

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.02.11

小口径火炮弹底压力测试系统抗高过载研究

王宇, 裴东兴*, 张瑜, 沈大伟, 赵小龙

(中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对小口径火炮的高过载环境和狭小测试空间可能导致弹底压力测试系统芯片失效, 导线以及焊点脱落和断裂的问题, 开展弹底压力测试系统抗高过载研究。建立了芯片失效和测试仪器隔离缓冲机理模型, 研究了芯片不同安装方向的抗高过载性能, 以及不同缓冲材料的抗高过载性能, 得出了芯片抗过载能力与安装方向的关系, 以及不同缓冲材料的抗过载性能的差异; 在此基础上提出了环氧树脂真空灌封方法, 解决了测试仪在高过载环境下导线以及焊点脱落和断裂的问题; 最后通过实弹测试验证了弹底压力测试系统的存活性和可靠性。研究结果对小口径火炮弹底压力测试系统的设计具有重要意义。

关键词: 测试; 火炮; 弹底压力; 抗高过载

中图分类号: TB93; TJ306*.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)02-0085-06

Research on anti-high-overload of projectile bottom pressure test system for small caliber gun

WANG Yu, PEI Dongxing*, ZHANG Yu, SHEN Dawei, ZHAO Xiaolong

(State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In view of the problem that the high overload environment and narrow test space of small caliber gun may lead to the failure of the chip, the shedding and fracture of the wire and solder joints of the projectile bottom pressure test system, the anti-high-overload research of the projectile bottom pressure test system was performed. The chip failure and isolation buffer mechanism model of the tester was established. The anti-high-overload performance of different mounting directions of the chip and different buffer materials were studied. The relationship between the chip's anti-overload capability and the installation direction, and the difference in the anti-overload performance of different buffer materials were obtained. The epoxy resin vacuum sealing method was proposed to solve the problem of shedding and fracture of wire and solder joint in high overload environment. Finally, the survivability and reliability of the projectile bottom pressure test system were verified by live ammunition test. The research results are of great significance to the design of the projectile bottom pressure test system for small caliber gun.

Key words: test; gun; projectile bottom pressure; anti-high-overload

0 引言

弹底压力是内弹道的关键参数, 直接影响火炮的发射性能^[1]。在小口径火炮弹底压力的测试中, 测试系统随弹丸高速发射, 并且撞击目标,

测试仪器会承受很大的冲击载荷^[2-4]。测试仪器常采用电路灌封和加缓冲垫的方法抗高冲击载荷, 而小口径火炮膛内狭小的测试空间限制了灌封材料的体积和缓冲垫的厚度, 给测试仪器的抗高过载防护设计带来了困难, 因此研究如何提高小口

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-02-22

基金项目: 山西省应用基础研究计划项目(201901D111148)

引用格式: 王宇, 裴东兴, 张瑜, 等. 小口径火炮弹底压力测试系统抗高过载研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 85-90.

Citation: WANG Y, PEI D X, ZHANG Y, et al. Research on anti-high-overload of projectile bottom pressure test system for small caliber gun [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (2): 85-90.



径火炮弹底压力测试系统的抗高过载能力具有重要意义。

弹载测试系统高冲击测试是支撑军工产品、核心器件研制、可靠性验证和评估评价的重要手段^[5]。因此,国内外已有不少研究人员对弹载测试系统的抗高过载性能进行研究。Verberne P等人^[6]研究了精确制导弹丸在冲击载荷下嵌入式集成电路芯片和印刷电路板(PCB)的生存能力,研究结果表明新设计的封装技术可以有效地保护微电子器件,提高其抗过载能力。Peng Tianfang等人^[7]在一篇专门针对冲击环境下MEMS的可靠性研究的综述文章中回顾了从2000年到2020年在冲击环境下MEMS的可靠性,填补了MEMS在冲击环境下可靠性研究的空白。Choi Y T和Yoon S W等人^[8-9]采用冲击塞或磁流变冲击隔离技术,通过吸收冲击能量来降低冲击载荷。于亚飞等人^[10]针对小口径武器发射时弹载元器件在高冲击下容易发生损坏失效的问题,对弹载模块电路应力进行分析,研究结果可为后续弹丸弹载模块的设计提供参考。王海霞^[11]对弹载记录仪在不同载荷形式以及有灌封气泡情况下的抗冲击特性展开了研究,为提高记录仪的抗冲击可靠性提供了参考。赵玉杰^[12]研究了高 g 值冲击下灌封电路系统的动态响应和失效机理,验证了灌封层对冲击振动的隔离与衰减效果。丁永红等人^[13]研究了高冲击载荷下弹载记录仪应力分布,为弹载记录仪可靠性研究提供了理论支撑。程祥利等人^[14]研究了高冲击载荷作用下弹载记录仪防护系统动力学响应特性,有效地指导了弹载记录仪的防护设计。曹娟等人^[15]研究了弹丸侵彻硬目标过程中冲击载荷与引信介质间的耦合动力特性,揭示了引信受冲击载荷变化规律,得出调整垫片厚度与结构化垫片相结合的引信防护优化设计方案能有效衰减冲击载荷。

