

文章编号: 1001-1455(2002)03-0277-04

高压驱动的抛掷角研究

言志信^{1,2}, 吴德伦¹, 王后裕¹, 郑周练¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;
2. 中南林学院建工学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 在相同的基本假设条件下, 运用与前人不同的数学积分方法, 获得了爆炸驱动抛掷角的表达式, 同时也获得了最终变形角的表达式, 该式与 P. C. Chou, J. Carleone 等所得到的结论完全一致, 并且与实验结果符合较好。

关键词: 高压驱动; 抛掷角; 爆炸

中图分类号: O383 文献标识码: A

*

1 引言

爆炸是一种剧烈的、极为迅速的物理的或化学的能量释放过程, 爆炸产生的高压驱动周围介质使其加速或变形, 是一类重要的爆炸现象。从力学的角度来看, 它具有两个显著的特点: 一是爆炸荷载的大小与介质的运动是相互耦合的, 也就是说, 介质的运动取决于荷载的大小, 荷载的大小又受到介质运动的影响; 二是介质运动的模型可根据情况做不同的选取和处理。

人们之所以极为重视对高压驱动的研究, 是因为它在高压物理、地球物理、材料动态性能、爆炸压实、爆炸焊接、爆破拆除、成型爆破、切割爆破等广泛领域内有很多的应用。

聚能效应是一种重要的高压驱动现象, 其机理可分为两个过程。第一, 药型罩(一般为锥形)压跨形成射流或自锻破片; 第二, 侵彻或高速碰撞过程。罩的压跨过程极为重要, 由于其独特的几何形状, 加之高速性、大变形以及射流能量的高度聚集, 使得对它的研究成为最难研究的课题之一。对药型罩高压驱动原理的深入研究, 使之能为设计提供合理的参数是十分重要的。同时, 也为其它类型的高压驱动提供极为重要的方法, 甚至结论。总之, 高压驱动是高压释放能量和被驱动介质获得能量的过程。

2 研究进展

1941 年 G. E. Taylor^[1] 提出

$$v_0 = 2u \sin \hat{\phi} \quad (1)$$

式中: u 为爆轰波扫过界面的速度。

式(1)给出了抛板极限速度 v_0 与最大抛掷角 $\hat{\phi}$ 的关系, 以后在此基础上出现了大量一维和二维计算公式。

1985 年, 邵丙璜、李国豪^[2] 在忽略了起爆端部影响的定常假定下, 根据绕流理论和活塞理论给出了二维近似的解析解。

以考虑加速效应为特征, P. C. Chou 等^[3] 对非定常情况下的高压驱动进行了研究。通过假设每个微元的加速过程符合指数规律

$$v(t, l) = v_0(l) \{1 - \exp[-(t - T(l))/\tau(l)]\} \quad (2)$$

* 收稿日期: 2001-04-17; 修回日期: 2001-11-05

作者简介: 言志信(1961—), 男, 博士, 副教授。

$$\text{在壁面抛掷角较小的情况下, 解出 } \delta = \frac{v_0}{2u} - \frac{1}{2} \tau \frac{dv_0}{dl} + \frac{1}{4} \frac{d\tau}{dl} v_0 \quad (3)$$

式中: v_0 、 T 、 τ 分别表示最终速度、爆轰波到达该单元的时间和加速时间常数。 T 、 τ 和 v_0 都随位置而变化, 选定特定点(如药型罩顶点) $l=0$, 沿其形成线(母线)距该点的距离记为 l , 第一项 $v_0/2u$ 即为 Taylor 公式, 后两项为不定常修正项。

Randers-Pehrson^[4] 运用一种简化的二维计算机代码模拟金属药型罩被炸药产生的加速度, 得到了跟文献[3]极为相似的公式

$$\delta = \frac{v_0}{2u} - \frac{1}{2} \tau \frac{dv_0}{dl} - \frac{1}{5} \left(\tau \frac{dv_0}{dl} \right)^2 \quad (4)$$

1991年, 作者对金属药型罩爆炸驱动进行了研究, 发现速度大小和抛掷角 δ 均按指数规律增长^[5]。

2 抛掷角方程的推导

本文中的抛掷角(变形角)指的是药型罩形成线(母线)上某点处的压垮方向与罩变形前该点处法线方向所夹的锐角。对抛掷角的计算, 人们已有研究^[3,5], 我们所做的工作是尝试用一种新的方法得到抛掷角的计算公式。

基本假设:

- (1) 爆轰压力垂直地作用于药型罩上;
- (2) δ 可认为很小;
- (3) 忽略在加速期间沿长度 l 方向的质点间的应力分量, 从而罩在加速期间的伸长可以忽略。

