

文章编号: 1006-9941(2017)10-0853-07

剪切式爆炸螺栓火工冲击作用解耦试验及特性

李燕华¹, 温玉全¹, 李元¹, 熊诗辉¹, 侯会民², 李志良^{1,2}

(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. 北方特种能源集团西安庆华公司, 陕西 西安 710025)

摘要: 为了辨识剪切式爆炸螺栓冲击产生的来源, 设计了有预紧力、无预紧力、无活塞剪切和仅火药燃烧四种不同状态的爆炸螺栓, 实现了火药燃烧、活塞剪切薄弱面、活塞行程末端碰撞和预紧力释放四种冲击源的解耦, 利用压阻加速传感器测量其在 60 cm×60 cm×1 cm 的等效铝板上距冲击源中心 15 cm 处的响应加速度, 以此计算出了各冲击源的冲击响应谱, 并与整个事件的冲击响应谱进行对比分析。结果表明, 不同冲击源的特性不同, 火药燃烧诱导的冲击主要表现为高频, 而活塞剪切薄弱面和活塞行程末端碰撞引起的冲击集中在中低频。在整个频域内, 预紧力释放是整个冲击响应输出的主要贡献者, 大约占 57.51%, 而火药燃烧、活塞剪切和活塞碰撞三个冲击源的贡献相当。

关键词: 爆炸螺栓; 火工分离; 火工冲击; 冲击响应谱

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.10.011

1 引言

爆炸螺栓是一类结构简单、可靠度高的点式火工分离装置, 广泛应用于航空航天、导弹武器以及水下运载系统, 如助推器分离、级间分离、整流罩分离和太阳帆板展开等^[1]。国内外设计了多种类型的爆炸螺栓, 按分离机制可分为爆炸型和压力型。爆炸型的爆炸螺栓主要利用炸药爆炸产生的冲击波将螺栓本体薄弱环节炸断, 从而实现分离, 如脊断式爆炸螺栓^[2], 炸断削弱槽式爆炸螺栓^[3]。压力型爆炸螺栓主要靠火药产物在螺栓腔内形成高压推动活塞, 并且利用活塞冲击剪切实现分离, 如推断削弱槽式爆炸螺栓^[4]、剪切式爆炸螺栓^[5]和剪切销式爆炸螺栓^[6]。压力型爆炸螺栓因其对连接结构冲击扰动小、无多余碎片和无产物泄露等优点, 得到广泛使用^[7]。

与众多火工装置一样, 爆炸螺栓工作时会产生高频率和高强度的瞬时冲击, 通常称之为火工冲击。尽管火工冲击很少对航天器结构本身造成损伤, 但是会引起安装在航天结构上的精密光学和电子等仪器失

效, 继而给整个航天任务造成灾难性的后果^[8-9]。为减缓火工冲击引起的损伤, 许多研究者在火工冲击传播和损伤评估上进行了大量研究, 并出台了多项试验标准^[8, 10-12]、试验模拟技术^[13], 而关于火工冲击产生机理的研究较少。以往的冲击防护措施也大多集中在冲击传播路径隔离和仪器安装隔离^[14-15]。随着微小型卫星、深空探测器等轻质结构的大量使用, 以上两种方式都受到限制, 而从源头(分离装置本身)上来降低冲击的措施越来越得到青睐。

韩国 Jae-Hung Han 团队^[2, 16-18]自 2004 年以来利用 AUTODYN 程序对“ridge-cut”(“脊断”)型爆炸螺栓火工冲击机理开展了深入分析和研究, 分析了诸如装药量、螺栓本体与夹具配合间隙、脊角度和脊位置等对分离冲击特性的影响, 提出了三种降冲击方案, 均是从阻断或消散高能炸药爆轰冲击波传播的角度来达到降低输出冲击的目的, 但是他们的研究没有考虑预紧力引起的冲击响应。2015 年, 黄含军等^[19]通过 LS-DYNA 数值模拟, 分析了爆炸型螺栓预紧力对冲击响应影响, 表明爆炸螺栓预紧力在一定范围内变化对中远场的冲击响应影响较小。较之以上爆炸型爆炸螺栓, 压力型爆炸螺栓由于涉及内部部件运动, 产生冲击的机制更为复杂, 目前公开的研究更少。2011 年, 叶耀坤等^[20]通过结构尺寸优化和减少装药量两种技术途径, 使某型火工解锁螺栓的分离冲量从 1.667 N·s 降低到了 0.4 N·s, 分离冲击得到大幅度降低。2015

