

文章编号:1006-9941(2023)12-1279-08

# 冲击片雷管四点阵列输出界面作用可靠性设计方法

马文涛<sup>1</sup>,穆慧娜<sup>1</sup>,秦国圣<sup>2</sup>,刘 炜<sup>1</sup>,曾晓云<sup>1</sup>

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;2.陕西应用物理化学研究所,陕西 西安 710061)

**摘要:** 针对冲击片雷管缺乏可靠性量化设计方法的问题,开展了冲击片雷管四点阵列输出界面可靠性设计方法研究。首先基于应力-强度干涉模型提出考虑双裕度系数的可靠性量化设计方法,构建输出性能参数与可靠度指标之间的量化模型;然后对不同设计参数下的输出性能进行仿真,建立输出性能参数与结构设计参数之间的量化模型;最后结合上述两类量化模型,给出了满足冲击片雷管四点阵列输出界面作用可靠度指标要求的结构设计参数。结果表明,该方法可以有效提高冲击片雷管输出界面的可靠性设计精度,实现精确设计。

**关键词:** 冲击片雷管;输出界面;数值模拟;应力-强度干涉模型;裕度;可靠性设计

中图分类号:TJ45

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2023126

## 0 引言

火工品是武器、弹药及其他燃爆装置的关键元件,用于点燃、起爆火炸药,对装置完成启动或做功程序<sup>[1]</sup>。随着武器装备的发展,高可靠性和安全性的火工品获得了快速发展,冲击片雷管技术是最具代表性的成果。在美国第28届引信年会上Gate<sup>[2]</sup>提出了极端钝感爆轰物质起爆系统的概念,即通过多发冲击片雷管同步起爆产生的爆轰波相互叠加,在中心区域内形成超压爆轰,使得区域爆轰波压力超过下级装药的起爆阈值。由于多点阵列冲击片雷管具有小型化、高威力、高可靠性、高安全性的特点,能够满足未来战争对起爆系统的起爆要求,已在钝感弹药系统中广泛应用,例如美军标MIL-STD-2105试验、“标枪、长弓”反坦克导弹等<sup>[3]</sup>。多点阵列冲击片雷管作为起爆系统的始发元器件,其作用可靠性直接影响起爆系统的可靠性,因此对其开展可靠性设计方法研究具有重要理论意义和工程价值。

冲击片雷管可靠性设计是将可靠性的理论和方法

应用到产品设计过程中,即在满足技术指标的前提下,通过合适的方法调整影响输入和输出可靠性的设计参数值,使其技术性能、制造成本、使用寿命达到最优化设计,解决冲击片雷管的“优生”问题。在此原则下,多点阵列冲击片雷管中各级单元的输出性能与各界面间的结构参数匹配问题是其可靠性设计的核心内容。针对上述多点阵列冲击片雷管的结构和特点,许多专家学者对其设计方法进行了研究<sup>[4-5]</sup>。韩克华<sup>[6]</sup>等为探究相同装药量条件下不同数量药柱阵列对冲击片雷管输出压力的影响,对不同阵列数量条件下的输出压力值进行了数值模拟,对比分析得出四点阵列结构为最优设计结构。郭菲<sup>[7]</sup>等为提高冲击片雷管的作用可靠度,采用双裕度系数对其进行优化设计,提高了冲击片雷管的作用可靠性。综上所述,目前针对多点阵列冲击片雷管输出可靠性设计的研究相对较少,缺少可靠性指标与结构设计参数之间的量化模型,对可靠度和设计裕度之间缺乏定量认识,对其设计成本、周期、可靠性的满足程度无法进行科学化评估。

鉴于此,本研究提出一种多点阵列冲击片雷管的输出可靠性设计方法,采用AUTODYN对不同工况下多点阵列的爆轰过程进行了数值模拟,构建了产品设计参数与爆轰输出压力之间的函数模型,结合可靠性设计理论,给出了满足输出界面可靠性指标要求的结构设计参数。

收稿日期:2023-06-08;修回日期:2023-07-31

网络出版日期:2023-10-26

作者简介:马文涛(1999-),男,硕士研究生,主要从事火工品可靠性设计与评估。e-mail:mwtkeepgo@126.com

通信联系人:穆慧娜(1981-),女,副研究员,主要从事复杂系统可靠性与安全性分析与评估。e-mail:mhnzhy@126.com

引用本文:马文涛,穆慧娜,秦国圣,等.冲击片雷管四点阵列输出界面作用可靠性设计方法[J].含能材料,2023,31(12):1279-1286.

MA Wen-tao, MU Hui-na, QIN Guo-sheng, et al. Reliability Design Method of Four-point Array Output Interface of Exploding Foil Initiator[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(12):1279-1286.

## 1 多点阵列冲击片雷管输出界面结构及作用原理

本研究以冲击片雷管四点阵列输出界面为例开展研究,主要结构包括 HNS-IV 药柱、钝感炸药 LLM-105、壳体,结构示意图如图 1 所示。该输出界面的作用过程为 HNS-IV 阵列药柱被起爆后产生爆轰波,在下级装药 LLM-105 上表面中心处汇聚形成超压爆轰,当局部爆轰波压力大于 LLM-105 的起爆压力阈值时发生爆炸,从而可以实现该冲击片雷管直接起爆不敏感战斗部主装药的功能。

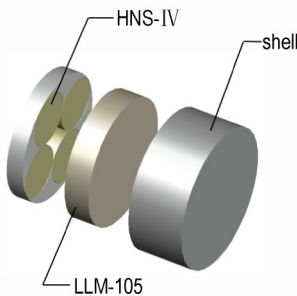


图 1 冲击片雷管四点阵列输出界面结构示意图

Fig.1 The diagram of the output interface structure of a Four-point Array Exploding Foil Initiator

