

公路运输振动环境下发动机粘接界面 受载情况分析

徐伯起¹, 卢明章², 李高春¹, 李金飞¹, 王玉峰¹

(1.海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001;

2.中国人民解放军 91049 部队, 山东 青岛 266102)

摘要: **目的** 基于实测数据, 分析公路运输时发动机粘接界面处受振动载荷情况, 为振动试验提供依据。**方法** 采用加速度传感器记录公路运输下加速度数据, 对信号进行时域统计分析, 并完成载荷谱的构建, 通过有限元软件, 构建发动机简化模型, 进行发动机模态分析和振动过程模拟。**结果** 对消除趋势项后信号进行统计分析, 信号峰值大于 3 倍均方根值, 表明振动数据中包含数值急剧变化的部分, 信号峭度为 9.34, 属于超高斯分布, 采集信号中包含冲击信号。将简化后 PSD 作为输入进行模态分析, 结果表明, 后封头底端粘接界面位移较大, 通过选取的 4 个参考点上看, 位移和加速度均方根值突变的频率在 33 Hz 附近。模拟实际振动过程发现, 前封头及筒段处粘接界面所受应力较为均匀, 约为 25 kPa, 在封头和圆筒段相接处应力值较大, 特别是在后封头顶端, 存在应力集中, 应力值最大可达 130 kPa。从应力历程上可以看出, 药柱的松弛效应使得冲击过后应力幅值迅速变小。**结论** 通过实测数据与有限元软件结合, 完成了发动机粘接界面模态分析和实际振动过程模拟, 为后续振动试验提供了基础。

关键词: 振动载荷; 粘接界面; 载荷谱; 模态分析; 有限元

中图分类号: TJ760.89; TB533+2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)09-0020-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.09.004

Analysis of Loading Condition of Bonding Interface under Road Transportation Vibration Environment

XU Bo-qi¹, LU Ming-zhang², LI Gao-chun¹, LI Jin-fei¹, WANG Yu-feng¹

(1. Naval Aviation University, Yantai 246001, China; 2. No. 91049 Unit of PLA, Qingdao 266102, China)

ABSTRACT: To analyze the vibration load at the bonding interface of the engine during road transportation based on the measured data, and provide a basis for the vibration test. Acceleration sensors were used to record acceleration data under highway transportation, time-domain statistical analysis of the signals and the construction of load spectra were completed, simplified engine models were constructed through finite element software, and engine modal analysis and vibration process

收稿日期: 2021-06-29; 修订日期: 2021-07-26

Received: 2021-06-29; Revised: 2021-07-26

作者简介: 徐伯起 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体火箭发动机使用工程。

Biography: XU Bo-qi (1996—), Male, Master, Research focus: solid rocket engine use engineering.

通讯作者: 李高春 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为固体火箭发动机。

Corresponding author: LI Gao-chun (1978—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: solid rocket motor.

引文格式: 徐伯起, 卢明章, 李高春, 等. 船舶海水管路直流杂散电流仿真研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 020-026.

XU Bo-qi, LU Ming-zhang, LI Gao-chun, et al. Analysis of loading condition of bonding interface under road transportation vibration environment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 020-026.

simulation were performed. Statistical analysis of the signal after removing the trend item showed that the signal peak value was greater than 3 times the root mean square value, indicating that the vibration data contained a sharply changing part. The signal kurtosis was 9.34, which belonged to the super-Gaussian distribution. The collected signal contained shock signals. Taking the simplified PSD as the input for modal analysis, the results showed that the bottom end of the back head had a large displacement of the bonding interface. From the four selected reference points, the frequency of the sudden change of the displacement and acceleration root mean square value was around 33 Hz. Simulation of the actual vibration process found that the stress on the bonding interface between the front head and the barrel section was relatively uniform, about 25 kPa, and the stress value at the junction of the head and the cylinder section was relatively large, especially at the top of the rear head. Concentration, the maximum stress value can reach 130 kPa. It can be seen from the stress history that the relaxation effect of grains made the stress amplitude decrease rapidly after the impact load. Through the combination of measured data and finite element software, the modal analysis of the engine bonding interface and the simulation of the actual vibration process are completed, which provides the basis for subsequent vibration tests.

