

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.05.005

基于输出特性仿真的引信传爆管结构优化*

刘鹏^① 王雨时^① 闻泉^① 黄建强^② 谷宝成^③ 张志彪^①

①南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)

②岳阳金秋红日工业有限公司(湖南岳阳,414001)

③山东红旗机电有限公司(山东潍坊,261108)

[摘要] 针对引信细长传爆管结构可生产性差的问题,应用有限元仿真软件 ANSYS/LS-DYNA 对不同结构和不同长度的传爆管输出特性进行了仿真,得到了不同结构和不同长度传爆管起爆后作用在战斗部炸药柱各点上的压力-时间历程曲线,并通过冲击起爆理论判断不同结构和不同长度传爆管的起爆能力。结果表明,输出端面带有聚能凹槽的传爆管相比于传统的平底传爆管,起爆能力较强,所需传爆药量少,轴向尺寸也最短。39 发起爆试验验证了仿真可信性。

[关键词] 传爆管;数值仿真;结构优化;冲击起爆

[分类号] TD235.2⁺2;TJ510.3

引言

传爆管直接影响引信输出能力。文献[1]研究了凹球形和半球形传爆药柱的起爆能力,并与圆柱形传爆药柱的起爆能力进行了试验对比,结果表明,凹球形和半球形结构的传爆药柱起爆能力较圆柱形传爆药柱有明显提高。文献[2]利用主装药变组分法和主装药轴向钢凹法研究了异形传爆药柱的起爆能力,试验结果表明:异形传爆药柱的起爆能力优于圆柱形传爆药柱的起爆能力,传爆药柱和主装药柱之间的接触面积对异形传爆药柱的起爆能力有很大影响。文献[3]利用数值模拟的方法研究了不同聚能穴直径下异形传爆药柱的起爆能力,结果表明:异形传爆药柱的起爆能力随聚能穴直径的增大,先提高后降低,异形传爆药柱起爆能力优于圆柱形。文献[4]研究了不同传爆距离下的圆柱形传爆管、聚能凹穴结构传爆管传爆能力,研究表明:随着传爆距离的增大,两种结构传爆管轴向输出威力差异较大,聚能凹穴结构传爆管更适合远距离传爆。

云爆弹装药需要有抛撒效应,初期设计的引信传爆管外凸部很长,传爆管壳采用细长的车制薄壳结构,给生产(包括机械零件加工和装药压制)带来一定的难度。因此,在保证可靠起爆弹丸、实现预定作战效能的前提下,尽量简化传爆管结构,对降低生产成本具有重要意义。

本文中,应用 ANSYS/LS-DYNA 数值仿真方法,

对比不同结构传爆管的起爆能力,并通过试验验证其可信性,为传爆管结构优化提供参考。

1 冲击起爆及爆轰传播理论

炸药受冲击起爆是一种常见的起爆方式。目前,较为成熟的冲击起爆的理论有:临界压力判据^[5]、临界起爆能量判据^[6]、带阻抗的冲击能量起爆判据^[7]和考虑面积效应的冲击能量起爆判据^[8]。在装药种类一定时,决定传爆药柱起爆能力的主要因素:冲击压力、作用时间和起爆面积。

炸药的爆轰传播过程很复杂。目前提出许多唯象反应率模型,如 JTF 模型、HVRB 模型、点火增长模型和统计热点模型等^[9]。其中,点火增长模型被广泛应用于模拟各种爆轰以及炸药与惰性材料的相互作用。本文中,采用点火增长模型对两种传爆结构进行数值模拟对比,并通过冲击起爆理论来判断炸药是否起爆。

2 模型建立和数值仿真

2.1 不同长度的平底传爆管结构

为研究传爆管装药量和长度对起爆能力的影响,对不同长度平底传爆管进行了仿真分析。平底传爆管的长度如图 1 所示。18.8 mm 长的传爆管,其内部装药上端面和首级药柱下端面齐平,而 40.0 mm 长的传爆管为原始设计长度。

