

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.006

破片头部系数对 TNT 冲击起爆临界速度影响规律研究^{*}

戴国诚^① 贾 鑫^① 黄正祥^① 夏 明^② 唐德荣^① 陈思敏^① 谭亚平^①

^①南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)

^②中国人民解放军军事科学院国防工程研究院工程防护研究所(河南洛阳,471023)

[摘 要] 为研究破片头部形状在炸药冲击起爆中的影响,基于破片冲击起爆炸药的临界能量判据准则,结合 LS-DYNA 有限元软件,分别计算了正四棱柱破片、正六棱柱破片、圆柱破片、模拟弹丸破片(fragment-simulating projectiles, FSP)和球头形破片等5种破片冲击起爆 TNT 装药的理论和仿真速度阈值,并拟合出 FSP 冲击起爆炸药的理论头部形状系数。结果表明,在相同质量和撞击横截面积下,不同头部形状的破片撞击 TNT 装药的起爆阈值不等;起爆时间与破片的动能大小有关,动能越大,起爆时间越短。对于多边正棱柱类型的破片(如正四棱柱破片、正六棱柱破片、正八棱柱破片等),提出了以正棱柱的外接圆柱作为简化模型来计算多边形正棱柱破片冲击起爆 TNT 速度阈值,发现多边正棱柱破片横截面的边数越多,计算结果与数值模拟结果吻合越好。

[关键词] 破片;冲击起爆;TNT;临界速度;头部形状

[分类号] TJ012.4

Influence of Fragment Head Coefficient on the Critical Velocity of Shock Initiation of TNT

DAI Guocheng^①, JIA Xin^①, HUANG Zhengxiang^①, XIA Ming^②, TANG Derong^①, CHEN Simin^①, TAN Yaping^①

^① School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

^② Institute of Engineering Protection, IDE, AMS, PLA (He'nan Luoyang, 471023)

[ABSTRACT] In order to study the effect of fragment head shape on the detonation of explosives, calculations using LS-DYNA finite element software based on critical energy were conducted on five types of positive four-prism, positive six-prism, cylindrical fragment, fragment simulating projectiles (FSP) and spherical head, respectively. Theoretical and simulation speed thresholds of blasting TNT, and theoretical head shape coefficient of the simulated projectile fragment were fitted. Results show that with the same mass and impact cross-sectional area, initiation threshold values of TNT are different for different head shapes. Initiation time relates to the kinetic energy of the fragment. The larger the kinetic energy, the shorter the initiation time. For multilateral positive prismatic fragments (such as positive four-prism fragments, positive hexagonal fragments, positive octagonal fragments), a simplified model was proposed to calculate TNT speed threshold by the impact of polygon positive prismatic fragments. It was found that the more sides of the cross section of the multilateral positive prismatic fragment, the better the result of numerical simulation.

[KEYWORDS] fragment; shock initiation; TNT; critical velocity; head shape

引言

在现有的弹药安全结构设计和不敏感弹药的研究中,对破片防护是一大重点。弹丸爆炸产生的不同形状以及不同质量的破片对弹药战斗部的毁伤效果也不相同。Cook等^[1]系统地综述了1985~2010年间破片冲击起爆炸药的研究成果,总结出了破片

究中,对破片防护是一大重点。弹丸爆炸产生的不同形状以及不同质量的破片对弹药战斗部的毁伤效果也不相同。Cook等^[1]系统地综述了1985~2010年间破片冲击起爆炸药的研究成果,总结出了破片

^{*} 收稿日期:2019-08-08

基金项目:国家自然科学基金青年项目(11602110);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_0471)

第一作者:戴国诚(1993-),男,硕士,主要从事高效毁伤与防护研究。E-mail:njustdgc@163.com

通信作者:贾鑫(1987-),男,硕士,副教授,主要从事高效毁伤与防护研究。E-mail:jiaxin@mail_njust.edu.cn

冲击起爆炸药的 3 种机理。刘鹏飞^[2]通过数值仿真和试验研究的方式,研究了不同形状和不同质量的破片冲击起爆炸药的比动能影响。赵峰等^[3]在 Walker-Wasley 判据的基础上,通过理论推导和试验验证分析了不同弹头形状对炸药冲击起爆的影响,提出了考虑头部形状的判据。对于各种类型的破片,如果对弹丸爆炸的破片进行毁伤评估,需要逐个分类,再利用不同的判据进行评判,这么做增加了工作难度和工作内容。对此,欧美等国提出了模拟弹丸破片(fragment-simulating projectiles,FSP)的概念,用以替代不同形状的破片进行破片的毁伤能力评估,并分别建立了欧洲标准^[4]和美国标准^[5]。但国内在 FSP 冲击 TNT 装药的这一领域的研究较少。

