

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.005

# DNAN 基熔铸装药榴弹跌落冲击特性与安全性分析<sup>\*</sup>

沙洪博<sup>①</sup> 袁俊明<sup>①</sup> 黄求安<sup>②</sup> 夏 韬<sup>①</sup> 邢曦伟<sup>①</sup> 温 旭<sup>①</sup>

①中北大学环境与安全工程学院(山西太原,030051)

②中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部(四川绵阳,621000)

[摘 要] 为研究 DNAN(2,4-二硝基苯甲醚)基熔铸炸药跌落过程的力学响应,设计了含模拟装药的榴弹跌落试验,应用力传感器测试系统分析了弹体跌落的冲击响应特性。同时,基于有限元方法模拟了 DNAN 基熔铸装药弹体在不同工况下的跌落过程,得到了 DNAN 基熔铸炸药受到的应力载荷及冲击加速度过载变化规律。结果表明:通过试验与仿真对比,验证了有限元模拟弹药跌落的可行性;DNAN 基熔铸炸药受到的冲击载荷在传递过程中呈现出递减的趋势,作用时间在 1~2 ms 之间;弹体装药冲击载荷峰值随跌落高度与角度的增加而变大,作用时间近似相同;DNAN 基熔铸炸药升温随着跌落高度的增加而增大,整体升温幅度为 2.3~5.8℃。仿真结果可为 DNAN 基熔铸装药榴弹跌落安全性设计提供依据。

[关键词] DNAN 基熔铸装药;弹体跌落;数值仿真;跌落安全性

[分类号] TQ560.7

## Drop Impact Characteristics and Safety Analysis of DNAN-Based Melt-Cast Charge Grenade

SHA Hongbo<sup>①</sup>, YUAN Junming<sup>①</sup>, HUANG Qiu'an<sup>②</sup>, XIA Tao<sup>①</sup>, XING Xiwei<sup>①</sup>, WEN Xu<sup>①</sup>

①School of Environmental and Safety Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd., China South Industries Group Co., Ltd. (Sichuan Mianyang, 621000)

[ABSTRACT] In order to study the mechanical response of DNAN-based melt-cast explosive during the drop process, a drop test for the grenade containing a simulated charge was designed, and impact response characteristics of the projectile after falling were analyzed by the force sensor test system. At the same time, based on the finite element method, the falling process of DNAN-based melt-cast charge projectile under different working conditions was simulated, and stress load and change law of impact acceleration overload of the DNAN-based melt-cast explosive was obtained. Results show that the feasibility of finite element simulation of ammunition drop is verified by the comparison of experiment and simulation. Impact load of DNAN-based melt-cast explosive shows a decreasing trend in the transmission process, and the action time is 1-2 ms. Peak impact load of the body charge increases with the drop height and angle, and the action time is approximately the same. Temperature rise of the DNAN-based melt-cast explosive increases with the drop height, and the overall temperature rise is 2.3-5.8℃. The simulation results can provide a basis for the drop safety design of DNAN-based melt-cast charge grenade.

[KEYWORDS] DNAN-based melt-cast charge; projectile drop; numerical simulation; drop safety

## 引言

在运输过程中,由于各种意外原因,弹药会发生

跌落或撞击,可能会造成弹体变形、弹药损伤加深及炸药稳定性降低。弹药损伤加重会导致弹药性能劣化,影响爆轰波的传递,减弱弹药毁伤效果;炸药的稳定性降低会导致炸药在受到外界刺激时,易发

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-06-08

基金项目:西安近代化学研究所开放合作创新基金(204J20190387)

