

档案号: 001295

编 号: 6449

科学技术研究报告

爆炸成形模型律

作 者: 郑 哲 敏

中国科学院力学研究所 (编号: (力) 63001)

中 国 科 学 院 (编号: 中科新-64-001)

中华人民共和国科学技术委员会

1964年6月19日 登 记

目 录

摘 要.....	(I)
引 言.....	(1)
一、爆炸成形的相似参数.....	(1)
二、几何相似律.....	(4)
三、爆炸成形的机制和能量准则.....	(5)
四、能量准则的试验检验.....	(11)
五、结束语.....	(18)
参考资料.....	(19)
附 录：水球和附加水碰撞时，能量损失的计麻.....	(20)

引言

在爆炸成形工艺技术发展的现阶段,模型试验是确定工艺条件和工艺参数(如所需药量)的一个主要方法。因此,如何选定模型试验方案,如何整理和归纳试验数据以及如何根据模型试验结果,确定实物生产的工艺条件和参数等就成为需要研究和解决的问题。换言之,需要研究和解决模型律问题。在这篇报告里讨论,当毛料为薄板或薄壳的时候,爆炸成形的模型律,提出我们对这一问题的见解和认为需要进一步探讨的问题。

为明确起见,我们把所讨论的对象规定为:药包具有一定的几何形状,而且除药包尺寸和毛料的厚度外,毛料的其他尺寸,药包的悬挂位置,模具的主要有关尺寸,传压介质的深度(如果采用有自由面的液体的话)等都是几何相似的。因此,共有三个特征长度,即药包的一个特征长度 l ,毛料的厚度 δ 和另一个特征长度 L 。为确定起见,我们取 L 为厚度以外,毛料的另一尺寸(长度、宽度或直径等),以下简称其为毛料尺寸。

本文首先讨论,在改变 L , δ , l 以及材料、炸药和传压介质的条件下,爆炸成形的相似参数问题,从而导出模型律的基本形式。其次,讨论一个有用的特殊情况,称之为几何相似律。然后,进一步分析爆炸成形的机制,并在这个基础上提出了所谓能量准则。在报告的第四部分,用试验结果检验了能量准则。最后一部分是小结。报告所引用的部分数据取自211厂锥形壳的试验记录。

一、爆炸成形的相似参数

在确定的条件下,成形效果也是确定的。确定这些条件的物理量称为独立的物理量或自变量。标志成形效果(包括成形过程)的任何一个物理量都仅仅是这些自变量的函数,所以都是因变量。根据量纲分析中的 Π 定理,如果有 N 个独立的物理量,就可以组成 $N-3$ 个相互独立的无量纲参数*,在这里称之为相似参数。由每一个因变物理量,可以组成一个无量纲参数,它只能是相似参数的函数。所以在两个爆炸成形问题里,如果相应的相似参数都相等,那末由任何标志成形效果的物理量所组成的无量纲参数也都相等,我们称后一种情况为成形效果相似。因此,保证成形效果相似的条件是相应的相似参数相等。所谓以一种情况模拟另一种情况,就是这样选择前者的工艺条件和工艺参数,使其相似参数(至少是那些主要的)与后一种情况下的相等。这就是建立模型律的基本方法。

组成相似参数的关键在于首先选定,哪些是独立的物理量。现分炸药、传压介质、毛料等方面讨论,

(一) 炸 药

对于一般密度较大的凝聚体炸药(炸药密度 $\rho_B = 1$ 至 $1.6-1.7$ 克/厘米³)¹⁾;爆震波的波速 D 约正比于 ρ_B ,于是可以足够精确地认为爆震波波后的压力正比于 ρ_B 的三次方⁽¹⁾。给定 ρ_B 和 D 就能算出

*在这里所考虑的问题里,共有三个基本单位,即长度、时间和质量单位。

引言

在爆炸成形工艺技术发展的现阶段,模型试验是确定工艺条件和工艺参数(如所需药量)的一个主要方法。因此,如何选定模型试验方案,如何整理和归纳试验数据以及如何根据模型试验结果,确定实物生产的工艺条件和参数等就成为需要研究和解决的问题。换言之,需要研究和解决模型律问题。在这篇报告里讨论,当毛料为薄板或薄壳的时候,爆炸成形的模型律,提出我们对这一问题的见解和认为需要进一步探讨的问题。

为明确起见,我们把所讨论的对象规定为:药包具有一定的几何形状,而且除药包尺寸和毛料的厚度外,毛料的其他尺寸,药包的悬挂位置,模具的主要有关尺寸,传压介质的深度(如果采用有自由面的液体的话)等都是几何相似的。因此,共有三个特征长度,即药包的一个特征长度 l ,毛料的厚度 δ 和另一个特征长度 L 。为确定起见,我们取 L 为厚度以外,毛料的另一尺寸(长度,宽度或直径等),以下简称其为毛料尺寸。

本文首先讨论,在改变 L , δ , l 以及材料、炸药和传压介质的条件下,爆炸成形的相似参数问题,从而提出模型律的基本形式。其次,讨论一个有用的特殊情况,称之为几何相似律。然后,进一步分析爆炸成形的机制,并在这个基础上提出了所谓能量准则。在报告的第四部分,用试验结果检验了能量准则。最后一部分是小结。报告所引用的部分数据取自211厂锥形壳的试验记录。

一、爆炸成形的相似参数

在确定的条件下,成形效果也是确定的。确定这些条件的物理量称为独立的物理量或自变量。标志成形效果(包括成形过程)的任何一个物理量都仅仅是这些自变量的函数,所以都是因变量。根据量纲分析中的 Π 定理,如果有 N 个独立的物理量,就可以组成 $N-3$ 个相互独立的无量纲参数*,在这里称之为相似参数。由每一个因变物理量,可以组成一个无量纲参数,它只能是相似参数的函数。所以在两个爆炸成形问题里,如果相应的相似参数都相等,那末由任何标志成形效果的物理量所组成的无量纲参数也都相等,我们称后一种情况为成形效果相似。因此,保证成形效果相似的条件是相应的相似参数相等。所谓以一种情况模拟另一种情况,就是这样选择前者的工艺条件和工艺参数,使其相似参数(至少是那些主要的)与后一种情况下的相等。这就是建立模型律的基本方法。

组成相似参数的关键在于首先选定,哪些是独立的物理量。现分炸药、传压介质、毛料等方面讨论:

(一) 炸 药

对于一般密度较大的凝聚体炸药(炸药密度 $\rho_B = 1$ 至 $1.6-1.7$ 克/厘米³);爆震波的波速 D 约正比于 ρ_B ,于是可以足够精确地认为爆震波波后的压力正比于 ρ_B 的三次方⁽¹⁾。给定 ρ_B 和 D 就能求出

*在这里所考虑的问题里,共有三个基本单位,即长度、时间和质量单位。

爆震波后任一点上爆炸产物的压力 p 、密度 ρ 和质点运动的速度 u 。例如,在爆震波的波前上,有

$$p = \frac{1}{4} \rho_B D^2, \quad \rho = \frac{4}{3} \rho_B, \quad u = \frac{1}{4} D.$$

因此,可以选取 ρ_B 和 D 作为决定炸药爆震过程的独立物理量。

爆炸产物的后期运动可以用通常气体动力学的方法处理。爆炸形成的时间过程很短,因而无需考虑重力影响。如果假设爆炸产物的运动是等熵的,则有

$$p = p(\rho),$$

这个式子总是可以写成无量纲的形式,

$$\frac{p}{\frac{1}{2} \rho_B D^2} = F\left(\frac{\rho}{\rho_B}, \gamma_1, \gamma_2, \dots\right),$$

其中 γ_1, \dots , 是无量纲参数,其数值取决于炸药的物理、化学性质。以下统由 γ 表示这些参数。上式常可写为

$$\frac{p}{\frac{1}{2} \rho_B D^2} = \gamma_1 \left(\frac{\rho}{\rho_B}\right)^{\gamma_2},$$

其中 γ_2 在密度较大时等于3,密度小时约等于1.3。 p - ρ 关系的另一种表达形式是

$$\frac{p}{\frac{1}{2} \rho_B D^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \left(\frac{\rho}{\rho_B}\right)^n.$$

在后一种情况下, γ 相当于多项式的系数。

在爆炸产物的连续方程和欧拉方程中不出现独立的物理量(在目前的讨论里,无需考虑空间坐标 x 、 y 、 z 和时间 t)。在爆炸产物和传压介质连接处的边界条件里,除药包尺寸外,也不出现新的炸药参数。显然,药包的特征尺寸 l 可以用 $(w/\rho_B)^{1/3}$ 表示,其中 w 是药量(以质量计)。

