

文章编号: 1006-9941(2011)06-0697-08

高密度压装炸药燃烧转爆轰研究

陈朗¹, 王飞¹, 伍俊英¹, 王晨¹, 鲁峰¹, 黄毅民², 代晓淦², 文玉史²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了给高密度炸药装药的安全性分析提供更准确的依据, 在不同约束条件下 (DDT 管长 420 mm, 壁厚分别为 10, 20 mm), 进行了 PBXC03 压装炸药燃烧转爆轰实验, 采用电离探针测量了炸药中反应波速度, 通过观测管体和反应波速度变化, 判断炸药燃烧转爆轰 (DDT) 的情况。根据高密度炸药状态, 建立了炸药燃烧转爆轰计算模型, 采用燃烧反应速率方程, 描述炸药反应过程。应用网格分离和节点随机失效方法计算高温高压炸药反应产物作用下管体的膨胀和破裂, 考虑气体产物泄漏, 压力下降对炸药反应的影响。对不同约束条件下 (DDT 管长 420 mm, 壁厚分别为 5, 10, 20, 30 mm) 炸药燃烧转爆轰过程进行了数值模拟计算。结果表明: PBXC03 压装炸药只有在强约束下 (壁厚 30 mm) 才能够发生燃烧转爆轰, 弱约束下 (壁厚 5 mm) 管体破坏引起气体泄漏和压力降低是限制炸药燃烧转爆轰的主要原因。

关键词: 爆炸力学; 炸药; 燃烧转爆轰 (DDT); 数值模拟

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.022

1 引言

燃烧转爆轰 (deflagration to detonation, DDT) 的难易程度是评价炸药安全性的重要指标之一。实际使用的炸药, 多数处于高密度状态。研究高密度炸药的燃烧转爆轰行为, 能够为炸药装药安全性分析提供更准确的依据。近十多年来, 国内外对高密度炸药燃烧转爆轰进行了大量的实验研究。Leuret 等^[1] 通过改变钢管壁厚和长度, 进行了不同约束条件下压装炸药 (密度为 $1.823 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 含 96% HMX) 的燃烧转爆轰实验。实验表明: 炸药燃烧转爆轰过程与约束条件有关, 在强约束、长钢管内才有可能发生燃烧转爆轰现象。黄毅民等^[2] 在 3, 13.5, 16 mm 三种壁厚的钢管内, 进行了 PBXC03 压装炸药 (密度为 $1.845 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 燃烧转爆轰实验。结果发现, 三种壁厚的钢管均破裂成几大块, 并剩余成块未反应的炸药。表明 PBXC03 压装炸药不容易发生燃烧转爆轰现象。文尚刚等^[3-4] 采用电探针和压力传感器测试技术, 研究了约束条件对压装炸药 (密度为 $1.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 燃烧转爆轰过程的影响。结

果发现, 在壁厚 19.8 mm、长度 600 mm 的钢管内, 炸药尾部的压力超过了 10 GPa, 整个管体破裂成很小的碎片。表明压装炸药在强约束条件才能够发生燃烧转爆轰。从已有的研究看, 国内外主要通过实验, 来研究压装炸药燃烧转爆轰性能, 结合管体碎片、压力或速度测量结果分析燃烧转爆轰的程度。但是实验测量数据有限, 不能有效给出燃烧转爆轰反应细节, 因此, 有必要同时开展数值模拟研究。

本工作采用实验和数值模拟相结合的方法, 研究约束强度对 PBXC03 压装炸药燃烧转爆轰行为的影响。采用 10 mm 和 20 mm 两种壁厚约束下的燃烧转爆轰实验, 通过观测管体变形和测量反应波速度, 判断炸药燃烧转爆轰的情况。建立了炸药燃烧转爆轰计算模型, 采用燃烧反应速率方程描述炸药反应过程。应用网格分离和节点随机失效方法描述管体膨胀和破裂。对不同约束条件下, PBXC03 压装炸药燃烧转爆轰过程进行了数值模拟计算。分析了弱约束和超强约束下炸药发生燃烧转爆轰现象的可能性。

2 燃烧转爆轰实验

DDT 管燃烧转爆轰实验是将炸药装填在细长的钢管 (称为 DDT 管) 内, 点火药放在炸药的一端, 点燃实验炸药。燃烧波在管内传播, 在一定条件下可转变为爆轰波。为了研究约束条件对燃烧转爆轰行为的影

收稿日期: 2011-10-12; 修回日期: 2011-10-31

基金项目: 国家自然科学基金-NSAF 联合基金重点项目 (10776100), 国防 973 计划项目 (61383)