如图1所示, β 表示为瞬时压垮角, γ 是某时刻罩表面某点切线与变形前相对该点切线的夹角, α 是罩变形前的半锥角。由图可见

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (5)$$

$$dx/dt = v \sin(\alpha + \delta) \quad (6)$$

另外, 根据爆压始终垂直作用于罩表面的假设及牛顿第二定律, 得

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{d[v \sin(\alpha + \delta)]}{dt} \\ &= \frac{dv}{dt} \sin(\alpha + \gamma) \end{aligned} \quad (7)$$

有

$$\sin(\alpha + \delta) = \frac{1}{v} \int_T^t \frac{dv}{dt} \sin(\alpha + \gamma) dt \quad (8)$$

式中: T 为爆轰到达药型罩表面的时间。对式(8)两边取正弦函数的 Taylor 展开式得

$$(\alpha + \delta) - \frac{1}{6} (\alpha + \delta)^3 + \dots = \frac{1}{v} \int_T^t \frac{dv}{dt} [(\alpha + \gamma) - \frac{1}{6} (\alpha + \gamma)^3 + \dots] dt \quad (9)$$

因为 α 与 t 无关, 同时有

$$\frac{1}{v} \int_T^t \frac{dv}{dt} dt = 1 \quad (10)$$

把式(10)代入(9), 并忽略 δ 和 γ 的二次及二次以上的项, 合并同类项可得

$$\delta = \frac{1}{v} \int_T^t \frac{dv}{dt} \gamma dt \quad (11)$$

对式(11)分步积分得

$$\delta = \gamma - \frac{1}{v} \int_T^t \frac{d\gamma}{dt} dt \quad (12)$$

由文献[6]知

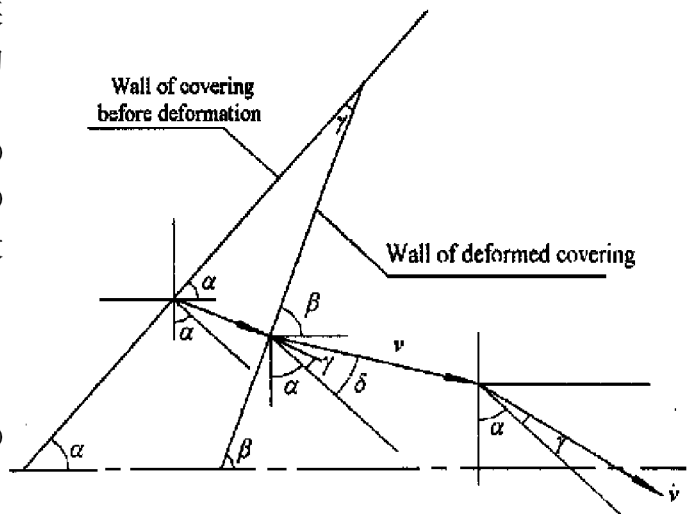


图1 变形角推导图

Fig.1 Sketch of projection angles fomula derivation

$$\beta = (\tan \alpha - \cos A \int_T^t \frac{dv}{dx} dt + \sin A \frac{dA}{dx} \int_T^t v dt) / (1 + \sin A \int_T^t \frac{dv}{dx} dt + \cos A \frac{dA}{dx} \int_T^t v dt) \quad (13)$$

式中: $A = \alpha + \delta$ 又

$$\tan \gamma = \{ \cos \alpha [\sin \delta \frac{dA}{dx} \int_T^t v dt - \cos \delta \int_T^t \frac{dv}{dx} dt] \} / \{ 1 + \cos \alpha [\sin \delta \int_T^t \frac{dv}{dx} dt + \cos \delta \frac{dA}{dx} \int_T^t v dt] \} \quad (14)$$

用 d/dl 代替 d/dx , 则有

$$\tan \gamma = (\sin \delta \frac{dA}{dl} \int_T^t v dt - \cos \delta \int_T^t \frac{dv}{dl} dt) / (1 + \sin \delta \int_T^t \frac{dv}{dl} dt + \cos \delta \frac{dA}{dl} \int_T^t v dt) \quad (15)$$

因为 δ 和 γ 均可认为很小, 根据基本假设及文献[6], $dA/dl = d\delta/dl$ 亦很小, 则有

$$\gamma = - \int \frac{dv}{dl} dt \quad (16)$$

将式(16)代入式(12)有

$$\delta = - \int_T^t \frac{dv}{dl} dt + \frac{1}{2v} \int_T^t \frac{d(v^2)}{dl} dt \quad (17)$$

4 抛掷速度在求抛掷角中的应用

文献[5]中, 我们已经得到

$$v = v_0(l) \{ 1 - \exp[-(t - T)/\tau] \} \quad (18)$$

这里 v_0 、 T 和 τ 仅为 l 的函数, 则相应的加速度为

$$a = \partial v / \partial t = (v_0 / \tau) \exp[-(t - T)/\tau] \quad (19)$$

为了便于积分, 可变换积分的时间顺序, 式(17)可写成为

$$\delta = - \frac{\partial}{\partial l} \int_T^t v dt + \frac{1}{2v} \cdot \frac{\partial}{\partial l} \int_T^t v^2 dt \quad (20)$$