综上所述,有关炸药的独立物理量为 ρ_B 、 D 、 $(w/\rho_B)^{1/3}$ 和 γ 。

在爆炸产物中是出现击波的(详见第三节)。将爆炸产物的 p - ρ 关系写成上述任何一种形式都意味着忽略在击波通过时,爆炸产物中熵的变化。在爆炸产物密度较高的条件下,作这样的假设是合理的。这是因为,在这种条件下,分子热运动对压力的贡献与分子间的排斥力和吸引力相比是较小的。但是为了完整起见,同时为了照顾到,在爆炸气体膨胀后密度较小时的情况,讨论一下更普遍的情况是有好处的。为此,对于爆炸产物需要引进下面两个描述它的状态的方程:

$$S = S(p, \rho), \\ e = e(p, \rho),$$

其中 S 和 e 分别是单位质量爆炸产物的熵和内能。用无量纲的形式表示则有

$$\frac{S}{S_0} = f\left(\frac{p}{\frac{1}{2} \rho_B D^2}, \frac{\rho}{\rho_B}, \gamma_1, \gamma_2, \dots\right), \\ \frac{e}{\frac{1}{2} D^2} = g\left(\frac{p}{\frac{1}{2} \rho_B D^2}, \frac{\rho}{\rho_B}, \gamma_1, \gamma_2, \dots\right),$$

其中 $\gamma_1, \dots, \gamma_1, \dots$ 是无量纲参数,其数值取决于炸药的物理、化学性质; S_0 是爆震终了时,爆炸产物的熵,它也是一个确定的量。 g 出现在兰金-雨果尼奥条件中, f 出现在击波以外的等熵条件中(即 $\frac{df}{dt} = 0$)。由此可见,如果由 γ 代表 $\gamma_1, \dots, \gamma_1, \dots$,那末即使在这种更为普遍的情况下,决定炸药力学性质的独立物理量仍可取为 ρ_B 、 D 和 γ 。

(二) 传压介质

对类水介质而言,在爆炸成形压力条件下,分子热运动对压力的贡献是较小的,因此允许忽略击波面上熵的增加,并认为介质的运动是等熵的。如果又忽略传压介质的初始压力(约为一个大气压),

则有关介质性质的物理量是初始密度 ρ_0 和其余一些出现在 p - ρ 关系中的量。这个关系通常可以写为

$$p = -\frac{a^2 \rho_0}{n} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right],$$

其中 a 是常压时介质里的声速, n 是一个无量纲的指数。以水为例, $a=1,500$ 米/秒, $n=7$ 。在这个关系里出现的物理量有 ρ_0 、 a 和 n 。

当毛料较薄时, 传压介质中通常出现空化。这是因为击波在毛料上反射后在传压介质里出现负压, 于是介质就很快地蒸发, 形成由液态和气态混合体组成的空化区^(2,3)。为了描述这个现象, 就需要引进另一个物理量 $-p_v$, p_v 称为空化压力。我们假设 p_v 是常数。当压力降低到 $-p_v$ 时, 便立即出现空化, 而且空化区的压力恒为 $-p_v$, 空化区的密度 $\rho \leq \rho_v$ 。 ρ_v 是当压力开始等于 $-p_v$ 时的介质密度。水的空化压力约为几个大气压。

以下取 ρ_0 、 a 、 p_v 和 n 作为描述传压介质性质的独立物理量。

(三) 毛 料

除了毛料的尺寸 L 和厚度 δ 而外, 有关毛料性质的物理量是密度 ρ_s 和强度。如果忽略弹性变形, 并假设材料是理想刚塑性的, 就可以用屈服应力 σ 这一个量表示材料的强度特性。我们还假设 σ 是常数, 或者说, 在爆炸成形应变率的范围内 (约为 10^3 秒⁻¹), σ 是常数。它可以不同于静力试验的数值。

当毛料很薄而变形量又比较大的时候 (这些条件通常是满足的), 毛料的变形和应力状态接近于同厚度的薄膜。因而 σ 、 ρ_s 、 δ 必然以 $\sigma\delta$ 和 $\rho_s\delta$ 这两种组合方式出现。以下我们就取 $\sigma\delta$ 、 $\rho_s\delta$ 和 L 作为描述毛料特征的独立物理量。

表 1

炸 药	ρ_B	D	$(w/\rho_B)^{1/3}$	γ
传 压 介 质	ρ_0	a	p_v	n
毛 料 等	$\rho_s\delta$	$\sigma\delta$	L	

如果又假设模具是刚性的, 则描述模具特征的量只有一个几何尺寸 L 。

表 1 列出决定爆炸成形效果的独立物理量, 其中 γ 和 n 已经是无量纲的纯数。这里共有 9 个有量纲的物理量。根据 Π 定理, 可以由它们组成 6 个独立的无量纲量。再加上 γ 和 n , 我们就得到薄板或薄壳的爆炸成形相似参数如下:

$$\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3}, \frac{\rho_s\delta}{\rho_0 L}, \frac{\sigma\delta}{\rho_B D^2 L}, \frac{\sigma\delta}{p_v L}, \frac{a}{D}, \frac{\rho_0}{\rho_B}, \gamma, n.$$

这些相似参数的直接物理意义为: $\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3}$ 代表药包尺寸与毛料尺寸之比, 也就是药包的相对尺寸; $\rho_s\delta/\rho_0 L$ 代表毛料质量与传压介质质量之比; $\sigma\delta/p_v L$ 代表毛料变形阻力与空化压力之比; $\sigma\delta/\rho_B D^2 L$ 与其他参数组合后, 代表毛料变形阻力与击波压力之比; $\frac{a}{D}$, $\frac{\rho_0}{\rho_B}$, γ , n 反映爆炸产物与传压介质间的相互作用, 例如, 这些量影响着, 炸药的能源有多少以击波的形式传递到传压介质中去, 有多少能量在击波发射后还保留在爆炸产物里。

令 y 为标志成形量的一个特征长度。例如, 在圆薄板自由拉延的问题里, y 可以是最大挠度; 在有模成型的部分成形问题里, y 可以是贴模点的位置。我们有

$$\frac{y}{L} = f_1 \left(\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3}, \frac{\rho_s\delta}{\rho_0 L}, \frac{\sigma\delta}{\rho_B D^2 L}, \frac{\sigma\delta}{p_v L}, \frac{a}{D}, \frac{\rho_0}{\rho_B}, \gamma, n \right).$$

这个式子又可以写成药量计标公式的形式:

$$w = \rho_B L^3 f_2 \left(\frac{y}{L}, \frac{\rho_s\delta}{\rho_0 L}, \frac{\sigma\delta}{\rho_B D^2 L}, \frac{\sigma\delta}{p_v L}, \frac{a}{D}, \frac{\rho_0}{\rho_B}, \gamma, n \right).$$

又如以 v 表示某一点的贴模速度, 以 τ 表示成形所需的时间, 则有

$$\frac{v}{a} = f_3 \left(\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3}, \frac{\rho_s \delta}{\rho_0 L}, \frac{\sigma \delta}{\rho_B D^2 L}, \frac{\sigma \delta}{p_v L}, \frac{a}{D}, \frac{\rho_0}{\rho_B}, \gamma, n \right),$$

$$\frac{\tau a}{L} = f_4 \left(\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3}, \frac{\rho_s \delta}{\rho_0 L}, \frac{\sigma \delta}{\rho_B D^2 L}, \frac{\sigma \delta}{p_v L}, \frac{a}{D}, \frac{\rho_0}{\rho_B}, \gamma, n \right).$$

用类似的方式可以表示任何其他有关成形效果和成形过程的量。在相似参数相等的情况下，毛料、传压介质和爆炸产物运动的所有方面都是相似的。

二、几何相似律

如果不改变炸药（品种、密度、颗粒度），传压介质和毛胚的材料，就只有 $\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3}$ 和 $\frac{\delta}{L}$ 这两个相似参数是可变的。前者是药包的相对尺寸，后者是毛料的相对厚度。在两个爆炸成形问题中，这一对相似参数相等就是说两个问题中的几何条件是相似的。因此，在不变炸药，传压介质和毛胚材料的条件下，如果所给定的几何条件是相似的，成形效果就相似。我们称这个关系为几何相似律。

在前一节里，相似参数的推导是以一些物理假设为前提的。如果问题只限于讨论不变炸药、传压介质和毛胚材料的情况，则有許多假设是不必要的。几何相似律能够成立的最重要和最本质的前提是允许忽略：应变率对材料应力应变关系的影响；空化生成率对传压介质 $p-\dot{\epsilon}$ 关系的影响；重力影响；爆炸气体和传压介质的粘性和热传导等。换言之，即允许忽略所有有时效的物理因素。前一节所提到的其他假设，对这里所讨论的问题，不是本质的，几何相似律的成立与否不依赖于那些假设。那些假设包括：毛料的变形和应力状态和薄膜一样；材料是理想刚塑性的；模具是刚性的；传压介质的空化压力与密度无关；炸药的爆震速度正比于装药密度；在爆震过程中，爆炸产物的压力正比于密度的三次方等。

根据几何相似律，在不变炸药、传压介质、毛胚材料，并且保持药包相对尺寸和毛料相对厚度不变的条件下，我们有：

（一）成形后的大、小零件是几何相似的。毛料任一部分的位移、变薄和回弹的绝对量都与零件的尺寸成正比。大、小零件上的应变和应力分布相同。

（二）大、小零件的毛料贴模速度相等，与零件的尺寸无关。毛料的应变率和成形所需时间与零件的尺寸成反比。

（三）大、小模具中相应点的应力和应变相等，但它们随时间的变化率与零件的尺寸成反比。

（四）在某些情况下，在炸后的零件上出现皱纹。根据我们的经验，皱纹常在以下两种情况下出现：（1）凹模内的真空度不够，而且被压缩后的空气不能顺利排出，以致在毛料和凹模之间形成局部的高压气包；（2）药包的位置或分布不恰当，例如，在使用多个集中药包时，在不同药包影响范围的交界处，常出现皱纹。出现皱纹另一个可能的原因是动力失稳。为了描述后二种现象，显然不需要引进新的物理量。为了模拟第一种情况，只需要保持凹模内的气体参数不变；对于通常使用的空气而言，只需保持真空度不变。由此可见，起皱现象也是服从几何相似律的。