在上述研究的基础上,本文结合弹底压力测试系统开展其抗高过载研究。建立了芯片失效和测试仪器隔离缓冲机理模型,研究了芯片不同安装方向的抗高冲击性能,以及不同缓冲材料的隔离缓冲能力,提出了环氧树脂真空灌封方法。研究结果对提高小口径火炮弹底压力测试系统的存活性和可靠性有重要指导意义。

1 机理分析

1.1 芯片失效机理

当芯片焊接位置与加速度方向垂直时,可以建立如图1所示的力学模型1^[16]。在高冲击下,芯片失效一般出现在最大弯矩和剪力的位置。设芯片长为 l_0 ,宽为 b_0 ,厚为 h_0 ,则芯片受到的分布载荷 q' 为

$$q' = \rho_x A_0 a_0 \quad (1)$$

式中: ρ_x 为芯片材料的密度; A_0 为芯片横截面积; a_0 为加速度载荷。

芯片受到的最大剪力 $Q_{\max}$ 和最大弯矩 $M_{\max}$ 分别为

$$Q_{\max} = \frac{1}{2} q' l_0 \quad (2)$$

$$M_{\max} = \frac{1}{12} q' l_0^2 \quad (3)$$

故,芯片受到的最大正应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{\frac{1}{12} q' l_0^2}{\frac{b_0 h_0^2}{2h_0}} = \frac{\rho_x l_0^2 a_0}{2h_0} \quad (4)$$

当芯片摆放位置与加速度方向平行时,可以建立如图1所示的力学模型2。芯片结构为静不定结构,两边固定端的形变量几乎为0,解变形协调方程为

$$\Delta l = \frac{\rho_x a_0 l^2}{2E_y} - \frac{R_0 l_0}{E_y A_0} = 0 \quad (5)$$

其端部支反力为

$$R_0 = \frac{1}{2} \rho_x a_0 l_0 A_0 \quad (6)$$

故,芯片受到的最大正应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{R_0}{A_0} = \frac{1}{2} \rho_x a_0 l_0 \quad (7)$$

将式(7)与式(4)相除,可以得到

$$n_0 = \frac{\frac{1}{2} \rho_x a_0 l_0}{\frac{\rho_x l_0^2 a_0}{2h_0}} = \frac{h_0}{l_0} \quad (8)$$

因为 $\frac{h_0}{l_0} < 1$,所以在同样的冲击作用下,芯片

垂直加速度方向放置所受的正应力大于平行加速度方向放置所受的正应力,更容易损坏。因此,电路板放置的位置最好与冲击方向平行。

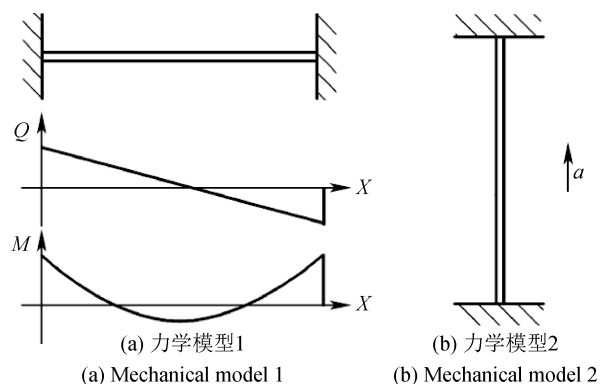


图 1 力学模型

Fig.1 Mechanical model

1.2 压力测试系统隔离缓冲机理

为了更好地提高弹底压力测试系统的抗高载荷能力,需要采用被动隔离缓冲技术。冲击隔离技术的原理是利用弹、塑性元件和阻尼元件储存或耗散冲击能量,来降低传递到内部电路模块中的加速度,进而使电路中的元器件、结构中的动应力远低于其失效极限值和材料的强度极限^[16]。所以,在电路模块与电路筒之间,以及电路筒与弹体之间加缓冲垫可以起到隔离缓冲的作用。

