高压物理学报

近场爆炸冲击波对屏蔽压装TNT的冲击引爆试验和仿真

陈兴旺 王金相 唐奎 陈日明 周莲 郝春杰

Experimental and Numerical Study of Shock Initiation of Covered TNT by Near-Field Shock Wave

CHEN Xingwang, WANG Jinxiang, TANG Kui, CHEN Riming, ZHOU Lian, HAO Chunjie

引用本文:
陈兴旺, 王金相, 唐奎, 等. 近场爆炸冲击波对屏蔽压装TNT的冲击引爆试验和仿真[J]. 高压物理学报, 2019, 33(1):015101. DOI: 10.11858/gywlxb.20180604
CHEN Xingwang, WANG Jinxiang, TANG Kui, et al. Experimental and Numerical Study of Shock Initiation of Covered TNT by Near-Field Shock Wave[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(1):015101. DOI: 10.11858/gywlxb.20180604

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180604

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚能装药水下爆炸冲击波载荷规律

Shockwave Characteristics of Shaped Charge Exploded Underwater

高压物理学报. 2017, 31(4): 453 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.04.014

运动装药空中爆炸冲击波特性研究

Characteristics of Air Blast Wave Field for Explosive ChargeMoving at Different Velocities

高压物理学报. 2017, 31(3): 286 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.03.010

扰流板结构参数对冲击波衰减特性影响的仿真分析

Simulation Analysis of Influence of Spoiler Structural Parameters on Shock Wave Attenuation Characteristics

高压物理学报. 2018, 32(2): 025202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170585

破片式战斗部破片与冲击波相遇位置研究

Meeting Location of Fragment and Shock Wave from Blast Fragmentation Warhead

高压物理学报. 2018, 32(6): 065101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180591

串联战斗部不同介质组合的隔爆能力

Explosive Interruption of Tandem Warhead with Different Multilayer Structures

高压物理学报. 2019, 33(1): 1 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180585

以HMX为基的两种压装高密度炸药的燃烧转爆轰实验研究

Experimental Study on Deflagration-to-Detonation Transition in Two Pressed High-Density Explosives

高压物理学报. 2009, 23(6): 441 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2009.06.007

DOI: 10.11858/gywlxb.20180604

近场爆炸冲击波对屏蔽压装 TNT 的冲击引爆试验和仿真

陈兴旺[1], 王金相[1], 唐 奎[1], 陈日明[2], 周 莲[2], 郝春杰[3]

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094;
2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072;
3. 晋西工业集团, 山西 太原 030027)

摘要: 为研究近场强冲击波对屏蔽装药的冲击引爆效应, 通过试验和 LS-DYNA3D 非线性有限元计算程序对屏蔽压装 TNT 的冲击引爆进行研究, 得到了接触爆炸时压装 TNT 被引爆的临界屏蔽板厚度和非接触爆炸时屏蔽压装 TNT 的殉爆距离, 分析了非接触爆炸时屏蔽板厚度对殉爆距离的影响, 并通过非线性最小二乘法拟合得到屏蔽板厚度与殉爆距离的函数关系。结果表明: 数值计算结果与试验结果基本一致; 接触爆炸时临界起爆的屏蔽板厚度在 20～23 mm 之间; 屏蔽板采用 3 mm 厚的 45 钢时, 非接触爆炸作用下压装 TNT 的殉爆距离在 12～15 mm 之间; 非接触爆炸时殉爆距离随着屏蔽板厚度的增加而减小, 当无屏蔽板时, 压装 TNT 的殉爆距离为 79 mm, 当屏蔽板厚度从 1 mm 加大到 9 mm 时, 殉爆距离从 51 mm 减为 1.5 mm, 被发装药的屏蔽板对冲击波有显著的防护作用。

