doi:10.11887/j.cn.201804023 http://journal.nudt.edu.cn

强爆轰驱动超高速碎片发射装置设计因素分析*

邢柏阳[1],刘荣忠[1],郭 锐[1],陈 亮[1],杨永亮[1],赵博博[1,2],高 科[1]
(1. 南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094;2. 中国人民解放军31102部队,江苏 南京 210000)

摘 要:为了得到发射装置设计因素和超高速碎片性能间的关系,考虑了药型罩的材料、炸药种类、装药长径比、药型罩的锥角、药型罩的厚度、药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径等设计因素,采用AUTODYNTM,结合正交试验,对超高速碎片的发射过程进行数值模拟。结果表明,3种发射装置结构分别可以提供质量为1.533 g的紫铜碎片、速度为11.649 km/s的铝碎片、动能为85.6 kJ的铝碎片;2种发射装置结构均可以提供质量大于1 g、速度高于11 km/s的密实结构圆柱状碎片。验证了仿真方法的可信性,对影响碎片性能的设计因素进行了分析、排序,并得到了这些设计因素与碎片质量、速度、动能的关系。

关键词:地面超高速撞击试验;强爆轰;聚能射流;正交试验;仿真方法验证
中图分类号:TP391.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2018)04-151-08

Analysis on design factors of hypervelocity fragment launcher using strong detonation drive

XING Boyang[1], *LIU Rongzhong*[1], *GUO Rui*[1], *CHEN Liang*[1], *YANG Yongliang*[1], *ZHAO Bobo*[1,2], *GAO Ke*[1]
(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;
2. The PLA Unit 31102, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to explore the relations between design factors of the launcher and performance of the produced hypervelocity fragment, the AUTODYNTM-employed numerical simulation towards launch process was performed repeatedly under the orthogonal experiment design framework. Design factors include explosive type, diameter ratio of charge, material type, thickness, taper angle and radius of the top close to charge chamber for liner part were considered. Multiple target launcher designs were demonstrated: three of which were capable to provide the red copper fragment with the mass of 1.563 g, the aluminum fragment with the velocity of 11.649 km/s and the aluminum one with the kinetic energy of 85.6 kJ respectively; two of which can produce compact cylindrical fragments with the mass over 1 g and velocity over 11km/s simultaneously. The associated experimental validation was confirmed as well and a further analysis of the design factors was made which explains how they were related to the mass, velocity and kinetic energy of generated fragment.

Key words: experiment of hypervelocity impact on the ground; strong detonation; shaped jets; orthogonal experiment; numerical method verification

在空间碎片防护问题中,质量为克级、平均速度10 km/s的空间碎片,对于在轨航天器具有极强的毁伤能力,但是尚无切实可行的预警防护措施,主要靠航天器自身的结构设计抵御,为了研究和设计这样的防护技术,必须进行试验模拟,因此需要设法在地面上把小颗粒驱动到足够高的速度[1]。

目前最常用的地面超高速撞击试验加载装置为二级轻气炮,Stilp[2]利用二级轻气炮将1 g的破片加速到8 km/s,Moritoh[3]利用三级轻气炮将0.58 g破片加速到8.9 km/s。研究人员利用电磁轨道炮[4-5]、等离子加速器[6]来实现对碎片的加速,但是发现现有的试验装置几乎不可能稳定地将密实颗粒加速到空间碎片与航天器撞击的平均速度(10 km/s及以上),这严重制约了空间碎片防护的试验研究,而且运用这些方法试验成本高、周期长,进行大量试验相对困难。

定向聚能加速器被认为是用于超高速撞击试验研究中最有应用潜力、最具有应用前途的发射技术,最大发射速度可达12 km/s。该装置结构

* **收稿日期**:2017-05-19
基金项目:国家部委基金资助项目(995-14021007020403);CAST-BISEE创新基金资助项目(201512);上海航天科技创新基金资助项目(SAST2015021);2017年江苏省研究生培养创新工程项目科研计划资助项目(KYCX17-0388)
作者简介:邢柏阳(1992—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,E-mail:xing_boyang@163.com;
刘荣忠(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:liurongz116@163.com