（五）模型试验的主要目的之一是找出成形量 y 与药量 w 、毛料尺寸 L 、毛料厚度 δ 和药包位置 h 间的具体函数关系。根据几何相似律，我们有

$$\frac{y}{L} = f_1 \left(\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3}, \frac{\delta}{L}, \frac{h}{L} \right).$$

因此，在试验中只需改变 w 、 δ 和 h ，并测量 y ，就能确定函数 f_1 的具体形式，而无需改变毛料的尺寸 L 。

从上面的讨论可见，小型零件试验可以在各个方面模拟大件试验。这些方面包括，成形量、变薄、回弹、破坏、起皱、贴模速度、模具强度等。

三、爆炸成形的机制和能量准则

在第一节里,为了推导相似参数,我们对薄板和薄壳的爆炸成形机制做了必要的一些描述。然而,这些基于一般流体动力学和塑性动力学的描述还未能充分反映这个问题最主要的特点。在这里,我们试就爆炸成形的机制作进一步的讨论,并在这个基础上提出更为简单、实用的模型律。

图1给出一圆薄板在一个8号电雷管作用下的成形过程测量结果^[4,5]。图中横坐标是时间,纵坐标是中心点的位移。图2是试验装置的示意图。试件是 $\delta=1.5$ 毫米厚的马口铁(由两片组成),毛料外径为148毫米,阴模模口直径为90毫米,雷管吊高为100毫米,传压介质是水,水深220毫米。

成形过程曲线最突出的特点是再加速现象,即图中成形过程曲线从II突然变为III这种现象。在我们最近所作的圆桶胀形过程的测量中,虽然由于技术上的原因,只

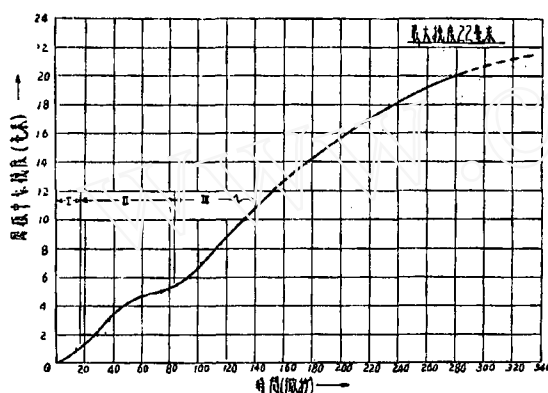


图 1

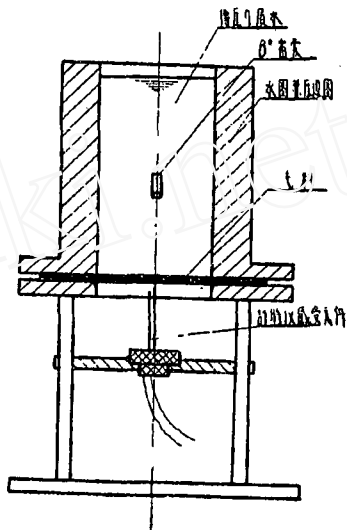


图 2

测得了类似II那样一段曲线,但这时曲线已趋水平,位移(半径的变化)却只有约5毫米,远远不及最后实际达到的变形量(约15毫米)。这说明,如果没有再加速,是不可能达到这样大的最后变形量的。因此虽然实验没能直接测出再加速,但再加速的存在是肯定的。无论是圆板或圆桶,再加速所贡献的成形量在总的成形量中所占比重都很大。国外有关水下结构抗爆炸的实验表明,在结构较薄时,也出现这种现象^[6]。因此必须认为,在薄板和薄壳的爆炸成形问题中,再加速是一种典型现象。

水下爆炸对结构作用的机制问题,包括二次加速问题,在国外已有所研究(例如,参看[2]、[6]、[7])。现在结合我们对这个问题的看法来说明爆炸成形的机制。

(一) 水下爆炸的若干特点^[2, 14, 15]

考虑一个在中心起爆的球形药包。起爆后,在药包中心迅速形成稳定的爆震波,它以一定的爆速向四周传播,同时引爆它所扫过的炸药。当爆震波到达药包表面时,炸药的爆震过程就基本结束。这

时,原来由炸药所占据的空间便都充满了高温、高压、高密度的爆炸产物(或称爆炸气体)。然而这个气体的状态和运动情况并不是均匀的,在爆震波头上,压力、密度和质点速度(向外)都最大,在中心处,压力、密度最小,而质点速度为零。这个高压气球与周围的水相互作用,就在水中产生向四周传播的击波。在爆炸气体内,首先产生向心的稀释波。由于圆球曲率的影响,不久就在稀释波后形成向心的击波。在这个击波形成的初始阶段,由于质点向外的速度很大,击波的强度还较小,所以击波向心发展的绝对速度不大。经过若干时间后,击波才以更快的速度向中心集中,形成所谓收缩爆炸,再次提高中心的压力。击波在中心反射后又形成向外的击波,当它到达爆炸气体和水的分界面时,在水中又一次产生击波,同时又一次在爆炸气体内产生稀释波,于是整个过程就重复进行,直到所发射的击波减弱到可以认为邻近药包处的水的运动接近于不可压缩的流动时为止。历次发射的击波累积成为总的击波,用于形成这个击波的能量约占全部炸药能量的50%。击波发射后,尚保留在爆炸气体中的能量为剩下的50%,确切的数值取决于炸药的品种和密度^[9]。

水中击波的强度随传播的距离衰减。一方面这是由于波前的面积随距离的平方增加,另一方面是由于击波是一种不可逆过程,因而一部分机械能变为热能。击波愈强,这种能量损失就愈大,因此主要的能量损失发生在距药包近的地方。击波的压力波形在波头附近可以近似地表示为

$$p = p_m e^{-t/\theta_m}.$$

根据第一节的相似参数分析,我们有

$$\begin{aligned} p_m &= \rho_0 \alpha^2 \varphi_1 \left(\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3} \right), \\ \theta_m &= \frac{1}{\alpha} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3} \varphi_2 \left(\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3} \right), \\ E &= \rho_0 \alpha^2 \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3} \varphi_3 \left(\frac{1}{L} \left(\frac{w}{\rho_B} \right)^{1/3} \right), \end{aligned}$$

其中 L 是测点到药包中心的距离, E 是单位面积的能流密度。当 L 超过药包半径的7倍以上时,对多种凝聚体炸药,可将上式表示为*,

$$\begin{aligned} p_m &= k \left(\frac{w^{1/3}}{L} \right)^\alpha, \\ \theta_m &= n w^{1/3} \left(\frac{w^{1/3}}{L} \right)^\delta, \\ E &= m w^{1/3} \left(\frac{w^{1/3}}{L} \right)^\mu. \end{aligned}$$

对于密度为1.52克/厘米³的铸装TNT,可取^[2]

$$\begin{aligned} k &= 0.0533 \times 10^4, & \alpha &= 1.13, \\ n &= 1.104 \times 10^{-4}, & \delta &= -0.24, \\ m &= 0.083 \times 10^3, & \mu &= 2.05. \end{aligned}$$

在使用上述数据时, w 的单位应为公斤(质量), L 的单位应为米。这时, p_m 的单位为公斤(力)/厘米², θ_m 的单位为秒, E 的单位为公斤(力)/厘米。

由 E 的表示式可见

$$4\pi L^2 E = 4\pi m w^{1/3(1+2.05)} L^{-0.05} \cong m' w$$

其中 $m' = 4\pi m$ 。所以在距药包半径大约7倍以外的地方,能量的损失是小的,因而击波的能流密度

*由于在以下讨论中 ρ_0 是常数,所以在公式中就不再写它。

近似地正比于药量,反比于距离的2次方。在薄板,薄壳的爆炸成形问题中,药包到毛料的距离通常满足这个条件。

仍以上述TNT为例,在距离药包半径10倍之处有

$$\begin{aligned} p_m &= 1070 \text{ 公斤 (力) / 厘米}^2, \\ \frac{a\theta_m}{L} &= 0.166 \left(\frac{w^{1/3}}{L} \right)^{0.78} = 0.265, \\ 4\pi L^2 E &= 1.043 \times 10^7 \times w \text{ 公斤 (力) - 厘米} \end{aligned}$$

但每公斤TNT的总能量 Q 为 4.53×10^7 公斤 (力) - 厘米。因此入射击波的能量占总能量的百分比为 22.9%。由于击波能量约占总能量的50%,因此约有一半击波能量变为热能。 $\frac{a\theta_m}{L}$ 代表击波波长与零件尺寸之比,可称为击波的相对波长。以上数据在薄板和薄壳的爆炸成形问题中是有代表性的,它们反映了压力、波长和入射击波能量的数量级。

