

文章编号: 1006-9941(2011)03-0352-09

夹层装药的超压爆轰研究综述

张先锋, 赵晓宁

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 长期以来炸药爆轰机理得到了世界各国研究学者的关注, 炸药爆轰过程中的一些特殊现象得到了重点研究, 其中夹层装药的超压爆轰现象已成为研究热点之一。本文着重介绍了夹层装药的超压爆轰现象的国内外研究现状及其应用前景, 主要从超压爆轰现象、理论模型、数值仿真、试验观测方法及其在聚能装药、爆炸压实的应用等几个方面进行综述。重点阐述了炸药超压爆轰过程的理论模型, 并对超压爆轰作用过程的研究方法及应用进行了深入探讨与分析, 并给出了进一步开展夹层装药超压爆轰试验测试、理论模型研究工作的建议。

关键词: 爆炸力学; 夹层装药; 超压爆轰; 爆轰机理; 冲击起爆

中图分类号: TJ55; O385; TD235

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.024

1 引言

超压爆轰(overdriven detonation, ODD)是炸药在某种超出其引爆临界条件的强冲击作用下, 炸药的爆轰将不再遵循传统的 C-J 爆轰过程, 其爆轰参数(爆轰速度、爆轰压力等)远大于 C-J 爆轰, 这种特殊的爆轰过程对于炸药驱动周围介质具有较高的价值。超压爆轰现象最早由 Altshuler^[1] 在 B 炸药中观测到, 通过特殊的实验测试手段, 获取了其爆轰速度超过 2 倍的 C-J 爆速、压力达到 120 GPa 的超压爆轰状态, 超压爆轰在军事及民用领域均有广泛的应用前景, 故国外学者对超压爆轰的发生、发展及作用性能展开了深入而广泛的研究。炸药的超压爆轰过程可以由高速飞片冲击 (high-speed plate)、马赫反射 (mach reflection detonation) 及汇聚爆轰波 (pool detonation) 等方式获得^[2]。

近年来世界各地的研究小组分别开展了大量有关炸药超压爆轰的基础理论和应用技术的研究工作, 相关的报道可见于凝聚态物质冲击压缩 (shock compression of condensed matter)、国际弹道学会议 (International Symposium on Ballistics) 及国际爆轰学会议 (International

Detonation Symposium) 等。与国外学者的活跃研究相比较, 国内在炸药超压爆轰的研究上还处于起步阶段, 有部分研究工作见文献[3-6], 主要集中于超压爆轰的实验观测与一维数值计算上。国外学者针对超压爆轰的作用机理、爆轰波传播过程的实验观测、数值仿真及其应用技术进行了较为全面系统的研究。目前在此领域相对活跃的研究小组, 如日本的 Kumamoto University 的材料冲击动力学实验室, 采用了试验、理论与仿真计算相结合的方式开展研究工作, 其研究成果颇具代表性。本文着重给出了夹层装药的超压爆轰现象的国内外研究现状及其应用前景, 重点阐述了炸药超压爆轰过程的理论模型。

2 炸药超压爆轰的激励过程及产生途径

在高速冲击下, 炸药中将会产生一个强的冲击波, 该冲击波的强度高于 ZND 模型中压力峰值点 (von Neumann spike), 这种高强度的冲击过程将会引起炸药的另一种爆轰模式, 如图 1 所示。在 ZND 爆轰模型中, 炸药从初始状态 V_0 达到 Neumann 压力峰值点。对超压爆轰而言, 冲击压力达到了高压状态 (high pressure state, OS), 此时炸药开始反应, 炸药的状态沿 Hugoniot 曲线下降到超压爆轰状态 (ODD)。与炸药的 C-J 爆轰过程相比, ODD 过程可以达到较高的压力状态, 同时超压爆轰过程是一个不稳定的过程, 超压爆轰产物声速大于爆轰波传播速度, 随着爆轰波的传播超压爆轰很快会衰减到正常 C-J 爆轰状态, 其爆轰压力和速度接近于 C-J 爆轰参数^[7]。

收稿日期: 2010-10-09; 修回日期: 2011-01-19

基金项目: 南京理工大学青年学者基金项目, 国家自然科学基金项目 (10902053), 爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目 (KFJ110-6M)

作者简介: 张先锋 (1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事毁伤与防护技术及材料冲击损伤与破坏的研究工作。

e-mail: lynx@mail.njust.edu.cn

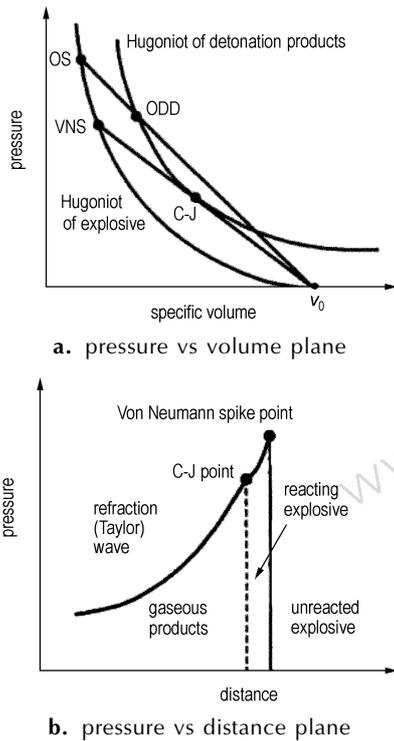


图 1 超压爆轰过程爆轰波结构^[7]
Fig. 1 Diagram of overdriven detonation structure

目前获取超压爆轰过程可以通过如下几种途径来获取:

(1) 利用高速飞片冲击炸药形成超压爆轰。当高速飞片速度大于炸药 C-J 爆轰粒子速度或冲击压力大于 C-J 爆轰压力时,由于飞片撞击初始动能较高,使炸药在很短距离或时间内的爆轰参数(爆压、爆速等)达到 C-J 爆轰状态,由于飞片速度此时仍高于炸药 C-J 爆轰粒子速度,形成超压爆轰。

