

文章编号: 1001-1455(2003)06-0534-05

爆轰波拐角传播三维数值模拟*

焦清介, 魏继锋, 周 钢, 严 楠, 蔡瑞娇

(北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了研究爆轰波在拐角中的传播特性以及拐角爆轰低压流场现象, 用 LSDYNA-3D 程序对三种常见的拐角装药的爆轰波传播特性进行了数值模拟, 清晰显示了爆轰波因拐角处爆轰波传播面积的变化而产生的衰减-增长过程, 讨论了侧向三通中爆速的变化情况, 并得到了拐角处低压爆轰区的尺寸。

关键词: 爆炸力学; 拐角爆轰; 数值模拟; 爆轰波; 低压爆轰区

中图分类号: O381 国标学科代码: 130°3510 文献标志码: A

1 引 言

拐角效应是小尺寸装药爆轰波非理想传播的一个重要现象, 是爆炸逻辑网络设计中的重要理论依据。拐角装药是刚性爆炸网络中的常见元件, 主要有直角拐角、直角三通拐角、侧向三通拐角等装药结构, 如图 1 所示。对于拐角效应现象已经有了较为深入的研究, C. M. Tarver 等^[1]利用二维有限元程序 DYNA2D 对 PBX-9404 和 LX-17 爆轰波拐角绕射现象进行了数值模拟; M. Cox 等^[2]利用多狭缝扫描技术观察了 PBX-9502 炸药中的爆轰波拐角现象, 得到了炸药不爆轰区域的大小; 刘举鹏^[3]利用 2DL 程序研究了 PETN/硅橡胶炸药的爆轰波拐角效应; 李生才^[4]利用 DYNA2D 对不同角度下注装 TNT 中的爆轰波拐角现象进行了数值模拟, 并模拟了拐角处材料的变化对爆轰波拐角过程的影响。

本文中用 LSDYNA-3D 程序研究直角拐角、直角三通拐角和侧向三通拐角的爆轰波传播特性, 以揭示拐角效应的作用规律。

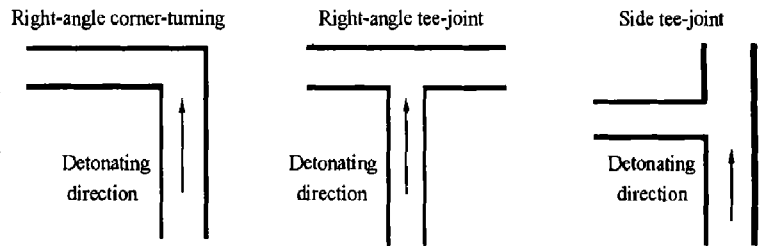


图 1 拐角装药结构图
Fig. 1 Corner-turning structures

2 计算模型

2.1 LSDYNA-3D 程序

LS-DYNA 程序是一个由 DYNA 程序发展而来的非线性动力学分析有限元程序, 可以求解各种二维和三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性问题^[5]。LSDYNA-3D 采用四、六、八节点单元进行空间离散化, 用于三维计算。其接触-碰撞算法可以处理材料交界面的缝隙和滑移, 已广泛应用于爆轰问题。

2.2 材料的本构关系

起爆炸药为 B 炸药, 其爆轰产物取高能炸药燃烧的材料模型和 JWL 状态方程^[6], 参数选取参见文献[7]; 被起爆炸药为 JO-9(C), 取流体弹塑性模型、JWL 状态方程和点火-增长反应速率方程, 参数选取参见文献[8]; 约束材料为紫铜。

* 收稿日期: 2003-08-04

作者简介: 焦清介(1958—), 男, 教授, 博士生导师。

凝聚炸药的 JWL 状态方程为

$$p_e = A_e \left[1 - \frac{\omega}{R_{1e}v} \right] e^{-R_{1e}v} + B_e \left[1 - \frac{\omega}{R_{2e}v} \right] e^{-R_{2e}v} + \frac{\omega E_e}{v} \quad (1)$$

