

讲 座

## 聚能破甲效应(一)

梁德寿

(西安近代化学研究所)

### 一、引言

在圆柱形装药远离起爆点的一端,如果有一空腔(如锥形空腔),就会有更多的爆炸能聚集,并产生大得多的破坏作用,人们称此为聚能效应。

聚能效应在二百年前已被发现,二次大战期间人们发现在炸药的空腔内衬一金属罩能大大提高其侵彻能力,并利用这一发现制成了反坦克火箭弹。从此,人们开始对聚能破甲进行大量的理论分析和实验研究。随着研究工作的深入,聚能破甲弹的性能也在不断地提高。目前,不少破甲弹对45°钢均质靶板的穿深可达口径的7~9倍,实验室内则可达10倍,甚至11倍。而且国外有的破甲弹由于对装药及罩的质量进行了严格的控制,在大炸高下穿深下降不多,这对侵彻复合靶、间隙靶及主动靶都非常有利。

另外,值得指出的是:由于计算机性能的不断提高和广泛应用,科学工作者们已开始采用各种简化模型及流体-弹塑性模型来计算聚能射流的形成及其破甲过程,这将会对聚能破甲机理研究及破甲弹、防护装甲的设计起到指导作用。

我们分两次来介绍这个专题,本篇是第一部分,主要是介绍聚能破甲效应的基本概念、研究方法和主要研究成果。下一篇则着重介绍聚能破甲技术的新发展。

### 二、射流形成过程

图1是射流形成过程的示意图。在爆轰产物的作用下,金属罩各部分向轴线会聚,会聚以后分

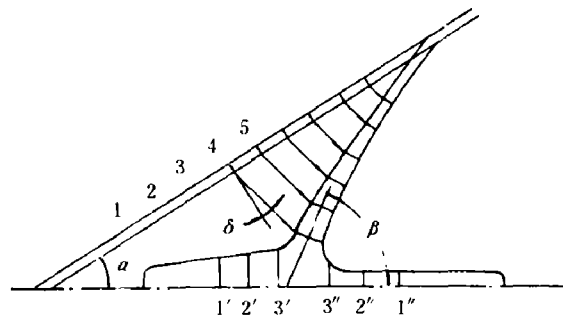


图1 射流形成过程示意图

成两部分:靠近罩内表面部分的材料得到较高速度,并形成射流;靠近罩外表面部分的材料形成速

度较低的杆体。图1中罩母线上4和5处的材料尚未会聚到轴上,3处则已会聚并分成了两部分,一部分进入了射流,运动到了3'点,另一部分进入了杆体运动到了3''点。2点和1点处的情况和3点类似,只是在轴上的碰撞发生的更早些。下面分几方面来讨论射流形成过程及其测试方法。

### 1. 准定常不可压缩流体理论

1948年美国的G. Birkhoff等人<sup>[1]</sup>作了如下假设:(1)在爆炸的高压下,罩材料可以看作无粘性不可压缩流体。(2)爆轰波到达某一罩微元时,该罩微元瞬时得到压垮速度。(3)爆轰波扫过罩母线的速度不变。(4)各罩微元的压垮速度相同。在这些假设条件下罩压垮过程是定常的,那么,运用动量守恒和伯努利方程就可以算出射流及杆体的质量和速度,但计算结果同实验结果相差较大。

1952年,E. M. Dugh,和R. J. Eichelberger,等人<sup>[2]</sup>对上述理论作了发展。把从罩顶到罩底各微元的压垮速度看作变量,于是压垮过程变成非定常的过程,伯努利方程原则上已不能使用,但由于压垮速度梯度不大,作者仍假设伯努利方程可用,于是得到射流和杆体的速度、质量计算公式为

$$v_j = v_0 \cos(a + \delta - \frac{\beta}{2}) / \sin \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

$$v_s = v_0 \sin(a + \delta + \frac{\beta}{2}) / \cos \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

$$\frac{dm_j}{dm} = \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

$$\frac{dm_s}{dm} = \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

其中下标 $j$ 表示射流,下标 $s$ 表示杆体, $v_0$ 是罩微元的压垮速度, $dm$ 是其质量, $\delta$ 和 $\beta$ 分别为 $v_0$ 同罩内表面法线的夹角及压垮角。 $\delta$ 和 $\beta$ 可分别由(5)式和(6)式计算

$$\sin \delta = \frac{v_0}{2U} \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sin a + 2 \sin \delta \cos(a + \delta) - x \sin a [1 - \operatorname{tg}(a + \delta) \operatorname{tg} \delta] v'_0 / v_0}{\cos a - 2 \sin \delta \sin(a + \delta) + x \sin a [\operatorname{tg}(a + \delta) + \operatorname{tg} \delta] v'_0 / v_0} \quad (6)$$