隔离缓冲作用机理的力学模型如图 2 所示。

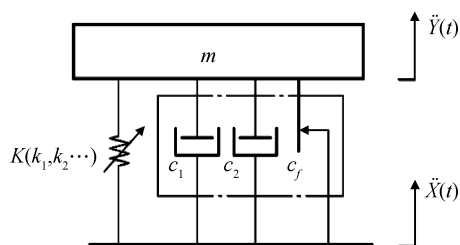


图 2 基础激励缓冲器的力学模型

Fig.2 Mechanical model of base excitation buffer

基础激励时的数学模型为^[17]

$$m'\ddot{z} + c_1\dot{z} + c_2\dot{z} + c_f\operatorname{sgn}(\dot{z}) + k_1z + k_3z^3 = -m'\ddot{x}(t) \quad (9)$$

式中: $\ddot{z}$ 为质量块相对加速度; $\dot{z}$ 为质量块相对速度; z 为质量块相对位移。

在此数学模型中,质量块 m' 与基础之间采用具有平方阻尼(阻尼系数为 c_1)、粘性阻尼(阻尼系数为 c_2)、库伦阻尼(阻尼系数为 c_f)、线性刚度(系数为 k_1)和立方刚度(系数为 k_3)耦合的物理

器件相连接,质量块和基础之间的动力传递通过这几个阻尼的相互耦合来衰减从而达到缓冲目的。根据数学模型,物理模型可以采用弹簧、橡胶、流体阻尼、库伦阻尼以及粘弹性阻尼的耦合来实现抗冲击。

2 实验研究

2.1 芯片冲击实验研究

电路中的晶振是由石英晶体振荡产生高度稳定的信号,容易受高冲击的影响,实验采用弹底压力测试系统 EXO3 型号的晶振在 Hopkinson 杆上进行冲击实验。将晶振焊接在电路板上,然后灌封在钢制壳体内,分别将壳体按照晶振与冲击方向垂直和平行方向分别固定在 Hopkinson 杆的端部,采用由低向高的冲击载荷,每冲击一次用示波器记录晶振的输出信号。部分实验结果如表 1 所示。

根据表 1 中的数据可知:与冲击方向垂直放置,加速度为 216000 g 时,晶振已经工作不正常;与冲击方向平行放置,加速度为 361000 g 时,晶振工作不正常。可以得出结论:与冲击方向平行放置的芯片抗冲击性能要比垂直放置的芯片高,但由于样本较少,无法精确得出晶振失效的加速度值。

表 1 晶振冲击实验结果统计

Tab.1 Statistics of crystal oscillator shock experiment results

芯片安装方向	加速度	芯片损坏情况
与冲击方向垂直	183000g	工作正常
与冲击方向垂直	216000g	工作不正常
与冲击方向平行	332000g	工作正常
与冲击方向平行	361000g	工作不正常

2.2 隔离缓冲材料实验研究

分别将珍珠棉(EPE)、PE棉、橡胶垫、羊毛毡四种缓冲材料在冲击台上做隔离缓冲实验,实验实物如图 3 所示,将四种厚度相同的缓冲物质分别放在冲击台上,每次固定冲击锤相同高度去冲击缓冲垫,在冲击台上安装好标准加速度传感器用来测试加速度信号,得到不同缓冲垫下加速度信号曲线如图 4 所示,实验结果如表 2 所示。

