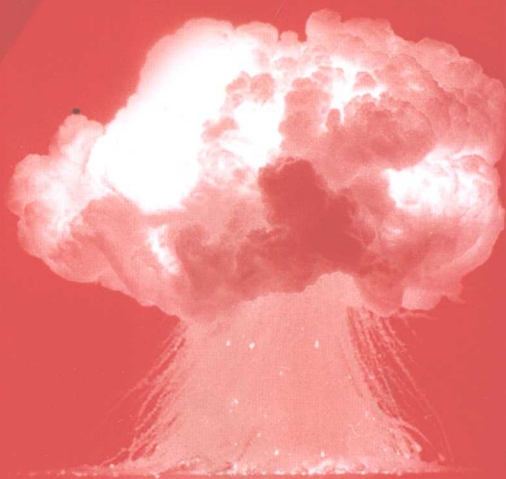


炸药冲击损伤 与起爆特性

梁增友 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

炸药冲击损伤 与起爆特性

梁增友 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书通过理论分析、试验研究及数值模拟 3 个方面对 PBX 炸药冲击损伤, 以及损伤对炸药冲击起爆性能的影响进行了阐述。全书共分 5 章, 第 1 章简单介绍了当前含能材料损伤研究理论及现状, 以及损伤对冲击起爆安全性能的影响; 第 2 章对炸药及其替代物的冲击损伤实验技术、细观损伤观测和表征技术进行了分析; 第 3 章重点讨论炸药的损伤本构模型; 第 4 章主要介绍损伤对炸药冲击起爆特性影响的试验研究; 第 5 章主要介绍利用数值仿真技术研究损伤对起爆性能的影响。

本书适合于从事含能材料、弹药工程与爆炸技术科技人员和相关专业的研究生阅读、参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

炸药冲击损伤与起爆特性 / 梁增友著. —北京: 电子工业出版社, 2009.5
ISBN 978-7-121-08595-6

I. 炸… II. 梁… III. ①炸药—击伤 ②起爆(炸药)—特性 IV.R642 TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 046258 号

责任编辑: 李雪梅

印 刷: 北京机工印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 11.25 字数: 208.1 千字

印 次: 2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 2 500 册 定价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

炸药是各种武器弹药破坏与毁伤目标的基本能源，也是国民经济建设中最重要的高功率能源。炸药的性能与武器的高效毁伤性能是决定武器先进性的重要因素之一。随着炸药在军民领域应用的不断深入和日益广范，对炸药起爆、爆轰安全性能的要求也越来越严格，对炸药起爆机理和爆轰特性的研究也由此不断深入。

计算机技术、损伤力学及微细观力学的迅速发展为炸药起爆及其爆轰机理的研究提供了新的有力工具。计算机技术的高速发展，使得利用计算机数值模拟功能研究炸药起爆及其爆轰机理成为可能。特别是高性能计算机的普及，通过建立相应的模型研究炸药的起爆和爆轰机理为研究炸药的机理提供了更详细、更直观的数据，一些数值仿真模型已经得到了广泛的应用。损伤力学经过多年的发展已经在金属、混凝土复合材料等脆性材料中得到了成功的应用。损伤是材料结构组织在外界因素作用下发生的力学性能劣化，并导致体积单元破坏的现象。炸药特别是 PBX 类炸药可以看成是颗粒高度填充的复合材料，在冲击载荷的作用下炸药材料具有与脆性材料类似的损伤特性。但是炸药由于其含能敏感性又具有与脆性材料不同的特点，在冲击载荷作用下炸药会产生结构的微细观损伤变化，这些变化一方面影响材料的力学特性，另一方面，微细观损伤又会导致炸药的含能特性（即起爆特性和爆轰特性）发生变化。因此在研究炸药的冲击损伤特性时必须借助损伤力学的研究方法，建立起宏观的描述模型，同时借助微细观力学方法，研究微细观对起爆的影响。当前起爆机理的研究在宏观机理研究的基础上逐渐向微损伤、微细观结构等方向拓展，并从跨尺度的角度开始了相关研究。

炸药作为一种特殊的材料，由于冲击载荷作用下的爆炸危险性，使得借助损伤和微观力学的研究具有较大的难度，因此通过研究替代物研究微细观结构损伤具有较大的优越性。利用计算机仿真技术和实验技术研究微损伤对起爆特性的影响是两个主要的手段。

由于炸药冲击损伤的有关理论及损伤对起爆特性的研究还处于初级阶段，相关的资料和论著比较少。本书正是在这个背景下编写的，通过对当前一些研究成果的总结论述，使相关的研究人员和技术人员能够尽快了解这方面的进展，以起到抛砖引玉的作用。

