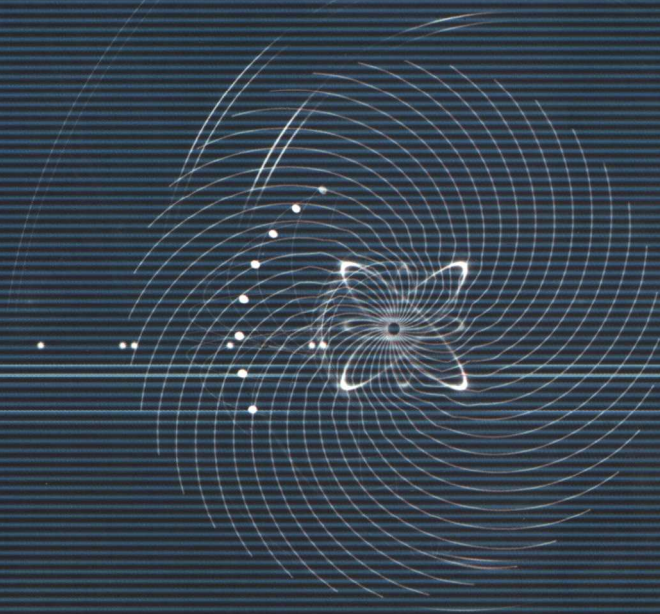


兵器科学与技术



有限空间内爆炸和点火的 理论与实验

王丽琼 冯长根 杜志明 编著



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委『十五』规划专著



国防科工委“十五”规划专著

有限空间内爆炸和 点火的理论与实验

王丽琼 冯长根 杜志明 编著

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

全书主要由二维热爆炸、热点火、冲击波点火和激光点火等内容组成,共分10章。

本书提出了一维、二维和三维热爆炸数学模型和求解典型形状二维热爆炸的稳定态和非稳定态问题的数值计算方法。介绍了几种炸药的热爆炸临界温度、热爆炸延滞期及温度历程。讨论了单反应系统和平行放热系统的临界性问题,并与实测值进行了对比。建立了有限空间电热丝点火的一维圆柱模型,计算给出了临界值和转变值。建立了一种评价中等感度或钝感点火药、烟火药和延期药冲击波点火感度的新方法,研究了松装黑火药和压装B/ KNO_3 的冲击波点火阈值和相应的点火延迟期。建立了激光二极管点火实验装置及测试系统,分析了含能材料的粒度、密度、组成配方、激光波长、强度和约束条件等因素对点火的影响。

图书在版编目(CIP)数据

有限空间内爆炸和点火的理论与实验/王丽琼,冯长根,杜志明编著. —北京:北京理工大学出版社,2005.4

国防科工委“十五”规划专著. 兵器科学与技术

ISBN 7-5640-0450-9

I. 有… II. ①王…②冯…③杜… III. ①爆炸-武器试验②点火-武器试验 IV. TJ01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 012174 号

有限空间内爆炸和点火的理论与实验

王丽琼 冯长根 杜志明 编著

责任编辑 董双洪 责任校对 陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081) 发行部电话:010-68944990

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

chiefedit@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:9.75 字数:243千字

2005年4月第1版 2005年4月第1次印刷 印数:2000册.

ISBN 7-5640-0450-9 定价:16.00元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委： 王文生	王泽山	卢伯英	乔少杰
刘建业	张华祝	张近乐	张金麟
杨志宏	杨海成	肖锦清	苏秀华
辛玖林	陈一坚	陈鹏飞	武博祎
侯深渊	凌 球	聂 武	谈和平
屠森林	崔玉祥	崔锐捷	焦清介
葛小春			



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。



国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们最具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、