利用 LS-DYNA 软件对传爆管模型进行数值仿真,图 2 为平底传爆管工程模型和简化的 1/4 有限

* 收稿日期:2015-10-27

作者简介:刘鹏(1991-),男,硕士,主要从事引信及弹药总体技术研究。E-mail:skiy906@163.com

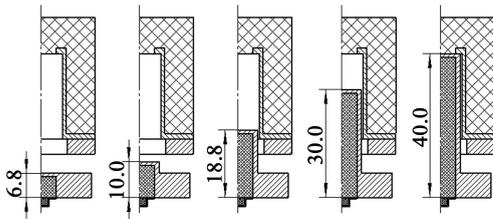
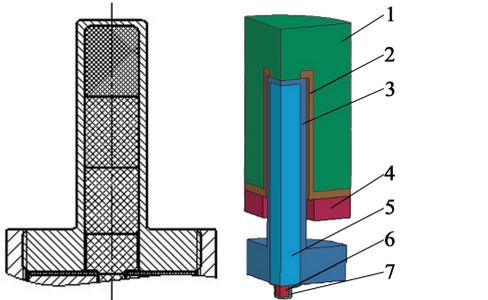


图 1 平底传爆管长度对比(单位:mm)

Fig.1 Length comparison of flat-boosters(unit:mm)



1 - 首级药柱; 2 - 内套; 3 - 传爆管壳;
4 - 拧紧螺圈; 5 - 传爆药; 6 - 导爆药; 7 - 导爆管壳。

图 2 平底传爆管工程模型和简化的 1/4 有限元模型

Fig.2 Engineering model structure and a quarter simulation model of the flat-booster

元仿真模型。

内套、传爆管壳、拧紧螺圈、导爆管壳材料均为 2A1 2 铝合金,其主要仿真参数如表 1 所列。

表 1 2A1 2 铝合金主要参数^[10]

Tab.1 Main parameters of Aluminum Alloy 2A1 2

材料	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa
2A1 2	2.80	71	0.33	275

导爆药和传爆药为 JH-14,首级药柱为 JH-2。对于这两种炸药的研究较少,目前无具体的材料模型参数。本文中,主要研究不同传爆结构能否可靠传爆,故从偏于保守角度考虑,采用比较钝感且成分接近、但能量略低的 B 炸药代替 JH-2 和 JH-14 炸药,进行数值仿真。导爆药密度为 $1.55 g/cm^3$,其爆轰产物取高能炸药燃烧的材料模型和 JWL 状态方程,其数据取自 AUTODYN 材料库。传爆药密度为 $1.63 g/cm^3$,首级药柱密度为 $1.70 g/cm^3$,其点火增长模型参数取自 AUTODYN 材料库和文献^[11],其主要仿真参数如表 2 所列。

2.2 有聚能凹槽的传爆管结构

前人研究表明,有聚能凹穴的传爆药柱起爆时会形成聚能射流,从而显著提高输出能量。故使用聚能凹槽结构的传爆管是简化长传爆管结构的一种

表 2 传爆药和首级药柱点火增长模型材料参数^[11]

Tab.2 Ignition and growth mode parameters of the booster charge and first explosive column

材料	A/GPa	B/GPa	X_{p_1}	X_{p_2}
传爆药	524.2	7.678	4.2	1.1
首级药柱	524.2	7.678	4.2	1.1
b	G	R_1/GPa	R_2/GPa	
0.222	3.4×10^{-6}	778.1	-5.031	
0.222	3.4×10^{-6}	778.1	-5.031	
R_3	R_5	R_6	$\lambda_{ig_{max}}$	
2.460×10^{-5}	11.3	1.13	0.3	
2.239×10^{-5}	11.3	1.13	0.1	
$I/\mu s^{-1}$	$G_1/(GPa \cdot \mu s^{-1})$	y	d	
44	514×10^2	2	0.067	
2×10^8	1×10^2	1	0.111	
c	$C_{vg}/(MJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$C_{vs}/(MJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$		
0.222	1×10^{-5}	2.7813×10^{-5}		
0.667	1×10^{-5}	2.5870×10^{-5}		
x	a	反应热 Q		
4	0.01	0.085		
4	0.03	0.085		
初始温度 T_0/K	$G_2/(GPa \cdot \mu s^{-1})$	g		
298	660×10^2	0.333		
298	414×10^2	1.000		
e	z	$\lambda_{G_1_{max}}$	$\lambda_{G_2_{min}}$	
1	3	0.6	0	
1	2	1.0	0	

