

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.05.004

温压弹药综合毁伤效果评估模型研究*

仲倩^{①②} 王伯良^① 刘大斌^① 高贫^② 房莹莹^①

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘要] 为了评估温压弹对爆炸场内目标的综合毁伤效果,通过对冲击波、热辐射、破片及窒息等单项毁伤效应的分析,建立了温压弹综合毁伤效果评估模型,并将毁伤效应转化为经济损失。以70 kg量级的温压弹为例,分析了综合毁伤效果评估模型的应用。结果表明:破片毁伤是温压弹战斗部爆炸毁伤区域内最严重的毁伤方式,其次是冲击波毁伤和热辐射毁伤;在已知爆炸作用范围内的人员密度、建筑物和设备资产密度的前提下,可根据建立的毁伤评估模型获得目标被毁伤的总经济损失。

[关键词] 爆炸力学;温压弹;综合毁伤;评估模型;经济损失

[分类号] TJ410;O38

Evaluation Model for Comprehensive Damage Effects of Thermo-baric Bomb

ZHONG Qian^{①②}, WANG Boliang^①, LIU Dabin^①, GAO Pin^②, FANG Yingying^①

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

② China National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to evaluate the comprehensive damage effects of thermo-baric bomb on targets in explosive field, shock wave, heat radiation, fragment and suffocation caused by explosion of thermo-baric bomb was analyzed separately. A comprehensive damage effect model of thermo-baric bomb was built, and it was also used to convert the damage into economic loss. Damage effects of 72 kg typical thermo-baric bombs were simulated by model. Results show that the most serious damage results from fragment, followed by shock wave and thermal radiation. When the premise of personnel density, property density of buildings and equipments are known, the total economic loss could be calculated by this model.

[KEYWORDS] mechanics of explosion; thermo-baric bomb; comprehensive damage; evaluation model; economic losses

引言

温压弹^[1-2]是一种新型弹药,它的出现是常规弹药的重大发展。与装有普通药剂的武器弹药相比,温压弹爆炸时具有超压大、冲量高、杀伤威力大等毁伤特性,对于有生力量、软目标、轻型装甲目标有很大的毁伤威力,其破坏力是等质量固体炸药的3~5倍,高威力的温压弹毁伤效应可达5~8倍。因此,温压弹战斗部的出现和发展是武器系统的一次重大突破,为常规武器增添了新的战斗力。

温压弹对目标的毁伤破坏作用^[3-4]主要包括冲击波、热辐射、破片及窒息等毁伤机理;在对目标进

行有效打击破坏时,存在毁伤效应的叠加。因此,某一单项毁伤效应的评估结果无法整体反映出温压弹的毁伤效应。所以,温压弹的综合毁伤效应评估模型的建立极其重要。关于温压弹的综合毁伤效应评估模型,对应的研究成果比较少。宇德明等^[5]曾提出炸药在地面爆炸后对目标的综合后果预测模型,该模型是在对环境等部分条件做出假设的前提下,综合分析了冲击波、热辐射等因素对事故的毁伤效果,理论计算结果与实际情况相近,从而更全面地获得了炸药爆炸综合毁伤效应评估依据。其评估结果^[6]可根据目标的特征为战斗部系统的方案设计提供理论依据,同时,也可以指导武器战斗部在现代战争中的应用,通过评估敌方的伤害后果,为作战中

* 收稿日期:2018-05-31

基金项目:江苏省博士后基金(1501051B)

作者简介:仲倩(1981-),女,博士后,主要从事安全热分析研究。E-mail:zhxwgjd@126.com

的指挥人员更好地决策奠定基础。但该毁伤模型的应用存在诸多假设的前提,例如,研究建筑物坍塌引起的事故后果时,未考虑预制破片的单项毁伤因素,对于能够产生大量破片的温压弹爆炸毁伤评估是不合理的。

因此,基于现有的炸药爆炸事故综合毁伤效果模型,根据温压弹的爆炸特性,建立了温压弹综合毁伤效果评估模型。在该模型中,将爆炸场内目标划分为人员、建筑物和设备等 3 类,并应用该毁伤效果评估模型计算了 70 kg 量级的温压弹对目标造成的总经济损失。

1 温压弹单项毁伤模型

1.1 冲击波毁伤模型

温压弹在空气中被引爆时,爆炸冲击波的传播规律遵循爆炸相似律,即

$$\Delta p = a \frac{\sqrt[3]{W}}{R} + b \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^2 + c \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^3. \quad (1)$$

