

内部刊物
注意保存

科技学报

爆轰会议文集



《科技学报》编辑部

一九八八年十月

科技学报

说 明

本文集收集了去年12月上旬在院部召开的“院爆炸物理专业会”上所作的专门技术报告38篇，内容丰富，涉及面广。大体分为：理论与数值计算、实验研究及测试分析、仪器研制及性能分析、常规兵器等方面的研究四部分。由于量比较多，一般的插图都缩得较小，且大部分都未重描，个别文章中插图多的根据作者的意见作了适当删减。由华夏信息工程公司用微机图文排版编辑系统排版，因软件不够完善，应该用斜体的量符号等用的都是正体。

责任编辑：杨秀安

编辑与出版《科技学报》编辑部

成都市501信箱5分箱

印 刷 国营九〇二厂印刷厂

订购与发行 成都市501信箱5分箱

内部发行

定价：

爆轰会议文集 目录

理论研究及数值计算

- 高速碰撞几个问题.....王继海 (1)
- 炸药反应速率函数的数值拟合.....孙承伟 (10)
- 热爆炸理论研究概况及应用.....秦承森 (26)
- 关于开展炸药安全研究的意见.....张丕亭 (35)
- 含铝炸药等熵线发生折转的物理机制.....李成银 (39)
- 内爆动力学中的六种流体力不稳定性.....王继海 (41)
- 发展三乙基铝燃烧弹的可行性论证.....李常青 (48)
- 使用掺钨RDX的分层装药驱动行为的数值研究.....董玉斌 苏林祥 (60)
- 超音速半穿甲战斗部穿甲过程中高能炸药的安全.....程洪涛等 (64)
- 聚能装药射流进展及一点理论研究结果.....章冠人 (69)
- 非球形板机应用钝感高能炸药的可靠性探讨.....方乃相 (78)
- PBH-9炸药点冲击起爆实验和数值模拟.....蒋德春 孙承伟 (85)
- 塑料粘结HMX炸药薄板的爆轰性能.....卫玉章 周之奎 (89)
- 炸药爆轰驱动的飞片熵增.....刘尔岩 (95)

实验研究与测试分析

- HMX-TATB塑料粘结炸药撞击感度与爆轰能量的初步研究.....廖鸿铭 (99)
- 高能炸药静电火花感度测试方法研究.....朱孝华 (106)
- TATB的冲击引爆和爆轰性能.....欧阳登焕 卫玉章 (113)
- 测量爆炸金属碎片质量的图象处理方法.....吴世法等 (123)
- 冲击载荷下45°钢和钨合金破坏比功和粘性系数的实验研究.....张万甲等 (126)
- 西桑试验.....阮庆云 (133)
- 木头炸药配方研究.....李秉仁 汤业鹏 (140)
- 爆轰波在LSHEA中的传播.....花平环 (148)
- 爆轰实验中的高速摄影技术.....赖国吉 (152)

水槽试验.....	陈启珍 (163)
冲击载荷下两种钢自由面的微物质喷射.....	张文平 陆景德 (167)
仪器研制及性能分析	
测量任意反射表面运动参数的JSG-1型激光速度干涉仪.....	胡绍楼等 (171)
电磁计综述.....	陈丕琪 (176)
一种探测爆轰冲击的光纤探针.....	吴世法 黄福 (181)
常规兵器等方面的研究	
云爆弹.....	沈金华 杨凯旋 (184)
电磁轨道炮与我们的初步研究.....	龚兴根 (193)
电磁脉冲弹.....	宗士瑜 贾浩 (208)
小型杀伤爆破弹爆炸过程的研究.....	邢彼田等 (213)
炸药能量对破甲深度的影响.....	陈启珍 (219)
射孔弹射流的实验和数值模拟研究.....	陈森华等 (224)
压缩气体炮及其应用.....	李大红 (228)
闪光X射线测试技术在常规武器研制中的应用.....	李延年 (232)
整体壳杀伤战斗部破片初速度及有效破片形状观测.....	邵乃林等 (237)
国外反坦克破甲武器的发展.....	王守道 (241)

高速碰撞几个问题

王继海

(来稿日期: 1988年1月)

本文概述高速碰撞中有关的解析模型的研究,介绍了国外主要的三维程序简况,列举了一些典型的算例。同时还述及了各有关的基础研究领域。论证了开展解析模型研究,发展有关的三维方法和程序以及进行有关基础研究的必要性。

一、引言

高速碰撞研究的背景是下列一些具体任务的需要:

1. 常规武器
2. 内爆动力学研究
3. 民用爆破、碰撞和爆炸加工
4. 宇航和动能武器

高速碰撞的几个重要方向:

1. 理论解析模型的研究
2. 数值模拟
3. 实验研究
4. 若干重要基础研究
 - a. 材料的动态响应和本构关系
 - b. 塑性动力学
 - c. 宏观和微观断裂动力学
 - d. 位错动力学
 - e. 分子动力学

前三种是直接针对高速碰撞的具体课题的。第四项则是为高速碰撞的研究提供物理参数、物理图象,并更为具体地讨论高速碰撞情况下材料本身所发生的内在的物理过程。前述四方面的研究各有侧重,但是是互相补充、互相促进的。为把高速碰撞这门科学开展起来,四条腿是缺一不可的。

二、解析模型的研究

在五十年代以前,就进行过许多解析模型的研究。主要是对物理图象(宏观的)进行简化,考虑不同速度段支配材料行为的主要物理规律,利用力学、物理和数学工具,给出一些高速碰撞问题的解析结果(主要是近似解析解),帮助我们认识有关物理规律,分析得到的图象,指导和配合实验及数值模拟工作。这方面的研究,随着电子计算机的广泛采

用，曾发生过被一些人忽视的状况，但国外的一些主要研究单位，在这方面一直未曾放松，近年来有更为重视的趋势，这是因为实验和数值模拟中提出了大量需要解决的物理问题，同时工程设计中也需要进行一些简便的估计的缘故。半个世纪以来，人们研究了大量的解析模型，得到了许多重要的结果，这里，我们简略地看一下驱动和侵彻的两个方面的问题。

(一) 驱动方面，举几个例子

1. 一维抛体的Gurney公式及其改进、利用。

炸药释放能量 = 飞片动能 + 炸药动能 + 炸药内能

可得考虑爆轰产物内能的推广的Gurney公式^[1]

$$v = \sqrt{2E_g \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^\alpha (\gamma - 1) \right]} \sqrt{\frac{\frac{m}{M}}{1 + \frac{\alpha}{\alpha + 2} \frac{m}{M}}} \quad \alpha = \begin{cases} 1 & \text{平面} \\ 2 & \text{柱面} \\ 3 & \text{球面} \end{cases}$$

一维驱动的极限速度，取 $E_g = \frac{D_v^2}{2(\gamma^2 - 1)}$ 得

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{3}{\gamma^2 - 1}} D_v$$

对于单层平板、单层炸药有：

$$v = \sqrt{2E_g \left[1 - \left(\frac{L_0}{L} \right)^{\gamma - 1} \right]} \sqrt{\frac{\frac{3}{5} \frac{m}{M}}{1 + \frac{1}{5} \frac{m}{M} + \frac{4}{5} \frac{M}{m}}}$$

或 $\begin{matrix} L \rightarrow \infty \\ R \rightarrow \infty \end{matrix}$ 可得到普通的Gurney公式

2. 滑移爆轰对平板的加速^[2]，有

Taylor公式 $u = 2D_1 \sin \frac{\theta}{2}$

θ_0 由爆轰和物质相互作用确定^[3]

$$\theta = \theta_0 \left(\theta_{\max} - \theta_0 \right) \left[1 - \frac{L_0}{L_0 + \xi s} \right]^{\gamma - 1}$$

$$\xi = \tan \left(\sqrt{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} - 1 \right) \frac{\pi}{2}$$

$$\theta_{\max} = 2 \arcsin \frac{1}{2\sqrt{\gamma^2 - 1}} \sqrt{\frac{\frac{3}{5} \frac{m}{M}}{1 + \frac{1}{5} \frac{m}{M} + \frac{4}{5} \frac{M}{m}}}$$

3. 对柱的驱动^[3]，产生射流的速度（包括平板碰平碰^[2]）：

$$u_j = 2D_j$$

4. 聚能射流的定常理论^[9]

五十年代初期G·I·Taylor, Birkhoff等人发表的^[9]射流速度公式为：

$$u_j = \frac{D_j \sin(\beta - \alpha')}{\cos \alpha} \left[\csc \beta + \cot \beta + \tan \frac{1}{2}(\beta - \alpha') \right]$$

β 是碰撞角 $\beta - \alpha' = 0 = 2\theta_1$ ，可由相互作用得到，还可考虑粘性和材料强度的影响^[3]