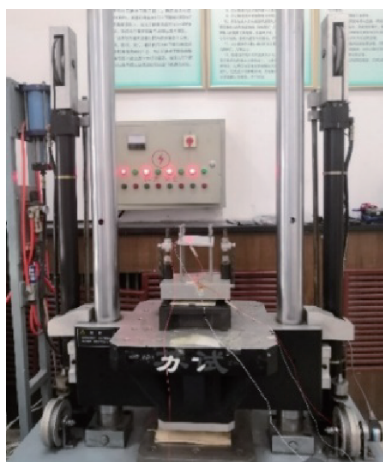


图3 隔离缓冲实验实物图

Fig.3 Picture of isolation buffering experiment

表2 加速度测试实验结果

Tab. 2 Experimental results of acceleration test

缓冲材料	最大加速度值	振荡幅度
羊毛垫	2422g	-919g~1203g
珍珠棉	2185g	-1101g~1076g
橡胶垫	1251g	-487g~140g
PE棉	2177g	-1014g~856g

根据表2中数据的对比可知,材料按最大缓冲加速度幅值从小到大排列为:橡胶垫、PE棉、珍珠棉(EPE)和羊毛垫;按振荡幅度从小到大排列为:橡胶垫、PE棉、羊毛垫和珍珠棉(EPE)。因为橡胶易成型、阻尼大,能同时承受多方向载荷,并且变形为非线性,不易压死,所以橡胶垫加速度最大缓冲幅值以及过滤振荡信号是这几种缓冲材料中最优的,PE棉和珍珠棉(EPE)材料属性非常接近,所以缓冲效果也是非常接近的。经过分析,得出橡胶垫作为测试仪器的隔离缓冲物质是非常不错的选择。

2.3 环氧树脂真空灌封

将一套加速度测试仪的电路用环氧树脂灌封在机械壳体中,另一套加速度测试仪的电路直接放在机械壳体中,分别固定在冲击台上同样高度进行冲击实验,逐渐增大冲击锤的高度,当加速度大约为50000 g时,用环氧树脂灌封的加速度测

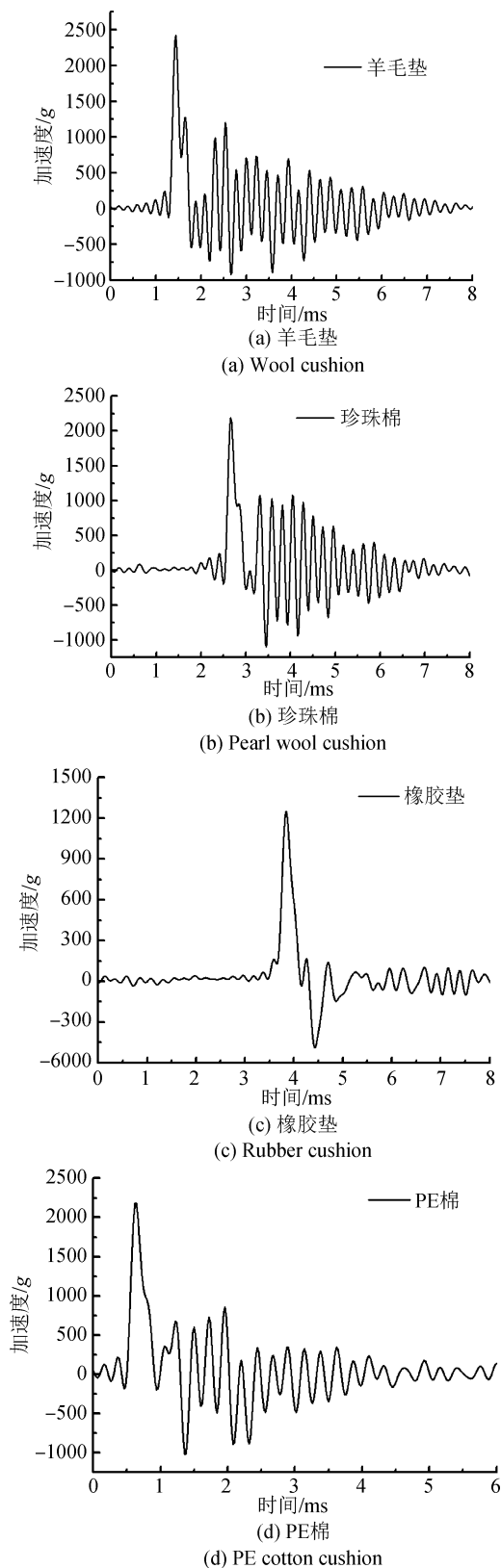


图4 不同缓冲垫下加速度信号曲线

Fig.4 Acceleration signal curves under different cushion

试仪仍然工作正常,加速度曲线如图5所示,而没有灌封的电路则没有采集到数据。将没有灌封的电路取出,发现测试电路中有一根与电路板连接导线的焊点脱落,最终导致测试失败。因此,可以得出结论:环氧树脂真空灌封后的电路比不灌封的电路能承受更高的冲击载荷。