关键词: 屏蔽装药; 冲击引爆; 近场冲击波; 殉爆距离

中图分类号: O383.1 **文献标识码:** A

屏蔽装药结构在外界强载荷作用下的安全性对于武器弹药研制具有重要意义。冲击波和高速破片是战场环境中两种最常见的威胁, 研究含装药结构在上述外界能量作用下的冲击引爆机理和毁伤效应可为含装药弹药的安全性设计提供依据[1-2]。目前很多学者对破片或破片群对屏蔽装药结构的冲击引爆开展了研究[3-6]。对于炸药的冲击引爆, Walker 等[7]以热起爆理论为基础, 推导出著名的非均相炸药的起爆判据 $p^2t=C$(其中 p 为炸药界面的冲击压力, t 为压力持续作用时间, C 是与炸药有关的参数), 此判据为不敏感弹药的冲击引爆研究提供了理论基础。Lu 等[8]对裸装 PBXN-109 炸药殉爆试验进行了数值仿真, 研究了爆炸冲击波对裸露炸药的冲击引爆作用。王晨等[9]对壳装固黑铝炸药殉爆试验进行了数值仿真, 分析了主发装药壳体厚度对殉爆距离的影响。然而, 作为弹药不敏感研究的重要方面, 屏蔽装药结构在超近场强冲击波作用下的响应研究却鲜见报道, 因此有必要开展爆炸冲击波对屏蔽装药的冲击引爆研究, 从而为弹药安全性设计提供指导。

本研究以压装 TNT 为例, 屏蔽板采用 45 钢, 通过试验和数值模拟方法开展接触和非接触爆炸两种情况下压装 TNT 在近场爆炸冲击波作用下的冲击引爆效应研究, 重点分析屏蔽板厚度和起爆距离对冲击引爆的影响, 以期确定临界起爆条件。

* 收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-08-23
基金项目: 国家自然科学基金(11672138)
作者简介: 陈兴旺(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事屏蔽装药结构安全性研究.
E-mail: m18851199809@163.com
通信作者: 王金相(1978—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事爆炸与冲击动力学研究.
E-mail: wjx@njust.edu.cn

1　近场爆炸冲击波对屏蔽装药冲击引爆的数值模拟

1.1　计算模拟

采用非线性有限元计算程序 LS-DYNA 对屏蔽装药的冲击引爆进行数值模拟。如图 1 所示，有限元计算模型包括：主发装药、屏蔽板、被发装药、见证板和空气域，具体模型尺寸与试验对应。为简化计算模型，不考虑雷管、PPR 套筒和传爆药。由于试验装置为轴对称结构，为减少计算量，采用 1/4 模型进行计算。数值计算采用 ALE（Arbitrary Lagrange-Euler）算法，主发装药和空气域采用 Euler 网格，屏蔽板和被发装药采用 Lagrange 网格，屏蔽板与被发装药以及被发装药与见证板之间的接触均采用滑移接触，以便观察被发装药的起爆过程和见证板的变形。起爆点设置在主发装药表面中心点处。

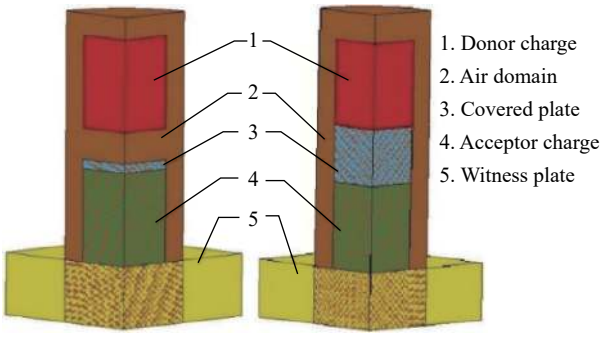


图 1　屏蔽装药冲击引爆数值计算模型图

Fig. 1　Numerical calculation model of covered charge explosive detonation

1.2　材料模型

空气域采用无偏应力动力模型（Null）和 Linear Polynomial 状态方程[10]。主发装药采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 本构模型和 JWL 状态方程，JWL 状态方程如下

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 V}\right)\mathrm{e}^{-R_1 V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 V}\right)\mathrm{e}^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \tag{1}$$

式中：p 为反应物的压力，V 为反应物的比容，E 为单位体积炸药内能，ω、A、B、R_1、R_2 为表征炸药特性的常数。屏蔽板和见证板材料模型均采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程，屏蔽板和主发装药的具体材料参数如表 1 所示，其中：ρ_0 为密度；D 为爆速；p_{CJ} 为 CJ 压力；G 为剪切模量；A_1、B_1、C_1、m、n 为材料常数，分别为材料的初始屈服应力、应变强化系数、应变速率强化系数、温度软化系数、应变强化指数；T_{r} 为常温，T_{m} 为材料的熔化温度。

表 1　主发炸药和屏蔽板的材料模型参数[11-13]

Table 1　Parameters for donor charge and shell model[11-13]

Material	ρ_0/(g·cm^{-3})	D/(m·s^{-1})	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E/(10^9 J·m^{-3})
TNT	1.60	6 812	18.56	370	3.23	4.15	0.95	0.3	7
Material	ρ_0/(g·cm^{-3})	G/GPa	A_1/GPa	B_1/GPa	C_1	n	m	T_{m}/K	T_{r}/K
45 steel	7.85	82.3	0.507	0.320	0.280	0.064	1.06	1 765	298
Q235 steel	7.83	80.0	0.235	0.250	0.022	1.000	0.36	1 793	294