收稿日期: 2017-05-16; 修回日期: 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助(U1530135)

作者简介: 李燕华(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事火工分离技术研究。e-mail: 3120130105@bit.edu.cn

通信联系人: 李志良(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事火工分离技术研究。e-mail: andylee20@163.com

年,刘怀亮等^[21]通过 LS-DYNA 仿真提取螺栓体、推杆的速度和加速度曲线计算得到了爆炸螺栓的爆炸冲击力与冲量,但是这并不是爆炸螺栓对外全部的响应输出。

为此,本研究对冲击输出响应试验和加速度谱进行分析,研究典型剪切式爆炸螺栓的冲击响应机理。通过设计有预紧力、无预紧力、无活塞剪切和仅火药燃烧等四种状态的爆炸螺栓冲击响应试验,解耦出火药燃烧、活塞剪切薄弱面、预紧力释放和活塞行程末端撞击四种冲击源的冲击响应谱,并与整体输出响应谱进行对比分析,以获得各冲击源的响应特征和占比。

2 结构及工作原理

剪切式爆炸螺栓结构如图 1a 所示,主要由点火器、火工组件(含主装药:2/1 樟枪药)、活塞、密封圈和本体组件(螺栓体和锁紧螺母等)组成,本体材料为 1Cr11Ni2W2MoV 耐热钢,活塞材料为 60Si2MnA 弹簧钢。螺栓本体上预制一个薄弱面,它能够承载一定载荷。在连接状态时,螺栓本体通过螺纹安装(图 1b),螺杆穿过两连接体,并在连接体一侧通过锁紧螺母施加一定的预紧力,将上下两级可靠连接。

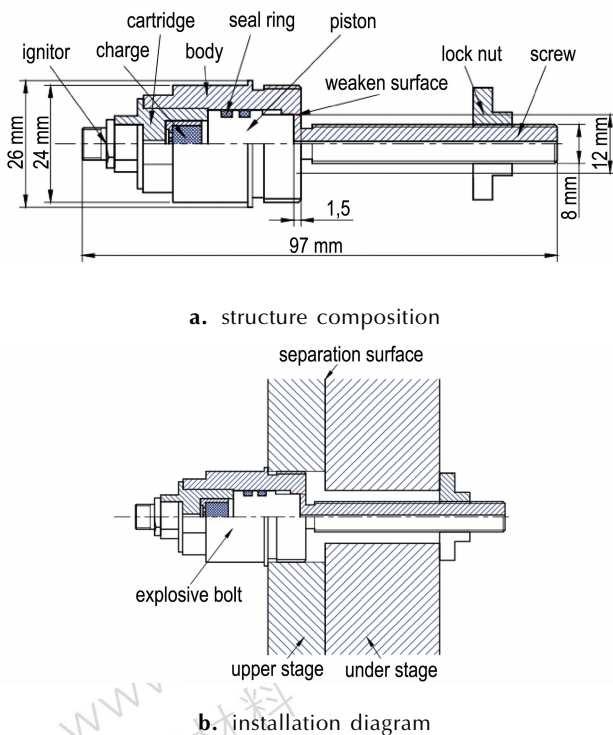


图 1 剪切式爆炸螺栓结构示意图

Fig.1 Structural schematic diagrams of shear type explosive bolt

剪切式爆炸螺栓的分离过程如图 2 所示。当目标体需要分离时,点火器被通电起爆,点燃主装药产生高

温高压气体(图 2a),推动活塞向前运动,螺栓本体在薄弱面处断裂,并释放预紧力(图 2b)。当薄弱面完全被剪断,活塞带着螺杆加速向前运动,至行程末端撞击本体台肩而停止运动(图 2c),随后螺杆完全脱离活塞向前飞出,实现完全分离(图 2d)。两个密封圈被放置在活塞的周向,将燃烧产物封闭在主体腔中,以实现无污染分离。