式中: Δp 为超压, kPa; a 、 b 、 c 为系数; $R/\sqrt[3]{W}$ 为对比距离, $\text{m}/\text{kg}^{-1/3}$; W 为装药质量, kg; R 为测量点距爆心的距离, m。

根据冲击波对人员造成毁伤的评判标准之一的超压准则^[7-8]可知,当 $\Delta p > 100$ kPa 时,人员全部死亡;当 $50 \text{ kPa} < \Delta p \leq 100$ kPa 时,人员为重伤;当 $20 \text{ kPa} \leq \Delta p \leq 50$ kPa 时,人员为轻伤。若已知温压弹战斗部的质量和超压的经验公式,可计算得到冲击波死亡区域半径 R_{11} 、重伤区域半径 R_{12} 和轻伤区域半径 R_{13} 。因此,爆炸作用场内:死亡人数为 $N_{11} = \pi R_{11}^2 \rho_{11}$;重伤人数为 $N_{12} = \pi (R_{12}^2 - R_{11}^2) \rho_{12}$;轻伤人数为 $N_{13} = \pi (R_{13}^2 - R_{12}^2) \rho_{13}$ 。其中, ρ_{11} 、 ρ_{12} 、 ρ_{13} 分别为死亡范围、重伤范围、轻伤范围内的人员平均密度, $\text{人}/\text{m}^2$ 。

则冲击波对人员造成的伤害效应的直接经济损失为

$$M_{11} = aN_{11} + bN_{12} + cN_{13}. \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为人员死亡、重度受伤和轻度受伤的经济赔偿系数(下同)。

由于温压弹主要应用目的为军事打击,根据各国对军人的赔偿标准^[9]:1) 发达国家, $a = 35$ 万美元/ a , $b = 9.6$ 万美元/ a , $c = 4.8$ 万美元/ a ;2) 发展中国家, $a = 24$ 万元/ a , $b = 1.5$ 万元/ a , $c = 0.7$ 万元/ a 。

同理,可计算得到冲击波对建筑物全部破坏、重度破坏、中度破坏以及轻度破坏区域内的半径分别

为 R'_{11} 、 R'_{12} 、 R'_{13} 、 R'_{14} 。

假设爆炸场内建筑物全部被损坏,财产的经济损失标准为建筑物总资产的 100%,被重度损坏时为建筑物总资产的 80%,被中度损坏时为建筑物总资产的 50%,被轻度损坏时为建筑物总资产的 20%。则冲击波对建筑物目标所造成毁伤效应的直接经济损失为

$$M_{12} = \pi R_{11}'^2 \rho'_{11} + 0.8\pi (R_{12}'^2 - R_{11}'^2) \rho'_{12} + 0.5\pi (R_{13}'^2 - R_{12}'^2) \rho'_{13} + 0.2\pi (R_{14}'^2 - R_{13}'^2) \rho'_{14}. \quad (3)$$

式中: ρ'_{11} 、 ρ'_{12} 、 ρ'_{13} 、 ρ'_{14} 分别为爆炸场内建筑物全部被损坏、重度损坏、中度损坏和轻度损坏区域内的财产密度, $\text{元}/\text{m}^2$ 。

同理,可计算得到冲击波爆炸作用对设备造成损坏的直接经济损失为

$$M_{13} = \pi R_{11}''^2 \rho''_{11} + 0.8\pi (R_{12}''^2 - R_{11}''^2) \rho''_{12} + 0.5\pi (R_{13}''^2 - R_{12}''^2) \rho''_{13} + 0.2\pi (R_{14}''^2 - R_{13}''^2) \rho''_{14}. \quad (4)$$

式中: R''_{11} 、 R''_{12} 、 R''_{13} 、 R''_{14} 分别表示爆炸场内设备完全被损坏、重度损坏、中度损坏和轻度损坏的半径范围, m; ρ''_{11} 、 ρ''_{12} 、 ρ''_{13} 、 ρ''_{14} 分别表示设备完全被破坏、重度破坏、中度破坏和轻度破坏区域内的财产密度, $\text{元}/\text{m}^2$ 。

