

## 包装技术与工艺

## 抗高过载防护结构的设计与性能测试

任小军<sup>1</sup>, 尤文斌<sup>1</sup>, 周优良<sup>1</sup>, 牛跃昕<sup>2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 中国人民解放军军械工程学院, 石家庄 050000)

**摘要:** 目的 弹载记录仪在回收过程中, 存在记录仪因硬着陆产生的高冲击力和高过载加速度使仪器损毁而致有效数据失效的现象。针对该问题设计新型双层壳体两级缓冲隔离的电路防护结构, 并进行性能测试。**方法** 结合 Ansys/Workbench 有限元数值模拟软件仿真分析该结构在冲击过程中的变形和受冲击过载特性, 同时使用马歇尔锤对该防护结构的记录仪模拟高冲击、高过载环境实验, 由记录仪存储双层防护壳体内外嵌入的加速度传感器信号, 并对多次试验信号数据进行处理和分析。**结果** 在过载加速度小于 25 000g 时, 该多层防护结构具有良好的缓冲效果, 对记录仪保护效果良好; 各层材料的声阻抗差别会影响整体保护效果, 差别越大效果越好。**结论** 该防护结构在高过载冲击环境下能有效衰减冲击效应, 保护电子设备的安全。

**关键词:** 新型防护结构; 高过载冲击; 马歇尔锤试验; 加速度

**中图分类号:** TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0064-05

## Design and Performance Test of Anti-high-overload Protective Structure

REN Xiao-jun<sup>1</sup>, YOU Wen-bin<sup>1</sup>, ZHOU You-liang<sup>1</sup>, NIU Yue-ting<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a new type of double-layer buffer-isolation circuit protective structure and conduct performance test, with respect to the problem that the valid data fails because the recorder is damaged by the high impact and high overload acceleration due to hard landing in the recovery process of missile-borne recorder. The deformation and overload characteristics of the structure in the impact process were simulated and analyzed in combination with Ansys/Workbench finite element numerical simulation software, and the Marshall hammer was adopted to simulate the high impact and high overload environment experiments on the recorder with the protective structure. The recorder stored the signals of acceleration sensors embedded inside and outside the double-layer protection enclosure. Then, the data from multiple tests were processed and analyzed. When the overload acceleration was less than 25 000g, the multilayer protective structure had good cushioning effect and could properly protect the recorder; and the acoustic impedance difference of each layer of materials would affect the overall protection effect. The greater the difference was, the better the effect was. The protective structure can effectively reduce the impact effect to protect the electronic equipment in the high overload impact environment.

**KEY WORDS:** new protective structure; high overload impact; Marshall hammer experiment; acceleration

记录仪最早以黑匣子的形式应用于航空领域, 用于记录飞行器的飞行信息。随着导弹等飞行武器的迅

速发展, 记录仪被装载到飞行武器上, 监测飞行过程中的气源、电源、飞行、控制和执行时间等状态参数,

收稿日期: 2016-11-17

基金项目: 国家自然科学基金 (61471385)

作者简介: 任小军 (1992—), 男, 中北大学硕士生, 主攻仿真与可视化。

通讯作者: 尤文斌 (1981—), 男, 博士, 中北大学副教授, 主要研究方向为恶劣环境下的信息获取技术、数据处理。

评估武器性能<sup>[1-2]</sup>，为研制和改进提供更多的理论依据。在该过程中，记录仪被安装在弹体内部，直到弹体分离，最终以硬着陆方式回收记录仪进行数据分析。

在硬着陆过程中记录仪装置将受到超高强度的冲击力和大约 20 000g 的过载加速度<sup>[3]</sup>，记录仪需要被很好地保护起来，防止数据存储模块损坏而丢失数据，而且飞行试验成本巨大，因此更需要保证在硬着陆过程中记录仪的整体结构和存储数据的完好，对记录仪防护结构的研究分析势在必行。这里微型化设计了一种新型双缓冲防护结构，采用马歇特锤模拟以上硬着陆环境，从防护结构的损毁原理出发，结合 Ansys/Workbench 软件仿真分析防护结构的性能。

