文章编号：1000-5773(2011)05-0469-06

双破片同时撞击对B炸药冲击起爆的数值模拟研究*

贾宪振，陈　松，杨　建，王建灵

（西安近代化学研究所，陕西西安　710065）

摘要：采用Lee-Tarver点火增长模型对单钨珠撞击带壳B炸药的过程进行了计算，所得到的不同尺寸钨珠引爆炸药的阈值速度与实验结果吻合良好。数值模拟了双钨珠同时撞击带壳B炸药的过程，计算了破片引爆炸药的阈值速度，分析了炸药的点火增长过程。结果表明：双破片同时撞击炸药时，引爆阈值速度随着破片间距的增大呈抛物线规律增大；当破片间距较大且撞击速度略高于阈值速度、双破片同时撞击时，炸药内部爆轰波的初始形态随破片速度而变化。

关键词：爆炸力学；冲击起爆；破片撞击；阈值速度；点火增长模型

中图分类号：O383　　**文献标识码**：A

1　引　言

研究炸药装药在破片或弹丸撞击作用下的起爆问题是弹药安全性设计中的重要课题，国内外很多学者对此进行了研究[1-9]。一般采用以数值模拟为主、用实验作为验证的研究方法，并发展了一些炸药冲击起爆的计算模型，如早期用于模拟炸药冲击起爆的森林之火(Forest Fire)反应率模型[1,10]，以及近年来国际上较为流行的Lee-Tarver点火增长模型等[2-9]。由Lee-Tarver点火增长模型计算得到的不同冲击压力下炸药爆轰增长时间和爆轰增长距离，以及炸药中某点处的压力历程曲线都与实验结果符合较好，因此可以采用该模型研究冲击起爆过程的细节。

现有的研究都是针对单发破片撞击炸药的情况进行研究，然而在实际战场情况下，弹药很可能会受到多发破片的撞击作用，而双破片同时撞击炸药则是其中较为典型的情况。研究炸药在双破片同时撞击下的起爆是研究多发破片撞击下装药起爆的基础，目前尚未见有这方面的研究报道。

本研究以常见的B炸药作为研究对象，采用Lee-Tarver点火增长模型，研究双破片同时撞击时炸药的冲击起爆过程。

2　数值模拟

对于破片撞击带壳装药的起爆，通常认为当壳体较薄时是冲击起爆机制，当壳体较厚时是冲击起爆和剪切起爆两种机制并存。由于本研究中的装药壳体较薄，所以采用冲击起爆机制进行研究。数值模拟包括两部分：第一部分是根据文献中的实验进行数值模拟，以检验采用冲击起爆机制的准确性，同时也验证Lee-Tarver点火增长模型和参数的精度；第二部分是在第一部分的基础上进行双破片同时撞击B炸药的数值模拟，探讨B炸药在双破片同时撞击下的响应规律。

*　**收稿日期**：2010-06-07；**修回日期**：2010-10-26

作者简介：贾宪振(1982—)，男，博士，助理研究员，主要从事混合炸药性能评估研究. E-mail：jiaxz1027@yahoo.com.cn

2.1 单发破片撞击炸药的数值模拟

为了验证模拟方法和模拟参数的准确性，对文献[7]中的钨珠撞击带壳 B 炸药的实验进行数值模拟。在该实验中，钨珠的直径分别为 9、14、18 和 25 mm，B 炸药的密度为 1.63 g/cm^3，装药呈薄饼形，直径为 25 cm，高度为 5 cm，装药上、下端面均覆盖一层钽壳，壳体厚度为 3.65 mm。实验中，采用两级自动轻气炮发射钨珠，使钨珠以一定的速度从炸药轴向中心处撞击被试炸药。

按照上述实验参数，采用 LS-DYNA 程序进行数值模拟，炸药的冲击响应采用 Lee-Tarver 三项式点火增长模型描述，即

$$\frac{\partial F}{\partial t}=I(1-F)^b\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1-a\right)^x+G_1(1-F)^cF^dp^y+G_2(1-F)^eF^fp^z$$

