DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0353-06

楔形罩线型聚能装药侵彻钢锭*

武双章,顾文彬,李旭锋
(解放军理工大学野战工程学院,江苏 南京 210007)

摘要: 为了获得楔形罩线型聚能装药射流侵彻钢锭的特点和规律,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了三维数值计算模型,并进行了数值模拟。在此基础上,进行了实际的切割实验:对于某一炸高条件,切割深度随时间的增加先快速增加,后缓慢增加;对于不同的炸高,切割深度随炸高的增加而缓慢增加,当炸高为 40~60 mm 和 70~120 mm 时,侵彻深度表现出对炸高的不敏感性;同时,获得了不同炸高条件下不同时刻的钢锭切口断面形状。结果表明,数值模拟和切割实验结果有很好的一致性,可以用该三维数值计算模型模拟实际切割器侵彻钢靶的过程,并获得其特点和规律。

关键词: 爆炸力学;切割实验;ANSYS/LS-DYNA 软件;线型聚能装药;单角度楔形罩
中图分类号: O385;TD235.3 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

聚能爆炸切割技术以线型聚能装药(linear shaped charge,LSC)为基础,相对于传统的切割方法,它具有高效、快速、简便、低成本、强环境适应性及安全可靠等突出特点,可用于岩石、混凝土和钢等坚硬材料的快速切割。随着该技术的不断发展,其应用范围也不断扩大,逐渐由早期的宇航和军事领域向工程爆破和抢险救援等领域中拓展,应用前景十分广阔[1-8]。如针对受到攻击破坏后不能正常打开的某型防护门,对其闭锁机构进行爆炸切割,以实现快速非正常顺利打开防护门的目的。

普通的 LSC 不能对防护门的闭锁机构实施快速有效的切割,需要采用大型 LSC 的爆炸切割技术。目前,关于大型 LSC 切割靶板的研究较少。LSC 的侵彻性能是衡量其性能优劣的重要指标,即使是最简单的单角度楔形罩 LSC,其侵彻靶板过程也十分复杂。由于聚能装药技术涉及的影响因素众多并且十分复杂,直接采用传统的实验或解析方法来进行研究存在着较大的困难。而爆炸实验虽然破坏性强、要求高、工作量大、周期长、难度大,且仅通过实验获得的信息量相对较少,但是能够为其他的研究方法提供非常重要的数据支撑。目前,数值计算方法可以高效地描述聚能装药的运动过程,在聚能装药的研究中发挥着十分重要的作用[2-10]。本文中,拟采用数值模拟和实验相结合的方法,对 LSC 侵彻钢锭的过程进行研究,为进一步提高 LSC 侵彻机理的认识提供参考。

1 影响因素和结构参数

采用主要由炸药和横断面形状为单角度楔形的药型罩组成的 LSC,其横断面结构及参数参见文献[11]。影响该 LSC 侵彻靶板性能的主要因素有装药口宽 c,炸药类型和装药密度 ρ_1,药型罩材料类型、密度 ρ_2、罩壁厚 δ_1 和楔形角 2α,药厚 b,药顶高 a,装药壳体材料类型、密度 ρ_3 和壁厚 δ_2,靶板材料类型、密度 ρ_4、强度 σ 和熔点 T,以及炸高 h 等[1,2,10-11]。本文中暂不考虑装药壳体的相关影响因素。

在 LSC 结构参数优化结果[2]的基础上,结合切割对象的具体特点,采用的 LSC 具体结构参数的选择及实物图参见文献[11]。实际侵彻的 45 钢钢锭参见文献[10]。

2 有限元模型

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行数值计算,按照与实验状态完全相同的尺寸和材料建立 LSC 和钢锭的三维有限元模型,同时考虑其周围的空气介质。由于 LSC 和钢锭均具有面对称的结构特点,因

* **收稿日期**: 2014-06-27; **修回日期**: 2014-10-16
第一作者: 武双章(1977—),男,硕士,讲师; **通信作者**: 顾文彬,guwenbin1@aliyun.com。

