

冲击波和破片对飞机油舱的耦合毁伤效应研究

黄 晨, 曾砾堂, 丁永军, 杨伟贵, 邓东辉, 吴 岳
(93119 部队, 甘肃 酒泉 735018)

摘 要: 针对杀爆战斗部导弹打击地面飞机目标时, 不同强度爆炸冲击波和不同形状破片的耦合毁伤问题, 建立不同形状破片和不同质量球体炸药打击飞机燃油舱的有限元模型, 研究了单一毁伤元和多毁伤元耦合毁伤效应。结果表明: 球体破片对飞机燃油舱的毁伤效果最好, 长方体破片次之, 正方体破片最差, 但是长方体破片侵彻飞机燃油舱过程中温度最高、持续时间最长, 对航空煤油的引燃概率最大; 航空煤油内能和内部压力的升高主要是由破片的侵彻作用引起, 冲击波对其具有增强作用, 耦合作用下航空煤油的压力和内能增量大于两者单独作用之和; 冲击波和破片耦合作用下不能提高破片对航空煤油的引燃能力。

关键词: 冲击波; 破片; 有限元模型; 耦合毁伤效应; 引燃

中图分类号: TJ012.4

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)04-024-010

Coupling Damage Effects of Shock Waves and Fragments on Aircraft Fuel Tank

HUANG Chen, ZENG Litang, DING Yongjun, YANG Weigui,
DENG Donghui, WU Yue
(Troops No. 93119, Jiuquan 735018, Gansu)

ABSTRACT: To explore the coupling effect of shock waves and fragments during the strike of blast-fragmentation warheads on ground aircraft targets, finite element models of strikes by fragments with various shapes and explosive mass on an aircraft fuel tank were established. Thereby, coupling damage effects of single-damage source and multi-damage sources were analyzed respectively. Results showed that the damage effect of spherical fragments, cuboid fragments and cubic fragments decreases successively. However, the penetration into the aircraft fuel tank by the cuboid fragment has the highest temperature, the longest duration, and the largest probability of kerosene ignition. Fragment penetration leads to an increase in the internal energy and pressure of aviation kerosene, which is enhanced by shock waves. The increment of kerosene pressure and internal energy caused by the coupling effect of shock waves and fragments exceeds the sum of the individual effects. The coupling effects can not improve the ignition ability of fragments on aviation kerosene.

KEYWORDS: shock wave; fragment; finite element model; coupling damage effect; ignition

收稿日期: 2023-11-11

第一作者: 黄晨 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事毁伤效能仿真与评估研究。E-mail: 764667441@qq.com

引用格式: 黄晨, 曾砾堂, 丁永军, 等. 冲击波和破片对飞机油舱的耦合毁伤效应研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (4): 24-33.

燃油舱作为作战飞机系统的重要组成部分, 其暴露面积最大, 约占飞机易损面积的 75%, 是易损性最高的组成部分, 在实际作战中容易遭受冲击波与破片单独毁伤或耦合毁伤^[1]。空空导弹打击空中飞机目标, 以及空地杀伤爆破弹药打击地面停放的飞机等目标均是以爆炸冲击波和破片杀伤为主^[2], 当爆心距离目标较近时主要以冲击波和破片耦合毁伤为主; 当距离爆心较远时, 由于冲击波衰减较快, 主要以破片毁伤为主。冲击波主要依靠作用在燃油舱上面的压力, 使其被挤压变形, 出现渗漏、破裂或爆裂等毁伤效果; 破片主要依靠自身动能侵彻燃油舱使其变形, 着速足够大时会贯穿燃油舱, 利用水锤效应毁伤燃油舱, 或者引燃、引爆油液和油气等。

冲击波和破片对飞机燃油舱的毁伤效应研究是作战飞机设计与易损性分析、杀伤爆破弹药毁伤效能评估以及航空武器弹药作战使用筹划的重要内容, 20 世纪 70 年代国外就开始了研究。例如, 1970 年美国海军研究生院 (Naval Postgraduate School, NPS) 联合海军武器中心通过侵彻体侵彻水箱试验研究水锤效应毁伤机理^[3], 1990 年美国联邦航空管理局通过试验和仿真对民航客机在破片侵彻作用下的损伤进行了研究。为了充分了解和掌握飞机燃油舱在冲击波和破片作用下的毁伤机理和毁伤效果, 韩璐等^[4]通过构建破片高速冲击飞机燃油舱有限元仿真模型, 并采用 Varas 等^[5]试验结果进行模型校验, 在此基础上利用 LS-DYNA 软件对 2 枚破片在不同间距和时间间隔条件下, 侵彻燃油舱过程中的水锤效应进行仿真分析, 指出燃油舱内液体压力具有叠加效应。Chen 等^[6]利用 PAM-CRASH 软件对复合材料燃油舱水锤效应和易损性进行仿真分析, 指出复合材料舱体相比于金属舱体更容易发生整体性破坏。薛瑞峰等^[7]利用 LS-DYNA 软件, 采用任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 流固耦合方法仿真分析了不同长径比高速杆形破片对飞机燃油舱的毁伤情况, 指出舱内航空煤油压力、水锤效应空腔直径和飞机燃油舱体变形程度随着杆形破片长径比的增加而增加。徐梓熙等^[8]通过不同破片侵彻真实飞机靶标试验, 研究钢惰性破片和活性破片对飞机关键部件的毁伤效能, 试验表明钢惰性破片可对飞机主燃油舱造成破孔, 活性破片无法对飞机主燃油舱造成毁伤。陈亮等^[9]利用有限元软件, 采用光滑粒子流体动力学方法

对飞机燃油舱不同打击方向的水锤效应进行了仿真模拟, 结果表明破片在不同方向侵彻飞机燃油舱的毁伤效能存在较大差异。马丽英^[10]采用有限元仿真和试验相结合的方法, 对破片侵彻燃油舱过程中水锤效应的形成、液体压力、燃油舱毁伤、破片动能和液体类型等对水锤效应的影响进行研究, 指出: 液体压力随着破片的运动而增加; 随着破片动能增加, 舱体毁伤程度分为 3 个等级, 即前后壁均无裂纹、仅后壁出现裂纹、前壁裂纹后壁面花瓣式开裂; 破片对装水舱体毁伤最严重、装柴油舱体次之、装航空煤油舱体毁伤最小, 并且随着液体量的增加毁伤程度增大。

