



《中国工程物理研究院科技丛书》第003号

凝聚炸药 起爆动力学

章冠人 陈大年 编著

朱建士 水鸿寿 秦承森 审校

国防工业出版社

038

714

《中国工程物理研究院科技丛书》第003号

凝聚炸药起爆动力学

章冠人 陈大年 编著

朱建士 水鸿寿 秦承森 审校

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

凝聚炸药起爆动力学是研究凝聚炸药在受热作用或冲击等作用下,起爆过程的物理机制、起爆判据、起爆数值模拟等内容。全书共分十章:第一章到第三章为一些预备知识的复习,主要为弹塑性力学和弹塑性加载波以及热物理和热化学基础知识;第四章为各种炸药起爆测试方法的基本原理;第五、六、七章介绍了热起爆、冲击起爆和其它各种因素引起炸药起爆的理论;第八、九、十章介绍炸药起爆的数值模拟工作,其中第八章为炸药及产物的本构关系,第九章为一维、二维有限差分方法和分子动力学方法,第十章为炸药的几种冲击感度试验和数值模拟。

本书介绍了有关凝聚炸药起爆问题的最新论著和我国科学工作者在这方面的工作,可供大学爆炸力学、炸药学等高年级学生和研究生作为教材或参考书籍,也可供该方面的研究工作者和工程技术人员参考。

凝聚炸药起爆动力学

章冠人 陈大年 编著

朱建土 水鸿寿 秦承森 审校

责任编辑 蒋 怡

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装



850×1168 1/32 印张8³/₄ 227千字

1991年9月第一版 1991年9月北京第一次印刷 印数: 0001-1400册

ISBN 7-118-00863-X/O-66 定价: 8.80元

《中国工程物理研究院科技丛书》

首届编审委员会

主 任 俞大光

副主任 章冠人

委 员 (以姓氏笔画为序)

丁厚本	于洞庭	水鸿寿	方乃相	王铁铮
刘庆兆	汤绍源	华欣生	吴宏志	杨成龙
张永昌	张寿齐	金行星	周正朝	罗诚鉴
赵维晋	姚景华	姚礼屏	贺仁辅	高天祐
徐锡申	徐清之	董海山	谢铭勋	曾启铭
赖祖武				

本丛书编辑部

负 责 人 吴衍斌

本册编辑 吴衍斌

《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院三十年来，坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向，完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务，在许多专业学科领域里，不论在基础理论方面，还是在实验测试技术和工程应用技术方面，都有重要发展和创新，积累了丰富的知识和经验，造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作，促进我院事业的继承与发展，系统地总结我院三十年来在各个专业领域里集体积累起来的经验，吸收国内外最新科技成果，形成一套系列科技丛书，无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科研成果，内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科，也将编著出书，续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍，经编委会审定后，也纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给三十年来为我国国防现代化而献身的人们！

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1989年1月25日

《中国工程物理研究院科技丛书》

已 出 版 书 目

001 高能炸药及相关物性能

董海山主编 科学出版社 1989年10月出版

002 光学高速摄影测试技术

谭显祥编著 科学出版社 1990年2月出版

003 凝聚炸药起爆动力学

章冠人等编著 国防工业出版社 1991年9月出版

目 录

序言	1
绪论	2
第一章 弹塑性动力学概论	5
1.1 应力张量	6
1.2 应变张量	8
1.3 弹性应力应变关系	10
1.4 塑性的基本概念	15
1.5 材料的屈服条件	16
第二章 弹塑性加载波在介质中的传播	18
2.1 弹塑性介质内的质点运动方程	18
2.2 一维长杆中的弹塑性波问题	19
2.3 特征线关系	20
2.4 半无限长杆中的弹塑性加载波	23
2.5 连续加载弹塑性波	30
2.6 冲击波	35
第三章 热物理和热化学基础	38
3.1 热传导	38
3.2 一维热传导问题的解	38
3.3 化学动力学和热化学	40
3.4 化学反应热	43
3.5 弗兰克-卡门涅茨基近似	44
第四章 平面撞击试验原理	46
4.1 由撞击产生的应力波强度	47
4.2 平面撞击试验技术	48
4.3 其它加载试验技术	50
4.4 高能炸药系统加载技术	52
4.5 冲击波参量的计算	57

