DOI: 10.11883/bzycj-2024-0109

CL-20 基高爆速压装炸药的落锤冲击响应特性*

徐 风[1], 蒋建伟[1], 王树有[1], 李 梅[1], 郝泽辉[2]

（1. 北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081;
2. 山西江阳化工有限公司, 山西 太原 030041）

摘要：针对典型 CL-20 基高爆速压装炸药（C-1, 94.5% CL-20+5.5% 助剂）的发射安全性问题, 开展了 400 kg 大型落锤试验对压装炸药 C-1 的冲击响应特性进行研究。同时, 采用改进的应力率表征法及下限值法、特性落高法分别对该炸药的落锤冲击响应特性进行表征, 并与同类压装炸药 JO-8 和 JH-2 进行了对比。得到了不同落高下 3 种压装炸药底部实测应力曲线及表征参数, 并讨论了 3 种炸药撞击感度的差异及 C-1 炸药撞击感度的影响因素。结果表明, 改进的应力率表征法对炸药撞击感度的表征具有一定的有效性和普适性, 与其他方法对撞击感度规律的反映具有一致性。C-1 炸药的特性落高（H_{50}）为 1 m, 分别为 JO-8 和 JH-2 炸药特性落高的 62.50% 和 50.00%; C-1 炸药不发生爆轰对应的后坐应力峰值（σ_0）为 748.90 MPa, 分别为 JO-8 和 JH-2 的 85.42% 和 64.33%; C-1 的安全应力率参数（C_0）为 344 GPa^2/s, 分别为 JO-8 和 JH-2 的 45.87% 和 39.14%。CL-20 的分子结构、C-1 药柱的力学性能和热-化特性是造成其撞击感度高于 JO-8 和 JH-2 撞击感度的主要因素。

关键词：CL-20 基炸药; 冲击响应特性; 抗过载性能; 大型落锤试验; 安全判据

中图分类号：O381; TJ55　　**国标学科代码：**13035　　**文献标志码：**A

Response of CL-20-based high-detonation-velocity pressed explosive to drop-hammer impact

XU Feng[1], JIANG Jianwei[1], WANG Shuyou[1], LI Mei[1], HAO Zehui[2]

（1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Shanxi Jiangyang Chemical Co.*, *Ltd.*, *Taiyuan* 030041, *Shanxi*, *China*）

Abstract: For the launch safety problem of the typical CL-20-based high detonation velocity pressed explosive (C-1, 94.5% CL-20+5.5% additive), the impact response characteristics of the explosive were studied by a large-scale hammer test with 400 kg, which has an impact loading curve similar to the loading characteristics of artillery chamber pressure. Meanwhile, the improved stress rate characterization method, the lower limit method, and the drop height method were used to characterize the drop hammer impact response characteristics of the explosive, and compared with the same kind of pressed explosives JO-8 and JH-2. The improved stress rate characterization method is obtained by improving the data processing process based on existing criteria and weakening the sensitivity of the original criterion formula to oscillatory waveforms. The measured stress curves and characterization parameters of the bottom of the three pressed explosives under different drop heights are obtained by tests, and the impact sensitivity differences of the explosives and influence factors of the impact sensitivity of C-1 are discussed. The results show that the improved stress rate characterization method has certain effectiveness and universality for characterizing the impact sensitivity of explosives. Meanwhile, the improved stress rate characterization method is consistent with other methods in reflecting the law. The drop height of C-1 (H_{50}) is 1.0 m, which is 62.50% and 50.00% of JO-8 and JH-2, respectively; the peak stress of the backseat corresponding to non-detonation (σ_0) is 748.90 MPa, which is 85.42% and 64.33%

* 收稿日期：2024-04-16；修回日期：2024-07-27
第一作者：徐 风（1991— ）, 男, 博士研究生, 3220215039@bit.edu.cn
通信作者：蒋建伟（1962— ）, 男, 博士, 教授, bitjjw@bit.edu.cn

of JO-8 and JH-2, respectively; the safety stress rate parameter (C_0) is 344 GPa^2/s, which is 45.87% and 39.14% of JO-8 and JH-2, respectively. The molecular structure of CL-20, the mechanical properties, and the thermal-chemical characteristics of the C-1 explosive cylinder are the main factors that make its impact sensitivity higher than JO-8 and JH-2. The research results can provide a reference for the application and design calculation of CL-20-based high detonation velocity pressed explosives in a high overload environment.

Keywords: CL-20-based explosive; impact response characteristics; anti-overload performance; large-scale drop-hammer test; safe criterion

六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)是目前世界上应用能量密度最高的单质炸药之一[1], 对该炸药特性的研究已获得了丰富的成果[2-4], 对 CL-20 基混合炸药配方及应用已开展了大量研究[5-10]。伴随着研究的深入, 越来越多的学者关注并深入研究了 CL-20 炸药所具有的机械、冲击感度问题[11-12], 而新型混合炸药的工程应用不仅需要其能量特性, 同时更需要结合应用平台考虑其安全特性。因此, 近年来通过改性[13]、包覆[14-15]、共晶[16-19] 等多种方式针对不同配方的 CL-20 基混合炸药进行降感成为了研究热点。此类研究成果的逐渐丰富, 也从侧面反映了开展 CL-20 基混合炸药机械、冲击感度相关研究的重要性。

C-1 炸药(94.5%CL-20+5.5% 助剂)是典型的 CL-20 基高爆速压装炸药, 其爆速高于 9.1 km/s, 作为第 3 代高能压装炸药在提升聚能装药的破甲威力方面具有广阔的需求前景[20]。南宇翔[21] 和王树有等[22] 开展了装填高爆速压装混合炸药 JH-2(RDX 基)、JO-8(HMX 基)和 C-1(CL-20 基)聚能装药在同炸高条件下的静破甲威力试验, 发现装填 C-1 炸药的战斗部破甲深度较装填 JO-8 和 JH-2 炸药的战斗部可分别提高 12.6% 和 21.9%。而炮射类破甲弹药作为常规聚能破甲类战斗部的主要平台之一, 是现有军事体系中反装甲目标的重要手段。因此, C-1 炸药对炮射类破甲弹药威力的提升, 就成为了极具研究、应用价值的课题。但考虑到炮射平台在发射过程中的高膛压和高加速度特性[23], 针对新型高能炸药在炮射弹药战斗部中的工程应用, 需首先对炸药在膛压加载下的冲击响应特性进行研究, 解决战斗部发射安全性设计及评估问题。

