

# 四种炸药爆轰波绕射数值模拟研究<sup>\*</sup>

于川 赵同虎 孙承纬

(中物院流体物理研究所 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610003)

**摘要** 报导了采用二维 Lagrange 反应流体动力学程序 W SU 数值模拟计算 RHT-901 JO-9159 JB-900 炸药绕直角和液体硝基甲烷炸药绕 60°、90°、120° 角的爆轰波绕射过程, 对绕爆机理进行了分析。经与实验观测结果比较, 数值模拟较准确地再现了爆轰波的绕射过程。

**关键词** 爆轰波绕射 W SU 程序 数值模拟 反应速度

**中图法分类号** O 381

## 1 引言

爆轰波绕过障碍物(如金属块等)的传播过程, 多年来是爆轰研究人员所关注的问题。弄清爆轰波绕射的机理和传播规律, 对于精巧的爆轰装置设计, 以及检验爆轰数值模拟意义重大。D. Venable 采用 X 光摄影技术研究了 Comp B 炸药中爆轰波的绕射现象<sup>[1]</sup>; A. W. Gibb 观测了硝基甲烷炸药中爆轰波绕射的过程<sup>[2]</sup>; C. L. Mader 也进行过一些数值模拟计算工作<sup>[3]</sup>。

爆轰波绕射的实验, 目前只能观测爆轰波波阵面形状, 尚不能准确地测量波后压力、粒子速度等参数及其分布情况。与实验符合的数值模拟工作对于深入探讨爆轰波绕射的基本规律是十分必要的。

本文的数值模拟计算, 是基于二维反应流体动力学理论的有限差分计算方法。与数值模拟计算结果进行比较的爆轰波绕射实验测试结果波阵面, 均采用高速分幅相机测试得到<sup>[4]</sup>。

## 2 W SU 程序简介

本文的数值模拟计算采用的程序 W SU<sup>[5]</sup>, 是一个大型二维 Lagrange 有限差分反应流体动力学程序, 综合考虑了流体弹塑性和炸药反应过程。炸药反应是一种唯象的描述方式, 即反应速率函数表征。反应速率函数根据情况可以选取 Arrhenius 反应速率、Forest Fire 反应速率、点火-燃烧两项式或点火-燃烧-慢反应三项式、CJV 燃烧和 Sharp Shock 方波法等形式。材料及炸药爆轰产物物态方程可选取 HOM (BKW) 物态方程、JWL 物态方程和 V 律物态方程等。边界条件可考虑自由面、连续面、对称面、压力活塞、速度活塞及滑移线等类型。可对平面或柱面形状的二维爆炸与冲击, 以及激光效应等问题进行数值模拟计算。

通过对大量冲击引爆、爆轰传播和爆轰驱动过程的二维数值模拟计算, 证明 W SU 程序能较精确地再现爆轰反应和传播过程。

<sup>\*</sup> 于川: 男, 1961年8月生, 硕士, 副研究员。  
1997-05-04收到原稿, 1997-11-20收到修改稿。

### 3 计算模型和结果

#### 3.1 RHT-90炸药中爆轰波的直角绕射

RHT-90是一种组分为 TNT/RDX (40/60)的熔铸混合炸药,标准密度  $d_0 = 1.70 \text{ g/cm}^3$ ; 爆速  $D = 7.786 \text{ km/s}$  爆压  $p_{CF} = 27.0 \text{ GPa}$ <sup>[6]</sup>.

数值模拟选用 Forest Fire 反应速率函数

$$r = -\frac{1}{W} \left( \frac{dW}{dt} \right)_p = \exp(C_0 + C_1 p + C_2 p^2 + \dots + C_n p^n) \quad (1)$$

式中:  $r$  为反应速率;  $W$  为炸药未反应部分质量分数,反应未开始,  $W = 1$  反应结束, 则  $W = 0$   $C_0, C_1, \dots, C_n$  及多项式阶数  $n$  为经验拟合系数,一般  $n$  取 9~14

Forest Fire 反应速率函数的系数  $C_0, C_1, \dots, C_n$  可由炸药的冲击 Hugoniot 关系, POP 关系进行拟合,或采用 Lagrange 分析方法确定.

