

爆轰产物会聚流增压装置的 二维数值计算

许锡章

(1983年4月14日收到)

本文用二维流体、弹塑性体的多层介质的欧拉型编码即HELP⁽¹⁾程序对爆轰产物会聚流增压装置进行了数值计算。计算结果与实验基本符合,计算给出的流动图象可以说明实验中的一些现象。

一、绪 言

在化爆高压中利用会聚原理的增压装置可以提高飞片的速度,文献(2)中对此类问题作了半定量的分析,并且用实验方法选择了几种不同压力点的装置结构,应用于固体高压状态方程的测量中。由于会聚现象比较复杂,要选择合适的装置结构,才能提高飞片的速度和飞片的平面度,否则会引起飞片强烈的变形,甚至穿孔。而对飞片的速度和形状难以进行理论分析,求出飞片飞行中速度和形状的解析表达式,对装置结构依靠实验确定,因此对这类问题进行数值模拟计算十分必要。到目前为止,还没有看到对这类问题进行数值计算的文章,因为它是属于二维不定常问题,介质流动大,装置结构也比较复杂。八一年我们曾用HELP程序对较低压力点的装置进行了计算,还计算了同样装置情况下而无会聚腔的模型。后来我们又对较高压力点的装置(即较大药量和较薄飞片的装置)进行了计算,计算结果与实验都基本符合,本文给出这些计算结果,并对结果进行了一些分析。

二、计算炸药物质时状态方程的处理

文献(1)的HELP程序没有计算炸药物质的程序,针对本文所计算的问题是平面爆轰波的情况,因此我们应用了一个简单且炸药爆轰压力非常接近其正常爆轰压力的燃烧函数。

爆轰产物的状态方程通常可以写成

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

其中 P 是爆轰产物的压力, ρ 是密度, E 是单位质量内能, γ 是多方指数。我们引入燃烧函数 δ 将凝固炸药和爆轰产物之间的状态用一条光滑曲线连结起来,两个状态的过渡区可表示为

* HELP 意为 Hydrodynamic plus elastic-plastic.

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

燃烧函数 δ 的形式如下

$$Z_D = Z_{MIN} + D_{C-J}t$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & Z_D > Z_J \\ (Z_D - Z_{J-1}) / (Z_J - Z_{J-1}) & Z_{J-1} < Z_D < Z_J \\ 0 & Z_D < Z_{J-1} \end{cases}$$

其中 D_{C-J} 是炸药的正常爆速， t 是爆轰波行走的时间， Z_D 是爆轰波的位置， Z_{MIN} 是炸药起爆位置， J 是被计算网格的下标。其示意图见图1。

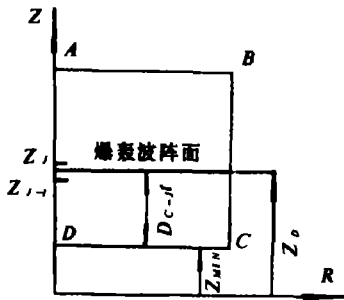


图1 燃烧函数示意图
(ABCD为炸药柱，
CD为起爆面)

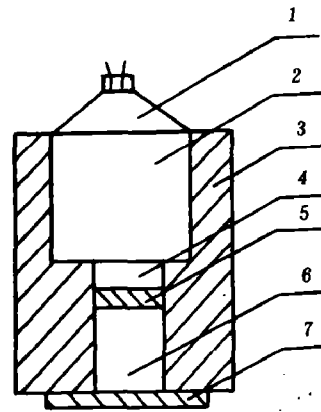


图2 爆轰产物会聚原理的飞片增压装置示意图
1. 平面波发生器 2. 炸药柱
3. 筒层外壳 4. 空气隙
5. 飞片 6. 空腔
7. 靶

三、装置与计算结果

会聚装置的简图示于图2。该装置中，当爆轰产物到达会聚部的上表面时，正对会聚孔的那部份爆轰产物由于受到钢界面的“阻滞”作用而引起压力和密度的增加，这样外缘部份的爆轰产物将要作轴向会聚运动，并增强爆轰产物向会聚腔的飞散作用，因而提高了飞片的速度。