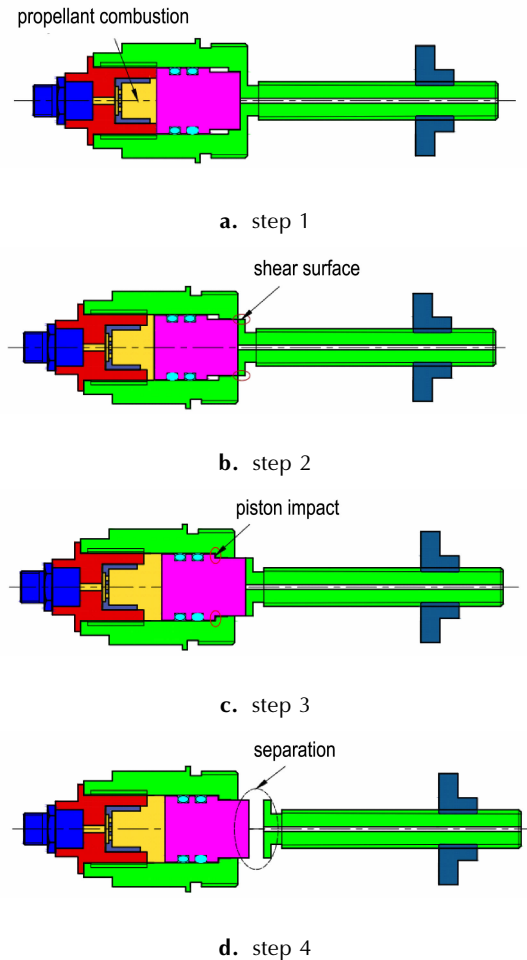


图 2 剪切式爆炸螺栓分离机制示意图

Fig.2 Schematic diagrams of separation mechanism for shear type explosive bolt

根据剪切式爆炸螺栓的分离火工冲击机制(图 2),分析其冲击产生的来源主要包括:(1)火药燃烧压力冲击;(2)活塞剪切薄弱面;(3)螺栓预紧力释放;(4)活塞行程末端撞击。由于剪切式爆炸螺栓冲击产生的来源比较复杂,需设计专门的试验对它们的冲击响应特性进行解耦分析。

分离前、后的剪切式爆炸螺栓实物图如图 3 所示。由图 3 可见,螺栓本体没有明显变形,分离面非常整齐,没有多余的碎片,实现了完美清洁分离。

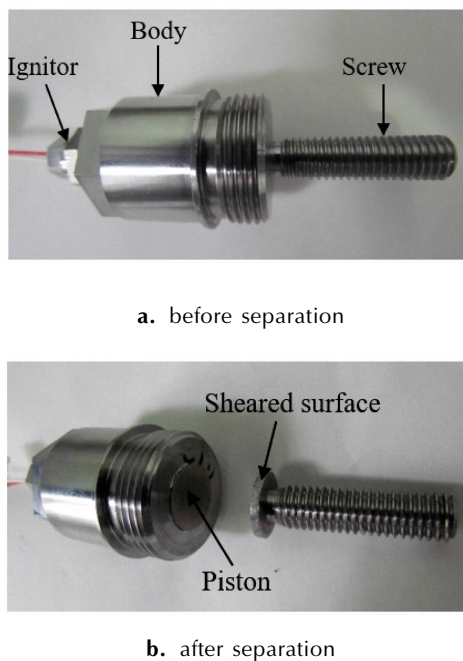


图3 剪切式爆炸螺栓分离前后的图片
Fig.3 Pictures of shear type explosive bolts before and after separation

3 冲击响应测量方法

火工冲击理论上可以用瞬态力、应变、速度和加速度来表征,测量方法从传统接触式点测量发展到了现代的非接触式全区域测量,如应变计、加速度计、激光多普勒振动计(LDVs)、激光多普勒加速度计(LDAc)和超高速扫描摄像机等方法^[13]。从方便性和成本考虑,利用加速度计来测量剪切式爆炸螺栓分离时在结构上引起的冲击振动加速度,然后计算出相应的冲击响应谱。

3.1 试验平台与设置

爆炸螺栓的输出冲击特性利用一块 60 cm × 60 cm × 1 cm 的铝板(利用四根松紧绳悬挂)来测试。爆炸螺栓先通过螺纹孔安装在一块 4 cm × 4 cm × 1 cm 铝安装块上,而铝安装块通过 4 个 M8 的螺栓连接到冲击测试铝板上。锁紧螺母在测试板的另一侧给爆炸螺栓施加预紧力。为了准确施加载荷以及记录预紧力

表1 加速度传感器性能参数

Table 1 Performance parameters of acceleration sensor

model number	transverse sensitivity	amplitude (linearity±10%)	frequency range (flatness±10%)	resonant frequency	electric insulation	mounting
PCB 3501B260KG	≤3%	±60 kg	0-20 kHz	>120 kHz	Yes	1/4-28 Stud

