

文章编号: 1003-1480 (2025) 01-0018-09

典型火工分离螺母装置冲击来源及传播特性研究

谭祖玮, 潘忠文, 胡振兴, 张新宇, 彭慧莲

(北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076)

摘要: 结合 LS-DYNA 数值仿真与冲击测试试验, 研究了装药爆燃、预紧力释放和机构撞击 3 种冲击来源对火工分离螺母装置冲击响应的贡献, 并基于应力波传播情况分析了不同冲击源产生的响应在平面底板中的传播特性。结果表明, 分离螺母装置的近场冲击响应主要由装药爆燃产生, 中远场冲击响应则主要来自机构撞击, 预紧力释放产生的冲击在近场和中远场均较小。不同冲击源的传播特性与其频率成分有关。爆燃冲击量级大、频率高, 在传播过程中快速衰减。撞击冲击频率相对较低, 传播至中远场时仍保持较大量级, 影响航天飞行安全。

关键词: 分离螺母; 火工冲击; 解耦分析; 应力波

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.004

Study on Shock Sources and Propagation Characteristics of Typical Separation Nuts

TAN Zu-wei, PAN Zhong-wen, HU Zhen-xing, ZHANG Xin-yu, PENG Hui-lian

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing, 100076)

Abstract: Based on LS-DYNA numerical simulation and shock test, the contributions of three sources, including propellant explosion, preload release and mechanism collision, to the total shock response of a typical separation nut were studied. In addition, according to the propagation of shock stress waves, the propagation characteristics of shock response arising from different sources were analyzed. The results show that the shock response in the near field of separation nuts mainly originates from propellant explosion while in the mid-to-far field from mechanism collision, and the shock from preload release is small in the whole field. The propagation characteristics of different shock sources are related to their frequency components. The shock generated by propellant explosion is large, high-frequency and attenuated rapidly during propagation. The shock generated by mechanism collision is relatively low-frequency, remaining of a large magnitude even propagating to mid-to-far field. This poses a threat to the safety of space flight.

Key words: Separation nut; Pyroshock; Decoupling analysis; Stress wave

火工分离螺母装置(以下简称分离螺母)因具有连接承载能力强、解锁可靠、多余物易于控制等优点^[1]而在航天工程中备受关注。分离螺母依靠装药爆燃驱动机构运动解锁来完成分离动作,属于火工分离装置。当前对火工分离装置的研究主要聚焦工作过程仿

真^[2-5]、分离可靠性评估^[6]、冲击源解耦分析^[7]、冲击响应计算^[8-11]和降冲击改进设计^[12-13]等方面。一般而言,火工分离装置的冲击来源包括装药爆燃、预紧力释放、机构撞击、剪切破坏等^[14],不同冲击源产生的响应具有不同的量级和特性。借助试验^[15]或仿真^[16]

收稿日期: 2024-09-10

作者简介: 谭祖玮(2000-),男,硕士研究生,主要从事载荷与力学环境研究。

通讯作者: 潘忠文(1966-),男,研究员,主要从事载荷与力学环境研究。

基金项目: 基础加强重点计划(2022-JCJQ-ZD)。

引用本文: 谭祖玮,潘忠文,胡振兴,等.典型火工分离螺母装置冲击来源及传播特性研究[J].火工品,2025(1):18-26.

手段将各种冲击源解耦,有助于分析火工分离装置冲击载荷的形成机制^[7]与作用特点,对于航天器结构冲击响应预示及火工分离装置降冲击设计具有重要指导意义。

现有研究主要遵循两种方法实现对不同冲击源的解耦分析:一种方法是结合工作时序,在加速度-时间曲线上辨识各个冲击源的作用时段,并分别计算其冲击响应谱^[17],但不同冲击源产生的响应有时会相互耦合,难以区分^[18];另一种方法则是通过设计包含不同冲击源的试验状态或仿真模型来进行解耦分析。例如,李燕华等^[14]针对某型爆炸螺栓设计了标准状态、无预紧力、无活塞剪切、仅装药爆燃4种试验状态,通过对比各状态的冲击响应谱,依次相减得到不同冲击源的响应。该方法假设冲击响应谱对冲击成分的叠加是线性的,但杨昊天^[19]的研究发现,当不同冲击源共同作用时,所得到的冲击响应谱并非是各自单独作用时的简单叠加。王军评等^[7]对各冲击来源单独建模仿真,研究了爆炸螺栓冲击源的产生机制,但并未通过试验来验证仿真结果的可靠性。Xiong等^[20]将试验与仿真手段结合起来,首先通过标准状态下的冲击测试试验验证仿真建模的合理性,再分别建立对应预紧力释放与机构撞击过程的仿真模型,实现对分离螺母冲击源的解耦分析。不过,该研究将载荷简化为作用在锁紧环和活塞上的燃气压力曲线,未获得装药爆燃对总冲击响应的贡献,并且只研究了距离分离螺母安装位置10 cm处单个测点的冲击响应来源,并未分析冲击响应在结构中的传播特性,这对于评估航天器各个单机安装位置的冲击环境的参考意义有限。