作者简介: 陈朗 (1965 -), 男, 教授, 主要从事爆轰、燃烧和含能材料安全性研究。e-mail: chenlang@bit.edu.cn

响,本实验使用了 10 mm 和 20 mm 两种壁厚的钢管。图 1 是实验装置示意图。主要由三部分组成: DDT 管、点火系统和实验炸药。实验采用电点火头点燃点火药。点火药由粉末状黑火药(零点几克)和黑索今组成。实验时,在炸药一端留出长度为 20 mm 的空气间隙,用来放置点火系统。为了测量管内燃烧波或爆轰波的传播速度,在管壁上沿轴向等距离布置了 14 个探针孔,相邻探针孔的间距是 25 mm。当燃烧波或爆轰波到达探针位置时,导通电离探针,产生脉冲信号,触发记录装置,由示波器记录输出电压波形。根据不同探针输出电压信号的时间,可推算出 DDT 管不同位置处的燃烧波或爆轰波速度。

图 2 是实验装置照片。为了加强端盖的约束,分别将 1 cm 厚的钢板固定在实验装置两端,并利用螺栓紧固。将实验装置放在底部见证板上。通过观察管体破裂程度、紧固钢板和底部见证板的变形情况,判断 DDT 管内燃烧转爆轰的程度。

实验对象为 PBXC03 压装成型炸药,直径为 30 mm,长度为 400 mm,密度为 $1.845 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,达到 98.5% 理论最大密度。管体材料是 45 号钢,管长为 420 mm。端盖材料是黄铜。

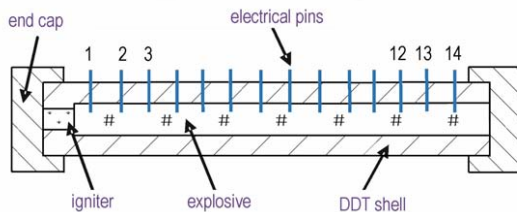


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 A diagram of the configuration

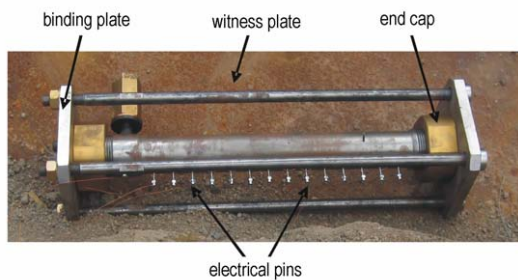


图 2 实验装置照片

Fig. 2 The experimental device photo

3 数值模拟计算

压装炸药与低密度颗粒炸药不同,它的内部孔隙

率低,不能采用气固两相流模型描述其燃烧转爆轰行为。选择合适的反应模型,是压装炸药燃烧转爆轰数值模拟的关键。反应过程中,管体在反应产物的作用下膨胀、破裂,会导致气体产物泄漏和压力降低,限制燃烧转爆轰现象的发生。因此,需要建立能够描述管体膨胀、破裂的计算模型。

本文采用燃烧反应模型^[5]描述压装炸药的燃烧行为,应用网格分离技术和节点随机失效方法^[6]描述管体膨胀、破裂的过程。对 PBXC03 压装炸药的燃烧转爆轰实验进行数值模拟,确定燃烧反应模型参数。利用确定的模型参数,对壁厚为 5 mm 的弱约束和 30 mm 的超强约束下,DDT 管内燃烧转爆轰现象的可能性进行预测分析。

3.1 计算模型

根据图 1 所示的实验装置建立计算模型。物理模型呈轴对称,建立 1/4 计算模型,见图 3。计算模型由 DDT 管、实验炸药、点火药和端盖四部分组成。实验点火药的厚度大约为 2 mm。因此建模时,在炸药上端面设置 2 mm 厚的点火区域来模拟点火药。实验时点火药附近的空气对燃烧转爆轰过程影响并不大,因此建模时忽略这部分空气。计算模型还对紧固钢板做了简化,通过在两端盖的表面设置强约束边界条件来模拟钢板的约束作用。在对称面上设置对称约束。在模型各部分之间定义点对点的自动面面接触,来实现它们之间的相互作用。

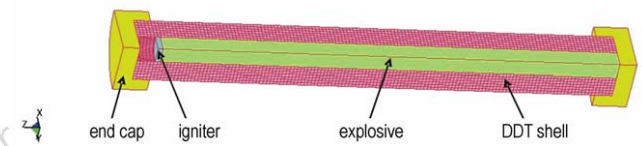


图 3 计算模型图

Fig. 3 Calculating model

计算模型中 DDT 管的长度为 420 mm,炸药柱长为 400 mm,直径为 30 mm,分别考虑管壁厚度为 5, 10, 20, 30 mm 的情况。采用三维实体单元对计算模型进行网格划分。