此只需建立 1/2 模型，约束对称面上的所有节点即可，如图 1 所示。炸药、药型罩和空气等材料在装药爆轰、射流成型及侵彻靶板过程中都会产生大的变形运动，难以用 Lagrange 方法进行准确模拟，因此采用 Euler 网格对上述材料进行建模；而靶板（钢锭）采用 Lagrange 网格进行建模。射流的成型及其切割靶板的全过程使用多物质 ALE 的单元算法进行模拟。流体（炸药、药型罩和空气）与靶板（钢锭）之间采用流固耦合算法。为了避免数值计算时压力在边界上出现反射现象，需要在空气外表面定义非反射边界。对钢锭底面节点进行轴向约束。计算网格均为 8 节点六面体实体单元，使用三维实体材料模型，见表 1。其中，对空气，炸高每增加 10 mm，单元数量增加 13 500 个。起爆点设置在装药顶部中心处。炸药、药形罩和靶板的材料模型和状态方程及其具体参数的选择详见文献[10]。

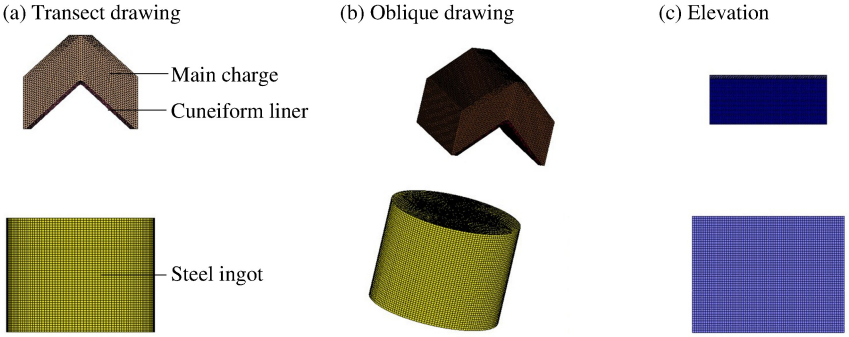

图 1 LSC 和钢锭有限元模型

Fig. 1 Finite model of LSC and steel ingot

表 1 材料模型和状态方程

Table 1 Material models and state equations

部位	材料	模型	状态方程	单元尺寸/(mm×mm×mm)	单元数
装药	B 炸药	HIGH_EXPLOSIVE_BURN	JWL	2.00×2.00×2.00	38 750
药形罩	纯铁	JOHNSON_COOK	Grüneisen	1.50×0.75×2.00	6 000
空隙	空气	NULL	Grüneisen	2.00×2.00×2.00	399 400～520 900
靶	45 钢	JOHNSON_COOK	Grüneisen	2.00×2.00×2.00	120 000

3 结果和分析

3.1 实 验

图 2 为单角度楔形罩 LSC 切割钢锭实验设置和实际切割效果，起爆方式为顶部中心点起爆，分别对炸高为 50、80 和 110 mm 进行了侵彻钢锭实验，实验结果如表 2 所示。

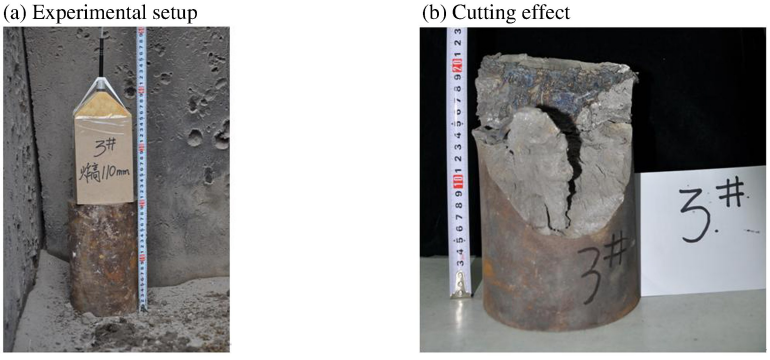

图 2 实验设置和切割效果

Fig. 2 Experimental setup and cutting effect

从图 2 中，可以看出 LSC 切割钢锭的最终效果，射流附着在切割断面上呈圆弧形，中间最深，向两侧逐渐变浅。对于高度为 200 mm 的钢锭，所有的切割效果基本上都是将钢锭分为 3 部分，即切割部位两侧各一半，底部一块；而对于高度为 100 mm 的钢锭，所有的切割效果基本上都是将钢锭分为 2 部分，即切割部位两侧各一半。