(2) 利用不同爆速炸药构成的夹层装药,外侧装药采用高爆速炸药时,外侧装药优先于内侧装药爆轰,内侧装药在外侧装药爆轰产物的强冲击下形成超压爆轰。由于装药超压爆轰激励方式的特殊性,可以较长距离内保持超压爆轰状态,这种装药是近年来超压爆轰应用的主要模式,同时球面波和柱形装药的汇聚爆轰也能使炸药装药达到超压爆轰状态。

(3) 炸药爆轰过程中爆轰波之间的马赫反射产生超压爆轰。当两个爆轰波以一定角度相互作用时,可能出现非正规反射和正规反射。当碰撞条件满足非正规反射时(主要由爆轰波结构与入射角决定)产生了新的爆轰波阵面,即为马赫反射(Mach reflection)。马赫反射爆轰波压力及速度将出现突跃,使炸药产生超压爆轰。

3 炸药超压爆轰过程理论模型

试验表明对于大多数炸药而言,其爆轰过程均可以用 C-J 模型来进行描述。根据该模型的假设条件,炸药完全反应后达到一个最大压力(一般称之为 C-J 压力)然后爆轰产物开始由这个状态膨胀向外做功。对于超压爆轰过程而言,由于 C-J 理论不考虑化学反应导致其计算结果与实验相差较远。针对超压爆轰的特点,国内外学者发展了许多用于描述超压爆轰过程的理论模型。其中最为典型的几种模型如下:

3.1 改进的 γ 方程

该方程是由 Skidmore^[8] 根据炸药 C-J 爆轰理论提出的:

$$\frac{D_{C-J}}{D} = \left[\frac{p_{C-J}}{p} \left(2 - \frac{p_{C-J}}{p} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{2u_{C-J}/u}{1 + (u_{C-J}/u)^2} \quad (1)$$

式中, D 、 p 、 u 分别为爆速、压力和爆轰波阵面后的粒子速度。下标为 C-J 的变量代表炸药在 C-J 状态下的参量。该方程避免利用复杂计算 γ 值,仅需知道 C-J 参数,超压爆轰参数即可相应得出。

3.2 Lee-Tarver 方程^[9-11]

此模型用于计算炸药冲击引爆(或由于炸药失效而发生爆炸)以及爆轰波在炸药中的传播规律。该模型假设,少量炸药由于冲击加热而被点火,其反应率方程受压力及表面积所控制。

在相对低的初始压力(2~3 GPa)条件下,利用弹塑性材料模型来计算未反应炸药参数,在较高压力条件下,利用 JWL 方程来计算未反应炸药状态参数。

对未反应炸药有:

$$p_e = r_1 e^{-r_3 V_e} + r_2 e^{-r_6 V_e} + r_3 \frac{T_e}{V_e} (r_3 = \omega_e C_{vr}) \quad (2)$$

对爆轰产物有:

$$p_p = a e^{-r_{p1} V_p} + b e^{-r_{p2} V_p} + r_{p3} \frac{T_p}{V_p} \quad (3)$$

式中, V_e 、 V_p 、 T_e 、 T_p 分别为未反应炸药及反应炸药的比容及温度, r_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$)、 ω_e 、 ω_p 、 a 、 b 、 r_{p1} 、 r_{p2} 、 r_{p3} 为经验常数, C_{vr} 为未反应炸药比热。

模型利用反应比例 F 来计算爆轰产物及未反应炸药混合物的参数。当 $F=0$ 表示还未反应, $F=1$ 时表示反应完成。此时炸药比容可由下式表示:

$$V = (1 - F) V_e + V_p \quad (4)$$

炸药反应率方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1 - F)^b (\rho/\rho_0 - 1 - a)^x +$$

$$G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^g p^z (g = \omega_p C_{vp}) \quad (5)$$

式中, 第一项表示热点的形成及加热区的点火; 第二项表示热点形成后向外或向内的增长; 第三项表示炸药爆轰的快速完成。\$C_{vp}\$ 为爆轰产物比热, \$F\$ 为反应率, \$t\$ 为反应时间, \$\rho\$ 和 \$\rho_0\$ 分别为当前密度和初始密度, 其余参数均为经验系数。

3.3 Tang 方程

在 Tang^[12-13] 方程中, 炸药的爆轰初始状态仍遵循 JWL 方程, 在标准 JWL 的压力和能量方程中对 JWL 方程的指前系数 \$A\$ 进行了修正, 如下式所示:

$$\begin{aligned} p_s &= [1 + F_p(V)] A \exp(-R_1 V) + \\ & B \exp(-R_2 V) + \frac{C}{V^{\omega+1}} \\ E_s &= [1 + F_e(V)] \frac{A}{R_1} \exp(-R_1 V) + \\ & \frac{B}{R_2} \exp(-R_2 V) + \frac{C}{\omega V^\omega} \end{aligned} \quad (6)$$

式中,

$$\begin{aligned} F_p(V) &= A_0(V_{C-J} - V)^2 + B_0(V_{C-J} - V)^3 \\ F_e(V) &= \left(A_0 - \frac{3B_0}{R_1} \right) \left\{ \frac{2}{R_1^2} [1 - \exp(-R_1(V_{C-J} - V))] - \right. \\ & \left. \frac{2}{R_1}(V_{C-J} - V) + (V_{C-J} - V)^2 \right\} + B_0(V_{C-J} - V)^3 \end{aligned} \quad (7)$$

\$A_0, B_0, C\$ 为引入常数, 由试验确定。\$V_{C-J}\$ 为 C-J 状态比容, \$V\$ 是炸药冲击压缩比容, \$A, B, R_1, R_2\$ 和 \$\omega\$ 均为 JWL 状态方程参数。