本文选取了一种典型的分离螺母作为研究对象,结合LS-DYNA数值仿真和冲击测试试验,研究了其冲击来源与响应的传播特性。首先介绍了仿真建模过程,并通过试验数据验证了仿真结果的准确性。然后,通过对各个冲击源单独解耦建模,获得了装药爆燃、预紧力释放和机构撞击各自产生的冲击响应,并提出了评价各个冲击源对整体冲击响应贡献的方法。最后,讨论了距安装位置不同距离处各个冲击源对整体冲击响应贡献的方法,并结合应力波演化情况分析了不

同来源冲击响应的空间传播特性。

1 冲击测试试验与仿真分析

1.1 试验装置

本研究的分离螺母冲击响应测试在如图1所示的标准测试平台^[21]上进行。测试平台主体为尺寸600 mm×600 mm×20 mm的铝合金底板,其四角通过吊环和弹性绳悬挂起来以模拟自由边界条件。在测试过程中,分离螺母通过安装块固定在测试平台中心位置,并在底板上布置了加速度传感器以测量分离时产生的冲击响应,测点位置及测量方向布置如图2所示。

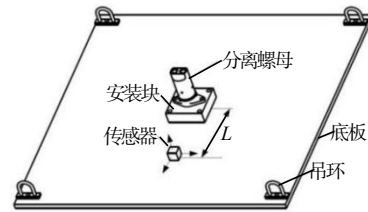


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test device

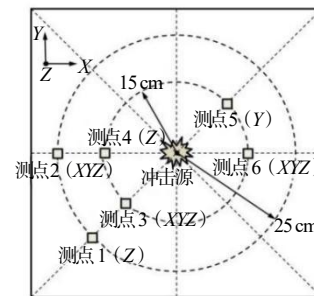


图2 测点位置与测量方向布置

Fig.2 Location of measuring points and measuring direction arrangement

试验所采用的加速度传感器为电荷型加速度计,其测量频率范围为 $1 \sim 2 \times 10^4$ Hz,所采集信号经过电荷放大器和抗混滤波器处理后进入数据采集器。根据得到的加速度测量结果,计算得到最大绝对加速度冲击响应谱^[22],计算频点间隔为1/12倍频程。鉴于500 Hz以下的冲击响应谱通常受噪声影响较大,无法准确反映真实的冲击响应^[17],设置响应谱计算频率范围为500~8 000 Hz,放大因子 $Q=10$ 。

1.2 仿真建模

以某型分离螺母为仿真对象,参照文献^[11,23]对

分离螺母结构进行合理简化,建立的有限元模型如图3所示。其中模型整体情况如图3(a)所示,并采用LS-DYNA软件进行求解计算。

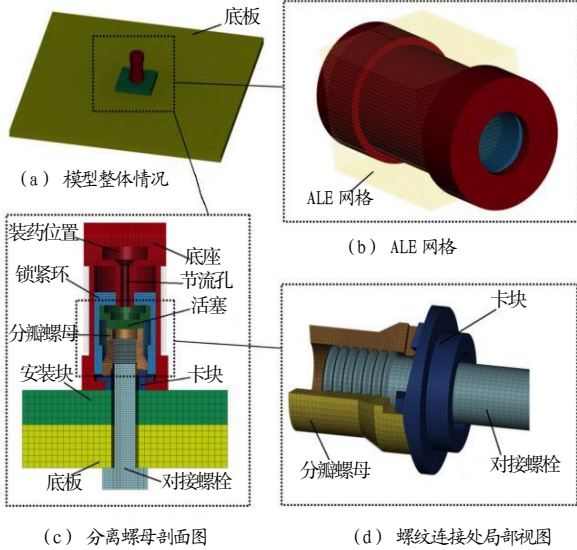


图3 有限元模型

Fig.3 The finite element model

在仿真过程中,采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)流固耦合方法来模拟爆燃产物与分离螺母结构间的相互作用。分离螺母及其测试平台采用拉格朗日单元建模,而空气与爆燃产物则采用ALE方法建模,建模结果如图3(b)所示。由图3(b)可见,ALE网格与拉格朗日单元之间存在部分重叠,使得ALE网格包覆住可能与爆燃产物接触的拉格朗日单元。分离螺母的具体结构如图3(c)~(d)所示,主要包括底座、锁紧环、活塞、分瓣螺母、对接螺栓和卡块等组件。分离螺母工作时,由装药爆燃产生的高压气体通过节流孔进入活塞与锁紧环之间的腔体,推动锁紧环运动,直至锁紧环与分瓣螺母间的径向约束被解除。解锁后,高压气体继续推动活塞运动,将分瓣螺母向外推开,并释放对接螺栓,完成分离动作。