目前, 关于 C-1 炸药冲击安全性的研究鲜有报道。皮铮迪等[24-25] 采用平面波加载飞片冲击试验方法, 比较了 C-1、CL-20/NTO 及 CL-20/FOX-7 等 3 种压装炸药的冲击点火阈值, 并获取了点火增长模型参数。然而, 炸药的冲击点火是与应力和应变率相关的行为过程[26-27], 采用飞片冲击法得到的应力加载曲线脉宽通常为 10～100 μs、峰值可达几个 GPa, 该测试结果不能很好地反映炸药装药在身管武器膛内发射状态下的低压力峰值和长脉宽压力加载特性(通常脉宽为 6～10 ms、压力峰值为 100～1 000 MPa)。而针对发射过程中 C-1 压装炸药的冲击响应特性问题, 当前尚缺乏相关研究数据。

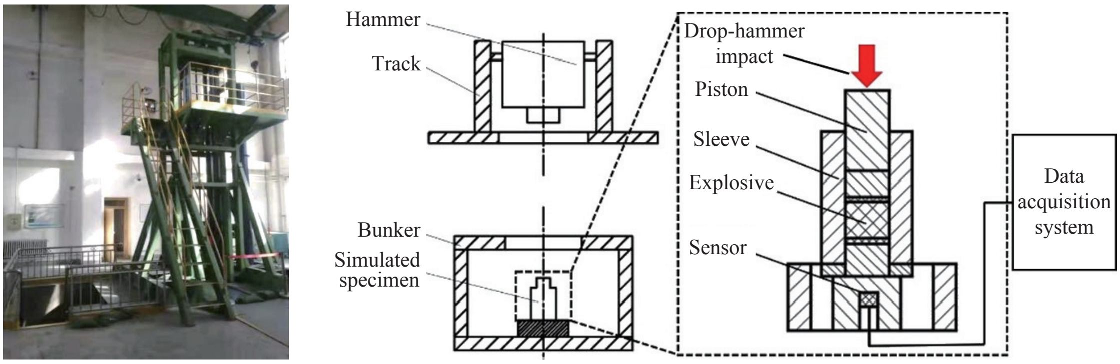
为了获得 CL-20 基高爆速压装炸药在膛压加载过程中的冲击响应特性, 本文中采用 400 kg 大型落锤模拟膛压加载试验方法, 以 C-1 炸药为研究对象, 参考 GJB 5403.2—2005《炸药装药发射安全模拟试验方法 第二部分: 落锤冲击试验》对炸药的落锤撞击感度开展试验。在大型落锤加载试验中, 被试药柱的质量可达 100 g 以上, 应力加载曲线的脉宽为 3～10 ms, 应力最高可达 1.5 GPa, 应力率最高可达 300 GPa/s, 冲击加载曲线与火炮膛压加载特征相近。该试验方法已被成功应用于多种炸药的发射安全性模拟膛压加载试验[28-30]。根据试验数据, 本文中采用下限值法、特性落高法及改进的应力率表征法 3 种数据处理方法, 通过不发生爆轰的最大落锤高度、后坐应力、特性落高、特性应力峰值以及安全应力率参数共 5 个特征参数对 C-1 炸药的冲击响应特性进行表征; 同时, 将表征结果与其他炸药, 尤其是同类典型高爆速压装炸药 JH-2、JO-8 进行对比; 以期为 C-1 装药战斗部的发射安全性设计及应用提供参考。

1　落锤加载试验

1.1　试验装置及原理

试验中采用的大型落锤模拟加载试验装置由西安近代化学研究所自行设计。该装置由落锤、样弹撞击系统、地下防爆小室、控制系统及数据采集系统组成, 如图 1 所示。按照图 1(b) 所示, 提前将炸药

柱装配于样弹套筒内部，试验时落锤沿预设轨道自由下落冲击上活塞，冲击波沿上活塞作用于壳体内药柱部分，炸药柱在冲击加载作用下发生变形，甚至燃烧、爆轰等现象。



(a) Photo　　(b) Principle diagram

图 1　大落锤试验装置

Fig. 1　Large-scale drop-hammer test device

将装置中落锤冲击炸药的全过程简化为单自由度系统的受迫振动，如图 2 所示，其中 Ox 为位移轴正方向，X_0 为平衡点到初始位置的距离，m 为落锤质量，k 为弹簧的劲度系数。根据文献 [31]，有：

$$\sigma_{\mathrm{m}} = \sqrt{2gHmE/(hA)} \tag{1}$$

$$T = \pi\sqrt{mh/(EA)} \tag{2}$$

式中：σ_{m} 为应力加载峰值，T 为冲击脉宽，g 为重力加速度，H 为落锤高度，E 为炸药的弹性模量，h 为炸药柱的高度，A 为炸药柱的横截面积。可据式 (1)～(2) 对落锤模拟发射冲击试验工况进行调整，进而更好地拟合目标膛压加载曲线，以实现模拟发射状态下装药冲击响应特性表征及安全性评估。

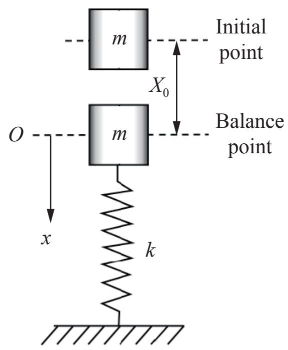


图 2　单自由度受迫振动模型

Fig. 2　Single-degree-of-freedom forced vibration model

1.2　试验样品

将 CL-20 与其他助剂以质量比 94.5∶5.5 制成混合炸药造型粉。炸药粉末的撞击感度和摩擦感度均低于 40%。将造型粉压制成高爆速 C-1 炸药，压药密度为 1.93 g/cm^3，爆速为 9 150 m/s。C-1 药柱样品如图 3 所示（共 20 个同一配方炸药，仅为区分分别标识为 c-1、c-2、c-3，依此类推，药柱上标识的数字为药柱高度，单位为 mm），药柱设计尺寸为 ⌀40 mm×40 mm（实测直径为 39.94～39.98 mm，实测高度为 39.98～40.31 mm），药柱的设计质量为 97.01 g（实测质量为 96.88～97.14 g）。

图 3　试验炸药样品

Fig. 3　Test explosive specimens

为保证炸药样品的质量均匀性，采用同一批次模具在相同工艺参数下完成试样制备。制备完成的药柱按照图 4 所示结构装配。其中壳体、活塞、下击柱材料均为 T10A 钢，上、下密封垫均为 5 mm 厚的高密度聚乙烯。