3.4 JWL 与 \$\gamma\$ 联合方程

该方程由日本的 Kumamoto University 材料冲击动力学实验室的研究学者提出^[7], 通过将炸药爆轰的 JWL 方程与 \$\gamma\$ 状态方程相结合, 提出了描述炸药超压爆轰的状态方程:

$$\begin{aligned} p &= m \left[A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + \right. \\ & \left. B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \right] + (1-m) \frac{(\gamma-1)E}{V} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, \$A, B, R_1, R_2\$ 以及 \$\omega\$ 均为 JWL 状态方程参数, \$\gamma\$ 为多方指数状态方程参数。\$m\$ 是由实验确定的超压爆轰状态。当爆轰压力等于或低于 C-J 爆轰状态时, \$m=0\$ 或 \$1\$ 来分别表示选用 JWL 方程或多方指数方程计算爆轰压力。利用该方程对几种炸药超压爆轰数据进行计算的结果与已有的试验结果^[7]吻合较好。

4 夹层炸药超压爆轰作用过程的研究

由于炸药超压爆轰作用过程的特殊性(作用过程

的瞬时性及超高压等), 很难对炸药超压爆轰的作用过程进行直接观测, 很多先进技术和手段都被应用于研究炸药的超压爆轰发生、发展及其作用性能。综合国内外学者的研究成果, 炸药超压爆轰作用过程的研究可分为仿真计算、实验测试与观测两个方面来进行。

4.1 夹层超压爆轰作用过程数值仿真

以上述描述炸药超压爆轰作用过程理论模型为基础, 国内外学者开展了大量的以描述炸药超压爆轰作用过程为目的的数值仿真研究。Balu Sekar^[14] 对一维条件下的超压爆轰波传播过程的稳定性进行了数值研究, 其研究表明当过度冲击(overdrive)值大于 1.73 时, 超压爆轰作用过程相对稳定。

随着数值模拟技术发展, 许多通用的商业软件均可用于对炸药的超压爆轰作用过程进行仿真研究。Toru Hamada^[15]、LIU Zhi-yue^[16] 等利用 HEMP 计算程序(该程序是一个流体计算软件, 20 世纪 70 年代由美国人开发)进行炸药超压爆轰作用过程的数值仿真研究颇具代表性, 其研究对象包括夹层装药、夹层聚能装药及高速飞片冲击爆轰过程。图 2 分别为夹层装药及夹层聚能装药的超压爆轰过程。其研究结果可以表明: 夹层装药的作用下炸药超爆轰压力是 C-J 压力的 2.5 倍。

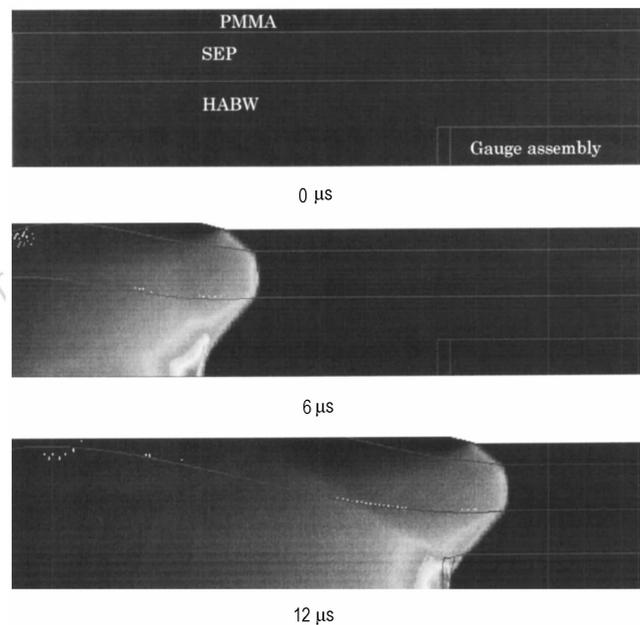


图 2 夹层装药超压爆轰过程^[15]

Fig. 2 Detonation process of double layer charge

张先锋^[17] 基于凝聚炸药冲击起爆的 Lee-Tarver 模型, 利用 AUTODYN 有限元计算软件对内层装药为

TNT ($D_{C-J} = 6930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $p_{C-J} = 21 \text{ GPa}$) 的夹层装药超压爆轰过程进行了数值模拟, 内层装药采用 Lee-Traver 模型描述炸药的冲击起爆作用过程及爆轰波的相互作用过程, 外层装药为 8701 炸药, 爆速为 $8425 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, C-J 爆轰压力为 29.5 GPa , 采用 JWL 模型描述炸药的爆轰, 图 3 为柱形装药的仿真结构图, 图 4 为普通装药及夹层装药爆轰波传播过程对比, 图 5 为装药轴线上的最大压力曲线。从计算结果可以看出: 夹层装药的内层装药形成了较为明显的超压爆轰现象, 夹层装药的爆轰波形呈喇叭型, 有利于对驱动介质做功, 爆轰压力最高可达 65 GPa , 远远大于炸药 C-J 爆轰压力, 这对提高炸药能量利用率有较大的优势。

4.2 炸药超压爆轰作用过程的实验研究

炸药超压爆轰具有作用过程瞬时、压力高等特点, 对于其作用过程参数难以用直接观测方法进行研究, 多采用间接观测的方法进行。美国学者 Louis Zernow^[18] 利用在距药柱一定距离布设传感器来获取不同条件下药柱爆轰的定向作用性能, 该传感器采用两层导电薄膜与导通击针组成, 当有爆轰产物作用时, 击针使导电薄膜导通, 提供时间信号。其实验装置如图 6 所示。时间记录传感器 (time of arrival sensor) 用于记录爆轰产物到达的时间。图 7 为环形起爆装药 (peripherally initiated) 及夹层装药 (外层装药为 LX-14、内层装药为 PETN-3) 爆轰产物速度与飞散距离的关系。夹层装药的超压爆轰过程爆轰产物速度比环形起爆高 $1350 \sim 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 明显提高了炸药定向做功能力。

