

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.02.003

累积损伤对B炸药冲击起爆影响的仿真研究*

黄炳耀 白桥栋 王茂杰 邱 晗 韩家祥

南京理工大学瞬态物理国家重点实验室(江苏南京,210094)

[摘 要] 采用LS-DYNA软件进行数值仿真,通过改变炸药撞击速度以改变损伤程度,探究损伤和垫层材料对B炸药起爆行为的影响。计算结果表明,当第2次撞击速度一定时,起爆时间 t 与第1次撞击速度 v_1 的关系为: $t = -0.02v_1 + C_1$,冲击起爆的距离也随之减小。主要因为第1次撞击速度增大,导致B炸药发生轻微变形,内部的损伤程度随之增大,第2次撞击时更容易被起爆。3种不同垫层中,波阻抗较大的材料抗撞击能力强,B炸药内部不易产生损伤,冲击起爆的时间和距离较长;而B炸药的临界起爆压力差别不大,临界起爆压力的范围在31.48~32.98 GPa之间。表明不同垫层材料会影响损伤后B炸药冲击起爆的时间和距离,而不会影响临界起爆压力。

[关键词] B炸药;累积效应;冲击起爆;垫层材料

[分类号] TQ560.9

Simulation Study on the Effect of Cumulative Damage on the Shock Initiation of Composition B

HUANG Bingyao, BAI Qiaodong, WANG Maojie, QIU Han, HAN Jiexiang

National Key Lab of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to study the influence of damage and cushion materials on the initiation of Composition B, numerical simulation was conducted using LS-DYNA software. The impact velocity of explosive was changed to change the damage degree. The calculation results show that when the second impact velocity is fixed, the relationship between the initiation time t and the first impact velocity v_1 is $t = -0.02v_1 + C_1$, and the distance of impact detonation also decreases accordingly. The increase of the first impact velocity leads to the slight deformation of the explosive, and the damage degree inside the explosive increases. Therefore, the explosive is easier to be triggered during the second impact. Among the three different cushions, the material with higher resistance to impact is stronger. The internal damage of the explosive containing this material is not easy to produce, and the time and distance of impact initiation of this explosive are longer. The critical initiation pressure of the explosive varies little, ranging from 31.48 GPa to 32.98 GPa. It indicates that different cushion materials will affect the time and distance of impact initiation of the damaged explosive, but will not affect the critical initiation pressure.

[KEYWORDS] Composition B; cumulative effect; shock initiation; cushion material

0 引言

B炸药是非常重要的军用炸药,具有生产周期短、生产效率较高、生产成本低等优点。在生产、运输、储存中,炸药常会受到多种意外刺激的复合作用,从而发生意外燃烧、爆燃甚至爆炸^[1]。炸药在储存时会受到多次低速撞击,引起炸药内部损伤累积,导致力学性能下降,进而导致起爆阈值发生改

变,严重影响安全性能。

目前,对B炸药相关的研究有许多。有研究发现,破片的长径比、形状、入射角对B炸药的起爆有影响^[2-4]。另一些研究涉及B炸药的起爆阈值、各种起爆情况以及损伤累积情况下的起爆^[5-8],但对损伤B炸药的仿真研究较少。

炸药安全性能的相关研究很早就开始了,对其他类型的炸药进行损伤情况研究的相关文献有许多。学者们针对炸药缺陷、损伤机理、侵彻过程中的

* 收稿日期:2023-10-20

第一作者:黄炳耀(1998—),男,硕士研究生,研究方向为爆轰理论与应用。E-mail: huangby322@njust.edu.cn

通信作者:白桥栋(1979—),男,副研究员,研究方向为爆轰理论与应用。E-mail: baiqndj@njust.edu.cn

损伤开展了大量研究^[9-17],但是对 B 炸药受到撞击后的损伤演化问题研究不足。

本文中,对受到轻微撞击产生损伤的 B 炸药的点火行为进行数值模拟,研究不同损伤累积对 B 炸药点火行为的影响。此外,对不同垫层材料条件下 B 炸药的多次撞击点火爆过程进行数值模拟,研究不同垫层材料对炸药多次撞击点火行为的影响。为损伤条件下 B 炸药的起爆行为研究及 B 炸药的储存和使用提供参考。

1 数值仿真模型

主要模拟 B 炸药在损伤后再次受到撞击的冲击起爆表现。采用 Lee-Tarver 状态方程^[18]。该方程包含反应速率方程、未反应物 JWL 方程和爆轰产物 JWL 方程。反应速率方程为

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1 - \lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1 - \lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1 - \lambda)^e \lambda^g p^z。$$

(1)

式中: I 为点火药冲击强度; λ 为炸药反应度; ρ 为炸药密度;下标“0”表示初始状态; G_1 、 G_2 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 g 、 x 、 y 和 z 均为常数。

模型右边第 1 项表示炸药在冲击压缩作用下的热点点火阶段;第 2 项表示热点缓慢燃烧阶段;第 3 项表示热点合并后炸药的快速反应阶段。炸药模型材料参数见表 1^[19]。

钢、铝合金和钨合金采用 Johnson Cook(J-C)强

度模型描述。J-C 模型能较好地描述材料的大应变、高应变率及高温状态^[20]。

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C\ln\dot{\epsilon}^*)[1 - (T^*)^m]。$$

(2)

