

文章编号: 1006-9941(2014)03-0406-07

典型电雷管的聚四氟乙烯抗过载加固方法

孙晓霞^{1,2}, 刘卫¹, 沈瑞琪¹, 叶迎华¹, 吴立志¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 辽宁北方华丰特种化工有限公司, 辽宁 抚顺 113003)

摘要: 为了提高弹药侵彻目标时火工品的抗过载冲击能力, 采用在雷管底部和外壁衬垫一定厚度聚四氟乙烯材料的方法减缓冲击应力波和惯性过载的强度。以制式桥丝式独角电雷管为加固对象。采用空气炮实验和数值模拟研究了这一加固方法的机理和有效性。实验与模拟结果表明, 衬垫缓冲层隔离了冲击应力波和缓冲了雷管质量惯性。随着衬垫厚度增加, 雷管承受的过载加速度和受到的过载损伤逐渐减小。当缓冲层厚度大于 0.9 mm 时, 雷管无显著损伤发生。聚四氟乙烯材料的加入对雷管有明显的保护作用。

关键词: 固体力学; 缓冲层加固; 桥丝式电雷管; 聚四氟乙烯; 高过载; 空气炮

中图分类号: TJ45⁺2.3; O347.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.025

1 引言

桥丝式电雷管具有发火能量小、作用迅速、性能容易控制等优点, 普遍应用于各类通用弹药、侵彻战斗部及各类攻坚弹药引信, 也常用于导弹、核武器等尖端武器中, 是传爆序列、传火序列及火工装置、火工系统的主要起爆元件。典型桥丝式电火工品耐过载指标为 $5 \times 10^4 \text{ g}$ ^[1]。面对动能侵彻弹药技术和防御体系的发展, 弹药侵彻目标过程中所经受的冲击过载越来越大。研究表明^[2-3] 弹丸侵彻钢板目标时过载峰值一般大于 $1 \times 10^5 \text{ g}$, 侵彻混凝土目标时过载峰值一般在 $4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ g}$ 。对制式桥丝式电雷管进行过载加固技术研究具有重要的现实意义。

冲击隔离是采用适当的缓冲材料和结构, 对侵彻过程的过载进行隔离, 或对高冲击产生的能量进行吸收储存, 降低加速度值到允许的极限值以内, 是用于引信冲击保护行之有效的技术途径之一。张建新^[4] 研究了缓冲垫片的吸能特性, 表明缓冲垫片对应力波有一定的过滤和吸收能力, 应力波在不同材料界面处有明显的反射或折射现象。徐蓬朝等^[5] 研究认为垫片

提高抗冲击能力的机理不是弹性缓冲, 而是机械滤波。蔡吉生^[6] 采用 Hopkinson 加载实验和数值模拟的方法, 对装 B/BaCrO₄ 延期药的延期装置进行了应力波传播特性研究, 并通过在端面放置纸垫片的途径来实现界面加固。奥成刚^[7] 通过材料优选、结构优化与加固、装药固化对某桥丝电雷管进行了结构加固设计, 通过 Hopkinson 压杆和 CT 层析技术进行了抗高过载性能检测, 表明加固后雷管可承受 $\geq 10^5 \text{ g}$ 的加速度。以上研究都是在实验基础上获得的缓冲层加固的有效性分析, 对缓冲层加固机理和规律的认识及掌握仅限于定性分析。为了弥补缓冲层作用机理和规律认识的不足, 满足制式电热火工品在高过载环境中的可靠使用, 加强其抗力学环境的能力, 本研究采用空气炮实验装置, 以典型制式桥丝式独角电雷管为研究对象, 以聚四氟乙烯 (PTFE) 作为缓冲材料, 实验和数值模拟了子弹动态碰撞钢靶板过程中有无缓冲、缓冲材料厚度以及过载加载方向对雷管损伤的影响, 考察雷管的外形、尺寸、电阻和内部结构等的变化, 从塑性吸能和弹性滤波两方面分析了 PTFE 的缓冲机理, 为该类电雷管在过载环境下使用提供基础研究支撑。

2 实验

2.1 实验装置、样品和方法

空气炮是 20 世纪 60 年代发展起来的力学实验设备, 是当前应用最广泛的实验室用冲击加载装置, 既可以模拟发射环境, 又可以模拟弹丸侵彻目标时的过载状态。本研究中的空气炮实验装置主要由实验平

