

温度对小型柔性接头力矩特性的影响

苏浩¹, 任军学¹, 郑开发¹, 刘宇¹, 杨敬贤²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 中国航天科技集团公司 上海航天技术研究院 上海航天动力技术研究所, 上海 200125)

摘 要: 为了研究柔性接头在固定压强下力矩特性随温度的变化, 设计了弹性材料为硅橡胶的小型柔性接头, 测试了一系列 0.1 MPa 容压条件下柔性接头在正弦激励下的动态特性, 获得了不同温度时接头的摆角力矩曲线。根据接头在摆角为 0° 时的力矩获得摩擦力矩, 根据摆角力矩曲线的近线性部分获得弹性比力矩, 在此基础上研究了温度对各个力矩的影响。结果表明: 作动力矩随温度的升高而减小, 但温度对作动力矩的大小影响很小, 库伦摩擦力矩随温度的升高而增加, 弹性比力矩和总比力矩因发生热弹逆变现象随温度的升高先减小后增加, 动态弹性模量和损耗系数随温度的升高而降低, 能量损耗受动态弹性模量和损耗系数变化影响随温度的升高而降低。

关 键 词: 推力矢量控制; 柔性接头; 温度; 力矩特性; 热弹逆变现象

中图分类号: V435⁺.23

文献标志码: A

Influence of temperature on torque properties of miniature flexible joint

SU Hao¹, REN Jun-xue¹, ZHENG Kai-fa¹, LIU Yu¹, YANG Jing-xian²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute,

Shanghai Academy of Spaceflight Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 200125, China)

Abstract: In order to study the properties of flexible joint torque at a certain motor pressure, a miniature flexible joint made of silicone rubber elastomer was designed. The dynamic characteristics of flexible joint under 0.1 MPa vessel pressure were tested and the curves of torque versus vector angle for the flexible joint at different temperatures were obtained. The friction torque was obtained through the 0° vector angle torque. The spring torque was calculated by the near-linear part of the torque versus vector angle curve. In addition, the influences of temperature on the three kinds of torque were studied. Results show that the torque decreases as temperature increases while temperature has little influence on the torque. The coulomb friction torque increases with the temperature rise. The spring torque and the total ratio torque decrease as the temperature increases and then increase within a certain range caused by thermo-elastic inversion phenomenon. The dynamic elastic modulus and coefficient of loss decrease with the temperature rise. The energy loss decreases as the temperature and frequency increase due to the influence of dynamic elastic modulus and coefficient of loss.

Key words: thrust vector control; flexible joint; temperature; torque properties;

收稿日期: 2015-11-19

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2016100)

作者简介: 苏浩(1992—), 男, 硕士, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

引用格式: 苏浩, 任军学, 郑开发, 等. 温度对小型柔性接头力矩特性的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(4): 976-982. SU Hao, REN Junxue, ZHENG Kaifa, et al. Influence of temperature on torque properties of miniature flexible joint [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(4): 976-982.

柔性喷管是由固定体、活动体和柔性接头三部分组成的推力矢量控制执行部件,柔性接头是固体火箭发动机柔性喷管推力矢量控制的核心部件^[1],它由若干环状的弹性橡胶和金属或复合材料层层交替黏接制成。

柔性喷管的较强的偏转能力、足够的抗扭刚度、结构简单、高比冲,这些优点使得它可以很好地满足战术应用的可控性、机动性要求^[2-6]。美国 TSRM(SM-3 第 3 级)和 STGR 12GV(Terrier LEAF 第 3 级),欧洲的 ASTER 15/30 助推发动机等都采用了柔性接头^[7-9]。

与战略导弹发射准备时间长,发射前有保温措施不同,战术导弹要求随用随发,宽温度使用(一般要求储存温度为 $-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作温度为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)。由于温度会影响橡胶弹性件的力学性能,如弹性力矩、摩擦力矩、切变模量及能量损耗等,进而影响柔性接头、柔性喷管的轴向刚度及角刚度等,因此在研制战术导弹柔性喷管时,必须考虑温度的影响,并应选用高低温性能优异的宽温度橡胶制造弹性件。以色列 Rafael 公司^[2]的小型柔性喷管采用高伸长率和低玻璃化温度的硅橡胶制造弹性件。该柔性接头在 $-43\sim 71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内弹性比力矩数值稳定。国内张晓光对某小型柔性接头进行了推力矢量性能的一系列试验,发现了柔性接头弹性比力矩随温度升高逐渐降低的规律^[10],但忽略了弹性比力矩最后出现的上升现象,也未为对其内在原因进行详细分析。本文在多次试验基础上认为该现象并非偶然并运用高聚物的热弹逆变理论予以解释。