全书共分 5 章，第 1 章介绍了当前含能材料损伤研究理论及现状，以及损伤对冲击起爆安全性能的影响。第 2 章对炸药及其替代物的冲击损伤实验技术、

细观损伤观测和表征技术进行了分析,并以 PBX 为典型材料进行了讨论。第 3 章介绍了微裂纹的稳定扩展准则和失稳扩展准则,并结合动态断裂理论中微裂纹扩展的速度公式建立了微裂纹的损伤演化方程;应用细观损伤力学中的 Taylor 模型方法将微裂纹引入柔度张量的计算方程中,并通过统计积分的方式建立了微裂纹体元的细观损伤本构模型;最后,通过微裂纹体元和广义黏弹性体元的串联耦合关系推导了材料体元的应力与应变关系,建立了 PBX 类炸药的黏弹性统计细观损伤本构模型。第 4 章主要介绍了损伤对炸药冲击起爆特性影响的试验研究,并对拉氏分析技术进行了说明。第 5 章主要介绍了利用数值仿真技术研究损伤对起爆性能的影响,通过对炸药冲击起爆机理和化学反应速率方程的理论分析,建立了带损伤的宏观化学反应速率方程和一个与炸药初始孔隙率、孔隙尺寸相关的细观反应速率模型,并将其嵌入有限元程序 DYNA2D 中。本书通过对不同初始密度、不同孔隙尺寸的 PBX 炸药进行一维和二维冲击起爆过程计算,比较了这些参数对冲击起爆感度的影响。通过数值计算结果对试验现象及结果进行了分析,事实说明所建立的模型能够正确模拟炸药的起爆过程,并对损伤炸药的起爆机理进行了合理解释。

本书是在以往及目前所做研究工作的基础上编写而成的,黄风雷教授、段卓平教授等对本书中的研究内容给予了悉心指导,在此对他们的关怀和帮助表示衷心的感谢。周栋、姚惠生博士对本书也提供了许多资料。此外本书的内容参考了一些国内外的文献,在此一并表示致谢。

本书适合作为从事与军事技术有关的专业技术人员的阅读材料,同时适合作为含能材料专业、弹药工程与爆炸技术,以及军工领域有关专业的高等学校在校本科生及研究生的参考资料。

由于作者能力有限,疏漏和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2008 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 炸药冲击起爆性能研究概述	2
1.2.1 炸药冲击起爆的试验研究	2
1.2.2 冲击起爆机理理论研究	5
1.2.3 炸药冲击起爆机理的数值模拟研究	7
1.3 炸药冲击损伤及其对炸药起爆机理影响的研究	13
参考文献	16
第 2 章 炸药及其替代物的冲击损伤试验技术	22
2.1 PBX 炸药冲击损伤试验研究	22
2.1.1 PBX 炸药冲击损伤试验研究	22
2.1.2 测试系统	23
2.1.3 试验加载及回收装置	25
2.2 冲击损伤试验结果表征	27
2.2.1 密度测量	27
2.2.2 损伤炸药超声波波速测试	28
2.3 PBX 炸药冲击损伤过程的数值模拟	30
2.3.1 轴向压缩加载情况下有限元模型	31
2.3.2 轴向无约束条件下的损伤模型探讨	34
2.4 PBX 炸药与其替代物冲击损伤的相关性分析	36
2.4.1 炸药模拟材料的冲击损伤试验研究	37
2.4.2 PBX 炸药的冲击损伤及其细观分析	46
2.4.3 三轴冲击压缩载荷作用下损伤的细观分析	51
2.5 本章小结	55
参考文献	55
第 3 章 PBX 炸药损伤本构模型	58
3.1 PBX 炸药细观损伤理论	59
3.2 黏弹性细观损伤模型简述	60
3.2.1 Visco-scream 模型简介	60
3.2.2 Visco-scream 模型的改进	62
3.3 PBX 炸药损伤本构模型	65