释放过程,在测试板和锁紧螺母之间放置一个环形力传感器。压阻加速度计(型号 PCB 3501B260KG)被安装在离爆炸螺栓轴中心的 15cm 处,用以记录爆炸螺栓的近场输出冲击响应。冲击测试安装示意图如图 4 所示,测试现场见图 5。

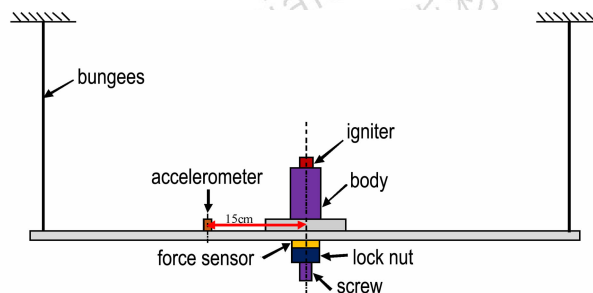


图4 爆炸螺栓输出冲击测量试验平台安装结构示意图
Fig.4 Schematic diagram of output shock measurement test platform installation structure for explosive bolts

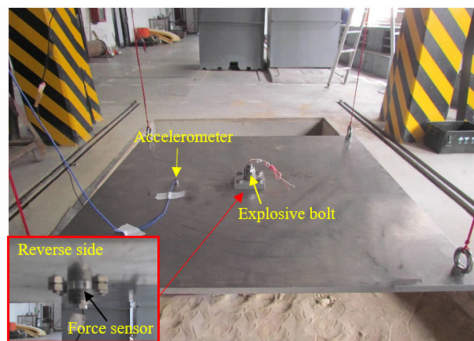


图5 爆炸螺栓输出冲击测量实物图
Fig.5 Output shock measurement scene of explosive bolts

3.2 加速度传感器

GJB 150.27-2009 对爆炸分离冲击响应测量所用加速度计作了规定:(a) 横向灵敏度小于或等于 5%;(b) 在试验要求的峰值加速幅值的 5% ~ 100% 范围内,幅值线性度在 10% 以内;(c) 在 10 Hz ~ 20 kHz 频率范围内,频率响应的平直度在 ±10% 以内;(d) 电气绝缘,如无则应通过绝缘螺钉或绝缘胶固定到结构上。所用 PCB 3501B260KG 的基本性能参数见表 1。从表 1 可以看出,所用传感器满足被测爆炸螺栓冲击响应试验要求。

3.3 数据采样

在火工冲击试验中,经常存在高频噪声信号混叠低频导致数据异常的情况,常表现为冲击响应谱低频段上偏,目前避免数据混叠的两种常用方法:(1)采用模拟抗混滤波器,其排除混叠效果好,但也存在体积大、价格昂贵等缺点;(2)过采样,即使用大于奈奎斯特采样频率的频率对输入信号进行采样,使得量化噪声大部分分布在关心频率之外的高频部分。为了减少试验成本,本研究采用第二种方法,信号采集仪上每个通道均设置过采样率 1 MHz。

3.4 典型试验数据

力传感器信号、发电电压信号和加速度计信号同步记录。典型的数据曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,点火器通电后被起爆,引燃主装药推动活塞剪切薄弱面,在 0.34 ms 时预紧力开始释放,大约 0.4 ms 后活塞完全将薄弱面剪断,预紧力完全释放。加速度第一个峰值加速度约为 1.1×10^4 G,峰值时间约为 0.52 ms,发生在预紧力释放过程中。由于爆炸螺栓整个作用时间非常短,小于 1 ms,故从加速度时间历程上很难区分出每个事件引起的冲击响应,尤其是预紧力释放和活塞剪切断裂应力释放,两者相伴而生。