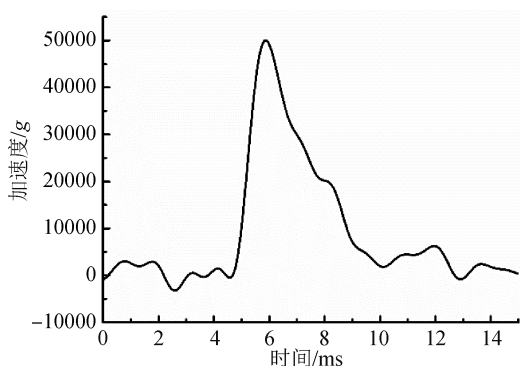


图5 加速度测试曲线

Fig.5 Acceleration test curve

3 实弹测试

将弹底压力测试系统安装到30 mm口径火炮的弹丸内部进行实弹试验,弹底压力测试系统安装示意图如图6所示。测试系统采用可拆卸设计,弹丸底部设计了专用空间放置弹底压力测试系统,拆装处使用了密封铜环,保证发射过程中火药气体不会冲毁测试电路与传感器。使用时先将内部电路取出,进行上电与编程操作,电路状态正常后,在电路顶部放置橡胶垫与青稞纸,与电路一同放入弹丸内部并用管钳旋紧。在进行试验时,弹底压力测试系统随弹一起飞出。弹底压力测试曲线如图7所示。

由图7可以看出,实测曲线与仿真曲线基本吻合,验证了弹底压力测试系统的存活性和可靠性。

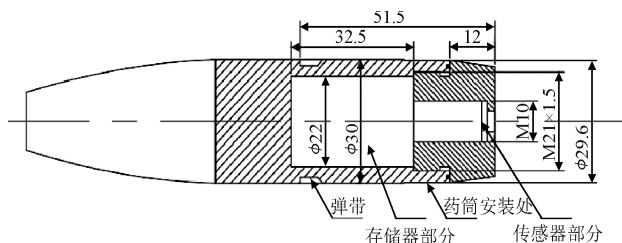


图6 弹底压力测试系统安装示意图

Fig.6 Installation diagram of projectile bottom pressure test system

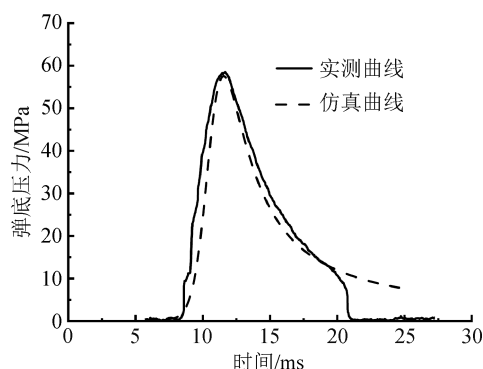


图7 弹底压力测试曲线

Fig.7 Test curve of projectile bottom pressure

4 结论

针对小口径火炮的高过载环境和狭小的测试空间可能导致弹底压力测试系统芯片失效,导线以及焊点脱落和断裂的问题,开展弹底压力测试系统抗高过载研究,得出的结论为:芯片安装位置与冲击方向平行时的抗过载能力比垂直时的抗过载能力更强,隔离缓冲材料选用橡胶垫的效果比选用羊毛垫、珍珠棉(EPE)和PE棉好。通过环氧树脂真空灌封方法有效解决了测试仪器在高过载环境下导线以及焊点脱落和断裂的问题。最后通过实弹测试验证了弹底压力测试系统抗高过载研究的重要性。该研究有效地提高了小口径火炮弹底压力测试系统在高过载环境下的存活性和可靠性,为高载荷小空间下的弹底压力测试系统的设计提供了支撑。

参考文献

- [1] CAO R D, ZHANG X B. Design optimization for a launching system with novel structure[J]. Defence technology, 2019, 15(5): 680-689.
- [2] 朱雨薇. 压电式压力传感器的加速度效应修正技术研究[D]. 太原:中北大学, 2021.
ZHU Y W. Research on acceleration effect correction technology of piezoelectric pressure sensor[D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [3] 石东昕. 基于膛内加速度测试的内弹道动态参数研究[D]. 太原:中北大学, 2019.
SHI D X. Research on dynamic parameters of interior trajectory based on acceleration measurement in bore[D]. Taiyuan: North University of China, 2019. (in Chinese)
- [4] 周优良. 强冲击载荷下弹载测试仪可靠性与寿命评估研究[D]. 太原:中北大学, 2018.