有效方法。

为分析聚能传爆的效果,对不同长度的聚能传爆管进行分析,聚能传爆管长度如图 3 所示。图 3 中,16.6 mm 长的聚能传爆管内部装药上端面和首级药柱的下端面齐平。

传爆管工程模型和简化的 1/4 有限元仿真模型如图 4 所示。聚能药型罩材料为 45# 钢,其主要仿真参

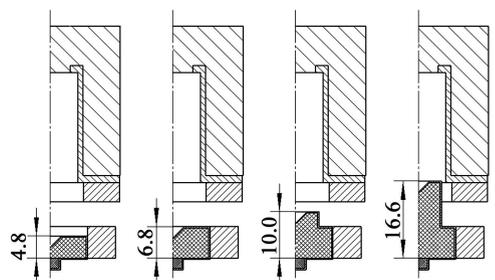
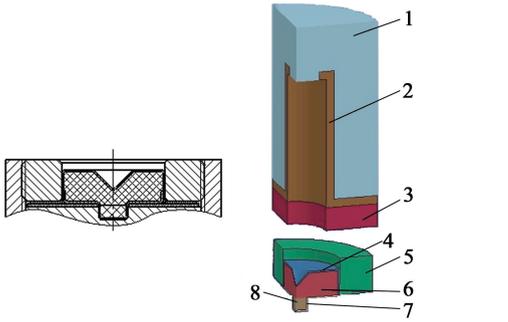


图 3 有聚能凹槽结构的传爆管长度对比(单位:mm)

Fig.3 Length comparison of the booster with cumulative grooves(unit:mm)

数如表3所列,其余材料的仿真参数同前。



1 - 首级药柱; 2 - 内套; 3 - 拧紧螺圈; 4 - 聚能药型罩;
5 - 上螺圈; 6 - 传爆药; 7 - 导爆管壳; 8 - 导爆药。

图4 有聚能凹槽结构的传爆管工程模型和简化的1/4有限元模型

Fig. 4 Engineering model structure and a quarter simulation model of the booster with cumulative grooves

表3 45#钢主要参数^[11]

Tab. 3 Main parameters of 45# steel

材料	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa
45#钢	7.85	200.1	0.269	355

