文章编号：1003-1480（2026）01-0088-07

结构参数对聚能切割索切割效果的影响规律探究

薛升曦[1]，乔毅轩[1]，刘迎彬[1]，杨文宇[1]，张艺潇[2]，李卫士[3]

（1. 中北大学 环境与安全工程学院，山西 太原，030051；2. 中国人民解放军32381部队，北京，100072；3.陆军装备部驻北京地区军事代表局某军事代表室，山西 太原，030051）

摘 要：采用模压工艺制备了圆管型聚能切割索，并结合切割实验与数值模拟，系统研究了壳体材料、壳体厚度、“V”型槽张开角及炸高 4 种结构参数对切割效果的影响规律。结果表明：所制备的聚能切割索可形成高温、高速片状射流，有效切割 10 mm 厚铝板；数值模拟结果与实验结果吻合良好，误差范围为 1.6%~8.1%；壳体材料对切割深度的影响最为显著，壳体厚度、“V”型槽张开角及炸高对切割深度的影响呈先增后减的趋势；射流头部速度与壳体厚度及“V”型槽张开角之间呈负线性相关；最优结构参数为壳体厚度 0.5 mm、“V”型槽张开角 60°、炸高 2 mm。研究结果可为聚能切割索的结构优化及工程应用提供理论依据。

关键词：聚能切割索；数值模拟；切割深度；结构参数

中图分类号：TJ45+9；TJ410.3 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.014

Influence Investigation of Structural Parameters on Cutting Performance of Flexible Linear Shaped Charge

XUE Sheng-xi[1]，QIAO Yi -xuan[1]，LIU Ying-bin[1]，YANG Wen-yu[1]，ZHANG Yi -xiao[2]，LI Wei-shi[3]，

（1.School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051；2. Unit of 32381 People's Liberation Army, Beijing, 100072; 3.A Military Representative Office of the Military Representative Bureau in Beijing of the Army Equipment Department，Taiyuan，030051）

Abstract：Tubular flexible linear shaped charges (LSCs) were fabricated using compression molding technology, and in combination with experiments and numerical simulations, the influence patterns of four structural parameters—shell material, shell thickness, "V" groove angle, and burst height on the cutting performance were systematically investigated. The results show that: the fabricated LSCs can generate high-temperature, high-speed planar jets to effectively cut a 10 mm thickness aluminum plate; Numerical simulations have good consistency with the experimental results, with an error margin of 1.6% to 8.1%; Shell material has the most significant impact on cutting depth, the impact tendency of shell thickness, "V" groove angle, and burst height exhibits an initial increase followed by a decrease in cutting depth; The jet head velocity shows a negative linear correlation with shell thickness and "V" groove angle; Optimal structural parameters are shell thickness of 0.5 mm, "V" groove angle of 60°, and burst height of 2 mm. These findings provide theoretical guidance for the structural optimization and practical application of flexible linear shaped charges.

Key words：Flexible linear shaped charge；Numerical simulation；Cutting depth；Structural parameter

聚能效应，也称门罗效应，即在炸药一端的空腔内设置一层薄金属衬层，该金属衬层被称为药型罩。在炸药爆轰作用下，药型罩沿轴向被压缩并形成高温、高速的聚能射流，对前方目标产生破坏作用[1]。聚能

收稿日期：2025-12-08

作者简介：薛升曦（1997-），男，硕士，主要从事聚能装药毁伤技术研究。

通讯作者：刘迎彬（1985-），男，副教授，主要从事爆炸加工及防护技术研究。

基金项目：国家自然科学基金（No.11802274）。

引用本文：薛升曦，乔毅轩，刘迎彬，等.结构参数对聚能切割索切割效果的影响规律探究[J]. 火工品, 2026(1):88-94.