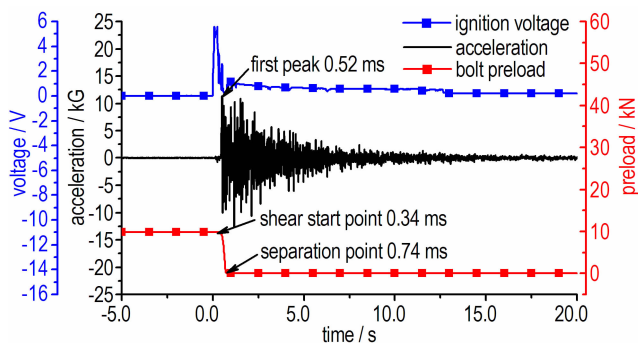


图 6 爆炸螺栓测量输出时间历程

Fig. 6 Measurement output time history of explosive bolts

3.5 冲击响应谱

为了评估冲击损伤的潜能,常用冲击加速度的响应谱(SRS)来描述^[22]。采用 1981 年由司摩伍德^[11]提出的改进递归数字滤波方法进行计算,编写了相应的 MATLAB 计算程序。为了消除高频数据噪声、混叠以及低频数据漂移,在将冲击加速度历程转换为响应谱之前,先对其进行带通滤波,滤波器为 8 阶巴通沃斯,上下截至频率分别为 70 Hz 和 30 kHz。冲击响应谱分析频率范围为 100 Hz ~ 15 kHz,以 1/12 倍频程的频率间距和阻尼比 $\xi=0.05$ (即 $Q=10$) 进行分析计算。

对试验数据进行 SRS 处理,得到的典型冲击响应谱如图 7 所示。从图 7 中可以看出,爆炸螺栓的最大频域冲击响应加速度大于 3.0×10^4 G,拐点频率大于 8000 Hz,为典型的高频、高幅值响应。

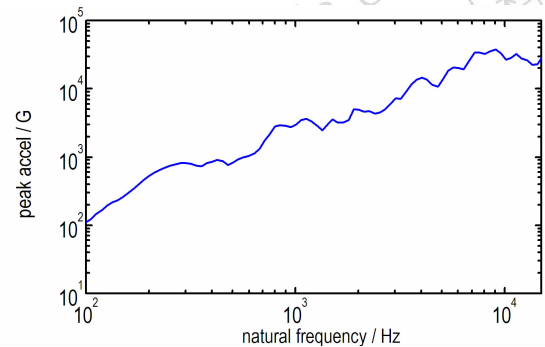


图 7 剪切式爆炸螺栓的典型冲击响应谱

Fig. 7 Typical shock response spectrum of shear type explosive bolt

4 冲击来源解耦分析

4.1 试验设计

为了辨识出四个冲击源的各自响应,设计了四个状态不同的爆炸螺栓进行冲击输出试验,每个状态试验三发样品,如表 2 所示。第一种螺栓状态是预紧力 10 kN,用以捕获来自火药燃烧、活塞剪切薄弱面、预紧力释放和活塞末端碰撞的冲击响应。第二种螺栓状

表 2 四种冲击源解耦试验设计方案

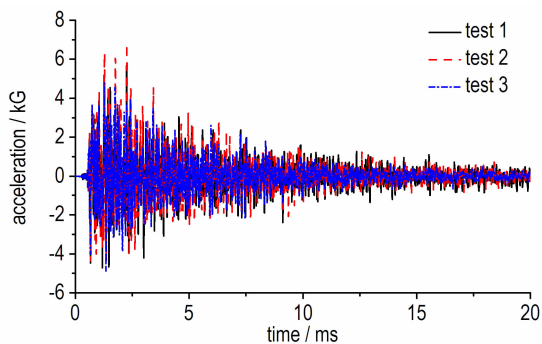
Table 2 Design scheme for decoupling test of four kinds of shock source

state number	schematic	contain source
1		propellant combustion, piston shear, piston impact, preload release
2		propellant combustion, piston shear, piston impact
3		propellant combustion, piston impact
4		propellant combustion

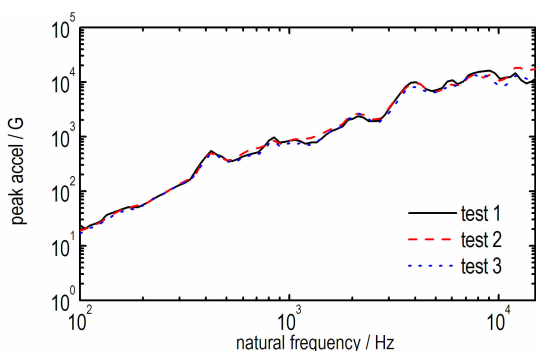
态是不施加预紧力,此时预紧力对冲击的贡献被剔除。第三种螺栓状态是先将螺杆与本体分离,此时冲击的主要来源是火药燃烧和活塞末端碰撞。最后一个螺栓本体不仅螺杆与本体已经分离,而且将活塞放置行程末端,即活塞不再撞击本体台肩,故输出冲击只来自火药燃烧。