由此可知, 对飞机等目标燃油舱的毁伤研究具有大量先进、成熟的理论基础和手段, 毁伤机理和毁伤效能影响因素也较为清楚。但是当前研究成果主要以球形或杆形破片侵彻燃油舱过程中的水锤效应为主, 破片形状和毁伤元单一。由于飞机燃油舱暴露面积较大, 在实际作战中通常受到不同强度爆炸冲击波和不同形状破片的耦合毁伤, 毁伤机理和效果与单一毁伤元相比具有较大差异。针对这一问题, 本文基于 LS-DYNA 有限元软件, 采用流固耦合方法构建破片、炸药和飞机燃油舱仿真模型, 对飞机燃油舱在长方体、正方体和球体形状破片以及不同强度冲击波单独和联合作用下的舱体形变量, 航空煤油空腔、压力和内能变化, 破片速度衰减与温度变化等进行仿真, 分析破片、冲击波单独和耦合作用下对飞机燃油舱的毁伤效能。

1 破片撞击燃油舱有限元模型

为了兼顾仿真结果的准确性和仿真计算效率, 构建有限元 1/2 对称仿真模型, 模型主要包括破片、炸药、航空煤油、飞机燃油舱和空气 5 部分。破片形状主要有正方体、长方体和球体 3 种, 体积、质量和材质均相同, 为控制破片着靶姿态, 采用赋予破片速度的方式代替爆轰驱动; 以不同半径的球形炸药模拟不同强度的冲击波超压, 利用炸药与飞机燃油舱的距离控制冲击波到达时间, 已达到冲击波和破片同时毁伤燃油舱的目的, 以此仿真分析冲击波和破片的耦合毁伤效能; 航空煤油装填在飞机燃油舱内; 飞机燃油舱为长方体, 竖直放置; 空气域包含燃油舱和破片, 除对称面以外, 其他面设置无反射边界。破片和飞机燃油

舱采用 Lagrangian 算法, 炸药、航空煤油和空气采用 ALE 算法, 利用 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字定义流固耦合, 炸药采用 *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 关键字填充到空气 ALE 网格中。

1.1 有限元模型

正方体破片尺寸为 2 cm×2 cm×2 cm (长×宽×高), 长方体破片尺寸为 8 cm×1 cm×1 cm (长×宽×高), 球形破片半径约为 1.24 cm。破片划分六面体网格, 网格单元的尺寸约为 0.25 cm×0.25 cm×0.25 cm (长×宽×高)。长方体和正方体破片划分 512 个等尺寸网格单元, 球形破片划分 3 400 个渐变网格单元。网格模型如图 1 所示。

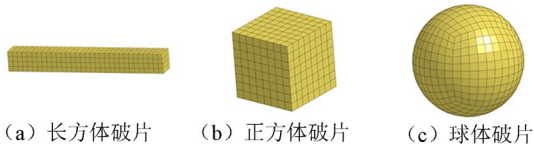


图 1 破片有限元网格模型

Fig. 1 Finite element mesh models of fragments

飞机燃油舱内部尺寸为 40 cm×40 cm×80 cm (长×宽×高), 舱壁厚度 0.5 cm, 划分六面体网格, 网格单元的尺寸约为 0.25 cm×0.25 cm×0.25 cm (长×宽×高), 厚度方向划分 2 个网格单元, 共计 62 万个单元。航空煤油装填在飞机燃油舱内部, 空气域包含破片和飞机燃油舱, 煤油与空气共节点, 划分六面体网格, 网格单元的尺寸约为 0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm (长×宽×高), 共计 346 万个单元。如图 2 所示。

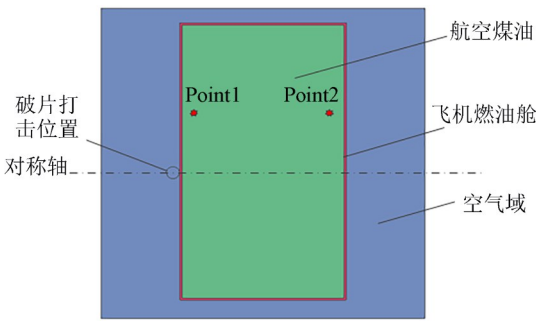


图 2 燃油舱、空气域和燃油网格模型

Fig. 2 Mesh models of aircraft fuel tank, air domain and fuel

1.2 材料本构及参数

钨-镍-铁合金材料具备密度大、强度高、延展性好等特点, 通常用来制作杀伤爆破战斗部预制破片, 可选择 LS-DYNA 软件中的 JOHNSON-

COOK 本构模型 (*MAT_JOHNSON_COOK) 进行模拟。该本构模型应变率范围较大, 可同时考虑钨合金破片在侵彻燃油舱过程中的应变硬化、应变率硬化和热软化, 并且将三者变量分离为乘积的关系模拟对动态屈服应力的影响, 形式简单, 常用来仿真金属材料冲击, 即

$$\sigma_Y = (A + B\bar{\epsilon}_p^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}) (1 - T_H^m) \tag{1}$$

$$T_H = (T - T_r) / (T_m - T_r) \tag{2}$$

式中: σ_Y 为屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为实时应变率与参考应变率的比值; A 为 $\dot{\epsilon}$ 和室温 T_r 下的准静态屈服应力; B 为硬化模量; n 为硬化指数; C 为应变率强化系数; m 为热软化参数; $\bar{\epsilon}_p$ 为有效塑性应变; T_H 为相对温度; T_r 为室温; T_m 为熔点; T 为实时温度, 可通过 LS-DYNA 输出控制关键字 *DATABASE_EXTENT_BINARY 进行定义, 在后处理中查看。

采用 JOHNSON-COOK 本构模型必须定义状态方程, 本文选用 GRUNEISEN 状态方程, 即 $P_1 =$

$$\frac{\rho_0 C_0^2 u [1 + (1 - \gamma_0/2) u - au^2/2]}{[1 - (S_1 - 1) u - S_2 u^2/(u + 1) - S_3 u^3/(u + 1)^2]^2} + (\gamma_0 + au) E_0 \tag{3}$$

$$P_2 = \rho_0 C_0^2 u + (\gamma_0 + au) E_0 \tag{4}$$

式中: P_1 为材料压缩状态下的压力; P_2 为材料膨胀时的压力; ρ_0 为密度; u 为相对体积 ($u = \rho/\rho_0 - 1$); C_0 为声速; S_1 、 S_2 、 S_3 为状态方程系数; γ_0 为 GRUNEISEN 系数; a 为 GRUNEISEN 系数的一阶修正; E_0 为单位体积内能。

钨-镍-铁合金破片 JOHNSON-COOK 本构模型和 GRUNEISEN 状态方程参数如表 1 所示。

表 1 破片材料参数
Tab. 1 Material parameters of fragments

密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模 量/ GPa	剪切模 量/ GPa	泊松 比	熔点/ K	室温/ K	A/ GPa
17.68	343	134	0.28	2 003	300	1.7
B/GPa	<i>n</i>	<i>C</i>	<i>m</i>	波速/ (cm·μs ⁻¹)	系数 <i>S</i>	系数 <i>Γ</i>
0.432 68	0.043 21	0.029 33	0.88	0.403	1.24	2.96