式中： $v = v_e/v_0$ ，是相对体积； v_e 是未反应炸药的比容； v_0 是炸药初始比容； p_e 、 E_e 分别是未反应炸药的
压力、能量密度， A_e 、 B_e 、 R_{1e} 、 R_{2e} 、 ω 为常数。

炸药点火增长模型^[5]

$$dF/dt = I(1-F)^b (\rho/\rho_0 - 1 - a)^x + G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^g p^z \quad (2)$$

式中： F 是炸药反应度， t 是时间， ρ 是密度， ρ_0 是初始密度， p 是压力。 I 、 G_1 、 G_2 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 g 、 x 、 y 、 z 是常数。右边第一项代表点火项，是热点的形成及其加热区的点火；第二项是热点向剩余炸药的
低速成长；第三项是化学反应接近爆轰时，化学反应迅速完成的过程。

2.3 三种拐角的几何模型

三种结构数值模拟的物理模型如图 2 所示(盖板未列出)，沟槽均为宽度 1.4mm，深 1.0mm。

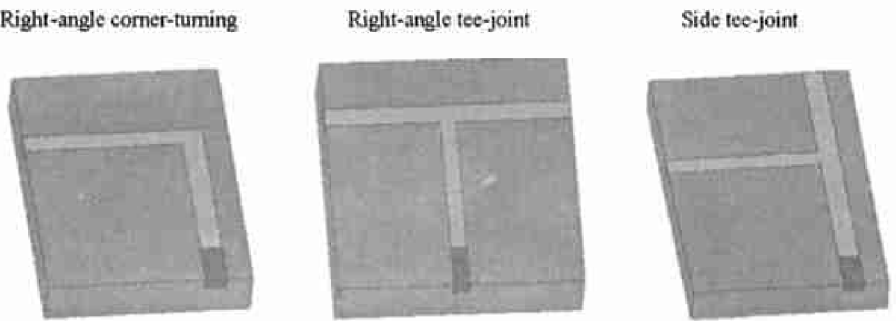


图 2 数值模拟的物理模型

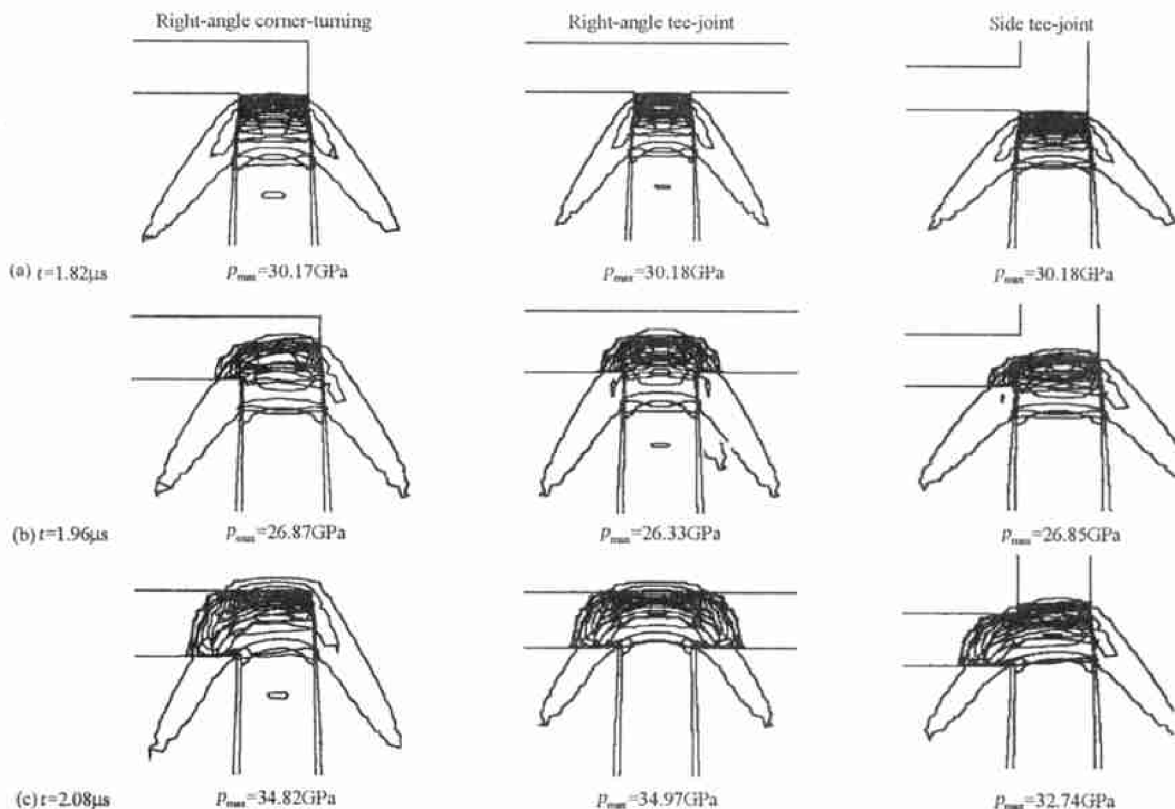
Fig.2 Physical model of numerical simulation