表1给出了两个不同飞片速度的实验装置的结构尺寸和实验测量结果。表2给出了相应于实验装置的计算模型。由于平面波发生器由高低速炸药组合而成，完全进行数值模拟比较困难，因此把平面波发生器折合成有效药量，计算开始时在炸药柱顶面上起爆，在炸药柱中传播一个平面爆轰波。表3给出两个模型的计算结果。

表1 两个不同压力点会聚装置的实验结果

会聚装置	平面波发生器	炸药柱尺寸 (毫米)	飞片材料及 厚度(毫米)	空气隙距离 (毫米)	外壳厚度 (毫米)	空腔距离 (毫米)	飞片速度 (毫米/微秒)	飞片平面度 (<0.1 微秒)
装置 I	$\phi 100 \times 37$	$\phi 100 \times 50$ (Comp B-3)	Fe $\phi 50 \times 6$	10	15~20	61	3.10	$\phi 20 \sim \phi 30$
装置 II	$\phi 200 \times 37$	$\phi 200 \times 200$ (Comp B-3) + $\phi 200 \times 100$ (HMX)	W $\phi 96 \times 1.5$	18	15~20	80	6.2~6.7	

表2 与实验装置对应的两个计算模型

计算模型	炸药柱尺寸(毫米)	飞片直径与厚度(毫米)	空气隙距离(毫米)	外壳厚度(毫米)
模型 I	$\phi 100 \times 75$ (Comp B-3)	$\phi 52 \times 6$ (Fe)	10	20
模型 II	$\phi 200 \times 220$ (Comp B-3) + $\phi 200 \times 100$ (HMX)	$\phi 96 \times 1.5$ (W)	18	20

表3 计算结果

模型 I	空腔距离(毫米)	1.4	9.7	20.5	32.5	45.2	58.0	63.4	70.6
	飞片到达时间(微秒)	14	18	22	26	30	34	35.69	38.87
	飞片速度(毫米/微秒)	1.54 ~1.68	2.39 ~2.53	2.79 ~2.93	3.05 ~3.18	3.10 ~3.22	3.15 ~3.22	3.22 ~3.36	3.25 ~3.38
	飞片平面范围(<0.1 微秒)	$\phi 51$	$\phi 42$	$\phi 37.8$	$\phi 29.8$	$\phi 25$	$\phi 21.8$	$\phi 21.2$	$\phi 20$
模型 II	空腔距离(毫米)	9.5	19.2	30.7	44.6	60.5	79.0		
	飞片到达时间(微秒)	44.1	46.1	48.2	50.7	53.5	56		
	飞片速度(毫米/微秒)	4.96	5.22	5.59	5.70	5.91	6.13		

四、结果分析

1. 模型 I 为较小药量、较厚飞片的装置,图 3 给出了不同时刻的装置轮廓图。从图中可以看到靠近炸药部份的情层外壳在爆轰产物作用下向外扩张,靠近空腔部份的情层外壳,由于稀疏作用突向腔内,飞片在稀疏作用下变厚,并逐渐加速,飞片的平面范围逐渐减小,会聚效应是逐步影响到轴心部份。飞片加速初期,飞片中部滞后于边侧,图 3 中 18 微秒这一幅

