

文章编号:1006-9941(2021)09-0848-07

金属橡胶隔振器对火工分离螺母冲击响应的影响

赵象润^{1,2},严楠¹,郭崇星²,代五四²,黄金红²,傅绍斌²

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081; 2.辽宁北方华丰特种化工有限公司火工品技术研究所,辽宁抚顺 113003)

摘要: 为避免航天器受到火工分离螺母作用时的高冲击载荷而造成故障,采用金属橡胶隔振器抑制分离螺母内活塞撞击所激起的冲击响应。通过在分离螺母活塞运动末端安装大刚度、中刚度和小刚度三种金属橡胶隔振器,分析500~10000 Hz的频域内的冲击响应谱。结果表明,金属橡胶隔振器的冲击抑制效应主要发生在3000 Hz以上的频段上,5000 Hz以上的频段的冲击抑制效果最为显著。使用小刚度隔振器后使最大加速度响应从1330 g下降至852 g,分析频域内的最大降幅为675 g@5993 Hz;使用中刚度隔振器后的使最大加速度响应从1530 g下降至1251 g,分析频域内的最大降幅为539 g@9514 Hz;使用大刚度隔振器后的最大加速度响应从1697 g下降至1416 g,分析频域内的最大降幅为281 g@8476 Hz。使用金属橡胶隔振器实现了较好的冲击抑制效果,对于火工工作装置的降冲击设计提供了一种可行的方法。

关键词: 分离螺母;冲击抑制;金属橡胶隔振器(MRVI);冲击响应谱(SRS)

中图分类号: TJ45

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020141

1 引言

分离螺母由于具有“强连接-弱解锁”的特性,产生的分离冲击相对较小,非常适合于级间分离、载荷释放分离等对低冲击分离有要求的场合^[1]。分离螺母作用时,其结构内部受火工药剂作用的激励而产生巨大的局部压力,以高量级、高频响应力波的形式在结构中传播,并在结构上产生宽频带、低速度、持续时间短的瞬态机械响应,称为爆炸分离冲击或火工冲击(Pyroshock)响应^[2]。火工冲击响应过高时会造成航天器上的高灵敏度设备、光学及电子产品等对冲击敏感的元器件的损伤或失效^[3-4]。降低分离装置作用过程中附加的冲击响应水平,可以有效提高精密仪器使用寿命和可靠性,对飞行器整体技术发展具有重要的战略意义^[5]。

美国Hi-shear公司的SN系列分离螺母是降冲击效果较好的代表性产品。SN9400分离螺母采用减振吸能材料吸收解锁后多余的动能实现冲击抑制。SN9500分离螺母通过设置一个包括同轴定子和转子的预紧力缓释机构,增加了预紧力释放时间,将释放的轴向力转换成旋转力,从而极大的减少由于轴向预紧力释放所带来的冲击。SN9500分离螺母比前代SN9400分离螺母的冲击响应削弱90%以上^[6-7]。2007年,美国航空航天局(NASA)为了降低“好奇者号”火星探测器上使用的分离螺母的冲击响应,通过增加铝蜂窝缓冲环、金属橡胶套管等方式有效降低了分离螺母产生的冲击,尤其是高频段上具有明显的降冲击效果^[8]。2012年,Han J H等^[9]针对橡胶类冲击抑制材料刚度较低的问题,提出了一种伪弹性混合网格冲击隔离器,以此来抑制火工分离装置的冲击响应。与传统冲击隔离器相比,金属橡胶表现出更好的降冲击性能。随着制作工艺的成熟,国内近些年也逐渐认识到金属橡胶在兵器、航天领域减振措施应用中有重要价值^[10-12]。军械工程学院致力于金属橡胶构件的设计、制备以及技术理论的研究,为金属橡胶在高技术装备中的应用做出了重要贡献^[13]。苏渤等^[14]采用金

收稿日期:2020-06-15;修回日期:2020-09-13

网络出版日期:2021-03-26

基金项目:国家自然科学基金资助(U1530135)

作者简介:赵象润(1983-),男,博士,主要从事火工工作装置方面的研究。e-mail:zxr.chn@gmail.com

通信联系人:严楠(1960-),男,教授,主要从事先进火工品技术方面的研究。e-mail:yn@bit.edu.cn

引用本文:赵象润,严楠,郭崇星,等.金属橡胶隔振器对火工分离螺母冲击响应的影响[J].含能材料,2021,29(9):848-854.

