

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.030

## 单推-3 火灾刺激下爆炸当量及其影响因素分析\*

徐飞扬<sup>1</sup>, 章菁菁<sup>2</sup>, 康立敏<sup>1</sup>, 姚亚东<sup>3</sup>, 夏曼曼<sup>4</sup>, 马智勇<sup>1</sup>, 过光飞<sup>1</sup>, 吴三震<sup>1</sup>, 徐森<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 南京 210094; 2. 南京理工中爆安全科技有限公司, 南京 210094;

3. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074; 4. 安徽天明爆破工程有限公司, 滁州 239000)

**摘要:** 为了研究单推-3 液体推进剂在储运和使用过程中遭遇火灾刺激时的爆炸当量, 利用极不敏感引爆物质(EIDS) 隔板试验确定单推-3 的冲击波感度, 采用高速摄像机、红外热成像仪、压力数据采集系统分别记录火烧刺激条件下不同尺度(18 和 120 kg) 单推-3 储罐的燃爆过程、火球表面最高温度以及冲击波超压峰值, 进一步计算了爆炸 TNT 当量。结果表明: 单推-3 在强冲击波的直接作用下不能传播爆轰。不同包装强度单推-3 在外部火灾条件下发生了爆燃, 甚至是整体爆轰反应, 制式包装 18 和 120 kg 单推-3 爆炸平均 TNT 当量分别为 0.629 和 0.0293, 其产生的冲击波效应与尺度效应之间不存在正相关关系。显然, 样品的制式包装设计强度对其爆炸烈度具有显著影响, 应在实际使用允许范围内, 降低单推-3 液体推进剂壳体的设计压力, 以有效减弱其整体爆炸危险性。

**关键词:** 单推-3; 冲击波感度; 火灾刺激; 爆炸当量; 壳体设计压力

中图分类号: O69 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)02-0245-08

## Study on Explosion Equivalent and its Influencing Factors of DT-3 under External Flame Stimulation

XU Fei-yang<sup>1</sup>, ZHANG Jing-jing<sup>2</sup>, KANG Li-min<sup>1</sup>, YAO Ya-dong<sup>3</sup>, XIA Man-man<sup>4</sup>,  
MA Zhi-yong<sup>1</sup>, GUO Guang-fei<sup>1</sup>, WU San-zhen<sup>1</sup>, XU Sen<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. NUST&CBSW Safety science and technology Co., LTD.,

Nanjing 210094, China; 3. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China; 4. An Hui Tianming Blasting Engineering Co., Ltd., Chuzhou 239000, China)

**Abstract:** To study the explosion equivalent of DT-3 and its influencing factors caused by fire stimulus during storage, transportation and use, the propagate detonation ability of that was studied by the extremely insensitive to detonating substances(EIDS) gap test. High-speed cameras and a shock wave pressure acquisition system were utilized to obtain information on the deflagration processes and shock wave hazards of DT-3 under external flame effect. Addi-

收稿日期(Date of reception): 2023-07-31

网络首发日期(Published online): 2023-10-19

作者简介: 徐飞扬(1992-), 男, 博士后, 主要从事液体推进剂爆燃反应机理及安全阈值量化表征方面研究, (E-mail) 2443634307@qq.com。

通讯作者: 徐森(1981-), 男, 教授, 主要从事爆炸力学、含能材料爆轰、危险性分级方面的研究, (E-mail) xusen@njust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金, 面上项目, No. 12272184; 中国博士后科学基金面上资助, No. 2023M731695; 中央高校基本科研业务费专项资金资助, No. 30922010503; 江苏省卓越博士后计划资金资助

**About the author:** XU Fei-yang(1992-), Postdoctor, mainly engaged in liquid propellant deflagration reaction mechanism and quantitative characterization of safety threshold, (E-mail) 2443634307@qq.com.

**Corresponding author:** XU Sen(1981-), Professor, mainly engaged in explosion mechanics, detonation of energetic materials and risk classification, (E-mail) xusen@njust.edu.cn.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China (NSFC) project (No. 12272184), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2023M731695), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 30922010503), and Jiangsu Funding Program for Excellent Postdoctoral Talent

tionally, an infrared thermal imager was employed to determine the highest temperature of the surface fireball. Further calculations were conducted to determine the explosive TNT equivalent of 18 kg and 120 kg DT-3 samples. The experimental results indicate that direct exposure to a strong shockwave does not cause DT-3 propagation detonation. However, different packing strengths can lead to deflagration events under external fire conditions, potentially resulting in an overall detonation reaction. The average TNT equivalents for standard packaged 18 kg and 120 kg DT-3 samples were found to be 0.629 and 0.0293 respectively. Furthermore, there is no positive correlation between the scale effect and shock wave impact. Under fire stimulus conditions, package design strength significantly influences the explosive characteristics of DT-3. To enhance safety measures, it is recommended that package design strength be reduced within acceptable limits for actual usage in order to effectively mitigate the risk of detonation hazard.