仿真中,实际结构中的固定安装面(底座与安装块、安装块与底板之间)被简化为绑定接触,其余接触面采用自动面接触算法模拟,对接螺栓与分离螺母之间的摩擦系数设定为0.1^[20]。显式推进步长由LS-DYNA在计算过程中自动更新。仿真计算总时长为2ms。采用动态松弛算法施加螺栓预紧力,预应力与预紧力矩之间满足如下关系^[24]:

$$\sigma_p = \frac{4T}{\pi K d^3} \quad (1)$$

式(1)中:预紧力矩 T 为75 N·m;预紧力矩系数 K 为0.2;螺栓直径 d 为12 mm,计算得到预应力 σ_p 为276 MPa。

分离螺母的材料为30CrMnSiNi2A,选用简化Johnson-Cook本构模型,材料参数设置参照文献^[23],如表1所示。底板与安装块的材料为铝合金,选用弹性本构模型,材料参数如表2所示。

表1 30CrMnSiNi2A材料参数

Tab.1 Property parameters of 30CrMnSiNi2A

参数	取值	参数	取值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	7.83	B/GPa	0.786
弹性模量 E/GPa	207.0	N	1.66
泊松比 μ	0.27	C	0.015 7
A/GPa	1.53	-	-

注: A 为静态屈服强度; B 为强度硬化系数; N 为硬化指数; C 为应变率影响参数。

表2 铝合金材料参数

Tab.2 Property parameters of aluminum alloy

参数	取值	参数	取值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.70	泊松比 μ	0.33
弹性模量 E/GPa	68.0	-	-

空气状态方程如下:

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} e_v \quad (2)$$

式(2)中: p 为压强;比热比 $\gamma=1.4$; ρ 为密度,初始密度 $\rho_0 = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; e_v 为单位体积内能,初始值设置为0.255 GPa。此外,设置空气动力粘度系数 $\mu_a = 2.0 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ 。分离螺母装药量为180 mg,状态方程为J-W-L方程,即式(3),装药参数设置参照文献^[24],具体如表3所示,其中爆速根据工程经验选取。

表3 装药参数

Tab.3 Property parameters of propellant

参数	取值	参数	取值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.77	R_1	4.4
爆速 $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6 113	R_2	1.2
C-J爆压 p_{C-J}/GPa	33.5	ω	0.25
p_A/GPa	617.0	$e_{v,0}/\text{GPa}$	10.1
p_B/GPa	16.9	V_0	1.0

$$p = p_A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + p_B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_v}{V} \quad (3)$$

式(3)与表3中: p 为压强; p_A 、 p_B 为常数; R_1 、 R_2 为对应的容积影响系数; V 为相对比容; V_0 为初始相对比容; ω 为Grüneisen系数; e_v 为单位体积内能; $e_{v,0}$ 为初始单位体积内能。

高频动力学仿真要求单元尺寸应不大于最小分析波长的1/5。尽管爆燃过程中分离螺母部分区域进入塑性状态,但近场结构变形基本属于弹性变形^[25],可以根据弹性应力波长评估单元划分密度。金属材料横波波速较纵波小,在相同频率下对应波长更短。各项同性材料弹性应力波横波波长计算见式(4):

$$\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)\rho}} \quad (4)$$

式(4)中: λ 为对应频率 f 时的波长,其余符号定义同表1~2。将测量频率上限 $f=20$ kHz与表1~2中的材料参数代入式(4),得到30CrMnSiNi2A和铝合金对应波长分别为161.3, 153.9 mm,单元尺寸应分别不大于32.3, 30.8 mm。本文中分离螺母和铝合金底板的最大单元尺寸分别为1.83, 8.12 mm,均满足单元划分要求。

1.3 仿真结果与试验验证

该分离螺母的工作过程与腔内压强分布情况如图4所示。

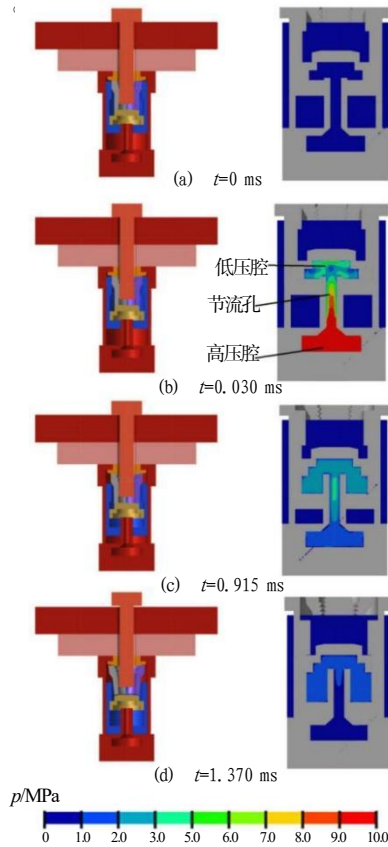


图4 分离螺母工作过程与压强分布
Fig.4 Actuation process and pressure nephograms of the separation nut

