

液体火箭发动机阻尼机架减振特性研究

李斌潮, 邓长华, 周云端, 李 锋
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 对具有橡胶——惯性结构的火箭发动机机架简化模型中动态载荷传播特性进行了研究。机架内动态载荷在依次通过橡胶——惯性结构粘贴位置时, 携带的部分动能传递到橡胶材料内, 导致机架内应力幅值显著低于能量交换前的应力。通过分析橡胶材料内外表面的速度, 发现速度差引起了橡胶阻尼材料沿轴向发生剪切加载和卸载过程, 并导致机架传递到橡胶材料的动态能量发生剪切变形的过程中被耗散吸收; 此外, 机架内动态载荷大小与机架内质点速度的变化量有关, 机架内质点动能减小及运动速度降低是引起机架动态载荷幅值降低的根本原因。

关键词: 能量吸收; 阻尼机架; 动态载荷; 橡胶

中图分类号: V414.3*3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 02-0046-06

Study on vibration attenuation of damping frame for liquid rocket engine

LI Bin-chao, DENG Chang-hua, ZHOU Yun-duan, LI Feng
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Dynamic loading transmitting characteristics in simplified frame model with rubber-inertia structure used in liquid rocket engine was studied in this paper. When the dynamic loading transmits across the place pasting the rubber-inertia structure, a part of kinetic energy of the loading in the frame was transferred into the rubber. As a result, the dynamic nominal stress in the frame was sharply reduced. It was found that loading and unloading processes in the rubber material were induced in turn by the velocity differences between the outer and inner surfaces, during which the dynamic energy absorbed by the rubber was quickly dissipated. In essence, the dynamic loads depending on the changes of the particle velocity in the frame are reduced by the kinetic energy decrease of the frame particle.

Keywords: energy absorption; damping frame; dynamic loading; rubber

收稿日期: 2013-01-11; 修回日期: 2013-02-27

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2009JY08)

作者简介: 李斌潮 (1984—), 男, 博士, 研究领域为火箭发动机强度试验研究

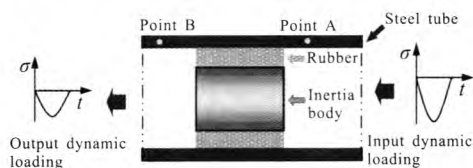
0 引言

火箭机架作为发动机与火箭箭体的连接结构, 承担着传递发动机推力的重要任务。目前, 服役中的承力机架均采用了等强度设计的思想, 既保证机架具有足够的刚度和强度, 又最大限度减轻机架质量。因此, 在机架设计中大量采用了钢质管材结构^[1-2]。然而, 机架在传递发动机推力的同时, 由于发动机点火及工作过程中产生的冲击、振动等动态载荷也通过机架传递到下一级箭体、卫星、飞船甚至宇航员, 极大地威胁了这些设备及人员安全, 从而使得这些设备在抗冲击及振动载荷的研发过程中投入巨大成本。若通过发动机与箭体的连接机构降低甚至隔绝振动和冲击等动态载荷同时又不影响发动机推力的传递, 对于减少安全隐患、提高发射成功率具有重要意义。即使动态载荷的能量吸收装置导致机架重量的少许增加, 但是振动、冲击等动态载荷水平的降低对于减轻下一级箭体、飞船等有效载体抗动态载荷的防护设施重量和降低研发成本均具有重要意义。因此, 探索具有能量吸收结构的机架中动态载荷的传递规律及能量耗散过程具有重要研究价值。