**Key words:** DT-3; shock wave sensitivity; fire stimulus; explosion equivalent; packing design pressure

单推-3(DT-3)是中国于20世纪80年代自主研发的一种高性能单组元推进剂,多应用于卫星以及长征系列运载火箭的末速修正和姿态控制等,也是世界上首次实际使用的低冰点推进剂,由肼、硝酸肼和水按规定配比所组成<sup>[1]</sup>,属于高能物质添加剂的成熟应用。吴联相验证了近红外光谱法用于单推-3成分含量快速检测的可行性<sup>[2]</sup>;Gao等研究了质量流量、预热温度和催化床尺寸等对单推-3推力和启动过程的控制的影响<sup>[3]</sup>;唐占梅采用电化学测试方法<sup>[4]</sup>,并结合其它分析手段,研究了钛合金TC4在单推-3中的电化学腐蚀行为与机理。

作为典型的液态化学品,单推-3因具有腐蚀和毒害等危险特性,其包装材料一般为带有一定工作压力的制式密闭不锈钢或者钛合金储罐,在遭遇火灾、外力冲击和意外点火等常见外界能量刺激时,容易引发意外爆炸事故。此外,国内航天单位对单推-3液体推进剂生产和储存场所安全距离的设定依据主要为《建筑设计防火规范》和《石油化工企业设计防火规范》等规范<sup>[5]</sup>,这严重忽视了其爆炸危害可能带来的不良后果<sup>[6,7]</sup>。冲击波超压峰值和TNT当量是衡量爆炸对目标破坏力大小的重要特征参数,对合理设置库房和生产场所的内外部安全距离具有

重要参考价值<sup>[8,9]</sup>。CHEN简要地介绍了液体推进剂爆炸效应的传播规律以及危害<sup>[10]</sup>;Osipov提出了低温液态氢氧火箭在发射事故期间发生大规模爆炸条件的工程风险评估方法<sup>[11]</sup>;Bowen等针对动物的杀伤做了大量的爆炸冲击实验<sup>[12]</sup>,并根据动物的创伤情况,按照一定的准则换算成了人在爆炸场中的创伤阈值。

综上所述,认为研究制式包装单推-3液体推进剂遭遇最常见意外刺激-火灾过程中产生的爆炸当量十分有必要。本文选择国内较为常用的单推-3液体推进剂(包含两种制式尺寸)为研究对象,通过EIDS隔板试验确定样品的冲击波感度,重点开展其在外部火灾刺激下的爆炸当量研究,为单推-3等液体推进剂现场生产线、库房的防爆安全设计以及运输和使用中的安全管理提供参考。

## 1 实验

### 1.1 试验样品及其包装

单推-3是一种具有类似氨臭味的有毒无色透明液体,吸湿性强。试验用样品与制式储罐由北京航天试验技术研究所提供,样品及其包装的关键参数如表1所示。

表1 样品及其包装的关键参数

Table 1 Key parameters of the sample and its packaging

样品	组分及质量百分比	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	氧平衡/%	净重/kg	包装设计压力/MPa	包装外形
DT-3	$\text{N}_2\text{H}_4 - 68\% +$	1.11	-62.65	18	1.00	柱状
	$\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{HNO}_3 -$ $23\% + \text{H}_2\text{O} - 9\%$			120	0.33	

### 1.2 试验方法与条件

#### 1.2.1 燃烧热

将燃烧热测量值和理论值相比较,可以反应样品的能量利用率,采用Parr 6200型氧弹量热仪在湿度约30%、温度约20°和3 MPa纯氧环境中开展样

品的燃烧热试验。

#### 1.2.2 冲击波感度

关于含能材料冲击波感度的测试方法较多,如UN和EIDS隔板试验等<sup>[13,14]</sup>。由于钝感含能材料的爆轰临界冲击压力与其尺寸密切相关,因此选择

较大尺寸的 EIDS 隔板试验讨论单推-3 的冲击波感度<sup>[13]</sup>。此外,布置两条夹角为 90°的地面压力传感器测量不同距离处的冲击波超压峰值,进一步判断

和验证单推-3 样品能否传播爆轰。压力传感器距样品中心距离分别为 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 和 6 m,冲击波感度测试方法如图 1 所示。