式中：F 是反应率，I、G_1、G_2、a、b、c、d、e、f、x、y 和 z 是计算时须输入的参数。对于 B 炸药，$I=44\times10^6$ s^{-1}，$G_1=514\times10^{-16}$ Pa$^{-2}\cdot$s^{-1}，$a=0.01$，$c=0.2222$，$d=0.6667$，$x=4$，$y=2$，G_2、b、e、f 和 z 均为零[7]。

钨珠和壳体均采用 Grüneisen 状态方程

$$p=\frac{\rho_0C^2\mu[1+(1-\gamma_0/2)\mu-a\mu^2/2]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\dfrac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\dfrac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]}+(\gamma_0+a\mu)E$$

式中：p 为压力，ρ 为密度，ρ_0 为初始密度，$\mu=\rho/\rho_0-1$。

图 1 是直径为 18 mm 的钨珠撞击 B 炸药的有限元模型图，由于计算模型的对称性，采用 1/4 模型进行计算，在相应的对称边界施加对称边界条件。图 2 是相应的计算网格图，网格划分时，对于受到钨珠撞击作用的区域，其网格划分得较为细密，并且从撞击区域到模型边界的网格密度逐渐减小，这样既可以保证计算精度，又可以减小计算规模，从而提高了计算效率。

计算过程中，采用“升-降法”调整破片的撞击速度反复进行计算。图 3 是直径为 18 mm 的钨珠分别以 1.42 和 1.43 km/s 的速度撞击炸药时，在 13 μs 时刻装药的压力云图。由图 3 可知，在 13 μs 时刻，撞击速度为 1.42 km/s 时所对应的炸药内部的最大压力约为 2.3 GPa，炸药没有爆轰；撞击速度为 1.43 km/s时所对应的炸药内部的最大压力约为 28.4 GPa，炸药发生了爆轰。因此，在上述实验条件下，18 mm 直径的钨珠撞击时，炸药的临界起爆速度为 1.43 km/s。

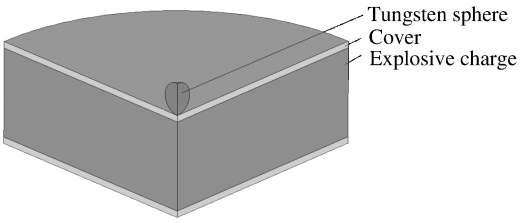


图 1 有限元计算模型

Fig. 1 Model of finite element calculation

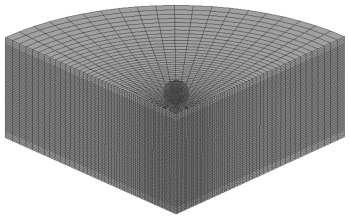
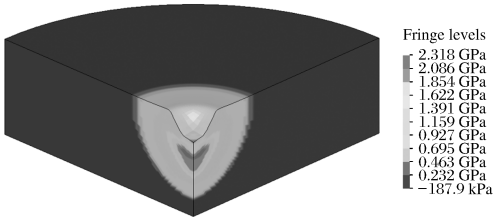
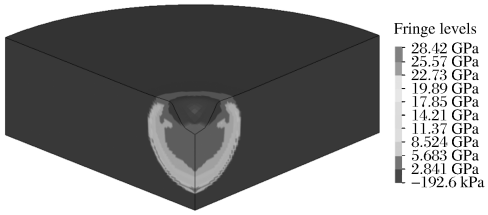


图 2 计算网格图

Fig. 2 Mesh of calculation



(a) $v=1.42$ km/s



(b) $v=1.43$ km/s

图 3 13 μs 时刻的压力云图

Fig. 3 Pressure contour at 13 μs

图 4 是文献[7]的实验结果与本研究计算结果的对比，结果表明，计算结果与实验结果吻合良好，计算得到的临界起爆速度均落在实验得到的炸药起爆速度范围内，说明采用冲击起爆机制是合理的，模拟中的计算参数也是准确可靠的，可以用于研究双破片同时撞击时炸药的起爆。