本文中,根据美国提出的 FSP 的标准^[5],选取直径 11 mm、质量 9 g 的破片建立相对应的 FSP。首先,利用 LS-DYNA 软件建立 FSP 以及圆柱、球头形、正四棱柱和正六棱柱破片模型,并展开数值仿真研究,获得 5 种破片冲击起爆 TNT 装药数值仿真速度阈值以及各破片在速度阈值下冲击起爆 TNT 装药的起爆时间。在此基础上,采用理论计算的方法获得各破片理论速度阈值,并与数值仿真速度阈值进行对比,拟合出 FSP 理论公式中对应的头部系数,并获得 FSP 理论公式在冲击起爆中对多棱柱破片的适用范围。

1 破片冲击起爆 TNT 装药数值仿真

1.1 破片形状

根据美国标准^[5]中的模拟破片,设计出本次研究中的模拟破片尺寸。为了研究 FSP 与其他形状

破片之间的联系,选取破片冲击起爆研究中常用的正四棱柱破片、正六棱柱破片、圆柱破片和球头形破片 4 种破片作为研究对象。将 FSP 的质量与最大横截面积作为标准,设计出与之质量相等、最大横截面积相等的正四棱柱、正六棱柱、圆柱和球头形 4 种破片。为了保证仿真计算中球头形破片的直径和质量,在仿真计算中只改变材料密度,使直径 11 mm 球的质量为 9 g。图 1 为设计出的 5 种破片示意图。图 1 中,5 种破片的质量均为 9 g。

1.2 计算模型

为了获得各破片冲击起爆 TNT 装药的起爆阈值,利用 LS-DYNA 有限元软件对 5 种破片进行建模,并分别设置球头形破片、FSP、圆柱破片、正四棱柱破片和正六棱柱破片的初始速度为 1 300、1 200、900、800 m/s 和 700 m/s,进行初步计算,采用升降法找出各破片冲击 TNT 装药的速度阈值。各破片初始位置位于距离 TNT 炸药表面 1 cm 处,被发药为直径 100 mm、质量 500 g 的圆柱形压装 TNT。

为减少计算量,3 种计算模型均取原模型的 1/4 进行计算(如图 2)。采用 ALE 流固耦合的计算方法。其中,破片采用拉格朗日网格,每单元网格尺寸为 0.2 mm×0.2 mm×0.2 mm;炸药和空气域采用欧拉网格,每单元网格尺寸为 0.3 mm×0.3 mm×0.3 mm。同时,在空气域外边界施加非反射边界。单位制使用 cm-g-μs。根据与 TNT 炸药正常起爆压力对比判断炸药是否发生爆轰。

破片所用材料为 823 钢(50SiMnVB)。破片与炸药的材料模型、状态方程和强度模型如表 1 所示。破片材料参数^[6]如表 2 所示。被发药 TNT 采用 Lee-Tarver 点火增长模型,参数^[7]如表 3 所示。