-ZHAO Xiang-run, YAN Nan, GUO Chong-xing, et al. Influence of Metal Rubber Vibration Isolator on Pyroshock Response of Pyrotechnic Separation Nuts[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(9):848-854.

属橡胶隔振器隔离航天器上的火工冲击,使冲击响应谱最大值由 1000 g 降低到 385 g,取得了良好的降冲击效果。但该结果是在冲击试验台上测出,与真实的火工分离装置作用时的复杂力学环境有较大区别,因此金属橡胶隔振器的降冲击效果应以火工分离装置实测结果为准。基于上述成果,本研究采用金属橡胶隔振器抑制分离螺母活塞撞击过程产生的冲击响应,获得金属橡胶隔振器对冲击响应的规律和降冲击效果。

2 试验部分

试验采用一块由四根柔性棉绳悬空吊起的铝板(600 mm×60 mm×10 mm)模拟分离螺母在无重力自由状态下对两个分离目标的连接,再设计一个铝块(80 mm×80 mm×10 mm)来匹配夹紧距离并加载预紧力进行分离螺母冲击响应的测试工作^[15]。在距离冲击源轴线 150 mm 处安装加速度传感器测试分离时的时间加速度($a-t$ 曲线)。占用一个电爆管安装孔安装压力传感器监测燃烧室压力变化,使用环形力传感器保证预紧力准确加载并监测分离过程中的预紧力变化过程。试验用的冲击响应测试平台示意图如图 1 所示。

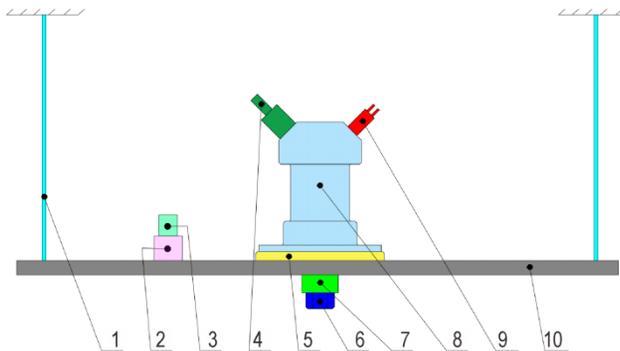


图 1 分离冲击多参量测试平台组成示意图

1—悬挂棉绳,2—转接块,3—加速度传感器,4—压力传感器,5—铝块,6—螺栓,7—力传感器,8—分离螺母本体,9—电爆管;10—测试铝板

Fig.1 Schematic diagram of the pyroshock response multi-parameter testing device

1—hanging cotton rope, 2—adapter block, 3—accelerometer, 4—pressure sensor, 5—aluminum block, 6—bolt, 7—force sensor, 8—separation nut body, 9—electric squib, 10—test aluminum plate

国内外分析火工冲击响应的频率上限一般为 10000 Hz^[16]。由于 500 Hz 以下的冲击响应基本都是噪声引起的,已经不能真实的反映火工冲击的响应

值^[17]。因此本研究只分析 500~10000 Hz 频域的响应。信号采集系统采用 DEWE-PACK-16 信号调理器, DEWE-5001-TR 动态分析仪,设置采样率 300 kHz(最高截止频率的 30 倍)。加速度测试使用 CA-YD-111A 型压电式加速度传感器,量程 30000 g,响应频率 5~15000 Hz,共振频率 55 kHz。时间-加速度曲线($a-t$ 曲线)采用 Smallwood 提出的改进的递归数字滤波法进行冲击响应谱(SRS)数值计算^[18-19]。计算频率间隔取 1/12 倍频程,放大因子 $Q=10$ (对应 5% 阻尼比),选择最大绝对加速度 SRS 作为分离螺母冲击响应的基本表示方法^[20]。

