

# 切割防护门的线型聚能装药参数正交优化设计研究\*

武双章 顾文彬 李旭锋 徐浩铭

解放军理工大学工程兵工程学院(江苏南京,210007)

[摘 要] 为了获得较优的某线型聚能装药主要结构参数,运用正交设计方法对其进行优化设计,采用  $L_{27}(3^{13})$  正交表获得了不同的试验方案,利用 ANSYS/LS-DYNA 对各方案进行了数值模拟,获得了不同方案的最大射流速度和射流断裂前的最大长度,其中,最大的射流速度和射流长度分别为 5622.13 m/s 和 151.41 mm,经过对数值模拟结果的分析获得了最佳的参数组合方案。结果分析表明,对于射流速度,各因素对其影响规律为  $\delta \rightarrow 2\alpha \rightarrow a \rightarrow b$ ,最佳参数组合方案为  $2\alpha_3 - \delta_3 - a_3 - b_3$ ;对于射流长度,各因素对其影响规律为  $\delta \rightarrow a \rightarrow 2\alpha \rightarrow b$ ,从上述正交优化表中获得的最佳参数组合方案为  $2\alpha_1 - \delta_1 - a_2 - b_2$ 。

[关键词] 线型聚能装药 正交优化设计 射流速度 射流长度

[分类号] TD235.3 TJ510.3+6

## 引言

线型聚能装药(LSC)是聚能装药的一种形式,以锥形聚能装药理论为基础。线型聚能爆炸切割技术是爆炸切割技术的一种,具有高速、高效、操作简便、适应性强、安全可靠、应用范围广等优点,广泛应用于航空航天、军事领域及工程爆破中,如导弹、运载火箭、航天飞机等的自毁系统和分离装置,军用飞机中的穿盖弹射系统,废旧弹药的爆炸切割销毁,大型(或高耸)钢结构物的爆破拆除,水下沉船的解体打捞,船体人工鱼礁爆破沉放作业,井下钻探、油气井内和海洋油田平台等故障的处理,以及岩石预裂切缝等方面<sup>[1-16]</sup>。

本文针对某型防护门在受到破坏不能顺利打开的情况下,利用线型聚能装药对防护门的闭锁机构进行爆炸切割,从而使防护门能够被顺利打开。

近年来关于线型聚能装药的研究主要集中在射流成型理论、数值模拟和侵彻试验研究、各主要因素对射流成型和侵彻能力的影响以及具体的应用上。王飞、崔云航等人采用正交优化设计与数值模拟方法分别对线型切割器切割退役飞机及 80 mm 厚大型铝罐进行了研究,同时研究了各影响因素与一级交互作用对切割器优化设计的影响<sup>[5,17,18]</sup>。Novotney 等人研究了线型聚能装药发展过程中的几个历史性变化阶段,重点讨论了目前线型聚能装药结构设计及数值模拟和实际侵彻试验的对比分析<sup>[11]</sup>。Lim 研究了线型聚能装药药型罩基于泰勒转角的稳态运动分析方程,并与数值模拟结果进行了对比分析<sup>[19]</sup>。Jamali 等人采用数据处理群方法(GMDH)

神经网络进行模型设计,并运用该方法对爆炸切割过程的模型设计和预测进行了多目标优化<sup>[20]</sup>。

正交设计方法是一种科学安排多因素试验的方法,其工具是一种特制的表格——正交表,利用正交表来计算和分析试验的结果<sup>[21]</sup>,被广泛应用于优化设计。

本文采用正交设计方法对线型聚能装药各主要参数进行优化设计,获得了各因素的影响规律和最佳方案,可以为类似的参数优化设计提供参考。

## 1 线型聚能装药正交设计

本设计的线型聚能装药主要采用如图1所示断面为楔形的装药结构(1/2模型结构图),主要由炸药和药型罩组成,暂时先不考虑装药壳体。影响线型聚能装药侵彻深度的主要因素有炸药参数(包括装药类型和密度)、药型罩参数(包括罩材料、楔形角  $2\alpha$  和罩壁厚  $\delta$ )、药顶高  $a$ 、药厚  $b$ 、装药口宽  $c$  以及炸高  $h$ <sup>[5,17,18,22]</sup>。首先进行线型聚能装药射流成

