

## 炸高对柔爆索爆炸切割脆性材料的影响研究

杨洋, 赵铮

引用本文:

杨洋, 赵铮. 炸高对柔爆索爆炸切割脆性材料的影响研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(5): 1-4.

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 聚能战斗部柔性分流索环形起爆方法

引用本文: 徐蓬朝, 黄琨, 聂峥, 等. 聚能战斗部柔性分流索环形起爆方法[J]. [兵器装备工程学报](#), 2015, 36(8): 46-50.

#### 2. ZL205A材料在海洋环境中腐蚀开裂的解决措施

引用本文: 钟登宽, 陈文君, 周水峰. ZL205A材料在海洋环境中腐蚀开裂的解决措施[J]. [兵器装备工程学报](#), 2018, 39(11): 164-167.

#### 3. 炸高对炮射导弹破甲威力影响数值仿真

引用本文: 林世聪, 杨军, 李帆. 炸高对炮射导弹破甲威力影响数值仿真[J]. [兵器装备工程学报](#), 2016, 37(4): 12-14,32.

#### 4. 线性聚能切割器销毁大口径弹药的数值模拟

引用本文: 郑军强, 黄寅生, 李龙宝, 等. 线性聚能切割器销毁大口径弹药的数值模拟[J]. [兵器装备工程学报](#), 2015(5): 69-74.

#### 5. 基于Held判据的线型聚能切割器结构优化

引用本文: 曹涛, 陈炜, 金建峰, 等. 基于Held判据的线型聚能切割器结构优化[J]. [兵器装备工程学报](#), 2019, 40(8): 85-89.

# 炸高对柔爆索爆炸切割脆性材料的影响研究

杨洋,赵铮

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094)

**摘要:**采用型号为RBS-R4S的柔爆索,对6 mm厚的ZL114A铝合金平板进行爆炸切割。对5种不同炸高情况下的爆炸切割实验现象进行了分析,基于有限元分析软件ANSYS/LS-DYNA对爆炸切割过程进行了数值模拟,有限元分析结果与实验结果吻合较好。随着炸高的增加,柔爆索的切割能力先增强再减弱,在切割ZL114A铝合金平板时,炸高为切割索装药宽度的0.9倍时为最佳炸高。研究可为柔爆索爆炸切割ZL114A铝合金等脆性材料提供参考。

**关键词:**聚能射流;柔爆索;ZL114A;炸高

**本文引用格式:**杨洋,赵铮.炸高对柔爆索爆炸切割脆性材料的影响研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(05):1-4.

**Citation format:**YANG Yang, ZHAO Zheng. Influence of Burst Height on Cutting of Brittle Materials by Mild Linear Shaped Charge[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(05): 1-4.

**中图分类号:**TJ55

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-2304(2020)05-0001-04

## Influence of Burst Height on Cutting of Brittle Materials by Mild Linear Shaped Charge

YANG Yang, ZHAO Zheng

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The mild linear shaped charge of type RBS-R4S was used to explode and cut the 6mm thick ZL114A aluminum alloy plate. The experiment analyzed the phenomena of the explosion cutting experiment under five different burst heights cases. Based on the finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA, the numerical simulation of the explosion cutting process was carried out. The finite element analysis results are in good agreement with the experimental results. With the increase of the burst height, the cutting ability of the mild linear shaped charge is first enhanced and then weakened. The best burst height for this mild linear shaped charge cutting the ZL114A aluminum alloy plate is when the burst height is 0.9 times the width of the charge. The study can provide a useful reference for the explosive cutting of ZL114A aluminum alloy plate by mild linear shaped charge.