简单、体积小、成本低、效率高、可设计性好。美国、欧洲、日本、俄罗斯等均研制了用于超高速撞击试验研究的定向聚能加速器[7]。这种加速装置的独特优点是其可将 1 g 的铝弹丸加速到 11 km/s以上的速度[8]。赵峰[9]从试验和理论证实了炸药强爆轰驱动高速金属飞片是可行的。利用占据式聚能装药空间碎片生成装置,可以得到 10.62 km/s 的射流头部[10],以及射流速度大于 10 km/s 的碎片云[11]。Walker[12]将 0.5 ~ 1 g 的铝碎片加速到 11.2 ± 0.2 km/s,徐全军[10-11]在试验中得到了 10 km/s 的紫铜碎片,但是很少有文章对影响碎片性能的关键因素进行分析、排序,很少有人得出相关影响因素与碎片质量、速度、动能间的关系。

因此本文设计了若干种满足不同要求的强爆轰驱动超高速碎片发射装置,并在试验数据的基础上,验证了仿真方法的可信性,考虑了 6 个相关设计因素对碎片成型的影响,得到了这些因素与碎片质量、速度、动能的关系。

1 仿真模型

本文使用 AUTODYN - 2DTM 的 Euler 算法进行仿真计算。

1.1 几何模型

强爆轰驱动超高速碎片发射装置分为占据体、药型罩、装药以及壳体 4 个主要部分。由于占据体的压垮速度比药型罩顶部的压垮速度要小得多,因此在占据体闭合之前,射流头部通过占据体的部分,即为最终获得的超高速碎片。为了束缚爆轰波传播,设计了较厚的壳体。发射装置示意图如图 1 所示,装药直径 $D = 56$ mm,药型罩顶部靠近装药侧的弧 - 锥交界点距中心线距离 $h_0 = 0.05D$,罩顶两圆弧为同心圆。壳体直径 $D_k = 1.50D$,壳体底面厚度 $H_1 = 0.75D$,壳体侧面厚度 $H_2 = 0.25D$,占据体凸台高度 $h_1 = 0.02D$,占据体凸台长度 $l_1 = 0.14D$,占据体凸台高度 $h_2 = 0.64D$,占据体中心孔直径保持 $D_0 = 0.13D$。装药长度与装药直径之比为 λ,锥角为 2θ,药型罩的厚度为 d,药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径为 R。

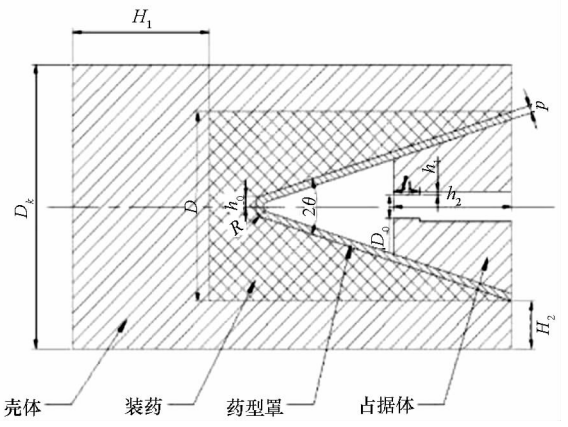


图 1 强爆轰驱动超高速碎片发射装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a hypervelocity fragment launcher using strong detonation drive

1.2 材料模型

壳体选用45#钢,药型罩和占据体选用紫铜、铝、钨镍铁合金、钽钨合金和铁,状态方程均选用 Shock。45#钢、紫铜、铝的本构方程选用 Johnson-Cook,钨镍铁合金、钽钨合金的本构方程选用 Steinberg Guinan,铁的本构方程选用 Piecewise JC。装药选用 8701、B 炸药、HMX、Octol 和 LX 14,状态方程均选用 JWL (Johns-Wilkins-Lee)。空气、钨镍铁合金、钽钨合金、铁、B 炸药、HMX、Octol、LX 14 均取自材料库[13-16]。45#钢、紫铜、铝、8701 的主要参数如表 1 ~ 2 所示。

表 1 金属材料参数表

Tab. 1 Metal material parameters table

材料	ρ/g · cm^{-3}	C_1/(m/s)	S_1	G/GPa	A/MPa	B/MPa	n	C	m	γ_0	Tm/K	Tr/K
45#钢	7.840	4570	1.490	80.0	0.500	0.320	0.28	0.064	1.06	1.93	1790	293
紫铜	8.930	3940	1.489	46.0	0.090	0.292	0.31	0.025	1.09	2.02	1356	293
铝	2.785	5328	1.338	27.6	0.265	0.426	0.34	0.015	1.00	2.00	775	293