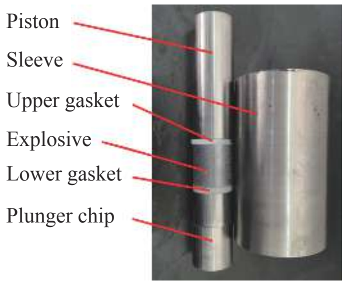


图 4　样弹组件照片

Fig. 4　Photo of simulated specimen assembly

1.3　试验方法及数据表征方法

(1) 落锤质量为 400 kg, 落高在 0～4 m 可调, 试验温度为室温。

(2) 依据升降法试验原理, 对准备好的样弹在预定的落锤落高工况下进行试验, 将前一组试验结束后样弹的状态作为进一步增大或减小落高的判断依据。

(3) 通过特性落高法计算炸药药柱的特性落高 H_{50} 及特性落高对应的应力峰值 σ_{50}; 通过下限值法获取炸药药柱不发生爆轰的最大落高 H_0 及后坐应力 σ_0, 并进一步由 H_0 提取对应的曲线数据。

(4) 周霖等[27] 认为炸药装药点火不仅与最大加载应力相关, 同时也受到加载应力率的影响, 且炸药加载应力率与炸药装药所承受的机械功率直接相关。因此, 周霖等[27] 提出了炸药抗过载能力的表征方法, 表达式为:

$$\int \dot{\sigma}\mathrm{d}\sigma \approx \sum \frac{\Delta\sigma}{\Delta t}\Delta\sigma = \sum_{i=1}^{n-1}\frac{(\sigma_{i+1}-\sigma_i)^2}{t_{i+1}-t_i} \tag{3}$$

式中: n 为示波器记录长度, i 为示波器采样点序号, σ_i 和 t_i 分别为第 i 个采样点处的应力和时间。

式 (3) 是考虑了应力变化率相关因素的函数形式, 以未反应炸药应力-时间曲线计算得到“炸药装药点火判据”。需要注意的是, 式 (3) 中平方累加形式的出现会造成加载曲线“上升沿”与“下降沿”在计算中权重相同的情况, 这在文献 [27] 的波形处理中是适用的, 但同时也使得该式在某些特定受力曲线条件下既不合理也无法正确起到判据的作用, 如局部有剧烈振荡的锯齿波、正余弦波等情况, 适用范围受限。同时, 该计算方法受数据采集系统灵敏度、采样频率及滤波处理影响较大。一般而言, 采样频率的高低直接影响采集波形振荡的速度和幅值, 而使得对同一物理过程的计算结果会随着采样频率的改变而发生剧烈变化。因此, 需要对数据采集、滤波条件进行明确和统一, 否则将难以为类似炸药撞击感度对比问题提供参考, 也无法为相关数值模拟提供依据。

基于上述考虑, 本文中在原判据式 (3) 的基础上给出改进的应力率表征方法, 形式如下:

$$C = \sum_{i=1}^{n-1}\frac{\chi(\sigma_{i+1}-\sigma_i)^2}{t_{i+1}-t_i}, \qquad \chi = \begin{cases} 1 & \sigma_{i+1}-\sigma_i \geqslant 0 \\ 0 & \sigma_{i+1}-\sigma_i < 0 \end{cases} \tag{4}$$

式中: C 为累积加载速率, $\mathrm{GPa^2/s}$; χ 为波形系数。

与原判据式 (3) 含义不同的是, 本文中以大型落锤加载试验中波形上升沿为炸药点火的主因, 而局部下降沿的作用则是决定了下个上升沿的起点, 其影响在下个上升沿计算中体现。实际上, 波形系数的添加相当于改进了式 (3) 的数据处理过程。这样处理的优势是, 数据结果规律性的表达更合理且在一定程度上降低了公式对振荡波形的敏感性, 使得表征方法的适用范围更广。同时, 本文试验测试中使用的是西安近代化学研究所大型落锤装置配套测试系统, 统一采用 0.005 ms 一个采样点的原始数据进行分析计算, 以便于进行相关炸药对比分析。由于原函数形式(式 (3))是基于应力率影响分析得到的, 因此, 后文中为与其他方法区分, 将改进后的表征方法称为“应力率表征法”。

特别地, 定义 C_0 为炸药安全应力率参数, 作为应力率表征法下的炸药安全性判据, 其取值为炸药不发生爆轰最大落高 H_0 条件下对应实测 σ-t 全曲线经式 (4) 的计算结果。

2　结果与讨论

2.1　C-1 炸药落锤试验结果

根据试验结果，C-1 炸药压装药柱在不同下落高度落锤冲击下发生爆轰的概率见表 1。

表 1　不同落高落锤试验结果

Table 1　Results of drop-hammer tests at different heights

落高/m	爆轰概率/%	落高/m	爆轰概率/%
0.8	0	1.1	100
0.9	0	1.2	100
1.0	50	1.5	100

C-1 炸药压装药柱在落高 H≥1.1 m 的条件下稳定爆轰，在 H≤0.9 m 的条件下炸药药柱均未发生爆轰反应，而在 1.0 m 落高组发生反应的概率为 50%。不同落高下典型落锤冲击试验回收照片如图 5 所示。其中，对于 H=1.0 m 落高选取了爆与未爆 2 种典型结果。图 5 中各工况对应的实测应力-时间曲线如图 6 所示。

图 5　不同落高落锤试验回收试样的照片

Fig. 5　Photo of recovered specimens of drop-hammer test at different heights

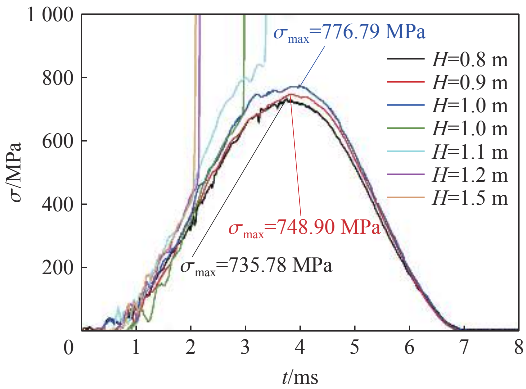


图 6　不同落高实测应力-时间曲线

Fig. 6　Measured stress-time curves at different heights

由图 6 可知，在炸药柱未发生爆轰反应时，实测大落锤冲击加载脉宽为 6.5～7.0 ms，与弹药发射加载曲线特征相近，而爆轰反应均发生于冲击脉冲上升沿。

2.2　试验结果表征与分析

2.2.1　C-1 炸药感度表征

由表 1 统计结果，根据特性落高法公式计算得到 C-1 炸药的 H_{50}，并由实测数据选取特性落高对应工况中未发生爆轰样品的实测应力最大值作为 σ_{50}。同时，根据下限法得到该炸药不发生爆轰的最大安全落高 H_0，并取 H_0 对应工况的应力峰值作为炸药的后坐应力 σ_0。