**Key words:** shaped charge jet; mild linear shaped charge; ZL114A; burst height

柔爆索是用来快速而有效切割金属和非金属的一类索类火工品<sup>[1]</sup>。它本质上是一种线性的聚能装药,具有易于弯曲制造各种形状、分离同步性好、重量轻、预分离面密封性好等优点,因此在不同领域的爆炸切割中得到了广泛应用。Mallery等<sup>[2]</sup>、Gonzalez等<sup>[3]</sup>对航天用的线性聚能装药进行了

相关研究。赵波等<sup>[4]</sup>建立了环型切割装置爆炸切割靶板的力学物理模型,并通过试验和仿真研究验证了计算模型的准确性。许多学者对线性聚能装药进行了理论研究。曾新吾等<sup>[5]</sup>较早提出了一端起爆的线型聚能装药射流形成的不定常理论模型,对线性聚能装药进行了理论研究。Rollins R R

**收稿日期:**2019-07-01; **修回日期:**2019-08-20

**基金项目:**国家自然科学基金项目(11302106)

**作者简介:**杨洋(1994—),男,硕士研究生,主要从事发射装置的爆炸切割研究,E-mail:1647434468@qq.com。

**通讯作者:**赵铮(1979—),男,副教授,主要从事爆炸力学研究,E-mail:zhaozheng@126.com。

等<sup>[6]</sup>对聚能装药的参数设计和靶板材料特性进行了研究,以确定它们对侵彻和破坏的影响。Ning J G 等<sup>[7]</sup>提出了一种 MOCL 算法对聚能射流的形成过程进行了数值模拟,得出大锥角聚能射流兼有爆炸成形弹丸和小锥角射流的优点。基于前人的理论研究, Yang L C 等<sup>[8]</sup>利用 TCH 计算机程序,对切割索的传爆进行了定量的评估。Hsiao<sup>[9]</sup>利用有限元方法研究了聚能射流的特性。段卓平等<sup>[10]</sup>设计了 4 种柔性切割索,并通过实验研究了其性能和最佳炸高范围。祝逢春等<sup>[11]</sup>对线性聚能装药侵彻深度进行了分析,给出了理论计算公式。许兵<sup>[12]</sup>、黄寅生等<sup>[13]</sup>都使用线性聚能切割索对硬铝板进行了爆炸切割试验,并得出炸高为 1 mm 是较为理想的。传统理论认为炸高一般为切割器装药宽度的 5~8 倍时为聚能切割器的最佳炸高,而脆性材料由于其特殊的材料特性,最佳炸高会有所不同。但相关的研究中对爆炸切割脆性材料的研究较少,因此,本文根据实际情况,选用 ZL114A 铝合金平板作为切割靶板,主要研究炸高对柔爆索爆炸切割脆性材料的影响。首先采用型号为 RBS-R4S 的柔爆索对 6 mm 靶板进行不同炸高的爆炸切割试验,再结合数值模拟结果与试验结果进行比对分析,最后得到炸高对柔爆索爆炸切割脆性材料的影响规律。

## 1 爆炸切割靶板试验

### 1.1 试验材料及方法

型号为 RBS-R4S 的柔爆索外壳为铅锡合金,药芯装药为起爆威力大,化学稳定性好,并具有较高的爆温和爆炸能量的 RDX<sup>[1]</sup>,其密度 1.717 g/cm<sup>3</sup>,爆速为 7 980 m/s。柔爆索截面如图 1。

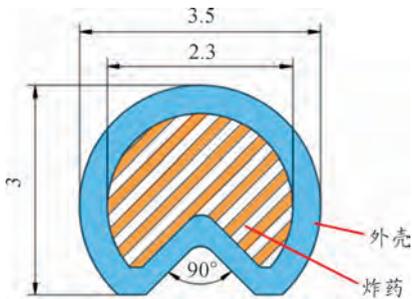


图 1 柔爆索截面

靶板为 ZL114A 铝合金,是一种典型的脆性材料,其凭借其出色的铸造性能、力学性能和加工性能被广泛应用于军工、民用等领域,常用于制造飞行器、导弹上承受高负荷的零部件以及汽车上的高性能结构件等<sup>[14]</sup>。ZL114A 铝合金具有一定的力学性能要求,试验中使用的靶板测定的抗拉强度为 325 MPa,伸长率为 5%,布氏硬度为 103。

爆炸切割试验在平板工装上进行,工装放置在地面上,平板两边夹持在工装上,切割索位于平板中间,雷管位于切割索一端。切割索与平板之间的距离(炸高)通过发泡双面胶实现,炸高用游标卡尺测量。选择 0 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 5.5 mm 五种炸高对靶板厚度为 6 mm 的靶板进行爆

