doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.04.002

不同温度下 CL-20 机械感度阈值的量化研究*

方鸣坤① 张 宇② 马智勇① 吴星亮① 孙 磊③ 曾 丹③ 徐 森①④
①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)
②南京理工大学安全科学与工程学院(应急管理学院)(江苏南京,210094)
③中国兵器工业火炸药工程与安全技术研究院(北京 100053)
④国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 在现有的感度试验方法中,特性落高法只能得出 50% 爆炸概率的特性落高,BAM 试验结果只能得出临界撞击能量和载荷压力,而兰利-D 最优化法能够得到不同发火概率下的机械感度。因此,采用兰利-D 最优化法,研究 CL-20 在机械作用下的不同发火概率临界反应阈值及温度对临界反应阈值的影响。使用 BAM 撞击和摩擦感度仪,对 ε 型 CL-20 开展机械感度阈值研究;采用特性落高法和兰利-D 最优化法,研究撞击能量阈值;采用 BAM 摩擦感度试验和兰利-D 最优化法,研究载荷压力阈值。通过兰利-D 最优化法,得到了 CL-20 在 1%、0.000 1% 发火概率下的撞击能量阈值和载荷压力阈值,分析了火炸药 1%、0.000 1% 发火概率在实际安全生产中的应用。结果显示:30、60 ℃和 90 ℃温度下,采用特性落高法得到 CL-20 的 50% 发火概率的撞击能量阈值 E_{50} 分别为 2 434.32、2 215.11、1 955.36 mJ,兰利-D 最优化法所得 E_{50} 分别为 2 504.40、2 297.15、2 014.63 mJ,撞击感度随温度的上升呈现升高趋势;采用 BAM 试验得到 CL-20 的载荷压力分别为 64、56、48 N,兰利-D 最优化法得到 50% 发火概率的载荷压力阈值 p_{50} 分别为 100.35、92.77、78.86 N,摩擦感度随着温度的上升同样呈现升高趋势。

[关键词] CL-20;机械感度;温度;兰利-D 最优化法;阈值量化
[分类号] TQ560.7

Quantification of CL-20 Mechanical Sensitivity Threshold at Different Temperatures

FANG Mingkun①, ZHANG Yu②, MA Zhiyong①, WU Xingliang①, SUN Lei③, ZENG Dan③, XU Sen①④
①School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)
②School of Safety Science and Engineering (School of Emergency Management), Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)
③China Safety Technology Research Academy of Ordnance Industry (Beijing, 100053)
④China National Quality Inspection and Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In the existing sensitivity testing methods, characteristic drop height method can only obtain the characteristic drop height with a 50% probability of explosion H_{50}, BAM test results can only obtain the critical impact energy and load pressure, while Langlie-D optimization method can obtain the mechanical sensitivity under different ignition probabilities. Therefore, the critical reaction threshold of CL-20 with different ignition probabilities under mechanical action and the influence of temperature on the critical reaction threshold were studied using Langlie-D optimization method. The mechanical sensitivity threshold of ε-type CL-20 was studied by BAM impact and a friction sensitivity meter. The impact energy threshold was studied by characteristic drop height method and Langlie-D optimization method. The load pressure threshold was studied by BAM test and Langlie-D optimization method. The impact energy threshold and load pressure threshold of CL-20 at 1% and 0.000 1% ignition probabilities were obtained by Langlie-D optimization method. And the application of 1% and 0.000 1% ignition probabilities of explosives in practical safety production was analyzed. The results show that, at 30, 60 ℃ and 90 ℃, the impact energy threshold E_{50} for the 50% ignition probability of CL-20 obtained by characteristic drop height method is 2 434.32, 2 215.11 mJ and 1 955.36 mJ, respectively. E_{50} obtained by Langlie-D optimization method is 2 504.40, 2 297.15 mJ and 2 014.63 mJ, respectively. The impact sensitivity shows an increasing trend with

* 收稿日期:2024-07-07
第一作者:方鸣坤(2000—),男,硕士研究生,主要从事含能材料安全性方面的研究。E-mail:fmk0111@163.com
通信作者:徐森(1981—),男,教授,主要从事爆炸品安全技术的研究。E-mail:xusen@njust.edu.cn

the rise of temperature. The load pressure of CL-20 obtained by BAM method is 64, 56 N and 48 N, respectively. The load pressure threshold p_{50} for 50% ignition probability obtained by Langlie-D optimization method is 100.35, 92.77 N and 78.86 N, respectively. The friction sensitivity also shows an increasing trend with the rise of temperature.