3 爆轰波拐角传播

3.1 爆轰波传播过程

定义起爆时刻 $t=0$ 。图 3 为不同时刻、三种拐角装药结构的爆轰波传播对比图。由图可见：

在 $t \leq 1.82\mu s$ 时间内，爆轰波从起爆端直线传播到拐角处，爆轰波面上的压力峰值处于直线装药的
中心处，数值为 30.18GPa。随后爆轰波进入拐角区，由于传播面积增大爆轰波阵面的峰值压力减小，当



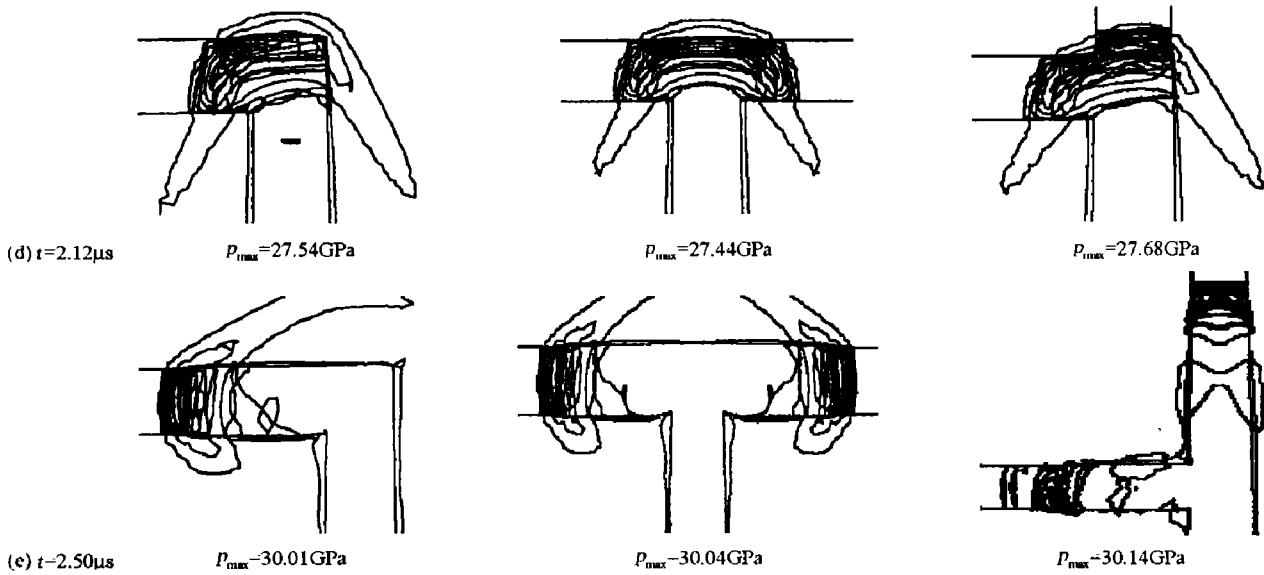


图 3 三种拐角装药结构在不同时刻的压力等值线

Fig.3 Pressure isolines of three corner-turning structures at different time

$t=1.96\mu\text{s}$ 时, 爆轰波传播到拐角的中心区域, 峰值压力已降低到正常爆压的 89% 左右, 出现了低压爆轰现象。

当 $t=2.08\mu\text{s}$ 时, 爆轰波与迎面的约束材料发生碰撞, 由于反射冲击波的作用, 使得波后局部区域压力峰值增加。对于直角拐角和对直角三通装药, 峰值压力比拐角的中心区域提高了约 30%, 对于对侧向三通装药, 由于反射作用较低, 峰值压力比拐角的中心区域提高了约 22%。