在燃烧转爆轰数值模拟中,描述管体膨胀、破裂的现象非常关键。计算时通常对管体应用塑性动力学材料模型,但是这种方法只能模拟管体膨胀过程,并不能很好地描述管体随机破裂的现象。本文对管体应用网格分离和节点随机失效的方法。在建立计算模型时,按照随机正态分布对管体网格设置失效应变,当网格单元在燃烧产物的压力作用下达到失效应变后,该单

元的节点就会与相邻单元的节点分离,产生裂纹。由于失效值为随机取值,因此采用这种方法描述的管体破裂具有随机性,更接近管体实际破裂过程。

3.2 材料模型

采用燃烧反应模型描述 PBXC03 压装炸药的燃烧行为。模型基于反应度和压力,能够描述压力低、速率慢的燃烧反应。基本形式是^[5]:

$$\frac{dF}{dt} = a(1 - F)^c (F + F_i)^d (p + p_i)^y + b(1 - F)^e F^g p^z \quad (1)$$

$$0 < F < F_{a \max}, F_{b \min} < F < 1$$

式中, F 是反应度; t 是时间, μs ; p 是压力, GPa ; p_i 是初始压力, GPa ; F_i 是初始反应度; a, b 分别是第一项燃烧速率系数和第二项燃烧速率系数, $\text{GPa}^{-1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; c, d, y 分别是第一项未反应度指数、反应度指数和压力指数; e, g, z 分别是第二项未反应度指数、反应度指数和压力指数。

燃烧反应模型认为反应速率与压力和表面积有关。在式(1)中, $(1 - F)^c (F + F_i)^d$ 代表反应度与表面积有关, $(p + p_i)^y$ 代表反应度与压力有关。模型包括两项燃烧反应速率方程,以反应度作为两项反应的控制开关。在第一项燃烧反应方程中,初始反应度 F_i 和初始压力 p_i 用于引发反应。指数 c, d, e, g 是常数,代表反应物几何表面积与体积的比值。对于球状颗粒炸

药来说,未反应度指数 c 和 e 通常为 0.667,反应度指数 d 和 g 为 0.366。1989 年,美国 Tao 等^[7]利用密闭爆发器测量了 HMX 基炸药的燃烧速率与反应压力。结果发现,HMX 基炸药的燃烧反应压力指数 y 和 z 均接近 1。

燃烧速率系数 a 和 b 是描述炸药燃烧行为的两个重要参数。当炸药中含有一种高能炸药组分时,仅采用第一项燃烧反应速率方程就可以描述炸药的燃烧行为。但当炸药中含有两种反应速率不同的高能炸药组分时,需要同时采用两项燃烧反应速率方程才能描述炸药的燃烧行为。1989 年,Tao 等^[7]通过研究 HMX 基炸药的燃烧过程,标定了它的燃烧速率系数为 $0.026 \text{ GPa}^{-1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。

本实验对象 PBXC03 炸药含有 HMX 和 TATB 两种高能炸药组分,它们的燃烧速率差别较大,因此模拟时需要采用两项燃烧反应速率方程。本文确定模型参数的基本思想是,第一项燃烧反应速率方程系数来源于参考文献[8]中 HMX 基炸药的燃烧反应模型系数。调节第二项燃烧速率系数 b 及两项反应的控制开关 $F_{a \max}$ 及 $F_{b \min}$,结合本实验的现象和数据确定合理的模型参数。表 1 是本文确定的 PBXC03 压装炸药的燃烧反应模型参数。

表 1 PBXC03 压装炸药的燃烧反应模型参数

Table 1 Reaction parameters in deflagration reactive flow model of PBXC03

explosive	$a/\text{GPa}^{-1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	F_i	p_i/GPa	c	d	y	$b/\text{GPa}^{-1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	e	g	z	$F_{a \max}$	$F_{b \min}$
PBXC03	0.026	0.0001	0.0001	0.667	0.366	1	0.0171	0.667	0.366	1	0.08	0.04

4 结果与讨论

4.1 燃烧转爆轰实验

通过观察管体碎片大小、紧固钢板和底部见证板的变形情况,结合反应波速度变化,判断 DDT 管内燃烧转爆轰的程度。

图 4 和图 5 是回收的实验装置照片。当壁厚为 10 mm 时,整个管体碎成十几块,并且碎片较大,大小在 6~10 cm 之间。底部见证板上有形变较小的凹坑,紧固钢板及支架完整。壁厚为 20 mm 时,管体碎片仍然较大。端盖完整,紧固钢板和支架发生较大变形,但基本保持完整。由此判断,在壁厚为 10 mm 和 20 mm 的 DDT 管内,PBXC03 压装炸药发生了强烈的反应,但还没有完全爆轰。