被发装药采用点火增长反应模型，该模型可以反映受冲击炸药内部的爆轰发展过程，具体形式为

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} = I(1-\lambda)^b\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1-a\right)^x + G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z \tag{2}$$

式中：λ 为反应度，即已反应炸药量与炸药总量的比值，它在模拟爆轰过程中控制着炸药化学能的释放；I、G_1、G_2、a、b、c、d、e、g、x、y 和 z 为材料参数，具体取值如表 2 所示。（2）式等号右侧第 1 项代表部

表 2　TNT 点火增长反应模型参数[13]

Table 2　Ignition and growth reactive flow model parameters for TNT[13]

I/μs^{-1}	G_1/(Pa^{-3}·s^{-1})	G_2/(Pa^{-3}·s^{-1})	a	b	c	d	e	g	x	y	z
8×10^8	4.20×10^{-25}	2.60×10^{-25}	0.111	0.667	0.667	0.667	0.333	1	6	3	3

分炸药在冲击压缩下被点火, 第 2 项代表热点的增长, 第 3 项代表主要反应后相对缓慢的扩散控制反应。

2　屏蔽装药冲击引爆试验

本工作主要研究近场强冲击波对屏蔽装药的冲击引爆效应, 并获得接触爆炸时压装 TNT 的临界屏蔽板厚度和非接触爆炸时屏蔽压装 TNT 的殉爆距离。为避免大量试验, 依据仿真结果和初步理论计算[14]设计了 3 发接触爆炸试验和 4 发非接触爆炸试验。

2.1　试验方案

图 2 为接触爆炸屏蔽装药冲击引爆实物照片。共进行 7 发屏蔽装药冲击引爆试验。其中, 接触爆炸试验 3 发: 试验装置由雷管、传爆药、主发装药、45 钢屏蔽板、被发装药和见证板组成; 主发装药和被发装药均为柱形压装 TNT, 且尺寸相同, 直径为 35 mm, 高度为 30 mm; 传爆药为柱形聚黑-14, 其密度为 1.136 g/cm^3, 直径为 20 mm, 厚度为 5 mm, 放置在主发装药的正上方; 主发装药与 45 钢屏蔽板直接接触, 屏蔽板厚度分别为 20、23、26 mm; 见证板为 Q235 钢, 厚度为 20 mm。非接触爆炸试验 4 发: 试验装置比接触爆炸试验装置多一个 PPR 套筒, 用来隔离主发装药与 45 钢屏蔽板; PPR 套筒内径 33.7 mm, 外径 40.0 mm, 高度分别为 10、12、15、19 mm; 屏蔽板厚度均为 3 mm。

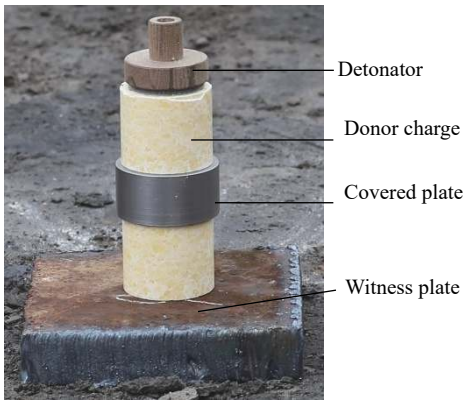


图 2　屏蔽装药冲击引爆实物照片

Fig. 2　Photo of shock initiation of covered charge

接触爆炸试验中,首先由雷管起爆传爆药, 进而起爆主发装药, 主发装药爆炸产生的冲击波直接经 45 钢屏蔽板衰减后作用于被发装药; 在非接触屏蔽装药冲击引爆试验中, 主发装药爆炸产生的冲击波分别经过空气和 45 钢屏蔽板衰减后作用于压装 TNT。

通过改变屏蔽板厚度 d 和 PPR 套筒高度 h, 使冲击波以不同幅值冲击引爆被发装药; 根据见证板的变形情况和高速摄像的记录过程, 判断被发装药的引爆情况。

2.2　试验结果

以非接触爆炸为例, 通过高速摄影记录被发装药的起爆和熄爆过程。图 3 和图 4 分别是套筒高度 h 为 10 和 15 mm 时不同时刻起爆装置的高速摄影照片。对比图 3 和图 4 发现, 主发装药 TNT 爆炸后, 图 3(a) 和图 4(a) 中装置上端均产生亮光。图 3 中, 被发装药爆炸后, 屏蔽板下面的被发装药有新的亮光产生, 且爆炸后产生的冲击波和爆轰产物将地面黑色尘土颗粒掀起。图 4 中, 被发装药未爆炸, 屏蔽板下面的被发炸药没有产生新的亮光, 爆轰剧烈程度相对较小。

