

回爆现象的研究及其临界曲线

邓全农 胡 栋 丁 懋

苏林祥 桂质珍

(1985年11月1日收到)

本文利用锰铜压力计技术,给出了回爆波在炸药内部传播的图象,直接证实了回爆现象的存在。同时利用一维拉格朗日含模拟化学反应的数字编码,研究了不同起爆条件对回爆出现的影响。本文提出,对给定的炸药和撞击飞片材料,存在这样一条回爆临界曲线

$$p_0 \tau = \text{常数}$$

其中 p_0 和 τ 分别为进入炸药的初始冲击波压力和冲击加载时间。此曲线可将回爆区与无回爆区分开。本文还给出了炸药BO-1的数值模拟回爆临界曲线及部分实验点。

前 言

固态炸药中是否存在回爆现象,曾经是一个有争论的问题。近年来,愈来愈多的实验事实证明,固态炸药中存在回爆波。丁懋等⁽¹⁾在金属飞片撞击炸药BO-1的实验中,利用锰铜压力计观察撞击面的压力变化过程,发现有第二次压力突跃,并且用了两种数值模型作了数值模拟。他们的实验和数值模拟结果指出,在薄飞片和低初始冲击压力下,回爆波与爆轰波同时产生。Chick等⁽²⁾在金属射流起爆炸药Comp. B的实验中,利用X射线照像技术也观察到回爆波。Weston⁽³⁾的数值模型在模拟多孔炸药的起爆时,在计算结果中可以看到清楚的回爆波。目前,数值模拟结果都指明,回爆波具有与波阵面运动方向一致的粒子速度。

回爆现象是固态炸药起爆过程中的一种新现象,它的研究对工程设计以及爆轰理论的发展都是有意义的。现在人们对回爆波的出现规律以及详细机理尚无充分认识,还有大量问题有待探讨。本文试图利用锰铜压力计观察炸药内部的压力变化过程,得到回爆波在炸药内部传播的图象。实验与含模拟化学反应的一维拉格朗日数字编码配合,研究金属飞片撞击炸药时回爆出现的规律,给出一个回爆波出现的临界曲线。

一、实验装置和数值计算模型

本文所用实验技术同文献〔1〕。实验装置见图1。压力计埋在炸药内。典型的实验结果

见图2。实验所用炸药均为BO-1, 密度为 1.87 g/cm^3 。数值模型采用一维拉格朗日流体力学方程⁽⁴⁾, Cochran化学反应速率方程⁽⁵⁾, JWL形式的炸药状态方程和爆轰产物状态方程⁽⁶⁾。混合区状态方程如下

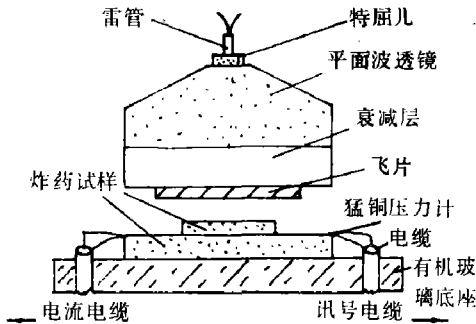


图1 实验装置示意图

平面波透镜有 $\phi 100$ 、 $\phi 200$ 两种衰减层厚
为有机玻璃 10 mm 加黄铜 15 mm 组成

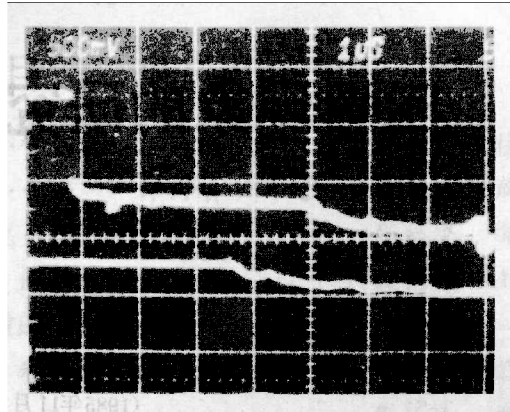


图2 离加载面2毫米处炸药内的
压力剖面

灵敏度: 0.5 V/div , 扫程: $1 \mu\text{s/div}$

$$E = fE_s + (1-f)E_g \quad (1)$$

$$V = fV_s + (1-f)V_g \quad (2)$$

$$E_s = c_{v,s} T \quad (3)$$

$$E_g = c_{v,g} T \quad (4)$$

$$p_s = \alpha \left(1 - \frac{w_1}{R_1 V_s} \right) \exp(-R_1 V_s) + \beta \left(1 - \frac{w_1}{R_2 V_s} \right) \exp(-R_2 V_s) + \frac{w_1 E_s}{V_s} \quad (5)$$

