

文章编号: 1006-9941(2012)03-0349-06

某桥丝电雷管抗高过载性能检测与加固设计

奥成刚, 任 炜, 白颖伟, 商弘藻

(陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘 要: 霍普金森压杆试验装置与 X 射线 CT 层析用于评价抗高过载条件下桥丝电雷管的性能。由试验结果得到了失效模式与易损特性。通过材料优选、结构优化与加固、过渡装药固化, 设计了结构加固的桥丝电雷管。结果表明, 加固设计后的桥丝电雷管可承受加速度 $\geq 10^5$ g 和宽度约为 100 μ s 的脉冲冲击。高加速冲击后电雷管性能和结构基本无变化, 提高了桥丝电雷管的抗高加速过载能力。

关键词: 固体力学; 桥丝电雷管; 高加速度过载; 结构加固设计

中图分类号: TJ45; O34

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.03.019

1 引 言

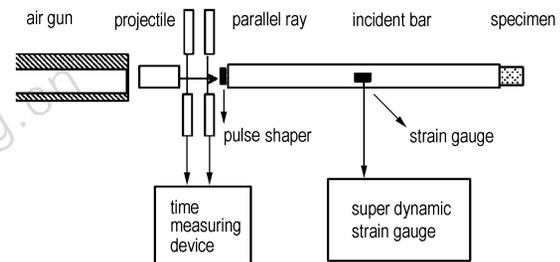
桥丝电雷管是引信爆炸序列中广泛采用的一种电雷管, 其在高加速度过载下引起的失效或性能变化将影响引信爆炸序列的作用性能, 从而会影响战斗部或弹丸对目标的毁伤效果^[1]。因此, 近年来, 我国十分重视桥丝电雷管等火工品单元的抗高加速度过载相关研究工作, 相继开展了火工品动态着靶模拟仿真技术与性能测试、雷管抗过载能力安全性试验评价、高加速度过载下延期元件的失效机理、延期体抗高加速度过载的结构加固性能等研究。已有的大量研究与试验结果表明^[2-5], 在高加速度过载条件下, 桥丝电雷管抗自身质量惯性过载的能力远大于抗结构失稳过载的能力; 抗径向结构失稳能力低于抗轴向结构失稳的能力; 抗轴向输出端的结构失稳能力低于抗轴向输入端的结构失稳能力, 基本掌握了高加速度过载下桥丝电雷管的失效模式与易损特性。在此基础上, 开展桥丝电雷管抗高加速度过载加固技术研究, 是适应攻坚武器弹药与硬目标侵彻战斗部起爆系统发展的迫切需要。

为此, 本课题组在对某桥丝电雷管抗高加速度过载性能检测与分析的基础上, 从材料优选、结构优化与加固、过渡装药固化处理等方面, 开展桥丝电雷管抗高加速度过载加固技术研究, 并对加固设计后的桥丝电雷管

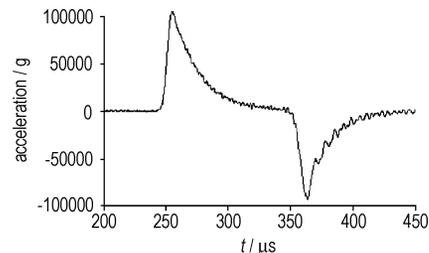
的抗高过载性能进行了试验验证。

2 抗高过载性能检测与分析

试验条件: 利用如图 1、2 所示的自由式和分离式霍普金森压杆试验装置^[6-7]与加速度加载波形(冲击加速度 $\geq 10^5$ g、脉冲宽度约为 100 μ s), 根据桥丝电雷管的结构特点, 完成了桥丝电雷管惯性过载与结构失稳过载条件下, 轴向输入、轴向输出、径向平行及径向垂直 4 个受力方位的抗过载性能检测。