当 $t=2.12\mu\text{s}$ 时, 反射压力波的作用消失, 拐角传播的爆轰波进入到低压爆轰的压力增长阶段。当 $t=2.5\mu\text{s}$ 时, 三种拐角都从低压轰成长为正常爆轰, 峰值压力恢复到拐弯前状态, 爆轰波完成拐角传播的过程。

3.2 爆轰波传播压力场分析

为了进一步研究拐角区域低压爆轰的变化规律, 以侧向三通装药结构为例, 选取特征单元分析压力变化的历程。拐角装药结构尺寸和特征单元如图 4 所示, 每个单元格为 $0.2\text{mm}\times 0.2\text{mm}$ 。

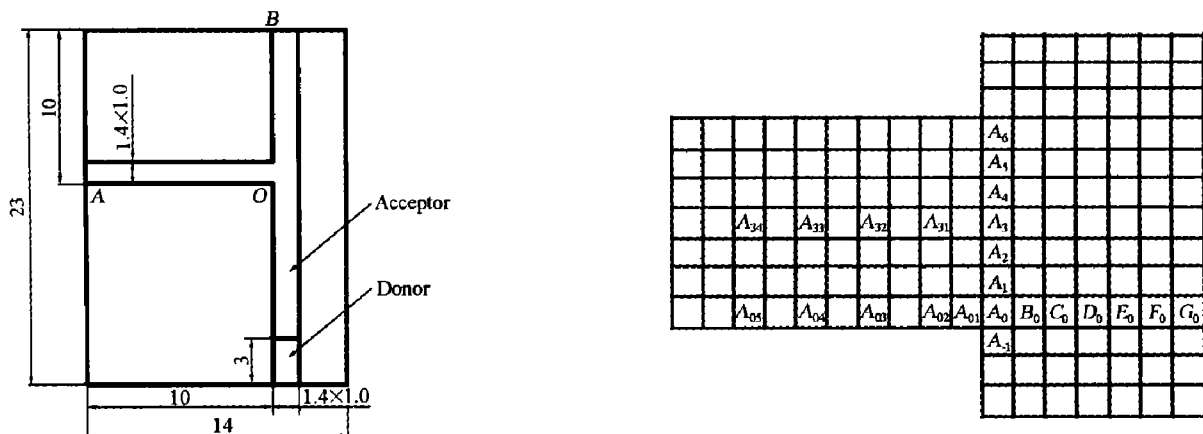


图 4 侧向三通拐角装药尺寸和特征单元选取示意图

Fig.4 Structure dimensions and typical elements of side tee-joint

3.2.1 爆轰波传播压力场

为了使得压力变化更加直观, 图 5 给出了若干特征单元的压力-时间曲线。

$A_0B_0C_0D_0E_0F_0G_0$ 单元组为装药通道的截面, 由图 5(a) 可见: 中间 D_0 单元的爆轰压力最高, 达到 30.18GPa , 两侧单元的压力依次递减, 表明爆轰波是以曲面的形式向前传播的。由于 A_0 单元处于拐角