第一作者:沙洪博(1995-),男,硕士研究生,主要从事含能材料安全与数值模拟研究。E-mail:1518418931@qq.com

通信作者:袁俊明(1979-),男,副教授,主要从事安全弹药评估方法与技术研究。E-mail:junmyuan@163.com

生点火和爆炸等意外事件,引起人员伤亡。

跌落试验是评价弹体安全性的重要试验之一,众多学者对此系统地进行了研究。南宇翔等<sup>[1]</sup>采用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟了子弹在不同工况下的冲击特性及子弹降落的角度和速度对子弹过载峰值的影响。代晓淦等<sup>[2]</sup>以 PBX-2 炸药为例,设计了炸药加速模拟跌落试验装置,分析了在壳体约束条件下的 PBX-2 跌落响应过程,并与 Spigot 试验做对比,验证了约束条件对弹药跌落反应的影响。王晨等<sup>[3]</sup>应用点火增长反应速率方程、炸药热力耦合和自热反应模型描述了在跌落过程中炸药的起爆和破碎过程,并实现了对炸药跌落响应的分析。高大元等<sup>[4]</sup>设计了炸药撞击试验,分析了跌落高度和弹药老化对炸药安全性的影响。Dienes 等<sup>[5]</sup>针对热点引起炸药爆炸的可能性,比较了几种机理,认为闭合裂纹的界面摩擦引起爆炸的可能性较高。Bennett 等<sup>[6]</sup>开发并演示了 PBX(高聚物黏结炸药)的数值本构模型;该模型可用于预测高能材料的非冲击点火和机械响应,并用于预测弹药跌落对炸药的损伤。Yang 等<sup>[7]</sup>采用二维力学化学模拟,通过流体力学代码 DREXH-2D,有效地描述了 PBX 受到中低水平撞击时的力学和点火爆燃响应,并应用计算模型准确预测了炸药意外起爆时的动态响应。

综上所述,国内外专家针对跌落对 PBX 损伤的影响进行了全面的研究,主要进行了宏观跌落试验以及细观模拟点火分析,而针对 DNAN(2,4-二硝基苯甲醚)基熔铸炸药在跌落过程中受到应力载荷以及冲击加速度的变化规律缺乏系统性研究。

DNAN 基熔铸炸药塑性变形能力低,在跌落过程中易发生断裂。同时, DNAN 基熔铸炸药在装药过程中易出现缩孔、缩松、裂纹及孔洞等缺陷;在跌落撞击过程中,装药缺陷易引发热点,造成爆炸,引起人员伤亡。所以,开展 DNAN 基熔铸装药弹体在意外刺激作用下的力学响应特性及安全性分析具有重要的工程应用价值和现实意义。

在跌落过程中,含 DNAN 基熔铸装药榴弹的主装药受低幅值、长脉冲的低速冲击力作用而易产生损伤,形成热点,诱发成燃烧甚至转为爆轰,所引起的爆炸后果及安全事故要远大于只发生燃烧现象的发射药。由此可知,对榴弹主装药的研究意义要高于发射药。因此,进行了含模拟装药的榴弹跌落安全性试验,采用有限元软件模拟了弹体以不同姿态及高度的跌落过程,比较试验与模拟数据,分析了数值模拟方法的可行性,并通过分析 DNAN 基熔铸炸药受到的应力载荷及加速度过载,提出了跌落冲击

对 DNAN 基熔铸炸药安全性的影响规律。

## 1 榴弹跌落试验

### 1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。包括:MYDL-14 压电石英力传感器,灵敏度为 4 pC/N,量程为 300 kN;示波器;信号放大器;榴弹,材料为 45#钢,口径为 57 mm,弹头直径为 20 mm,弹尾直径为 56 mm,高度为 225 mm,质量为 2.6 kg;底座,材料为钢块;模拟装药,质量为 3 kg,直径为 56 mm,高度为 50 mm;导向装置,材料为 PVC 管,口径为 63 mm,高度为 500 mm。

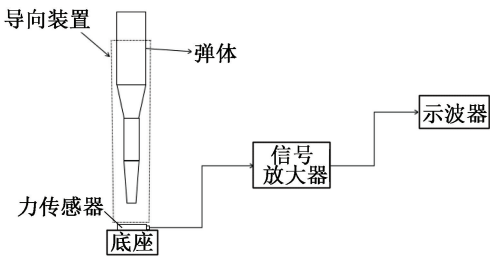


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

### 1.2 试验原理

弹体受到的冲击压力

$$F = \frac{V}{\alpha\beta} \quad (1)$$

式中: $F$  为冲击压力,kN; $\alpha$  为力传感器灵敏度系数,pC/N; $\beta$  为信号放大器的放大倍数, $\beta = 1$ ;  $V$  为示波器示数,mV。