进一步地，根据式 (4)，取 H_0 工况的实测应力-时间全曲线，累积计算得到 C-1 炸药的安全应力率参数 C_0。各特征参数计算结果见表 2。

表 2　C-1 炸药冲击响应特性表征

Table 2　Impact response characterization of explosive C-1

特性落高法		下限值法		应力率表征法
H_{50}/m	σ_{50}/MPa	H_0/m	σ_0/MPa	C_0/(GPa^2·s^{-1})
1.0	776.79	0.9	748.90	344

2.2.2　应力率表征

以 C_0 为参考，取图 6 所列不同落高典型工况实测曲线计算并绘制各工况累积加载速率-时间关系曲线，C 值为对应时间 t 之前的曲线段根据式 (4) 计算的累积值，如图 7 所示。其中，红色点划横线为 C-1 炸药安全应力率参数 C_0=344 GPa^2/s 参考线。

由图 7 可知，对于 H=0.9 m 工况，随着时间的增长，其 C-t 曲线会逐渐逼近 C_0。发生爆轰工况 H=1.0, 1.1, 1.2, 1.5 m 下，最终 C-t 曲线会逼近垂直，且对应 C-t 曲线出现拐点位置分别为 C=500, 682, 405, 469 GPa^2/s，均大于 C-1 炸药的安全应力率参数 C_0；而对于未发生爆轰的工况，则大多数曲线加载平缓直至逼近水

平。特别地，H=0.8 m 工况在 2.02 ms 时出现小拐点，对应 C 值为 186 GPa^2/s，小于 C_0。

除以上列举典型工况应力时间曲线外，各组落高下全部工况的统计结果见图 8。其中，横坐标表示各工况的落高，纵坐标为计算的 C 值（未爆工况为全曲线累加值，爆轰工况由于全曲线计算结果趋于无穷而取拐点值进行对比）。由图 8 可知，在发生爆轰的工况下，C-t 曲线出现的拐点值均大于 C_0。而结合图 7 来看，在未发生爆轰的工况下，往往无明显拐点或偶尔有小拐点（对应 C 值低于 C_0）。

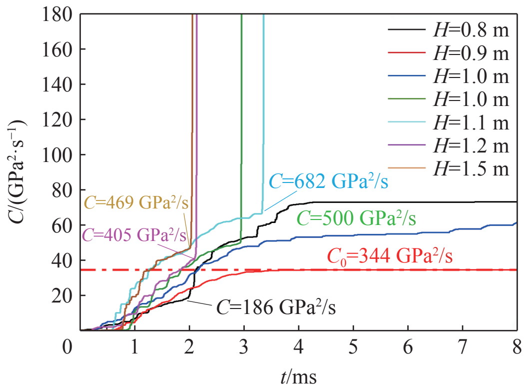


图 7　C-1 炸药累积加载速率-时间曲线

Fig. 7　Cumulative loading rate-time curves of C-1 explosive

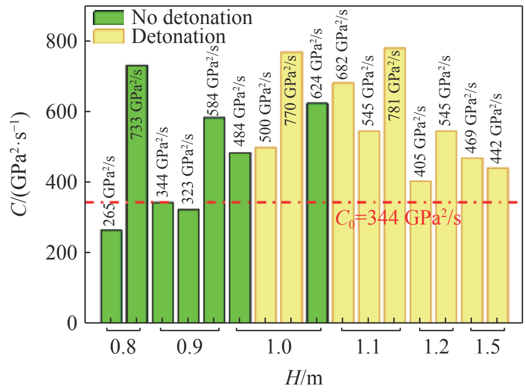


图 8　不同工况对比结果

Fig. 8　Comparison results of different testing conditions

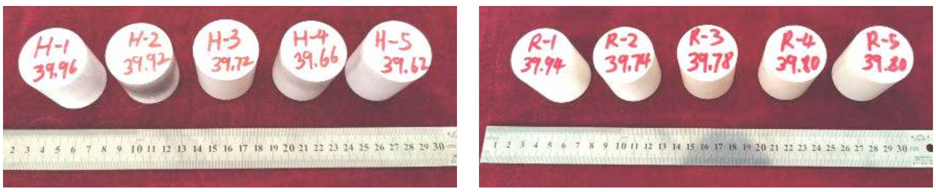
通过计算结果可得到规律：根据 σ-t 曲线得到累积加载速率 C 随时间变化累加至大于安全应力率参数 C_0 后炸药不一定发生爆轰，这与多因素有关，需进一步确定是否有加载速率突跃。但对于炸药发射安全性设计更具有价值的是：当 σ-t 全曲线累积 C 值小于等于 C_0 时炸药均不发生爆轰反应，可以作为 C-1 炸药发射安全性设计过程中的参考依据。

2.3　对比炸药落锤试验

选取典型 HMX、RDX 基压装炸药（JO-8：95%HMX+5% 助剂；JH-2：95%RDX+5% 助剂）作为对比炸药进行分析。高立龙等[29] 给出了本文相同试验条件下 JO-8 和 JH-2 等 2 种炸药的特征落高 H_{50}，分别为 1.6 和 2.0 m，但该研究并未提供不发生爆轰的最大落高 H_0 及对应的应力时间曲线，也就无法求解和对比 2 种炸药的安全应力率参数 C_0。因此，为了获取试验数据曲线，本文中参考文献 [29] 给出的特征落高，选取附近工况进行对比试验。

2.3.1　对比炸药试验结果

同样将 2 种造型粉分别压制成⌀40 mm×40 mm 炸药柱。其中，JO-8 压药密度为 1.83 g/cm^3，药柱实测质量为 91.79～91.96 g；JH-2 压药密度为 1.71 g/cm^3，药柱实测质量为 85.71～85.93 g。对比药柱样品如图 9 所示，2 种药柱各 5 个，以主组分区分，分别标识为 H-1、H-2 或 R-1、R-2，依此类推，药柱标识数字为药柱高度，单位为 mm。