(a) t=312.5 μs　　(b) t=1 250 μs

图 3　套筒高度为 10 mm 时不同时刻起爆装置的高速摄影照片

Fig. 3　High speed camera photos of experimental setup with 10 mm PPR sleeve at different time

(a) t=312.5 μs　　(b) t=1 250 μs

图 4　套筒高度为 15 mm 时不同时刻起爆装置的高速摄影照片

Fig. 4　High speed camera photos of experimental setup with 15 mm PPR sleeve at different time

图 5 和图 6 分别显示了接触和非接触爆炸后被发装药的见证板变形情况。对比图 5 和图 6 发现：当被发装药爆炸后，试验后无剩余的 TNT 炸药粉末，见证板被炸出凹坑，坑深为 4.2 mm，凹坑直径为 40 mm，与炸药直径基本相同；当被发装药未起爆，试验后见证板上遗留大量的白色粉末，没有发生任何变形。

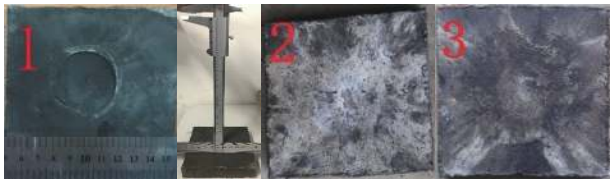


图 5　接触爆炸试验后被发装药的见证板变形

Fig. 5　Deformation of the witness plates under the acceptor with contact explosion

图 6　非接触爆炸试验后被发装药的见证板变形

Fig. 6　Deformation of the witness plates under the acceptor with non-contact explosion

表 3 列出了屏蔽装药冲击引爆试验结果。接触爆炸试验中：当屏蔽板厚度 d=20 mm 时，被发炸药完全爆轰；当屏蔽板厚度 d 为 23 和 26 mm 时，炸药未爆炸。因此，压装 TNT 的临界屏蔽板厚度在 20～23 mm 之间。非接触爆炸试验中，PPR 套筒高度为主发装药和 45 钢屏蔽板之间的垂直距离。当套筒高度 h=10 mm 时，被发炸药完全爆炸；h=12 mm 时，见证板的坑深较浅，且残留炸药粉末，被发炸药仅部分爆炸；h=15 mm 和 h=19 mm 时，炸药未爆炸。由此得到，屏蔽板厚度 d=3 mm 的压装 TNT 装药的临界起爆距离在 12～15 mm 之间。

表 3　屏蔽装药冲击引爆试验结果

Table 3　Results of shock initiation of covered charge

Explosion type	Test No.	d/mm	h/mm	Explosion situation of acceptor charge	Pit depth/mm
Contact explosion	1	20		Exploded	4.22
	2	26		Unexploded	0
	3	23		Unexploded	0
Non-contact explosion	4	3	10	Exploded	4.20
	5	3	19	Unexploded	0
	6	3	15	Unexploded	0
	7	3	12	Part of the explosion	2.20

3　分析与讨论

3.1　仿真结果的有效性

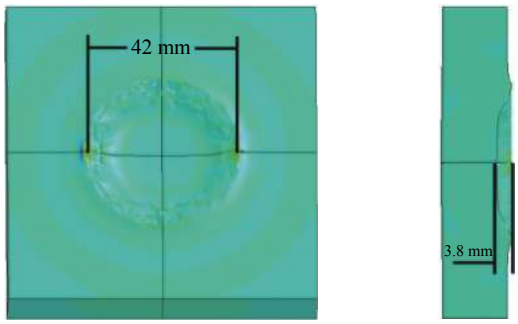
为了验证数值模拟的有效性，对临界屏蔽板厚度、临界起爆距离、见证板变形情况的试验结果和数值模拟结果进行对比，如表 4 所示。可见，在接触爆炸试验中，压装 TNT 临界起爆的屏蔽板厚度在 20～23 mm 之间，仿真计算结果为 24.0 mm，数值模拟结果与试验结果的相对误差不超过 16.7%。当屏蔽板采用 3 mm 厚的 45 钢时，在非接触爆炸作用下压装 TNT 殉爆距离的试验结果在 12～15 mm 之间，数值计算结果为 13.0 mm，相对误差不超过 15.4%。数值计算结果与试验结果基本一致。