由图4(b)可见,装药点火后,爆燃产物迅速充满高压腔,腔内压强快速上升。气体经过节流孔流向低压腔,在节流作用下气压逐渐下降,说明节流孔能够降低爆燃气体作用在活塞上产生的冲击^[7]。气体进入低压腔后驱动锁紧环运动,腔体体积逐渐扩张,腔内压强快速下降。在大约0.915 ms时,锁紧环与分瓣螺母解锁,如图4(c)所示。解锁后,气压继续驱动活塞,推开分瓣螺母并释放对接螺栓,锁紧环继续运动直至约1.370 ms时与分离螺母底座碰撞,如图4(d)所示。

仿真模型中与图2各测点对应的加速度数据被提取出来,用于计算冲击响应谱,计算方法与试验保持一致。以测点3-Z方向为例,对比了仿真与试验得到的冲击响应谱,结果如图5所示。

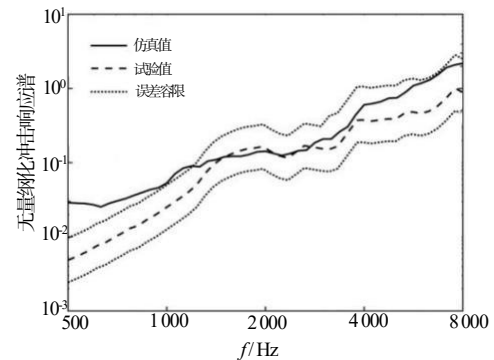


图5 测点3-Z方向冲击响应谱

Fig.5 Shock response spectrum at measuring point 3 in Z direction

本文中所有冲击响应数据均进行了无量纲化处理。由于火工分离试验结果具有较大随机性和分散性,通常将3 kHz以下偏差控制在 ± 6 dB以内,3 kHz以上偏差控制在 $+9$ dB/ -6 dB以内^[26]作为两个冲击响应谱等效一致的评价标准。从图5可知,仿真值基本符合误差容限要求,具有较高的可信度。经核验,其余测点的误差水平与该测点相当,基本符合容限要求。

各测点在4 000 Hz和8 000 Hz以下冲击响应谱峰值的仿真与试验值对比如图6~7所示。

由图6~7可知,仿真与试验结果基本吻合,绝大多数测点的计算误差在容限范围内。对于同一测点,法向(Z方向)的冲击响应显著大于面内(X、Y方向)响应,后文将重点关注法向冲击响应的来源及其传播特性。

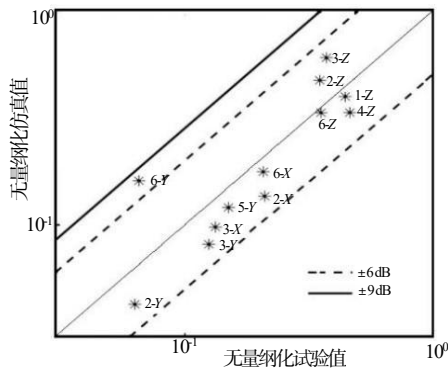


图6 各测点4 000 Hz以内冲击响应谱峰值

Fig.6 Shock response spectrum peaks below 4 000 Hz at measuring points

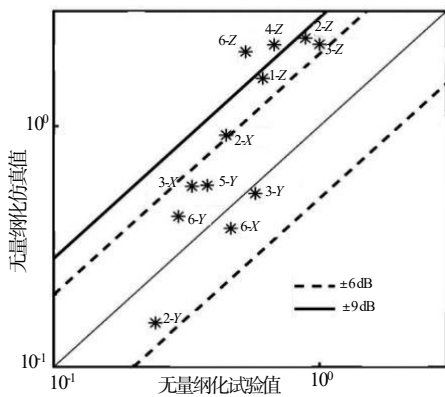


图7 各测点8 000 Hz以内冲击响应谱峰值

Fig.7 Shock response spectrum peaks below 8 000 Hz at measuring points

2 冲击源解耦与贡献评价

2.1 冲击源解耦建模

在验证了仿真建模方法的可靠性之后,对分离螺母各冲击源单独建模以实现冲击源解耦分析。

以1.2节中的仿真模型为基准,将其记作模型1,如图8(a)所示。

为反映装药爆燃单独作用产生的冲击,移除预紧力,并删除锁紧环底面与底座之间的自动接触,将该模型记作模型2,如图8(b)所示。

为反映预紧力释放产生的冲击,建立如图8(c)所示的仿真模型3。该模型在模型1的基础上删除了装药与空气部分,并在螺栓截面上施加了拉力载荷,以模拟预紧力的加载和卸载过程。

据文献[20]报道,预紧力释放产生的冲击与释放速度有关,预紧力瞬时释放产生的冲击响应较非瞬时

释放增加约70%。为确保模型3中的预紧力释放的速度与模型1尽可能一致,从模型1的计算结果中提取螺栓截面的轴向应力曲线,并采用经验模态分解(EMD)技术剔除爆燃产生的应力振荡,得到预紧力卸载曲线。基于此,设计的模型3输入载荷曲线如图9所示。