表 2 装药参数表

Tab. 2 Charge parameters table

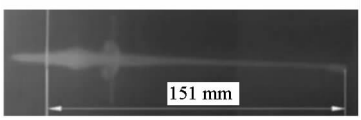
材料	ρ/g · cm^{-3}	A/kPa	B/kPa	R_1	R_2	ω	D/m · s^{-1}	E_0/kJ · m^{-3}
8701	1.700	8.54×10^8	$6.204\,9 \times 10^8$	4.60	1.35	0.25	8.315×10^3	8.5×10^6

1.3　仿真验证

1.3.1　聚能射流仿真验证

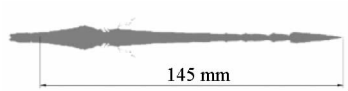
由于本文所研究的超高速碎片是占据体截断聚能射流而得到的,均属于流态、大变形,且超高速碎片的速度与射流头部的速度接近,因此可以通过对比试验和仿真中的聚能射流形状、长度以及头尾部速度,验证仿真计算的可信性。

聚能射流的装药直径为 56 mm,装药高度为 73 mm,装药种类为 8701,药型罩材料为紫铜,药型罩壁厚为 0.8 mm,药型罩锥角为 60°。利用脉冲 X 光摄影机,对 56 mm 标准弹的聚能射流在 30 μs时刻的形状进行拍摄并测量,如图 2(a)所示,与相同时刻仿真所得的射流形状对比,如图 2(b)所示。试验及仿真中的聚能射流速度、长度如表 3所示。



(a) 试验

(a) Experiment



(b)仿真

(b) Simulation

图 2　射流形状及长度

Fig. 2　Shape and length of jet

表 3　射流长度及速度

Tab. 3　Length and velocity of jet

射流参数	试验	仿真	误差/%
30 μs 射流长度/mm	151.0	145	4.0
射流头部速度/(km/s)	6510	6868	5.5
射流尾部速度/(km/s)	1189	1120	5.8

由图 2 可以发现,聚能射流仿真结果与试验结果是非常相似的。由表 3 可知,仿真结果与试验结果非常接近。这表明本文所使用的仿真方法是具有可信性的。

1.3.2　超高速碎片仿真验证

采用 Walker[12] 给出的结构参数,构建本文的仿真模型,如图 3 中心线上半侧所示,下半侧为 Walker[12] 的仿真、试验模型图。

发射装置的主要参数:装药直径为 65 mm,装药高度为 157.5 mm,装药种类为 Octol70/30,药型罩材料为 1100 - O 铝,占据体材料为铜,所得碎片参数如表 4 所示。图 4(a) ~ (c)依次为为本文仿真、Walker[12] 仿真、Walker[12] 试验所得的碎片形状。

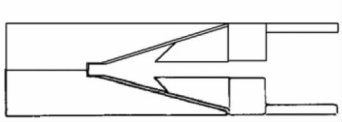


图 3　仿真、试验模型

Fig. 3　Model of simulation and experiment

表 4　碎片参数

Tab. 4　Parameters of fragment

碎片参数	本文仿真	Walker 仿真	Walker 试验
碎片速度/(km/s)	10.5	11.2	11.2 ±0.2
碎片质量/g	1.06	1.00	0.74
碎片动能/kJ	58.43	62.72	44.77 ~48.09



(a) 本文仿真　(b) Walker 仿真　(c) Walker 试验

(a) Simulation of the paper　(b) Simulation of walker　(c) Walker experiment

图 4　碎片形状

Fig. 4　Shape of fragments

由表 4 可知,本文仿真值中碎片速度与 Walker[12] 仿真、试验的误差分别为 6%、5% ~ 8%。本文仿真值中碎片质量与 Walker[12] 仿真的误差为 6%。因此本文所使用的仿真方法是具有可信性的。

1.4　仿真试验

对装药长径比、药型罩的锥角、药型罩的厚度、药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径、药型罩的材料以及炸药种类 6 个参数各取 5 个水平,因素水平如表 5 所示,并按照 L25(56)正交表安排仿真试验,仿真试验结果如表 6 所示。

表5 因素水平表

Tab. 5 Factors level table

水平	设计因素					
	λ	2θ/(°)	d/D	R/D	药型罩及占据体的材料	炸药种类
1	1.7	32	0.034	0.071	紫铜	8701
2	2.1	34	0.038	0.080	铝	Comp B
3	2.5	36	0.041	0.090	钨镍铁合金	HMX
4	2.9	38	0.045	0.098	钽钨合金	Octol
5	3.3	40	0.048	0.107	铁	LX 14