3.3.1	模型的假设条件	66
3.3.2	微裂纹体损伤度表征	67
3.3.3	微裂纹体的偏量本构关系	67
3.3.4	微裂纹扩展准则	71
3.3.5	微裂纹体的体量本构关系	76
3.3.6	广义黏弹性体本构关系	77
3.4	本章小结	80
参考文献		81
第 4 章	损伤炸药冲击起爆性能试验研究技术	83
4.1	隔板试验装置及测试系统	83
4.2	未损伤炸药隔板试验	84
4.2.1	试验用 H 型锰铜压阻传感器标定	85
4.2.2	试验结果	87
4.2.3	试验结果分析	89
4.3	隔板入射冲击波压力的理论计算	90
4.4	损伤炸药的冲击起爆试验结果	92
4.5	三轴压缩冲击加载条件下炸药起爆机理的分析	93
4.6	拉格朗日分析方法	95
4.7	本章小结	108
参考文献		109
第 5 章	损伤炸药冲击起爆的理论和数值模拟	110
5.1	化学反应速率方程的有关理论	110
5.2	含损伤的宏观反应速率方程的建立及应用	114
5.2.1	炸药反应速率方程的整体标定	114
5.2.2	被发炸药 PBX	118
5.2.3	PBX 炸药模拟结果	120
5.2.4	其他炸药计算结果	124
5.3	细观反应速率模型的建立及应用	132
5.3.1	细观反应速率模型的建立	132
5.3.2	反应速率模型的参数确定	139
5.4	孔隙率等初始物理不均匀参数对冲击起爆过程影响的数值模拟研究	142
5.4.1	一维数值模拟计算	143
5.4.2	二维数值模拟计算	151
5.5	本章小结	168
参考文献		169

第1章 绪 论

1.1 引言

炸药是各种武器弹药破坏与毁伤目标的基本能源,也是国民经济建设中最重要的高功率能源之一。随着现代高性能武器系统的快速发展,炸药在国民经济建设各领域的应用范围日益扩大,炸药装药在各种条件下的安全性问题已成为十分重要的研究课题。炸药在生产、加工、运输、储存和使用等过程中会受到各种载荷的作用,从而使炸药产生各种微空洞、微裂纹等微损伤。微损伤的出现会导致炸药力学性能劣化,同时使热点源增加,燃烧表面积扩大,导致炸药敏感化,使炸药的感度大大提高,甚至影响燃烧、爆轰性能,从而对炸药可靠应用产生影响。

冲击载荷是各种武器弹药在实战环境中最常遇到的载荷,因此炸药在冲击载荷作用下发生爆炸的可能性一直是一个备受关注的问题。强冲击载荷使炸药受到强冲击波作用并发展到爆轰,这个过程称为炸药的 SDT (Shock to Detonation Transition) 问题^[1~3]。它为炸药的可靠起爆提供了有效手段,一般情况下,当冲击强度低于炸药 SDT 阈值时,炸药不会可靠起爆。但人们在研究炸药 SDT 过程中发现,在某些特定条件下,炸药在受到强度比 SDT 阈值低得多的冲击作用时,也会发生爆炸,且其起爆时间比 SDT 有显著延长。这种低强度冲击下引发炸药延迟爆轰的现象,与通常炸药的 SDT 过程有明显的不同,人们对这种起爆机理还没有十分清楚的认识。目前把这种低强度冲击引发的炸药延迟爆轰现象称为炸药的 XDT (Unknown-mechanism to Detonation Transition) 现象或迟滞爆轰 (Delayed Detonation)^[1, 2, 4~7]。炸药的 XDT 现象虽然在一定条件下才会发生,但在炸药的生产、运输、储存和使用过程中,有时会受到碰撞、跌落等长脉冲低压冲击波的作用,如果条件满足,就可能发生 XDT 现象造成灾难性事故。因此,深入研究炸药的 XDT 现象,对炸药及武器系统的安全性具有十分重要的意义。当前,对 XDT 起爆机理比较一致的解释是爆轰前机械损伤造成炸药敏感化,然后由于压缩波的作用发生了爆炸^[1, 2, 4, 7, 8]。研究表明,损伤炸药比未损伤炸药更为敏感,而很多炸药早炸、误炸事故在本质上都可以与损伤炸药在冲击载荷作用下的起爆问题联系起来。研究炸药冲击损伤及其对冲击起爆的影响有助于认识冲击起爆 (SDT 和 XDT) 的本质,这对于



其他诸多军工难题具有重要的意义。这些军工难题主要有大口径火炮的发射安全性、钻地弹在侵彻过程中遭受冲击波作用是否起爆、导弹遭受拦截反导弹药爆炸冲击波冲击或破片冲击、实战环境下弹药遭受流弹等撞击是否被引爆及炸药的燃烧转爆轰等问题。

此外,通过对冲击载荷作用下的损伤及冲击起爆的研究,可以对炸药的各项组成成分在冲击作用下对炸药性能的影响有更深入的认识,这对于爆炸灾害和意外事故的预防及高能钝感炸药的研究与开发都具有重要的指导意义。