式中: σ 为材料流动屈服强度; A 、 B 、 n 、 C 、 m 为材料相关常数; $\bar{\epsilon}_p$ 为有效塑性应变率; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p/\dot{\epsilon}_0$,为归一化有效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_p$ 为有效塑性应变率 $\bar{\epsilon}_p$ 对时间的导数; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,取 1 s^{-1} ; $T^* = (T - T_r)/(T - T_m)$;其中, T_r 与 T_m 分别为室温和材料熔化温度。

具体参数如表 2 所示。表 2 中, ρ 为材料密度; G 为切变模量; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

无氧铜采用 Steinberg-Cochran-Guinan (SCG)强度模型描述。

$$\begin{cases} G = G_0 \left[1 + \frac{G'_p}{G_0} \frac{p}{\eta^{\frac{1}{3}}} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right]; \\ Y = Y_0 (1 + \beta \epsilon_i)^n \left[1 + \frac{Y'_p}{Y_0} \frac{p}{\eta^{\frac{1}{3}}} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right], \end{cases}$$

应用范围为 $Y_0(1 + \beta \epsilon_i)^n \leq Y_{\max}$ 。

(3)

式中: p 、 T 分别为压力、温度; $\eta = V_0/V$; β 、 n 为硬化功参数; ϵ_i 为初始应变; G'_p 、 Y'_p 及 G'_T 分别表示 G 、 Y 对 p 、 T 的偏导数。

参量 G_0 、 G'_p 及 G'_T 可以通过超声实验确定。具体参数如表 3 所示。

钢、铝合金、钨合金和无氧铜均采用 Grüneisen 状态方程^[25]描述:

表 1 B 炸药反应速率方程参数

Tab. 1 Parameters of the reaction rate equation for Composition B

$I/\mu\text{s}^{-3}$	a	b	c	d	z	g	G_1	e	G_2	x	y
45	0.036 7	0.667	0.667	0.33	3	1.0	140	0.222	1 000	7.0	2

表 2 钢、铝合金和钨合金的模型参数

Tab. 2 Model parameters of steel, aluminum alloys and tungsten alloys

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G/GPa	E/GPa	ν	A/MPa	B/MPa	n	C	m
钢 ^[21]	7.83	76.92	200	0.30	410	20.0	0.08	0.100	0.55
铝合金 ^[22]	2.77	25.94	69	0.33	265	426.0	0.34	0.015	1.00
钨合金 ^[23]	17.70	158.08	411	0.30	1 350	0	1.00	0.060	0

表 3 无氧铜的模型参数

Tab. 3 Model parameters of Cu-OHFC

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Y_0/GPa	Y_{\max}/GPa	β	n	$G'_p \cdot G_0^{-1}/\text{GPa}^{-1}$	$G'_T \cdot G_0^{-1}/\text{K}^{-1}$	T_{m0}^b/K	G_0/GPa
无氧铜 ^[24]	8.93	0.12	0.6	36	0.45	0.03	0.000 8	1 356	47.7

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - a\mu^2/2]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \mu^2/(\mu + 1) - S_3 \mu^3/(\mu + 1)^2} + (\gamma_0 + a\mu)E.$$

(4)

式中： μ 为压缩度； c 为物质中的声速； γ_0 是 Grüneisen 系数； ρ_0 为初始密度； E 为产物内能； S_1 、 S_2 、 S_3 是 $u_s - u_p$ 曲线的 3 次拟合系数； u_s 为冲击波速度； u_p 为波后粒子速度； a 是对 γ_0 的一阶修正； S_1 、 S_2 、 S_3 、 γ_0 和 a 均为输入常数。

给予破片 Z 轴正方向的速度,从 0 时刻就开始向炸药进行撞击。采用升降法获得炸药的临界起爆速度。采用反应度 λ_1 判断炸药是否发生爆轰反应:若 $\lambda_1 = 0$,表示炸药没有任何反应;若 $0 < \lambda_1 < 1$,说明炸药发生了不完全反应;若 $\lambda_1 = 1$,表示炸药发生完全爆轰。对 B 炸药在多次撞击下的点火行为进行数值模拟,并研究累积损伤对炸药冲击起爆行为的影响。计算的三维模型如图 1(a)。为了简化计算,只计算 1/4 模型,包括 B 炸药、垫层、外壳和破片。其中,炸药的尺寸为 $\phi 80\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,密度为 1.8 g/cm^3 ;破片材料为钨合金;外壳材料为钢;垫层材料为钢、铝合金和无氧铜。图 1(b)为 B 炸药冲击起爆的有限元模型,采用 Lagrange 网格,网格尺寸为 $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$,整体网格数目为 2 001 540,为了获得损伤炸药的应力变化情况,在 B 炸药轴线上,距离垫层界面处 $0.4\sim 3.2\text{ cm}$ 范围内,以 0.4 cm 为间隔设置压力取样点,编号分别为 1[#]~8[#],如图 1(b)

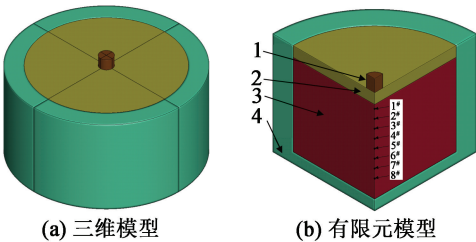


图 1 有限元计算模型

Fig. 1 Finite element calculation model

所示。

2 结果分析

模拟多次撞击。基于 LS-DYNA 重启动技术,对炸药试样进行 2 次撞击。第 1 次撞击速度低于炸药起爆的速度阈值,使炸药内部产生变形和损伤,得到不同损伤程度的炸药。第 2 次撞击时,使用相同的弹丸撞击损伤炸药,撞击位置与第 1 次撞击位置相同,最终得到 B 炸药的第 2 次撞击点火阈值。第 1 次撞击结束后,炸药的应力、应变的状态将被保留。