综上所述,温压弹爆炸冲击波效应对爆炸作用场内的目标造成伤害的综合经济损失为

$$M_1 = M_{11} + M_{12} + M_{13}. \quad (5)$$

1.2 破片毁伤模型

温压弹爆炸时,破片首先在壳体内被冲击波加速;然后,由于冲击波遇到障碍物的反射及爆轰气体的压缩膨胀作用,破片又获得继续加速运动的动能。

应用格尼公式来计算破片的初始速度^[10]。对于圆柱型装药战斗部,破片初始速度的计算公式为

$$v_0 = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{\beta}{1 + 0.5\beta}}. \quad (6)$$

式中: β 为炸药的装填系数, $\beta = W_i/M$, W_i 为装药质量, M 为壳体的质量; $\sqrt{2E}$ 为炸药的 Gurney 常数, $\sqrt{2E} = 520 + 0.28D_e$, D_e 为炸药的爆速。

从初始加速点到击中目标的整个过程中,因为会受到空气的阻力,破片在整个行程中均会减速。根据空气阻力作用的原理,破片运动一段距离后的速度^[11]计算公式为

$$v = v_0 e^{-\frac{0.75c_w \rho_a x}{\rho_m D}}. \quad (7)$$

式中: v 为破片飞行 x 米距离后的速度; c_w 为阻力系数,无量纲; ρ_a 为空气密度; ρ_m 为破片密度; D 为破

片直径。

破片动能的计算公式为 $E = 1/2mv^2$, 根据破片动能准则可知, $E \geq 128 \text{ J}$ 时, 破片致人死亡; $78.5 \text{ J} \leq E < 128 \text{ J}$ 时, 破片杀伤人; $E < 78.5 \text{ J}$ 时, 破片对人没有伤害^[12]。

在破片对目标的毁伤区域内, 爆炸场内人员目标被任意一个破片命中的几率为

$$P_k = 1 - e^{-\frac{2.25}{\pi} \rho} (\text{立姿}); P_k = 1 - e^{-\frac{\rho}{\pi}} (\text{卧姿})。$$

式中: ρ 为杀伤破片的平均密度。

若已知温压弹战斗部装置的基本参数、破片形状和质量, 则可根据破片对人员毁伤的动能准则, 分析得到破片毁伤造成人员目标死亡的区域半径 R_{21} 和破片毁伤造成人员目标受伤的区域半径 R_{22} 。由于在研究破片毁伤的文献中, 其毁伤阈值仅有死亡、杀伤及安全 3 个等级, 因此在计算破片的单项毁伤时, 未考虑轻伤的情况。

由此, 可计算得出爆炸作用场内破片致死人数 $N_{21} = P_k \pi R_{21}^2 \rho_{21}$; 杀伤人数 $N_{22} = P_k \pi (R_{22}^2 - R_{21}^2) \rho_{22}$ 。其中, ρ_{21} 、 ρ_{22} 分别为破片致人死亡和使人受伤的半径范围内的人员密度, 人/ m^2 。

则人员目标受到破片伤害的直接经济损失为

$$M_{21} = aN_{21} + bN_{22}。 \quad (8)$$

同理, 可分别计算得到设备被破片完全损坏、重度损坏的区域半径分别为 R'_{21} 、 R'_{22} 。

则在爆炸场内, 根据设备被破片损坏的程度, 得到其直接经济损失为

$$M_{22} = \pi R'_{21}{}^2 \rho'_{21} + 0.8 \pi (R'_{22}{}^2 - R'_{21}{}^2) \rho'_{22}。 \quad (9)$$

式中: ρ'_{21} 、 ρ'_{22} 分别为爆炸场内设备被完全损坏和重度损坏区域半径内的平均财产密度, 元/ m^2 。

温压弹爆炸场内, 目标被破片破坏的直接经济损失为

$$M_2 = M_{21} + M_{22}。 \quad (10)$$

1.3 热辐射毁伤模型

根据 Baker 模型, 爆炸火球能够产生的热辐射剂量表达式^[13]为

$$Q = \frac{D^2}{F + \frac{D^2}{r^2}} bGM^{\frac{1}{3}} T^{\frac{2}{3}}。 \quad (11)$$

式中: Q 为火球热辐射剂量, J/m^2 ; D 为火球直径, m ; T 为火球温度, K ; F 为常数 161.7; bG 为常量, 2.04×10^4 ; r 为测点到火球中心的距离, m ; M 为燃料质量, kg 。