从表 2 中可以看出，炸高为 110 mm 时侵彻钢锭深度为最大值 66.40 mm（药型罩口宽的 0.692 倍）；其他炸高获得的侵彻深度均比炸高为 110 mm 时的小。侵彻深度随着炸高的增加而增加，但增加的幅度较小，说明该 LSC 在一定炸高范围内对 45 钢钢锭的侵彻深度对炸高不敏感。模拟结果也获得了类似的规律。

表 2 实验结果

Table 2 Experimental results

h/mm	P_{num}/mm	P_{exp}/mm	δ_P/%
50	68.32	62.60	9.14
80	70.20	64.80	7.69
110	72.14	66.40	7.96

3.2　数值模拟

顶部中心点起爆时单角度楔形罩 LSC 在不同炸高条件下侵彻 45 钢钢锭深度随时间变化关系如图 3 所示，侵彻深度随炸高的变化如图 4 所示。

从图 3 中可以看出，在顶部中心点起爆条件下，炸高一定时，侵彻钢锭的深度随时间先以较大速率快速增加，后以较小速率缓慢增至最大值，曲线总体呈现上凸形。炸高从 30 至 120 mm、间隔 10 mm 逐渐增加时，对应于每条曲线的起始值在时间轴上向后顺延，即射流接触钢锭表面的时间也依次增加。

由图 3 和图 4 可知，侵彻钢锭的深度随炸高的不同而变化。当炸高取值范围为 40～60 mm 和 70～120 mm 时，侵彻深度变化幅度很小（即对炸高不敏感），其主要原因可能是：炸高较低时，射流拉伸不充分，随着炸高的增加，射流充分拉伸，甚至成为断裂射流，而射流最大速度随时间变化很小[8]，导致在射流拉伸不充分时侵彻钢锭深度较小，在射流拉伸充分时较大，但在相应的炸高区间内变化很小；炸高在 80～100 mm 区间时，射流侵彻钢锭深度略有下降，可能由于较大炸高下射流充分拉伸成为断裂射流，其侵彻靶板的稳定性略有下降所致，但影响相对较小。侵彻深度在炸高为 70 mm 或 110～120 mm 时均最大。因此，单角度楔形罩 LSC 侵彻钢锭时的最佳炸高是一个范围，而非某一定值，该范围为 70～120 mm。

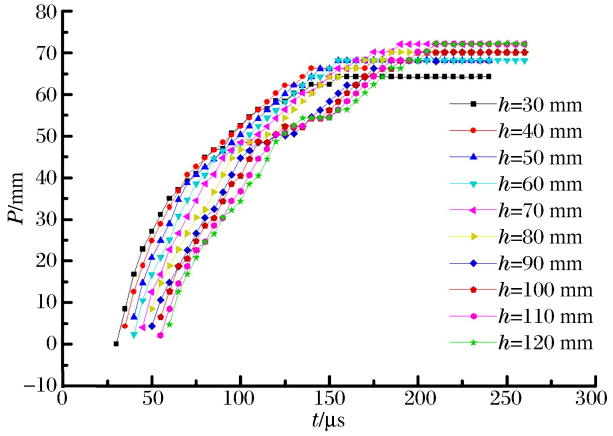

图 3 不同炸高时的侵彻深度

Fig. 3 Penetration depths at different standoffs

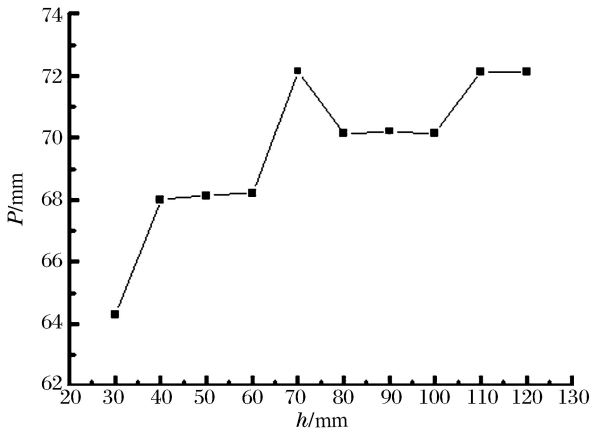

图 4 侵彻深度随炸高的变化

Fig. 4 Penetration depths vs standoffs

炸高为 70 和 110 mm 时单角度楔形罩 LSC 侵彻钢锭切口断面形状随时间变化，分别如图 5～6 所示。不同炸高条件下，最终切口断面形状如图 7 所示，图中每条曲线的纵向坐标都是以药型罩底面为 y 向零点的，因此图中每条曲线所代表的切口断面若以钢锭上表面为基准，则需要减去相应的炸高。