可以用理论计和实验的方法确定在击波发射后气球内的残余能量。在无限体里,气球脉动的周期与残余能量有直接的关系。如以 θ 表示气球第一次收缩的周期, Y 表示击波发射后的残余能量, p_0 表示药包所处位置的静水压力,则根据不可压缩流体理论有^[2]

$$\theta = 1.14 p_0^{-1/2} \frac{Y^{1/3}}{p_0^{5/6}}.$$

气球第一次脉动周期的实测结果可以归纳为

$$\theta \approx K w^{1/3} / p_0^{5/6}.$$

如以装药密度为1.55的TNT为例, $K=2.11$ 。在后一公式中, w 以公斤 (质量) 计, p_0 以米水头计 (一个大气压=10.3米)。从这两个公式消去 p_0 和 θ , 并注意到单位的换算, 得

$$Y = 1.94 \times 10^7 w,$$

其中 Y 以公斤 (力) - 厘米计, w 以公斤计。因此残余能量占总能量之百分比为 42.8%。

仍以距离药包中心10倍半径的 L 为例, 并取 $p_0=10.3$ 米, 我们得

$$\frac{a\theta}{L} = 451 \left(\frac{w^{1/3}}{L} \right) = 835.$$

这个数值很大。实际上这说明,在爆炸成形条件下, θ 远大于成形所需的时间, 因此一般不会出现无限体中的那种气球脉动现象。

根据上面的讨论, 可以将在爆炸成形条件下水下爆炸的特性归纳为以下几点: (1) 毛料上入射击波的压力峰值为一千大气压的数量级。击波的波长较短, 不超过毛料尺寸的十分之几, (2) 毛料上入射击波的能量占炸药能的1/4左右, 占用于形成击波的能量的一半左右。在击波形成后, 约有一半炸药能量仍保留在爆炸气体中。

(二) 毛料及其与传压介质的相互作用

我们取中心放有一集中药包的球壳毛料为例 (图3), 以 L 表示球的半径。在一般薄板、薄壳的爆炸成形问题中, 毛料的相对厚度 $\frac{\delta}{L}$ 约为 1% ~ 0.1%, 因此 $\frac{\rho_s \delta}{\rho_0 L}$ 是一个小量。这就是说, 毛料的重量远小于传压介质的重量。用流体弹性力学的述语说, 这就意味着, 在影响毛料运动的因素中, 附加质量起很大的作用。

首先考察入射击波作用于毛料的初期情况。一千大气压量级的水中击波可以近似地用声学理论处理。又由于击波的相对波长 $\frac{a\theta_m}{L}$ 较小, 所以在处理初期运动时可以把问题简化为平面声波。当入射

波刚好到达毛料表面时,毛料的变形速度还很小,因此入射波的反射相当于全反射,而毛料所首先受

到的压力为 $2p_m$ 。除了水压力以外,作用于单位面积毛料上的力还有变形阻力

$\frac{2\sigma\delta}{L}$ 。后者与前者之比在数量级上为

$\frac{\sigma\delta}{p_m L}$,这是一个很小的数,约为5%

~0.5%。正是因为压力很大,毛料的质量又很小,所以毛料的加速度很大。在毛料取得速度的同时,就有稀释波传向液体的内部,作用于毛料的压力也迅速下降。在这一运动阶段中起控制作用的

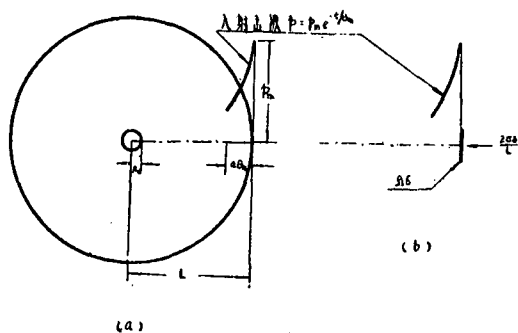


图 3

参数是

$$\frac{\theta_s}{\theta_m} = \frac{\rho_s \delta}{\rho_0 a \theta_m} = \frac{\rho_s \delta}{\rho_0 L} \frac{L}{a \theta_m}.$$

$\frac{\theta_s}{\theta_m}$ 代表毛料质量与击波波长内水的质量之比。在一般情况下 $\frac{\theta_s}{\theta_m} \approx 0.4$ 。若以 y 表示毛料的径向位移,以 \dot{y} 表示速度, $p(t)$ 表示毛料表面的水压力,通过简单计算可得,

$$\begin{aligned} \frac{\theta_m \dot{y}/L}{2p_m \theta_m / \rho_0 a L} &= \frac{e^{-t/\theta_m} - e^{-\frac{t}{\theta_m} - \frac{\theta_m}{\theta_s}}}{1 - \frac{\theta_s}{\theta_m}} - \frac{\sigma\delta}{p_m L} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_m} - \frac{\theta_m}{\theta_s}} \right), \\ \frac{y/L}{2p_m \theta_m / \rho_0 a L} &= 1 - \frac{e^{-\frac{t}{\theta_m}} - \frac{\theta_s}{\theta_m} e^{-\frac{t}{\theta_m} - \frac{\theta_m}{\theta_s}}}{1 - \frac{\theta_s}{\theta_m}} - \frac{\sigma\delta}{p_m L} \left[\frac{t}{\theta_m} - \frac{\theta_s}{\theta_m} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_m} - \frac{\theta_m}{\theta_s}} \right) \right], \\ \frac{p(t)}{2p_m} &= e^{-\frac{t}{\theta_m}} - \frac{e^{-\frac{t}{\theta_m}} - e^{-\frac{t}{\theta_m} - \frac{\theta_m}{\theta_s}}}{1 - \frac{\theta_s}{\theta_m}} + \frac{\sigma\delta}{p_m L} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_m} - \frac{\theta_m}{\theta_s}} \right). \end{aligned}$$

在推导上述关系时,我们取入射击波的压力波形为 $p = p_m e^{-t/\theta_m}$ 。

令 t_1 表示最大变形速度的发生时间,得

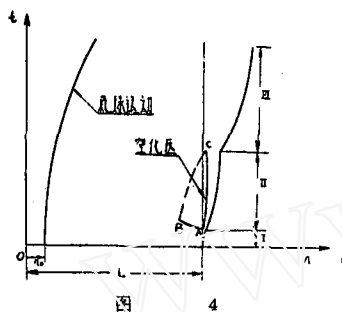
$$\begin{aligned} \frac{t_1}{\theta_m} &= \frac{1}{\frac{\theta_m}{\theta_s} - 1} \ln \frac{\theta_m}{\theta_s} \left[1 - \frac{\sigma\delta}{p_m L} \left(1 - \frac{\theta_s}{\theta_m} \right) \right] \\ &\approx \frac{1}{\frac{\theta_m}{\theta_s} - 1} \ln \frac{\theta_m}{\theta_s}. \end{aligned}$$

取 $\theta_m/\theta_s = 2.5$,得 $t_1/\theta_m = 0.876$ 。令 t_2 表示最小板面压力的发生时间,得

$$\begin{aligned} \frac{t_2}{\theta_m} &= \frac{1}{\frac{\theta_m}{\theta_s} - 1} \ln \left(\frac{\theta_m}{\theta_s} \right)^2 \left[1 - \frac{\sigma\delta}{p_m L} \left(1 - \frac{\theta_s}{\theta_m} \right) \right] \\ &\approx \frac{2t_1}{\theta_m}. \end{aligned}$$

$$\frac{p(t_2)}{2p_m} = -e^{-\frac{t_2}{\theta_m}} + \frac{\sigma\delta}{p_m L} \approx -e^{-\frac{t_2}{\theta_m}}.$$

质里将出现负压。可以证明,板面上开始出现负压的时间比 t_1 晚一些,在 $\frac{\sigma\delta}{p_m L}$ 小的情况下,几乎等于 t_1 。因此可以说在大约 $t \leq \theta_m$ 的时候,毛料上就开始有负压*。当负压足够大时,水中就发生气泡,形成空化区。在这以后,上述计祿就不可靠了,就必须考虑空化的作用。在图1和图4里,我们以I标志空化前毛料的运动阶段。



具体计祿是比较复杂的，而且在作出计祿后，上面所提到的机制中的某些细节可能还需要修正，但在大体上明确了这个机制后，可以对某些极限情况作出至少是在量级上正确的估计。我们考虑毛料厚度很薄的情况，显然这时药量也是较小的。从前面关于古波性质的讨论里我们知道，在这种情况下，作用于毛料的入射击波能量与药量成固定的比例，与毛料的尺寸 L 无关。如毛料很薄，则借助于空化，这部分能量将为毛料所吸收。因此第 I、II 阶段的成形量可以根据简单的能量平衡关系得出。若以 $y_{I, II}$

- 9 -

表示这个成形量, 假设材料是理想刚塑性的, 并忽略材料的变薄, 则应变能可以表示为

$$8\pi\sigma\frac{y_I}{L}\delta L^2,$$

其中 σ 是屈服应力。因此

$$2\frac{y_I}{L} = \frac{m'w}{4\pi\sigma\delta L^2}.$$

附加水的厚度应该与击波波长 $\alpha\theta_m$ 同一数量级, 具体的数值还与毛料厚度、强度和重量有关。但在小药量的极限情况下, $\frac{\alpha\theta_m}{L}$ 也很小。因此附加水的质量相对于水球的质量也很小。这就是说 $\frac{m_2}{m_1} \ll 1$ 。