a. principle of freestyle Hopkinson pressure bar



b. loaded waveforms of acceleration

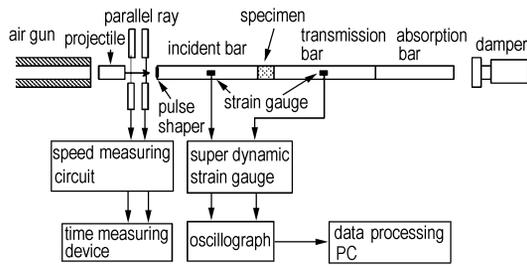
图 1 自由式霍普金森压杆试验装置与加速度加载波形

Fig. 1 Freestyle Hopkinson pressure bar and its loaded waveforms of acceleration

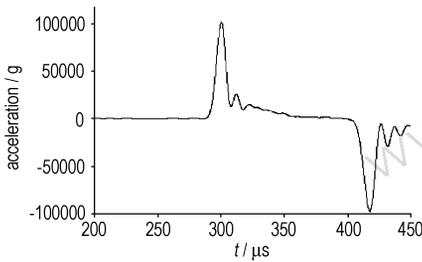
收稿日期: 2011-05-03; 修回日期: 2011-10-17

基金项目: 总装预研项目(51305080101)

作者简介: 奥成刚(1978-), 男, 高级工程师, 从事高新火工品技术研究。e-mail: acg_213@163.com



a. principle of split Hopkinson pressure bar

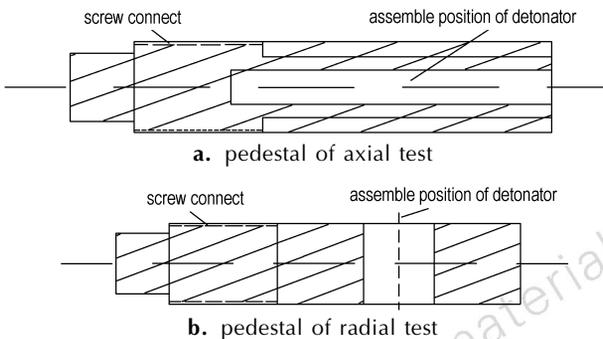


b. loaded waveforms of acceleration

图2 分离式霍普金森压杆试验装置与加速度加载波形

Fig.2 Split Hopkinson pressure bar and its loaded waveforms of acceleration

抗高过载性能检测试验样品安装于如图3所示的雷管座。通过过载前后电雷管电阻值及结构变形情况的检测与分析,得出桥丝电雷管高过载冲击条件下的失效模式与易损特性,为抗高过载加固设计提供理论与数据支持。



a. pedestal of axial test

b. pedestal of radial test

图3 抗高过载性能检测雷管座示意图

Fig.3 Detonator pedestal in high overload test

惯性过载与结构失稳过载前后电雷管的电阻值变化与结构变形情况见表1和表2。

表1的惯性过载试验结果表明,受力方位不同时电雷管电阻值的变化不同。其中,受力方位为径向的阻值变化率大于受力方位为轴向的阻值变化率;受力方位为轴向输出的阻值变化率大于受力方位为轴向输入的阻值变化率;受力方位为径向垂直的阻值变化率大于受力方位为径向平行的阻值变化率。结合图4的过载

后壳体变形情况,某些试样壳体出现了轴向压缩、径向裂痕或输出端的径向膨胀等结构变形。综上可见,惯性过载条件下,电雷管的径向方向较轴向方向,轴向输出较轴向输入,为高惯性过载条件下的薄弱环节。

表1 桥丝电雷管4个受力方位惯性过载试验结果

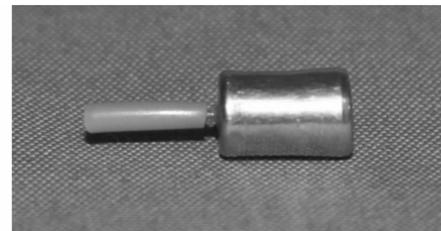
Table 1 Inertial overload test results on four bearing position

test position	test number	resistance change percents/%			structural deformation number
		max	min	average	
axis input	10	0.811	0.678	0.745	0
axis output	10	1.635	0.774	1.144	2
radial parallel	10	4.420	0.699	1.381	1
vertical radial	10	7.628	0.666	1.799	1

