

文章编号:1006-9941(2024)01-0092-10

## 边界约束及分离面宽度对铅切割索分离性能的影响

先明春<sup>1,2</sup>,张月萍<sup>2</sup>,李柠芮<sup>2</sup>,尹鑫<sup>2</sup>,王友<sup>2</sup>,索奇<sup>2</sup>,刘名兴<sup>2</sup>,成琦<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州 646004)

**摘要:** 为研究舱体边界约束及分离面宽度对铅切割索分离性能的影响,采用数值模拟的方法,对铅切割索爆炸后射流分离靶板的影响因素进行分析,得到了自由边界约束、固定边界约束和分离面削弱槽宽度对铅切割索分离性能的影响规律。结果表明,铅切割索分离铸铝等脆性材料是切割索射流侵彻和高压爆轰产物共同作用结果,边界约束对射流侵彻的影响较小,固定边界约束和自由边界约束对相同切割索射流侵彻深度的偏差小于5%;不同的边界约束对靶板的崩裂过程影响较大,固定边界约束会在切割索分离时限制材料的形变位移,进而限制高压爆轰产物对铸铝等脆性材料的崩裂作用,导致后续分离难度加大。增加分离界面削弱槽宽度,可有效降低分离装置边界约束对切割索分离性能的影响,提高切割索的分离可靠性,当削弱槽宽度 $\geq 12$  mm时,  $2.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$  铅切割索能够可靠分离 4.5 mm 厚的 ZL114A 材料。

**关键词:** 线性分离; 铅切割索; 边界约束; 分离面宽度; 数值分析

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2022266

## 0 引言

分离装置是航天型号中的关键产品,其分离可靠性直接影响发射成败。火工分离是航天型号中最常用的一种高效分离方式,分为点式爆炸分离和线式爆炸分离,其中,切割索类线性分离装置由于承载能力强、分离可靠性高,在弹/箭的级间分离、排焰窗口分离、助推分离等环节应用广泛<sup>[1-4]</sup>。

切割索由外部壳体和内部装药组成,工作时内部装药形成爆轰并推动外壳的V型槽向轴线运动形成高速聚能射流,切割分离结构材料,实现线性分离功能<sup>[5-7]</sup>。国外研究人员通过开展V型装药的数值模拟和理论建模研究,分析了影响成型装药威力的敏感参数<sup>[8-10]</sup>。美国 Sandia Nation 实验室<sup>[11-12]</sup>通过大量实验,得到了药型罩材料、壁厚、锥角等结构参数对侵彻能力的影响,研究发现不同的起爆方式对聚能切割的

性能也会产生影响<sup>[13-15]</sup>。J. B. Chase等<sup>[16]</sup>利用光学测量和X照片测量结合的方式,测量了线型聚能装药射流刀的形成过程。国内研究人员通过仿真及实验研究发现,切割索对不同材料靶板的切割分离能力存在明显差异<sup>[17-19]</sup>。部分研究人员结合数值模拟及实验方法,发现炸高的差异直接对切割索分离性能产生影响<sup>[20-21]</sup>。陈智刚等<sup>[22]</sup>通过建立数学模型对聚能装药金属射流形成的主要机理和射流破坏准则进行研究。石艺娜等<sup>[23]</sup>基于哈密顿原理,推导和建立了描述金属射流拉伸失稳的运动方程,该方程耦合了射流强度、剪切、应变率效应、动力学粘性、表面张力、气动阻力和惯性力等多种因素对射流稳定性的影响。此外,已有研究表明,通过研究切割索对不同力学性能的镁合金试板进行切割试验,发现材料的断裂伸长率、抗拉强度、硬度等力学性能的增强都会影响侵彻深度和分离性能<sup>[24-26]</sup>。

在工程应用中需要的具体设计参数,如舱体分离面的边界状态对切割分离的影响,在国内外文献中鲜有报道。在工程应用中发现,改变分离面边界状态,会影响分离对象的受力状态,从而导致分离对象的剪切应变、拉伸应变产生变化,影响最终分离结果<sup>[27]</sup>。因此,有必要探究边界约束及分离面宽度切割索分离性

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-03-14

网络出版日期: 2023-11-06

作者简介: 先明春(1982-),男,研究员,主要从事航天火工技术研究。e-mail: 85742506@qq.com

通信联系人: 成琦(1971-),男,研究员,主要从事航天火工技术研究。e-mail: 742626709@qq.com

引用本文: 先明春,张月萍,李柠芮,等. 边界约束及分离面宽度对铅切割索分离性能的影响[J]. 含能材料, 2024, 32(1):92-101.

XIAN Ming-chun, ZHANG Yue-ping, LI Ning-rui, et al. Effect of Boundary Constraints and Separation Surface Width on Separation Performance of Lead Linear Shaped Charge[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(1):92-101.

能影响规律,进而完善设计方法,提高分离可靠性。

本研究以  $2.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$  铅切割索分离  $4.5 \text{ mm}$  铸铝类材料 ZL114A 为研究对象,采用数值模拟的方法分析边界约束及分离面宽度对铅切割索分离性能的影响规律,研究结果可以提升铅切割索的分离可靠性,为结构设计提供依据。

## 1 模拟方法

### 1.1 模型的建立

切割索分离靶板试验装置如图 1 所示,包含了切割索、靶板、削弱槽以及左右的边界约束。本研究中的切割索均为  $2.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$  的铅切割索,靶板采用铸铝 ZL114A,削弱槽处的靶板厚度为  $4.5 \text{ mm}$ 。根据左右边界约束的强度大小,边界约束分为固定边界和自由边界。固定边界是指在切割索分离时,限制了分离对象向两侧的挤压运动;自由边界是指在切割索分离时,允许分离对象材料受挤压向两侧的运动。

铅切割索截面结构如图 2 所示,铅切割索由金属药型罩包覆黑索今炸药组成。黑索今炸药被引爆后,产生的爆轰产物高压作用于金属药型罩,金属药型罩内壁的金属形成高速的金属射流,瞬间切割靶板。当靶板厚度过厚,射流的侵彻能力不足以将靶板完全侵彻时,后续炸药爆炸产生的高压爆轰产物会作用在靶板剩余材料上,实现崩裂分离。

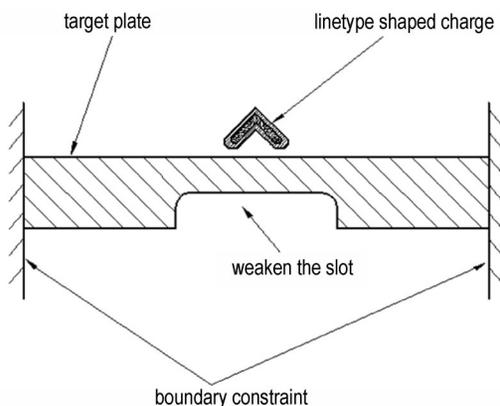


图 1 切割索分离靶板示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cutting cable separating target plate

表 1 炸药材料及状态方程参数<sup>[38]</sup>

Table 1 Explosive materials and state equation parameters<sup>[38]</sup>

material	$D / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	C-J energy / $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	C-J pressrue / $\text{kPa}$
RDX	7450	625	23.29	5.25	1.6	0.28	1.66	$8.56 \times 10^6$	$2.2 \times 10^7$

Note:  $D$  is Detonation velocity.  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  are material constants.  $\rho$  is density. C-J Energy is detonation energy. C-J Pressrue is detonation pressrue. C-J Energy is detonation energy.