KEY WORDS: vibration load; bonding interface; load spectra; modal analysis; finite element

固体火箭发动机广泛应用于海军各种型号的导弹中。目前研究表明,推进剂与衬层粘接界面的粘接破坏是固体发动机结构完整性破坏的关键形式之一。纵观导弹全寿命环境^[1],运输阶段的载荷环境极其恶劣。相较于艇载运输过程^[2]的振动加速度幅值($\leq 0.4 \text{ m/s}^2$),铁路及舰载运输^[3]条件下基本稳定在 $-0.5 \text{ m/s}^2 \sim 0.5 \text{ m/s}^2$,公路运输过程中受到的振动载荷更大,并且公路运输会途经荒山、沿海等复杂地形,导弹所受振动载荷会更加复杂。为了保证导弹运输过程中的安全稳定,对公路运输中粘接界面受载情况进行分析意义重大。

目前研究人员对于振动载荷分析主要从时域和频域两方面进行^[4-6],大多基于相关标准进行仿真分析来研究载荷。刘铁^[7]通过进行仿真计算导弹运输车,获得不同路况和运输车速时的振动响应情况。李恩奇^[8]利用 MSC.NASTRAN 有限元软件,得到了固体火箭发动机药柱的固有频率、相应的振型、各阶模态损耗因子和频率响应曲线,以及随机振动响应均方根值和功率谱密度曲线。针对粘接界面处受载情况,Herb Chelner^[9]和张波^[10]等通过在粘接界面处设置传感器研究其受载情况。

基于上述研究,文中利用加速度传感器对导弹公路运输振动载荷进行测量,完成加速度数据的统计分析和 PSD 的计算。利用有限元软件构建发动机全尺寸模型,通过瞬态模态分析和随机响应分析研究结构的振动响应,输入实测加速度数据模拟发动机实际振动过程,获得粘接界面处所受应力情况,为运输过程中发动机可靠性评估提供数据基础。

1 振动数据处理

1.1 数据采集

公路运输的振动载荷数据采集方法为:在运输车底盘纵向安装型号为 1C301 型的电容式三向加速度传感器,采样频率为 200 Hz,采样时间总长为

7.1165 h。传感器传回的三个方向上的振动数据符合笛卡尔坐标系, x 轴正向为车辆前进左侧方向, y 轴正向为车辆前进方向, z 轴正向为竖直向上方向。

实际环境中,各种变化因素使得监测信号发生偏移,即产生趋势项。为还原信号的真实情况,需要对采集到的信号进行相应的预处理。

文中采用多项式最小二乘法的方法进行趋势项的消除^[11]。首先对采集到的信号 $\{x_i\}(i=1,2,\dots,n)$ 设置一个多项式函数 \hat{x} :

$$\hat{x}_i = a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + \dots + a_m i^m \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中: m 为多项式阶次; $a_j(j=1,2,\dots,m)$ 为多项式系数。

通过满足 \hat{x}_i 和 x_i 之间的误差平方和(E)最小的原则来确定多项式系数 $a_j(j=1,2,\dots,m)$,误差平方和的计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=0}^m a_j i^j - x_i \right)^2 \quad (2)$$

E 存在极值的条件为其对 a 求偏导为0:

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = 2 \sum_{i=1}^n i^k \left(\sum_{j=0}^m a_j i^j - x_i \right) = 0 \quad (k=0,1,2,\dots,m) \quad (3)$$

对式(3)变形后得到 $m+1$ 元线性方程组:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m a_j i^{j+k} - \sum_{i=1}^n i^k x_i = 0 \quad (k=0,1,2,\dots,m) \quad (4)$$