表 4　屏蔽装药冲击引爆试验和仿真计算结果

Table 4　Test and simulation results of shock initiation of covered charge

Explosion type	Test results		Simulation results	
	d/mm	Explosion situation	*d*/mm	Explosion situation
Contact explosion	20	Exploded	24.0	Exploded
	23	Unexploded	24.5	Unexploded
Explosion type	Test results		Simulation results	
	h/mm	Explosion situation	*h*/mm	Explosion situation
Non-contact explosion	12	Partial explosion	13.0	Exploded
	15	Unexploded	13.5	Unexploded

图 7 显示了 *h*=10 mm 时被发装药爆炸后数值模拟的见证板变形情况。被发装药爆炸后，数值计算得到的 Q235 钢见证板的坑深为 3.80 mm，凹坑直径为 42.0 mm，而试验所得坑深为 4.20 mm，直径为 40.0 mm。数值模拟结果与试验结果的相对误差不超过 9.52%，二者基本一致。



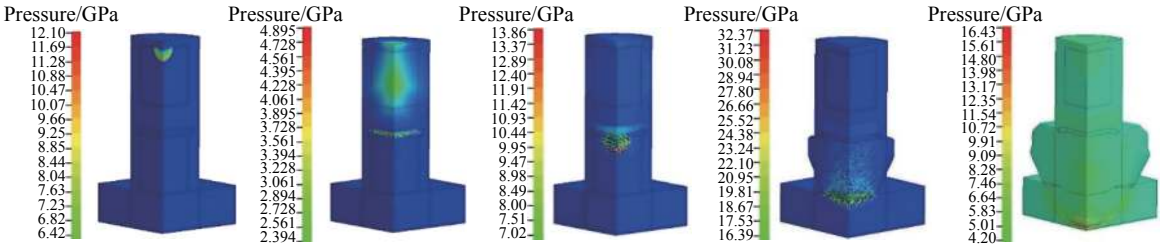
(a) Top view　　(b) Cross section

图 7　被发装药爆炸后见证板变形的数值模拟结果

Fig. 7　Numerical simulation results of witness plate deformation

3.2　屏蔽装药冲击起爆过程分析

为研究被发装药的冲击起爆过程，以非接触爆炸为例分析被发装药的爆轰成长过程和熄爆过程。图 8 为数值计算得到的 *h*=13.0 mm 时炸药不同时刻的变形图。由图 8 可见：*t*=8 μs 时，主发炸药爆炸产生的冲击波刚好传到被发炸药上表面；*t*=11 μs 时，被发装药爆炸，爆轰波由上向下传播；16 μs 以后，炸药完全起爆，见证板有明显的凹坑。图 9 显示了 *h*=13.5 mm 时炸药不同时刻的变形情况。由图 9 可见：*t*=12 μs 时，冲击波已传入被发装药一段时间，但是由于冲击波压力较小，并未引爆被发装药，冲击波继续由上向下传播；当 *t*=16 μs 以后，冲击波从非反射界面流出，被发装药仍未爆炸，只是由于爆轰产物膨胀和屏蔽板压缩发生了一定的变形，且见证板也未出现任何变化。

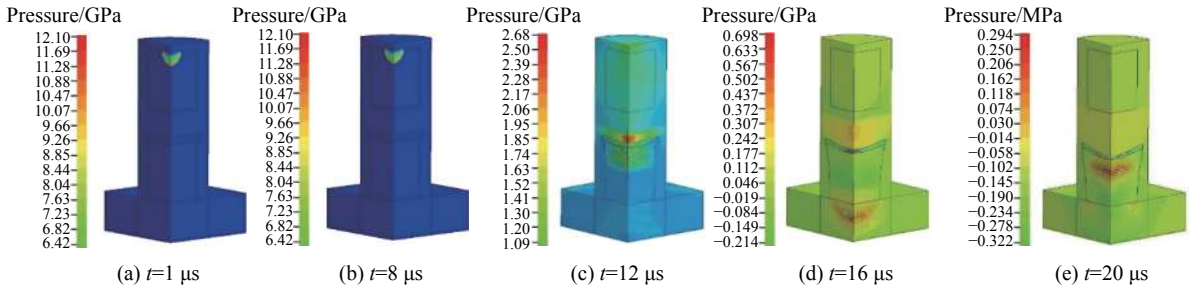


(a) *t*=1 μs　(b) *t*=8 μs　(c) *t*=11 μs　(d) *t*=12 μs　(e) *t*=16 μs

图 8　13.0 mm 距离下炸药不同时刻的变形

Fig. 8　Calculated pressure contours at various time for the configuration with 13 mm separation