3 仿真结果及其分析

对首级药柱上不同位置的压力变化情况进行分析,取点位置见图5。不同传爆管对应的首级药柱上各点压力-时间历程曲线如图6到图14所示。

文献[12]总结了各种炸药的起爆准则值,并且给出了B炸药的临界起爆压力为5.63 GPa,但未找到B

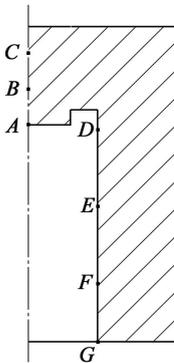


图5 首级药柱上输出取点
Fig. 5 Output point of the first explosive column

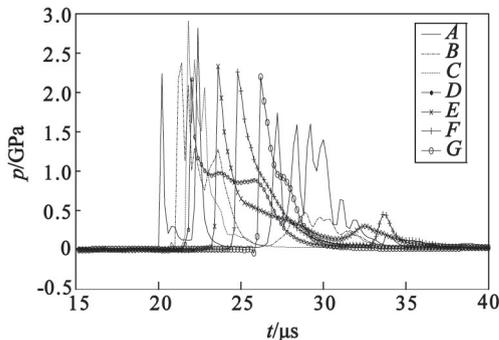


图6 6.8 mm 平底传爆管各点压力

Fig. 6 Pressure of different points on 6.8 mm flat-booster

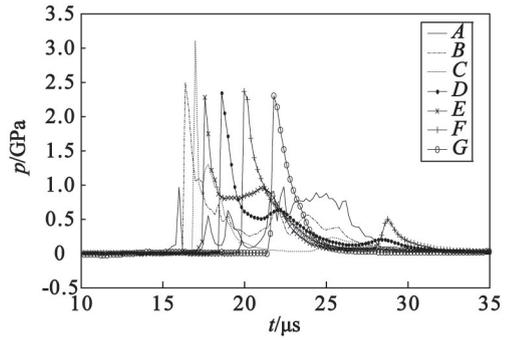


图7 10.0 mm 平底传爆管各点压力

Fig. 7 Pressure of different points on 10.0 mm flat-booster

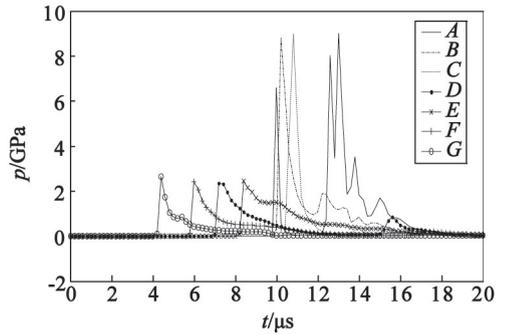


图8 18.8 mm 平底传爆管各点压力

Fig. 8 Pressure of different points on 18.8 mm flat-booster

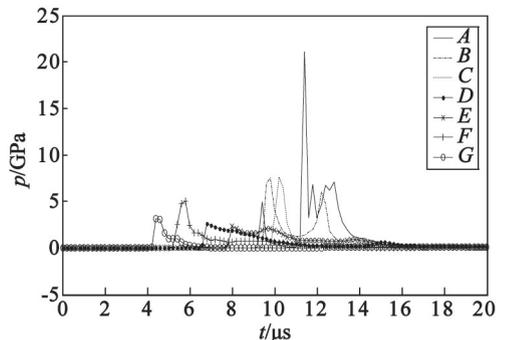


图9 30.0 mm 平底传爆管各点压力

Fig. 9 Pressure of different points on 30.0 mm flat-booster

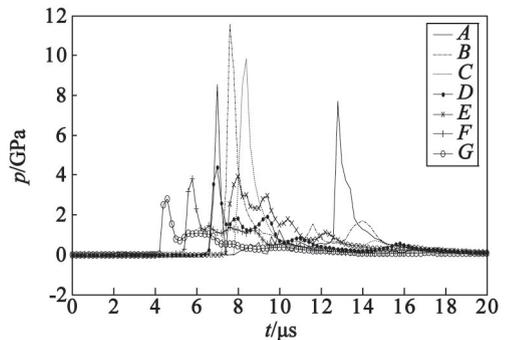


图10 原长平底传爆管各点压力

Fig. 10 Pressure of different points on original flat-booster

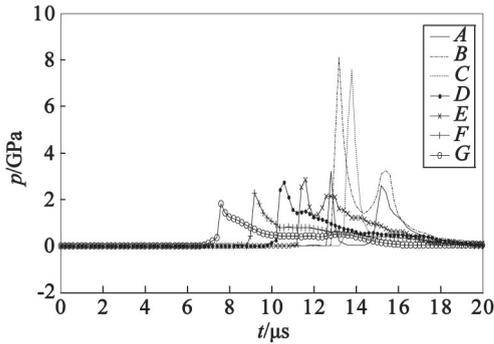


图 11 4.8 mm 有聚能凹槽的传爆结构各点压力

Fig. 11 Pressure of different points on 4.8 mm shaped-charge-booster

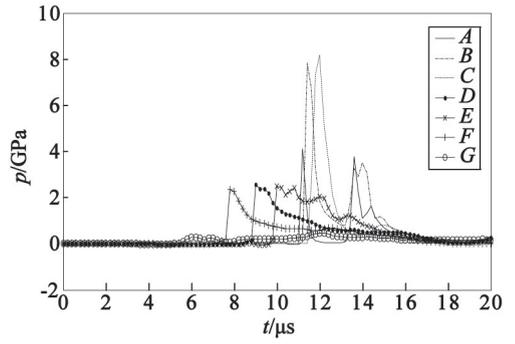


图 12 6.8 mm 有聚能凹槽的传爆结构各点压力

Fig. 12 Pressure of different points on 6.8 mm shaped-charge-booster

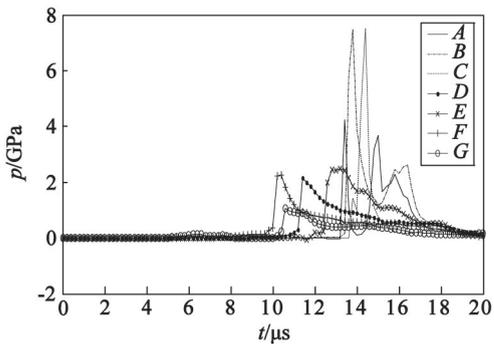


图 13 10.0 mm 有聚能凹槽的传爆结构各点压力

Fig. 13 Pressure of different points on 10.0 mm shaped-charge-booster

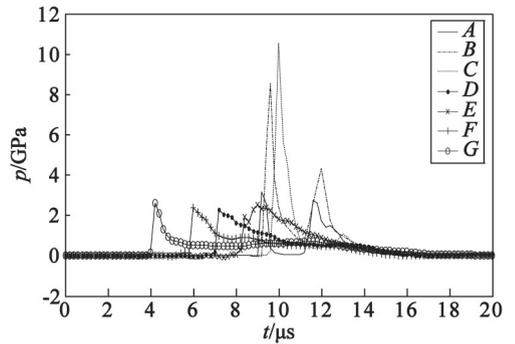


图 14 16.6 mm 有聚能凹槽的传爆结构各点压力

Fig. 14 Pressure of different points on 16.6 mm shaped-charge-booster

炸药的 p^2t 准则值,从各点压力图可见,爆轰冲击时间 t 比较一致,故在此采用临界压力准则来判断首级药柱是否起爆,各点最大压力和起爆判断如表 4 所列。