测试工况为:12000 N 预紧力,分离螺母单点发火。装药条件:羧甲基纤维素斯蒂芬酸钡(40 mg)+炭黑/硝酸钾(60 mg)。发火电流:5 A(DC)。

3 结果与讨论

3.1 金属橡胶隔振器的冲击抑制机理

火工冲击伴随着结构预紧所产生的应变能释放,或者受火工药剂驱动的运动零件在结构中的撞击^[21]。该定义实际上已经表明了航天器火工装置动作时产生的冲击响应是由以下三种类型的冲击源构成:①火工药剂作用引起冲击波和应力波在刚体结构中的传播;②火工装置内运动部件以一定速度撞击刚性结构表面,形成应力波和结构谐振响应;③火工装置上的预紧力突然卸载产生的应变能突然释放,形成应力波传播和结构谐振响应^[22]。因此,要有效降低火工分离装置的冲击响应,首先应进行冲击源特性的研究。在这三组冲击源中,为保证连接刚度及装配要求,一般不允许降低预紧力值,因此针对预应变能激起的冲击响应不可避免,这就导致通过控制预紧力释放进行冲击抑制的技术手段受到很大的限制。而药剂作用和撞击激起的冲击响应可以通过结构设计和缓冲设计在一定程度上削弱^[23]。由于本结构采用的主装药炭黑/硝酸钾属于较低燃速的火药^[24-25],且装药量较少,相当于火工药剂作用激起的冲击响应已经处于较低水平。另外,对于不同结构的分离螺母,撞击激起的冲击响应能量要占到总冲击响应的 30%~50%^[26]。因此本研究通过在分离螺母内部的活塞撞击位置加装具有空间网状结构的金属橡胶隔振器进行缓冲,抑制部件刚性撞击所激起的冲击响应。

金属橡胶是一种均质的弹性多孔材料,是用一定的工艺方法,将一定质量的、拉伸开的、螺旋状金属丝有序地排放在冲压(或碾压)模具中,然后用冷冲压方法成型的非线性阻尼材料^[27]。金属橡胶隔振器的制作工艺流程如图2所示。按照目前的工艺水平,要使金属橡胶隔振器的刚度特性精确达到预先设计参数很困难。在实际的设计和加工过程中,主要通过选用具有适当的弹性模量、强度、丝径的金属丝以及调整金属丝长度、相对密度(隔振器的密度除以金属丝材料密度所得的无量纲量,可反映隔振器的孔隙率)、螺旋角、螺旋卷直径、数量等工艺参数制成不同刚度的成品^[28]。

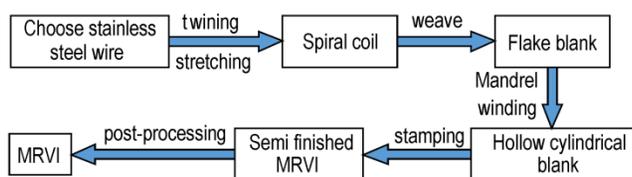


图2 金属橡胶隔振器制作工艺流程

Fig.2 Production process of the metal rubber vibration isolator (MRVI)

金属橡胶构件可以满足空间飞行器所经历的高温、低温、高压、高真空、高冲击、耐腐蚀等环境,可以做成复杂形状满足安装需要,长期贮存无老化的可能。金属橡胶材料属于干摩擦阻尼非线性弹簧,构件内的弹簧卷的分布形式以嵌合、滑动两种形式接触。嵌合接触改变材料的刚度,产生弹性力;而滑动接触能产生内摩擦力^[29]。在受到外界激励时,金属丝相互之间发生挤压滑移,消耗部分能量,同时还有一部分能量转换成势能储存起来再缓慢释放,释放过程则体现为随后的隔振系统(由隔离器和被隔离设备组成的含适宜的阻尼弹簧质量系统)的自由振动,由此起到冲击抑制作用^[30-31]。

3.2 金属橡胶隔振器的能量消耗

从理论上来说,刚度越大的隔振器在单位变形量时消耗的能量越多。但是,如果载荷一定时,刚度过大会导致变形量偏小,能量消耗有限不利于隔振;而刚度过小时隔振器容易超过变形极限导致隔振器破坏失去弹性甚至挤压成刚体而无法缓冲。为保证隔振器不影响可靠解锁,设计时使活塞与螺母瓣脱离后仍有1.5 mm行程才能接触到隔振器。隔振器使用 $\varphi 0.2$ mm,牌号为06Cr19Ni10的奥氏体不锈钢丝加工。加工的金属橡胶隔振器及其在分离螺母上的安装位置如图3所示。

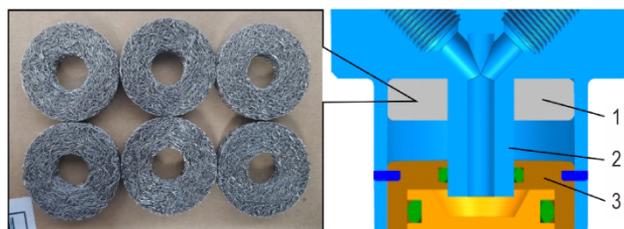


图3 金属橡胶隔振器及其安装位置

1—金属橡胶隔振,2—壳体,3—活塞

Fig.3 Schematic diagram of the installation location of the MRVI

1—MRVI, 2—case, 3—piston

金属橡胶的刚度是非线性刚度,可通过加载-卸载曲线来计算^[32]:

$$K(X_i) = \frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i} \quad (1)$$