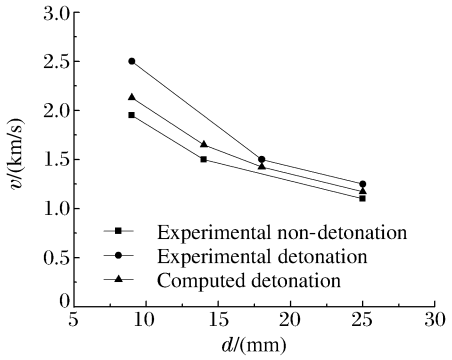
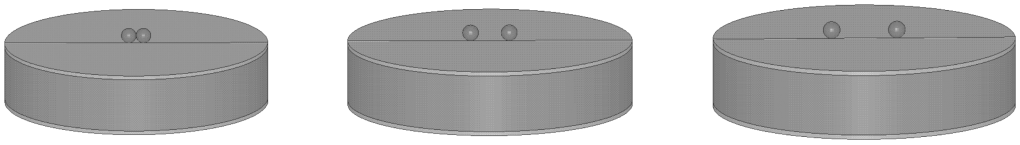


图 4 计算结果与实验结果的对比

Fig. 4 Comparison of calculation and experiment

2.2 双破片同时撞击炸药的数值模拟

在双破片同时撞击的条件下，如果双破片之间的距离较近，则破片撞击导致的装药内部的压力波发生叠加，使得压力增高，必然导致炸药在较低撞击速度下发生起爆，而且破片的引爆阈值速度受破片之间距离的影响。为了研究这种规律，本研究进行了一系列数值模拟。模拟中，装药模型仍然采用文献[7]中实验的装药参数，选取 3 种钨珠直径(9、14 和 18 mm)，两颗钨珠以一定速度从装药端面与装药正撞击，两颗钨珠与装药的撞击点和装药壳体被撞的端面中心点在同一直线上，且两个撞击点到端面中心点的距离相等。由于此时问题具有轴对称特征，所以采用 1/2 模型进行计算。作为示意，图 5 给出了双 14 mm 直径的钨珠破片撞击炸药的模型，钨珠之间的距离 D 分别为 0、2 和 4 cm，D 取为双破片相距最近的两点之间的距离。



(a) $D=0$ (b) $D=2$ cm (c) $D=4$ cm

图 5 两颗直径为 14 mm 的钨珠同时撞击炸药的计算模型图

Fig. 5 Calculation model of two tungsten spheres of 14 mm diameter impacting the charge synchronously

计算得到的两颗钨珠同时撞击情况下引爆炸药的阈值速度示于图 6。从图 6 可看出，对于双钨珠同时撞击炸药的情形，当钨珠之间的距离为零时，其阈值速度最小；随着破片之间距离的增大，引爆炸药的阈值速度大致呈抛物线规律增大，并逐渐趋于单发破片的引爆阈值速度；当钨珠之间的距离增大到某一值后，阈值速度等于单发钨珠的阈值速度，此时已经不存在双破片的压力叠加效应。根据图 7 中的计算结果，当钨珠直径分别为 9、14 和 18 mm 时，两颗钨珠间距为零时的引爆阈值速度均比单颗钨珠的引爆阈值速度小 22%左右，说明两颗钨珠撞击时的引爆阈值速度比单钨珠撞击时的减小幅度与钨珠直径无关。

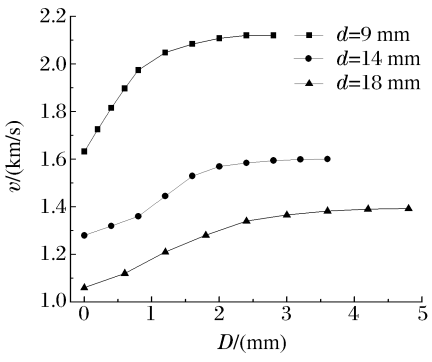
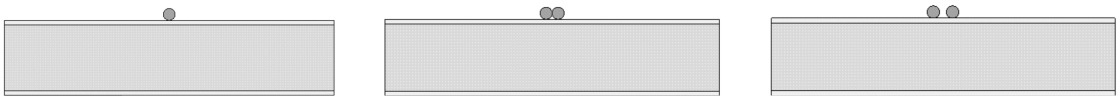