[**KEYWORDS**] CL-20; mechanical sensitivity; temperature; Langlie-D optimization method; threshold quantization

0 引言

六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)是目前能量密度最高的单质炸药[1-3],主要应用于高能发射药、固体推进剂及混合炸药等方面[4-5]。

由于 CL-20 机械感度较高,在生产、储存、运输、使用等环节中存在安全隐患。近年来,国内针对不同高能炸药开展了大量感度试验研究[4-8]。但这些研究只能定性分析含能材料感度。要定量分析含能材料的感度,必须选用新的感度试验方法。

从 20 世纪初的非序贯试验方法到 20 世纪 40 年代后出现的序贯试验方法[9-14],感度试验方法已经发展了 100 多年。1948 年,Dixon 等[15]提出了预估中位数的升降法(布鲁塞顿法)。1962 年,Langlie 提出一种变步长试验方法——兰利法,克服了升降法无法改变步长的缺陷,减少了试验的样本量[16]。1994 年,Neyer[17]率先采用最优化思想,克服了之前的序贯方法对标准偏差预估较差的问题,采用行列式最优化(D 最优化)选取下一试验点,克服了选点盲目的问题。近 20 年,国内外很多学者通过模拟软件对不同感度试验方法的试验结果进行了分析研究[18-22]。目前,含能材料感度测试一般选用 GJB 772A—1997 标准中的试验方法进行,但量化效果较差,仅能定性地分析含能材料的危险度,并不能给出一个量化的阈值。

因此,针对 CL-20,选用特性落高法和兰利-D 最优化法研究撞击感度阈值;选用 BAM 试验和兰利-D 最优化法研究摩擦感度阈值。分析兰利-D 最优化法应用于 CL-20 感度测试的可行性,得到 CL-20 在 1%、0.000 1%等小发火概率下的撞击能量阈值及载荷压力阈值。并根据 Purba 等[23]和 Jonkman 等[24]的研究成果,分析不同概率数据的实际应用情况,为 CL-20 基炸药的安全生产及使用提供可靠的量化阈值参数。

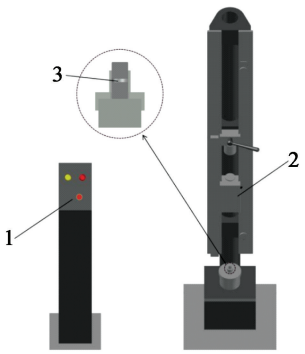
1 试验部分

1.1 试验样品

CL-20(ε 型),辽宁庆阳特种化工有限公司,III 类。样品粒径为 20.55 ~ 51.82 μm。为保证在生产及使用过程中的安全性,将温度选择为:生产及使用过程中会出现的室温(30 ± 5)℃、实际应用条件下可能遇到的恶劣环境温度(60 ± 5) ℃、为了保持温度步长的一致性的极端温度(90 ± 5)℃。环境湿度 <55%。

1.2 试验装置

撞击感度试验装置为德国 R&P(BFH 12 型)BAM 撞击感度仪。试验药量(40 ± 1) mg。落锤选用 1 kg,落锤由两侧平行滑轨自由落下。所用套筒和击柱均采用 BAM 配套装置。如图 1 所示。



1 – 开关;2 – 落锤;3 – 样品。

图 1 BAM 撞击感度仪示意图

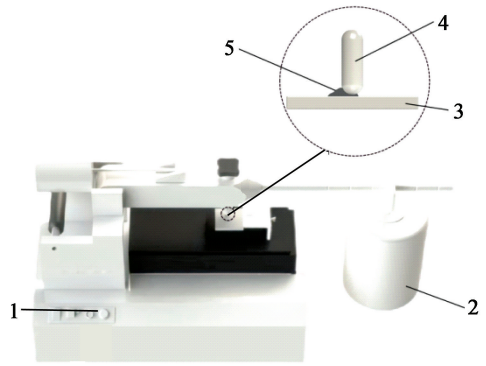
Fig. 1 Schematic diagram of BAM impact sensitivity instrument