(a) JO-8　　(b) JH-2

图 9　炸药对比样品

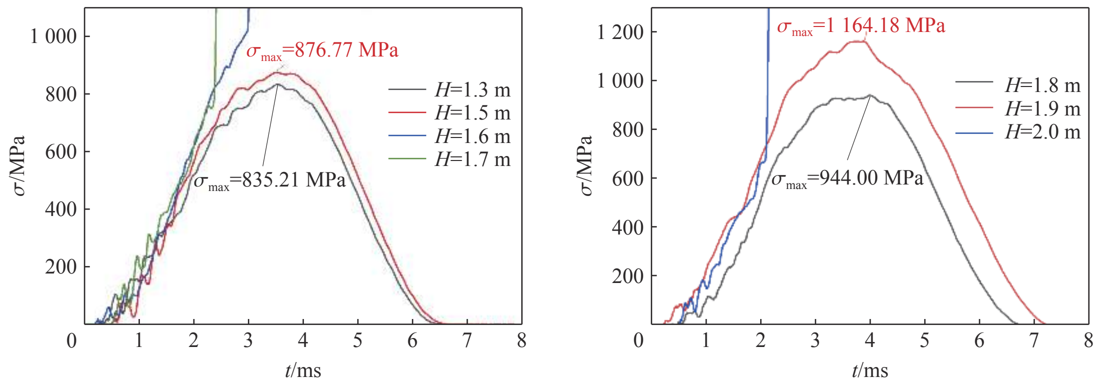
Fig. 9　Comparison explosive specimens

试验装置及过程与 C-1 炸药试验相同，不再赘述，2 种炸药对比试验结果如图 10 所示，实测应力-时间曲线如图 11 所示。

(a) JO-8　　　　(b) JH-2

图 10　对比试验回收试样照片

Fig. 10　Photos of recovered specimens in comparison tests



(a) JO-8　　　　(b) JH-2

图 11　对比试验的应力-时间曲线

Fig. 11　Stress-time curves of comparison tests

由试验结果可知，JO-8 炸药柱在落高 H=1.6, 1.7 m 的条件下均发生爆轰，H=1.5 m 为该炸药不发生爆轰的最大安全落高，对应的应力峰值为 876.77 MPa；JH-2 炸药柱在 H=2.0 m 的条件下发生爆轰，H=1.9 m 为该炸药不发生爆轰的最大安全落高，对应的应力峰值为 1 164.18 MPa，试验结果与高立龙等[29]的表述相印证。同时，2 种对比炸药的 σ-t 曲线脉宽与 C-1 炸药的接近，显示出试验状态的良好一致性。

2.3.2　典型压装炸药感度对比

高立龙等[29] 给出了 2 种对比炸药的 H_{50} 和 σ_{50}，同时根据本文试验结果提取 H_0 和 σ_0，并根据式 (4) 计算得到安全应力率参数 C_0，与 C-1 炸药试验结果进行对比。3 种炸药的对比结果如图 12 所示。

由图 12 可知，相比于同类高爆速压装炸药 JO-8 和 JH-2，C-1 炸药的各项感度表征数据均为 3 种炸药的最低值，表现出较高的炸药撞击敏感性。其中，C-1 炸药的特性落高 H_{50} 分别为 JO-8、JH-2 炸药的 62.50% 和 50.00%，对应特征应力峰值 σ_{50} 分别为 JO-8、JH-2 炸药的 77.68% 和 85.17%；不发生爆轰的最大落高 H_0 分别为 JO-8、JH-2 炸药的 60.00% 和 67.37%，对应后坐应力峰值 σ_0 分别为 JO-8、JH-2 炸药的 85.42% 和 64.33%；而 C-1 炸药的安全应力率参数 C_0 则分别为 JO-8、JH-2 炸药的 45.87% 和 39.14%。

此外，高立龙等[29] 还给出了其他 2 种相似配方压装炸药的特性落高 H_{50} 及对应的特征应力峰值 σ_{50}，见表 3。在此列举以更直观凸显 C-1 炸药的撞击敏感性。

结合本文试验结果，若以落高作为输入条件进行对比，C-1 炸药落锤特征落高分别为 JOF、P-RDX 炸药的 93.02% 和 62.50%，6 种炸药撞击敏感性排序为：C-1、JOF、P-RDX、JO-8、JH-2，从左到右敏感性依次降低。

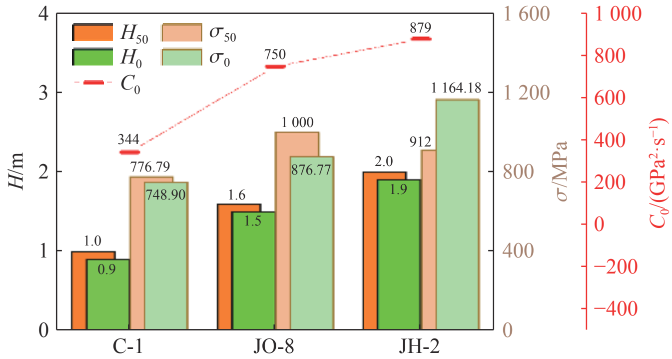


图 12　3 种典型炸药冲击特性

Fig. 12　Impact characteristics of three typical explosives

表 3　其他压装炸药的 400 kg 落锤撞击感度[29]

Table 3　Impact sensitivities of drop-hammer test with 400 kg for other pressed explosives[29]

名称	组分	H_{50}/m	σ_{50}/MPa
JOF	95.5%HMX+4.5%助剂	1.075	478
P-RDX	95%RDX+5%助剂	1.6	801

2.3.3　典型压装炸药加载速率表征

为进一步验证安全应力率参数 C_0 作为炸药发射安全性判据对发射安全性设计过程是否具有普适性的问题，同样以 JO-8、JH-2 各自的 C_0 值为参考，计算并绘制各工况累积加载速率-时间关系曲线，如图 13 所示。

