

# HELP程序模拟炸药与固体相互作用的研究

殷致远 封加波

(1984年10月23日收到)

本文描述了用HELP程序模拟稳定爆轰时出现的几个问题。经过适当的处理,得到了满意的结果。我们还分析和研究了产生空格的原因,提出了消除空格的方法。这种方法是有用的。

## 一、序 言

HELP程序是一个用途广泛的二维Eulerian程序,近年来在我国已为愈来愈多的力学工作者所重视。我们得到的是文献〔1〕、〔2〕所发表的1971年版本,是一个早期的程序。其功能上尚有欠缺的地方,处理上仍有不足之处。在对力学问题作数值模拟时,它的应用仍受到相当的限制。

本文所述问题是对1971年版本的程序作了一些修改和补充,使之能算带有炸药的问题。第二节中描述了HELP程序用于模拟稳定爆轰时出现的几种情况,提出了解决办法,并给出了算例。第三节研究了自由面的运动与产生空格的关系,修正了在 $ox$ 轴上边界条件的处理,从而消除了由于边界条件处理不当而产生的空格。

## 二、HELP程序应用于稳定爆轰的数值模拟

对稳定爆轰波的传播作数值模拟时,通常用两种方法。其一是C-J体积燃烧法。化学反应能按燃烧体积对C-J体积的份额加到已压缩的网格内。例如,对于爆轰产物按 $\Gamma$ 定律给出的状态方程而言,网格 $K$ 中炸药的压强

$$P = (\gamma - 1)\rho E \delta \quad (1)$$

其中 $\rho$ 是炸药密度, $E$ 是炸药比内能, $\gamma$ 为常数, $\delta$ 为燃烧函数

$$\delta = (V_0 - V)/(V_0 - V_1) \quad (2)$$

其中 $V_0$ 是未反应炸药的初始比容, $V_1$ 是已反应炸药的C-J比容。显然,当比容 $V = V_0$ 时, $\delta = 0$ ;  $V = V_1$ 时, $\delta = 1$ 。用人为粘性把强间断面作光滑处理,使这部分流场也能用流体动力学方程组来描述。这种办法是通过压力的作用,驱动和压缩介质,从而使爆轰波传播。燃

烧函数  $\delta$  控制着化学能的释放。

另一方法是用程序控制,使爆轰波在各个方向均以 C-J 爆速  $D_J$  传播<sup>[3]</sup>。每个循环用

$$R_d = R_0 + D_J \cdot t \quad (3)$$

决定爆轰波阵面的位置。其中  $t$  是时间,  $R_d$  是爆轰波阵面的半径,  $R_0$  是爆轰波阵面的初始半径。令爆轰中心到矩形网格  $K$  的四个角中最近的距离为  $R_{min}$ , 最远的距离为  $R_{max}$ 。新的燃烧函数

$$\delta_i = \text{MIN} \left\{ 1, \text{MAX} \left[ 0, \frac{R_d - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \right] \right\} \quad (4)$$

对于非点源的爆轰波,用惠更斯原理求出以后各时刻波阵面的位置,类似地给出燃烧函数  $\delta_i$ 。爆轰产物状态方程用  $\Gamma$  定律给出时,压力

$$P = (\gamma - 1) \rho E \delta_i \quad (5)$$

同样,也用人为粘性对强间断面作光滑化处理,使波阵面在波传播方向上扩展在几排网格上<sup>[4]</sup>。

把 HEL P 程序用于炸药驱动金属片的数值模拟时,以上所述两种方法都各自存在的问题。

在对炸药爆炸驱动金属片作数值模拟时,爆轰波传播相当距离后到达金属片表面。高压气体驱动金属片运动。通常,我们最关注的是飞片到达固定空间的时间史,也就是飞片到达某一空间位置的波形。对于炸药层薄、飞片飞行空腔大的问题,用 C-J 体积燃烧法算出的波形误差偏大。若将网格再分细,可减小偏差,但计算量会成倍增加。这给数值模拟带来了麻烦。对上述问题,使用程序控制爆轰波以  $D_J$  传播的办法可以将爆轰波传播时间算得较准,但在 HEL P 程序中使用此法时,会遇到另一个问题。