转弯处,所以压力低于 G_0 单元。爆轰波正常传播时,爆轰压力基本保持不变;当爆轰波的传播面积突然增大时,爆轰压力就会降低。

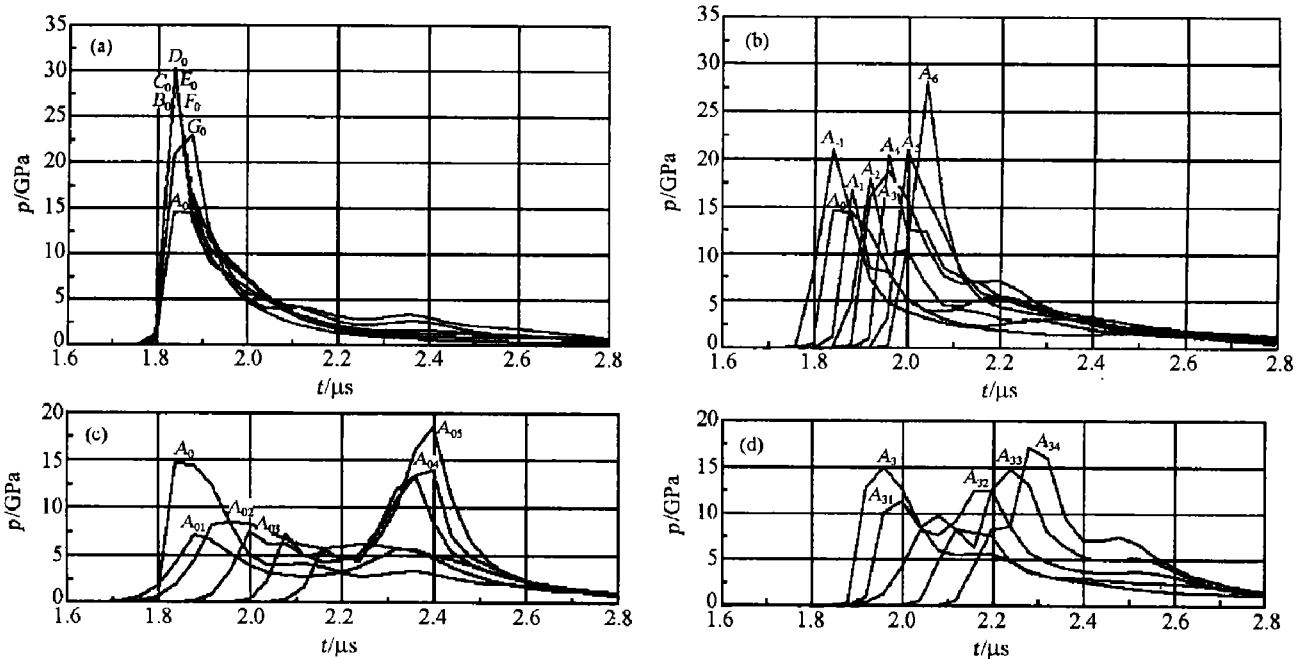


图 5 特征单元的压力-时间曲线

Fig.5 Pressures of typical elements

$A_{-1}A_0A_1A_2A_3A_4A_5A_6$ 单元组为直线与拐弯通道的界面,由图 5(b)可见:由于传播面积增大,导致爆轰压力衰减, A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 单元的压力显著低于 A_{-1} 单元的压力。 A_6 单元压力的增加是由于约束材料对爆轰波的反射作用,使得压力得到了增强。

图 5(c)为爆轰波沿拐角底端传播的压力分布情况。 A_0 到 A_{05} 为沿底部分布的六个单元,从图中可见,爆轰波的传播是一个先衰减而后逐渐恢复的过程,在此阶段形成了一个低压爆轰段。

图 5(d)中单元的选取,是为了观察爆轰波拐弯后装药中段爆轰压力的分布,从 A_3 到 A_{34} ,压力经历一个先衰减后增强的过程。爆轰波传播到 A_{34} 时,爆轰压力为约 17GPa,以后逐渐恢复到拐弯以前的传播状态。

3.2.2 爆速变化

从拐角到炸药上端面的距离是 1cm,到左端面的距离也是 1cm,如图 4 所示。爆轰波从初始起爆到到达基板的上边缘的时间为 $3.15\mu s$,即可求得爆轰波直线传播平均爆速为 7302m/s;而到达基板的左边缘的时间是 $3.34\mu s$,可得爆轰波拐角传播的平均爆速为 6886m/s。爆轰拐角延迟时间为 $0.19\mu s$ 。爆轰波拐弯传播的爆速低于相同尺寸直线装药的爆速,表明在爆轰波拐角传播过程中,存在着明显的爆轰延迟和爆速亏损现象。