摩擦感度试验装置为德国 R&P BAM 摩擦感度仪。试验药量(10 ± 1) mg。使用 9 种规格配重,共 6 个试验位点,选用 2 盒砝码进行额外配重,经过力臂换算,使摩擦感度仪可以在 0 ~ 360 N 内连续测试。如图 2 所示。

1.3 兰利-D 最优化法

该方法可分为两部分。第一部分为预试验阶段。根据 GJB/Z 377A—1994《感度用数理统计方法》中方法 101 兰利法,对样品进行预试验,直至出现混合区域时,停止兰利法预试验,进入第二部分。

第二部分为 D-最优化阶段。参照 Neyer-D 最优化法,引入 Fisher 信息矩阵[15],应用极大似然估计(MLE)计算出现混合区域时的 $\hat{\theta}_{\mathrm{MLE},n}$。$\hat{\theta}_{\mathrm{MLE},n}$为根据前 n 个试验得出的参数 $\theta(\mu,\sigma)$ 的极大似然估计。代入 Fisher 信息矩阵,使行列式值最大并计算 X_{n+1}。X_{n+1}为程序预估的下一个试验的试验刺激量。重复



1-开关;2-配重;3-瓷板;4-瓷柱; 5-样品。

图 2　BAM 摩擦感度仪示意图

Fig. 2　Schematic diagram of BAM friction sensitivity instrument

上述过程并计算 $\hat{\theta}_{\mathrm{MLE},n+1}$,计算 X_{n+2}。直至达到总试验次数 N 为止,$N \geqslant 90$。

最大似然函数

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^{n} p_\theta(X_i)。\tag{1}$$

式中: X_i 是参数分布族 $\{p_\theta(x), \theta \in \Theta\}$ 的独立同分布样本观察值。

θ 的极大似然估计

$$\hat{\theta}_{\mathrm{MLE}} = \arg\theta \max(\theta)。\tag{2}$$

2　结果与讨论

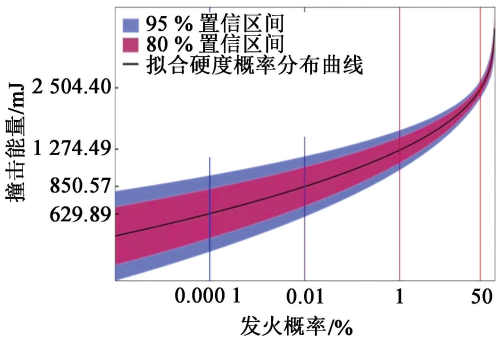
2.1　撞击感度试验

使用兰利-D 最优化法进行感度试验后,程序对试验数据进行分析、整合后,输出图片。得到兰利-D 最优化法试验分别在 30、60、90 ℃下撞击能量阈值及置信区间范围,如图 3 所示。

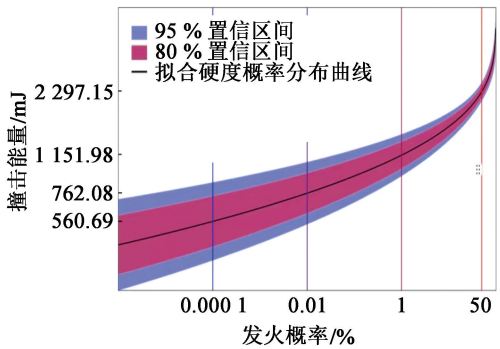
CL-20 在 30、60、90 ℃下特性落高法的试验结果如表 1 所示。表 1 中:H_{50}为 50% 爆炸概率的特性落高;E_{50}为 50% 爆炸概率的撞击能量阈值;S 为标准差。

由表 1 可知,在 30、60、90 ℃下,使用特性落高法所得 CL-20 的 E_{50}分别为 2 434.32、2 215.11 mJ 和1 955.36 mJ,E_{50}随温度的升高而降低,呈现撞击感度随温度上升而升高的趋势。根据热点理论,当炸药受撞击作用时,形成热点的主要原因是炸药中气隙或气泡的绝热压缩;随着温度的升高,更加容易形成热点,且热点燃烧爆炸的概率更大。

