

文章编号: 1006-9941(2010)03-0286-04

射弹冲击带盖板 Comp B 装药起爆过程数值模拟

崔凯华¹, 洪滔², 曹结东²

(1. 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 分析并验证了圆柱形平头铜射弹冲击起爆带盖板 Comp B 装药, 利用 LS-DYNA 模拟了圆柱形平头和圆头钨射弹冲击带不同厚度钢盖板的 Comp B 装药起爆过程, 定量地分析了起爆临界速度随盖板厚度的变化规律, 讨论了发生延迟起爆 (XDT) 现象的原因和机理。结果表明, 直接冲击起爆计算结果能够较好地符合 Jacobs 判据, 圆头与平头钨射弹冲击带盖板 Comp B 装药临界起爆速度满足关系式 $V_{\text{round}} \approx 1.15 V_{\text{flat}}$, 发生 XDT 现象是因为炸药被破坏及反射冲击共同作用所致, 且 XDT 现象产生位置均在邻近底板的炸药界面处。

关键词: 爆炸力学; 射弹; Comp B 装药; 冲击起爆; 延迟起爆; 临界速度

中图分类号: TJ55; O381

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.011

1 引言

在炸药安全性评估、武器设计以及导弹反导中, 炸药的冲击起爆问题是人们广泛关注的重要课题。

国内外许多学者都研究过这一问题^[1-7], 并得出一系列的半经验及近似计算起爆判据公式。对于圆柱形平头射弹正向冲击裸装炸药情况, Held^[2] 给出了临界速度随射弹直径变化的关系式; Slade^[3] 等人和 Rosland^[4] 等人实验得到圆柱形平头钢射弹正向冲击带钢盖板的 Comp B 装药起爆的临界速度随射弹直径及盖板厚度变化的关系式, 并被广泛接受; 方青^[5] 等人通过实验获得了钢射弹倾斜撞击带盖板炸药引发爆炸的阈值关系式, 即 Jacobs 判据, 该公式引入了尖头系数, 是对以上两种关系式的改进和推广。陈朗^[6] 等人采用两端加载双隔板试验研究了低冲击下固体炸药的延迟起爆 (XDT) 现象, 认为固体炸药发生 XDT 现象的原因是多次重复加载以及加载作用下炸药的敏化。

冲击起爆 (SDT) 及 XDT 现象虽然在一定条件下才会发生, 但它对炸药及武器系统安全性有重要影响。并且 XDT 现象发生的原因及起爆机理还不甚明了。因此, 对炸药 SDT、XDT 现象进行深入研究, 对炸药及武器系统安全有重要意义。

上述试验和理论分析的研究对象均为钢射弹, 关

于钨射弹的冲击起爆问题^[8] 鲜有报道, 为了获得更广泛的应用, 本文应用 Ls-dyna 模拟了钨射弹冲击带有不同厚度钢盖板 Comp B 装药的起爆过程。针对钨射弹冲击引爆带钢盖板炸药的情况, 分析了直接瞬间冲击起爆 (SDT) 临界速度随盖板厚度变化的关系; 给出了同等条件下圆头钨射弹和平头钨射弹引爆临界速度关系式; 并进一步讨论了 XDT 发生的原因。

2 计算模型及算法

2.1 计算模型及算法

射弹冲击带盖板炸药简化模型如图 1 所示。

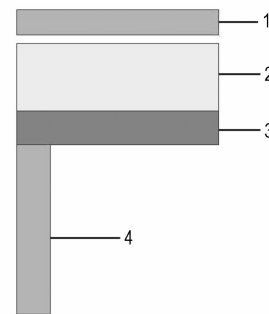


图 1 射弹撞击带盖板 Comp B 装药模型

1—back plate, 2—Comp B, 3—cover plate, 4—projectile

Fig. 1 Model of covered Comp B charge by projectile impact

材料参数的正确与否与计算结果的正确性有直接关系, 射弹、靶板均采用 Jonson-Cook 材料模型^[9] 和 Gruneisen 状态方程^[10]; 炸药材料选取 Lee-Tarver 的

收稿日期: 2009-10-11; 修回日期: 2009-10-21

作者简介: 崔凯华 (1979 -), 男, 硕士, 工程师, 高能炸药冲击起爆。

e-mail: aiguoze_703@sina.com

三项式点火增长模型^[10~11],即 I&G 模型 (Ignition-and-Growth Model)。缘于计算模型的对称性,采用轴对称模型,算法为二维任意拉格朗日欧拉法 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE)。

