文章编号：1000-5773(2013)01-0132-05

180°圆弧形钝感炸药的爆轰波传播*

姜　洋，李　蕾，王　涛，钟　敏，李　平，柏劲松

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳　621900）

摘要：采用贴体坐标下与 Level Set 方法相结合的爆轰冲击波动力学(DSD)计算方法，研究了180°圆弧形钝感炸药中非理想爆轰波的传播过程。通过数值模拟计算和实验测量的对比分析，得到了180°圆弧形炸药中爆轰波传播的一些规律：圆弧形钝感炸药可以实现定常爆轰，即在极坐标中整个爆轰波以固定角速度转动。这种定常阵面的形状和角速度与圆弧的外半径无关，定常体系依赖于圆弧形炸药的内半径和覆盖圆弧的外壳物质。对描述圆弧形炸药中爆轰波传播规律的经验公式进行了研究，结果表明这些经验公式能够准确描述爆轰波速度的变化，在实验测量和预估方面具有一定的参考价值。

关键词：爆轰冲击波动力学方法；圆弧形钝感炸药；爆轰波传播

中图分类号：O382　　**文献标识码**：A

1　引　言

近年来，钝感炸药在工程和武器中的使用日益广泛。因钝感炸药的反应区较长，爆轰波传播和爆轰产物驱动带有明显的非理想行为，爆轰波阵面形态将影响武器的效率甚至成败；另一方面，研究爆轰波的传播规律，使爆轰波形态能够按照预期设想进行控制或改善，对于提高炸药利用率也有一定的参考意义。因此，曲面非理想爆轰波传播规律的研究和应用，已成为当前爆炸装置设计、爆炸安全问题和爆轰应用的基础。圆弧形钝感炸药的爆轰波传播因受到边界效应、散心效应和绕射效应的影响，成为爆轰波传播规律研究的常用爆轰装置。对圆弧形炸药而言，由于波阵面不对称，圆弧内边界效应(内径和半宽度)将是影响爆轰波传播的主要因素。Bdzil 等人[1]用改进的 Huygens 编码计算了平面起爆时圆弧形钝感炸药的爆轰波传播，并与理想传播做了对比，但是他们仅从理论上分析了圆弧形炸药的爆轰传播规律，未与实验结果进行比较。本研究拟采用与 LS(Level Set)方法[2]相结合的 DSD(Detonation Shock Dynamics)方法[3]，在实验测量结果的基础上，结合经验公式，研究 180°圆弧形钝感炸药中定常爆轰区域的形成以及外壳、圆弧尺寸对爆轰波传播的影响规律。

2　贴体坐标下与 LS 方法相结合的 DSD 方法

计算曲率相关的界面运动问题的 LS 方法[4]，是根据初始条件确定 ψ 的偏微分方程，即

$$\psi_t + D_n(\kappa) \mid \nabla\psi \mid = 0 \tag{1}$$

式中：$\psi=\psi(t,x,y)$ 为符号距离函数，ψ_t 为 ψ 对时间 t 的偏导数，D_n 为阵面传播速度在法向上的分量，κ 为阵面的中值曲率。定义 $\psi=0$ 的位置为物质界面。D_n 与 κ 的关系为

$$D_n = D_{CJ} - \alpha\kappa \tag{2}$$

* **收稿日期**：2010-11-17；**修回日期**：2011-07-04

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金(11002129)

作者简介：姜　洋(1976－)，女，博士，主要从事计算爆炸力学研究. E-mail：jiangyang1016@sina.com

通讯作者：李　蕾(1981－)，女，硕士，主要从事计算爆炸力学研究. E-mail：liulei_82@yahoo.com.cn

式中:D_{CJ}为理想爆速,α 为拟合参数。将(2)式代入(1)式,得到

$$\psi_t + D_{CJ} \mid \nabla\psi \mid = \alpha\kappa \mid \nabla\psi \mid \tag{3}$$

对于弯曲边界,为了简化边界条件的处理,引入贴体坐标系,令计算网格边界为炸药边界,炸药的几何性质蕴含在计算网格中。在二维情况下引进坐标变换

$$\begin{cases} \xi = F(x,y) \\ \eta = G(x,y) \end{cases} \tag{4}$$

坐标变换应满足两个基本要求:(1) 为了保证逆变换存在,应有 Jacobi 行列式 $\boldsymbol{J} \neq 0$;(2) 在计算空间(ξ,η)边界(即炸药边界)上,应有 $\xi=\xi_i$ 或 $\eta=\eta_j$,计算区域为矩形。于是有

$$\begin{cases} \psi_x = \psi_\xi F_x + \psi_\eta G_x \\ \psi_y = \psi_\xi F_y + \psi_\eta G_y \end{cases} \tag{5}$$