射流质量

$$m_j = \frac{1 - \cos \beta}{2} m$$

β 角小时，会出现无射流的超音速碰撞^[4]，从而限制射流能达到的速度及其效率。

5. 自锻破片弹，适当考虑有效装药下使用Gurney公式。

目前，无论是射流或自锻破片都可利用爆轰驱动微元的办法获得半解析结果。

(二) 侵彻力学

1. 侵彻的基本阶段的研究。大致可分为

碰撞产生激波的开坑阶段，定常阶段，背面效应，冲塞等阶段。

2. 定常不可压缩流体力学模型^[9]。

$$\text{侵彻速度} \quad u = \frac{u_0}{1 + \sqrt{\rho_2 / \rho_1}}$$

u_0 杆速， ρ_2 靶密度， ρ_1 杆密度， L_0 杆长。

$$\text{侵彻深度} \quad L = \sqrt{\rho_1 / \rho_2} L_0$$

3. 定常可压缩流体力学模型^[5] 对上述模型作改进，考虑了杆-靶有无反射激波的四种情形

在有激波情况下，采用Hugoniot关系

在无激波情况下，使用Bernoulli方程

可求解侵彻速度，深度等。

4. 强度对侵彻的影响，Tate理论

1967年，Tate在Bernoulli方程中加进了材料强度的影响^[6]，得到

$$Y_1 + \frac{1}{2} \rho_1 (v - u)^2 = R_2 + \frac{1}{2} \rho_2 u^2$$

v 杆速， u 侵彻速度，他得到杆长变化：

$$L_{\text{eff}} = L_0 \left(\frac{v + \sqrt{v^2 + A}}{v_0 + \sqrt{v_0^2 + A}} \right)^{\frac{R_2 - Y_1}{u v_1}}$$

$$\exp\left\{ \frac{\mu \rho_1}{2(1-\mu^2)Y_1} \left[\mu(v_0^2 - v^2) + v\sqrt{v^2+A} - v_0\sqrt{v_0^2+A} \right] \right\}$$

这里 $\mu = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ $A = \frac{2(R_2 - Y_1)}{\rho_2} (1 - \mu^2)$

他讨论了各种情况，特别是当 $\rho_1 \sim \rho_2$ 时，可适当考虑硬化和惯性的影响，

当 $R_2 = Y_1$ 侵彻深度 $L = L_0 \{ 1 - \exp [\bar{v}^2 (\xi^2 - 1)] \}$

当 $R_2 = 3Y_1$ $L = L_0 \left\{ \left(1 - \frac{2}{\bar{v}_0^2} \right) - \left(\xi^2 - \frac{2}{\bar{v}_0^2} \right) \exp [\bar{v}^2 (\xi^2 - 1)] \right\}$

当 $R_2 = 5Y_1$ $L = L_0 \left\{ \left(1 - \frac{2}{\bar{v}_0^2} + \frac{4}{\bar{v}_0^4} \right) - \left(\xi^4 - \frac{4\xi^2}{\bar{v}_0^2} - \frac{4}{\bar{v}_0^4} \right) \exp [\bar{v}^2 (\xi^2 - 1)] \right\}$

$$\bar{v}^2 = \frac{\rho v_0^2}{4Y_1} \quad \xi = \frac{v}{v_0}$$

对同样材料，取

$$R_2 = 3.5Y_1 \text{ 可使理论和实验符合得很好}$$

5. 薄板冲塞理论 (Recht R. F., Ipson T. W. 1963)

对于薄板 靶厚度 < 杆半径

靶厚度 < 1/2 杆长

的情况下，利用能量守恒

$$\frac{1}{2} M_p v_0^2 = \Delta E + W + \frac{1}{2} (M_p + M_s) v^2$$

这里，W 剪切做功 ΔE 杆塞非弹碰撞能量损失，可得剩余速度公式：

$$v = \frac{1}{1 + \mu_2 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \frac{\delta}{L_{\text{杆}}}} \sqrt{v_0^2 - v_m^2}$$

$\mu^2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ ，D 塞直径，d 杆直径， δ 靶厚， $L_{\text{杆}}$ 杆长， v_0 杆初速， v_m 极限速度。

确定 v_m 有各种公式，最著名的有 de-Marre 公式：

$$v_m = k \frac{d^{0.5} \delta^{0.7}}{q^{0.5}}$$

q—杆重，k 为经验常数。

上述公式可考虑在碰撞过程中质量飞溅的损失。

对斜侵彻速度有：

$$v = \frac{\cos\beta}{1 + \mu^2 \left(\frac{D}{d}\right)^2 \frac{T}{L_{\text{ff}} \cos\alpha}} \sqrt{v_0^2 - v_m^2}$$

α 角是杆与法线方向夹角, β 是过靶后的转角;

β 角亦有理论表达式, 可由动量守恒得到。

6. 临界跳飞角问题。考虑弹着靶所受的力和转动, 可以得到临界跳飞角的公式^[8]:

$$\tan^3 \alpha_{\text{ext}} = \frac{2}{3} \frac{v_0^2 \rho_2}{R_2} \left(\frac{L_{\text{ff}}^2 + d^2}{L_{\text{ff}}} \right) (1 + \sqrt{\rho_2 / \rho_1})$$

7. 冲塞问题的进一步研究^[10]