同时发现如果考虑到冲击波沿径向传播速度比轴向慢的因素,采用网格的划分尺度轴径比为 1 : 2 效果会更好,能有效地抑制负体积单元的出现。

2.2 算法的可行性

为验证该种方法的可行性,首先与实验数据比较,本文计算了文献[12]中平头铜弹冲击不同材质、不同厚度盖板的 Comp B 装药,并与文献[10]中计算该问题的数据相比较。文献[12]中射弹、盖板、炸药几何尺寸为:直径 12.7 mm、长 22.4 mm 的平头圆柱形铜射弹冲击 1.2 kg 直径为 40 mm 的 Comp B 装药,盖板分别为 1 mm 厚的钢、3 mm 厚的 Al 以及 5 mm 厚的 Al 和 HDPE (high density polyethylene)。

本文计算数据和文献[12]试验数据以及文献[10]计算数据如表 1 所示。由表 1 可以看出,本文计算数据、文献[12]试验数据以及文献[10]计算数据有较好的一致性。

表 1 平头铜射弹冲击起爆临界速度

Table 1 Comparison of critical brass projectile impact velocity

cover materials	critical velocity/mm · μs ⁻¹		
	experimental	calculated	this work
bare Comp B	0.969 ^[12]	0.99 - 1.0 ^[10]	0.93 - 0.94
1.0 mm steel	1.086 ^[12]	1.11 - 1.12 ^[10]	1.03 - 1.04
3.0 mm Al	1.203 ^[12]	1.21 - 1.22 ^[10]	1.20 - 1.21
5.0 mm HDPE	1.348 ^[12]	1.90 - 1.91 ^[10]	-
5.0 mm Al	1.348 ^[12]	1.42 - 1.44 ^[10]	1.44 - 1.45

2.3 起爆判据

目前广泛应用(1)式作为射弹冲击带盖板炸药起爆判据^[3~5]:

$$vd^{\frac{1}{2}} = A + Bh/d \quad (1)$$

式中, v 为射弹速度, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; d 为射弹直径, mm ; h 为盖板厚度, mm ; A 和 B 是与炸药和射弹材料有关的常数。

当弹头是尖头时,需加尖头系数 k ,即 Jacobs 判据^[5]:

$$vd^{\frac{1}{2}} = (1 + k)(A + Bh/d) \quad (2)$$

3 计算结果和讨论

采用上述方法,计算重为 15 g 的圆柱体型平头及圆头钨射弹冲击带不同厚度超硬质钢盖板 Comp B 装

药的起爆过程。如图 1 所示,平头射弹长径比为 2.5 : 1,圆头射弹直径与平头相同;盖板半径为 19.15 mm,厚度每 3.83 mm 为一个间隔,从 0 mm 到 38.3 mm; Comp B 装药半径为 19.15 mm,长 11.49 mm;底板材料也为钨,半径为 19.15 mm,厚 3.83 mm。

装药临界起爆速度随盖板厚度的变化如图 2 所示。图 2 中曲线“□”与曲线“☆”之间所包区域即为延迟起爆范围。从图 2 可见,圆柱形圆头钨射弹冲击带不同厚度钢盖板 Comp B 装药时没有出现延迟起爆情况。且发现对于圆柱形平头钨射弹冲击盖板厚度为 7.66 mm、11.49 mm、15.32 mm 时,钨射弹以低于临界起爆速度的冲击速度撞击 Comp B 装药,炸药延迟起爆。

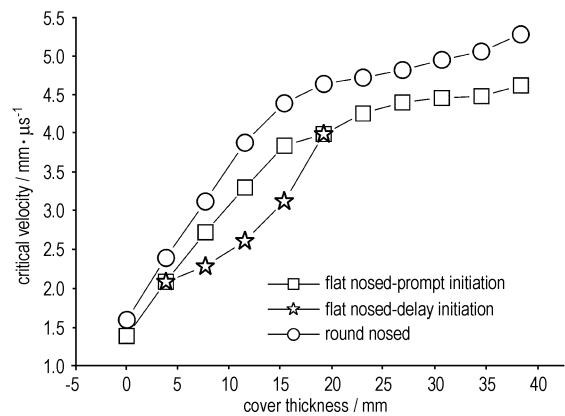


图 2 临界速度随盖板厚度变化

Fig. 2 Curves of critical velocity vs cover thickness

图 3 为圆柱形平头钨射弹冲击带 7.66 mm 厚钢盖板 Comp B 装药时起爆部位的压力历史。可以看出,37 μs 时,装药中第一次出现压力峰值(2.1 GPa 左右),结合此时刻的压力云图,可知炸药没有被引爆,到 43 μs 时出现第二个压力峰值,第二个压力峰值可能与炸药膨胀做功撞击到底板有关,此时低密度炸药被低压引爆。