4.2 结果及分析

为了提高数据的可信度,每种状态进行了三发试验。图8是第二种状态下三发试验的输出冲击加速度历程和相应的冲击响应谱。由于火工事件本身的不可重复特性,三次试验结果存在一定差异,但这种差异非常小,说明所研究产品在此状态下的一致性较好。其它状态下,有相似的结果,不再赘述。每种状态下三发试验的冲击响应谱的平均值用于下文的冲击源解耦分析中。



a. acceleration time histor



b. shock response spectrum

图8 第二种状态爆炸螺栓的三发试验结果对比

Fig. 8 Comparison of three test results of explosive bolt in state 2

将四种状态爆炸螺栓的冲击响应谱进行对比分析,如图9所示。从图9中可以看出,在同频率下 $SRS(State 1) > SRS(State 2) > SRS(State 3) > SRS(State 4)$,这由于各状态试验包含的冲击源多少不同导致的。

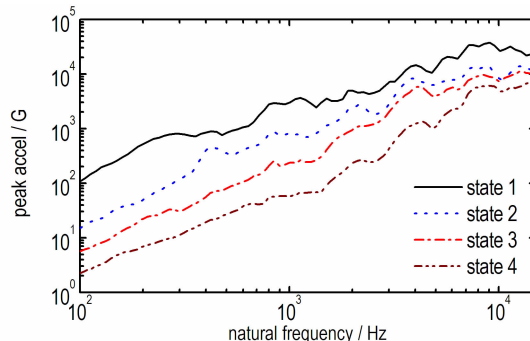


图9 不同状态下爆炸螺栓输出冲击响应谱对比

Fig. 9 SRS comparison of explosive bolts under different states

根据表2中展示了每个试验各自包含的冲击源,由此可计算出各冲击源引起的冲击响应,如下:

$$SRS(PC) = SRS(State 4) \tag{1}$$

$$SRS(PI) = SRS(State 3) - SRS(State 4) \tag{2}$$

$$SRS(PS) = SRS(State 2) - SRS(State 3) \tag{3}$$

$$SRS(F1) = SRS(State 1) - SRS(State 2) \tag{4}$$

其中, $SRS(State 1)$, $SRS(State 2)$, $SRS(State 3)$, $SRS(State 4)$ 分别是四个状态试验输出的冲击响应谱; $SRS(PC)$, $SRS(PI)$, $SRS(PS)$, $SRS(F1)$ 分别是计算得到的火药燃烧、活塞行程末端撞击、活塞剪切薄弱面和预紧力释放引起的冲击响应谱。

计算得到的不同冲击源的冲击响应谱(SRS)如图10。

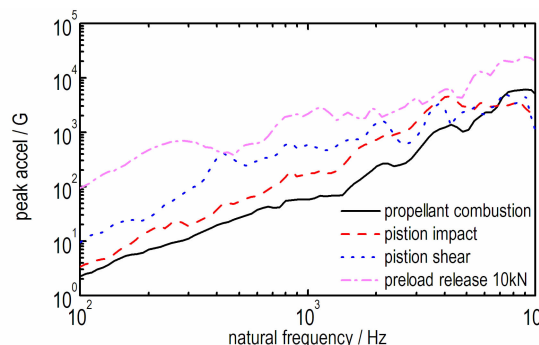


图10 估算的不同冲击来源的输出冲击响应谱

Fig. 10 Calculated SRS spectra of different shock source

为了更加清晰地表现各冲击源的冲击响应特征,以第一种状态试验的冲击响应谱为基准,计算各冲击源输出响应的占比,如图11所示。从图10和图11均可以看出,预紧力释放引起的冲击在整个频域内占主导作用。活塞剪切引起的冲击主要集中在5000 Hz以内,这是由于剪切薄弱面实际上是一个材料塑性变形失效过程。在中低频内,除预紧力以外,活塞撞击占主导,这是由于活塞撞击不仅具有金属-金属高速撞击

的特点,而且还伴有材料的塑性变形。在中低频,火药燃烧冲击贡献不明显,但是在高频(高于7000 Hz)内,却高于活塞剪切和活塞撞击。此外,可以发现火药燃烧诱导冲击主要在高频区域,这也符合燃烧冲击波高频率的特点。

