

文章编号: 1006-9941(2010)01-0063-05

耐高过载延期电雷管的设计

雷 鸣, 高 艳, 刘文灏

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安 710061)

摘 要: 为提高延期电雷管耐冲击性能, 对其加载作用过程进行了分析, 对加固与缓冲结构、耐冲击延期技术进行了研究, 并采用应力分解和对发火、传火、延期元件加固设计, 环形储气空间设计, 对其进行了设计。高冲击加载试验结果表明, 该设计方法耐加速度冲击高于 1×10^5 g, 可提高延期性能。

关键词: 军事化学与烟火技术; 高过载; 延期; 电雷管

中图分类号: TJ55

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.016

1 引 言

延期雷管作为攻坚弹药起爆装置的主要做功单元, 在载体碰击目标时, 承受的过载有时高达 1×10^5 g^[1]。当弹丸高速撞击目标时会导致强应力波压缩后产生强稀疏波拉伸, 使引信体内部的器件被拉断, 导致火工品受到严重破坏、失效或早爆, 常规延期雷管在这种高加速度冲击载荷作用下就会出现延期精度下降、串火、延期失效等现象。目前, 国内外对延期雷管耐高过载研究的报道较少^[2-3], 国内用于硬目标引信的延期雷管, 通常采取火工品外壳加塑料套管缓冲或采取引信缓冲的办法应对系统耐高过载要求。为了提高电延期雷管耐高过载性能, 本文对延期雷管高过载加载过程进行了分析, 对其结构加固、装药工艺、缓冲技术进行了研究, 采用了应力分解结构和径向环形储气空间设计思路, 通过应力分解技术和环形储气空间的设计, 使延期电雷管耐冲击过载高于 1×10^5 g, 对提高攻坚弹药的杀伤效果有重要意义。

2 结构分析与设计

2.1 应力分解结构设计

在常规的延期雷管设计中, 延期药柱被约束在外管壳或内管壳内, 药剂和管壳承受的是同一级加载应

力。在高过载环境下, 强冲击载荷在短时间内会使加载到管壳和药柱的载荷发生显著的变化, 产生高传播应力和高应变率, 导致管壳的管壁发生屈曲, 延期药柱受挤压, 出现药、管分离和药剂失稳现象, 使延期精度下降或失效。根据以上分析, 将延期雷管的外管壳与内管壳分离, 延期管壳与内管壳分离, 使外载荷施加到延期药柱的作用力(应力)通过结构设计得以逐级衰减, 并减少由于管壳的变形对延期药柱的影响。延期雷管加固结构的设计思路, 是在延期雷管的外管壳内设计一个工字形内管壳(以下简称内管壳), 两管壳径向被空腔隔离, 将延期管壳镶入内管壳的一端, 内管壳两端分别用塑料垫圈/片、外管壳底端面以及陶瓷电极塞端面约束, 外管壳、内管壳、延期管壳构成三级应力衰减。耐冲击延期电雷管结构示意图如图 1 所示。

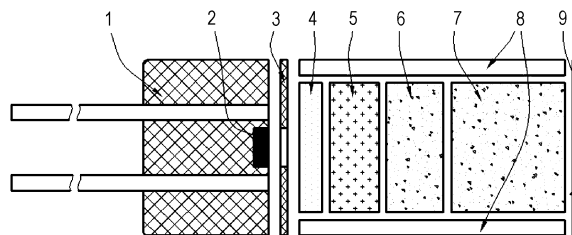


图 1 耐高过载延期雷管结构示意图

1—电极塞, 2—发火件, 3—约束垫圈, 4—点火药柱, 5—延期药柱, 6—起爆药柱, 7—输出药柱, 8—环形空间, 9—缓冲垫

Fig. 1 Structure diagram of delay detonator withstanding a high acceleration impact

1—insulated plug, 2—firing element, 3—washer, 4—ignition composition pellet, 5—delay composition pellet, 6—initiating explosive pellet, 7—output charge, 8—annular space, 9—buffer

收稿日期: 2009-02-06; 修回日期: 2009-09-07

基金项目: “十一五”预研课题(51305080102)

