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

需要全本请访问 www.ertongbook

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

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

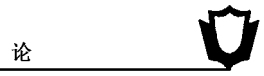
炸近代理论之父。由于 Semenov 的贡献，也由于化学动力学的迅速发展，在 20 世纪 30 年代，热爆炸现象引起了研究者的极大兴趣，这方面的工作进展很快。最著名的有 Todes、Rice 和 Frank－Kamenetskii 等人的工作。其中，前苏联的 Frank－Kamenetskii[4] (1939)建立的温度具有空间分布的热爆炸理论产生了深远的影响，直到今天仍为各国科学家所重视。后来，英国 Thomas[5] (1958)提出了新的边界条件，建立了包含 Semenov 和 Frank－Kamenetakii 理论在内的更为普遍的理论。热爆炸理论的贡献和应用越来越广泛，开始进入综述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

需要全本请访问 www.ertongbook

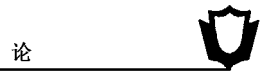


行过探讨，北京理工大学的 Ding Jing，Xiu Gengguang and Du Xia[30]（1987），Lao Yunliang，Li Zhen yu 和 Gao Xiang[31]（1991），陈福梅[32]（1990）等都对炸药或起爆药的热爆炸问题进行过研究。此外，华北工学院的张景林[33]（1991）也曾做过有关高能炸药的热爆炸实验。北京理工大学的冯长根教授[34]（1983）在英国利兹大学物理化学系研究扩展的热爆炸理论，获得了博士学位。1988 年，科学出版社出版了他的专著《热爆炸理论》[17]。该书系统总结了国内外热爆炸的研究成果。由于放热反应物质（如可燃气体、爆炸性或可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



量纲为 1 的温升。那么由上述各种不同方法得到的热爆炸临界参数的精度有多高呢？这还需要与用数值解法得到的结果加以比较来评判。Parks[49] 最早使用数值解法得到满足 Frank - Kamenetskii 边界条件的等高圆柱和正方体的热爆炸判据，但由于他使用的方法是一种间接的逼近方法，所以计算工作量相当大，且精度较差。20 世纪 70 年代初，Anderson 和 Zienkiewicz[50] 使用有限元方法得到了采用指数近似时，满足 Frank - Kamenetskii 边界条件的有限长圆柱、无限长方形杆、无限长等边三棱柱、圆锥（母线等于底圆直径）、无限长半圆柱、无限长椭圆柱（长轴与短轴长度之比为 2）、椭球体（长轴与短轴长度之比为 2）和圆环台等满足 Thomas 边界条件的、等高圆柱的热爆炸判据，该数值解法是一种直接的逼近方法，计算工作量比 Parks 使用的方法要小，但算起来还是比较费时。之后，一些从事计算数学的学者在研究非线性方程组的极值解问题时提出了一种可直接求得极值解的数值方法，并将这种方法用于热爆炸理论的研究，得到了采用指数近似时，满足 Frank - Kamenetskii 边界条件的无限长方形杆的爆炸判据[51~54] 以及其在部分表面处于绝热状态而其余表面保持一定温度时的稳定解和热爆炸判据[55] 与满足 Frank - Kamenetskii 边界条件的有限长圆柱的热爆炸判据和转变值[56]。

以上概述的前人在非 A 类形状放热反应系统热爆炸理论方面所做的工作均属于热爆炸稳定态理论的研究范畴，而涉及热爆炸非稳定态理论研究内容（热爆炸延滞期、反应物的温度历程和反应物消耗的影响等）的文献极少[50]。而且主要注意力在一维反应物的热爆炸理论研究，对于二三维反应物的热爆炸理论研究较少。