## 2 可靠性设计方法

根据冲击片雷管四点阵列输出界面的结构特性及作用原理,本研究提出的可靠性设计方法如下:

(1) 构建可靠性量化设计模型。将设计及安全裕度系数作为约束条件,基于应力-强度干涉模型建立可靠度指标与输出性能参数之间的量化设计模型,获得满足可靠性设计要求的输出性能参数范围。

(2) 建立输出性能参数与结构设计参数之间的量化模型。选取四点 HNS-IV 阵列输出压力作为该界面输出性能表征参数,采用 AUTODYN 对该阵列在不同药柱密度、直径和高度工况下的输出压力进行数值模拟,构建输出压力与结构设计参数之间的量化模型。

(3) 对输出界面的结构参数进行优化设计。根据可靠度设计值和双裕度系数约束值,结合(1)和(2)的量化模型,获得满足可靠性指标要求的 HNS-IV 药柱密度、直径和高度,完成输出界面的可靠性优化设计。

### 2.1 构建可靠性量化设计模型

应力-强度干涉模型在工程中被广泛应用,应力-强度干涉理论认为:可靠性是产品在给定的运行条

件下对抗失效的能力,即应力与强度相互作用的结果,当产品受到的应力大于强度时,就会发生失效<sup>[8]</sup>。针对该输出界面,从其作用可靠度而言,四点 HNS-IV 阵列药柱的输出压力可以看作广义“强度”,LLM-105 的起爆压力阈值可以看作广义“应力”,为使其满足可靠性指标要求,该输出界面可靠度  $R_f$  为:

$$R_f = P(X > Y) \quad (1)$$

式中,  $X$  为 HNS-IV 阵列的输出压力, GPa;  $Y$  为 LLM-105 的起爆压力阈值, GPa。

假设 HNS-IV 阵列的输出压力  $X$  和 LLM-105 的起爆压力阈值  $Y$  对应的概率密度函数分别为  $f(x)$  和  $g(y)$ ,可靠度计算公式为:

$$R_f = P(X > Y) = \int_0^{+\infty} g(y) \left[ \int_y^{+\infty} f(x) dx \right] dy \quad (2)$$

由式(2)可得,若已知 HNS-IV 阵列的输出压力和 LLM-105 的起爆压力阈值的分布模型及参数就可以计算可靠度值。反之,若已知要求的可靠度值,由(2)式可反推 HNS-IV 阵列输出压力分布参数,该过程即为可靠性设计。由于冲击片雷管四点阵列输出界面在炸药选择、生产及装配时会引入各种不确定性因素, HNS-IV 阵列的输出压力和 LLM-105 的起爆压力阈值均具有随机性。根据上述各参数特性和工程经验,分别设 HNS-IV 阵列输出压力  $X$  服从正态分布  $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ , LLM-105 起爆压力阈值  $Y$  服从  $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ , 令  $Z = X - Y$ 。由正态分布的性质可知,  $Z$  服从正态分布  $N(\mu_z, \sigma_z^2)$ ,  $\mu_z = \mu_x - \mu_y, \sigma_z^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ , 则  $R_f$  的计算公式为:

$$\begin{aligned} R_f &= P(Z > 0) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] dz \\ &= \Phi\left(\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布函数。

在起爆压力阈值的分布模型及参数、设计可靠度指标  $R_f$  已知的情况下,可由式(3)获得满足要求的输出压力分布参数。设 HNS-IV 阵列输出压力  $X$  对应的变差系数为  $k$ , 式(3)可转化为:

$$(1 - k^2 u_{R_f}^2) \mu_x^2 - 2\mu_x \mu_y + \mu_y^2 - (\mu_{R_f} \sigma_y)^2 = 0 \quad (4)$$

式中,  $k = \sigma_x / \mu_x$ , 可根据相似产品的历史试验数据获得。

则 HNS-IV 阵列的输出压力均值  $\mu_x$  为:

$$\mu_x = \frac{\mu_y + u_{R_f} \sqrt{k^2 \mu_y^2 + \sigma_y^2 - k^2 u_{R_f}^2 \sigma_y^2}}{1 - k^2 u_{R_f}^2} \quad (5)$$

为保障武器系统的可靠性及安全性,多点阵列冲击片雷管作为传爆序列的起爆元件,应综合考虑其作用可靠性的设计裕度和安全裕度,既要确保下级装药能可靠被起爆,并兼顾上级装药的输出压力不会过度溢出,使得该界面能够有效传递爆轰能量。根据多点阵列冲击片雷管输出界面的成本、技术条件、复杂程度等因素确定设计裕度为  $M_D$  和安全裕度  $M_S$ ,则输出压力设计值  $\mu'_x$  应满足以下约束:

$$\begin{cases} M_D \mu_y \leq \mu'_x \leq M_S \mu_y \\ \mu_x \leq \mu'_x \end{cases} \quad (6)$$

即满足设计可靠度的 HNS-IV 阵列输出压力设计值  $\mu'_x$  应在式(6)所示范围内。

### 2.2 构建输出性能参数与结构设计参数之间的量化模型

根据输出界面的结构及作用过程可知,在药柱圆心距固定时,影响四点 HNS-IV 阵列输出压力的主要结构参数为 HNS-IV 的药柱密度  $\rho$ 、直径  $d$  和高度  $h$  (相邻药柱间距  $l$ )。针对上述 3 个关键参数,采用 AUTODYN 对不同工况下该界面的爆轰传递过程进行数值模拟,研究 HNS-IV 阵列输出压力随结构参数的变化规律,构建两者量化模型,模拟工况如表 1 所示。