根据火球的热剂量准则^[14], 热剂量阈值为 $592 \text{ kJ}/\text{m}^2$, 爆炸场内人员会死亡; 热剂量阈值为 $392 \text{ kJ}/$

m^2 , 爆炸场内人员会受到重度伤害; 热剂量阈值为 $172 \text{ kJ}/\text{m}^2$, 爆炸场内人员会受到轻度伤害。

火球的基本参数^[15]可应用红外热成像仪测得, 包括爆炸火球的表面温度 T 、爆炸火球的直径 D , 从而计算出热剂量致人死亡、重度伤害和轻度伤害时的毁伤半径 R_{31} 、 R_{32} 、 R_{33} 。

则爆炸作用场内: 热辐射导致死亡人数 $N_{31} = \pi R_{31}^2 \rho_{31}$; 热辐射导致重伤人数 $N_{32} = \pi (R_{32}^2 - R_{31}^2) \rho_{32}$; 热辐射导致轻伤人数 $N_{33} = \pi (R_{33}^2 - R_{32}^2) \rho_{33}$ 。其中, ρ_{31} 、 ρ_{32} 、 ρ_{33} 分别表示热辐射毁伤作用造成的人员目标的死亡半径、重度伤害半径以及轻度伤害半径区域内的人员密度, 人/ m^2 。

在热辐射对目标的毁伤效应研究中, 仅考虑热辐射对人员目标的伤害作用, 忽略热辐射对建筑物和设备的破坏效应。则爆炸场内, 目标被热辐射损伤的直接经济损失为

$$M_3 = aN_{31} + bN_{32} + cN_{33}。 \quad (12)$$

1.4 窒息毁伤模型

温压弹装药的分子组成 $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d\text{Cl}_e\text{F}_f\text{Al}_g$, 其氧平衡计算公式为

$$B = \frac{800(\sum N_{\text{O}_i} A_{\text{V}_i} - \sum N_{\text{R}_i} A_{\text{V}_i})}{M}。 \quad (13)$$

式中: M 为燃料质量; $N_{\text{O}_i} A_{\text{V}_i}$ 为温压弹装药中被还原的原子数与相应的化合价乘积; $N_{\text{R}_i} A_{\text{V}_i}$ 为温压弹装药中被氧化的原子数与相应的化合价乘积。

若温压弹质量为 $W_i \text{ kg}$, 完全爆炸时所需要的氧气质量为 $10W_i B \text{ g}$, 在标准状况下, $\rho_{\text{O}_2} = 1.429 \text{ g}/\text{L}$, 则所消耗的氧气体积为 $V_{\text{O}_2} = 10W_i B / \rho_{\text{O}_2} = 7W_i B \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。而氧气在大气中所占体积分数为 21%, 所以, $10W_i B \text{ g}$ 氧气对应的空气体积为 $V = V_{\text{O}_2} / 0.21$ 。由于温压弹爆炸时的爆炸火球近似球形, 则在该球形内为无氧区, 其半径 R_4 的取值为: $R_4 = \sqrt[3]{V} / 4\pi = 0.62 \sqrt[3]{V} \text{ m}$ 。

所以爆炸场内: 窒息死亡人数为 $N_4 = \pi R_4^2 \rho_4$ 。其中, ρ_4 为毁伤区域内引起窒息的人员密度, 人/ m^2 。

温压弹窒息效应导致爆炸作用场内的目标综合经济损失为

$$M_4 = aN_4。 \quad (14)$$

在真实情况下, 温压弹爆炸所引起的缺氧环境中, 无氧区域和空气的界限划分无法达到如此清晰。因为空气在不断地流动, 在爆炸火球的中心范围, 缺氧情况虽然最为严重, 但也无法出现氧气量为零的情况; 在离爆炸火球中心点较远的范围, 缺氧情况会得到有效缓解。此外, 窒息对人员目标所造成的毁

伤效果还与空气流动的方向、风速等环境要素有关。

2 温压弹综合毁伤效果模型

温压弹爆炸过程中对目标造成的伤害包括冲击波、破片、热辐射以及窒息等单项毁伤机理。前文已将 4 种情况进行了量化计算。但若建立温压弹综合毁伤效果模型,须考虑各种毁伤机理的有效叠加。因此,在 4 种毁伤机理量化计算的基础上,讨论爆炸场内目标被毁伤的综合效应模型。

温压弹对人员的综合毁伤评估模型如式(15)~式(17)所示。

死亡人数:

$$N_1 = \pi \max(R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_4)^2 \rho_1; \quad (15)$$