式中, X_i, X_{i+1} 是金属橡胶的第*i*点和*i+1*点处的压缩量,mm; P 为金属橡胶回弹力,kN。

金属橡胶隔振器的单位体积耗散能量是指内部的干摩擦所耗散的能量与体积的比值,而干摩擦的耗散的能量就是隔振器的滞回曲线围成的面积。由这个定义可得单位体积耗散能量为:

$$E = \frac{\Delta W}{V} \quad (2)$$

式中, E 为单位体积耗散能量, $J \cdot cm^{-3}$; V 为金属橡胶隔振器体积, cm^3 ; ΔW 为金属橡胶网块发生压缩时金属丝之间的干摩擦耗散的能量, J 。

金属橡胶隔振器减振性能是指当受到外界载荷时,能够最大程度对集中在减振元件上的能量进行耗散的能力。那么能量耗散的系数就成为衡量减振性能好坏的一个重要的指标。能量耗散系数的计算公式为^[32]:

$$\omega = \frac{\Delta W}{W} \quad (3)$$

式中, W 为金属橡胶网块的弹性势能, J 。

金属橡胶材料的一个重要特性就是加载和卸载的起点和终点相同但中间路径不同。表现在刚度曲线上就是加载曲线和卸载曲线形成一个月牙形的闭环。金属橡胶材料的这种加载曲线和卸载曲线首尾相接,能量不同的特性被称为迟滞特性,这个迟滞环所包含的面积即为一个加载-卸载行程中消耗的能量。为验证不同隔振器刚度对冲击响应的影响,设计了三种不同刚度的隔振器安装在分离螺母内并进行冲击响应测试。本次试验所设计的三种刚度的隔振器的加载和卸载曲线如图4所示。