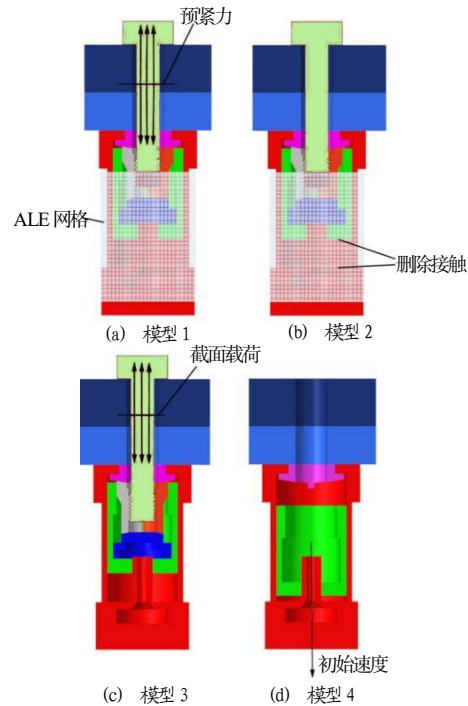


图8 冲击源解耦仿真模型

Fig.8 Simulation models for shock source decoupling

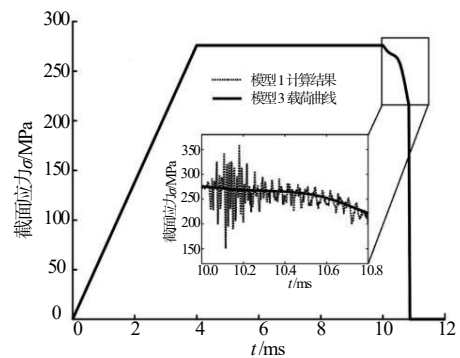


图9 模型3载荷曲线

Fig.9 Load curve in model 3

由图9可见,预紧力在4 ms内缓慢施加,在10 ms时开始释放。这样的设计目的在于最小化加载过程产生的冲击,并确保卸载开始前冲击已充分衰减,避免预紧力加载过程对预紧力释放冲击计算结果的干扰。

最后,为了反映锁紧环撞击底座产生的冲击,提取模型1计算结果中的锁紧环撞击速度,并将其作为初始条件施加在锁紧环上,使其撞击分离螺母底座,

得到如图 8 (d) 所示的模型 4。

2.2 冲击源贡献评价方法

将上述各计算模型分别提交计算,并提取对应的冲击响应谱即可实现对分离螺母冲击源的解耦。例如,可以提取得到测点 3-Z 方向各冲击源产生的响应谱,如图 10 所示。

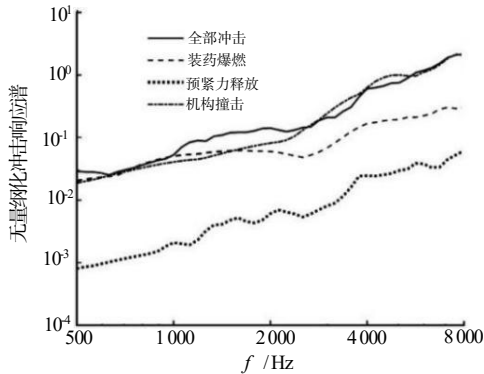


图 10 测点 3-Z 方向各冲击源对应冲击响应谱

Fig.10 SRS of different sources at measuring point 3 in Z direction

为了定量评价各冲击源对整体冲击响应的贡献,引入峰值贡献度 $M_{r,i}$ 与全频段贡献度 $E_{r,i}$ 两个指标。

峰值贡献度 $M_{r,i}$ 定义为模型 i 与模型 1 冲击响应谱峰值之比,用于评估不同冲击源对冲击响应峰值的贡献^[23],具体公式见式 (5) :

$$M_{r,i} = \frac{\max(S_i)}{\max(S_1)} \quad (5)$$

式 (5) 中: S_i 为模型 i 对应的冲击响应谱。

全频段贡献度 $E_{r,i}$ 的定义见式 (6),用于评估不同冲击源对全频段冲击响应谱的贡献^[10]。

$$E_{r,i} = \frac{1}{n} \sum_{500\text{Hz} < f < 8000\text{Hz}} \frac{S_i(f)}{S_1(f)} \quad (6)$$

式 (6) 中: $S_i(f)$ 表示模型 i 在频率 f 处的冲击响应值; n 为冲击响应谱总的计算频点数。

3 结果与分析

3.1 冲击源贡献评价结果

对测点 2、测点 4 以及近场位置 (距冲击源 6 cm 处) Z 方向上的各冲击源进行了峰值贡献度 (M_r) 和全频段贡献度 (E_r) 的计算,结果分别如表 4~5 所示。