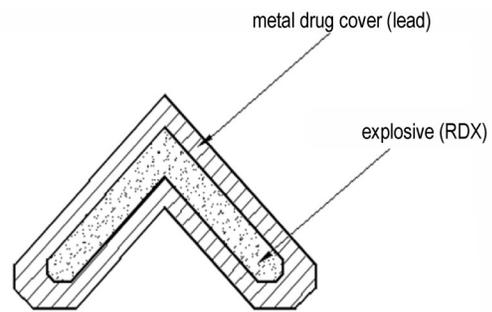


图 2 铅切割索截面结构图

Fig. 2 Section structure diagram of lead cut cable

基于上述切割索分离靶板的结构示意图及切割索的工作原理,为分析靶板边界约束及分离面宽度对铅切割索分离性能的影响,在 ANSYS/Autodyn 上建立模型并进行数值计算,铅切割索分离靶板的工作过程主要涉及炸药、金属药型罩与靶板 3 个部分<sup>[28-29]</sup>。在 ANSYS/Autodyn 上采用 Lagrange 法(描述靶板)和 Euler 法(描述炸药和金属药型罩)相结合的方式计算。切割索内装炸药、金属药型罩均定义为流体,采用 Euler、2D Multi-material 法,该法能很好模拟多物质相互作用的大变形运动,方便模拟炸药膨胀及金属射流的形成;靶板采用 Lagrange 法,该法能更好地描述介质界面,模拟目标靶板被侵蚀的过程<sup>[30-32]</sup>。

内装炸药材料为黑索今,采用 JWL 状态方程<sup>[33]</sup>描述,状态方程如式(1)所示:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中, $p$ 为爆轰压力,MPa; $E$ 是单位体积内能, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $V$ 是相对比容; $\omega$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 为材料常数,炸药材料模型参数如表 1 所示。考虑切割索产生的金属射流为高温、高速流体,作用在靶板上需要考虑侵蚀效应,采用 Shock 状态方程<sup>[34]</sup>、Steinberg Guina 强化模型<sup>[35-36]</sup>、Hydro 失效模型<sup>[37]</sup>、Geometric Strain 侵蚀模型<sup>[37]</sup>描述。金属药型罩材料为铅,靶板材料为 ZL114A,材料参数如表 2 所示。

为了对仿真模型进行简化处理,如图 3a 所示,在靶板上切割位置的上方设置 5 处(point 1<sup>#</sup>、point 2<sup>#</sup>、point 3<sup>#</sup>、point 4<sup>#</sup>、point 5<sup>#</sup>)观测点(由于模型为轴对

表2 金属材料及状态方程参数<sup>[29]</sup>Table 2 Metal materials and state equation parameters<sup>[29]</sup>

materials	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$G / \text{GPa}$	$\sigma_b / \text{MPa}$	$\sigma_s / \text{MPa}$	HC	HE	$k$	$C_1$	$S_1$	$C_2$	$S_2$
LEAD	11.34	8.6	12	24	110	0.52	2.74	2006	1.429	0	0
ZL114A	2.7	27.6	228	315	125	0.1	1.97	5240	1.4	0	0

Note:  $\rho$  is density.  $G$  is shear modulus.  $\sigma_b$  is yield strength.  $\sigma_s$  is tensile strength. HC, HE,  $k$ ,  $C_1$ ,  $S_1$ ,  $C_2$ ,  $S_2$  are material constants.

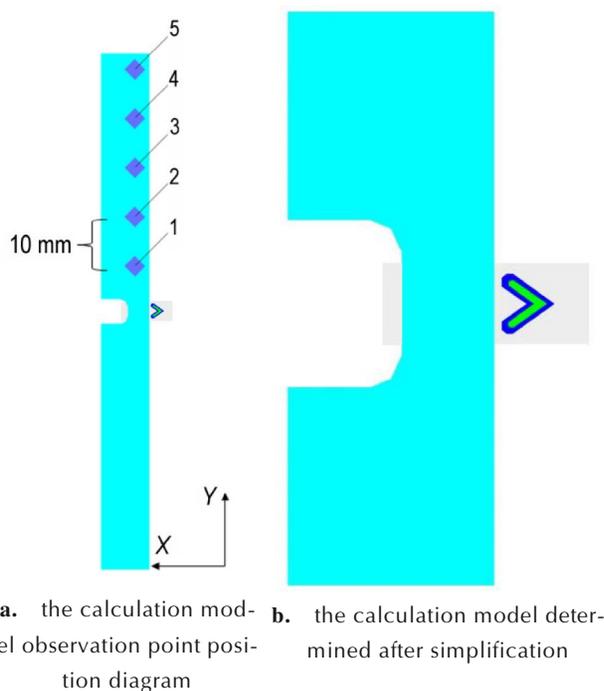
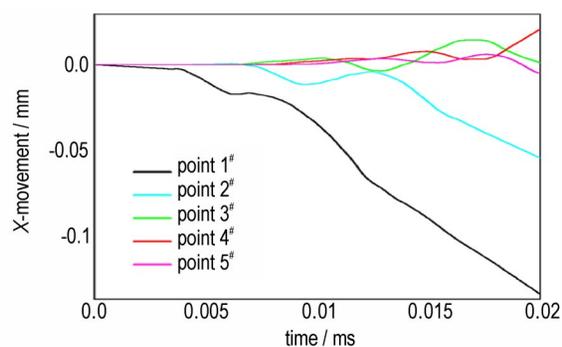


图3 原始模型及简化后计算模型示意图

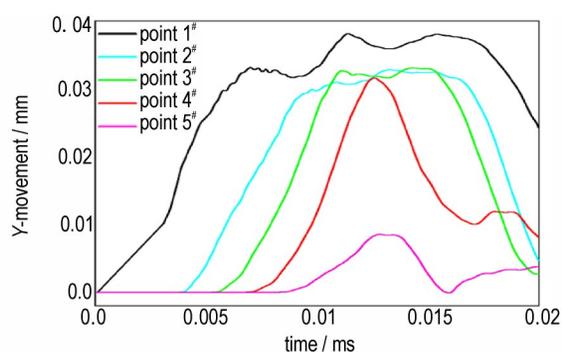
Fig.3 Schematic diagram of the original model and simplified model

