

# 球面爆轰波的数值模拟

肖作智

(1984年8月20日收到)

本文介绍了一种用示踪点的移动来确定球面爆轰波位置的 HELP 数值计算的近似方法。通过大锥角翻转弹丸的算例,说明这种方法是一种行之有效的数值模拟方法。

## 一、前言

在众多的数值模拟中,对于爆轰过程的解决集中在状态方程中。当网格中有三种材料成分:炸药,它的产物和第三种不带反应的固体或流体,计算状态方程将假设炸药和它的产物是温度和压力都平衡,而对于第三种非反应物质只有压力平衡。状态方程的子程序将要求输入各成分的比容、内能和质量分数,子程序经叠代后输出压力及各个成分各自的温度、能量和密度。

对于聚能装药的研究来讲,我们所关心的并不是炸药变成产物的各个成分,而要求确定出各个时间的爆轰波的具体位置。对于一般的聚能装药,如果起爆点位置确定后,作出球形爆轰波形的假设是对的(通常只含一种主炸药)。这样,问题就归结为求出每个时刻球形波所在的位置。

文献〔1〕、〔2〕中提供的确定爆轰波位置的方法似乎比较粗糙。因为提出球形波的假定,并不能完全解决确定爆轰波介面的问题,因为爆轰波并不完全是球面的。另外用系数来控制各个格子是否起爆是不够准确的。

这里,我们以大锥角翻转弹丸为例,提出一个用示踪点的移动来确定爆轰波位置的初步方法,仍近似认为爆轰波是球面的,另外产物状态方程用了理想气体状态方程。

## 二、HELP编码计算中爆轰波处理方法的探讨

HELP 编码能够对二维流体、弹塑体的非定常运动进行数值模拟,特别是用无质量的示踪点布置在材料块的边界以便能够准确地计算出不同时刻材料块的变形过程。这对我们研究聚能破甲弹中球面爆轰波的具体位置带来很大的方便。我们以大锥角翻转弹丸为例进行说明。假设大锥角罩(铁)为材料块1,没有起爆的炸药为材料块2,起爆后的炸药(爆轰产物)为材料块3,空块为材料块4。那么,每一时间步长,我们可以精确地算出各材料块之间示踪点的位置,而材料块2和块3之间则应该是“球形”交界面,我们可以在球形交界面的圆弧

上布置一定数量的示踪点, 这些示踪点的位置无疑是此刻球形爆轰波阵面的位置。对于交界面上的混合格可用部分体积计算出所需要的量, 对于交界面以内的纯格要做好从材料块 2 到块 3 的转换工作。这些想法的细节, 我们将在新设计的爆轰子程序 EXP 和赋格子量子程序 FGL 中详述。

### 三、球面爆轰波形的确定

图 1 为大锥角翻转弹丸计算示意图。其中材料块 1 为大锥罩(铁), 材料块 2 为主装药, 材料块 3 为爆轰产物。现在, 用一个二维数组  $(X, Y)$  把各个已知点的坐标给出:

$A: (0, AC(9)), B: (AC(2), AC(9)), C: (AC(2), AC(6)), D: (AC(2), AC(1)), E: (0, AC(3)), F: (0, AC(5)), H: (AO, BO)$ 。其中  $AO, BO$  和数组  $AC(9)$  是用数据文件送进的已知数。

现在的问题是要在  $AB$  线上任找一点  $H$  (其位置由  $AO, BO$  给定), 以该点为圆心作圆。圆的半径  $R_{ii}$  应当是炸药的爆速  $D$  和传爆时间  $T$  的乘积, 由于我们设计的爆轰子程序 EXP 要被子程 IN-FACE 调用, INFACE 又分子步 CYC, 所以  $R_{ii} = (T + (CYC + 1) \cdot SDT) \cdot D$ 。圆心和半径确定后, 圆的方程为:  $(X - AO)^2 + (Y - BO)^2 = R_{ii}^2$ 。这样, 我们可在主装药内任找一点, 只要给定  $AO, BO$  和炸药的爆速  $D$  以后, 即可确定不同时刻的球面爆轰波的位置。