求解式(4)中的方程组,可以得到多项式函数 \hat{x}_i 的系数 $a_j(j=1,2,\dots,m)$,阶次 m 影响多项式的形式。当 $m=1$ 时,趋势项为线性函数;当 $m \geq 2$ 时,趋势项为幂函数。文中 m 取2。

多项式函数 \hat{x}_i 各项系数确定后,消除趋势项的计算公式为:

$$y_i = x_i - \hat{x}_i \quad (5)$$

图1显示了处理后的信号。对比不同轴向上的振动信号,发现三轴向的振动信号具有相同波形。在幅值上,z轴向最大,对应垂直方向;y轴向最小,对

应车体左右侧方向。从时间历程上看,路况较好时,加速度幅值为-0.05g~0.05g;路况较差时,幅值为-0.6g~0.6g。

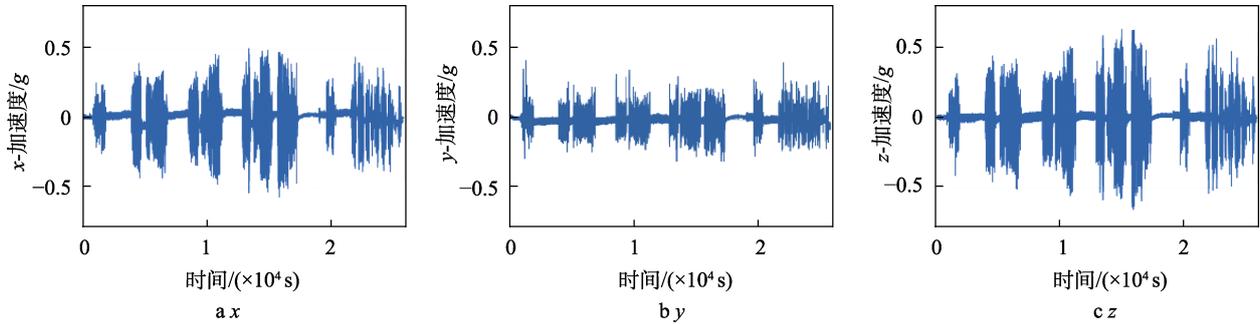


图1 振动加速度历程
Fig.1 Vibration acceleration history

1.2 时域统计分析

考虑到导弹在运输过程中处于卧式放置的方式及粘接界面结构特点,z轴向载荷对导弹影响最大,因此文中主要研究z轴向载荷。

时域分析是根据载荷的时间历程,计算相关统计特征量进行分析。典型的统计特征量主要包含峰值、均方根值、斜度和峭度。其中斜度^[12]表征数据的偏斜方向和程度,是非对称程度的数字特征,计算公式见式(6);峭度^[13]表征概率密度分布曲线在平均值处峰值高低的特征数,计算公式见(7)。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^3}{n\sigma^3} \tag{6}$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^4}{n\sigma^4} \tag{7}$$

图2a为加速度的统计分布情况,图2b为加速度绝对值的统计分布,表1显示了z轴向信号的特征量。可以看到,信号峰值大于3倍均方根值,说明采集到的振动数据中包含数值急剧变化的部分。斜度和峭度反映的是信号接近于正态分布的程度,标准正态分布的斜度为0,峭度为3。采集信号斜度为-0.46,对应图2a分布曲线稍向右偏;峭度为9.34,属于超高斯分布,说明采集信号中包含冲击信号^[14],对应路况较差的情况。

表1 信号的特征量

Tab.1 Signal typical statistical characteristic

Maximum	Minimum	Peak/g	RMS/g	Skewness	Kurtosis
0.643	-0.659	0.651	0.0687	-0.46	9.34