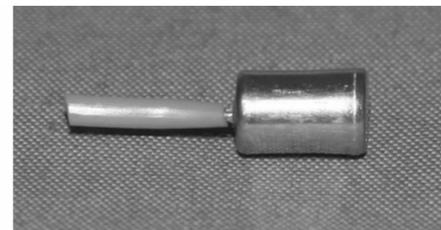
表2 桥丝电雷管4个受力方位结构失稳过载试验结果

Table 2 Structure instability overload test results on four bearing position

test position	test number	resistance change percents/%			explosion number
		max	min	average	
axis input	10	1.022	0.774	0.898	0
axis output	10	2.166	0.774	1.321	0
radial parallel	10	0.646	0.258	0.506	2
vertical radial	10	1.723	0.518	0.982	1



a. axial compression



b. radial expansion



c. radial crack

图4 桥丝电雷管惯性过载后壳体变形情况

Fig.4 Shell deformation after high inertial overload impact

表 2 的结构失稳过载试验结果表明,4 种受力方位的电雷管电阻值的最大值、最小值、平均值均呈增大趋势,说明过载试验对电雷管的电阻值有影响;但是特别值得关注的是,以径向方向为受力方位的试验中,某些试样发生了爆炸现象,对比惯性过载试验结果可知,电雷管抗自身质量惯性过载的能力大于抗结构失稳过载的能力。

为了进一步观测高加速度过载冲击对壳体及其内部结构的影响情况,利用 X 射线 CT 层析扫描设备对采用玻璃电极塞的电雷管内部结构进行检测与分析,结果如图 5 所示。

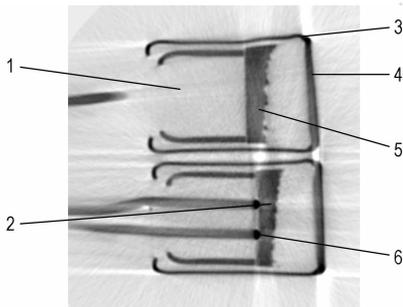


图 5 桥丝电雷管高加速度过载后内部结构 CT 层析图
1—玻璃塞体裂纹, 2—装药界面位移, 3—壳体径向膨胀,
4—壳体轴向压缩, 5—装药密度减小, 6—药面脱离焊点

Fig. 5 X-ray CT chromatogram of detonator after high acceleration overload impact

1—crack on stopple, 2—remove of explosive interface, 3—radial expansion of shell, 4—axial compression of shell, 5—decrease of explosive density, 6—explosive interface leave weld point

由图 5 的 CT 层析图可以看出,高加速度过载后,玻璃电极塞塞体出现了数条细小的裂纹。随着冲击过载的加剧塞体会发生脆裂,形成锋利的边角,发生错位移动刺入始发装药,可能会击发始发装药导致试样的爆炸。此外,由于高冲击与塞体的错位移动导致其对管壳的支撑作用降低,发生壳体变形及内部装药结构的变化,如部分药剂脱离桥丝焊接面,药剂界面向输出端位移,使焊接点暴露,始发装药的密度减小,从而会影响桥丝点火与火工序列作用的可靠性,造成试样失效。

综合上述桥丝电雷管高过载性能检测与试验结果表明,在高加速度冲击过载下,电雷管会发生电阻值增大、管壳绝热剪切、药剂界面位移、玻璃电极塞脆裂及早炸等性能或结构变化现象;且桥丝电雷管抗结构失稳过载能力较抗惯性过载能力差,抗径向过载能力较抗轴向过载能力差;基本掌握了桥丝电雷管高过载条件下的失效模式与易损特性^[4]。