表 1 模拟工况

Table 1 Simulation conditions

| Conditions | $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | $d(l) / \text{mm}$ | $h / \text{mm}$ |
|------------|--|--------------------|-----------------|
| 1          | 1.40                                   | 3.0 (2.0)          | 4.0             |
|            | 1.55                                   |                    |                 |
|            | 1.65                                   |                    |                 |
| 2          | $\rho_m$                               | 1.5 (3.5)          | 4.0             |
|            |  | 2.4 (2.6)          |                 |
|            |  | 3.0 (2.0)          |                 |
|            |  | 3.6 (1.4)          |                 |
|            |  | 4.5 (0.5)          |                 |
| 3          | $\rho_m$                               | $d_m(l_m)$         | 2.0             |
|            |  |                    | 3.2             |
|            |  |                    | 4.0             |
|            |  |                    | 6.0             |

Note: 1)  $\rho$  is the density of the explosive; 2)  $d$  is the diameter of the explosive; 3)  $l$  is the spacing of the explosive; 4)  $h$  is the height of the explosive; 5)  $\rho_m$  is the density of the explosive with the maximum converging pressure; 6)  $d_m$  is the diameter of the explosive with a suitable converging pressure margin; 7)  $l_m$  is the explosive spacing with the maximum converging pressure.

### 2.2.1 有限元模型建立

针对该冲击片雷管输出界面,设置四点 HNS-IV 阵列相邻圆心距的初始值为 5 mm, LLM-105 药柱直径为 14 mm, 高度为 6 mm, 壳体厚度为 1 mm, 利用 HYPERMESH 建立该界面物理模型, 如图 2 所示, HNS-IV 为施主装药, LLM-105 为受主装药, 壳体材料选用 STEEL V250。采用单位制为 cm-g- $\mu$ s, 模型设置网格尺寸为 0.2 mm, 建立有限元计算模型。采用流固耦合算法定义流体与结构之间的相互作用, 其中流体采用 Euler 算法, 壳体结构采用 Lagrange 算法, 炸药爆炸后向结构施加爆轰压力加载, 结构相当于流体的边界条件。四点 HNS-IV 阵列考虑同步点起爆, 在各自的中心位置设置起爆点。分别在 HNS-IV 和 LLM-105 的中心位置设置观测点, 以 LLM-105 药柱下表面为起点, 设置间隔为 0.1 mm 以监测输出压力和反应度情况, 如图 3 所示。

### 2.2.2 状态方程及材料参数

上级装药材料选取 HNS-IV, 通过 JWL 状态方程描述其爆轰产物的状态, JWL 表达式为:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (7)$$

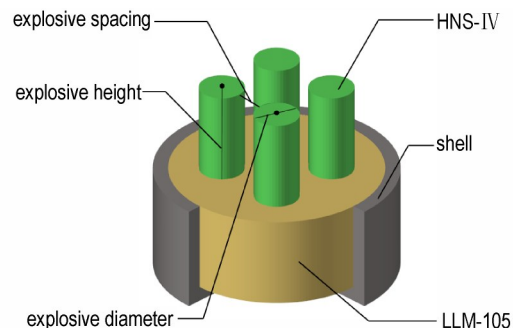


图 2 冲击片雷管四点阵列输出界面物理模型

Fig.2 The physical model of the output interface of the Four-point Array Exploding Foil Initiator

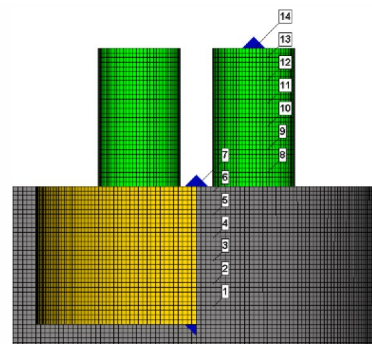


图 3 有限元网格模型

Fig.3 Finite element mesh model

式中,  $p$  为爆轰产物的压力, GPa,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$ 、 $E_0$  为 JWL 状态方程参数,  $V$  为相对体积, 具体参数见表 2。

表 2 HNS-IV 炸药材料参数<sup>[9]</sup>

Table 2 Material parameters of HNS-IV<sup>[9]</sup>

| $\rho$                            | $D$                               | $P$   | $A \times 10^2$ | $B \times 10^2$ | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $E_0$  |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------------|-----------------|-------|-------|----------|--------|
| / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ | / GPa | / GPa           | / GPa           |       |       |          |        |
| 1.40                              | 6.340                             | 14.5  | 3.665           | 0.067           | 4.80  | 1.40  | 0.32     | 0.0600 |
| 1.55                              | 6.890                             | 18.9  | 4.690           | 0.130           | 4.58  | 1.79  | 0.30     | 0.0845 |
| 1.65                              | 7.030                             | 21.5  | 4.630           | 0.088           | 4.55  | 1.35  | 0.35     | 0.0745 |

### 2.2.3 模型验证

为提高阵列式起爆界面作用过程模拟的计算精度, 首先对单 HNS-IV 药柱起爆 LLM-105 药柱的过程进行研究, 然后设计相应的现场试验, 最后根据试验结果对仿真参数进行优化。

采用图 4 所示的单元 HNS-IV 药柱模型进行模拟, 其中 HNS-IV 密度为  $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 直径为 4 mm, 高度为 4 mm, 图 5 为观测点 7 (即 LLM-105 上表面中心) 的输出压力变化曲线。可知单元 HNS-IV 药柱仿真模拟输出压力约为 18.5 GPa。