### 1 系统测试理论分析

#### 1.1 应力传播过程

记录仪在硬着陆时产生了巨大的应力，应力在固体介质中以波的形式向四周传播。文中采用简化的圆柱形壳体垂直撞击刚性靶体来分析壳体坠落时的应力传播，见图 1。

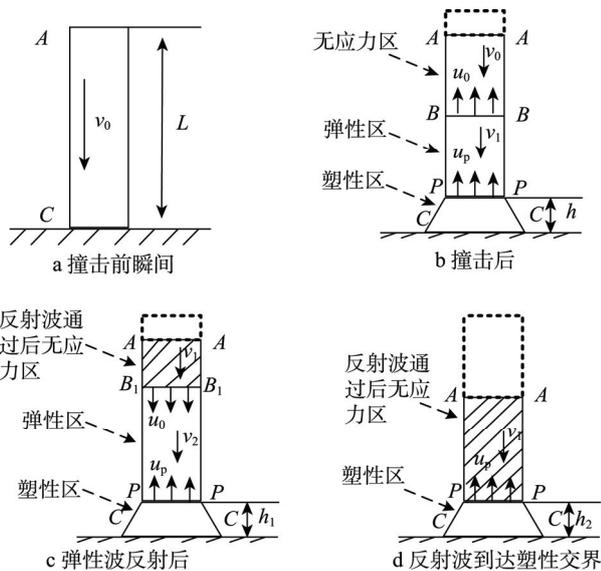


图 1 应力波传输

Fig.1 Stress wave transmission

假定装置保护外壳的长度为  $L$ ，垂直撞击靶体  $C$  的初始速度为  $v_0$ ，产生一个弹性压缩波向壳体尾部传输，波阵面上的应力幅值为动屈服极限  $\delta_r^D$ ，紧接着碰撞压力持续增加，超出装置弹性形变后转变为塑性形变  $h$ ，塑性波在弹性波后以较慢的速度传播，塑性应力为  $\delta_r^D$ ，塑性区继续以塑性波  $u_0$  速度传向自由端，在弹性区域  $BP$  段，质点速度  $v_1$  为：

$$v_1 = v_0 - \frac{\delta_r^D}{\rho_0 u_0}$$

在撞击过程中，装置受到的弹性应力可以描述为：

$$\delta_0 = \frac{z_p z_0}{z_p + z_0} v_0 = \frac{u_0 \rho_0 + u_p \rho_p}{u_0 \rho_0 u_p \rho_p}$$

式中： $z_0$  为装置材料阻抗， $z_0 = u_0 \rho_0$ ； $z_p$  为靶体材料阻抗， $z_p = u_p \rho_p$ ； $u_0$  为装置材料的弹性速度， $u_0 = \sqrt{E_0 / \rho_0}$ ； $u_p$  为靶体的应变弹性波速， $u_p = \sqrt{\frac{1-\mu}{(1-\mu)(1-2\mu)} \cdot \frac{E_p}{\rho_p}}$ ； $E$  为材料的弹性模量； $\rho_0, \rho_p$  分别为装置和靶体的密度； $\mu$  为材料的泊松比<sup>[5]</sup>。

在装置还没有应力发生的区域质点仍然以速度  $v_0$  向撞击面运动，直到  $t=L/u_0$  时弹性波到达自由端，拉伸卸载波反向传输，此时没有应力的存在，质点运动速度将变小：

$$v_2 = v_1 - \frac{\delta_r^D}{\rho_0 u_0} = v_0 - 2 \frac{\delta_r^D}{\rho_0 u_0}$$

图 1c 中  $B_1P$  是弹性形变部分，质点仍然以速度  $v_1$  向撞击面运动， $PC$  是塑性形变部分。随着塑性区域的不断变大，柱体装置的长度变短，同时会以速度  $v_2$  继续撞击靶体而产生新的弹性波和反射拉伸波。按此规律不断循环，每碰撞一次速度变小一些，分别为  $v_2, v_4 \dots v_{2n}$ ， $n$  为装置装置撞击次数， $v_{2n}$  可表示为：

$$v_{2n} = v_0 - 2n \frac{\delta_r^D}{\rho_0 u_0}$$

当  $v_{2n}=0$  时，撞击过程完全停止，靠近靶体一端发生永久性形变<sup>[6]</sup>。

装置在撞击过程中，当压缩应力波传到装置自由端时会产生相同强度的拉伸应力波，拉伸应力波的强度超过装置的断裂强度时将导致装置被拉断。

#### 1.2 撞击应力波的传递性质

应力波在介质中的传播以及在不同介质面上的透射和反射研究是防护结构设计的主要理论基础。当入射层材料的声音阻抗远远大于透射层时，应力波经过入射层到达透射层后将大大减弱，主要依据为：

$$\sigma_2 = \frac{2\sigma_1}{1 + z_1/z_2}$$

式中： $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为入射层和透射层的应力波强度； $z_1$  和  $z_2$  分别为入射层和透射层的声音阻抗<sup>[7]</sup>。