收稿日期: 2013-09-26; 修回日期: 2013-12-09

作者简介: 孙晓霞 (1974-), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事固体力学、火工品抗高过载研究及火工品的研制与开发。

e-mail: xiaoxia_7410@163.com

通信联系人: 沈瑞琪 (1963-), 男, 教授, 博导, 主要从事抗高过载、化学芯片、固相快速化学反应、火工技术、激光辐射效应等方面的研究和教学。e-mail: rqshen@mail.njust.edu.cn

台、炮管、气动控制系统、测速系统、回收靶室、钢靶板以及子弹组成,实验原理如图 1。

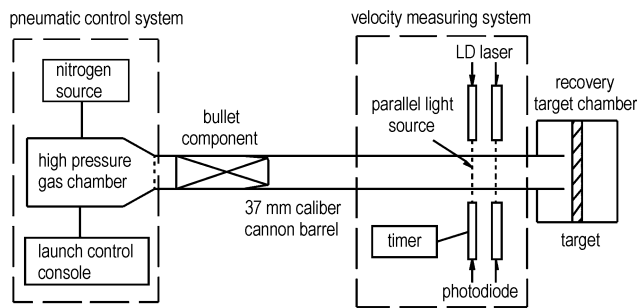


图 1 空气炮实验装置原理图

Fig. 1 Principle diagram of air gun test device

各部分组成及主要参数: 炮管口径 37 mm、长 2.26 m; 气动控制系统由氮气源、高压气室和发射控制操作台组成, 高压气室内径 $\Phi 150$ mm、容积 8.6 dm^3 , 气室采用活塞式释放机构; 测速系统由两对 LD 激光器和光电二极管及微秒级计时器和信号放大器组成, 狭缝宽度 1.0 mm、间距 80 mm; 钢靶板采用 Q235A 钢材料, 尺寸 35 cm \times 25 cm \times 3 cm; 子弹由弹体、螺帽、雷管座和垫块组成, 均使用 GCr15 轴承钢加工, 子弹结构如图 2 所示。

实验选取典型制式桥丝式独角电雷管为研究对象。为了安全解剖实验后样品, 雷管中装填硬脂酸惰性物质, 装填密度为 $1.87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 电阻为 $2 \sim 4 \ \Omega$, 其成品尺寸、产品组成及内部结构如图 3 所示。

采用在雷管输出端和外壁添加一定厚度聚四氟乙烯衬垫的方法进行火工品试样的加固, 即轴向加载时聚四氟乙烯垫片安放于雷管输出端前面, 横向加载时聚四氟乙烯套管安放于雷管管壁外面, 并与管壁紧密接触。聚四氟乙烯缓冲垫厚度或缓冲套管壁厚 h 分别为 0, 0.3, 0.6, 0.9 mm。通过调节空气炮发射气

压, 在子弹炮口速度 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (采用压缩铜柱法测得的平均加速度过载为 $1 \times 10^5 \text{ g}$) 的情况下, 进行电雷管轴向输出端加载和横向加载实验。

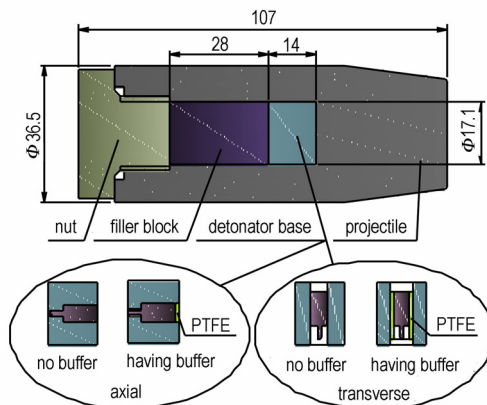


图 2 子弹结构示意图(单位: mm)

Fig. 2 Bullet structure sketch (unit: mm)

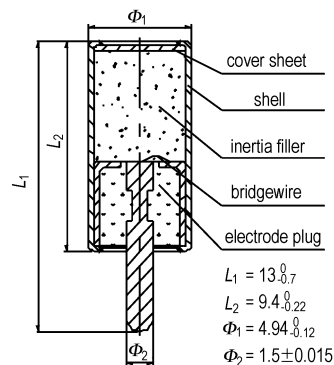


图 3 电雷管结构示意图

Fig. 3 Structure sketch of electric detonator

2.2 实验结果与讨论

试样内部结构分析采用 BJI-G 型 X 射线透视仪对过载前和过载后的电雷管进行图像分析, 得到轴向加载和横向加载前后电雷管典型 X 射线图像如图 4 和图 5 所示。