飞机主燃油舱厚度为 0.3 cm, 包裹在 0.2 cm 厚的飞机蒙皮内部, 燃油舱和蒙皮材质均为铝制壳体。常用的航空铝合金材料主要有 2A12-CZ、2A12-M、2024-T351、7050-T74、7050-T7451,

可用 PLASTIC-KINEMATIC、JOHNSON-COOK、COWPER-SYMONDS 等本构模型进行模拟。本文采用 PLASTIC-KINEMATIC 本构模型和参数模拟燃油舱材料, 模型屈服应力关系式为

$$\sigma_y = (\sigma_0 + \beta E_p \bar{\epsilon}_p) [1 + (\dot{\epsilon}/c)^{1/p}]$$
$$E_p = E_e E_t / (E - E_t)$$

(5)

(6)

式中: σ_0 为初始屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; β 为硬化参数; E_p 为塑性硬化模量; c 、 p 为应变率参数; E_e 为弹性模量; E_t 为切线模量。

飞机燃油舱铝合金材料 PLASTIC-KINEMATIC 本构模型参数如表 2 所示。

表 2 飞机燃油舱材料参数

Tab. 2 Material parameters of aircraft fuel tank

密度/ (g·cm ⁻³)	弹性 模量/ GPa	切线 模量/ GPa	屈服 应力/ GPa	$c/\mu s^{-1}$	p
2.77	68.5	1.53	1.565	0.022 515 4	4.843

LS-DYNA 软件中常采用 HIGH-EXPLOSIVE-BURN 本构模型和 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程模拟爆轰对结构体的毁伤过程。本文采用 TNT 炸药模拟爆轰对飞机燃油舱的毁伤, 其爆轰产物压力方程式为

$$P_e = A_1 \left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + A_2 \left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{w E_0}{V}$$

(7)

式中: P_e 为爆轰压力; A_1 、 A_2 、 R_1 、 R_2 、 w 均为与材料相关的常数; V 为相对体积。

TNT 炸药 HIGH-EXPLOSIVE-BURN 本构模型和 JWL 状态方程模参数如表 3 所示。

表 3 TNT 炸药材料参数

Tab. 3 Material parameters of TNT explosive

密度/ (g·cm ⁻³)	爆速/ (cm·μs ⁻¹)	爆压/ GPa	单位体积内 能/(N·cm)	相对 体积
1.63	0.693	21	6.968 4	1.0
常数 A_1	常数 A_2	常数 R_1	常数 R_2	常数 w
3.738	0.037 47	4.15	0.9	0.35

空气和煤油材料模型采用 NULL 本构模型。煤油状态方程采用 GRUNEISEN, 如式 (3) 和式 (4) 所示。空气状态方程采用 LINEAR-POLYNOMIAL 线性多项式状态方程, 其压力表示为

$$P = B_0 + B_1 u + B_2 u^2 + B_3 u^3 + (B_4 + B_5 u + B_6 u^2) E_0$$

(8)

$$u = \rho/\rho_0 - 1$$

(9)

式中: $B_0 \sim B_6$ 为常数; B_0 用于定义初始压力; B_1 为体积黏性。

空气和航空煤油材料本构模型和状态方程参数如表 4、表 5 所示。

表 4 空气材料参数

Tab. 4 Material parameters of air

密度/(g·cm ⁻³)	常数 B_0	常数 B_2	常数 B_3	常数 B_4
$1.184 5 \times 10^{-3}$	0	0	0	0.4
常数 B_5	常数 B_6	单位体积内 能/(N·cm)	相对 体积	
0.4	0	2.533×10^{-4}	1.0	

表 5 航空煤油材料参数

Tab. 5 Material parameters of aviation kerosene

密度/(g·cm ⁻³)	参数 B_0	系数 S_1	系数 S_2
0.775	0.148	2.56	-1.986
系数 S_3	GRUNEISEN 系数	单位体 积内能	相对 体积
0.226 8	0.5	2.985×10^{-4}	1.0

2 冲击波和破片耦合毁伤效应仿真分析

冲击波和破片耦合作用下, 飞机燃油舱会发生变形、撕裂或破裂解体等毁伤效果。随着冲击波强度和破片动能的增加, 燃油舱毁伤过程依次分为侵彻舱体、冲击液体、液体膨胀、穿出舱体、液体空腔振荡 5 个阶段。破片在冲击液体和液体膨胀阶段会形成冲击波, 使燃油舱受到的液体压力增加, 舱体出现变形或破碎。因此, 在构建有限元仿真模型基础上, 仿真分析不同形状破片与不同强度冲击波耦合作用下的航空煤油中 2 个特定点 point 1 与 point 2 的压力 (2 点位置如图 2 所示)、燃油舱迎弹面和背弹面形变量、破片速度衰减、航空煤油内能变化等指标, 定量分析冲击波和破片对飞机燃油舱的耦合毁伤效应。

2.1 破片形状对燃油舱毁伤效应的影响

杀伤爆破战斗部破片类型主要为预制破片, 常见的预制破片形状主要有球体、长方体和正方体。设置破片初始侵彻速度均为 1 200 m/s, 燃油舱内航空煤油填充量为 100%, 分别对相同质量的正方体、长方体和球体破片垂直侵彻飞机燃油舱

相同位置的毁伤效果进行仿真。命中点为燃油舱迎弹面几何中心。除正方体破片在侵彻燃油舱过程中侵蚀和变形严重，在燃油舱迎弹面形成较小破口外，球体和长方体破片均能够贯穿燃油舱，利用水锤效应对燃油舱形成有效毁伤，仿真结果如图 3~8 所示。

由以上仿真结果可知：1) 侵彻燃油舱和航空煤油过程中，长方体破片自身形变量和侵蚀程度

较大，球体破片几乎无变形或侵蚀现象，球体破片在侵彻煤油时形成的空腔比长方体破片大；2) 燃油舱迎弹面在破片侵彻过程中先向内凹陷，随后破片在煤油中运动形成空穴，煤油内部压力迅速升高，舱壁均向外膨胀；3) 长方体破片侵彻煤油过程中，临近迎弹面和临近背弹面的煤油压力同时到达峰值，分别为 1.458、9.222 MPa；4) 球体侵彻过程中，临近迎弹面的煤油压力较临近