图 1 冲击波感度测试方法

Fig. 1 Shock wave sensitivity test

图 1 中所示钢管的外直径为 95 mm,壁厚约 11 mm,长度为 280 mm。验证板的材质为 A3 钢板,尺寸为 200 mm × 200 mm × 20 mm。传爆药柱为 1 kg pentolite 标准药柱,药柱的直径和长度均为 (95 ± 1) mm。

### 1.2.3 储箱火灾试验

储箱火灾试验是表征制式包装样品在实际状态下的危险效应直接有效的方式之一,火灾刺激测试系统如图 2 所示。

使用压力数据采集系统表征样品发生反应时的冲击波效应,采样频率为 1 MHz,所有压力传感器测试前均已标定。两条压力测试线的壁面压力传感器布置位置见表 2;采用高速摄像机(型号 FASTCAM Mini UX 100)观察液体推进剂储罐燃爆过程;红外

热成像仪记录样品反应过程中的表面火球最高温度。样品下方燃烧池填充足够量的航空煤油液体燃料,以保证样品有充足的时间反应。

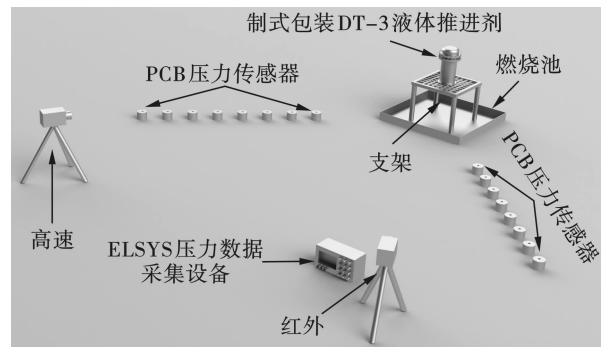


图 2 火灾刺激试验测试系统

Fig. 2 Schematic diagram of test layout

表 2 壁面压力传感器布置位置

Table 2 Horizontal distances of pressure sensors from the center projection of sample

传感器/布置距离	1	2	3	4	5	6	7	8
20 kg and 120 kg	5 m	7 m	9 m	11 m	14 m	16 m	18 m	21 m

## 2 试验结果与分析

### 2.1 燃烧热

燃烧热试验结果如表 3 所示。

已知硝酸肼的燃烧热理论值为 4.33 MJ/kg<sup>[15]</sup>,显著低于无水肼(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> - 19.37 MJ/kg<sup>[1]</sup>),计算得出 DT-3 样品理论燃烧热值为 14.17 MJ/kg,与测量

值的偏差为 13.1%。显然,单推-3 燃烧热理论值要高于测量值,分析认为,单推-3 中含有约 9%的液态水,反应过程中不仅没有为样品提供热值,且由于反应过程中发生了放热反应,使得液态水蒸发,吸收了整个体系中因放热反应产生的一部分热量,致使试验测量值与理论值偏差较大。

表3 燃烧热试验结果

Table 3 Combustion heat of DT-3

样品	$\Delta_c H-1\# /$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	$\Delta_c H-2\# /$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	平均值/ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	理论值/ (MJ · kg <sup>-1</sup> )
DT-3	12.67	11.96	12.32	14.17

## 2.2 冲击波敏感度

采用 EIDS 的 0 隔板试验测试单推-3 的冲击波敏感度,见证板结果见图 3。

由图 3 可知,三发平行试验中,20 mm 厚的验证板均无穿孔,仅有轻微变形现象,依据判定标准试验结果为“-”<sup>[13]</sup>,即单推-3 不能持续传播爆轰。分

析认为,单推-3 体系中硝酸胍虽属高能单质炸药,但含量较少,且体系中的水在一定程度上抑制了爆轰波的传导;此外,单推-3 属液相物质,自身内部一般不会产生气泡,即无利于爆轰形成的“热点”存在,因此单推-3 即使在强冲击作用下也无法快速发生氧化还原反应,从而无法传播爆轰。