弹体受到的冲击应力载荷

$$p = \frac{F}{S} \quad (2)$$

式中: $p$  为压强,MPa; $F$  为冲击压力,kN; $S$  为受力面积,m<sup>2</sup>。

### 1.3 试验方案

鉴于弹体结构强度,将跌落高度设为 30 cm 和 40 cm。在试验过程中,按照选定的高度,选择弹头顶部垂直跌落在力传感器上,并在力传感器底部放置一个钢块,目的是减少由于冲击引起的地面振动以及地面过软带来的缓冲,并应用导向装置控制跌落角度,通过示波器和信号放大器采集数据,做出冲击压力曲线。

### 1.4 试验结果

图 2 为在 30 cm 和 40 cm 高度跌落时弹体受到的冲击压力曲线;图 3 为由式(2)计算得到的弹体受到的冲击应力载荷曲线。

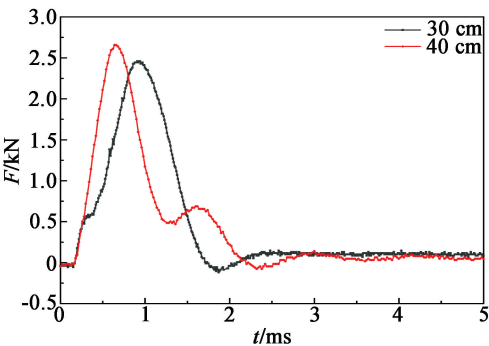


图 2 弹体跌落冲击压力曲线

Fig. 2 Drop impact pressure curve of the projectile

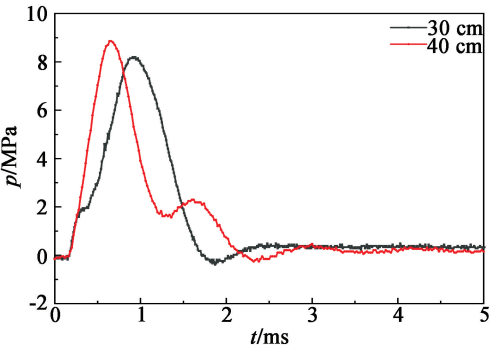


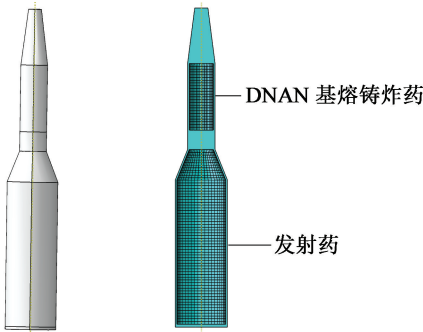
图 3 弹体跌落冲击应力载荷曲线

Fig. 3 Drop impact stress load curve of the projectile

2 弹体跌落数值计算

2.1 建立有限元模型

采用有限元软件中的三维实体,按照实际尺寸 1 : 1 对弹体建模,单位制为 mm · t · s,主要包括弹壳、主装药、发射药 3 个部分,弹体外形和内部装药结构如图 4 所示。外壳材质为 45# 钢<sup>[8]</sup>;主装药为 DNAN 基熔铸炸药<sup>[9-11]</sup>,组分为 DNAN/HMX,质量比 20 : 80,采用双线性本构模型;发射药组分为硝胺、RDX



(a)有限元模型 (b)内部装药剖面网格图

图 4 弹体有限元模型与内部装药剖面网格图

Fig. 4 Finite element model and grid diagram of internal charge section of the projectile

和聚氨酯弹性体,采用黏弹性模型<sup>[12]</sup>;靶板长为 2 000 mm,宽为 2 000 mm,厚度为 750 mm,材质为高强度钢<sup>[13]</sup>。材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比
弹体	7.80	210.0	0.30
DNAN 基熔铸炸药	1.82	19.3	0.23
发射药	1.60	1.6	0.30
靶板	18.50	360.0	0.20

为增加计算效率,网格属性为六面体结构网格,单元类型为八结点热耦合六面体单元。在模拟跌落过程中,不计算空气阻力,假设弹体跌落为自由落体运动。根据能量守恒定律,可求得弹体在跌落至靶板时的瞬时速度<sup>[14]</sup>为

$$v = \sqrt{2gh}。$$
 (3)