为验证模拟结果, 利用锰铜压阻法对相同尺寸的单点 HNS-IV 药柱爆轰输出压力进行测试。为保证测

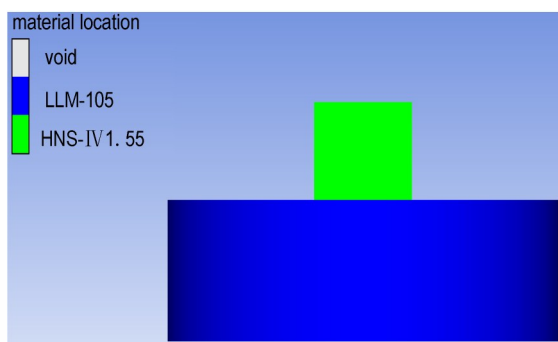


图 4 单点 HNS-IV 药柱仿真模型

Fig.4 The simulation model of a single-point HNS-IV grain

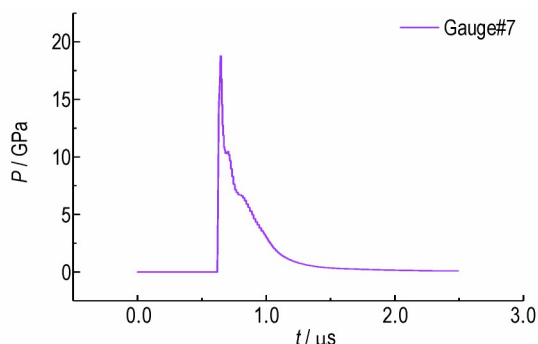


图 5 HNS-IV 爆轰输出压力变化曲线

Fig.5 The output pressure change curve of the HNS-IV grain

量精度, 使药柱下表面与 1 mm 厚的有机玻璃紧贴, 试验采用微型锰铜压阻传感器采集有机玻璃另一端面处的冲击波压力  $p_{m1}$ , 然后利用冲击波在有机玻璃中的衰减规律推导入射初始冲击波压力  $p_{m0}$ , 试验结果如表 3 所示。

表 3 HNS-IV 药柱输出压力试验结果<sup>[10]</sup>

Table 3 The results of HNS-IV grain output pressure test<sup>[10]</sup>

| serial number | $p_{m1}$ / GPa | $p_{m0}$ / GPa |
|---------------|----------------|----------------|
| 1             | 15.77          | 19.79          |
| 2             | 13.14          | 16.49          |
| 3             | 13.69          | 17.18          |
| 4             | 14.54          | 18.20          |
| 5             | 14.14          | 17.74          |
| 6             | 14.57          | 18.29          |

Note: 1)  $p_{m1}$  is the terminal shock wave pressure; 2)  $p_{m0}$  is the initial shock wave pressure.

由表 3 可得, 单元 HNS-IV 药柱的输出压力平均值为 17.95 GPa, 相同结构条件下的仿真结果为 18.5 GPa, 相对误差仅为 3.1%, 满足工程需求。但在仿真计算中参数设置及材料均处于理想状态, 无法考虑试验过程中由于原材料、加工工艺等因素随机性导致的误差, 导致试验测试结果比仿真结果稍低。

### 2.2.4 设计参数对输出压力影响规律研究

#### 2.2.4.1 药柱密度的影响

按照工况 1, 在 HNS-IV 药柱高度为 4.0 mm, 直径为 3.0 mm (相邻药柱间距为 2.0 mm) 的工况下进行模拟, 研究 HNS-IV 阵列药柱密度对输出压力的影响规律, 图 6 为观测点 7 (即 LLM-105 上表面中心) 在不同密度条件下的输出压力变化曲线。

如图 6 所示, 在 HNS-IV 药柱密度为  $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时, 作用在 LLM-105 上表面中心压力约为 6.0 GPa, 略大于 LLM-105 的起爆压力阈值 5.8 GPa<sup>[11]</sup>。由于此时传入 LLM-105 中的冲击波压力较小, 爆轰成长所需时间较长, 因此在 LLM-105 内部反应初期存在一个压力缓慢增长的过程。在药柱密度分别为  $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时, 作用在 LLM-105 上表面中心压约为 20 GPa, 远大于 LLM-105 的起爆压力阈值, 并且 LLM-105 内部的爆轰波能够得以迅速成长。故本文选取 HNS-IV 密度为  $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  进行后续仿真分析。

#### 2.2.4.2 药柱直径的影响

按照工况 2, 在 HNS-IV 密度为  $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 高度为 4.0 mm 的工况下进行模拟, 研究 HNS-IV 阵列药柱直径对输出压力的影响规律, 图 7 为观测点 7 (即

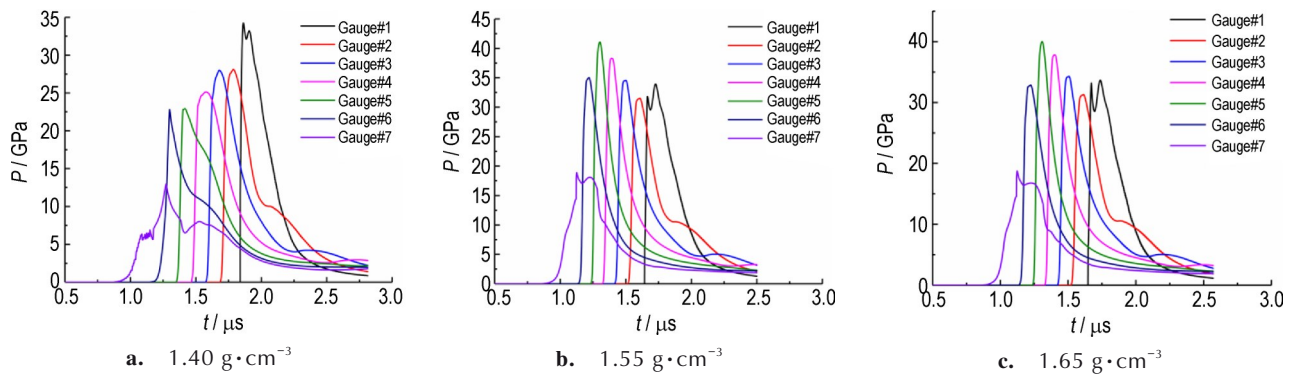


图6 不同密度条件下汇聚到LLM-105上表面中心压力变化曲线

Fig.6 The pressure change curves converged to upper surface center of the LLM-105 on different density conditions