图 4 为圆柱形平头钨射弹冲击带 7.66 mm 厚钢盖板 Comp B 装药在第 43 μs 时的压力图。可明显看出炸药及盖板严重变形且炸药已撞击到底板之上,炸药接近底板中心位置已出现 XDT 现象。

由图 2 可以看出:对于钨射弹冲击带盖板炸药后立即起爆(SDT)的情况,圆头射弹和平头射弹临界速度随盖板厚度变化趋势基本一致。

经拟合,对于圆柱形平头钨射弹冲击带钢盖板的 Comp B 炸药的情况下,盖板厚度在 0 ~ 15.32 mm 之间,若 $A = 10.6$, $B = 5.33$; 盖板厚度在 15.32 ~ 38.3 mm

之间,若 $A=9.22, B=0.72$,则计算数据都满足公式(1);可以看出以上两种情况选取合适的 A, B 值,均可分别满足公式(1)。虽然这些数值只是些经验常数,但是可以看出钨射弹冲击起爆问题在一定条件下也能满足 Jacobs 判据。

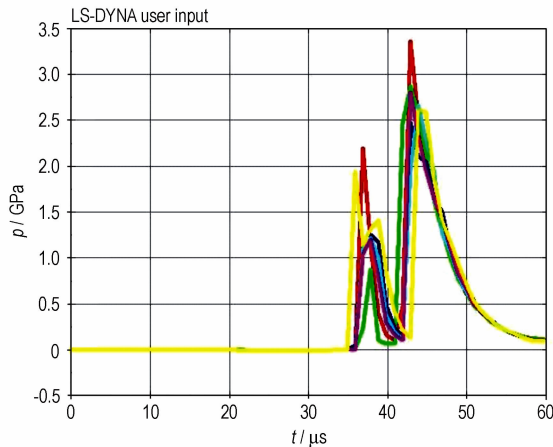


图3 圆柱形平头钨射弹冲击带 7.66 mm 厚钢盖板 Comp B 装药时起爆位置的压力历史

Fig. 3 Pressure history of initiation sites caused by impact of a flat nosed tungsten projectile at against Comp B charge with a 7.66 mm thick cover

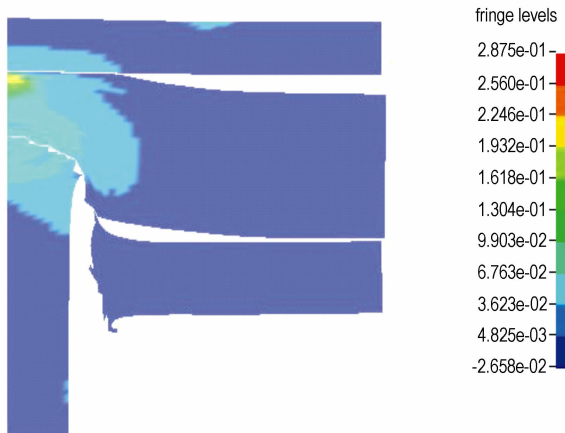


图4 圆柱形平头钨射弹冲击带 7.66 mm 厚钢盖板 Comp B 装药发生 XDT 现象时的压力图

Fig. 4 Pressure profile of XDT caused by impact of a flat nosed tungsten projectile at against Comp B charge with a 7.66 mm thick cover

射弹直径和重量相同时,拟合临界起爆速度,圆柱形圆头钨射弹临界速度大约是圆柱形平头射弹临界速度的 1.15 倍,即 $V_{\text{round}} \approx 1.15 V_{\text{flat}}$,与公式(2)相吻合,即圆柱形圆头射弹正向撞击带盖板 Comp B 装药时尖头系数约为 0.15(平头射弹尖头系数为 0)。

由图 2 亦可以看出,XDT 现象一般发生在装药盖

板厚度适中(7.66 ~ 22.98 mm)的情况下。盖板很薄时,射弹很快穿透盖板;盖板足够厚时,射弹在穿透盖板之前已经完全被侵蚀。此两种情况下炸药不易发生延迟起爆。

由图 3 和图 4 可以分析出,当射弹冲击目标时,冲击波在射弹前沿传播并且发散,冲击波传到炸药中去,出现第一个压力峰值,随后该波作为一种拉伸波沿轴向反射且抵达装药的两侧,同时炸药被整个盖板及弹体冲击变形而向径向膨胀,产生的拉伸波使炸药破裂、坍塌,这与压力云图中出现的负压相对应,此时炸药密度亦随之减小,低密度的炸药撞击到底板,产生反射冲击,随之出现第二个压力峰值,低密度的炸药在很低的压力冲击下即被延迟引爆,且延迟爆轰起爆位置均在邻近底板的炸药界面处。