图 10 和图 11 显示 *h* 分别为 13.0 和 13.5 mm 时被发装药的爆轰成长过程和熄爆过程，图中 *A*～*K* 为被发装药的不同位置。对比图 10 和图 11 发现：*h*=13.0 mm 时，被发装药表面所受冲击波压力达到 2.1 GPa 后，炸药开始反应，压力瞬间升高，最高压力达到 9.8 GPa 左右；随着爆轰的成长，在距离炸药表面 22 mm 处，最大压力达到 18 GPa，并在以后的距离下基本保持稳定，达到稳定爆轰状态。当 *h*=13.5 mm 时，被发装药在受到峰值压力为 1.8 GPa 的冲击波作用时，未发生任何反应，在侧向和轴向稀疏波的共同作用下，随着传播深度的增加，压力逐渐衰减，被发装药未爆炸。



(a) t=1 μs　(b) t=8 μs　(c) t=12 μs　(d) t=16 μs　(e) t=20 μs

图 9　13.5 mm 距离下炸药不同时刻的变形

Fig. 9　Calculated pressure contours at various times for the configuration with 13.5 mm separation

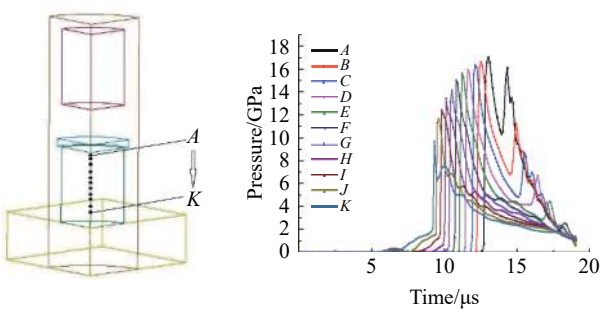


图 10　13.0 mm 间隔高度下被发装药的爆轰成长过程

Fig. 10　Detonation development process with spacing distance of 13.0 mm

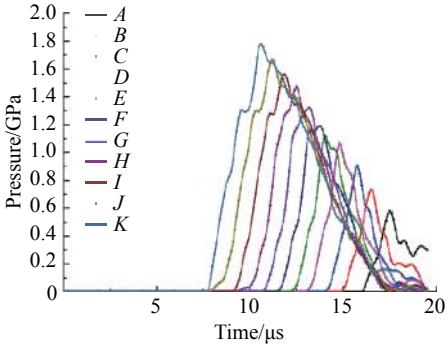


图 11　13.5 mm 间隔高度下被发装药的熄爆过程

Fig. 11　Extinguished process with spacing distance of 13.5 mm

对于不敏感炸药 TNT，主要是由于爆轰产物的冲击使被发装药产生热点，从而导致爆炸或爆轰。因此，采用炸药临界起爆压力判据，得到压装 TNT 炸药的临界起爆压力约为 2.1 GPa，爆轰成长距离约为 22 mm。

3.3　不同屏蔽板厚度对屏蔽装药冲击引爆的影响

屏蔽板厚度对被发装药的冲击起爆起着关键作用。图 12 为屏蔽装药冲击引爆示意图。主发炸药爆炸后在空气中产生冲击波，冲击波经过一段距离的传播到达屏蔽板，在空气与屏蔽板的接触面上发生反射和透射，由于空气的波阻抗小于屏蔽板的波阻抗，因此在空气中反射冲击波，并在屏蔽板内透射冲击波。当屏蔽板中的冲击波传播到屏蔽板与被发炸药界面处时，由于被发炸药的波阻抗远小于屏蔽板的波阻抗，在屏蔽板与被发炸药界面处冲击波产生卸载反射，向屏蔽板反射稀疏波，而向被发炸药透射冲击波。对于远场爆炸，通过空气冲击波峰值超压的经验公式，求得冲击波到达屏蔽板界面的冲击波参数；再利用冲击波前后质量守恒、动量守恒和连续条件，可求得进入被发装药的冲击波压力和质点速度；最后，根据炸药临界起爆压力判据，判断被发装药是否起爆[14]。对于近场爆炸，由于主发装药与屏蔽板的距离太小，爆轰产物的影响不可忽略，目前尚无成熟理论和经验公式对冲击波衰减