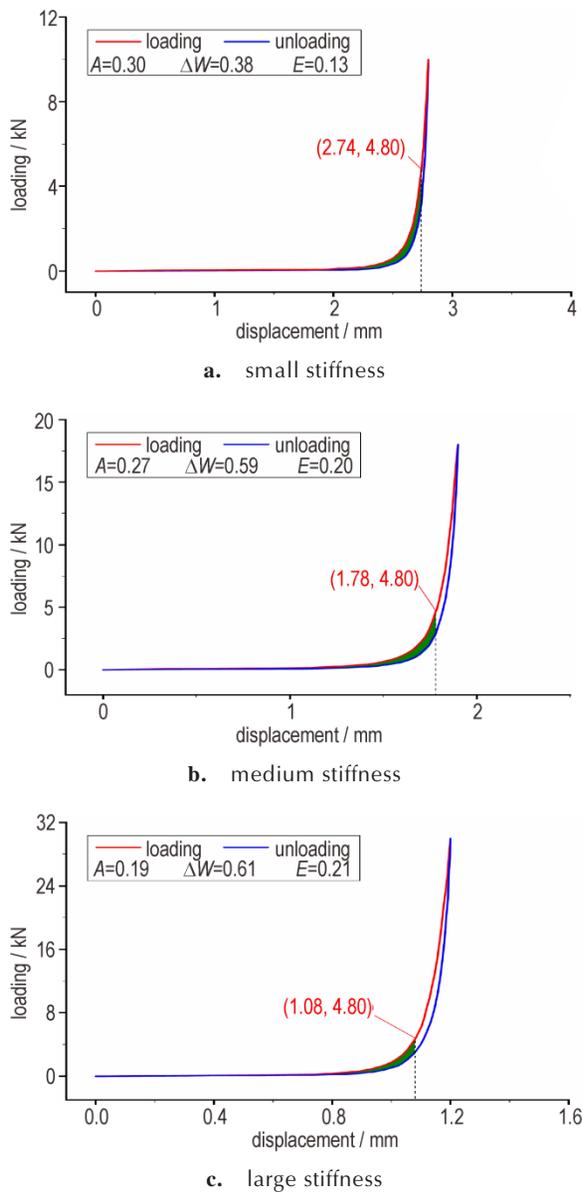


图4 三种隔振器的加载-卸载曲线
Fig.4 Loading-unloading curves of the MRVI

由于分离螺母作用时实测的燃烧室的峰值压力为 8.3~9 MPa,因此在不计摩擦损耗且峰值压力取最大值的条件下计算活塞对隔振器的正向载荷约为 4.8 kN。将加载曲线下的积分面积减去卸载曲线下的积分面积可得出一个行程内所耗散的能量 A(图 4 中绿色区域面积)。结果表明隔振器刚度越大时受活塞撞击后耗散的能量反而越小。可以预测小刚度隔振器对冲击抑制效果最好。该分析实际上没有考虑活塞速度衰减的影响,由图 4 可以看出小刚度隔振器受到同样活塞的作用力后,其轴向压缩量为 2.74 mm,中刚度隔振器的轴向压缩量为 1.78 mm,大刚度隔振器的轴向压缩量

为 1.08 mm。由于小刚度隔振器的压缩量最大,因此活塞从接触到隔振器到速度衰减为 0 的时间最长,因此对于隔振器的激振力最小,大刚度隔振器则与之相反。显然,压缩量越大,活塞的能量释放时间越长,越有利于缓冲。

3.3 金属橡胶隔振器对冲击响应的影响

将不同刚度的隔振器安装于分离螺母测试分离时的 a-t 曲线,经滤波分析后得到的三种金属橡胶隔振器的冲击响应谱(SRS)如图 5 所示。三种隔振器的性能参数及降冲击效果如表 1 所示。

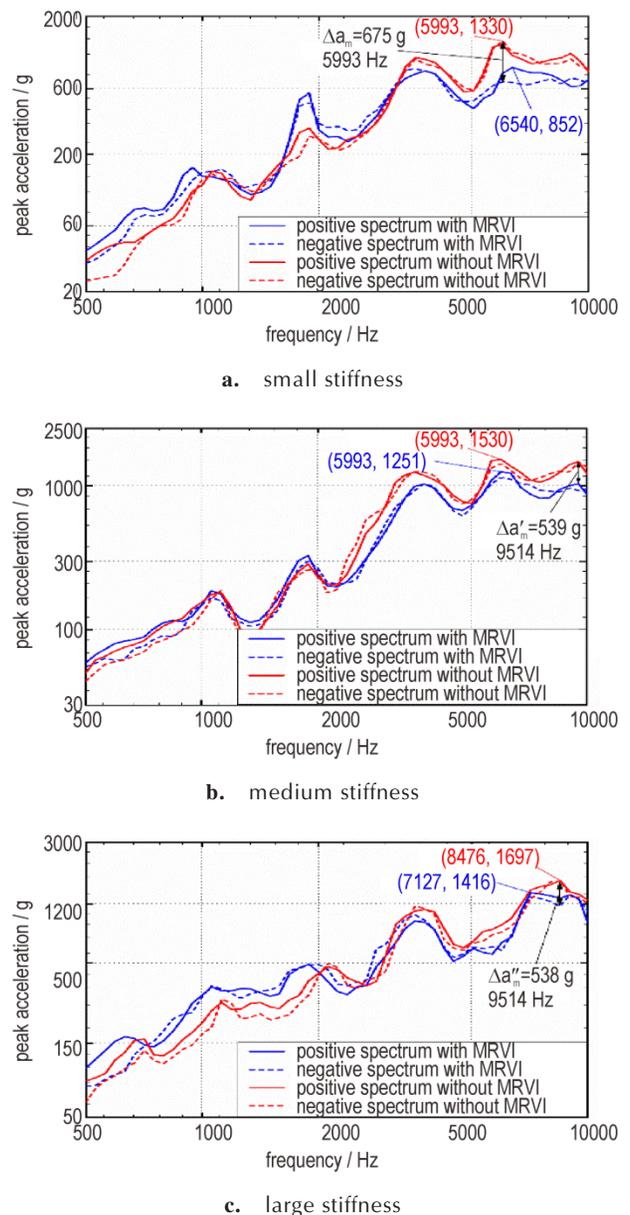


图5 安装金属橡胶隔振器前后的 SRS
Fig.5 The shock response spectrum (SRS) before and after installation of the MRVI

表1 三种隔振器的性能参数及降冲击效果

Table 1 Property parameters and pyroshock reduction effects of three types of MRVI

stiffness	relative density	maximum load / kN	maximum compression / mm	actual compression / mm	maximum response acceleration / g		decrease / %	energy utilization / %
					without MRVI	with MRVI		
small	0.19	10	2.8	2.74	1330	852	36.0	79
medium	0.32	18	1.9	1.78	1530	1251	18.2	46
large	0.44	30	1.2	1.08	1697	1416	16.6	31