称,故仅在切割位置上方设置5处观测点即可),从切割索中心位置向上,观测点的间距为10 mm。定义切割索射流方向为X向,与射流方向垂直的方向为Y向。通过仿真计算结果,分析各观测点处材料在X、Y方向上的形变位移量,从而略去位移量较小区域,简化模型,减小计算量。

材料X向、Y向的形变位移曲线如图4所示。从图4a中可知,观测点1在X方向最大形变位移远大于其他观测点,0.02 ms时最大位移为0.152 mm。观测点2在X方向最大形变位移为0.053 mm,约为观测点1形变位移量的1/3。当距离切割位置上、下超过20 mm处,即观测点3,4,5处材料在X方向的形变位移骤降,均 $\leq 0.01$  mm,表明材料基本未产生位移。从图4b中可知,在同一边界条件下,除距离切割位置过远的观测点5外,不同观测点在材料Y方向上的形变差异较小,各观测点在Y方向的最大形变均小于0.04 mm。



a. curve of material deformation in X direction



b. curve of material deformation in Y direction

图4 各观测点处材料形变位移曲线

Fig.4 Material deformation displacement curves at each observation point

上述仿真计算结果表明,在偏离切割位置10 mm内,分离对象的结构对切割索的分离性能影响较大,在偏离切割位置20 mm以外,基本无影响。故为了简化模型、节约计算资源,截取距离切割位置10 mm和20 mm的中间值15 mm(总长30 mm),作为仿真模型中靶板的长度范围。简化后确定的计算模型如图3b所示。

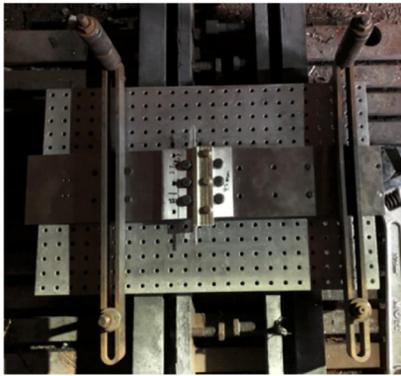
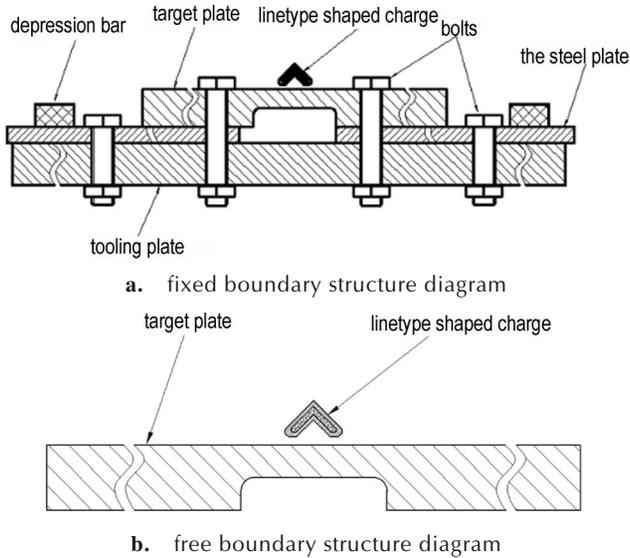
## 1.2 模型的验证

### 1.2.1 试验方法

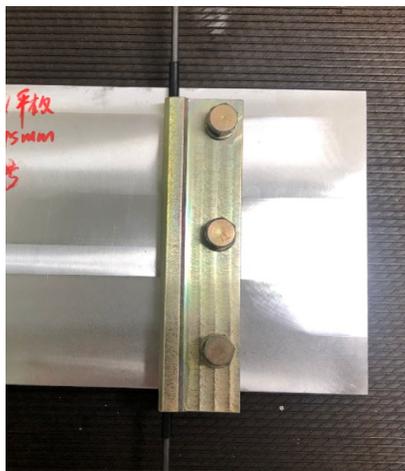
#### 1.2.1.1 边界约束影响试验方法

采用靶板试验分析验证边界约束对切割索分离性能的影响。固定边界条件下,先通过螺钉将靶板试验件紧固在钢板上,然后再用螺钉将钢板紧固在工装大板上,最后将整个工装大板用2根压条固定在发火工

装上,完全限制试验件的位移;自由边界约束条件下,直接将靶板试验件放置在工装上进行发火,试验件可以自由位移。不同边界约束下靶板试验结构示意图及试验实物图见图5。



c. fixed boundary physical diagram



d. free boundary physical diagram

图5 不同边界约束下靶板示意图

Fig. 5 Schematic diagram of target plate with different boundary constraints

### 1.2.1.2 分离面结构影响试验方法

采用分离环试验件分析验证分离面削弱槽宽度对切割索分离性能的影响,对2种不同削弱槽宽度(5, 12 mm)的分离环试验件开展试验验证,其对应的试验件分别为1#、2#,其余状态完全一致。2种试验件削弱槽位置实物图见图6。

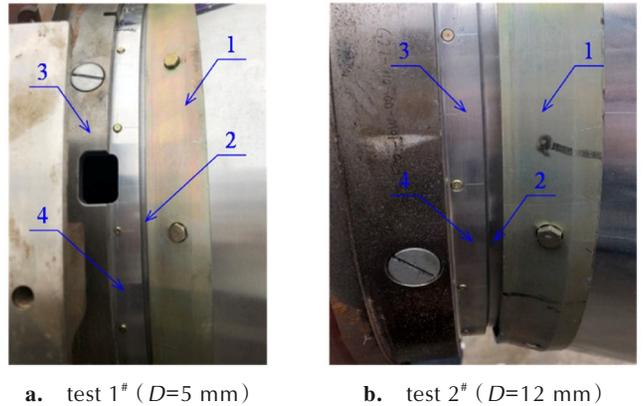


图6 2种试验件削弱槽位置实物图

1—金属包带,2—削弱槽,3—助推器,4—分离环

Fig.6 Physical diagram of two kinds of test pieces weakening slot position

1—metal straps, 2—weaken the slot, 3—the booster, 4—separation ring

### 1.2.2 计算模型有效性验证

典型铅切割索分离ZL114A材料的数值计算过程如图7所示,图7a~7c为金属射流的侵彻过程,图7d~7f为靶板崩裂过程。结合图8射流头部的平均速度曲线可以看出,时间大于0.012 ms后,射流头部平均速度已经趋于 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,射流切割作用消失,分离作用主要表现为爆轰对材料的崩裂过程。