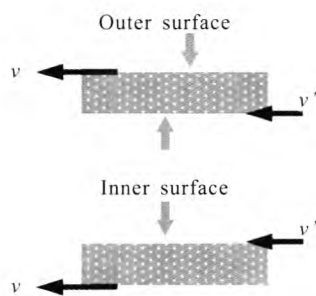
在动态载荷吸能方面, 单次使用的吸能材料主要是利用材料的塑性变形甚至断裂的特点以材料永久变形甚至损伤的形式将有害能量耗散掉, 比如: 用于缓冲方面的泡沫材料、蜂窝材料^[3-5]以及碰撞和侵彻方面的穿甲钢、陶瓷、混凝土材料等^[6-8]; 可持续重复性利用的吸能材料主要是利用材料的粘性及阻尼特性将输入载荷的能量以粘性能的形式耗散掉, 比如: 由于橡胶材料的 Mullins 效应^[9], 许多工业领域利用了橡胶材料的能量耗散特性制造出多种多样的工业耗能元件、减振传动件等^[10-12]。本文利用动态载荷在机架中通过应力波传递动态能量这一特点, 将具有阻尼特性的橡胶材料填充到机架内, 并经过合理地设计, 既保证机架能够传递推力, 又达到耗散动态能量、衰减动态载荷幅值的目的。

由于 Mullins 效应^[9,13-15], 橡胶材料的加、卸

载力——变形曲线具有滞回的响应行为, 橡胶材料受到连续加、卸载力作用时, 表现出卸载应力减弱, 加卸载路径不同, 即: 与卸载相比, 外界输入橡胶材料时需要更大的能量, 而该材料恢复到初始状态需要的弹性能量则较小, 这一部分能量差被以粘性能的形式耗散掉, 而且频率越高, 粘性阻尼表现越明显^[9], 是一种常用的阻尼形式, 且阻尼结构灵活简便, 可以适应不同形状的结构, 尤其适于航天器定型后的减振处理。在动态载荷输入的过程中, 为了使机架钢管中填充的橡胶材料产生类似的加、卸载过程, 本文研究的结构如图 1 (a)所示: 圆柱形空芯钢管内粘接一定厚度的圆柱形空芯橡胶, 并在橡胶内壁填充具有一定质量的惯性体。发动机工作过程中产生的动态载荷在机架中以应力波的形式向箭体传播, 当通过填充橡胶的机架时, 应力波引起的机架内质点的运动将部分动能传递到橡胶材料内, 带动与其粘接在一起的橡胶材料产生轴向运动, 橡胶进而影响惯性体的运动状态。本文研究在橡胶材料与惯性体轴向不同步的运动过程中 (如图 1 (b)所示), 橡胶材料如何与惯性体相互作用耗散外界输入能量, 并讨论影响机架内动态载荷大小的关键因素和载荷衰减的机理。



(a) 橡胶——惯性结构衰减管道内动态载荷示意图



(b) 空芯圆柱形橡胶受外表面动载荷与惯性体共同作用时的质点运动示意图

图 1 动态载荷传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic loads transmission

1 动态载荷分析

火箭发动机工作过程中产生的冲击与振动载荷在机架和箭体其他部位的传递其实是复杂的、持续的应力波, 由于许多机架采用了桁架结构设计, 受力方向一般沿管件轴向, 在机架内, 应力波传播形式相对简单, 动态载荷在杆件内可近似描述为一维应力波。为了分析机架中应力波的传播规律和影响载荷幅值大小的关键因素, 这里采用经典一维冲击波理论^[10], 如图 2 所示, 管壁中描述波阵面前后状态变化规律的物理参数——应力、应变、质点速度及应变能密度为: 波前状态 (AB 截面): $\sigma^-, \varepsilon^-, v^-, E^-$; 波后状态 (A'B' 截面): $\sigma^+, \varepsilon^+, v^+, E^+$ 。

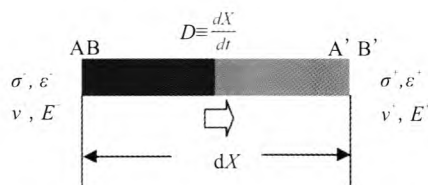


图 2 管壁中冲击波波阵面前后各参数的变化示意图
Fig. 2 Schematic diagram of parameters before and after wave front of impact wave