2.1 不同初始撞击速度下炸药的爆轰响应

为了研究损伤对炸药起爆的影响,使用低速破片撞击炸药,以造成炸药内部出现轻微损伤;然后用较高速度的破片再次撞击炸药,并观察起爆情况的变化。其中,垫层材料为钢。采用升降法计算发现,当冲击速度小于 300 m/s 时,炸药无法起爆。因此,选择 50 、 100 、 150 、 200 m/s 和 250 m/s 的速度对炸药进行初次撞击,使内部产生损伤;再使用 400 、 500 m/s 和 600 m/s 的速度撞击,对炸药进行起爆。

表 4 列出了第 1 次撞击速度 v_1 (50 、 100 、 150 、 200 m/s 和 250 m/s) 以及第 2 次撞击速度 v_2 (400 、 500 、 600 m/s) 下炸药发生爆轰时的距离 d 和时间 t 。

图 2 为对表 4 数据进行拟合的结果。当第 2 次撞击速度一定时,起爆时间与第 1 次撞击速度的关系为: $t = -0.02v_1 + C_1$, C_1 为常数。在相同第 2 次撞击速度下,随着第 1 次撞击速度的增加,炸药的冲击起爆时间呈线性变化,而相应的起爆距离减少。这是因为第 2 次撞击强度一定时,随着损伤的累计,撞击后炸药变得易于起爆。而在相同的第 1 次撞击速度下,随着第 2 次撞击速度的增加,炸药的冲击起爆时间也变短,相应的起爆距离变小。

使用 0.5 cm 钢垫层、第 1 次撞击速度 v_1 分别为 50 、 150 m/s 和 250 m/s 时,炸药在第 2 次撞击 (v_2

表 4 第 2 次撞击下炸药发生爆轰时的距离和时间

Tab. 4 Distance and time of detonation of explosives during the second impact

$v_1 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$t/\mu\text{s}$			d/cm		
	$v_2 = 400\text{ m/s}$	$v_2 = 500\text{ m/s}$	$v_2 = 600\text{ m/s}$	$v_2 = 400\text{ m/s}$	$v_2 = 500\text{ m/s}$	$v_2 = 600\text{ m/s}$
50	5.10	4.75	4.50	1.922 0	1.840 1	1.761 0
100	4.90	4.55	4.35	1.915 3	1.828 7	1.746 1
150	4.80	4.45	4.20	1.904 4	1.821 1	1.738 2
200	4.70	4.30	4.10	1.895 9	1.793 0	1.718 0
250	4.70	4.30	4.10	1.856 4	1.773 0	1.690 3

为 600 m/s) 初始时刻和发生爆轰时刻的反应度云图如图 3 所示。结果显示,随着第 1 次撞击速度的增加,初始时刻炸药的损伤程度变大,并且炸药内部发生的反应加剧。这与文献[26]中关于 B 炸药受到冲击后,在炸药试样中产生裂纹的实验结果基本一致,验证了本文中采用的仿真方法是合理的。当发生爆轰时,反应度达到 1 的区域变大,表明反应的热点区域增大。这是因为,当第 1 次撞击速度增大后,炸药会经历轻微的变形,内部的损伤程度随之增大,使得后续第 2 次撞击时更容易被起爆。对比初始时刻的炸药损伤和爆轰时刻的反应度云图可以发现,当初始时刻的炸药损伤较大时,最终时刻的爆轰热点区域也相应增大。

第 1 次撞击速度 v_1 为 50 m/s 和 250 m/s,第 2 次撞击速度 v_2 为 500 m/s,破片冲击起爆 B 炸药时,不同冲击波运动位置处的波后压力剖面见图 4。从图 4(a)中可以看到,当冲击波进入 B 炸药后,位于 1[#] 压力取样点的物质压力出现突跃,表明冲击波已经进入炸药;随着冲击波进入炸药距离的增加,波后压力剖面的冯诺依曼(von Neumann)峰不断增加。

观察不同位置压力取样点之间的起爆时间差可以看出,冲击波不断加速,当波后压力剖面 CJ 点的压力达到 31.08 GPa,炸药完全爆轰。由于化学反应的进行,波后压力剖面在冯诺依曼峰后呈现迅速下降的趋势,随着化学反应的结束,由于产物飞散造成的稀疏波进一步缓慢降低。由图 4 可见,随着初始撞击速度的不断增加,炸药内部的损伤逐渐加剧。这与文献[27]中关于损伤的存在使炸药颗粒反应活性提高,导致爆轰建立过程加快的实验现象一致。

2.2 不同垫层材料对炸药累积损伤的影响

当冲击波传到炸药与垫层交界面时会发生反射,反射波的幅值与炸药和垫层之间的波阻抗 ρc (c 为材料声速) 相关。所以,垫层材料影响反射波的幅值,进而影响炸药的起爆阈值^[28]。为了研究不同材料对炸药起爆的影响,分别采用相同厚度的铝合金和无氧铜作为垫层,并与以钢为垫层材料的模拟结果进行比较,3 种材料波阻抗的具体参数见表 5^[29]。较高的波阻抗意味着材料对冲击波的传播有更高的阻力。同时,垫层材料的波阻抗会影响起爆过程中冲击波的传播方式和速度。