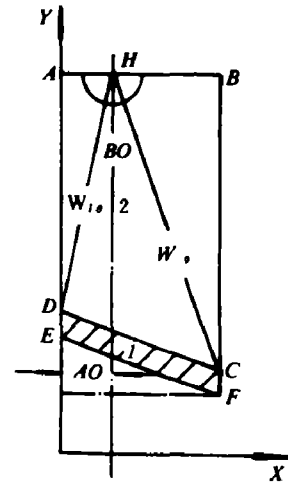


图 1 大锥角弹计算示意图

### 四、爆轰子程序 EXP 的设计

由图 1 看出, 假设  $ABCD$  为大锥角弹丸的主装药, 那么, 从  $AB$  线上任何一点作圆, 这个圆与四边形  $ABCD$  只可有两个交点, 而且这两个交点只能在材料块 2 的示踪点连线  $DCBAD$  上。所以, 现在从  $D$  点出发 ( $D$  点开始是材料块 2 的第一示踪点, 当  $R_{ii} > W_{10}$  时, 则材料块 2 的第一示踪点将在  $DC$  线段上), 沿着  $DCBAD$  寻找圆与直线的交点, 找到交点后, 分别记下交点所对应的材料块 2 的示点号码  $IK(1)$  和  $IK(2)$  及其坐标位置  $TX X$  和  $TY Y$ 。圆的方程与直线方程联立求解, 即可解出二者的交点来。

图 2 是不同时刻球面爆轰波所在位置图。上面说过, 从  $D$  点出发, 沿着材料块 2 上的示踪点去寻找交点。因为块 2 上的每一示点  $M$  所

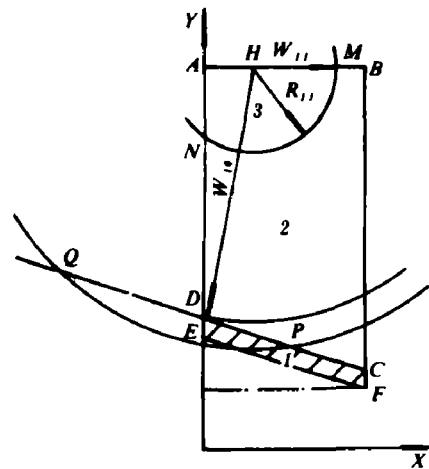


图 2 不同时刻爆轰波所在位置



上(图3),而当 $R_{11} = W_{10}$ 时,第一点 $M$ 是在 $DC$ 线上(图4),所以,这两种情况示点的整理是有所不同的。

参看图3,当 $R_{11} < W_{10}$ 时,材料块1的示点数和示点位置全不动,而材料块2示点则分布在 $DCMND$ 上,材料块3的示点分布在 $NMBAN$ 上,材料块4的示点分布在 $ABMCFEA$ 上。随着球面爆轰波的推进,材料块2的示点数是逐步减少的,材料块3的示点数是逐步增加的,材料块4的示点数目略有增减。因为 $M$ 点是材料块2和材料块3的交界点,在处理材料块4的示点时,这一处的示点应当是光滑连续的。

参看图4,当 $R_{11} = W_{10}$ 时,上述规律仍然成立,但除材料块4的处理和上述相同外,其余各块材料示点的处理又有所不同。材料块1的 $DC$ 边,由于和球形波相交而多出一个示点,并且示点的位置需重新整理。材料块2的示点分布在 $MCNM$ 上,起点不再是 $D$ 点。材料块3的示点相应地分布在 $DMNBAD$ 上。很显然,这种情况下,材料块2和材料块3的示点数和示点位置需要重新整理。

当爆轰波到达图4中的 $PQ$ 位置时,下一步有可能要跨出 $C$ 点,那时也就求不出爆轰波与 $BC$ 和 $DC$ 的交点了,而材料块2仅四个或略多于四个示点包围,这时,在EXP中应加进这样一段处理:把块2的几个示点取消,把块3的示点重新整理,取消材料块2的质量、比内能等。