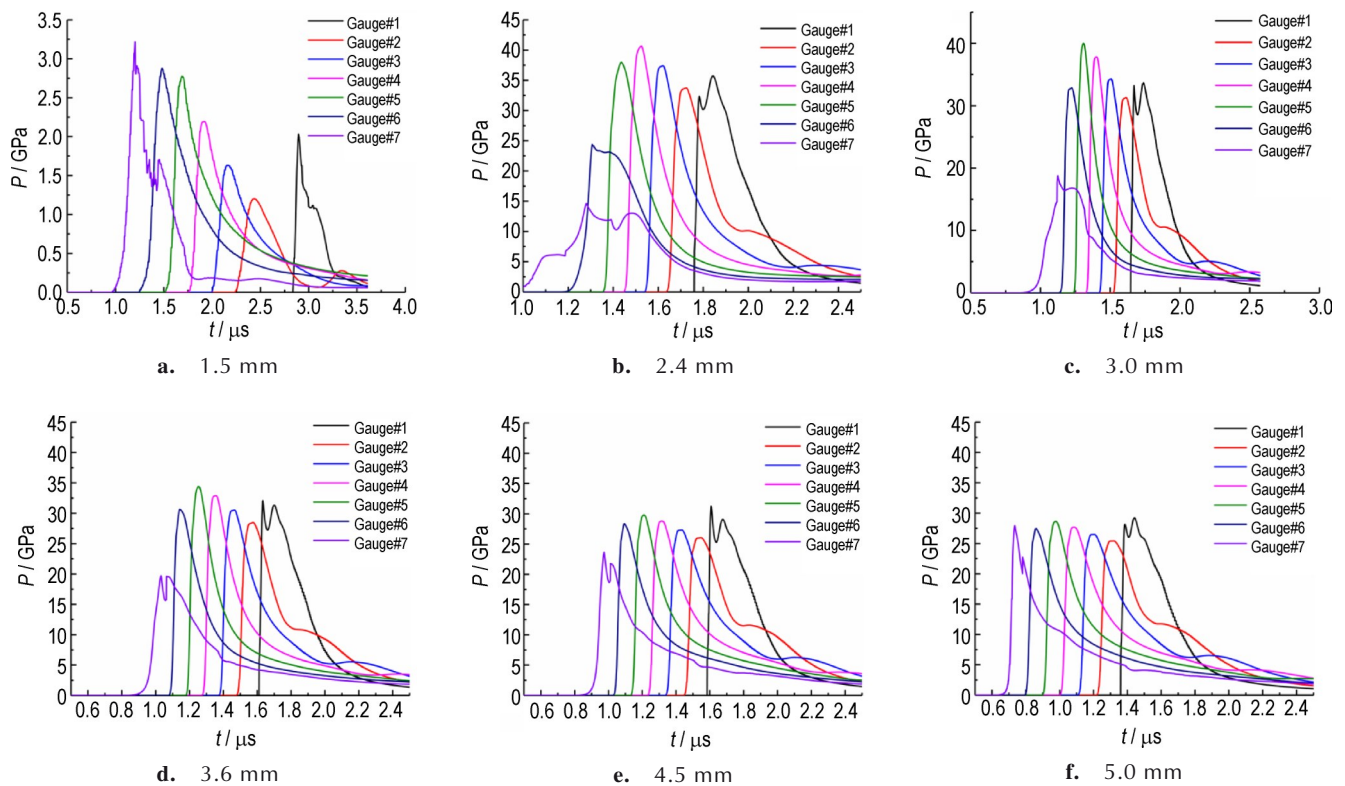


图7 不同直径条件下汇聚到LLM-105上表面中心压力变化曲线

Fig.7 The pressure change curves converged to the upper surface center of the LLM-105 on different diameter conditions

LLM-105上表面中心)在不同直径条件下的输出压力变化曲线。

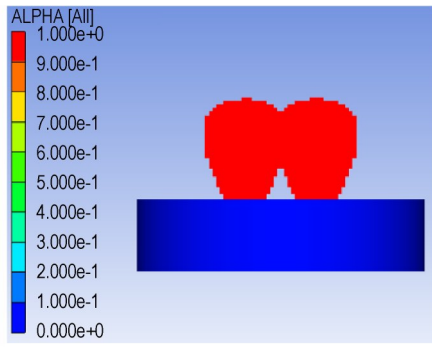
如图7a所示,药柱直径为1.5 mm时(相邻药柱间距为3.5 mm),汇聚到LLM-105上表面中心压力最大值约为3.2 GPa,远小于LLM-105的起爆压力阈值,不能起爆。此时输出界面的反应度情况(ALPHA)如图8所示。

如图7b所示,药柱直径为2.4 mm时(相邻药柱间距为2.6 mm),汇聚到LLM-105上表面中心压力约为6.1 GPa,大于LLM-105的起爆压力阈值,可以被起爆,但此时LLM-105内部的爆轰波成长较为缓慢。由