表6 正交试验结果

Tab. 6 Orthogonal experimental results

序号	质量/g	速度/(km/s)	动能/kJ
1	0.575	11.149	35.74
2	0.727	10.327	38.77
3	0.174	9.513	7.87
4	0.140	9.105	5.80
5	0.384	10.344	20.54
6	0.590	9.014	23.97
7	0.762	11.088	46.84
8	0.696	9.321	30.23
9	0.858	11.378	55.54
10	0.557	7.964	17.66
11	1.433	10.930	85.60
12	0.495	8.720	18.82
13	0.466	8.826	18.15
14	0.944	9.080	38.91
15	1.225	9.509	55.38
16	1.383	10.271	72.95
17	1.228	9.484	55.23
18	1.091	11.463	71.68
19	0.880	8.204	29.61
20	0.608	7.549	17.32
21	0.566	7.685	16.71
22	1.504	8.375	52.75
23	1.162	9.616	53.72
24	1.533	9.328	66.69
25	1.075	11.649	72.94

2 结果分析

2.1 各影响因素分析

2.1.1 装药长径比的影响

依据装药长径比的不同，将25组试验平均分为5组，各组平均质量、速度以及动能与装药长径比的关系如图5~6所示。

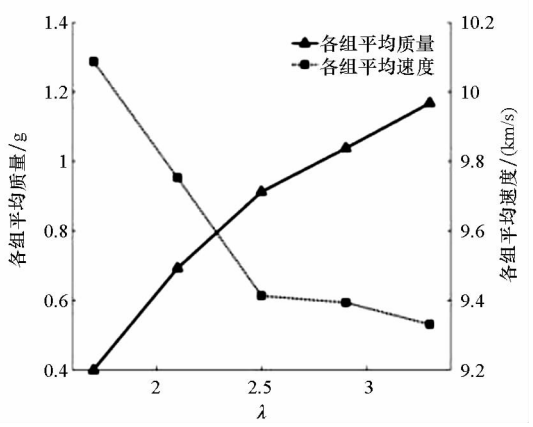


图5 各组平均质量、速度与装药长径比的关系

Fig. 5 Relationship between the average mass, velocity of each group and the length to diameter ratio

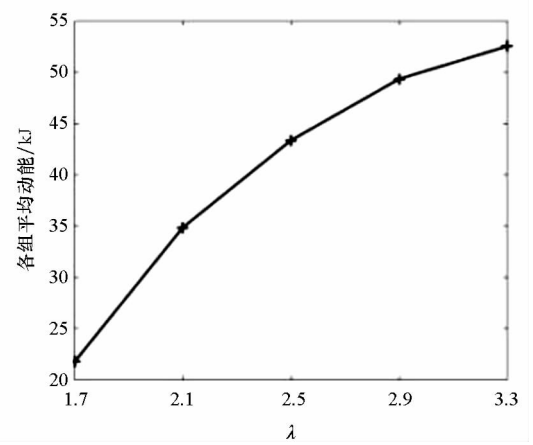


图6 各组平均动能与装药长径比的关系

Fig. 6 Relationship between the average kinetic energy of each group and the length to diameter ratio

由图5~6可知，随着装药长径比的增加，碎片的平均质量、动能呈单调增加的趋势，但是碎片的平均速度呈单调降低的趋势。由聚能射流定常理论[17]和Gurney速度公式[18]可知，对于聚能射流而言，增加装药长径比可以有效提升其速度、质量以及动能，但是由于占据体的截断作用对碎片的速度提升产生了消极的影响，导致在增加装药长径比之后，碎片的平均速度反而有明显降低的趋势。从而表明，占据体对碎片平均速度的阻碍作用随着装药长径比的增加而增加。由于装药长径比的增加，使得产生的碎片平均质量增加，并且其增加幅度很大，以至于在碎片的平均速度呈单调降低趋势的情况下，碎片的平均动能仍可以呈单调增加的趋势。