## 五、赋格子量子程序FGL的编制

在问题形成子程序SETUP中,材料块3还没有形成,但是,所选用的数组维数必须给材料块3(爆轰产物)留一个位置。因为当 $T = 0$ 时,从起爆点才开始引爆炸药,所以,只好假设此时材料块3虽然存在,而不占有格子数,也就没有格子量。当在INFACE中调用爆轰子程序EXP后,出现了第一批属于材料块3的格子。因为其它几块材料的格子量在SETUP子程序中已经安排好了,而材料块3的格子量必须在其出现以后在INFACE子程序中进行安排。

每计算一层(每一时间步长),必定有一批材料块2的格子转变成材料块3的格子。我们知道,炸药的初始比内能和爆轰产物的初始比内能之间相差一个炸药的爆热 $Q$ ,所以在子程序FGL的开始,我们用一个赋值语句表示: $Q = SSIEN(3) - SSIEN(2)$ ,材料块2和材料块3的初始比内能已经在SETUP中从数据文件里读出。

下面的工作是从所要计算的格子中把属于材料块3的纯格和混合格都要找出,寻找的顺序是 $I = 1, IMAX, J = 1, JMAX$ ,即从左到右,从下到上去寻找,找到以后,要把格子插旗: $MFLAG(K) = 3$ 。混合格的处理要比纯格繁杂得多,因为这些混合格里有几种不同的形式(图5)。形式虽不同,但都是从材料块2转成材料块3的问题,即有多少体积的块2材料转换成多少体积的块3材料。在此之前,我们已调用了部分体积子程序FRAVOL,所以每个混合格里每种材料的部分体积 $FRAVOL(N, M)$ 已经算好,有了部分体积后,就可以重新计算材料块2和块3的质量、密度和比内能等。最后,对所有格子的总能 $ESUM$

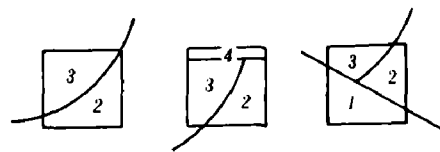


图5 混合格的几种形式

和理论能量  $ETH$  进行计算, 以使能量守恒得到保证 (不致因材料块 2 转成材料块 3 而使能量守恒被破坏)。

## 六、HELP 流程的安排

根据爆轰子程序 EXP 的设计和赋格子量子程序 FGL 的编制, 整个 HELP 流程必须“配合行动”, 才能达到予期的目的, 也就是说, 各个子程序要采取相应的措施, 作出局部改动, 使程序能顺利进行。

在问题设置子程序 SETUP 中, 因为原先只考虑了三块材料 (包括空块) 的情况, 所以必须改成适合四块材料进行计算的 SETUP 子程序。这个改动还是比较容易实现的, 只需在 SETUP 中出现  $N = 3$  的语句中改为  $N = NVOID$ , 再在读语句中把  $NMAT = 2$  改为  $NMAT = 3 (NVOID = NMAT + 1)$  即可。SETUP 中的读语句也要重新考虑, 加进适当的数据, 例如炸药的比内能、密度、爆速等, 这样, 需要重新编制一个数据文件。

子程序 CDT 中的几处改动是必要的。因为爆轰产物在状态方程中当作 ( $N = 20$ ) 理想气体处理, 现在要进行的计算是将炸药编为  $N = 21$ , 而炸药在未变成爆轰产物前, 压力只能取为零, 所以用判断语句  $IF (N \cdot EQ \cdot 21) P(K) = 0$ , 以避免在调状态方程时算出错误的压力。另外, 材料块 3 (爆轰产物) 在时间  $T$  为零时本应该不存在, 因为  $R_{ii} = D * T = 0$ 。参看图 1, 我们认为, 当  $T = 0$  时,  $R_{ii} = 0$  是不好处理的, 因为在爆轰子程序 EXP 中, 要用材料块 2 上的示点到起爆原点的距离  $W_{ii}$  与爆轰波半径  $R_{ii}$  进行比较来确定球面波与直线的两个交点, 那么  $R_{ii} = 0$  时, 这一步就进行不下去了。我们不妨在  $T = 0$  时, 让球面波先跨出近三个格边的长度, 也就是说, 当  $T = 0$  时, 球面波就已形成, 这样处理, 能使计算顺利进行, 对计算精度影响不大。在子程序 CDT 中, 当计算到 DT 以后, 可以加进一句:  $IF (NC \cdot EQ \cdot -1) DT = 3 * DXF / D + DT * (DINT (CYCMX) - 1) / DINT / CYCMX$ , 同样的语句也要加在子程 INFACE 和 EXP 中, 都是为了首先划定一个很小半径的爆轰波来。