式中:F_x、F_y、G_x、G_y 分别为 F、G 对 x 和 y 的偏导数,ψ_ξ 和 ψ_η 分别为 ψ 对 ξ 和 η 的偏导数。利用 Jacobi 矩阵,可得 F_x、F_y、G_x 和 G_y。此时

$$\mid \nabla\psi \mid = \sqrt{(\psi_\xi F_x + \psi_\eta G_x)^2 + (\psi_\xi F_y + \psi_\eta G_y)^2} \tag{6}$$

展开并合并同类项后可变换为

$$\mid \nabla\psi \mid = \sqrt{a_1\psi_\xi^2 + a_2\psi_\eta^2 + 2a_4\psi_\xi\psi_\eta} \tag{7}$$

式中:$a_1 = F_x^2 + F_y^2$,$a_2 = G_x^2 + G_y^2$,$a_4 = F_xG_x + F_yG_y$。

在(3)式等号右边的曲率计算中,含有 ψ 对空间坐标的二阶偏导数,不能表示为 HJ(Hamilton-Jacobi)类型方程形式。因此,对(3)式等号两边分别计算。(3)式等号右边可采用中心差分方法计算,左边则可表示为(ξ,η)坐标系下的 HJ 类型偏微分方程,即

$$\psi_t + H(\psi_\xi,\psi_\eta) = 0 \tag{8}$$

式中:$H(u,v) = D_{CJ}\sqrt{a_1u^2 + a_2v^2 + 2a_4uv}$。对于(8)式,可采用含数值耗散项的二维 Godunov 格式进行求解[5]。

3　贴体坐标系下边界条件的处理

与炸药相邻的往往还有空气、金属或非金属等介质。介质对爆轰波传播的影响是通过设置波阵面外法线与边界外法线的夹角小于边界角 ω(ω 为炸药参数)的几何边界条件[6]体现,即波阵面与边界的交点满足

$$\partial\psi/\partial n \geqslant \mid \nabla\psi \mid \cos\omega \tag{9}$$

利用 LS 函数和贴体坐标系,波阵面的外法线可表示为$\nabla\psi/\mid\nabla\psi\mid$,边界 Γ 的外法线可表示为$\nabla\Gamma/\mid\nabla\Gamma\mid$。波阵面与边界的夹角余弦为

$$\cos\theta = (\nabla\psi/\mid\nabla\psi\mid)\cdot(\nabla\Gamma/\mid\nabla\Gamma\mid) \tag{10}$$

通过比较 $\cos\theta$ 和 $\cos\omega$,调整边界上的 ψ 值,使之满足(9)式。

4　180°圆弧形钝感炸药中的爆轰波传播

实验装置见图 1[7],外半径和圆弧的宽度为60 mm,圆弧的内半径 R_1 分别为 30、40、50 mm,内、外边界上覆盖着钢壳。用平面波透镜和以 RDX 为基的传爆药引爆圆弧形炸药。圆弧远端用 10 mm 厚的平板盖住,平板上布置电探针,用于测量爆轰波在圆弧形炸药中经过"U"形偏转后到达圆弧远端的时刻,以获得爆轰波阵面形状。在内、外边界上分别设置间隔为 15°的电探针(15°,30°,…,165°),监测爆轰波到达各点的时刻。实验模型中,垂直于纸面方向的药柱尺寸足够大,可忽略该方向的边界效应。

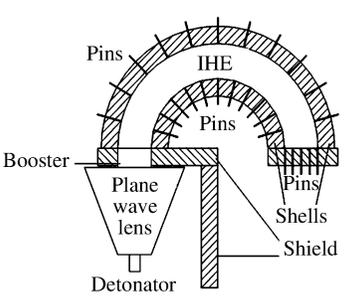


图 1　实验装置

Fig. 1　Experimental set-up

134
高 压 物 理 学 报 第 27 卷

5 计算结果与分析

采用 DSD 方法，对圆弧形钝感炸药的爆轰波传播过程进行数值模拟。计算参数为 $D_{CJ}=7.4$ km/s，$\alpha=2.727$ m^2/s。炸药边界在钢约束下的边界角 ω 为 81.0°，由实验波形[7]确定。