HEL P 程序的扰动区是矩形区域。在  $R > R_d$  的计算区内,由于人为粘性作用会存在  $\delta_i = 0$ , 但其速度却大于零的网格。假设网格  $K$  是一个含炸药和惰性材料的混格,它的  $R_{min} > R_d$ , 但速度大于零。这时按公式 (4),  $K$  中  $\delta_i = 0$ , 即网格  $K$  中的炸药因还完全处在未反应区,将不释放化学能。按 HEL P 程序法则,扰动区中混格的压力(在 CDT 子程序中)通过迭代计算。由于  $\delta_i = 0$ ,  $K$  中炸药的按式 (5),  $P = 0$ , 也就是说,无论怎样压缩混格  $K$  中的炸药,它的压力都为零。而  $K$  中惰性材料的压力一旦不为零。这样网格  $K$  就出现压力迭代不收敛,计算进行不下去。在实际计算中,个别特定位置上的混格,用公式 (5) 计算压力时出现了这种情况。

若依下例方法定义燃烧函数,可以避免上述问题<sup>[4]</sup>。按式 (2)、(4) 分别算出  $\delta, \delta_i$ , 取

$$\delta_2 = \text{MAX}(\delta, \delta_i) \quad (6)$$

作为燃烧函数,代替公式 (5) 中的  $\delta_i$  计算压力  $P$ 。这样既控制了爆轰波按爆速  $D_J$  传播,又可避免因波阵面前的扰动区内有  $\delta_2 = 0$  而引起的压力迭代不收敛。

显然,在  $R < R_d$  的区域  $\delta_2 = \delta_i = 1$ , 而在  $R > R_d$  的区域内  $\delta_2 = \delta = (V_0 - V)/(V_0 - V_f)$ 。人粘的作用使比容光滑化,也使燃烧函数光滑化。网格界面上的压力采用界面两侧网格压力的

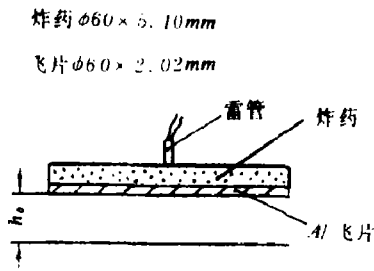


图 1 圆柱形炸药驱动金属  
飞片实验装置图

质量反加权平均值。我们用这种方法对圆柱形炸药驱动飞片的运动规律作了二维数值模拟。实验装置如图 1 所示。炸药使用  $\phi 60 \times 5.10$  mm 的 PBX 9404, 飞片用  $\phi 60 \times 2.02$  mm 的铝。要求测出雷管起爆炸药后, 铝飞片各点到达  $h_0 = 10.10$  mm 处的波形。数值计算使用了 PBX 9404 的 JWL 状态方程描述爆轰产物的特性, 铝的状态方程使用 Tillotson, J. H. 给出的状态方程<sup>[1]</sup>。

图 2 比较了实验测得的波形图和用 HEL P 程序计算出的波形图。在相同的  $x$  座标处, 实验给出飞片到达的时间略早于计算值。大部分区域两者的时间差都小于  $0.2 \mu s$ , 只在  $x = 22 \sim 26$  mm 的范围内略大于  $0.2 \mu s$ 。由于整个波形变化很陡, 时间基准点的测量误差比波形较平的要大。在  $x = 15$  mm 处测量的时间基准值比计算值快  $0.13 \mu s$ 。这样整个计算值都系统落后实验值  $0.13 \mu s$ 。若扣除基准点带来的误差, 两者符合得更好。

对于厚  $5.10$  mm 的药柱, 雷管本身的装药量对  $x = 0$  附近的波形有影响。实验上  $x = 0$  附近的波形不清晰, 因而数值计算上我们未计入这种影响。