本次试验中未加隔振器时的冲击响应有一定差异,这是由于通过节流孔控制的输出到活塞内腔的燃气流量不同造成的。电爆管输出相同时,节流孔越小,燃气流量越小,活塞内腔升压速率最慢,活塞运动速度最低。因此在未装隔振器时,活塞运动速度最快的冲击响应也最大。按照设计,三种刚度隔振器分别对应于三种触网速度的活塞(大刚度对应触网速度最快的活塞,以此类推),最终达到接近的冲击抑制效果。但实际试验结果表明,加装小刚度隔振器后的最大加速度下降了478 g,在5993 Hz频率上有最大降幅 $\Delta a_m = 675$ g。分离螺母加装中刚度隔振器后的最大加速度下降了279 g,在9514 Hz频率上有最大降幅 $\Delta a'_m = 539$ g。分离螺母加装大刚度隔振器后的最大加速度下降了281 g,在8476 Hz频率上有最大降幅 $\Delta a''_m = 538$ g。对比三种刚度隔振器的冲击抑制效果,显然小刚度隔振器在整个频域上的冲击抑制效果最佳,这与隔振器加载-卸载曲线的分析结果一致。从隔振器设计的角度来说,隔振器受到活塞撞击后的变形量恰好达到最大变形量时缓冲效果最好(积分面积差最大)。因此,本研究中的小刚度隔振器的能量利用率达到79%,其刚度设计相对最合理,另外两种刚度设计偏大,能量利用率较低。

此外,由图5的SRS可以看出,金属橡胶隔振器的冲击抑制效应主要发生在3000 Hz以上的频段上,在5000 Hz以上的频段上的冲击抑制效果最为显著,但加装金属橡胶隔振器后低频响应反而有所放大。这是由于增加金属橡胶隔振器后,将原本的高速刚性撞击产生的尖峰短脉冲高频响应通过吸能缓释作用转变为更低频的长脉冲释放,抑制了分离螺母壳体的刚性激振作用。另外,冲击载荷的低频分量相对接近隔振器的固有频率,激起该频段的某些谐波分量共振而导致冲击响应被放大^[33]。因此对于低频响应敏感的场所要慎用金属橡胶隔振器进行缓冲。

隔振器的冲击抑制效果实际上也受到火药燃气压力、释放速率等因素的影响。综合来看,增加隔振器后

均实现了较好的冲击抑制效果,尤其是在中频、高频上具有明显的冲击抑制效果。由于金属橡胶隔振器可以设计成各种较为复杂的形状,因此对于火工作动装置的降冲击设计也提供了一种可行的方法。

4 结论

通过设计三种不同刚度的金属橡胶隔振器测试分离螺母的冲击响应,分析500~10000 Hz频域内的冲击响应谱,结果表明:

(1)金属橡胶隔振器的冲击抑制效应主要发生在3000 Hz以上的频段上,在5000 Hz以上的频段上的冲击抑制效果最为显著。但是金属橡胶隔振器对低频上的响应有所放大,在低频响应敏感的场所要慎用金属橡胶隔振器进行缓冲。

(2)加装小刚度隔振器后的最大加速度响应值从1330 g下降至852 g。在分析频域内的最大降幅为675 g@5993 Hz。

(3)加装中刚度隔振器后的最大加速度响应值从1530 g下降至1251 g。在分析频域内的最大降幅为539 g@9514 Hz。

(4)加装大刚度隔振器后的最大加速度响应值从1697 g下降至1416 g。在分析频域内的最大降幅为538 g@8476 Hz。

综合来看,使用金属橡胶隔振器实现了较好的冲击抑制效果,对于火工作动装置的降冲击设计提供了一种可行的方法。

参考文献:

- [1] 刘竹生,王小军,朱学昌,等.航天火工装置[M].北京:中国宇航出版社,2012:46-49.
LIU Zhu-sheng, WANG Xiao-jun, ZHU Xue-chang, et al. Aerospace pyrotechnic devices [M]. Beijing: China Astronautic Publishing Co., Ltd., 2012: 46-49.
- [2] 焦亮,邓明.爆炸分离冲击试验分析[J].电子产品可靠性与环境试验,2013,31(1):31-34.
JIAO Liang, DENG Ming. The pyroshock test [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2013, 31(1):