其中 $U$ 是爆轰波扫过罩母线的速度, $x$ 是罩微元沿轴线方向到罩顶的距离, $v'_0 = \partial v_0 / \partial x$ 。

公式(1)~(6)的计算结果基本上与实验一致,是用分析法及简化模型计算机程序计算射流形成过程的基本方程。这说明了作者所采用的几个假设基本上是可用的,但也不完全是这样,例如旋压金属罩有抗旋作用,这一点充分证明了罩材料强度对射流形成过程有影响,如果罩材料是流体形成的,射流就不会旋转。此外,罩微元在爆轰波到达后需要一个加速过程才能达到压垮速度,尽管加速时间并不长。

### 2. 罩压垮参数及射流参数的测定方法

(1) 用罩压垮过程的闪光X射线照片确定 $v_0$ 、 $\beta$ 和 $\delta$ <sup>[3]</sup>

将同一发实验不同曝光时间的两张X射线底片按罩的静止相(即在爆炸前的位置)叠到一起,根据罩外表面的位置,采用叠代法进行处理,可以得到 $v_0$ 、 $\beta$ 和 $\delta$ 值,并可根据方程(1)~(4)算出相应的射流、杆体速度及质量。

(2) 杆体回收法测杆体质量及计算其他压垮参数<sup>[4][5]</sup>

由于流体模型基本成立, 所以可以事先将罩切割成许多小环, 称出其质量, 爆炸后再称出与其相应的杆体部分的质量, 其差为射流质量。由(3)式或(4)式可以算出压垮角, 并可对 $v_0$ 等进行计算。

### (3) 截割法测射流速度分布<sup>[6]</sup>

采用钢靶将射流的前部消耗掉, 再用高速摄影或记时仪等测出靶射流的头部速度, 于是就确定了一个射流微元在时间-离罩底距离坐标系中的运动迹线。高速摄影测量结果表明射流微元的运动迹线是直线。

改变截割靶的厚度就改变了被测微元, 这样作下去就在时间-距离坐标系中得到一组发散的直线, 根据这组直线就可以得到任一时刻的射流速度分布。

光测的误差在3%以内。

### (4) 拉断法测射流速度分布<sup>[7]</sup>

由于速度梯度的存在射流会逐渐拉断, 射流微元在断裂前后都基本作匀速直线运动, 所以可以通过同一发实验不同曝光时间的两张拉断射流X光底片处理得到各颗粒在时间-距离坐标中的运动迹线, 这些直线同样是一组发散的直线, 可以由其得到任一时刻的射流速度分布。

### (5) 破甲弹旋转对射流的影响

为了研究破甲弹旋转对射流及其侵彻的影响, 研制了“聚能装药旋转试验装置”<sup>[8]</sup>。对J205破甲弹在400转/秒以下的转速范围内, 测量了穿深随转速增加下降的变化曲线, 并得到由于高速旋转而中间变空的射流的清晰照片<sup>[9]</sup>。

由于旋转离散和中间变空, 使得射流的侵彻能力随破甲弹转速增加连续下降(见图2)。图中相对穿深是指旋转条件下的穿深与不旋转穿深的比。由图2可以看出当转速小于50转/秒时穿深下降不明显, 但转速达到350转/秒时穿深下降60%以上。

## 三、破甲过程

在射流头部(速度大约为8公里/秒)撞靶时, 可以在局部范围内产生几百吉帕的压力, 产生的两道激波分别沿靶板和射流传播, 并逐渐减弱、消失。侵彻过程也逐渐进入准定常侵彻阶段。即使在准定常侵彻段孔底的压力也高达几十吉帕, 在这样高的压力作用下, 靶板材料被径向和轴向(主要是径向)排开, 产生一个孔(见图3)。由于高应变率和大塑性应变, 在局部区域内会产生很高的