#### 1.2.2.1 约束边界影响计算模型有效性验证

按照1.1节中的计算模型进行不同边界条件下切割索分离ZL114A靶板的数值计算,计算结果如图9所示。计算结果表明,在固定边界约束下,切割索未能成功分离靶板,射流侵彻深度约2.70 mm;自由边界约束下,靶板正常分离,切割索能正常分离靶板,射流侵彻深度约2.65 mm。2种约束边界条件下切割索的射流侵彻深度相差仅0.05 mm,偏差小于5%,表明约束边界对射流侵彻深度的影响较小。

按照1.2.1.1条方法开展试验验证,图10给出了不同边界约束下的试验件分离结果,固定边界约束下,发火后靶板未分离,侵彻深度为2.62 mm;自由边界约束下,靶板正常分离,侵彻深度为2.54 mm。

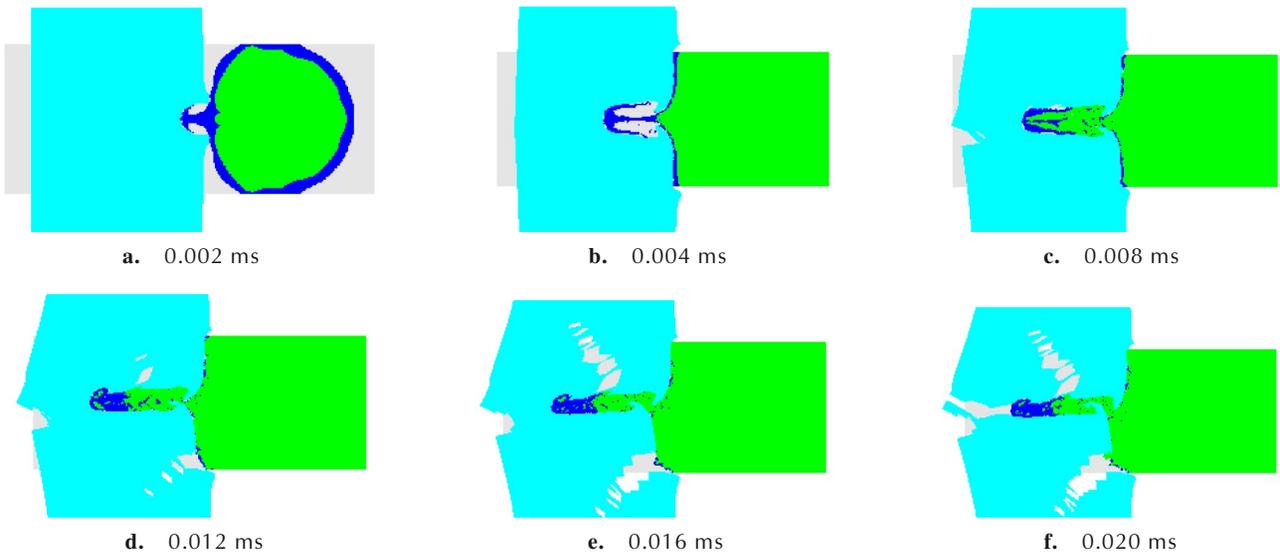


图7 铅切割索分离ZL114A材料计算过程

Fig.7 Calculation process of ZL114A material separation by lead cutting cable

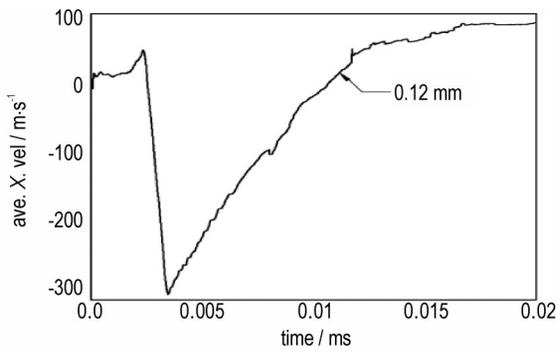
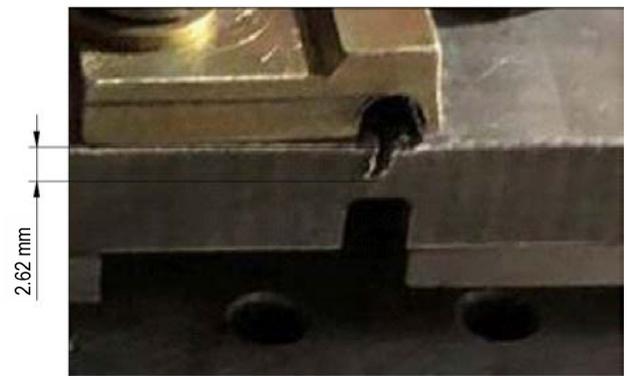
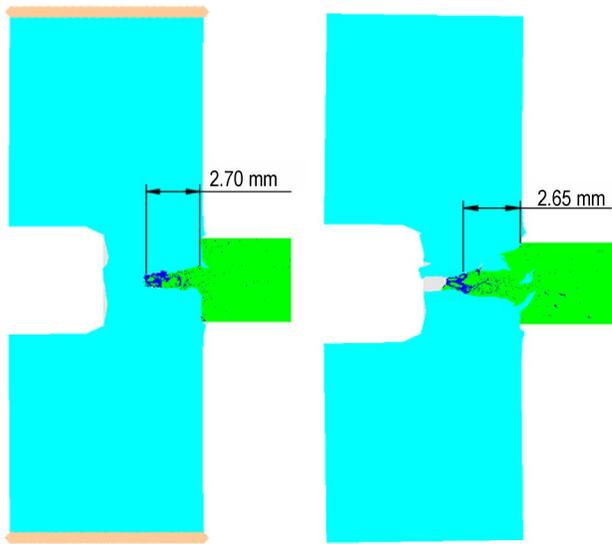


图8 射流头部平均速度曲线

Fig.8 Average velocity curve of jet head



a. fixed boundary test result

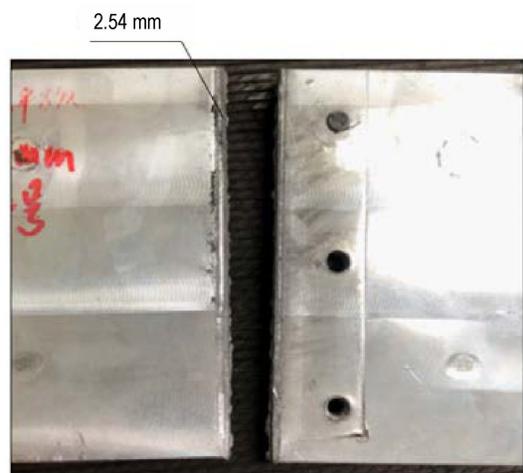


a. fixed boundary

b. free boundary

图9 不同约束边界下的仿真结果

Fig.9 Simulation results under different constraint boundaries



b. free boundary test result

图10 不同边界约束下试验件分离结果

Fig.10 Separation results of test pieces under different boundary constraints

1.2.2.2 约束边界影响计算模型有效性验证

按照 1.1 节中的计算模型进行削弱槽宽度分别为 5 mm 和 12 mm 两种情况下切割索分离 ZL114A 靶板的数值计算, 计算结果如图 11 所示。计算结果表明, 削弱槽宽度为 5 mm 时, 切割索未分离靶板, 侵彻深度 2.70 mm; 削弱槽宽度为 12 mm 时, 切割索正常分离靶板, 侵彻深度 2.61 mm。

