

高等工业学校教学用书

---

# 爆炸及其作用

下 册

爆炸对目标的作用和穿甲作用

国防工业出版社

高等工业学校教学用书

# 爆炸及其作用

下 册

## 爆炸对目标的作用和穿甲作用

北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书分上、下两册。上册为气体动力学基础和爆轰原理，下册为爆炸的作用。下册内容包括：爆炸的破片杀伤作用；聚能效应及破甲理论；爆炸的应力波反射破甲作用；空气以及密实介质中的爆破作用等。书中还介绍了弹丸的穿甲作用。

本书可供高等工业学校有关专业教学参考，也可供弹药设计与研究、炸药装药与爆破器材威力设计、火工品设计，以及其他炸药应用工作者参考。

高等工业学校教学用书

### 爆炸及其作用

下 册

爆炸对目标的作用和穿甲作用

北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组 编

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张22 514千字

1979年7月第一版 1979年7月第一次印刷 印数：0,001—5,000册

统一书号：N15034·1866 定价：2.25元

# 目 录

第八章 杀伤作用 .....	1
§ 8-1 带壳药柱爆炸过程的基本现象 .....	1
§ 8-2 壳体破裂机理与破片尺寸的理论计算 .....	3
§ 8-3 破片数及其按重量分布的规律 .....	12
§ 8-4 控制破片的方法 .....	18
§ 8-5 破片飞散速度 .....	22
§ 8-6 破片弹道 .....	43
§ 8-7 破片飞散速度的实验测定 .....	48
§ 8-8 破片飞散特性 .....	51
§ 8-9 杀伤标准问题 .....	59
§ 8-10 战斗部对地面目标的杀伤威力计算 .....	61
§ 8-11 战斗部对空中目标的杀伤威力计算 .....	69
§ 8-12 连续杆式战斗部作用原理 .....	78
第九章 聚能效应 .....	84
§ 9-1 聚能现象 .....	84
§ 9-2 聚能射流形成过程 .....	87
§ 9-3 聚能射流破甲过程 .....	123
§ 9-4 影响破甲威力的因素 .....	143
第十章 应力波反射破甲作用 .....	160
§ 10-1 基本现象 .....	160
§ 10-2 在接触面上的破坏作用 .....	163
§ 10-3 应力波的基本知识 .....	169
§ 10-4 层裂的机理及参数计算 .....	180
§ 10-5 影响层裂效应的主要因素 .....	191
§ 10-6 斜冲击时的崩落效应 .....	196
第十一章 弹丸对靶板的侵彻与贯穿 .....	203
§ 11-1 侵彻与贯穿现象的一般特性 .....	203
§ 11-2 侵彻极限的实验公式 .....	205
§ 11-3 薄板穿甲问题 .....	212
§ 11-4 弹丸侵彻厚板时阻力的变化规律 .....	233
§ 11-5 靶板的破坏 .....	240
第十二章 空气中爆炸 .....	247
§ 12-1 空气中爆炸的基本现象 .....	247
§ 12-2 空气中爆炸时冲击波的初始参数 .....	254
§ 12-3 空气冲击波的爆炸相似律 .....	257
§ 12-4 带壳弹药的爆炸 .....	266
§ 12-5 装药运动对爆炸作用的影响 .....	270

§ 12-6	空气冲击波的实验测定 .....	271
§ 12-7	空气冲击波对目标的作用 .....	273
§ 12-8	空气中爆炸的破坏作用 .....	283
§ 12-9	空气冲击波的减压设施 .....	287
§ 12-10	设防安全距离 .....	291
<b>第十三章</b>	<b>密实介质中爆炸 .....</b>	<b>302</b>
§ 13-1	水中爆炸的基本现象 .....	302
§ 13-2	水中冲击波 .....	305
§ 13-3	水中冲击波的传播 .....	310
§ 13-4	水中爆炸的气泡脉动 .....	318
§ 13-5	水中爆炸的破坏作用 .....	319
§ 13-6	土中爆炸的基本现象 .....	321
§ 13-7	土中爆炸的药量计算 .....	327
§ 13-8	爆破在农田基本建设中的应用 .....	336
<b>参考文献</b>	.....	<b>346</b>

## 第八章 杀伤作用

带壳体装药爆炸后形成的破片对目标的破坏作用称为杀伤作用。杀伤战斗部主要利用破片的杀伤作用来杀伤、摧毁各种目标。破片命中各类目标后对目标杀伤、破坏可以有三种作用：击穿作用、引燃作用和引爆作用。击穿作用对各类目标都起作用，引燃作用和引爆作用仅对带有燃料和爆炸物的目标才起作用。由于破片的击穿作用是主要的和共有的，通常以破片的动能来衡量破片的杀伤作用。

### § 8-1 带壳药柱爆炸过程的基本现象

杀伤战斗部带有一定厚度的壳体，其炸药装药的爆炸过程与裸体炸药装药有所不同。在带壳的炸药装药爆炸后，它的爆炸能量一部分分配在外壳的变形和破坏以及给予破片以一定的初始动能上，另一部分是分配在爆轰产物的飞散和空气冲击波的形成上。壳体可以延迟圆周侧向的稀疏波进入炸药装药的时间，因而能减少装药层不完全分解的化学损失，提高装药能量的利用率。图 8-1-1 所示是战斗部爆炸过程示意图。引信起爆后，爆轰波沿