在这种情况下, 水球与附加水碰撞时的能量损失可以忽略, 因而气球内的剩余能量 $Y = sw$ 几乎都转化为毛料的变形功。令 y_{II} 表示二次加速对成形量的贡献, 得

$$2\frac{y_{II}}{L} = \frac{sw}{4\pi\sigma\delta L^2}.$$

因此

$$\frac{y_{II}}{y_I} = \frac{s}{m'}.$$

仍以前面所引的TNT为例, 得 $\frac{y_{II}}{y_I} = \frac{43}{23} = 1.87$, 这一比例, 在数量级上是与圆桶的实验结果很一致的。由 $y = y_I + y_{II}$ 得

$$2\frac{y}{L} = \frac{(s + m')w}{4\pi\sigma\delta L^2}.$$

令 $\bar{\epsilon}$ 表示毛料的平均应变, 则可将上式写成更为一般的形式,

$$\sigma\bar{\epsilon}\delta L^2 = Kw.$$

$\sigma\bar{\epsilon}$ 显然表示单位体积毛料的平均应变能, 而 δL^2 正比于毛料的体积, 所以系数 K 正比于炸药能的利用率。这个利用率的极限数值, 仍以前述TNT为例, 是66%。实现这种极限的条件是 $\frac{\delta}{L}$ 很小(趋近于

零), $\frac{w^{1/3}}{L}$ 较小, 但不是过分小以至不能发生空化。在其他条件下, 或者是因为碰撞损失较大, 或者是

因为部分击波能量被反射, 炸药能的利用率会低些。究竟与极限值差多少就需要通过实验和理论分析来解决了。还可以指出, 既然毛料有一定厚度, 入射击波的能量终究有一部分被反射波带走, 因此

$\frac{y_I}{y_{II}}$ 的比值可以比极限值更小些。

如果把 K 当成常数, 更确切地说, 如果把 K 当成是与 w 和 δ 无关的, 我们就称上式所表示的关系为能量准则。在自由成形问题中, $\bar{\epsilon}$ 总是可以表示为 $\frac{y}{L}$ 的函数, 因此根据能量准则, 我们有

$$\frac{y}{L} = f_1\left(\frac{w}{\sigma\delta L^2}\right).$$

在有模成形问题里, 成形后的几何形状是完全确定的, 因而 $\bar{\epsilon}$ 为已知。于是能量准则可以表示为

$$\frac{\sigma\delta L^2}{w} = C = \text{const.}$$

与第一节和第二节的讨论相对照, 可见在能量准则成立的条件下, 如果不考虑炸药和传压介质, 就只有一个相似参数 $\frac{w}{\sigma\delta L^2}$ 。为了确定常数 C 或函数 f_1 , 就只需要用一种尺寸, 一种厚度的毛料来作试

验。如果事先又知道各种材料的 σ , 则甚至只用一种材料就可以了。

在下一节里, 我们将用目前所掌握的试验资料来检验能量准则。在这里先考察一下能量准则可能成立的条件。在封闭式的爆炸成形装置中, 传压介质无散逸的可能。我们预期在这种条件下, 能量准则成立的可能性较大, 大体上应与球壳的情况相当。在开敞式的装置中, 传压介质可以沿开敞的部位飞散。毛料愈厚, 变形阻力就愈大, 毛料对传压介质的反作用也愈大, 因此散逸的能量也会多些, 从而厚度对 K 值的影响也会比在封闭的条件下更显著一些。总之, 在开敞式的问题中, 当毛料充分薄时, 有理由认为能量准则可以成立。在封闭式问题中, 成立的条件可能放松一些。

以上关于能量准则的讨论还多半是定性的, 不能认为是充分的证明。在下一节中, 我们用试验资料直接检验这个准则。

四、能量准则的试验检验

(一) 薄圆板深拉伸试验*[9]

试验装置如图5所示。表2和表3给出变药量和变毛料厚度的试验数据。表中的药量是TNT的克数, 其中尚未包括雷管的炸药当量。试验条件如下: 毛料直径 $L=240$ 毫米, 拉伸比 $=\frac{132}{240}=0.55$,

表2. 变药量试验** $\delta=30$ 毫米

药 量 w (克)	10	15	30	40	50
成形深度 y (毫米)	23.9	32.5	39.5	52.2	57.2

表3. 变厚度试验 $w=30$ 克

料 厚 δ (毫米)	0.75	1.00	1.25	1.5	2.0	3.0
成形深度 y (毫米)	54.3	40.0	29.5	27.5	22.8	20.6

材料是08冷轧钢板, 药高 $h=200$ 毫米, 水深为300毫米。药包呈圆柱形, 中插8号雷管。TNT炸药之颗粒度小于0.25毫米, 密度约为1.1克/厘米³。

根据几何相似律我们有

$$\frac{y}{L} = f_1\left(\frac{w^{1/3}}{L}, \frac{h}{L}, \frac{\delta}{L}\right),$$

或

$$\frac{y}{L} = f_1\left(\frac{w}{\delta L^2}, \frac{\delta}{L}, \frac{h}{L}\right).$$

根据能量准则则有

$$\frac{y}{L} = f_1\left(\frac{w}{\delta L^2}, \frac{h}{L}\right).$$

* 参阅附录。

** 本表中未列入原有的两个显然不合理的数据。

在这两批试验中, $\frac{h}{L}$ 等于0.833。如果能能量准则成立, 那末当我们用 $\frac{y}{L}$ 和 $\frac{w}{\delta L^2}$ 整理试验数据时,

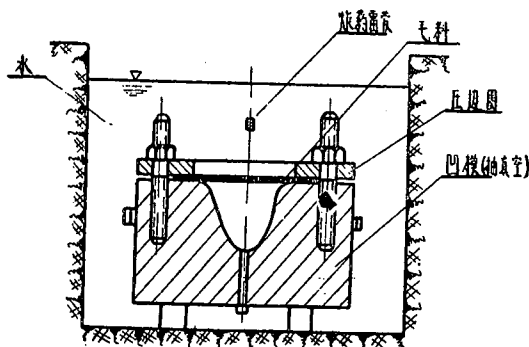


图 5

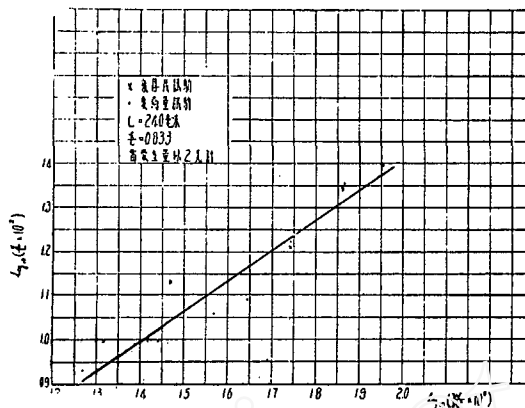


图 6

两批数据应当大体上落在同一曲线上。图6给出以这种方式整理后所得之试验点, 其中·表示变药量试验, ×表示变厚度试验。在这个图里, 雷管当量以2克计, 这个修正实际上只在小药量, 小厚度条件下起作用。由图可见, 每一批试验点都有相当程度的分散性, 而且两批试验点是有交错的。在对数座标里可以大体上用一条直线归纳两批数据。这时试验点与直线间的偏差大都在 $\frac{y}{L}$ 的±10%以内。考虑

到试验中的误差, 就这些试验数据而言, 没有理由认为能量准则是不成立的。附带说明, $\frac{\delta}{L}$ 的变化范围为0.31%~1.25%。

(二) 圆薄板拉伸试验^[10]

这些试验是分别在如图7.a和7.b所示的装置上进行的。传压介质为拍实后的湿沙。炸药是粉状混合TNT, 装药密度为1.1—1.24克/厘米³, 起爆方式同前。以下给出有关的研究数据:

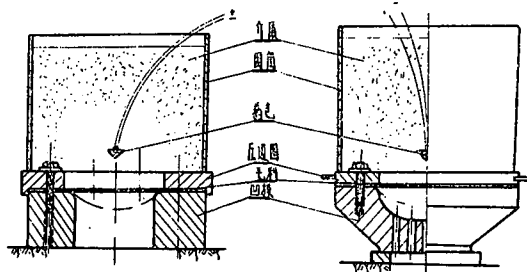


图 7

1. 变药量试验 (图7.a) 毛料直径 $L \approx 288$ 毫米, 药高 $h = 60$ 毫米, 模口直径 $d = 219$ 毫米, 料厚 $\delta \approx 3$ 毫米, 材料是质量较差的、相当于 CT3 的热轧钢

板。于是我们有, $\frac{h}{L} \approx 0.208$, $\frac{d}{L}$

≈ 0.76 , $\frac{\delta}{L} \approx 1.04\%$ 。试验结果列于表4, 在此表中TNT指克数, 不包括雷管的炸药当量。

表 4

药量 w (克)	10	15	20	30	40	50	60	65	70
毛料直径 L (毫米)	288	287	288	290	288	286	286	289	287
毛料厚度 δ (毫米)	3.0	3.0	3.1	3.35	3.0	3.0	3.0	3.2	3.3
成形深度 y (毫米)	14.6	26.8	35.5	42.2	50.4	58.9	70	70	破裂