J. Awerbuch和S. R. Bodner进一步仔细研究了冲塞问题, 他们把整个冲塞分成三个互相连接的阶段:

(1) 弹碰撞与之相遇的靶的局部(附加质量), 使之压缩, 实现开坑。剪切开始。

(2) 塞柱继续受到压缩和剪切, 直到塞柱和弹体以相同速度运动为止。

(3) 塞柱和弹一起运动, 直到冲射出靶为止, 此时, 只有剪切力的作用。

在这样的基本假定下, 可以列出各阶段的运动方程, 求解这些常微分方程, 可以给出冲塞时间, 剩余速度等各物理量, 和实验结果十分符合。

8. 多层间隔靶的冲塞^[11]

K. Nixdorff 利用上面的理论讨论和计算了多层间隔靶的问题, 得到了和实验符合的结果。

9. 侵彻的成坑理论

关于成坑问题存在着许多理论模型。有利用不可压流体模型, 用复变函数方法求解的四、五十年代的工作, 也有近年来发表的许多工作。例如低速下的硬穿体模型^[12] 以及高速下金属空球的膨胀模型等, 可得坑半径

$$r = \frac{D}{2} \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} v_0 \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{其中 } P_1 = \frac{2}{3} R_2 \left(1 + \ln \frac{2}{3} \frac{E}{R_2} \right) + \frac{2}{27} \pi^2 E_1$$

E 杨氏模量, R_2 —强度, E_1 线性形变硬化的剪切模量, 穿深也有相应的表达式^[13]。由于篇幅, 不能详细介绍。

10. 主动装甲问题^[14], 这是近几年来提出的问题。

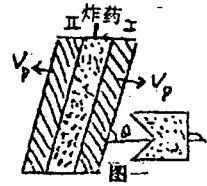
射流在反作用装置的影响下将发生速度偏转。

$$\tan \alpha = \pm \left[\frac{v_j}{v_p} \frac{K}{\cos \theta} \left(\frac{v_j}{v_p} \tan \theta \pm \frac{1}{\cos \theta} \right) \mp \tan \theta \right]^{-1}$$

上下的符号是对应 I 和 II 两个不同反作用板对射流作用的(如图一)。

$$K = \frac{\rho_j}{\rho_p} \frac{\pi d_j}{4h}$$

ρ 是反作用板密度, h 是其厚度, 而 ρ 和 d 是射流密度和直径。受干扰的射流将大大地减少其穿透能力。



三、数值模拟

解析研究虽然能给出过程的物理图象和规律, 但其解题的领域是有限的, 往往要进行许多简化, 因而普适性是受到限制的。数值模拟也有其缺陷, 如计算方法需要研究, 有些处理带来人为性, 价格昂贵, 但却比较普适, 特别是一些复杂的问题(几何的和物性的等)都可以通过数值模拟给出一定的结果, 在实验图象和局部解析的配合下, 仍然是十分有效的工具。由下面的简介可见, 目前数值模拟的重点已转移到三维计算上, 采用的物理性质已由简单的流体发展到弹塑性和断裂, 甚至发展到硬化等更为复杂的本构关系。这部分中我们简略介绍国外常用的一些三维程序及部分算例, 不追求完整性, 而着重在粗的线条方面。程序主要是拉格朗日、欧拉以及混合描述。主要介绍八个大程序的特点及其应用范围。

(一) 各三维程序简况

1. HEMP3D

作者: LLNL的M·L·Wilkins等^[15]

拉格朗日描绘, 二阶精度格式

状态方程: Mie - Grunlisen, r , JWJ

理想 Mises 条件

断裂: 韧性和脆性断裂判据(动和静态均有), 有双向可交的滑移面。

程序的先处理: 半自动化分区形成网格: VMESH3D

后处理: 图形输出程序VPIX3D

电子计算机: CDC-7600, STAR100, CRAY-1

2. EPIC-3

作者 G·R·Johnson^[16] 美国空军武器所

拉氏描绘, 二维为三角网格, 三维采用24面体上的有限元方法, 对各向同性介质采用M-G状态方程。

Mises 理想塑性条件, 还考虑了形变速率和温度效应以及压力和强度的各向异性。

滑移面可加摩擦, 考虑了空穴的形成和闭合。

预处理程序中考虑了方形、矩形、锥形甚至尖拱形的几何结构。

后处理: 图形输出包括流场、等位线等。

机器: UNIVAC 1108, HONEYWE/6080, CDC7600, CRAY等

3. DYNA3D (NIKE3D)

作者 J·O·Hallquist^[17, 18], LLNL

拉氏描绘。用HEMP差分方程和Popov-Galerkin有限两种算法。由于有限元更有效, 后来版本主要使用有限元方法。考虑了弹塑性硬化。材料的破坏采用压力截断和体积变形。有具有摩擦和无摩擦的滑移面处理。有自动开、闭穴功能。状态方程原来是压力和压缩比的单项式的, 后来可选择更多种的。