图 6 双破片同时撞击时的引爆阈值速度

Fig. 6 Critical velocity of two fragments impacting synchronously

为了分析不同撞击情况下装药内部的压力变化，设计了 3 种撞击情形(如图 7 所示)：第 1 种是单个钨珠沿着装药中轴线撞击；第 2 种是两颗钨珠相互紧挨以中轴线为对称轴撞击；第 3 种是两颗钨珠间距为 1 cm，以中轴线为对称轴撞击。钨珠的直径均为 9 mm，撞击速度均为 1.6 km/s。在装药中轴线上自上而下等间距地选取 6 个点，这 6 个点到壳体的距离分别为 0.15、0.35、0.55、0.75、0.95 和 1.15 cm，

图 8给出了峰值压力随装药到壳体的距离 d_s 的变化曲线，峰值压力的变化表示了装药内部压力的空间分布。可见在不同撞击条件下，炸药内部峰值压力的变化规律不同。在单颗钨珠撞击下，峰值压力随着到撞击点距离的增加呈指数规律减小；而在两颗钨珠紧挨的撞击作用下，峰值压力的衰减要慢得多；而当两颗钨珠的间距增大之后，峰值压力的衰减变快。图 9 给出了距离壳体 0.15 和 0.55 cm 两点处的压力时程曲线，不难看出，两颗钨珠撞击时装药内部固定位置处的压力衰减较慢，随着钨珠间距的增大，压力的衰减速度加快。



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

图 7 计算中的不同工况横截面图

Fig. 7 Cross section of different calculation cases

计算结果表明，当双破片间距较小时，破片在阈值速度或速度更高时撞击炸药所引发的爆轰波均为球面波，说明此时炸药的起爆中心只有一个。随着双破片之间距离的增大，破片以阈值速度或略大的速度撞击炸药所引发的爆轰波形不再是球面波，而是导致装药内部出现复杂的爆轰波形，如“V”型、“W”型或者更为复杂的形状，但是当撞击速度更高时又变为球面波。图 10 是钨珠直径为 9 mm、钨珠间距为 1.8 cm 时的爆轰波形，此时阈值速度为 2.094 km/s，可见破片以阈值速度撞击时，爆轰波形大致为“V”形；当速度为 2.095 km/s 时，截面上的爆轰波呈现“W”型；而当速度为 2.1 km/s 时，截面上的爆轰波为球面波。图 11 给出了钨珠直径为 9 mm、钨珠间距为 2.0 cm 时的爆轰波形。由图 11 可见，速度为 2.108 km/s 时，爆轰波形为“WV”形，当速度为 2.11 km/s 时，截面上的爆轰波呈现“W”型，而当速度为 2.12 km/s 时，截面上的爆轰波为球面波。由此可知，两颗破片的撞击速度对爆轰波形的影响很大，撞击速度略高于阈值速度时，爆轰波呈现出复杂的形状。从图 10 和图 11 还可以看出，破片撞击速度的小幅增大会导致炸药的点火起爆时间明显提前，爆轰的点火增长速度加快，说明在临界起爆条件附近，炸药的点火增长对撞击速度的变化很敏感。

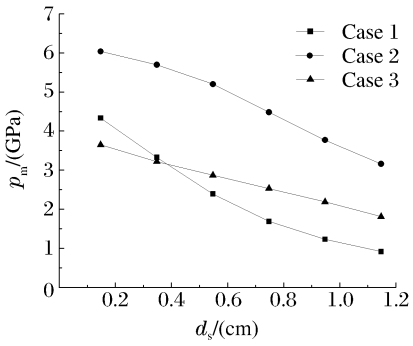
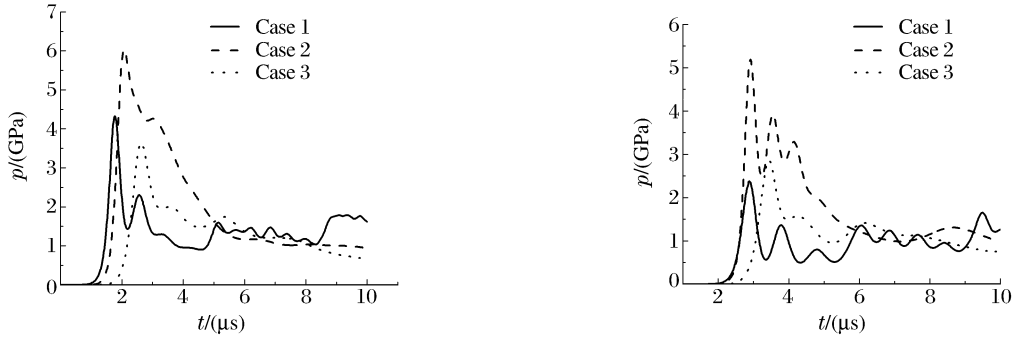