表 4 M_r 计算结果

Tab.4 Results of M_r

冲击来源	近场 (6cm)	测点 4 (15cm)	测点 2 (25cm)
装药爆燃	0.521	0.202	0.181
预紧力释放	0.009	0.023	0.033
机构撞击	0.218	0.771	0.922

表 5 E_r 计算结果

Tab.5 Results of E_r

冲击来源	近场 (6 cm)	测点 4 (15 cm)	测点 2 (25 cm)
装药爆燃	0.539	0.482	0.543
预紧力释放	0.015	0.043	0.070
机构撞击	0.352	0.924	0.893

据表 4~5 可知,不同测试位置处各冲击源对整体冲击响应的贡献不同。在近场区域,装药爆燃是冲击响应的主要来源,峰值贡献度达 0.521,全频段贡献度为 0.539。然而在中远场位置,即测点 4 和测点 2,装药爆燃对冲击响应的贡献显著降低至 0.2 左右,此时机构撞击成为冲击响应的最主要来源。特别是在测点 2,机构撞击的峰值贡献度和全频段贡献度分别高达 0.922 和 0.893。与此同时,分离螺母的预紧力释放对整体的冲击响应贡献较小,其贡献度均低于 0.1,这与文献[20]的结论一致。需要说明的是,由于爆炸冲击过程具有高度非线性,各冲击源对应的贡献之和常常并不等于 1,但上述指标仍可以有效反映火工装置中冲击源的相对重要性。

3.2 冲击响应的传播特性分析

各个冲击源对整体响应的贡献度呈现出空间差异,这是因为不同冲击源产生的响应具有不同的传播特性。以分离螺母的安装位置为原点,提取 X 轴不同位置处各冲击源产生的无量纲化冲击响应谱峰值,如图 11 所示。

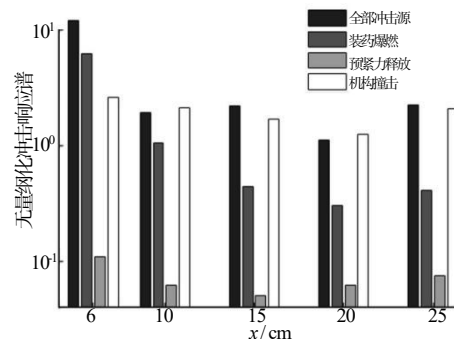


图 11 不同位置处各冲击源对应响应谱峰值

Fig.11 SRS peaks of different sources at several positions

由图 11 可见,在近场位置 ($x = 6 \text{ cm}$),装药爆

燃产生的冲击响应量级较高，超过6倍无量纲单位，但随着传播距离增大，爆燃冲击迅速衰减，在 $x = 15$ cm处降至约为0.4倍无量纲单位。相比之下，机构撞击产生的冲击则随传播距离增大衰减较慢，在近场位置($x = 6$ cm)大约为2.5倍无量纲单位，在 $x = 15$ cm处仍接近2倍无量纲单位。

图12~13分别是装药爆燃和机构撞击在底板上产生的 Von-Mises 等效应力演化云图。由图12~13可以观察到，无论是装药爆燃还是机构撞击，都会在瞬间产生冲击应力波，并向周围扩散，应力波在0.1 ms内即可从分离螺母安装位置传播至底板边界，如图12(c)、图13(c)所示。应力波随即发生反射，如图12(d)与图13(d)所示。

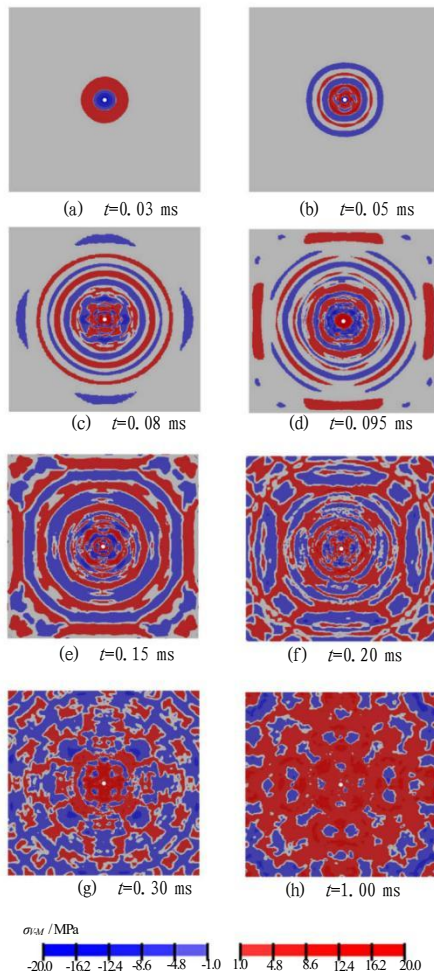


图12 爆燃产生的应力云图

Fig.12 Cloud images of stress caused by explosion

图12中的爆燃应力波在反射叠加过程中快速消散，至0.30 ms已观察不到明显波形，如图12(g)~(h)所示，而图13中的撞击应力波在传播过程中耗

散较慢，反射叠加后形成类似驻波的图形，如图13(g)~(h)所示。

已有研究表明，装药爆燃产生的冲击成分主要集中在高频段，而撞击产生的冲击频率相对较低^[7]，对比图12(c)~(d)与图13(c)~(d)可以发现，装药爆燃产生的应力波的波长较撞击的短，对应波动频率更高。这使得爆燃冲击在传播过程中的衰减速度更快，传播距离有限，主要作用于近场范围；而撞击冲击则在传播过程中衰减较慢，作用范围更大。