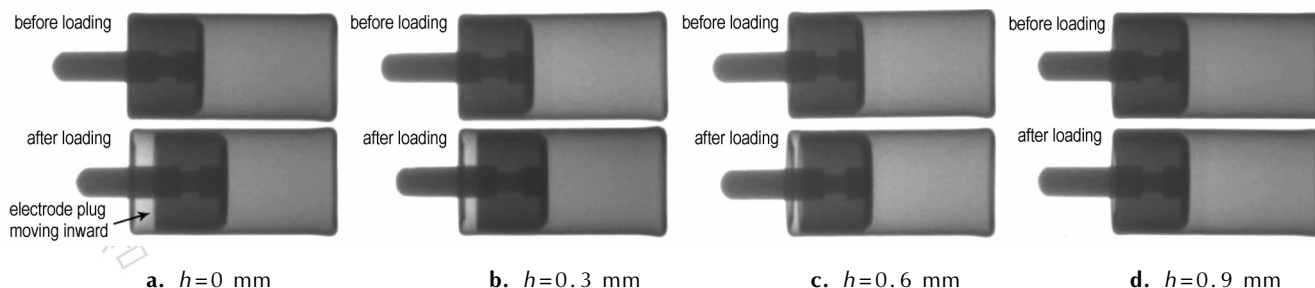


图 4 轴向加载时电雷管典型 X 射线图像

Fig. 4 Detonator typical X-ray images under axial loading

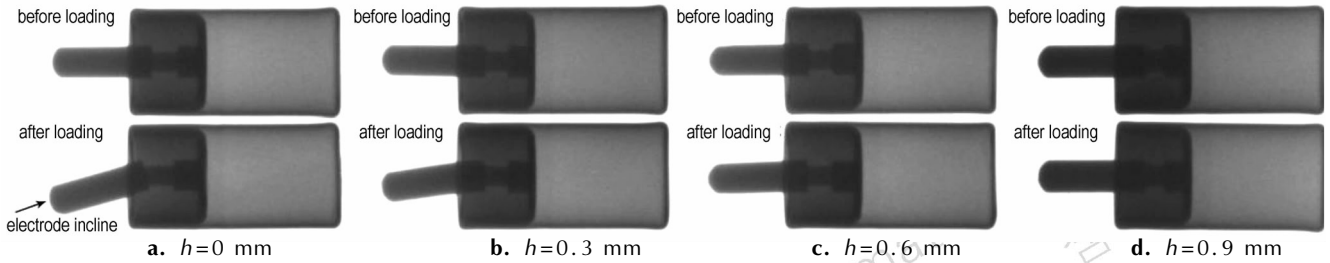


图5 横向加载时电雷管典型 X 射线图像

Fig.5 Detonator typical X-ray images under transverse loading

图 4 表明,轴向加载时电极塞发生内陷,采用 PTFE 加固后雷管电极塞内陷程度明显小于未加固产品,且随着缓冲垫厚度增加,电极塞内陷程度逐渐减小,当缓冲垫厚度为 0.9 mm 时,电极塞已基本不发生内陷。图 5 表明,横向加载时电极发生倾斜,采用 PTFE 加固后雷管电极倾斜角度明显小于未加固产品,且随着缓冲套管壁厚增加,电极倾斜程度逐渐减小,当缓冲套管壁厚为 0.9 mm 时,电极已基本不发生倾斜。X 射线图像说明,采取加固措施后雷管损伤程度明显减小,PTFE 加固是有效的。

横向加载后雷管壳体沿径向发生变形,截面由圆形变为椭圆形,加载后的壳体端面如图 6 所示,用椭圆大小径比 D_1/D_2 表征壳体的变形情况。因轴向输出端加载时电极塞产生向内移动,用 L_1-L_2 的变化率表征雷管电极塞的内陷程度。过载前后不同缓冲层厚度下的雷管各部件变形量如图 7 所示。

图 7a 表明,轴向加载时电极塞发生了明显的内陷,轴向未加固产品电极塞内陷率最大达近 30%,随着缓冲厚度增加,电极塞内陷程度逐渐减小;横向加载时电极塞位置基本不发生变化。图 7b 表明,轴向加载时,雷管受到轴向撞击长度有所减小,随着缓冲厚度增加,壳体变形程度逐渐减小,当缓冲垫厚度为 0.9 mm