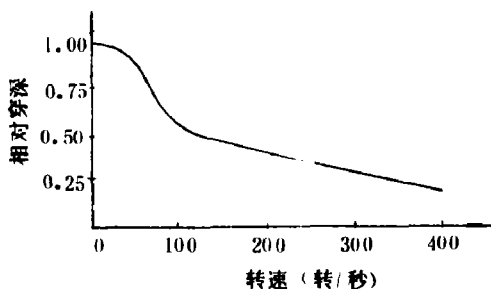


图2 J205破甲弹的穿深-转速曲线

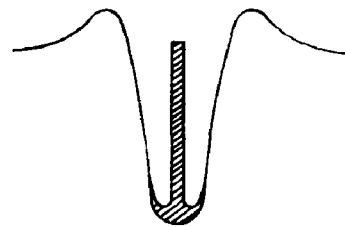


图3 射流侵彻示意图

温度, 金属会变色, 所以往往会误认为孔是烧出来的, 孔内的材料被熔化或汽化了。事实上这是根本不可能的, 因为热传递是一个比较缓慢的过程, 而且破甲前后靶板重量变化不大的事实也证明了孔内的材料主要是径向排开了, 飞溅和汽化的不多。

1. 连续射流破甲深度计算<sup>[10]</sup>

由于射流微元作匀速直线运动，其轨迹可以写成

$$z = v_j t + b(v_j) \tag{7}$$

其中 $z$ 是速度为 $v_j$ 的射流微元到罩底的距离， $t$ 是从爆轰波到达罩底时算起的时间， $b$ 为外推得到的 $t=0$ 时射流微元的 $z$ 坐标，它通常随微元不同而不同，但有些聚能装药 $b$ 的变化范围不大，可以近似取作常数，在这种情况下，从(7)式不难看出射流微元的速度分布是线性的。

为推导侵彻公式，另取一坐标系 $p-t_p$ ， $p$ 是侵彻深， $t_p$ 是从射流头部撞靶时算起的时间。设 $x_0(v_j)$ 为 $t_p=0$ 时速度为 $v_j$ 的射流微元距靶面的距离，从图4显然有

$$p(v_j) = v_j t_p - x_0(v_j) \tag{8}$$

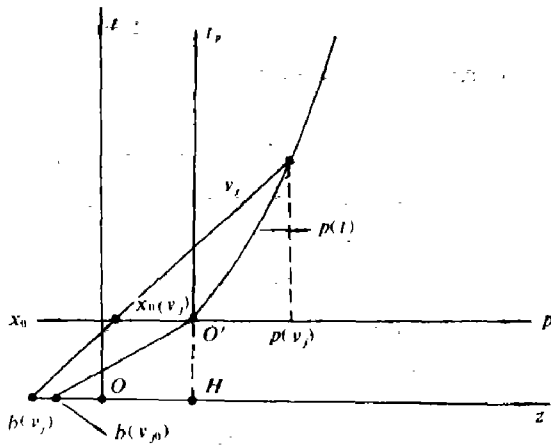


图4 射流微元及孔底位置随时间的变化

将此式对 $v_j$ 求导，并注意到

$$\frac{dp(v_j)}{dv_j} = \frac{dp(v_j)}{dt_p} \frac{dt_p}{dv_j} = u \frac{dt_p}{dv_j}$$

可以得出

$$(v_j - u) \frac{dt_p}{dv_j} + t_p = \frac{dx_0(v_j)}{dv_j}$$

其中 $u$ 为侵彻速度。这个一阶非齐次常微分方程在初始条件 $t_p(v_{j0}) = 0$  ( $v_{j0}$ 为射流头部速度)下的解为

$$t_p(v_j) = e^{-F(v_j)} \int_{v_{j0}}^{v_j} \frac{e^{F(v_j)} dx_0(v_j) / dv_j}{v_j - u} dv_j \tag{9}$$

其中

$$F(v_j) = \int_{v_{j0}}^{v_j} \frac{dv_j}{v_j - u}$$

将(9)式代入(8)式,即可得出与速度为 $v_j$ 的射流微元对应的穿深

$$p(v_j) = v_j e^{-F(v_j)} \int_{v_{j0}}^{v_j} \frac{e^{F(v_j)} dx_0(v_j)/dv_j}{v_j - u} dv_j - x_0(v_j) \quad (10)$$

射流的总穿深为

$$p_{max} = v_{jmin} e^{-F(v_{jmin})} \int_{v_{j0}}^{v_{jmin}} \frac{e^{F(v_j)} dx_0(v_j)/dv_j}{v_j - u} dv_j - x_0(v_{jmin}) \quad (11)$$

由此式可以看出,连续射流的最大穿深取决于射流的头部速度 $v_{j0}$ 、尾部速度 $v_{jmin}$ 、初始速度分布 $x_0(v_j)$ 及 $u \sim v_j$ 的关系。