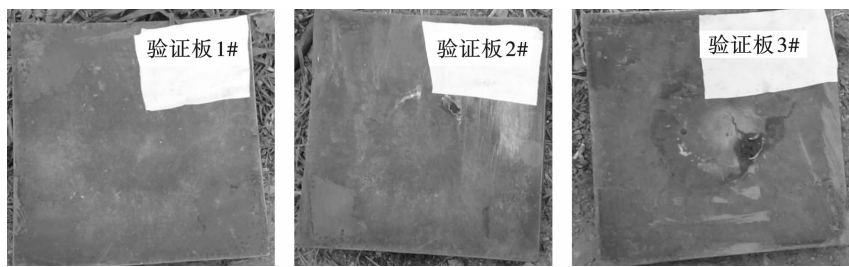


图3 EIDS 隔板试验结果

Fig. 3 EIDS gap test results of witness plate

单推-3 EIDS 隔板试验过程中的超压测试曲线如图 4 所示。

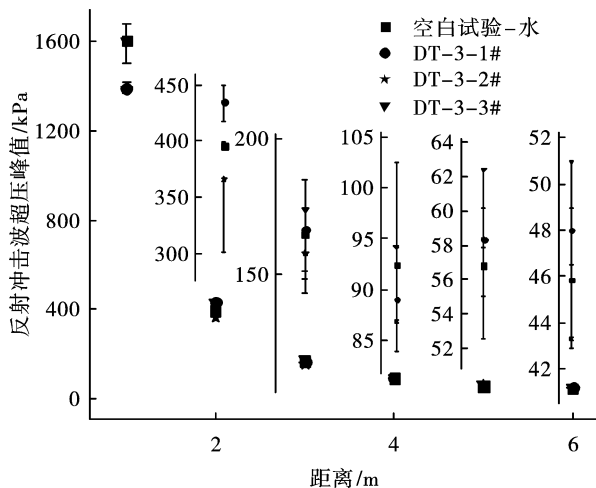


图4 不同距离处地面超压峰值均值

Fig. 4 Mean value of peak pressure of ground shock wave at different distance

图 4 中,样品于相同距离处的超压峰值与空白试验超压峰值并无明显差异,甚至略低于水介质的超压峰值,进一步表明单推-3 样品不能传播爆轰。

## 2.3 储箱火灾爆炸当量

### 2.3.1 燃爆过程结果与分析

样品火烧反应过程部分高速录像如图 5 所示,

高速录像采样频率为 1000 fps。

观察图 5 发现,火焰初期呈类球形,之后开始离开地面向上,在空中呈现出蘑菇状。火灾刺激条件下,单推-3 的受热温度远超其热分解温度,导致与储罐接触部分的推进剂在极短时间内发生热分解,产生大量的高温、高压气体产物。由于样品储存于密闭容器中,内部气体体积膨胀,蒸汽压不断增加,使得储箱内部压力超过了推进剂包装的设计压力,最终单推-3 发生爆炸。进一步观察高速结果可知,在爆炸反应发生之后毫秒级时间内,样品在高压反应产物和冲击波作用下向四周抛洒,并雾化变成小液柱或小液滴,细小液柱和液滴受高温环境作用迅速蒸发变成气态可燃物,被火焰引发进一步发生剧烈的爆燃反应。

煤油燃烧火焰的平均温度、煤油点火到样品反应以及样品反应持续时间如表 4 所示。

由表 4 中结果可知,航空煤油的平均温度差异较小,相同试验条件下,120 kg 样品的包装尺寸更大,因此其受热比表面积更大,单位时间内的热分解产气速率相对更快;此外,120 kg 样品包装的约束强度较 18 kg 储罐弱(120 和 18 kg 储罐设计压力分别为 0.33 和 1.0 MPa),致使 120 kg 样品在更短时间内发生了反应。

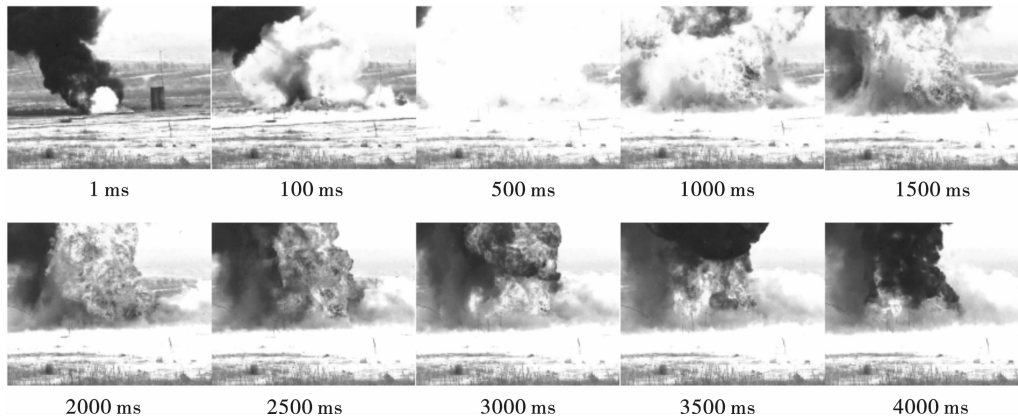


图 5 18 kg 单推-3 燃爆过程

Fig. 5 High speed video results of 18 kg DT-3

表 4 煤油火焰平均温度和样品反应持续时间

Table 4 Temperature and time parameters of flame in external fire test

样品	煤油平均温度/℃	煤油点火起始至样品反应瞬间的时间	样品反应持续时间/s
DT-3 - 18 kg	747	10 min and 07 s	4.55
DT-3 - 120 kg	818	08 min and 27 s	-