1.3 载荷谱构建

为了对比分析路况好、坏两种情况下的振动载荷

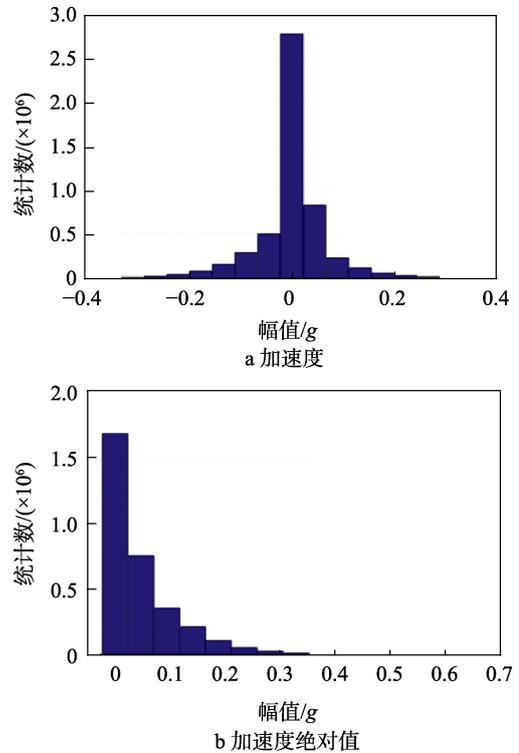


图2 载荷统计分布情况

Fig.2 Value distribution: a) value histogram; b) absolute peak value distribution

特点,采用了基于PSD等级对运输条件进行分类的方法^[15]。根据国际平整度指数(IRI)^[16-17]进行道路状况分类^[18]。表2显示了两个振动严重程度级别(A,B)及其PSD级别。依据振动等级,各提取5段A级和B级下的信号段,每段信号时长300s,包含60000个数据点。求取各等级下的振动信号段PSD,绘制的10段PSD曲线如图3所示。通过对每个级别内5段信号的PSD进行平均,得到每个振动级别(A,B)的平均PSD。假设采集过程中行驶速度不变,通过计算每个等级下信号时长与总时间的比值,得到各等级PSD在总行程上的比率,A级占41%,B级占59%,以行程占比作为权重,计算等效PSD,如图4所示。