切割索为线性聚能装药的一种应用形式，在装药的爆轰效应作用下，聚能切割索的“V”形聚能槽被压缩形成片状射流，能够实现对目标的快速切割。该技术在爆破拆除[2]、航空飞行器的分离[3]、爆破片[4]、石油工业[5]等领域具有广泛的应用前景。

尽管聚能切割索的应用前景广阔，但其切割效果受多种结构参数的影响，如壳体材料、壳体厚度、“V”型槽张开角及炸高等。近年来，国内外学者对聚能切割索的理论模型、数值模拟及实验验证进行了深入研究。在理论研究方面，曾新吾等[6]提出了端部滑移起爆线性射流形成的非定常理论模型，并通过实验验证了有效性。Lim[7]建立了预测线性射流方向与形状的数学模型。赵波等[8]通过数值模拟与实验研究，建立了聚能切割索切割靶板的物理模型。李晓杰等[9]在不可压缩流体力学模型的基础上，对线性射流切割靶板的切割深度与炸高、材料等的关系进行了推导。在数值模拟领域，Ning 等[10]提出一种适用于大变形计算的 MOCL 跟踪算法，该算法在聚能射流的数值模拟上有较高的准确性。李磊等[11]利用 SPH 算法对射流的成型与侵彻进行了三维数值模拟，发现与传统 FEM 方法相比，SPH 方法可有效避免网格畸变、物质穿透等问题。戈庆明等[12]利用 AUTODYN 软件，对切割索切割铝板过程进行了数值模拟研究。其他方面，龚康平[13]对环形切割索的起爆点数量及最佳起爆点位置进行了研究，得到环形切割索连接处的对称点为最佳起爆点。苟瑞君等[14]通过爆轰波传播理论研究了起爆方式对切割索切割效果的影响。Jongmin 等[15]以双锥角药型罩为研究对象，对线性聚能装药进行了结构优化设计。陈道利等[16]对聚能切割索在不同炸高与侵彻角度下的切割效果进行了数值模拟与实验验证，得到了炸高与侵彻角度两种因素耦合作用对切割效果的影响规律。姜国纯等[17]利用数值模拟研究了不同类型切割索切割作用下有机玻璃的损伤特性。Sun[18]、何志杰[19]等以碳纤维增强复合材料为研究对象，对聚能切割索切割下层状复合材料的失效形式进行了研究。王友等[20]对 BP 神经网络与卷积神经网络算法在聚能切割索结构优化及切割性能中的应用进行了研究。

然而，现有研究多集中于理论模型的建立与数值模拟方法的优化，对实际应用中结构参数对切割效果影响规律的研究仍显不足。尤其是圆管型聚能切割索，因其加工方便、价格低廉、可靠性高等优点，在工业领域具有重要的应用价值。因此，深入研究圆管型聚能切割索的结构参数对其切割效果的影响规律，对于优化其设计和提升切割性能具有重要意义。

本文以端面为割圆的圆管型聚能切割索为研究对象，采用模压工艺制备了不同结构参数的聚能切割索，并通过切割实验与数值模拟相结合的方法，系统研究了壳体材料、壳体厚度、“V”型槽张开角及炸高对切割效果的影响规律。

1　切割实验

1.1　材料制备

传统的端面为割圆结构的聚能切割索通常采用轧制-拉伸工艺加工而成，其工艺流程为：首先在金属管中装填一定密度的炸药，然后通过对金属管进行拉伸和轧制，使装药压实并形成割圆截面结构的聚能切割索。与传统的轧制-拉伸工艺不同，本研究采用模压工艺制备聚能切割索。具体的方法是：选用薄壁金属管作为壳体材料，在装填高能炸药后，通过模具进行 V 型槽加工，从而形成割圆截面的聚能切割索，加工使用的模具断面如图 1 所示。

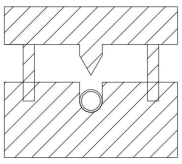


图 1　“V”型槽加工模具断面示意图

Fig.1　Schematic diagram of the cross-section of the "V" groove mould

在材料选择上，本研究选取了广泛应用于药型罩的紫铜和切割索常用的铅两种材料作为壳体材料，壳体厚度设定为 1 mm，“V”型槽张开角为 60°，选用钝化黑索今作为装药，进行切割索的加工。通过该工艺加工得到的聚能切割索如图 2 所示。

1.2　实验设置

切割实验以 10 mm 厚的铝板作为靶板，炸高设

定为 0 mm。实验中，采用 8#电雷管对聚能切割索进行轴向起爆。电雷管与切割索连接时，将电雷管底部凹槽对准切割索的起爆端，并使用电工胶带进行固定。利用 C 型夹具将待切割的铝板固定在工作台上，以施加必要的约束力。将切割索放置在靶板上方，并使其紧贴靶板表面，然后用胶带固定。实验的具体设置如图 3 所示。