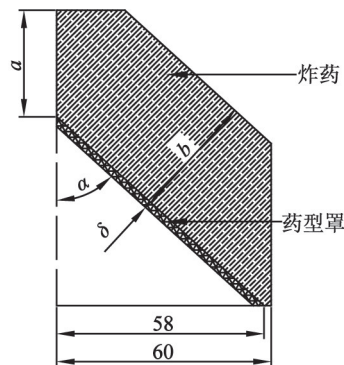


图1 线型聚能装药断面结构与参数(单位:mm)

\* 收稿日期:2012-03-30

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

型的优化设计,以射流最大速度 $v_{\max}$ 和射流断裂前的最大长度 $l_{\max}$ 为切割器的优化指标;然后在此基础上分析选择较好的方案,同时考虑炸高 $h$ 因素进行对靶板侵彻的数值模拟,以最大侵彻深度 $L_{\max}$ 作为线型聚能装药最终的优化指标。暂时不考虑各因素间的交互作用,装药结构的因素及各因素对应的水平值如表 1 所示。

表 1 线型聚能装药结构参数优化设计的因素水平

| 因素  | 楔形角<br>$2\alpha/^{\circ}$ | 罩壁厚<br>$\delta/\text{mm}$ | 药顶高<br>$a/\text{mm}$ | 药厚<br>$b/\text{mm}$ |
|-----|---------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|
| 水平一 | 95                        | 3.0                       | 50                   | 45                  |
| 水平二 | 90                        | 2.5                       | 40                   | 40                  |
| 水平三 | 85                        | 2.0                       | 30                   | 35                  |

本文选择了  $L_{27}(3^{13})$  正交表进行方案设计,如表 2 所示。

表 2 正交设计及最大射流速度 $v_{\max}$ 和射流断裂前最大长度 $l_{\max}$ 数值模拟试验

| 试验号 | 因素(列号)         |               |          |          | 试验指标  |                   |
|-----|----------------|---------------|----------|----------|---|-------------------|
|     | 1<br>$2\alpha$ | 2<br>$\delta$ | 3<br>$a$ | 4<br>$b$ | $v_{\max}/$<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $l_{\max}/$<br>mm |
| 1   | $2\alpha_1$    | $\delta_1$    | $a_1$    | $b_1$    | 4668.59   | 122.48            |
| 2   | $2\alpha_1$    | $\delta_2$    | $a_2$    | $b_2$    | 4446.82   | 139.91            |
| 3   | $2\alpha_1$    | $\delta_3$    | $a_3$    | $b_3$    | 4698.37   | 79.55             |
| 4   | $2\alpha_2$    | $\delta_1$    | $a_2$    | $b_3$    | 4257.19   | 151.41            |
| 5   | $2\alpha_2$    | $\delta_2$    | $a_3$    | $b_1$    | 4578.58   | 90.06             |
| 6   | $2\alpha_2$    | $\delta_3$    | $a_1$    | $b_2$    | 4907.40   | 100.04            |
| 7   | $2\alpha_3$    | $\delta_1$    | $a_3$    | $b_2$    | 4512.61   | 106.55            |
| 8   | $2\alpha_3$    | $\delta_2$    | $a_1$    | $b_3$    | 4691.20   | 98.97             |
| 9   | $2\alpha_3$    | $\delta_3$    | $a_2$    | $b_1$    | 5104.69   | 78.50             |
| 10  | $2\alpha_1$    | $\delta_1$    | $a_2$    | $b_2$    | 4547.44   | 114.96            |
| 11  | $2\alpha_1$    | $\delta_2$    | $a_3$    | $b_3$    | 4578.02   | 71.05             |
| 12  | $2\alpha_1$    | $\delta_3$    | $a_1$    | $b_1$    | 5166.57   | 81.55             |
| 13  | $2\alpha_2$    | $\delta_1$    | $a_3$    | $b_1$    | 4636.82   | 81.08             |
| 14  | $2\alpha_2$    | $\delta_2$    | $a_1$    | $b_2$    | 5060.36   | 89.68             |
| 15  | $2\alpha_2$    | $\delta_3$    | $a_2$    | $b_3$    | 5153.95   | 62.58             |
| 16  | $2\alpha_3$    | $\delta_1$    | $a_1$    | $b_3$    | 4916.45   | 82.63             |
| 17  | $2\alpha_3$    | $\delta_2$    | $a_2$    | $b_1$    | 5241.65   | 68.55             |
| 18  | $2\alpha_3$    | $\delta_3$    | $a_3$    | $b_2$    | 5323.35   | 49.56             |
| 19  | $2\alpha_1$    | $\delta_1$    | $a_3$    | $b_3$    | 4367.06   | 77.01             |
| 20  | $2\alpha_1$    | $\delta_2$    | $a_1$    | $b_1$    | 4905.73   | 109.02            |
| 21  | $2\alpha_1$    | $\delta_3$    | $a_2$    | $b_2$    | 4997.14   | 67.55             |
| 22  | $2\alpha_2$    | $\delta_1$    | $a_1$    | $b_2$    | 4799.65   | 97.56             |
| 23  | $2\alpha_2$    | $\delta_2$    | $a_2$    | $b_3$    | 4870.17   | 72.66             |
| 24  | $2\alpha_2$    | $\delta_3$    | $a_3$    | $b_1$    | 5114.00   | 52.05             |
| 25  | $2\alpha_3$    | $\delta_1$    | $a_2$    | $b_1$    | 5025.27   | 86.60             |
| 26  | $2\alpha_3$    | $\delta_2$    | $a_3$    | $b_2$    | 5107.98   | 60.56             |
| 27  | $2\alpha_3$    | $\delta_3$    | $a_1$    | $b_3$    | 5473.37   | 58.07             |