如图 2 所示, 认为连续介质在变形过程中质点的位移 u 具有连续性, X 表示物质坐标, $[\cdot]$ 表示任意变量 \cdot 的增量, 记波速 $D \equiv dX/dt$, 质点运动速度 $v = du/dt$, 则质点速度变化量与材料变形之间的关系可表示为:

$$[v] = -D \left[\frac{\partial u}{\partial X} \right] \quad (1)$$

冲击波的波阵面在 t 时刻位于 AB 位置 (如图 2 所示), 经过时间 dt 后传播到 A'B' 位置, 传播的距离为 $dX = Ddt$ 。根据 AB-A'B' 之间质点的动量守恒条件经简化后为:

$$[\sigma] = -\rho_0 D [v] \quad (2)$$

式中: ρ_0 为材料密度。

根据冲击波波阵面上的能量守恒条件。考虑图 2 中 AB-A'B' 间在 dt 时刻的能量守恒, 则经简化后可表示为:

$$[E] = \frac{1}{2} (\sigma^+ + \sigma^-) [v] / D \quad (3)$$

2 有限元分析

2.1 有限元模型

采用商业有限元计算软件 Abaqus 研究具有橡胶—惯性结构的机架对动态冲击载荷的衰减特性, 有限元计算模型见图 3, 冲击载荷通过与机架内外径一致的环形钢质冲击锤在机架的端面进行撞击产生, 该动态载荷沿着机架轴向以声速向另一端传播, 通过计算橡胶—惯性结构两端机架内沿轴向正应力的大小分析该结构对冲击载荷幅值衰减特性的影响, 为了减小撞击端面对载荷分布均匀性的影响, 根据圣文南原理, 将橡胶—惯性结构设置在远离冲击端面的中部位置 (A, B 点各自到端面的最近距离为机架内径 4.8 倍), 使机架轴向正应力在环面内分布尽可能均匀。

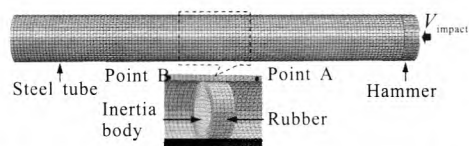


图 3 动态冲击载荷作用下机架内橡胶—惯性结构的冲击有限元模型

Fig. 3 Finite element model of rocket frame with rubber-inertia structure subjected to impact loading

由于橡胶材料表现出很强的非线性特性^[15], 如: 超弹特性、阻尼特性、不可压缩或近似不可压缩特性。其经典的拉伸应力应变曲线具有明显的非线性, 在较大应变下不可能给出恒定值确定其杨氏模量, 不适用描述一般固体材料 Hooke 定律。在有限元计算中将橡胶材料的耗能特性通过比例阻尼模型表示, 这样结构的阻尼矩阵可以通过无阻尼振型解耦, 使动力学问题的分析变得相对简便。为了模拟橡胶材料的超弹特性行为, 选用基于 Mooney-Rivlin 理论的本构模型, 描述材料超弹特性应力应变关系的应变势能选用多项式形式, 橡胶材料选用的参数为: $C_{10} = 0.1699 \text{ MPa}$, $C_{01} = 0.3629 \text{ MPa}$, $C_{11} = 0.06863 \text{ MPa}$, $C_{02} =$

-0.049 18 MPa (与体积变形无关)。

仿真过程中所有单元均选用 C3D8R 单元,机架划分为 550 0 个六面体单元,橡胶划分为 105 6 个六面体单元,惯性体划分为 840 个六面体单元,冲击锤划分为 320 个六面体单元,采用显式计算方法;机架受冲击端面自由,另一端固支;冲击锤只允许沿轴向具有初速度为 V_{impact} 的自由运动;橡胶和惯性体在各自接触面的自由度被约束;机架、冲击锤及惯性体均采用 304 不锈钢。

