

铸装 B 炸药的隔板实验数值模拟

胡湘渝¹ 黄风雷² 张德良¹

1 中国科学院力学研究所, 北京, 100080

2 北京理工大学, 爆炸与安全国家重点实验室, 北京, 100081

摘要 本文对点火与增长化学反应速率模型进行了改进, 采用 DYNA2D 程序对铸装 B 炸药的隔板实验过程以及热点的作用进行了二维数值模拟, 并和实验结果进行了对照。

1 引言

隔板实验作为研究炸药二维冲击波起爆重要的实验方法而得到广泛应用。在作为冲击波源的主发装药和被发装药之间, 放上惰性隔板如金属板或塑料片, 研究二维冲击波起爆过程, 并通过改变隔板厚度测定使被发装药产生 50% 爆发率时的隔板厚度来评价被测炸药的冲击波敏感度。

本文在前人提出的化学反应速率方程基础上进行了改进, 配合改进的化学反应速率方程, 采用 DYNA2D^[1] 程序对铸装 B 炸药的隔板实验过程进行了二维数值模拟, 并和实验进行了对比和分析。

2 改进的反应速率方程

Lee-Tarver^[2] 的点火与增长模型是基于唯象理论之上的, 它将冲击波起爆过程分为几个阶段, 并对每一个阶段给出一个简化的模型描述。一是点火阶段, 在这个阶段中主要是由于冲击波的作用产生了热点, 二是一个增长阶段, 在这个阶段大规模的化学反应开始发生,

本文对该模型作出修正, 根据对隔板实验的铸装 B 炸药的起爆机理分析得出, 非均质炸药起爆的最后阶段应当和均相炸药起爆相似, 根据这一原则, 方程的形式变为

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)(\eta-a)^4 + G_1(1-\lambda)^{2/3}\lambda^{1/3}p + G_2(1-\lambda)\lambda p^2 \quad (1)$$

第一项仍为热点反应项, 将其处理为体积燃烧, 热点反应包括两种可能的反应, 即体积燃烧和表面燃烧。当入射冲击波压力为本文实验压力 2.5-4GPa 时, 可以认为体积燃烧占主要部分。第二项为表面燃烧增长项, 采取 Lee-Tarver 的三项点火与增长模型的方案^[3], 为简单的向内球形颗粒的燃烧模型。第三项为体积反应项 (由冲击波和反应产物的整体加热引起), 仍然采用压力指数形式。本模型采用两个开关参数 a 和 $F_{i,max}$, 当 $\eta-1 < a$ 和产物体积分数大于 $F_{i,max}$ 时, 第一项为零。其他项只在 $\eta-1 < a$ 时为零。

3 状态方程的选定和初始单元划分

本文隔板实验数值模拟的材料模型和状态方程为: 主发药柱为压装 8071, 采用 JWL 状态方程, 有机玻璃隔板采用各向同性弹塑性流体模型; 被发药柱铸装 B 炸药的产物状态方程采用 JWL 状态方程。

在进行数值模拟时, 被发药柱采用高精度单元划分 (1.0mm x 1.0mm), 为了保证主发药柱和隔板轴向压力的精度, 主发药柱和隔板轴向采用 1.0mm, 径向采用 2.0mm 的单元划分。如图 1 所

示, 为当有机玻璃隔板厚度为 52.0mm 时, 在零时刻各材料所处的状态。

4 热点作用的数值模拟

为了更好的了解冲击波起爆过程的初、中期情况, 有必要对单独模拟热点反应对冲击波的作用。将前文所述的反应速率方程的体积反应项即第一项设置为零, 并令前两项反应的最大体积分数为 0.1。图 2、3 为当隔板厚度为 52mm 时, 计算在时间为 $t=20.0, 22.0, 24.0, 28.0$ 时的压力增长变化的分布图, 由图可知冲击波在 $t=20.0\text{ms}$ 时已进入被发药柱, 在 $t=22.0\text{ms}$ 后, 压力就不再升高, 并保持稳定传播, 可见热点反应可支持的反应冲击波的压力应当为 4.3GPa。如果入射冲击波高于该值, 则热点反应不能加强入射冲击波的速度而只能由反应区的表面燃烧和体积燃烧增强冲击波强度, 冲击波的起爆过程将接近均相起爆的规律, 不过因为边、后侧稀疏波的作用, 起爆点将不在入射端面, 而要向下游推移, 至于要向下游推移多少, 将取决于边、后侧稀疏波的作用、反应区燃烧的强度和入射冲击波强