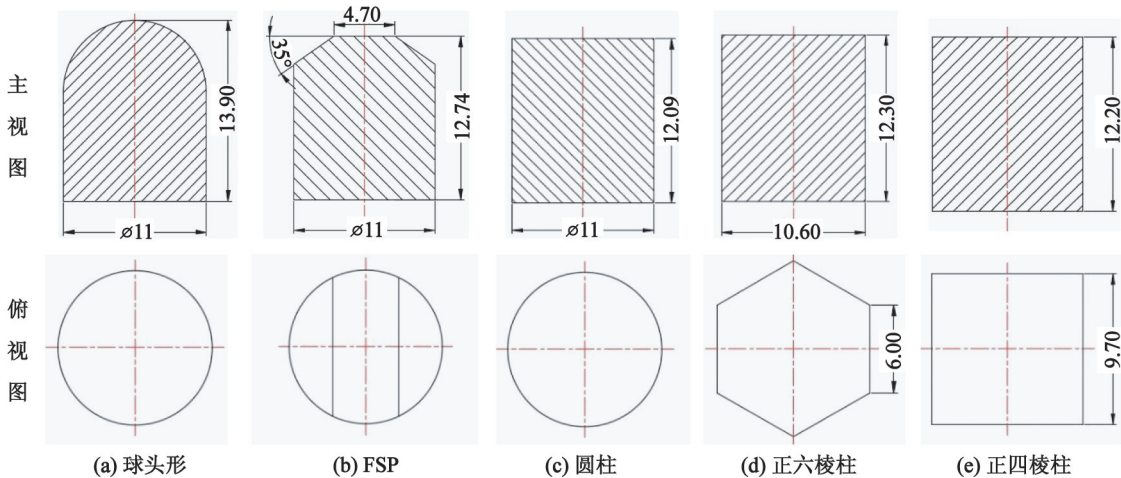
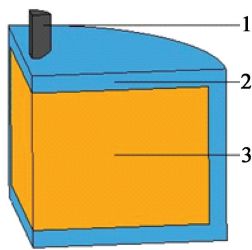


图 1 各破片尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Size of each fragments (Unit:mm)



1 - FSP;2 - 空气域;3 - TNT。

图 2 FSP 冲击起爆 TNT 炸药模型

Fig.2 TNT model initiated by impact of FSP

表 1 材料模型

Tab.1 Material model

| 部件 | 材料 | 状态方程 | 强度模型 |
|----|----------|---------------------|-----------------------|
| 破片 | 50SiMnVB | Gruneisen | Johnson Cook |
| 炸药 | TNT | Ignition and Growth | Elastic Plastic Hydro |

表 2 破片材料参数

Tab.2 Parameters of fragment material

| $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | $A/$ MPa | $B/$ MPa | n | c | m |
|--|-------------|-------------|----------|-----------|----------|
| 7.86 | 280 | 135.8 | 1.798 02 | 0.100 297 | 0.328 03 |

表 3 TNT 炸药点火与增长反应速率模型参数

Tab.3 Model parameters of ignition and growth reaction rate of TNT explosives

| I | G_1 | G_2 | a | b | c |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 50 | 360 | 100 | 0 | 0.667 | 1.000 |
| d | e | g | x | y | z |
| 0.667 | 1.000 | 0.111 | 4.000 | 1.200 | 1.000 |

TNT 点火增长模型反应率方程为

$$\frac{dF}{dt} = I(1 - F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x +$$

$$G_1(1 - F)^c F^d p^y + G_2(1 - F)^e F^g p^z. \quad (1)$$

式中: I 、 x 分别为控制点火和热点数量,是冲击波强度与作用时间的函数; a 为临界压缩度; b 、 c 、 e 与反应速率最大值的位置有关; G_1 、 G_2 为表面积与体积之比; d 、 g 与热点成长几何形状有关; y 、 z 与燃烧反应的非层流特性有关,取值范围一般为 0.8 ~ 2.0。

1.3 破片冲击起爆 TNT 装药过程

图 3 为 FSP 以初始速度 980 m/s 冲击 TNT 装药的压力云图,以此为例,对破片冲击 TNT 装药进行描述。

从图3中看出,高速破片在撞击炸药的瞬间,撞击压力为1.23 GPa,同时在破片和炸药之间产生两

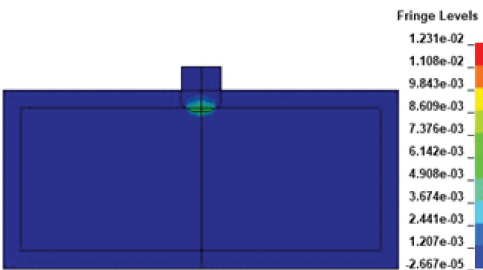


图 3 FSP 以初始速度

980 m/s 撞击 TNT 炸药瞬间

Fig.3 The instantaneous impact of FSP on TNT

explosive at an initial speed of 980 m/s

个冲击波,两个冲击波将沿相反方向分别向破片和炸药中传播。随后,破片持续侵彻 TNT,使得冲击波阵面后的压力和粒子速度持续增长。从破片接触炸药开始计时,到第 30 μs ,炸药趋于反应发生的一半,冲击起爆进入快速反应阶段;此时,炸药内冲击波压力发生明显阶跃,说明冲击波已发展成为爆轰波,此后炸药发生完全爆轰(如图 4)。对应的压力时程曲线见图 5。可以看出,FSP 以临界起爆速度冲击 TNT 炸药时,在与 TNT 炸药接触后的 30 μs 左右时,压力值阶跃,TNT 完全爆轰。