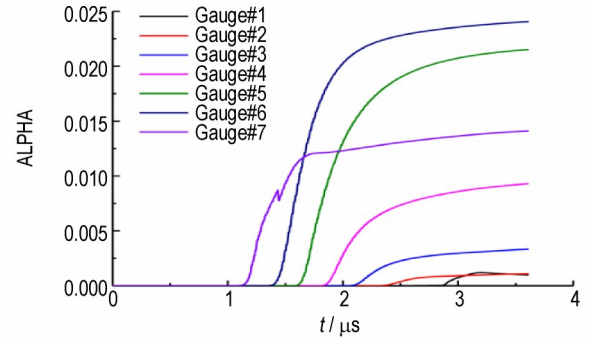
图7c~7f可知,直径为3.0~5.0 mm时,汇聚到LLM-105上表面中心压力均达到15 GPa以上,炸药迅速发生反应并成长为爆轰。不同直径条件下汇聚到LLM-105上表面中心压力如表4所示。

#### 2.2.4.3 药柱高度的影响

按照工况3,在HNS-IV药柱密度为 $1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,直径为3.0 mm(相邻药柱间距为2.0 mm)的工况下进行模拟,研究HNS-IV阵列药柱高度对输出压力的影响规律,图9为观测点7(即LLM-105药柱上表面中心)在不同高度条件下的输出压力变化曲线。



a. ALPHA cloud



b. ALPHA curve

图8 药柱直径为 1.5 mm 时输出界面的反应度

Fig.8 The reactivity of the output interface when the grain diameter is 1.5 mm

表4 不同直径条件下汇聚到 LLM-105 上表面中心的压力

Table 4 The upper surface central pressure of the LLM-105 on different diameter conditions

| $d / \text{mm}$  | 1.5 | 2.4 | 3.0  | 3.6  | 4.5  | 5.0  |
|------------------|-----|-----|------|------|------|------|
| $P / \text{GPa}$ | 3.2 | 6.1 | 18.7 | 19.7 | 23.7 | 27.9 |

Note: 1)  $d$  is the diameter of the explosive; 2)  $P$  is the surface central pressure of LLM-105.

如图 9a 所示, HNS-IV 药柱高度为 2.0 mm 时, 汇聚到 LLM-105 上表面中心压力约为 6.3 GPa, 大于 LLM-105 的起爆压力阈值, 可以完成起爆, 但 LLM-105 内部爆轰波成长较为缓慢。由图 9b~9e 可

知, 高度为 3.2~6.0 mm 时, 汇聚到 LLM-105 上表面中心压力均达到 15 GPa 以上, 且随着高度的增加而增大。在强压力作用下, LLM-105 迅速发生反应并成长为爆轰。不同高度条件下汇聚到 LLM-105 的上表面中心压力如表 5 所示。

2.2.5 构建输出压力与结构参数之间的量化模型

根据上述仿真结果, 在 HNS-IV 药柱密度为  $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时, 采用 MATLAB 的三次插值法建立四点 HNS-IV 阵列输出压力  $P$  与药柱直径  $d$ 、高度  $h$  之间的量化模型, 结果如图 10 所示。根据该模型可以给出