预处理: 网格生成

后处理：图形输出

4. HULL

作者 D·A·Matuska and R·EDurrett⁽¹⁹⁾ 美国空军武器所 欧拉描述，
二阶精度格式。 Von - Mises 条件

状态方程：固和液体用M - G状方，汽化后用r状方。

破坏准则用主应力或主应变。对金属亦用三轴破坏准则。

有重新分区功能，可使用单向和多方向速度连续条件。

可有多种物质，可应用于多种几何形体。

预处理器KEEL：确定初始网格。

HULL系统由KELL - 初始条件和网格生成，HULL差分计算，PULL图形包等七部分组成。

近来HULL可和EPIC 串连使用。

机器：CDC7600, IBM360, 370, CYBER176, DECVAX和CRAY等。

5. TRIOIL, TRIDORF, TRISOIL

作者 W·E·Johnson^(20, 21, 22) LANL 欧拉描绘，有限元近似，其中

TRIOIL 求解三维流体问题

TRIDORF 两种物质，包含刚塑性

TRISOIL 四种物质，弹塑性体

状方：Tillotson和M - G

破坏准则：网格密度

重分网格：考虑最大梯度区

预处理：适用于多种几何形体 后处理图形包

机器：CDC7600, UNIVAC1108, VAX, CRAY (程序未向量化)

6. METRIC (HELP)

作者 Hageman L·J and Lee E·P⁽²³⁾ BRL实验室

欧拉描绘，一阶有限差分近似

线弹性和理想塑性

多种物质和炸药。有固壁自由面

状态：Tillotson 及其改型

断裂判据 ρ / ρ_0 极小值

无网格重分

先处理：多种几何形体

后处理：图形输出

7. K3

作者：J·May, P·Snow, D·Williams W·Windholz⁽²⁴⁾ S·L·Thompson
(25) SANDIA

欧拉描绘、有限差分法。三维K3是对Sandia的CSQ II的扩展。状方同CSQ II。

材料断裂判据用压力或主应力极值，引入空穴处理，无重分。

预处理：PREK3和KSQEN，适用多种几何形体。

后处理: K3PLT图形程序, 可给出等密度和压力线。

机器: CDC7600

8. CELFE

作者 C·H·Lee²⁶⁾ (NASA)

程序有三部分组成:

1. 有限元的欧拉描述, 以模拟碰撞区(流体力学近似)
2. 有限元的拉氏描述, 适用碰撞区外部分
3. 两者的连接

状方: Tillotson和Los Alamos状方(P, ρ , E分式)理想塑性和Prandtl-Reuss

流动率定律

滑动处可有或无摩擦。无网格重分。

无预处理。有后处理系统。

除上述外, 还有LLNL的Hallquist的NIKE3D(隐式编码), 可用于结构大变形的动力分析, 考虑材料的各向异性, 热弹性, 线弹性等。LLNL的R·couch的JOY程序(欧拉)。

SANDIA的D·L·Hicks的THREEDY程序(三维拉氏)等等。

(二) 一些算例(从略)。

四、基础研究领域(简略)

1. 材料的动态响应和本构方程研究。
2. 塑性动力学研究
3. 宏观和微观断裂力学研究
4. 位错动力学
5. 分子动力学

这些基础研究对于型号和高速碰撞研究都是十分重要的。应开展上述领域的工作, 才能使我们的研究建立在牢靠的基础上。两个建议:

1. 理论分析、数值研究和实验紧密结合。走出我们自己的路子来;
2. 型号研究和基础研究相结合, 只有抽出力量从事基础, 才能提高我们的研究水平, 在国内的研究中取得和保持领先地位。

参考文献

1. 王继海, “高速碰撞讲稿”(九所)
2. 王继海“滑移爆轰对平板的驱动”, 全国第二层高速碰撞会议文集(1987, 太原)
3. 王继海 二维不定常流体力学的若干问题 1984
4. Wang Jihai, Asymmetric Supersonic collision, proc, 4th APS Topical Conference on shock waves in condensed Matter, Plenum Press, New York, P661-669(1987)
5. 林晓, 王继海<兵工学报> NO3, 1986
6. Tate A. J. Mech phys solids, 15, 387-399(1967)