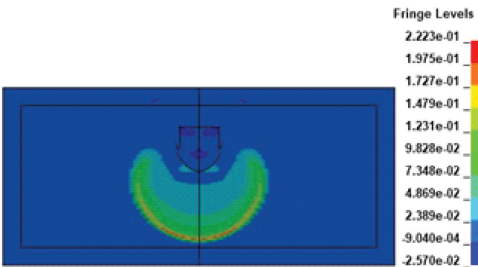


图 4 FSP 冲击引爆 TNT 炸药的压力云图

Fig.4 Pressure nephogram of TNT explosive

detonated by FSP impact

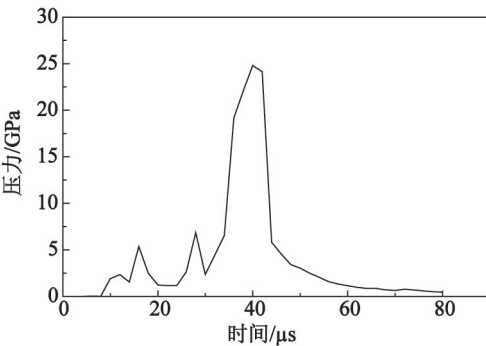


图 5 FSP 冲击起爆 TNT 装药的压力时程曲线

Fig.5 Pressure time curve of TNT charge

initiated by FSP impact

1.4 不同破片冲击起爆 TNT 仿真结果分析

为了研究 FSP 与其他 4 种破片冲击起爆 TNT

装药之间的联系,通过数值仿真的方式获得同等质量下各破片冲击 TNT 装药的起爆速度阈值以及在该速度阈值下的引爆时间,判断 FSP 的冲击起爆特性。通过升降法分别获得了 5 种破片的速度阈值(如表 4)。

表 4 各破片冲击 TNT 装药仿真速度阈值

Tab.4 Simulation velocity threshold of each fragment impact TNT charge

| 破片类型 | 球头形 | FSP | 圆柱 | 正六棱柱 | 正四棱柱 |
|---|-------|-----|-----|------|------|
| 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1 210 | 980 | 840 | 750 | 530 |

图 6 为 5 种破片冲击 TNT 装药的压力时程曲线。从图 6 中可以看出,5 种破片以临界起爆速度冲击 TNT 装药时,从破片开始接触 TNT 炸药开始计时,破片按起爆时间由小到大的顺序依次为:球头形破片、FSP、圆柱破片、正六棱柱破片、正四棱柱破片。可以看出,当破片质量相等时,破片冲击起爆时间主要与弹丸动能有关;动能越大,起爆时间越短。

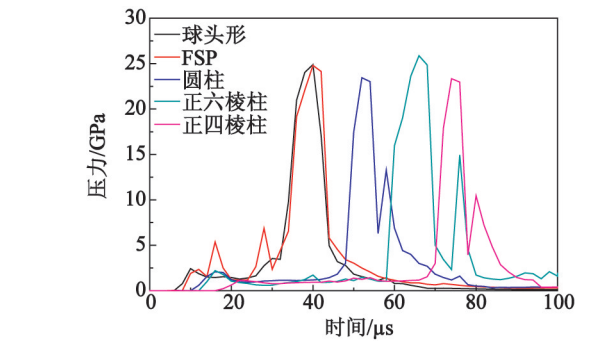


图 6 不同破片以临界起爆速度冲击 TNT 装药的压力时程曲线

Fig.6 Pressure time history curve of TNT charge impacted by different fragments at the critical initiation velocity

为了进一步验证数值模拟的准确性,采用前人理论计算的方法对各破片冲击起爆 TNT 速度阈值进行验证。

2 破片冲击起爆 TNT 装药理论分析

2.1 破片冲击起爆 TNT 装药速度阈值计算

通常情况下,将破片冲击起爆炸药看作平面一维起爆问题,它被广泛地应用于炸药的冲击起爆特性和炸药感度等方面的研究。根据 James^[8]、Bahl^[9]等的研究结果,炸药单位面积上受到的侵彻体能量 E 可由式(2)表示:

$$E = \frac{pud_p}{nC_e}.$$

(2)