时长度几乎不发生变化;横向加载时,雷管受到横向挤压长度有所增长,随着缓冲厚度增加,壳体变形程度逐渐减小,直至缓冲套管壁厚为 0.9 mm 时长度几乎不发生变化。图 7c 表明,轴向加载后壳体截面变形不显著;横向加载后壳体截面呈椭圆形,且未加固产品截面大径与小径比明显大于加固产品。综上所述,采取加固措施后雷管损伤明显减小,且随着加固厚度增加损伤程度逐渐减小,说明加固措施是有效的。

轴向和横向加载前后雷管电阻变化情况见表 1,其中“+”表示电阻增大,“-”表示电阻减小。



图 6 横向加载后雷管输出端面变形图

Fig.6 Deformation diagram of detonator output surface after transverse loading

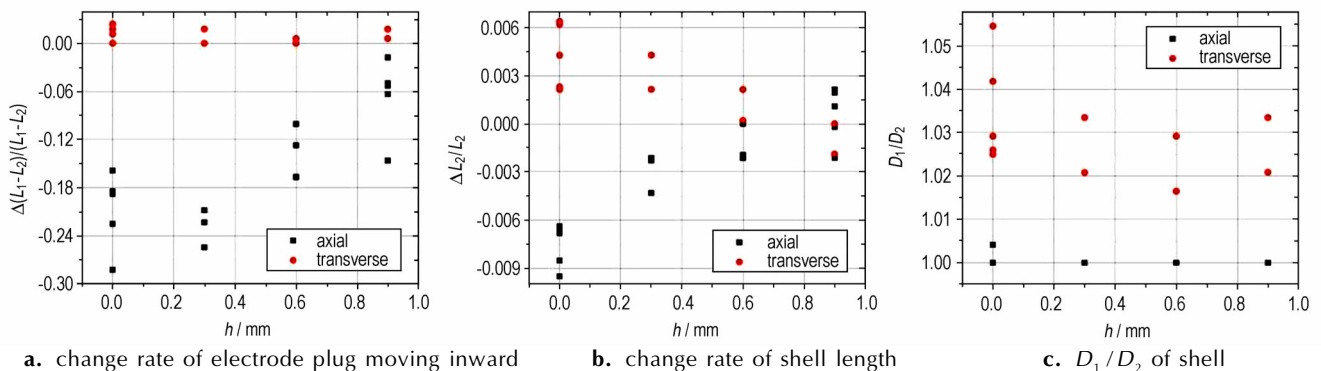


图 7 不同缓冲层雷管各部件变形数值尺寸

Fig.7 Detonator deformation dimension with different buffer layers

表1 雷管电阻变化情况

Table 1 Resistance change of detonator

h/mm	change rate of resistance $\Delta R/R$ /%	
	axial	transverse
0	-2.94, 0, 0, -1.35, -1.01 ¹⁾	
0.3	3.64, -0.98, 0	-2.30 ²⁾
0.6	-1.56, 0.43, 0.40	-1.34, -2.09
0.9	0, 0, 9.68, -0.66, -6.86	-2.56, 17.24

Note: 1) Five detonators' bridgewire are all broken. 2) One detonator's bridgewire is broken.

表1表明,轴向加载时,无桥丝断裂现象发生,电阻变化不显著、规律不明显;横向加载时,无缓冲加固时桥丝损伤严重,5发雷管桥丝全部断裂,缓冲套管壁厚为0.3 mm时,仍有桥丝断裂现象发生,当缓冲套管壁厚达到0.6 mm及以上时,加固效果显著,无桥丝断裂现象出现。

3 理论分析

聚四氟乙烯具有耐高温、耐低温、耐腐蚀、耐气候、高润滑、不粘附、不吸潮等优点,因而在苛刻的环境中具有稳定的力学性能,是一种满足高过载冲击下严格要求的高分子材料,其弹性模量为1.14~1.42 GPa^[5],在外力作用下易发生弹性变形,是一种理想的缓冲加固材料。聚四氟乙烯衬垫进行缓冲加固的机理分为两类:一类是塑性吸能机理,即在过载冲击下发生塑性变形,吸收或储存部分能量;另一类是弹性滤波机理,主要是应力波在传递过程中发生滤波、折射或反射等情况,使雷管所受过载得到整形,从而达到降低过载峰值的作用。