7. Recht R. F. Ipson T. W, J. Appl. Mech, 30, 384 (1963)
8. Recht R. F. Ipson T. W, The Dynamics of Terminal Ballistics, 1975
9. Birkhoff G. , Mac Dougal D. P, Pugh D. P. and Taylor G. I J . Appl. phys. ,
19, 563, (1948)
10. Awerbuch J and Bodner S. R. , Int. J. Solid Structures, 10, 671 (1974)
11. Nixdorff K. ZAMM. 64, 147-149 (1984)
12. Goodier J. N. Proc 7th Hypervelocity Impact Symp Vol. 3, Tampa Florida,
Martin Company, 1965
13. Byrnside N. C. et. al. Trans. ASME, J. Basic Eng June, 394 (1972)
14. Mayselless M. et. al. 8th Intern. Symp. Ballistics, VII - 15 (1985)
15. Wilkins M. L. UCRL - 51574 (1975)
16. Johnson G. R. , AFATL - TR - 78 - 81 (1978)
17. Hallquist J. O. UCRL - 52429 (1978)
18. Hallquist J. O. UCRL - 52678 (1978)
19. Matuska D. A and Durrett R. E. , AFATL - TR - 78 - 125 (1978)
20. Johnson W. E. , GAMD - 7310 (1976)
21. Johnson W. E. , CCC - 976 (1976)
22. Johnson W. E. , ARBRL - CR - 00429 (1980)
23. Hageman L. J. , Lee E. P. , BRL - CR - 305 (1976)
24. May J. et. al. Kaman Science Corp. K - 80 - 226 (R)
25. Thompson S. L. SAND - 77 - 1339
26. Lee C. H. NASA - CR - 159395 (1978)
NASA - CR - 159396 (1978)

炸药反应速率函数的数值拟合

孙承纬

(来稿日期: 1988年2月)

在反应冲击波唯一迹线原理假定下, 利用未反应炸药和爆轰产物状态方程组合得到部分反应产物状态方程, 以及实验和计算得到的冲击引爆的 $\rho_0 p_0$ 关系和反应Hugoniot, 可以求得炸药反应速率同其他热力学量(压力、温度等)的数值关系, 再拟合有关经验速率函数的待定系数。产物状态方程可选用HOM, JWL或 ν -多方气体等形式。经验速率函数包括Arrhenius率、点火—燃烧形式(Cochram)和Forest Fire。计算结果表明, 状态方程对拟合结果影响不大, Forest Fire速率同点火—燃烧速率十分接近。TATB炸药的反应速率同其他典型高能炸药差别很大。根据拟合的反应速率函数所作的冲击引爆数值模拟, 各拉格朗日位置上的压力历史同压力计实验记录符合较好。

一、前言

爆轰的反应流动理论是一种唯象方法, 通常用一个反应度(或者爆轰产物浓度) λ 描述爆轰反应进程(即由炸药转变为爆轰产物的过程)。研究所谓的反应速率方程、速率函数或者爆轰方法(Burn Technique), 就是通过实验和计算, 确定 λ 的随体时间导数(反应速率)同 λ 和其他热力学量的关系, 并拟合为适当的函数形式。反应速率函数的经验形式种类很多, 典型的如只依赖于压力 p 的Forest Fire⁽¹⁾, 同 p 和 λ 都有关的点火—燃烧形式^(2,3), 以及确有化学背景, 但只适用于均匀炸药的Arrhenius定律⁽⁴⁾。对于形状给定的经验速率函数, 数值拟合就是确定其待定系数的优化计算。

从理论上说, 有了正确的部分反应产物状态方程和反应速率方程, 爆轰应用问题原则上就已解决。例如, 二维流体力学编码计算可能有百分之几的误差, 通常通过调整状态方程, 以求得计算和实验的一致⁽⁵⁾。对于引爆问题, 还应当调整反应速率函数。

假设爆轰模型具有单个不可逆反应道, 则独立的热力学自变量有三个。我们只考虑定常反应区, 记部分反应产物的压力、比容、粒子速度、温度、比内能和未反应部分质量分数分别为 p , v , u , T , I 和 W , 注意到密度 $\rho = v^{-1}$, 以及 $\lambda = 1 - W$ 。反应未开始则 $W = 1$, 反应结束则 $W = 0$ 。选定 v , I 和 W 为自变量, 一般的物态和能态关系可以写成为

$$p = p(v, I, W) \quad (1)$$

$$T = T(v, I, W) \quad (2)$$

根据质量、动量和能量守恒关系, 可得到任何部分反应状态同未反应初态(下标0)之间关系, 即Rankine-Hugoniot关系:

$$\rho(D-u) = \rho_0(D-u_0) \quad (3)$$

$$p-p_0 = \rho_0(D-u_0)(u-u_0) \quad (4)$$

$$I-I_0 = \frac{1}{2}(p+p_0)(v_0-v) \quad (5)$$

这里D为反应冲击波速度，通常取 $u_0=0$ 。方程组(1)~(5)共有七个未知量，因此W应当是两个热力学自变量的函数。反应速率 γ 就是反应物的相对燃耗率 $-\frac{1}{W}\frac{dW}{dt}$ ，也是二元函数。根据Lagrange量计(压力计和速度计)的实验数据，运用Lagrange分析方法，可以研究一般形式的反应速率函数^[6]。本文使用的是Forest提出的近似方法^[7]，其主要基础是Lindstrom提出的爆轰建立过程中反应冲击波唯一迹线原理^[8]。据此，可把实验的pop关系推广为一般关系式，使得W或者 γ 变为单个自变量(如压力p)的函数。