$$p_g = A \left(1 - \frac{w_2}{n_1 V_g} \right) \exp(-n_1 V_g) + B \left(1 - \frac{w_2}{n_2 V_g} \right) \exp(-n_2 V_g) + \frac{w_2 E_g}{V_g} \quad (6)$$

$$p = p_s \quad p = p_g \quad (7)$$

式中, p 、 V 、 E 分别为压力、比容和比内能; w 、 R 、 α 、 β 、 n 为状态方程参数, 本文用炸药PBX-9404的参数⁽⁶⁾来模拟炸药BO-1; 下标 s 与 g 分别表示炸药和爆轰产物的参量, 无下标参量表示流场中的平均量; A 、 B 为方程系数。这套方程在计算 PoP 图和回爆模型时, 都取得了与其他数值计算模型一致的结果。它的优点是迭代方法简单, 节约机时。

二、回爆波在炸药内部的传播

为了得到回爆波在炸药内部传播的图象, 我们在同样起爆条件的实验装置中, 分别在炸药内不同拉格朗日位置嵌入猛铜压力计, 得到了每个拉格朗日位置的压力随时间变化过程, 并且做了数值模型。实验结果与计算结果见图3和图4。来自飞片后界面的稀疏波进入炸药后, 距离撞击面为 0 、 2 和 3 mm 处的压力计测得的压力剖面图表明, 压力上升缓慢甚至下降, 约 $3 \sim 4 \mu\text{s}$ 后, 有一个明显的压力波向后传播, 它就是回爆波。此外, 实验和计算结果都表明, 回爆波的平均传播速度接近正常爆轰波的传播速度。这与Chick的结果一致。这些结果直接证明了回爆现象的存在。

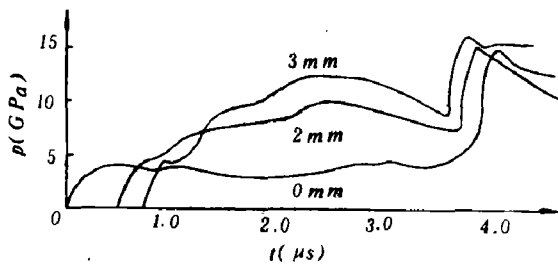


图3 BO-1炸药的拉格朗日压力剖面图
黄铜飞片厚1 mm, 撞击压力3.9 GPa,
图上标出了拉格朗日位置

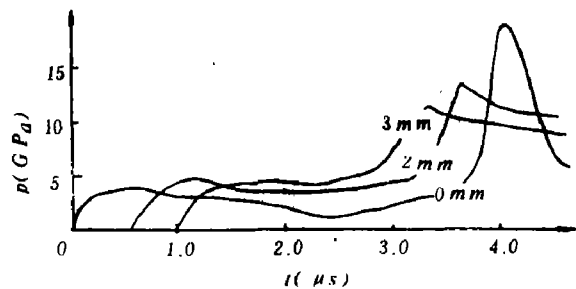


图4 数值计算压力剖面图
撞击压力3.4 GPa, 其他条件同图3,
图上标出了拉格朗日位置。

三、起爆条件对回爆现象的影响

一般说来, 在薄飞片, 弱撞击的条件下, 固态炸药中可能出现回爆波。那么, 初始冲击压力与冲击加载时间怎样影响回爆呢? 本文数值模拟了1 mm铜飞片以不同初始冲击压力起爆炸药BO-1, 得到了回爆波最大相对压力值的变化情况(见图5)。回爆波最大相对压力值为回爆波波阵面压力与爆轰波后最低压力值之差。在一定范围内, 回爆波最大相对压力与初始撞击压力近似成反比关系。进一步观察在不同初始冲击压力下撞击面附近炸药的质量分数随时间的变化情况(见图6), 就容易理解上述规律。首先, 在弱冲击压力下, 回爆波到达以前