作者简介: 雷鸣(1955-), 男, 工程师, 从事耐高过载延期火工品技术研究。e-mail: ring_213@163.com

2.2 发火件、点火药头、延期药柱的加固

本设计采用半导体桥作为换能元件^[4]。为了验证其在常规封装工艺下的耐高过载性能,对该半导体桥芯片进行了霍普金森压杆装置的高过载加载测试^[5-6]。被测半导体桥芯片用环氧胶粘接、约束到陶瓷电极塞端面的方槽中,将电极塞组件装到试验夹具中进行加载试验,加载后的半导体桥经测试各项技术指标正常。设计中采用点火药头形式作为初始装药与发火件匹配。为了使点火药头在装药、高过载冲击中能够保持完好,用一环形垫圈对其约束,此外垫圈还具有缓冲、增强绝缘的作用。对延期药柱的加固主要采取:①减小药柱直径,缩小延期药柱的中心和药管之间塑性应变差异,降低因径向位置不同产生的应变差对延期药柱内部的剪切破坏程度;②对延期药柱的两个端面进行约束。

2.3 环形储气空间结构设计

密封性对燃速的影响通过气体压力表示出来,同时点火头产生的气体量也影响气体压力与延期药的燃速。所以,有些延期火工品为了减少气体压力,在内部设计一定的自由空间,以储存产生的气体^[2,7]。常规延期火工品通常将储气空间设计为轴向,这种结构将导致产品的体积增加,不利于提高其耐冲击性能。本设计利用应力分解结构的外管壳与内管壳分离的空间作为储气空间,将这个空间通过内管壳设定的孔与点火、延期腔连通,形成一个环形储气空间,期望在高过载环境中提高延期性能。

3 试验方法

3.1 高过载加载试验方法

采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置进行冲击加速度加载试验。该试验主要用于评价试件与装配组件的结构失稳导致的试件挤压变形应力。加载过程中,将短试件夹置于输入杆和输出杆之间,通过高压气枪发射的子弹以一定速度撞击输入杆,在输入杆中产生入射弹性应力波,此应力波沿输入杆并通过杆端传递到试件上,对试件进行高速应力波加载,与此同时向输入杆传播反射波和向输出杆传播透射波,SHPB加载试验装置原理见图2。

SHPB试验技术是建立在杆中一维应力波假定和短试件应力/应变沿其长度均匀分布假定的基础上。由于SHPB长径比较大,这里可以将应力波看作一维应力波。如果试件足够短,试件内部沿长度的应力/应

变分布将很快趋于均匀化,从而可以忽略试件的应力波效应^[6]。

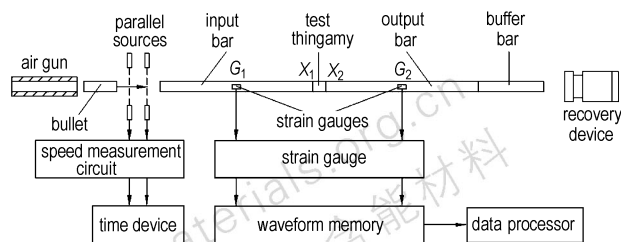


图2 分离式霍普金森压杆加载装置示意图

Fig. 2 Diagram of SHPB loading device

根据应力波理论,输入杆端面质点速度为:

$$v = C_0 [\varepsilon_1(X_1, t) - \varepsilon_R(X_1, t)] \quad (1)$$

其中

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (2)$$

由于试件长度比输入杆小得多,可忽略应力波在试件内的损失,入射波全部反射,反射波 ε_R 是入射波 ε_1 的倒像:

$$\varepsilon_R = -\varepsilon_1 \quad (3)$$

由于试件与输入杆端面粘接,由(1)、(3)式可得输入杆端面即试件的轴向质点速度 v 和加速度 a 的值为:

$$v = 2C_0\varepsilon_1 \quad (4)$$

$$a = 2C_0 \frac{d\varepsilon_1}{dt} \quad (5)$$

式中, ε_1 、 ε_R 、 C_0 、 E 、 ρ_0 分别为霍普金森压杆的入射应变、反射应变、波速、弹性模量和密度。实验中,测出输入杆的应变 $\varepsilon-t$ 曲线,运用公式(5),可得到试件所承受的过载加速度计算数值^[5-6]。