为了进一步认识上述各参数随温度变化的规律,本文开展了一系列硅橡胶弹性件小型柔性接

头在 0.1 MPa 压强下的动态特性试验,测试了柔性接头在不同温度下给予正弦波激励时的力矩特性,分析了循环过程中的摆角-力矩曲线、各力矩随温度的变化规律和能量损耗,为进一步通过建立模型定量的分析温度对柔性接头力矩特性的影响提供依据。

1 柔性接头及试验系统

1.1 柔性接头

柔性接头的结构如图 1 所示,由前法兰、后法兰、增强件和弹性件组成。弹性件材料参数与文献^[10]中所提一致。

1.2 试验系统

柔性接头冷试试验系统装置如图 2 所示。压力容器可充填高压氮气模拟燃烧室压强环境,电动伺服机构通过驱动器产生不同振幅、不同频率的正弦激励信号,用于提供柔性接头摆动所需作动力矩。两个水平安装的位移传感器用于测试柔性接头摆角,铅垂安装的位移传感器结合两水平传感器用于测试柔性接头的摆心^[10],拉压力传感器用于测试伺服机构所提供的作动力,测得摆心和作动力后,则可按文献^[11]中的方法计算出作动力矩。

为了进行高低温试验,必须建立符合试验要求的高低温环境,试验中使用的 GDW-150 型高低温箱,工作室尺寸 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 600\text{ mm}$,功率 5 kW ,温度范围 $-65\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,温控精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

试验前,将柔性接头、压力容器、刚性杆等机械部件装配完毕,置于高低温箱工作室中,进行加热或制冷,在设定温度下停放 48h 后取出并用海

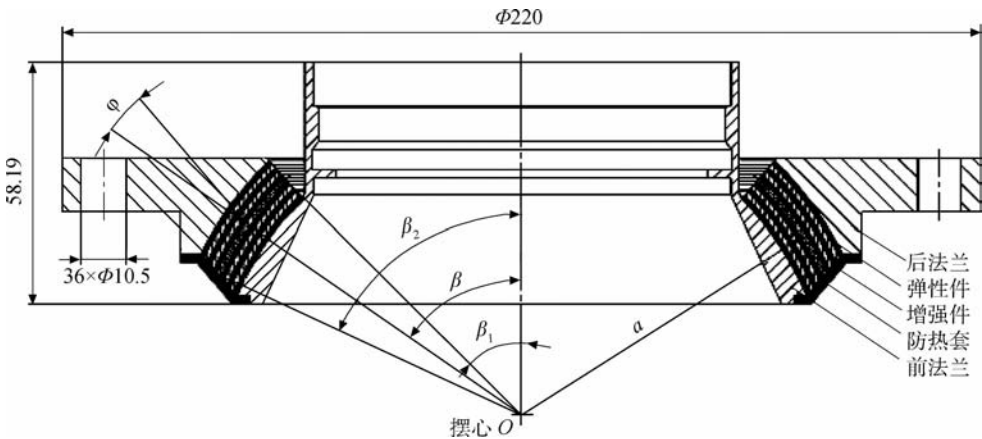


图 1 柔性接头(单位:mm)
Fig. 1 Flexible joint (unit:mm)