从图 6 和图 7 可见,当平底传爆管长度较短时,传爆药的装药量少,传爆管和首级药柱间的间隙大,首级药柱上各点位置受到的爆轰波压力差异很小,此时各点受到的最大压力低于其临界起爆压力,故长度较短的平底传爆管无法可靠起爆首级药柱。

当平底传爆管长度增加时,传爆药装药量增加,

传爆管和首级药柱间的间隙减小,爆轰波的传爆速度增快。从图 8 到图 10 中可以看出,此时仿真得到的压力曲线相似,首级药柱上 A、B、C 3 点的爆轰压力已超过了临界起爆压力,能可靠起爆首级药柱。

从图 11 到图 14 可看出,对于聚能传爆结构,由于聚能效应的影响,其径向压力大于轴向压力,且传爆管长度变化对其轴向爆轰压力大小影响不大,轴向位置 A、B、C 3 点的压力变化很小,仿真得到了比较相似的压力曲线。从表 4 可以看出,首级药柱上

表 4 不同结构传爆管对应的首级药柱上各点最大压力

Tab. 4 Maximum pressure of points on the first explosive columns of boosters with different structures

传爆管结构	A	B	C	D	E	F	G	是否起爆
6.8 mm 平底传爆管	2.82	2.37	2.91	2.17	2.32	2.26	2.20	否
10.0 mm 平底传爆管	0.97	2.50	3.10	2.27	2.34	2.37	2.29	否
18.8 mm 平底传爆管	9.01	8.82	9.00	2.45	2.37	2.43	2.64	是
30.0 mm 平底传爆管	21.13	7.56	7.66	2.34	2.61	5.04	3.16	是
40.0 mm 平底传爆管	8.53	11.58	9.84	3.92	4.40	3.82	2.79	是
4.8 mm 聚能传爆管	3.21	8.09	7.55	2.86	2.73	2.29	1.81	是
6.8 mm 聚能传爆管	4.11	7.85	8.18	2.51	2.59	2.34	0.48	是
10.0 mm 聚能传爆管	4.23	7.50	7.52	2.49	2.17	2.26	1.06	是
16.6 mm 聚能传爆管	3.16	8.53	10.56	2.52	2.27	2.37	2.62	是

GPa

B点和C点最大压力大于临界起爆压力的情况,即认为能引爆首级药柱;随着传爆管的加长,爆轰波的传爆速度增快,在6.8 mm到10.0 mm之间出现反常现象的原因可能是装药的直径变化影响了爆轰波的传爆。

4 试验验证

为验证聚能传爆管能否起爆炸药柱,对上述两种类型的传爆管进行钢凹对比试验。试验共分4组:第1组,平底传爆管-无炸药柱,编号1#~9#;第2组,聚能结构传爆管-无炸药柱,编号11#~20#;第3组,平底传爆管-有炸药柱,编号21#~30#;第4组,聚能结构传爆管-有炸药柱,编号31#~40#。通过试验后钢块上的凹坑深度来判断炸药柱是否完全起爆,试验装置如图15所示。聚能传爆管高为4.8 mm,平底传爆管高为40 mm。炸药柱材料为JH-2,尺寸为 $\varnothing 24\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,参考密度为 1.7 g/cm^3 。钢块材料为冷拉20#钢,尺寸为 $\varnothing 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。套筒1与套筒2材料为2A12铝合金,中心小孔尺寸与内套尺寸相同。套筒轴向尺寸由传爆管和炸药柱决定,保证其轴向无间隙。试验后钢块上凹坑如图16所示,各组试验结果如表5所列。表5最末一行给出了仿真得到的钢块凹坑尺寸。