实验采用电离探针测量炸药中反应波速度。在壁厚为 10 mm 和 20 mm 的燃烧转爆轰实验中,DDT 管前半部分的电离探针没有可靠导通,管体后部 13、14 号探针均有导通信号。根据探针导通时间,计算反应波在这段距离内的平均传播速度。实验结果显示,壁厚为 10 mm 时,13、14 号探针之间反应波的平均传播速度为 $4300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;壁厚为 20 mm 时,这两根探针之间反应波的平均速度是 $4160 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这表明炸药在 DDT 管后部还没有发生完全爆轰。

通过观测管体和反应波速度变化,判断 PBXC03 压装炸药在长 420 mm,壁厚分别为 10 mm 和 20 mm 的 DDT 管内,均未成长为稳定爆轰,只是发展到爆燃或低强度爆轰阶段。



a. part of shell fragments



b. binding plates and bracket

图4 壁厚为10 mm时,回收的实验装置照片

Fig.4 Experimental apparatus recycled from 10 mm thick shell



a. part of shell fragments



b. binding plates and bracket

图5 壁厚为20 mm时,回收的实验装置照片

Fig.5 Experimental apparatus recycled from 20 mm thick shell

4.2 燃烧转爆轰数值模拟

通过观察管体碎片大小、紧固钢板和底部见证板的变形情况,结合反应波速度变化,判断 DDT 管内燃烧转爆轰的程度。

对 10 mm 壁厚约束下, PBXC03 压装炸药的燃烧转爆轰实验进行数值模拟。为了更好地分析炸药内部的反应细节,按照实验监测点的位置,在炸药内取了

14 个监测单元。监测单元从炸药点火端到炸药后部的编号依次为 1 至 14。通过观察管体破裂、炸药形变、炸药内部压力和反应度,来判断 DDT 管内燃烧转爆轰的情况。

图 6 是壁厚为 10 mm 时,炸药在不同时刻的变形和压力分布。点火初期,点火药燃烧时产生高温气体产物,压缩波率先形成并在炸药内传播,炸药反应的燃烧波滞后于压缩波。43.19 μs 时,在炸药点火端能明显看到燃烧波向下传播。反应提供的能量使燃烧波逐渐加速。但由于压装炸药内部孔隙率低,燃烧表面积小,因此燃烧波很难快速传播,反应主要集中在炸药前半部分。80.09 μs 时,炸药前半部分压力较大,反应产物较多。135.60 μs 时,点火端的炸药已经发生明显变形,反应产物向炸药点火端的空气区扩展。220.89 μs 时,炸药内部发生了比较剧烈的反应,反应产物向周围膨胀。

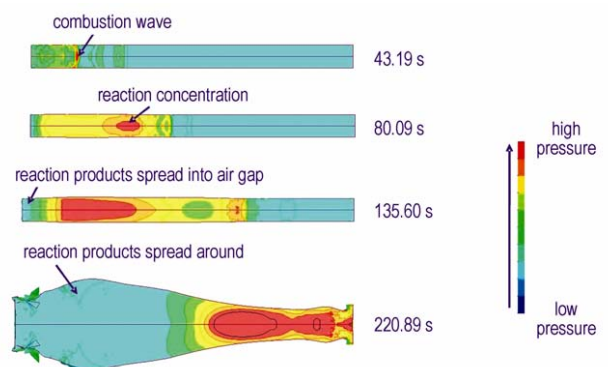


图6 壁厚为10 mm时,炸药在不同时刻的变形和等压线

Fig.6 Explosive deformations and pressure distributions at different times in 10 mm thick shell

DDT 管内的燃烧产物不容易扩散,管体在反应产物的压力作用下向外膨胀。当膨胀到一定程度后,首先在管体上随机形成小裂纹,并沿纵向扩展为大裂纹,如图 7a 所示。随着管体进一步膨胀变形,管体上开始产生横向裂纹,裂纹不断成长,形成大小不等的碎片,如图 7b 所示。端盖在反应产物的压力作用下也发生形变,220.88 μs 时上端盖被反应产物冲开。

由管体形变和炸药内部的压力分布可知,壁厚为 10 mm 时,反应主要集中在炸药前半部分。图 8 是该部分炸药内监测单元 3、4、5 的压力-时间曲线。三个监测单元的反应压力依次升高,压力峰值在 400 MPa 左右。表明在炸药前半部分已经发生了比较强烈的化学反应。