式中:  $v$  为速度, m/s;  $g$  为重力加速度,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ;  $h$  为高度, m。

将该瞬时速度设为弹体的临界速度,为节省计算时间,采用初始速度等效跌落高度的方法<sup>[15]</sup>。

2.2 计算工况

首先,模拟跌落高度为 30 cm 和 40 cm 的弹体跌落。对于跌落安全性试验,国外制定了极其严格的标准<sup>[16-17]</sup>;同时,分析在实际跌落过程中跌落姿态对弹体冲击的影响,选取了 4 个跌落角度。因此,弹体跌落高度设为 1.5 m 和 12.0 m,跌落角度设为 30°、45°、60°和 90°。

3 仿真结果分析

3.1 试验与模拟对照分析

由图 5 可知:弹体跌落高度为 30 cm 时,应力峰值区间为 8.1 ~ 8.5 MPa;跌落高度为 40 cm 时,应力峰值区间为 8.8 ~ 9.0 MPa;试验与模拟应力峰值误差小于 10%。含模拟装药的弹体跌落试验的仿真模拟应力载荷曲线的规律及作用时间,与榴弹跌落试验过程中弹体的应力曲线基本相同,证明弹体模型建立正确,同时材料模型参数选择合理。因此,可以采用有限元软件模拟弹药跌落过程,并分析其冲击特性。在此基础上,开展 DNAN 基熔铸装药榴弹在不同跌落高度、跌落姿态以及弹体内部装药整体升温变化等多种工况的仿真模拟计算,并对其跌落状态安全性进行分析。

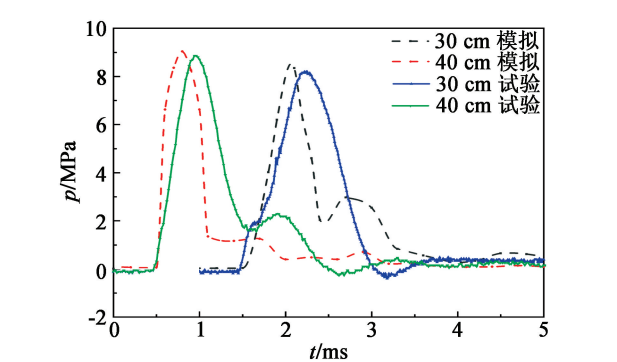


图5 弹体所受应力的模拟与试验结果对照

Fig.5 Simulation and experiment comparison of stress on the projectile

3.2 不同跌落高度下 DNAN 基熔铸炸药冲击载荷分析

为了分析弹药在垂直跌落时的冲击载荷传递规律,在 DNAN 基熔铸炸药上选取了 3 个节点。如图 6 所示,节点 1<sup>#</sup>为弹体装药头部,节点 2<sup>#</sup>为中部,节点 3<sup>#</sup>为尾部。对各节点应力载荷和加速度过载进行分析。

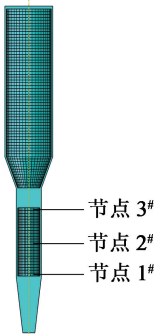


图6 节点位置分布图

Fig.6 Distribution of the nodes

3.2.1 弹体在 1.5 m 高度处跌落

图 7 为弹体在 1.5 m 高度处垂直跌落时 DNAN 基熔铸炸药受到的应力载荷和冲击加速度过载曲线。由图 7 可知:弹体在跌落时,应力载荷和加速度过载峰值均在节点 1<sup>#</sup>处达到最大,分别为 35.0 MPa 和 30 000 g;在节点 3<sup>#</sup>处最小,分别为 26.8 MPa 和 20 000 g。应力载荷作用时间均在节点 1<sup>#</sup>处最大,为 1.0 ms;节点 3<sup>#</sup>处最小,为 0.9 ms。加速度过载作用时间均在节点 1<sup>#</sup>处最大,为 1.7 ms;节点 3<sup>#</sup>处最小,为 1.5 ms。

3.2.2 弹体在 12.0 m 高度处跌落

图 8 为弹体在 12.0 m 高度处垂直跌落时 DNAN 基熔铸炸药受到的应力载荷和冲击加速度过载曲线。由图 8 可知:弹体在跌落过程中,应力载荷和加速度过载峰值均在节点 1<sup>#</sup>处达到最大,分别为