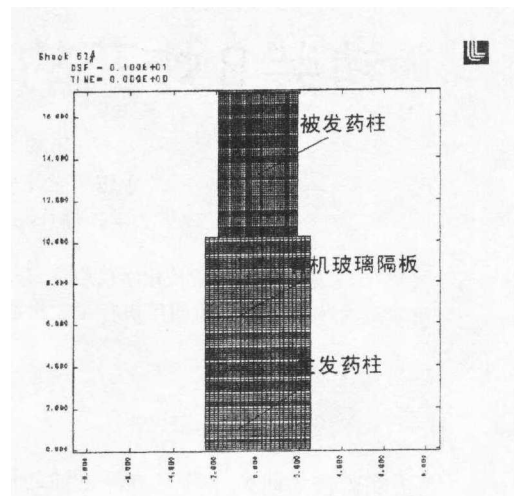


图 1 隔板厚度为 52mm 时, 数值模拟的初始单元划分

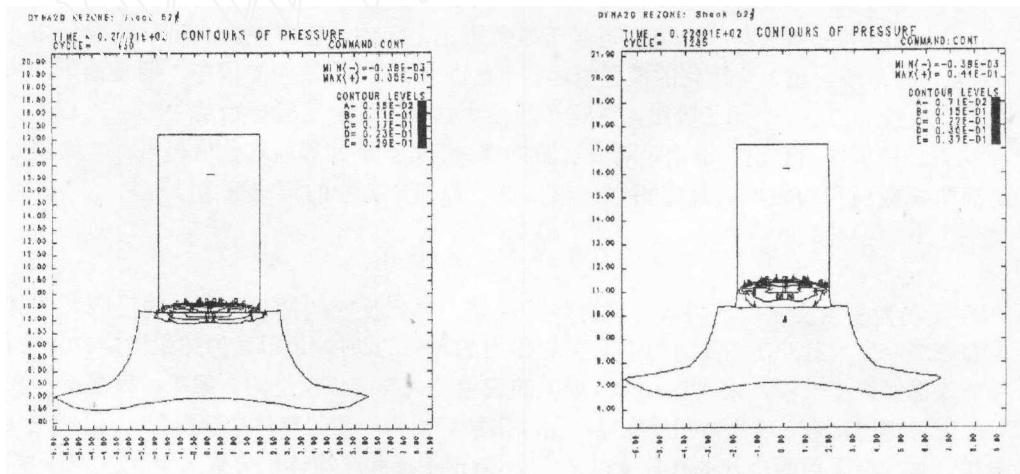


图 2 只考虑热点作用时, $t=20.0, 22.0\text{ms}$ 时的压力增长变化的分布图

度之间的关系。另外, 如果将热点反应的最大体积分数增加, 即对应于压装或散装的情况, 热点反应作用将进一步增强, 所以在这种情况下当入射冲击波的强度相同时, 冲击波起爆的差别主要和热点的作用有关。

从图 4 的流场轴心不同拉氏位置压力变化历史, 可以看出此反应冲击波的速度为 5000m/s。另外, 图 5 为只考虑热点作用时的被发药柱表面不同拉氏位置压力变化历史, 注意到表面波的速度和压力都保持不变, 表面波的速度为 4000m/s, 比实验结果^[4]要高一些。

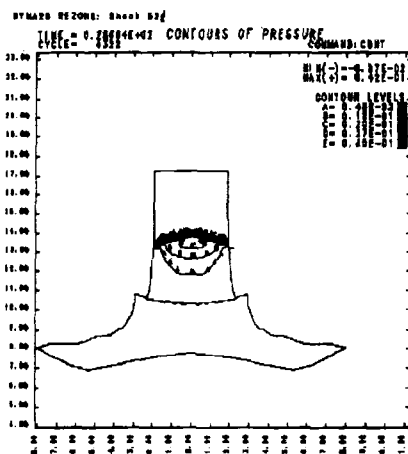
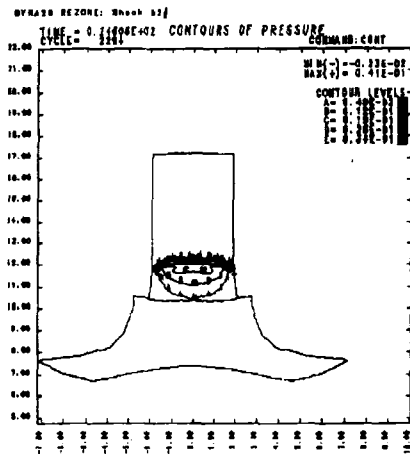