从图 5～7 中，既能获得最终的侵彻效果，又能获得 LSC 射流成型及其侵彻钢靶的详细过程；而从图 5 中，只能看到最终的切割效果。随着炸高的增加，切口断面的中间侵彻深度和两端侵彻深度变化范

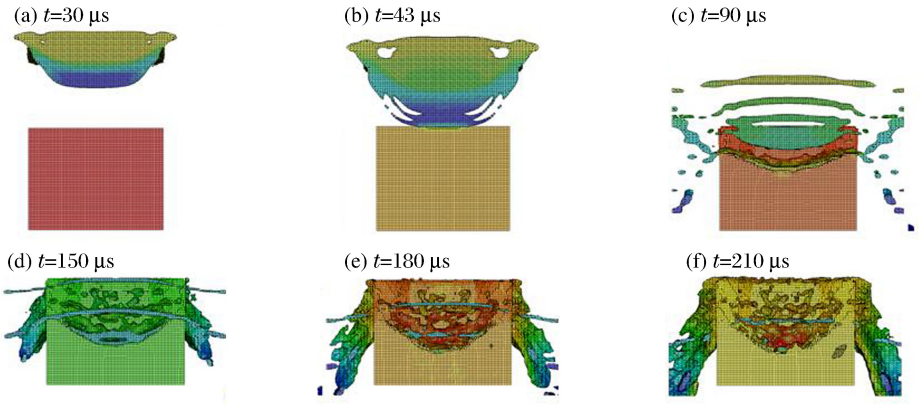

图 5 70 mm 炸高时 LSC 切割钢锭过程

Fig. 5 Processes of LSC cutting steel ingot at 70 mm standoff

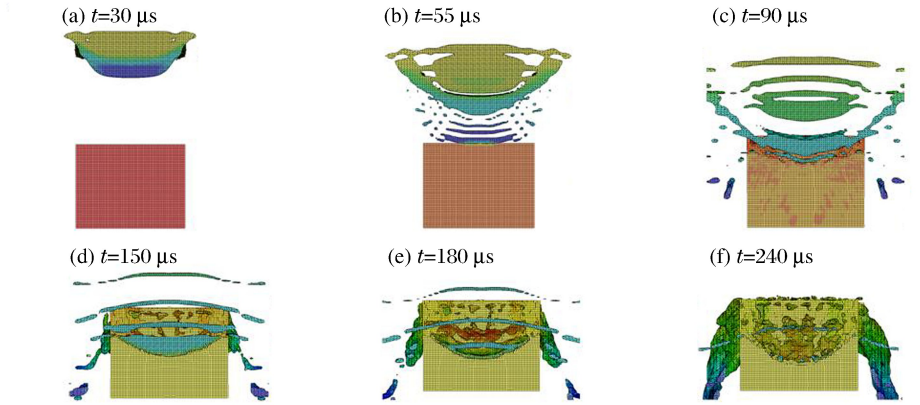

图 6 110 mm 炸高时 LSC 切割钢锭过程

Fig. 6 Processes of LSC cutting steel ingot at 110 mm standoff

围均较小，切口断面形状变化也不大，均为圆弧形，这与表 2 中数据所反映的规律一致。LSC 起爆后的射流成型机理参见文献[8,10]。在侵彻过程中，最终射流会有部分附着在靶板切割断面上，在图中则表现为颜色较深的部分。

炸高为 70 mm 时，射流头部开始侵彻钢锭时(43 μs)射流还未完全断裂，但已经接近射流完全断裂的时刻 45 μs，射流拉伸已较为充分，其快速侵彻阶段发生在 150 μs 内；炸高为 110 mm 时，射流头部开始侵彻钢锭时(55 μs)射流已充分拉伸，超过了射流完全断裂的时刻 45 μs，其快速侵彻阶段发生在 180 μs 内。