注:各因素下标数字代表水平,如 $2\alpha_1$ 代表楔形角水平一。

## 2 数值模拟及结果分析

### 2.1 有限元模型及计算过程

为了能够可靠地将某型防护门切割开,参照相关资料,决定第一轮优化采用的装药口宽为 120mm,药型罩横断面底边水平方向的炸药宽度保持 2.0mm 不变。由于线型聚能装药是面对称结构,在其横断面上只需建立 1/2 模型,如图 2 所示。在装药长度方向只需要建立 1 层网格,对对称面上的节点和长度方向上两横断面上的节点进行约束。采用该方法可以建立三维模型,使用三维实体材料模型,能够有效地减小模型的大小,节省计算资源和时间。模型采用 cm-g- $\mu\text{s}$  单位制。

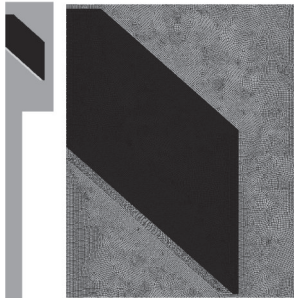


图 2 线型聚能装药有限元模型

本设计建模和计算都是在 ANSYS/LS—DYNA 中进行的,利用 LS—DYNA970 提供的前处理功能建立起计算模型,并定义各种材料模型。装药为 B 炸药,其材料模型为 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN,状态方程采用 EOS\_JWL 状态方程;药型罩材料为工业纯铁,材料模型为 MAT\_STEINBERG 模型,状态方程采用 EOS\_GRUNEISEN 状态方程;空气采用 MAT\_NULL 模型,状态方程为 EOS\_GRUNEISEN。炸药、药型罩和空气 3 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线型聚能装药为装药顶部中心点起爆。装药、药型罩和空气的计算网格均为六面体实体单元。

### 2.2 数值模拟结果及分析

#### 2.2.1 数值模拟结果

对表 2 所列的试验条件分别进行了数值计算,得到的最大射流速度 $v_{\max}$ 、射流断裂前最大长度 $l_{\max}$ 指标如表 2 所示。

表 2 中,第 27 号试验其射流最大速度 $v_{\max}$ 最大( $v_{\max} = 5473.37\text{m/s}$ ),对应的试验条件为 $2\alpha_3$ - $\delta_3$ - $a_1$ - $b_3$ ;第 4 号试验其射流长度 $l_{\max}$ 最大( $l_{\max} = 151.41\text{mm}$ ),对应的试验条件为 $2\alpha_2$ - $\delta_1$ - $a_2$ - $b_3$ 。