图 2　加工的聚能切割索

Fig.2　Machined flexible linear shaped charge

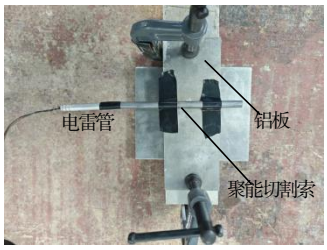
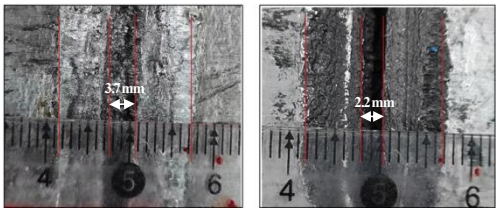


图 3　实验设置图

Fig.3　Diagram of the experimental setup

1.3　实验结果与分析

实验结果如图 4 所示，对靶板的切缝宽度和切割深度等参数进行了测量。



（a） 壳体材料为 Cu　　（b）壳体材料为 Pb

图 4　实验结果图

Fig.4　Diagram of the experimental result

由图 4 可知，所制备的聚能切割索能够形成片状射流，对靶板实现了有效切割。在装药爆轰作用下，靶板接触面变形区的尺寸均约为 17 mm。当壳体材料为 Cu 时，切缝宽度为 3.7 mm，切割深度为 4.8 mm；当壳体材料为 Pb 时，切缝宽度为 2.2 mm，切割深度为 6.3 mm。

2　数值模拟

炸药爆炸通常在几个微秒内完成，实验中数据采集难度较大且成本较高。因此，利用有限元软件对爆炸过程进行数值模拟，并基于模拟结果进行分析，已成为一种重要的研究手段[21]。本研究采用美国 Century Dynamics 公司开发的 AUTODYN 有限元分析软件，该软件在大变形、高速碰撞及爆炸冲击等问题的模拟计算方面具有显著优势，广泛应用于航空、土木、国防工业等领域[22]。通过 AUTODYN 软件的二维模型，对切割实验进行了数值模拟。

2.1　有限元模型

在处理大变形问题时，拉格朗日算法易出现网格畸变，影响计算结果的准确性。而欧拉算法允许物质在网格间流动，可有效规避网格畸变引起的计算误差。本研究的数值模拟采用了欧拉-拉格朗日耦合算法，其中，聚能切割索部分采用欧拉算法，靶板部分采用拉格朗日算法，并在两者之间设置流固耦合接触。为平衡计算精度与效率，欧拉域网格尺寸设定为 0.1 mm，拉格朗日网格尺寸设定为 0.2 mm。在欧拉域中，靶板上边缘“V”型槽轴线位置设置高斯点，用于监测射流切割靶板过程中射流头部的速度。具体的有限元模型如图 5 所示。

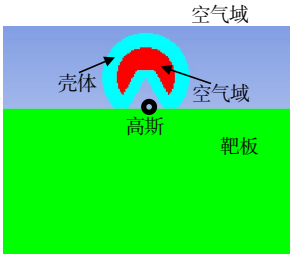


图 5　有限元模型

Fig.5　The finite element model

2.2　材料参数

AUTODYN 软件自带材料库包含 300 多种常用材料模型，能够满足大部分数值模拟计算的需求。本文数值模拟中，材料参数直接采用 AUTODYN 材料库中的材料模型及参数，具体包括状态方程和强度模型，如表 1 所示。

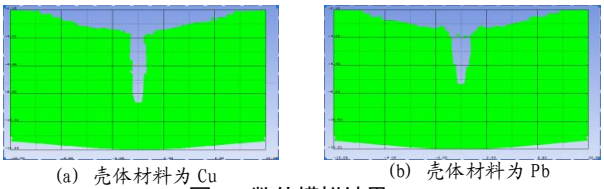
表 1　相关材料的材料模型及状态方程

Tab.1　Material model and equation of state

材料	状态方程	强度模型
空气	理想气体	-
RDX	JWL	-
铜（Cu）	线性	Johnson cook
铅（Pb）	冲击	Steinberg-Guinan

2.3　数值模拟结果

根据实验参数建立有限元模型并进行计算，得到数值模拟结果如图 6 所示。



(a) 壳体材料为 Cu　　(b) 壳体材料为 Pb

图 6　数值模拟结果

Fig.6　Numerical simulation results

依据数值分析结果，两种壳体材料的靶板端面在装药爆轰作用下的变形情况相近。当壳体材料为铜（Cu）时，切缝宽度为 3.4 mm，切割深度为 4.9 mm；当壳体材料为铅（Pb）时，切缝宽度为 2.1 mm，切割深度为 6.2 mm。实验数据与数值模拟结果的对比如表 2 所示。由表 2 可见，数值模拟结果与实验数据相吻合，误差范围为 1.6%~8.1%，验证了数值模拟方法的可靠性。