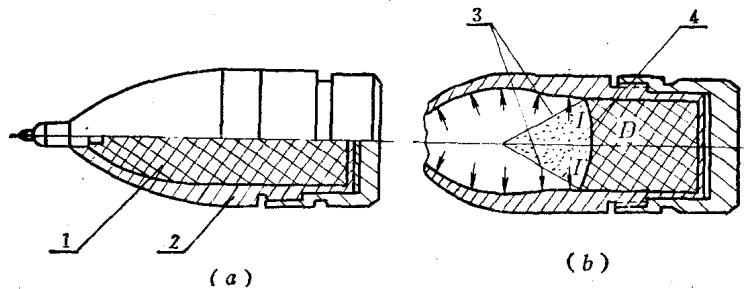


图8-1-1 战斗部爆炸过程示意图

a—爆炸前；b—爆炸过程中；1—炸药；2—壳体；3—稀疏波；4—爆轰波。

口部以稳定爆速向右传播。在爆轰波后面紧跟着稀疏波。爆轰波在传播过程中，以 15 万以上大气压的压力冲击壳体，在冲击点 *I* 处压力达到最大，但由于稀疏波迅速到达，压力迅速下降。爆轰波传到弹底时，战斗部内部的炸药装药爆轰结束。壳体在爆轰产物作用下，从冲击点开始，沿内表面产生塑性变形，同时壳体迅速地向外膨胀。壳体出现裂缝后，爆轰产物即通过裂缝直接向外流动，作用于壳体内表面的压力迅速下降。壳体裂缝全部形成后，即以破片的形式以一定初速向四周飞散。

带壳装药的爆炸过程是在几十微秒时间内完成的，要研究这一过程并掌握其规律，就必须借助于高速摄影仪器。图 8-1-2 所示是 20 毫米炮弹爆炸过程闪光 X 射线照片。这个炮弹由起爆到爆轰结束约经 10 微秒左右。起爆 25 微秒后，壳体膨胀到 2 倍直径以上，此时壳体上出现裂缝；约在 54 微秒时，壳体全部形成破片，破片以 1000 米/秒以上速度向四周飞散。

根据典型的杀伤战斗部爆炸过程的闪光 X 射线照相的照片和相应实验的分析，整体式

战斗部爆炸过程有以下一些特点。

战斗部炸药装药由起爆至爆轰结束所经过的时间，与壳体由开始变形至全部破裂成破片所经过的时间相比，是很短的，仅约为后者的 1/4。以 122 毫米榴弹为例，炸药装药由起爆至爆轰结束约需 60 微秒，而壳体由塑性变形开始至全部形成破片约需 250 微秒。

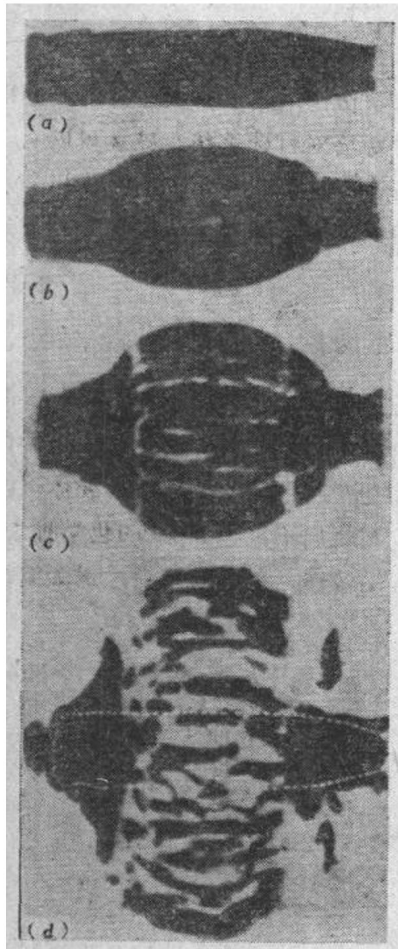


图8-1-2 20毫米炮弹爆炸过程闪光X射线照片  
a—爆轰波到达弹底部；b—在a以后16微秒；  
c—在a以后25微秒；d—在a以后54微秒。

在战斗部爆炸过程中，壳体要承受很大的冲击压力。例如，梯恩梯装药爆炸时，冲击点的压力可达 15 万大气压以上，此压力超过中碳钢静载强度约 25 倍。在静载条件下，破坏最先发生在材料最薄弱的环节（例如应力集中的地方），而在爆炸载荷作用下，破坏则不一定首先发生在最薄弱的地方。

当爆轰波在炸药装药内传播时，从冲击点向壳体内传入一个强压缩的应力波，此波以 3000~4000 米/秒速度沿壁厚向外运动。与此同时，由于壳体向外膨胀，产生稀疏波，使作用于壳体内表面的压力下降。

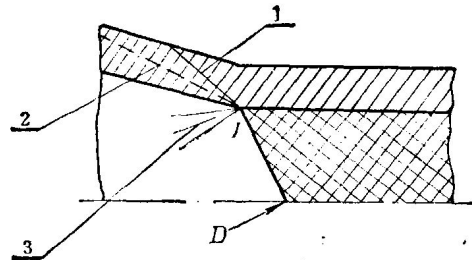


图8-1-3 处于爆炸过程中的战斗部  
1—冲击波；2—分界面；3—稀疏波。

许多研究人员所发表的试验数据表明<sup>[1]</sup>：低碳钢制成的壳体膨胀到  $r_p = (1.6 \sim 2.1) r_0$  时发生破裂（ $r_p$  是壳体破裂时半径， $r_0$  是壳体未发生膨胀时的半径）；中碳钢制成的壳体膨胀到  $r_p = 1.84 r_0$  时发生破裂；铜制壳体膨胀到  $r_p > 2.6 r_0$  时才发生破裂。

在爆轰产物作用下，壳体向外膨胀的速度很高：装填梯恩梯炸药的壳体，膨胀速度在 1000 米/秒以上；装填高威力炸药的壳体，膨胀速度在 2000 米/秒以上。壳体破碎瞬间的膨胀速度即是破片的初速  $v_0$ 。壳体破碎所形成的破片，在爆轰产物作用下将继续加速。破片受到的空气阻力与爆轰产物对破片的推力平衡时，破片速度达到最大，此后，破片速度随着距离的增加逐渐衰减。