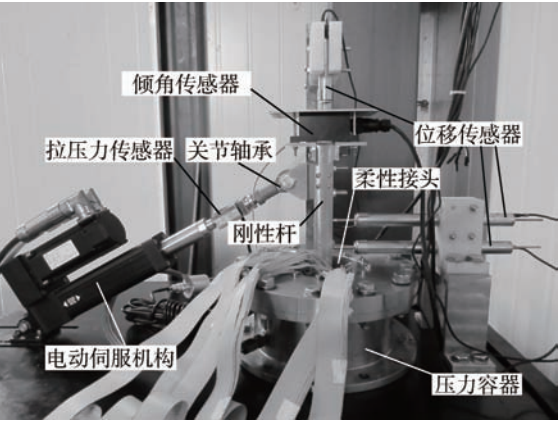


图 2 柔性接头冷试试验系统

Fig. 2 Cold-flow experiment system for flexible joint

绵缠裹以绝热,再安装传感器、伺服机构等电气设备,即可测试不同试验温度状态下柔性接头摆动的试验参数. 整个安装、试验过程在 10 min 内完成,经测试,温度下降在 10℃ 以内.

2 力矩辨识方法

图 3 是柔性接头在一定燃烧室压强、某一振幅、摆动频率和温度下的摆角-力矩曲线.

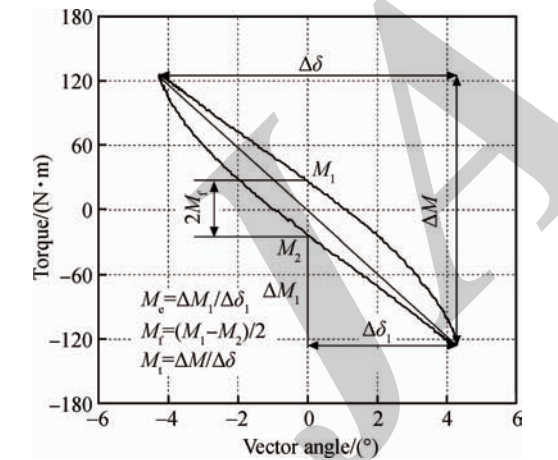


图 3 力矩辨识方法

Fig. 3 Method of torque identification

从图 3 可看出,摆角力矩曲线呈回环状态^[12],曲线上下两部分都有近似线性的部分,且保持平行,说明柔性接头的力矩存在与摆角成比例的弹性部分,在振幅最大处摆动方向变换时,曲线斜率变化较大. 这是由于弹性件填充颗粒的影响,使得柔性接头出现类似库仑摩擦的现象,对于填充类橡胶制品承受循环载荷时,不论加载频率有多低,都会出现这种现象^[13].

柔性喷管中弹性件橡胶材料的黏滞特性使柔性接头摆动试验中反映出具有黏滞摩擦和库伦摩

擦力矩. 黏滞摩擦力矩是与摆动角速度有关的摩擦力矩部分;库伦摩擦力矩是与摆动角速度无关的静摩擦力矩部分,相当于要使柔性接头开始摆动所需的起码力矩^[14]. 在激励频率非常低时(例如 0.1 Hz),黏性效应可以忽略,摆角为 0° 处的力矩近似为库伦摩擦力矩. 对于本试验使用的柔性接头,将 0.1 Hz 摆动频率时摆角为 0° 处的力矩近似为库伦摩擦力矩,随频率的提高,摆角为 0° 处的力矩变为库伦摩擦力矩和黏滞摩擦力矩之和,摩擦力矩 M_f 、弹性比力矩 M_e 和总比力矩 M_t 的定义及计算方法可以表示为式(1)~式(3)

$$M_e = \Delta M_1 / \Delta \delta_1 \tag{1}$$

$$M_f = (M_1 - M_2) / 2 \tag{2}$$

$$M_t = \Delta M / \Delta \delta \tag{3}$$

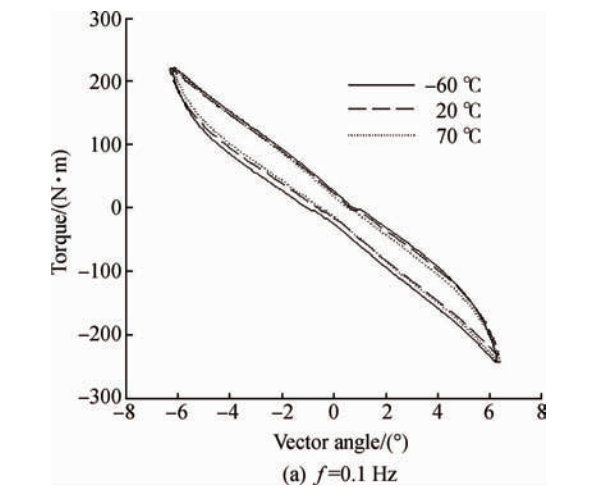
此外,为了减小误差,分别求解迟滞环左边的弹性比力矩和右边的弹性比力矩,然后将两者的平均值作为最终分解得到的弹性比力矩.