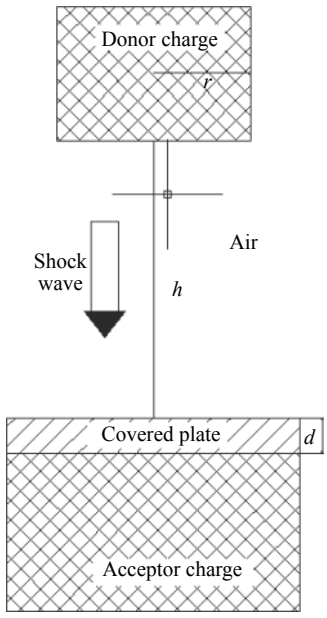


图 12　屏蔽装药冲击起爆示意

Fig. 12　Shock initiation of covered charge

后到达屏蔽板界面的冲击波参数进行求解, 因此无法通过理论计算得到进入炸药的冲击波压力以及屏蔽板厚度与殉爆距离之间的关系。为了分析近场非接触爆炸时屏蔽板厚度对殉爆距离的影响, 本研究结合试验数据, 通过非线性最小二乘法拟合得到二者的关系, 具体形式如下

$$(d+a)^m(h+b)^n = C \tag{3}$$

式中: d 为屏蔽板厚度(mm), h 为殉爆距离(mm), a、b、m、n、C 为表征冲击引爆的特性参数, 通过拟合图 12 中的数据得到各参数值: a=4.45, b=1.83, m=3, n=1, C=8 033。由(3)式可知, 随着屏蔽板厚度的增大, 殉爆距离呈幂指数衰减, 拟合得到的屏蔽板厚度与殉爆距离的函数关系可以很好地描述屏蔽板的防护特性以及殉爆距离对被发装药冲击引爆的影响。如图 13 所示, 当无屏蔽板时, 压装 TNT 的殉爆距离为 79 mm; 当屏蔽板厚度从 1 mm 逐渐加大到 9 mm 时, 屏蔽压装 TNT 的殉爆距离从 51 mm 降为 1.5 m, 屏蔽板对冲击波有显著的防护作用; 屏蔽板厚度在 3 mm 以内时, 厚度加大对冲击引爆效应的影响较大, 大于 3 mm 时, 进一步增大屏蔽板厚度对提高炸药抗冲击引爆能力的影响显著变小。

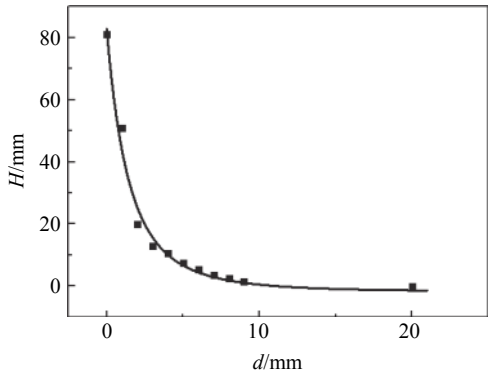


图 13　殉爆距离随屏蔽板厚度变化曲线

Fig. 13　Variation of sympathetic detonation distance with shield thickness

4　结　论

(1)对于装药尺寸为ø35 mm×30 mm 的压装 TNT, 当屏蔽板为 45 钢时: 在接触爆炸作用下, 试验和数值模拟得到的临界起爆的屏蔽板厚度为 20～23 mm 和 24 mm, 相对误差小于 16.67%; 在非接触爆炸作用下, 实验得到的殉爆距离在 12～15 mm 之间, 数值模拟得到的临界殉爆距离为 13 mm, 与试验结果的相对误差小于 15.4%。数值计算结果与试验结果基本一致, 表明采用 ALE 算法的计算模型能够有效描述屏蔽装药冲击引爆试验。

(2)本试验中, 压装 TNT 炸药的临界起爆压力约为 2.1 GPa, 爆轰成长距离约为 22 mm。

(3)非接触爆炸条件下: 殉爆距离随着屏蔽板厚度的增加而减小; 当无屏蔽板时, 压装 TNT 的殉爆距离为 79 mm; 当屏蔽板厚度从 1 mm 逐渐加大到 9 mm 时, 屏蔽压装 TNT 的殉爆距离从 51 mm 降为 1.5 mm, 屏蔽板对冲击波有显著的防护作用。

(4)通过非线性最小二乘法拟合得到屏蔽板厚度与殉爆距离的函数关系, 公式可以在一定范围内很好地描述屏蔽板的防护特性以及殉爆距离对被发装药冲击引爆的影响, 为屏蔽装药的冲击引爆试验研究和后续的可靠性研究提供一定的理论参考。

参考文献:

[1] 徐松林, 阳世清, 李玉龙. 弹药与爆炸品的安全标准体系 [J]. 安全与环境工程, 2012, 19(5): 85–89.
XU S L, YANG S Q, LI Y L. Safety standard system of ammunitions and explosives [J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(5): 85–89.

