

端面效应对楔形罩切割器射流成型影响的试验和数值模拟

武双章, 顾文彬

(解放军理工大学, 江苏 南京 210007)

摘要: 为了研究端面效应和装药长度对单角度楔形罩线型聚能切割器射流成型性能的影响特点和规律, 运用 ANSYS/LS-DYNA 对方案进行了全尺寸三维数值模拟, 并采用 X 光试验进行了成型照相, 获得了不同时刻射流的成型图片。结果表明, X 光试验和数值模拟获得的图像外形基本吻合, 端面效应使得装药形成的射流质量和速度均有一定程度的下降; 在装药长度不同的条件下, 端面效应对射流成型的影响也不同; 当装药长度小于 20 mm 时, 基本不能形成射流; 当装药长度大于 20 mm 小于 70 mm 时, 对于某一装药长度, 形成的射流最大速度逐渐增大至某一固定水平, 装药长度范围内可以形成较稳定的射流。为了尽量降低端面效应对射流成型的不利影响, 装药长度需要大于 70 mm。

关键词: 爆炸力学; 端面效应; 线型聚能切割器; 射流成型; 三维数值模拟; X 光试验

中图分类号: TJ55; TD235.3; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.023

1 引言

线型聚能装药 (Linear Shaped Charge, LSC) 理论是建立在锥形聚能装药理论基础之上的, 属于聚能装药的其中一种形式。由于聚能装药技术涉及到装药的高速爆轰、药型罩材料和外壳材料在高温、高压、高速的爆轰产物作用下产生大变形等因素, 其性能受装药、药型罩材料、外壳材料的性能和结构以及炸高等因素的影响较大, 传统的解析方法很难直接描述其射流成型过程及侵彻靶板过程的特点和规律。伴随着计算机技术的不断发展, 数值计算方法作为描述聚能装药运动过程的一种有效方法也一直处在发展之中, 为研制新型聚能装药、给出大量关于装药结构参数合理性的先验性信息、描述试验难以获得的聚能射流形成过程的详细信息、减少难度较大的试验工作量等方面发挥着重要的作用^[1-8]。

实际的线型聚能装药的射流成型过程十分复杂, 涉及的影响因素更多, 与理想的射流成型过程及其特点可能存在着较明显、较大的差别。因此, 本研究工作采用 X 光试验和全尺寸三维数值模拟相结合的方法研究了端面效应和装药长度对单角度楔形罩线型聚能装药射流成型的影响特点和规律。

收稿日期: 2012-12-26; **修回日期:** 2013-03-16

作者简介: 武双章 (1977-), 男, 讲师, 主要从事爆炸及其应用方面的研究工作。e-mail: shsnake@163.com。

2 有限元模型的建立

本文所述线型聚能切割器装药结构的横断面形状为单角度楔形, 主要由炸药和药型罩组成, 暂不考虑装药外壳的影响。根据切割对象的材料和尺寸特征, 决定采用的装药口宽为 100 mm; 药型罩材料选择密度较大、塑性较好、可压缩性较小、汽化温度较高、成型及侵彻性能较好且经济实用的金属材料——工业纯铁; 炸药选择聚能装药中常用的 B 炸药; 药型罩横断面底边水平方向的炸药宽度固定为 2.0 mm。具体结构参数如图 1 所示。

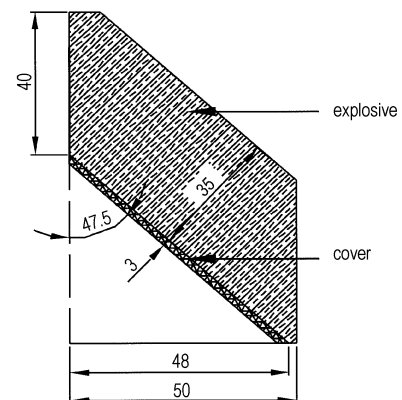


图 1 线型聚能装药断面结构 (mm)

Fig. 1 The transect configuration of LSC (mm)