- 31-34.
- [3] Filippi E. Pyroshock simulation using the alcateletca test facility [C]//Launch Vehicle Vibrations. First European Conference. Toulouse: CNES, 1999.
- [4] 张建华. 航天产品的爆炸冲击环境技术综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2005, (3): 30-36.
ZHANG Jian-hua. Pyroshock environment of missiles and launch vehicles[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2005, (3): 30-36.
- [5] 苏哈. 典型分离螺母降冲击设计方法和性能分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
SU Han. Research on the design method of shock reduction and performance analysis for a typical separation nut [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [6] Alexander Luna. Operational improvements of a pyrotechnic ultra low shock separation nut [R]. NASA Glenn Research Center, Proceedings of the 36th Aerospace Mechanisms Symposium, 2002: 131-136.
- [7] Peffer A. Development and transition of low-shock spacecraft release devices for small satellites [C]//14th Annual/USU Conference on Small Satellites, 2001: 277-284.
- [8] Fernández J P. MSL pyroshock development test program for shock mitigation [C]//Spacecraft and Launch Vehicle Dynamic Environments Workshop, 2007.
- [9] Han J H, Youn S H, Jeong H K, et al. Enhanced shock and vibration isolator for the attenuation of low-frequency vibration and high-frequency pyroshock loads [C]//2012, Third International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering.
- [10] 李宇明, 彭威, 白鸿柏, 等. 炮用金属橡胶与橡胶缓冲件的性能对比分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2002, (4): 16-18.
LI Yu-ming, PENG Wei, BAI Hong-bai, et al. Performance comparative analysis of amortisseur of metal-rubber with rubber ones[J]. *Gun Launch & Control Journal*, 2002, (4): 16-18.
- [11] 杜金明, 耿峰. 金属橡胶材料在导弹武器系统中的应用研究[J]. 飞航导弹, 2004 (8): 56-59.
DU Jin-ming, GENG Feng. Application research of metal rubber material in missile weapon system [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2004 (8): 56-59.
- [12] 苏卫民. 发动机涡轮泵转子新型阻尼挠性支承的性能[J]. 推进技术, 2000, 21(5): 53-57.
SU Wei-min. Characteristic of a new damped flexible support in turbopump rotor for engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(5): 53-57.
- [13] 白鸿柏, 路纯红, 曹凤利, 等. 金属橡胶材料及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 10-13.
BAI Hong-bai, LU Chun-hong, CAO Feng-li, et al. Metal rubber materials and engineering applications [M]. Beijing: Science Press, 2014: 10-13.
- [14] 苏渤. 某航天装备冲击响应谱隔离设计[J]. 机械工程师, 2020, (6): 145-149.
SU Bo. Solution Design of Shock Response Spectrum for an Aerospace Equipment[J]. *Mechanical Engineer*, 2020, (6): 145-149.
- [15] Kozmic J, Lee H S. Shock measurement of a pyrotechnic separation nut [C]//51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. AIAA 2015-3707.
- [16] Peffer A. Development and transition of low-shock spacecraft release devices for small satellites [C]//14th Annual/USU Conference on Small Satellites, 2001: 277-284.
- [17] John Eriksson. Measuring and analysis of pyrotechnic shock [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 1999.
- [18] 中国人民解放军总装备部. GJB150.27-2009: 军用装备实验室环境试验方法 第27部分: 爆炸分离冲击实验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Armament Department of PLA. GJB150.27-2009: Laboratory environmental test methods for military materiel-Part 27: Pyroshock test[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [19] Department of Defense. MIL-STD-810G: Environment engineering considerations and laboratory tests [S]. Washington DC: Department of Defense, 2006.
- [20] National Aeronautics and Space Administration. Dynamic environmental criteria: NASA-HDBK-7005 [S]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2001.
- [21] National Aeronautics and Space Administration. NASA-STD-7003A: Pyroshock test criteria [S]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2011.
- [22] Lucy M, Hardy R, Kist E, et al. Report on alternative devices to pyrotechnics on spacecraft [C]//10th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites.in Proc. 1996: 1-19.
- [23] 王军评, 毛勇建, 黄含军. 点式火工分离装置冲击载荷作用机制的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(2): 9-13.
WANG Jun-ping, MAO Yong-jian, HUANG Han-jun. Numerical simulation for impulsively loading mechanism of a point pyrotechnic separation device [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(2): 9-13.
- [24] 杨斌, 盛涤伦, 陈利魁, 等. 爆破阀用炭黑/硝酸钾推进剂性能[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 397-340.
YANG Bin, SHENG Di-lun, CHEN Li-kui, et al. Performance of carbon black/potassium nitrate propellant for blasting valve[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3): 397-340.
- [25] 赵象润, 严楠, 李朝振, 等. 烟火药在定容条件下的爆燃 p-t 曲线仿真[J]. 含能材料, 2020, 28 (6): 533-538.
ZHAO Xiang-run, YAN Nan, LI Chao-zhen, et al. Simulation on p-t curves of deflagration of pyrotechnical compositions under constant volume [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2020, 28 (6): 533-538.
- [26] Alexander Luna. Operational improvements of a pyrotechnic ultra low shock separation nut [C]//Proceedings of the 36th Aerospace Mechanisms Symposium, Glenn Research Center, May 15-17, 2002. 131-136.
- [27] 李玉龙, 白鸿柏, 何忠波, 等. 金属橡胶非线性隔振器试验研究与参数分析[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(2): 194-200.
LI Yu-long, BAI Hong-bai, HE Zhong-bo, et al. Experimental study and parameter analysis of nonlinear metal-rubber isolators [J]. *Noise and Vibration Control*, 2015, 35 (2) : 194-200.
- [28] 贺未明. 金属橡胶减振器网块成型工艺及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
HE Wei-ming. The technology forming and properties for the metal rubber damper [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [29] 姜洪源, 夏宇宏, 敖宏瑞, 等. 金属橡胶构件的性能分析与实验