对于弹性应力波，在复杂多层材料的构造中，各层材料之间的声音阻抗差别越大，应力波传输过程中衰减效果越好，可以参考以下公式：

$$\sigma_{i+1} = \frac{2\sigma_i}{1 + z_i/z_{i+1}}$$

$$v_{i+1} = \frac{z_i}{z_{i+1}} \cdot \sigma_{i+1} \quad (i=1, 2, 3 \dots N)$$

式中： $N$  为装置保护壳的材料总层数，从外至内依次加 1； $v_i$  为各质点的运动速度。

通过以上分析可得,弹性压缩波和反射波的传输是造成记录仪损毁的主要原因,因此要完全利用波的传播特点,采取合理的缓冲隔离措施,从而降低对记录仪的毁伤作用。

### 1.3 失效机理分析

记录仪的着陆过程是一个高速度、高强度的撞击过程,产生微秒级的强脉冲载荷,作用时间短,强度非常高<sup>[8]</sup>。在撞击区域产生撞击应力的波源迅速向装置的内部和尾部传输,应力波强度超过了保护壳体的强度就会导致其变形、断裂,最终导致记录仪失效,信息丢失。在电路设计中,芯片破碎、元器件疲劳、芯片管脚断裂、导线断裂等是电子器件失效的主要原因。设计防护结构时要考虑隔震减震、材料选择、缓冲设计和电路灌封等主要内容。

## 2 仿真

### 2.1 防护结构设计

通过分析冲击应力波在防护结构中的传输和装置响应机理,整个装置采取内部灌封和外部缓冲的设计理念<sup>[9]</sup>,选用声阻抗差别较大的多层材料设计成复合式结构,主要包含硬结构层、软结构层、缓冲层和稳固层,每层实现不同的任务,并要求保护记录仪不被损坏。从结构设计的兼容性和技术性出发,该防护装置采用圆柱形外腔壳体内嵌圆柱形内腔壳体,内外腔体之间填充橡胶作为缓冲材料,记录仪电路安放在内腔壳体中,周围用高弹坚固材料灌封。防护装置剖面结构见图2,主要包含外筒顶盖、外筒、外筒走线槽、缓冲橡胶、内筒防护壳、电路腔、传感器等部分。

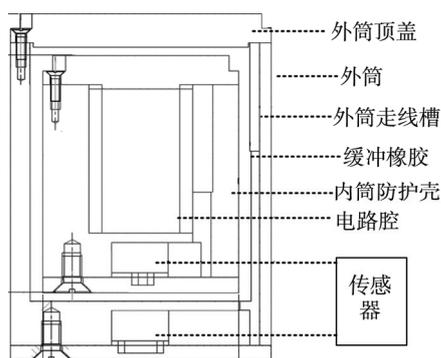


图2 记录仪保护结构剖面结构  
Fig.2 Recorder protection profile

外筒壳体在撞击过程中承受了绝大部分的冲击力,选用动态断裂强度和断裂韧性较好的材料;内腔壳体选择强度、韧度等各方面条件相对较优的材料,使用螺丝连接外壳顶盖和壳体;通过查阅相关资料了解几种钢材的性能参数,见表1。分析比较可得,35CrMnSiA 性价比较高,可满足条件。为了承受高过

载的冲击力,需要对35CrMnSiA进行一定的热处理使其具有较高的硬度。整个装配体结构采用声阻抗差别较大的多层材料构成的复合结构,外腔壳体选择铝,内腔壳体选择35CrMnSiA。