重伤人数:

$$N_2 = \pi [\max(R_{12}, R_{22}, R_{32})^2 - \max(R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_4)^2] \rho_2; \quad (16)$$

轻伤人数:

$$N_3 = \pi [\max(R_{13}, R_{33})^2 - \max(R_{12}, R_{22}, R_{32})^2] \rho_3. \quad (17)$$

式中: ρ_1 为 $\max(R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_4)$ 范围内的人员密度; ρ_2 为 $[\max(R_{12}, R_{22}, R_{32}) - \max(R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_4)]$ 范围内的人员密度; ρ_3 为 $[\max(R_{13}, R_{33}) - \max(R_{12}, R_{22}, R_{32})]$ 范围内的人员密度。

式(15)~式(17)是在最大毁伤半径同时满足重伤区超过死亡区,且轻伤区超过重伤区的前提下得到的。

若其中任意一个单项毁伤机理所造成的死亡半径超过其他毁伤机理所造成的重伤或轻伤半径,则需根据最严重毁伤原理进行分析讨论。

1)若死亡区域较大的单项毁伤评估结果为冲击波、热辐射或者是窒息任意一项造成的,根据其目标的毁伤特性可知,该 3 种情况均为面覆盖毁伤,即在温压弹爆炸作用区域内,3 种毁伤均会引起人员的伤亡效应。因此,应用最大的死亡半径计算得到爆炸场内的死亡人数,同理可得到重伤半径和轻伤半径,计算公式同式(15)~式(17)。

2)若死亡区域较大的单项毁伤评估结果为预制破片所引起的,根据破片对目标的毁伤特性可知,在破片造成的毁伤区域,还需分析破片击中人员目标的几率。假设破片造成的人员死亡区域超过其他单项毁伤方式,则温压弹爆炸对人员目标造成的综合毁伤如式(18)~式(20)。

死亡人数:

$$N_1 = \pi \max(R_{11}, R_{31}, R_4)^2 \rho'_1 + \pi P_k [\max(R_{12}, R_{32})^2 - \max(R_{11}, R_{31}, R_4)^2] \rho'_2 + \pi P_k [\max(R_{13}, R_{33})^2 - \max(R_{12}, R_{32})^2] \rho'_3 + \pi P_k [R_{12}^2 - \max(R_{13}, R_{33})^2] \rho'_4; \quad (18)$$

重伤人数:

$$N_2 = \pi [\max(R_{12}, R_{32})^2 - \max(R_{11}, R_{31}, R_4)^2] \rho'_2 + \pi P_k (R_{22}^2 - R_{21}^2) \rho_{22}; \quad (19)$$

轻伤人数:

$$N_3 = \pi [\max(R_{13}, R_{33})^2 - \max(R_{12}, R_{32})^2] \rho'_3. \quad (20)$$

式中: ρ'_1 为 $\max(R_{11}, R_{31}, R_4)$ 范围内的人员平均密度; ρ'_2 为 $[\max(R_{12}, R_{32}) - \max(R_{11}, R_{31}, R_4)]$ 范围内的人员平均密度; ρ'_3 为 $[\max(R_{13}, R_{33}) - \max(R_{12}, R_{32})]$ 范围内的人员平均密度; ρ'_4 为 $[R_{12} - \max(R_{13}, R_{33})]$ 范围内的人员平均密度。

则温压弹爆炸场内,人员受到伤害的直接经济损失为

$$M_\alpha = aN_1 + bN_2 + cN_3. \quad (21)$$

温压弹的爆炸毁伤作用对建筑物造成的综合效应评估中,只考虑建筑物被冲击波的破坏效应,则温压弹爆炸对建筑物所造成的综合毁伤的直接经济损失表达式见式(3)。

则在爆炸场内,设备被毁坏所引起的直接经济损失为

$$M_\beta = \pi \max(R''_{11}, R'_{21})^2 \rho''_1 + 0.8 \pi [\max(R''_{12}, R'_{22})^2 - \max(R''_{11}, R'_{21})^2] \rho''_2 + 0.5 \pi [R''_{13} - \max(R''_{12}, R'_{22})^2] \rho''_3 + 0.2 \pi (R''_{14} - R''_{13}) \rho''_4. \quad (22)$$