图3 只考虑热点作用时, $t=24.0, 28.0\text{ms}$ 时的压力增长变化的分布图

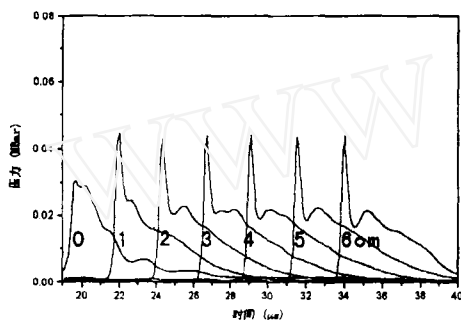


图4 只考虑热点作用时, 被发药柱流场轴心不同拉氏位置压力变化历史

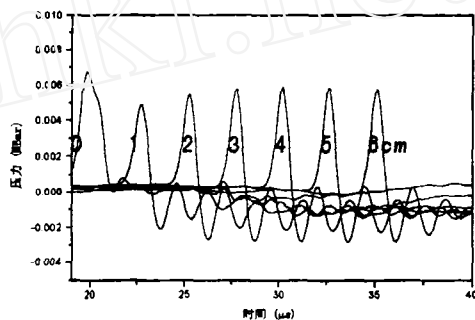


图5 只考虑热点作用时, 被发药柱表面不同拉氏位置压力变化历史

5 隔板实验全过程的数值模拟

如图6为当隔板厚度为52mm时, 计算在时间为 $t=22.0, 24.0, 26.0, 28.0, 30.0, 32.0$ 时的压力增长变化的分布图, 稳定爆轰压力约为30GPa, 和实验结果接近。图7为轴心不同拉氏位置压力变化历史, 注意到在深度为3, 4, 5cm处, 压力出现了双尖峰的情况, 下游的尖峰压力约为5.0GPa, 而上游的尖峰压力迅速增加, 很快超过下游尖峰, 压力比热点反应所能支持的反应冲击波的压力高, 通过和前述的热点作用数值模拟结果比较, 可知此压力尖峰由反应速率方程第三项(体积反应)引起, 当这个压力尖峰追上热点反应尖峰时, 稳定爆轰实现, 正好和本文实验的分析结果一致。另外, 下游压力峰在深度为3cm处压力正好超过热点反应冲击波尖峰, 因此可以认为是在这个位置实现起爆, 这个值和实验的结果接近。通过和文献^[6]的铸装药隔板实验拉氏压力量计的结果对比, 图7实际上描述了不同拉氏位置压力增长的较精细的结构。

不过, 本文的数值模拟中没有出现回爆现象, 这可能是体积反应项没有采用阿累尼斯方程, 而仍然是压力指数燃烧方程的原因, 在冲击波起爆的初期的体积反应速率比实际的要高, 从图7

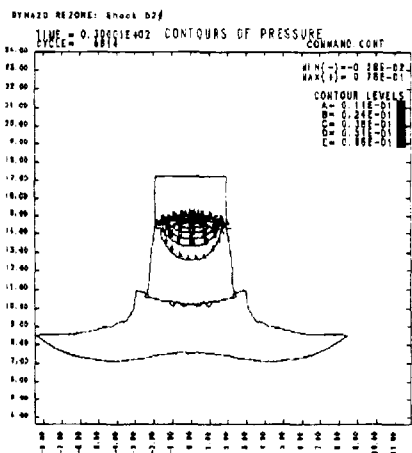
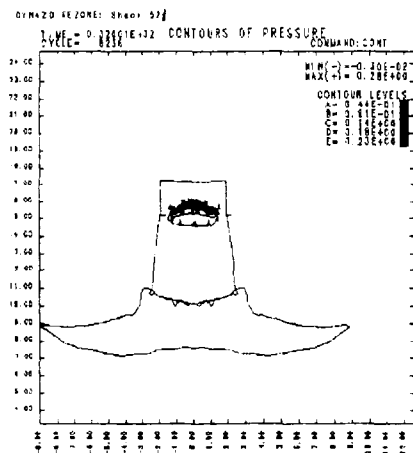
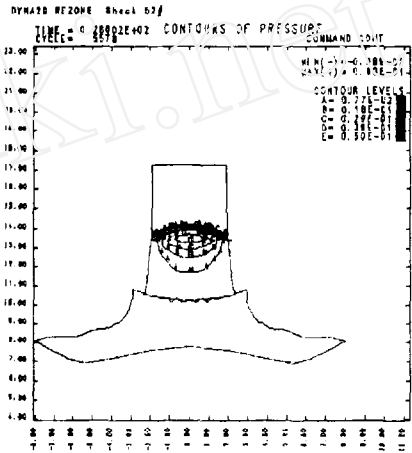
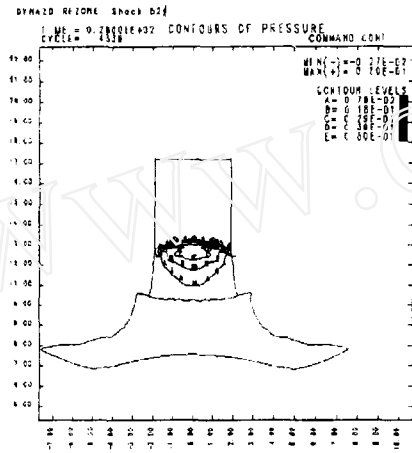
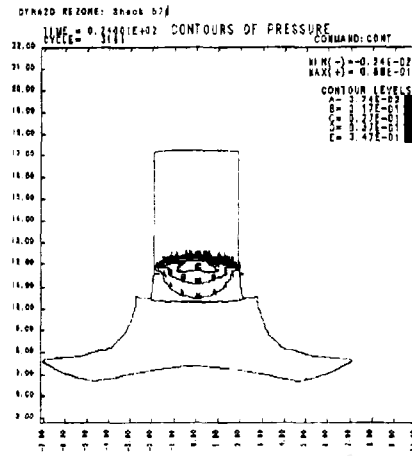
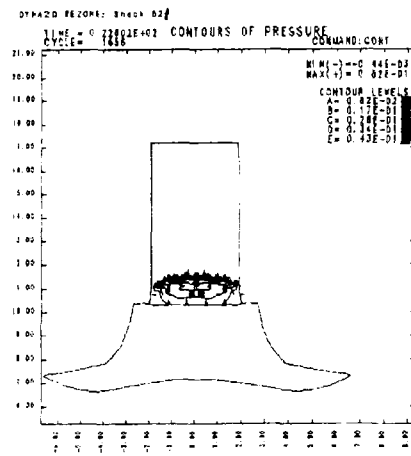