整体式战斗部爆炸后，部分壳体金属被粉碎成极小的粉末状碎粒，大部分壳体则形成不同重量和不同形状的破片。

在壳体向外膨胀过程中，或者在壳体破裂后爆轰产物向空气中扩散时，由于它们的速度很高，壳体周围的空气在其冲击下将形成冲击波。

应该指出，预制破片战斗部爆炸过程的基本现象与整体式战斗部爆炸过程的基本现象是相类似的。所不同的是，预制破片战斗部壳体变形过程时间较短，壳体膨胀程度较小，破片初速  $v_0$  稍低，形成的破片大小较均匀。

## § 8-2 壳体破裂机理与破片尺寸的理论计算

炸药装药爆轰后，在爆轰波作用下，壳体在冲击点承受很大压力，同时，在爆轰产物作用下，壳体内表面承受很大冲量。研究壳体在这样的脉冲载荷作用下的变形与破裂规律以及裂缝的产生和扩展，是有实际意义的<sup>(2)</sup>。但由于加载速度快，爆炸过程时间短，壳体内产生应力较复杂，研究壳体破裂过程有不少困难。所以壳体破裂问题目前从理论上还只能作定性解释，尚不能作定量计算。

### (一) 壳体破裂机理

许多研究人员提出了壳体在爆炸载荷作用下破裂机理的观点，综合归纳为两方面：裂缝产生的学说和裂缝扩展的学说。

1. 关于裂缝的产生。目前主要有两种观点。

(1) 裂缝是由应力产生的。壳体因受载而产生的各种应力达到或超过壳体材料允许应力时，即产生裂缝。

从理想弹塑性理论出发<sup>(2)</sup>，一个圆筒受内载荷向外膨胀，壳体内产生三向应力（图 8-2-1 a）。其中任一方向的应力大于材料允许应力时，在这一方向上就产生裂缝。事实上，在任何方向皆有可能首先产生裂缝。图 8-2-1 b 表示由切向应力产生切向裂缝。

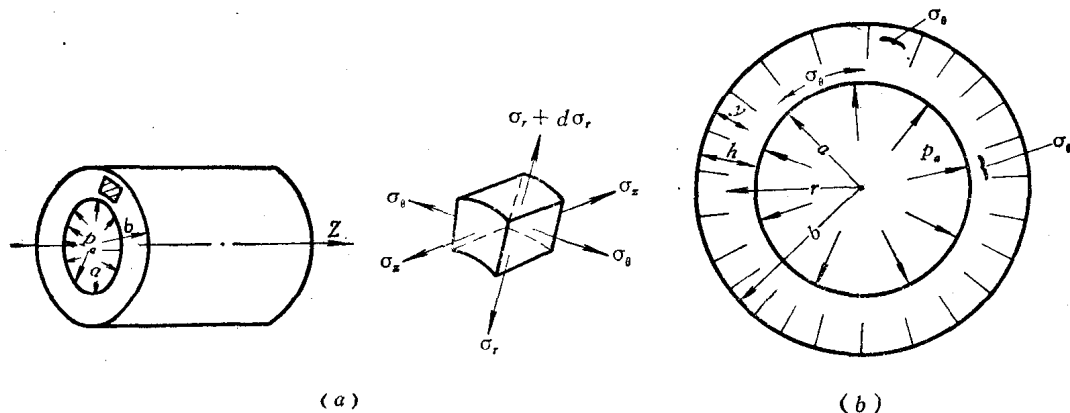


图8-2-1 圆筒受内载荷时产生应力

a—壳体产生三向应力；b—由切向应力产生切向裂缝。

从应力波理论出发，裂缝仅出现在拉伸区。强应力波传入壳体时，产生压缩应力，压缩应力经过区域为压缩区。压缩应力传播到自由表面时，产生拉伸应力，拉伸应力经过区域为拉伸区<sup>(2)</sup>（图 8-2-2）。由于拉伸应力大于材料抗拉应力而产生的裂缝，可以发生在径向或在最大剪应力的平面上。

从普通的材料力学理论出发，壳体内表面承受很大载荷后发生塑性流动，引起剪切破



坏；外表面受载后向外膨胀，使切向拉伸应力迅速增加，产生拉伸破坏；因此，认为裂缝是由两部分组成的：一是内层的剪切裂缝，二是外层的径向裂缝（图 8-2-3）。通常，剪切

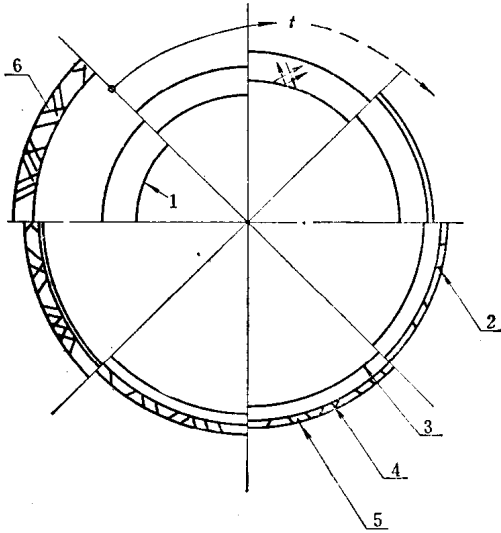


图8-2-2 应力波引起的裂缝

1—起始状态；2—起始裂缝；3—压缩区；4—界面；5—拉伸区；6—裂缝扩张完毕。

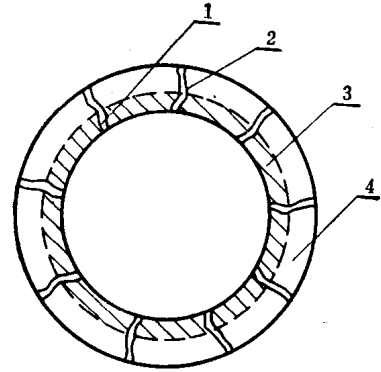


图8-2-3 壳体的破裂

1—剪裂；2—脆裂；3—塑性区；4—弹性区。

裂缝的方向倾斜于轴向，径向裂缝平行于轴向。

(2) 裂缝是由质点运动产生的。英国 Mott<sup>[3]</sup>认为，应力波传入壳体后，壳体内质点要产生同方向运动。当质点运动速度  $u$  大于材料所允许临界质点速度  $u_c$  时，即出现裂缝。