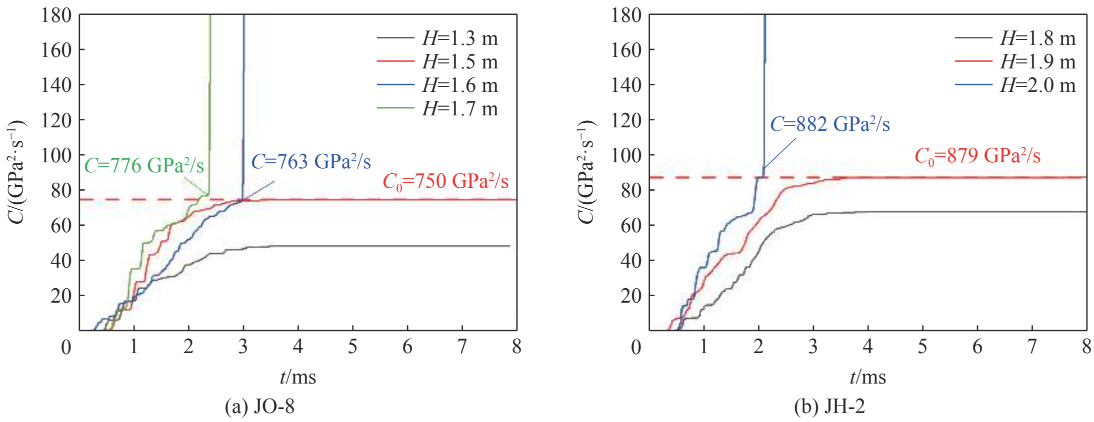


图 13　对比炸药累积加载速率-时间曲线

Fig. 13　Cumulative loading rate-time curves of comparison tests

与 C-1 炸药类似地，2 种炸药发生爆轰工况对应的 C-t 曲线出现拐点位置 C 值均大于各自的安全加载速率系数，而有限试验结果内未发生爆轰工况下的 C-t 曲线均未超过 2 种炸药各自的安全应力率参数。试验结果在一定程度上说明了安全应力率参数 C_0 作为炸药发射安全性设计判据的普适性。

2.4　C-1 炸药撞击感度的影响因素分析

试验结果显示，典型的 CL-20 基混合炸药 C-1 的撞击感度显然高于同类压装炸药 JH-2 和 JO-8，而炸药撞击感度试验判定依据仅区分炸药柱是否发生点火，并不区分反应的激烈程度。因此，影响炸药点火阶段的主要因素就是决定撞击感度的主要因素[32]。

基于热点起爆机理对大型落锤试验中炸药的撞击点火响应过程进行分析，即在冲击载荷作用下，炸

药局部产生热点，进而引起炸药颗粒分解、表面燃烧释放能量，并逐渐转为爆轰状态。以下结合本文试验状态对炸药柱撞击点火的力-热转换过程进行分解，分析 C-1、JH-2 和 JO-8 等 3 种炸药的撞击感度存在差异的原因。

(1) 相同冲击载荷下，C-1、JH-2 和 JO-8 等 3 种炸药柱内部的实际应力存在差异。根据式 (1)，有：

$$\sigma_{\mathrm{m}} = K\sqrt{E} \qquad K = \mathrm{Const} \tag{5}$$

利用本文试验结果对式 (5) 进行拟合，可反推 3 种炸药的弹性模量，并得到不同落高条件下 3 种炸药柱的应力峰值，如图 14 所示（假设炸药均不发生爆轰反应）。

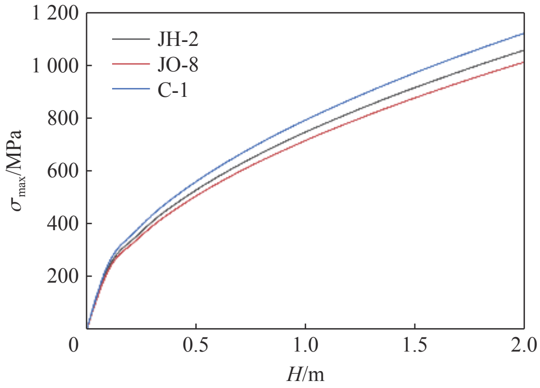


图 14　3 种典型炸药的应力峰值随落高的变化

Fig. 14　Stress peaks of three typical explosives varied with drop height

由图 14 可知，在相同冲击载荷下，由于 3 种炸药柱的弹性模量不同，因此，理论上 C-1 炸药柱内的应力峰值高于 JH-2 和 JO-8 炸药的。

(2) 3 种炸药柱内部热点形成的难易程度不同。炸药柱局部热点问题较复杂，一般认为该热点是由多种情况综合作用形成的，例如：炸药内部空穴、晶体位错缺陷，等等。但在理想装药条件下，主要考虑 2 种情况的共同作用：①载荷作用下，药柱变形与周边介质摩擦或发生局部剪切；②药柱局部微裂纹扩张，进而引起炸药颗粒间的剧烈摩擦。

对于药柱与周边介质摩擦的问题，暂无数据显示 3 种炸药存在显著区别，同时，试验过程中上、下密封垫在一定程度上弱化了炸药柱发生绝热剪切的情况，因此主要考虑 3 种炸药微裂纹扩张及炸药颗粒间摩擦效果的差异。对相关问题暂未见直接观测与统计分析的研究报道，但根据高立龙等[29] 的数据，采用 GJB 772A—1997 中的方法 416.1（压缩法）测得 JH-2 和 JO-8 炸药柱的抗压强度分别为 29.2 和 36.5 MPa，而同方法下测得 C-1 炸药柱的抗压强度仅为 14.5 MPa；同时，采用 GJB 772A—1997 中的方法 601.2（爆炸概率法）测得 JH-2 和 JO-8 炸药造型粉颗粒的摩擦感度分别为 28% 和 10%，而同方法下测得 C-1 炸药造型粉颗粒的摩擦感度为 26%。由此可以合理推断，在相同应力条件及试验状态下，C-1 炸药较低的抗压强度和较高的颗粒摩擦感度会促进其发生局部微裂纹扩张并进一步形成局部热点。

(3) 3 种炸药主成分受热分解的反应程度不同。根据文献 [11]，3 种炸药的主要成分 RDX、HMX 和 CL-20 的热分解温度分别为 210、280 和 215 ℃，CL-20 的热稳定性仅比 RDX 略高。同时，CL-20 在其多环结构中含有 6 个 N—NO_2 基团（RDX 有 3 个，HMX 有 4 个），其分解反应热为 (2.9±0.3) kJ/g，大于 RDX 和 HMX 的[33-34]。因此，在相同热点条件下，主成分 CL-20 与 RDX 和 HMX 在热分解温度及分解反应热的较大差异，会导致 C-1 炸药的热稳定性和局部温升与 JH-2 和 JO-8 炸药的显著不同。