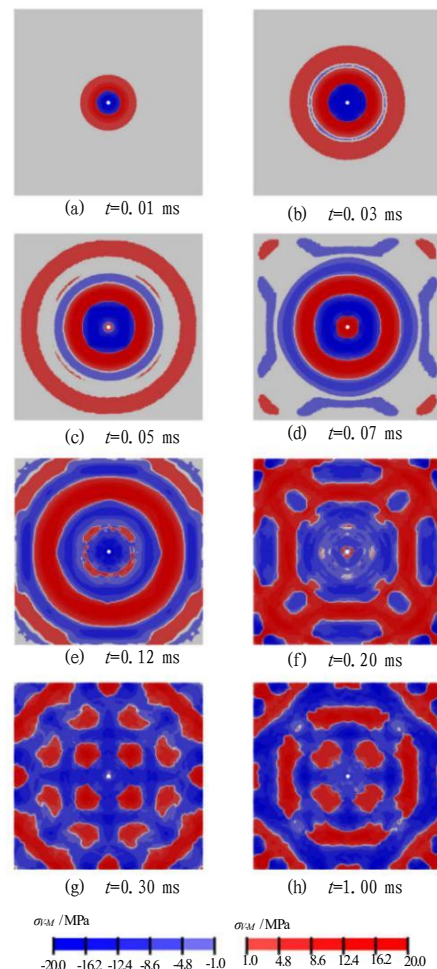


图13 撞击产生的应力云图

Fig.13 Cloud images of stress caused by collision

由于近场冲击环境非常恶劣，实际上一般不在近场位置安装对冲击敏感的电子元件，这就使对中远场冲击环境的预示与控制显得尤为重要。中远场冲击响应主要来自机构撞击，通过对撞击进行吸能缓冲有望显著改善单机冲击环境。尽管有学者提出通过降低装药量与预紧力来改善分离螺母冲击环境^[11]，但降低装药量会对分离可靠性造成影响，而降低预紧力则会同

时降低连接刚度,均会给运载任务带来风险。因此,更可行的改进方向是致力于减少由撞击产生的冲击,以优化分离螺母的设计。

从图 11 中还可以发现,各冲击源产生的响应峰值在底板中的分布并非随传播距离的增加而单调递减。当传播距离在 6~20 cm 内时,冲击响应峰值大体随传播距离增大而下降,但在 25 cm 处的冲击响应峰值比 20 cm 处有所增大。

据图 12 (d) 与图 13 (e) 可知,因为冲击应力波在底板边界附近发生反射,反射波与入射波相互叠加,使得应力波在局部区域出现增强,从而提高了该位置的冲击响应。当前在预测航天器的冲击环境时,通常根据传播距离估计响应量级^[27],并未考虑应力波在自由边界或连接面发生反射时导致的叠加增强,这可能会导致局部冲击环境的测量值超出预测值。在考虑应力波垂直入射的情况下,入射波和反射波的应力满足如下关系:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (7)$$

式(7)中: σ_R 为反射波应力; σ_1 为入射波应力; Z_1 为入射介质的阻抗; Z_2 为透射介质的阻抗。对于自由界面, $Z_2 = 0$, $\sigma_R = -\sigma_1$,这说明反射波与入射波的幅值相同但相位相反。忽略应力波的衰减,当入射波与反射波的波峰或波谷相遇时,应力峰值将叠加为入射值的 2 倍,对应的响应也相应增大。图 11 中 $x = 20$ cm 处冲击响应峰值为 1.13 倍无量纲单位, $x = 25$ cm 处的冲击响应峰值为 2.27 倍无量纲单位,与理论预测结论吻合。

4 结论

本文结合 LS-DYNA 仿真与冲击分离试验,通过对各冲击源单独解耦建模,研究了某典型火工分离螺母冲击来源及传播特性,得到以下结论:

(1) ALE 流固耦合算法可以较为准确地模拟火工分离螺母的工作解锁过程并预示冲击响应。

(2) 引入峰值贡献度和全频段贡献度两个量化

指标,对不同冲击源对整体冲击响应的贡献进行了定量评价。不同冲击源产生的应力波在空间中的传播特性不同,爆炸产生的应力波频率高、传播时衰减迅速、影响范围较小;撞击产生的应力波频率较低、传播时衰减较慢,影响范围较大。这些特性导致不同位置各冲击源对响应的贡献存在差异。