3 试验结果及分析

3.1 温度对摆角-力矩迟滞环曲线的影响

为研究在压强不变的情况下,柔性接头的摆角-力矩特性曲线在不同频率下随温度变化的规律,进行了温度分别为 -60, 20, 70℃ 的 4 组动态试验. 图 4 为振幅为 6°, 0.1 MPa, 频率为 $f=0.1$, 0.3, 0.6, 1.0 Hz 下不同温度的迟滞环曲线.

从图 4 可看出,作动力矩随温度的升高而减小,结合图 5 可以看出,温度对作动力矩的增减幅度大小影响较小. 硅橡胶的结构与特性是由其生胶聚硅氧烷的结构与特性决定的^[15]. Si-O 的离子特性与共化学键特性决定其具有较高的解离能,因而硅橡胶与天然橡胶相比具有更高的高温稳定性. 柔性接头硅橡胶使用有机取代基替换与硅原子相连的甲基,破坏了主链的规整性,抑制了硅橡



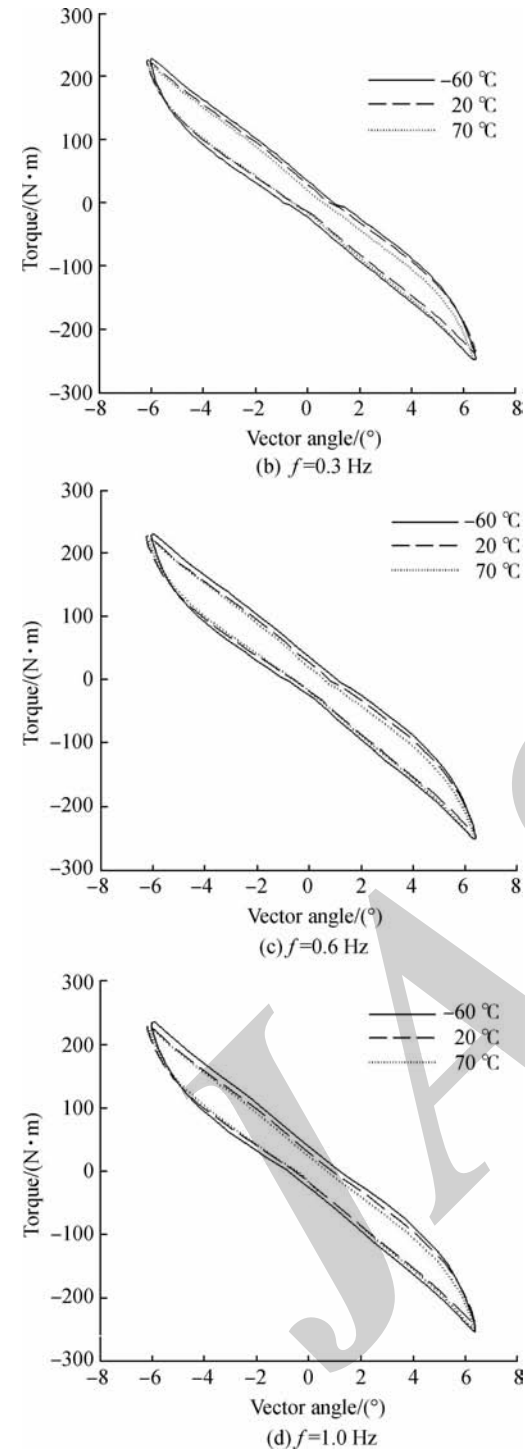


图 4 0.1 MPa, 振幅为 6°不同温度下的特征曲线
Fig. 4 Characteristic curves in different temperatures at 6° excitation amplitude (0.1 MPa)

胶的低温结晶过程并降低了玻璃化温度,从而使硅橡胶呈现出良好的低温性能.此柔性接头作动力矩对温度的依赖性很小,在高低温下均有很好的稳定性.