表1 常见优质钢材性能参数  
Tab.1 Common steel performance parameters

| 型号        | 抗拉强度/MPa | 屈服应力/MPa | 伸长率/% | 断面收缩率/% | 冲击吸收功/J |
|-----------|----------|----------|-------|---------|---------|
| 25Cr2MoVA | 930      | 785      | 14    | 55      | 63      |
| 20Cr2Ni4  | 1180     | 1080     | 10    | 45      | 63      |
| 50CrVA    | 1280     | 1130     | 10    | 40      |         |
| 35CrMnSiA | 1620     | 1280     | 9     | 40      | 31      |
| 30CrMnTi  | 1470     |          | 9     | 40      | 47      |

在内外筒之间的间隙填充BLATZ\_KO\_RUBBER型号的橡胶作为缓冲材料,它具有弹性模量小、弹性高和强度大的结构特性,减少了撞击过程中对内壳体的冲击动量,且隔热效果良好,能很好地保护电路。内腔壳体用加入了恰当增韧剂和固化剂的环氧树脂进行灌封,粘合力好、强度大,且固化后应力较大,没有弹性,保证了灌封的坚固性。同时要确保环氧树脂注入时的流动性最佳,把握好注入速度,防止形成气泡影响抗冲击性能。

### 2.2 Ansys 建模仿真分析

#### 2.2.1 模型仿真材料及参数

Ansys具有强大的结构、流体和磁场等有限元分析能力<sup>[10]</sup>,为研究该防护结构的可靠性,用Ansys/Workbench14.5模拟实际情况,建立如下模型参数:模拟记录仪装置以一定的速度和不同的角度撞击混凝土靶体;内外筒壳体采用的参数模型见表2<sup>[11-12]</sup>;橡胶参数选择BLATZ\_KO\_PUBBER材料模型,密度为1.12 g/m<sup>3</sup>,泊松比为0.27,弹性模量为1.04 GPa,厚度为4 mm;环氧树脂选择PLASTIC\_KINEMATIC模型材料,密度为0.40 g/m<sup>3</sup>,泊松比为0.4,弹性模量为3.20 GPa;地面靶体材料为C35混凝土H-J-C本构模型和损伤模型,壳体与地面之间的撞击采用Contact Eroding\_Surface\_to\_Surface算法。

表2 内、外筒壳体模拟参数  
Tab.2 Internal and external cylinder simulation parameters

| 材料            | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量/GPa | 屈服应力/MPa | 切线模量/GPa | 泊松比   |
|---------------|--------------------------|----------|----------|----------|-------|
| 35CrMnSiA (内) | 8.0×10 <sup>5</sup>      | 206      | 1280     | 2        | 0.284 |
| 铝(外)          | 2704                     | 69       | 265      | 0.426    | 0.33  |

#### 2.2.2 Ansys 有限元模型建模

仿真中结构模型设置为复合结构,地面为均匀连

续介质，忽略地面侧边影响和地面整体运动，不计模型与地面的摩擦和空气阻力，忽略热效应，结构模型和地面受重力影响。使用 CAD 系统建立该防护结构的实体模型，把模型保存为 Ansys 可以识别的 IEGS 格式并导入 Ansys，并设置为弹塑性模型的四面体结构单元；模拟地面为六面体结构单元，底部背面施加 Fixed Support，无反射边界条件，固定地面法线自由度为 0。最终对防护结构和地面模型进行自动网格划分操作，完成建模。

### 2.2.3 仿真结果

分别以 0°、45°、60°、90°俯仰角和 500 m/s 的速度模拟记录仪撞击混凝土地面，通过分析不同角度下的等效应力云图，表明装置在垂直地面撞击时受到的过载、应力最大且最集中，对装置的损伤最严重。装置垂直撞击混凝土靶板时装置壳体的等效应力与陷入混凝土深度的曲线见图 3，由外壳应力曲线可知大约在 15 mm 深度处超过了外壳铝的屈服应力，外壳铝及缓冲材料橡胶严重损坏，失去保护作用，同时缓冲掉绝大部分的冲击能量。外壳受最大应力时，内壳对应的应力云图见图 4，由云图可见内筒壳体没有形变。应力分布为后续马歇特锤试验中传感器的安装进行了有效指导，同时仿真测得该状态下外壳受到 25 000g 的过载加速度，为试验提供了加速度参考。