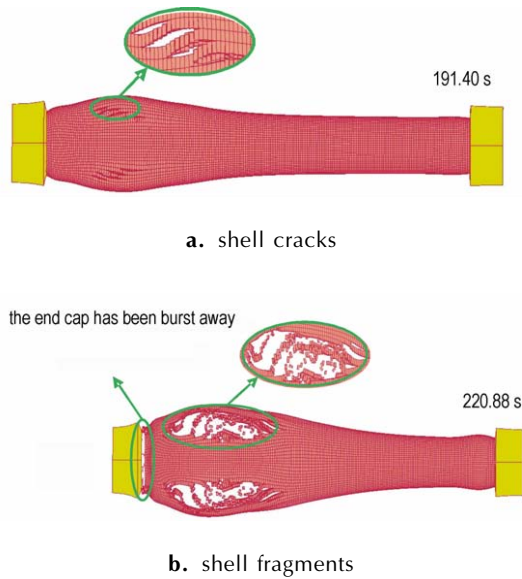


图7 管体裂纹及碎片形成

Fig.7 Shell cracks and fragments

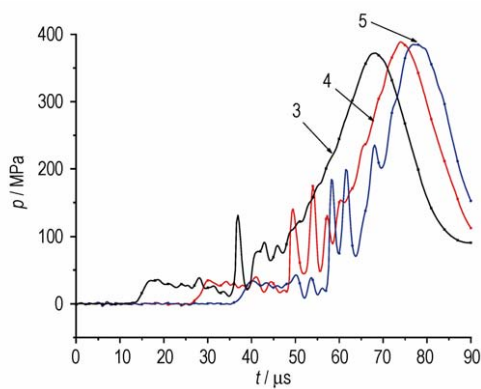


图8 壁厚为 10 mm 时,监测单元的压力-时间曲线

Fig.8 The pressure-time of different monitor elements in 10 mm thick shell

反应度是描述炸药反应情况的重要参数。为了分析不同位置炸药的反应程度,图9比较了炸药前半部分监测单元3、4、5和炸药后部监测单元12、13、14的反应度。从图9可以看出,管体破裂时,炸药前半部分的反应程度更大,反应度为25%,而炸药后部的反应度仅有14%。通常情况下,认为反应度达到5%时炸药点火。根据监测单元的反应度达到5%的时间,计算反应波在监测单元12、13和监测单元13、14之间的传播速度分别是3101, 4208 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验测得反应波在13、14号探针间的平均速度是4300 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。计算结果与实验结果的误差为2.5%。

采用同样的模型和参数,对20 mm壁厚的燃烧转爆轰实验进行数值模拟。炸药反应过程、管体破裂情况

与10 mm壁厚时相似。图10是壁厚为20 mm时,炸药监测单元3、4、5、12、13、14的反应度-时间曲线。同样认为反应度达到5%时炸药点火。根据监测单元的反应度-时间曲线,得出反应波在监测单元12、13和监测单元13、14之间的平均速度是3218, 4410 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。计算结果与实验结果的误差为5.9%,表明计算采用的模型和参数是合理的。管体破裂时炸药内部的最大反应度为43%。表明炸药的反应度随着约束条件的加强而增大。

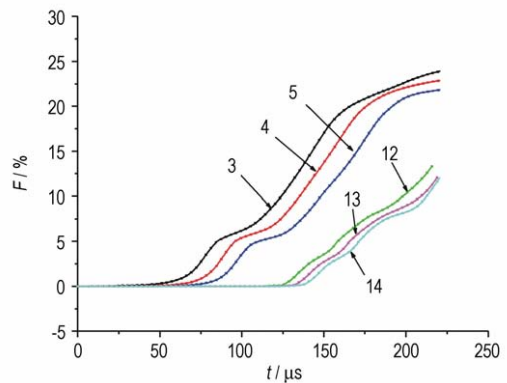


图9 壁厚为 10 mm 时,监测单元的反应度-时间曲线

Fig.9 The fraction reacted vs time of monitor elements in 10 mm thick shell

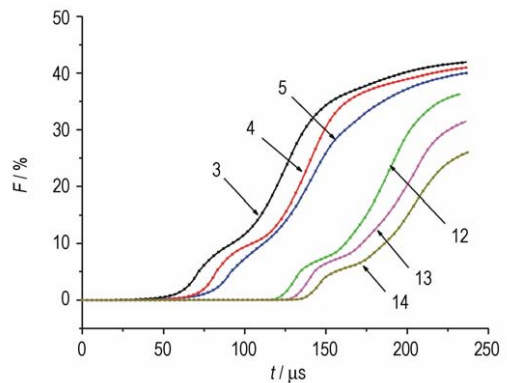


图10 壁厚为 20 mm 时,监测单元的反应度-时间曲线

Fig.10 The fraction reacted vs time of monitor elements in 20 mm thick shell

结合实验照片、实验数据和数值模拟的结果,判断在长420 mm,厚10 mm和20 mm的钢管内,炸药发生了强烈的反应,但还没有发生完全爆轰。如果将管壁进一步加厚,则有可能形成稳定爆轰。