3.2 延时试验的测试方法

按照WJZ273-1991规定的测试方法,采取靶线炸断测量。延期雷管的延期时间是从给雷管输入端施加电脉冲开始到雷管作用炸断靶线结束的时间间隔。

4 测试结果

4.1 高过载试验结果

SHPB加载试验装置的杆径为 $\Phi 19$ mm,采用图1所示结构的试件,装在 $\Phi 13$ mm \times 20 mm的试验夹具中。应变信号通过粘贴在入射杆和透射杆G1、G2处的应变片得到,通过式(4)、(5)可求证加速度数据,转换的加速度曲线波形见图3,高过载加载试验数据见表1。

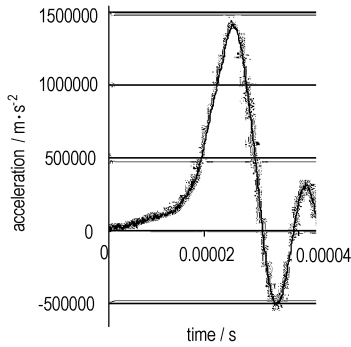


图3 典型加载加速度波形

Fig.3 Typical accelerating waveform

表1 霍普金森压杆加载试验数据

Table 1 SHPB loading test data

type	quantity /piece	bullet driving pressure/MPa	acceleration / $\times 10^4$ g
I	5	0.18 ~ 0.25	12.0 ~ 15.0
II	5	0.18 ~ 0.25	10.0 ~ 14.5

类型 I、II 分别表示两个不同延时段,每个延时段 10 发试件,其中 5 发作高过载试验。

4.2 延时试验结果

对加载试验件与未加载试验件进行延时对比试验,试验数据见表 2。

4.3 有、无储气空间对比试验

对毫秒长延时段有、无储气空间延时进行了延时对比试验,试验数据见表 3。

4.4 加载作用过程数值模拟

应用 ANSYS/LS-DYNA 分析软件的非线性动力分析程序,对 SHPB 高过载加载过程进行动态模拟,可对试验样件内部应力传播状态进行求解。数值模拟分析的材料参数(包括材料密度、弹性模量、泊松比、屈服应力、剪切应力等参数)以及材料模型的选择是否准确,将导致分析结果的差异。本分析采用的参数,其通用材料参数来自于对该材料试验样块进行的动态测试数据;其特殊材料,如药剂,则来自于行业内部公布的相关数据或采用接近其材料特性的相关材料参数;加载数值来自表 1 所示实验室实测的数据。图 4、图 5 和表 4 是分析模型受外载荷加载作用时相应拾取点的应力传播过程和应力传播数据。图 4 上部的图形为普遍应用的延期雷管结构分析模型,在分析模型中采取了延期药剂界面约束,减小延期药柱直径以及轴向缓冲等加固、缓冲措施。图 6 为应力分解加固结构分析模型变形结果图。

5 分析与讨论

由表 2 延时试验的结果可见,加载与未加载的试件,延期时间散布变化不大,表明点火、延期序列的形态经过高过载冲击后基本保持完好。对加载试验件进行的工业 CT 扫描和解剖的结果可见,加载试件的外管壳和内管壳都有不同程度的屈曲变形,延期管壳基本没有变形。