新设计的爆轰子程序 EXP 加在什么地方合适是要仔细考虑的一个问题。考虑到子程序 INFACE 是处理交界面问题的, 它是分子步进行的, 最好每进行一子步整理一次示踪点, 所以, EXP 加在 INFACE 子程序中是比较合适的。INFACE 在开始分成子步后, 每一子步先移动示踪点 ( $CALL MOVTGR$ ), 再调部分面积 ( $CALL FRASV$ ), 在部分面积中计算部分体积 ( $CALL FRAV$ ), 建立新的混合格 ( $CALL NEWMIX$ ), 回到 INFACE 后再找负旗号格, 然后进行予置再置等一系列的计算内容。我们开始打算在 INFACE 一开始就调用 EXP 子程序, 建立好每材料块的示踪点后就去调移动示踪点子程序, 在移动示踪点子程序中加上一系列的判别语句, 分别对各块示踪点的移动进行一些限制, 也就是说, 强迫一些示踪点不需移动, 各材料块示点的移动必须“同步”进行。这种作法比较麻烦, 而且也比较花费机时, 我们曾经调试通过。后来, 考虑到这种作法没有必要, 干脆让示踪点全部移动, 然后再建立各材料块的示踪点, 即在 INFACE 子程序中, 先调移动示踪点子程序, 再调爆轰子程序, 接着再调部分面积子程序。这样, 在 INFACE 每一子步内让示踪点全部移动后, 在一个新的时间步长内在炸药中作园, 再设法使园与直线的交点与原来的第二、四材料块上的示点光滑地连接起来, 这种方法很简便合理, 容易调通。

赋格子量子程序 FGL 加在什么地方也很关键。因为 HELP 流程在过了零层以后不再走 SETUP 子程序了, 而材料块 2 变成材料块 3 是在 INFACE 中的子步里完成的, 每完成一次转化必须重新整理格子旗号并赋给所需的格子量, 在全场作能量守恒的计算。根据这种设想, 仍把 FGL 加在 INFACE 子步循环体内, 只是应注意, FGL 子程序必须加在给格子插上负旗号之后, 否则能量不守恒。

对 HELP 流程的各个细节都要考虑到。BLOCK DATA 中要多加一个炸药的初始密度值, 以使  $RHOZ(21) = 1.68$ 。主程序和所有子程序前面的插入部分要加上所要通用的量, 增加的量必须在 LAST 之前, 注意换行。为了作好材料块 2 到材料块 3 的转化, 在 SETUP 中必须在调部分面积 (计算出部分体积) 之后, 将块 2 的部分体积进行存储, 在  $M$  从 1 到  $NMXCLS$  的循环中, 使  $FRAVOB(M) = FRAVOL(2, M)$ , 而在 NEWMIX 中注意要把  $FRAVOB(M)$  置成 0。其它细节不一一详述, 在程序中都有记载。

## 七、算例

新设计的程序在 7760 机上边调边改。子程序 EXP 和 FGL 除出现一些语法问题外, 基本思路是对头的。调示工作上主要的麻烦仍在示踪点上, 因为在 SETUP 中把示踪点布置好, 一旦走完 HELP 流程一遍以后, 各材料块的示踪点就有不重合的危险, 所以, 每走几层就得修改 EXP 中部分语句, 以保证示点的正确位置。

共进行了 105 层的调试。就球面爆轰波的数值模拟而言, 把计算结果进行整理和分析, 详细的结果, 计算机每隔 10 层作了长打印, 这里主要以图示的方法进行阐述。