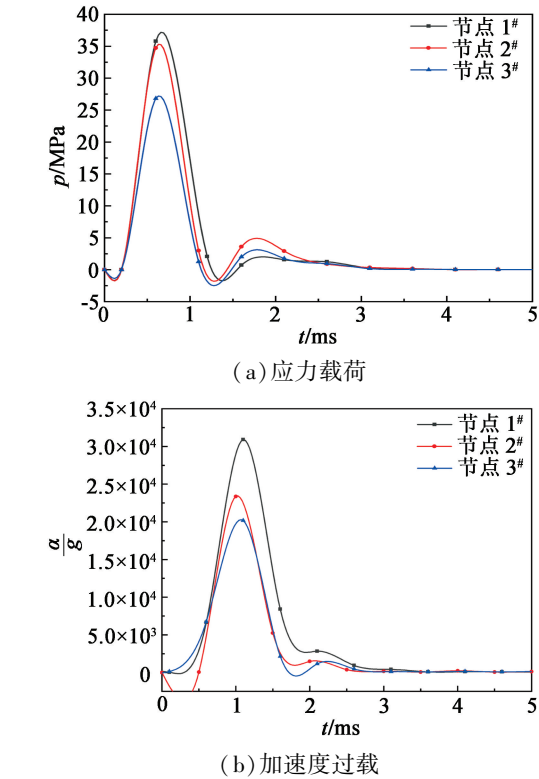


图7 1.5 m 跌落时 DNAN 基熔铸炸药的应力载荷和加速度过载曲线

Fig.7 Stress load curves and acceleration overload curves of DNAN-based melt-cast explosive during 1.5 m drop

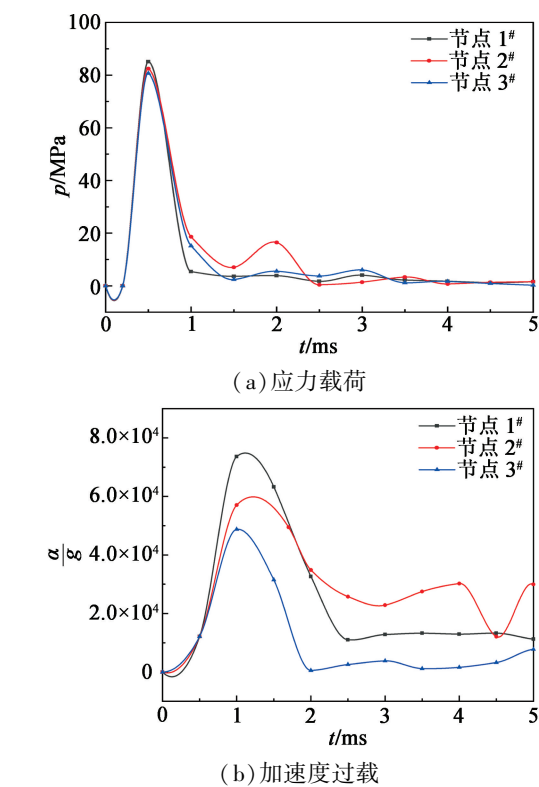


图8 12.0 m 跌落时 DNAN 基熔铸炸药的应力载荷和加速度过载曲线

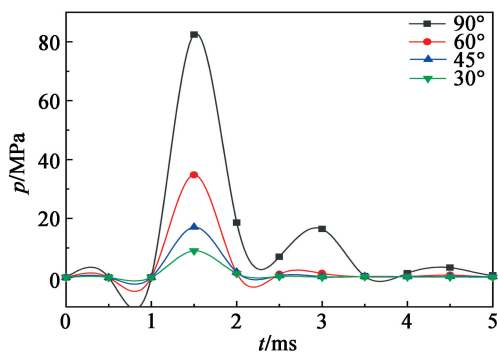
Fig.8 Stress load curves and acceleration overload curves of DNAN-based melt-cast explosive during 12.0 m drop