(3) 分析了不同冲击源产生的应力波在结构中的传播特性。分离螺母近场冲击响应主要来自装药爆燃,中远场冲击响应主要来自锁紧环与底座之间的撞击。由于在实际工程中更为关注火工分离装置的中远场冲击环境,可通过设计吸能缓冲装置减小撞击冲击,从而改善分离螺母产生的冲击环境。

(4) 冲击应力波在结构边界处发生反射可能使局部冲击响应峰值增大,在制定航天器冲击环境条件时应考虑这一因素。

参考文献:

- [1] 苏晗. 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.
- [2] 张威,杨昭,刘群,等. 液压缓冲设计的火工分离螺母内弹道仿真[J]. 火工品,2023(2): 26-32.
- [3] 杜龙飞,马玉环,陈慧能,等. 爆炸螺栓作用过程的仿真研究[J]. 火工品,2015(3): 29-32.
- [4] 刘怀亮,崔德林,阎绍泽. 无污染爆炸螺栓动态断裂特性的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版),2015,55(3):292-297, 303.
- [5] 蒋文灿,梁斌,卢永刚,等. 针刺式无污染型爆炸螺栓分离特性及机理研究[J].火工品,2023(4): 1-6.
- [6] Niu L, Tu H, Dong H, et al. Separation reliability analysis for the low-shock separation nut with mechanism motion failure mode [J]. Aerospace, 2022(9): 156.
- [7] 王军评,毛勇建,黄含军. 点星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): 9-13,32.
- [8] Lee J, Hwang D, Jang J, et al. Pyroshock prediction of ridge-cut explosive bolts using hydrocodes [J]. Shock and Vibration, 2016: 1 218 767.

- [9] 杨宁,范伯钧,洪青峰.分离螺母冲击环境数值仿真研究[J]. 载人航天,2017,23(6): 776-783.
- [10] Choi S, Kwon S, Lee S, et al. Shock response of precision linear shaped charge in a multistage rocket system [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2023 (24): 92-104.
- [11] Wang X, Qin Z, Ding J, et al. Finite element modeling and pyroshock response analysis of separation nuts [J]. Aerospace Science and Technology, 2017(68): 380-390.
- [12] 冯丽娜,李东,田建东,等. 低冲击剪切式膨胀管分离装置设计与分析[J]. 宇航总体技术,2022,6(5): 62-70.
- [13] Wu Y, Lu Y, Yang H, et al. Multidisciplinary structural optimization of low-pyroshock separation nuts for aerospace [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2023, 60(2): 508-519.
- [14] 李燕华,温玉全,李元,等. 剪切式爆炸螺栓火工冲击作用解耦试验及特性[J]. 含能材料,2017,25(10): 853-859.
- [15] Kozmic J, Lee H S. Shock measurement of a pyrotechnic separation nut [C]// 51st AIAA/ASE/ASEE Joint Propulsion Conference. Orlando, FL, 2015.
- [16] 汤林,杨树涛,林鑫,等. 中小型航天器爆炸螺栓解锁冲击响应特性[J]. 兵工学报,2021,42(增刊1): 40-45.
- [17] 赵象润,严楠,郭崇星,等. 节流孔对分离螺母火工冲击的影响[J]. 含能材料, 2021,29(6): 535-542.
- [18] Wang J, Xiong S, Wen Y, et al. Numerical simulation of actuation processes and decoupling pyroshock of a pressure cartridge-type pin puller [J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2023, 42(3): 1 363-1 378.
- [19] 杨昊天. 包带式分离结构的冲击源耦合效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2018.
- [20] Xiong S, Li Y, Ye Y, et al. Quantitatively decoupling the impact of preload and internal mechanism motion on pyrotechnic separation shock [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2021(22): 1 106-1 117.
- [21] 胡勇,张志峰,胡振兴,等. 一种用于点式分离装置的冲击测试平台及其测试方法: 中国,CN102879166B[P]. 2015-05-27.
- [22] GB/T 29716.4-2018 机械振动与冲击 信号处理 第4部分: 冲击响应谱分析[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2018.
- [23] Zhao H, Liu W, Ding J, et al. Numerical study on separation shock characteristics of pyrotechnic separation nuts [J]. Acta Astronautica, 2018(151): 893-903.
- [24] 张欢,刘天雄,李长江,等. 航天器火工分离螺母的火工冲击环境数值仿真研究[J]. 航天器环境工程,2014,31(4): 363-368.
- [25] 赵欣,丁继锋,韩增尧,等. 航天器火工冲击模拟试验及响应预示方法研究综述[J]. 爆炸与冲击,2016,36(2): 259-268.
- [26] 吴永亮,何玲,樊世超,等. 航天动力学环境设计与试验指南 [M]. 第1版. 北京: 科学出版社, 2018.
- [27] NASA-HDBK-7005 Dynamic environmental criteria[Z]. NASA, 2001.