计算层次和时间的对应关系如表 (一)。

表 1

层 次	10	20	30	100	105
时间(秒)	$1.1832 \times 10^{-6}$	$1.8908 \times 10^{-6}$	$2.6406 \times 10^{-6}$	$8.7906 \times 10^{-6}$	$9.2071 \times 10^{-6}$

图 6 ~ 图 9 给出了不同时刻各材料块的变形轮廓图。这些图是按照计算机打印出的各材

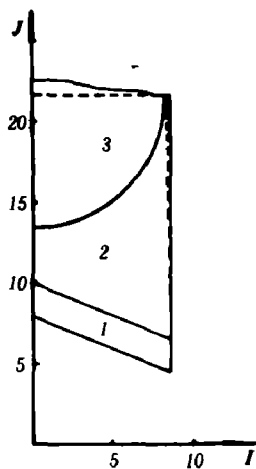


图 6 10 层的结果

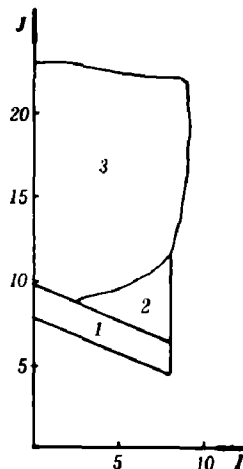


图 7 20 层的结果

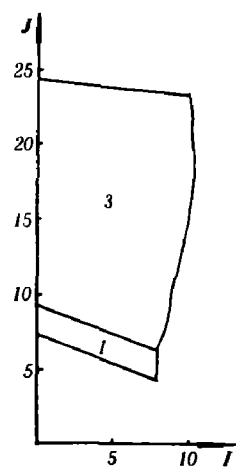


图 8 30 层的结果

料块上示点的  $TX$  和  $TY$  两坐标点绘制的。要研究的对象是当大锥角装药中心端点起爆后，球面爆轰波的传播过程和药型罩的变形过程。

图 6 中的虚线是所选装药结构的初始轮廓。起爆点选在  $J = 21$  处。当起爆后经过了 1.1832 微秒 (10 层) 时，球形爆轰波已传到装药的右上端面，这时所形成的爆轰产物开始上移，炸药的右端面基本上没动，只是受到爆轰波的作用，右上角开始向右倾斜一点 (小数点后两位数字的量级)，药型罩没有变化。图 7 表示爆轰波已传播到药型罩的一小段距离，此时爆轰产物开始向上向右膨胀，在炸药中仍以球形向下推进，很明显地看到，受到爆轰产物作用的一小段药型罩上表面已开始了不太明显的变形。图 8 是炸药已经完全爆轰完毕时的情形，这时材料块 2 已消失 (爆轰完毕)，爆轰产物开始完全作用在药型罩上，同时仍在向上向右飞散。图 9 是药型罩到 105 层时的变形图。由大锥罩压跨时的 X 光照片看，药型罩的上表面变形计算和试验值比较一致，而药型罩的下表面变形计算的结果不够明显。需要指出的是，图 9 的药型罩体积已比初始体积胀大了相当一部分，在计算机打印的数据上表现在药型罩的材料密度上，此时整个药型罩的密度全部降低，最甚者达初始密度的 (1/10)，这是需要解决的问题。