图 12 给出了 2 种削弱槽宽度下的试验件分离结果。发火后, 试验件 1# 的尾舱靶板未被分离, 将试验件

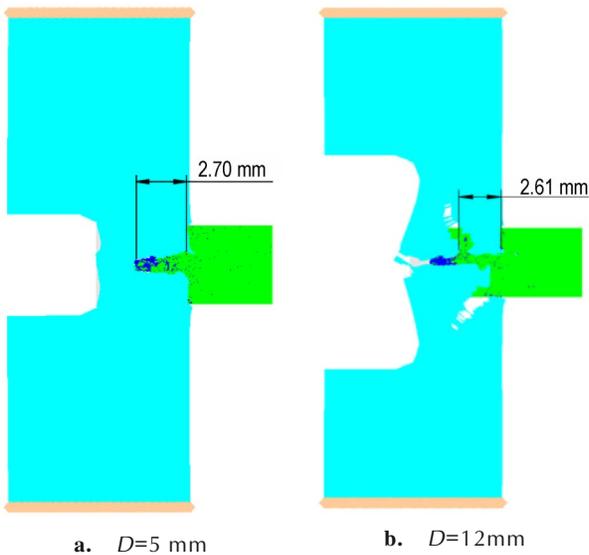


图 11 2 种削弱槽宽度下的仿真结果  
Fig.11 Schematic diagram of simulation results for different weakening slot widths



a. test 1# (D=5 mm)



b. test 2# (D=12 mm)

图 12 2 种削弱槽宽度下试验分离结果  
Fig.12 Physical diagram of test result under two kinds of weakening slot widths

分解检查后发现, 舱段预分离位置内侧出现一圈金属射流切痕。试验件 2# 削弱槽宽度为 12 mm 的分离环被成功分离, 金属射流的侵彻深度约为 2.48 mm。

1.2.2.3 小结

对比 1.2.2.1 和 1.2.2.2 节中仿真计算结果和试验结果可知, 边界约束影响和分离面结构影响的仿真计算结果与铅切割索对 ZL114A 类脆性材料的分离特性具有较好的一致性, 仿真和试验侵彻深度误差不大于 5%, 验证了计算模型的正确性。同时从试验和仿真计算结果均表明, 铅切割索对铸铝类脆性材料的分离主要是通过射流对靶板的侵彻以及高压爆轰产物对材料崩裂共同作用的结果。

2 结果与讨论

2.1 边界约束对切割索分离性能的影响

从图 9 可以看出, 固定约束边界条件下, 切割索未能成功分离靶板; 自由约束边界条件下, 切割索能正常分离靶板。2 种约束边界条件下切割索的射流侵彻深度相近, 表明约束边界对射流侵彻深度的影响较小。采用图 3b 所示的简化仿真模型, 如图 13 所示, 在模型上设置 2 处观测点(分别距离切割位置上方 2 mm 和 10 mm)对固定边界约束和自由边界约束下, 切割索分离靶板的情况分别进行模拟, 研究边界约束对切割索分离性能的影响, 得到不同边界约束条件下观测点的运动情况。

由于上述边界约束主要对靶板的 Y 向上, 进一步分析切割索工作后, 观测点在 Y 方向上材料的变形情况。由图 14 可知, 固定边界约束时, 观测点 Y 向的最

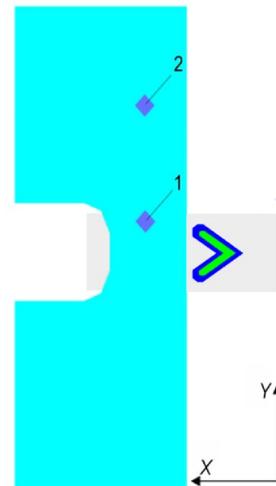


图 13 观测点位置示意图  
Fig.13 Schematic diagram of observation point position

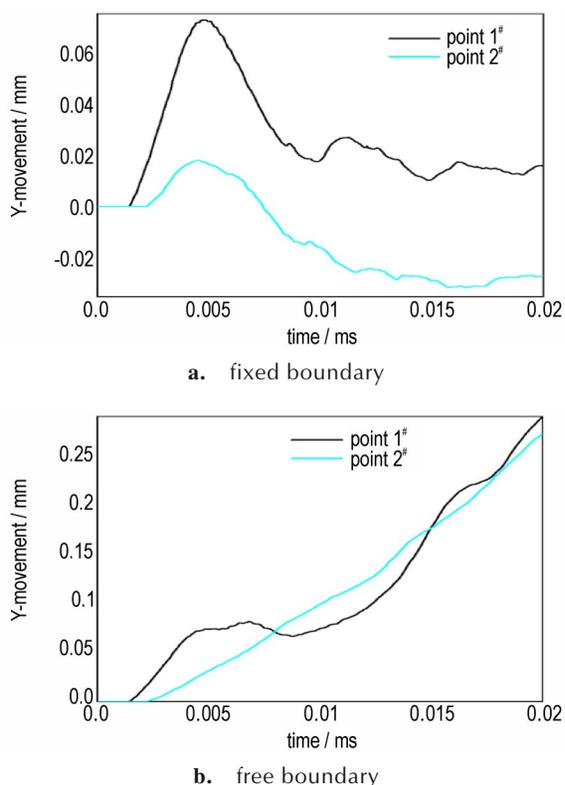


图14 观测点处材料Y向的形变位移曲线

Fig.14 Deformation displacement curve of material in Y direction at the observation point

大位移为0.063 mm;自由边界约束时,观测点处材料Y向的最大位移为0.296 mm,且随着时间的推进位移不断增大。在相同位置,自由边界约束时的材料Y向最大变形量可达固定边界约束时的4.7倍。由此可知,当固定Y向边界条件时,不允许网格产生较大的位移和变形,限制了材料的形变,进而影响了后续高压爆轰产物对靶板的崩裂作用,导致分离难度加大。而自由边界条件下,靶板可以向两侧移动,给予了靶板崩裂的空间,使得靶板更容易分离。