3.2.3 低压爆轰区

从图 5 可以看出,在拐角段存在明显的低压爆轰区,它对于爆轰波的拐角传播以及刚性爆炸网络的设计有着十分重要的作用。图 6 所示的拐角低压爆轰区是用数值模拟的结果处理得到的,反映了拐角处低压爆轰的区域及压力分布。

数值模拟结果表明拐角处存在着低压爆轰区,若以正常爆压的 1/2(约 15GPa)为低压区,则低压爆轰区的特征尺寸为长度 $L = 1.5\text{mm}$,宽度 $h = 0.9\text{mm}$ 。

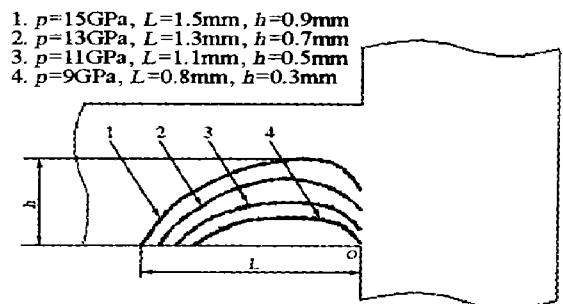


图 6 拐角低压爆轰区等压线

Fig.6 Pressure isolines of low pressure detonation zone

4 结 论

(1)拐角装药爆轰波的传播过程是一个从正常爆轰转为低压爆轰,再由低压爆轰恢复到正常爆轰的过程,也是一个爆轰波先以对称结构传播,拐角过程失去对称结构,拐角过程完成后重新获得对称结构的过程。

(2)在拐角处存在着低压爆轰区,低压爆轰区的轮廓为不规则扇形。在本文模拟的装药条件,低压爆轰区的长度 $L=1.5\text{mm}$,宽度 $h=0.9\text{mm}$ 。

(3)拐角装药存在明显的爆轰延迟和爆速亏损现象。

参考文献:

- [1] Tarver C M, Hallquist J O. Modeling two-dimensional shock initiation and detonation wave phenomena in PBX-9404 and LX-17[A]. Short J M. The Proceedings of the 7th Symposium (Inter) on Detonation[C]. Annapolis MD, 1981.
- [2] Cox M, Campbell A W. Corner-turning in TATB[A]. Short J M. The Proceedings of the 7th Symposium (Inter) on Detonation[C]. White Oak MD, USA: Naval Weapons Center, 1981.
- [3] 刘举鹏.爆轰波拐角绕射现象机理及应用研究[D].北京:北京理工大学,1991.
- [4] 李生才.拐角角度对爆轰波拐角效应的影响[J].爆炸与冲击,1999,19(4):289—294.
LI Sheng-cai. The influence of the angle of convex corner on the effect of detonation waves[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 289—294.
- [5] 北京理工大学 ANSYS/LS-DYNA 中国技术支持中心. ANSYS/LS-DYNA 算法基础和使用方法[Z].1999.
- [6] 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.
- [7] Dobratz B M. LLNL Explosive Handbook[Z].1981.
- [8] 周钢.爆炸网络的数值模拟及其 CAD 的研究[D].北京:北京理工大学,2001.

Three dimensional numerical simulation of detonation wave propagation on corner-turning

JIAO Qing-jie^{*}, WEI Ji-feng, ZHOU Gang, YAN Nan, CAI Rui-jiao
(The National Key Laboratory of Explosion and Safety, Beijing Institute of Technology,
Beijing 100081, China)

Abstract: Corner charge is a common structure of rigid explosive circuit. In order to study the propagation characteristics of detonation wave at corner turning and the phenomenon of low-pressure flow field, program LSDYNA-3D was used to simulate three common types of corner-turning structures. The attenuating-growing process of pressure is shown clearly, which is the result of the variety of propagation area. The change of detonation velocity in side tee-joint is discussed, and moreover, the dimensions of low-pressure detonation zone are obtained.

Key words: mechanics of explosion; corner charge; numerical simulation; detonation wave; low pressure detonation zone

^{*} Corresponding author: JIAO Qing-jie