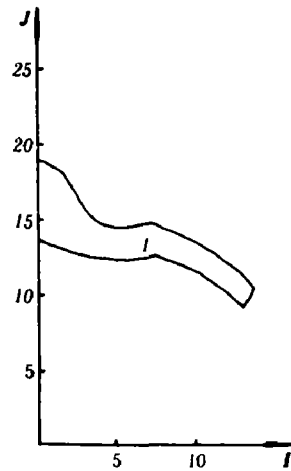


图 9 105 层的结果

球形爆轰波的数值模拟方法能使我们每一时刻的爆轰产物内压力和质点速度分布有一个很直观的印象。图 10 是对应 20 层的结果 (图 7)。当爆轰进行到 1.89 微秒 (20 层) 时，爆轰波已开始扫过药型罩上表面的 (1/3)。我们取第一列 ( $I = 1$ ) 靠近轴的所有格子的压力和轴向速度作成图 10。考查对称轴  $J$  上的数值，当  $J = 10$  时，对应药型罩的尖端点，当  $J = 21$  时，对应起爆点。此时爆轰产物内压力场的分布很明显， $J = 10$  时，药型罩尖端点受到脉冲高压 ( $P = 2.118 \times 10^{11}$  微巴) 的直接作用，然后呈指数曲线规律沿着轴线向上 (近似地看作自由面) 衰减到零。而爆轰产物内速度场的分布却要复杂一些，由图 10 看出，当  $J = 16.5$  时为分界线，当  $J < 16.5$  时，产物轴向速度  $U$  为正值，即向上飞散，当  $J > 16.5$  时，产物的轴向速度  $U$  为负值，向下飞散。图 10 中的虚线是我们假设的理论直线，其表达的意思是：一端引爆后，爆轰产物作一维飞散时其质点速度呈直线衰减规律。由此看出，当球面波扫过炸药后，靠近轴线的产物速度分布规律和一维飞散规律近似。当  $J = 16.5$  时，产物质点虽然向下移动，但由于受到药型罩顶端的阻挡而慢慢减速直到停止。由此可见，炸轰产物内这种压力和速度场的分布规律对药型罩的变形是比较有利的。

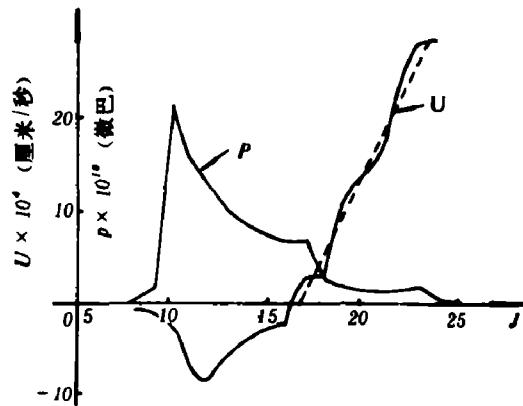


图 10 靠近轴一系列产物内压力  $P$  和轴向速度  $U$  的分布

### 八、结语

在用瞬态爆轰假设对大锥角翻转弹丸进行

数值模拟时发现, 计算值与试验值对比误差较大, 使人很怀疑计算值的真实性。为此, 我们查实了一些文献, 一致认为用球面爆轰波作为聚能破甲弹中的爆轰波形是可行的, 难点是作了近似计算, 即把定量和材料块2的格子数在一个时间步长内转化成材料块3的格子数, 这样作很不准确。我们把HEL P程序的SETUP“标准”化以后, 也就是说, HEL P程序能计算部分体积后, 我们就可能实现精确模拟球面波的想法。用HEL P程序在边界设置示踪点的特点, 每一时间步长内整理两次各材料块的示踪点的办法应该说是比较精确的, 因为每一示踪点的 $X$ 、 $Y$ 坐标值都精确到 $10^{-6}$ 左右, 而且示踪点可以加密, 因此所组成的各材料块应该是很准确的。交界面上的示踪点都是绝对重合的, 调试中 $\heartsuit$ 现, 如果有一对示踪点在尾数不重合, 那么, 到后来几层会导致全部示踪点乱套而使计算出错停机。

用示踪点的移动来确定球面爆轰波位置的方法是我们对爆轰波进行数值模拟的一种尝试。对聚能破甲弹来说, 如果带有隔板装药, 那么, 起爆点就会分主次, 起爆点位置就会变化, 甚至会出现球面波的正交, 这都是本方法需进一步完善的地方。

#### 参 考 文 献

- [1] Hageman, L. J., et al., AD-BO 15343 (1976).
- [2] Gittings, M. L., AD-AO 23982 (1975).

## NUMERICAL SIMULATION OF SPHERICAL DETONATION WAVES

Xiao Zuozhi

#### Abstract

In this paper a preliminary numerical simulation method of how to determine the spherical detonation wave position with moving tracer particles is introduced. Through sameple calculation of wide-angle shaped charge turn projectile, this method shows its effectiveness in nmerical simulation.