4.3 约束条件对燃烧转爆轰的影响

为了分析约束条件对炸药燃烧转爆轰可能性的影响,采用根据实验确定的燃烧反应模型参数,对弱约束

(壁厚 5 mm) 和超强约束(壁厚 30 mm)下, PBXC03 压装炸药发生燃烧转爆轰现象的可能性进行计算分析。

图 11a 是壁厚为 5 mm 的管体变形, 图 11b 是对应时刻炸药内部的压力分布。从图中可以看出, 刚一点火, 管体就被冲开了。管体破裂位置十分靠近点火端, 在管体中后部没有任何裂纹。图 12 是炸药监测单元 3、5、7、9、11、13 的反应度-时间曲线。从曲线上可以看出, 反应区仅位于点火端附近。管体破裂时, 靠近点火端的炸药反应度仅有 4.1%, 大部分炸药还未来得及参与反应。产生这种现象是由于约束较弱, 管体破坏引起气体产物泄漏和压力降低, 限制了炸药继续反应。

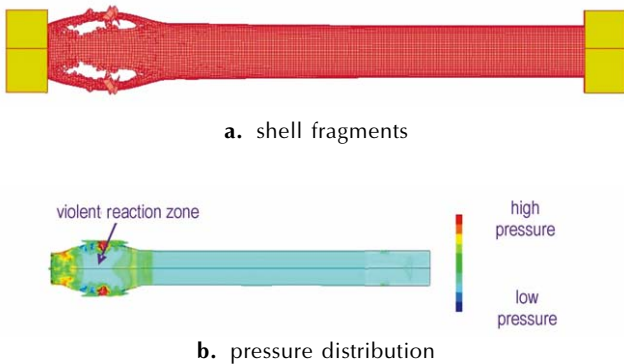


图 11 管体变形及炸药内部的等压线分布

Fig. 11 Shell fragments and pressure distribution of the explosive

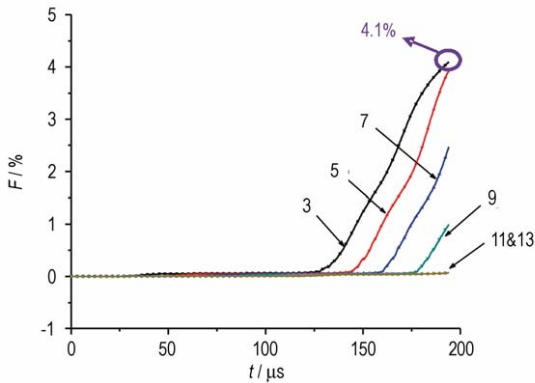


图 12 壁厚为 5 mm 时, 监测单元的反应度-时间曲线

Fig. 12 The fraction reacted vs time of monitor elements in 5 mm thick shell

图 13a 是壁厚为 30 mm 的管体变形。随着约束增强, 管体变形范围大, 管身上产生了很多小裂纹。图 13b 是对应时刻的炸药变形。计算过程中, 当炸药发生剧烈反应时, 炸药网格会产生过大变形, 表明此时炸药可能已经发生了燃烧转爆轰。

通过分析炸药内部压力波的成长和波速变化来观

察燃烧转爆轰过程。图 14 是壁厚为 30 mm 时, 炸药监测单元 3、5、7、9、11、13 的压力-时间曲线。监测单元的压力依次增大, 表明压力波向前传播时, 反应是逐渐加强的。监测单元 7 (距离点火端 175 mm) 的压力已经开始超过 1.5 GPa, 表明此时在 DDT 管中部可能已经形成了燃烧转爆轰。

图 15 是壁厚为 30 mm 时, 炸药监测单元 3、5、7、9、11、13 的反应度-时间曲线。相邻监测单元的反应度达到 5% 的时间间隔越来越短, 意味着反应波的传播速度逐渐增大。