#### 2.2.2 极差分析

数值模拟结果极差分析如表 3 所示。

射流速度和射流长度与 4 因素的关系分别如图 3 和图 4 所示。

从表 2 和图 3、图 4 中的曲线可以看出,楔形角  $2\alpha$  为  $85^\circ$  时射流速度最大,  $95^\circ$  时射流长度最大; 罩壁厚  $\delta$  为 2.0mm 时射流速度最大, 3.0mm 时射流长度最大; 药顶高  $a$  为 50mm 时射流速度最大, 40mm 时射流长度最大; 药厚  $b$  为 45mm 时射流速度最大, 40mm 时射流长度最大。综合 3 个因素最好水平, 对射流速度而言, 最佳条件为  $2\alpha_3-\delta_3-a_1-b_1$ ; 对射流长度而言, 最佳条件为  $2\alpha_1-\delta_1-a_2-b_2$  (第 10 号试验)。

极差大小反映了各因素变化时试验指标的变化幅度, 因素的极差越大, 该因素对指标的影响也越大, 就越重要。

对射流速度而言, 罩壁厚的影响最大, 楔形角次之, 药顶高更次, 药厚最小, 它们对射流速度影响由主至次的顺序是:  $\delta \rightarrow 2\alpha \rightarrow a \rightarrow b$ 。

对射流长度而言, 罩壁厚的影响最大, 药顶高次之, 楔形角更次, 药厚最小, 它们对射流速度影响由主至次的顺序是:  $\delta \rightarrow a \rightarrow 2\alpha \rightarrow b$ 。

主要因素的水平变化对指标的影响较大, 所以必须将其控制在最好的水平上。对射流速度而言, 罩壁厚影响最大, 且成反比关系, 在满足侵彻能力的条件下, 选择较小者为好, 同时还可以减少罩材料的使用量及质量, 取 2mm; 楔形角为第二重要因素, 成反比关系, 取  $85^\circ$ ; 药顶高和药厚分别为第三和第四重要因素, 均成正比关系, 应选择较大者为好, 但此时装药线密度和装药质量也增大, 不利于在实际应

表 3 试验结果极差分析

| 试验号   | 因素(列号)    |          |          |        |          |        |          |        | 试验指标                           |             |
|-------|-----------|----------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|--------------------------------|-------------|
|       | 1         | 2        | 3        | 4      |          |        |          |        | $v_{\max}/$                    | $l_{\max}/$ |
|       | $2\alpha$ | $\delta$ | $a$      | $b$    |          |        |          |        | $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | mm          |
| $K_1$ | 42375.74  | 863.08   | 41731.08 | 920.28 | 44589.32 | 840.00 | 44441.90 | 769.89 |                                |             |
| $K_2$ | 43378.12  | 797.12   | 43480.51 | 800.46 | 43644.32 | 842.72 | 43702.75 | 826.37 |                                |             |
| $K_3$ | 45396.57  | 689.99   | 45938.84 | 629.45 | 42916.79 | 667.47 | 43005.78 | 753.93 |                                |             |
| $k_1$ | 4708.42   | 95.90    | 4636.79  | 102.25 | 4954.37  | 93.33  | 4937.99  | 85.54  | 131150.43                      | 2350.19     |
| $k_2$ | 4819.79   | 88.57    | 4831.17  | 88.94  | 4849.37  | 93.64  | 4855.86  | 91.82  |                                |             |
| $k_3$ | 5044.06   | 76.67    | 5104.32  | 69.94  | 4768.53  | 74.16  | 4778.42  | 83.77  |                                |             |
| $R$   | 335.65    | 19.23    | 467.53   | 32.31  | 185.84   | 19.47  | 159.57   | 8.05   |                                |             |

注:  $K_{ij}$  为因素  $j$  的第  $i$  水平指标总和,  $k_{ij}$  为因素  $j$  的第  $i$  水平指标平均值,  $R_j$  为因素  $j$  的极差。由于本设计采用双指标, 即射流最大速度  $v_{\max}$  和射流断裂前最大长度  $l_{\max}$ , 故试验判断指标及数据初步处理中各因素均包含 2 列。