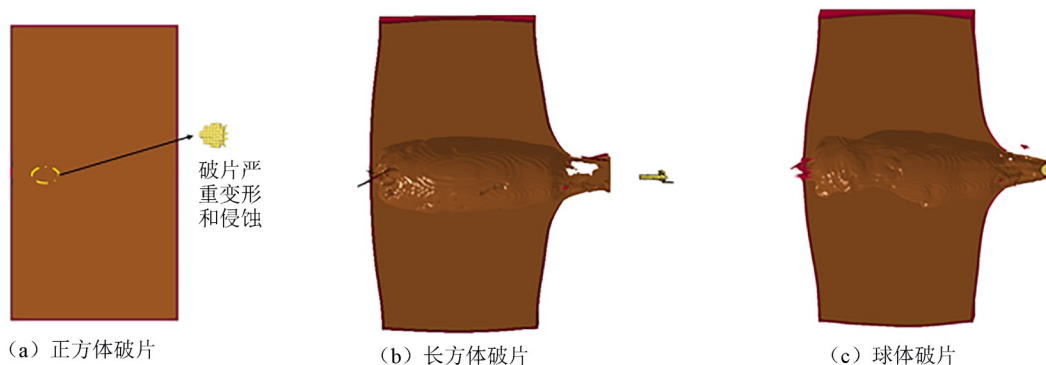


图 3 不同形状破片打击下航空煤油空穴对比

Fig. 3 Cavities of aviation kerosene caused by fragments of different shapes

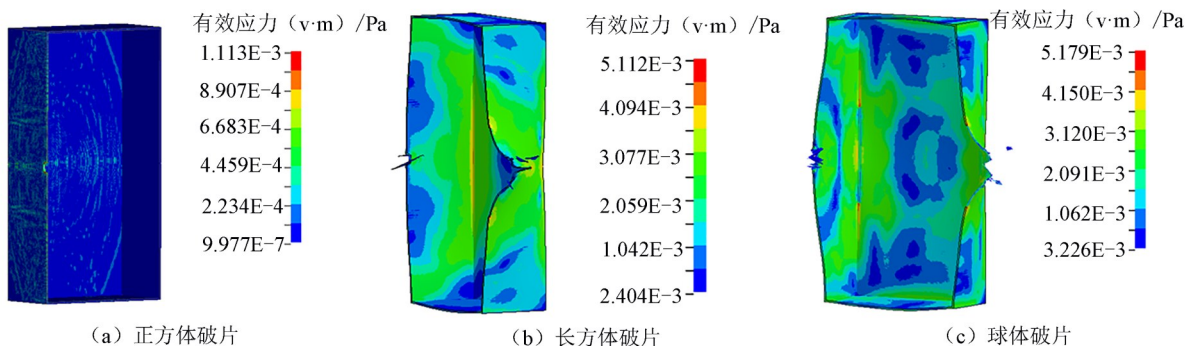


图 4 不同形状破片打击下燃油舱变形情况

Fig. 4 Fuel tank deformations caused by fragments of different shapes

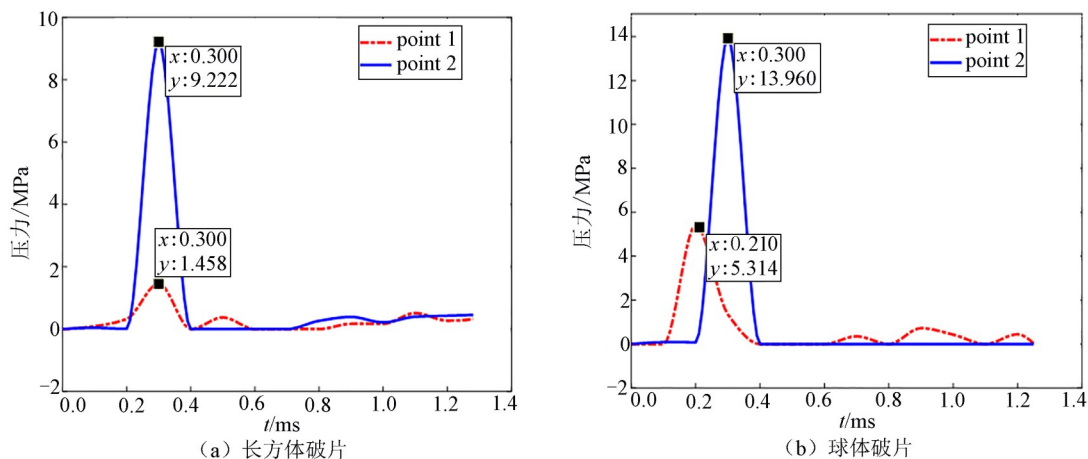


图 5 不同形状破片打击下航空煤油压力变化曲线

Fig. 5 Curves of aviation kerosene pressure caused by fragments of different shapes