因此可以推断，在其他条件不变的前提下，增加装药长径比，可有效地提高碎片的质量、动能，

但会降低碎片的速度。

2.1.2　药型罩锥角的影响

依据药型罩锥角的不同,将 25 组试验平均分为 5 组,各组平均质量、速度以及动能与药型罩锥角的关系如图 7 ~ 8 所示。

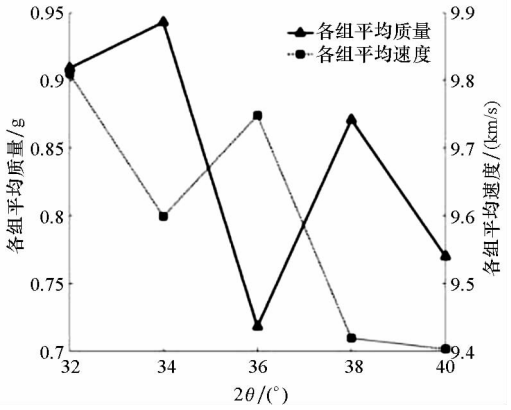


图 7　各组平均质量、速度与药型罩锥角的关系

Fig. 7　Relationship between the average mass and velocity of each group the taper angles of liner

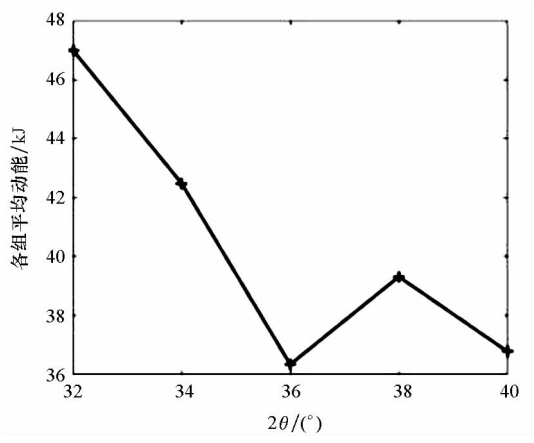


图 8　各组平均动能与药型罩锥角的关系

Fig. 8　Relationship between the average kinetic energy of each group and the taper angles of liner

由图 7 ~ 8 可知,药型罩锥角的变化对碎片的平均质量、速度以及动能的影响是不稳定的。但是在一定的锥角范围内,碎片的平均速度、动能有较明显的下降趋势。由聚能射流定常理论[17]可以推知,对于聚能射流而言,增加药型罩的锥角可以提升聚能射流整体的质量,减小聚能射流整体的速度,动能变化不确定。但是由于占据体的截断作用,使得部分占据体融入射流头部或者部分射流头部融入占据体,导致碎片的平均质量变化不稳定。

因此可以推断,在其他条件不变的前提下,在一定范围内减小药型罩的锥角,存在提高碎片的速度、动能的可能性。

2.1.3　药型罩厚度的影响

依据药型罩厚度的不同,将 25 组试验平均分为 5 组,各组平均质量、速度以及动能与药型罩厚度的关系如图 9 ~ 10 所示。

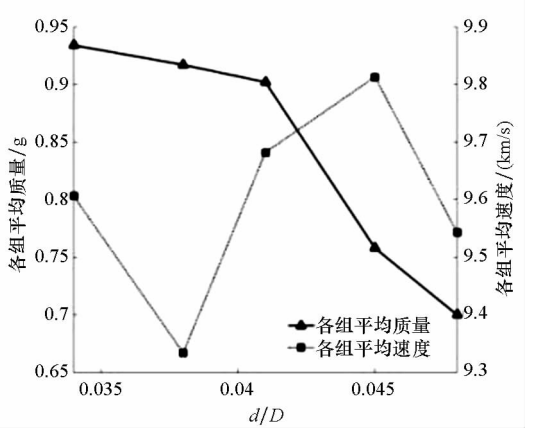


图 9　各组平均质量、速度与药型罩厚度的关系

Fig. 9　Relationship between the average mass, velocity of each group and the thickness of liner

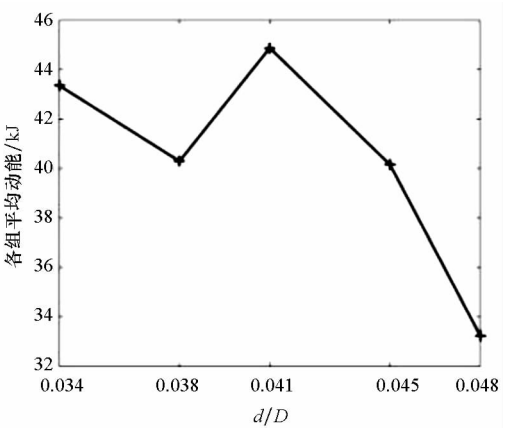


图 10　各组平均动能与药型罩厚度的关系

Fig. 10　Relationship between the average kinetic energy of each group and the thickness of liner