本文另一个主要假定是，波后压力剖面(初始段)是平直的，阵面处压力空间梯度(后向)为零。实验表明，一定条件下压力剖面呈驼峰形状，随反应冲击波的发展，驼峰位置逐渐向阵面靠拢(ApcuuH燃烧)。所以这个假定有其局限性。

本文提出根据实验POP关系计算反应Hugoniot的方法，并把Forest的方法推广到多种产物状态方程和经验速率函数的情形。本文的计算过程，已编成程序RATEFIT^[9]。

二、爆轰建立过程中反应冲击波唯一迹线原理

非均质炸药冲击起爆的特点在于，反应冲击波受到阵面上流体动力学热点激起的反应的推动，速度不断增加，最后首先在阵面上完成到爆轰的转变。空时平面(x、t)上，反应冲击波的轨迹被称为它的迹线。

Lindstrom和Craig分别用RDX/Exon和PBX-9404、TATB炸药进行实验发现，若以反应冲击波转变为爆轰的点为原点，不同冲击压力下的反应冲击波迹线近似地互相重合，从而，冲击波压力(或粒子速度等其他量)——到爆轰距离或时间的剖面也是近似重合的^[8,10]。这表明爆轰建立过程中任一时刻以后的发展状况，只同该时刻冲击波阵面压力有关，同其历史无关。这些实验支持了Mader提出的假设：不论初始条件如何，若炸药经受同样的冲击压力，在同样传播距离上，反应冲击波阵面上的炸药达到同样的反应程度。更抽象一些说，炸药中反应冲击波发展为爆轰的过程，是沿着距离、时间和状态空间中唯一的一条曲线进行的。这就是所谓“爆轰建立过程的唯一迹线原理”^[1]。

冲击引爆的Popolato图表明，持续冲击压力p同炸药到爆轰距离 X_{det} 在双对数坐标中近似具有直线关系(Pop关系)^[11]。根据唯一迹线原理，把 X_{det} 看作为过程中任一时刻反应冲击波阵面到爆轰转变点的距离，p是这时刻冲击波阵面压力，则p和 X_{det} 仍符合原来的上述实验pop关系。这样，把pop关系推广用于冲击引爆过程的任何中间时刻，成为唯一迹线原理的一种数学表达方式。

爆轰建立过程沿状态空间中一条迹线进行，各物理量都可表示为某一自变量的函数。对于部分反应物态关系，冲击波速度D也只同波后粒子速度u有关，称为反应Hugoniot，通常仍以线性函数近似。例如Ramsay由实验得到PBX-9404炸药的反应Hugoniot为^[1]

$$D = 0.246 + 2.53 u \quad (\text{cm} / \mu\text{s}) \quad (6)$$

前言中一般Hugoniot关系(5)式即可用反应Hugoniot替代。

必须指出,唯一迹线原理并不与实验完全相符。不同冲击压力下,实验的 $D \sim u$ 关系也不一定可用设想中的统一的反应Hugoniot描述。但这种近似有一定合理性,它可以解释 p - u 关系和压力剖面的相类似现象。用这原理计算炸药反应速率函数,可使数学问题大为简化。

三、中间反应产物的物态方程

本文假定中间反应产物是未反应炸药(下标 zy)和完全反应产物(下标 CW)的混合物,这两种组分处于温度和压力平衡,混合物的比容和比内能是这两种组分相应量按质量分数(分别是 W 和 $(1-W)$)的平均值。所以,中间物态关系可归结为炸药和爆轰产物各自物态关系的研究。

设未反应炸药的冲击Hugoniot是

$$D = c_{01} + su \quad (7)$$

c_{01} : 零压下一维应变的绝热声速。把(7)代入(1)~(3)式得到冲击状态(下标 H)下的压力和比内能

$$p_H = \frac{\rho_0 c_{01}^2 \eta}{(1 - s \eta)^2} \quad (8)$$

$$I_H = I_0 + \frac{1}{2} (p_H + p_0) (v_0 - v_{zy}) \quad (9)$$

这里 $\eta = 1 - \frac{v_{zy}}{v_0}$ 。以Hugoniot为参考状态,Gruncisen方程给出

$$p_{zy} = p_H + \frac{p}{v_{zy}} (I_{zy} + I_H) \quad (10)$$

Hugoniot温度计算采用Walsh - Christlan近似:

$$T_H = T_0 c^{b(v_0 - v_{zy})} + \frac{p_H}{2c_v} (v_0 - v_{zy}) + \frac{c}{2c_v} \int_{v_0}^{v_{zy}} p_H c^{bv} [2 - b(v_0 - v)] dv \quad (11)$$