由动量定律

$$\sigma_c = \rho C u_c \quad (8-2-1)$$

式中  $\sigma_c$ ——临界应力 (公斤/厘米<sup>2</sup>)；

$C$ ——应力波传播速度 (米/秒)；

$u_c$ ——质点临界速度 (米/秒)。

表 8-2-1 列举出几种材料的  $\sigma_c$ 、 $u_c$  值。

表 8-2-1

材 料	临界应力 $\sigma_c$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	临界质点速度 $u_c$ (米/秒)	备 注
铝 合 金	$1.02 \times 10^3$	61.5	
铜	$2.98 \times 10^3$	80.4	相当于 T2
青 铜	$2.17 \times 10^3$	65.6	
1020 钢	$1.12 \times 10^3$	25.6	相当于 20Mn
4030 钢	$3.08 \times 10^3$	72.4	相当于 30CrMo

根据这种观点，由于内表面质点速度大，所以裂缝出现在内表面居多，而且裂缝在断面上的分布是均匀的。

2. 关于裂缝的扩展。裂缝产生后，要向外扩展，裂缝在钢中的传播速度约为 1550 米/秒。裂缝传播的准则<sup>[4]</sup>为裂缝出现后不能传入压缩区；裂缝的两边立即出现卸载波，在卸载区内不会出现新的裂缝。

壳体内所有裂缝不可能同时出现，而破片的全部形成只有裂缝在壳体表面全部沟通相交时才完成。下面以二维应变为例来说明壳体的裂缝扩展过程与规律<sup>[4]</sup>。

现在用一个划分为十个水平带和十个垂直带的正方形面积来讨论裂缝的扩展（见图8-2-4）。为了简单起见，假定壳体上开始出现的裂缝互成直角，随后所有出现的裂缝都平

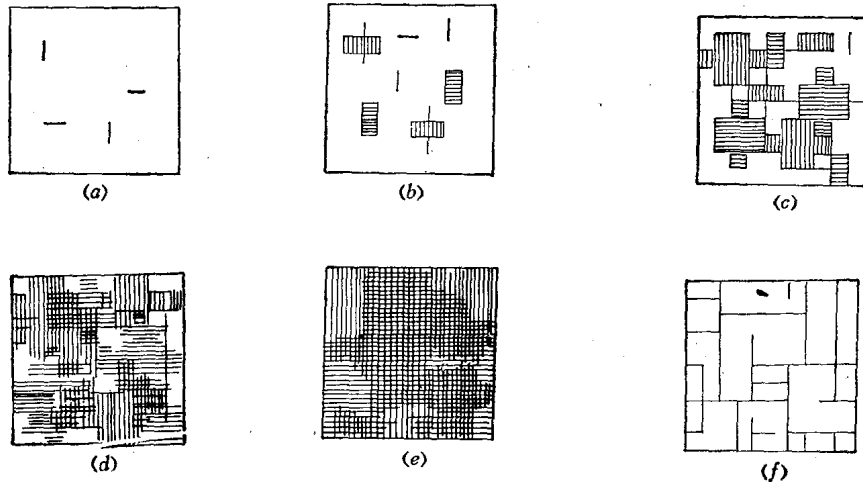


图8-2-4 裂缝扩展过程

a—出现起始裂缝；b, c—裂缝传播与出现新裂缝；d—某些裂缝停止传播，大部分面积已卸载；e—最后的新裂缝形成，破裂过程接近完成；f—破片形成。

行或垂直于初始裂缝。裂缝扩展是按下述规律进行的。

- (1) 裂缝出现后，认为立即通过一条带，并以一定的速度传入附近的带中。
- (2) 当裂缝出现在带上时，卸载波顺带沿裂缝的垂直方向向两边传播。
- (3) 如在带上某点出现裂缝，此点距相邻带上已形成裂缝的一点的距离小于带的宽度时，则新裂缝成为旧裂缝的延伸，因而裂缝的传播速度可能比通常的速度高得多。
- (4) 如裂缝传入一条与它成直角的初始裂缝中，则原来的裂缝停止传播。
- (5) 如裂缝传入由一条与之平行的裂缝发生卸载的区域，则此裂缝停止传播。
- (6) 当整个面积在两个方向上完全卸载时，则破裂过程结束。

现以图8-2-4为例对作图方法说明如下：在图a上，任意选定四条互成直角的裂缝，作为最初出现的裂缝。在图b上，四条初始裂缝长度增加三倍，沿初始裂缝的两边传播卸载波。与此同时，出现四条新的裂缝。在图c上，初始裂缝已传入新的带中，应力卸载波继续向两边传播；远离初始裂缝。同时又形成数条新裂缝。在图d上，某些裂缝在其他裂缝或应力卸载波的影响下停止传播。并且大部分面积上已发生卸载。在图e上，最后的新裂缝形成，破裂过程接近完成。在图f上，整个面积已为卸载波扫过，材料中应力消失，破裂过程结束，破片最后形成。

由图f可知，最后的破片尺寸由各相交裂缝所包围的面积确定。有一些裂缝没有与其他裂缝相交就留在破片上，这种现象是符合实际情况的。根据作图过程可以概略地找到已知面积破裂后所形成的破片尺寸和破片数目。