RHT-90炸药的 Forest Fire 反应速率函数系数如表 1 所列<sup>[3]</sup>.

表 1 炸药 Forest Fire 反应速率函数系数

Table 1 The parameters of Forest fire rate for explosives

炸药	$n$	$C_0, C_1, C_2, \dots, C_n$				
RHT-901	13	$-1.0354580437 \times 10^0$	$+4.734274495 \times 10^2$	$-1.6753704228 \times 10^4$		
		$+4.4756746438 \times 10^5$	$-8.4931471542 \times 10^6$	$+1.1555934358 \times 10^8$		
		$-1.1402565157 \times 10^9$	$+8.206591093 \times 10^9$	$-4.2986627008 \times 10^{10}$		
		$+1.6183793696 \times 10^{11}$	$-4.2605817430 \times 10^{11}$	$+7.4376767275 \times 10^{11}$		
		$-7.7289848996 \times 10^{11}$	$+3.6167775705 \times 10^{11}$			
JO-9159	13	$-8.3979132644 \times 10^0$	$+4.0524452315 \times 10^2$	$-1.2887959724 \times 10^4$		
		$+2.9889932207 \times 10^5$	$-4.7962436917 \times 10^6$	$+5.4017707004 \times 10^7$		
		$-4.3377143285 \times 10^8$	$+2.506854809 \times 10^9$	$-1.043325890 \times 10^{10}$		
		$+3.0950369616 \times 10^{10}$	$-6.3781135352 \times 10^{10}$	$+8.6704208069 \times 10^{10}$		
		$-6.9876089170 \times 10^{10}$	$+2.5277953727 \times 10^{10}$			
JB-9001	14	$+1.6223658470 \times 10^2$	$-1.9660891926 \times 10^4$	$+1.0170082035 \times 10^6$		
		$-3.118198801 \times 10^7$	$+6.3734890585 \times 10^8$	$-9.2043883492 \times 10^9$		
		$+9.6978690159 \times 10^{10}$	$-7.5817519329 \times 10^{11}$	$+4.4248348854 \times 10^{12}$		
		$-1.9206772744 \times 10^{13}$	$+6.1110150327 \times 10^{13}$	$-1.3836158944 \times 10^{14}$		
		$-2.1097494446 \times 10^{14}$	$-1.9413888714 \times 10^{14}$	$+8.1425481888 \times 10^{13}$		

未反应炸药和爆轰产物物态方程采用由 BKW 物态方程扩展而成的 HOM 完全物态方程,参数取自文献 [3] 计算模型与计算结果如图 1 所示.

在图 1(a)中,  $BCD$  为障碍物钨块的边界;  $DE$ 、 $EF$  和  $FA$  界面为连续面;  $AB$  为引爆面,采用  $16 \text{ GPa}$  持续  $0.6 \text{ s}$  的“压力活塞”模拟引爆.

图 1(a)中,实线为计算的爆轰波波阵面在不同时刻的传播情况,由反应度  $\lambda = 1 - W = 0.95$  表征;虚线为实验观测的波阵面.

图 1(b)为计算得到的  $6.98 \text{ s}$  和  $11.0 \text{ s}$  两个时刻的波后压力分布情况.