炸药的冲击损伤及其对冲击起爆的影响是炸药材料的一个新的研究方向。它既是冲击力学和材料力学的交叉点,又是细观力学、宏观力学和爆炸力学的交叉点,具有重要的实际意义和学术价值。研究炸药冲击损伤及其对冲击起爆的影响可以为炸药起爆装置的设计提供理论依据,对于研究炸药冲击加载条件下的力学响应及安全评估等也具有重要的意义,同时这些研究还将为炸药冲击感度和炸药起爆的深入研究奠定基础。

1.2 炸药冲击起爆性能研究概述

炸药作为军民两用的重要含能材料,对其性能和应用的研究一直备受关注。由于炸药冲击起爆过程的复杂性和其作用过程的瞬时性,对其作用机理的研究一直是爆轰领域的热点和难点。为了弄清其机理,各国的科研人员从理论和试验,以及数值仿真等多方面进行了研究,对冲击起爆过程有了较深入的探索。下面分别对一些重要的研究成果进行简单介绍。

1.2.1 炸药冲击起爆的试验研究

目前研究炸药冲击波起爆的典型试验主要有两类:平面撞击试验和隔板试验^[1, 8, 9]。

1. 平面撞击试验

平面撞击试验的原理是把一块试验炸药或材料做成平面靶板,使其与另一块飞板相撞,飞板撞靶速度可以从低速到高速调整,飞板撞靶传递给炸药样品部分能量后,随之传递弹塑性波,然后观察炸药起爆情况。也可以不用飞行的平板而用一块金属板和炸药平面波发生器接触,平面冲击波从隔板传入起爆被测炸药药柱。测量起爆时间、起爆距离、速度等一些参量,通过这些参量研究冲击波起爆的情形。平板撞击炸药样品形成矩形剖面的平面冲击波,适合对冲



击起爆规律进行定量研究。该试验最早是 1961 年美国研究人员对气泡形成的热点进行平板撞击试验, 通过对该试验发现气体的绝热压缩加热是引起起爆的一种机制。Gittings^[59] 通过对 PBX9404 炸药起爆行为的研究, 发现炸药起爆同冲击压力 p 和冲击波脉冲宽度 τ 两个因素有关。Walker 和 Wasley^[1] 通过平板撞击试验及对前人试验数据的分析, 发现炸药的起爆与炸药单位面积上的入射能量有关, 提出了等能量冲击起爆判据

$$E = p U_e \tau$$

式中 E ——炸药起爆能量;

p ——冲击波压力;

U_e ——冲击波速度;

τ ——冲击波脉冲宽度。

在一定压力范围内炸药反应冲击波速度 U_e 变化不大, 故临界判据等价于

$$p^2 \tau = \text{constan } t$$

这就是著名的平面一维短脉冲冲击起爆判据。Longueville^[60] 等将起爆判据修正为

$$p^n \tau = S_1$$

通过飞片试验发现炸药起爆压力不仅与飞片厚度或脉冲宽度有关, 还与飞片的撞击面积有关。王治平、周之奎、Manfred Held^[10] 等用该方法测量了炸药的冲击起爆阈值。

2. 隔板试验

隔板试验是早期建立的用于测定炸药冲击起爆特性的典型方法。隔板试验装置示意图如图 1.1 所示^[6]。在隔板试验中通过改变隔板的冲击阻抗和厚度控制输入试验药柱的冲击波强度, 从而控制炸药发生爆轰或不爆轰。对应 50% 发生爆轰的隔板厚度作为临界隔板厚度阈值, 相应的入射冲击波压力峰值称为起爆压力阈值或临界起爆压力。

Liddiard^[61] 将验证板去掉, 通过高速分幅照相测量被发药柱的自由表面速度, 对隔板试验方法进行了改进, 不仅

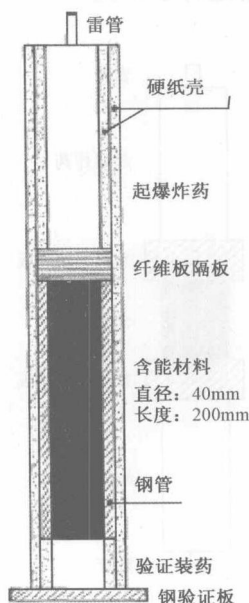


图 1.1 隔板试验装置示意图



得到了爆轰阈值, 而且得到发生反应的阈值压力。试验表明反应阈值压力与炸药的厚度无关, 即不依赖于被发药柱的长度, 而爆轰阈值压力随炸药厚度的减小而增加, 说明反应冲击波转变为爆轰波有一个过程, 并受背后稀疏波的影响。而且反应阈值与爆轰阈值不仅仅由被发药柱的化学组成、物理状态所决定, 而且与试验条件、试验装置的尺寸有关, 这些尺寸控制了背部及侧向稀疏波赶上冲击波阵面的时间。