2. 变料厚试验 $L \cong 475$ 毫米, $\frac{h}{L} \cong 0.249$, $\frac{d}{L} \cong 0.802$ (装置见图 7.b) 药量 $w = 150$ 克, 材料是质量尚好的热轧钢板。试验结果见表 5。

表 5

δ (毫米)	2.5	3.0	3.9	5.0	5.25	7.25	8.5
L (毫米)	471	470	475	475	475	475	475
y (毫米)	94	81.5	58.2	57.0	49.8	42.5	34

3. 变药高试验 $L = 288$ 毫米, $\delta = 3$ 毫米, $w = 50$ 克。试验在如图 7.a 所示的装置上进行, 结果列于表 6。

表 6

药高 h (毫米)	40	50	60	70	80	90	100	110
y (毫米)	58.4	53	41.75	41.0	36.6	31.0	31.1	25

变药量和变料厚试验是分别在不同尺寸的模具上进行的, 药包的相对挂高 $\frac{h}{L}$ 也不相等。此外在拉延比, 模具, 材料等方面也存在着系统的差别。因此能量准则的检验不能第一个例子那样直接。为此我们取

$$\frac{y}{L} = \varphi\left(\frac{h}{L}, \dots\right) \left(\frac{w}{L^3}\right)^{\alpha} \left(\frac{L}{\delta}\right)^{\beta}$$

其中 $\varphi\left(\frac{h}{L}, \dots\right)$ 是除药量和厚度以外, 其他参数 (如相对药高、拉延比, 材料强度等等) 的函数。

α 和 β 是常数。这个式子虽不如 $\frac{y}{L} = f\left(\frac{w}{L^3}, \frac{\delta}{L}, \frac{h}{L}, \dots\right)$ 那么普通, 但在参数变化范围足够窄时, 可以认为是相当普遍的。

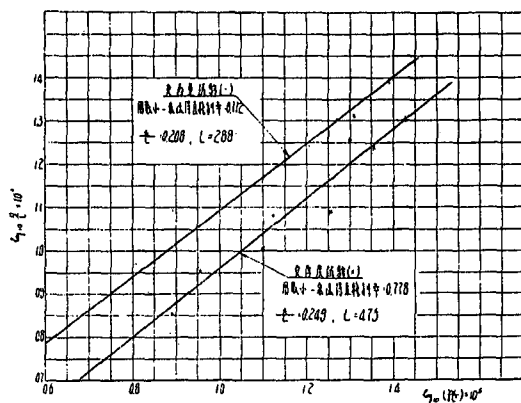


图 8

如果能量准则成立, 则 α 应等于 β 。换言之,

$$\frac{y}{L} = \varphi\left(\frac{h}{L}, \dots\right) \left(\frac{w}{\delta L^2}\right)^{\alpha}$$

可以利用变药量和变厚度的试验数据, 分别确定 α 。如果能量准则成立, 那末这样确定的两个 α 值应该相等。

图 8 中给出变药量和变厚度试验的试验点, \cdot 表示变药量数据, \times 表示变厚度数据。在对数坐标里, 分别用最小二乘法以直线归纳试验结果, 则从变药量试验得

$$\log_{10} \left(\frac{y}{L} \times 10^3 \right) = 0.772 \log_{10} \left(\frac{w}{\delta L^2} \times 10^5 \right) + 0.323,$$

从变厚度试验得

$$\log_{10}\left(\frac{y}{L} \times 10^2\right) = 0.778 \log_{10}\left(\frac{w}{\delta L^2} \times 10^5\right) + 0.1766.$$

在图 8 里也作出了这两条直线。试验点距直线的偏差大都在 $\frac{y}{L}$ 的 $\pm 10\%$ 以内。 α 之值分别为 0.772 和

0.778。考虑到试验数据的分散情况, 没有理由认为它们是不相等的。因此也就没有理由认为能量准则是不成立的。

以上二式中的常数项不等是由于其他因素的影响。需要指出, 这个差别不能单纯的用相对药高 $\frac{h}{L}$ 这一因素来解释。用最小二乘法, 可将表 6 中的变药高试验结果归纳为

$$\frac{y}{L} \propto \left(\frac{L}{h}\right)^{0.82}$$

把这个修正纳入前二式, 则在变药量情况下得

$$\frac{y}{L} = 43.6 \left(\frac{w}{\delta L^2}\right)^{0.77} \left(\frac{L}{h}\right)^{0.82},$$

在变厚度情况下得

$$\frac{y}{L} = 34 \left(\frac{w}{\delta L^2}\right)^{0.77} \left(\frac{L}{h}\right)^{0.82}$$

这几个公式中的系数不同, 说明在 $L=288$ 和 475 毫米的两套试验中, 另有一些因素造成系统差别。

(三) 锥壳有模成形试验

以上都是自由拉延的例子, 现在再举一个有模胀形的例子。图 9 是试验装置的示意图。图 10 表示凹模形状和毛料放置情况。试验时在模口上下放置顶板, 它们起定位和密封作用。下顶板上开有圆洞, 试验时用湿青纸封好, 以防止在起爆前有水从下面漏走。上顶板也开有圆洞, 其直径比锥壳上口略小。上顶板上放置湿青纸筒。水深是这样选定的, 即再增加水深对成形效果没有影响。采用的材料是 08KII 冷轧钢板, 厚度为 0.8、1.2、1.5、3.0 毫米。炸药为粉状 TNT, 颗粒度在 0.125 毫米以下, 装药密度控制在 1 克/厘米³。试验时只变化药量和料厚。起爆方式同前。当药量较小时, 毛料不能全部贴模。这时以贴模线的位置 y 标志成形量 (见图 11)。药量增加时, y 就逐渐减少。我们称 $y=20$ 毫米时的成形情况为基本成形, 相应的药量为基本成形药量。到达基本成形以前的情况称为部分成形。

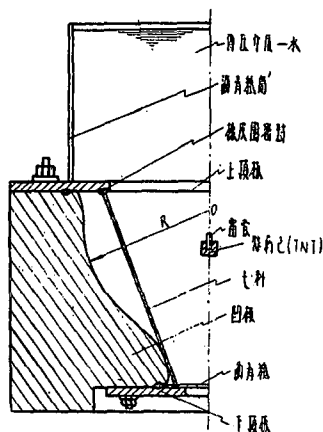


图 9

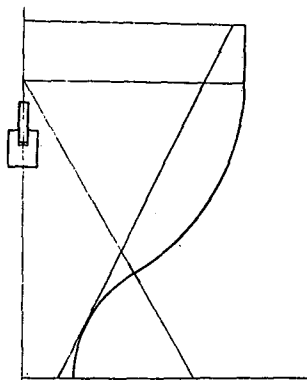


图 10

图12是药量 w 和成形量 y 之间关系的示意图。贴模线与药量的关系大体上是这样的：药量较小时，

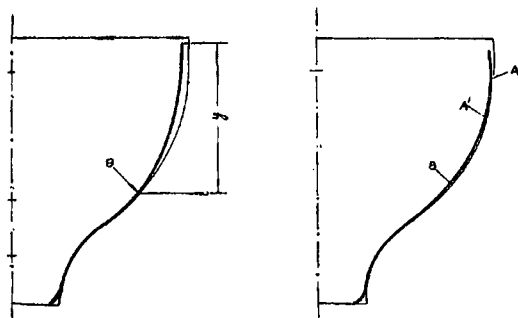


图 11

只有一个贴模线（图11中的B）。药量足够大时，在B之上又出现两条贴模线（A和A'）。随着药量的继续增加，B点上升，A'点下降，并在相遇后消失；A点上升。因此在某一药量范围内可以同时有三条贴模线，而且 $y-w$ 曲线有一段较为平坦的部分。加以A'和B在零件上又常常比较模糊。这就是为什么，在指定药量的情况下，贴模线位置的数据有时比较分散。

根据能量准则，在成形量一定的条件下有

$$\frac{w}{\delta L^2} = \text{const.}$$

这就是说， w 应与 δ 成正比。图13给出在基本成形时，由试验确定的 w 与厚度 δ 的关系。我们看到，基本上可以用一条直线把试验点连接起来。如果将这条直线上升约1.5克药量，它就会通过原点，而1.5克可以认为是雷管的炸药当量。

测量基本成形时毛料母线的长度就可以算出母线方向的平均应变 $\bar{\epsilon}_z$ 和圆周方向的平均应变 $\bar{\epsilon}_\theta$ 。如果忽略母线方向的应力，则总的应变功是 $\sigma \bar{\epsilon}_\theta \delta A_0$ ，其中 A_0 是毛料的初始面积。这样就可以算出，在基本成形时，炸药能量的利用率 $\eta = \frac{\sigma \bar{\epsilon}_\theta \delta A_0}{Qw}$ （11）

取每克TNT之能量 Q 为 4.53×10^7 公斤厘米，雷管的

炸药当量为1.5克，并假设 $\sigma = 5000$ 公斤厘米²，则所得 η 之值如表7所示。 σ 的数值应该是多少，是一个尚待研究的问题。这里所取的约为静载荷下屈服极限的二倍。由于试验时没有改变材料，所以表中的 η 值至少具有相对的意义。能量准则要求 η 与 δ （和 w ）无关。表中 η 的数值基本上符合这个要求。