[2] ROSENBERG Z, DEKEL E. Terminal ballistics [M]. Berlin: Springer, 2012.

[3] 陈卫东, 张忠, 刘家良. 破片对屏蔽炸药冲击起爆的数值模拟和分析 [J]. 兵工学报, 2009, 30(9): 1187–1191.
CHEN W D, ZHANG Z, LIU J L. Numerical simulation and analysis of shock initiation of shielded explosive impacted by fragments [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(9): 1187–1191.

[4] 童宗保, 王金相, 彭楚才, 等. 预制破片对屏蔽炸药冲击引爆研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(7): 173–177.

TONG Z B, WANG J X, PENG C C, et al. Study on the initiation of shielded explosive impacted by prefabricated fragment [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(7): 173–177.

[5] 杨正才, 廖昕, 李晓刚, 等. 某隔板起爆器冲击起爆过程的数值模拟与实验研究 [J]. 含能材料, 2011, 19(2): 221–225.
YANG Z C, LIAO X, LI X G, et al. Numerical simulation and experimental investigation for shock initiation of bulkhead initiator [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(2): 221–225.

[6] 周杰, 何勇, 何源, 等. 含能毁伤元冲击引爆模拟战斗部试验研究 [J]. 含能材料, 2016, 24(11): 1048–1056.
ZHOU J, HE Y, HE Y, et al. Experimental study on shock initiation of simulative warhead by energetic kill element [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(11): 1048–1056.

[7] WALKER F E, WASLEY R J. Critical energy shock initiation of heteropterous explosive [C]//Explosive Pyrotechnics, 1968.

[8] LU J P, LI J, KENNEDY D L. Simulation of sympathetic reaction rests for PBXN-109 [C]//Proceedings of 13th Symposium (International) on Detonation. New York, USA, 2006: 1338–1349.

[9] 王晨, 伍俊英, 陈朗, 等. 壳装炸药殉爆实验和数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(2): 152–158.
WANG C, WU J Y, CHEN L, et al. Experiments and numerical simulations of sympathetic detonation of explosives in shell [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(2): 152–158.

[10] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[11] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45 钢的 Johnson-Cook 失效模型 [C]//中国力学学会学术大会, 2005.

[12] 张磊. Q235 钢拉伸性能的有限元仿真与试验 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.

[13] 蒋国平. 非均质凝聚炸药二维冲击起爆实验与 Lagrange 分析研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2005.

[14] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用 (上) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.

Experimental and Numerical Study of Shock Initiation of Covered TNT by Near-Field Shock Wave

CHEN Xingwang[1], WANG Jinxiang[1], TANG Kui[1], CHEN Riming[2], ZHOU Lian[2], HAO Chunjie[3]

(1. *National Key Laboratory of Transient Physics*, *Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *China*;
2. *China North Vehicle Research Institute*, *Beijing* 100072, *China*;
3. *Jinxi Industries Group Co. Ltd.*, *Taiyuan* 030027, *China*)

Abstract: In this study we analyzed the shock initiation process of covered TNT using experiments and LS-DYNA3D to study the damage effect of the near-field strong shock wave on the covered charge. We obtained the critical thickness of the covered plate for detonating TNT during contact explosion and the sympathetic detonation distance of the covered TNT during non-contact explosion and the relation between the covered plate thickness and the distance of the explosion using the non-linear least square method. The results show that the numerical simulation results accord well with the experimental results. The sympathetic detonation distance of the covered-pressed TNT in non-contact explosion ranges from 12-15 mm when the thickness of the 45 steel covered plate is 3 mm. The critical thickness of the covered plate is between 20 and 23 mm for the pressed TNT ignited by contact explosion. The sympathetic detonation distance of the non-contact explosion decreases as the covered plate thickness increases. Without a covered plate, the sympathetic detonation distance is 79 mm. When the thickness of the covered plate increases from 1 mm to 5 mm, the sympathetic detonation distance reduces from 51 mm to 1.5 mm. The thickness of the covered plate is of great importance for the protection against shock waves.

Keywords: covered charge; shock initiation; near-field shock wave; sympathetic detonation distance