浣石^[62]用二维拉式量计和隔板试验对整个起爆过程和冲击波后流场进行了研究, 获得了流场各物理量沿流线分布的结论。Bernecker 利用高速摄影的方法研究了隔板试验中二维冲击波作用下炸药的瞬时爆轰和延迟爆轰。夏先贵^[55]等利用设计的试验装置对 PBX9404 的冲击起爆阈值进行了测定。胡湘渝^[56]利用隔板试验分析二维冲击波起爆过程, 获得了从主发药柱到被发药柱起爆并形成稳定爆轰的各种参量。Guengant^[6]等在对隔板试验分析的基础上, 设计了如图 1.2 所示的双隔板试验装置, 并利用该试验装置通过控制冲击波强度和间隔对炸药的 XDT 现象进行了研究, 认为早期的隔板试验适合于研究含能材料在 SDT 状态下的冲击波感度问题, 而双隔板试验适合于研究炸药在 XDT 状态下的冲击波感度问题。柯加山^[7]利用隔板试验对 JO9159 炸药的冲击起爆进行了研究, 得到了起爆压力阈值和隔板临界厚度, 并结合脉冲 X 光机对延迟爆轰现象进行了研究。

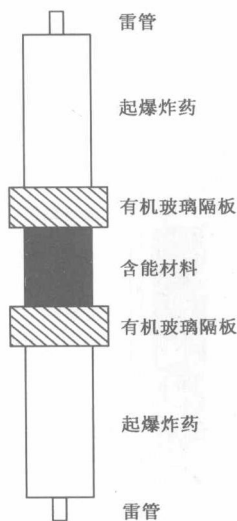


图 1.2 双隔板试验装置

炸药在冲击载荷下的起爆行为不仅反映在其反应阈值、起爆阈值和相应的判据上, 也反映在爆轰建立过程方面。楔形试验是观察其爆轰建立过程的重要方法。利用该试验可以获得非均匀炸药中反应冲击波的成长迹线, 以及反应冲击波转变为高速爆轰的时间和距离。Dervaux^[11]利用楔形试验建立了 JTF 反应速率方程, 对不同黏合剂的炸药装药的反应行为进行了研究。根据爆轰时间和距离及入射冲击压力即可得到炸药的 POP 曲线。孙承伟利用该试验给出了一些常用炸药的 POP 曲线。吴国栋^[63]等利用平板对 JO9159 楔形炸药进行冲击起爆, 并拟合出炸药的起爆判据。

1.2.2 冲击起爆机理理论研究

对炸药冲击起爆的机理,虽然已有不少研究但尚有许多问题需要进一步深入研究。对非均质炸药起爆而言,目前比较成熟的观点是热点起爆理论。该理论认为,当炸药受冲击后,并不是全部遭受冲击作用而被加热,而只是炸药中若干部分受到加热,如炸药内部的孔穴、间隙、杂质或密度间断处等。冲击波在这些地方的反射和绝热压缩,使局部温度大大高于平均温度,从而形成热点,随后引起热点周围炸药颗粒表面的燃烧,释放能量,由燃烧逐步发展成为稳定爆轰。

对炸药在冲击波作用下热点形成的力学机制,人们提出了许多模型,概括起来主要有以下几种。

① 流体动力学热点机制。该观点认为冲击波于炸药内部空洞或杂质密度间断处相互作用,引起空隙中气体、周围炸药或惰性介质的会聚流动、射流、冲击波反射等流体动力学现象,形成局部高温区。

② 晶体的位错运动和晶粒之间的摩擦产生热点。由于位错是晶体中未滑移区和已滑移区的交界处,是一种线缺陷,在结晶的过程中形成,并且在晶体变形时大量增值,位错密集区移动时部分塑性功转化为热量,形成热点。

③ 剪切摩擦形成热点。该观点认为当冲击波进入带孔穴的炸药时,处在孔穴正面的炸药可能产生剪切带。在炸药剪切过程中,软化效应产生塑性功,导致热点生成。

④ 热点形成机理的孔穴崩塌机理。描述这种孔穴崩塌过程中黏塑性功形成热点的模型称为黏塑性热点模型。该理论认为当冲击波压力超过孔穴周围炸药的塑性屈服极限时,由于炸药材料的塑性流动引起孔穴崩塌。孔穴崩塌过程中的塑性功使崩塌孔穴周围的一薄层炸药材料温度升高形成局部热点,当热点温度达到一定程度时,引起热点周围其他炸药的化学反应。