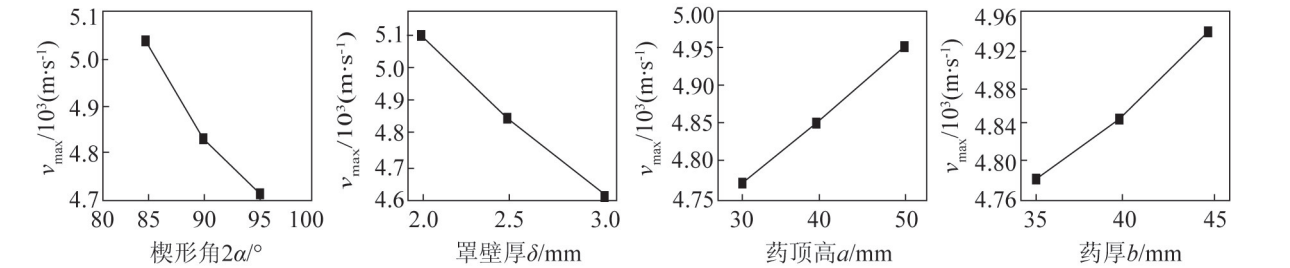


图 3 射流速度与 4 因素关系趋势图

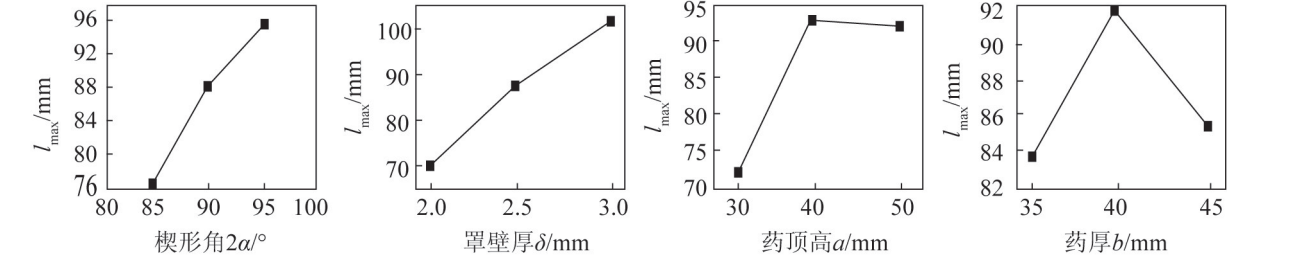


图 4 射流长度与 4 因素关系趋势图



用过程中进行安全防护,在满足侵彻能力的条件下,选择较小者为好,同时还可以克服以上不足之处,分别选择 30mm 和 35mm。因此, $2\alpha_3-\delta_3-a_3-b_3$  也为一种较好的水平组合。

对射流长度而言,罩壁厚影响最大,成正比关系,选择较大者为好,取 3mm;药顶高为第二重要因素,第 1 和第 2 水平相差很小,但减小药顶高有利于减小装药线密度和装药质量,取 40mm;楔形角为第三重要因素,第 1 水平为最佳,取  $95^\circ$ ;药厚为第四重要因素,3 个水平相差不大,但减小药厚有利于减小装药线密度和装药质量,药厚取 35mm。因此, $2\alpha_1-\delta_1-a_2-b_3$  也为一种较好的水平组合。

至此,对于射流速度而言,得到 3 组较好的水平组合,即  $2\alpha_3-\delta_3-a_1-b_3$ 、 $2\alpha_3-\delta_3-a_1-b_1$ 、 $2\alpha_3-\delta_3-a_3-b_3$ 。对于射流长度而言,亦得到 3 组较好的水平组合,即  $2\alpha_2-\delta_1-a_2-b_3$ 、 $2\alpha_1-\delta_1-a_2-b_2$ 、 $2\alpha_1-\delta_1-a_2-b_3$ 。本轮 27 次试验中,没有  $2\alpha_3-\delta_3-a_1-b_1$ 、 $2\alpha_3-\delta_3-a_3-b_3$  和  $2\alpha_1-\delta_1-a_2-b_3$  这 3 个条件,所以需要通过试验对其进行验证。为此,用  $2\alpha_3-\delta_3-a_1-b_1$ 、 $2\alpha_3-\delta_3-a_3-b_3$  和  $2\alpha_1-\delta_1-a_2-b_3$  3 个条件进行数值模拟,6 个较优方案的数值模拟结果如表 4 所示。