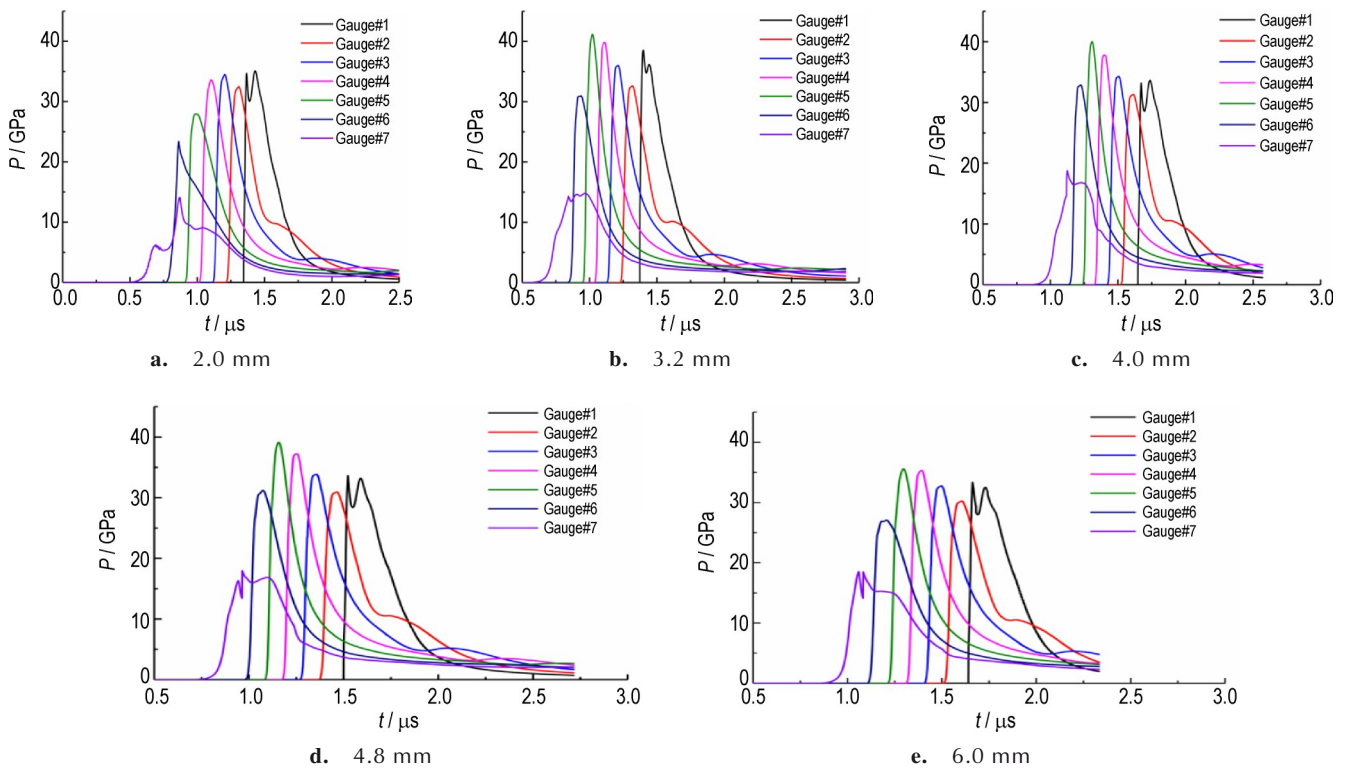


图9 不同高度条件下汇聚到 LLM-105 上表面中心压力变化曲线

Fig.9 The pressure change curves converged to the upper surface center of the LLM-105 on different height conditions

表5 不同高度条件下汇聚到LLM-105上表面中心压力

Table 5 The upper surface central pressure of the LLM-105 on different height conditions

| $h / \text{mm}$  | 2.0 | 3.2  | 4.0  | 4.8  | 6.0  |
|------------------|-----|------|------|------|------|
| $P / \text{GPa}$ | 6.3 | 14.8 | 18.7 | 18.0 | 18.5 |

Note: 1)  $h$  is the height of the explosive; 2)  $P$  is the surface central pressure of LLM-105.

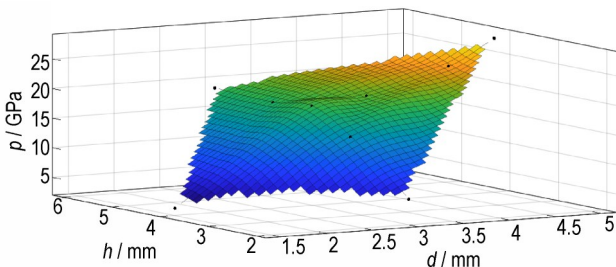


图10 LLM-105上表面中心压力与HNS-IV直径、高度的函数关系模型

Fig.10 The functional relationship model of the LLM-105 upper surface center pressure and the diameter and height of the HNS-IV

同输出压力下对应的药柱直径 $d$ 和高度 $h$ ,亦可获得不同药柱直径 $d$ 和高度 $h$ 下对应的输出压力。

### 3 可靠性设计方法应用

某冲击片雷管四点阵列输出界面的可靠度指标要求为0.9995,选择四点HNS-IV阵列药柱密度为 $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,直径为 $1.5 \sim 5.0 \text{ mm}$ ,高度为 $2 \sim 6 \text{ mm}$ 。

设HNS-IV阵列输出压力服从正态分布 $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ ,变差系数 $k = 0.05$ ;LLM-105起爆压力阈值服从正态分布 $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ <sup>[11]</sup>。查询标准正态分布表可知 $\mu_{0.9995} = 3.3$ ,将以上数据代入式(5),可得:

$$\mu_x = \frac{5.80 + 3.3 \sqrt{0.05^2 \times 5.80^2 + 0.15^2 - 0.05^2 \times 3.3^2 \times 0.15^2}}{1 - 0.05^2 \times 3.3^2} = 7.07$$

采用技术人员选用的设计及安全裕度作为约束,令设计裕度 $M_D = 1.2$ ,安全裕度 $M_S = 1.5$ ,代入式(6),可得同时满足该输出界面作用可靠度双裕度系数约束条件的HNS-IV阵列输出压力设计值范围为:

$$7.07 \leq \mu'_x \leq 8.70$$

将获得的压力范围将代入图10的量化模型中,可得满足输出界面作用可靠性的结构设计参数组。表6列出了4组典型的设计结果。

假设实际工程中,选取结构2进行设计,由图10可得该设计结构下对应的输出压力为7.26 GPa,此时

表6 满足可靠性指标要求时HNS-IV阵列的结构设计参数

Table 6 The structural design parameters of the HNS-IV array that meet the reliability index requirements

| Design structure | $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | $d / \text{mm}$ | $h / \text{mm}$ | $R_D$   |
|------------------|--|-----------------|-----------------|---------|
| 1                | 1.65                                   | 1.97            | 4.32            | 0.9995  |
| 2                |  | 1.98            | 4.44            | 0.9999  |
| 3                |  | 2.03            | 4.35            | 0.99995 |
| 4                |  | 2.04            | 4.44            | 0.99999 |

Note: 1)  $\rho$  is the density of the explosive; 2)  $d$  is the diameter of the explosive; 3)  $h$  is the height of the explosive; 4)  $R_D$  is the design reliability.

输出界面作用可靠度为0.9999,满足指标要求。工程应用中,当产品设计出来后,对其进行可靠性预计,若由于参数随机性和误差影响导致产品无法满足指标要求,则需要对其进行优化设计,直至满足为止。

为提高设计精度,做以下分析:

(1)在构建可靠量化设计模型过程中,需确定上级装药的输出性能参数及下级装药的起爆阈值分布。一般来说,炸药的输出性能参数服从正态分布,起爆阈值服从正态分布、对数正态分布、逻辑斯谛分布或对数逻辑斯谛分布等<sup>[12]</sup>。具体的参数及分布模型需根据可靠性试验数据拟合得到或参考同类型产品的分布模型。

(2)在研制周期和成本允许的情况下,可采取均匀设计法、Box-Behnken设计法等获取不同设计工况下的试验数据,然后建立输出性能参数与结构设计参数之间的量化模型;在工程条件受限的情况下,可采取数值模拟进行辅助设计,在仿真过程中需要根据产品的实际结构和特性选择合适、合理的算法,模型和参数等,以减少由于数值模拟理想性带来的误差。