机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

本书主要介绍近 10 年在二维热爆炸、热点火、冲击波点火和激光点火等方面的理论研究和实验研究成果。本书共分 10 章。

第 1 章介绍了热爆炸理论的研究简史和国内外的研究成果；简述了热点火与冲击波点火的研究历史和应用背景。

第 2 章通过引入维数的概念，提出了一维、二维和三维热爆炸数学模型。在此基础上建立了一套直接求解二维热爆炸的稳定态问题如临界温度表达式 $\theta(\rho_1, \rho_2)$ 、热爆炸判据 δ_{cr} 和在临界状态下反应物各点的量纲为 1 的温升 $\theta_{cr}(\rho_1, \rho_2)$ 的数值计算方法。研究得到的大部分关于临界条件下的数据是首次得到。

第 3 章使用差分方法建立了一种求解二维热爆炸的非稳定态问题(反应物的温度历程、热爆炸延滞期、反应物在热爆炸过程中不同时刻的温度分布、反应物消耗的影响等)的数值计算方法。

第 4 章以聚黑-9105 和聚奥-9159 两种塑料黏结炸药为对象,通过实验测定了其圆柱形试样在热空气浴中的热爆炸临界温度、在不同环境温度下的热爆炸延滞期、中心处的温度历程及热爆炸特性。

第 5 章主要讨论单反应系统高温环境点火的临界性问题,采用打靶法得到了 A 类形状并满足



Thomas 边界条件的临界性和转变性条件。在非限定型条件下对 HNX、HNX/RDX 和黑火药/单基发射药系统进行了临界点火实验。

第 6 章讨论各反应在化学上相互独立(平行)的、放热系统的热点火临界性问题。研究得到两个相互独立、平行的均温、非均温放热系统的临界参数及随 Biot 数的变化,计算和实测了双反应体系的临界点火温度。

第 7 章建立了有限空间电热丝点火的一维圆柱模型,计算得到临界值和转变值。通过设计的桥丝点火实验装置获得了黑火药和单基发射药的临界点火电流。

第 8 章模拟黑火药在点火管中的实际装药条件,采用冲击波加载方式,用 VISAR 系统测定了松装黑火药的冲击波点火特性,获得了黑火药的临界冲击波点火温度和相应的延迟期,为爆轰波点火的研究提供了有价值的参考依据。

第 9 章设计建立了一种评价中等感度或钝感点火药、烟火药和延期药冲击波点火感度的新方法。利用轻气炮加载手段和锰铜压阻计研究了钝感点火药压装 B/KNO_3 的冲击波激发特征,得到了不同弹丸速度条件下点火药样品表面的 $p-t$ 关系,给出了低压下样品冲击波速度与质点速度的直线关系表达式以及发生明显化学反应的临界冲击波压力和相应延迟期,其中大部分结果在国内是首次得到。

第 10 章建立了激光二极管点火实验装置及



测试系统。对 $Zr/KClO_4$ 、 $Ti/KClO_4$ 等含能材料进行了激光点火实验,分析了含能材料的粒度、密度、组成配方、激光波长、强度和约束条件等因素对点火的影响。

有限空间内爆炸与点火的理论与实践一书的出版得到了国防科学技术工业委员会重点专著基金的资助,在此表示衷心感谢。本书是在科研工作的基础上总结写成的,其内容反映了近10年来学科组在热爆炸理论和实验方面所做的工作,集中了包括作者本人在内的博士学位论文工作成果,部分内容取自杜霞、杜志明和项士标的博士学位论文,并进行了有机地整合形成了这部专著,在此表示感谢。作者借此机会对为完成作者博士学位论文工作提供研究条件的中国工程物理研究院一所、三所和曾给予过支持、指导和帮助的专家、同行一并表示深深地谢意。感谢评审专家对本书所提出的宝贵意见。