表 4 正交设计中较优方案试验

| 试验号 | 因素(列号)         |               |          |          | 试验指标  |                   |
|-----|----------------|---------------|----------|----------|---|-------------------|
|     | 1<br>$2\alpha$ | 2<br>$\delta$ | 3<br>$a$ | 4<br>$b$ | $v_{\max}/$<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $l_{\max}/$<br>mm |
| 1   | $2\alpha_3$    | $\delta_3$    | $a_1$    | $b_3$    | 5473.37   | 58.07             |
| 2   | $2\alpha_3$    | $\delta_3$    | $a_1$    | $b_1$    | 5622.13   | 53.61             |
| 3   | $2\alpha_3$    | $\delta_3$    | $a_3$    | $b_3$    | 5468.32   | 55.59             |
| 4   | $2\alpha_2$    | $\delta_1$    | $a_2$    | $b_3$    | 4257.19   | 151.41            |
| 5   | $2\alpha_1$    | $\delta_1$    | $a_2$    | $b_2$    | 4547.44   | 114.96            |
| 6   | $2\alpha_1$    | $\delta_1$    | $a_2$    | $b_3$    | 4433.12   | 102.52            |

从表 4 可以看出,对于射流速度而言,第 2 号试验的速度最大,第 1 号和第 3 号试验的速度相差不大,第 2 号比第 3 号试验结果大 153.81 m/s,同时第 1 号~第 3 号试验的射流长度差别很小,其楔形角和罩壁厚相同,只有药顶高和药厚不同,而第 3 号试验的装药结构参数最小,对于减小装药线密度和装药质量及安全防护有利。因此,在满足侵彻能力的条件下,选择第 3 号方案即  $2\alpha_3-\delta_3-a_3-b_3$  为较优方案。

对于射流长度而言,第 4 号试验的射流长度最大,第 4 号比第 5 号试验的射流速度小 290.25 m/s,射流长度大 36.45 mm,差别均较大。若选择第 4 号方案,其射流速度较低,对侵彻深度影响较大;而第 5 号方案,其射流速度较大,且射流长度也较大,在

满足侵彻能力的条件下,选择第 5 号方案即  $2\alpha_1-\delta_1-a_2-b_2$  为较优方案。

3 结 论

1)对线型聚能装药结构参数运用  $L_{27}$  正交表进行优化设计,通过对各方案的数值模拟以及对计算结果的极差分析,对射流速度而言,各因素的影响规律由主至次为  $\delta\rightarrow 2\alpha\rightarrow a\rightarrow b$ ;对射流长度而言,各因素的影响规律由主至次为  $\delta\rightarrow a\rightarrow 2\alpha\rightarrow b$ ;

2)以获得较大的射流速度,同时射流断裂前的最大长度较长为指标选择较优方案。对射流速度和射流长度而言,分别选择  $2\alpha_3-\delta_3-a_3-b_3$  和  $2\alpha_1-\delta_1-a_2-b_2$  为较优方案;

3)从以上分析中获得的两个较优方案中究竟选择哪一个为最优方案,还需要进一步结合靶板同时考虑炸高因素做侵彻试验,以侵彻深度作为最终的判断指标,能够获得最大侵彻深度的方案为最优方案。

参 考 文 献

[1] 李裕春,吴腾芳,徐全军,等. 线型聚能装药射流形成过程的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2002,3(3):71-75.

[2] 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.

[3] 刘千寿,白春华,李建平. 线型聚能装药切割器系统参数研究[J]. 工程爆破,2004,10(4):13-16.

[4] 李志强,赵隆茂,刘晓明,等. 微爆索线型切割某战斗机机舱盖的研究[J]. 航空学报,2008,29(4):1049-1054.

[5] 崔宇航,李裕春,吴腾芳,等. 线型聚能装药数值模拟与优化设计[J]. 爆破,2005,22(3):26-29.

[6] 祝逢春,邓振礼,胡瑜. 线性聚能装药切割航空炸弹可靠性评估[J]. 火工品,2000(2):24-26.

[7] 张瑞麟,苏义松. 线型聚能射流应用于船礁切割开孔之案例研究[J]. 爆破器材,2002,31(3):27-29.

[8] 唐献述,龙源,王耀华,等. 大型钢结构厂房拆除控制爆破总体方案设计[J]. 工程爆破,2002,8(4):24-28.

[9] 纪冲,龙源,杨旭,等. 线型聚能切割器在工程爆破中的应用研究[J]. 爆破器材,2004,33(1):32-35.

[10] 王前裕,谢圣权. 线型聚能切割器在岩石预裂成缝中的应用[J]. 中国矿业,2001,10(3):37-41.