3.2 温度对各力矩的影响

为研究在压强不变的情况下,柔性接头的在不同频率下摩擦力矩、弹性比力矩和总比力矩随

温度的变化规律,将文中第 3.1 节的迟滞环按第 2 节的力矩辨识方法进行分解.图 5 为分解后得到的不同温度下摩擦力矩、弹性比力矩和总比力矩的变化曲线图.

从图 5(a)可看出,在频率不变的情况下摩擦力矩随温度的升高而降低,摩擦力矩的值约在 20 °C 时摩擦力矩值的上下 30% 范围内变化.从图 5(b)

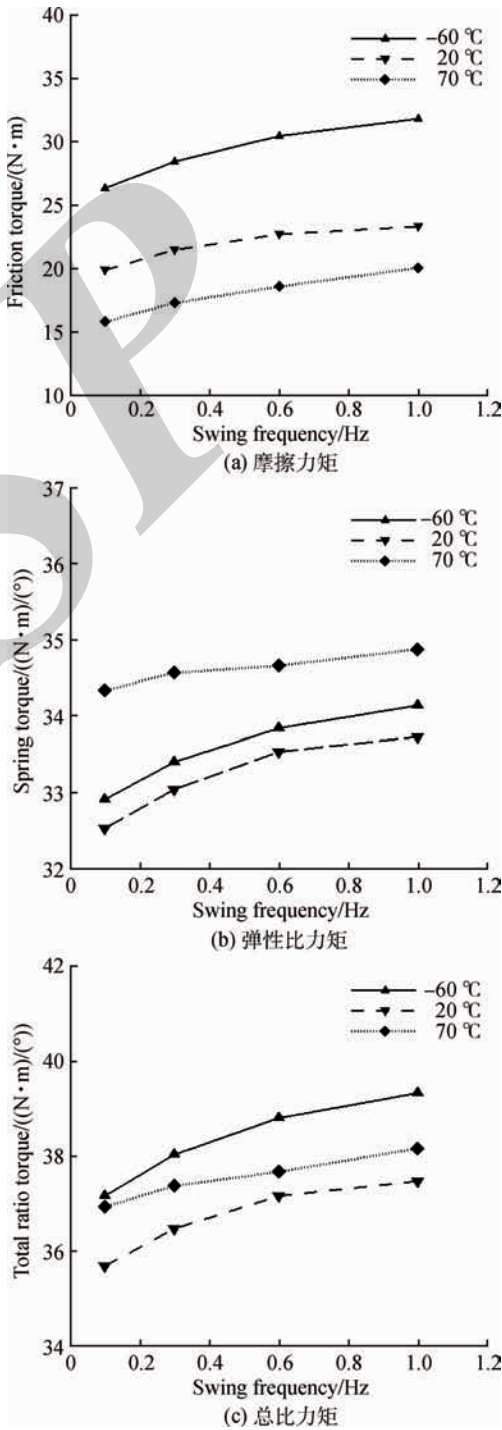


图 5 振幅为 6°时各力矩随温度的变化关系
Fig. 5 Curves of the relation for each torque with the temperature at 6° excitation amplitude

和图 5(c)可看出,弹性比力矩和总比力矩随温度的升高先降低后升高,弹性比力矩和总比力矩的值约在 20℃时弹性比力矩和总比力矩值的上下 10%范围内变化,这与文献[10]的试验结果是一致的。

出现图 5(a)中现象的原因是,在低温时链段的分子运动被冻结,形变主要由高分子链中原子的化学键长或键角的变形产生,随温度升高许多冻结链段变得能够运动,库伦摩擦力矩表现出随温度升高而增加的趋势.黏滞摩擦力矩基本上与斜率角速度成正比,因此摩擦力矩的总值整体上表现出随摆动频率增加而增加。