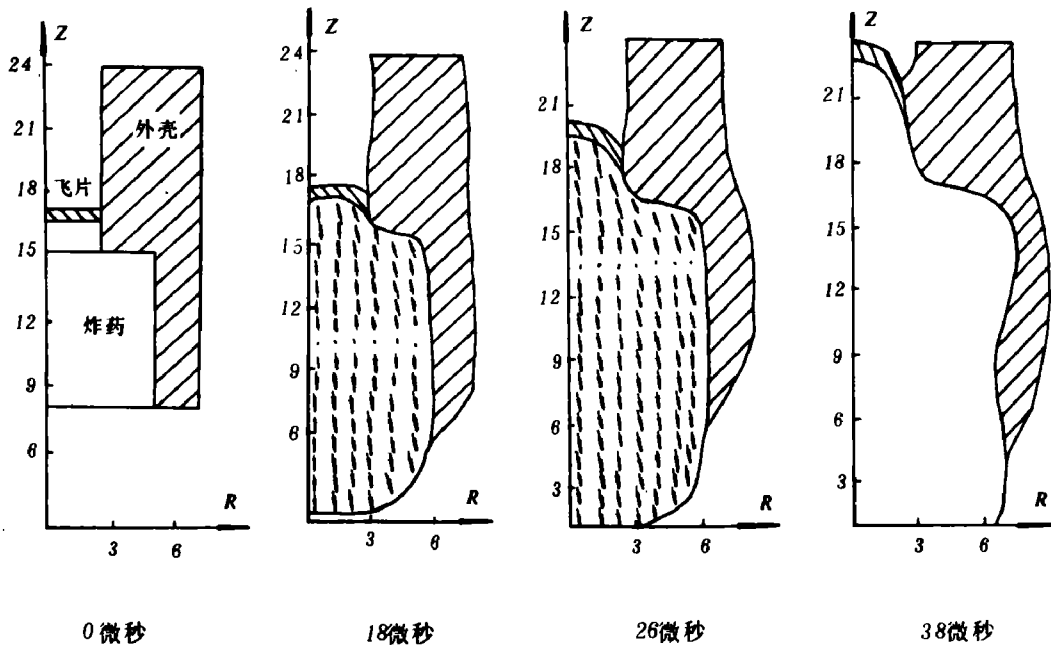


图3 计算模型 I 中装置外廓随时间的变化
(R 为半径, Z 为轴向距离, 尺寸单位为厘米)

图可以比较明显地看到这一点。在〔3〕中实验上观察到初始时刻飞片边侧部份超前中心部份 0.12 微秒, 此后经过 14.4 毫米空腔距离的飞行后, 飞片中心部份才赶上边侧部份。所以空气隙距离, 飞行空腔距离可以调节飞片速度和波形。图 3 中 18 微秒, 26 微秒两幅图中还表示出爆轰产物流场的速度分布, 箭头方向表示流动方向, 长短表示速度大小, 这是根据计算中给出的流场轴向速度和径向速度画出的, 从中可以看出爆轰产物的会聚情况。

2. 表 1 和表 3 给出了两个模型的实验结果和计算结果。装置 I 中在 61 毫米的空腔距离上, 实验上用高速转镜测量得到的飞片速度为 3.1 毫米/微秒, 而模型 I 在 63.4 毫米空腔距离上计算得出的飞片速度为 3.22—3.36 毫米/微秒, 计算值比实验值要高一些, 这是由于模型 I 中计算时炸药柱高度取了 75 毫米, 平面波发生器的有效折合药量取大了一点。装置 II 中在 80 毫米空腔距离上测得飞片速度为 6.2—6.7 毫米/微秒, 而模型 II 在 79 毫米空腔距离上计算得出的飞片速度约为 6.13 毫米/微秒 (飞片中部速度)。由上可以看出, 两个模型计算得出的飞片速度与实验测量都比较接近。

图 4 给出了模型 I 和模型 II 飞片速度随空腔距离的变化曲线, 曲线 1 对应模型 I, 曲线 2 对应模型 II, 曲线 3 对应模型 I 中无会聚外壳计算得出的曲线。可以看

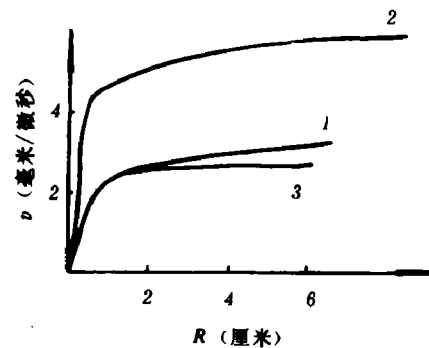


图4 飞片速度随空腔距离的变化曲线 (曲线 1, 2, 3 分别对应模型 I, II 及模型 I 无会聚外壳的情况)