3.1 塑性吸能机理

固体材料受外力作用变形。变形过程中,外力所做的功转化为储存于固体内的能量。固体在外力作用下因变形而储存的能量即为变形能。当外力逐渐减小时,变形逐渐减小,固体会释放出部分能量而对外做功,这部分能量为弹性变形能;由于固体材料的永久塑性变形而形成的能量则为塑性变形能。

空气炮过载实验中,子弹撞击靶板过程满足能量守恒定律。而对于电雷管和聚四氟乙烯加固件构成的局部系统,受到撞击作用引起运动状态的改变,将导致外力对其做功,总能量发生变化。外力所做的功,一部分转化为雷管及聚四氟乙烯加固件的动能变化,另一部分则转化为系统的内能。由于撞击过程是在极短的时间内完成的,因此可以假设系统的变形过程是绝热的,也

就是假设在变形过程中系统没有热量损失。因而,储存在系统内的内能就是固体材料变形而产生的变形能。

通常情况下,固体材料在变形过程中单位体积变形能被定义为应力-应变曲线下的积分面积,则体积为 V_0 的固体材料变形时产生的变形能 W ^[4]为:

$$W = V_0 \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

式中, W 为变形能,J; V_0 为体积,m³; σ 为材料在变形时受到的应力,Pa; ε 为材料在变形时受到的应变。应力-应变曲线下的积分面积越大,积蓄或吸收的能量也就越大,其缓冲效率也就越高。

当材料受单轴应力作用并均匀变形时, W 的计算较为简单。对于复杂应力状态下非均匀变形的固体材料而言, W 的计算过程则较为复杂。在数值计算过程中,材料变形所产生的塑性变形能可以直接采用后处理软件读取。

3.2 弹性滤波机理

高速运动的弹丸碰撞到目标时,在各自的表面和内部将产生高强度、短历时的冲击载荷,载荷以应力波的形式从弹丸头部向尾部传播。雷管通过雷管座装填在弹丸中。在雷管座强度足够、无雷管座结构失稳对雷管的挤压作用时,雷管将同时受到自身惯性力和来自弹丸前方的应力波的双重作用,致使表面产生变形、破坏,内部发生质点位移、应力与应变传播以及它们之间相互作用的十分复杂的变形-破坏行为,最终导致在总体上发生结构的塑性变形和损坏。

在应力波从弹头向弹尾传播过程中,当应力波从一种介质进入与之相接处的另一种介质时,因两种介质的波阻抗可能不同,应力波将在两种介质的界面上发生波的反射和透射^[8]。

定义透射系数 T 为:

$$T = \frac{2(\rho_0 C_0)_1}{(\rho_0 C_0)_1 + (\rho_0 C_0)_2} \quad (2)$$

式中, ρ_0 为密度,g·cm⁻³; C_0 为弹性波速,km·s⁻¹; $\rho_0 C_0$ 为波阻抗,g·cm⁻³·km·s⁻¹。式中 C_0 可由(3)式求得:

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

式中, E 为弹性模量,GPa。当弹性波垂直入射截面几何形状相同的介质时,透射波 σ_T 与入射波 σ_1 的关系为:

$$\sigma_T = T\sigma_1 \quad (4)$$

因此,当应力波传播到弹体或雷管座与缓冲衬垫的

界面时,两种介质的波阻抗相差越大,透过衬垫到达雷管的透射波就越小。衬垫和弹体的性能参数见表2。

表2 衬垫和弹体性能参数

Table 2 Parameters of gasket and projectile

parameters	gasket (PTFE)	projectile(GCr15)
$\rho_0/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.10~2.30	7.81
E/GPa	1.14~1.42	210
$C_0/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	0.704~0.822	5.185
$\rho_0 C_0/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	1.547~1.807	40.495

衬垫波阻抗取中间值 $1.677\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 因而由式(2)和式(4)计算得到透射波与入射波的关系为:

$$\sigma_T = T\sigma_1 = \frac{2(\rho_0 C_0)_1}{(\rho_0 C_0)_1 + (\rho_0 C_0)_2} \sigma_1 = \frac{2 \times 1.677}{1.677 + 40.495} \sigma_1 = 0.0795 \sigma_1 \quad (5)$$