表 2　实验与数值模拟结果对比

Tab.2　Comparison between experimental and numerical simulation results

相关参数	实验结果/mm	数值模拟结果/mm	误差/%
Pb 切缝宽度	2.2	2.1	4.5
Pb 切割深度	6.3	6.2	1.6
Cu 切缝宽度	3.7	3.4	8.1
Cu 切割深度	4.8	4.9	2.1

3　影响规律探究

3.1　影响因素

根据聚能射流效应的相关研究，影响聚能切割索切割效果的主要因素包括壳体材料、壳体厚度、"V" 型槽张开角和炸高[23]。本研究采用数值模拟方法，以片状射流切割靶板时的射流头部速度和切割深度为评价指标，采用单一变量法探究这 4 个变量对聚能切割索切割效果的影响规律。4 个影响因素的具体取值见表 3。聚能切割索与靶板端面的结构如图 7 所示。

表 3　各影响因素取值

Tab.3　The value of each influencing factor

影响因素	因素水平			
壳体材料	铜	铁	铝	铅
壳体厚度/mm	0.25	0.50	0.75	1.00
“V”型槽张开角/°	40	60	80	100
炸高/mm	0	2	4	6

基础结构参数设定为：壳体材料为 Cu、壳体厚度 1 mm、“V”型槽张开角 60°、炸高为 0 mm。通过改变其中一项参数进行数值模拟，探究各参数对切割效果的影响规律。

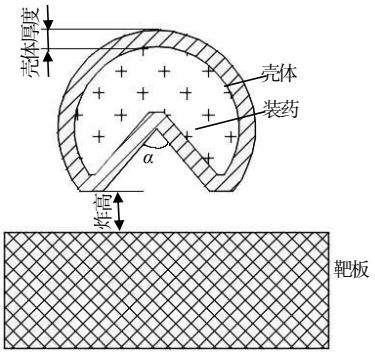


图 7　聚能切割索及靶板端面示意图

Fig.7　Schematic diagram of LSC and target board cross-section

3.2　壳体材料的影响

聚能射流的侵彻深度与药型罩材料的声速和密度密切相关。为探究壳体材料对切割索切割深度的影响，对 Cu、Fe、Al、Pb 4 种壳体材料进行了数值模拟。根据数值模拟中高斯点记录的数据，绘制射流速度——时间曲线，如图 8 所示。

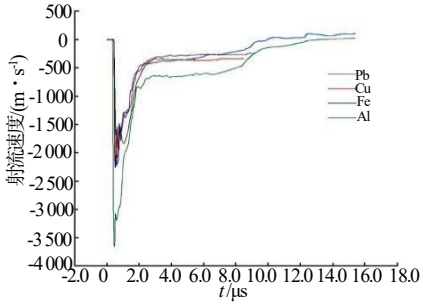


图 8　不同壳体材料的射流速度曲线

Fig.8　Jet velocity curve of different shell materials

数值模拟结果显示，Al 壳体材料的射流头部速度最快，达到 3 664 m·s^{-1}，但切割深度最小，仅为 3.2 mm；Pb 壳体材料的射流头部速度最小，为 1 963 m·s^{-1}，但切割深度最深，达到 6.2 mm；Cu、Fe 的射流头部速度相近，分别为 2 262 m·s^{-1} 和 2 254 m·s^{-1}，切割深度分别为 4.9 mm 和 4.0 mm。4 种材料切割深度的最大差距为 3.0 mm。4 种材料的密度、声速与切割深度和射流头部速度如表 4 所示。

表 4　4 种材料的密度、声速及其切割深度与射流速度

Tab.4　The density and velocity of sound of the four materials, as well as their cutting depth and jet velocity

材料	密度/（g·cm^{-3}）	声速/（m·s^{-1}）	切割深度/mm	射流头部速度/（m·s^{-1}）
Pb	11.3	2 006	6.2	1 963
Cu	8.9	3 940	4.9	2 262
Fe	7.9	4 570	4.0	2 254
Al	2.7	5 240	3.2	3 664