此外, Kim K^[64]等提出了一种典型的炸药弹黏塑性球壳塌缩模型,认为炸药受到冲击压缩时,孔穴和黏合剂附近的炸药颗粒会发生较大变形,温度上升,形成热点,随后点燃周围炸药,反应进行到一定程度,高温高压气体渗透到炸药之间的缝隙中,继续燃烧传播转变为爆轰。许多学者利用该机理对炸药的起爆模型进行了研究。Frey R B^[65]对以上提到的各种热点形成机制中炸药的加热条件进行了分析,认为黏塑性功是造成孔穴崩塌产生高温热点而导致炸药起爆最可能的机理。

韩小平等^[12, 53]对温度场中受冲击载荷作用的炸药药柱进行了弹黏塑性



分析,其计算曲线和试验曲线有较好的近似性。1998 年 Massoni J 和 Saurel R^[67] 建立了一个固体炸药冲击起爆的点火增长模型。假定点火发生在炸药内部的孔穴区域,而增长则从孔穴内部的燃烧开始,并建立了一个基于 Khasainov^[68]黏塑性模型的点火模型。在增长的第一阶段用 Khasainov 黏塑性模型的扩展模型描述,第二阶段用爆轰颗粒燃烧模型描述,综合这些微观模型并考虑到波的传播特性,建立了宏观模型。

非均质炸药的冲击起爆是冲击波直接不均匀地加热炸药,形成热点,然后使炸药分解,最后引起反应爆炸。当冲击波传入非均质炸药后,一部分能量转换为冷能,一部分能量转换为热能,只有热能对炸药的起爆有作用,并把这部分热能作为瞬时输入能量。

Walke 和 Wasley^[60]利用平面波装置研究了 LX-04 和 TNT 的炸药起爆行为,并结合 Gitting E F 给出的 PBX9404 数据和 Liddiard T P 给出的改进隔板试验及水箱试验结果进行了分析,指出炸药是否被引爆(或引发),与炸药单位面积上的入射能量有关,从而提出了等能量冲击起爆判据

$$E = pu_e t = \frac{p^2 t}{\rho_e U_e} = E_{cr} \quad (1.1)$$

式中 E_{cr} ——与炸药性质有关的常数

p ——输出冲击波的压力;

t ——冲击波持续的时间。

由于在一定压力范围内,炸药中的冲击波速度 U_e 变化不大,所以临界能量判据等价于

$$p^2 t = \text{常数} \quad (1.2)$$

这就是著名的非均质炸药的平面一维短脉冲冲击起爆判据。

Logueville 等^[61]通过试验指出:在一定压力范围内,许多非均质炸药的引爆阈值可以近似用式(1.2)来表达,但是若干炸药有较大偏离。更全面的一维短脉冲冲击起爆判据可以表示为

$$p^n t = S \quad (1.3)$$

n 和 S 是与炸药有关的常数,非均质炸药的 n 值通常在 1.75~2.2 之间。

Foan G C W^[62]根据隔板冲击起爆试验的结果,结合微积分理论,推导出隔板试验中由透射冲击波引爆的起爆判据,其形式为

$$\int_0^\infty p^2(t) dt = \text{constant}$$

周培毅和胡双启^[63]通过分析炸药内部侧向能量分配对热点能量传播的影响,提出面积效应系数概念,导出了一种适用于衰减脉冲波起爆的冲击起爆判据



$$\alpha \int_0^{t_c} (p^2 - p_c^2) dt = \text{constant} \quad (1.4)$$

该判据考虑了面积效应和有效能量的影响, 因此比以往的判据更为合理, 更具实用性。

张泰华和卞桃华^[64]分析了几种典型的冲击起爆判据和有关数据, 认为这些判据都没有考虑到装药微观结构的影响。据此, 他们提出了用局部化因子修正起爆判据的新思想。

综上所述可以看出非均质炸药的冲击起爆机理相当复杂, 但是对起爆过程的认识却基本一致, 即认为存在点火过程和爆轰建立过程, 点火过程是指在冲击波作用下形成大量的热点引起热爆炸, 建立过程是指由不稳定爆轰到稳定爆轰的发展过程。

1.2.3 炸药冲击起爆机理的数值模拟研究

由于爆炸过程的复杂性和高速瞬时性, 以及当前试验水平的限制, 使得对炸药冲击起爆和爆轰问题的研究仅依靠试验是不够的。因此计算机模拟技术成为研究炸药冲击起爆机理的另一途径。