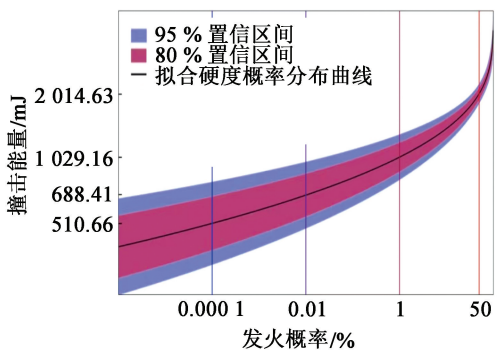
同样温度条件下,兰利-D 最优化法试验数据见表 2。选取 50%、1%、0.01%、0.000 1% 4 种代表性较强的发火概率对应的撞击能量阈值E_{50}、E_1、$E_{0.01}$、$E_{0.000\,1}$。表2 中:计算能量时,g取9.8 N/kg;



(a)30 ℃



(b)60 ℃



(c)90 ℃

图 3　兰利-D 最优化法撞击能量阈值及置信区间

Fig. 3　Impact energy threshold and confidence interval of Langlie-D optimization method

表 1　特性落高法试验结果

Tab. 1　Test results of characteristic drop height method

t/℃	H_{50}/cm	E_{50}/mJ	S
30	24.84	2 434.32	1.25
60	22.60	2 215.11	1.26
90	19.95	1 955.36	1.19

σ 为标准差。

由表2可知,在30、60、90 ℃下,使用兰利-D 最优化法所得 CL-20 的 E_{50} 分别为 2 504.40、2 297.15、2 014.63 mJ,同样呈现撞击感度随温度上升而升高的趋势。这与特性落高法所得结论一

表 2　兰利-D 最优化法试验结果

Tab. 2　Test results of Langlie-D optimization method

t/℃	E_{50}/mJ	E_1/mJ	$E_{0.01}$/mJ	$E_{0.000\,1}$/mJ	σ
30	2 504.40	1 274.49	850.57	629.89	0.28
60	2 297.15	1 151.98	762.08	560.69	0.29
90	2 014.63	1 029.16	688.41	510.66	0.28

致。随着温度的升高,CL-20 更易发生撞击发火。

兰利-D 最优化法试验结果 E_{50} 与特性落高法试验结果 E_{50} 基本一致。30、60、90 ℃下,两种方法所得 E_{50} 偏差分别为 2.7%、3.6%、2.9%,偏差较小。从表 1 ~ 表 2 中标准差 S 和 σ 可以看出,特性落高法计算出的 S 与兰利-D 最优化法所求得的 σ 相差较大,这与文献[19-20]的研究分析结论一致,在少量试验数据下,特性落高法预估含能材料的 50% 发火概率撞击能量阈值的效果较好,但特性落高法得到的结果为 H_{50},只能计算得出 50% 发火概率对应的撞击能量阈值,无法预估小发火概率条件下的撞击能量阈值。

兰利-D 最优化法在 90 发左右试验样本条件下较为准确地预估了 50% 发火概率对应的撞击能量阈值。并且,能够通过现有数据计算分析,预估任意发火概率条件下的撞击能量阈值。还提供了 95%、80% 的置信区间。为 CL-20 不同工艺流程下提供了更多可供选择的撞击感度数据参考。

2.2　摩擦感度试验

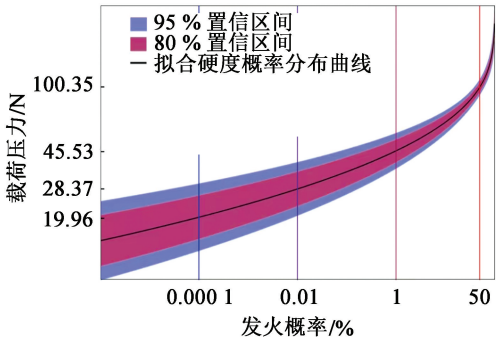
BAM 摩擦感度仪采用载荷压力作为摩擦力的表征参量,试验范围为 0~360 N。使用 BAM 摩擦感度试验和兰利-D 最优化法测定 CL-20 的摩擦感度。