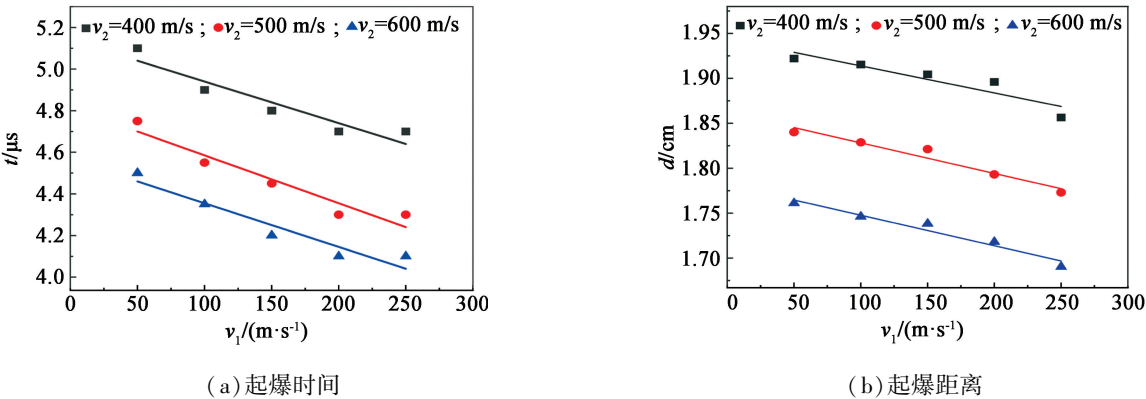


图 2 第 2 次撞击下,炸药发生爆轰时的时间和距离的拟合

Fig. 2 Fittings of time and distance of explosive detonation during the second impact

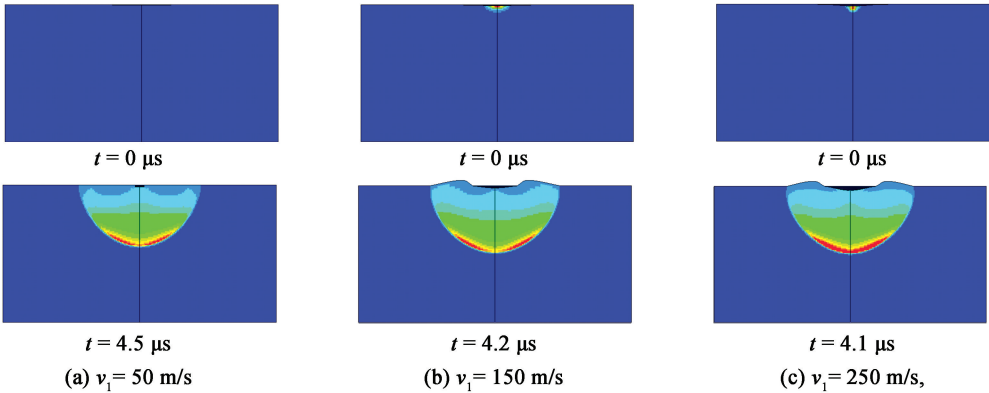


图 3 炸药第 2 次撞击初始时刻和发生爆轰时刻的反应度云图 ($v_2 = 600$ m/s)

Fig. 3 Reactivity cloud map of explosives at initial time and detonation time during the second impact ($v_2 = 600$ m/s)

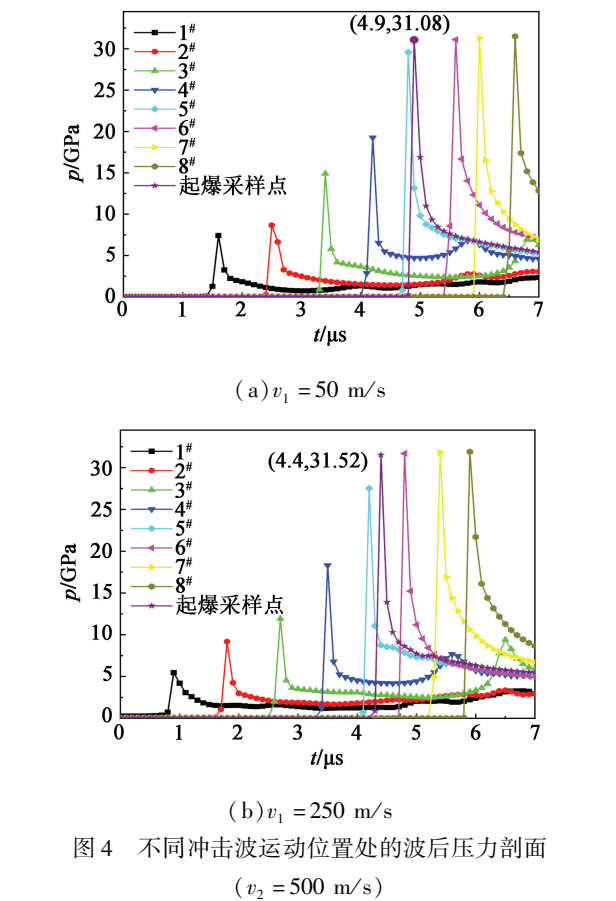


Fig.4 Post-wave pressure profile at different motion positions of the shock wave ($v_2 = 500\text{ m/s}$)