第五章 凝聚炸药的热起爆理论	64
5.1 凝聚炸药对于热作用的试验现象	65
5.2 经典热起爆理论的普适表示式	66
5.3 静热起爆理论	69
5.4 定常热起爆理论	72
5.5 不定常均温热起爆近似理论	79
5.6 线性加热的热起爆理论	81
第六章 凝聚炸药的冲击起爆	89
6.1 均相炸药的冲击起爆	89
6.2 非均相炸药冲击起爆机理	96
6.3 非均相炸药冲击起爆的热点理论	100
6.4 非均相炸药的冲击起爆判据	106
第七章 冲击凝聚炸药形成热点的机理	113
7.1 气泡绝热压缩起爆模型	113
7.2 气泡压缩炸药反应模型	115
7.3 空穴弹塑性塌陷模型	117
7.4 空穴剪切摩擦模型	124
7.5 空穴或气孔的表面能转化为动能	126
7.6 晶体形变形成热点的起爆机制	127
第八章 凝聚炸药和爆轰产物的本构关系	129
8.1 凝聚炸药的状态方程	129
8.2 反应产物的状态方程	132
8.3 反应流拉格朗日分析	139
8.4 反应速率方程	145
8.5 孔隙度对状态方程的影响	162
第九章 起爆过程的数值模拟	171
9.1 一维流动的数值解	172
9.2 二维流动的拉格朗日数值解	185
9.3 二维流动的欧拉数值解	202
9.4 分子动力学方法	217
第十章 炸药的冲击波感度试验及数值模拟	226
10.1 最小起爆药试验	226

10.2	隔板试验.....	229
10.3	“猎枪”试验和苏珊试验.....	236
10.4	殉爆试验.....	241
10.5	射流或弹丸侵彻引起的起爆试验.....	248
10.6	持续脉冲起爆楔试验.....	260
附录	译名表	266

序 言

火药的发明起源于我国的汉代，距今已有千余年的历史，炸药的发明也有百余年了。科学家们系统地研究炸药起爆，如从查普曼和儒格时代算起已有九十年了。但时至今日，对炸药的起爆过程，仍了解得不够。这方面的专著，除最近我国北京理工大学冯长根教授所著《热爆炸理论》外，其它尚未见到。该书综述了国内外有关热爆炸方面的理论工作，内容丰富。但该书只局限于热起爆临界条件方面的讨论。对起爆过程的研究，除杂志上发表的文章外，只有美国洛斯阿拉莫斯实验室的梅特教授的 Numerical Modeling of Detonation 一书。该书出版于 1979 年，距今已十年，故内容也不符合发展的要求，况该书在我国尚无中文版。因此本书作者由于从事此工作的方便，久想编著一本关于专门讨论凝聚炸药起爆过程的书籍，收集国内外有关这方面的论著，尤其是国内学者们的工作，这将是十分有意义的事情。

本书力图从理论和实验紧密结合的角度阐明问题，故从内容选择和编排上均以数值模拟为主要内容，这是适应该学科近二十年来的发展特点和现代计算工具发展条件的。但这是一种初步的尝试，加之本书内容广泛，涉及到好几门学科，作者知识面有限，因而错误在所难免，希读者不吝指正。

本书得到我院俞大光主任（研究员）审定，朱建士研究员、水鸿寿研究员和秦承森研究员的审校，对原稿提出了许多宝贵的意见，徐志同志描绘了全部插图，在此，谨向他们表示衷心的感谢。本书第一章到第七章由章冠人执笔，第八章到第十章由陈大年执笔，由章冠人最后作了修改。