式中 b : 物质常数, c_v : 定容比热, 一般状态下的温度

$$T_{zy} = T_H + (I_{zy} - I_H) / c_v \quad (12)$$

爆轰产物的物态方程以其过CJ点的等熵线为参考状态(下标 S),本文采用三种等熵线形式,可供选择:

1. BKW方程,经拟合后得到HOM方程:

$$\begin{aligned}
 p_s &= \exp [p_4 (\ln v_{cw})] \\
 I_s &= \exp [I_4 (p_4 (\ln v_{cw}))] - I_z \\
 T_s &= \exp [T_4 (\ln v_{cw})]
 \end{aligned} \tag{13}$$

这里 p_4 、 I_4 、 T_4 是四阶多项式，各系数可见于资料^[1]， I_z 为调整常数， Γ_g 是爆轰产物的 Gruncisen 系数。

2. JWL 方程

$$\begin{aligned}
 p_s &= A e^{-R_1 v} + B e^{-R_2 v} + c v^{-1+w} \\
 I_s &= \left(\frac{A}{R_1} e^{-R_1 v} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 v} + \frac{c}{W} v^{-w} \right) v_0 - I_z
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 T_s &= T_{cJ} \exp \left(- \int_{v_{cJ}}^{v_{cw}} \frac{W}{v} dv \right) = T_{cJ} \left(\frac{v_{cJ}}{v_{cw}} \right)^w \\
 \Gamma_g &= w
 \end{aligned}$$

式中 A 、 B 、 c 、 R_1 、 R_2 和 W 都是实验决定的系数， $v = v_{cw} / v_0$ ，下标 CJ 表示 CJ 状态。

3. γ 多方气体方程

$$\begin{aligned}
 p_s &= p_{cJ} (v_{cJ} / v_{cw})^\gamma \\
 I_s &= (p_s v_{cw} - p_{cJ} v_{cJ}) / (\gamma - 1) + \frac{1}{2} p_{cJ} (v_0 - v_{cJ}) - I_z \\
 T_s &= T_{cJ} (v_{cJ} / v_{cw})^{\Gamma_g} \\
 \Gamma_g &= \gamma / \left[1 + \left(1 + \frac{\partial \ln D_{cJ}}{\partial \ln \rho_0} \right) / (\gamma - 1 - 2 \frac{\partial \ln D_{cJ}}{\partial \ln \rho_0}) \right]
 \end{aligned} \tag{15}$$

式中 CJ 参数 $p_{cJ} = \rho_0 D_{cJ}^2 / (\gamma + 1)$ ， $v_{cJ} = \gamma v_0 / (\gamma + 1)$ ，最后 Γ_g 式由 Jones 公式导出^[5]，偏导数 $\partial \ln D_{cJ} / \partial \ln \rho_0$ 由实验测定，如对于 Comp. B 炸药，约为 0.67。

有了参考状态和 Gruncisen 系数后，爆轰产物一般物态方程可写为

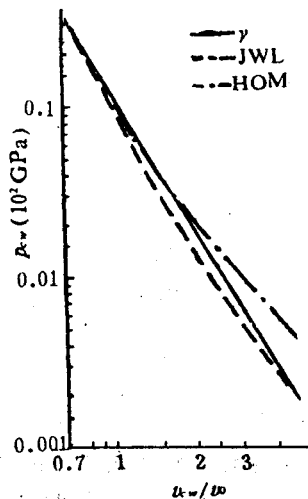
$$p_{cw} = p_s + \frac{\Gamma_g}{v_{cw}} (I_{cw} - I_s) \tag{16}$$

$$T_{cw} = T_s + (I_{cw} - I_s) / c_{vg} \tag{17}$$

式中 c_{vg} 为产物的定容比热。

图一表示 Comp. B 炸药爆轰产物的三种等熵线，它们主要区别在于低压区（如 5GPa 以下）。Comp. B 炸药冲击引爆的临界压力约 2GPa，在 5GPa 冲击压力下的到爆轰距离约 1.12cm，离实际临界状态并不远。上述三种形式等熵线对应的 Γ 依次是 0.49，0.34 和 0.486，可以看出，反应速率计算中物态关系形式的影响并不显著。然而，爆轰产物对飞片的驱动，一般主要发生在低压区，产物物态方程的选择比较重要。

根据本节的假定，中间产物的热力学量（无下标）由下式确定，



图一 Comp. B 炸药爆轰产物的三种等熵线