如果用 $t_H$ 表示从爆轰波到达罩底到射流头部撞击靶面之间的时间间隔,则根据(7)式有

$$t_H = [H - b(v_{j0})]/v_{j0}$$

式中 $H$ 是炸高。于是

$$x_0(v_j) = H - b(v_j) - v_j + t_H$$

或者

$$\frac{dx_0(v_j)}{dv_j} = -\frac{db(v_j)}{dv_j} - t_H \quad (12)$$

如果射流微元的速度分布是线性的,即 $b$ 为常数,则

$$\frac{dx_0(v_j)}{dv_j} = -t_H$$

于是(10)式和(11)式变成

$$p(v_j) = -t_H v_j e^{-F(v_j)} \int_{v_{j0}}^{v_j} \frac{e^{F(v_j)}}{v_j - u} dv_j - x_0(v_j) \quad (13)$$

$$p_{max} = -t_H v_{jmin} e^{-F(v_{jmin})} \int_{v_{j0}}^{v_{jmin}} \frac{e^{F(v_j)}}{v_j - u} dv_j - x_0(v_{jmin}) \quad (14)$$

从(10)、(11)、(13)和(14)式可以看出破甲深除和射流参数有关外,还和 $u \sim v_j$ 关系有关, $u \sim v_j$ 关系不仅同射流有关,而且同靶板的性质还有关。

## 2. 连续射流侵彻的 $u \sim v_j$ 关系

(1) 不可压缩流体假设下的 $u \sim v_j$ 关系

如果靶板材料可以看作不可压缩流体,而且在准定常侵彻段伯努利方程可用,那么可以得到如下的 $u \sim v_j$ 关系

$$u = \frac{v_j}{1 + \sqrt{\rho_j/\rho_t}} \quad (15)$$

其中 $\rho_j$ 和 $\rho_t$ 分别为射流和靶板的密度。将此式代入(13)和(14)式,可以得到不可压缩流体假设条件下速度分布为线性的连续射流穿深公式

$$p(v_j) = (H - b) \left[ \left( \frac{v_{j0}}{v_j} \right)^{\sqrt{\rho_j/\rho_t} - 1} - 1 \right] \quad (16)$$

$$p_{max} = (H - b) \left[ \left( \frac{v_{j0}}{v_{jmin}} \right)^{\sqrt{\rho_j/\rho_t} - 1} - 1 \right] \quad (17)$$

(2) 实测的 $u \sim v_j$ 关系

破甲机理实验结果[10]表明不同断裂强度的钢板有不同的 $u \sim v_j$ 关系。如果用每种材料的临

界侵彻速度 $v_c$ 去除 $u$ 和 $v_j$ ,并在无量纲速度 $\bar{u}$ 和 $\bar{v}_j$ 坐标系内作图,则不同强度钢板的曲线会重合到一起,于是就得到了对各种钢板通用的 $u \sim v_j$ 关系为

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \frac{\bar{v}_j}{1 + \sqrt{\rho_i/\rho_j}} && \text{当 } \bar{v}_j > 2 \\ \bar{u} &= \frac{\bar{v}_j}{1 + \sqrt{\rho_i/\rho_j}} \frac{\sqrt{1 - 1/\bar{v}_j^2}}{\xi(\bar{v}_j)} && \text{当 } 1 < \bar{v}_j < 2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中 $\xi(\bar{v}_j)$ 的值由实验确定,基本上是一个常数,约为0.86。

根据实测的 $u \sim v_j$ 关系(18),就可以由(10), (11)或(13), (14)式计算连续射流对钢靶的穿深。

### 3. 射流的断裂及断裂射流对钢板的侵彻

由于速度梯度的存在,射流在运动中不断地拉伸以至失稳,产生颈缩和断裂<sup>[11]</sup>。断裂后的射流由于颗粒偏离轴线或翻转其侵彻能力大大下降。一般地讲射流从断裂到侵彻的时间越长侵彻能力下降的越多,有很多经验办法来计算断裂射流的侵彻,这里不介绍了。

值得指出的是精密装药(尺寸对称、密度均匀)和精密药型罩(尺寸精确、织构均匀)可以大大减小射流断裂颗粒偏离轴线及翻转现象,从而大大提高断裂射流(或大炸高下射流)的侵彻能力。