2.3.2 红外结果与分析

利用红外热像仪测量样品火烧反应过程中的火球最高温度<sup>[16]</sup>,采样频率 12.5 fps,如图 6 所示。

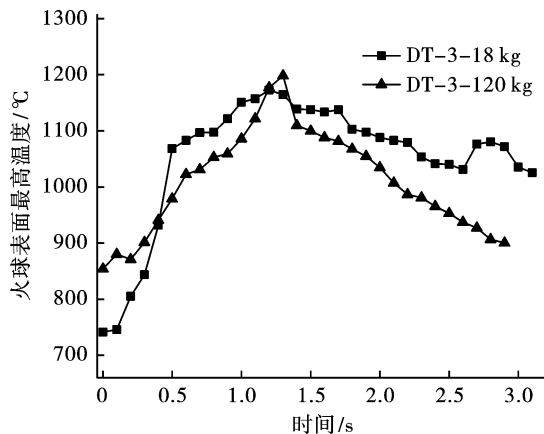


图 6 火球表面火焰最高温度

Fig. 6 Maximum surface temperature of the fireball vs. time

由图 6 可知,样品反应可分为两个阶段。第一阶段,从反应瞬间开始,火球表面最高温度迅速升高;第二阶段,火焰表面温度开始明显下降。由于火焰温度高低和样品的自由基浓度以及活跃程度相关,而与样品质量无关联,因此二者温度差异性小<sup>[17]</sup>,其趋势变化的时间拐点也基本相同。火球的特征参数见表 5。

2.3.3 爆炸当量结果与分析

图 7 是单推-3 样品爆炸反射冲击波超压峰值随距离的衰减趋势图。

表 5 爆炸火球的特征参数

Table 5 Infrared testing results

序号	样品	火球表明最高温度/℃	火球最大直径/m
1	18 kg - DT-3	1172.7	18.6
2	120 kg - DT-3	1198.2	19.0

显然,18 kg 单推-3 样品反应时有强烈的冲击波,离爆心水平距离 5 m 处,超压峰均值为 280.54 kPa,120 kg 单推-3 超压峰值为 97.05 kPa。借鉴爆炸相似律,对样品地面反射超压进行拟合,可得到如图 8 所示的拟合曲线。

式(1)和(2)分别 18 和 120 kg 单推-3 样品的拟合方程。

$$P = 94.81 \times \frac{\sqrt[3]{w}}{R} + 572.64 \times \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R}\right)^2 + 570.79 \times \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R}\right)^3 \quad (1)$$

$$P = 39.56 \times \frac{\sqrt[3]{w}}{R} + 36.65 \times \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R}\right)^2 + 23.06 \times \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R}\right)^3 \quad (2)$$

样品的 TNT 当量,并依据 TNT 当量结果评估外部火烧条件下样品反应瞬间产生的冲击波破坏效应。TNT 当量可由式(3)进行计算<sup>[18]</sup>

$$TNT_e(\%) = 100 \times \left(\frac{w_{TNT}}{w_x}\right)_{p_m} \quad (3)$$

式中:  $TNT_e$ , TNT 当量;  $w_{TNT}$ , TNT 药柱的质量, kg;  $w_x$ , 被测药柱的质量, kg。

公式(4)为适用公斤级至百公斤级的 TNT 爆炸的冲击波参数经验公式(P 单位:MPa),将样品反射峰值超压代入 TNT 拟合公式<sup>[19]</sup>,样品爆炸等效 TNT 当量数据见图 9。

$$P = 0.109 \times \frac{\sqrt[3]{w}}{R} + 0.56 \times \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R}\right)^2 + 1.98 \times \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R}\right)^3, 1 \leq \frac{\sqrt[3]{w}}{R} \leq 10 \quad (4)$$