对于夹层炸药超压爆轰的研究, 主要采用如图 8 所示的试验装置^[19-24], 内层装药为添加不同比例钨粉的高密度炸药 (tungsten loaded PBX)、外层装药为高爆速的 PBX NS-201 炸药。平面波发生器 (plane wave generator) 用于获取初始起爆波形。传感器 (PMMA gauge)、光纤探针 (optical fiber) 分别用于获取内层装药的爆轰压力和爆速, 表 1 及图 9 为实验测试结果。

Held^[25] 等对夹层炸药的爆轰行为进行了实验观测, 利用条纹式转镜相机分别获取了中心材料为 TNT、玻璃、巴拉托尔、HMX/粘结剂 (85/15), 外侧药柱为 TNT/HMX (15/85) 的夹层装药爆轰过程波形, 内侧药柱在外侧药柱环形包围产生爆轰时, 形成弧形收敛爆轰波, 而外侧高爆速炸药在邻近于内侧填充物界面的爆轰稍微滞后。其研究结果对该项研究后续工作具有很大的参考价值。

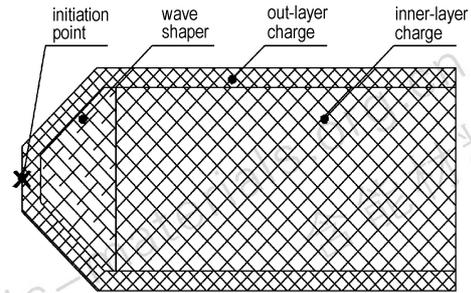
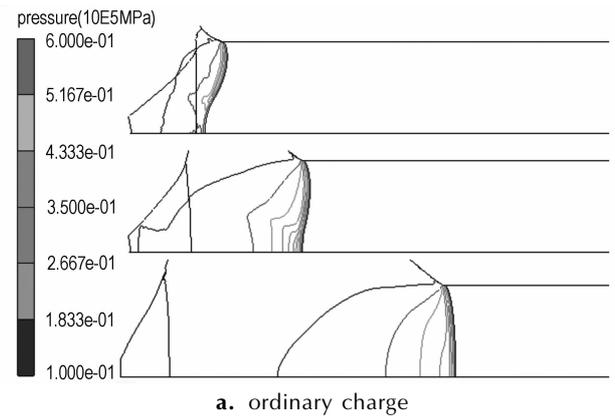
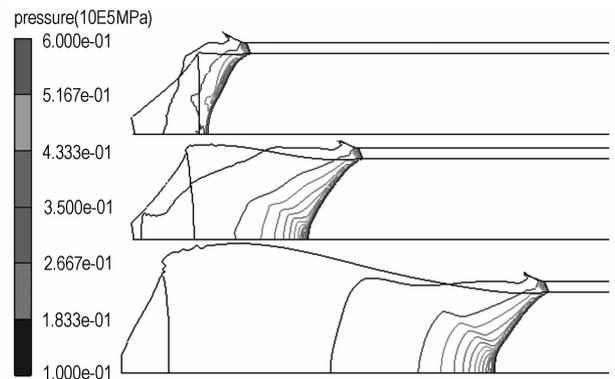


图 3 柱形夹层装药仿真模型^[17]

Fig. 3 Numerical simulation model of double-layer charge



a. ordinary charge



b. double layer charge

图 4 两种装药爆轰波形态^[17]

Fig. 4 Detonation process of double layer charge

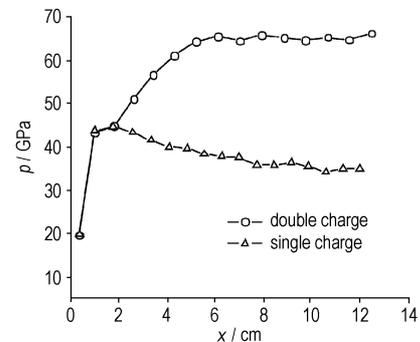


图 5 装药轴线最大压力曲线^[17]

Fig. 5 Detonation pressure of charge at axial of charge

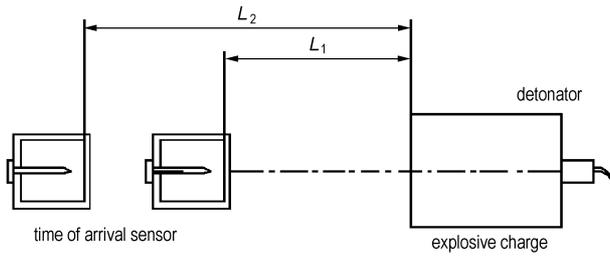


图 6 夹层装药爆轰过程间接测试实验布局^[18]
Fig. 6 Schematic of experiment set-up for first thermal-sensor observation

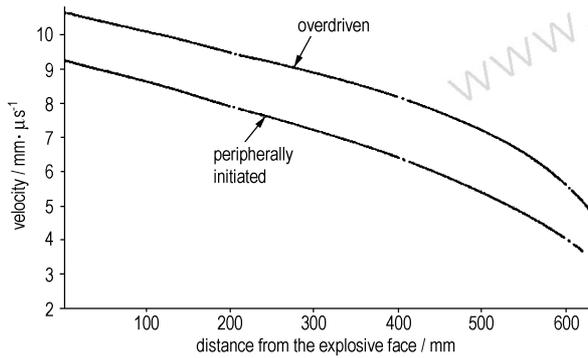


图 7 不同爆轰状态下爆轰产物速度关系^[18]
Fig. 7 Comparison of instantaneous-detonation product-front velocity for peripheral and overdriven charges