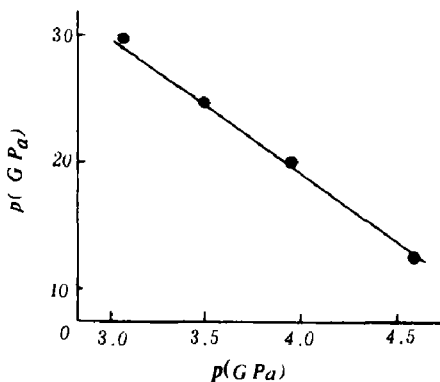


图5 回爆波最大相对压力值与初始撞击压力的关系

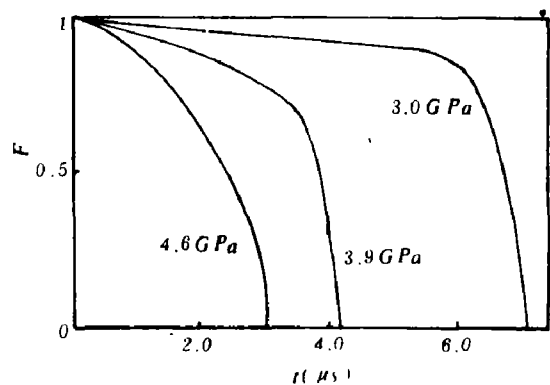


图6 不同撞击压力下撞击面附近炸药质量分数的变化情况

爆轰波阵面后的压力一直较低, 见图2, 炸药的化学反应进展缓慢, 而在回爆波扫过的短时间内, 炸药很快反应完毕。同时释放能量支持回爆波的传播。其次, 较强的初始冲击压力则使炸药反应较快, 支持回爆波的能量相应减少, 这时回爆波比较弱或者不出现。实验结果也证实这一点。当高速薄飞片撞击炸药时, 在压力计测得的压力剖面图中不呈现第二个压力突跃尖峰(见图7)。

初始冲击加载时间对回爆波也有较大影响。如果采用15 mm厚的铜飞片撞击或者采用隔板实验的方法加载, 即使是弱加载, 实验也观察不到回爆波⁽¹⁾。这主要是因为这种实验都属

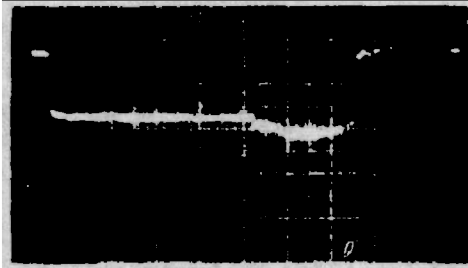


图7 高速薄飞片撞击炸药时, 撞击面处压力剖面
飞片: 0.5 mm 黄铜, 衰减层15 mm 黄铜。
灵敏度: 0.5 V/div 扫程2 μs/div

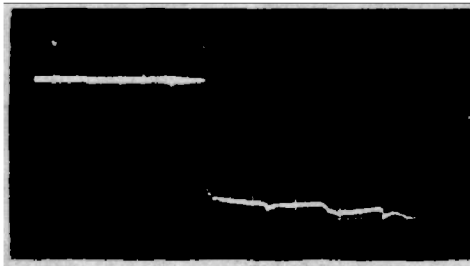


图8 两次冲击炸药时, 撞击面处压力剖面
飞片: 1 mm 有机玻璃和15 mm 黄铜
灵敏度: 200 mb/div 扫程: 5 μs/div

于持续加载, 炸药在较短时间反应完。但是, 如果先用 1 mm 有机玻璃飞片预冲击后, 再用 15 mm 黄铜飞片撞击, 就能观察到回爆波 (见图 8)。图 8 中的第三个压力尖峰即是回爆波到达后形成的压力突跃。第一二个压力突跃分别是有机玻璃飞片、黄铜飞片撞击引起的。这充分说明预冲击压实后的炸药, 其化学反应进展缓慢, 以致回爆波到达后尚有较多的未反应炸药, 由此可见, 必须在起爆面与撞击面之间有较多的未反应炸药, 才能出现明显的回爆波。如果冲击加载时间较长, 或者较强的冲击加载, 起爆面后的炸药也基本反应完了。故回爆波没有形成条件。