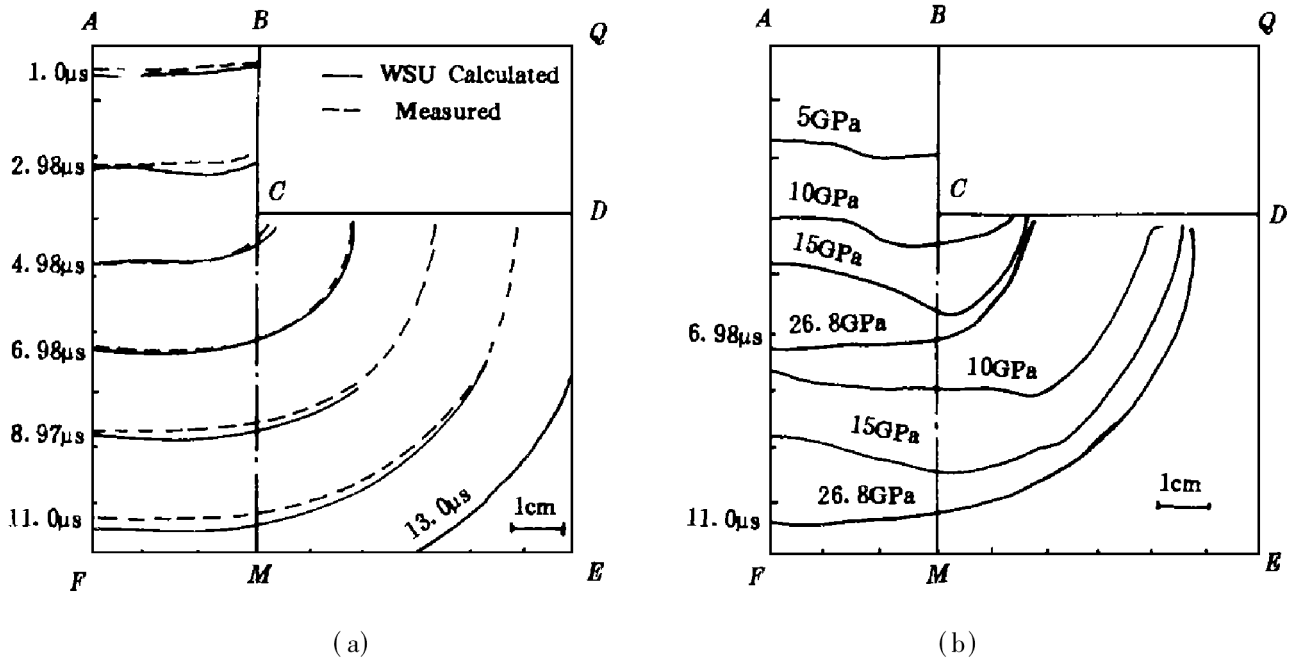


图 1 RHT-901炸药中爆轰波绕射计算结果

Fig. 1 Calculated results of diffraction of detonation wave in explosive RHT-901

### 3.2 JO-9159炸药中爆轰波的直角绕射

JO-9159是一种以HM X为主的塑料粘结炸药,标准密度  $\rho_0$  为  $1.860 \text{ g/cm}^3$ ; 爆速  $D$  为  $8.862 \text{ km/s}$  爆压  $p_{cl}$  为  $36.8 \text{ GPa}$ <sup>[6]</sup>。数值模拟选用 Forest Fire 反应速率函数,其系数如表 1 所列<sup>[3]</sup>。未反应炸药和爆轰产物物态方程采用 HOM 完全物态方程,参数取自文献 [3]

计算模型与计算结果如图 2 所示,图中的边界条件与符号说明与 RHT-901 的计算模型一致。采用  $16 \text{ GPa}$  持续  $0.6 \text{ s}$  的“压力活塞”模拟引爆。