为了更好地模拟实际切割器的射流成型过程, 采用了全尺寸三维实体建模方法。线型聚能装药的周

围均为空气介质,为炸药和药型罩材料的流动提供充足的空间。由于线型聚能装药切割器的结构属于面对称结构,因此,在其断面上只需建立 1/2 模型,如图 2 所示,此时需要对对称面上的所有节点进行对称约束。利用上述方法建立全尺寸三维数值计算模型,使用三维实体材料模型。在 ANSYS/LS-DYNA 中进行建模和计算,利用其前处理功能建立计算模型,并定义各种材料模型,如表 1 所示。炸药、药型罩和空气三种材料采用 EULER 网格建模,单元使用多物质 ALE 算法。数值模拟计算中假设切割器为点起爆,起爆点位于装药顶部中心处,即在此处对装药进行引爆。装药、药型罩和空气的计算网格均为六面体实体单元。模型采用 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 单位制,计算时间为 $100 \mu\text{s}$ 。

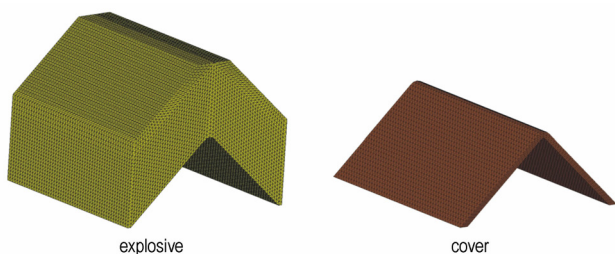


图 2 线型聚能装药有限元模型

Fig.2 The finite model of LSC

表 1 数值模拟的材料模型和状态方程

Table 1 The material models and state equations of numerical simulation

material	material model	state equation
composition B	HIGH_EXPLOSIVE_BURN	JWL
ingot cover	JOHNSON_COOK	GRUNEISEN
air	NULL	GRUNEISEN

3 X 光试验和数值模拟结果分析

单角度楔形罩线型聚能装药拉伸长度为 100 mm 时射流成型的 X 光试验和数值模拟射流形状对比见表 2,射流尺寸对比见表 3。

从表 2 和表 3 中可以看出:

(1) 数值模拟获得的射流外形无论从正面还是横断面方向看都和 X 光试验的结果基本一致。

(2) 线型聚能装药在雷管和传爆药的爆炸作用下起爆后,装药在爆轰瞬间迅速生成大量的气态产物,并释放出大量的能量,使气态产物形成高温高压的状态,该气态产物的温度高达数千摄氏度、压力高达数十万个大气压,并迅速作用于药型罩。在如此高的压力下,

药型罩材料的性能近似为流体,因此,药型罩迅速被压垮,并向对称面运动,在对称面处发生高速碰撞,紧挨炸药部分的药型罩外壁附近的金属在对称平面处碰撞时速度增加的程度相对较小,相对于碰撞点处,此部分金属流向罩顶部方向运动,逐渐形成了较厚的片状“刀背”;药型罩内壁附近的金属在对称平面处高速碰撞时向罩底部方向运动并不断地得到加速,逐渐形成高速运动的片状金属射流,通常称之为“射流刀”。由于射流内部存在着一定的速度梯度,因此,射流在运动过程中不断地被拉长、变薄,最终发生断裂^[8-9]。

(3) 对于顶部中心起爆方式,当装药起爆后,爆轰波将沿着装药起爆点横断面从上至下和装药长度方向向起爆点两侧以球面波形式进行传播,因此,起爆点横断面处药型罩顶部首先受到爆轰产物的强烈冲击作用率先压垮,随后其它横断面的药型罩材料沿着装药长度方向依次压垮,这些部位的药型罩材料受到的作用并非沿着药型罩表面的法线方向,而是向端面方向与法线有一定的夹角,并且随着距离起爆点越远,该角度越大;爆轰波到达装药两端附近时,开始受到稀疏波的影响。受上述因素的综合影响,最终导致装药两端出现药型罩材料向装药两侧飞散的现象,形成的射流速度最大值有一定程度的降低,射流形状从正面看呈对称的“饺子”状,从横断面看呈多层“伞”状。