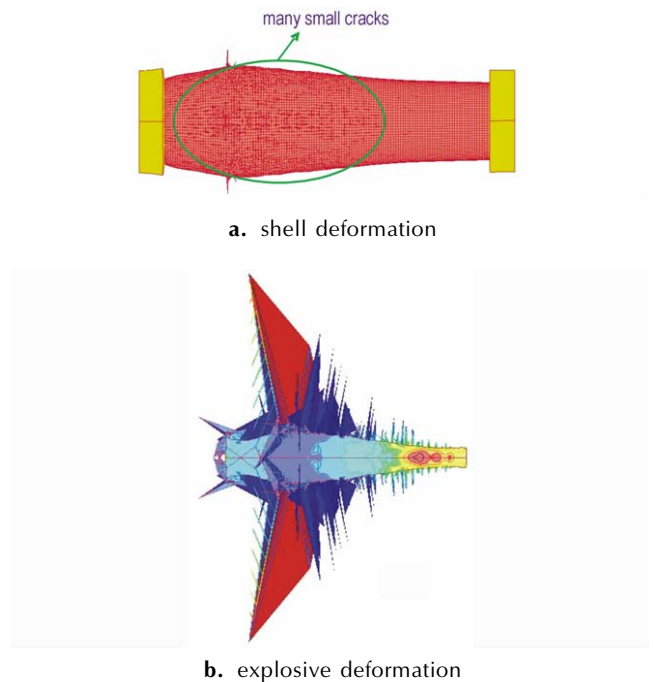


图 13 212.62 μs 时, 壁厚为 30 mm 的管体变形和炸药变形

Fig. 13 Shell deformation and explosive deformation in 30 mm thick shell at 212.62 μs

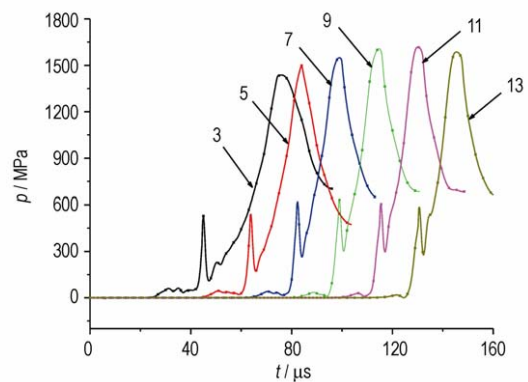


图 14 壁厚为 30 mm 时, 监测单元的压力-时间曲线

Fig. 14 The pressures-time of monitor 3, 5, 7, 9, 11, 13 in 30 mm thick shell

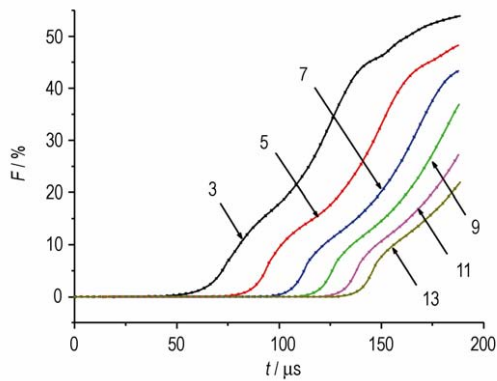


图 15 壁厚为 30 mm 时, 监测单元的反应度-时间曲线
 Fig. 15 The fraction reacted vs time of monitor elements in 30 mm thick shell

图 16 是根据反应度曲线得到的反应波速度随传播距离变化的折线。从速度折线上可以看出, 随着传播距离增加, 反应波速度逐渐提高。传播距离为 100 mm 时的波速为 $2368.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当传播距离增大到 300 mm 时, 反应波速度提高到 $6439.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当传播距离增大到 350 mm 时, 反应波速度提高到 $8426.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 接近 PBXC03 炸药的理论爆速 $8712 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表明此时炸药已基本发生了完全爆轰反应。

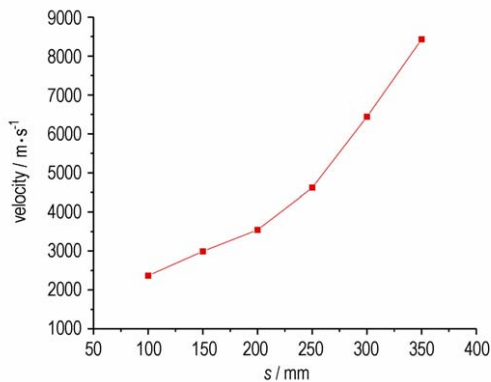


图 16 反应波速度随传播距离变化的折线
 Fig. 16 The spot line of reaction wave velocity versus spread distance