编 者

1990年于四川绵阳

绪 论

炸药是一种含能物质，可以发生高速的化学反应，放出大量的热能，并伴随着产生高温，高压气体。作为一种亚稳态物质，在一定的条件下储存、处理和运输时，发生化学反应的速度可以小到忽略不计。但在某些条件下，其化学反应的速度可以达到较高的水平，反应对放出热量的自身加热作用能进一步增加反应速度，最后导致爆炸。

研究导致炸药爆炸的条件是军事科学研究和工业发展的一个重要课题。它对提高武器系统和工业应用炸药的可靠性和安全性具有头等重要的意义。

可靠性是衡量一种产品在完成它的使命过程中符合设计要求的程度。武器的可靠性是十分重要的，如不能像预期的那样起作用，那便是一堆废物。

可靠性用统计学的术语来定义。它是产品在特定的条件下，在规定时间内完成预期功能的概率。炸药产品的可靠性问题之所以更为严重的原因有两个：第一，它们是复杂系统的一部分。因为系统完成功能的概率是各部分完成功能概率的乘积，炸药的作用概率必须高于整个系统的概率。这就要炸药产品具有高度的可靠性。其次，炸药系统是一次作用的机构，不能重复试验，为了要鉴定系统的可靠性，只有在实际应用的条件下测定大量的产品，然后用概率的方法取得一个定量的结论。从经济的观点来看，这对价值低廉的产品是无所谓的。但对价值昂贵的产品来说，要做成千上万次试验是不可能的。

安全性是炸药应用自始至终要考虑的主要问题。我们关心的，是一种产品从制造开始到它应用之间，在各个环节和任何时间，由于可能出现的意外事故而产生早期作用的程度。例如炸药产品由于勤务处理、运输、储存、温度变化或受冲击作用和这些

操作过程中可能发生的意外偶然事故而直接引爆。安全性也是按统计学定义的，解决安全性问题也必须进行大量的试验。同可靠性问题一样，对价值昂贵的产品，从经济的观点来看，也是不可能的。

设计者的任务在于能利用少量的试验次数，而获得对所要求的安全性和可靠性的准确估计。要做到这点，他一方面应选择最优化的试验和统计方法；另一方面他必须熟悉有关炸药起爆过程的内在物理机制，了解其规律性，这样可以进一步加以人为地控制或预防。因而，炸药的起爆动力学是一门非常实际的学科，对武器科学的研究和工业应用具有重大的意义。

一般炸药，特别是固体炸药的起爆过程是十分复杂的。为简化研究，大体上可以分为两部分，即化学反应过程和物理过程。

对于化学反应过程的研究，由于炸药反应的特殊性质，现在已见到一般研究化学反应的宏观方法，它属于炸药学的范畴。

炸药的起爆动力学只研究炸药起爆的物理过程。这是由于现在炸药起爆的方法所决定的。虽然现在应用的炸药起爆方法很多，例如用热桥丝起爆，针刺起爆、撞击起爆、摩擦起爆、爆炸桥丝起爆、光和激光起爆等等，但是这些方法不外是产生热或冲击波输入炸药引起爆炸。因而从物理机制上说，只有两种起爆方式，即热起爆和冲击起爆。

本书的内容，主要讨论炸药的热起爆和冲击起爆理论，唯象地研究起爆的物理微观机制。对于整个起爆过程来说，化学反应是极重要的组成部分。这部分内容我们只讨论到化学反应率方程为止，以便和炸药学分开。

为了本书的完整性和系统性，内容共分十章。其中第一章到第三章是一些预备知识，写得较简单，但本书以后各章所应用的基础知识已全部提到了。第四章平面撞击试验，其中概括了各种炸药起爆测试方法的基本原理，并没有限制在某一种测试手段，这样做，力图举一反三，达到更好效果。第五、六和七章主要介绍了热起爆，冲击起爆和其它各种因素的理论。也可以说主要是