兰利-D 最优化法分别在 30、60、90 ℃下摩擦载荷压力阈值及试验置信区间范围如图 4 所示。

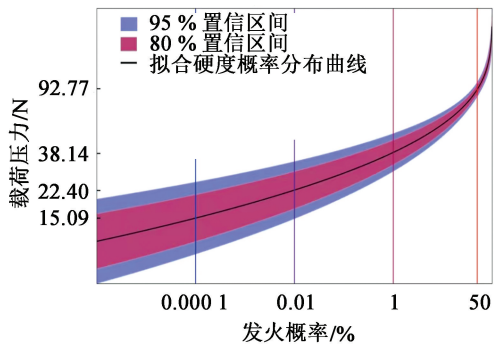
CL-20 在以上 3 种温度下的 BAM 试验数据见表 3。兰利-D 最优化法试验数据见表 4,选取 50%、1%、0.01%、0.000 1%4 种代表性较强的发火概率对应的摩擦载荷压力阈值 p_{50}、p_1、$p_{0.01}$、$p_{0.000\,1}$。

由表 4 可知,在 30、60、90 ℃下的 BAM 试验结果分别为 64、56、48 N,载荷压力阈值随温度升高而降低,呈现随温度上升而感度升高的趋势。

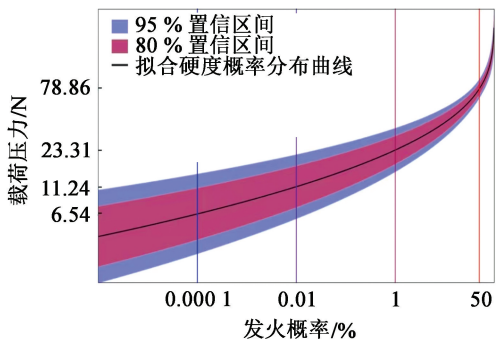
采用兰利-D 最优化法在 50%、1%、0.01%、0.000 1%4 种代表性较强发火概率条件下测得的载荷压力阈值随温度的升高而降低,与 BAM 试验结果随温度变化而发生改变的趋势一致。随着温度的升高,CL-20更易发生摩擦发火。根据热点理论,摩擦形成热点主要是因为炸药颗粒彼此间发生滑动,产



(a)30 ℃



(b)60 ℃



(c)90 ℃

图 4　兰利-D 最优化法摩擦载荷压力阈值及置信区间

Fig. 4　Friction load pressure threshold and confidence interval of Langlie-D optimization method

表 3　BAM 摩擦感度试验结果

Tab. 3　BAM friction sensitivity test results

温度/℃	载荷压力/N
30	64
60	56
90	48

表 4　兰利-D 最优化法试验结果

Tab. 4　Test results of Langlie-D optimization method

t/℃	p_{50}/N	p_1/N	$p_{0.01}$/N	$p_{0.000\,1}$/N	σ
30	100.35	45.53	28.37	19.96	0.33
60	92.77	38.14	22.40	15.09	0.37
90	78.86	23.31	11.24	6.54	0.51

生摩擦;在接触界面处,晶粒间滑动摩擦产生机械功;功转化为局部沉积热,形成热点,从而引发爆炸。温度越高,热点越容易形成,且热点燃烧爆炸的概率越大。

兰利-D 最优化法能够精准量化 CL-20 在不同温度、任意发火概率下的摩擦载荷压力阈值。由图 4 可以看出,CL-20 在 30、60、90 ℃下的 p_{50}分别为 100.35、92.77、78.86 N,随着温度升高,摩擦感度变高。将 CL-20 的 BAM 摩擦感度试验结果与图 4 中发火概率与载荷压力的关系曲线对应,可读出在兰利-D 最优化法试验结果中的发火概率。30 ℃下,在图 4(a)中对应的概率为 10.1%;60 ℃下,在图 4(b)中对应的概率为 14.4%;90 ℃下,在图 4(c)中对应的概率为 17.2%,这与 BAM 试验结果的 1/6 的概率相接近。同时,孙铭泽等[23]通过蒙特卡罗法验证了兰利-D 最优化法数理模型的准确性,在实际应用过程中得出的试验结果也较为准确,表明兰利-D 最优化法在预估 CL-20 摩擦感度阈值时效果出色。兰利-D 最优化法给出了 95%、80% 两种置信区间内的摩擦感度数据,为 CL-20 的不同制备工艺流程提供更多可供选择的摩擦感度数据参考。