表 2 是不同约束条件下, DDT 管内炸药反应的计算结果。计算结果显示, 约束强度对压装炸药燃烧转爆轰过程的影响很大, 炸药的反应程度和燃烧转爆轰趋势随着约束强度的增加而增加。随着管壁约束逐渐增强, 炸药内部的压力和反应度逐渐增大, 反应波的速度逐渐提高, 反应也越来越剧烈。壁厚为 30 mm 时, 约束强度足够强, PBXC03 压装炸药发生了燃烧转爆轰反应。

表 2 不同约束条件下, DDT 管内炸药反应计算结果

Table 2 Calculated reaction results from different constraints

shell thickness / mm	peak pressure in explosive / MPa	fraction reacted of monitor 3 / %	wave velocity between monitor 13 and monitor 14 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	reaction results
5	175	4.1	-	ignition
10	389	25	4208 (4300 ¹⁾)	deflagration
20	518	43	4410 (4160 ¹⁾)	deflagration
30	1635	54	7518	deflagration

Note: 1) the data in the brackets were obtained by test.

5 结论

根据高密度炸药装药状态, 建立了炸药燃烧转爆轰计算模型, 对不同约束条件下炸药燃烧转爆轰过程进行了数值模拟计算。结果表明, 采用燃烧反应速率方程, 能够描述炸药反应过程。应用网格分离和节点随机失效方法可以计算管体膨胀和破裂, 从而得到气体产物泄漏对炸药反应过程的影响。计算结果显示, 炸药的反应程度和燃烧转爆轰趋势随着约束强度的增加而增加, PBXC03 高密度压装炸药只有在强约束下才能够发生燃烧转爆轰。

参考文献:

- [1] Leuret F, Chaisse F, Presles H N. Experimental study of the low velocity detonation regime during the deflagration to detonation transition in a high density explosive [C] // Proceedings of the 11th Symposium (International) on Detonation. Colorado. 1998.
- [2] 黄毅民, 冯长根, 龙新平, 等. JOB-9003 炸药燃烧转爆轰现象研究 [J]. 火炸药学报, 2002, 25(1): 54-56.
 HUANG Yi-min, FENG Chang-gen, LONG Xin-ping, et al. Deflagration to detonation transition behavior of explosive JOB-9003 [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(1): 54-56.
- [3] 王建, 文尚刚, 何智, 等. 压装高能炸药的燃烧转爆轰实验研究 [J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 25-28.
 WANG Jian, WEN Shang-gang, HE Zhi, et al. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in pressed high-density explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(5): 25-28.
- [4] 王建, 文尚刚. 以 HMX 为基的两种压装高密度炸药的燃烧转爆轰实验研究 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 441-446.
 WANG Jian, WEN Shang-gang. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in two pressed high-density explosives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(6): 441-446.
- [5] LS-DYNA Users' Manual. Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory. Version 960, 2001.
- [6] 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 Chen, WU Jun-ying, CHEN Lang, et al. Experiments and numerical simulations of sympathetic detonation of explosives in shell[J]. *Explosion and Shockwaves*, 2010, 30(2): 152–158.
- [7] Tao W C, Costantino M S, Ornellas D L. Burning rates of two cast nitramine explosives using a hybrid closed bomb-strand burner [C]// Proceedings of the Ninth Symposium (International) of Detonation. Portland. 1989.
- [8] Steven K C, Craig M T, Leroy G G, et al. On the Violence of thermal explosion in solid explosives[J]. *Combustion and Flame*, 1997, 110(1): 264–280.

Investigation of the Deflagration to Detonation Transition in Pressed High Density Explosives

CHEN Lang¹, WANG Fei¹, WU Jun-ying¹, WANG Chen¹, LU Feng¹, HUANG Yi-min², DAI Xiao-gan², WEN Yu-shi²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this work, deflagration to detonation (DDT) experiments of pressed PBXC03 with different confinements (shell length 420 mm, shell thickness 10 mm and 20 mm) were conducted. Electrical pins were used to measure reaction wave velocity in explosives. DDT intensity was estimated by observing shell fragments and analyzing velocity changes. According to the conditions of different high density explosive charge, a DDT calculating model was established. The explosive deflagration reactive flow model was adopted to describe explosive reaction process. The methods of separating elements and random invalidation stress were used to describe shell expansion and rupture. The effects of gas leakage and pressure reduction on explosive reaction were considered. DDT processes under different confinements (shell length 420 mm, shell thickness 5, 10, 20, 30 mm) were calculated. The results show that only high density PBXC03 with strong confinement (shell thickness 30 mm) may undergo DDT. Gas leakage and pressure reduction induced by weak confinement (shell thickness 5 mm) will restrict the occurrence of DDT.

Key words: explosion mechanics; explosive; deflagration to detonation (DDT); numerical simulation

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.022