上述机理对于了解破片的形成是有益的，但尚不能用来确定壳体破裂后的破片尺寸和破片数，而破片尺寸和破片数是研究战斗部和弹丸的杀伤作用所必需的数据。

## (二) 破片平均尺寸的理论计算

下面介绍一种从理论上确定破片平均尺寸和破片数的方法。这种方法从数学推导上还不十分严格，理论上也还不十分严密，但在目前还是有一定参考价值。

战斗部通常是圆筒形的，假定圆筒在爆炸载荷作用下，只有切向应变（即有径向膨胀），而无轴向应变（即无轴向膨胀），即壳体的破裂过程简化为一维应变问题。根据此假设，战斗部圆筒可视由一系列圆环所组成的。现在任取一圆环  $c$  进行研究（图 8-2-5）。

圆环在爆轰压力作用下向外膨胀到某一临界状态时，其上开始出现由切向应变引起的轴向裂缝；之后，裂缝出现愈来愈多。从裂缝开始出现到圆环完全破碎为止，圆环不断向外膨胀。现以  $t$  表示裂缝开始之后，圆环向外膨胀过程中的任一时刻，相应的圆环半径为  $r$ ，与给定  $\theta$  角相对应的弧长为  $x$ （图 8-2-6）。显然，

$$x = r\theta$$

对  $t$  求导数，可得

$$\frac{dx}{dt} = \theta \frac{dr}{dt} \quad (8-2-2)$$

以  $\theta = \frac{x}{r}$  代入 (8-2-2) 式，则

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x}{r} \frac{dr}{dt} \quad (8-2-3)$$

式中  $\frac{dx}{dt}$  代表弧长  $x$  的切向变形速度。取  $v = \frac{dr}{dt}$ ， $v$  是圆环的径向膨胀速度。由 (8-2-3) 式，可得

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x}{r} v$$

$$\frac{dx}{xdt} = \frac{v}{r} \quad (8-2-4)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{v}{r} \quad (8-2-5)$$

式中  $\frac{d\epsilon}{dt}$  代表圆环膨胀过程中的应变率。

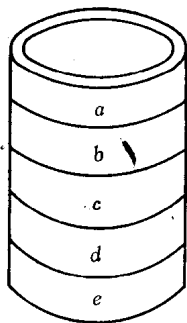


图8-2-5 圆筒由圆环组成

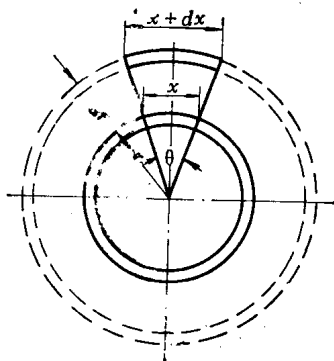


图8-2-6 圆环向外膨胀

当圆环膨胀到某一临界状态时，假定最先从  $A$  点出现裂缝，如图 8-2-7 所示。 $A$  点出现裂缝之后，立即发生两种新的情况：一是在裂缝两边的材料中产生卸载波，随卸载波的

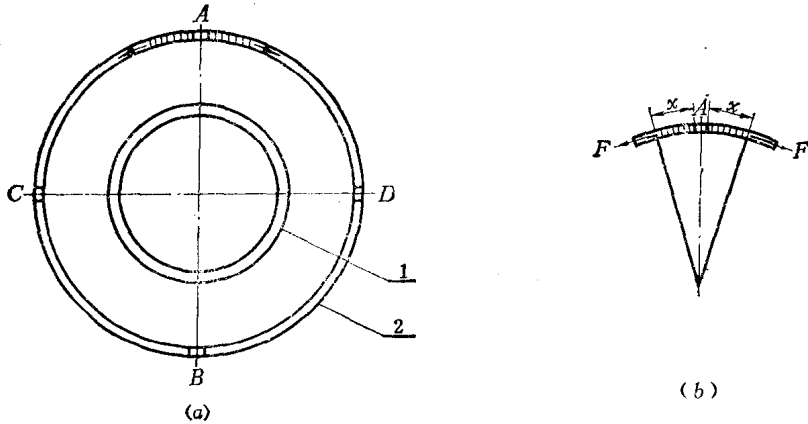


图8-2-7 处于破裂过程的圆环

a—圆环从起始状态膨胀到出现裂缝的临界状态；b—圆环局部视图；1—圆环的起始状态；2—圆环出现裂缝的临界状态。

运动，形成卸载区；二是爆轰产物沿裂缝向外流动，压力迅速下降。在卸载区内，由于应力消失不再出现裂缝。随之，可能在B点出现裂缝；B点出现裂缝之后，则类似地在裂缝的两边形成新的卸载区，爆轰产物的压力进一步下降。之后，在C点或D点出现裂缝，同样在C点或D点的两边形成卸载区，爆轰产物压力继续下降。以后依此类推。总之，卸载波没有扫过的地方，就有可能继续出现裂缝，当卸载波全部扫过之后，则圆环上再不会出现裂缝。至此圆环全部破裂成为破片。

从A点出现裂缝（第一条）开始，设裂缝两边卸载区的宽度由0增至 $x$ ，相应的时刻由0增至 $t$ 。以 $\sigma_b$ 表示圆环材料的强度极限（公斤/厘米<sup>2</sup>）， $\rho_c$ 表示材料的密度（克/厘米<sup>3</sup>）， $S$ 表示卸载区的纵断面积。以卸载区部分作为研究对象，则根据牛顿定律 $F=ma$ ，得

$$\sigma_b S = \frac{1}{g} \rho_c S x \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right) \quad (8-2-6)$$

以(8-2-4)式代入，得

$$\sigma_b = \frac{1}{g} \rho_c x \frac{d}{dt} \left( \frac{v}{r} x \right)$$

积分上式，积分限为时间由0至 $t$ ；卸载区宽度由0至 $x$ 。

$$\int_0^t \sigma_b dt = \int_0^x \frac{1}{g} \rho_c x d \left( \frac{v}{r} x \right)$$