在实际工程应用中由于1:1舱段分离成本较高,研制过程中一般采用平板试验件进行模拟验证,在进行靶板试验时通常采用虎钳双边加持、靶板螺钉简易固定等措施来限制靶板位移,这类措施在爆轰作用时不能完全限制靶板移动,属于弱边界约束。而实际运载火箭的整舱结构中,靶板结构被有效限制在舱段上,属于强固定约束边界条件。因此,在采用靶板进行地面研制验证时,应该充分考虑边界约束的影响,加强边界约束,避免因边界约束条件产生的靶板和舱段的差异,导致产品失效或可靠性不足。

## 2.2 分离界面宽度对切割索分离性能的影响

同样采用图3b所示的简化后仿真模型进行分析,如图13所示,在模型上设置2处观测点(分别位于距离切割位置上方2 mm和10 mm处)。在固定边界约束和自由边界约束下,得出了距离切割位置上方2 mm和10 mm观测点处的压力曲线图。根据图15可知,无论自由边界还是固定边界,切割索工作时,距离切割位置上方10 mm观测点处的压力较小,最大压力均不超过200 MPa;而在距离切割位置上方2 mm观测点处,自由边界条件下的最大压力为485 MPa,固定边界条件下的最大压力均达到了520 MPa。因此在固定边界约束时,通过设置4种不同的分离面削弱槽宽度( $D=5, 8, 10, 12$  mm),观察削弱槽宽度对切割索分离能力的影响情况(分离面削弱槽宽度不超过距离切割位置上方10 mm)。

研究不同分离面削弱槽宽度,得到了4种削弱槽宽度( $D=5, 8, 10, 12$  mm)下的仿真结果,见图16。可以看出,4种宽度下,射流侵彻深度基本一致。当 $D=5$  mm时,靶板未分离;当 $D=8$  mm时,靶板未分离,分离位置背部出现小裂纹;当 $D=10$  mm时,分离

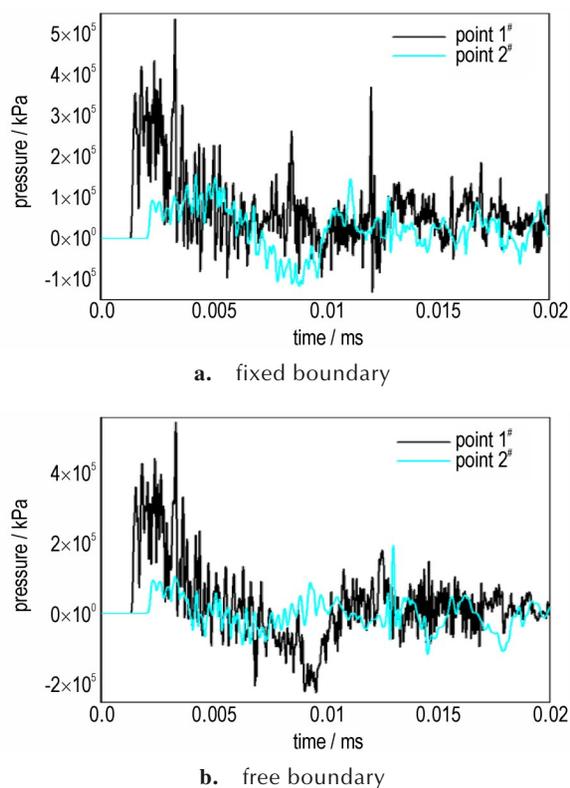


图15 不同约束边界下的仿真压力曲线

Fig.15 Simulation pressure curves under different boundary constraints

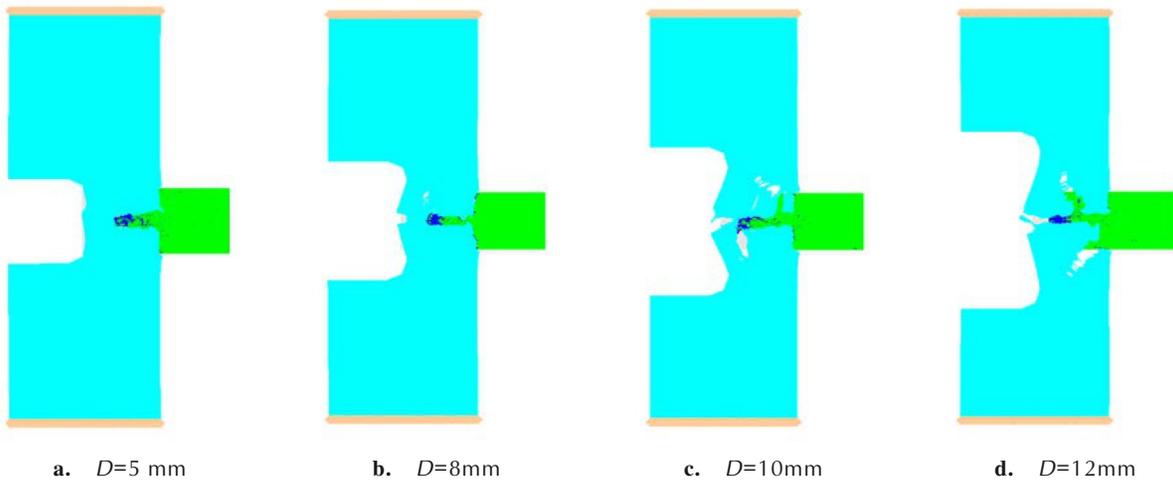


图 16 不同削弱槽宽度的仿真结果图

Fig.16 Schematic diagram of simulation results for different weakening slot widths

位置背部出现裂纹,削弱槽位置被高压爆轰产物崩裂出现大裂缝,处于分离与未分离的临界面;当  $D=12\text{ mm}$  时,靶板成功分离。由此可知,削弱槽宽度变化会直接影响到切割索的分离性能,在固定边界约束条件下,削弱槽宽度越宽,越有利于铅切割索对铸铝材料的分离。

为进一步分析分离界面除削弱槽附近结构外,其余结构是否会对分离性能产生影响,建立了火箭某分离环仿真模型,模型包含了切割分离舱分离段壳体及金属包带,分离段壳体材料为 ZL114A,分离位置削弱槽厚度为  $4.5\text{ mm}$ ,削弱槽宽度为  $12\text{ mm}$ ,实际分离对象的结构图如图 17 所示。

从仿真分析结果可知,  $2.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$  切铅割索能够对削弱槽宽度为  $12\text{ mm}$  的分离环进行分离,侵彻深度约  $2.5\text{ mm}$ 。分离环仿真结果云图如图 18 所示,从图 18 可知,分离界面材料的应变集中在分离界面削弱槽附近,由此可知,在整环约束条件下,切割索分离时受分离界面非削弱槽部位的影响较小。