式中: d_p 表示侵彻体直径; C_e 表示炸药声速; u 表示侵彻体材料冲击波后粒子速度; p 表示入射到炸药上的冲击波压力; d_p/nC_e 表示侵彻体加载到炸药表面上的平均时间; n 为与破片头部形状有关的系数, n (圆柱破片) = 6, n (球头形破片) = 18。

结合侵彻体撞击炸药过程中的动量守恒以及 D 与 $u^{[10]}$ 之间的关系有:

$$p = \rho_0 Du;$$

(3)

$$D = C_e + \lambda u;$$

(4)

$$u = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}.$$

(5)

式中: $A = \rho_e \lambda_e - \rho_p \lambda_p$; $B = \rho_e C_e + \rho_p C_p + 2\rho_p \lambda_p v_p$; $C = -(\rho_p C_p v_p + \rho_p \lambda_p v_p^2)$ 。其中, ρ_e, ρ_p 表示炸药和侵彻体材料的初始密度; λ_e, λ_p 表示炸药和侵彻体的经验参数; C_e, C_p 表示炸药和侵彻体的材料声速; v_p 表示侵彻体速度; D 表示冲击波速度。

根据以上关系,在侵彻体直径一定的情况下,可以将侵彻体以不同速度撞击炸药时入射到单位面积上的能量 E 和炸药的临界起爆能量 E_c 相比较,判定炸药的起爆情况。TNT 炸药的临界起爆条件^[11]如表 5 所示。

表 5 TNT 炸药临界起爆条件

Tab.5 Critical initiation conditions of TNT

| 炸药 | 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 临界起爆压力/ GPa | 引爆判据 $p^2 \tau /$ ($\text{GPa}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1}$) | 临界起爆能量/ ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$) |
|-----|--|----------------|---|--|
| TNT | 1.63 | 0.14 | 10 | 142 |

为了拟合破片头部系数,根据文中的数值模拟工况,利用式(2)对各类型破片的速度阈值进行理论计算,分别求出圆柱破片和球头形破片冲击 TNT 炸药起爆阈值,分别为 890 m/s 和 1 613 m/s。考虑到式(2)主要用于计算投影面为圆形的破片冲击起爆速度阈值,提出使用正四棱柱和正六棱柱破片对应的外接圆柱破片计算出的临界起爆速度作为这两种破片的临界起爆速度(表 6),并将其作为正四棱柱破片和正六棱柱破片理论速度阈值的参考值。

表 6 各破片冲击 TNT 装药理论速度阈值

Tab.6 The theoretical velocity threshold of each fragment impact TNT charge

| 破片类型 | 球头形 | 圆柱 | 正六棱柱 | 正四棱柱 |
|---|-------|-----|------|------|
| 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1 613 | 890 | 850 | 790 |

2.2 数值仿真与理论计算误差分析

根据本文中的理论计算方法,得出 5 种破片冲击起爆 TNT 装药的速度阈值。将各破片的理论速度阈值和数值模拟速度阈值进行对比分析可知,圆柱破片数值仿真计算值和理论计算值所存在的误差较小;球头形破片、正六棱柱破片和正四棱柱破片的数值模拟值与理论计算值误差较大(如图 7 所示)。这是因为,当采用式(2)对球头形破片进行理论计算时,球的质量较球头形破片小很多,造成了在相同速度下破片撞击 TNT 炸药的能量偏小。

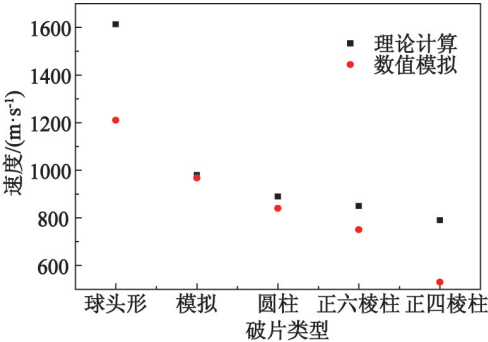


图 7 各破片理论计算值与数值模拟值对比
Fig. 7 Comparison of theoretical calculation and numerical simulation of each fragment