(4) 其他因素。以上 3 点仅以较宏观的角度分析了 3 种炸药的基本性能对其撞击感度的影响。实际上，炸药的分子组成、分子结构和晶粒大小以及添加剂等均会影响药柱的撞击感度[32]。对于 C-1 炸药，晶粒大小和添加剂方面的影响目前暂未见相关数据支持。而对于炸药的分子组成及结构等方面的影响，Song 等[11] 从 3 种炸药的主要成分 RDX、HMX 和 CL-20 的单个分子密度、分子与电子结构、电荷平衡及分子间作用力、滑动能量等方面给出了分析，从微观联系宏观的角度证实了 CL-20 炸药的机械敏感性应当高于 RDX 和 HMX。

综上可知：C-1 炸药和药柱本身的力学性能及主成分 CL-20 的分子组成、分子结构和热-化特性是影响 C-1 炸药柱冲击响应的主要因素，并会导致 C-1 炸药药柱的撞击感度高于同类压装炸药的结果，这与本文试验结果相吻合。需要强调的是，大型落锤试验中，炸药的撞击点火响应是典型的力-热-化耦合过程，影响炸药撞击感度的因素较复杂，更多因素对撞击感度的影响暂无相关数据，有待进一步研究。

3 结　论

(1) 给出了改进的应力率表征方法及其对应判据，即安全应力率参数 C_0。在继承原“过载条件下炸药点火判据”对应力率考虑的基础上改进了数据处理方法，并明确了数据采集和滤波条件。通过典型压装炸药 C-1、JH-2、JO-8 的落锤试验，验证了安全应力率参数 C_0 对炸药冲击响应特性的表征具有一定的有效性和普适性，且与采用 GJB 5403.2—2005 中的表征方法得到的 3 种炸药的撞击感度的变化规律一致。

(2) 获得了 3 种典型压装炸药的撞击感度特性。C-1 炸药的特性落高 H_{50}=1.0 m，分别为 JO-8、JH-2 炸药的 62.50% 和 50.00%；在不发生爆轰的条件下，C-1 炸药的后坐应力峰值 σ_0=748.90 MPa，分别为 JO-8、JH-2 炸药的 85.42% 和 64.33%；C-1 炸药的安全应力率参数 C_0=344 GPa^2/s，分别为 JO-8、JH-2 炸药的 45.87% 和 39.14%。C-1 炸药的总体撞击感度高于 JO-8 和 JH-2 的。

(3) 分析了 C-1 炸药撞击感度较高的原因。C-1 炸药和药柱本身的力学性能及其主成分 CL-20 的分子组成、分子结构和热-化学特性会导致 C-1 炸药柱的撞击感度较 JH-2 和 JO-8 炸药柱高，进而在同落高下 C-1 炸药柱内的实际应力更高、结构破坏更快、热分解更早、热点温升更剧烈。炸药撞击感度的影响因素复杂，相关问题尚需进一步研究。

参考文献:

[1] 彭翠枝, 赵春柳, 毛长勇, 等. 国外 CL-20 炸药技术发展分析 [J]. 火炸药学报, 2022, 45(3): 290–299. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203003.
PENG C Z, ZHAO C L, MAO C Y, et al. Foreign development status of CL-20 explosive technology [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(3): 290–299. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203003.

[2] PARAKHIN V V, SMIRNOV G A. Research progress on design, synthesis and performance of energetic polynitro hexaazaisowurtzitane derivatives: towards improved CL-20 analogues [J]. FirePhysChem, 2024, 4(1): 21–33. DOI: 10.1016/j.fpc.2023.05.006.

[3] BARI R, DENTON A A, FONDREN Z T, et al. Acceleration of decomposition of CL-20 explosive under nanoconfinement [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 140(6): 2649–2655. DOI: 10.1007/s10973-019-09027-5.

[4] YANG L F, SHI X R, LI C Z, et al. Microfluidic assisted 90% loading CL-20 spherical particles: enhancing self-sustaining combustion performance [J]. Defence Technology, 2023, 22: 176–184. DOI: 10.1016/j.dt.2021.12.004.

[5] 吴成成, 王正宏, 李世伟, 等. CL-20 基压装炸药结构成型载体的设计及其应用 [J]. 火炸药学报, 2022, 45(3): 388–395. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202204020.
WU C C, WANG Z H, LI S W, et al. Design and application of CL-20-based pressed explosives structure forming carrier [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(3): 388–395. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202204020.

[6] 刘正, 聂建新, 徐星, 等. 密闭空间内六硝基六氮杂异伍兹烷基复合炸药能量释放特性 [J]. 兵工学报, 2022, 43(3): 503–512. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0163.
LIU Z, NIE J X, XU X, et al. Energy release characteristics of CL-20-based composite explosives in confined space [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(3): 503–512. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0163.

[7] GAO H X, ZHANG Q H, SHREEVE J M. Fused heterocycle-based energetic materials (2012—2019) [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(8): 4193–4216. DOI: 10.1039/c9ta12704f.

[8] LI C Y, KONG S, LIAO D J, et al. Fabrication and characterization of mussel-inspired layer-by-layer assembled CL-20-based energetic films via micro-jet printing [J]. Defence Technology, 2022, 18(10): 1748–1759. DOI: 10.1016/j.dt.2021.12.001.

[9] 阚润哲, 聂建新, 郭学永, 等. 不同铝氧比 CL-20 基含铝炸药深水爆炸能量输出特性 [J]. 兵工学报, 2022, 43(5): 1023–1031. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0227.
KAN R Z, NIE J X, GUO X Y, et al. Energy output characteristics of CL-20-based aluminized explosives with different Al/O ratios during deep-water explosion [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(5): 1023–1031. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0227.

[10] 吕中杰, 高晨宇, 赵开元, 等. 铝质量分数对 CL-20 基炸药驱动筒壁能量输出结构影响 [J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(1): 27–35. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.015.
LÜ Z J, GAO C Y, ZHAO K Y, et al. Influence of aluminum content on energy output structure of CL-20-based explosives

driving cylinder wall [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(1): 27–35. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.015.

[11] SONG S W, TIAN X L, WANG Y, et al. Theoretical insight into density and stability differences of RDX, HMX and CL-20 [J]. CrystEngComm, 2022, 24(8): 1537–1545. DOI: 10.1039/d1ce01577j.

[12] SHA Y, ZHANG X B. Reaction mechanism of hydrogen peroxide enhancing detonation performance in the host-guest structure of CL-20 by reactive molecular dynamics simulations [J]. Vacuum, 2023, 211: 111929. DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.111929.