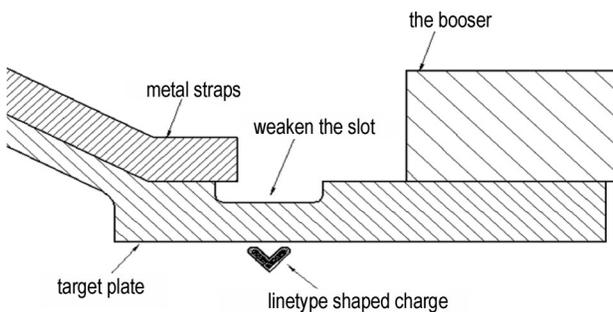


图 17 实际分离对象的结构示意图

Fig.17 Schematic diagram of structure of the actual separated object

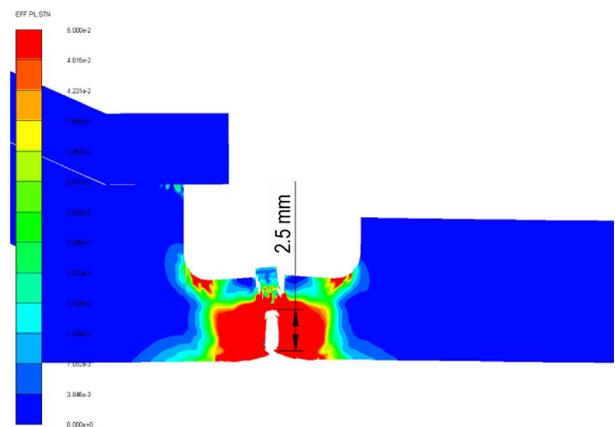


图 18 实际分离对象的仿真结果云图

Fig.18 Schematic diagram of simulation results of actual separated objects

上述模拟结果表明,采用相同状态的强边界约束条件时,在满足舱体结构强度的前提下,通过适当增加分离界面削弱槽的宽度,可有效降低分离位置的约束力,降低边界约束对切割索分离性能的影响,提高切割索的分离可靠性。

### 3 结论

(1) 铅切割索分离铸铝等脆性材料是切割索射流侵彻和高压爆轰产物共同作用结果,边界约束对射流侵彻的影响较小,但对靶板的崩裂过程影响较大。

(2) 强固定边界约束会限制材料的形变位移,进而影响高压爆轰产物对靶板的崩裂作用,降低铅切割索对铸铝材料的分离能力。 $2.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$  铅切割索在自由边界条件下能够正常分离  $4.5\text{ mm}$  厚铸铝材料,在

固定边界约束条件下则无法分离。

(3)在固定边界约束条件下,分离界面削弱槽宽度越宽,越有利于铅切割索对铸铝材料的分离。当削弱槽宽度 $\geq 12$  mm时,2.7 g·m<sup>-1</sup>切割索能够可靠分离4.5 mm厚的铸铝材料。可通过适当增加削弱槽的宽度,降低边界约束对切割索分离性能的影响,提高切割索的分离可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 371-380.  
WANG Kai-min. Explosive engineering[M]. Beijing: National Defense industry Press, 2014: 371-380.
- [2] 孙璟, 唐科, 王帅, 等. 线式分离装置产品化研究和实践[J]. 航天工业管理, 2018(8):5.  
SUN Jing, TANG Ke, WANG Shuai et al. Research and practice of commercialization of linear separation unit[J]. *Aerospace Industry Management*, 2018(8):5.
- [3] 李志强. 火工装置在航天飞行器上应用[J]. 航天返回与遥感, 1997, 18(2):5.  
LI Zhi-qiang. Application of fireworks in space vehicles [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1997, 18(2):5.
- [4] 何春全, 严楠, 叶耀坤. 导弹级间火工分离装置综述[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(3):8.  
HE Chun-quan, YAN Nan, YE Yao-kun. Review of inter-stage fireworks separation devices [J]. *Space Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(3):8.
- [5] HENRY MOHAUPT. Shape charge and warheads [M]. Publ. Prenticehall, Inc., EnglewoodCliffs, New Jersey, 1966.
- [6] DONALD R. BEEMAN. Shaped charge-aemor nemesis. National Defense, May-June 1978:561.
- [7] 松全才, 金韶华. 俄罗斯切割索的现状[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(4): 7.  
SONG Quan-cai, JIN Shao-hua. Current situation of cutting cable in Russia[J]. *Explosion and Shock*, 1997, 17(4):7.
- [8] RONDOT F. Tracking the "poorness" of a linearshaped [A]. 23th International Symposium on Ballistic [C]//Tarragona, Spain: Intemational Ballis-tic Committee, 2007: 169-176.
- [9] ROLC S, BUCAR J, Akstein Z. Computer simulation of explosively formed projectiles(EFP)[C]//23th International Symposium on Ballistics. Tarragona, Spain: Intemational Ballistic Committee, 2007: 185-192.
- [10] CURTIS J P. Axisymmetric instability model for shapedcharge jets[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(11): 4978-4985.
- [11] VIGIL M G. Precision linear shaped charge designs for severance of aluminum materials, 1992.
- [12] GEORGE, A, Hayes. Linear shaped-charge(LSC) collapse model[J]. *Journal of Materials Science*, 1984, 19(9): 3049-3058.
- [13] SWOKBIN LIM, PAUL WORSEY. An investigation of the characteristics of linear shaped charges used in demolition [C]// Proceeding of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, 2003:297-206.
- [14] 王存扣. 起爆方式对爆炸网络冲击波压力影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.  
WANG Cun-kou. Research on the influence of the detonating ways to the shock wave pressure of explosion network [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [15] 苟瑞君, 赵国志. 线性成型装药起爆方式的比较[J]. 火工品, 2006, (1): 42-45.  
GOU Rui-jun, ZHAO Guo-zhi. Comparison of linear shaped charge initiation manners [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2006, (1): 42-45.
- [16] CHASE J B, KIKLO R M. High resolution diagnostics of a linear shapes charge jet[C]//18th International Symposium and Exhibition on Ballistics. San antonio, TX, November 1999.
- [17] 成伟, 杜成光, 李家家, 等. 聚能切割索切割靶板的数值仿真系统[J]. 火工品, 2010, (1): 18-20.  
CHENG Wei, DU Cheng-guang, LI Jia-jia, et al. Numerical simulation of shaped charge cutting cable cutting target plate[J]. *Initiating Explosive Device*, 2010, (1): 18-20.
- [18] 刘宁, 渠弘毅, 戈庆明, 等. 聚能切割索切割能力仿真及试验研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020, (1): 38-42.  
LIU Ning, QU Hong-yi, GE Qing-ming, et al. Simulation and experiment study on cutting ability of shaped charge cutting cable[J]. *Missile and Space Vehicle technology*, 2020, (1): 38-42.
- [19] 李志强, 刘晓明, 赵勇刚, 等. 聚能切割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 Zhi-qiang, LIU Xiao-ming, ZHAO Yong-gang, et al. Experiment study and finite element analysis of linear cutting of aeronautical plexiglass by shaped charge cutting cable [J]. *Explosion and shock*, 2007, 27(5): 385-389.
- [20] 蒲俊州, 李征鸿, 姜国纯, 等. 炸高对RDX基聚能切割索爆破切割有机玻璃的影响研究[J]. 火工品, 2004, (4): 21-26.  
PU Jun-zhou, LI Zheng-hong, JIANG Guo-chun, et al. Study on the effect of blasting height on the blastin cutting of plexiglas with RDX based shaped charge cutting cable[J]. *Initiating Explosive Device*, 2004, (4): 21-26.
- [21] 朱铭颖, 顾文彬, 唐勇, 等. 炸高对侵彻效应影响试验和数值模拟研究[J]. 爆破器材, 2010, 39(2): 31-34.  
ZHU Min-jie, GU Wen-bing, TANG Yong, et al. Experiment and numerical simulation study on impact of blasting height on penetration effect [J]. *Blasting Equipment*, 2010, 39(2): 31-34.
- [22] 陈智刚, 赵太勇, 侯秀成. 聚能装药金属射流形成技术研究[J]. 爆破器材, 2004, (2): 4-7.  
CHEN Zhi-gang, ZHAO Tai-yong, HOU Xiu-cheng. Study on forming technology of shaped charge metal jet [J]. *Blasting Equipment*, 2004, (2): 4-7.
- [23] 石艺娜, 秦承森. 金属射流失稳断裂的理论分析[J]. 力学学报, 2009, (4):361-369.  
SHI Yi-na, QIN Cheng-sen. Inetability and breakup of stretching metallic jets [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, (4):361-369.
- [24] 许兵. 线型切割索侵彻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.  
XU Bing. Experimental study and numerical simulation of wire cutting cable penetration into duralumin plate [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.
- [25] 张维星. 线式爆炸分离装置的强度分析及其动态断裂研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.  
ZHANG Wei-xing. Strength analysis and dynamic fracture