在内半径 R_I 为 30、40 和 50 mm 的模型中，计算得到爆轰波到达外、内界面的时间 t_A、t_I 与转角 φ 之间的关系，如图 2 所示。由图 2 可知：对于 R_I 不同的 3 个模型，在测试范围内(15°～165°)，t_I-φ 线保持为直线，即内边界上爆轰波的角速度是定常的；而外边界上，t_A-φ 线的斜率在开始的一定角度范围内较大，然后逐渐变小，直至与 t_I-φ 线平行，表明起初外边界的爆轰波角速度较小，随后逐渐增大至与内边界上的爆轰波传播角速度相同，此时爆轰波阵面以定常角速度 $\omega=D_I/R_I$ 绕轴传播。

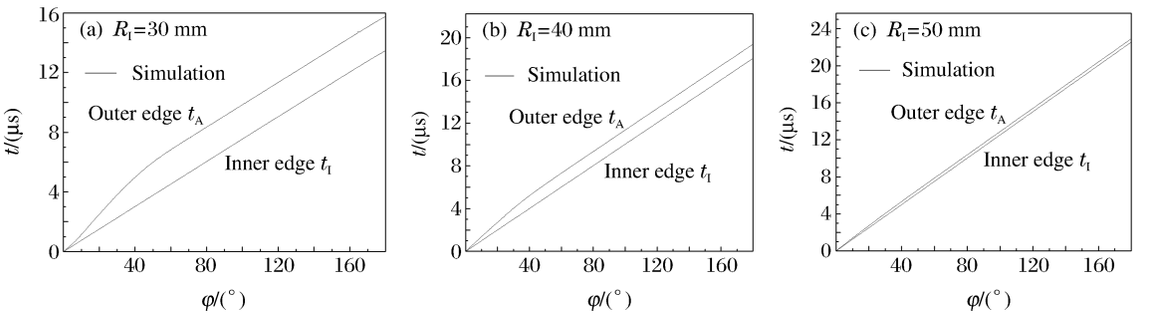


图 2 不同 R_I 时爆轰波到达圆弧形炸药内、外边界的时间与转角的关系

Fig. 2 Detonation times of arrival at the outer and inner edges of the rib versus turn angle with different R_I

在定常爆轰区域内，定常体系的形成时刻可以从爆轰波到达内、外边界的时间差 $\Delta t=t_A-t_I$ 与转角 φ 之间的关系得出。图 3 给出了不同内半径时 Δt 与 φ 的关系的实验值[7]和计算值。可以看出：在内半径为 30、40 和 50 mm 的情况下，数值模拟得到的爆轰波非定常传播的角度分别约为 90°、70°和 50°，爆轰波到达内、外界面的时间差 Δt 分别稳定在 2.30、1.09 和 0.20 μs，意味着定常爆轰体系形成，整个反应区以同样的形状(即作为刚体)沿圆弧运动；爆轰波非定常传播区域和时间差 Δt 随着圆弧厚度的增加而增加。图 3 中的数值模拟结果与实验值符合较好，验证了 DSD 方法在计算圆弧形炸药中的弯曲爆轰波传播方面能够达到较高精度，具有一定的可靠性和有效性。

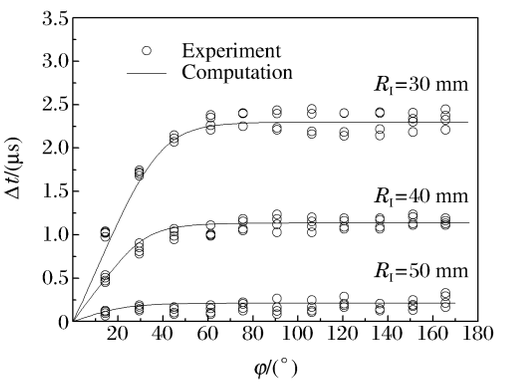


图 3 爆轰波到达内、外边界的时间差与转角的关系

Fig. 3 Difference between times of detonation arrival at the outer and inner edges versus turn angle