由此可见,通过聚四氟乙烯衬垫后应力波得到了

表3 材料参数

Table 3 Material parameters

parts	mass density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Young's modulus / GPa	Poisson's rate	yield stress / GPa	tangent modulus / GPa	hardening parameter	strain rate parameter C	strain rate parameter P	failure strain for eroding elements
target	7.81	210	0.29	-	-	-	-	-	-
projectile	7.81	210	0.29	-	-	-	-	-	-
PTFE	2.20	1.28	0.40	0.20	0.20	1.0	0.0	0.0	0.0
detonator	2.70	70	0.30	6.85	26.5	1.0	0.0	0.0	0.0

数值模拟中,靶板和弹体采用各向同性线弹性模型 MAT_ELASTIC,雷管和 PTFE 采用等向硬化塑性随动模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC。塑性随动模型应变率使用与应变率相关的因数表示屈服应力^[12]。

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}}) \quad (6)$$

式中, σ_y 为屈服应力, GPa; σ_0 为初始屈服应力, GPa; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, μs^{-1} ; C 和 P 为应变率参数; $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ 为有效塑性应变; β 为硬化参数; E_p 为塑性硬化模量, GPa。

考虑对称性特点,建立撞击过程的 1/2 物理模型,采用 cm-g- μs 单位制、Lagrangian 算法、Solid 164 常应力实体单元,使用六面体映射网格划分实体。在模型对称面上施加对称边界约束,在钢靶板边界处施加固定约束。弹丸和靶板之间采用自动面-面接触。模拟过程设定子弹与靶板初始距离为 0.5 mm,子弹以 $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度撞击靶板,计算总时间为 100 μs 。

4.2 模拟结果与讨论

图 8 和图 9 是模拟得到的两种加载方向的 PTFE

大幅衰减,透射波为入射波的 0.0795 倍。应力波在传播过程中发生了滤波,因而使得雷管所受过载得到了整形,从而达到了降低过载加速度的作用。

4 数值模拟

4.1 模型与参数

ANSYS/LS-DYNA 是显式动力分析软件,适合处理高度非线性复杂动力学问题,在冲击、碰撞、爆炸等领域有着广泛的应用^[9-11]。本研究采用 ANSYS/LS-DYNA 10.0 对子弹动态撞击钢靶板过程进行数值模拟,重点分析聚四氟乙烯对雷管的加固作用。

该数值模拟的三维模型由钢靶板、弹体、雷管和 PTFE 组成。模拟过程中,将雷管简化为一个整体,并将螺帽、弹体、雷管座和填充块视为一个整体。为使模拟结果真实、与实验结果具有可比性,该模拟的模型尺寸全部与实验部分一致,材料参数亦在实验基础上确定,材料参数见表 3。

塑性变形能、雷管塑性变形能和雷管过载加速度曲线。

图 8a 和图 9a 表明,轴向加载时缓冲垫厚度或横向加载时缓冲套管壁厚对其缓冲吸能效果均具有明显的影响,随着缓冲层厚度增加,聚四氟乙烯吸收的能量增多;图 8b 和图 9b 表明,无缓冲时雷管吸收的能量远大于有缓冲时雷管吸收的能量,特别是横向加载时有无缓冲层雷管吸收的能量差异更加显著,有缓冲时随着缓冲层厚度增加,雷管吸收的能量逐渐减少;图 8c 和图 9c 表明,无缓冲时雷管承受的过载加速度大于有缓冲时雷管承受的过载加速度,特别是横向加载时加速度差别更加显著,有缓冲时随着缓冲层厚度增加,雷管所承受的过载加速度随之减小。综合图 8 和图 9 模拟结果,可以发现聚四氟乙烯厚度为 0.8 mm 时聚四氟乙烯吸收的能量、雷管吸收的能量和雷管承受的过载加速度均十分接近聚四氟乙烯厚度为 0.9 mm 时的曲线,表明聚四氟乙烯厚度为 0.8 mm 时对雷管已具有较好的保护作用。