表 2 基于 PSD 的振动级别划分

Tab.2 Classification of vibration severity based on the PSD level

Range		PSD/(g ² ·Hz ⁻¹)
A	Good	<0.005
B	Bad	≥0.005

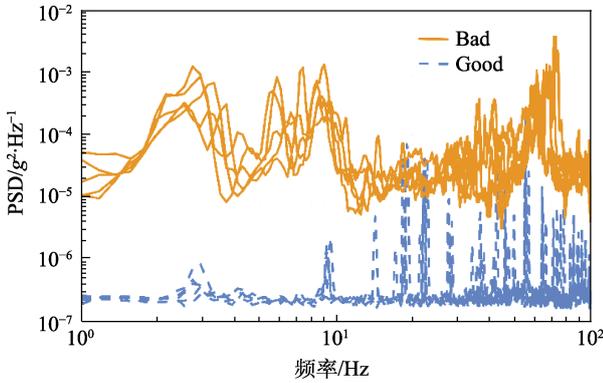


图 3 两种振动等级的 PSD

Fig.3 PSD in two vibration severity classes

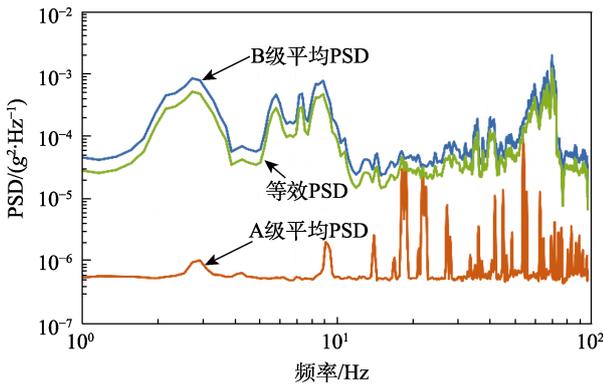


图 4 平均 PSD 与等效 PSD

Fig.4 Average PSD and equivalent PSD

为方便将 PSD 输入到有限元软件中进行计算，还需要将 PSD 转换为倍频程格式，从而简化功率谱密度，同时保证输入载荷谱真实性。简化结果如图 5 所示。

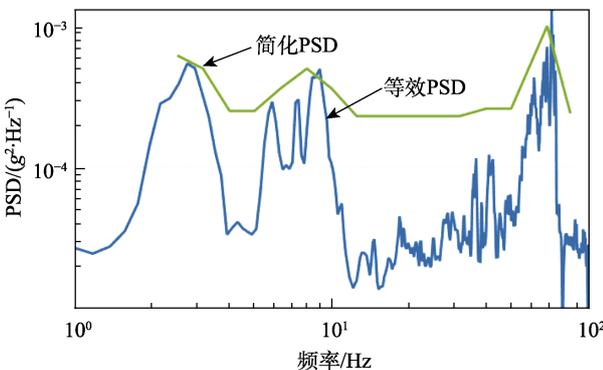


图 5 简化 PSD

Fig.5 Simplified PSD

2 有限元仿真分析

文中利用有限元软件 Abaqus 构建发动机模型，输入加速度 PSD 对发动机进行模态分析。利用两个振级下的实测加速度数据，模拟发动机振动过程，获得粘接界面应力历程。

2.1 模型基本参数

导弹发动机的简化模型如图 6 所示，模型主要由壳体、绝热层、人工脱粘层和推进剂药柱构成，各部件材料参数设置见表 3。考虑到药柱的热粘弹特性，采用如式 (6) 所示的 Prony 级数形式^[19]设置推进剂弹性模量。考虑到实际情况下壳体与衬层、衬层与推进剂、壳体与人工脱粘层界面粘接牢固，将边界条件简化为绑定约束，人工脱粘层和药柱间不设置约束。

$$E(t) = 1.79 + 1.65e^{-25t} + 2.05e^{-2.5t} + 3.04e^{-0.25t} + 3.88e^{-0.025t} \quad (6)$$

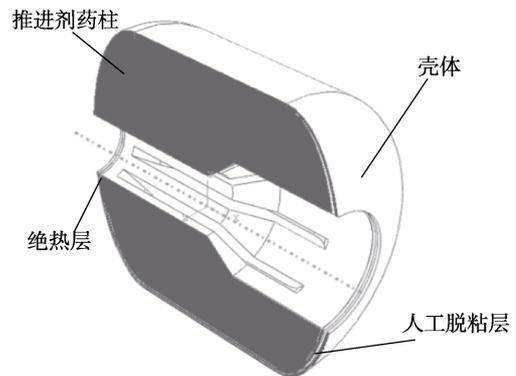


图 6 导弹发动机的简化模型

Fig.6 Simplified model of missile engine

设置边界条件情况：在壳体与绝热层接触面和绝热层与药柱接触面上设置绑定约束，人工脱粘层与壳体之间不设约束，用于释放封头处集中应力。在模态分析过程中，封头外表面完全固定。在模拟振动过程时，模型外表面施加 y 轴向的约束。

2.2 模态分析

利用加速度 PSD 进行发动机模态分析需设置两个分析步：第一步先进行瞬态模态分析，提取前 10 阶模态，模型各阶模态频率见表 4；第二步输入简化 PSD 进行随机响应分析。图 7 为振动频率在 45.54 Hz 时后封头处位移云图，可以看出，后封头底端粘接界面位移较大。在 y 轴方向上取 4 个参考点研究位移和应力情况，图 8a 为 4 点位移均方根值随频率的变化情况，图 8b 为 4 点加速度均方根值随频率的变化情况。可以看出，位移和加速度突变的频率在 33 Hz 附近。