### 4. 射流对金属-非金属-金属复合靶及间隙靶等的侵彻

当射流侵彻到非金属(如玻璃钢)时,孔底附近的玻璃钢材料经历了高应变率和大应变,部分材料发生热裂解。热裂解产生的气体和夹杂的玻璃钢碎粒形成固气两相流,两相流冲击射流使其侵彻能力大大下降<sup>[12] [13] [14] [15]</sup>。实验观察发现尽管玻璃钢的强度远低于钢,但射流临界侵彻速度竟高达3.6公里/秒,而且发现出靶射流弯曲,这充分说明射流在孔内运动时受到强烈干扰。此外,复合靶及间隙靶由于总靶厚的增加,而增加了射流的断裂和分散程度,这和增加炸高一样也必然引起穿深的下降。

### 5. 穿深-时间曲线 $p \sim t$ 的实验测定<sup>[16]</sup>

在射流参数已知的情况下,每给定一个时间 $t$ 就可以找出相应的 $p$ 及 $u = dp/dt$ 。将 $t$ 和 $z = p + H$ (见图4)代入(6)式就可以求出 $v_j$ ,于是就得到了 $u \sim v_j$ 曲线上的点,重复以上过程可以得出整条 $u \sim v_j$ 关系曲线。

图5是实验测定 $p \sim t$ 曲线的示意图。测时设备可以是示波器或电子频率计等。 $t_0$ 为爆表波到达罩底面的时间(图4中的 $o$ 点), $t_1$ 为射流头部到达靶面的时间(图4中的 $o'$ 点), $t_2 \dots t_n$ 分别为侵彻到不同深度的时间, $H$ 表示炸高。

## 四、聚能破甲过程的计算

随着计算技术的迅速发展,计算机在各个领域中都获得了越来越广泛的应用,聚能破甲也不例外,科学家和工程技术人员正在冲破“画图、加工、打靶”这种传统的研究和设计程序,开始使用计算机和复杂的物理数学模型对射流形成和破甲过程进行计算。

目前,使用计算机来计算聚能破甲的程序可分为两大类:一类是采用简化模型,这类计算有时称作工程计算;另一类是采用流体弹塑性模型的有限差分或有限元程序。

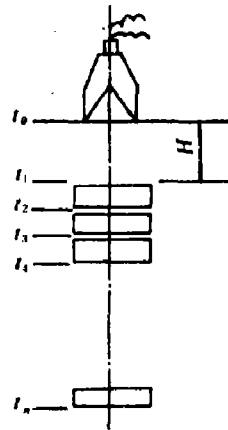


图5  $p \sim t$  曲线实验测定示意图

### 1. 简化模型

目前国内外用于计算聚能破甲的简化模型及程序很多, 这里仅介绍一下JPGS程序<sup>[17]</sup>的主要特点。

JPGS程序将药型罩作流体处理, 并把罩的收敛压垮过程当作板状炸药对所粘附金属板的抛掷过程来研究。前者是二维轴对称问题, 后者是二维平面问题, 为确定两者之间的差异究竟有多大, JPGS的作者们曾作了平板抛掷和管状炸药对内衬金属管压垮的比较试验, 证明两者的压垮图象极为相似, 而且在同样的金属-炸药质量比下两者的压垮速度也比较接近, 只是后者略低一些。他们认为药型罩的压垮过程应介于板和管之间, 所以根据园筒实验的结果对平板模型略加了调整。

JPGS程序考虑了炸药、隔板及罩的结构参数、密度、炸药的爆轰参数、引爆点位置等多种因素对射流形成及破甲过程的影响。对多种破甲弹穿深的计算结果与实测值相比误差均在6%以内。该程序还多次用于新弹设计、寻找最佳结构, 效果不错。

### 2. 流体弹塑性数值计算

从六十年代开始, 特别是近十年来, 国内外不少学者和工程技术人员使用流体弹塑性有限差分或有限元程序研究聚能破甲过程。

由于聚能破甲是大畸变过程, 使用欧拉程序是比较合适的, 在国外已有很多这样的程序, 例如HELP、SOIL、BRLSC等等。在国内也作了不少工作<sup>[18] [19]</sup>。

由于拉氏程序比欧拉程序有计算精度高和速度快等优点, 不少学者认为在聚能破甲这类大畸变问题上也应尽量采用拉氏程序, 大体有两条途径: 一是先用拉氏程序, 到畸变很大时再转用欧拉程序; 二是借助于连续再分区<sup>[20]</sup>, 图6就是用DEFEL程序借助于连续再分区计算的高速(8公里/秒)铜射流侵彻钢靶板的数值模拟结果<sup>[21]</sup>。可以看出结果是不错的。