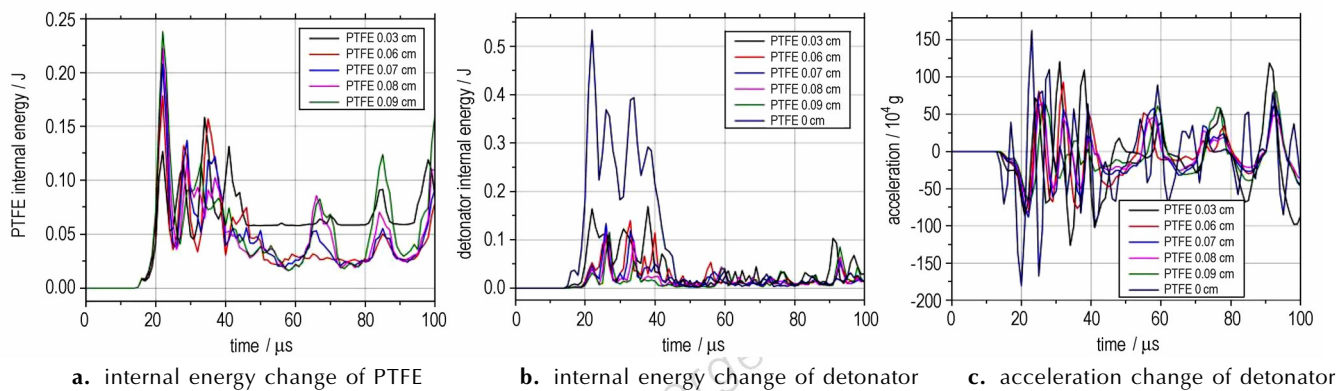


图 8 轴向加载时模拟结果

Fig.8 Simulation results under axial loading

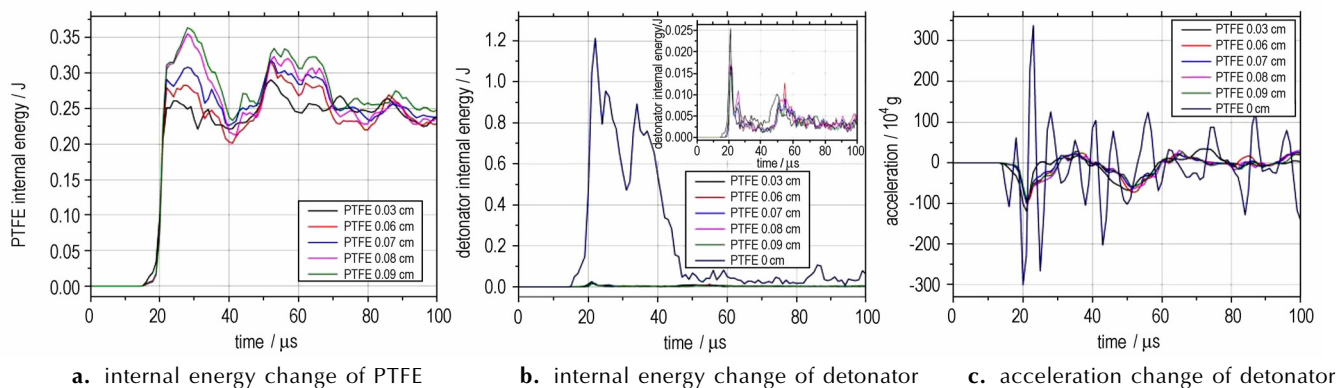


图 9 横向加载时模拟结果

Fig.9 Simulation results under transverse loading

将图 8 和图 9 模拟结果与实验数据及式(5)的计算结果进行比对,可以得到一致的结果,即 PTFE 缓冲层厚度越大,吸收的能量越多,经 PTFE 缓冲后作用到雷管上的塑性变形能就越少,雷管最终所承受的加载加速度也越小,因而 PTFE 对雷管的保护作用就越强。加入聚四氟乙烯缓冲层能显著减小雷管的损伤,提高雷管抗冲击过载的能力。

5 结论

采用空气炮实验装置,以轴向输出端加载和横向加载的方式,在子弹以 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度动态碰撞钢靶板的过程中,采用不同厚度的聚四氟乙烯缓冲垫或不同壁厚的聚四氟乙烯缓冲套管作为缓冲材料,对典型桥丝式独角电雷管的加固过程进行实验、理论分析和数值模拟,表明:

(1) 轴向加载时,电极塞发生内陷,无桥丝断裂现象;横向加载时,电极发生倾斜,壳体截面呈现椭圆形,未加固产品过载后桥丝全部断裂,加固产品桥丝损伤显著减小。

(2) 聚四氟乙烯可以显著改善外界环境条件,且横向加载时外界环境条件改善效果显著于轴向加载,其加固机理有塑性吸能和弹性滤波两种。

(3) 实验、计算与模拟获得了一致的规律,衬垫缓冲层隔离了冲击应力波和缓冲了雷管质量惯性,随着缓冲层厚度增加,缓冲吸收的能量增多,雷管承受的过载加速度和受到的过载损伤逐渐减小。