由图 9 ~ 10 可知,随着药型罩厚度的增加,碎片的平均质量呈单调减少的趋势,药型罩的厚度变化对碎片的平均速度及动能的影响是不稳定的。但在一定的厚度范围内,碎片的平均速度有较明显的上升趋势,平均动能有较明显的下降趋势。由聚能射流定常理论[17]以及 Chanteret 关于药型罩压垮速度的理论[19]可知,随着药型罩厚度的增加,射流速度会单调减少,射流质量会单调增加,动能变化不确定。药型罩厚度增加时,占据体和装药间距离保持不变,因此占据体的闭合时间保持不变,由于射流速度会单调减少,能够通过占据体的射流头部在减少,导致碎片的平均质量单调减少。

因此可以推断,在其他条件不变的前提下,减小药型罩的厚度,可以有效地提高碎片的质量,在一定厚度范围内存在提高碎片的速度、降低碎片动能的可能性。

2.1.4 药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的影响

依据药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的不同,将25组试验平均分为5组,各组平均质量、速度以及动能与药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的关系如图11~12所示。

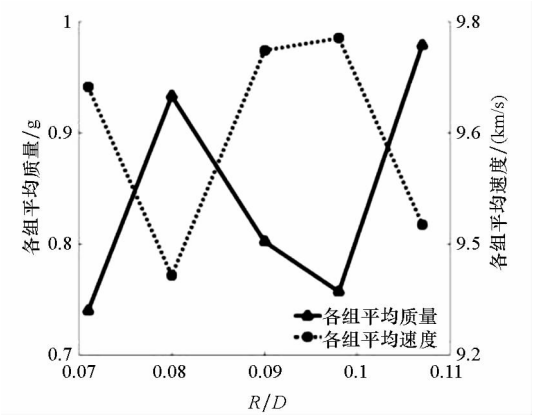


图11 各组平均质量、速度与药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的关系

Fig. 11 Relationship between the average mass, velocity of each group and the radius of the top of the liner which is close to the charge

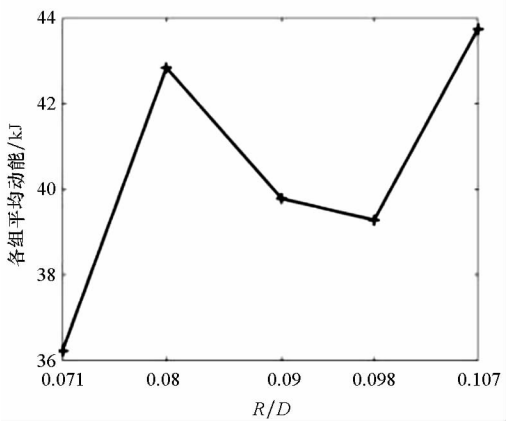


图12 各组平均动能与药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的关系

Fig. 12 Relationship between the average kinetic energy of each group and the radius of the top of the liner which is close to the charge

由图11~12可知,药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的增加对碎片的平均质量、速度以及动能的影响是不稳定的。但是,碎片的平均质量和动能的变化趋势是完全一致的,与碎片平均速度的变化趋势是完全相反的。当R/D介于0.080~0.098之间时,药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的增加可以有效地提高平均速度,但是降低了平均质量、动能。

因此可以推断,在其他条件不变的前提下,减小药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径,在一定厚度范围内,存在提高碎片的质量和动能、降低碎片速度的可能性。

2.1.5 药型罩材料的影响

依据药型罩材料的不同,将25组试验分为5组,统计并排序,如表7~8所示。

表7 药型罩材料对平均质量的影响

Tab. 7 Effect of the sorts of liner material on the average mass

排序	药型罩材料	密度/(g/cm^3)	各组平均质量/g	体积/cm^3
1	紫铜	9.0	1.051	0.117
2	铝	2.8	1.038	0.371
3	铁	7.9	0.927	0.117
4	钽钨合金	17.0	0.662	0.039
5	钨镍铁合金	18.2	0.534	0.029

表8 药型罩材料对平均速度、动能的影响

Tab. 8 Effect of the sorts of liner material on the average velocity and kinetic energy

药型罩材料	声速/(km/s)	各组平均速度/(km/s)	各组平均动能/kJ
铝	5.3	11.149	64.90
铁	4.6	10.080	46.59
紫铜	3.9	9.758	48.66
钽钨合金	3.5	8.574	23.60
钨镍铁合金	4.0	8.417	18.14