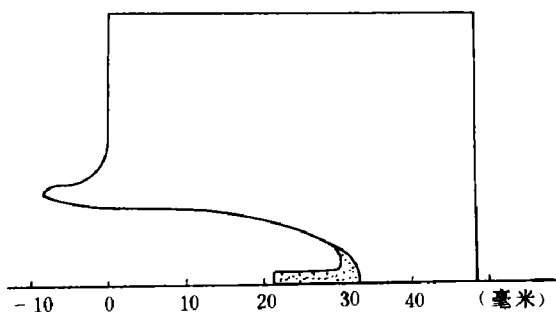


图6 铜射流侵彻钢靶板的数值模拟结果

值得指出的是随着大规模集成电路技术的发展, 微机的功能越来越强, 采用微机进行二维流体弹塑性计算已提到日程上来, 这将为工程设计人员直接用微机进行破甲弹和装甲设计提供前提。

### 参 考 文 献

- [1] Birkhoff, G., MacDougall, D., Pugh, E.M. et al., Explosives with Lined Cavities, *J. Appl. Phys.*, 19 (1948) 563.
- [2] Pugh, E.M., Eichelberger, R.J., Rostoker, N., Theory of Jet Formation by Charges with Lined Cavities, *J. Appl. Phys.*, 23 (1952), 532.
- [3] 梁德寿, 药型罩变型三个基本参数的测定及射流参数的计算, 西安近代化学研究所资料 (1972)。

- [4] Eichelberger, R.J., Pugh, E.M., Experimental Verification of the Theory of Jet Formation by Charges with Lined Conical Cavities, *J. Appl. Phys.*, 23 (1952), 537.
- [5] 王淑华, 用杆体回收法直接换算压垮角 $\beta$ 及间接换算压垮速度, 西安近代化学研究所资料 (1975) .
- [6] 王文京, 梁德寿, 射流速度分布的截割测试法, 西安近代化学研究所资料 (1976) .
- [7] 王野平, 射流速度分布的拉断测试法, 西安近代化学研究所资料 (1977) .
- [8] 肖作智, 王野平, 聚能破甲旋转试验装置, 西安近代化学研究所资料 (1975) .
- [9] 刘贵喜, 梁德寿, 肖作智, 王野平, 锥孔装药旋转对破甲作用的影响, 西安近代化学研究所资料 (1975) .
- [10] 丁雁生, 破甲机理的实验研究, 西安近代化学研究所资料 (1975) .
- [11] 郑哲敏, 聚能射流的稳定性问题, 爆炸与冲击 1 (1) (1981), 6 .
- [12] 谈庆明, 丁雁生, 郑哲敏, 受压固、气两相介质一维膨胀运动, 力学学报, 16 (4), (1984), 340 .
- [13] 郑哲敏, 谈庆明, 高举贤等, 玻璃钢抗侵彻机理的研究, 第二届全国爆炸力学学术会议论文集, 第一册 (1981) .
- [14] 郑哲敏, 谈庆明, 受压固气两相一维膨胀的渐近解, 第二届全国爆炸力学学术会议论文集, 第一册 (1981) .
- [15] 曾宗元, 梁德寿, 聚能装药对非金属材料及金属-非金属复合材料结构侵彻的实验研究, 西安近代化学研究所资料 (1977) .
- [16] 艾衍祥, 侵彻深度和侵彻时间关系的测试方法, 西安近代化学研究所资料 (1975) .
- [17] 胡焕性, 李德俊, 陈世钰, 聚能破甲工程计算法, 兵工学报, 1 (1984), 1 .
- [18] 秦孟兆, 谢春生, 梁德寿等, 二维不定常流体弹塑性数值计算的应用软件, 数值计算与计算机应用, 5 (3) (1984), 129 .
- [19] 梁德寿, 部分体积的计算和HELP程序的改进, 爆炸与冲击, 4 (1) (1984), 29 .
- [20] Johnson, W.E., SOIL-A Multi-Dimensional Multi-Material Continuous Eulerian Code With Operator Splitting, Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects, (Beijing), (1986), 450 .
- [21] Chou Pei Chi (周培基), Liang Deshou (梁德寿), Flis, W., Mesh Rezoning for a Dynamic Triangular Finite-Elements Hydrocode, 将发表于“Finite Elements in Analysis and Design”杂志.

## SHAPED CHARGE AND ITS PENETRATION(I)

Liang Deshou

(Xian Modern Chemistry Research Institute)