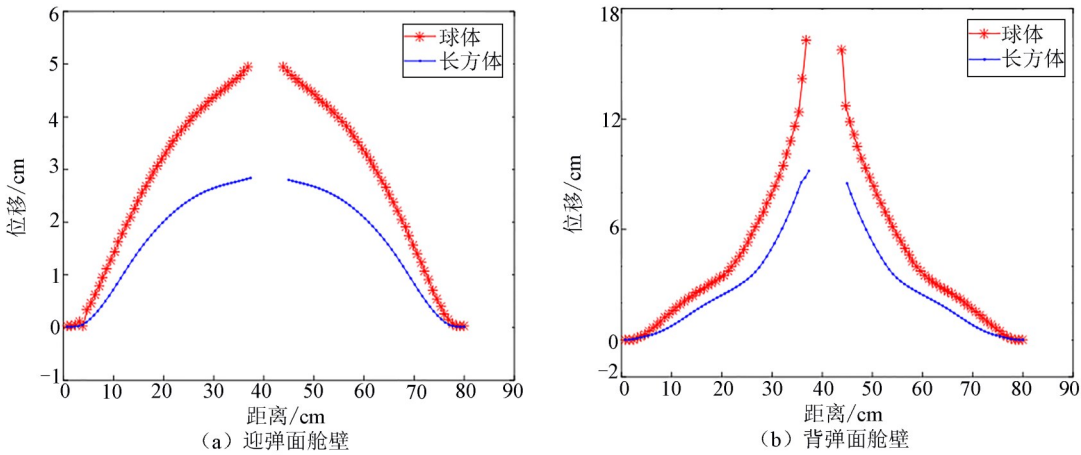


图 6 不同形状破片打击下燃油舱壁面位移曲线

Fig. 6 Displacement curves of tank walls caused by fragments of different shapes

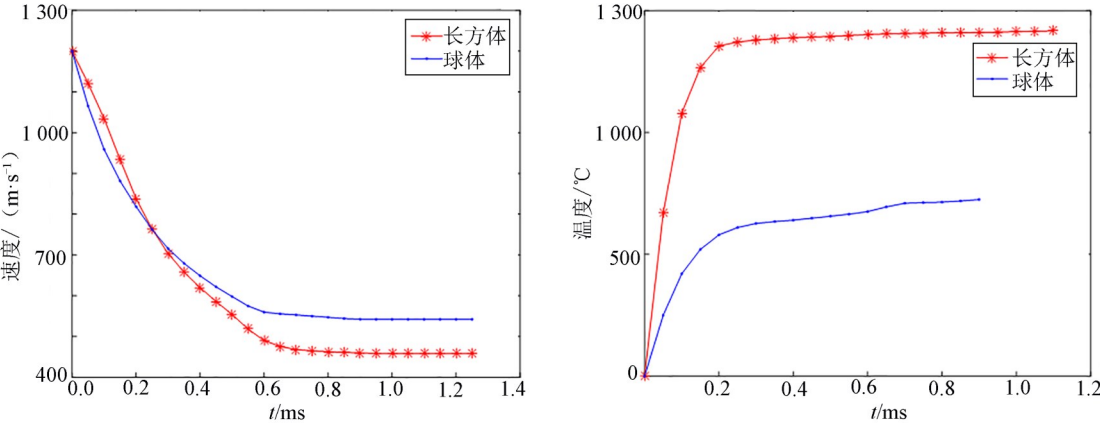


图 7 不同形状破片侵彻过程中速度曲线

Fig. 7 Velocity curves of fragments of different shapes during during penetration

图 8 破片侵彻航空煤油过程中温度曲线

Fig. 8 Curves of aviation kerosene temperature during fragment penetration on

背弹面先到达峰值, 分别为 5.314 MPa、13.960 MPa; 5) 燃油舱背弹面在破片穿孔处有撕裂, 迎弹面仅有破片穿孔, 球体破片形成的水锤效应使燃油舱向外膨胀和撕裂程度比长方体破片更严重; 6) 球体破片和长方体破片在 1 200 m/s 速度下均能够高速贯穿燃油舱, 剩余速度分别为 542.3、457.8 m/s; 7) 在侵彻燃油过程中, 长方体破片温度最高达 1 200 °C 以上、持续时间 0.90 ms, 球体破片温度最高达 600 °C 以上、持续时间 0.65 ms。

2.2 冲击波对燃油舱毁伤效应的影响

在燃油舱距离弹药爆点较近的情况下, 冲击波较破片优先到达燃油舱表面, 燃油舱在冲击波超压作用下, 内部煤油压力升高, 可发生变形、撕裂或爆裂等毁伤效果。为仿真分析这一毁伤效应, 在燃油舱外表面相同距离处的空气域中填充半径分别为 1、2、3 cm 的球形 TNT 炸药, 分别模

拟 shock wave 1、shock wave 2、shock wave 3 这 3 种强度冲击波, 作用于燃油舱表面的超压峰值分别为 1.994、2.464、7.378 MPa, 冲击波波形如图 9 所示, 仿真结果如图 10~13 所示。