由表5可以看出,无炸药柱方案(第1组和第2组)与有炸药柱方案(第3组和第4组)试验后在钢块上形成的凹坑深度和直径差异很大,且第3组方案为原设计方案,炸药柱与传爆管直接接触,平底传爆管能可靠起爆炸药柱,故可以用第3组试验得到的凹坑大小为参考值来判断炸药柱的起爆状态。

由第3组和第4组的试验结果可见,两种传爆

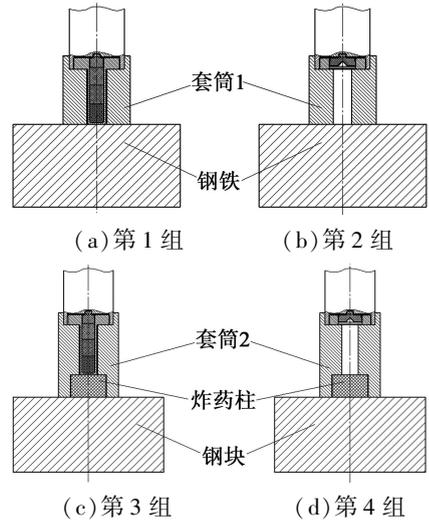


图15 试验装置

Fig. 15 Test device

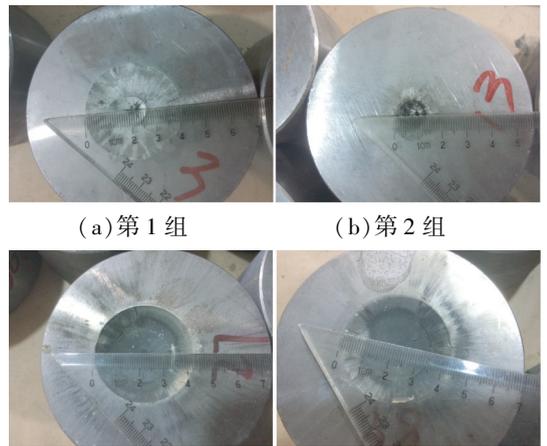


图16 4组方案试验后的钢块凹坑

Fig. 16 Pits of steel block after experiments with four different schemes

表5 各组试验结果和仿真结果

Tab. 5 Results of each test and simulation

序号	凹坑深度/mm	凹坑直径/mm									
1#	1.40	12.59	11#	0.56	13.96	21#	3.55	43.16	31#	2.80	43.40
2#	1.40	12.10	12#	0.50	12.78	22#	3.20	42.18	32#	2.80	42.73
3#	1.30	12.41	13#	0.48	12.86	23#	3.40	42.39	33#	3.00	41.93
4#	1.47	12.26	14#	0.68	12.67	24#	3.57	42.32	34#	2.96	42.60
5#	1.30	12.15	15#	0.40	12.55	25#	3.84	43.31	35#	2.73	41.90
6#	1.46	12.32	16#	0.60	12.27	26#	3.25	43.51	36#	2.66	42.30
7#	1.44	11.90	17#	0.40	12.00	27#	3.36	42.57	37#	3.18	41.60
8#	1.38	12.15	18#	0.40	12.48	28#	3.11	42.32	38#	2.90	42.07
9#	1.30	12.50	19#	0.70	12.70	29#	3.70	43.36	39#	2.95	43.84
			20#	0.45	12.28	30#	3.62	42.77	40#	2.45	41.75
试验均值	1.38	12.26	试验均值	0.52	12.66	试验均值	3.46	42.79	试验均值	2.84	42.40
仿真值	1.28	13.75	仿真值	0.43	10.36	仿真值	2.46	41.60	仿真值	1.73	41.80

管起爆炸药柱后在钢块上留下的凹坑形状完全一致,直径基本相同,深度略有差异;凹坑深度的差异可能是由炸药柱初始起爆面积的不同造成。因此,可以认为带有聚能凹槽结构的传爆管能够可靠起爆炸药柱。