4 结 论

(1) 对于 SDT 情况,盖板厚度在 0 ~ 15.32 mm 之间,若 $A=10.6, B=5.33$;盖板厚度在 15.32 ~ 38.3 mm 之间,若 $A=9.22, B=0.72$,则计算数据都满足公式(1)。

(2) 相同直径、相同重量的圆头钨射弹是平头钨射弹临界起爆速度的 1.15 倍,即圆头射弹的尖头系数为 0.15,与公式(2)相吻合。

(3) 当弹头为平头时,药盖板厚度为 7.66 ~ 22.98 mm 的情况下,会产生 XDT 现象,XDT 现象的发生是因为炸药被破坏及反射冲击共同作用所致,且 XDT 现象产生位置均在邻近底板的炸药界面处。

参考文献:

- [1] Quidot M, Hamaide S, Groux J, et al. Fragment impact initiation of cast PBXs in relation with shock sensitivity tests [C] // Proceedings of the 10th International Detonation Symposium, Boston, Mass, USA, 1993: 113-121.
- [2] Held M. Initiation phenomenon with shaped charge jets [C] // Proceedings of the 9th International Detonation Symposium, Portland, Oregon, USA, 1989: 1416-1426.
- [3] Dewey J, Slade D C. High order initiation of two military explosives by projectile impact [R]. ARBRLTB-1021, Ballistics Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1957.
- [4] Rouslund L A. Initiation of warhead fragments, normal impacts [R]. NOLTR 73-124, Naval Weapons Center, White Oak, 1973.
- [5] 方青, 卫玉章, 张克明. 射弹倾斜撞击带盖板炸药引发爆轰的条件 [J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(2): 153-158.
FANG Qing, WEI Yu-zhang, ZHANG Ke-ming. On the projectile oblique-impact initiation conditions for explosive covered with a plate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(2): 153-158.
- [6] 陈朗, 柯加山, 方青, 等. 低冲击下固体炸药延迟爆轰 (XDT) 现象 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 215-218.
CHEN Lang, KE Jia-shan, FANG Qing, et al. Delayed detonation

- of solid explosives under low amplitude shock wave loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(3): 215–218.
- [7] 代晓淦, 申春迎, 文玉史, 等. Steven 实验中不同形状弹头撞击下炸药响应规律研究[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 50–54.
DAI Xiao-gan, SHEN Chun-ying, WEN Yu-shi, et al. Reaction rule for explosive under different shape warhead impact in Steven test [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(1): 50–54.
- [8] 傅华, 谭多望, 李涛, 等. 钨射弹引爆带盖板炸药阈值工程计算方法[J]. 含能材料, 2008, 16(1): 100–102.
FU Hua, TAN Duo-wang, LI Tao, et al. Engineering calculation on threshold velocity of covered explosives impacted by tungsten projectile [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(1): 100–102.
- [9] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C] // Proc. 7th Int. Symp. On Ballistics, 1983: 541–547.
- [10] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Shock initiation experiments and modeling of Composition B and C-4 [C] // Proceedings of the 13th International Detonation Symposium, Norfolk, Virginia, USA, 2006: 929–939.
- [11] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives [C] // Proceedings of the 8th International Detonation Symposium, Naval Surface Weapons enter, Albuquerque, NSWC MP 86-194, 1985: 951–961.
- [12] Almond R J, Murray S G. Projectile attack of surface scattered munitions: prompt shock finite element models and live trial [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 31: 83.

Numerical Simulation of Shock Initiation in Covered Comp B by Projectile Impact

CUI Kai-hua¹, HONG Tao², CAO Jie-dong²

(1. Graduate Department of CAEP, Beijing 100088, China; 2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the experiments of cylindrical flat nosed copper projectiles impacting Comp B with various thickness steel cover plates, the explosion processes of cylindrical flat and round nosed tungsten projectiles impacting Comp B with various thickness steel cover plates were simulated. The curves of critical velocity vs thickness of the steel cover plate were quantitatively analyzed. The results show that the calculational results of direct shock initiation satisfy Jacobs criterion to a larger extent. Furthermore, the relationship between flat and round nosed tungsten projectiles velocities were obtained, i. e. $V_{\text{round}} \approx 1.15 V_{\text{flat}}$. At last, the reason of the delayed detonation (XDT) events was analysed. The cause was attributed to the mutual effects between the damage of Comp B and the reflection shock.

Key words: explosion mechanics; projectile; Comp B; shock initiation; delayed detonation (XDT); critical velocity

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.011