图 2(b) 为计算得到的  $5 \mu\text{s}$  和  $8 \mu\text{s}$  两个时刻的波后压力分布情况。

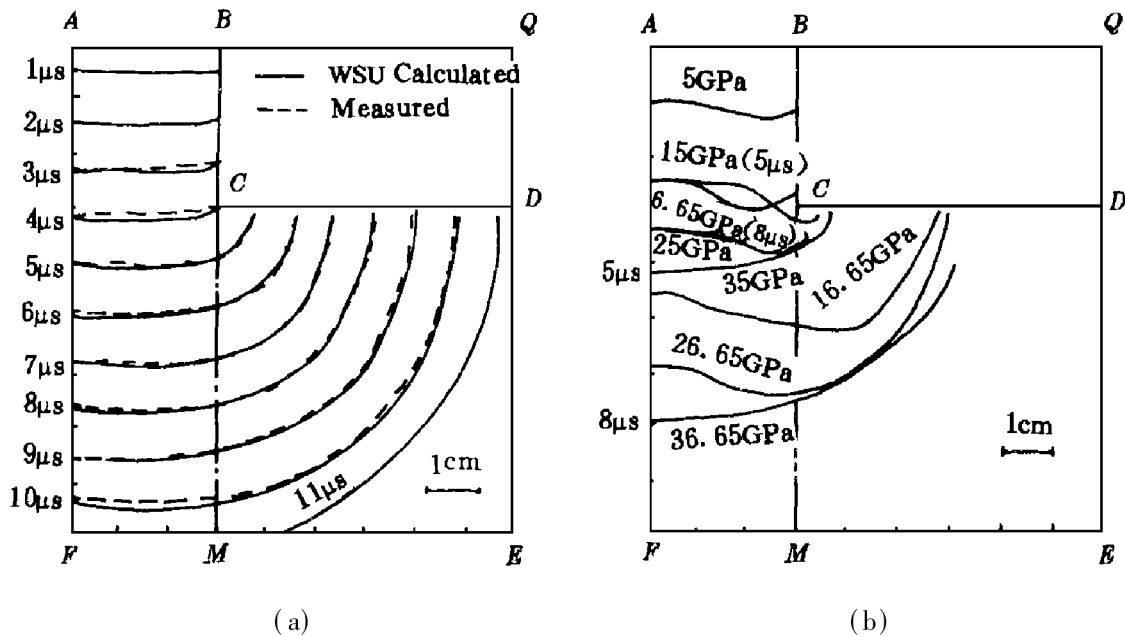


图 2 JO-9159炸药中爆轰波绕射计算结果

Fig. 2 Calculated results of diffraction of detonation wave in explosive JO-9159

### 3.3 JB-900炸药中爆轰波的直角绕射

JB-900是一种以 TATB 为主的塑料粘结钝感炸药,标准密度  $\rho_0 = 1.894 \text{ g/cm}^3$ ; 爆速  $D =$

7.589 km/s 爆压  $p_{c1} = 28.5 \text{ GPa}$ <sup>[3]</sup>。数值模拟选用 Forest Fire 反应速率函数, 其系数如表 1 所列<sup>[3]</sup>。未反应炸药和爆轰产物物态方程采用 HOM 完全物态方程, 参数取自文献 [3]

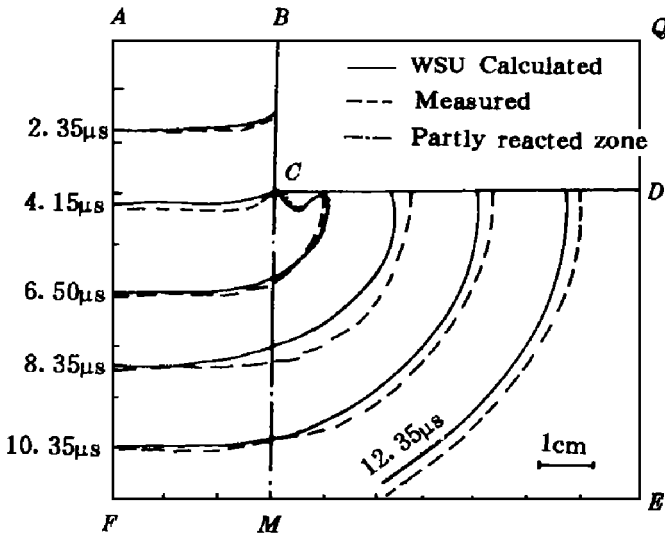


图 3 JB-900 炸药中爆轰波绕射计算结果  
Fig. 3 Calculated results of diffraction of detonation wave in explosive JB-9001