试验结果表明,输出端有聚能凹槽的传爆管结构,即使是长度为 4.8 mm,仍有足够的轴向输出能力起爆炸药柱,这与数值仿真方法得到的结果是一致的。由于 B 炸药较 JH-2 和 JH-14 炸药钝感,且爆炸产生能量低,所以仿真结果相比实际情况会偏于保守,但得到的规律是一致的。因此,得到的引爆和被引爆的结论是可信的。

5 结论

1) 平底长传爆管结构缩短长度会显著影响传爆管输出能力,传爆管长度 18.8 mm 大约是保证可靠起爆弹丸内炸药柱的最小长度,该方案对于传爆管结构的简化作用有限。

2) 输出端有聚能凹槽的传爆管结构,即使缩短到 4.8 mm,仍有足够的轴向输出能力;采用较短的带有聚能凹槽结构的传爆管能减小传爆管零件生产(包括机械零件和装药压制)难度,输出端有聚能凹槽的传爆管结构是一种很有效的简化结构。

参 考 文 献

- [1] 曹雄,胡双启,张建忠. 装药结构对传爆药柱起爆能力的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2005(增刊1):200-204.
CAO X, HU S Q, ZHANG J Z. Study on the effect of charge structure of booster pellet had on its initiation capacity [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005 (Suppl. 1): 200-204.
- [2] 胡立双,胡双启,曹雄,等. 异形传爆药柱的起爆能力[J]. 爆炸与冲击,2013,33(2):207-211.
HU L S, HU S Q, CAO X, et al. Initiation capacity of a

special shape booster pellet [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 207-211.

- [3] 胡立双,胡双启,曹雄,等. 凹穴直径对异形传爆药柱起爆能力的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2014,37(3):35-37.
HU L S, HU S Q, CAO X, et al. Effect of cavity diameter on initiation capacity of special booster pellet [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(3): 35-37.
- [4] 李来福,王雨时,闻泉. 传爆距离对传爆管输出威力影响的仿真研究[J]. 火工品,2014(3):14-18.
LI L F, WANG Y S, WEN Q. Simulation study on the impact of detonation transmission distance on the output power of booster [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014(3): 14-18.
- [5] 陈勇军. 小口径穿甲爆破炮弹侵彻目标数值模拟研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [6] WALKER F E, WASLEY R J. Critical energy for the shock initiation of heterogeneous explosive [J]. Explosive Stoffs, 1969, 17(1): 9.
- [7] FOAN G C W, GOLEY G D. Shock Initiation in gap test configurations [C]//7th Symposium (International) on Detonation, 1981.
- [8] 胡双启. 传爆药-主装药间冲击起爆若干问题的研究[D]. 北京:北京理工大学,1997.
- [9] 郝鹏程,冯其京,洪滔,等. 炸药点火增长模型的欧拉数值模拟[C]//第十四届全国激波与激波管学术会议论文集(上册). 黄山,2005:224-229.
- [10] 李来福. 某枪榴弹机械触发起爆引信关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.
- [11] 梁增友. 炸药冲击损伤与起爆特性[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [12] 章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1991.

Structural Optimization of Fuze Booster Based on Simulation of Its Output Characteristics

LIU Peng^①, WANG Yushi^①, WEN Quan^①, HUANG Jianqiang^②, GU Baocheng^③, ZHANG Zhibiao^①

① Mechanical Engineering College, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② Yueyang Jinqiuhongri Industrial Co., Ltd. (Hu'nan Yueyang, 414001)

③ Shandong Hongqi Electrical Co., Ltd. (Shandong Weifang, 261108)

[ABSTRACT] In order to reduce production difficulties of fuze caused by the slender-booster structure, the output characteristics of boosters with different structures and different lengths were simulated by finite element simulation software ANSYS/LS-DYNA, and the pressure-time curves of each warhead's point after explosion were obtained. The detonation ability of boosters with different structures and different lengths was judged by shock initiation theory. Results show that the booster with cumulative grooves exhibits stronger detonating ability and requires less booster charge, and its axial dimension is the shortest. The simulation was also verified by 39 initiation tests.

[KEYWORDS] booster; numerical simulation; structural optimization; shock initiation