图 8 不同撞击条件下装药内部的峰值压力

Fig. 8 Maximal pressure in the charge under different cases

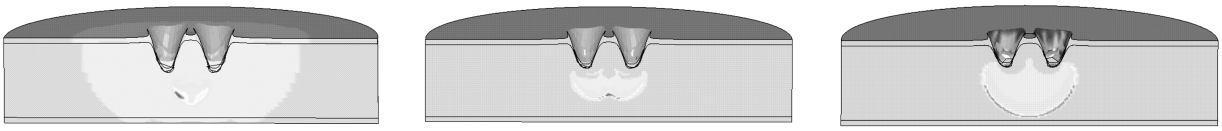


(a) 0.15 cm from the shell (b) 0.55 cm from the shell

图 9 装药内部的压力时程曲线

Fig. 9 Pressure history in the charge

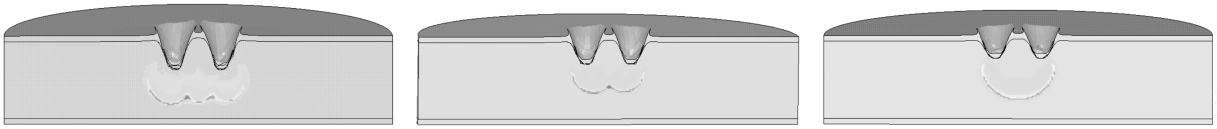
导致爆轰波出现复杂波形的原因在于：两颗钨珠同时撞击装药时，在装药中持续形成压力波，压力波在炸药内叠加，造成压力升高，此后继续传播并和后续的压力波再次叠加，形成了更高的压力，这种压力就可能导致炸药点火，而最初发生压力波叠加的位置也可能由于压力的持续作用导致炸药点火，造成装药中出现两个或两个以上的点火中心，从而形成“W”和“WV”等复杂形状的爆轰波。因此，出现复杂爆轰波的本质是，双破片同时撞击导致装药内部出现了压力波的互相叠加和相互作用，从而形成了复杂的压力场。



(a) v=2.094 km/s, t=17.4 μs　　(b) v=2.095 km/s, t=15 μs　　(c) v=2.1 m/s, t=13.2 μs

图 10　钨珠直径 9 mm、两颗钨珠间距为 1.8 cm 时的爆轰波形

Fig. 10　Detonation wave shape of two fragments with diameter of 9 mm impact 1.8 cm apart



(a) v=2.108 km/s, t=16.4 μs　　(b) v=2.11 km/s, t=13.2 μs　　(c) v=2.12 km/s, t=11 μs

图 11　钨珠直径 9 mm、两颗钨珠间距为 2.0 cm 时的爆轰波形

Fig. 11　Detonation wave shape of two fragments with diameter of 9 mm impact 2.0 cm apart

3　结　论

通过对计算结果的分析，得到以下主要结论。

(1) 双破片同时撞击炸药时，导致炸药点火的阈值速度明显降低，双破片距离为零时的阈值速度最低，并且比单发破片阈值速度的降低幅度与钨珠直径无关。

(2) 双破片同时撞击炸药的引爆阈值速度与破片之间的距离有关，引爆阈值速度随着破片间距的增大而大致呈抛物线规律增大，当距离超过一定值时，引爆阈值速度等于单发破片的阈值速度。

(3) 在两颗破片相互紧挨的撞击作用下，装药内部的压力峰值明显增大，而且压力的衰减速度较单颗钨珠撞击时慢，随着两颗钨珠间距的增大，装药内部相同点处的峰值压力减小，而且衰减变快。

(4) 当破片之间的距离较大时，双破片的速度在阈值速度附近撞击装药时，装药中的爆轰波可能出现不同的形态，如“V”形、“W”形、“VW”形、球面波等。而当破片之间的距离较小、或者撞击速度远高于阈值速度时，炸药内的爆轰波均为球面波。

References:

[1] Fu J H M, Cort G E. Numerical Calculation of Shock-to-Detonation from Projectile Impact, LA-8816-MS [R]. USA: Los Alamos Sci Lab, 1981.