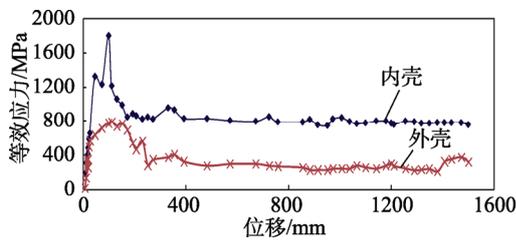


图 3 装置壳体等效应力曲线  
Fig.3 Equivalent stress curve of inner shell

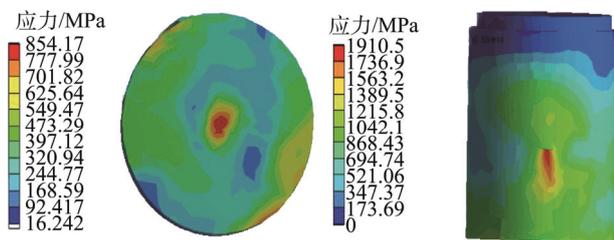


图 4 内壳底部和侧面应力云图  
Fig.4 Stress cloud of inner shell

## 3 马歇特锤试验

在以上理论分析和 Ansys 仿真的指导下，利用马歇特锤对保护装置进行了垂直冲击破坏性试验<sup>[13]</sup>，试验中定义传递比为内壳传感器与外壳传感器的加速度比值，比值越小说明内壳加速度衰减越大，保护效

果越好。马歇特锤试验的数据传递比曲线见图 5，分析曲线得知不同冲击作用下结构的防护效果明显不同，其主要原因是不同冲击下外壳铝和橡胶形变产生的缓冲效果不同，且在 25 000g 加速度范围内结构的防护性能良好。

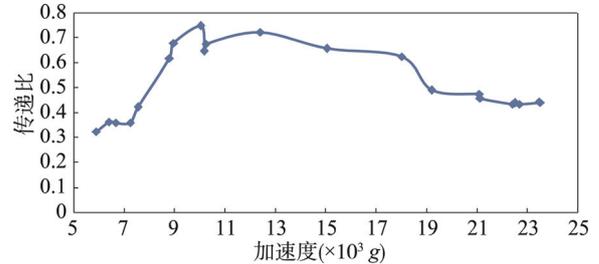


图 5 实验数据传递比曲线  
Fig.5 Transfer ratio curve

利用 Matlab 显示某次试验中装置内外壳加速传感器采集的数据，关键加速度数据的放大曲线见图 6，可知记录仪存储数据完好。装置在第 1 个波峰处受到主要冲击应力<sup>[14-15]</sup>，对比放大后 2 条曲线可以明显看出内壳加速度远小于外壳，说明冲击过程中内壳获得的能量较外壳小很多，存在能量的损耗。实验验证了该防护结构缓冲效果良好，防护结构起到了减震、削弱能量的作用。

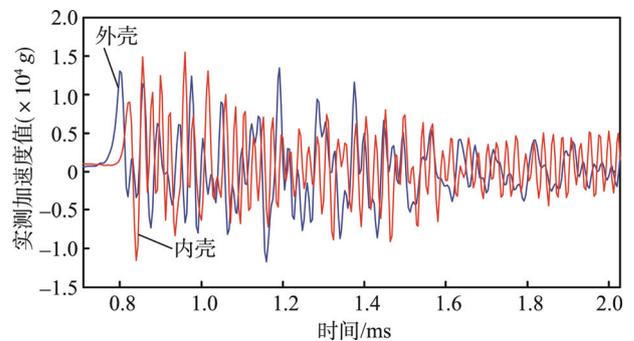


图 6 关键加速度数据放大曲线  
Fig.6 Partial amplification curve of key data

## 4 结语

设计了应用于高过载的新型双层复合防护结构，并通过实验测试表明了该结构在受到 20 000g 高冲击时，内壳仍无明显变形，大部分能量被缓冲吸收，有效保护了装置内部器件的正常工作。由实验结果可知，该结构设计符合基本应用原则要求，选材得当，能够经受高冲击和高过载考验，防护效果良好，可以应用于弹载记录仪。

### 参考文献：

[1] 王敏涛. 某弹载多参数采集存储装置的设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2010.