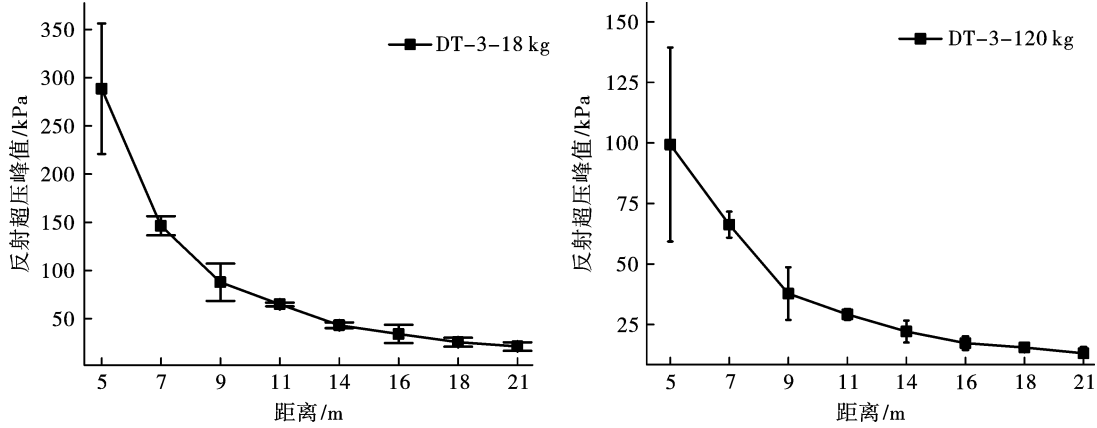


图 7 爆炸反射冲击波超压峰值随距离衰减趋势

Fig. 7 Peak pressure attenuation trend of the ground shock wave

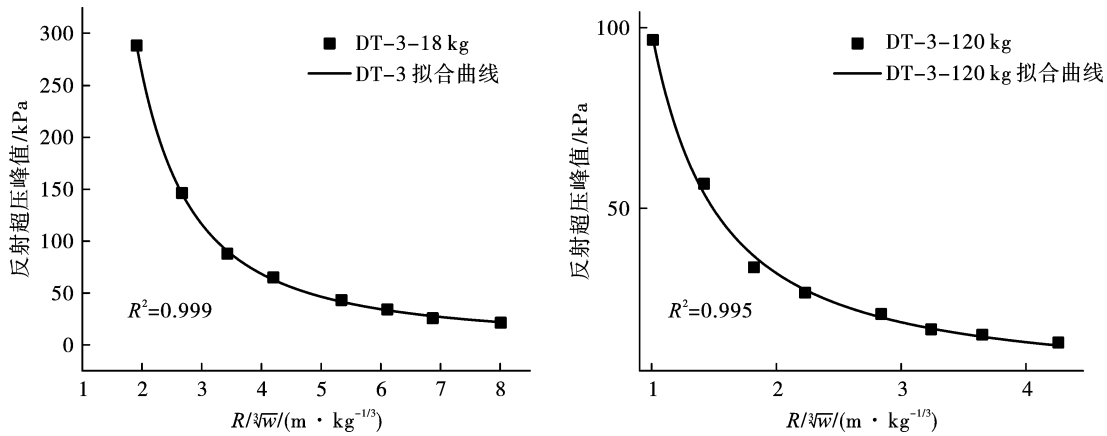


图 8 反射超压的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of the ground reflection pressure

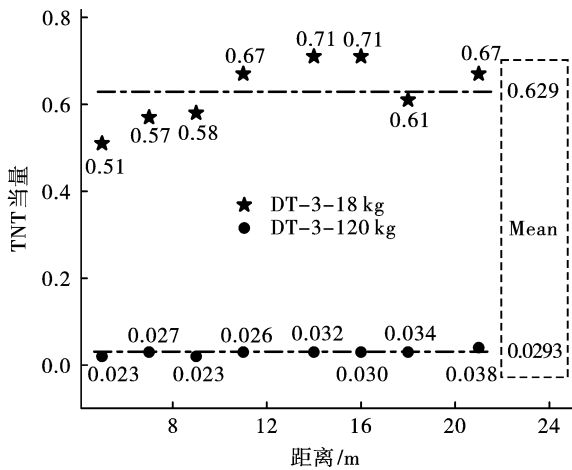


图 9 不同距离处的爆炸 TNT 当量结果和其平均值  
Fig. 9 The values of TNT<sub>e</sub> at different distance of samples