式中: ρ''_1 为 $\max(R''_{11}, R'_{21})$ 范围内的设备平均财产密度; ρ''_2 为 $[\max(R''_{12}, R'_{22}) - \max(R''_{11}, R'_{21})]$ 范围内的设备平均财产密度; ρ''_3 为 $[R''_{13} - \max(R''_{12}, R'_{22})]$ 范围内的设备平均财产密度; ρ''_4 为 $(R''_{14} - R''_{13})$ 范围内的设备平均财产密度。

综上所述,温压弹爆炸场内,目标被毁坏的综合经济损失为

$$M = M_\alpha + M_{12} + M_\beta. \quad (23)$$

式中, M_α 为人员目标被伤害所造成的综合经济损失; M_{12} 为建筑物被损坏所造成的综合经济损失; M_β 为设备被损坏所造成的综合经济损失。

3 试验研究

为了简化计算,在毁伤评估模型的试验应用过程中,做出如下假设:

- 1) 温压弹战斗部中放置 1 000 个预置钢质球型破片,其直径为 0.5 cm,钢的密度为 7.85 g/cm³;
- 2) 各毁伤区域内的人员密度均为 ρ ;
- 3) 开放空间,不考虑窒息毁伤效应。

3.1 试验条件

试验样品为液固复合态的温压弹战斗部,其中心装药量为 72 kg,壳体质量为 31 kg,均应用上端起爆的方式,共进行 2 组平行试验。

试验场地为空旷的专用试验靶场,硬质地面,炸高设置 1.33 m,云爆弹战斗部在地面上的铅锤投影点为爆心,在垂直的两个方向距爆心分别为 6、8、10、12、14、17、20 m 和 22 m 处安装壁面压力传感器,测试爆炸冲击波超压;在距爆心 140 m 处放置红外热成像仪(仪器型号 Mikronscan7200V),测试爆炸火球的各表征参量。具体布置如图 1 所示。

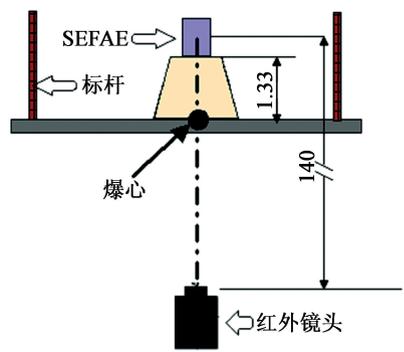
3.2 试验结果

应用爆炸冲击波超压的测试仪器,可测得冲击波超压数据,见表 1。

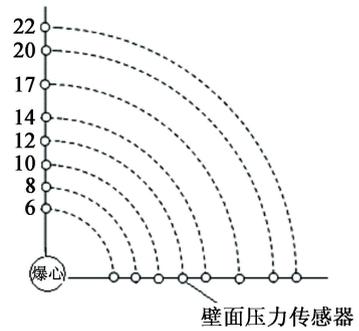
在红外热成像仪的测试结果基础上,分析获得温压弹爆炸火球的表征参量,见表 2。

3.3 结果分析

根据表 1 和表 2 内试验数据可计算得到,在冲击波毁伤作用下,人员目标全部死亡的半径范围是 18.9 m,重伤半径是 28.0 m,轻伤半径是 48.9 m;在破片毁伤作用下,人员目标全部死亡的半径范围是 51.9 m,重度伤害的半径范围是 62.0 m;在热辐射作用下,人员目标全部死亡的半径范围是 7.0 m,重伤半径范围是 8.7 m,轻伤半径范围是 13.2 m。因为在热辐射毁伤作用下,人员受到伤害的区域范围较小,均落在冲击波造成全部死亡的区域内;因此,在距离爆心 18.9 m 圆形区域内,由于冲击波的毁伤作用,人员目标已全部死亡,热辐射无法对其造成二次伤害。



(a) 弹体及红外热成像布置



(b) 压力传感器布置

图 1 试验现场示意图(单位:m)

Fig. 1 Sketch of the experimental arrangement(unit:m)

根据建立的各种毁伤评估模型,计算温压弹爆炸对人员造成毁伤的综合经济损失,结果见表 3。

对于建筑物,只考虑冲击波的毁伤效应,将试验测试数据带入式(3),得 $M_{12} = 4.79\rho'$ 万元, ρ' 为爆炸场内建筑物的平均财产密度。

对于设备,由于其受冲击波损坏的程度相对复杂,需分析设备的实际使用功能,本次评估不进行讨论,仅考虑预制球形破片的毁伤效应,将球形破片的基本参数带入式(9),可得到 $M_{22} = \pi \times 9.5^2 \times \rho_2 \times 0.8 = 226.8\rho_2$, ρ_2 为爆炸场内设备的财产密度。