从模拟结果的曲线数据可看见,虽然经过一些耐冲击处理,但外管壳加载的应力传播到内管壳并没有得到明显的衰减,在高加速度冲击下受内管壳约束的延期药柱部位仍产生较大的传播应力。由表 4、图 4 的数据和曲线可见,这种结构的延期雷管受到外载荷冲击时,外管壳(点 9594)、内管壳(点 10610)应力传播差别不大,均呈现高应力传播特征。处于这种冲击载荷条件下的可变形固体,由于在强冲击载荷所具有的在短暂时间尺度上发生载荷显著变化的特点,意味着高加载率或高应变率。实践表明,在不同应变率下,材料的力学行为往往是不同的。从材料变形机理来说,各种类型的非弹性变形都是以有限速率发展、进行的非瞬态响应,如应力引起的扩散过程,损伤的演化过程,裂纹的扩散过程等。图 5 上部图形为采取应力分解加固结构设计的延期雷管模型,由表 4、图 5 的数据和曲线可见,外管壳(点 8808)和内管壳(点 10225)仍具有高的传播应力,但内管壳的传播应力迅速减小,传播到延期管壳(点 17018)的应力得到了较大的衰减(此模型从外管壳到延期管壳衰减近 70%)。由图 6 截取的加载过程模型变形结果可见,在外载荷作用下,外管壳、内管壳均发生了较明显的变形,延期管壳没有发生明显的变化。对于加载后产生了延期时间的漂移,本研究认为属于制作工艺范畴,不做模拟分析。

环形储气空间的设计,主要解决毫秒长延时段延期雷管耐冲击问题。由表 3 试验结果可见,对于长延时段,有、无储气空间无论在延期时间还是延期精度方面都有较大的影响,由于该设计与应力分解加固结构有关,在此仅作简单叙述。

发火、点火、延期序列的加固应符合整体耐冲击设计要求。根据本研究对高过载加载试验后样机的外部形态、内部各部件的解剖、观测以及对试验数据的分析,认为本结构点火、延期序列的加固应从以下几方面加以考虑:(1)在壳体材料的选择上应从外向内采取逐步提高其屈服应力的选材原则;(2)延期药柱的直径尽可能小,因为,延期体承受冲击过载的过程就是应

力波在延期体中传播和反射的过程,在这个过程中延期体将被压缩和拉伸。延期药柱的中心和药管之间塑性应变差异很大,减小药柱直径就是缩小这种应变差异,降低因径向位置不同产生的应变差对延期药柱内部的剪切破坏程度;(3)延期系统各部件轴向之间要加大装配压力,使之处于变形临界状态,尽量减小加载前、后轴向位置上的变化,这是解决延时漂移问题的关键;(4)点火、延期药柱要进行约束。

表 2 延时试验数据

Table 2 Delay test data

with high acceleration impact test						without high acceleration impact test				
type	quantity /piece	\bar{t} /ms	t_{max} /ms	t_{min} /ms	S	quantity /piece	\bar{t} /ms	t_{max} /ms	t_{min} /ms	S
I	5	6.8	8.0	5.6	1.13	5	8.68	9.8	8.0	0.77
II	5	27.0	28.6	24.8	1.5	5	29.4	30.8	28.4	0.96

Note: S is standard deviation.

表 3 有,无储气空间延时对比试验数据

Table 3 Comparison of delay test data with and without a gas storage space

	quantity /piece	\bar{t} /ms	t_{max} /ms	t_{min} /ms	S
with a gas storage space	5	249.6	276	228	19.92
without a gas storage space	5	374.4	386	356	13.68