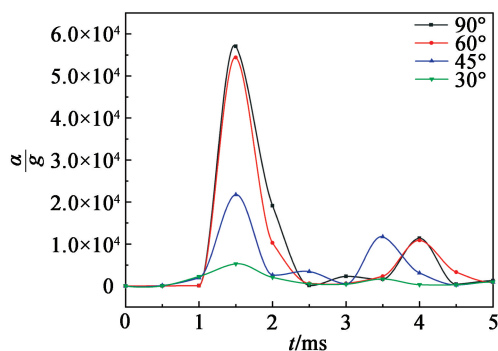
85 MPa 和 73 000 g; 在节点 3<sup>#</sup>处最小, 分别为 80 MPa 和 48 000 g。应力载荷作用时间均在节点 1<sup>#</sup>处最大, 为 1.0 ms; 节点 3<sup>#</sup>处最小, 为 0.9 ms。加速度过载作用时间均在节点 1<sup>#</sup>处最大, 为 1.9 ms; 节点 3<sup>#</sup>处最小, 为 1.6 ms。

### 3.3 不同跌落姿态下 DNAN 基熔铸炸药冲击载荷分析

由于弹体在较高处跌落时, 跌落姿态在空中会发生变动。针对跌落姿态对冲击载荷的影响, 在仿真计算时, 模拟了弹体在 12.0 m 高度处以 30°、45°、60°和 90°的角度跌落的过程, 并对 DNAN 基熔铸炸药在不同角度跌落时节点 2<sup>#</sup>处的应力载荷和加速度过载峰值进行了分析, 如图 9 所示。



(a) 应力载荷



(b) 加速度过载

图 9 不同跌落姿态下 DNAN 基熔铸炸药的应力载荷和加速度过载曲线

Fig. 9 Stress load curves and acceleration overload curves of DNAN-based melt-cast explosive under different drop angles

由图 9 可知: 弹体在 12.0 m 处跌落时, 应力载荷和加速度过载峰值均在 90°时最大, 分别为 81 MPa 和 57 045 g, 作用时间约为 2.1 ms; 在 30°时最小, 分别为 9 MPa 和 5 271 g, 作用时间约为 2.0 ms。

### 3.4 不同跌落高度下 DNAN 基熔铸炸药升温变化

选取下部节点来分析 DNAN 基熔铸炸药整体升温变化。同时, 为了获得弹体装药在更极端跌落

高度的升温规律, 还研究了跌落高度为 20.0、25.0 m 和 30.0 m 时内部装药的升温变化。

由图 10 可知: 在 1.5 m 时, 弹体内部 DNAN 基熔铸装药整体升温为 0.5 °C; 其余跌落高度 (如 12.0、20.0、25.0 m 及 30.0 m) 时, 整体升温分别为 2.3、3.8、4.8 °C 以及 5.8 °C。同时也可知, 不同跌落高度时 DNAN 基熔铸装药整体升温速率近似相等, 表现出急剧上升趋势, 且都在 0.5 ms 左右出现升温拐点, 逐渐趋于平稳。通过图 11 可知, DNAN 基熔铸炸药的升温变化与弹体跌落高度呈线性关系, 随着跌落高度的增加, 升温也逐渐增大, 但增幅不大。

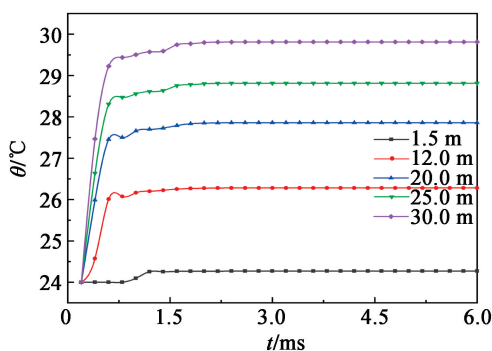


图 10 不同跌落高度下 DNAN 基熔铸炸药的升温变化

Fig. 10 Temperature rise change of DNAN-based melt-cast explosive under different drop heights

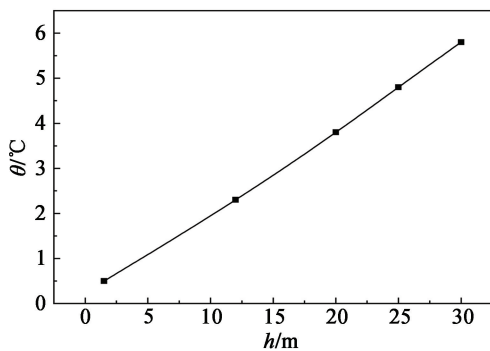


图 11 DNAN 基熔铸炸药的升温与跌落高度的关系

Fig. 11 Relationship between temperature rise and drop height of DNAN-based melt-cast explosive