2.3 发动机振动过程模拟

对于发动机粘接界面处所受应力情况，还需要将

表3 各部件参数设置
Tab.3 Parameter setting of each part

Part	Density/(kg·m ⁻³)	Modulus/MPa	Conductivity/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Expansion/(K ⁻¹)	Poisson's ratio
Shell	7800	2.1×10 ⁵	39.0	1.1×10 ⁻⁵	0.3
Insulation/Liner	1050	5.7	0.3	9.2×10 ⁻⁵	0.499
Debonding layer	1050	3	0.35	9×10 ⁻⁵	0.495
Propellant	1800	E(t)	0.6	1×10 ⁻⁴	0.495

表4 模型各阶模态频率
Tab.4 Model frequency

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	33.96	33.98	35.37	39.83	39.9	44.13	45.72	45.73	46	46.58

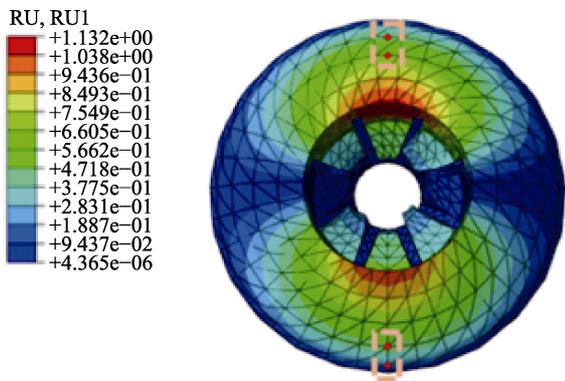


图7 位移云图
Fig.7 Displacement cloud

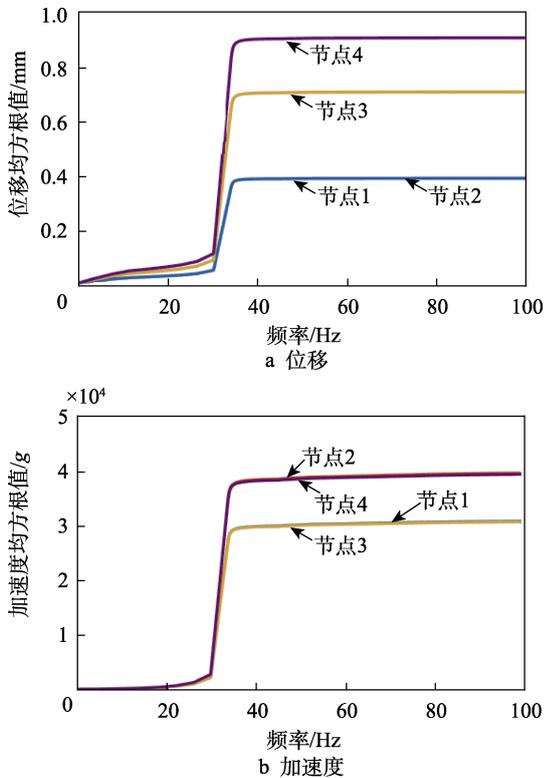


图8 频域中位移和加速度的均方根值
Fig.8 The RMS value of (a) displacement and (b) acceleration in the frequency domain

加速度数据作为载荷进行输入，模拟实际振动过程。振动开始时刻，假设发动机位移为0，将两种等级下加速度数据各提取300s作为输入，施加在发动机模型外表面上，分析步间隔设置为0.1s。图9显示了某一振动时刻下粘接界面处所加载荷情况。其中图9a为界面所受y22方向应力情况，可以看出，前封头及筒段处粘接界面所受应力较为均匀，约为25kPa。在封头和圆筒段相接处应力值较大，特别是在后封头顶端，存在应力集中，应力值最大可达130kPa。图9b为界面所受剪应力情况，可以看出，前、后封头处剪应力较小，圆筒段特别是靠近后封头处，剪应力较大，