热起爆，因为本书作者认为冲击起爆的实质也是热起爆。这个观点可能不正确，但在没有足够的试验事实以前，是很难说明冲击起爆的其它起爆本质的。第八章本构关系是炸药起爆动力学的重要组成部分，与守恒方程联立，构成理论框架，如采用计算技术就构成爆轰的数值模拟。本构关系主要包括两方面的内容：一是炸药及产物的状态方程；二是反应率方程。第九章数值模拟主要介绍一维、二维有限差分计算及分子动力学方法。有限反应率爆轰的数值模拟是与炸药安全试验密切有关的。³因此在第十章炸药的冲击波感度试验中，不仅介绍了各种试验，而且结合叙述了数值模拟的计算实例，试图从理论与试验的结合上说明问题。

第一章 弹塑性动力学概论

炸药分为气体、液体和固体三大类。一般军事上和民用的炸药大部分为固体炸药，例如梯恩梯、黑索金等。在加工、制造、储存、运输和应用过程中，必须考虑其安全性和可靠性，这就需要研究这些炸药的起爆性质。

炸药的起爆一般是受到外界的刺激所引起的，外界的刺激包括温度、力的载荷作用，电火花、光等的作用。由于最常遇到的意外事故，大部分是冲击力的动载荷，因而我们必须先研究固体炸药受冲击等动载荷作用下的性质。日常遇到的动载荷的范围很广，可能从压力很小的弹塑性波到压力很大的冲击波。当炸药受到它们的作用时，均可能引起爆轰，当然在某些条件下也可能不引起爆轰。能否引起爆轰决定于炸药的性质和它们的相互作用过程。因而研究弹塑性波和炸药的相互作用过程实际上就是研究炸药的起爆过程。这个过程是十分复杂的。要详细地描写这个过程，可能要考虑连续介质力学理论和化学动力学的各个阶段。在最初阶段，炸药受到外界的冲击，这个冲击可能是人为地加上去的，也可能是由于偶然事故产生的。冲击也许是不到几十兆帕斯卡的弹性波，也可能是几百兆帕斯卡的塑性波，也可能是 10^{10} 帕斯卡以上的强冲击波，也可能几种波均存在。同时在这些波后，温度均有一定的升高，因而炸药也许存在融化、蒸发等现象。要描述这些现象和炸药起爆的关系，当然还要考虑炸药的分解反应。要把这些相互交错复杂的物理、化学过程描述清楚是不容易的事，只能分门别类、分阶段地进行。例如先研究弹塑性波在固体炸药内的传播，研究其可能激发起爆的因素等等。

本章的内容就是介绍弹塑性波在固体中传播的一些基础知识。

1.1 应力张量

如在空间任取一个元面积 Δa ，其法线方向为 $\vec{n}$ ，则作用在这个面上的力（每单位面积上的力）可用一个张量 $\bar{\sigma}$ 表示之。它称为应力张量，有九个分量：

$$\bar{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (1.1.1)$$

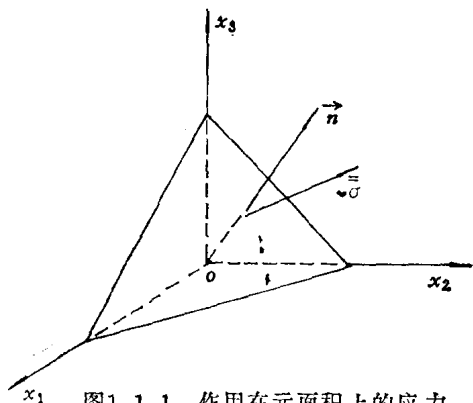


图1.1.1 作用在元面积上的应力

实际上作用在该面上每单位面积上有三个力的分量，分别沿着 x_1 , x_2 , x_3 坐标轴的方向：

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{11}n_1 + \sigma_{12}n_2 + \sigma_{13}n_3 \\ \sigma_2 &= \sigma_{21}n_1 + \sigma_{22}n_2 + \sigma_{23}n_3 \\ \sigma_3 &= \sigma_{31}n_1 + \sigma_{32}n_2 + \sigma_{33}n_3 \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