2.3　安全性应用

在含能材料生产及使用过程中,当事件的风险事故概率大于 1%,可视为高风险事件[24-25]。应避免高风险事件的发生。事故可接受范围见图 5。

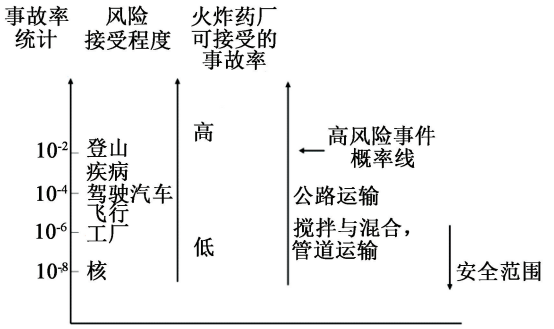


图 5　事故可接受范围示意图

Fig. 5　Acceptable range of accidents

兰利-D 最优化法根据高风险事件的概率给定了 3 种温度下 CL-20 的 1% 及 0.000 1% 发火概率撞击能量阈值及摩擦载荷压力阈值。CL-20 在 30、60、90 ℃下的 1% 发火概率撞击能量阈值分别为 1 274.49、1 151.98、1 029.16 mJ,0.000 1% 发火概率撞击能量阈值分别为 629.89、560.69、510.66 mJ;在 30、60、90 ℃下的 1% 发火概率摩擦载荷压力阈值分别为 45.53、38.14、23.31 N;0.000 1% 发火概率摩擦载荷压力阈值分别为 19.96、15.09、6.54 N。在搅拌混合、管道输送等工艺中,易产生摩擦或撞击的工况下,为了含能材料安全生产,1% 发火概率的高风险事件不能作为安全标准,应避免产生高于 0.000 1% 发火概率的机械刺激。

3　结论

针对 CL-20 的机械感度,采用最优化方法解决了现有机械感度试验方法无法准确量化反应阈值的问题。得出对含能材料生产及应用过程中的安全使用具有实际指导意义的小发火概率下的临界撞击能量及临界载荷压力。分析 CL-20 机械感度试验结果,得到了如下结论:

1)在 30~90 ℃范围内,CL-20 在 0.000 1%~50% 发火概率下的撞击能量阈值由 629.89~2 504.40 mJ 降低为 510.66~2 014.63 mJ,载荷压力阈值由 19.96~100.35 N 降低为 6.54~78.86 N。随着温度的升高,CL-20 的机械感度呈升高趋势。

2)在确保安全性方面,应该以最严苛的条件作为依据。因此,选用兰利-D 最优化法在 90 ℃、0.000 1% 发火概率条件下的撞击能量阈值以及载荷压力阈值作为依据。因此,CL-20 在生产和使用中应避免 510.66 mJ 以上的撞击刺激以及 6.54 N 以上的摩擦刺激。

参 考 文 献

[1]　梁力, 常志鹏, 张正金, 等. 超细 CL-20 的可控批量制备及降感技术[J]. 上海航天(中英文), 2020, 37(4): 148-154.
LIANG L, CHANG Z P, ZHANG Z J, et al. Controllable batch preparation and desensitization technology of superfine CL-20 [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2020, 37(4): 148-154.

[2]　曾贵玉, 聂福德, 刘晓东, 等. 六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)的研究进展[J]. 含能材料, 2000, 8(3): 130-134.
ZENG G Y, NIE F D, LIU X D, et al. The developments of hexanitrohexaazaisowurtzitane [J]. Energetic Materials, 2000, 8(3): 130-134.

[3]　叶宝云, 王晶禹, 安崇伟, 等. CL-20 基复合含能材料的制备及性能[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(2): 199-203.
YE B Y, WANG J Y, AN C W, et al. Preparation and properties of CL-20 based composite energetic material [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(2):

199-203.

[4] 郭惠丽, 黄亚峰, 金朋刚, 等. 炸药撞击感度研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(5): 10-15.
GUO H L, HUANG Y F, JING P G, et al. Research progress on impact sensitivity of explosive [J]. New Chemical Materials, 2022, 50(5): 10-15.