由表7可知,选用紫铜材料作为药型罩时,碎片的平均质量最大。除紫铜外,碎片的平均质量均随药型罩材料密度的减小而增大。这是由于占据体的闭合截断时间固定不变,当碎片的速度较大时,可以通过更多的体积。由于紫铜的延展性比铁好,因此紫铜的凝聚性比铁好,尽管紫铜形成的碎片速度低于铁,但是仍可以通过相同体积的碎片,使得其形成的碎片的平均质量最大。由表8可知,选用铝材料作为药型罩时,碎片的平均速度、动能最大。除钨镍铁合金外,碎片的平均速度均随药型罩材料体积声速的减小而增大。这是由于射流速度随药型罩

体积声速的增大而增大[20]。因此可以推断,在其他条件不变的前提下,当需要较高的碎片质量时,应选用紫铜材料作为药型罩;当需要较高的碎片速度及动能时,应选用铝材料作为药型罩。

2.1.6　炸药种类的影响

依据炸药种类的不同,将 25 组试验分为 5 组,统计如表 9 所示。

表 9　炸药种类对平均质量、速度及动能的影响

Tab. 9　Effect of the sorts of explosive on the average mass, velocity and kinetic energy

炸药种类	Gurney 速度/(km/s)	各组平均质量/g	各组平均速度/(km/s)	各组平均动能/kJ
HMX	2.551	1.029	9.809	48.90
LX 14	2.464	0.819	9.774	40.34
Octol	2.375	0.904	9.420	43.60
8701	2.360	0.752	10.183	40.66
Comp B	2.235	0.708	8.792	28.39

由表 9 可知,选用 HMX 作为炸药时,碎片的平均质量及动能最大,除 LX 14 外,碎片的平均质量及动能均随炸药爆压的减小而减小。选用 8701 作为炸药时,碎片的平均速度最大,除 8701 外,碎片的平均速度均随炸药爆压的减小而减小。由聚能射流定常理论[17]和 Gurney 速度公式[18]可知,对于聚能射流而言,选用 Gurney 速度越大的炸药,药型罩的压垮速度越大,从而射流速度越大,射流质量越大,射流动能越大。

因此可以推断,在其他条件不变的前提下,当需要较高的碎片质量及动能时,应选用 HMX 作为炸药;当需要较高的碎片速度时,应选用 8701 作为炸药。

2.2　各影响因素敏感性分析

基于碎片的质量、速度和动能仿真试验结果,分别对所讨论的 6 个设计因素进行极差分析,如表 10 所示。

由表 10 可知,装药长径比对于碎片质量的影响最大,药型罩材料对于碎片速度、动能的影响最大。若装药长径比被限制,则药型罩的材料以及炸药的种类是影响碎片质量、速度以及动能最大的设计因素。

表 10　质量、速度及动能的极差分析

Tab. 10　Range analysis of mass, velocity and kinetic energy

设计因素	质量极差/g	速度极差/(km/s)	动能极差/kJ
λ	0.768	0.757	30.82
药型罩材料	0.517	2.732	46.77
炸药种类	0.321	1.391	20.51
R/D	0.240	0.427	7.52
d/D	0.234	0.479	11.63
2θ	0.225	0.407	10.66

3　结论

1)在试验的基础上,验证了仿真方法的可信性。得到了 3 种发射装置结构,分别可以提供质量为 1.533 g 的紫铜碎片、速度为 11.649 km/s 的铝碎片、动能为 85.6 kJ 的铝碎片。得到了 2 种发射装置结构,均可以提供质量大于 1 g、速度高于 11 km/s 的密实结构圆柱状碎片。

2)若装药长径比被限制,则药型罩的材料以及炸药的种类是影响碎片质量、速度以及动能最大的设计因素。

3)当需要较高的碎片质量时,可以增加装药长径比、减小药型罩的厚度、选用紫铜材料作为药型罩、选用 HMX 作为炸药,药型罩的锥角和药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的调整需要结合具体情况讨论。当需要较大的碎片速度时,可以减小装药长径比、选用铝材料作为药型罩、选用 8701 作为炸药,药型罩的锥角、药型罩的厚度、药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的调整需要结合具体情况讨论。当需要较大的碎片动能时,可以增加装药长径比、选用铝材料作为药型罩、选用 HMX 作为炸药,药型罩的锥角、药型罩的厚度、药型罩顶部靠近装药侧的曲率半径的调整需要结合具体情况讨论。

参考文献(References)

[1]　奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Orlenko L P. Explosion physics[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)

[2]　Stilp A J. Review of modern hypervelocity impact facilities[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 5(1/2/3/4): 613 - 621.