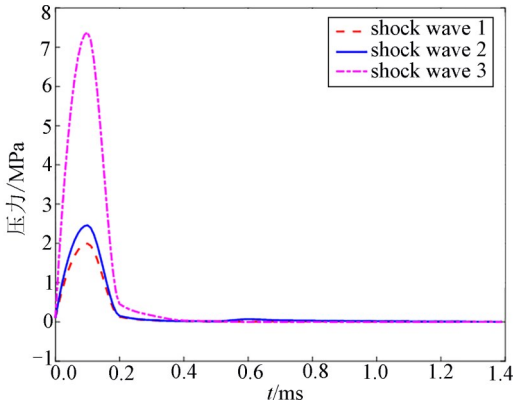


图 9 冲击波超压波形

Fig. 9 Waveforms of shock wave overpressure

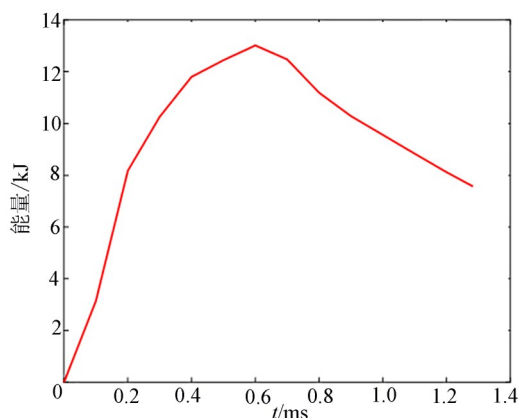


图 10 球体破片打击下燃油内能变化曲线

Fig. 10 Curves of fuel internal energy under spherical fragment strikes

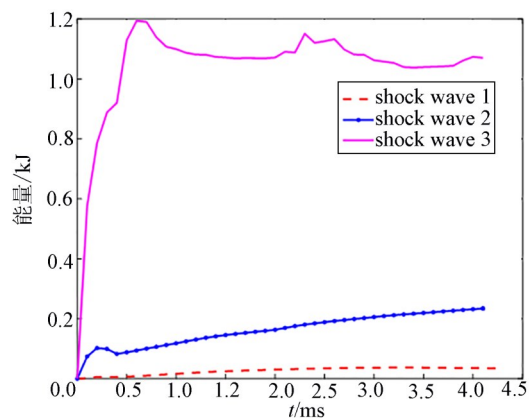


图 11 冲击波打击下燃油内能变化曲线

Fig. 11 Curves of fuel internal energy under shock wave impact

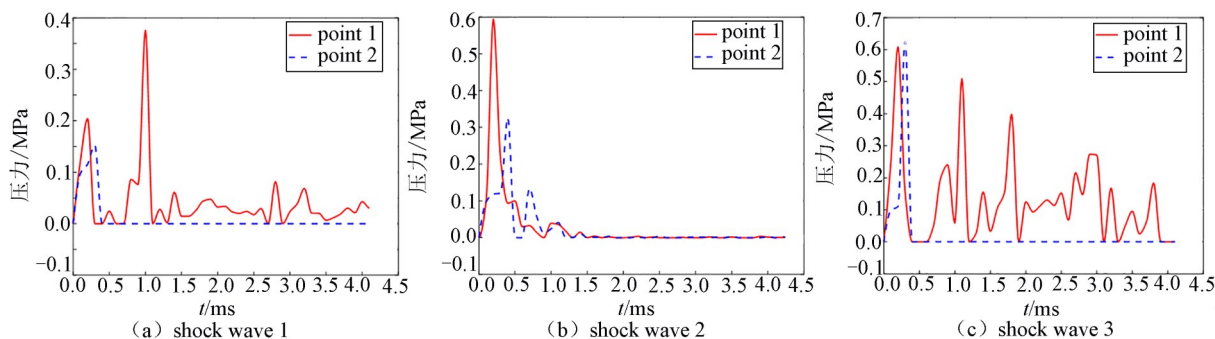


图 12 不同冲击波打击下航空煤油压力曲线

Fig. 12 Curves of aviation kerosene pressure under different shock waves impact

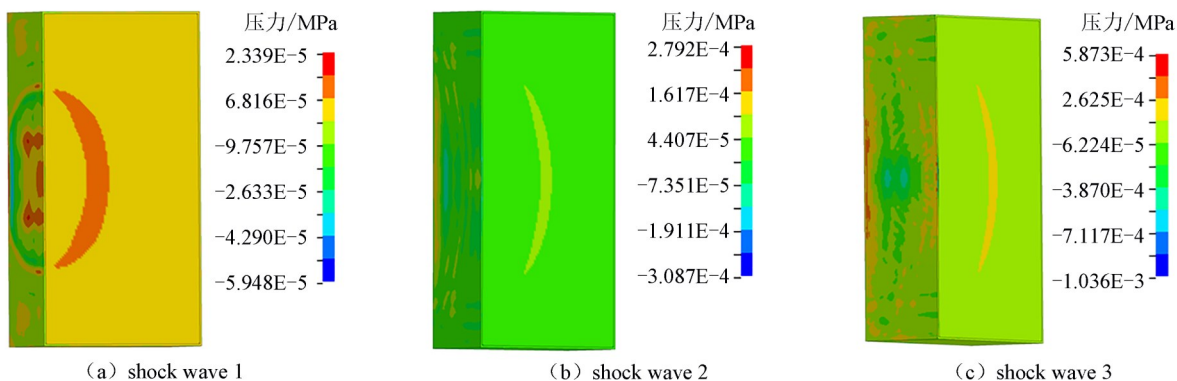


图 13 不同冲击波打击下燃油舱毁伤效果

Fig. 13 Damage effects of fuel tank under different shock waves impact

由以上仿真结果可知：1) 在爆炸冲击波超压作用下，燃油舱迎爆面舱壁外侧受到的冲击波超压作用大于内侧煤油压力，所以迎爆面舱壁向内凹陷，其余舱壁受到煤油压力而向外膨胀，但凹陷和膨胀程度均较小；2) 空气冲击波超压由燃油舱壁传递到煤油，使煤油内部的压力和内能升高，但是升高幅度远小于球体和长方体破片侵彻作用下煤油内部压力和内能的升高幅度；3) 在超压峰

值分别为 1.994、2.464、7.378 MPa 的冲击波作用下，由于冲击波在燃油舱迎爆面反射叠加后传递至液体中（见图 13），加之燃油舱壁的振动作用，临近迎爆面的测点 Point 1 出现多个波峰（见图 12），且冲击波超压越大，波峰值越大、数量越多，压力峰值分别为 0.375、0.594、0.609 MPa；4) 由于传递至液体中的冲击波在液体中的衰减作用，过滤掉了部分较小二次压力波，导致临近背

爆面的测点 point 2 仅出现了 1~2 个波峰, 3 种强度冲击波作用下的液体压力峰值分别为 0.153、0.326、0.626 MPa。

2.3 冲击波与破片对燃油舱的耦合毁伤效应

在实际作战中, 杀爆战斗部弹药主要利用冲击波和破片 2 种毁伤元对目标进行杀伤, 当冲击波作用于飞机燃油舱表面且未衰减至安全超压值时, 通常受到冲击波和破片的耦合毁伤。为研究冲击波与破片对飞机燃油舱的耦合毁伤效应, 以及与单毁伤元毁伤效应之间的差异, 在 2.1 节和 2.2 节仿真模型的基础上, 对飞机燃油舱在冲击波和破片同时作用下的舱壁形变量、航空煤油压力与内能变化、破片速度衰减等进行仿真, 通过与同等条件下的单毁伤元毁伤效应进行对比, 分析冲击波和破片耦合毁伤效应及其两者差异。

空气域中填充球形 TNT 炸药的半径 r_{TNT} 为 2 cm, 球体破片的速度 v_{frag} 分别为 1 000、1 200 m/s, 其余条件均与 2.1 节和 2.2 节保持相同, 分别对 $r_{\text{TNT}} = 2$ cm 与 $v_{\text{frag}} = 1$ 000 m/s (打击工况 1)、 $r_{\text{TNT}} = 2$ cm 与 $v_{\text{frag}} = 1$ 200 m/s (打击工况 2) 2 种工况进行仿真, 结果如图 14~21 所示。