在研究热爆炸理论的同时，人们对热爆炸实验也展开了大量的研究工作，包括热爆炸临界温度、热爆炸延滞期和反应物的温度历程的实验测定等。热爆炸实验研究的目的有两个，一是对热爆炸理论进行实验验证；另一个是为了实际的需要（如用于放热反应物质的热自燃危险性评价、含能材料的耐热性能评价等）。热爆炸实验研究的放热反应物质有气相物质和凝聚相物质，凝聚相物质

研究的重点是含能材料。下面就文献中报道的含能材料热爆炸实验研究作一个回顾。

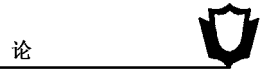
含能材料的热爆炸实验研究可追溯到19世纪，当时只是一种定性的研究。定量的、系统的研究始于20世纪50年代末、60年代初。

从试样的形状可归纳为：

① 平板类。Zinn和Rogers[57]测定了TNT、HMX、AN、RDX、TETRYL、PETN等在不同环境温度下的热爆炸延滞期。Rogers[10]测定了HMX、RDX、TNT、PETN、TATB、DATB、BTF、NQ、PATO和HNS的热爆炸临界温度。楚士晋[58]测定了RDX、2#A、2#B、TATB和PETN的热爆炸临界温度及其在不同环境下的热爆炸延滞期。他们所使用的测试方法基本相同，都是将少量的试样压入一定金属管壳内呈薄片状，然后将试样管置于一定温度的金属液内，测定到发生热爆炸的时间。Jaeger[59]测定了PBX9501和TNT平板一端裸露在空气中而另一端与加热板紧密接触时不同深度的温度历程。

② 圆柱类。Zinn和Mader[60]测定了RDX、TNT、75/25Cyclotol、50/50Pentolite的热爆炸延滞期。Schimts和Faubion[61]测定了LX-10、PBX9501等塑料黏结炸药的热爆炸延滞期。这两组实验方法相似，都是将密封在金属壳内的试样放入加热到一定温度的空气浴中，测定到发生热爆炸的时间。

③ 球类。Catalno等人[62]、Tarver等人[63]和Campbell等人[64]测定了TNT、TATB、LX-10等高能炸药的热爆炸临界温度和热爆炸延滞期，其方法是将试样密封在两个具有半球空腔的圆柱形铝块中间(加热到一定温度)，测定到发生热爆炸的时间。Castille等人[65]使用类似的方法测定了TATB和HMX/TATB混合物的热爆炸临界温度和热爆炸延滞期。Jaeger[66]测定了裸露PBX9501和PBX9502在一定温度的热空气流介质中，其中心、边界及二分之一半径处的温度历程。



④ 有限长圆柱。Anderson 和 Parkulak[67] 测定了由铝箔包着的 PBXC－116 和 PBXC－117 在一定温度的热空气浴中到发生热爆炸的时间及其中心处的温度历程。Schmits 和 Faubion[68] 测定了密封在铝管内的塑料黏结炸药(LX－10、PBX9501、X－0298、RX－26－AF 等)在一定温度的热空气介质中的热爆炸延滞期。Kent 和 Rat[69] 测定了 C1～C9 和 DB1～DB3 推进剂在裸露状态下,从置于一定温度的热空气流加热介质中到发生热爆炸的时间及试样中心处的温度历程。Hutchinson 测定了密封在铝合金壳体内的 Tetry1、HNS/Kel－F、PBX9503 和 BX Compounds 等炸药的热爆炸临界温度、热爆炸延滞期及试样中心和边界处的温度历程,其方法是将试样置于加热至一定温度的、连续充氮搅拌的石蜡油或硅油中进行测试。杜霞和徐更光测定了裸露 HMX 和 HMX 与各种添加剂混合物从置于一定温度的热空气流加热介质中到发生热爆炸的时间和 HMX 药柱中心处的温度历程。胡荣祖、松全才等[27] 测定了三硝基甲烷从装入一定温度、一端敞口的圆柱形反应器中到发生热爆炸的时间。Castille 等人[65] 测定了以 0.5 ℃/s 的速度连续加热加热板时,一端与加热板紧密接触而其他面为临空的圆柱形炸药 X1 药柱不同深度处的温度历程。杜志明[70] 还测定了尺寸为 15 mm×15 mm、由铝箔包着的 RDX 的热爆炸延滞期。