如果在基本成形时能量准则成立，那末在部分成形时（ $y > 20$ 毫米）也预期成立。这就是说，如

表 7

δ (毫米)	0.8	1.2	1.5	3.0
$\frac{\delta}{L}$ ($L=100$ 毫米(%))	0.8	1.2	1.6	3.0
η (%)	13.1	14.4	14.2	13.8

果以 $\frac{w}{\delta L^2}$ 和 $\frac{y}{L}$ 整理试验数据，则在试验误差范围内，所有试验点应该大体上落在同一条曲线上。

由于没有改变 σ 和 L ，因此也可以直接用 $\frac{w}{\delta}$ 和 $\frac{y}{L}$ 整理数据。在图14上给出了经过这样整理后的试验点。在整理时，我们取雷管的炸药当量为1.5克。雷管当量的数值，在小药量、小厚度的情况下，对 $\frac{w}{\delta}$ 的值有较大影响。1.5克是参考了基本成形的试验结果和雷管的能量选定的，但还不一定是最佳的数值。如果以图14中所示的那样一条曲线来综合代表这些试验数据，则在A点右侧（ $\frac{y}{L} < 0.275$ ），试验点偏离这条曲线的数值不超过 $\frac{w}{\delta}$ 的 $\pm 8\%$ ，多数点的偏离比这个数值小。在A点左侧，有些试验点分散较大。在最后一试验范围内，有理由认为在试验条件的控制方面尚存在一些问题，因此暂以虚线归纳数

据。这一部分数据如何处理问题留待以后研究。从A点到基本成形这一区域试验点的分布情况看，在上述误差范围内，试验结果与能量准则是符合的。从不同厚度毛料的试验点沿综合曲线的分布情况

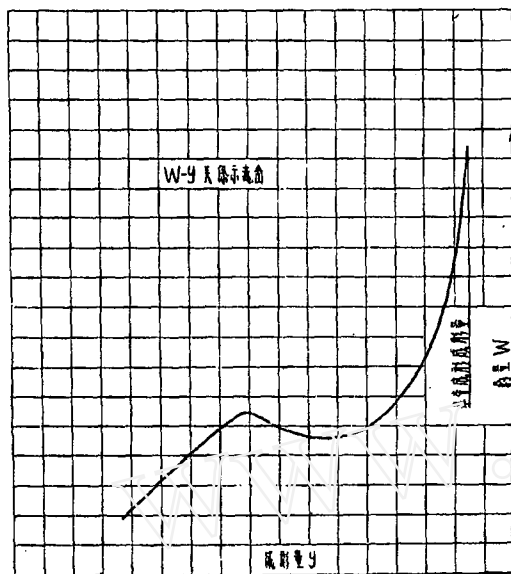


图 12

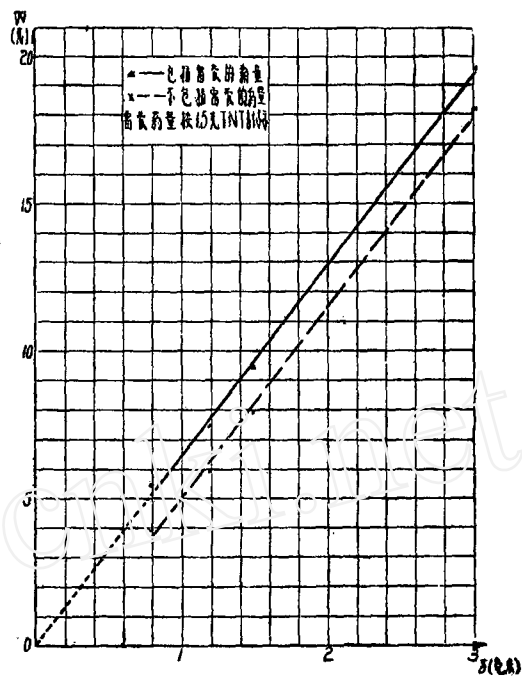


图 13

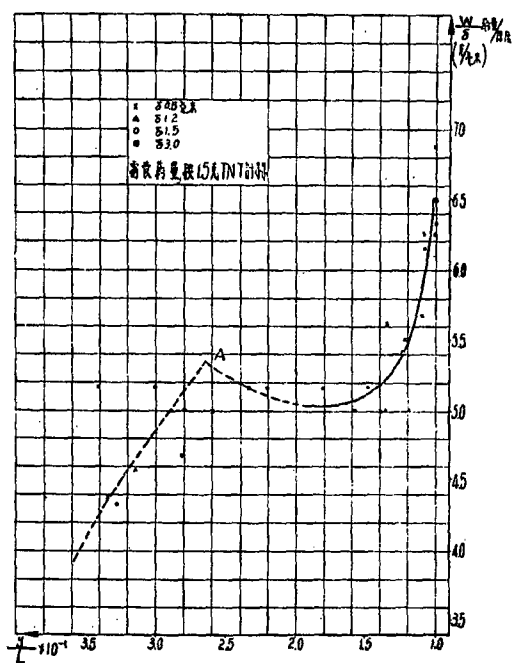


图 14

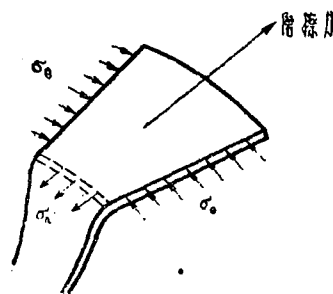


图 15

看,似乎有一些系统的偏差。例如,相应与 $\delta=3$ 毫米的试验点大多稍稍偏高,相应于 $\delta=1.2$ 毫米的试验点则有些偏低。但总地说来偏差不大。又由于试验点还少,即使这种偏差是确实存在的话,根据目前这些数据也难作出肯定的判断。

通过以上三类试验的检验,这些试验既包括自由成形又包括有模成形,可以作出以下结论:试验结果不能否定能量准则是成立的。在试验误差范围内(一般为百分之几至百分之十),试验结果基本上符合能量准则的要求。因此用能量准则计算药量或成形量时,可以预期不致有大的出入。

对于上面所举的第一和第二个例子还需要作一些补充说明。和第三个例子不一样,在平板自由成形问题中,毛料的支撑或约束条件并非都是几何性质的。在试验时我们利用螺钉和压边圈压紧毛料。如果以 F 表示总的压边力,以 μ 表示毛料和压边圈及毛料和凹模之间的摩擦系数,则显然需要引进另一

个相似参数 $\frac{\mu F}{\sigma \delta L}$,这个比值反映了摩擦力与薄膜拉力之比(见图15)。抵抗毛料向凹模内移动的阻

力当然不限于 μF ,另外一个材料的变形阻力 $\sigma \theta$ 。一些冷冲压的试验结果表明,即使在 F 较大的情况下,用于克服摩擦力之功远小于用于产生塑性变形之功^[12]。基于这个原因,在能量准则中就不必考虑用于克服摩擦力之功。当然,压边力必须充分地大以防止起皱,因为一旦毛料起皱,变形阻力就会显著增加,同时应力状态也不再是象薄膜那样了,从而不能把变形功归结为 $\sigma \delta \delta L^2$ 这种形式。

文献[13]指出,在水下结构抗爆的问题中,曾使用能量平衡的原理,并给出平板最大挠度的公式如下:

$$\bar{\delta} = C' \frac{L}{h} \frac{\omega^{1/2}}{(\sigma \delta)^{1/2}}.$$

其中 C' 取决于板的形状和支撑条件以及炸药的性质。这个公式可根据以下两个假设从能量准则导出。

1. 在小挠度情况下, $\bar{\delta}$ 一定可以用 $\frac{y}{L}$ 的幂级数表示,即

$$\bar{\delta} = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left(\frac{y}{L} \right)^{2n}.$$

由于 $\bar{\delta}$ 必须是 $\frac{y}{L}$ 的偶函数,所以级数中只有 $\frac{y}{L}$ 偶次方的项。如挠度很小,有则

$$\bar{\delta} \propto \left(\frac{y}{L} \right)^2.$$

2. 假设平板上的入射能量正比于药量和平板边缘与药包中心所构成的立体角 Ω ,即

$$K \propto \Omega w.$$

当药包到平板的距离足够大时,

$$\Omega \propto \left(\frac{L}{h} \right)^2.$$

将最后三个关系代入能量准则,即得文献[13]所给出的公式。这个公式不同于本文所给出的圆薄板

自由拉伸的公式,其差别在于 $\frac{L}{h}$ 和 $\frac{w}{\sigma \delta L^2}$ 的方次。这可能是因为两个公式的应用范围有所不同,[13]

中的公式适用于小挠度和药包相对吊高很大的情况。文献[13]认为它所给出的公式,经试验验证,是比较满意的。这可以作为能量准则成立的一个佐证。

五、結 束 語

在本文第一节里提出了薄板和薄壳的爆炸成形相似参数。在这个基础上,在第二节里讨论了几何相似律,并分析了几何相似律成立的条件,其中最主要的是假设应变率对材料的应力应变关系没有显著影响。在热加工条件下以及对那些应变率影响较显著的材料,需要对这一假设的可靠性作进一步的研究。在几何相似律成立条件下,只要作一种尺寸毛料的变药量和变厚度试验,就能完全地模拟其他尺寸下的情况。过去我们还没有系统地进行过变尺寸试验。从少数的碳钢试验结果看,几何相似律是大体上成立的^{〔10〕*}。