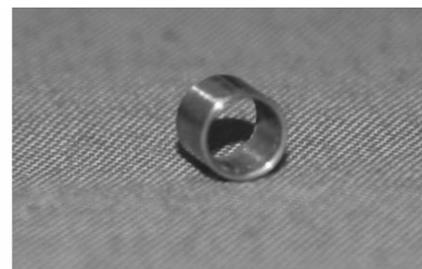
3 抗高过载加固设计

3.1 结构材料的优选

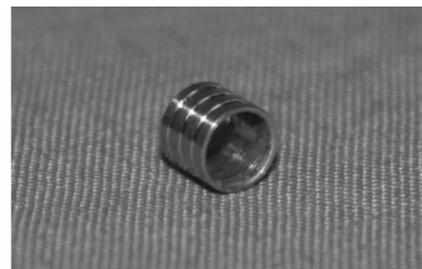
根据冲击动力学理论^[9],绝大多数金属材料的抗动态冲击性能与其准静态时的抗拉强度、屈服强度与冲击韧性等机械性能密切相关;准静态时机械性能优良的材料,在动态冲击条件下可承受较强的弹性波和塑性波的加载作用,且不易发生塑性变形及微观与宏观结构的破坏。因此,我们结合火工品常用金属材料的性能参数进行优选,即壳体选用 1Cr18Ni9Ti,利用其较高的机械强度可增强电雷管整体抗高过载性能,同时对提高电雷管的输出威力有利;加强帽选用较好韧性且与药剂相容性好的铝合金 L3M,有利于管壳与内部零部件的紧密结合;加强环选用硬度较高的超硬铝 LC4CS 和钛合金,可有效地保护药柱,减小冲击应力波对药柱的破坏;电极塞选用韧性好的酚醛塑料,以减少高过载冲击作用引起的塞体脆裂现象。

3.2 径向加强环的设计

针对电雷管输出端径向抗高过载冲击能力差这一关键薄弱部位,加固设计中增设了径向金属加强环进行保护。径向金属加强环的实物如图 6 所示;为减小径向加强环的质量,加强环也可加工为如图 6b 所示的沟槽状。



a. general



b. grooved

图 6 径向金属加强环实物图

Fig. 6 The radial metal reinforce ring

3.3 电极塞的结构优化

为了配合径向加强环的应用,将电极塞设计为带有

台阶圆的圆柱体。具体装配时将加强环套压在电极塞的突起圆柱上,使电极塞与加强环固定为一体。利用突起圆柱对加强环起到的圆周方向的支撑作用,增强对压入其中的始发装药与中间装药的保护,降低因壳体变形引起的始发装药与中间装药药柱的裂纹或点火传爆功能的破坏。台阶圆柱体电极塞结构实物如图7所示。

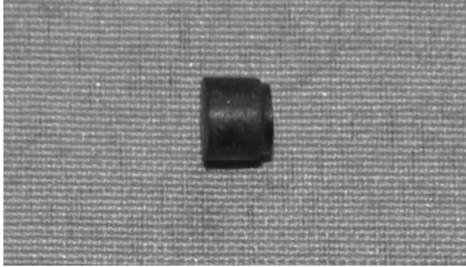


图7 台阶圆柱体电极塞实物图

Fig.7 The step cylinder electrode stopple

3.4 过渡装药的固化处理

电雷管的药剂装填工艺是影响其作用性能的重要因素,其中,压药密度及其一致性对电雷管的爆炸性能与输出功能有着直接的影响^[10]。压药过程中内应力的不均匀分布是引起密度不均匀的主要原因,药柱密度的均匀性与药柱内部应力的均衡程度有直接关系,高密度和密度均匀性预示着药柱具有高的强度和低的内应力,标志着药柱具有较好的尺寸稳定性且不易出