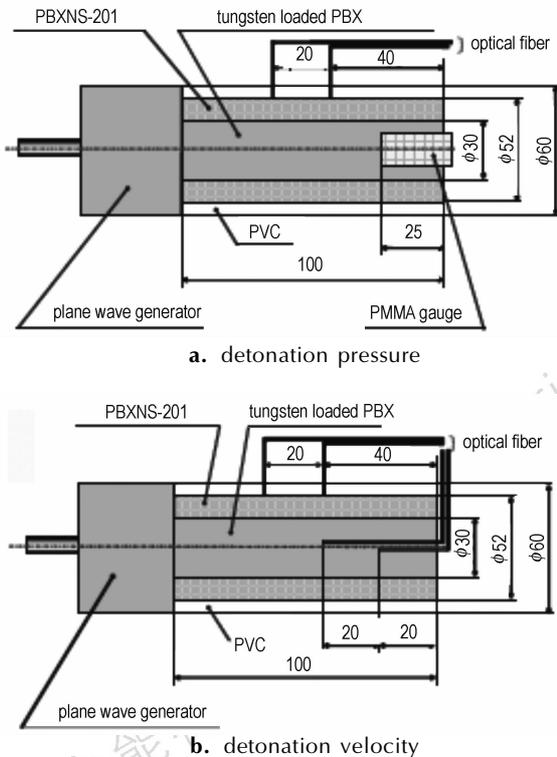


图 8 夹层装药超压爆轰参数测试装置^[19]
Fig. 8 Experimental devices to measure detonation velocity (right) and detonation pressure (left)

表 1 高密度炸药超压爆轰测试结果^[24]

Table 1 Experimental results for ODD of high density explosive

explosive	PBX NS-201	RHW2	RHW4	RHW6
component (mass percent)				
RDX	0	72	53	34
HMX	90	0	0	0
HTPB	10	8	7	6
tungsten	0	20	40	60
density/kg·m ⁻³	1700	2018	2452	3184
detonation velocity/m·s ⁻¹	8112	7252	6135	4834
detonation pressure/GPa	28.3	25.9	22.4	17.1
ODD velocity/m·s ⁻¹	8206	8197	8163	8163
ODD pressure/GPa	/	59.7	66.9	66.9

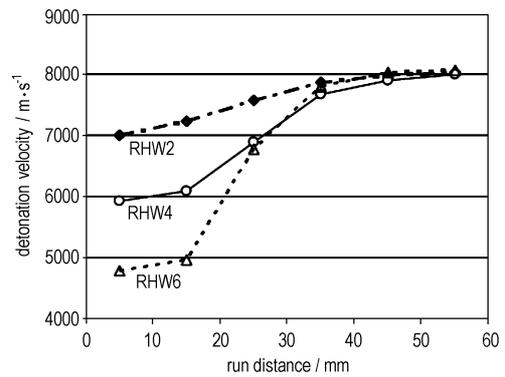


图 9 内层高密度装药超压爆轰测试结果^[24]
Fig. 9 Variation of the overdriven detonation velocity with run distance

5 炸药超压爆轰现象的应用

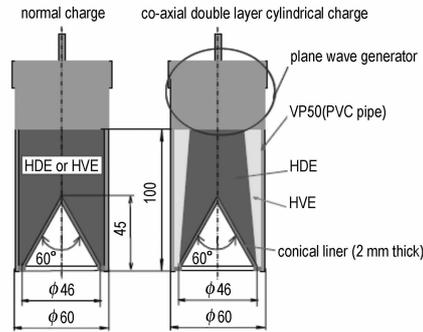
5.1 超压爆轰现象在聚能装药上的应用

超压爆轰现象在军事上最主要的应用之一是聚能装药战斗部,主要通过炸药不同的爆速和爆轰能量来实现对整个战斗部装药爆轰波形的控制,得到和药型罩匹配良好的爆轰波形,提高炸药装药做功能力和利用率,从而达到提高战斗部破甲威力和破甲稳定性的目的。夹层聚能装药形式根据内外层炸药爆速的不同分为如下两种形式^[26]:其一为内外层炸药高低爆速关系,这类装药主要用于减缓药柱爆轰时稀疏波进入爆轰产物的时间,尽可能提高炸药装药的有效能量;其二为低高爆速关系,由于外层装药爆速高于内层装药,爆轰过程中在外层炸药的激励下,内层装药的爆轰过程不再遵循传统的 C-J 爆轰过程,而形成爆轰参数(爆轰速度、爆轰压力等)远大于 C-J 爆轰的超压爆轰,同时外层装药高爆速装药的优先爆轰作用过程改变了内层装药的爆轰波形,与驱动介质(如聚能药型罩、爆炸烧蚀介质)的入射角得到了改变,从而达到提高炸

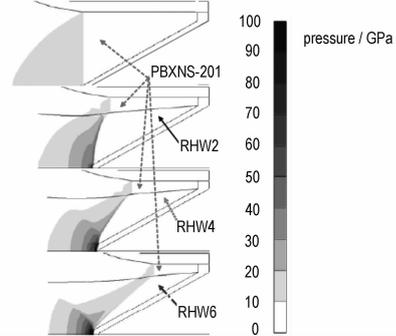
药装药对药型罩做工能力的目的。

Hisaatsu Kato 等^[27-29]对内层装药为高密度炸药的夹层聚能装药作用性能进行了验证试验研究,分别对夹层聚能装药射流头部速度、侵彻速度及侵彻性能进行了数值模拟和试验研究。如图 10 为夹层炸药仿真模型和爆轰波压垮药型罩作用过程,图 11 为夹层

聚能装药射流头部速度及侵彻速度结果。数值模拟结果表明夹层聚能装药的不但使内层装药产生超压爆轰,而且极大地改变了爆轰波对药型罩的入射角。与常规装药(normal charge)相比,夹层聚能装药射流头部速度最大提高约 30%。