[5] 张磊, 吴成成, 王正宏, 等. CL-20 基压装型温压炸药的设计及性能研究[J]. 爆破器材, 2022, 51(5): 7-11.
ZHANG L, WU C C, WANG Z H, et al. Design and performance research on CL-20 based pressed thermobaric explosive [J]. Explosive Materials, 2022, 51(5): 7-11.

[6] 李岗, 耿孝恒, 王晶禹, 等. 不同粒度 PETN 机械感度[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(6): 79-81.

[7] 耿孝恒. PETN 粒度对其机械感度的影响[J]. 火炸药学报, 2012, 35(4): 30-32.
GENG X H. Influence of particle size on mechanical sensitivity of PETN [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(4): 30-32.

[8] 吴星亮, 王红松, 李文海, 等. RDX 和 HMX 机械刺激临界反应阈值试验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(6): 9-14.
WU X L, WANG H S, LI W H, et al. Experimental study on critical response threshold of RDX and HMX under mechanical stimulation [J]. Explosive Materials, 2020, 49(6): 9-14.

[9] 郑航, 蔡瑞娇, 董海平, 等. 计数法和计量法的发展历程[J]. 火工品, 2003(4): 44-47.
ZHENG H, CAI R J, DONG H P, et al. The development of attribute sampling plan and variable sampling plan [J]. Initiators & Pyrotechniscs, 2003(4): 44-47.

[10] 严楠, 蔡瑞娇. 序贯感度试验的设计原理[J]. 火工品, 2001(2): 41-44.
YAN N, CAI R J. The design principle of sequential sensitivity experimental procedure [J]. Initiators & Pyrotechniscs, 2001(2): 41-44.

[11] WU C F J. Efficient sequential designs with binary data [J]. Journal of the American Statistical Association, 1985, 80(392): 974-984.

[12] JOSEPH V R, TIAN Y B, WU C F J. Adaptive designs for stochastic root-finding [J]. Statistica Sinica, 2007, 17(4): 1549-1565.

[13] JOSEPH V R. Efficient Robbins-Monro procedure for binary data [J]. Biometrika, 2004, 91(2): 461-470.

[14] DROR H A, STEINBERG D M. Sequential experimental designs for generalized linear models [J]. Journal of the American Statistical Association, 2008, 103 (481): 288-298.

[15] DIXON W J, MOOD A M. A method for obtaining and analyzing sensitivity data [J]. Journal of the American Statistical Association, 1948, 43(241): 109-126.

[16] 濮晓龙. 基于兰利法和 Neyer_D 法的一种新感度试验方法[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.

[17] NEYER B T. A D-optimality-based sensitivity test [J]. Technometrics, 1994, 36(1): 61-70.

[18] WU C F J, TIAN Y B. Three-phase optimal design of sensitivity experiments [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2014, 149: 1-15.

[19] 袁俊明, 张庆明, 刘彦. 炸药感度测试兰利法与升降法比较研究[J]. 含能材料, 2008, 16(1): 86-89.
YUAN J M, ZHANG Q M, LIU Y. Comparison study on Langlie method and up-and-down method for sensitivity test of explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(1): 86-89.

[20] 田玉斌, 王典鹏, 房永飞. 火工品发火点估计方法比较研究[J]. 含能材料, 2010, 18(1): 58-62.
TIAN Y B, WANG D P, FANG Y F. Comparative study on estimating method of firing level of pyrotechnics [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(1): 58-62.

[21] HUNG Y, JOSEPH V R. Discussion of "three-phase optimal design of sensitivity experiments" by Wu and Tian [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2014, 149: 16-19.

[22] RAY D M, ROEDIGER P A, NEYER B T. Commentary: three-phase optimal design of sensitivity experiments [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2014, 149: 20-25.

[23] 孙铭泽, 王艳平, 罗太明, 等. 火炸药静电感度试验数理统计方法分析与优化[J]. 火炸药学报, 2023, 46(3): 266-274.
SUN M Z, WANG Y P, LUO T M, et al. Analysis and Optimization of mathematical statistics methods for electrostatic sensitivity test of explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(3): 266-274.

[24] PURBA J H, LU J, ZHANG G Q, et al. A fuzzy reliability assessment of basic events of fault trees through qualitative data processing [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2014, 243: 50-69.

[25] JONKMAN S N, VAN GELDER P H A J M, VRIJLING J K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 99(1): 1-30.