[13] MAO X X, JIANG L F, LI Y F, et al. Preparation of sub-micron sized CL-20 and its mechanical and thermal properties [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46(1): 52–60. DOI: 10.1002/prep.202000137.

[14] GAO F B, JING J Q, CHENG W J, et al. Molecular dynamics simulation of bilayer core-shell structure of CL-20 surface-modified by polydopamine coated with polymer binder [J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107099. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107099.

[15] HE W J, LI Y N, BAO P, et al. Utilizing surface modification in coating technology to enhance the efficiency of CL-20 desensitization [J]. FirePhysChem, 2024, 4(1): 72–79. DOI: 10.1016/j.fpc.2023.10.002.

[16] ZHANG X P, CHEN S S, WU Y G, et al. A novel cocrystal composed of CL-20 and an energetic ionic salt [J]. Chemical Communications, 2018, 54(94): 13268–13270. DOI: 10.1039/c8cc06540c.

[17] LIU K, ZHANG G, LUAN J Y, et al. Crystal structure, spectrum character and explosive property of a new cocrystal CL-20/DNT [J]. Journal of Molecular Structure, 2016, 1110: 91–96. DOI: 10.1016/j.molstruc.2016.01.027.

[18] ANDERSON S R, DUBÉ P, KRAWIEC M, et al. Promising CL-20-based energetic material by cocrystallization [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(5): 783–788. DOI: 10.1002/prep.201600065.

[19] LIU N, DUAN B H, LU X M, et al. Preparation of CL-20/DNDAP cocrystals by a rapid and continuous spray drying method: an alternative to cocrystal formation [J]. CrystEngComm, 2018, 20(14): 2060–2067. DOI: 10.1039/C8CE00006A.

[20] 王克强. 炸药破甲威力与爆轰参数之间定量关系的探讨 [J]. 火炸药学报, 1999, 18(2): 25–29. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.1999.02.007.
WANG K Q. Studies on the quantitative relation between the penetration performance and explosive properties [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999, 18(2): 25–29. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.1999.02.007.

[21] 南宇翔. 高能炸药爆炸驱动金属能量输出规律研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 109–112.
NAN Y X. Law of energy release for metal-driving by high-energy explosive [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 109–112.

[22] 王树有, 南宇翔, 蒋建伟, 等. 典型 CL-20 和 HMX 基压装炸药爆炸驱动特性对比 [J]. 含能材料, 2021, 29(4): 332–337. DOI: 10.11943/CJEM2020301.
WANG S Y, NAN Y X, JIANG J W, et al. Comparative experimental study on explosion driving performance of typical CL-20 and HMX-based pressed explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(4): 332–337. DOI: 10.11943/CJEM2020301.

[23] 谈乐斌, 张相炎, 管红根, 等. 火炮概论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 124–124.
TAN L B, ZHANG X Y, GUAN H G, et al. Introduction to artillery [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 124–124.

[24] 皮铮迪. CL-20 混合炸药冲击起爆特征及爆轰波成长规律研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
PI Z D. Investigate the shock into the detonation characteristics and rules of CL-20-based explosives [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[25] 皮铮迪, 陈朗, 刘丹阳, 等. CL-20 基混合炸药的冲击起爆特征 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 915–923. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0915-09.
PI Z D, CHEN L, LIU D Y, et al. Shock initiation of CL-20 based explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 915–923. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0915-09.

[26] 高家乐, 周霖, 苗飞超, 等. 过载环境下炸药装药点火过程的数值模拟 [J]. 火炸药学报, 2022, 45(3): 323–331. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203031.
GAO J L, ZHOU L, MIAO F C, et al. Numerical simulation of ignition process of explosive charge in overload environment [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(3): 323–331. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203031.

[27] 周霖, 倪磊, 李东伟, 等. 炸药抗过载性能试验方法 [J]. 兵工学报, 2023, 44(6): 1722–1732. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0074.
ZHOU L, NI L, LI D W, et al. Test method for anti-overload performance of explosives [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(6): 1722–1732. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0074.

[28] 王世英, 胡焕性. B 炸药装药发射安全性落锤模拟加载实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 275–278. DOI: 10.11883/1001-1455(2003)03-0275-4.
WANG S Y, HU H X. Drop hammer simulation study on launch safety of composite B [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 275–278. DOI: 10.11883/1001-1455(2003)03-0275-4.

[29] 高立龙, 牛余雷, 王浩, 等. 典型炸药柱的 400 kg 落锤撞击感度特性分析 [J]. 含能材料, 2011, 19(4): 428–431. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.017.
GAO L L, NIU Y L, WANG H, et al. Analysis of impact sensitivity characteristics for typical explosive cylinder [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 428–431. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.017.

[30] 许志峰, 屈可朋. 装药发射安全性模拟加载实验方法研究 [J]. 火工品, 2015, 37(6): 51–53. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2015.06.014.
XU Z F, QU K P. Study on experimental method of simulation loading for launch safety of charge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2015, 37(6): 51–53. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2015.06.014.

[31] 黄正平, 张锦云, 张汉萍, 等. 后坐冲击模拟实验装置工作机理研究 [J]. 北京理工大学学报, 1994, 14(4): 371–377. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.1994.04.008.
HUANG Z P, ZHANG J Y, ZHANG H P, et al. Working principles of a setback-shock simulator [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1994, 14(4): 371–377. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.1994.04.008.

[32] 刘海营, 张景林, 王作山. 炸药撞击感度的研究综述 [J]. 山西化工, 2007, 27(6): 57–59. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2007.06.025.
LIU H Y, ZHANG J L, WANG Z S. Study on the explosive impact sensitivity [J]. Shanxi Chemical Industry, 2007, 27(6): 57–59. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2007.06.025.

[33] TURCOTTE R, VACHON M, KWOK Q S M, et al. Thermal study of HNIW (CL-20) [J]. Thermochimica Acta, 2005, 433(1/2): 105–115. DOI: 10.1016/j.tca.2005.02.021.

[34] 范夕萍, 王霞, 刘子如, 等. 纳米 Cu 粉对 HMX 和 RDX 热分解的催化作用 [J]. 含能材料, 2005, 13(5): 284–287. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2005.05.003.
FAN X P, WANG X, LIU Z R, et al. Catalysis of nano Cu powder on the thermal decomposition of HMX and RDX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005, 13(5): 284–287. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2005.05.003.

(责任编辑　张凌云)