2.2 有限元结果分析

通过有限元方法模拟冲击锤在钢性管一端产生动态冲击载荷并在机架内传播,对该载荷通过橡胶—惯性结构后载荷幅值的变换、系统输入能量的转换规律以及橡胶对动态输入能量的耗散等进行了计算。结果表明,动态冲击载荷通过橡胶—惯性结构后载荷幅值发生了显著变化,由图 4 计算结果可知,碰撞产生的第一列动态冲击载荷在依次通过 A, B 环面的过程中,冲击波携带的部分能量传递到橡胶材料内,导致 B 面上的名义应力幅值明显低于能量交换前 A 面上的应力且持续时间基本保持不变,这表明通过在机架内填充橡胶—惯性结构,使机架对外界输入冲量的传递得到了衰减。如果在机架的另一端亦连接相同材料的结构,则衰减后的剩余冲量将无损失地传递到该结构上,而在本文计算中由于在机架的一端采用了固支边界条件,另一端采用了自由边界条件,当动态冲击载荷传播到固支端时,载荷沿相反方向传播,形式不变(如图 4 所示)。在依次通过 B, A 截面后,同样由于橡胶—惯性结构对冲击载荷携带能量的吸收,载荷幅值进一步降低。

为了满足自由端面处内正应力始终为零的条件,当载荷传播到达初始碰撞的自由面并再次向固支端传播时,便形成了一系列作用方向相反的载荷(即由压缩载荷变为拉伸载荷)。由此可知,一端固支、一端自由管受到轴向动态冲击载荷作用后,在其内部载荷总是压缩与拉伸载荷具有双峰值特征的交替出现,可以预测交替时间为:

$$T_1 = 2H_1/D_s \quad (4)$$

式中: H_1 为机架长度; D_s 为机架声速。如图 4 所示,在经过橡胶—惯性结构后峰值均有所衰减,且随着载荷在管内反射次数的增加,衰减程度逐渐减弱。

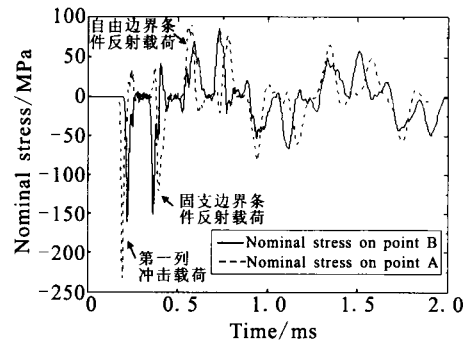


图 4 动态载荷通过橡胶—惯性结构前后 A, B 环面名义应力时域变化规律

Fig. 4 Change rule of dynamic nominal stress in time domain between cross-section A and B

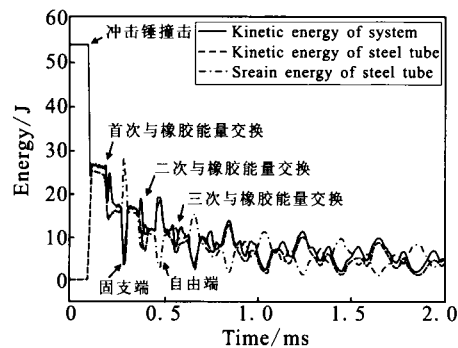


图 5 系统各部分能量时域变化规律

Fig. 5 Energy time domain change in each part of system

通过计算具有橡胶—惯性结构的机架各部分能量的变化规律,可以更好地理解该结构对动态能量的传递过程。如图 5 所示,当机架受到动态冲击载荷后,冲击锤的冲击动能首先转化为机架的应变能和质点运动的动能,这两种能量以冲击波形式在机架内传递到橡胶—惯性结构位置时,机架中该处质点的运动带动与其粘接在一起的橡胶材料外表面运动发生轴向运动,由于惯性体的存在内表面将发生与外表面不同步的轴向运动(如图 1 (b) 所示),此时,机架与橡胶材料发