### 三、‘空格’问题

HEL P 程序用来对含有炸药的模型作数值计算时, 在某些情况下会出现‘空格’<sup>[15]</sup>。所谓空格是指某种物质包中的网格, 由于处理不当, 本应含有物质的却变为质量等于零。一旦‘空格’出现, 凡是流经该网格边界线的质量输运都将为零, 从而其动量, 能量的输运也都为零。若网格  $K$  变为‘空格’, 与它相邻的网格  $K_i$  的输运在与  $K$  的公共边界上出现异常。当输运速度是流向  $K$  格时, 其结果是使网格  $K_i$  的介质密度增加过大, 压力过高。如果网格  $K_i$  内的介质是较稀薄的气体, 例如是已膨胀的爆轰产物, 由于介质的可压缩性大, 虽然密度增加使压力也增加, 但增加后的压力在整个流场中不算特别高。虽然在流场的局部会出现某些不正常的结果, 但计算仍能继续下去, 整个结果有时也具有参考价值。

在 HEL P 程序中, 为了保证有限差分方程的稳定性, 时间步长  $\Delta t$  按稳定性条件算出。如果网格  $K_i$  的声速  $C(K_i)$  过高, 满足

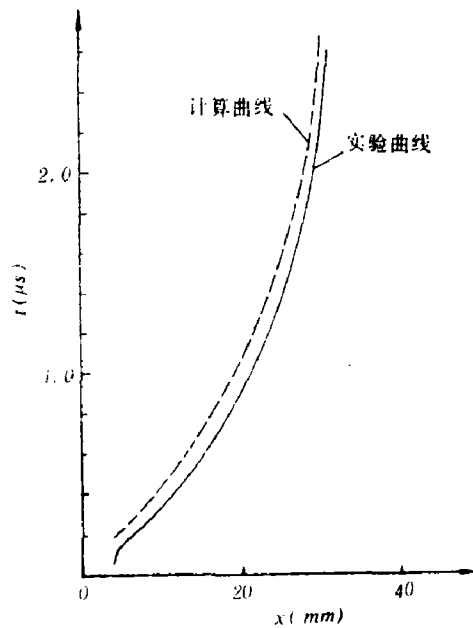


图 2 PBX 9404 炸药驱动金属片  
到达  $h_0$  处的相对时间波形图

$$C(K_i) \gg W_{max} \quad (7)$$

其中  $W_{max}$  是整个流场中最大的质心速度分量。那么近似有  $\Delta t \sim 1/C(K_i)$ 。这样的  $\Delta t$  会很小, 使计算进行不下去。当与空格相邻的网格  $K_i$  内的介质含有难以压缩的介质(如金属)时,  $K_i$  内由于输运受阻会使压力大大升高,  $C(K_i)$  很大, 导致计算出的  $\Delta t$  很小, 使计算进行不下去。可见空格问题的出现对用 HELP 作数值模拟有相当大的危害。

空格出现的原因, 目前看来大致可分为两类。一类由于自由面网格物理量计算的失真引起; 另一类由于程序对边界条件的处理有不当之处造成。例如, 当自由面示踪粒子运动速度太快时, 它们的后面便出现空格。这样产生的空格可能会有多个接连出现。我们在计算含有金属和炸药的模型时, 自由面网格若不施行粘合, 爆轰产物自由面示踪粒子的运动速度便会严重失真, 导致空格出现。对这类问题, 示踪粒子速度失真的原因消除后, 空格就不会再出现。在上述例子中, 对自由面网格作粘合后(或者用其它方法算准自由面示踪点的运动)空格便消失。产生空格的第二类原因是边界条件的处理有不当之处。在 HELP 程序中, 用流过  $J=1$  的一排网格底边的通量来作  $ox$  轴上的边界条件。以下设网格  $K$  是  $J=1$  的一排网格中的某一个。在 HELP 程序中, 当  $K$  格是混格的时候, 第  $N$  个物质包透过  $K$  格的底边界而流过的质量