综合分析前文各种毁伤机理对人员、建筑物和

表 1 超压试验数据

Tab. 1 Measurement data of overpressure

距离/m	6	8	10	12	14	17	20	22
组 1#/kPa	895	471	347	239	199	111	83	65
组 2#/kPa	962	556	308	232	188	130	91	67
平均值/kPa	929	514	327	235	193	120	87	66

表 2 火球表征参数测试结果

Tab. 2 Measurement results of characterization parameters of blast fireball

装药量/kg	最高温度/℃	最高温度时火球直径/m	爆炸持续时间/s		
			1 000 ℃	1 500 ℃	2 000 ℃
72	2 629	16.8	2.083	1.232	0.821

表 3 综合经济损失计算结果
Tab.3 Comprehensive economic losses

毁伤范围/m	< 18.94	18.94 ~ 28.04	28.04 ~ 48.86	48.86 ~ 51.90	51.90 ~ 62.00
经济损失/元	1 127ap	76ap + 1 344bp (立姿) 34ap + 1 300bp (卧姿)	282ap + 5 030cp (立姿) 126ap + 4 904cp (卧姿)	54ap (立姿) 25ap (卧姿)	203bp (立姿) 91bp (卧姿)

设备的破坏效应,若目标人员在温压弹爆炸作用场内均为立姿时,则目标被伤害的程度最深,即综合毁伤经济损失最严重:

$$M_{max} = 1\ 127ap + 76ap + 1\ 344bp + 282ap + 5\ 030cp + 54ap + 203bp + 4.79\rho' + 226.8\rho_2 = (1\ 539a + 1\ 547b + 5\ 030c)\rho + 4.79\rho' + 226.8\rho_2 \quad (24)$$

若人员在爆炸作用场内均为卧姿时,则目标被伤害的程度最轻,即综合毁伤经济损失最小:

$$M_{min} = 1\ 127ap + 34ap + 1\ 300bp + 126ap + 4\ 904cp + 25ap + 91bp + 4.79\rho' + 226.8\rho_2 = (1\ 312a + 1\ 391b + 4\ 904c)\rho + 4.79\rho' + 226.8\rho_2 \quad (25)$$

4 结论

根据温压弹爆炸特点,以单项毁伤机理研究分析结果为前提,建立温压弹综合毁伤效果的评估模型,并将毁伤效应统一量化为经济损失,结论如下:

1) 温压弹对人员的综合毁伤经济损失为: $M_\alpha = aN_1 + bN_2 + cN_3$ 。

2) 温压弹对设备的综合毁伤经济损失为: $M_\beta = \pi \max(R''_{11}, R'_{21})^2 \rho''_1 + 0.8\pi [\max(R''_{12}, R'_{22})^2 - \max(R''_{11}, R'_{21})^2] \rho''_2 + 0.5\pi [R''_{13} - \max(R''_{12}, R'_{22})^2] \rho''_3 + 0.2\pi (R''_{14} - R''_{13}) \rho''_4$ 。

3) 温压弹对建筑物的综合毁伤经济损失为: $M_{12} = \pi R'^2_{11} \rho'_{11} + 0.8\pi (R'^2_{12} - R'^2_{11}) \rho'_{12} + 0.5\pi (R'^2_{13} - R'^2_{12}) \rho'_{13} + 0.2\pi (R'^2_{14} - R'^2_{13}) \rho'_{14}$ 。

4) 试验结果表明,温压弹对目标综合毁伤经济损失最大和最小分别为:

$$M_{max} = (1\ 539a + 1\ 547b + 5\ 030c)\rho + 4.79\rho' + 226.8\rho_2;$$

$$M_{min} = (1\ 312a + 1\ 391b + 4\ 904c)\rho + 4.79\rho' + 226.8\rho_2。$$

参 考 文 献

[1] 王芳, 冯顺山. FAE 战斗部毁伤威力评价的试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 179-182.

WANG F, FENG S S, Experimental research on damage power evaluation of FAE warhead [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 179-182.

[2] 许化珍, 彭朝晖, 李向东. 云爆弹杀伤效能研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 114-116.

XU H Z, PENG Z H, LI X D. The reaserach on damage efficiency of FAE [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(3): 114-116.