## 4 结论

通过试验与模拟数据相对比, 证明了有限元软件模拟弹体内部装药冲击特性的可行性。

1) 由仿真计算可知, 当弹体在 1.5 m 与 12.0 m 高度处跌落时, DNAN 基熔铸炸药装药受冲击力的

峰值、作用时间分别是百兆帕与毫秒级,属于典型的含能材料非冲击点火响应特性。同时,获得了冲击加速度过载变化规律。

2)当跌落高度设为 12.0 m 时,DNAN 基熔铸炸药受到的冲击加速度过载峰值随着跌落角度的增加而变大。弹药在垂直跌落时危险性最高,加速度过载峰值为 57 045 g;在 30°跌落时,危险性最小,加速度过载峰值为 5 721 g。冲击特性作用时间随着高度及角度的增加而变大。

3)在 30.0 m 高度跌落时,DNAN 基熔铸装药榴弹跌落后内部整体升温最大,为 5.8℃,不会影响装药安全性。但跌落冲击应力载荷及加速度过载可能会引发含装药缺陷的 DNAN 基熔铸装药榴弹产生局部热点,导致发生意外爆炸或早炸现象。因此,未来可在此基础上开展 DNAN 基熔铸装药跌落状态下的细观模型升温规律与点火机制研究。

总之,在进行含 DNAN 基熔铸装药榴弹跌落安全防护时,应针对上述高过载的情况进行跌落安全性分析,防止 DNAN 基熔铸炸药的应力载荷及加速度过载超过安全阈值,引起炸药爆炸,造成人员伤亡和财产损失。

## 参 考 文 献

- [1] 南宇翔,蒋建伟,王树有,等.子弹药落地冲击响应数值模拟及实验验证[J].振动与冲击,2013,32(3):182-187.  
NAN Y X, JIANG J W, WANG S Y, et al. Numerical simulation and test for impact response of submunitions drop [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32 (3):182-187.
- [2] 代晓淦,申春迎,文玉史.模拟跌落撞击下 PBX-2 炸药的响应[J].含能材料,2011,19(2):209-212.  
DAI X G, SHEN C Y, WEN Y S. Reaction of PBX-2 explosive under simulated drop impact [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(2):209-212.
- [3] 王晨,陈朗,何乐,等.低强度冲击下炸药点火的数值模拟[J].火炸药学报,2012,35(2):44-48.  
WANG C, CHEN L, HE L, et al. Numerical simulation of explosive ignition under low intensity impact [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(2):44-48.
- [4] 高大元,申春迎,黄谦,等.炸药件在模拟跌落试验中的响应[J].火炸药学报,2012,35(5):13-16.  
GAO D Y, SHEN C Y, HUANG Q, et al. Reaction of explosive subassembly under simulated drop test [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35 (5):13-16.
- [5] DIENES J K. Frictional hot-spots and propellant sensitivity [J]. MRS Online Proceedings Library, 1983, 24:373-381.
- [6] BENNETT J G, HABERMAN K S, JOHNSON J N, et al. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(12):2303-2322.
- [7] YANG K, WU Y Q, HUANG F L, et al. Numerical simulations of mechanical and ignition-deflagration responses for PBXs under low-to-medium-level velocity impact loading[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 337:148-162.
- [8] 李聪,赵宏伟,孙琳琳.基于纳米压痕分析的往复扭转载荷下 45 号钢的力学性能[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(3):859-864.  
LI C, ZHAO H W, SUN L L. Mechanical properties of 45 steel under reciprocating torsional load based on nanoindentation analysis [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3):859-864.
- [9] ZHU D L, ZHOU L, ZHANG X R, et al. Simultaneous determination of multiple mechanical parameters for a DNAN/HMX melt-cast explosive by Brazilian disc test combined with digital image correlation method[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017,42(8):864-872.
- [10] 蒙君熨,张向荣,周霖,等.DNAN 基熔铸炸药成型过程数值仿真[J].兵工学报,2013,34(7):810-814.  
MENG J J, ZHANG X R, ZHOU L, et al. Simulation of solidification process for DNAN-based melt-cast explosives[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(7):810-814.
- [11] 蒙君熨,周霖,金大勇,等.成型工艺对 2,4-二硝基苯甲醚基熔铸炸药装药质量的影响[J].兵工学报,2018,39(9):1719-1726.  
MENG J J, ZHOU, JIN D Y, et al. Effect of forming process on casting quality of 2,4-dinitroanisole-based casting explosive [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39 (9):1719-1726.
- [12] 孔斌.粒状发射药力学性能实验与仿真研究[D].太原:中北大学,2019.  
KONG B. Experimental and simulation study on mechanical properties of granular propellants [D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [13] 赵奇.弹体侵彻靶板过程中弹体温度场数值模拟研究[D].太原:中北大学,2016.