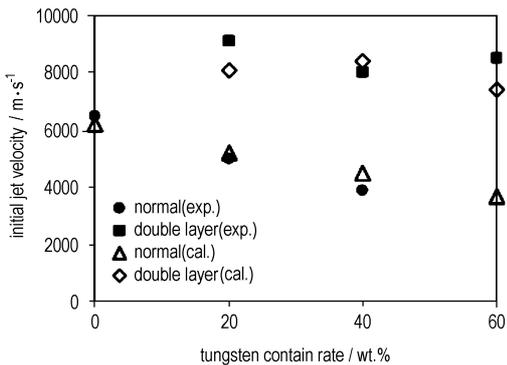
a. sample of double charges



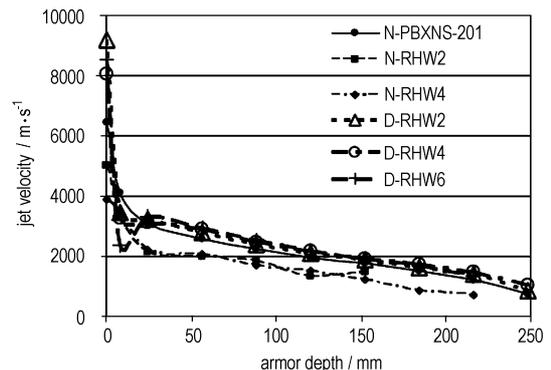
b. calculated pressure contours

图 10 夹层聚能装药示意图及数值模拟结果^[28]

Fig. 10 Schematic of double layer shaped charge and calculated pressure contours



a. initial jet velocity vs tungsten concentration



b. jet penetration velocity in target plates

图 11 夹层装药超压爆轰射流头部速度及侵彻速度^[27]

Fig. 11 Jet tip velocity and penetration to armor of double layer shaped charge

5.2 超压爆轰在爆炸烧结上的应用

粉末冶金中的爆炸粉末烧结是利用炸药爆轰产生的能量,以激波的形式作用于金属或非金属粉末,在瞬态、高温、高压下发生烧结的一种材料加工或合成的新技术,是爆炸加工领域的第三代研究对象。作为一种高能率加工的新技术,爆炸粉末烧结具有烧结时间短(一般为几十微秒左右)、作用压力大(可达 100 GPa)的特征^[30-32]。早在 20 世纪 50 年代初,人们就把爆炸压实引入到粉末冶金工艺中,直到 70 年代末,爆炸压实技术才真正引起材料科学工作者的兴趣。这种方法不需要太多设备投资,并且制取的材料压实密度大。具有经济、设备简单、容易放大产量的特点,并且便于实验样品

的回收。因此,已成为目前粉末冶金与爆炸力学的交叉科学技术研究的热点,具有非常广阔的应用前景。

常规爆炸粉末烧结方法是将待烧结材料放置于金属管内,外侧包覆一定厚度(该厚度大于炸药爆轰的临界直径)圆管炸药。在单端起爆下,圆管炸药爆轰波对管中的粉末进行压缩,通常情况下能使管内材料产生约 10~20 GPa 的压力、80%~85% 的理论密度(theoretical maximum density, TMD)。利用夹层炸药爆炸烧结方法可以获取高达 60 GPa 的压力、可达到 95% 以上的理论密度,可以满足特殊爆炸烧结情况要求^[32]。如图 12 为两种夹层装药的爆轰压力云图,图 13 为爆炸压实材料轴线压力对比结果。

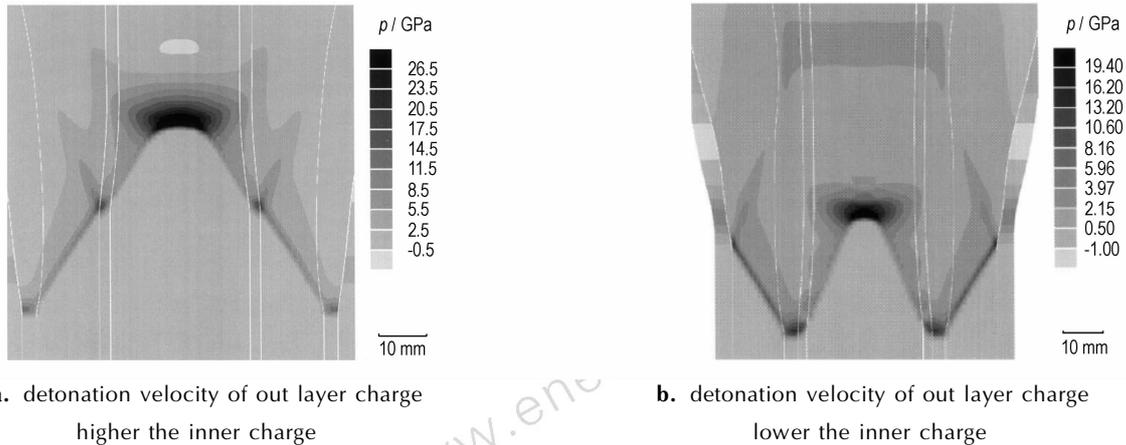
图 12 不同装药压力云图^[32]

Fig. 12 Pressure contour plot for a simulation for the double configuration

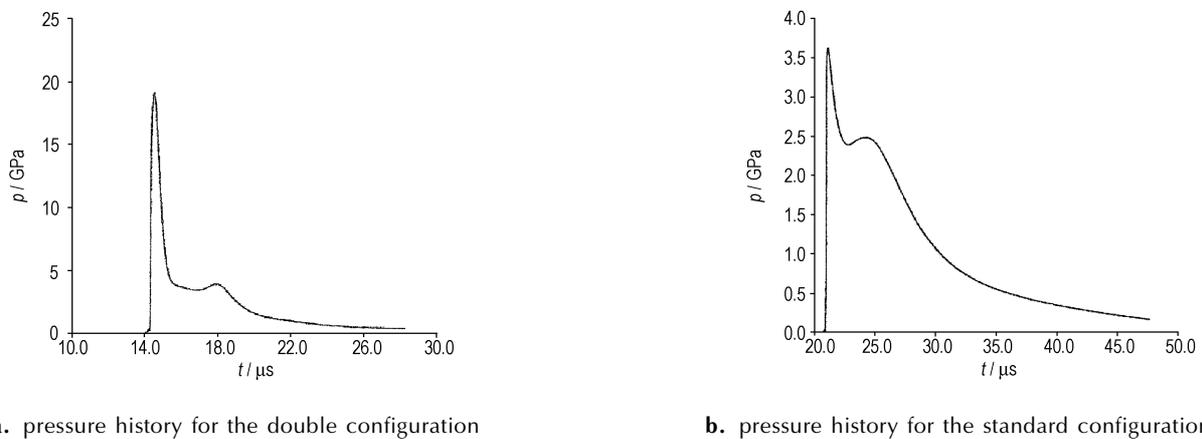
图 13 超压爆轰压缩材料压力等值线及轴线压力峰值^[32]