[3] 王杰. 某型云爆弹毁伤威力测试及评价方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

[4] 邓金榜. 四种温压炸药综合毁伤效应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

DENG J B. Study of the damage effects of four thermobaric explosives [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

[5] 宇德明, 冯长根, 徐志胜, 等. 炸药爆炸事故的综合后果模型 [J]. 兵工学报, 1998, 19(2): 122-125.

YU D M, FENG C G, XU Z S, et al. A global consequence model for explosive explosion accidents [J]. Acta Armamentarii, 1998, 19(2): 122-125.

[6] 房莹莹. 燃料空气炸药综合毁伤评价模型研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.

FANG Y Y. Research on comprehensive damage assessment models of fuel air explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.

[7] 刘雅琼. 多重毁伤效应综合评价方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

LIU Y Q. A research on comprehensive evaluation methods of multi-damage effect of explosion [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.

[8] 高旭东, 郭敏, 孙韬, 等. 炮射温压弹对人员目标的毁伤效能研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 123-125, 128.

GAO X D, GUO M, SUN T, et al. The damage efficiency research on cannon thermobaric ammunition to personnel target [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(3): 123-125, 128.

[9] 庞双芹. 关于死亡赔偿计算方法的探讨 [J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(3): 38-42.

PANG S Q. New consider about theoretic evidence of compensating for death and calculating measurement [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2005,

MA P. Synthesis, theoretical calculation and application research on cocrystal ammonium energetic materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

[9] 赵凯. SY 装药柔爆索爆轰特性研究及工程应用[D]. 南京:南京理工大学, 2016.

ZHAO K. Detonation characteristics research and engineering application of SY mild detonating fuse[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[10] 陈太林. 水悬浮法造粒点火药的制备及其性能[J]. 火工品, 1999(3):43-45.

CHEN T L. Ignition powder made from water suspension granulation[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1999(3): 43-45.

[11] 朱顺官, 张琳, 李燕, 等. SY 共晶化合物的应用特性

综述[C]//民用爆破器材理论与实践. 2012: 242-245.

ZHU S G, ZHANG L, LI Y, et al. Briefly introduction on the application of SY co-crystal compound[C]//Theory and Practice of Industrial Explosive Materials. 2012: 242-245.

[12] 中国兵器工业总公司. 火工品药剂试验方法相容性试验压力传感器法; GJB737.13—1994[S]. 1994.

[13] 李兵, 陈曦, 杜忠华, 等. LEFP 对带壳装药冲击起爆过程的数值模拟与试验[J]. 含能材料, 2016, 24(11):1034-1040.

LI B, CHEN X, DU Z H, et al. Numerical simulation and experimental study of LEFP on impact initiation process of charge with shell [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(11):1034-1040.

(上接第 26 页)

1(3):38-42.

[10] 朱继业, 郑纯, 孙晓晖, 等. 杀爆弹破片与冲击波对地面人员目标综合毁伤[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(4):1-4.

ZHU J Y, ZHENG C, SUN X H, et al. Integration lethal probability of fragment and shock wave of explosive projectile on attacking personalities[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(4):1-4.

[11] 赵国志, 张运法. 战术导弹战斗部毁伤作用机理[M]. 南京:南京理工大学, 2000:130-133.

[12] 金丽, 赵捍东, 曹红松, 等. 预制破片对地面人员目标的杀伤威力分析计算[J]. 导弹与制导学报, 2006, 26(4):157-159.

JIN L, ZHAO H D, CAO H S, et al. Analysis and calculation on the lethality of premade fragments to the per-

sonnel targets on the ground [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(4):157-159.

[13] BAKER W E, COX P A, WESTINE P S, et al. Explosion hazards and evaluation [M]. Amsterdam: Elsevier Science Pub. Co., 1983.

[14] 解立新, 严峰, 苑宏志. 燃料空气炸药爆炸温度场参数实验研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(2):6-8.

XIE L X, YAN F, YUAN H Z. Experimental study on the parameter of FAE's temperature field[J]. Explosive Materials, 2007, 36(2): 6-8.

[15] 阚金玲, 刘家聪, 曾秀琳, 等. 温压炸药爆炸火球的特征[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2):55-58.

KAN J L, LIU J C, ZENG X L, et al. Fireball characteristics of a thermal-baric explosive[J]. Chinese Journal of Explosive and Propellants, 2007, 30(2):55-58.