目前在爆炸冲击效应技术领域中的主要的数值模拟方法包括有限差分法、有限元法、有限体积法等。有限差分方法是先建立微分方程组(控制方程), 然后用网格覆盖空间域和时间域, 用差分近似代替控制方程中的微分, 得到近似的数值解, 该方法是一种直接将微分问题转变为代数问题的近似数值解法。有限元法是把计算域划分为有限个互不重叠的单元, 在每个单元内, 选择一些合适的节点作为求解函数的插值点, 将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式, 借助于变分原理或加权余量法, 将微分方程离散求解。采用不同的权函数和插值函数形式, 便构成不同的有限元方法, 有限元方法最早应用于结构力学, 后来随着计算机的发展慢慢用于流体力学的数值模拟。有限体积法是在物理空间将偏微分方程转化为积分形式, 然后在物理空间中选定的控制体积上把积分形式守恒定律直接离散的一类数值方法。有限体积法适合于任意复杂的几何形状的求解区域, 是在吸收了有限元方法中函数的分片近似的思想, 以及有限差分法的一些思想发展起来的高精度算法, 目前已在复杂的高速流体动力学数值模拟中得到了广泛的应用。但是由于有限差分法和有限元法发展得比较早, 现在已经比较成熟, 所以目前在爆炸冲击领域中普遍使用。

在炸药冲击起爆的力学问题的数学模型中, 非线性流体动力学方程组是基本部分, 此外还需要增加炸药及爆轰产物的状态方程、化学反应速率方程等,

构成封闭的方程组。

凝聚炸药最常用的状态方程有两种：HOM 状态方程及 JWL 状态方程。其中 JWL 状态方程能够很好地描述凝聚炸药的圆筒试验，而且有明确的物理意义，因而在弹药设计和爆炸数值模拟中得到广泛应用，但是该方程也有它的不足之处，就是其系数随装药密度的改变而改变，同种炸药，装药密度不同时，JWL 状态方程的系数明显不同。

关于反应产物的状态方程，Fickett 等曾对反应产物的状态方程做了很好的描述。把产物的状态方程分为两大类：一类不考虑化学反应，另一类则考虑化学反应。前者只是简单地拟合某种组成的试验数据，而后者则包括各组分的状态方程，然后根据某种混合规律把各种组分结合起来，给出状态方程。

炸药的起爆反应过程通常用反应速率来描述，反应速率方程是冲击起爆过程数值模拟中数学模型的核心，也是数值模拟的基础。在数值模拟中广泛应用的主要有以下几种模型。

1. Arrhenius 方程

早期的 Arrhenius 方程主要用于均质炸药，方程如下

$$\frac{1}{1-\lambda} \frac{d\lambda}{dt} = Z * \exp\left(-E^*/RT\right) \quad (1.5)$$

2. Arrhenius 方程的改进形式

Arrhenius 方程的改进形式也可用于固体非均质炸药，如双 Arrhenius 形式的方程和考虑压力作用的 Arrhenius 方程。

3. 巴塔洛娃方程

从热点理论出发的巴塔洛娃方程为

$$\frac{d\lambda}{dt} = 3\lambda^{2/3} \left(\frac{4}{3} \pi N_0 P_1 \right)^{1/3} \left[\exp\left(-E^*/E\right) \right]^{1/3} aP \quad (1.6)$$

巴塔洛娃方程未考虑热点的形成机制，认为热点分布均匀，质量为零，数量由冲击波强度决定，并假定从热点发出球形燃烧波，燃烧阵面的厚度为零。

4. Dremin 方程

Dremin 提出的方程为

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(\lambda + b)(c - \lambda)^3 P_1 P \quad (1.7)$$



这是从热点理论出发的经验方程，只考虑从热点开始的燃烧，并认为燃烧具有层流特性。

5. Cochran 方程

首先考虑热点形成的是 Cochran 方程^[69]

$$\frac{d\lambda}{dt} = (1 - \lambda)(\omega_1 p^n + \omega_2 \lambda p^m) \quad (1.8)$$

方程右边第一项表示点火，第二项表示燃烧。在热点成核过程中考虑炸药的消耗，将冲击波起爆过程分解为点火和燃烧两个阶段。这是 1979 年由 Cochran S F 提出的一个由冲击波压力和反应速率控制的简单形式的二项反应速率模型，它反应了起爆过程的基本特点，即冲击波与炸药性质不均匀结构相互作用形成热点，化学反应首先在热点处发生并成为瞬发反应的核心。如果热点温度足够高，尺寸足够大，损耗比较小，则热点处的反应就会向周围扩展，使周围的炸药发生“燃烧”反应。