图 4 为采用 DSD 方法计算得到的内、外边界上的爆轰波传播速度之比(D_I/D_A)与转角 φ 的关系。可见，圆弧形炸药中爆轰波传播达到拟定常状态后，内、外边界上的爆轰波速度之比 D_I/D_A 保持为常数，不再随转角变化而变化，并且该常数值由内半径和圆弧厚度决定，即

$$D_I/D_A = R_I/(R_I+\Delta R) \tag{11}$$

式中：ΔR 为圆拱厚度。(11)式在实验测量中发挥着重要作用，因为 D_A 比 D_I 更容易测得，所以可根据(11)式，由 D_A 推导出 D_I。

图 5 给出了 R_I 为 30、40、50 mm 时内边界上的角速度倒数 R_I/D_I 与 R_I 的关系。从图 5 中的数值模拟结果和实验结果可以看出，R_I/D_I 与 R_I 呈线性关系。根据文献[7]，可采用下式近似描述，即

$$\frac{D_I}{D_\infty}=\frac{R_I}{R_I+\Delta_0} \tag{12}$$

式中:D_∞ 为内边界上爆轰波速度的上限,取 $D_\infty=7.4$ km/s;Δ_0 为常数。通过比较实验数据和计算分析结果可得,当外壳为钢时,对于不同的 R_I,Δ_0 相同,可取 $\Delta_0=3$ mm。从图 5 可以看出,采用(12)式计算得到的计算结果与数值模拟结果和实验结果均吻合。此外由(12)式可知,D_I 比 D_∞ 低 10%～25%,这主要是由装药曲率和边侧稀疏的影响所致。

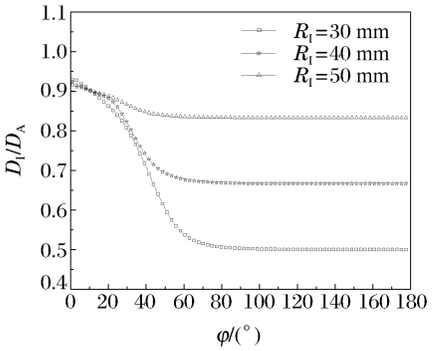


图 4　$D_\mathrm{I}/D_\mathrm{A}$ 与转角 φ 的关系

Fig. 4　$D_\mathrm{I}/D_\mathrm{A}$ versus turn angle φ

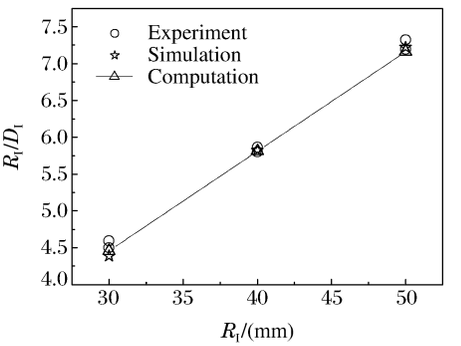


图 5　$R_\mathrm{I}/D_\mathrm{I}$ 与内径 R_I 的关系

Fig. 5　$R_\mathrm{I}/D_\mathrm{I}$ versus the inner radius R_I

不同内半径下爆轰波到达圆弧远端的波形实验测量值和数值模拟计算值如图 6 所示。可见,DSD 方法在计算弯曲爆轰波传播方面具有较高的计算精度。从图 6 中的波形可以看出,随着内半径的增大,波形逐渐变缓。理想爆轰波阵面的先导点位于内边界上,而对于钝感炸药,波阵面的先导点位于距离内边界 Δ_R 处,并且对于不同内半径,Δ_R 相同,约为 2 mm。内边界上爆轰波到达时间的滞后很小,而外边界上的滞后值较大,这是因为外边界上的波速是逐渐增大的缘故,达到拟定态后,该滞后值也保持为常数。在外边界介质为钢的情况下,可采用下式计算先导点的爆轰波速度 D_L[7]

$$D_\mathrm{L}=D_\infty\frac{R_\mathrm{I}+\Delta_R}{R_\mathrm{I}+\Delta_0} \tag{13}$$