Fig. 13 Pressure profile along the cylinder axis

6 结 论

经过近 30 年(特别是近 5 年)国际同行的共同努力,在超压爆轰作用方式、爆轰机理及理论模型方面,已有丰富的实验、理论和数值分析的研究成果可供参考,同时也要求国内同行在进行超压爆轰及相关应用研究时,应站在前沿的起点和高度,与国际同行的工作同步,以公开发表的文献和实验测试方法、数据为基础,加强超压爆轰作用过程的实验观测与作用机理研究,进行更高层次更有创新的研究,为实现超压爆轰的工程化应用奠定理论基础。

根据对炸药超压爆轰研究现状的初步认识,我们认为近期可开展的研究工作有:

(1) 超压爆轰作用过程的实验观测。设计炸药超压爆轰试验观测与测试装置,通过采用高速纹影相机等设备,研究炸药超压爆轰作用过程的相关参数(压力、速度等),并与相同条件下常规装药爆轰参数相比

较。重点研究装药参数(密度、爆速、压力)对超压爆轰作用结果的影响。

(2) 开展炸药超压爆轰理论模型研究。综合利用炸药超压爆轰理论模型及爆轰波曲率效应、拐角效应、界面效应、直径效应等理论研究成果,建立描述夹层炸药超压爆轰作用过程理论模型,获取超压爆轰作用过程的主要特征参数。重点研究夹层装药超压爆轰波形、压力、速度等参数。

(3) 开展炸药超压爆轰作用过程数值模拟技术研究。选用合适的描述炸药超压爆轰作用过程状态方程;以已有数值计算软件为基础,开展夹层装药作用过程仿真方法研究。获取与已有实验研究相一致的仿真结果。

参考文献:

- [1] Altshuler LVe. Supercompressed detonation waves in condensed explosives[J]. *Combustion, Explosion and Shock Wave*, 1976, 10: 648-672.
- [2] Liu Z Y, Nagano S, Itoh S. Overdriven detonation phenomenon

- in high explosive[J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 1999; 227–230.
- [3] 潘昊,胡晓棉. 钝感炸药的超压爆轰与冲击起爆过程数值模拟[J]. *爆炸与冲击*,2006,26(2): 174–178.
PAN Hao, HU Xiao-mian. Numerical simulation for overdriven and shocking-to-detonation transition of insensitive high explosives[J]. *Explosive and Shock Waves*,2006,26(2): 174–178.
- [4] 孙海权,洪滔. PBX-9502 炸药超压爆轰条件下的状态方程[J]. *含能材料*,2007,15(5): 455–459.
SUN Hai-quan, HONG Tao. Equation of state for PBX-9502 in the condition of strong detonation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*,2007,15(5): 455–459.
- [5] 李银成. 强爆轰参数的理论估算[J]. *化学物理学报*,2003,16(1): 25–29.
LI Yin-cheng. The calculation of strong detonation parameters[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*,2003,16(1): 25–29.
- [6] 赵锋,孙承伟,文尚刚,等. 炸药强爆轰研究[J]. *高压物理学报*,2000,14(1): 47–53.
ZHAO Feng, SUN Cheng-wei, WEN Shang-gang, et al. Researches on strong detonation of high explosives[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*,2000,14(1): 47–53.
- [7] Liu Z Y. Overdriven detonation phenomenon and its application to ultra-high pressure generation[D]. Japan: Kumamoto University,2001. 3.
- [8] Skidmore, Hart. The equation of state of detonation products behind overdriven detonation waves in composition B [D]. White Oak, MD: Fourth Symposium on Detonation,1965.
- [9] 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: 150–154.
- [10] Murphy M J, Lee E L. Modeling shock initiation in composition B [C] // 10th Symp on Detonation, Boston, MA (United States), 1993: 965–970.
- [11] Lee E Van Thiel. Detonation products EOS: The region above chapman jouguet pressure [J]. *Shock Waves in Condensed Matter*,1984: 617–620.
- [12] Tanaka K. Detonation properties of high explosives calculated by revised kihara-hikita equation of state [C] // 8th Symposium on Detonation, Albuquerque, NM, July 15–19, 1985: 548–557.
- [13] Tang P K, Hixson R S. Modeling PBX 9501 overdriven release experiments [J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 1998: 365–368.
- [14] Balu Sekar. A numerical study of overdriven detonation waves. AIAA 99-0490 [R].
- [15] Toru Hamada, Yuichi Nakamura, Shigeru Itoh. The performance of pressure vessel using concentric double cylindrical high explosive [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2004, 126: 409–413.
- [16] Zhi-yue Liu, Shiro Kubota, Shigeru Itoh. Numerical study on hypervelocity acceleration of flyer plates by overdriven detonation of high explosive [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26: 443–452.
- [17] 张先锋,丁建宝,赵晓宁. 夹层聚能装药作用过程的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*,2009,29(6): 617–624.
ZHANG Xian-feng, DING Jian-bao, ZHAO Xiao-ning. Numerical simulation of double layer shaped charge [J]. *Explosion and Shock Waves*,2009,29(6): 617–624.
- [18] Louis Zernow. Final report on anomalous energy transfer from a detonation. ARL-CR-421 [R]. 1998. 4.
- [19] Itoh, Shigeru. Visualization of an overdriven detonation phenomenon in a high explosive [J]. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 1999, 6(4): 295–302.
- [20] Zhi-yue Liu, Katsumi Tanaka, Shigeru Itoh. A method for producing extra-high dynamic pressure due to the efficient use of high explosive [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2004, 126: 264–268.
- [21] Hamada, Toru. An investigation on overdriven detonation phenomenon in concentric double cylindrical high explosive [J]. *Explosion, Shock Wave and Hypervelocity Phenomena in Materials*, 2004: 379–384.
- [22] Otsuka M, Hida E, Morimoto H. Effective using for overdriven detonation in high explosives [C] // Claude Cavailler, Graham P Haddleton, Manfred Hugenschmidt. 25th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. SPIE, 2003, 4948: 464–469.
- [23] Liu Z Y. High-speed photographic study on overdriven detonation of high explosive [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4183: 731–738.
- [24] Stuiyinga M, Verbeek H J, Carton E P. The double explosive layer cylindrical compaction method [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 85: 115–120.
- [25] Held. Behaviour of dual composition explosive [J]. *Europyro*, 1995: 185–191.
- [26] 李福金. 夹层聚能装药的破甲试验研究与分析 [J]. *破甲技术文集*, 1987(5): 58–59.
- [27] Kato H, Kenji Murata, Shigeru Itoh, et al. Application of overdriven detonation in high density explosive to shaped charge [C] // 23th International Symposium on Ballistics. Tarragona, SPAIN 16-20 APRIL 2007: 223–230.
- [28] Kato H. Investigation of jet formation with overdriven detonation in high density explosive [J]. *Explosion, Shock Wave and Hypervelocity Phenomena In Materials*, 2008, 566: 327–332.
- [29] LIU Zhi-yue. Formation of metallic jets by utilization of overdriven detonation of high explosive [J]. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division*, 2001: 209–213.
- [30] 李晓杰,王金相,闫鸿浩. 爆炸粉末烧结机理的研究现状及其发展趋势 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(6): 566–570.
LI Xiao-jie, WANG Jin-xiang, YAN Hong-tao. The survey and development trend of the research for the mechanism of explosive consolidation of powders [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(6): 566–570.
- [31] 李晓杰,王占磊,谢兴华,等. WC/Al₂O₃ 颗粒增强 Cu 基复合材料爆炸粉末烧结实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(4): 356–360.
LI Xiao-jie, WANG Zhan-lei, XIE Xing-hua, et al. Experimental study on explosive compaction of WC/Al₂O₃/Cu powders [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 356–360.
- [32] Stuiyinga M, Verbeek H J, Carton E P. The double explosive layer cylindrical compaction method [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 85: 115–120.