表 1.1 总结了上述工作,表 1.2 给出了相关炸药名称的中英文对照。

表 1.1 含能材料的热爆炸实验研究情况表

作 者	年份	延滞期	临界温度	温度历程
Zinn and Rogers[57]	1962	√		
Rogers[10]	1975	√		
楚士晋[58]	1985	√	√	
Jaeger[59]	1978			√

续表

作　　者	年份	延滞期	临界温度	温度历程
Zinn and Mader[60]	1960	√		
Schmits and Faubion[61]	1980	√		
杜志明[70]	1993	√	√	
Catalno and McGuire[62]	1976	√	√	
Tarver and McGuire[63]	1987	√	√	
Campbell and Flaugh[64]	1981	√	√	
Castille[65]	1989	√	√	√
Jaeger[66]	1980			√
Anderson and Parkulak[67]	1976			√
Schmits and Faubion[68]	1982	√		√
Kent and Rat[69]	1982	√		√
胡荣祖　松全才[27]	1987	√		

表 1.2　炸药名称一览表

英文缩写	中文名称
AN	**硝酸铵**
BTF	**苯基三呋咱氮氧化合物**
DATB	**二氨基三硝基苯**
HMX	**环四甲撑四硝胺(奥克托今)**
HNS	**六硝基均二苯基乙烯(六硝基芪)**
NQ	**硝基胍**
NTO	3-**硝基**-1,2,4-**三唑**-5-**酮**
PATO	3-**苦氨基**-1,2,4-**三唑**
PETN	**季戊四醇四硝基酯(泰安)**
RDX	**环三甲撑三硝胺(黑索今)**
TATB	**三氨基三硝基苯**
Tetryl	2,4,6-**三硝基甲基硝胺(特屈尔)**
TNT	**三硝基甲苯(梯恩梯)**
2# **炸药**	**重(β,β,β-三硝基乙基-N-硝基)乙二胺**
Cyclotol	**黑索今与梯恩梯组成的混合炸药(赛克洛托)**
LX-10	**含** HMX **的塑性黏结炸药**
PBX9502	**含** RDX、DNPAP **塑料黏结炸药**
Pentolite	**泰安与梯恩梯组成的混合炸药(彭托利特)**
RX-26-AF	**含** TATB **耐高温塑料黏结炸药**
X-0298	**含** TATB95 **的混合炸药**

需要全本请访问 www.ertongbook



1.2 热点火研究简史

发生化学热爆炸的本质是化学反应进行过程中“自发”出现的热积累和热反馈。这是一个系统内部的过程。倘若从环境中增加了促进这一过程的条件,那么,化学热爆炸就会加快出现。这类问题称为热点火。

要求具有潜在化学反应能力的系统在短时间内能迅速激起激烈的化学反应,而后又快速达到燃烧或爆炸状态是工程实践中的重要课题。为了达到这个目的,需要在系统自身热量积累的基础上,对系统提供附加的能量以激发或促成系统自身的快速反应。在工程中,这种情况被称为“点火”。由于起因是热,又称为热点火。激发能有各种各样的形式,热点火问题在实践中也是多种多样的,例如由光能、电能、冲击能、高温表面或热气流等提供的热能均可引起点火。热点火问题是燃烧、爆炸安全等领域的重要课题,也是兵器、航空、宇航以及国民经济许多部门中最重要的工程问题之一。

热爆炸与热点火的基本区别在于,热爆炸是指一个具有内热源的物质,处于高温环境下,不存在外界能量对系统的刺激,而是在散热不好的情况,从热分解、升温到热量积累,最终导致点火或爆炸的现象。而热点火则是在外界局部能量的刺激下,形成热点并发生分解反应而不断扩大范围,最终导致点火或爆炸的现象。这两种过程在本质上有许多共同之处。但在细节上,则各有特色。