对图 5(b)需要说明的是,柔性接头的弹性件(硅橡胶)的外围均是由增强件和法兰固定的,在整个温度变化和摆动过程中均认为弹性件的体积保持不变,即看作是等容试验^[16].在固定激励角度作用下,硅橡胶产生的应变是相同的.根据高聚物热弹逆变现象理论,处于 70℃的高聚物分子在温度降低时,分子偏离原先的平衡位置,在偏离过程中,分子间斥力帮助外力功共同使试件发生形变,此时所需要的外力功就会减少,维持同样的形变所需的应力就会减少,即切变模量(G)减少.当模量下降到一定的数值时,到达另一个平衡态,这是个稳定平衡,如果要克服位垒而到达另一个平衡状态,仍需外力做功,而且此时外力还要克服斥力做功,所以这时就需要较大的外力功,且斥力越来越大,所以随温度降低,切变模量又在不断增加,这时就会出现一个波谷^[17].上述现象的示意图如图 6 所示。

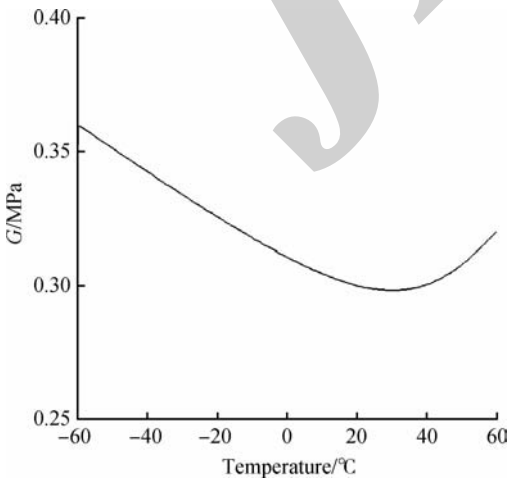


图 6 由热弹逆变现象引起的切变模量随温度变化规律示意图

Fig. 6 Schematic diagram of shear modulus variation with temperature caused by thermo-elastic inversion phenomenon

上述现象反映到宏观上即硅橡胶高聚物发生相同形变所需的外力在一定范围内随温度升高呈现出先减小后增加的趋势。

对于图 5(c),分析试验中使用的柔性接头的试验数据可以发现,摩擦力矩占总力矩的 15%左右,而弹性力矩占 80%以上.弹性比力矩的变化导致了总比力矩在-60~70℃的温度范围内随温度升高呈现出先减小后增加的趋势。

3.3 温度对能量损耗的影响

对图 4 迟滞环的面积求积分,即可得到等于在一个摆动周期中柔性接头所损耗的机械功,这部分功全部用于克服在交变力作用下链段运动的摩擦力(内摩擦).这种由于力学滞后而使机械功转换成热的现象,称为力学损耗^[18].

为了了解柔性接头的能量损耗在不同摆动频率、不同振幅下随温度的变化情况,分别进行了 0.1 MPa 下,柔性接头在摆动频率为 0.6 Hz 不同振幅和振幅为 6°时不同摆动频率的试验.图 7 为柔性接头在同一振荡周期内不同摆动频率下能量损耗随温度变化的关系曲线。

从图 7 可看出,在振幅、频率不变的情况下,能量损耗随温度的升高而降低;在温度不变的情况下,能量损失随振幅和频率的增加而增加.增加频率与降低温度都会促进力学滞后现象,因而对能量损耗的增加有相同的影响^[19].能量损耗在大振幅激励下随温度的变化明显,滞后现象也更严重。

为进一步探究柔性接头在摆动过程中的能量损耗随温度变化的原因,进行了柔性接头所使用硅橡胶的动态性能温度扫描试验.硅橡胶的动态性能通常是指在正弦振动下测得的动态弹性模量和损耗因子,它直接决定柔性接头的动态刚度的阻尼的大小.图 8 为柔性接头试验件使用的硅橡胶的动态弹性模量 G' 和损耗系数 $\tan \delta$ 随温度的变化曲线。

从图 8 可以看出,硅橡胶的动态弹性模量 G' 和损耗系数 $\tan \delta$ 随温度的升高呈现出下降的趋势,这与硅橡胶的弹性模量 G 随温度的升高先降低后升高的规律是不同的.低温下硅橡胶分子链活动性降低,侧基、链结、链段活动越加困难,链段的分子运动被冻结,形变主要由高分子链中原子的化学键长或键角的变形所产生,橡胶体积收缩,链缠绕更加紧密,分子间力增大,拉伸强度呈增大,因而动态弹性模量 G' 很高^[20].当橡胶处于玻璃化转变温度以上时,温度升高,尽管整条高分子

链还不能发生运动,但链段的运动已被激发.在力学性能上表现为动态弹性模量 G' 的迅速下跌.