由图 9 可知,18 和 120 kg 单推-3 的 TNT 当量分别为 0.629 和 0.0293。显然,制式包装单推-3 样品反应时的冲击波效应并未随着尺寸增大而增强,反而是显著降低。由于 120 kg 样品设计压力仅为 0.33 MPa,其开始发生受热分解至样品包装被炸开这一时间段明显小于 18 kg 样品(设计压力为 1.0 MPa),表 4 中数据佐证了这一观点。样品质量更大和受热时间更短使得 120 kg 推进剂贮箱中还未受热分解的剩余样品比例显著更高。另一方面,当单推-3 过量时,爆炸瞬间的氧气量不足会抑制燃烧反应的进行,同时液体悬浮液滴在爆炸抛洒过程中也会削弱冲击波强度<sup>[20,21]</sup>,同样导致 120 kg 样品反应剧烈程度弱于 18 kg 样品。据此认为,单推-3 样品反应的剧烈程度与样品尺寸大小并不存在正相

关关系,反而与包装的设计压力密切相关,壳体的设计强度对单推-3 的爆炸特性具有显著影响。出于安全的目的,应在实际使用允许范围内,降低液体推进剂制式包装设计的强度,将样品的危险性从爆轰降低为爆炸,甚至是爆燃及以下。当然,需要指出的是,120 kg 单推-3 的爆炸 TNT 当量结果是以样品总质量进行计算的,样品火烧反应过程中有部分样品并未参与反应,因此,真实情况下爆炸 TNT 当量应比计算得到的结果偏大。

### 3 结论

(1)单推-3 在强冲击波直接作用下不具有传播爆轰的能力。

(2)单推-3 制式储箱的设计强度对其在遭遇火灾情况下的爆炸反应烈度有显著影响。出于安全目的,应在实际使用允许范围内,适当降低单推-3 包装设计压力,从而有效减弱其整体爆炸危险性。

#### 参考文献 (References)

- [1] LI H M, LI G X, LI L, et al. Experimental study on thermal ignition and combustion of droplet of ammonium dinitramide based liquid propellant in different oxidizing gas atmospheres[J]. *Acta astronautica*, 2020, 169: 40-49.
- [2] 吴联相,刘勤勤,贾月,等. 近红外光谱法快速测定单推-3 液体推进剂组分含量的研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2008(4): 54-58.
- [2] WU Lian-xiang, LIU Qin-qin, JIA Yue, et al. Study on rapid determination of compositions in DT-3 liquid propellant by near infrared spectroscopy[J]. *Missile and Space Vehicle*, 2008(4): 54-58. (in Chinese)
- [3] GAO Z G, LI G X, ZHANG T, et al. Numerical simulation for the decomposition of DT-3 in a monopropellant thruster[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 74: 132-144.
- [4] 唐占梅,郭伟,方涛. TC4 在液体推进剂单推-3 中电化学腐蚀机理研究[J]. *推进技术*, 2022: 1-12. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210827.
- [4] TANG Zhan-mei, GUO Wei, FANG Tao. Electrochemical corrosion mechanism of TC4 in liquid propellant DT-3[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022: 1-12. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210827. (in Chinese)
- [5] GJB 2216A—2019. 肼类燃料和硝基氧化剂包装贮存运输要求[S]. 2019.
- [5] GJB 2216A—2019 Requirments for package storage and transportation of hydrazine fuels and nitro-oxidizers[S]. 2019. (in Chinese)
- [6] 陈新华,聂万胜. 液体推进剂爆炸危害性评估方法及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005:90-120.
- [6] CHEN Xin-hua, NIE Wan-sheng. Evaluation method and application of liquid propellant explosion harmfulness[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 90-120. (in Chinese)
- [7] AIAA standards, the American Institute of Aeronautics and Astronautics. Special Project\_ Fire, Explosion, Compatibility, and Safety Hazards of Hypergols-Monomethydrizine(AIAA SP-085-1999)[S]. 1999:45-48.
- [8] 李岩,余文力,黄璜,等. 热和冲击波耦合作用下 CL-20/TNT 共晶响应的分子动力学模拟[J]. *火炸药学报*, 2022: 1-10. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203018.
- [8] LI Yan, YU Wen-li, HUANG Huang, et al. Response of the co-crystal of CL-20/TNT under the coupling of heat and shock wave: A molecular reactive force field simulation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022: 1-10. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203018. (in Chinese)
- [9] 陈艳,马宏昊,沈兆武,等. 添加 RDX 粉末的乳化炸药的爆炸特性[J]. *火炸药学报*, 2019, 42(3): 242-246.
- [9] CHEN Yan, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, et al. Explosion characteristics of emulsion explosive mixed with RDX powder[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(3): 242-246. (in Chinese)
- [10] 陈新华,聂万胜. 液体推进剂爆炸危害性评估方法及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005:90-120.
- [10] CHEN Xin-hua, NIE Wan-sheng. Evaluation method and application of liquid propellant explosion harmfulness[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 90-120. (in Chinese)
- [11] OSIPOV V, MURATOV C, HAFIYCHUK H, et al. Explosion hazard from a propellant-tank breach in liquid hydrogen-oxygen rockets[J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2015, 50(4): 860-871.
- [12] BOWEN I G, FLETCHER E R, RICHMOND D R, et al. Biophysical mechanisms and scaling procedures applicable in assessing responses of the thorax energized by airblast overpressures or by nonpenetrating missiles[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1968, 152(1): 122-146.
- [13] ST/SG/AC. Recommendations on the transport of dangerous goods, tests and criteria[M]. 7th Rev ed. New