到，有会聚时飞片到达最大速度所需的空腔距离比无会聚时要大，也说明有会聚时，飞片吸收爆轰产物的能量比无会聚时要多。同时在会聚情况下，药量大的装置比药量小的装置飞片达到最大速度的空腔距离又要大。

3. 从表3可以看出模型I中飞片到达最大速度时平面范围(0.1微秒)约为 $\Phi 20$ 毫米，与实验测量基本一致。图5给出了模型II不同时刻飞片的形状图，由于模型II空气隙距离比

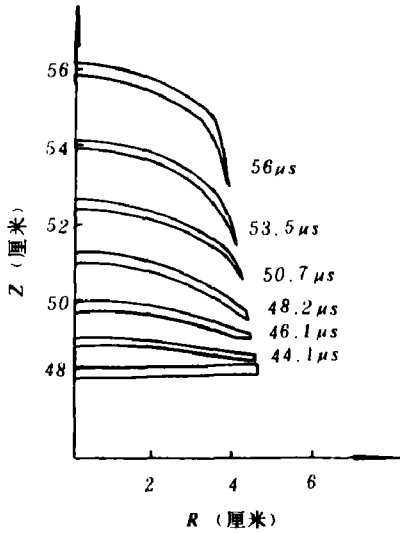


图5 计算模型II飞片在不同空腔距离上的形状

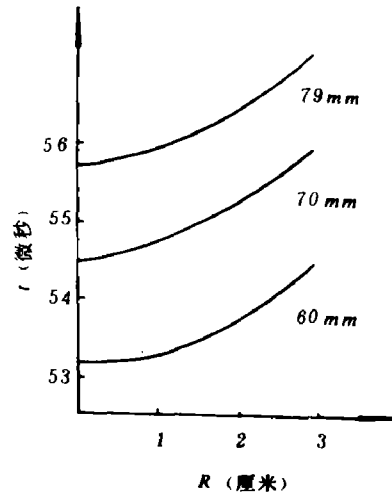
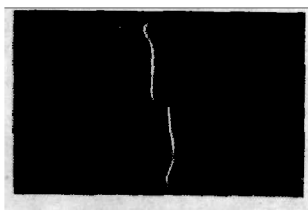


图6 按飞片形状(不同时刻)内插求得的波形曲线(图上数字表示空腔距离)

模型I要大，而且空腔的直径也要大，因此此时(爆轰产物接触到飞片的时刻)爆轰产物的会聚影响已经到达轴心部份，使得轴心部份速度比边侧要大。图6给出按不同时刻飞片形状内插求得的波形曲线。图中数字表示空腔距离。由图看出，飞片的平面范围比较小，波形差小于0.1微秒的区域约为 $\Phi 15 - \Phi 20$ 毫米，整个波形弯曲比较大，这个波形非常类似低压点的模型I装置空气隙为20毫米时的波形(见图7)。此图说明空气隙距离对波形影响很大。由于没有模型II空气隙为20毫米的实测波形，故计算波形与实验还不能直接比较。但从图7看出计



(1)空气隙10毫米



(2)空气隙20毫米

图7 装置I不同空气隙厚度实验测得的波形

算给出的波形趋势是对的。

感谢王炳成、谭振南、杨慕松等同志提供实验数据。

参 考 文 献

- (1) Hageman, L. J. and Walsh, J. M., AD-726459, AD-726460 (1971).
- (2) Tan Bingsheng and Jing Fuqian, *Preprint of Papers to be Presented at Seventh Symposium (International) on Detonation*, United State Naval Academy, Annapolis, Maryland, June 16-19, 1981, Vol. 2 p. 762.
- (3) 王炳成, 谭振南 (私人通信)。

TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL RESULT OF A HIGH PRESSURE DEVICE DRIVEN BY A CONVERGENT FLOW OF DETONATION PRODUCTS

Xu Xizhang

Abstract

By means of HELP code—a multimaterial Eulerian code in two dimensional hydrodynamic and elastic-plastic regimes, numerical calculations were performed for a high pressure device driven by a convergent flow of detonation products. The calculated results are approximately consistent with the experimental data. Some phenomena occurred in the experiments can be explained by the flow diagrams of calculation.