表 5 垫层材料的波阻抗

Tab.5 Wave impedance of the cushion material		
材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
钢	7 830	40.98×10^6
铝合金	2 770	13.83×10^6
无氧铜	8 930	54.16×10^6

表6为第2次撞击下,不同垫层材料炸药的起爆时间 t 、距离 d 和压力 p_r 。由表6可以看到:在相同的初次撞击和第2次撞击速度下,波阻抗较低的

表 6 第 2 次撞击下,不同垫层材料炸药的起爆时间、距离和压力

Tab.6 Initiation time, distance and pressure of explosives with different cushion materials during the second impact

v_2 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	钢			无氧铜			铝		
	$t/\mu\text{s}$	d/cm	p_r/GPa	$t/\mu\text{s}$	d/cm	p_r/GPa	$t/\mu\text{s}$	d/cm	p_r/GPa
400	4.80	1.904 4	31.48	4.90	1.905 4	31.74	4.70	1.862 1	31.69
450	4.60	1.864 5	31.64	4.70	1.863 8	31.88	4.30	1.817 7	31.71
500	4.45	1.821 1	31.82	4.55	1.823 3	31.95	4.00	1.778 2	31.84
550	4.30	1.778 6	32.45	4.45	1.781 3	32.10	3.80	1.734 4	32.44
600	4.20	1.738 2	32.26	4.40	1.741 6	32.64	3.70	1.693 1	32.98

铝合金作为垫层时炸药的起爆时间最短,起爆距离最短;波阻抗最高的无氧铜作为垫层时炸药的起爆时间最长,起爆距离最长。这种差异是不同材料中冲击波的衰减程度不同所导致的。在无氧铜中,冲击波的衰减程度最高;而在钢中,冲击波的衰减程度相对较低;在铝合金中,冲击波的衰减程度最低。然而,使用 3 种不同垫层时,炸药的临界起爆压力差别不大,临界起爆压力的范围在 31.48~32.98 GPa 之间。这是因为,炸药、壳体和破片材料都保持不变,垫层主要影响的是炸药的起爆时间和距离,并不会对炸药的临界起爆压力产生显著影响。

图 5 是初次撞击速度 v_1 为 150 m/s 时不同垫层材料炸药发生爆轰时刻的反应度云图。从图 5 中可以看到,当垫层材料相同时,随着第 2 次撞击速度的增大,热点区域也随之增大,这与前面以钢为垫层的起爆情况一致。在相同的第 2 次撞击速度 v_2 下,铝合金为垫层时的热点区域最大;钢为垫层的热点区域较小;无氧铜为垫层的热点区域最小。以上结果表明,垫层材料会对热点区域的大小产生影响。

图 6 为初次撞击速度 v_1 为 150 m/s、第 2 次撞击 v_2 为 500 m/s 时不同垫层材料炸药的第 2 次撞击初始时刻和发生爆轰时刻的反应度对比。可以看到,在相同的初次撞击速度下,垫层为铝合金的炸药损伤程度最大,而垫层为无氧铜的炸药的损伤最小。这是因为,铝合金具有较低的波阻抗,使得初次撞击时冲击波的衰减较小,导致炸药的损伤程度较大,损伤区域大于以其他 2 种材料为垫层的情况;第 2 次撞击后,炸药的热点区域相对较大,冲击起爆的时间最短;无氧铜的波阻抗较大,使得初次撞击后冲击波衰减严重,炸药的损伤区域较小,炸药上的损伤程度较小,进而在第 2 次撞击时与垫层材料共同影响炸药的起爆,导致炸药起爆后热点区域较小,冲击起爆的时间变长。

图 7 是初次撞击速度 v_1 为 150 m/s、第 2 次撞

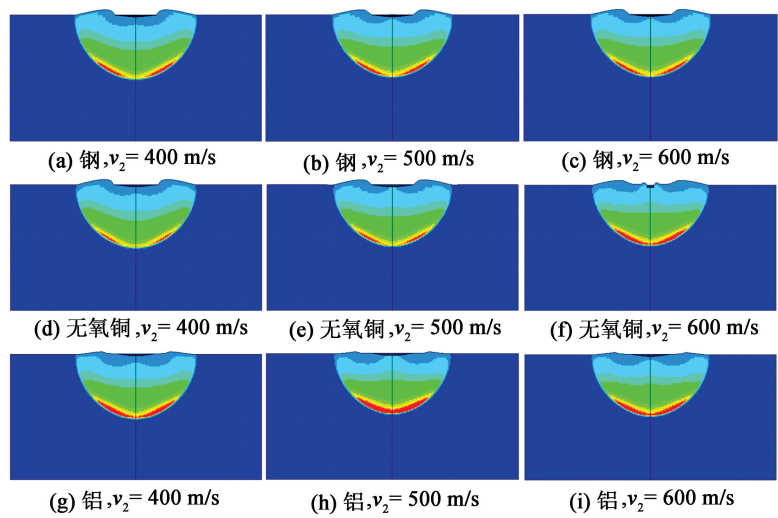


图 5 第 2 次撞击下不同垫层材料炸药发生爆轰时刻的反应度云图($v_1 = 150 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Reactivity cloud map of explosives with different cushion materials at detonation time during the second impact ($v_1 = 150 \text{ m/s}$)