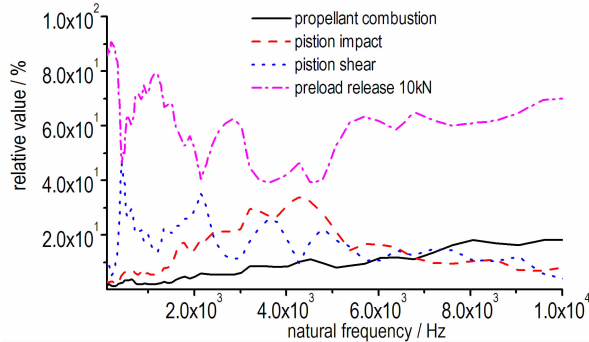


图 11 不同冲击来源的冲击响应谱相对值

Fig. 11 Relative value of SRS spectra of different shock source

为了在整个频域内综合评估各冲击源的贡献,将图 11 中各曲线值在整个频域进行平均,结果见表 3。从表 3 中可以看出,剪切式爆炸螺栓的预紧力释放是主要的冲击来源,约占 57.51%,其它冲击源的贡献相当。

表 3 爆炸螺栓冲击源解耦分析结果

Table 3 Decoupling analysis results of shock source for explosive bolts

shock source	proportion / %
propellant combustion	14.43
piston shear	13.05
piston impact	15.01
preload release	57.51

5 结论

(1) 通过对剪切式爆炸螺栓的分离过程分析,得到了剪切式爆炸螺栓冲击产生的来源包括:(a)火药燃烧;(b)活塞剪切薄弱面;(c)螺栓预紧力释放;(d)活塞行程末端撞击。设计了有预紧力、无预紧力、无活塞剪切和仅火药燃烧四种不同工况的爆炸螺栓进行试验,解耦出了来自火药燃烧、活塞剪切薄弱面、活塞行程末端碰撞和螺栓预紧释放的冲击,并计算出了各自的冲击响应谱。

(2) 不同冲击源的冲击特性不同,火药燃烧诱导的冲击主要表现为高频,而活塞剪切薄弱面和活塞行程末端碰撞引起的冲击集中在中低频,预紧力释放引

起的冲击在整个频域内占主导作用。

(3) 预紧力释放是整个冲击响应输出的主要来源,大约占 57.51%,其它三个冲击源的贡献相当。在进行爆炸螺栓降冲击设计时,在不降低连接分离可靠性的基础上,应首先从预紧力上采取措施,如在连接处添加多层垫片以消散释放的预应变能等;其次可在在活塞前端添加缓冲装置用以吸收活塞撞击能。

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,2012:36-44.
LIU Zhu-sheng, WAN Xiao-jun, ZHU Xue-chang, et al. Aerospace pyrotechnic devices [M]. Beijing: Chinese Astronautics Press, 2012: 36-44.
- [2] Lee Y J. The interpretation of separation mechanism of ridge-cut explosive bolt using simulation programs [J]. *Journal of the Society of Magnetic Resonance in Medicine*, 2006, 56(2): 395-410.
- [3] 李宇. 削弱槽式爆炸螺栓的结构设计及作用过程的数值分析[D]. 南京:南京理工大学,2010.
LI Yu. The structural design and numerical analysis of explosive bolt with impair slot [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.
- [4] LI Yan-hua, LI Xiao-gang, WEN Yu-quan, et al. Optimal design of an explosive separation device based on LS-DYNA [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2016(V25): 24-28.
- [5] 叶天源,王毅,汪锡发,等. 水下爆炸螺栓设计探讨[J]. 水雷战与舰船防护,2007,15(4):11-14.
YE Tian-yuan, WAN Yi, WANG Xi-fa, et al. Discussion on the design of underwater explosive bolt [J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defense*, 2007, 25(4): 11-14.
- [6] 侯传涛,尹伟,唐陶,等. 典型爆炸螺栓承载能力研究[J]. 强度与环境,2011,38(4):32-37.
HOU Chuan-tao, YI Wei, TANG Tao, et al. Strength study on a typical explosive bolt [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2011, 38(4): 32-37.
- [7] 刘怀亮,阎绍泽. 火箭连接结构中爆炸螺栓的发展现状与应用分析[J]. 机械设计,2012,29(增刊):143-151.
LIU Huai-liang, YAN Shao-ze, [J]. *Journal of Machine Design*, 2012, 29(Suppl): 143-151.
- [8] NASA-STD-7003A. Pyroshock test criteria [S]. USA, 2011.
- [9] Moening C J. Pyrotechnic shock flight failures [C] // Institute of environmental sciences pyrotechnic shock tutorial program, 31st Annual Technical Meeting, Washington D, C, NASA, 1985: 1-7.
- [10] MIL-STD-810G. Environmental engineering considerations and laboratory [S]. USA, 2008.
- [11] IEST RP-DTE032. 2-2009 Pyroshock Testing Techniques [S]. USA, 2009.
- [12] GJB 150.27-2009. 军用装备实验室环境试验方法 第27部分:爆炸分离冲击试验 [S]. 北京:中国人民解放军总装备部,2009.
GJB 150.27-2009. Laboratory environmental test methods for military materiel—Part 27: Pyroshock test [S]. Beijing: The Chinese people's liberation army (PLA) in the equipment department, 2009.