根据聚能射流理论，侵彻深度与材料密度呈正相关，高声速材料作为药型罩有助于提高射流速度和连续性。从表 4 中可知，Al 的声速最高，但密度较低，导致切割深度较小；Pb 的声速较低，但密度较高，切割深度最大；Cu 和 Fe 的射流速度相近，切割深度随材料密度的增加而增大。

3.3　壳体厚度的影响

壳体厚度对线性射流的形成和切割效果有显著影响。在保证装药一定的情况下，对 0.25，0.50，0.75，1.00 mm 4 种壁厚进行了数值模拟，根据数值模拟绘制射流速度——时间曲线，如图 9 所示。

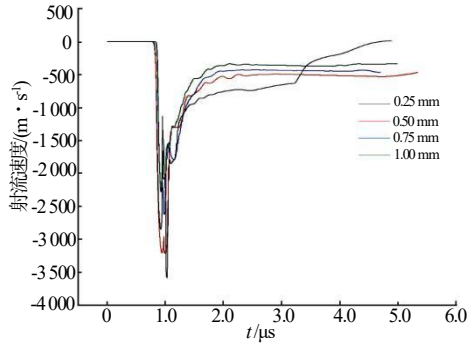


图 9　不同壳体厚度的射流速度曲线

Fig.9　Jet velocity curve of different shell thicknesses

由数值模拟结果可得，0.25 mm 厚度时射流头部速度最快，为 3 585 m·s^{-1}，切割深度并非最大，为 5.6 mm；0.50 mm 和 0.75 mm 厚度时射流头部速度分别为 3 216 m·s^{-1} 和 2 619 m·s^{-1}，切割深度接近，分别为 6.1 mm 和 6.0 mm；1.00 mm 厚度时射流头部速度与切割深度均降低，为 2 262 m·s^{-1} 和 4.9 mm。不同壳体厚度切割索切割深度的最大差距为 1.2 mm。根据模拟结果绘制射流速度与切割深度随壳体厚度的变化曲线，如图 10 所示。

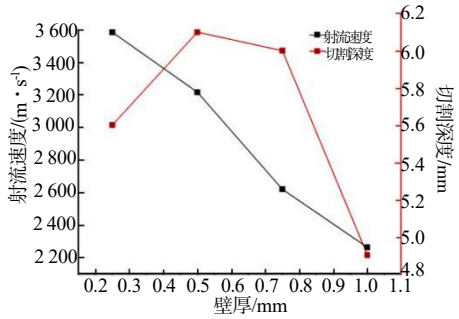


图 10　射流速度与切割深度随壳体厚度的变化曲线

Fig.10　Change curves of jet velocity and cutting depth *vs* shell thickness

由图 10 可以看出，射流速度与壳体厚度基本呈负线性相关，而切割深度随壳体厚度先增加后减小。

3.4　“V”型槽张开角的影响

锥形聚能射流理论表明，锥角大小影响聚能射流的形式和性能。对 40，60，80，100 ° 4 种锥角工况进行数值模拟，得到射流速度——时间曲线，如图 11 所示。结果显示，40° 张开角时射流头部速度最高，为 2 683 m·s^{-1}，但切割深度较低，仅有 4.0 mm；60° 张开角时切割深度最大，为 4.9 mm，射流头部速度为 2 262 m·s^{-1}；80° 与 100° 时射流头部速度和切割深度均降低。不同张开角切割索切割深度的最大差距为 1.5 mm。

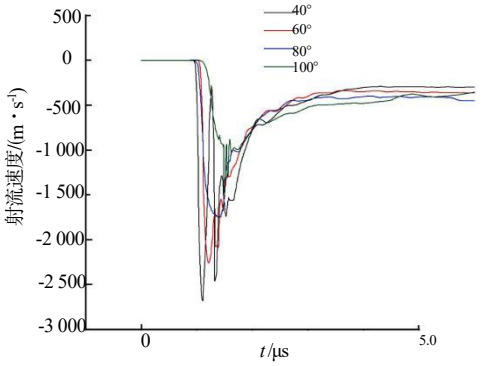


图 11　不同“V”型槽张开角度的射流速度曲线

Fig.11　Jet velocity curve of different “V” groove angles

根据数值模拟结果绘制射流头部速度与切割深度随张开角的变化曲线，如图 12 所示。由图 12 可知，射流速度与张开角呈负线性相关，切割深度随张开角的增加先增加后减小。