- 研究[J], 中国机械工程, 2001, 12(11): 1294-1297.
- JIANG Hongy-uan XIA Yu-hong, AO Hong-rui, et al. Experimental research on characteristics of metal rubber element[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(11): 1294-1297.
- [30] 黄协清, 张铁山, 张俊华. 金属橡胶材料隔振特性研究[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(6): 977-980.
- HUANG Xie-qing, ZHANG Tie-hua, ZHANG Jun-hua. Research on vibration isolation characteristics of metal rubber material[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2000, 19(6): 977-980.
- [31] 李中鄂, 卢正人. 航天器用新型金属橡胶隔振器[J]. 上海航天, 2005, 21(5):58-61.
- LI Zhong-ying, LU Zheng-ren. New all-metal damper for spacecraft[J]. *Aerospace Shanghai*, 2005, 21(5):58-61.
- [32] 余文韬. 金属橡胶减振器网块制备工艺及性能试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- SHE Wen-tao. Research on preparation process and performance test of metal rubber damper mesh block [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [33] 李燕华. 典型点式火工分离装置冲击预示与控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
- LI Yan-hua. Shock prediction and control of typical point pyrotechnical separation devices[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019.

Influence of Metal Rubber Vibration Isolator on Pyroshock Response of Pyrotechnic Separation Nuts

ZHAO Xiang-run^{1,2}, YAN Nan¹, GUO Chong-xing², DAI Wu-si², HUANG Jin-hong², FU Shao-bin²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Pyrotechnics Technology, Liaoning North Huafeng Special Chemical Co., Ltd., Fushun 113003, China)

Abstract: In order to prevent the spacecraft from being damaged by the high pyroshock during the action of the pyrotechnic separation nuts, a metal rubber vibration isolator(MRVI) was used to suppress the pyroshock response caused by the impact of the piston in the separation nut. Three kinds of MRVIs with different stiffness were installed at the end of the piston movement in the separating nut, and the shock response spectrum(SRS) in the frequency domain of 500 Hz to 10000 Hz was analyzed. The results show that the pyroshock suppression effect of the MRVI mainly occurs in the frequency band above 3000 Hz, and the pyroshock suppression effect in the frequency band above 5000 Hz is the most significant. The maximum acceleration response after installing a small-stiffness MRVI is reduced from 1330 g to 852 g, and the maximum reduction in analysis frequency domain is 675 g@5993 Hz. The maximum acceleration response after installing a medium-stiffness MRVI is reduced from 1530 g to 1251 g, and the maximum reduction in analysis frequency domain is 539 g@9514 Hz. The maximum acceleration response after installing a large-stiffness MRVI is reduced from 1697 g to 1416 g, and the maximum reduction in analysis frequency domain is 538 g@8476 Hz. The use of MRVI achieves a better pyroshock suppression effect, and provides a viable method for the pyroshock reduction design of the pyrotechnical actuation devices.

Key words: separation nut; pyroshock suppression; metal rubber vibration isolator (MRVI); shock response spectrum (SRS)

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020141

(责编:姜梅)