四、回爆波的临界线

由前面的讨论可见, 初始冲击压力和加载时间是影响回爆波出现的两个重要因素。本文认为, 对确定的炸药, 一定存在这样一条曲线, 它将回爆区与无回爆区分开, 称之为回爆临界曲线。许多文献指出, 炸药的起爆临界曲线为 $p^m \tau = \text{常数}$ 。我们不妨假设回爆临界曲线也为 $p^m \tau = \text{常数}$ 。这样, 在起爆临界曲线与回爆临界曲线之间的区域就是回爆区。对炸药 BO-1, 用最小二乘法处理数值模拟得到的回爆临界点可得 $n = 4.06$, 常数为 271.03, 图 9 是炸药 BO-1 的回爆临界曲线与实验值比较。回爆临界曲线是判断回爆波是否出现的方便工具, 它对爆轰工程设计以及炸轰学的研究发展都有一定参考价值。本文假定回爆临界曲线是 $p_0^m \tau$ 形式, 这对炸药 BO-1 基本是适合的。对其他炸药, 回爆临界曲线是什么形式, 有待进一步研究。

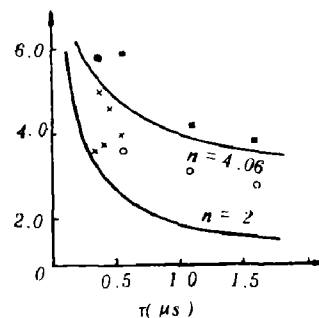


图9 炸药 BO-1 的回爆临界曲线
实验值 ● 无回爆 计算值 ■ 无回爆
 × 有回爆 ○ 有回爆

回爆临界曲线是判断回爆波是否出现的方便工具, 它对爆轰工程设计以及炸轰学的研究发展都有一定参考价值。本文假定回爆临界曲线是 $p_0^m \tau$ 形式, 这对炸药 BO-1 基本是适合的。对其他炸药, 回爆临界曲线是什么形式, 有待进一步研究。

五、结 论

本文的数值模拟及实验工作充分地说明了回爆波产生的条件——在起爆面后尚存一定的未反应炸药。进入炸药的初始冲击波强度及加载时间是影响回爆波出现的两个较重要的因素。本文所得的回爆判据对于回爆波的进一步研究提供了一个较方便的工具。目前的理论, 实验工作都表明回爆波有类似爆轰波的特性——传播速度接近爆速, 波阵面到达后, 未反应的炸药在较短的时间内反应完毕。它显然不同于炸药中的 Дремин 燃烧现象。但是, 回爆波前是不稳定的部分反应区, 所以回爆波不可能稳定地传播。

参 考 文 献

- (1) Ding, J. et al., *Inte. 8th Symp. Detonation*, Vol. 1, Preprint (1985), 533.
(2) Chick, M. C. et al., *Propel. Expl. Pyro.*, 8 (1983) 121.
(3) Westrn, A. et al., *Inte. 8th Symp. Detonation*, Vol. 1, Preprint (1985), 285.
(4) 苏林祥等, *爆炸与冲击*, (2)(1981), 12.
(5) Cochran, S. G. et al., *UCID-18024*(1979).
(6) Lee, E. L. et al., *Phys. Fluids*, 23(12)(1980).

STUDIES OF RETONATION PHENOMENA AND ITS CRITICAL CURVE

Deng Quannong Hu Dong Ding Jing

Su Linxiang Gui Zhizhen

Abstract

Propagation of retonation waves in explosive is inscribed by the technique of manganin gauge in this paper. It directly confirms the existence of retonation phenomena. At the same time, the influence of different initiation conditions on the presence of retonation was studied by means of an one dimensional lagrangian numerical code with chemical reaction. In this paper, it also proposes that there exists a retonation critical curve for a given explosive:

$$p_0^n \tau = \text{Constant}$$

where p_0, τ are initial shock pressure into the explosive and the duration of shock loading, respectively. The curve separates the retonation region with the non-retonation region. The retonation critical curve by numerical modeling for BO-1 explosive and some partial experimental results are given.