炸切割,试验装置如图 2 所示。

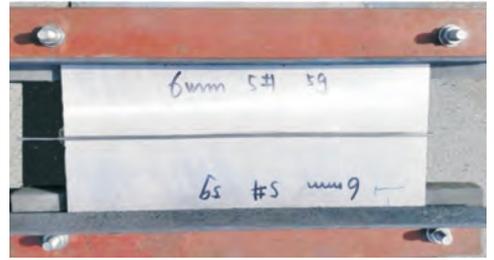


图 2 切割索切割靶板的试验装置

### 1.2 试验结果及分析

切割试验后靶板如图 3,其中炸高为 5.5 mm 时射流侵彻一定深度后,靶板没能切开,炸高为 0 mm、1 mm、2 mm 和 4 mm 都成功切开,从实验现象可以看出,炸高较低时,随着炸高的增加,切缝越来越规则,切口凸起部分逐渐减少,断面平整度越来越好;当炸高增加到 4 mm 以上时,切口凸起部分增多,平整度下降。



(a) 0 mm 炸高 (b) 1 mm 炸高



(c) 2 mm 炸高 (d) 4 mm 炸高 (e) 5.5 mm 炸高

图 3 切割试验后的靶板

靶板的切口形貌如图 4、图 5 所示,其中  $h$  表示炸高, I 表示切割索对靶板上表面的冲刷区域, II 为射流侵彻区域, III 拉伸断裂区域。

从图 4 和图 5 的切口形貌可以看出,切割索射流侵彻端面比较整齐,射流侵彻结束后,切口下方发生动态拉伸断裂,形成凹凸不平的断面。由此可见,由于靶板是脆性材料,对切口有较高敏感性,高速射流在靶板上切开一定深度的切槽后,在冲击波的作用下,达到脆性材料的动态破坏强度<sup>[15]</sup>,然后沿着切槽处断裂。另外,切割索爆炸时在切缝垂直方向上对靶板的上表面有一定的冲刷作用,靶板在切割位置的上表面更加毛糙。试验结果如表 1 所示,从表 1 可以看出,炸高过低,由于射流未充分拉伸使得侵彻能力不足,侵彻深度未达到最大;炸高过高,切割索的侵彻能力有所降低,这是因为射流产生了摆动,能量不集中,侵彻能力减小。因此选择 2 mm 炸高为此聚能切割索的最佳炸高。

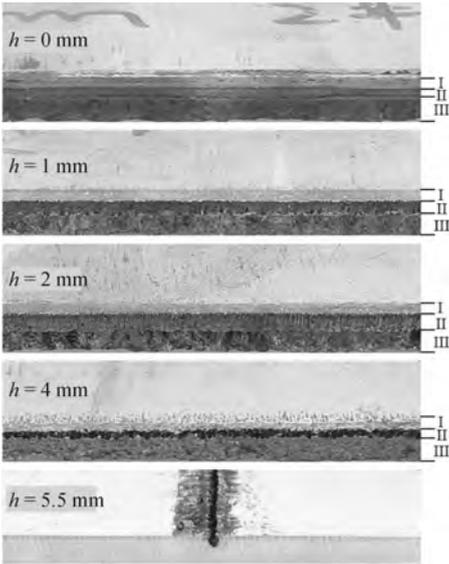


图4 靶板的切口形貌

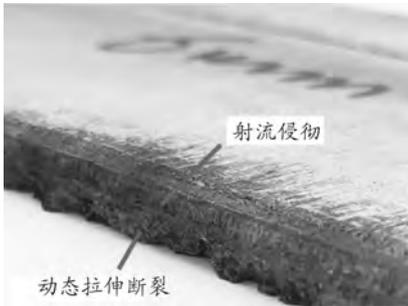


图5 0 mm炸高时切口形貌

表1 爆炸切割试验结果

序号	靶板厚/ mm	炸高/ mm	平均射流 深度/mm	射流侵入作 用占比/%	拉伸断裂作 用占比/%
1	6	0	2.6	43.3	56.7
2	6	1	2.9	48.3	51.7
3	6	2	3.2	53.3	46.7
4	6	4	1.7	28.3	71.7
5	6	5.5	1.7	28.3	0