- ZHOU Y L. Research on reliability and life evaluation of missile borne tester under strong impact load[D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [5] 张振海, 张振山, 胡红波, 等. 高冲击传感器、极端环境试验测试与计量校准[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 12-23.
- ZHANG Z H, ZHANG Z S, HU H B, et al. Testing and calibration technology of high- g accelerometer and extreme harsh environment test [J]. Metrology and measurement technology, 2019, 39(4): 12-23. (in Chinese)
- [6] PV A, SAM A, EAE B. Survivability of embedded microelectronics in precision guided projectiles: Modeling and characterization[J]. International journal of impact engineering, 2021: 154.
- [7] PENG T F, YOU Z. Reliability of MEMS in shock environments: 2000-2020[J]. Micromachines, 2021, 12(11).
- [8] CHOI Y T, NORMAN M W. Shock isolation system using magnetorheological dampers[J]. Journal of vibration and acoustics, 2008, 130: 1-6.
- [9] YOON S W. Vibration isolation and shock protection for MEMS[D]. University of Michigan, 2009.
- [10] 于亚飞, 李忠新, 吴志林. 小口径智能弹药发射高过载环境下弹载模块电路应力分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(7): 92-96.
- YU Y F, LI Z X, WU Z L. Analysis on stress for circuit module under launching high overload environment in small caliber smart bullet[J]. Ordnance industry automation, 2019, 38(7): 92-96. (in Chinese)
- [11] 王海霞. 抗冲击弹载记录仪的设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- WANG H X. Design and research of impact-resistant missile recorder[D]. Taiyuan: North University of China, 2019. (in Chinese)
- [12] 赵玉杰. 高 g 值冲击下灌封电路系统的动态响应及失效分析[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- ZHAO Y J. Study on dynamic response and failure of the circuit systems under high g value impact[D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [13] 丁永红, 周优良, 尤文斌, 等. 高冲击载荷下弹载记录仪应力分布研究[C]. OSEC首届兵器工程大会论文集, 2017: 672-675.
- DING Y H, ZHOU Y L, YOU W B, et al. Study on stress distribution of missile recorder under high impact load[C]. Proceedings of the first OSEC Ordnance Engineering Conference, 2017: 672-675. (in Chinese)
- [14] 程祥利, 赵慧, 焦敏, 等. 高冲击载荷作用下弹载记录仪防护系统动力学响应特性[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(12): 117-125.
- CHENG X L, ZHAO H, JIAO M, et al. Dynamic response characteristics of the protection system for a projectile-borne recorder under high impact loading[J]. Explosion and shock waves, 2019, 39(12): 117-125. (in Chinese)
- [15] 曹娟, 张合, 王晓锋. 硬目标侵彻引信隔离防护优化研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(24): 192-196.
- CAO J, ZHANG H, WANG X F. Optimization of isolated protection for the hard-target penetration fuze[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(24): 192-196. (in Chinese)
- [16] 祖静, 马铁华, 裴东兴, 等. 新概念动态测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- ZU J, MA T H, PEI D X, et al. New concept dynamic test [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [17] 杨平. 非线性抗振动冲击防护动力学和动态设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- YANG P. Dynamics and dynamic design of nonlinear anti-vibration shock protection [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)

(本文编辑:朱俊真)



第一作者:王宇(1991—),男,山西朔州人,博士,讲师,主要从事高压、高冲击、高温、高速、强电磁干扰等恶劣环境下各种瞬态过程的信息获取方面的研究工作。



通讯作者:裴东兴(1970—),男,山西忻州人,博士,教授,主要从事高压、高冲击、高温、高速、强电磁干扰等恶劣环境下各种瞬态过程的信息获取方面的研究工作。