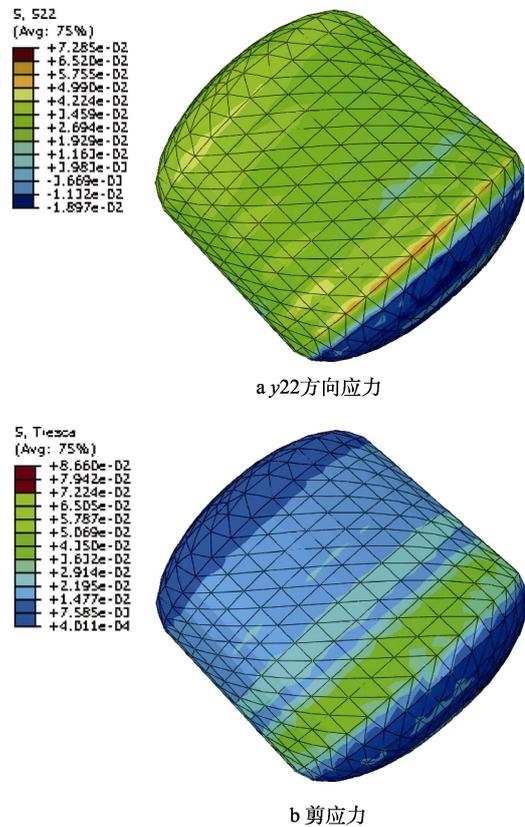


图9 粘接界面处所加载荷情况
Fig.9 Load condition of bonding interface: a) y22 stress; b) shear stress

剪应力整体要小于正应力。为对比不同振级下界面受载情况, 提取筒段与后封头连接处正应力最大值点的应力历程, 如图 10 所示。整体来看, B 级振动载荷在界面上产生的应力远大于 A 级。从应力历程上看, 每次出现较大冲击时, 应力变化幅值会突然增大, 然后迅速减小。主要是由于冲击初期壳体剧烈运动使得界面处药柱产生较大弹性变形, 而后药柱迅速产生松弛效应, 从而应力幅值迅速变小。

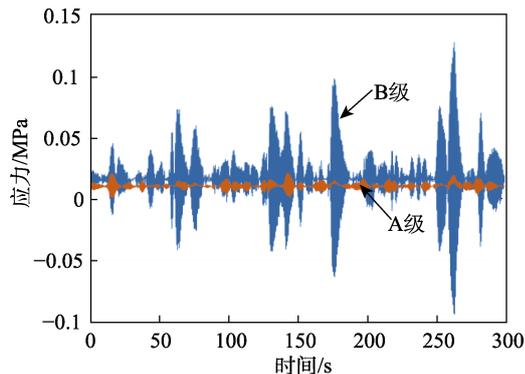


图 10 应力历程
Fig.10 Stress history

3 结论

1) 通过传感器实测获得导弹公路运输加速度数据, 统计分析发现, 信号属于超高斯分布, 相关统计特征量表明, 采集信号中包含冲击信号。以信号 PSD 值对载荷进行两级划分, 求取等效 PSD。

2) 利用有限元软件 Abaqus 构建发动机模型, 输入加速度 PSD 对发动机进行模态分析。结果表明, 后封头底端粘接界面处位移较大, 通过选取的 4 个参考点上看, 位移和加速度均方根值突变的频率在 33 Hz 附近。

3) 将加速度数据作为载荷进行输入, 模拟实际振动过程发现, 前封头及筒段处粘接界面所受应力较为均匀, 在封头和圆筒段相接处应力值较大, 特别是在后封头顶端存在应力集中。从应力历程上看, 药柱的松弛效应使得冲击过后应力变化幅值迅速变小。同时应力历程数据可为后续试验提供基础。

参考文献:

[1] 李高春, 黄卫东, 董可海, 等. 固体火箭发动机全寿命环境载荷分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 101-105.
LI Gao-chun, HUANG Wei-dong, DONG Ke-hai, et al. Environmental load in total life cycle of solid rocket motor[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(3): 101-105.