(4) 对于顶部中心起爆方式中的头尾距离而言,当测试时间较小时,测试获得的数据较数值模拟大,并且随着时间的减小,相对误差越大,主要原因是 X 光照片中亮区及虚影较大,不能明确区分射流的头尾关键点,导致误差较大;当测试时间较大时,测试获得的数据普遍较数值模拟小,相对误差在 24.3% 以内,基本可以满足工程需要。

(5) 对于顶部中心起爆方式中的头部距罩底部距离而言,测试获得的数据较数值模拟小,相对误差在 7.2% 以内,一致性较好,同样可以满足工程需要。

从以上分析中可以看出,数值模拟能够和 X 光试验较好地吻合,说明该数值模型能够很好地模拟实际射流的形成过程,因此,可以用该数值模型来模拟实际装药的射流成型过程。

单角度楔形罩线型聚能装药拉伸长度分别为 $10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 \text{ mm}$ 时的各典型时刻射流正面和横断面形状对比如表 4 所示,对应的射流最大速度时程曲线如图 3 所示,不同装药长度的射流速度最大时刻及其对应的射流最大速度如表 5 和图 4 所示。

表 2 射流形状对比

Table 2 The contrast of jet shape between X-ray test and numerical simulation

time/ μs	camera site	X-ray test	numerical simulation	time/ μs	camera site	X-ray test	numerical simulation
8/7.992	Transect			14/13.758	Transect		
19/18.681	Transect			25/25.433	Transect		
40/39.977	Transect			45/44.731	Transect		
31/30.815	Face			41/40.817	Face		
46/45.788	Face			51/50.734	Face		
56/55.722	Face			61/60.793	Face		

Note: Time in Table column before the diagonal is for numerical simulation, and after the diagonal is for X-ray test.

表 3 X 光试验与数值模拟射流尺寸对比

Table 3 The jet size contrast between X-ray test and numerical simulation

detonation	camera site	time / μs	numerical simulation			X-ray test		relative error of header and cover bottom distance /%	relative error of header and trailer distance /%
			coordinate of jet top /cm	coordinate of jet tail /cm	header and trailer distance /cm	header and cover bottom distance /cm	header and trailer distance /cm		
transect		9	3.2873	4.1702	0.8829		1.0509		19.03
		13	2.2012	3.9000	1.6988		1.9630		15.55
		14	1.9075	3.8215	1.9140		2.1812		13.96
		18	0.6495	3.5400	2.8905		2.7405		-5.19
		19	0.3021	3.5142	3.2121		3.3372		3.89
		24	-1.2832	3.1709	4.4541		3.9599		-11.10
		25	-1.6206	3.1082	4.7288		4.5342		-4.12
		40	-6.5000	2.0275	8.5275		7.6201		-10.64
		45	-8.2000	1.7652	9.9652		9.8202		-1.46
top center		26	-1.8779	2.8795	4.7574		4.8044		0.99
		31	-3.5133	2.5822	6.0955		5.0917		-16.47
		36	-5.1500	2.8248	7.9748	4.7825	6.0396	-7.14	-24.27
face		41	-6.8000	1.9875	8.7875	6.3216	7.1946	-7.04	-18.13
		46	-8.4500	1.6902	10.1402	7.9613	8.2710	-5.78	-18.43
		51	-10.2500	1.3928	11.6428		9.2605		-20.46
		56	-11.9000	1.0955	12.9955		10.4553		-19.55
		61	-13.7000	0.7710	14.4710		11.6319		-19.62

从图 3、图 4、表 4 和表 5 中可以看出：

(1) 线型聚能装药两端的端面效应使得装药爆轰时产生的能量有所下降,从而导致形成的射流质量和速度也有一定程度下降。

(2) 当装药长度小于 50 mm 时,射流速度最大时

刻随着装药长度的增加快速增大;当装药长度大于 50 mm 时,基本稳定在某一固定水平。

(3) 当装药长度小于 70 mm 时,射流最大速度随着装药长度的增加快速增大;当装药长度大于 70 mm 时,缓慢增加至某一较稳定的水平值。

表 4 不同时刻不同装药长度的射流形状

Table 4 The jet shape at different time with different charge length

charge length /mm	$t=20 \mu\text{s}$		$t=30 \mu\text{s}$		$t=40 \mu\text{s}$	
	transect	face	transect	face	transect	face
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						