- [13] Lee J R, Chia C C, Kong C W. Review of pyroshock wave measurement and simulation for space systems [J]. *Measurement*, 2012, 45(4): 631–642.
- [14] 张欢, 李长江, 刘天雄, 等. 航天器火工冲击缓冲技术综述[C] // 全国机械行业可靠性技术学术交流会暨可靠性工程分会第五次全体委员大会, 2013: 220–229.
ZHANG Huan, LI Chang-jiang, LIU Tian-xiong, et al. Review of spacecraft pyroshock reduction technique [C] // The Academic Seminar on Reliability Technology of Machinery Industry. 2013: 220–229.
- [15] 张欢, 刘天雄, 李长江, 等. 航天器火工冲击环境保护技术现状与应用[J]. *航天器工程*, 2014, 23(2): 104–113.
ZHANG Huan, LIU Tian-xiong, LI Chang-jiang, et al. Status and application analysis of spacecraft pyroshock protection techniques [J]. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(2): 104–113.
- [16] Lee J, Han J H, Lee Y J, et al. Separation characteristics study of ridge-cut explosive bolts [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014(39): 153–168.
- [17] Lee J, Han J H, Lee Y J, et al. A Parametric Study of Ridge-cut Explosive Bolts using Hydrocodes [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2015, 16(1): 50–63.
- [18] Lee J, Han J H, Lee Y J, et al. Design of Low-Shock Ridge-Cut Explosive Bolts Based on Separation Behavior Analysis [C] // Proceeding of The 40th International Pyrotechnic Seminar, Colorado Springs, USA, 2014: 44–56.
- [19] 黄含军, 王军评, 毛勇建, 等. 爆炸螺栓预紧力对冲击响应影响分析[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(16): 166–169.
HUAN Han-jun, WANG Jun-ping, MAO Yong-jiang, et al. Influence of pretightening force of explosive bolts on impulse response [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(16): 166–169.
- [20] 叶耀坤, 严楠. 降低火工解锁螺栓分离冲击的技术研究[J]. *火工品*, 2011(1): 13–16.
YE Yao-kun, YAN Nan. Study on technology to low separation impact of pyrotechnic separator [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(1): 13–16.
- [21] 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.
LIU Huai-liang, CUI Dei-lin, YAN Shao-ze. Numerical simulation of the dynamic fracture of non-contamination explosive bolts [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(3): 292–297.
- [22] Pierol A G, Paez T L, Harris C M. Harris' shock and vibration handbook, 6th edition [M]. New York: McGraw-Hill, 2010.

Decoupling Test and Characteristic of Pyrotechnic Shock Effect of Shear Type Explosive Bolt

LI Yan-hua¹, WEN Yuan-quan¹, LI Yuan¹, XIONG Shi-hui¹, HOU Hui-min², LI Zhi-liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. CNGC Xi'an Qinghua, North Special Energy Group Co. Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: To identify the shock generated sources of shear type explosive bolt, four kinds of explosive bolts with different states including preload, no preload, no piston shear and only propellant combustion, were designed. The decoupling of four kinds of shock sources including the collision of propellant combustion, piston shear weak surface, end of piston stroke and preload release, was realized. Their acceleration response at 15 cm from the shock source center on 60 cm×60 cm×1 cm equivalent aluminum plate were measured by using the piezoresistive accelerometer. On this account, the shock response spectrum of various source was calculated and compared with the overall shock response spectrum. Results show that the characteristics of different shock sources are different, the shock induced by propellant combustion is mainly caused by high frequency, while the shock caused by the collision of the piston shear weak surface and the end of piston stroke is concentrated in medium and low frequency. The preload release is major contributor to the overall shock response output, accounting for approximately 57.51%, while the contributions of three shock sources of propellant combustion, piston shear and piston impact are equivalent.

Key words: explosive bolt; pyrotechnic separation; pyrotechnic shock; shock response spectra

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.10.011