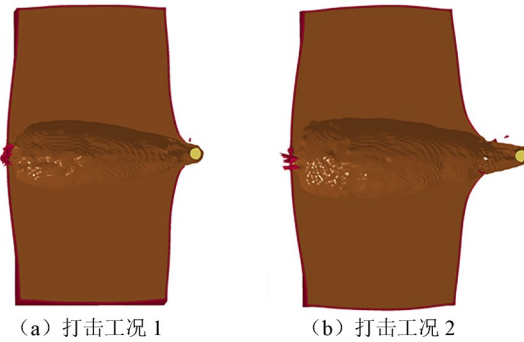


图 14 不同打击工况下航空煤油空穴对比

Fig. 14 Aviation kerosene cavities under different attack conditions

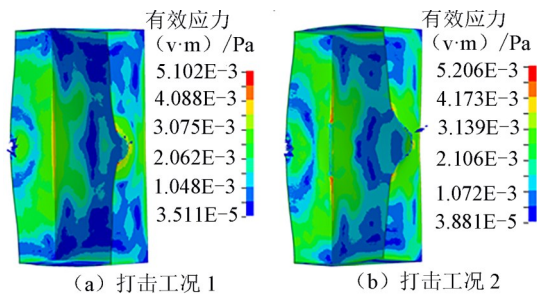


图 15 不同打击工况下燃油舱变形情况

Fig. 15 Fuel tank deformations under different attack conditions

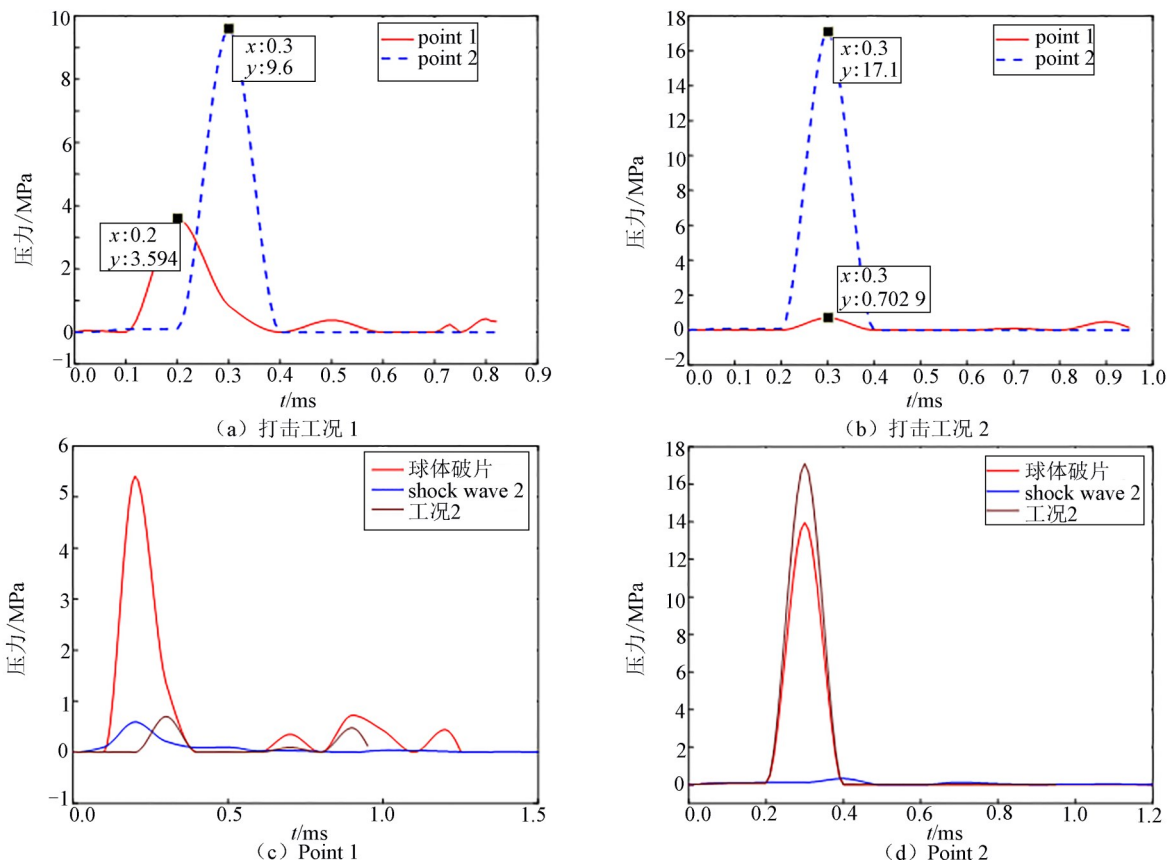


图 16 不同打击工况下航空煤油压力变化曲线

Fig. 16 Curves of aviation kerosene pressure under different attack conditions

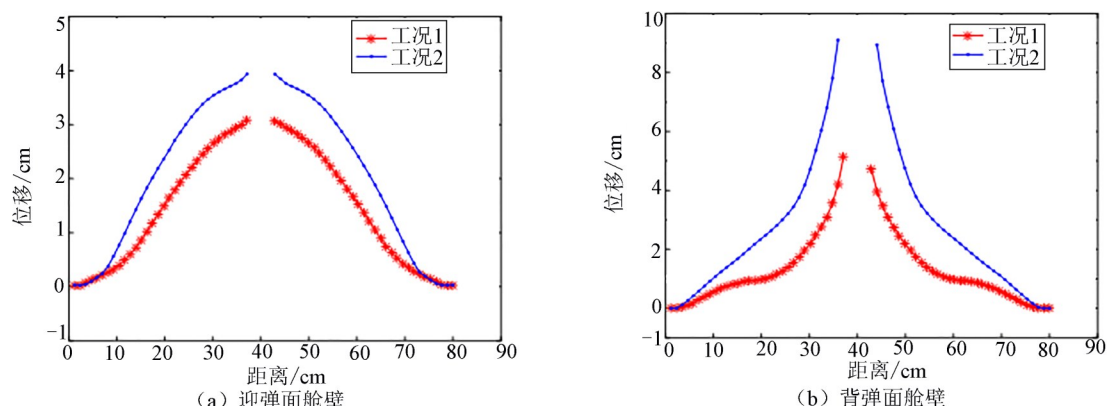


图 17 不同打击工况下燃油舱壁面位移曲线

Fig. 17 Displacement curves of tank walls under different attack conditions

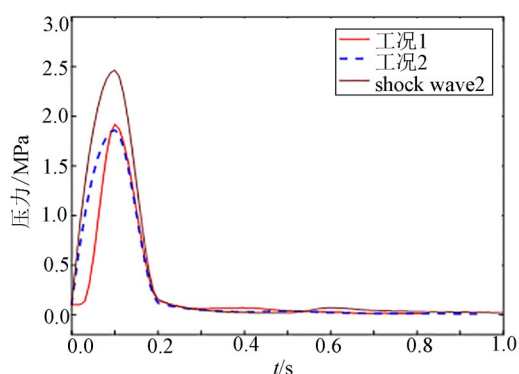


图 18 不同打击工况下燃油舱表面冲击波超压波形

Fig. 18 Waveforms of shock wave overpressure of fuel tank wall under different attack conditions