表 5 射流速度最大时刻及其对应的射流最大速度

Table 5 Time of maximum jet velocity and corresponding maximum jet velocity

charge length /mm	time of maximum jet velocity / μs	maximum jet velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
10	13	1175.62
20	11	2014.72
30	13	2563.86
40	23	2948.55
50	27	3212.16
60	28	3366.51
70	27	3443.32
80	29	3480.83
90	30	3496.39
100	30	3500.86

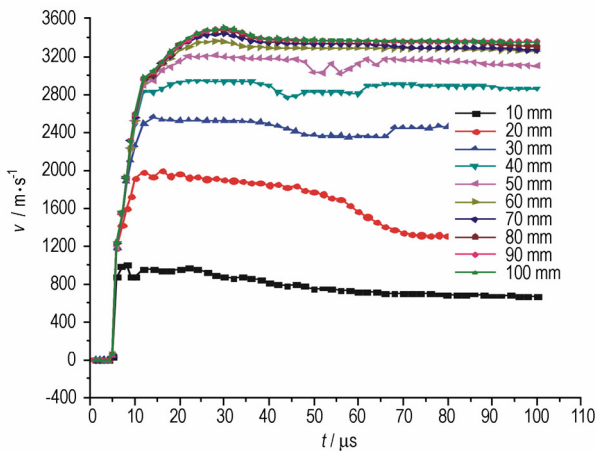


图 3 不同装药长度的射流最大速度时程曲线

Fig. 3 The curves of maximum jet velocity vs time of different charge length

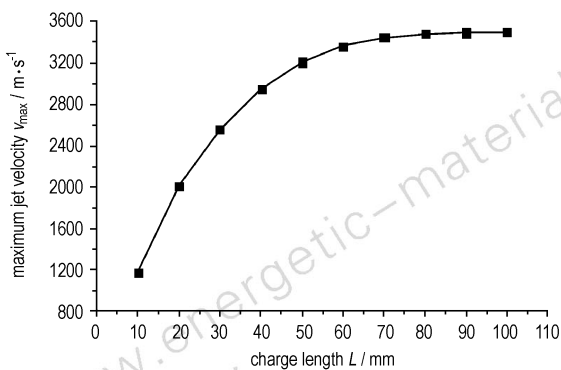


图 4 不同装药长度的射流最大速度曲线

Fig. 4 The curve of maximum jet velocity of different charge length

(4) 从表 4 中射流形状的正反面可以看出,射流最先出现断裂的部位位于装药的两端,随着装药长度的

增加,射流头部未完全断裂部分的宽度增加,处于高速部分的射流宽度随之增加,射流的成型性能变好。

(5) 在装药长度不同的条件下,端面效应对射流成型的影响程度也不同。当装药长度小于 20 mm 时,基本不能形成射流;当装药长度大于 20 mm 小于 70 mm 时,形成的射流最大速度逐渐增大至某一较稳定的水平值,装药长度范围内可以形成较稳定的射流,但不同拉伸长度的装药形成的射流最大速度差别较大,说明端面效应使得装药爆轰时产生的能量损失较大,从而对射流成型产生的影响也较大;当装药长度大于 70 mm 时,形成的射流最大速度时程曲线基本一致,即先快速增加至某一较大值约 $2900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,然后较缓慢增加至最大值约 $3500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最后缓慢下降至某一较大水平约 $3360 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明此时端面效应对射流成型产生的影响较小。因此,要想尽量降低端面效应的不利影响,使获得的装药产生的射流最大速度达到稳定的高水平值,需要保证装药的最小长度不低于 70 mm。

4 结论

(1) 采用 ANSYS/LS-DYNA 进行线型聚能装药全尺寸数值建模和计算,获得的射流横断面和正向外形基本一致,能够很好地再现实际切割器在射流形成过程中出现的端面效应,以及沿着装药长度方向药型罩的压垮过程随着爆轰波沿装药长度方向的传播依次进行,因此,在装药两端将出现药型罩材料的飞散,正面形成类似“饺子”状外形,而横断面则形成多层“伞”状外形。