(3)量化模型的构建需确定相关的输入参数,如四点HNS-IV阵列输出压力的变差系数、设计裕度及安全裕度等。由于输出压力具有一定的随机性,引入变差系数更能反映产品因生产、材料、工艺等影响带来的误差,为更好地覆盖以上因素对产品可靠性的影响,可根据同类型产品历史数据的统计获得。设计裕度及安全裕度的选取需要根据实际工程设计确定,即在产品设计技术、工艺相对成熟等的条件下,选取较低值;相反,选取较高值。

### 4 结论

本研究针对冲击片雷管缺乏可靠量化设计方法的问题,基于冲击片雷管四点阵列输出界面的结构及作用原理,提出了一种数值模拟和可靠性理论相结合

的可靠性设计方法,获得结论如下:

(1)基于应力-强度干涉模型,采用设计及安全裕度的双裕度设计模型作为约束对该界面进行可靠性量化设计,建立了可靠度指标与输出压力之间的量化模型,给出满足要求的输出压力范围为7.07~8.70 GPa;

(2)基于输出界面中HNS-IV阵列在不同密度、直径及高度设计工况下作用的数值模拟结果,建立了输出压力与结构参数之间的量化模型;

(3)基于可靠性设计指标结合本文提出的方法,给出了满足不同可靠度指标要求的4种结构设计参数,工程设计人员可根据实际应用背景、成本等因素选择合适的产品结构。

#### 参考文献:

- [1] 刘卫,褚恩义,刘兰,等.基于飞片冲击起爆原理的微起爆序列技术研究进展[J].含能材料,2023,31(6):606-634.  
LIU Wei, CHU En-yi, LIU Lan, et al. Review on micro fire-train based on flyer impact initiation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(6):606-634.
- [2] GATES R. Navy overview [C]//52th Annual Fuze Conference. Sparks, NV, US: National Defense Industrial Association, 2008.
- [3] COPE R. Navy overview [C]//53th Annual Fuze Conference. Lake Buena Vista, FL, US: National Defense Industrial Association, 2009.
- [4] GUO Jun-feng, ZENG Qing-xuan, QIN Guo-sheng, et al. Initiation and overdriven detonation of high explosives using multipoint initiation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(4):423-428.
- [5] WANG Peng, MA Tie-hua, CUI Chun-sheng. The design on slapper detonator initiating system of miniature and high efficiency[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2017, 40(2): 486-489.
- [6] 韩克华,任西,李慧,等.冲击片雷管多点同步起爆爆轰波压力的数值模拟和试验[J].含能材料,2016,24(1):38-44.  
HAN Ke-hua, REN Xi, LI Hui, et al. Simulation and experimental studies on the multi-point synchronization detonation overpressure of slapper detonators[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(1):38-44.
- [7] 郭菲,王窈,吕军军,等.冲击片雷管双裕度系数设计方法研究[J].兵工学报,2017,38(11):2093-2097.  
GUO Fei, WANG Yao, LV Jun-jun, et al. Research on double margin coefficient design method of slapper detonator[J]. *Defence Technology*, 2017, 38(11):2093-2097.
- [8] YE Ke-wei, WANG Han, MA Xiao-bing. A generalized dynamic stress-strength interference model under  $\delta$ -failure criterion for self-healing protective structure [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 229:108838.
- [9] 陈清畴,蒋小华,李敏,等.HNS-IV炸药的点火增长模型[J].爆炸与冲击,2012,32(3):328-332.  
CHEN Qing-chou, JIANG Xiao-hua, LI Min, et al. Ignition and growth reactive flow model for HNS-IV explosive[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(3):328-332.
- [10] 刘增军.两级爆炸驱动飞片的冲击起爆技术研究[D].南京:南京理工大学,2016.  
LIU Zeng-jun. Study on the shock initiation technology of two step explosive driven flyer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [11] 刘永刚,黄忠,余雪江.新型钝感含能材料LLM105的研究进展[J].爆炸与冲击,2004(5):465-469.  
LIU Yong-gang, HUANG Zhong, YU Xue-jiang. Progress of research of new insensitive energetic material LLM105[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004(5):465-469.
- [12] 伊泉剑,董海平,翟志强,等.基于应力-强度干涉模型的火工品可靠性设计方法[J].北京理工大学学报,2014,34(10):1007-1011.  
YI Xiao-jian, DONG Hai-ping, ZHAI Zhi-qiang, et al. Reliability design for initiating devices based on stress-strength interference model[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(10):1007-1011.

## Reliability Design Method of Four-point Array Output Interface of Exploding Foil Initiator

MA Wen-tao<sup>1</sup>, MU Hui-na<sup>1</sup>, QIN Guo-sheng<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, ZENG Xiao-yun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of reliability quantitative design method of the Exploding Foil Initiator (EFI), the reliability design method for the Four-point Array output interface of EFI is studied. Firstly, based on the Stress-strength interference model, the reliability quantitative design method considering double margin coefficients is proposed, and the quantitative model between output performance parameters and reliability index is constructed. Then, the output performance of the output interface on different design parameters is simulated, and the quantitative models between the output performance parameters and structural design parameters is established. Finally, combined with the above two types of quantitative models, the structural parameters that meet the requirements of the output interface reliability design index of the four-point array slapper detonator are given. The results show that the method can effectively improve the reliability design accuracy of EFI's output interface and then achieve accurate design.

**Key words:** exploding foil initiator; output interface; numerical simulation; stress-strength interference model; margin; reliability design

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023126

(责编:高毅)