由于在圆环上开始出现裂缝以后， $v$ 与 $r$ 值增加不大，可以近似地看为不变，因此 $v/r$ 可以从积分号中提出来，则上式变为

$$\int_0^t \sigma_b dt = \frac{\rho_c}{g} \frac{v}{r} \int_0^x x dx$$

$$\sigma_b t = \frac{\rho_c}{g} \frac{v}{r} \frac{x^2}{2}$$

最后可得

$$x = \sqrt{\frac{2r\sigma_b g}{\rho_c v}} \sqrt{t} \quad (8-2-7)$$

再按 (8-2-5) 式积分, 积分限: 时间由 0 至  $t$ , 应变由  $\varepsilon_K$  至  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_K$  称为临界应变, 因此

$$\int_0^t v dt = \int_{\varepsilon_K}^{\varepsilon} r d\varepsilon$$

故

$$t = \frac{r}{v} (\varepsilon - \varepsilon_K) \quad (8-2-8)$$

以  $t$  代入 (8-2-7) 式, 则有

$$x = \frac{r}{v} \sqrt{\frac{2\sigma_b g}{\rho_c} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_K}} \quad (8-2-9)$$

式中的  $x$ , 既是卸载区的宽度, 也正是破片的宽度。由于  $r$  与  $v$  可近似地看为常数,  $\sigma_b$ ,  $\varepsilon_K$  和  $\rho_c$  是由材料决定的常数。因之, 破片的宽度主要决定于材料超过临界应变  $\varepsilon_K$  以后所产生的应变  $\varepsilon$ 。

圆环的应变超过  $\varepsilon_K$  后, 破裂的机率迅速增大。用单位长度的杆进行的拉伸试验表明, 应变  $\varepsilon$  愈大, 杆发生破裂的概率也愈大, 故破裂概率的增加是  $\varepsilon$  的函数。以  $P$  表示单位长度的杆的破裂概率, 则

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = f(\varepsilon)$$

试验证明,  $\varepsilon$  增大时,  $P$  迅速增加, 函数  $f(\varepsilon)$  可用指数函数表示, 即

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = C e^{K\varepsilon} \quad (8-2-10)$$

令  $S = K\varepsilon$ , 则  $dS = Kd\varepsilon$ , 故

$$\frac{dP}{dS} = \frac{C}{K} e^S \quad (8-2-11)$$

式中  $C$  与  $K$  为常数。

以  $S$  代入 (8-2-9) 式, 可得

$$x = \frac{r}{v} \sqrt{\frac{2\sigma_b g}{\rho_c K} \sqrt{S - S_K}} \quad (8-2-12)$$

或

$$x = x_0 \sqrt{\Delta S} \quad (8-2-13)$$

式中

$$x_0 = \frac{r}{v} \sqrt{\frac{2\sigma_b g}{\rho_c K}}$$

$$\Delta S = S - S_K$$

根据理论计算与实验数据,  $r = (0.75 \sim 1.0) D$ ,  $D$  表示战斗部口径。近似地取  $v = v_0$ ,  $v_0$  为破片的初速。因此 (8-2-12) 式中要决定的是  $K$  和  $\Delta S$ 。

系数  $K$  主要与圆环中所具有的机械性能弱点数目的概率和应力对应变的增长率有关, 可用以下的函数表示:

$$K = f(p_1) \frac{d \ln \sigma}{d\varepsilon}$$

或写成

$$K = \xi \frac{d \ln \sigma}{d\varepsilon} \quad (8-2-14)$$

即  $\xi = f(p_1)$ , 一般取  $\xi = 160$

在大塑性变形条件下,  $\sigma(\varepsilon)$  可取为

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \ln(1 + \varepsilon) \quad (8-2-15)$$

式中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  代表材料的特征系数。由此式可得

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_2}{1 + \varepsilon}$$

以此式代入 (8-2-14) 式, 令  $\sigma = \sigma_b$ , 相应地  $\varepsilon = \varepsilon_b$ , 则

$$K = 160 \frac{d \ln \sigma}{d\varepsilon} = 160 \frac{d\sigma}{\sigma d\varepsilon} = 160 \frac{\sigma_2}{\sigma(1 + \varepsilon)} = 160 \frac{\sigma_2}{\sigma_b(1 + \varepsilon_b)} \quad (8-2-16)$$

常用材料的  $K$  值列于表 8-2-2。

表 8-2-2 常用材料的  $K$  值

材 料	含 碳 量	断面收缩率 $\varepsilon_b$	$\sigma_b$ (公斤/毫米 <sup>2</sup> )	$\sigma_2$ (公斤/毫米 <sup>2</sup> )	$K$
铸 铁	—	0.83	54	34	20
钢	0.1	0.70	70	42	42
钢	0.25	0.63	80	45	53
钢	0.45	0.57	82	38	67

试验证明, 通常  $x = (1 \sim 2)x_0$ , 即  $(\Delta S)^{1/2} = 1 \sim 2$ 。现以  $l_{P2}$  表示破片的平均宽度, 则

$$l_{P2} = 1.5 x_0$$

以  $x_0$  的值代入, 则有

$$l_{P2} = \frac{1.5 r}{v_0} \sqrt{\frac{2\sigma_b g}{\rho_c K}} \quad (8-2-17)$$