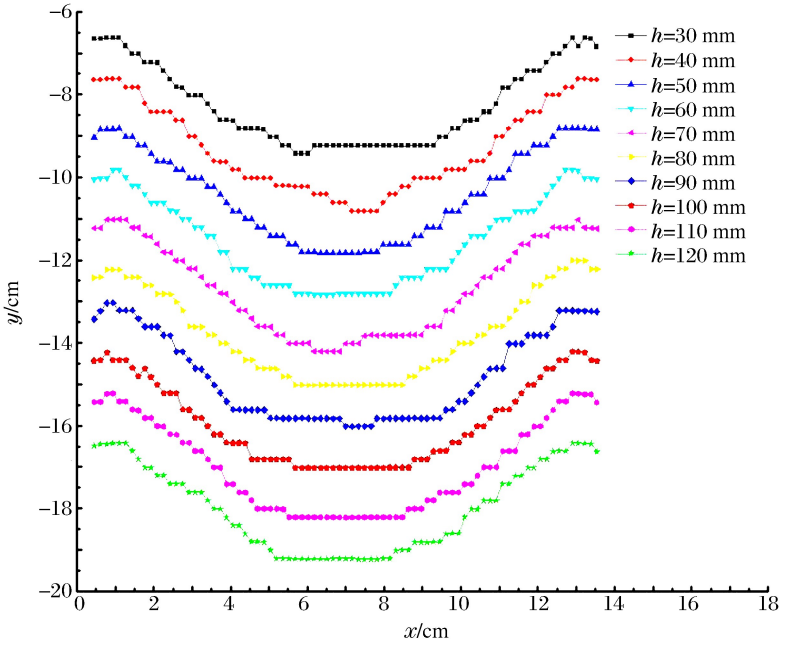

图 7 炸高不同时的切口断面形状

Fig. 7 Shapes of cutting sections at different standoffs

实际有限长装药(100 mm)的 LSC 由于受端面效应的影响[8]，实际切割靶板的能力有所降低[10]。炸高为 110 mm 时，切割实验获得的结果(66.40 mm)比三维数值模拟的结果(72.14 mm)略小，其主要原因是：在采用冲压工艺加工药型罩时，尽管采取了适当的消除回弹措施，但不能完全避免，导致实际 LSC 关键尺寸如楔形角、药型罩口宽等参数与设计状态存在一定的偏差；在进行铸药时，装药内部存在一定缩孔和裂隙；装药与药型罩之间贴合不紧密，存在一定间隙，等等。以上诸多因素导致了模拟结果比切割实验获得的结果略大，相对误差在 10%以内，能够满足工程实际需要，因此实际切割器射流成型及其切割钢靶的全过程可以用该三维数值模型进行模拟。

4　结　论

(1)顶部中心点起爆时，LSC 对钢锭的侵彻深度随炸高的增加缓慢增加，增加幅度较小；当炸高小于 40 mm 时，侵彻深度较小；当炸高不小于 40 mm 时，侵彻深度较大；最佳炸高不是固定值，而是一个范围，此最佳炸高范围为 70～120 mm；在 40～60 mm 和 70～120 mm 的炸高范围内，表现出侵彻深度对炸高的不敏感性；该性质具有较强的实用意义，使该结构 LSC 在实际使用中具有较强的适应性，便于根据实际条件合理地选择炸高，在实际布设 LSC 时，即使在设置炸高时存在着一定误差，也不会对最终的侵彻效果造成较大的影响。

(2)充分考虑装药周围空气介质影响的三维数值结果，准确地描述了 LSC 射流成型及其侵彻靶板的全过程，实际切割实验获得的结果与数值计算结果能够较好地吻合，说明了所建立的三维数值计算模型和选择的各个参数都是合理的、正确的，可以为研究其他类型罩结构 LSC 射流成型及切割靶板的特点和规律提供参考。

参考文献：

[1] Dave N, Meryl M. Historical development of linear shaped charge[C]// 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati, OH: AIAA, 2007.

[2] 武双章，顾文彬，李旭锋，等. 切割防护门的线型聚能装药参数正交优化设计研究[J]. 爆破器材，2012，41(5)：12-16.
Wu Shuangzhang, Gu Wenbin, Li Xufeng, et al. Study on the orthogonal optimization design of the parameters of linear shaped charge cutting the protective door[J]. Explosive Material, 2012, 41(5): 12-16.