由 1.4 节中 FSP 和球头形破片冲击 TNT 装药数值仿真速度阈值作为理论计算中破片冲击 TNT 的起爆阈值,在研究工况下,利用式(2)拟合计算出 FSP 的头部形状系数 $n \approx 7$,此时该点处理论计算与数值模拟误差为 1.3%;球头形破片的头部形状系数 $n \approx 11$,此时的理论计算与数值模拟结果误差在该单点处为 1.2%。

图 7 中,正六棱柱破片和正四棱柱破片的误差较大,具体原因为:当使用正六棱柱和正四棱柱外接圆柱作为理论计算模型时,其对应的外接圆柱的横截面积和质量都比正六棱柱和正四棱柱大,造成外接圆柱实际质量和撞击时的接触面积也大,从而造成较大的误差。

为了进一步分析多边正棱柱的边数对破片冲击起爆 TNT 装药理论速度阈值的影响,采用 LS-DYNA 有限元软件和式(2)进行计算对比分析。

2.3 正棱柱边数对理论速度阈值计算影响

结合图 7 发现,对圆柱破片、正六棱柱破片和正四棱柱破片,当正棱柱横截面的边数越多时,其理论计算值与数值模拟值越接近。为了验证这一观点,设计出与上述圆柱质量相等、最大横截面积相等的正十棱柱破片和正八棱柱破片(如图 8)。在此基础上,分别计算图 8 所示的 4 种破片横截面积在其对

应的外界圆柱横截面中所占的百分比(如表 7),并将理论计算值与数值模拟值进行对比,获得了图 9 所示的曲线。

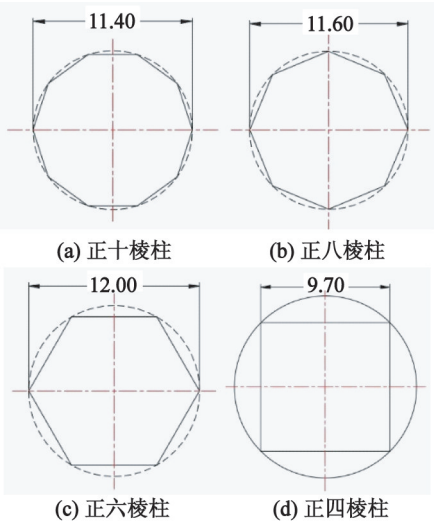


图 8 横截面尺寸示意图(单位:mm)
Fig. 8 Cross sectional dimension diagram (Unit:mm)

表 7 正棱柱破片在其外界圆柱中横截面积占比及理论与仿真速度阈值误差
Tab. 7 Cross-sectional area ratio, theoretical and simulation velocity threshold error of prismatic fragment in external cylinder

| 破片类型 | 圆柱 | 正十棱柱 | 正八棱柱 | 正六棱柱 | 正四棱柱 |
|--------|-----|------|------|------|-------|
| 面积占比/% | 100 | 93.6 | 90.0 | 82.7 | 63.67 |
| 误差/% | 5.6 | 7.0 | 9.8 | 11.8 | 33.0 |

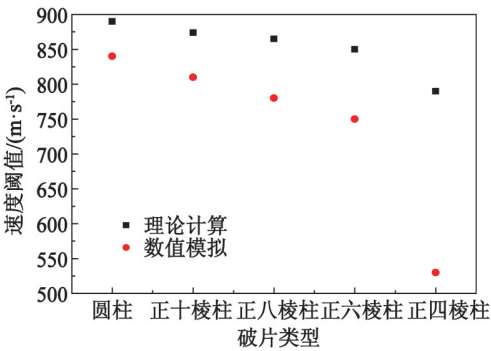


图 9 多边正棱柱冲击 TNT 装药理论值与数值模拟值对比

Fig. 9 Comparison of theoretical and numerical simulation values of TNT charge impacted by polygonal prism

结合表 7 与图 9 可知,横截面的边数越多,正棱柱在其对应的外接圆柱中的体积占比越高,使用正棱柱对应的外接圆柱来计算正棱柱的理论临界起爆阈值时,式(2)的理论计算值与数值模拟值越接近;