Review on Overdriven Detonation of Double Layer High Explosive Charge

ZHANG Xian-feng, ZHAO Xiao-ning

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Detonation mechanism of high explosives was concerned by researchers all over the world for a long time, and lots of researches were focus on the overdriven detonation (ODD) of double layer charges. The development of ODD in double layer charge was introduced. The theoretical models, numerical simulation and testing and observation results of ODD were reviewed. The application and some experimental techniques of ODD were specially addressed. Some research proposals on experimental techniques and theoretical model are made at the end of the paper.

Key words: explosion mechanics; double layer charge; overdrive detonation; detonation mechanism; impact ignition

CLC number: TJ55; O385; TD235

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.024

读者·作者·编者

美国科学家：研制成功高效存储氢的纳米复合材料

据美国物理学家组织网近日报道,美国科学家设计出了一种新的储氢纳米复合材料,它由金属镁和聚合物组成,能在常温下快速吸收和释放氢气,这是氢气储存和氢燃料电池等领域取得的又一个重大突破。

20世纪70年代,人们开始将氢气看成化石燃料的替代品并对其寄予厚望,因为氢气燃烧后得到的副产品只有水,而其他碳氢化合物燃料燃烧后会喷射出温室气体和有害污染物。另外,同汽油相比,氢气的质量更轻,能量密度更大且来源丰富。

但氢气要想作为燃料替代汽油,就必须解决两大难题:如何安全且密集地存储,以及如何更容易获得。最近几年,科学家一直尝试解决这两个问题。他们试着将氢气“锁”在固体中;试着在更小的空间内存储更多氢气,同时让氢气的反应性很低——要让氢气这种易挥发的物质保持稳定,低反应性非常重要。然而,大多数固体只能吸收少量氢气,同时,还需要对整个系统进行极度地加热或冷却来提升其能效。

现在,美国能源部劳伦斯伯克利国家实验室的科学家设计出了一种新的纳米储氢复合材料,其由金属镁纳米离子散落在一个聚甲基丙烯酸甲酯(同树脂玻璃有关的聚合物)基质组成。新材料在常温下就能快速地吸收和释放氢气,在吸收和释放氢气的循环中,金属镁也不会氧化。

研究人员詹弗·厄本表示,这项研究表明,在设计纳米复合材料中,他们能够突破基本的热力学和动力学障碍,让物质很好地结合在一起;而且也能有效地平衡新复合材料中的聚合物和纳米金属粒子,从而为其他能源研究领域解决相关问题提供借鉴。

厄本和同事克里斯蒂安·基思洛维斯基使用美国能源部下属的国立电子显微镜中心的TEAM 0.5显微镜观察到了散落在聚合物内的单个镁纳米晶体。TEAM 0.5显微镜是全球功能最强的电子显微镜,能在0.5 Å(大约是碳原子尺寸的三分之一,也是原子尺度研究的一个关键尺寸)分辨率下直接观察和分析纳米结构。使用该显微镜,研究人员也能追踪到“瑕疵”——晶体内的不规则排序和原子空白,据此,科学家能以前所未有的精度和准确度理解新储存材料中的氢原子行为。

摘自中国经济网 http://www.ce.cn/xwzx/kj/201103/21/t20110321_22315935.shtml