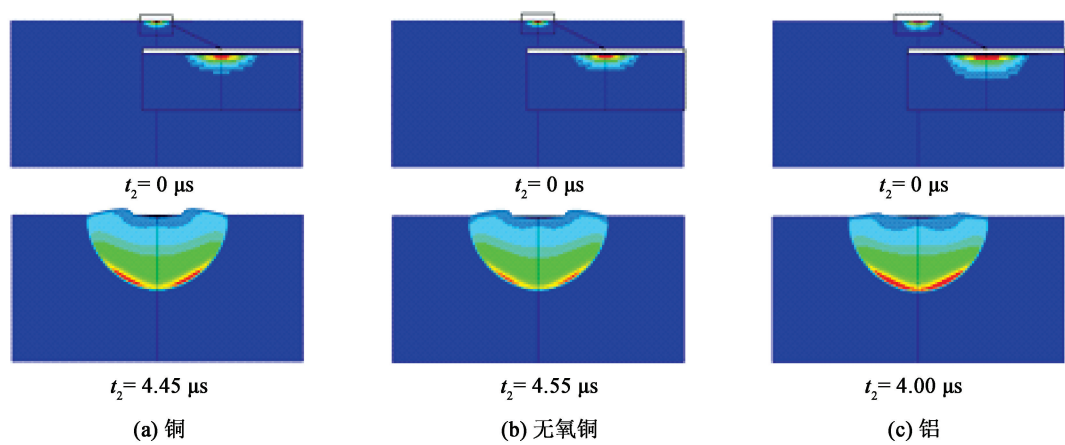


图 6 不同垫层材料第 2 次撞击下炸药初始时刻和发生爆轰时的反应度云图

Fig. 6 Reactivity cloud map of explosives at initial time and detonation time during the second impact

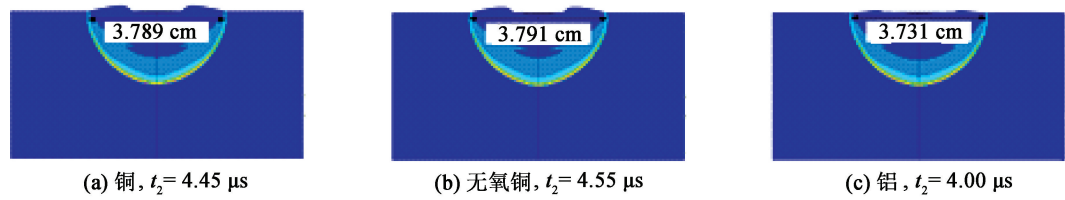


图 7 不同垫层材料炸药冲击起爆时的压力云图

Fig. 7 Pressure cloud map of explosives with different cushion materials during impact initiation

击速度 v_2 为 500 m/s 时不同垫层材料炸药冲击起爆时压力云图。从图 7 中可以看到:以铝合金为垫层时,在初始时刻压力波在横向上的传播距离最短,为 3.731 cm ;而垫层为无氧铜时,压力波在横向上的传播距离最长,为 3.791 cm ;垫层为钢时,压力波横向传播距离和无氧铜相差不大,为 3.789 cm 。这是

由于不同垫层材料的波阻抗不同、炸药损伤程度不同共同作用所导致的。钢垫层和无氧铜垫层在这方面的差异不大,可能是因为它们波阻抗相对接近,说明了垫层材料对于炸药冲击起爆过程中压力波传播的影响:不同垫层材料会改变压力波在横向上的传播距离,从而影响炸药的爆轰特性。

图8是初次撞击速度 v_1 为150 m/s、第2次撞击速度 v_2 为500 m/s时不同垫层材料的冲击起爆的时间和距离对比,从图8中可以看到,随着第2次冲击速度的增大,冲击起爆的距离在减小,冲击起爆的时间也在减少;而在相同的速度下,铝合金的冲击起爆的时间最短,冲击起爆的距离最短,无氧铜合金的冲击起爆的时间最长,冲击起爆的距离最长。从图8(a)可以看出,随着第2次撞击速度的增大,起爆时间与第2次撞击速度的关系为: $t = -2.2v_2 + C_2$, C_2 为常数,起爆时间和第2次撞击速度近似为线性关系。这是因为,铝合金的波阻抗远低于钢和无氧铜的波阻抗,导致在相同冲击速度条件下,经过铝合金垫层进入炸药的冲击波强度最大,从而使得炸药发展成为完全爆轰的距离最短;无氧铜的波阻抗仅略高于钢垫层的波阻抗,因此当无氧铜作为垫层时,炸药冲击起爆的距离与钢作为垫层时炸药冲击起爆的距离相差不大。

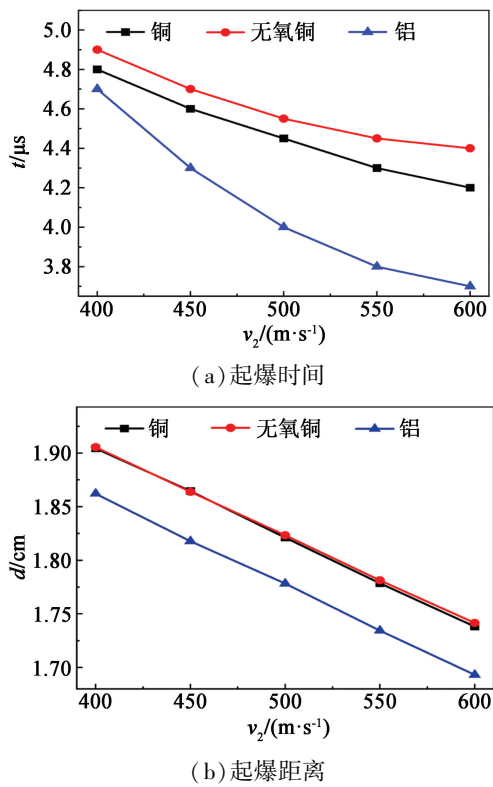


图8 不同垫层材料炸药冲击起爆的时间和距离对比

Fig. 8 Time and distance of impact detonation of explosives with different cushion materials