从本质上说,热爆炸与热点火都与系统内热量的释放与耗散的相互竞争密切相关。由于热反馈机理在其中扮演了最重要的角色,热爆炸与热点火之前都经过热积累这一过程和相应的延滞时间。它们的作用机理是非线性的。因此,热点火和热爆炸两者的研究常常相关联,甚至有时候,两者之间都没有严格的界限。例如热爆炸的一个主要特征是化学热爆炸常常发生在系统内散热最不

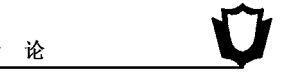
利的地方,即系统的中心。而点火的特征则是点火发生在初始能量激发的边界点(层)附近。但随着点火初始激发能的降低,点火点会从表面向中心推移。所以,对于临界点火问题,点火点也可能出现在系统的中心。

热点火理论是在热爆炸研究不断深入的基础上发展起来的。第一位探讨热点火问题的研究者是前苏联科学家 Zeldovich[71],他把热爆炸稳定态理论扩展到壁面具有不同温度的平板容器中,并在这种系统中确定了热点火临界条件。类似的方法不仅在点火理论中而且在热爆炸理论中也得到了进一步发展。Seager[72] 第一次计算了点火时的非稳定温度场,他利用电子计算机对半无限大空间热点火方程进行了数值积分,结果得到了点火物质中不同时刻的温度分布。后来,Cook[73] 和 Hicks[74] 进行了进一步计算,他们的计算涉及各种不同参数对点火延滞期的影响。这些文献提出的非稳定热点火模型为热点火问题更进一步的研究提供了基础。以后,又有许多关于热点火研究的文章发表[75~78]。这些文章发展了热点火理论,或用实验实现了其中一部分理论结果。冯长根等人曾对强光点火问题进行过深入的研究[79~80],确定了平板强光点火(起爆)的临界条件和转变条件。1991 年,由吉林科学技术出版社出版了《热点火理论》[18]。

1.3 冲击波点火研究历史与背景

一、冲击波点火研究历史

冲击波感度这一概念过去一直是针对高能炸药而言的。冲击波起爆感度通常是指炸药在外界冲击波作用下发生爆炸的难易程度。有关猛炸药冲击波激发感度和机理的研究文章相当多,相应地评价冲击波感度的实验技术也有许多[25],例如最小起爆药试验、“猎枪试验”、殉爆试验、高速射流引起的起爆试验、持续脉冲起



爆楔试验、平面波撞击试验(落锤、抛射体碰撞试验和隔板试验)、激光和电子束以及爆炸箔和轻气炮技术等等。

上述各种方法以不同的形式产生冲击波,而且用不同的参数来定性或定量地评价炸药的冲击波感度。

从 20 世纪 70 年代起,人们便开始对烟火剂、点火药的冲击波激发产生了兴趣。

关于烟火剂、点火药等混合物的冲击波点火特性研究,最早是由美国 Lockheadpalo Alto Research Laboratories 的 Alexander 和 Martinson 在 1974 年提出的。他们利用大电容通过电线放电(12 000 J),使铝箔蒸发驱动厚度为 0.36 mm 的 Mylar 膜或有机玻璃,使其以很高的速度撞击待测样品,样品表面覆盖一层膜,以免烟火剂直接暴露于高温等离子体。通过超高速扫描摄像机记录"飞片"的发光表面情况,从而确定碰撞速度。实验给出了所研究的烟火剂混合物冲击波点火的速度阈值,估算了临界激发条件下样品所储存的内能,并与热自燃能量进行了对比。同时根据混合物理论和已知金属的 Hugoniot 参数,计算和外推出烟火药的 Hugoniot 关系。结果认为,烟火剂的冲击波激发属于热激发机理,其激发所需的冲击波能量和使药剂温度升至点火温度所需要的焓变相等。