6. Forest-Fire 模型^[13]

Forest-Fire 模型的基础是“唯一曲线形成原理”，按照此原理，“不论初始条件怎样，其后有化学反应的冲击波沿着距离空间、时间和状态上的唯一曲线转变成爆轰波”^[16]。因此，在强度超过某一极限的冲击波阵面上，化学反应由压力单值确定，在波阵面压力达到 CJ 爆轰压力 p_{CJ} 后，所有炸药将瞬时分解，分解速度可以由 POP 图关于部分起反应的炸药的 Hugoniot 曲线和 HOM 状态方程确定，宏观反应动力学方程有如下形式

$$\frac{1}{1 - \lambda} \frac{d\lambda}{dt} = \exp(A + Bp + Cp^2 + \cdots + Xp^n) \quad (1.9)$$

当 p 小于某一极小值 $p_{\min}$ 时，有

$$\frac{1}{1 - \lambda} \frac{d\lambda}{dt} = 0 \quad (1.10)$$

当 p 大于 p_{CJ} 时，有

$$\lambda_j^{n+1} = 1 \quad (1.11)$$

式 (1.9) 中 $A, B, C, \cdots, X$ 为常数。此模型在计算超压爆轰问题及一维爆轰波传播问题时，已被广泛使用。图 1.3 是厚铝板以 800m/s 的速度撞击 PBX9404 炸药引起冲击波起爆过程通过特征线程序 CSIN 计算的结果，界面撞击压力约为 4.0GPa。图 1.3 (a) 显示了不同拉格朗日质点的压力剖面，曲线右下角的数字为与该剖面对应的拉格朗日质点位置（单位：cm），图 1.3 (b) 给出的是冲

击波到达位置随时间变化的曲线。

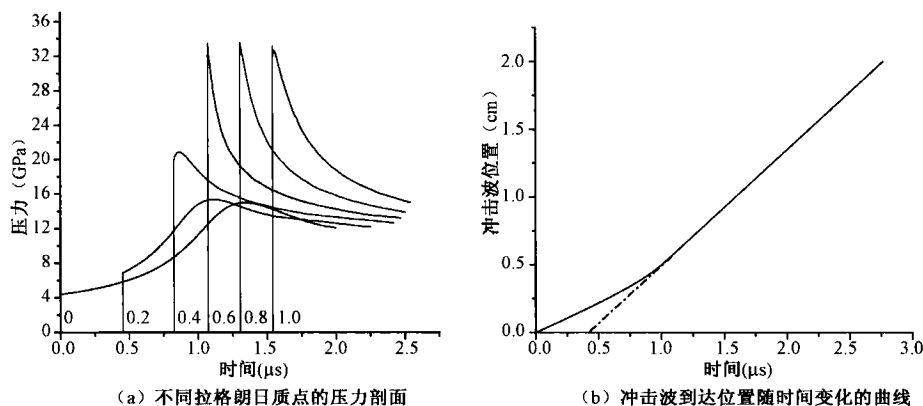


图 1.3 PBX9404 炸药的冲击波起爆图像——Forest-Fire 反应速率模型结果

虽然 Forest-Fire 反应速率可以较好地预估爆轰距离和爆轰时间，但是试验表明，在大多数非均质炸药反应冲击波的早期发展过程中，阵面附近的压力没有明显增长，反应冲击波阵面后方流场中的反应所产生的压缩波不断增长，并向前追赶冲击波阵面，最终导致爆轰过程的转变，而用 Forest-Fire 反应速率计算出了较大的前期增长。建立在反应冲击波唯一增长迹线基础上的 Forest-Fire 反应速率关系夸大了反应冲击波阵面附近早期反应的贡献。同时，应该注意到，Forest-Fire 模型实质上是沿着 POP 图加速一个增长的矩形波所必须的反应速率。当冲击波接近爆轰状态时，关于带反应冲击波的矩形波假设不再适用。因此，Forest-Fire 模型不能用于描述定常爆轰反应区状态及非理想爆轰的传播问题，在描述短脉冲冲击波引发爆轰时的演变波形上也是定性的，是不正确的。另外，对模型中常数的确定还与假设的状态方程有关，它们不具有任何物理意义。

7. 点火增长模型^[14]

Lee 和 Tarver 在 1980 年提出了非均质炸药在冲击波作用下化学分解的点火增长模型。此模型将冲击波波后的化学分解过程分成两个阶段：少量炸药在冲击波作用下加热点火阶段和从这些点火热源向外以表面燃烧形式发展的反应阶段。一般形式的宏观反应速率方程含有描述这两个阶段的两项。这两项的公式为

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^x \eta^\gamma + G(1-\lambda)^x \lambda^\gamma p^z \quad (1.12)$$