本书可作为相关学科专业研究生的参考书,也可供从事热点火、热爆炸和工业热安全工程的研究人员参考。

由于编著者学识和水平所限,书中有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

王丽琼

2005.2

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 热爆炸研究简史	1
1.2 热点火研究简史	9
1.3 冲击波点火研究历史与背景	10
第 2 章 二维热爆炸稳定理论	18
2.1 热爆炸理论研究中的维数概念	18
2.2 二维热爆炸的临界性和临界条件	22
2.3 二维热爆炸临界参数	40
2.4 小结	63
第 3 章 二维热爆炸非稳定理论	65
3.1 不考虑反应物消耗	65
3.2 反应物消耗的影响	90
3.3 小结	99
第 4 章 炸药的二维热爆炸实验研究	100
4.1 实验原理和测试方法	100
4.2 实验仪器和试样的制备	101
4.3 实验程序	103
4.4 实验结果及讨论	104
4.5 小结	110
第 5 章 高温环境点火	111
5.1 高温环境点火的基本模型	112
5.2 边界条件讨论	113
5.3 定态热点火方程的特征及临界性	115
5.4 求解热点火方程临界点和转变点的方法	119
5.5 临界点火温度的算法	129



5.6	圆柱形含能材料固体介质加热点火实验	136
5.7	单组分药剂的点火实验结果	139
5.8	非 A 类形状反应物的点火问题	145
5.9	小结	148
第 6 章	平行的多个反应放热系统的高温环境点火	149
6.1	多个平行放热反应系统热点火基本方程	150
6.2	双反应系统的热点火临界值和转变值	152
6.3	双反应系统的临界点火温度	159
6.4	小参数 ε 对指数近似下临界参数的修正	164
6.5	热点火理论的两个应用实例	173
6.6	小结	185
第 7 章	电热丝点火	188
7.1	电热丝点火模型	189
7.2	电热丝点火的临界值和转变值	190
7.3	临界点火功率 W_{cr} 的计算	201
7.4	电热丝点火实验装置和实验方法	202
7.5	实验结果与计算值的对比及讨论	204
7.6	小结	208
第 8 章	松装黑火药的冲击波点火	210
8.1	概述	210
8.2	点火药或烟火剂的冲击波点火机理	212
8.3	冲击波引燃过程的物理模型	214
8.4	黑火药(松装)冲击波激发实验	216
8.5	实验结果与讨论	224
8.6	小结	231
第 9 章	钝感点火药硼/硝酸钾的冲击波加载	232
9.1	概述	232
9.2	硼/硝酸钾点火药冲击波加载实验	233
9.3	硼/硝酸钾的冲击波加载特性与化学反应延迟期	238
9.4	B/ KNO_3 点火药的 Hugoniot 参数	245
9.5	冲击波激发判据	250



9.6 讨论	253
9.7 小结	256
第 10 章 激光点火	257
10.1 激光二极管点火系统	257
10.2 实验装置及原理	264
10.3 点火药的准备	267
10.4 实验结果	269
10.5 影响含能材料激光点火的因素分析	273
10.6 小结	281
参考文献	282

第 1 章 绪 论

1.1 热爆炸研究简史

化学反应过程涉及能量的变化。对于大多数放热化学反应,反应速率与温度的关系通常遵循 Arrhenius 定律。也就是说,即使是在常温下产生放热化学反应的系统,在一定的条件下也会导致热量的积累,使系统内温度升高,而温度升高又会进一步加剧化学反应的进行,使系统内的温度变得更高。这就是非线性化学动力学中所称的“热反馈”。若能量不损失,热反馈继续进行的结果将使系统出现失控,导致自动点火或发生化学热爆炸(简称热爆炸)。

从化学反应动力学角度看,热爆炸起因于非线性化学动力学,即放热反应系统中出现的热反馈。对于大多数放热反应,热产生速率与温度的关系是强非线性的(例如 Arrhenius 定律),而热损失速率通常是线性或接近线性的(例如 Newton 冷却定律),一旦系统产生的热量不能全部从系统散失于环境中或损失掉,系统就会出现热量积累,“连续”的热反馈会使系统出现失控,导致自动点火或发生化学爆炸。由于系统能量的突然释放起因于“热”,因此把这类现象称为热爆炸。