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型

有限元模型如图6所示,模型尺寸与实际尺寸一致,建模过程中均采用 cm-g- $\mu$ s 单位制。由于该模型是线性且对称结构,所以采用单层实体建立 1/2 模型,在对称面上施加对称约束,靶板端面施加全自由度约束,以模拟工装对靶板的约束作用。全部模型均采用六面体映射网格进行划分,并且加密了靶板被切割部分的网格,其他部分网格稀疏。



图6 有限元模型

### 2.2 材料模型

炸药为 RDX,其密度为  $1.717 \text{ g/cm}^3$ ,爆速为  $7980 \text{ m/s}$ ,采用 JWL 状态方程对炸药爆炸过程进行描述,其表达式为<sup>[16]</sup>:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega P_c e}{V} \quad (1)$$

其中:  $P$  为爆轰产物的压力;  $V$  为爆轰产物的相对比容;  $e$  为爆轰产物的比内能;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为常数。

其材料关键字为高能炸药关键字 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 和 JWL 状态方程关键字 \* EOS\_JWL;起爆点数量对切割效果有所影响<sup>[17]</sup>,本文设置 1 个起爆点,为顶点起爆。切割索外壳和靶板均采用 \* MAT\_ELASTIC 关键字,外壳密度为  $11.35 \text{ g/cm}^3$ ,杨氏模量为  $1.7 \text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.42$ ,靶板的密度为  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,杨氏模量为  $70 \text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.35$ 。靶板通过添加失效关键字 \* MAT\_ADD\_EROSION 来控制单元的失效。

### 2.3 仿真结果和分析

采用流固耦合的方法对型号为 RBS - R4S 的柔爆索爆炸切割 ZL114A 平板过程进行了有限元数值模拟。切割靶板的过程如图7所示,其中时刻  $t$  的单位为  $\mu$ s。

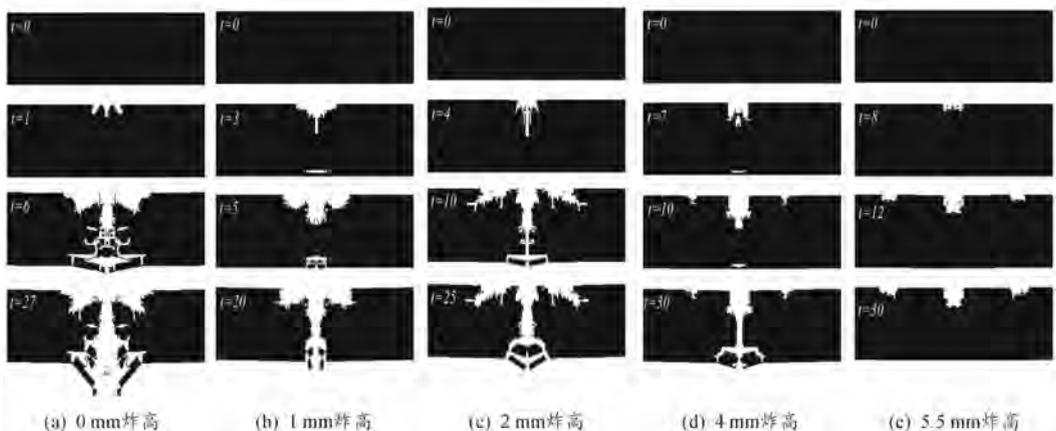


图7 有限元数值模拟过程

从图7可以看出,5.5 mm 炸高的靶板未能切开;在其他切透靶板的过程中,可以看到聚能射流会先对靶板上表面有不同程度的冲刷作用,炸高越大,冲刷作用越小。随后射流侵入一定深度,并且随着炸高的增加,侵入深度先增加后减少,然后在冲击波的作用下,靶板的背部逐渐出现动态拉伸断裂现象,并发生脆性断裂,4 mm 炸高时冲击波作用占整个切割部分的70%~80%,这与试验结果是基本一致的。同时,2 mm 炸高情况下的侵入深度最深,靶板背部发生断裂后形成的切割效果更佳。通过后处理,选取靶板中心位置上表面的单元得到不同炸高下单元的压力载荷,如图8所示,其中 $h$ 表示炸高,单位为mm。从图中可以看出,随着炸高的增加,靶板上表面的压力峰值为先增加后减少,2 mm 炸高时载荷最大,最有利于切割靶板。由此可得出最佳炸高约为切割索装药宽度的0.9倍。