图6 冲击波起爆过程中, $t=22.0$ 至 32.0 ms 时的压力增长变化的分布图

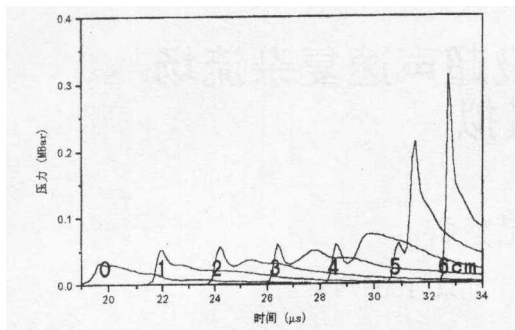


图7 冲击波起爆过程中, 被发药柱表面不同拉氏位置压力变化历史

表1 不同隔板厚度情况下, 数值模拟的起爆距离和实验结果的对比

L (g) (规格)	X_0 (规格)	T_0 (μ s)	X_1 (规格)	T_1 (μ s)
50	22	8.12	23.0	7.0
52	29.2	11.05	30.0	11.0
53	43	15.84	37.0	13.0
54	77	28.45	68.0	25.0
55	未爆	-	未爆	-

中热点反应冲击波的压力高于不考虑体积反应的情况也可以看出, 而且, DYNA2D 是一个数值粘性较大的程序, 然而由于存在强冲击波间断和快速增长的化学反应, 以及时间步长的要求, 人工粘性又不可能太小。看来, 要得到更加精确的起爆图象, 采用优秀算法是一个必不可少条件。但是仍然可以看到冲击波起爆最早发生在轴心部位, 并且快速向两侧扩展, 二维效应十分明显。

表1 是在不同隔板厚度情况下, 数值模拟的起爆距离和实验结果^[4]的对比, 发现在隔板厚度较长时, 计算值要比实验结果要小, 这可能是由于反应速率方程第三项采用了指数燃烧的形式, 增加了起爆初期的体积反应从而提前起爆的结果, 在隔板厚度为 55mm 时, 计算采用实验中被发药柱长度 100mm, 当反应冲击波传至被发药柱另一端时, 炸药仍未爆轰。

参考文献

1. R. G. Whirley, Engelmann, B. E. And Hallquist, J. O., DYNA2D. A Nonlinear, Explicit Two-dimensional Finite Element Code For Solid Mechanics, UCRL-110630, April, 1992.
2. E. L. Lee and C. M. Tarver, Phys. Fluid, 23,12, 12, 2362, 1980.
3. M. J. Murphy and E. L. Lee, Composition-B Initiation Report. UCRL-ID-118300, 1994.
4. 胡湘渝, 凝聚炸药二维冲击波起爆研究, 博士论文, 北京理工大学, 1999。
5. 浣石, 非均质炸药冲击波起爆和二维稳态爆轰研究, 博士论文, 北京理工大学, 1988。