[3] 计算模型与计算结果如图 4~ 图 6 所示。

在图 4~ 图 6 中, BCD 为障碍物 PMMA 块的边界; DE、EF 和 FA 为连续面; AB 的引爆面采用 16 GPa 持续时间 0.6 μs 的“压力活塞”模拟引爆。

图 4~ 图 6 的 (a) 中的实线为计算的爆轰波波阵面, 用  $\lambda = 0.95$  表征; 虚线为实验观测的波阵面。在拐点 C 之下沿 CD 的绕射区内, 计算发现有反应不完全的“部分反应区” (点划线表征的区域) 和不反应的“死区” (接近 CD 边界无波阵面延伸的区域)。

图 4~ 图 6 的 (b) 分别为计算得到的两个时刻的波后压力分布情况。

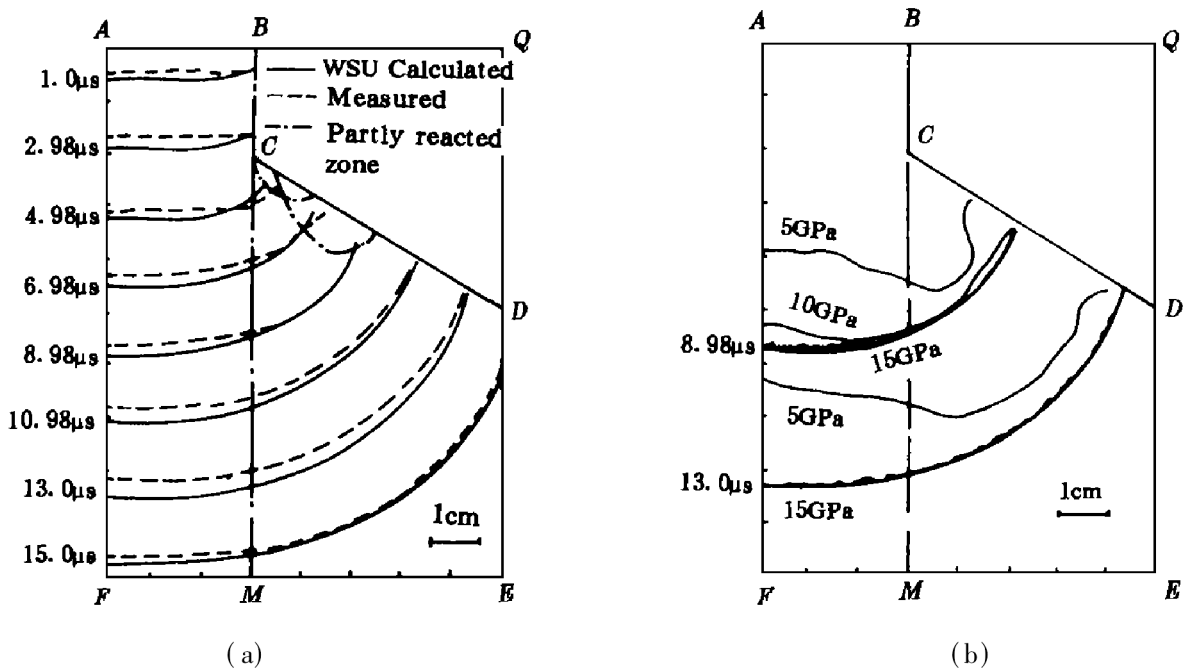


图 4 硝基甲烷中爆轰波 60° 绕射计算结果

Fig. 4 Calculated results of diffraction of detonation wave round 60° corner in explosive Nitromethane