(2) 射流速度最大时刻及其对应的射流最大速度随着装药长度的增加均先快速增大,后缓慢增加至某一较稳定的水平。

(3) 获得的射流尺寸如头尾距离、头部距罩底距离相对误差均较小,能够满足工程实际,因此,可以用 ANSYS/LS-DYNA 建立三维线型聚能装药的数值计算模型,模拟实际的线型聚能切割器,为了尽量降低端面效应对射流成型的不利影响,装药长度需要大于 70 mm。

参考文献:

- [1] 王克波, 郑宇. 线性聚能装药结构的数值仿真优化[J]. 爆破, 2012, 29(6): 99-103.
WANG Ke-bo, ZHENG Yu. Numerical simulation and optimization of the liner shaped charging structure [J]. *Blasting*, 2012, 29(6): 99-103.

- [2] 姚志华, 王志军, 付璐, 等. 半正方形罩线型切割器的数值模拟研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(2): 11-13.
YAO Zhi-hua, WANG Zhi-jun, FU Lu, et al. Numerical simulation of linear cutter with semi-square liner[J]. *Explosive Material*, 2011, 40(2): 11-13.
- [3] 林振荣, 季凯, 卢玉松, 等. 线性聚能切割器系统参数实验研究[J]. 煤炭技术, 2010, 29(12): 176-177.
LIN Zhen-rong, JI Kai, LU Yu-song, et al. Research on index of linear shaped cutter [J]. *Coal Technology*, 2010, 29(12): 176-177.
- [4] Dave Novotney, Meryl Mallery. Historical development of linear shaped charge [C] // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 8-11 July 2007, Cincinnati, OH, AIAA 2007: 5141.
- [5] Lien C Yang, Lexter J Granda, Garth E Davis, et al. Dynamic testing of large scale destruct charge assemblies [C] // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9-12 July 2006, Sacramento, California, AIAA 2006-4987.
- [6] Ian A Whalley. Development of the STARS II shroud separation system [C] // 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 8-11 2001, Salt Lake City, Utah, AIAA 2001-3769.
- [7] 李立伟, 李翔宇. 聚能装药圆形切割器的数值模拟和分析设计[J]. 试验技术与试验机, 2006(3): 12-14.
LI Li-wei, LI Xiang-yu. An analytic design and numerical simulation of annular cutting [J]. *Test Technology and Testing Machine*, 2006(3): 12-14.
- [8] Л. П. Орр连科. 孙承纬译. 爆炸物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 922-1079.
Л. П. Orr Rien. SUN Cheng-wei, Translators. *Explosion physics* [M]. Beijing: Science Press, 2011: 922-1079.
- [9] 焦丽娟, 刘天生. 关于楔形罩的初步研究[J]. 华北工学院学报, 2001, 22(1): 70-73.
JIAO Li-juan, LIU Tian-sheng. Preliminary study on the cuneiform charge liner [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2001, 22(1): 70-73.

Experimental and Three-dimensional Numerical Simulation for Influence of End Constraint on Jet Formation of Cuneiform Cover Cutter

WU Shuang-zhang, GU Wen-bin

(PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to study the influences of end constraint and charge length on the jet formation of single angle cuneiform cover liner shaped charge (LSC) cutter, a three-dimensional full-scale model of charge was established by using ANSYS/LS-DYNA program. The jet formation photographs of different time was recorded by X-ray technique. Results show that the image shape of simulation almost is same with X-ray test. The jet mass and jet velocity were declined because of end constraint. The influence of end constraint on jet formation was different with different charge length. Jet can hardly form when the charge length was less than 20 mm. When the charge length was greater than 20 mm and less than 70 mm, a stable jet can form in charge length range and maximum jet velocity increased gradually to a certain level for a certain length of charge. To minimize the adverse effect of the end constraint on the jet formation, charge length should be greater than 70 mm.

Key words: mechanics of explosion; transect effect; linear shaped charge cutter; jet formation; Tri-dimensional numerical simulation; X-ray test

CLC number: TJ55; TD235.3; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.023