[3]　Morndh T, Kawai N, Nakamura K G, et al. Three-stage light-gas gun with a preheating stage[J]. Review of Science Instruments, 2004, 75(2): 537 - 540.

[4] 张晓，鲁军勇，侯重远，等. 应用地面电磁发射清除空间碎片方法[J]. 国防科技大学学报，2016，38(6)：54－58.
ZHANG Xiao，LU Junyong，HOU Chongyuan，et al. Space debris removal method utilizing earth electro-magnetic launch[J]. Journal of National University of Defense Technology，2016，38(6)：54－58.（in Chinese）

[5] 马伟明，鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报，2016，38(6)：1－5.
MA Weiming，LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology，2016，38(6)：1－5.（in Chinese）

[6] 高著秀，冯春华，杨宣宗，等. 微小碎片加速器同轴枪内等离子体轴向速度研究[J]. 物理学报，2012，61(14)：280－286.
GAO Zhuxiu，FENG Chunhua，YANG Xuanzong，et al. Research on plasma axial velocity generated by small debris accelerator coaxial gun[J]. Acta Physica Sinica，2012，61(14)：280－286.（in Chinese）

[7] Katayama M，Takeba A，Toda S，et al. Analysis of jet formation and penetration by conical shaped charge with the inhibitor[J]. International Journal of Impact Engineering，1999，23(1)：443－454.

[8] 张伟，管公顺，庞宝君，等. 超高速撞击加速技术及其应用研究[J]. 哈尔滨工业大学学报，2005，37(10)：1324－1326.
ZHANG Wei，GUAN Gongshun，PANG Baojun，et al. Research on hypervelocity impact acceleration techno-logy and applications[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2005，37(10)：1324－1326.（in Chinese）

[9] 赵峰. 炸药强爆轰驱动高速金属飞片的试验和理论研究[D]. 绵阳：中国工程物理研究院，2005.
ZHAO Feng. Experimental and theoretical research on hypervelocity metal flyers driven by detonation of explosives[D]. Mianyang：China Academy of Engineering Physics，2005.（in Chinese）

[10] 李志龙，徐全军，姜楠，等. 试验室聚能高速碎片生成装置设计与研究[J]. 爆破器材，2012，41(5)：5－8.
LI Zhilong，XU Quanjun，JIANG Nan，et al. Design and research of laboratory hypervelocity debris launcher based on speed charge[J]. Explosive Materials，2012，41(5)：5－8.（in Chinese）

[11] 徐全军，白帆，伍睿星. 占据式聚能装药射流形成的数值模拟及试验研究[J]. 爆破器材，2011，40(3)：11－13.
XU Quanjun，BAI Fan，WU Ruixing. Numerical simulation of jet formation by shaped charge with the inhibitor and experimental investigation[J]. Explosive Materials，2011，40(3)：11－13.（in Chinese）

[12] Walker J D，Grosch D J，Mullin S A. A hypervelocity fragment launcher based on an inhibited shaped charge[J]. International Journal of Impact Engineering，1993，14(1/2/3/4)：763－774.

[13] Rogers G F C，Mayhew Y R. Thermodynamic and transport properties of fluids[M]. USA：Blackwell Publishing，1995.

[14] Steinberg D J. Equation of state and strength properties of selected materials：UCRL-MA-106439 [R]. Lawrence Livermore National Laboratory，1996.

[15] Tillotson J H. Metallic equations of state for hypervelocity impact[R]. San Diego，USA：General Atomic Division of General Dynamics，1962.

[16] Dobratz B M. Properties of chemical explosives and explosive simulants：UCRL-51319 (REV. 1)[R]. Livermore，USA：Lawrence Livermore Lab.，1972.

[17] Carleone J. Tactical missile warheads[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics，1993，155：165－223.

[18] Gurney R W. The initial velocities of fragments from bombs，shells，and grenades：report 405[R]. Ballistic Research Laboratory，1943.

[19] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京：北京理工大学出版社，2014：31.
HUANG Zhengxiang. Theory and practice of shaped charge[M]. Beijing：Beijing Institute of Technology Press，2014：31.（in Chinese）

[20] Held M. Liners for shaped charges[J]. Journal of Battlefield Technology，2001，4：1－7.