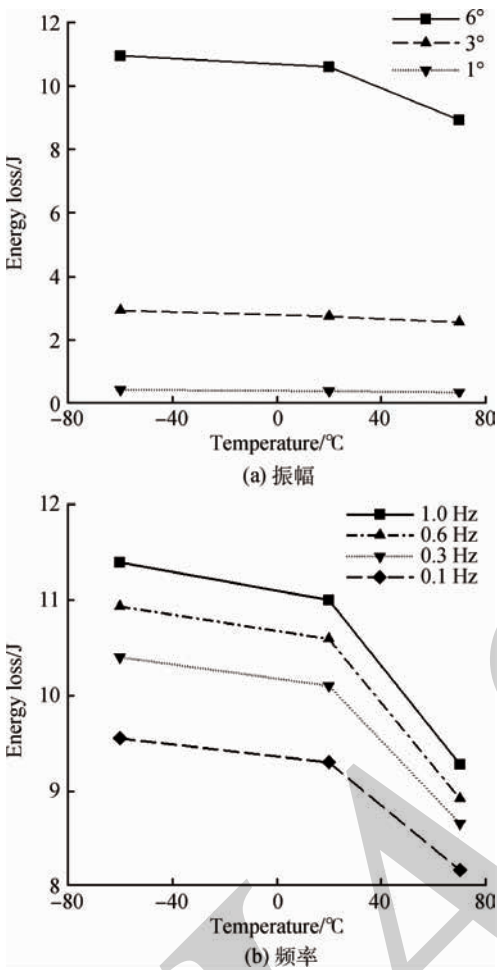


图 7 能量损耗随温度的变化关系

Fig. 7 Curves of the relation for energy loss with the temperature

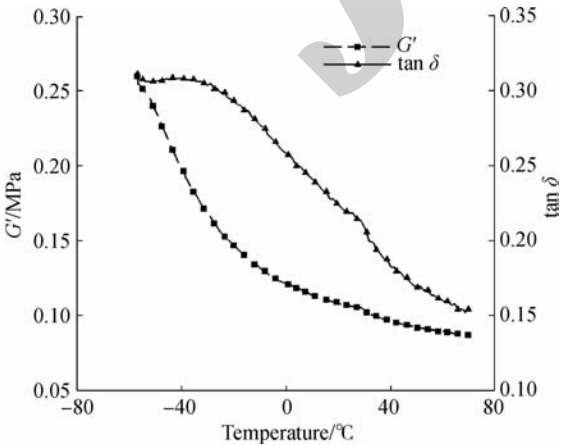


图 8 动态弹性模量 G' 、损耗系数 $\tan \delta$ 与温度的关系

Fig. 8 Relation of dynamic elastic modulus G' and loss factor $\tan \delta$ with temperature

当变形幅值一定时,应变幅值的平方为定值,能量损耗只与动态弹性模量 G' 和损耗系数 $\tan \delta$ 的乘积有关.所使用硅橡胶材料的动态弹性模量 G' 和损耗系数 $\tan \delta$ 在 $-60 \sim 70^\circ\text{C}$ 的范围内随温度升高急剧下降,这导致了单位体积的材料在一个振动周期损耗能量的减少.这也解释了图 7 中能量损耗随温度升高而降低的现象.