2008.

WANG X G. Emulsion explosives[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.

[2] 张定忠. 青藏铁路高原冻土区冻土爆破施工技术[J]. 工程科技, 2011(8): 242.

[3] 何广沂. 青藏高原多年冻土地带爆破研究[J]. 中国工程科学, 2001, 3(6): 57-64.

HE G Y. Study on blasting at ever-frost ground in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Engineering Science, 2001, 3(6): 57-64.

[4] 赵晓莉, 夏斌, 刘尊义, 等. 模拟高原环境对炸药爆速影响的试验研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(2): 36-39.

ZHAO X L, XIA B, LIU Z Y, et al. Experimental research on velocity of simulated plateau environment [J]. Explosive Materials, 2015, 44(2): 36-39.

[5] 李志敏, 汪旭光, 汪泉, 等. 负压环境对炸药爆炸冲击波影响的实验研究[J]. 火炸药学报, 2021, 44(1): 35-40.

LI Z M, WANG X G, WANG Q, et al. Experimental study on the effect of negative pressure environment on explosive shock wave [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2021, 44(1): 35-40.

[6] 高玉刚, 赵晓莉, 徐龙, 等. 高海拔压力环境对炸药猛度影响的实验研究[J]. 火工品, 2013(5): 36-39.

GAO Y G, ZHAO X L, XU L, et al. Experimental re-

search on brisance of explosive in simulated high altitude environment [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(5): 36-39.

[7] 黄麟. 模拟不同海拔水下爆炸的实验研究: 能量输出和作功能力[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2012.

HUANG L. Experimental research on underwater explosions in the simulated different altitudes: energy output and functional force [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2012.

[8] 百度文科. 海拔高度与大气压对比表 [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/4c9482fb770bf78a652954b4.html>.

[9] 冯学民, 蔡德利. 土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 489-491.

FENG X M, CAI D L. Soil temperature in relation to air temperature, altitude and latitude [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 489-491.

[10] 张立. 爆破器材性能与爆炸效应测试[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2006.

[11] 蔡敬国. 乳化炸药化学敏化效果的影响因素分析[J]. 煤矿爆破, 2008(2): 11-13.

CAI J G. Analysis for impact factors of chemical sensitization effect of emulsion explosive [J]. Coal Mine Blasting, 2008(2): 11-13.

(上接第 33 页)

ZHAO Q. Research the temperature field of the projectile in the process of the projectile penetrating target plate by the numerical simulation [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.

[14] 洪昊, 朱敏, 王盛凹, 等. 半球形炸药部件跌落应力分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(12): 210-214.

HONG H, ZHU M, WANG S A, et al. Stress analysis of dropping of hemispherical explosive part [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 210-214.

[15] 倪庆乐, 王雨时, 闻泉, 等. 基于有限元的裸态弹丸底向下跌落冲击特性[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(6): 51-56.

NI Q L, WANG Y S, WEN Q, et al. Drop impact properties of projectile without package bottom down based finite element [J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(6): 51-56.

[16] Safety drop. Munition test procedures: STANAG 4375-2003[S]. Brussels: NATO, 2003.

[17] Test method standard, hazard assessment tests for non nuclear munitions: MIL—STD—2105D [S]. Department of Defense, US, 2011.