在第三节里比较详细地讨论了成形机制,并在这个基础上提出了能量准则。如果这个准则是成立的,那末作为成形量试验**的模型律,它比几何相似律远为简便。在成形量试验中,只需要作变药量试验,而不象几何相似律所要求的那样,还要作变厚度试验。由于在能量准则中考虑到了材料的强度,所以在这个意义上它比几何相似律更为广泛。但是几何相似律所能概括的其他现象,如起爆现象等(见第二节),就不是能量准则所都能解决的了。

看来“能量利用”系数C可以作为爆炸成形工艺的一个技术指标。在实践中统计这个数据,或直接统计 η 是有益的。大的C或 η 值意味着药包形状(或分布),药包位置和传压介质的封闭情况是选择得比较合理的。

我们用若干试验数据检验了能量准则。这些试验既有自由成形,又有有模成形;传压介质有水和湿沙。在试验误差范围内,看不出能量准则与试验数据之间有什么矛盾。相反地,以能量准则预测变形量或药量时,误差一般不超过试验误差。今后我们准备在更好地控制误差的条件下,进一步检验这个准则。

能量准则是一个近似的关系。它的使用范围如何是应当通过今后的理论分析和实验研究进一步明确的。

小型模型试验中的一个实际问题是雷管的炸药当量问题,这是因为在小药量情况下,雷管在药量中占相当大的比重,而雷管的作用却是有很显著的方向性的。锥壳基本成形的试验数据表明,8号电雷管的TNT当量约为1.5克。从雷管所含炸药的能量估测,这是一个合理的数值。但是,如果试件的尺寸更小一些,那末相对而言,雷管作用的方向性也就更显著一些。这时是否仍可将雷管当量取为1.5克?在锥壳试验中,雷管是平行于壳体的轴线的,因此在聚能穴的方向上是沒有毛料的。在平板试验中聚能穴常常是对准毛料的。在这两种不同的情况下,雷管当量是否相同?这些也都是尚待研究的问题。看来在用雷管起爆的条件下,试件不能取得过小,否则即便用小模型试验方法确定当量,它的数值将是不可靠的。

在本文编写过程中,郭汉彦、孙同坤同志协助整理和核对了锥壳的试验数据,范桃卿同志制图。文中涉及的平板试验都是中国科学院力学研究所有关研究组的许多同志进行的。参考资料中所提到的只是这些同志中的一部分。不论是提到的或沒有提到的,作者向他们都表示深切谢意。

锥壳试验是211厂首先开始进行的,后来又有力学研究所部分同志参加工作。作者对211厂同意在本文中引用锥壳试验数据,以及对该厂参加此项工作的同志也一并表示谢意。

* 最近我們进行了锥壳的放大試驗。在放大一倍的情况下,几何相似律也得到初步验证。关于锥壳試驗結果的全面分析,將另有專門报告。

** 指 y 与 w , δ , L , σ 等量的关系。

参 考 资 料

- [1] Зельдович Я. Б., Компанец А. С., "Теория Детонации", Государственное Издательство, Москва (1955).
- [2] Cole P., "水下爆炸" (中译本), 国防出版社.
- [3] 郑哲敏, 水中击波入射于平板时空化的形成及其作用, 中国科学院力学研究所资料 (1962).
- [4] 范良藻、孟珊, 爆炸成形的成形过程, 中国科学院力学研究所研究报告 (1961).
- [5] 范良藻, 微秒计时仪的研究和制造, 中国科学院力学研究所研究报告 (1961).
- [6] Snay H.G., Hydrodynamics of Underwater Explosions, Symposium on Naval Hydrodynamics (Edited by Sherman, F. S., 1956), p.325.
- [7] Shauer H. M., The After-Flow Theory of Reloading of Air-Backed Plates at Underwater Explosions, Proc. 1st Nat. Congress Appl. Mech. (1951).
- [8] Христофоров Б. Д., Параметры ударной волны и газового пузыря при подводной взрыве зарядов разной плотности из тэна и азиды свинца, ПМТФ, 1961, №4, 118.
- [9] 韩良弼、陈勇富、汪寿昌, 爆炸成形参数试验报告, 中国科学院力学研究所研究报告 (1961).
- [10] 邵丙璜等, 锅炉封头爆炸成形的实验研究及药量公式的建立, 中国科学院力学研究所研究报告 (1962).
- [11] 孙同坤、郭汉彦, 锥壳零件爆炸成形能量利用初步计算, 中国科学院力学研究所资料 (1962).
- [12] Chung S. Y., Swift, H. W., Cup-Drawing from a Flat Blank, part I, Experimental Investigation, proc. Inst. Mech. Engineers, vol. 165 (1951), p. 199.
- [13] Keil A. H., Problems of Plasticity in Naval Structures: Explosive and Impact Loading, Proc. of the 2nd Symposium on Naval Structural Mechanics (1960), p. 22.
- [14] Holt M., The Initial Behavior of a Spherical Explosion, Proc. Roy. Soc., London, A 234 (1956), p. 89.
- [15] Brode H. L., Blast Wave from a Spherical Charge, Phys. of Fluids, vol. 2, №. 2 (1959), p.217

附 录

水球和附加水碰撞时, 能量损失的计算

在这里我们简单地估计一下, 在空化区消失时, 由于附加水和水球的相互碰撞, 能量的损失情况。为简化起见, 忽略毛料的质量和强度, 并假设在发生碰撞时, 附加水的速度为零。取 U_0 为碰撞前水球外表面的速度。以 r_1 、 r_2 分别表示碰撞时水球的内径和外径, 以 r_2 、 r_3 表示附加水的内径和外径。令 I 表示碰撞时, 单位面积接触面上 ($r=r_2$), 水球与附加水相互作用之冲量。

在碰撞前, 附加水的位势函数 φ 可取为零。在碰撞刚刚结束时, 在 $r=r_3$ 处, φ 仍为零, 但在 $r=r_2$ 处, φ 的边界值需根据冲量 I 确定。我们有

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{p}{\rho_0} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 - F(t).$$

因此在碰撞刚刚结束时, φ 在 $r=r_2$ 处的边界值由下式给出,

$$\varphi|_{r=r_2} = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_0^\epsilon \left[-\frac{p}{\rho_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + F(t) \right] dt$$

$$= -\frac{1}{\rho_0} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\epsilon}^a p dt = -\frac{I}{\rho_0}.$$

φ 的一般表达式为

$$\varphi = \frac{A}{r} + B.$$

因此在碰撞刚刚结束时

$$\varphi = -\frac{I}{\rho_0} \frac{r_3 r_2}{r_3 - r_2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_3} \right).$$

若令 V 为接触面 ($r=r_2$) 在碰撞刚结束时的速度, 则由

$$V = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=r_2, t=0}$$

得

$$V = \frac{I}{\rho_0} \frac{r_3}{r_2} \frac{1}{r_3 - r_2}.$$

同理, 在冲量 I 作用下, 水球外缘之速度 V 又可表示为

$$V = U_0 - \frac{I}{\rho_0} \frac{r_1}{r_2} \frac{1}{r_2 - r_1}.$$

由最后二式得

$$V = U_0 \frac{r_3}{r_2} \frac{r_2 - r_1}{r_3 - r_1}.$$

碰撞前, 水球内各点的速度分布为

$$u = \frac{U_0 r_2^2}{r^2}, \quad r_1 \leq r \leq r_2.$$

因此其动能 K 为

$$K = \int_{r_1}^{r_2} 4\pi r^2 \frac{\rho_0}{2} \frac{U_0^2 r_2^4}{r^4} dr = 2\pi \rho_0 U_0^2 \frac{r_2^3}{r_1} (r_2 - r_1).$$

碰撞后之速度分布为

$$u = -\frac{V r_2^2}{r^2} = \frac{1}{r^2} U_0 r_2 r_3 \frac{r_2 - r_1}{r_3 - r_1}, \quad r_1 \leq r \leq r_3.$$

其动能 K' 为

$$K' = 2\pi \rho_0 \frac{r_2^2 r_3}{r_1} U_0^2 \frac{(r_2 - r_1)^2}{r_3 - r_1}.$$

因此

$$\frac{K'}{K} = \frac{1 - \frac{r_1}{r_2}}{1 - \frac{r_1}{r_3}}.$$

当 r_1 、 r_2 、 r_3 很大时, 我们有

$$\frac{K'}{K} \rightarrow \frac{r_2 - r_1}{r_3 - r_1} \rightarrow \frac{m_1}{m_1 + m_2},$$

其中 m_1 是水球的质量, m_2 是附加水的质量。这也就是两个刚体作塑性碰撞时, 碰撞后的能量与碰撞前的能量之比。若 $\frac{r_1}{r_2}$, $\frac{r_1}{r_3}$ 很小 (相当于小药量的情况), 则 $\frac{K'}{K}$ 近乎1, 这时能量的损失是很小的。