4 结 论

本文研究了柔性接头在不同试验温度下的性能特点,分析了温度对于柔性接头迟滞环、各力矩以及能量损耗的影响,给出了柔性接头弹性比力矩变化规律的解释,得到以下结论:

- 1) 作动力矩随温度升高呈逐渐降低的趋势,但在 $-60 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度区间内柔性接头的摆角—力矩(迟滞环)曲线受温度的影响非常小.硅橡胶柔性接头弹性比力矩和总比力矩总体稳定,可满足战术导弹宽温域的使用需求.
- 2) 摩擦力矩随温度升高逐渐降低,弹性比力矩和总比力矩在 $-60 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度区间内随温度升高先降低,且温度对摩擦力矩变化的影响更大.在温度升高的过程中由于发生高聚物热弹逆变现象,导致弹性比力矩和总比力矩随温度升高最后出现上升趋势.
- 3) 硅橡胶材料的动态弹性模量和损耗因子随温度的升高而降低,这与柔性接头在同一振荡周期内的能量损耗随温度变化的规律相吻合,并很好地解释了能量损耗变化的原因.

参考文献:

[1] 王超,任军学,郝文强. 柔性接头有效摆心漂移[J]. 航空动力学报,2014,29(12):2293-2299.
WANG Chao, REN Junxue, HAO Wenqiang. Characteristics of effective pivot point excursion for flexible joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2293-2299. (in Chinese)

[2] Shani S, Putter S, Peretz A, et al. Development of a high-performance flexible joint for thrust vector control [R]. AIAA 95-3017, 1995.

[3] 吉礼超,宋贵宝. 防空导弹控制方法的研究现状及展望[J]. 战术导弹技术,2009,30(3):54-59.
JI Lichao, SONG Guibao. Current study status and future prospect of control mode of air-defense missile[J]. Tactical Missile Technology, 2009, 30(3): 54-59. (in Chinese)

[4] Wassom S R, Faupell L C, Perley T. Integrated aerofin/thrust vector control for tactical missile[J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(3): 374-381.

[5] Herbst W B. Dynamics of air combat[J]. Journal of Air-

craft,1982,20(7):594-598.

[6] Danielson A O,Dillinger R B. Investigation of thrust vector control for high-alpha pitchover[R]. AGARD CP-451, 1988.

[7] Caveny L H,Geisler R L,Ellis R A,et al. Solid rocket enabling technologies and milestones in the United States[J]. Journey of Propulsion and Power,2003,19(6):1038-1066.

[8] Olsen K E,Walsh J J,Thomas E L. Navy terrier LEAF third-stage propulsion[R]. Monterey, CA: AIAA Missile Sciences Conference,1994.

[9] Uhrig G,Roussille C. Design drivers and technologies for solid propulsion of interceptors[R]. Arcachon, France: 1st AAAF International Conference in Missile Defence,2003.

[10] 张晓光,刘宇,任军学,等. 小型柔性接头推力矢量性能试验研究[J]. 航空动力学报,2012,27(12):2836-2841.

ZHANG Xiaoguang,LIU Yu,REN Junxue,et al. Experimental investigation of miniature flexible joint thrust vector characteristics[J]. Journal of Aerospace Power,2012, 27(12):2836-2841. (in Chinese)

[11] 陈汝训,刘铭初,李志明,等. 固体火箭发动机设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2005.

[12] 朱忠惠. 推力矢量控制伺服系统[M]. 北京:宇航出版社, 1995.

[13] Berg M. A model for rubber springs in the dynamic analysis of rail vehicles[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 1997,211(2):95-103.

[14] 王铮,胡永强,等. 固体火箭发动机[M]. 北京:宇航出版社,1993.

[15] 刘嘉,苏正涛,栗付平. 航空橡胶与密封材料[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

[16] 刘凤岐,汤心颐. 高分子物理[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.

[17] 宋博,胡时胜,刘孝敏. 高聚物热弹逆变现象的分子运动机理[J]. 高分子材料科学与工程,1999,15(4):1-3.

SONG Bo,HU Shisheng,LIU Xiaomin. Molecular motive mechanism of polymer's thermo-elastic-inversion phenomenon[J]. Polymer Materials Science and Engineering,1999,15 (4):1-3. (in Chinese)

[18] 吴其华,张萍,杨文君,等. 高分子物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2011.

[19] 何平笙. 高聚物的力学性能[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2008.

[20] 何平笙. 新编高聚物的结构与性能[M]. 北京:科学出版社,2009.

(编辑:叶 青)