当正棱柱横截面的边数越少,即棱柱横截面在其对应外接圆柱横截面积占比越低时,理论值与仿真值相差越大。因此,当棱柱横截面边数较少时,不建议使用式(2)对破片的临界起爆速度进行理论计算,各破片面积占比及误差率如表 7 所示。

3 结论

采用非线性有限元软件 LS-DYNA 和基于破片冲击起爆 TNT 装药的临界能量判据,对不同头部形状的破片以不同速度冲击 TNT 装药过程进行了数值模拟和理论速度阈值计算。获得了各破片冲击 TNT 装药的起爆速度阈值,并拟合出 FSP 和球头形破片头部形状系数。提出了以正棱柱的外接圆柱作为简化模型,来计算多边形正棱柱破片冲击起爆 TNT 速度阈值,得出了如下结论:

- 1) 各种头部形状破片冲击 TNT 装药起爆速度阈值不同,5 种破片按起爆速度阈值由小到大的顺序为:正四棱柱破片、正六棱柱破片、圆柱破片、FSP、球头形破片。
- 2) 破片冲击 TNT 装药起爆时间与破片自身动能有关,破片动能越大,起爆时间越短。
- 3) 对球头形破片冲击 TNT 炸药进行理论计算时,头部形状系数 n 取值为 11;对于 FSP 冲击 TNT 炸药理论计算时,头部形状系数取值为 7。
- 4) 利用式(2)计算多边正棱柱破片冲击起爆 TNT 速度阈值时,正棱柱横截面的边数越多,即棱柱横截面积在其对应的外接圆柱横截面中占比越高,理论计算数值与数值模拟值越接近。当正棱柱横截面边数小于 4 时,理论计算值与数值模拟值误差可达到 33.0%;因此,棱柱棱横截面边数较少时不建议采用式(2)进行计算。

参 考 文 献

[1] COOK M D, HASKINS P J. Projectile impact initiation of a homogeneous explosive [J]. AIP Conference Proceedings, 1996, 370(1):823-826.

[2] 刘鹏飞. 破片特性对冲击起爆 B 炸药比动能阈值的影响[D]. 太原:中北大学,2017.

LIU P F. Influence of fragment characteristics on the threshold specific kinetic energy of impacting on covered comp B[D]. Taiyuan:North University of China,2017.

[3] 赵锋,孙承伟,卫玉章. 非均质固体炸药的冲击引爆临界能量判据研究[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1): 41-48.

ZHAO F, SUN C W, WEI Y Z. Critical energy criterion for the shock initiation of heterogeneous explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(1):41-48.

[4] BOLDUC M, JAGER H. Summary of newly ratified NATO standard AEP 2920, Ed. A, V1[R]. Allied Engineering Publication approved by NATO Army Armaments Group RDDC,2016:65.

[5] Department of defense test method standard: MIL-STD-1916[S]. 1997.

[6] 赵熹. 大口径弹体辊挤:引伸成形技术研究[D]. 太原:中北大学,2014.

ZHAO X. Research on rolling-extrusion and drawing technology of the large caliber projectiles[D]. Taiyuan: North University of China,2014.

[7] 崔宇,马宏昊,沈兆武,等. 爆炸二极管的数值模拟设计[J]. 含能材料,2017,25(4):266-272.

CUI Y, MA H H, SHEN Z W, et al. Numerical simulation and design of explosive diode[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017,25(4):266-272.

[8] JAMES H R. Critical energy criterion for the shock initiation of explosives by projectile impact[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1988, 13(2): 35-41.

[9] BAHL K L, VANTINE H C, WEINGART R C. Shock initiation of bare and covered explosives by projectile impact [electronic resource][R]. Lawrence Livermore National Lab. , CA ,USA, 1981:16.

[10] MEYERS M A. 材料的动力学行为[M]. 张庆明,刘彦,黄风雷,等译. 北京:国防工业出版社,2006:80.

MEYERS M A. Dynamic behavior of materials[M]. ZHANG Q M, LIU Y, HUANG F L, Trans. Beijing:National Defense Industry Press,2006:80.

[11] 苏林祥,毕祝,孙义亨. 非均匀凝聚炸药冲击起爆的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,1981(2):12-22.

SU L X, BI Z, SUN Y T. Numerical simulation of shock initiation of heterogeneous condensed explosives[J]. Explosion and Shock Waves,1981(2):12-22.