文献中一般认为,对热爆炸现象的早期的定性认识可追溯到 1884 年,当时 Van't Hoff^[1] 指出了点火与系统的热失衡有关。热爆炸近代理论的初始形态见于法国, Taffanel 和 Le Floch^[2] 在 1913 年就给出了清晰的、现在被称为热图的曲线。这些早期结果被前苏联著名科学家 Semenov^[3] 在 1928 年重新独立地发现了。Semenov 的重大贡献在于他把数学引入了研究之中。尽管从今天的水平看,他应用的数学方法并不复杂,但他第一次建立了热爆炸的临界条件,在数学上给出了定量关系式。他被普遍确认为热爆



炸近代理论之父。由于 Semenov 的贡献,也由于化学动力学的迅速发展,在 20 世纪 30 年代,热爆炸现象引起了研究者的极大兴趣,这方面的工作进展很快。最著名的有 Todes、Rice 和 Frank - Kamenetskii 等人的工作。其中,前苏联的 Frank - Kamenetskii^[4] (1939)建立的温度具有空间分布的热爆炸理论产生了深远的影响,直到今天仍为各国科学家所重视。后来,英国 Thomas^[5] (1958)提出了新的边界条件,建立了包含 Semenov 和 Frank - Kamenetskii 理论在内的更为普遍的理论。热爆炸理论的贡献和应用越来越广泛,开始进入综述的年代。20 世纪六七十年代,相继出现了关于热爆炸研究的高质量综述文章,较著名的有英国科学家 Gray 和 Lee^[6] (1967)以及前苏联科学家 Dubovitskii 和 Merzhanov^[7] (1966)的文章。

在理论研究的同时,针对含能材料和其他热不稳定性的化学系统也开展了大量的实验研究工作。Rogers^[8~10]对炸药的热分解以及热爆炸进行了非常有成效的研究,测得了常用炸药的部分热物理、热化学和化学动力学参数。在对自热过程、化学系统的不稳定性以及灾害性控制等方面的实验研究中,Thomas 和 Bowes^[11,12]、Gray P 和 Harper^[13] (1959)、Merzhanov^[14] (1967)等都做了很重要的工作,这些工作验证和推动了热爆炸理论的研究和发展,也为理论与实践相结合开辟了道路。

从热爆炸理论诞生以来,也已出版了一些与热爆炸研究有关的重要书籍^[15,16]。热爆炸理论研究的内容得到不断的充实和完善,成为一门独立的、系统的学科^[17,18]。

20 世纪 60 年代,在中国出版过一些反映热爆炸最经典结果的化学动力学著作^[19~22]。当时,在浙江大学也开展了热爆炸研究,并有综述性文章发表^[23]。这以后,国内有许多单位开展了热爆炸的实验和理论研究。中国工程物理研究院的章冠人、陈大年研究了热点起爆的机理^[24,25],楚士晋^[26] (1994)针对含能材料的热分解和热爆炸进行了长期的实验研究,原兵器工业部 204 所的胡荣祖^[27~29]对炸药及相关物的热分解过渡到热爆炸等重要问题进



行过探讨,北京理工大学的 Ding Jing, Xiu Gengguang and Du Xia^[30] (1987), Lao Yunliang, Li Zhen yu 和 Gao Xiang^[31] (1991), 陈福梅^[32] (1990) 等都对炸药或起爆药的热爆炸问题进行过研究。此外,华北工学院的张景林^[33] (1991) 也曾做过有关高能炸药的热爆炸实验。北京理工大学的冯长根教授^[34] (1983) 在英国利兹大学物理化学系研究扩展的热爆炸理论, 获得了博士学位。1988 年, 科学出版社出版了他的专著《热爆炸理论》^[17]。该书系统总结了国内外热爆炸的研究成果。由于放热反应物质(如可燃气体、爆炸性或可燃性液体与固体)几乎出现于各行各业, 因此, 热爆炸理论在石油、化工、煤炭、冶金、国防、消防等领域得到了广泛的应用。