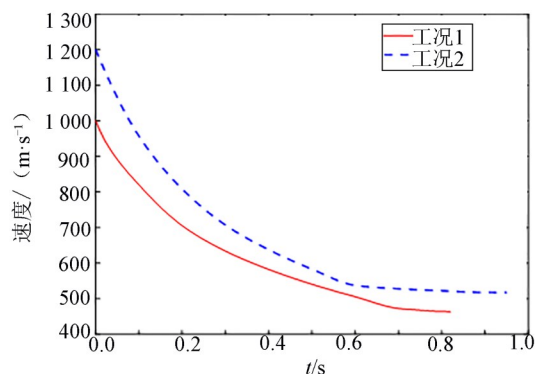


图 19 不同打击工况下破片速度曲线

Fig. 19 Velocity curves of fragments under different attack conditions

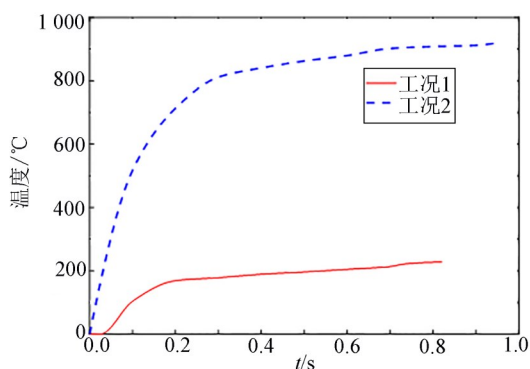


图 20 破片温度变化

Fig. 20 Curves of fragment temperatures

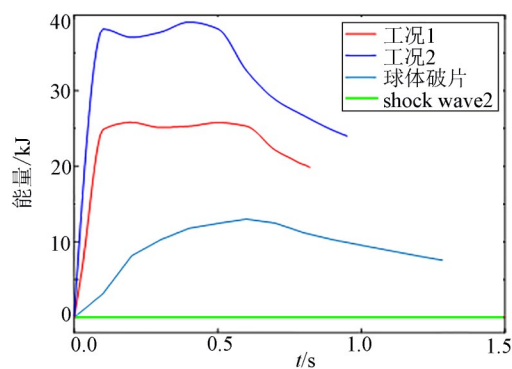


图 21 燃油内能变化

Fig. 21 Curves of fuel internal energies

由以上仿真结果可知：1) 在受到的冲击波超压峰值相同的情况下，破片速度越大，在航空煤油中形成的空腔越大（见图 14）；2) 燃油舱迎爆面所受的冲击波超压约为 1.9 MPa，比冲击波单独作用条件下的超压要小（见图 18），主要是由于破片侵彻煤油形成空腔，冲击波向煤油空腔中传播，存在泄压现象；3) 工况 2 条件下背爆面压力较工况 1 大得多，迎爆面压力较工况 1 小得多，原因在于燃油舱壁在工况 2 作用下的破片穿孔和形变量均

比工况 1 大（见图 17），导致工况 2 条件下的迎爆面泄压作用比工况 1 大，加之液体压力升高主要是破片侵彻作用（对比图 5 和图 12 可知），工况 2 条件下破片速度大，破片在液体中向前运动，液体压力向前传播并经背爆面舱壁反射叠加；4) 冲击波-破片耦合作用下飞机燃油舱迎爆面和背爆面破片穿孔比仅有破片侵彻条件下要大，但是形变量比仅有破片侵彻条件下小，这是由于破片穿孔大，导致煤油外漏，临近迎弹（爆）面一侧煤油压力

下降导致, 临近背弹(爆)面一侧煤油内部压力略大于破片和冲击波单独条件下的煤油压力之和; 5) 在耦合作用下, 破片能贯穿燃油舱, 剩余速度约为 526.8 m/s, 球体破片侵彻煤油过程中温度最高达 800 ℃ 以上、持续时间 0.68 ms, 在工况 1 和工况 2 条件下, 煤油内能增量远大于破片和冲击波单独作用下煤油内能增量之和(见图 21)。

3 结论

通过以上对装满航空煤油的飞机燃油舱毁伤效应仿真, 以及对比分析破片、冲击波单独作用和耦合作用下煤油空穴直径、煤油内部特定点压力与内能变化、破片速度衰减、燃油舱形变量等, 得到如下结论。

(1) 在破片材质、质量和速度相同的情况下, 不同形状的破片对飞机燃油舱的毁伤效能差别较大; 正方体破片侵蚀现象最严重, 仅能对燃油舱迎弹面形成较小穿孔, 无法贯穿燃油舱; 长方体破片次之; 球体破片对燃油舱毁伤效能最佳、侵蚀现象最小、贯穿剩余速度最大。

(2) 在材质、质量、速度相同的条件下, 长方体破片在侵彻航空煤油过程中的变形和侵蚀比球体破片更严重, 导致自身内能升高, 与煤油接触面温度最高、持续时间最长。加之煤油空腔内进入大量空气, 为引燃航空煤油创造了条件。根据文献[11]中油气空间引燃概率函数预测模型可得, 长方体破片引燃煤油的概率大于球体破片。

(3) 航空煤油内能与压力增加主要是由于破片侵彻作用, 冲击波对其影响较小, 而且煤油的内能与压力在冲击波和破片耦合作用下的增量大于冲击波和破片单独作用下的增量之和。

(4) 破片在煤油中的运动速度是影响其对煤油引燃能力的主要因素, 速度越大, 引燃能力越强。冲击波对破片的温度和持续时间具有增强作用, 但对破片的运动速度无增强作用。因此, 冲击波和破片耦合作用下不能提高破片对燃油的引燃概率。

参考文献:

- [1] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 107-108.
- [2] 周旭. 导弹毁伤效能试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 76-79.
- [3] LUNDSTROM E A. Structural response of flat panels to hydraulic ram pressure loading[R]. China Lake, CA: Naval Weapons Center, 1988.
- [4] 韩璐, 韩庆, 杨爽. 多破片高速冲击下飞机油箱水锤效应数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 473-484.
HAN L, HAN Q, YANG S. Simulation analysis of hydrodynamic ram in an aircraft fuel tank subjected to high-velocity multi-fragment impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3): 473-484.
- [5] VARAS D, LÓPEZ-PUENTE J, ZAERA R. Experimental analysis of fluid-filled aluminium tubes subjected to high-velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 81-91.
- [6] CHEN L, SONG B F, PEI Y. Simulation analysis of hydrodynamic ram phenomenon in composite fuel tank to fragment impact[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(30): 3148-3154.
- [7] 薛瑞峰, 刘迎彬, 张婧. 不同长径比弹丸对飞机燃油箱的毁伤效应研究[J]. 火工品, 2020(4): 44-47.
XUE R F, LIU Y B, ZHANG J. Research on the damage effect of projectiles with different length-to-diameter ratio on aircraft fuel tank[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(4): 44-47.
- [8] 徐梓熙, 刘彦, 闫俊伯, 等. 不同破片对典型飞机目标的毁伤效应[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 63-68.
XU Z X, LIU Y, YAN J B, et al. Experimental investigation on the damage of aircraft subjected to different fragments loading[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(S2): 63-68.
- [9] 陈亮, 宋笔锋, 裴扬, 等. 威胁打击方向对飞机油箱液压冲击易损性的影响分析[J]. 机械强度, 2012, 34(6): 807-811.
CHEN L, SONG B F, PEI Y, et al. Impact analysis of threat directions to hydrodynamic ram vulnerability of aircraft fuel tank[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(6): 807-811.
- [10] 马丽英. 高速破片撞击充液容器形成液水锤及其毁伤机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 36-45.
- [11] 骆亮, 裴扬, 侯鹏, 等. 飞机燃油箱油气空间引燃概率函数预测模型[J]. 兵工学报, 2022, 42(2): 383-390.
LUO L, PEI Y, HOU P, et al. Prediction model for ignition probability function of ullage in aircraft fuel tank[J]. Acta Armamentarii, 2022, 42(2): 383-390.