计算模型与计算结果如图 3 所示, 图中的边界条件与符号说明与 RHT-901 的计算模型一致。采用 26 GPa 持续 0.6 μs 的“压力活塞”模拟引爆。

### 3.4 硝基甲烷中爆轰波的 60°、90°、120° 绕射

硝基甲烷是一种均匀单质液体炸药, 标准密度  $\rho_0 = 1.128 \text{ g/cm}^3$ ; 爆速  $D = 6.463 \text{ km/s}$  爆压  $p_{c1} = 13.0 \text{ GPa}$ <sup>[3]</sup>。数值模拟采用 Arrhenius 反应速率函数

$$r = Z \exp(-E^*/RT) \quad (2)$$

待定参数是频率因子  $Z$  和活化能  $E^*$ 。对硝基甲烷<sup>[3]</sup>, 取  $Z = 4 \times 10^8 \text{ μs}^{-1}$ ,  $E^* = 2.24 \times 10^5 \text{ J/mole}$  硝基甲烷的未反应态和爆轰产物物态方程采用 HOM 物态方程。参数取自文献

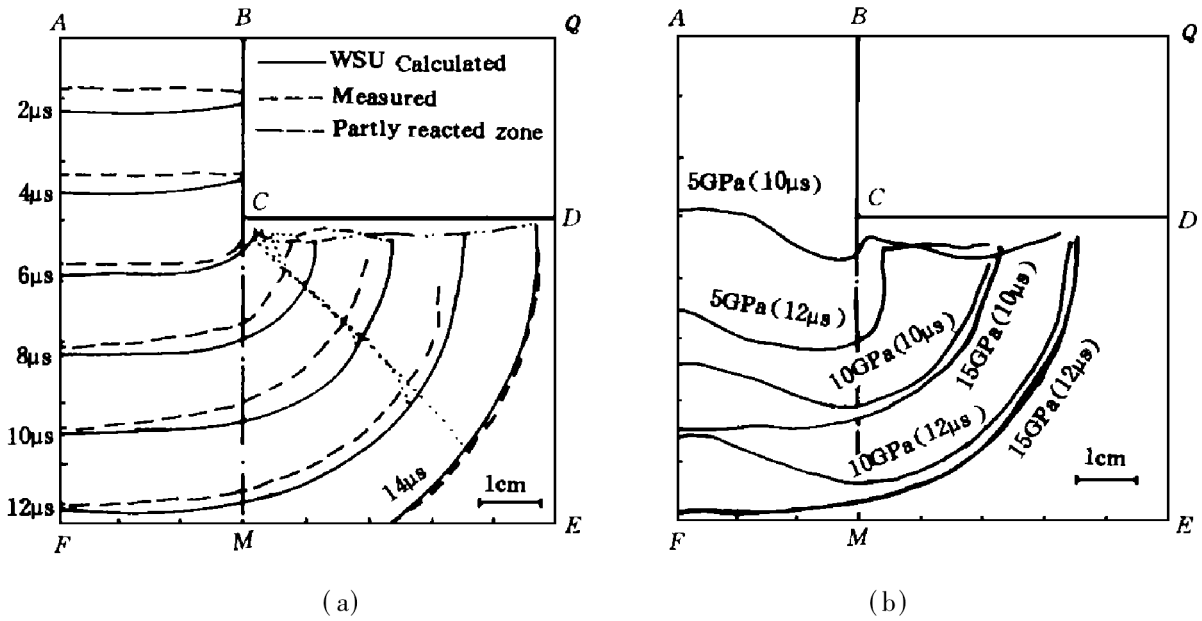


图 5 硝基甲烷中爆轰波 90°绕射计算结果

Fig 5 Calculated results of diffraction of detonation wave round 90° corner in explosive nitromethane