现裂纹等瑕疵^[11]。因此,为了提高药剂高过载条件下的抗过载能力,在药剂装填过程中应减少内应力的不均匀分布,提高装药的密实性与均匀性。

一般情况下,桥丝电雷管的装药包括初始装药、过渡装药与输出装药。其中,过渡装药普遍采用松装方式。而在压合与收口过程中,该层装药只承受上下两端传递过来的较小压力,导致装药密度亦较小。在高加速度过载冲击下,过渡装药层会因承受不了过载作用而变形,导致电雷管内部结构发生变化。本文研究为了提高松装过渡装药的抗冲击过载能力,采用交联型氟碳树脂为粘合剂对过渡装药进行固化处理,即在压装前添加氟碳树脂粘合剂予以包覆,利用其较好的可塑性,在压药过程中以压力将其固化,可提高过渡装药密度与均匀性。表3是以太安(PETN)为例,在相同药量、相同的压力条件下,药剂固化前后药柱密度的变化情况。

表3的结果表明,固化处理后的PETN密度约提高10%以上,有效地提高了装药的密实性,可在一定程度上提高药柱抗高过载能力。此外,在压药过程中,始发装药与输出装药的压装采取适当提高压药压力并增加保压时间,也有利于获得密度更均匀的药柱结构,同样对提高药柱的抗高过载能力有利。

图8是经过材料优选、结构优化与径向加固、过渡装药固化处理等加固设计后研制的桥丝电雷管实物。

表3 太安固化前后密度对比

Table 3 Density of PETN before and after solidification

explosive	52.3 MPa			70.7 MPa		
	$\rho_b / g \cdot cm^{-3}$	$\rho_a / g \cdot cm^{-3}$	density increase/%	$\rho_b / g \cdot cm^{-3}$	$\rho_a / g \cdot cm^{-3}$	density increase/%
PETN	1.402	1.543	10.06	1.445	1.592	10.17

Note: ρ_a is density after solidification, ρ_b is density before solidification.

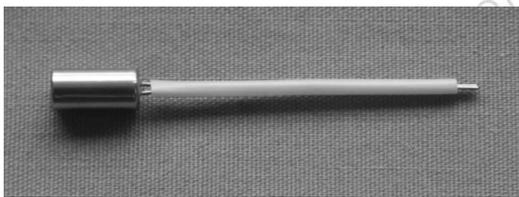


图8 加固设计后的桥丝电雷管实物

Fig.8 Actual picture of structure reinforced detonator

4 抗高过载性能验证与分析

利用图1、2所示的霍普金森压杆试验装置与加速度加载波形,对加固设计后的桥丝电雷管进行加速度 $\geq 10^5 g$,脉冲宽度约为100 μs 的惯性过载与结构

失稳过载试验,各试验40发,未发生结构变形或爆炸情况,电雷管的电阻值变化、作用时间及铅板输出性能试验结果见表4、表5。

表4、表5的试验结果表明,加固设计后的桥丝电雷管能够承受冲击加速度 $\geq 10^5 g$,脉冲宽度约为100 μs 的惯性过载与结构失稳过载,其作用时间、铅板孔径等性能与过载前相比变化不大;此外,不同类型、不同方位冲击过载后的电阻值变化情况一定程度上验证了电雷管易损特性的分析,但需要特别指出的是加固后电雷管,在结构失稳过载前后电阻值的离散性略有增大,大于加固前电阻值的变化,可能与其自身的误差以及加固前部分试样爆炸导致统计样本量差异有关,但40发

产品均未发生爆炸或失效情况,说明加固效果良好,抗过载能力得到了提高。

表 4 加固设计后的桥丝电雷管 4 个受力方位惯性过载试验结果

Table 4 Inertial overload test results on four bearing position with structure reinforced detonator

test position	test number	resistance change percents/%			function time/ μ s			output aperture/mm		
		max	min	average	max	min	average	max	min	average
axis input	10	0.802	0.517	0.692	14.4	11.0	12.3	8.0	7.4	7.6
axis output	10	1.079	0.149	0.599	15.4	12.2	13.8	7.8	7.3	7.5
radial parallel	10	1.319	0.491	0.806	13.4	11.8	12.8	7.8	7.5	7.6
vertical radial	10	1.347	0.262	0.682	14.4	11.8	12.7	7.9	7.4	7.6