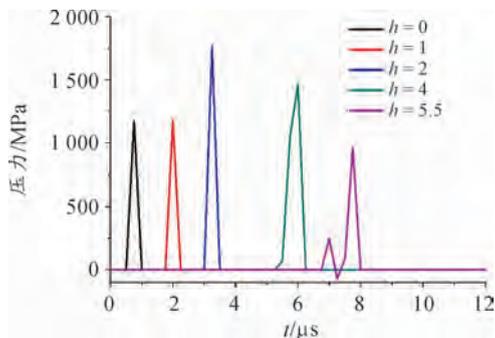


图8 靶板上表面的压力时间曲线

### 3 结论

1) 柔爆索爆炸切割 ZL114A 铝合金平板时,最佳炸高约为切割索装药宽度的0.9倍。

2) ZL114A 的爆炸切割是射流侵入和动态拉伸断裂共同作用的结果,并且随着炸高的增加,柔爆索的切割能力先增强再减弱。

3) 在炸高不大于4 mm 时,RBS-R4S 柔爆索能够可靠切开6 mm 厚的 ZL114A 铝合金平板。

### 参考文献:

[1] 黄寅生,康聪成,薛爱莲,等. 简易柔性切割索的制作及爆炸切割金属板试验[C]//中国民用爆破器材学会第六届年会论文集. 中国民用爆破器材学会,呼和浩特:2004.

[2] MALLERY M, KOZLOWSKI T. Performance Analysis of Linear Shaped Charge for Aerospace Applications [C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA:2005.

[3] GONZALEZ D, GEBHARD T, STAPF S. Space Shuttle SRB Aft End Orientation Biases After Linear Shape Charge Activation [C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA:2007.

[4] 赵波,詹发民,王涛. 磁性爆破切割装置研究[J]. 兵器装备工程学报,2015,36(02):18-20.

[5] 曾新吾,薛鸿陆. 线型聚能装药的理论研究[J]. 爆炸与冲击,1988(02):97-105.

[6] ROLLINS R R, CLARK G B, KALIA H N. Penetration in granite by jets from shaped-charge liners of six materials [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1973,10(3):183-200.

[7] NING J G, WANG C, MA T B. Numerical Analysis of the Shaped Charged Jet with Large Cone Angle [J]. International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation, 2006,7(1):71-78.

[8] YANG L C, H. DO I P. Titan IVB Linear-Shaped Charge Assembly Explosive Train Transfer Reliability [J]. AIAA Journal,2001,41(7):1304-1313.

[9] HSHAO R C. Analysis of Linear Shaped Charge Igniting Rapid Deflagration Cord using Explicit Dynamics Method [C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA:2015.

[10] 段卓平,恽寿榕,洪兵,等. 耐高温柔性切割索的实验研究[J]. 兵工学报,1995(04):57-60.

[11] 祝逢春,邓振礼,胡瑜. 线性聚能切割器的设计计算[J]. 火工品,2000(01):20-23.

[12] 许兵. 线型切割索侵入硬铝板的实验研究及数值模拟仿真[D]. 南京:南京理工大学,2003.

[13] 黄寅生,康聪成,薛爱莲,等. 柔爆索爆炸切割工业硬铝板试验[J]. 煤矿爆破,2003(01):10-12.

[14] 张继敏. ZL114A 合金热变形及热处理特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.

[15] 严成,欧卓成,段卓平,等. 脆性材料动态强度应变率效应[J]. 爆炸与冲击,2011(04):423-427.

[16] HAMASHIMA H, KATO Y, ITOH S. Determination of JWJL Parameters for Non-Ideal Explosive [J]. AIP Conference Proceedings,2004,706(1):331-334.

[17] 李松楠,张国伟,崔小杰,等. 起爆点位置对破片飞散方向的影响研究[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(11):49-53.

科学编辑 范志锋 博士(武昌工学院副教授)  
责任编辑 周江川