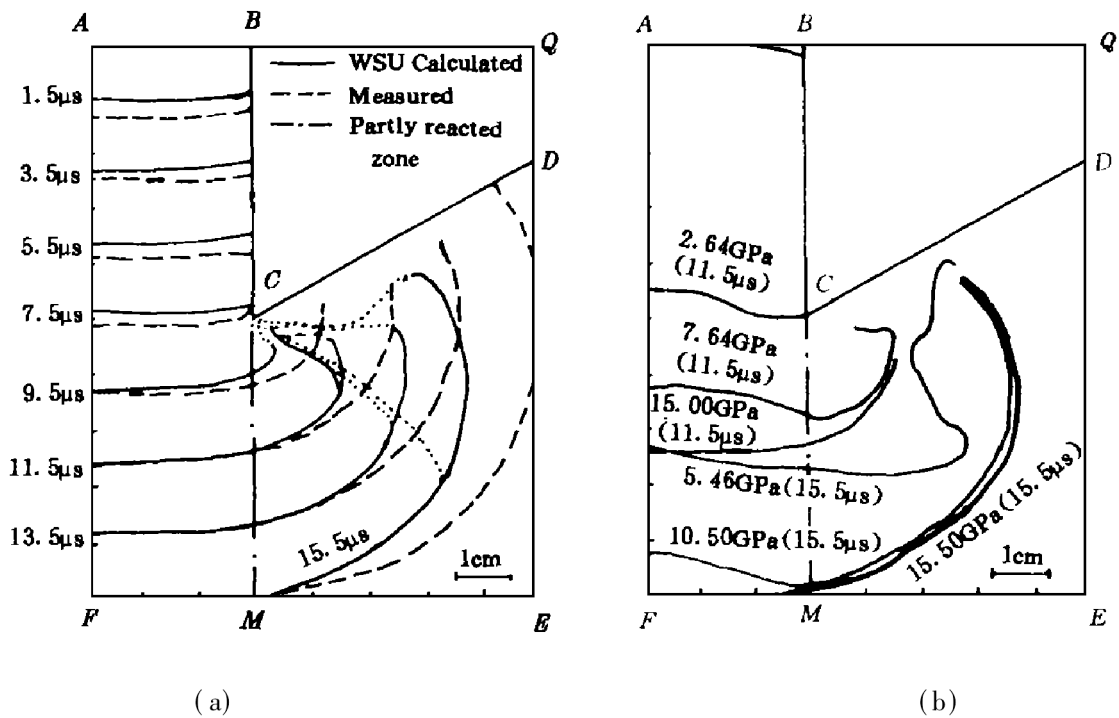


图 6 硝基甲烷中爆轰波 120°绕射计算结果

Fig 6 Calculated results of diffraction of detonation wave round 120° corner in explosive nitromethane

### 4 分 析

(1)从图 1~ 图 6(a)中可见,数值模拟计算的爆轰波绕射波阵面与实验观测的结果相符较好。在  $ABC M F A$  的非绕射传播区内,波阵面曲率较小,保持正常传播。在  $C D E M C$  的绕射区内,爆轰传播速度变慢,越接近  $C D E$  界面,波阵面向内弯曲越强烈。

(2)对某些炸药,在一定条件下,其爆轰波绕射会出现不反应的“死区”或反应不完全的“部分反应区”。本文计算的四种炸药中,RHT-901、JO-9159炸药的爆轰波绕射反应完全,无明显的“死区”或“部分反应区”。但在如图 3所示的 JB-900钝感炸药中的绕射角附近,如图 4~ 图 6所示的硝基甲烷中,在拐点  $C$  之下沿  $C D$  的绕射区内,计算发现有如点划线表征的“部分反应

区”和不反应的“死区”。在“部分反应区”内,波阵面扫过之后,反应度 $\lambda$ 不是很快趋于 1,而是呈现杂乱无章的情形;在“死区”内,反应度 $\lambda$ 接近为零,无压力间断等波阵面特征。

从图 4~图 6 三种不同绕射角的计算可见,在 *CDEM* 的绕射区内,硝基甲烷的“部分反应区”和“死区”随绕射角的增大而显著增大。

对图 1~图 6 的波后压力分布图 (b) 进行分析可见,在 *ABMF* 的非绕射区内,波后压力下降较慢,但在 *CDEM* 的绕射区内,随着波阵面向 *CD* 面的延伸越多,波后压力下降越快,这将直接影响爆轰波的自持传播。由于 *RHT-901*、*JO-9159*、*JB-9001* 均是非均匀混合炸药,其内的不同化学成分的“杂质”和不均匀性影响因素,在爆轰反应过程中将形成大量“热点”,而向波阵面提供能量,维持波阵面的自持传播,但其传播速度与非绕射区相比,明显减慢。而硝基甲烷是一种均质的单质炸药,其内“热点”效应不明显,在绕射区内当压力陡然下降时,不能及时地向波阵面提供能量以维持自持传播,就将造成不反应的“死区”或反应不完全的“部分反应区”。