- WANG Min-tao. Design and Implementation of a Certain Missile-borne Multi-parameter Collection Storage Devices[D]. Taiyuan: North University of China, 2010.
- [2] 王琦. 某型号制导炮弹弹载数据记录仪的设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.  
WANG Qi. Research and Design for a Certain Type of Missile-Missile Data Recorder[D]. Taiyuan: North University of China, 2011.
- [3] 廖圣洁, 林国欣, 杨秀深. 空降携行装备缓冲包装设计与分析[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 11—14.  
LIAO Sheng-jie, LIN Guo-xin, YANG Xiu-shen. Design and Analysis of Cushioning Packaging for Airborne Carrying Equipment[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 11—14.
- [4] 梁永刚. 某遥测系统双备份固态存储器的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2014.  
LIANG Yong-gang. The Design and Realization of Double Backup Solid-state Storage Device for a Telemetry System[D]. Taiyuan: North University of China, 2014
- [5] 赵良, 田恒春. 硬回收装置的设计探讨[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(9): 294—297.  
ZHAO Liang, TIAN Heng-chun. Research on Hard Recovery System[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2005, 25(9): 294—297.
- [6] 刘俊, 石云波, 马游春. 高过载测试中结构防护模型研究[J]. 测试技术学报, 2005, 19(3): 249—253.  
LIU Jun, SHI Yun-bo, MA You-chun. The Research on the Structural Protection in the High Overload Measurement[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2005, 19(3): 249—253.
- [7] 李罡. 冲击载荷作用下三维界面端的应力奇异性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.  
LI Gang. Study on Stress Singularities of Three-Dimensional Interface Edge under Impact Load[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [8] 马其琪, 徐晓辉, 孔雁凯, 等. 弹载记录器的抗高过载分析及设计[J]. 弹箭与制导学报, 2015(1): 15—18.  
MA Qi-qi, XU Xiao-hui, KONG Yan-kai, et al. Anti-high Overload Analyses and Design of Missile-borne Recorder[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2015(1): 15—18.
- [9] 申展, 陈东, 罗俊杰. 聚乙烯泡沫缓冲系统跌落冲击过载仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 128—131.  
SHEN Zhan, CHEN Dong, LUO Jun-jie. Simulation and Analysis of Dropping Impact Acceleration of Polyethylene Foam Buffer[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 128—131.
- [10] 郭晓娟, 钱静. 基于Ansys保温包装球壳模型的建立[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 43—48.  
GUO Xiao-juan, QIAN Jing. Spherical Shell Models for Insulating Packages Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 43—48.
- [11] 汪衡, 田晓丽, 陈国光, 等. 弹载硬回收记录器炮击结构侵入混凝土靶的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(4): 95—98.  
WANG Heng, TIAN Xiao-li, CHEN Guo-guang, et al. Digital Simulation of Shelled Structure of Missile and Hard Recovery Recorder Penetrating Through Concrete Target[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2010, 30(4): 95—98.
- [12] 庞春旭, 何勇, 沈晓军, 等. 刻槽弹体旋转侵入铝靶试验与数值模拟[J]. 弹道学报, 2015(1): 70—75.  
PANG Chun-xu, HE Yong, SHEN Xiao-jun, et al. Experimental Investigation and Numerical Simulation on Grooved Projectile Rotationally Penetrating into Aluminum Target[J]. Journal of Ballistics, 2015(1): 70—75.
- [13] 齐明思, 孙亮. 基于马歇特锤实验的聚氨酯缓冲性能分析[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 108—110.  
QI Ming-si, SUN Liang. Buffer Performance of Polyurethane Based on the Machete Hammer Experiment[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 108—110.
- [14] 甄国涌, 沈洁, 任勇峰, 等. 硬回收记录器壳体的设计及仿真[J]. 机械工程与自动化, 2010(1): 15—16.  
ZHEN Guo-yong, SHEN Jie, REN Yong-feng, et al. Design and Simulation on Hard Recovery Recorder Shell[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2010(1): 15—16.
- [15] 靳书云, 靳鸿, 张艳兵, 等. 弹载加速度数据记录仪抗高冲击设计[J]. 传感技术学报, 2014(4): 463—466.  
JIN Shu-yun, JIN Hong, ZHANG Yan-bing, et al. Anti-Impact Design for Missile Accelerometer Recorder[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014(4): 463—466.