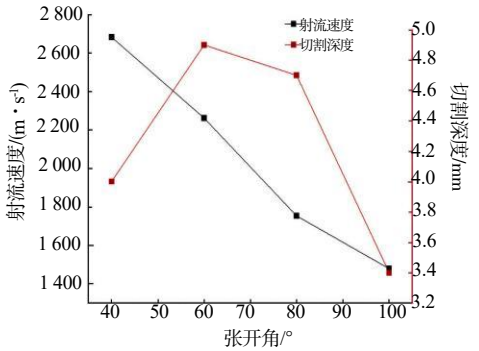


图 12　射流速度与切割深度随“V”型槽张开角度的变化曲线

Fig.12　Change curves of jet velocity and cutting depth *vs* angle of “V” groove

3.5　炸高的影响

炸高对射流质量和侵彻深度有显著影响。对 0，2，4，6 mm 4 种炸高进行了数值模拟，得到的射流速度——时间曲线如图 13 所示。

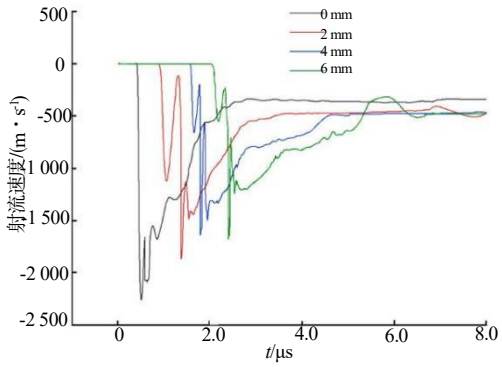


图 13　不同炸高的射流速度曲线

Fig.13　Jet velocity curve of different burst heights

模拟结果显示，炸高为 0 时射流头部速度最高为 2 262 m・s^{-1}，但切割深度较低，仅有 4.9 mm；2 mm 炸高时切割深度最大 6.7 mm，射流头部速度为 1 873 m・s^{-1}；4 mm 时炸高切割深度为 6.0 mm，射流头部速度为 1 637 m・s^{-1}；6 mm 时炸高射流出现断裂，切割深度降低至 5.5 mm。不同炸高切割索切割深度的最大差距为 1.8 mm。

根据数值模拟结果绘制射流速度与切割深度随炸高的变化曲线，如图 14 所示。

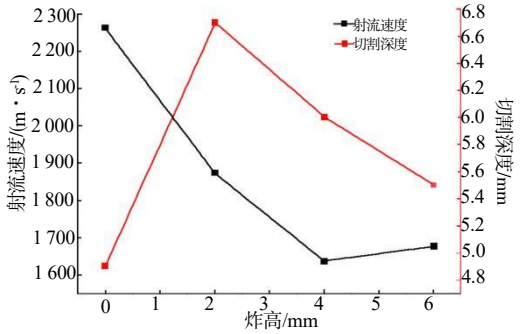


图 14　射流速度与切割深度随炸高的变化曲线

Fig.14　Change curves of jet velocity and cutting depth *vs* burst heights

由图 14 可知，射流头部速度随炸高的增加先减小后增加，切割深度则先增加后减少。当炸高较小时，靶板阻碍射流的成型；当炸高过大时，射流断裂导致切割深度降低。同时，随着炸高的增加，靶板受装药爆轰作用的影响减小，上端变形明显减小。

4　结论

本研究通过模压工艺制备了圆管型聚能切割索，并结合切割实验与数值模拟，系统研究了壳体材料、壳体厚度、“V”型槽张开角及炸高 4 种结构参数对其切割效果的影响规律。得到以下结论：

（1）实验结果表明，所制备的聚能切割索可形成高温、高速的片状射流，能有效切割 10 mm 铝板。数值模拟结果与实验结果吻合良好，误差范围为 1.6%~8.1%。

（2）壳体材料对切割深度的影响最为显著。铅（Pb）壳体材料因其较高密度，尽管射流头部速度较低，但切割深度最大；铝（Al）壳体材料射流头部速度最高，但因密度较低，切割深度最小。铜（Cu）和铁（Fe）的切割效果介于两者之间。