[11] Novotney D., Mallery M. Historical Development of Linear Shaped Charge [C]. 43rd AIAA/ASME/SAE/AS-EE Joint Propulsion Conference & Exhibit, USA, Cincinnati,2007.

[12] Yang L. C., Granda L. J., Davis G. E., et al. Dynamic Testing of Large Scale Destruct Charge Assemblies

- [C]. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, USA, Sacramento, 2006.
- [13] Mallery M., Kozlowski T. Performance Analysis of Linear Shaped Charge for Aerospace Applications [C]. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, USA, Tucson, 2005:1-12.
- [14] Whalley I. Development of the STARS II Shroud Separation System [C]. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. USA, Salt Lake City, 2001.
- [15] McGill L. J. Tomahawk Booster Separation System Ground Test Failure Investigation and Results [C]. 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 2000.
- [16] 张华, 郭宝义. 双向线型聚能爆炸切割器的研制[J]. 矿业快报, 2001(20):21-22.
- [17] 王飞, 王连来, 刘广初. 线性切割器正交优化设计与数值模拟研究[J]. 爆破器材, 2006, 35(2):23-26.
- [18] 崔云航, 万文乾, 田七, 等. 线型聚能装药优化设计[J]. 火工品, 2006(4):42-46.
- [19] Lim S. Steady State Equation of Motion of A Linear Shaped Charges Liner [J]. Int. J. Impact Eng., 2012, 44:10-16.
- [20] Jamali A., Nariman-zadeh N., Darvizeh A., et al. Multi-objective Evolutionary Optimization of Polynomial Neural Networks for Modelling and Prediction of Explosive Cutting Process [J]. Eng. Appl. Artif. Intel., 2009, 22(4-5):676-687.
- [21] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组. 正交设计——一种安排多因素试验的数学方法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1976.
- [22] Л. П. 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承伟, 译. 3 版. 北京: 科学出版社, 2011:922-1079.

## Study on the Orthogonal Optimization Design of the Parameters of Linear Shaped Charge Cutting the Protective Door

WU Shuangzhang, GU Wenbin, LI Xufeng, XU Haoming

Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] The different projects of the main structure parameters of some linear shaped charge(LSC) were designed with  $L_{27}(3^{13})$  orthogonal table by the orthogonal optimization method. To obtain better main structure parameters of LSC, all projects were simulated numerically by means of ANSYS/LS—DYNA program. The maximum jet velocity and the maximum prebreakup jet length of the different projects were obtained as 5622.13 m/s and 151.41 mm respectively. The optimal projects were achieved by analyzing the simulation results. Various factors dominating the jet velocity is  $\delta \rightarrow 2\alpha \rightarrow a \rightarrow b$ , and the best projects from the orthogonal table is  $2\alpha_3 - \delta_3 - a_3 - b_3$ . For the jet length, the various dominant factors is  $\delta \rightarrow a \rightarrow 2\alpha \rightarrow b$ , and the best projects from the orthogonal table is  $2\alpha_1 - \delta_1 - a_2 - b_2$ .

[KEY WORDS] linear shaped charge, orthogonal optimization design, jet velocity, jet length

(上接第 11 页)

## Experimental Research on Minimum Ignition Energy of Lycopodium

HUANG Liyuan<sup>①</sup>, CAO Weiguo<sup>①</sup>, XU Sen<sup>①</sup>, ZHANG Jianxin<sup>②</sup>, QIU Shanshan<sup>①②</sup>, PAN Feng<sup>①②</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to obtain the changing regularity of the minimum ignition energy with dust concentration, ignition delay and dusting pressure, lycopodium with the median diameter of  $32\mu\text{m}$  was experimentally studied by 1.2 L Hartmann tube minimum ignition test device. The results have shown that the optimum ignition concentration is  $750\text{ g/m}^3$  and the optimum ignition delay is 90ms, the best dusting pressure is 0.8MPa under the temperature of  $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$  and ambient humidity of  $30\% \pm 5\%$ , just when minimum ignition energy of lycopodium reaches its minimum value. Energy required for inductance ignition is smaller than the non-inductive under the same experimental conditions. The minimum ignition energy of lycopodium is 10 mJ in the presence of inductance, while it is 15 mJ with non-inductive, implying that lycopodium is sensitive to the electric spark.

[KEY WORDS] lycopodium, Hartmann tube, minimum ignition energy, ignition delay, dusting pressure