另外,硝基甲烷的感度很低,而 *RHT-901*、*JO-9159*、*JB-9001* 的感度则相对要高一些。这也是在硝基甲烷绕爆中形成“死区”或“部分反应区”的原因之一。

可见,均匀炸药和非均匀炸药在爆轰波绕射过程中,其传播行为具有明显的差异。

(3) 在本文的数值模拟计算中,对 *RHT-901*、*JO-9159*、*JB-9001* 和硝基甲烷分别选用了 *Forest Fire* 反应速率函数和 *Arrhenius* 反应速率函数。由 (1) 式可知, *Forest Fire* 反应速率函数中,反应速率  $r$  只是压力  $p$  的函数,反应了压力的主导作用。这与 *RHT-901*、*JO-9159*、*JB-9001* 类型的非均匀炸药中,“热点”起主导作用,而热点的强度主要依赖于波阵面压力的情况是相符的。而对硝基甲烷采用了 *Arrhenius* 反应速率函数,由 (2) 式可知,反应速率  $r$  仅依赖于热力学温度  $T$ 。计算表明: *Arrhenius* 反应速率用于描述热点影响较小的均匀单质炸药是简便可靠的。

(4) 本文通过对 *RHT-901*、*JO-9159*、*JB-9001* 和硝基甲烷四种非均匀和均匀炸药爆轰波绕射数值模拟计算,计算的波阵面与实验观测结果相符,且得到了实验尚不能测量到的压力分布情况,对于深入探讨爆轰波绕射的基本规律具有一定的应用价值。

#### 参 考 文 献

- 1 Venable D. *PHERM EX. Physics Today*, 1964, 17: 19
- 2 Gibb A W. *Experimental Study of Corner Turning in Nitromethane* PB90-221409, 1986
- 3 Mader C L. *Numerical Modeling of Detonation*. Berkeley, California University of California Press, 1979
- 4 赵同虎,等. *JO-9159* 炸药爆轰波绕射现象研究. *爆轰波与冲击波*, 1991, (2): 23
- 5 Sun Chengwei et al. *Rectangular Diffraction of Detonation Wave in Nitromethane*. In: Zhang Guanren, ed. *Proc 2nd Int Symp on Intense Dynamic Loading and Its Effects*. Chengdu, 1992. Chengdu, China Sichuan Univ Press, 1992, 87
- 6 董海山,等. *高能炸药及相关物性能*. 北京: 科学出版社, 1989, 20

# NUMERICAL SIMULATIONS ON DIFFRACTION OF DETONATION WAVES IN FOUR EXPLOSIVES

Yu Chuan, Zhao Tonghu, Sun Chengwei

*(Laboratory for shock wave and Detonation Research,  
Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu 610003)*

**ABSTRACT** By means of numerical simulation with the  $\mathcal{D}$  Lagrangian reactive hydroelastic-plastic code W SU, the diffraction of detonation waves in high explosives RHT-901, JO-9159 and insensitive high explosive JB-9001 round a rectangular tungsten block and in liquid nitromethane round  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $120^\circ$  PMMA block respectively have been studied. There are partly reacted zone and undetonated "dead" zone behind the diffracting detonation wave in nitromethane, but there are no similar cases in RHT-901 and JO-9159. Comparing with the results observed in experiments, the numerical simulations reproduce well the process of diffraction of detonation waves in these four explosives.

**KEY WORDS** diffraction of detonation, W SU code, numerical simulation, reaction rate