由 (8-2-17) 式可以求得圆环破裂以后破片的宽度  $l_{P2}$ 。求破片尺寸问题 变成确定破片的长度和厚度的问题。设  $l_{P1}$  为破片的平均长度,  $l_{P3}$  为破片的平均厚度。根据实验统计, 在大多数情况下, 钢制战斗部破片的宽度  $l_{P2}$  比厚度  $l_{P3}$  大 1~3 倍, 而破片的长度  $l_{P1}$  比厚度  $l_{P3}$  大 3~7 倍。在实际处理时, 取其平均值, 即设破片尺寸比为

$$l_{P1} : l_{P2} : l_{P3} = 5 : 2 : 1$$

则有

$$\frac{l_{P1}}{l_{P2}} = 2.5, \quad \frac{l_{P3}}{l_{P2}} = 0.5$$

由此可知, 破片的平均尺寸如  $r$ :

$$\left. \begin{aligned} l_{P1} &= 3.75x_0 \\ l_{P2} &= 1.5x_0 \\ l_{P3} &= 0.75x_0 \end{aligned} \right\} \quad (8-2-18)$$

以  $q_P$  表示平均破片的重量, 则

$$q_P = l_{P1} \cdot l_{P2} \cdot l_{P3} \cdot \rho_c = 1.25 \rho_c l_{P2}^3$$

〔例〕某火箭战斗部的破片初速  $v_0 = 1605$  米/秒, 壳体材料为 60 钢,  $\sigma_b = 90$  公斤/毫米<sup>2</sup>,  $\rho_c = 7.8$  克/厘米<sup>3</sup>。试计算破片的平均尺寸和重量。

由表 8-2-2, 以含碳量为准, 用外推法得  $K=75$ 。

由 (8-2-17) 式

$$l_{p_2} = \frac{1.5 r}{v_0} \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho_c K} g} = \frac{1.5 r}{1605} \sqrt{\frac{2 \times 9000}{7.8 \times 10^{-3} \times 75}} \times 9.81 = 0.051 r$$

故

$$l_{p_1} = 0.128 r \text{ 毫米}$$

$$l_{p_2} = 0.051 r \text{ 毫米}$$

$$l_{p_3} = 0.026 r \text{ 毫米}$$

由于战斗部壳体破裂时半径  $r \approx 2r_0 \approx 130$  毫米, 则破片的平均尺寸为

$$l_{p_1} = 0.128 \times 130 = 16.6 \text{ 毫米}$$

$$l_{p_2} = 0.051 \times 130 = 6.6 \text{ 毫米}$$

$$l_{p_3} = 0.026 \times 130 = 3.3 \text{ 毫米}$$

而破片的平均重量为

$$q_p = l_{p_1} \cdot l_{p_2} \cdot l_{p_3} \cdot \rho_c = 16.6 \times 6.6 \times 3.3 \times 0.0078 = 2.89 \text{ 克}$$

由以上的分析和计算实例可知, 战斗部结构和材料决定后, 若已知破片的初速  $v_0$ , 则可求出破片的平均尺寸及相应的平均重量。但应该指出, 以上的方法是按薄壁圆筒推导出来的, 用于实际战斗部的计算可能会产生误差, 计算出的平均尺寸仅能作参考。

附: 下面介绍一下决定  $\Delta S$  的方法。

(8-2-11) 式  $\frac{dP}{dS} = \frac{C}{K} e^s$  表示单位长度杆破裂机率随  $S$  的增长率。在某一时刻  $t$  内, 在周长  $l = 2\pi r$  的圆环上, 由于已有部分长度形成卸载区, 再出现裂缝的长度不是  $l$  而是  $fl$  ( $f$  为小于 1 的系数), 因此

$$\frac{dP}{dS} = fl \frac{C}{K} e^s$$

或

$$dP = fl \frac{C}{K} e^s dS \quad (8-2-19)$$

以上所说的破裂机率增大, 也就是裂缝的数目增多, 现以  $n$  表示裂缝的数目, 因此  $dP$  正比于  $dn$ , 故 (8-2-19) 式可改写为

$$dn = \frac{flC'}{K} e^s dS \quad (8-2-20)$$

式中  $C'$  为常数, 积分后可得

$$n = \frac{flC'}{K} e^s \quad (8-2-21)$$

(8-2-20) 式如用增量表示, 则有

$$\Delta n = \frac{flC'}{K} e^s \Delta S \quad (8-2-22)$$

又有

$$\Delta S = S - S_k \quad (8-2-23)$$

将 (8-2-21) 与 (8-2-23) 式写成通用的形式:

$$\Delta n = n_{i+1} - n_i$$

$$\Delta S = S_{i+1} - S_k$$

按前面的假定, 裂缝是一条接一条地出现的, 则  $\Delta n = 1$ 。因此

(1) 圆环上第一条裂缝 ( $n=1$ ) 出现于  $S=S_K$  时, 由 (8-2-21) 式可得

$$1 = \frac{fIC'}{K} e^s K = \frac{IC'}{K} e^s K \quad (8-2-24)$$

式中取  $f=1$ , 由于圆环刚开始破裂。

(2) 当  $n=2$  时, 则  $\Delta n=2-1=1$ , 由 (9-2-21) 式可得

$$\Delta n=1 = \left[ \frac{fIC'}{K} e^s \right]_{n=1} (\Delta S)_{n-2}$$

以 (8-2-24) 式代入, 则可得

$$(\Delta S)_{n-2} = 1 \quad (8-2-25)$$

以此代入 (8-2-13) 式, 则可求得  $x_{n-2}$ 。

(3) 当  $n=3$  时, 则  $\Delta n=3-2=1$ , 由 (9-2-21) 式可得

$$\Delta n=1 = \left[ \frac{fIC'}{K} e^s \right]_{n-2} (\Delta S)_{n-3}$$

于是

$$(\Delta S)_{n-3} = \frac{K}{fIC'} e^{-s_{n-2}}$$

$$\text{或} \quad (\Delta S)_{n-3} = \frac{K}{fIC'} e^{-s_{n-2} + s_K} \cdot e^{-s_K} = \frac{K}{fIC'} e^{-(\Delta S)_{n-2} \cdot e^{-s_K}} \quad (8-2-26)$$