生首次能量交换；随后冲击波继续沿机架轴向传播到固支端并发生反射，由于固支端面质点运动位移被约束，入射波与反射波相互叠加，在端面处质点运动速度减弱，变形量增加，在该区域动能转化为变形能（见图 5），入射波与反射波分离后，动能与变形能恢复叠加前状态，继续沿轴向传播，当再次到达橡胶——惯性结构位置时，机架与橡胶材料发生二次能量交换，随后冲击波继续沿机架轴向传播到自由端并发生反射，由于自由端面处不发生轴向变形，入射波与反射波的相互叠加导致该区域的变形能转化为质点运动的动能（见图 5），当入射波与反射波分离后，动能与变形能恢复叠加前状态，继续沿轴向传播，到达橡胶——惯性结构位置时，机架与橡胶材料发生 3 次能量交换，如此不断循环交替，使动态冲击能量逐步耗散。通过机架内能量变化过程可看出管内能量的相当比例（约占总能量 60%）通过两次能量交换得以耗散。实际火箭机架的安装状态是：一端与发动机相连，另一端与箭体相连，且与箭体的连接处通常采用与机架相同材料或阻抗接近的材料，如此，机架中的动态载荷将近似无反射地将全部冲击能量传递到与其连接的箭体上，因此能量交换将不涉及图 5 中二次及后续耗能过程，图 5 表明：若在管内设置类似的 2 个橡胶——惯性结构亦可达到较好的耗能效果。

3 载荷衰减机理分析

为了解释在冲击开始阶段机架中应力波的传播特性，根据冲击波理论：材料变形的位移连续性条件和作用力与反作用力相等，即：相互碰撞的两个物体碰撞面处位移及相互接触力应相等。由于机架材料与冲击锤的波阻抗 $\rho_s D_s$ 相等，根据碰撞物体在碰撞过程中冲击力大小相等以及碰撞物体质点运动的连续性条件，并结合式 (1) 和式 (2)，物体在碰撞过程中产生的弹性应力大小及质点运动速度的精确解表示如下：

$$\sigma^{(1)} = \frac{(\rho_s D_s) V_{\text{initial}}}{2}, V^{(1)} = \frac{V_{\text{initial}}}{2} \quad (5)$$

应力及速度符号上标“(1)”表示经过碰撞在

机架中形成的第 1 次弹性应力波，持续时间 T_d 表示为：

$$T_d = 2H_i/D_s \quad (6)$$

式中： H_i 为冲击锤沿轴向厚度。注意：该精确解仅适用于弹性波特性的预测。根据式 (5) 和式 (6) 的预测结果：当初始冲击速度为 10 m/s 时，则第一列动态冲击载荷幅值为 205 MPa，持续时间为 0.015 4 ms，与图 4 的有限元分析结果一致。

由式 (1) 和式 (2) 可知：应力、变形的变化量随质点速度变化量线性变化，因此当机架与橡胶材料发生能量交换，质点动能减小，质点运动速度降低进而导致材料变形和应力幅值降低。

若传递到橡胶材料的这部分能量不被耗散掉，必然会通过弹性能释放重新返回机架中，因此需要使橡胶材料不同部位之间产生相对运动，通过其粘性阻尼将动态能量耗散掉。通过在橡胶内表面设置惯性质量体以达到改变橡胶内表面与外表面运动的一致性（如图 1(b)所示）。图 6 表明：当动态冲击能量传播到橡胶粘结位置时，惯性体使橡胶材料内外表面质点运动速度发生改变，在冲击波的持续时间内：I 区橡胶材料外表面质点运动速度大于内表面质点运动速度，O 区橡胶材料外表面质点运动速度小于内表面质点运动速度，表明当机架质点与橡胶材料外表面质点一起运动时，因惯性体的存在内表面速度较小，橡胶材料沿轴向被拉伸；当机架与橡胶外表面质点运动速度减小时，由于惯性体的存在内表面速度衰减较慢，橡胶材料沿轴向卸载甚至压缩。