- study of linear explosive separation device[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [26] 肖旅,周海涛,汪彦博,等,VW63Z铸造铝合金线型分离性能及切割机理研究[J].特种铸造及有机合金,2021,(1):11-15.  
XIAO Lv, ZHOU Hai-tao, WANG Yan-bo, et al. Linear shaped charge separation behavior and cutting mechanism of VW63Z cast magnesium alloy [J]. *Special casting &*, 2021, (1): 11-15.
- [27] 卢芳云.柔爆索线性爆炸分离过程机理研究[M].北京:科学出版社,2021.  
LU Fang-yun. Mechanism research on the linear explosive separation process of soft explosive cable Defense industry Press [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [28] NING J G, WANG C, MA T B. Numerical analysis of the shaped charge jet with large cone angle[J]. *Int J Nonlin-ear Sci Numer Simulat*, 2006, 7(1): 71-78.
- [29] 关焕文,宋文娟,王巍,等,铝合金聚能切割性能研究[J].火工品,2019,(6):17-20.  
GUAN huan-wen, SONG wen-juan, WANG wei, et al. Study on explosive cutting of aluminium alloy[J]. *Initiating Explosive Device*, 2019, (6): 17-20.
- [30] LEE E L, HORNING H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products: UCRL-50422 [R]. San Francisco: University of California, 1968.
- [31] S ROLC. Numerical and experimental study of defeating the RPG-7 [C]//24th International Symposium of Ballistics, New Orleans, Louisiana, 2008.
- [32] STEINBERG D J. Equation of state and strength properties of selected material[M]. LLNL, 1991.
- [33] 陈清畴,蒋小华,李敏,等,RDX基高聚物黏结炸药JWL状态方程[J].含能材料,2011,19(2):213-216.  
CHEN Qing-chou, JIANG Xiao-hua, LI Min, et al. JWL Equation of State for RDX-based PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 213-216.
- [34] JOSHUA E GORFAIN, CHRISTOPHER T KEY. Damage prediction of rib-stiffened composite structures subjected to ballistic impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 57:159-172.
- [35] 彭建祥. Johnson-Cook本构模型和 Steinberg本构模型比较研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2006.  
PENG Jian-xiang. A comparative study of the Johnson-Cook constitutive model and the Steinberg constitutive model [D]. Mianyang: Chinese Academy of Engineering Physics, 2006.
- [36] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, The Netherlands: 1983: 541-547.
- [37] 马海洋,龙源,鲁会友,等,铝合金在线型聚能装药爆炸冲击作用下破坏模式的研究[J].火工品,2010,134(3):20-24.  
MA hai-yang, LONG yuan, LU hui-you, et al. Study on the failure mode of aluminum alloy under the impact of online shaped charge explosion [J]. *Initiating Explosive Device*, 2010, 134(3): 20-24.
- [38] 戴蓉兰.美国LXPX和PBX系高聚物粘结炸药介绍[J].火炸药,1980,(3):69-72.  
DAI Rong-lan. Introduction to LXPX and PBX series polymer bonded explosives in the United States [J]. *Explosive*, 1980, (3): 69-72.

## Effect of Boundary Constraints and Separation Surface Width on Separation Performance of Lead Linear Shaped Charge

XIAN Ming-chun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yue-ping<sup>2</sup>, LI Ning-rui<sup>2</sup>, YIN Xin<sup>2</sup>, WANG You<sup>2</sup>, SUO Qi<sup>2</sup>, LIU Ming-xing<sup>2</sup>, CHEN Qi<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China; 2. Sichuan Aerospace Chuannan Pyrotechnics Technology Co., Ltd., Luzhou 646004, China)

**Abstract:** In order to study the effects of boundary constraint and separation surface width on separation performance of lead linear shaped charge, numerical simulation was used to analyze the factors affecting the separation of cast aluminum target plate after the explosion of lead linear shaped charge. The effects of free boundary constraint, fixed boundary constraint and slot width of separation surface on separation performance of lead linear shaped charge were obtained. Results show that the separation of brittle materials such as cast aluminum from lead linear shaped charge is the result of the joint action of jet penetration and high pressure detonation products. The boundary constraint has little influence on jet penetration and the deviation is generally less than 5%, but it has a great influence on the cracking process of the target plate. The strong fixed boundary constraint will limit the deformation and displacement of the material during the separation of the cutting cable, and then limit the cracking effect of high-pressure detonation products on brittle materials such as cast aluminum, which will increase the difficulty of subsequent separation. By appropriately increasing the width of the separation interface, the effect of boundary constraints on the separation performance of the cutting cable can be effectively reduced, and the separation reliability of the cutting cable can be improved. The  $2.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$  lead linear shaped charge can reliably separate the ZL114A material with a thickness of 4.5 mm when the width of the weakening groove is  $\geq 12 \text{ mm}$ .

**Key words:** linear separation; lead linear shaped charge; boundary constraints; separation surface width; simulation analysis

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022266

(责编:王馨逸)