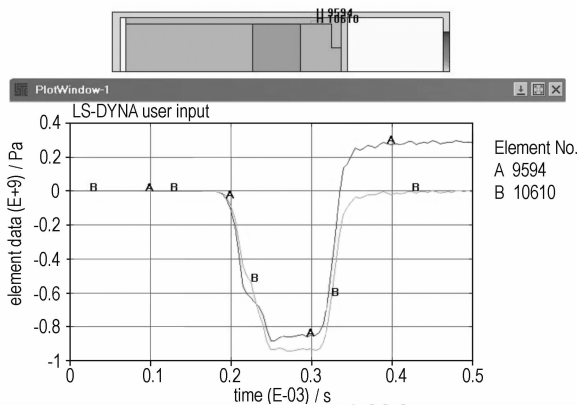


图 4 普通结构分析模型及应力分布曲线

Fig. 4 Common structure model and loading stress distribution curve

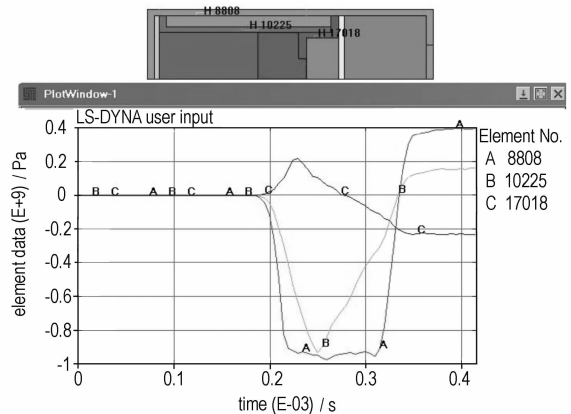


图 5 应力分解结构分析模型及应力分布曲线

Fig. 5 Stress distribution structure model and loading stress distribution curve

表 4 分析模型应力传播数据

Table 4 Stress propagation data of the models

common structure			stress distribution structure		
point	stress /Pa	stress attenuation /%	point	stress /Pa	stress attenuation /%
9594	1.18×10^9 (max)		8808	1.38×10^9 (max)	
10610	0.94×10^9 (max)	20.3	10225	1.1×10^9 (max)	20.3
			17018	4.4×10^8 (max)	68.1

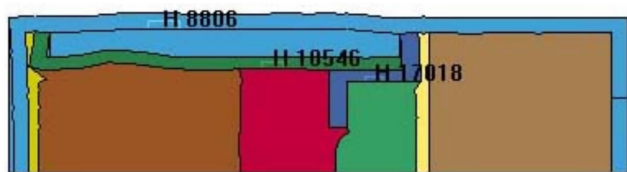


图6 应力分解加固结构分析模型变形结果

Fig.6 Distortion results of stress distribution and consolidating model

6 结论

(1) 设计有应力分解结构的延期电雷管可承受大于 1×10^5 g 的加速度冲击。

(2) 延期体环形储气空间结构的可起到稳定延期的作用。

(3) 使延期系统各部件轴向之间处于挤压变形临界状态,是解决延时漂移问题的关键。

参考文献:

- [1] Laurie Turner. MAFIS a proven hard target fuze[C]//50th Annual Fuze Conference, Norfolk, Virginia, 2006.
- [2] Paul J, Bryan. Shock-resistant delay detonator: USP4696231 [P]. 1987.
- [3] Liebhardt, Joset. Detonator system für Hochschock und allgemeine Anwendung: DE4214327 [P]. 1993.
- [4] Bouma R H B, Boluijt A G. Electrical characterization of a semi-conducting bridge initiator with and without pyrotechnic mixture [C]//52th Annual Fuze Conference, Sparks, NV, 2008.
- [5] 张学舜, 沈瑞琪, 邓强, 等. 雷管抗高过载能力的安全性试验评价 [J]. 火工品, 2004(2): 4-7.
ZHANG Xue-shun, SHENG Rui-qi, DENG Qiang, et al. Test and evaluation of safety of detonator in shock environments [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(2): 4-7
- [6] 王礼立编著, 朱兆祥审校. 应力波基础[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
WANG Li-li, ZHU Zhao-xiang. *Foundation of Stress Waves* [M]. Beijing: National Defense Industry Publishing Press, 2005.
- [7] 北京工业学院八四教研室. 火工品[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1977.
Industry College of Beijing 84 Teaching and Research Section. *Initiators & Pyrotechnics* [M]. Beijing: Industry College of Beijing Publishing Press, 1977.

Design of Electric Delay Detonator Withstanding a High Acceleration Impact

LEI Ming, GAO Yan, LIU Wen-hao

(Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: The loading process was analyzed to improve performance of delay electric detonator withstanding a high acceleration impact. The consolidating and buffering structures, and delaying technology withstanding impact were also studied. The design of stress distribution, firing, auxiliary ignition, consolidating design of delay element, annular gas storage space structure design were adopted. Thereby, high impact loading test was carried out. Results show that the value withstanding acceleration of the above design structures is higher than 1×10^5 g and the delay performance is also improved.

Key words: military chemistry and technique of pyrotechnics; high acceleration; delay; electric detonator

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.016