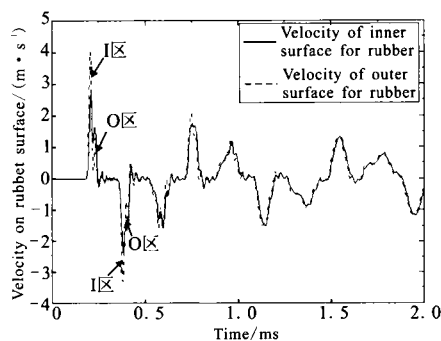


图 6 橡胶材料内外表面质点运动速度

Fig. 6 Particle velocity on outer and inner surfaces of rubber

图7给出了橡胶及惯性体在动态载荷传播过程中能量变化规律, 由结果可知: 惯性体的运动与橡胶材料粘性耗散能量的增加密切相关, 这表明: 橡胶材料内外表面的速度差导致沿轴向发生剪切加载和卸载过程, 由于粘性阻尼作用, 由机架传递到橡胶材料的动态能量发生剪切变形的过程中被耗散吸收, 且前两次吸收的能量占总外界冲击能量约60%。

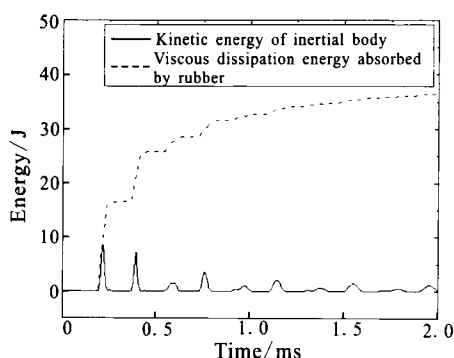


图7 橡胶——惯性结构在动态载荷传播过程中能量变化规律

Fig. 7 Energy dissipation by rubber-inertia structure during dynamic load transmission

4 结论

本文研究了具有橡胶——惯性结构(即约束阻尼层结构)的火箭发动机机架简化模型对动态载荷的衰减特性这一科学问题, 得到如下结论:

1) 动态冲击载荷在依次通过橡胶——惯性结构的过程中, 动态载荷携带的部分能量传递到橡胶材料内, 导致名义应力幅值明显低于能量交换前的应力, 而载荷持续时间基本保持不变, 这表明通过在机架内填充橡胶——惯性结构, 使机架对外界输入冲量的传递得到了衰减;

2) 橡胶材料内外表面的速度差导致了沿轴向发生的剪切加载和卸载过程, 由于粘性阻尼作用, 由机架传递到橡胶材料的动态能量在发生剪切变形的过程中被耗散吸收;

3) 机架内动态载荷幅值衰减的本质因素是: 动态载荷与质点速度的变化量线性相关, 当机架

与橡胶材料发生能量交换时, 机架质点动能减小, 质点运动速度降低引起材料变形和应力幅值降低。

由于火箭机架本身对重量的限制十分严格, 不可能在所有管内粘接橡胶——惯性结构, 只能在机架减振最有效的位置粘贴阻尼材料, 这就需要进行不同的机架结构减振吸能最佳的机架位置, 选用最小重量的阻尼材料对机架中动态载荷衰减的最佳效果。

参考文献:

- [1] 黄道琼, 张继桐, 何洪庆. 四机并联发动机低频动态特性分析[J]. 火箭推进, 2004, 30(4): 28-31.
- [2] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [3] 何思渊, 臧晓云, 何德坪. 轻质能量吸收器[J]. 中国科学B辑化学, 2005, 35(4): 265-267.
- [4] 李斌潮, 赵桂平, 卢天健. 高孔隙率闭孔泡沫铝的低应变率压缩行为[J]. 力学学报, 2010, 43(1): 122-135.
- [5] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 517-535.
- [6] THAM C Y. Numerical and empirical approach in predicting the penetration of a concrete target by an ogive-nosed projectile[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42(14/15): 1258-1268.
- [7] BOOKER P M, CARGILE J D, KISTLER B L, et al. Investigation on the response of segmented concrete targets to projectile impacts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(7): 926-939.
- [8] FORRESTAL M J, FREW D J, HICKERSON J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 479-497.
- [9] MULLINS L. Effect of stretching on the properties of rubber[J]. Journal of rubber research, 1947, 16: 275-289.
- [10] GRACIA L A, LIARTE E, PELEGAY J L, et al. Finite element simulation of the hysteretic behaviour of an industrial rubber. Application to design of rubber components[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2010, 46: 357-368.