[2] Bahl K L, Vantine H C, Weingart R C. The Shock Initiation of Bare and Covered Explosives by Projectile Impact [A]//Proceedings of the 7th Symposium (International) on Detonation [C]. Annapolis, MD, USA, 1981: 325-335.

[3] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives [J]. Phys Fluids, 1980, 23(12): 2362-2372.

[4] Chen H L, Jiang J W, Men J B. Numerical Simulation of Fragment Impacting on Charge with Aluminum Shell [J].

Chinese Journal of High Pressure Physics,2006,20(1):109-112. (in Chinese)
陈海利,蒋建伟,门建兵. 破片对带铝壳炸药的冲击起爆数值模拟研究 [J]. 高压物理学报,2006,20(1):109-112.
[5] Zhao X L,Qu M,Lu Z H. Numerical Simulation on the Impact Effect of Three Type Fragments Impacting Steel-Covered Charge [J]. Journal of Ballistics,2009,21(4):72-75. (in Chinese)
赵小笠,屈 明,路中华. 三种破片对带壳炸药冲击起爆能力的数值分析 [J]. 弹道学报,2009,21(4):72-75.
[6] Chen J K,Ching H K,Allahdadi F A. Shock-Induced Detonation of High Explosives by High Velocity Impact [J]. J Mech Mater Struc,2007,2(9):1701-1721.
[7] Murphy M J,Lee E L,Weston A M,et al. Modeling Shock Initiation in Composition B [A]//Proceedings of the 10th Detonation Symposium [C]. Boston,MA,USA,1993.
[8] Leininger L,Springer H K,Mace J,et al. Modeling Three-Dimensional Shock Initiation of PBX 9501 in ALE3D [A]//Proceedings of the MABS Conference [C]. Oslo,Norway,2008.
[9] Tarver C M,Hallquist J O,Erickson L M. Modeling Short Pulse Duration Shock Initiation of Solid Explosives [A]//Proceedings of the 8th Symposium on Detonation [C]. Albuquerque,NM,USA,1985.
[10] Zhang G R,Chen D N. The Initiation Dynamics in Condensed Explosives [M]. Beijing:National Defense Industry Press,1991:248-259. (in Chinese)
章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学 [M]. 北京:国防工业出版社,1991:248-259.
[11] Mader C L. Two-Dimensional Homogeneous and Heterogeneous Detonation Wave Propagation [A]//Proceedings of the 6th Symposium (International) on Detonation [C]. San Diego,CA,USA,1976.

Numerical Study of Explosives Initiation by Simultaneous Impact from Two Fragments

JIA Xian-Zhen,CHEN Song,YANG Jian,WANG Jian-Ling

(*Xi′an Modern Chemistry Institute*,*Xi′an* 710065,*China*)

Abstract: The explosives initiation by simultaneous impact from two fragments was simulated based on Lee-Tarver ignition and growth model by using finite element code LS-DYNA. In order to verify the simulation method and parameters,the courses that tungsten spheres with different diameters impacted tantalum covered Composition B charges were simulated,and the critical velocity to ignite Composition B was gained,which accorded well with the experimental results. The problems that two tungsten spheres with three kinds of diameters impacted Composition B charges were simulated. It can be found that the critical velocity to ignite explosives by two fragments,which was lower than one tungsten sphere condition,varied with the distance between the two fragments approximately in term of parabolic curve. When the impact velocity was equal to or slightly larger than the critical velocity,there can be different shapes of detonation wave appearing in the charge,including spherical,W-shape,V-shape,VW-shape and so on.

Key words: mechanics of explosion; shock initiation; fragment impact; critical velocity; ignition and growth model