（3）壳体厚度对切割效果呈先增后减的趋势。较薄的壳体厚度虽能提高射流头部速度，但射流密度和质量较低，影响切割效果；较厚的壳体厚度则降低射流速度，但提高射流稳定性。最佳壳体厚度为 0.5 mm。

（4）“V”型槽张开角对切割效果的影响趋势与壳体厚度类似，呈先增后减。较小的张开角能提高射流速度，但射流质量较差；较大的张开角则降低射流速度，但提高射流稳定性。最佳张开角为 60° 。

（5）炸高对切割效果的影响也呈先增后减的趋势。过小的炸高导致靶板阻碍射流成型，过大的炸高使射流拉断，均降低切割深度。最佳炸高为 2 mm。

（6）射流头部速度与壳体厚度及“V”型槽张开角呈负线性相关。壳体厚度和张开角的增加均导致射流速度降低。

综上所述，通过优化结构参数，可显著提高聚能切割索的切割性能。最佳结构参数组合为：壳体厚度 0.5 mm、“V”型槽张开角 60° 、炸高 2 mm。本研究为聚能切割索的结构优化及工程应用提供了理论依据和实践指导。

参考文献：

[1]　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.

[2]　惠鸿斌,薛延河,肖均. 线型聚能切割索在拆除爆破中的应

用[J]. 爆破器材, 1997, 21(05): 25-29.

[3] 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, 48(01): 38-42.

[4] 李万全,赵云涛,耿阳,等.聚能切割技术在爆破片上的应用研究[J].火工品,2022(5): 5-8.

[5] 郭同政,李凯,高强,等.一种高温高压井用小直径切割器设计及性能研究[J].火工品,2024(2): 93-96.

[6] 曾新吾,薛鸿陆.线型聚能装药的理论研究[J].爆炸与冲击,1988,8(02):97-105.

[7] Seokbin Lim.Steady state equation of motion of a linear shaped charges liner[J].International Journal of Impact Engineering, 2012(44): 10-16.

[8] 赵波,詹发民,王涛.磁性爆破切割装置研究[J].四川兵工学报,2015,36(02):18-20.

[9] 李晓杰,闫鸿浩,王小红,等.线型聚能切割爆破的理论研究[J].工程爆破,2021,27(1): 1-13.

[10] Ning JG, Wang C, Ma TB.Numerical analysis of the shaped charged jet with large cone angle[J].International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 2006,7(1): 71-78.

[11] 李磊,沈兆武,李学岭,等.SPH 方法在聚能装药射流三维数值模拟中的应用[J].爆炸与冲击,2012,32(3):316-322.

[12] 戈庆明,渠弘毅,王寅虎,等. 柔性导爆索切割过程仿真及试验研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020, 48(6): 23-26.

[13] 龚康平. 环形切割装置切割索起爆点研究[J].火工品, 2008 (1): 5-7.

[14] 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.

[15] Jongmin Park, Sejin Kwon. Study on the penetration performance of a double-angle linear shaped charge: Performance improvement and miniaturization[J].Aerospace, 2024, 11 (4): 310-323.

[16] 陈道利,赵铮. 炸高与侵彻角度对聚能切割索爆破切割性能的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(12): 97-104.

[17] 姜国纯，莫明珠，张江涛,等.不同类型线性切割索爆炸切割有机玻璃的损伤特性分析[J].火工品,2024(6): 23-27.

[18] Sun Jing, Ma Zhiguo, Zhang Zhifeng, et al.The delamination of carbon fiber reinforced composites during cutting by flexible linear shaped charge[J].Journal of Mechanical Science & Technology,2020,34(4): 1 515-1 522.

[19] 何志杰,王猛,赵康,等.聚能切割碳纤维增强复合材料层合板的研究[J].火工品,2021(3):20-23.

[20] 王友，刘名兴，尹鑫,等.神经网络算法在切割索侵彻性能预测中的应用研究[J].火工品,2024(3): 22-29

[21] 甄建伟，曹凌宇，孙福.弹药毁伤效应数值仿真技术[M].北京:北京理工大学出版社,2018.

[22] 石少卿, 汪敏, 孙波, 等. AUTODYN 工程动力分析及应用实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[23] 贾梦晔,高永宏,周鹏飞,等.药型罩材料与结构的研究进展[J].兵器装备工程学报,2022,43(1):10-18.