$$BMN(N) = \rho(N, M) \cdot V(K) \cdot \Delta t \cdot S(I) \quad (8)$$

而且, 当  $BMN(N) + XM(N, M) < 0$  时, 令

$$BMN(N) = -XM(N, M) \quad (9)$$

其中  $V(K)$  是  $K$  格的轴向速度;  $S(I)$  是  $K$  格的底面积;  $M = MFLAG(K) - 100$ , 表示网格  $K$  是第  $M$  个混格。  $\rho(N, M)$  是混格  $M$  (也即网格  $K$ ) 中第  $N$  个物质包的密度;  $XM(N, M)$  是混格  $M$  中第  $N$  个物质包的质量。当质量穿过  $K$  格的底边向下流动时  $BMN(N) < 0$ 。按 (9) 式的意义, 若从  $K$  格底部流出的物质包  $N$  的物质过多, 则最多使这种介质在  $K$  格中原有的质量全从底部流出。

如果混格  $M$  是含两种或两种以上(不包括真空在内)介质的混格时, 即使公式 (9) 条件成立取  $BMN(N) = -XM(N, M)$ ,  $M$  格中还有其它介质, 不致造成空格。但是若混格是真空混格(也就是含自由面的网格), 而且除真空外只含有一种物质时, 这样执行的结果便会使  $K$  格成为空格。虽然原则上说在网格  $K$  的其它三个网格界面上还有质量流, 但在实际计算中, 出现空格前这些质量流经抽查都很小。于是, 经程序运行后  $K$  格就会变为空格。由此产生的空格通常是在  $J=1$  一排网格的个别网格。

在 HELP 程序中, 按公式 (8) 计算  $BMN(N)$ , 当  $K$  格是真空混格时, 在处理上是很不合理的。当  $K$  格变成只含单一物质的自由面网格后, 程序便按公式 (8) 计算  $BMN(N)$ , 而不管自由面是否已到达  $K$  格的底边界。把这个网格看做装满密度  $\rho(N, M)$ 、速度  $V(K)$  的单一物质的网格来输运, 势必使  $|BMN(N)|$  比实际值大。特别是, 当这个自由面网格中的物质只占据其中很小的一部分体积, 这种偏差就更大。只要速度  $V(K)$  不是太小, 便容易满足  $BMN(N) + XM(N, M) < 0$  的条件, 导致空格出现。当我们对圆筒试验作数值计算时就出现了这种空格。

为了解决这类空格问题, 我们改变了边界条件的处理。先判断自由面是否到达  $K$  格的底

部,若未到达取  $BMN(N)=0$ ,只有当自由面到达  $K$  格底部后,才允许有不为零的  $BMN(N)$ 。另外,用对输运有贡献的部分底面积代替  $S(I)$  或者考虑介质所占据体积之权重来对 (8) 式修正。在实际计算中,程序经这样修改后,原来出现的空格便消失了,使得数值模拟过程能进行下去并取得了较好的结果。

本项工作的某些问题曾和陈森华作过有益的讨论;承刘文翰提供有关实验结果和数据,特此致谢!

### 参 考 文 献

- (1) Hageman, L. J., Walsh, J. M., *AD* 726459(1971).
- (2) Hageman, L. J., Walsh, J. M., *AD* 726460(1971).
- (3) Gittings, M. L., *AD* A0 23962(Dec. 1975).
- (4) Wilkins, M. L., *J. Comp Phys.* 36(1980), 281-303.
- (5) 谈庆明、刘小萍,“用欧拉法求解流体运动时自由面条件的数值研究”,第二届全国爆炸力学学术会议论文集(1981).

## SIMULATION OF THE INTERACTION OF HIGH EXPLOSIVE WITH SOLIDS BY HELP PROGRAM

Yin Zhiyuan Feng Jiabo

### Abstract

In this paper, several problems in regard to simulation of detonation by HELP program are described. With some reasonable treatments we adopted, satisfactory results are obtained. We also analysed the cause of empty cells arised in calculation, the method of elimination of which is proposed, it is effective in our calculation.