式中 n_i ($i = 1, 2, 3$) 为 $\vec{n}$ 沿 x_1 , x_2 , x_3 的三个分量。 $\bar{\sigma}$ 的九个分量有三个分量 σ_{ii} 是作用在这个元面积在三个坐标轴投影面上的垂直应力，而 σ_{ij} ($i \neq j$) 为作用在三个投影面上的切应力。

因为这个元面积没有发生转动，这些切应力必须成对地相等和相反，否则就要产生力矩。所以应存在下列关系：

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.1.3)$$

这样应力张量变为以一根左边的对角线成对称的形式。

$$\bar{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (1.1.4)$$

在对角线上的量表示张应力或压应力，不在对角线上的量表示切应力。

普通所谓的流体静应力，是对角项的平均值

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (1.1.5)$$

如果这三个对角项完全相等，则称为纯静水压力。由于是压力，一般取“+”号。

一般可以把应力张量分解为两部分，即流体静压 $\bar{\sigma}^s$ 和偏应力 $\bar{\sigma}^D$ 两部分：

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^s + \bar{\sigma}^D = \begin{vmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{2\sigma_{11} - (\sigma_{22} + \sigma_{33})}{3} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \frac{2\sigma_{22} - (\sigma_{11} + \sigma_{33})}{3} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \frac{2\sigma_{33} - (\sigma_{11} + \sigma_{22})}{3} \end{vmatrix} \quad (1.1.6)$$

如果适当选择坐标轴的方向，可以把应力张量对角化：

$$\bar{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad (1.1.7)$$

$\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 称为主应力，这三个方向称为主方向，此

时, $\sigma_i^n = \sigma_i - p$ 。

1.2 应变张量

当固体发生形变时, 固体内的质点必然要发生位移, 位移的定义为

$$\vec{s} = \vec{r} - \vec{r}_0 \quad (1.2.1)$$

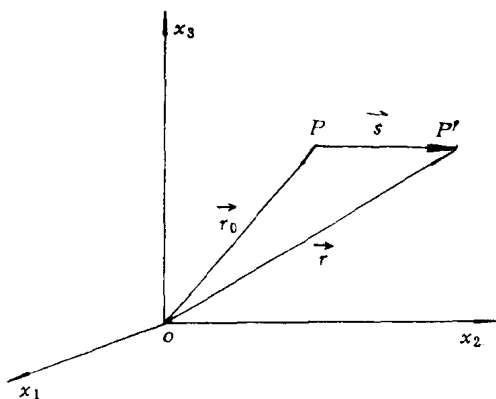


图1.2.1 质点位移图

在一元体积内, 邻近点的位移矢量沿三个坐标轴的分量是不能任意的, 要受到不能出现空洞和两个质点不能在同一位置的相容性的限制。一般可表示为:

$$\begin{aligned} s_1 &= s_1^0 + \frac{\partial s_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial s_1}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial s_1}{\partial x_3} \Delta x_3 \\ s_2 &= s_2^0 + \frac{\partial s_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial s_2}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial s_2}{\partial x_3} \Delta x_3 \\ s_3 &= s_3^0 + \frac{\partial s_3}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial s_3}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial s_3}{\partial x_3} \Delta x_3 \end{aligned} \quad (1.2.2)$$

或者写成

$$\Delta S_i = S_i - S_i^0 = \sum_j D_{ij} \Delta x_j \quad (1.2.3)$$

式中 D_{ij} 称为应变张量, 它是两个矢量的联系桥梁, 一个矢量是