[3] 关焕文，张絮，封文春，等. 聚能爆破切割清理弹射通道技术[J]. 航空学报，2013，34(1)：52-57.
Guan Huanwen, Zhang Xu, Feng Wenchun, et al. Technology of explosive cutting to clear ejection path[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(1): 52-57.

[4] 夏红兵，李磊，马宏昊，等. 多向线性聚能切割弹的研究与应用[J]. 含能材料，2013，21(1)：85-91.
Xia Hongbing, Li Lei, Ma Honghao, et al. Application of the multi-directional linear cumulative cutter[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(1): 85-91.

[5] 李志强，刘晓明，赵勇刚，等. 微爆索线性切割航空有机玻璃的实验研究和有限元分析[J]. 爆炸与冲击，2007，27(5)：385-389.
Li Zhiqiang, Liu Xiaoming, Zhao Yonggang, et al. Experimental study and finite element analysis of linear cutting aerial PMMA using micro detonation cord[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 385-389.

[6] Meryl M, Tom K. Performance analysis of linear shaped charge for aerospace applications[C]// 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, Arizona: AIAA, 2005.

[7] 王志华，李志强，任会兰，等. 有机玻璃的几何形状对爆炸切割影响的研究[J]. 高压物理学报，2010，24(1)：43-48.
Wang Zhihua, Li Zhiqiang, Ren Huilan, et al. Finite element analysis on the influence of PMMA geometry on explosion cutting[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(1): 43-48.

[8] 武双章，顾文彬. 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[J]. 含能材料，2013，21(6)：806-811.
Wu Shuangzhang, Gu Wenbin. Experimental and three-dimensional numerical simulation for influence of end constraint on jet formation of cuneiform cover cutter[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(6): 806-811.

[9] 李成兵，裴明敬，沈兆武. 高速杆式弹丸三维数值模拟[J]. 高压物理学报，2007，21(2)：165-172.

Li Chengbing, Pei Mingjing, Shen Zhaowu. Three-dimensional numerical simulation of the high velocity rod-shaped projectile[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007,21(2):165-172.

[10] 武双章,顾文彬,刘建青,等.椭圆形罩 LSC 侵彻钢锭试验与三维数值模拟[J].含能材料,2014,22(5):600-606.
Wu Shuangzhang, Gu Wenbin, Liu Jianqing, et al. Test and three-dimensional numerical simulation of penetrating steel ingot by linear shaped charge with oval cover[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014,22(5):600-606.

[11] 武双章,顾文彬,李旭锋,等.单角度楔形罩 LSC 对 X 光底片盒影响的试验研究[J].工程爆破,2014,20(4):1-5.
Wu Shuangzhang, Gu Wenbin, Li Xufeng, et al. Experimental study on the effect of linear shaped charge with single angle cuniform cover on X-ray cassette[J]. Engineering Blasting, 2014,20(4):1-5.

Penetration of steel ingot by linear shaped charge with cuniform cove

Wu Shuangzhang, Gu Wenbin, Li Xufeng
(*Field Engineering Institute, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: To obtain the characteristics and the mechanisms behind the penetration of steel ingot by linear shaped charge (LSC) with a cuniform cover, we built a three-dimensional numerical model using ANSYS/LS-DYNA program and performed a numerical simulation study. The actual cutting experiment was conducted on the basis of this numerical simulation and the following results were achieved: For a given standoff, the depth of LSC cutting steel ingot increases at first rapidly along with of time and then this increase gradually slows down; for different standoffs, the depth of LSC cutting steel ingot increases more slowly with the increase of the standoff. The penetration depth changes little at the standoffs ranging from 40 to 60 mm and from 70 to 120 mm, showing an insensitivity to the variation of the standoff. Different shapes of the cutting cross-sections of the steel ingot at different time were obtained under different conditions of the standoff. The results show that the penetration results of numerical simulation were consistent with those of the cutting experiment. Our three-dimensional numerical model can simulate the process of the penetration of the steel ingot by the real cutter. The characteristics and the mechanisms obtained can better reflect the actual cutting process.

Key words: mechanics of explosion; cutting experiment; ANSYS/LS-DYNA program; linear shaped charge; single angle cuniform cover

(责任编辑 丁 峰)