(下转第58页)

- 2008, 29(4): 386–395.
- [5] 王玉峰, 郭斌, 吴宝元. 冲压发动机燃烧室压力脉动对进气道的影响分析[J]. 火箭推进, 2010, 36(3): 28–32.
- [6] 王玉峰, 杨宝娥. 超声速进气道喘振的机理研究[J]. 火箭推进, 2008, 34(1): 21–26.
- [7] 郭斌, 张元. 攻角动态变化对侧压式进气道起动特性影响的风洞试验 [J]. 航空动力学报, 2009, 24 (10): 2221–2227.
- [8] 石喜勤, 陈兵, 徐旭, 等. 冲压发动机进气道/燃烧室/尾喷管耦合流场计算[J]. 推进技术, 2008, 29(5): 557–561.
- [9] 白晓征, 刘君, 郭正, 等. 冲压发动机进气道压力振荡过程的数值研究[J]. 推进技术, 2008, 29(5): 562–565.
- [10] 刘占生, 张云峰, 田新. 冲压发动机超声速进气道流动自激振荡研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9): 1596–1602.
- [11] BAO Wen, YAO Zhaohui, CHANG Juntao. A simulation method based on SIMULINK for a supersonic inlet[C]// The 1st IEEE/IEE/AIAA International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics. Harbin, China: ISSCAA, 2006: 122–127.
- [12] 张明, 田宏伟, 梁彦. 冲压发动机在战术导弹上的应用[J]. 飞航导弹, 2005 (6): 50–63.
- [13] 刘晖, 袁书生, 李季颖, 关英勇. 液体冲压发动机特性分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(1): 150–152+156.
- [14] 刘华, 雍雪君, 梁俊龙, 等. 超声速进气道及冲压发动机动态特性分析[J]. 火箭推进, 2012, 38(3): 17–22.
- [15] 秦艳平, 李斌, 梁俊龙, 等. 面向控制的燃油调节器动态特性研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(5): 7–12.
- [16] 张玫, 张蒙正, 付秀文. 火箭/冲压组合发动机工作特性分析[J]. 火箭推进, 2010, 36(1): 33–37.
- [17] 梁俊龙, 吴宝元, 液体亚燃冲压发动机性能分析研究[J]. 火箭推进 2011, 37(3): 20–27.

(编辑: 马 杰)

(上接第 51 页)

- [11] 王利荣, 吕振华. 橡胶隔振器有限元建模技术及静态弹性特性分析[J]. 汽车工程, 2002, 24(6): 480–485.
- [12] 奚曹良, 彭亦军, 褚洪森, 等. 高弹性联轴器橡胶弹性元件轴向力仿真分析[J]. 噪声与振动控制, 2009 (6): 72–75.
- [13] KIM B K, YOUN S K. A viscoelastic constitutive model of rubber under small oscillatory load superimposed on large static deformation[J]. Archive of Applied Mechanics, 2001, 71: 748–763.
- [14] GUO Z, SLUYS L J. Constitutive modelling of hyperelastic rubber-like materials[J]. HERON, 2008, 53(3): 109–132.
- [15] SALA G. A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: part II –aluminium alloys rubber-forming[J]. Materials and Design, 2001, 22: 299–315.
- [16] 王礼立, 朱兆祥. 应力波基础[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(编辑: 张永秀)