3 结论

通过 LS-DYNA 数值软件和点火增长模型,对不同材料作为垫层时,低速撞击损伤 B 炸药的过程进行了数值模拟,探究了 B 炸药损伤以及不同垫层材

料对冲击起爆 B 炸药的影响,结论如下:

1)通过改变撞击速度对炸药进行了2次撞击,得出当第2次撞击速度一定时,起爆时间与第1次撞击速度的关系为: $t = -0.02v_1 + C_1$,而冲击起爆的距离也随之减少。这些结果表明,较高的第1次和第2次撞击速度能够引发更快的反应过程,使得炸药更容易起爆,起爆距离变短。

2)采用不同垫层进行炸药冲击起爆模拟,发现垫层主要影响的是炸药的起爆时间和距离,并不会对炸药的临界起爆压力产生显著影响;随着第2次撞击速度的增大,起爆时间与第2次撞击速度的关系为: $t = -2.2v_2 + C_2$ 。研究表明,可以采用对冲击波衰减能力较强的垫层材料加强战斗部破片起爆的防护能力。

参 考 文 献

[1] DAI X G, WEN Y S, HUANG H, et al. Impact response characteristics of a cyclotetramethylene tetranitromine based polymer-bonded explosives under different temperatures [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(11): 114906.

[2] 刘鹏飞, 智小琦, 杨宝良, 等. 六棱钨柱冲击起爆带壳 B 炸药比动能阈值研究[J]. 高压物理学报, 2017, 31(5): 637-642.

LIU P F, ZHI X Q, YANG B L, et al. Specific kinetic energy threshold of impacting initiation covered explosive B by six-prismed tungsten fragment [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(5): 637-642.

[3] 朱福林, 陈阳, 崔卫超, 等. DU 合金破片冲击起爆 B 炸药研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 69-72.

ZHU F L, CHEN Y, CUI W C, et al. Study on impact initiation of Comp. B by DU alloy fragment [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3): 69-72.

[4] 仝远, 李德贵, 聂源, 等. 钨合金破片对屏蔽 B 炸药撞击起爆数值模拟[J]. 空天防御, 2021, 4(3): 70-75.

TONG Y, LI D G, NIE Y, et al. Numerical simulation of shock initiation of shielded composition B impacted by tungsten alloy fragment [J]. Air & Space Defense, 2021, 4(3): 70-75.

[5] 杨洋, 韩勇, 段英良, 等. 双钨球破片同时冲击柱壳装药起爆响应规律[J]. 兵工学报, 2021, 42(增刊1): 46-52.

YANG Y, HAN Y, DUAN Y L, et al. Initiation response law of cylindrical charge subjected to simultaneous impact

- of two tungsten ball fragments [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42 (Suppl. 1): 46-52.
- [6] 郭淳, 郭尚生, 钱建平, 等. 双球破片冲击柱壳装药的临界起爆条件[J]. *国防科技大学学报*, 2022, 44 (2): 188-194.
- GUO C, GUO S S, QIAN J P, et al. Critical initiation condition of cylindrical covered charge by double spherical fragments impact [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2022, 44(2): 188-194.
- [7] 郑英, 黎坤海, 赵铮, 等. Comp B 炸药枪击数值仿真研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43 (12): 158-164.
- ZHENG Y, LI K H, ZHAO Z, et al. Numerical simulation of gunshot values of Comp B [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(12): 158-164.
- [8] 郭淳, 张先锋, 熊玮. 双 EFP 冲击引爆带盖板 B 炸药的累积毁伤效应[J]. *含能材料*, 2023, 31(8): 797-807.
- GUO C, ZHANG X F, XIONG W. Cumulative damage effect on shock initiation of covered Composition B by dual EFP impacts [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2023, 31(8): 797-807.
- [9] 吕鹏博, 王伟力, 刘晓夏, 等. 含裂纹装药缺陷的侵爆战斗部穿甲过程装药安定性的数值模拟研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(11): 26-30.
- LU P B, WANG W L, LIU X X, et al. Research on numerical simulation of stability of the charge of invasion of explosive warheads containing seam defects in armor-piercing process [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(11): 26-30.
- [10] HASKINS P J, COOK M D, ELERT M, et al. On delayed detonation(XDT) under fragment impact; an analysis of experimental data and a simple phenomenological model [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1195 (1): 205-208.
- [11] 金朋刚, 姜夕博, 李鸿斌, 等. 冲击损伤对炸药装药冲击起爆特性的影响[J]. *装备环境工程*, 2019, 16 (9): 1-4.
- JING P G, JIANG X B, LI H B, et al. Effects of shock insults on explosive charges shock wave sensitivity [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(9): 1-4.
- [12] 孙宝平, 段卓平, 刘彦, 等. 破片撞击损伤装药点火数值模拟[J]. *含能材料*, 2019, 27(3): 178-183.
- SUN B P, DUAN Z P, LIU Y, et al. Numerical simulation on damaged charge ignition by fragment impact [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27 (3): 178-183.
- [13] 屈可朋, 赵志江, 沈飞, 等. 高速破片撞击下带壳装药响应及防护的试验研究[J]. *火炸药学报*, 2019, 42(2): 185-190.
- QU K P, ZHAO Z J, SHEN F, et al. Experimental study on response and protection of charge with shell under high velocity fragment impact [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(2): 185-190.
- [14] 成丽蓉, 汪德武, 贺元吉. 侵彻单层和多层靶时战斗部装药损伤及热点生成机理研究[J]. *兵工学报*, 2020, 41(1): 32-39.
- CHENG L R, WANG D W, HE Y J. Research on the damage and hot-spot generation in explosive charges during penetration into single-or multi-layer target [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(1): 32-39.
- [15] 聂少云, 薛鹏伊, 代晓淦. 模拟多层穿靶过程装药安全性评价方法[J]. *火炸药学报*, 2020, 43(5): 537-542.
- NIE S Y, XUE P Y, DAI X G. Method of evaluating the safety of charging in a multi-layer penetration process [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(5): 537-542.
- [16] 张萌昭, 周涛, 郭洪福, 等. 侵彻多层间隔靶板装药损伤特性研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42 (12): 92-97.
- ZHANG M Z, ZHOU T, GUO H F, et al. Experimental study of charge damage in multi-layer target penetration process [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(12): 92-97.
- [17] 王一鸣, 刘睿, 陈鹏万, 等. 损伤累积下 PBX 炸药低速撞击点火花行为的数值模拟[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(5): 456-464.
- WANG Y M, LIU R, CHEN P W, et al. Numerical simulation on low-velocity impact ignition behavior of PBXs with damage accumulation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(5): 456-464.
- [18] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosive [J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [19] URTIEW P A, VANDERSALL K S, TARVER C M, et al. Shock initiation experiments and modeling of Composition B and C-4 [J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 2006.
- [20] 林莉, 支旭东, 范锋, 等. Q235 B 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(9): 153-158, 172.
- LI L, ZHI X D, FAN F, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235 B steel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(9): 153-158, 172.
- [21] 陈刚, 陈小伟, 陈忠富, 等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢

板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 390-397.

CHEN G, CHEN X W, CHEN Z F, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting 45 steel plates [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 390-397.

[22] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541-548.

[23] LITTLEFIELD D L, ANDERSON C E, PARTOM Y, et al. The penetration of steel targets finite in radial extent [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(1): 49-62.

[24] 彭建祥. Johnson-Cook 本构模型和 Steinberg 本构模型的比较研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2006.

PENG J X. Comparative study of Johnson-Cook constitutive model and Steinberg constitutive model [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2006.

[25] 赵铮, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 爆炸压实过程中颗粒碰撞问题的 SPH 法数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2007, 21(4): 373-378.

ZHAO Z, LI X J, YAN H H, et al. Numerical simulation of particles impact in explosive-driven oil process using SPH method [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(4): 373-378.

[26] 陈鹏万, 丁雁生, 何松伟, 等. 炸药冲击损伤的实验研究 [J]. 含能材料, 2003, 11(1): 13-17.

CHEN P W, DING Y S, HE S W, et al. Experimental study on the impact damage of selected explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2003, 11(1): 13-17.

[27] 姚惠生, 黄风雷, 张宝钲. 炸药冲击损伤及损伤炸药冲击起爆实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2007(6): 487-490.

YAO H S, HUANG F L, ZHANG B P. Experimental study on the impact damage and shock initiation of damaged explosives [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007(6): 487-490.

[28] 李一鸣, 杨晓红, 姚文进, 等. 背板材料及炸药厚度对破片冲击起爆 8701 炸药装药的影响 [J]. 火炸药学报, 2020, 43(3): 276-281.

LI Y M, YANG X H, YAO W J, et al. Effects of back plate materials and explosive thickness on the fragment impact initiation of 8701 explosive charge [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(3): 276-281.

[29] 高光发. 波动力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.

GAO G F. Fundamentals of wave dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2019.



(上接第 12 页)

[8] DOLGOBORODOV A Y, MAKHOV M N, KOLBANEV I V, et al. Detonation in an aluminum-Teflon mixture [J]. JETP Letters, 2005, 81(7): 311-314.

[9] 彭翠枝, 范夕萍, 任晓雪, 等. 国外火炸药技术发展新动向分析 [J]. 火炸药学报, 2013, 6(3): 1-5.

PENG C Z, FAN X P, REN X X, et al. Analysis on recent trends of foreign propellants and explosives technology development [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 6(3): 1-5.

[10] 李凌峰, 王辉, 韩秀凤, 等. Al/PTFE 与炸药组合装药的爆炸释能特性 [J]. 火炸药学报, 2023, 46(1): 69-75.

LI L F, WANG H, HAN X F, et al. Explosive energy release characteristics of composite charges with Al/PTFE and explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(1): 69-75.

[11] 陶俊, 王晓峰. 金属-氟聚合物机械活化含能材料的研究进展 [J]. 火炸药学报, 2017, 40(5): 8-14.

TAO J, WANG X F. Research progress in metal-fluoropolymer mechanical activation energetic composites [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(5): 8-14.

[12] 陈亚红, 白春华, 刘意, 等. 中心药抛撒金属颗粒群的初速计算与实验研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33(5): 556-559.

CHEN Y H, BAI C H, LIU Y, et al. Experimental study and initial velocity calculation of particles dispersed by center explosive [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(5): 556-559.