[2] 刘磊, 李高春, 李金飞, 等. 基于实测数据的固体火箭发动机粘接界面振动损伤分析[J]. 固体火箭技术,

2019, 42(3): 389-395.

LIU Lei, LI Gao-chun, LI Jin-fei, et al. Vibration damage analysis of the bonded interface of shipborne solid rocket motor based on measured data[J]. Journal of solid rocket technology, 2019, 42(3): 389-395.

- [3] 邱欣. 某固体火箭发动机粘接系统损伤特性与使用寿命评估技术研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2015.
QIU Xin. Research on damage characteristics and service life evaluation technology of a solid rocket engine bonding system[D]. Yantai: Naval Aeronautical Engineering Institute, 2015.
- [4] LUTES L D. Stochastic analysis of structural and mechanical vibrations[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1997.
- [5] 王明珠. 结构振动疲劳寿命分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
WANG Ming-zhu. Research on life analysis method for structure vibration fatigue[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [6] OKAN YILMAZ. Service life assessment of solid rocket propellants considering random thermal and vibratory loads[D]. Turkey: Mechanical Engineering Department of Middle East Technical University, 2012.
- [7] 刘铁, 李高春, 张璇, 等. 基于 Matlab/Simulink 的导弹运输振动载荷分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 95-98.
LIU Tie, LI Gao-chun, ZHANG Xuan, et al. Vibration load analysis of missile transportation based on Matlab/simulink[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(9): 95-98.
- [8] 李恩奇, 雷勇军, 袁端才, 等. 某固体火箭发动机药柱的动力学分析[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(6): 486-489.
LI En-qi, LEI Yong-jun, YUAN Duan-cai, et al. Dynamic analysis on X-type solid rocket motor grain[J]. Journal of solid rocket technology, 2007, 30(6): 486-489.
- [9] CHELNER H, BUSWELL J, EVANS D. Embedded sensors for monitoring solid propellant grains[C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference & exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2005.
- [10] 张波, 董可海, 李金飞, 等. 振动载荷对立贮式发动机粘接界面损伤影响[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 1092-1098.
ZHANG Bo, DONG Ke-hai, LI Jin-fei, et al. Effects of vibration load on bonding interface damage of vertical storage motor[J]. Journal of propulsion technology, 2018, 39(5): 1092-1098.
- [11] 顾晓华. 车载设备随机振动疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
GU Xiao-hua. Research on the fatigue life of the on-board equipment on the vehicle under random vibration environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [12] 黄淮德. 振动工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
HUANG Huai-de. Vibration engineering[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005.
- [13] JOANES D N, GILL C A. Comparing measures of sample

- skewness and kurtosis[J]. Journal of the royal statistical society: Series D (the statistician), 1998, 47(1): 183-189.
- [14] 商霖, 周国峰, 卢鑫. 战术导弹公路机动运输振动环境条件的研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 40-44.
SHANG Lin, ZHOU Guo-feng, LU Xin. Vibration environment condition for highway and off-road transportation of tactical missile[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(12): 40-44.
- [15] TAKEO S. Derivation of PSD for random vibration test based on the field data obtained in Japan[J]. Packaging technology, 2015, 53: 158-163.
- [16] SAYERS M W, GILLESPIE T D, PATERSON W D O. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements[R]. Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development, 1986.
- [17] SAYERS M W. The little book of profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles[R]. Michigan: University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute, 1998.
- [18] SAYERS MW. Two quarter-car models for defining road roughness: IRI and HRI[R]. Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development, 1989.
- [19] 张春龙. 固体发动机粘接界面受载状态监测检测技术与方法研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2015.
ZHANG Chun-long. Research on the detection technology and method for monitoring the state of solid engine bonding interface under load[D]. Yantai: Naval Aeronautical Engineering Institute, 2015.