验研究为金属橡胶构件在高温、恶劣工程领 域的阻尼/隔热防护设计的应用奠定了理论基础和 试验依据.

- [1] Al K 2002 Ph. D. Dissertation (TX: Texas A&M University)
- [2] Ma Y H, Hong J, Zhang D Y, Wang H 2007 Proceedings of ASME TURBO EXPO Montreal, Canada, May 14–17, 2007 p27585
- [3] Ma Y H, Wang H, Li H Y, Hong J 2008 Proceedings of ASME TURBO EXPO Berlin, Germany, June 9–13, 2008 p50961
- [4] Ma Y H 2005 Ph. D. Dissertation (Beijing: Beihang University) (in Chinese) [马艳红 2005 博士学位论文 (北京: 北京航空航天大学)]
- Bugra E, Luo H, Darren H 2009 Proceedings of the 17th American Institute of Aeronautics and Astronautics Palm Springs, California, May 4–7, 2009 p2521
- [6] Yan H, Jiang H Y, Liu W J, Hao Z D, Ulannov A M 2010 Acta Phys. Sin. 59 4065 (in Chinese) [闫辉, 姜洪源, 刘文剑, 郝振东, Ulannov A M 2010 物理学报 59 4065]
- [7] Chegodayev D E (Translated by Li Z Y) (Russia) 2000 The Designing of Components Made of Metal Rubber (Beijing: Publishing Company of National Defence Industry) p42 (in Chinese) [契戈达耶夫 D E 著 (李中郢译) 2000 金属橡胶构件的设计 (北京: 国防工业出版社) 第

42 页]

- [8] Fei W D, Wang L D 2004 Mater. Chem. Phys. 85 450
- [9] Schapery R A 1968 J. Compos. Mater. 2 380
- [10] Kim D K 2008 Ph. D. Dissertation (TX: Texas A&M University)
- [11] Li W Z, Wang J 2012 Acta Phys. Sin. 61 114404 (in Chinese) [黎威志, 王军 2012 物理学报 61 114401]
- [12] Sanada K, Tada Y, Shindo Y 2009 Composites A: Appl. Sci. Manufact. 40 724
- [13] Zhu B, Ma Y H, Zhang D Y, Hong J 2012 Acta Phys. Sin. 61 078101 (in Chinese) [朱彬, 马艳红, 张大义, 洪杰 2012 物理学报 61 078101]
- [14] Lü Y F 2006 Ph. D. Dissertation (Hefei: Hefei University of Technology) (in Chinese) [吕艳凤 2006 博士学位论文 (合肥: 合肥工业大学)]
- [15] Jing Q, Liu R P, Shao G J, Wang W K 2004 Acta Phys. Sin. 53 1440 (in Chinese) [景勤, 刘日平, 邵光杰, 王文魁 2004 物理学报 53 1440]
- [16] Farouki O T 1981 Thermal Properties of Soils (Hanover: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory)
- [17] Aduda B O 1996 J. Mater. Sci. 31 6441

# Theoretical and experimental investigation on thermophysical properties of metal rubber<sup>\*</sup>

 $\label{eq:main_state} Ma \; Yan-Hong^{1)} \quad Tong \; Xiao-Long^{1)} \quad Zhu \; Bin^{2)} \quad Zhang \; Da-Yi^{1)\dagger} \quad Hong \; Jie^{1)}$ 

(School of Jet Propulsion, Beihang University, Beijing 100191, China)
 (AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)
 (Received 10 June 2012; revised manuscript received 10 September 2012)

#### Abstract

Metal rubber (MR) is a new-type damping material with special raw material and manufacturing process. The helix wire is considered as the geometric unit of MR. The thermal expansion model of the MR is established based on the thermal expansion analyses of micro-springs in different contact states with the Schapery model. Thermal experiments are conducted to analyze the effects of relative density and temperature on the thermal expansion property of metal rubber. The heat transfer process of the MR and the heat transfer model of helix wires are obtained based on MR microstructure. Under certain conditions, the heat transfer can be simplified into the single thermal conductions. Based on the Fourier law, thermal conduction of MR microstructure is analyzed using the thermoelectric analogy method. Combined with the equivalent coefficient law of the thermal conduction, the thermal conduction model of MR is established. The formula of the thermal conduction coefficient is derived. The accuracy of the theoretical model is verified by the experimental results. The theoretical and experimental results of the thermal expansion and heat transfer provide strong theoretical and calculative analytical foundation for the application of the MR in the heat insulation material field at high temperature.

Keywords: metal rubber, thermal expansion, thermal conduction, wire helix

PACS: 81.05.Ni, 07.10.Fq, 46.25.-y, 46.40.Ff

**DOI:** 10.7498/aps.62.048101

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51101008, 51105022) and the Fan Zhou Research Fund, China (Grant No. 20110402).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: dayi@buaa.edu.com