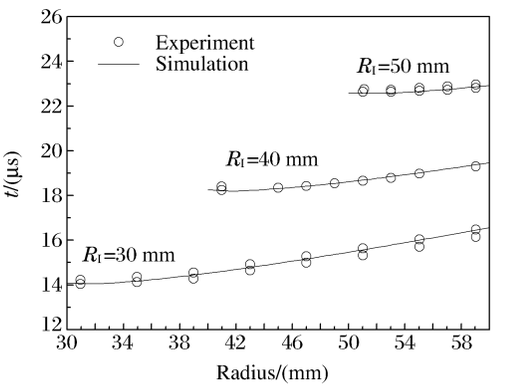


图 6　爆轰波到达圆弧形炸药远端的时间的计算值和实验值

Fig. 6　Computed and experimental results of the time of detonation breakout at the far end of the rib

数值模拟结果与(13)式计算结果见表 1。可见,两者的符合程度较高,说明(13)式能够准确描述阵面先导点的波速。从(13)式和表 1 可以看出,D_L 值约为 D_∞ 的 0.96～0.98 倍,且随着 R_I 的增大而增大。

表 1　先导点爆轰波速度

Table 1　Detonation wave velocity at the leading point

R_I/(mm)	D_L/(km/s)	
	Simulation result	Calculation result
30	7.164	7.176
40	7.200	7.228
50	7.258	7.260

6　结　论

采用与 LS 方法结合的 DSD 方法,计算了 180°圆弧形钝感炸药中爆轰波的传播过程。通过数值模

拟及实验研究，结果表明：内边界上的爆轰波传播速度在测试区域内是定常的；经过 50°～90°的非定常传播区域，爆轰波到达内、外边界的时间差稳定在 0.20～0.23 μs，意味着定常爆轰体系形成；非定常传播区域的大小和时间差值随内半径的变化而变化；波阵面先导点位于距内边界 2～5 mm 处，且以 0.96～0.98 倍拟定态速度移动；内边界上的爆速比拟定态爆速低 10%～25%。本研究仅针对外壳为钢的模型进行了分析计算，当外壳为不同阻抗物质时，需要深入研究爆轰波的传播规律。

References:

[1] Bdzil J B, Fickett W, Stewart D S. Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multi-dimensional detonation waves [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Detonation, Portland, USA, 1989: 730-742.

[2] Aslam T D, Bdzil J B, Stewart D S. Level set methods applied to modeling detonation shock dynamics [J]. J Comput Phys, 1996, 126(2): 390-409.

[3] Stewart D S, Bdzil J B. The shock dynamics of stable multidimensional detonation [J]. Combust Flame, 1988, 72(3): 311-323.

[4] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. J Comput Phys, 1988, 79(1): 12-49.

[5] Zhong M, Chen S H, Li P. An issue in the numerical simulation for non-ideal detonation propagation in body-fitted coordinate systems [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(4): 397-402. (in Chinese)
钟 敏，陈森华，李 平. 贴体坐标系中非理想爆轰波阵面传播计算的一个问题 [J]. 高压物理学报，2006，20(4)：397-402.

[6] Chen S H, Zhang X, Bai J S. LS method in body-fitted coordinate system for multi-dimensional non-ideal detonation propagation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(4): 280-284. (in Chinese)
陈森华，张 旭，柏劲松. 贴体坐标系中多维非理想爆轰波阵面传播计算的位标函数法 [J]. 高压物理学报，2000，14(4)：280-284.

[7] Lubyatinsky S N, Batalov S V, Garmashev A Y, et al. Detonation propagation in 180° ribs of an insensitive high explosive [C]//Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, Portland, USA, 2003: 859-862.

Detonation Propagation in 180° Ribs of an Insensitive Explosive

JIANG Yang, LI Lei, WANG Tao, ZHONG Min, LI Ping, BAI Jin-Song

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Non-ideal detonation wave propagation in 180° ribs of an insensitive high explosive is studied using the DSD (Detonation Shock Dynamics) method which is combined with the LS (Level Set) method in body-fitted coordinate. The rule of detonation wave propagation in 180° explosive ribs is obtained through comparing and analyzing the computed and experimental results. The explosive ribs can detonate in steady state regime, and in this case the detonation front is steady as viewed in a system of polar coordinates rotating with a fixed angular velocity. The shape and angular velocity of this steady front is independent of the outer radius of the rib. The formation of steady-state regime depends on the rib dimensions and the material of the shells covering the rib edges. Some experimental formulae describing the detonation front propagation in explosive ribs are also studied. It is shown that the change of detonation wave velocity can be accurately described by these experimental formulae, which have reference value for experimental measurement and estimation.

Key words: detonation shock dynamics method; explosive ribs; detonation propagation