表 5 加固设计后的桥丝电雷管 4 个受力方位结构失稳过载试验结果

Table 5 Structure instability overload test results on four bearing position with structure reinforced detonator

test position	test number	resistance change percents/%			function time/ μ s			output aperture/mm		
		max	min	average	max	min	average	max	min	average
axis input	10	5.873	1.245	3.570	14.6	11.2	12.9	8.2	7.8	8.0
axis output	10	4.946	1.787	3.362	16.6	9.0	12.6	7.8	7.6	7.7
radial parallel	10	0.870	0.201	0.439	19.2	12.2	14.0	7.5	7.3	7.4
vertical radial	10	3.672	0.969	2.128	14.4	10.6	12.6	7.7	7.2	7.4

Note: before high acceleration overload impact, the maximum, minimum and average values of function time and output aperture were 15.6 μ s, 11.2 μ s, 12.8 μ s; 7.9 mm, 7.4 mm, 7.7 mm.

为了进一步观测加固设计效果,利用 X 射线 CT 层析扫描设备对加固设计后的桥丝电雷管高过载冲击前后的内部结构进行检测与分析,结果如图 9 所示。

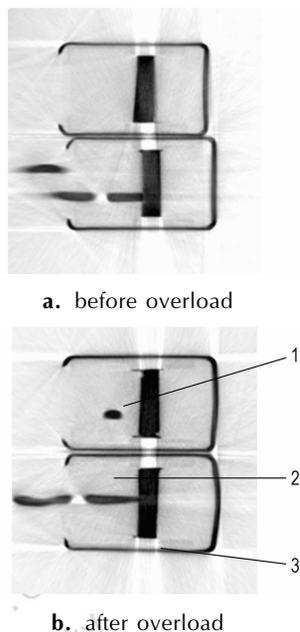


图 9 加固设计后的桥丝电雷管过载前后 CT 层析图

1—桥丝与药剂界面紧密接触, 2—装药均匀性良好, 3—壳体结构完好

Fig. 9 X-ray CT chromatogram of structure reinforced detonator 1—impinge on bridge wire and explosive, 2—homogenize of explosive, 3—steady of shell structure

由图 9 的 CT 层析图可以看出,加固设计后的桥丝电雷管,冲击过载前后雷管内外部结构基本无变化,未发生管壳破裂、药剂界面分离及焊点脱落等现象,说明加固效果良好。此外,还对冲击过载后的雷管进行局部解剖分析,结果如图 10 所示。

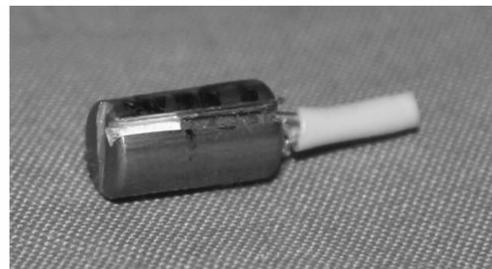


图 10 加固设计后的桥丝电雷管过载后局部解剖图

Fig. 10 Local anatomize picture of structure reinforced detonator

由图 10 的局部解剖图可以看出,经过加强环加固的桥丝电雷管,由于加强环在受到冲击过载过程中起到了支撑加强帽与管壳的作用,有效地保护了电雷管的内部装药结构,也有利于提高电雷管的抗高加速度过载能力。

5 结 论

(1) 抗高过载性能检测与分析表明,桥丝电雷管抗自身质量惯性过载的能力大于抗结构失稳过载的能

力,抗轴向结构失稳能力大于抗径向结构失稳的能力;在高加速度冲击过载下,电雷管会发生电阻值增大、壳体变形、药剂界面位移及早炸等性能或结构变化现象。为加固设计提供了理论与数据支持。