当 $t = T$ 时, $v = 0$, 则对 T 的微分等于零。应用式(18)可积分得

$$\delta = \frac{\partial}{\partial l} [\varpi - v_0(t - T)] - \frac{1}{2v} \cdot \frac{\partial}{\partial l} \{ v_0 [\varpi - v_0(t - T)] + \frac{1}{2} \varpi^2 \} \quad (21)$$

当 $t \rightarrow \infty$, $\delta = \delta_0$, 这就是最大抛掷角, 这时 v 变成 v_0 , dv/dl 变成 dv_0/dl , 则

$$\delta_0 = v_0 / (2u) - \frac{1}{2} \tau dv_0/dl + \frac{1}{4} (d\tau/dl) v_0 \quad (22)$$

此式与 P.C.Chou 得到的式(3)完全相同, 虽然它们的处理方法和推导方法完全不同。

5 计算值与实验结果的比较

文献[5]中, 作者已通过实验获得 45[#]钢制成的直径为 $\Phi 40$, 内外锥角均为 140° , 质量为 22.7g, 装药为 8701 炸药, 药量 65g 的等厚药型罩和 45[#]钢直径为 $\Phi 40$, 内锥角 140° , 外锥角 130° , 质量 21.1g, 装 8701 炸药, 药量 65g 变厚药型罩的最终变形角。现将实验测量值与由式(22)计算所得不同 l 处的 δ_0 值均列于表 1 和表 2, 计算时取爆轰波速为 7.15mm/ μ s。

表 1 等厚罩最终变形角

Table 1 Final projection angles of same thick covering

l/mm	$\delta_c/(\text{^\circ})$	$\delta_m/(\text{^\circ})$	l/mm	$\delta_c/(\text{^\circ})$	$\delta_m/(\text{^\circ})$
7.28	8.7293	8.6995	13.52	8.4010	8.3926
9.02	8.7102	8.6707	15.20	8.1764	8.2017

表 2 变厚罩最终变形角

Table 2 Final projection angles of changing thick covering

l/mm	$\delta_c/(\text{°})$	$\delta_m/(\text{°})$	l/mm	$\delta_c/(\text{°})$	$\delta_m/(\text{°})$
7.20	7.0198	7.0024	13.70	6.5690	6.5712
8.30	6.9835	6.9543	14.80	6.4556	6.4663

6 结 语

P.C.Chou 根据流体动力学和式(2)推导出了式(3),说明了 δ 不仅与 v_0 、 u 、 τ 和 dv_0/dl 有关,还与 $d\tau/dl$ 有关,完全从理论上推导而获得了分析解。

我们采用跟前人不同的数值积分概念处理抛掷角问题,在一般条件下推导了有加速效应的抛掷角的解析解,其过程是合理的,在跟 P.C.Chou 相同的假设条件下^[3],通过完全不同的方法得到了与之相同的结论,并且与实验结果符合得较好。

参考文献:

- [1] Taylor G I. Analysis of the Explosion of a Long Cylindrical Bomb Detonated at One End [M]. London: Published by Chapman and Hall, 1941: 110-186.
- [2] 邵丙璜, 李国豪. 滑移爆炸作用下金属复板的运动 [J]. 爆炸与冲击, 1985, 5(3): 23-27.
- [3] Chou P C, Cardeone J, Hirsch E. Improved Formulas from Velocity Acceleration and Projection Angles of Explosively Driven Liners [A]. 6th Int Symp on Ballistics [C]. Washington DC: Government Printing Office, 1982: 135-141.
- [4] Randers-pehrson, Glenn. An Improved Equation for Calculating Fragment Ballistics [M]. Daytona Hilton, Daytona Beach, Florida: Physics Publishing, 1977, 25(2): 256-264.
- [5] 言志信. 爆炸驱动的实验研究和理论分析 [D]. 北京: 北京理工大学, 1991: 2-65.
- [6] 李世宏. 二维拉氏光测药型罩压垮的研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 1986: 1-57.

Study of Projection Angles of High Pressure Driving

YAN Zhi-xin^{1,2}, WU De-lun¹, WANG Hou-yu¹, ZHENG Zhou-lian¹

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Faculty of Civil Engineering of CSFU, Changsha 410000, Hunan, China)

Abstract: Shaped charge effect is a kind of vital phenomena of high pressure driving. It is also one of the most difficult problems to study. This paper has reviewed the predecessor's studies on the phenomenon of high pressure drive. Under basic hypothesis using a different integration method, the author has derived the formula of projection angles of the explosive and the final explosive drive. The formulas are not only quite consistent with the conclusions got by P. C. Chou and J. Cardeone, but also consistent well with the experimental results.

Key words: high pressure driving; projection angles; explosive