- York:United Nations Publication,2019.
- [14] 徐 森. 爆炸品危险性分级程序改进及典型试验方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2011:35-50.
- [14] XU Sen. Research on the improving of explosives hazard classification procedures and typical test methods[D]. Nanjing:Nanjing University of Science & Technology, 2011:35-50. (in Chinese)
- [15] M Klap tke T M, RIEN CKER C M, ZEWEN H. Calculated and experimentally obtained heats of combustion of hydrazinium nitrate, monomethylhydrazinium nitrate, and n, n-dimethylhydrazinium nitrate [ J ]. Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie,2015,628(11):2372-2374.
- [16] SONG X Z, ZHANG J, ZHANG D, et al. Dispersion and explosion characteristics of unconfined detonable aerosol and its consequence analysis to humans and buildings [ J ]. Process Saf Environ Protect,2021,152:66-82.
- [17] 宋 哲. 基于自由基光谱的预混火焰温度检测研究 [ D ]. 北京:华北电力大学,2020:8-22.
- [17] SONG Zhe. Research on temperature detection of premixed flame based on free radical spectrum[ D ]. Beijing:North China Electric Power University,2020:8-22. (in Chinese)
- [18] HELD M. TNT-Equivalent[ J ]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics,1983,8(5):158-167.
- [19] 张玉磊,王胜强,袁建飞,等. 不同量级 TNT 爆炸冲击波参数相似律实验研究[ J ]. 弹箭与制导学报,2016,36(6):53-56.
- [19] ZHANG Yu-lei, WANG Sheng-qiang, YUAN Jian-fei, et al. Experimental research on similarity law of explosive shock wave parameters with different orders of magnitude TNT[ J ]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2016,36(6):53-56. (in Chinese)
- [20] XU H B, CHENG L K, ZHANG D Z, et al. Mitigation effects on the reflected overpressure of blast shock with water surrounding an explosive in a confined space[ J ]. Defence Technology,2020,17(3):1071-1080.
- [21] RESNYANSKY A D, DELANEY T G. Experimental study of blast mitigation in a water mist[ J ]. Defence Science and Technology Group(DST),2006:5-15.

(上接第 111 页)

- [14] 戴 俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算 [ J ]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(2):144-147.
- [14] DAI Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion[ J ]. Journal of Liaoning Technical University ( Natural Science Edition ),2001,20(2):144-147. (in Chinese)
- [15] 杨小林,王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理[ J ]. 爆炸与冲击,2001,21(2):111-116.
- [15] YANG Xiao-lin, WANG Meng-shu. Mechanism of rock crack growth under detonation gas loading[ J ]. Explosion and Shock Waves,2001,21(2):111-116. (in Chinese)
- [16] 王玉杰,陈先锋,柴修伟. 爆破工程[ M ]. 武汉:武汉理工大学出版社,2018.
- [16] WANG Yu-jie, CHEN Xian-feng, CHAI Xiu-wei. Blasting engineering [ M ]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press,2018. (in Chinese)
- [17] 杨国梁,姜琳琳,杨仁树. 复式楔形深孔掏槽爆破研究[ J ]. 中国矿业大学学报,2013,42(5):755-760.
- [17] YANG Guo-liang, JIANG Lin-lin, YANG Ren-shu. Investigation of cut blasting with duplex wedge deep holes [ J ]. Journal of China University of Mining, 2013,42(5):755-760. (in Chinese)
- [18] 孙健东,陈 需,周 宇,等. 基于无人机倾斜摄影的抛掷爆破爆堆形态测量方法[ J ]. 煤炭工程,2021,53(2):99-105.
- [18] SUN Jian-dong, CHEN Xu, ZHOU Yu, et al. Method for mapping cast blasting stockpile morphology based on drone oblique photography[ J ]. Coal Engineering,2021,53(2):99-105. (in Chinese)