根据 (8-2-24) 和 (8-2-25) 式可得

$$e^{-s_K} = \frac{IC'}{K}, \quad e^{-(\Delta S)_{n-2}} = \frac{1}{e}$$

以此两式代入 (8-2-26) 式, 则

$$(\Delta S)_{n-3} = \frac{1}{ef} \quad (8-2-27)$$

以 (8-2-27) 式代入 (8-2-13) 式, 则可求得  $x_{n-3}$ 。

(4) 当  $n=4$  时, 则  $\Delta n=4-3=1$ , 由 (8-2-21) 式可得

$$\Delta n=1 = \left[ \frac{fIC'}{K} e^s \right]_{n-3} (\Delta S)_{n-4}$$

$$(\Delta S)_{n-4} = \frac{K}{fIC'} e^{-s_{n-3}} = \frac{K}{fIC'} e^{-(\Delta S)_{n-3} \cdot e^{-s_K}} \quad (8-2-28)$$

由于

$$e^{-s_K} = \frac{IC'}{K}, \quad e^{-(\Delta S)_{n-3}} = e^{-\frac{1}{ef}}$$

以此两式代入 (8-2-28) 式, 则可得

$$(\Delta S)_{n-4} = \frac{l}{f} e^{-\frac{1}{ef}} \quad (8-2-29)$$

以 (8-2-29) 式代入 (8-2-13) 式, 则可求得  $x_{n-4}$ 。

根据以上的计算结果, 取一段长  $l=2\pi r$  的直线, 在此线上任取一点 0 作为第一条裂缝的出现点。在 0 点的两边找出长度为  $x_0$  的线段, 指定为 I 点。以 I 点为起点, 定出  $x_1 = x_0 \sqrt{(\Delta S)_{n-2}}$ , 指定为 II 点。再以 II 点为起点, 定出  $x_2 = x_0 \sqrt{(\Delta S)_{n-3}}$ 。用类似的方法作出  $x_3, x_4 \dots$  直到整个线段上布满刻线为止, 如图 8-2-8 所示。

之后, 再任意另选一点  $0'$  作为第一条裂缝的出现点, 类似地定出  $x_0, x_1, x_2 \dots$ 。再



任意地选一点  $0''$  作为第一条裂缝的出现点, 依此类推, 重复很多次。最后, 量出各刻线之间的距离, 并将所得结果分为数组, 例如以  $(0.2 \sim 0.4)x_0$  为第一组,  $(0.4 \sim 0.8)x_0$  为第二组..., 并记下每组中的线段数目, 由此绘制破片宽度分布曲线如图 8-2-9 所示。

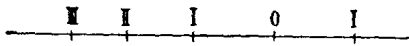
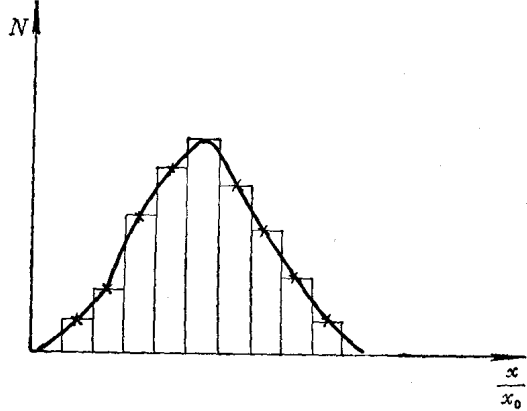
图 8-2-8  $x_i$  的确定作图法

图 8-2-9 破片宽度分布曲线

根据这种实验结果分析, 在通常的情况下, 可以发现大多数破片宽度落在  $(x_0 \sim 2x_0)$  之间, 也就是  $x = (1 \sim 2)x_0$ 。

### § 8-3 破片数及其按重量分布的规律

整体式战斗部的壳体在爆炸后不可能形成按上节讨论的尺寸相等的均匀的破片, 一般都破裂成不同重量和不同形状的破片。

壳体在爆炸后形成的破片总数  $N$  及其按重量的分布规律, 是衡量壳体破碎程度的标志, 同时也是计算战斗部杀伤作用的重要依据。

破片总数  $N$  及其按重量的分布规律与许多因素有关, 其中最主要的是壳体金属的机械性质、炸药性能、装填系数、壳体的几何形状以及一些偶然性因素 (例如, 壳体金属中的微小裂纹、砂眼、杂质; 炸药装填密度不均匀性、传爆管位置歪斜等等)。由于影响因素这样多, 有些又是偶然性因素, 因此即使同样的战斗部爆炸, 每次爆炸以后所得的破片总数及其按重量的分布也不完全相同。所以, 用理论方法预计战斗部爆炸以后产生的破片总数及其按重量的分布规律是一个困难的问题。根据大量的实验统计分析, 可以提供以下一些定性的结论。

以韧性较大的碳钢为壳体的战斗部, 爆炸以后, 重量大的破片占的百分比较高, 破片总数较少。例如, 某火箭战斗部所产生的 1 克以上的破片总数为 1893 片, 20 克以上的破片为 188 片, 占总数的 1%。低碳钢冷冲压壳体的战斗部爆炸后, 破片总数更少, 并且大量破片是长条状的。例如, 100 毫米高射榴弹, 当采用 S 15 A 碳钢冷冲压壳体和 TNT 炸药时, 4 克以上的破片为 390~400 片, 20 克以上的破片为 170 片; 而采用 60 号钢热冷压壳体和 TNT 炸药时, 4 克以上的破片达 700 片以上。钢性铸铁和球墨铸铁为壳体的战斗部, 炸药爆炸以后, 产生的破片总数较多, 但大多数为重量轻的小破片, 此外还有许多碎粒和粉末。战斗部的炸药装药猛度增大时, 破片重量减轻, 而破片数增多。

通常用实验方法确定破片数及其按重量分布的规律。

#### (一) 破片性试验

对于重量较小的战斗部和弹丸, 常采用沙坑试验或水中爆炸试验来检验其破片性; 而