(4) 聚四氟乙烯材料的加入对雷管有明显的保护作用,可以有效减小雷管的损伤。当缓冲层厚度为 0.6 mm 时,无桥丝断裂现象出现;为 0.8 mm 时,对雷管已具有较好的保护作用;为 0.9 mm 时,雷管无明显损伤发生。

参考文献:

[1] 王凯民, 温玉全, 编著. 军用火工品设计技术[M]. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 2006.
 [2] Turner L J. Hard target reliability for MAFIS [C] // 50th Annual Fuze Conference, 2006.
 [3] 范锦彪, 徐鹏, 王燕, 等. 高速动能弹侵彻钢板加速度测试技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(2): 123-126.
 FAN Jin-biao, XU Peng, WANG Yan, et al. Acceleration test of

- high velocity kinetic energy projectile penetrating armour plate [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(2): 123-126.
- [4] 张建新. 侵彻引信炸点控制理论及试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
ZHANG Jian-xin. Theoretical and experimental study on burst point control for penetration fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [5] 徐蓬朝, 黄惠东, 张龙山, 等. 垫片提高抗冲击能力的应力波衰减机理[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(2): 1-6.
XU Peng-zhao, HUANG Hui-dong, ZHANG Long-shan, et al. Stress wave reflecting attenuation to improve anti-shock capacity by gasket[J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(2): 1-6.
- [6] 蔡吉生, 沈瑞琪, 叶迎华, 等. 延期体抗高加速度过载的界面加固性能研究[J]. 火工品, 2007(4): 43-46.
CAI Ji-sheng, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, et al. Study on boundary reinforcing performance of delay element for high acceleration load[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(4): 43-46.
- [7] 奥成刚, 任炜, 白颖伟, 等. 某桥丝电雷管抗过载性能检测与加固技术[J]. 含能材料, 2012, 20(3): 349-354.
AO Cheng-gang, REN Wei, BAI Ying-wei, et al. Performance determination and structure reinforced design of detonator in high acceleration overload environments[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(3): 349-354.
- [8] 郭伟国, 李玉龙, 索涛. 应力波基础简明教程[M]. 第1版. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [9] 王娜. 冲击波加载过程中火工品的受力分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
WANG Na. Mechanical analysis of initiator in loading of shock wave[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004.
- [10] 杨正才, 廖昕, 李晓刚, 等. 某隔板起爆器冲击起爆过程的数值模拟与实验研究[J]. 含能材料, 2011, 19(2): 221-225.
YANG Zheng-cai, LIAO Xin, LI Xiao-gang, et al. Numerical simulation and experimental investigation for shock initiation of bulkhead initiator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 221-225.
- [11] 曹磊. 含能材料损伤本构模型的数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
CAO Lei. Numerical simulation study on constitutive model with damage of energetic materials[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [12] 尚晓江, 苏建宇, 等. ANSYS LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 第1版. 北京: 中国水利电力出版社, 2006.

Reinforcement Method of Typical Electric Detonator with PTFE under High Overloading

SUN Xiao-xia^{1,2}, LIU Wei¹, SHEN Rui-qi¹, YE Ying-hua¹, WU Li-zhi¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Liaoning North Huafeng Special Chemical Limited Company, Fushun 113003, China)

Abstract: To improve the anti-overloading ability of initiating explosive device under ammunition penetration target, polytetrafluoroethylene (PTFE) materials with varied thickness were added at the bottom or the outer wall of detonators to weaken the impact stress wave and the strength of inertial overload. The standard one-leg bridge-wire electric detonators were used as strengthening object. The mechanism and effectiveness of this reinforcement method were studied by gas gun experiment and numerical simulation. Experiment and the simulation results show that the buffer layer isolates the impact stress wave and cushions the mass inertia of the detonators. With the increase of gasket thickness, the overload acceleration and overload damage of detonator decrease gradually. When the buffer layer thickness is greater than 0.9 mm, the detonator has no obvious damage. The addition of PTFE materials on the detonator has an obvious protective function.

Key words: solid mechanics; buffer layer reinforcement; bridge-wire electric detonator; polytetrafluoroethylene (PTFE); high overload; air gun

CLC number: TJ45⁺2.3; O347.3

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.025