热爆炸理论按其内容可以分为稳定态理论和非稳定态理论。热爆炸稳定态理论研究不考虑反应物消耗时放热与散热的临界平衡问题, 从数学的角度讨论临界条件的定义、临界点的确定、各种情况下系统的爆炸判据和临界温度。热爆炸非稳定态理论则考虑热爆炸问题中与时间有关的问题, 这些问题包括反应物消耗的影响、反应物的温度历程等。从研究的对象来看, 热爆炸理论所研究的放热反应系统可分为两类, 一类是内部温度不随空间位置变化的系统——均温系统, 另一类是温度具有空间分布的系统——非均温系统。后者研究的重点是无限大平板、无限长圆柱和球(这三类形状在热爆炸理论中称为 A 类形状), 关于这方面的理论研究成果在新出版的《热爆炸理论》和《Thermal Theory of Explosion and Ignition》等专著^[35]中已作了全面的介绍。

在实践中遇到的放热反应系统有可能是非 A 类形状的, 如有限长圆柱、立方体、圆锥、圆台、椭球体等。但关于非 A 类形状放热反应系统的热爆炸理论研究得还不够, 所做的工作也较少。1940 年, Harris^[36] 提出了用加权平均的方法估算“球帽圆柱”中心处的热爆炸判据。1955 年, Frank - Kamenetskii 假设在准稳定态时圆柱中心处的温度变化速率与球心的温度变化速率相等, 从而导出了等高圆柱的热爆炸判据。Wake 和 Walker^[38] 在 1961 年提



出了“当量球”模型,并使用稳定方法和非稳定方法得到了等高圆柱、八面棱柱和正方体的热爆炸判据。Gray 和 Lee^[6]也使用了当量球的方法。他们建议采用两种办法来确定当量球的半径,一是物理分析方法,二是 Frank - Kamenetskii 使用过的方法。1970 年, Bowes^[39]将 Thomas 提出的、用于估算满足 Thomas 边界条件的 A 类形状放热反应系统的热爆炸判据的准稳态方法扩展到了无限长方形杆和正方体。上述几种方法在数学处理中都采用了一种近似,即认为热产生速率不随温度的变化而变化,在文献[37]中还都假设了系统满足 Frank - Kamenetskii 边界条件。Boddington 等人^[40]在 1971 年则提出了一种指数近似时求解满足 Frank - Kamenetskii 边界条件的、中心对称的、任意形状的放热反应系统热爆炸判据的一般近似方法,并将这一方法推广到满足 Thomas 边界条件的系统中。同一时期,他们还提出了一种上下限估算法^[41],得到了采取指数近似时等高圆柱、无限长方形杆和正方体满足 Frank - Kamenetskii 边界条件的热爆炸判据的上限和下限。Hardee 等人^[42,43]使用一种温度分布近似方法估算满足 Frank - Kamenetskii 边界条件的正方体、圆柱和圆锥体的热爆炸判据。Zaturka^[44]提出一种阶梯函数反应速率近似法,并由此得到了采取指数近似时,满足 Frank - Kamenetskii 边界条件或 Thomas 边界条件的无限长方形杆、圆柱和长方体的热爆炸判据。Tam^[45]利用非线性抛物线方程导出的超越函数,得到了圆柱和长方体在满足 Thomas 边界条件或非均温边界条件下的热爆炸判据和转变值。Zaturka 和 Banks^[46]使用类似于 Boddington 等人用过的方法,得到了采用指数近似时无限长方形杆和无限长半圆柱在部分表面处于绝热状态,而其余表面保持一定温度时的热爆炸判据上下限以及无限长方形杆、无限长圆柱、椭球体和无限长三棱柱在满足 Frank - Kamenetskii 边界条件时的热爆炸判据上、下限。秦承森等^[47,48]将变分原理用于热爆炸临界参数的计算,估算出了采用指数近似时,满足 Frank - Kamenetskii 边界条件的无限长方形杆、等高圆柱和长方体的热爆炸判据及其在临界状态下中心处的