(2) 加固后的验证试验结果表明,研制的抗高过载电雷管可承受加速度 $\geq 10^5$ g,脉冲宽度约为100 μ s的惯性过载与结构失稳过载且结构基本无变化,显著提高了桥丝电雷管的抗高过载性能,为侵彻武器弹药与硬目标侵彻战斗部火工品的研制提供了重要的技术支撑。

参考文献:

- [1] GJB/Z 135-2002 引信工程设计手册[S]. 中华人民共和国国家军用标准,2003.
- [2] 张学舜,沈瑞琪. 火工品动态着靶模拟仿真技术研究[J]. 火工品,2003(4): 1-4.
ZHANG Xue-shun, SHEN Rui-qi. Study on dynamic touch-target analog simulation technique for initiating explosive devices[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2003(4): 1-4.
- [3] 邓琼,李玉龙,索涛,等. 火工品高过载动态力学性能测试方法研究[J]. 火工品,2007(1): 28-31.
DENG Qiong, LI Yu-long, SUO Tao, et al. Test method on dynamic mechanical behavior of initiating explosive device under high acceleration[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2007(1): 28-31.
- [4] 张学舜,沈瑞琪,邓强,等. 雷管抗过载能力的安全性评价[J]. 火工品,2004(2): 4-7.
ZHANG Xue-shun, SHEN Rui-qi, DENG Qiang, et al. Test and evaluation of safety of detonator in shock environments[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2004(2): 4-7.
- [5] 王娜,沈瑞琪,叶迎华. 霍普金森杆测量火工品过载情况的研究与数值模拟[J]. 火工品,2004(1): 42-47.
WANG Na, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua. Study on the measurement of over-loaded initiator by Hopkinson bar and numerical simulation[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2004(1): 42-47.
- [6] 胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展[J]. 实验力学,2005,20(4): 589-594.
HU Shi-sheng. The application development of experimental technique of Hopkinson pressure bar[J]. *Journal of Experimental Mechanics*,2005,20(4): 589-594.
- [7] 邓强,吴艳霞,沈瑞琪,等. 波形整形器在火工品高过载试验中的应用[J]. 火工品,2005(5): 12-15.
DENG Qiang, WU Yan-xia, SHEN Rui-qi, et al. Application of pulse shaper in over-loading test for initiator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2005(5): 12-15.
- [8] 杨光强,任炜,商弘藻. 高过载下桥丝电雷管失效模式与机理初步研究[J]. 火工品,2010(2): 39-43.
YANG Guang-qiang, REN Wei, SHANG Hong-zao. Study on failure mode and mechanism of detonator under high overload[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2010(2): 39-43.
- [9] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1992.
- [10] 郑连清,孙才新. 火工品压药压力的控制新方法[J]. 机械工程学报,2008,42(6): 219-223.
ZHENG Lian-qing, SUN Cai-xin. New method of pressure control for initiating explosive device pressing powder[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,2008,42(6): 219-223.
- [11] 胡焕性. 破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J]. 火炸药学报,1999(1): 1-5.
HU Huan-xing. Elements of hollow-charge warhead precise-charge and its experiment[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,1999(1): 1-5.

Performance Determination and Structure Reinforced Design of Detonator in High Acceleration Overload Environments

AO Cheng-gang, REN Wei, BAI Ying-wei, SHANG Hong-zao

(Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physical Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: Hopkinson pressure bar and X-ray CT tomography scan equipment and devices were used to test and evaluate a bridge-wire detonator's performance in high acceleration overload environments. According to test results, the failure mode and the weak properties were obtained. A structure reinforced detonator was designed through materials optimization, structural optimization and reinforcement, transition charge solidified. The results show that reinforced detonator can withstand the impact of more than 100000 g and pulse with width of about 100 μ s. After the high acceleration impact, the detonator performance and basic structure nearly do not change, revealing that the performance of bridge-wire detonator against high acceleration overload is enhanced.

Key words: solid mechanics; bridge-wire detonator; high acceleration overload; structure reinforced design

CLC number: TJ45; O34

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.03.019