Lee 和 Schwar[81] 于 1980 年就密度为 2 000～2 250 kg/m^3 的氢化钛($TiH_{0.65}$)与高氯酸钾($KClO_4$)混合物(33/67)的冲击波响应进行了研究,他们根据撞击界面阻抗的匹配条件,由石英传感器测得的压力大小推断出撞击面的压力。实验中发现,在 1 μs 时间内没有观察到反应的迹象。

为了更好地了解烟火剂的冲击波响应和过程,美国圣地亚国家实验室 Sheffield 和 Schwarz[82] 于 1982 年用不同的加载方式又对 $TiH_{0.65}/KClO_4$ 进行了实验研究。他们测得了质点速度与时间的关系。测试结果表明,当承受 4.7 GPa 冲击波压力时,样品大约经过 2 μs 的延迟时间后便发生反应,且燃烧是在压缩介质中以

0.4～0.7 km/s 的速度传播的。他们得出的结论认为，长脉冲与短脉冲的激发过程有明显的区别；烟火剂的冲击波激发在某些方面类似于猛炸药的冲击波激发，但较猛炸药反应速度慢；多孔烟火剂在冲击波作用下，经历冲击、破碎和颗粒间运动等几个过程后在局部形成热点，而发生反应并扩散至整个反应物。

法国 Lombard 等人[83]于同年用隔板法研究了若干种烟火剂的冲击波点火原理以及药剂成分、比例、装填密度、隔板厚度以及激发方式对冲击波点火感度的影响。

Sychev[84]1985 年着重研究了液体气泡化学反应性系统（包括非反应性液体-反应性气泡系统，液体燃料-气泡-氧化剂系统，反应性液体-非反应性气泡系统和反应性液体-反应性气泡系统）的冲击波点火现象。冲击波是利用混合气体燃烧产生的高压气体冲破隔膜而形成的，冲击波的强度通过调节混合气体的初始压力来实现。他们指出，气体系统的冲击波点火主要是由于冲击波的作用气泡出现坍塌并成为更小的二次气泡而被点火的。

1986 年，美国 Hornig 等人[85]介绍了固体氧化剂和可燃剂混合物在冲击波作用下被点燃的压力和诱发时间。

20 世纪 90 年代初，美国圣地亚实验室 Weirich[86,87]对复合推进剂和 NC 基火炮发射药进行了冲击波加载实验。由 VISAR 测试系统获得的 $u_p - t$ 曲线特征来判断推进剂的反应情况，结果说明，两种推进剂的冲击波点火感度相近，反应压力阈值为 2.07～2.61 GPa（延迟期为 3.5 μs）。

此外，日本的 Kenji Aoki 等人[88]介绍了包括黑火药、B/KNO_3 在内的几十种中等感度烟火药的冲击波点火感度的研究结果（隔板升降法），对比结果可知，B/KNO_3 冲击波点火感度较黑火药冲击波点火感度低，并指出采用落锤法评价中等感度烟火药点火感度的可靠性相当低，落锤法不能分辨出不同烟火剂间的感度区别，而冲击波点火试验是评价这类含能材料的更为有效的办法。

国内有关冲击波点火方面的研究开始于20世纪90年代。陈志明、沈季宁[89]用隔板法研究了延期药冲击波引燃的规律并提出冲击波用来激发延期药不仅可以提高点火的瞬时性和可靠性而且还是提高延期药秒量精度的一种科学的技术途径。研究发现,当冲击波很强时,延期药经过一定时间的延迟,冲击波所到之处的延期药均以冲击波的速度燃烧;在用中等强度冲击波激发时,点火端面一段产生爆燃,之后便以反应波阵面的速度传播;当冲击波很弱但足以点燃延期药时,延期药则以燃烧波的速度传递燃烧。Zhang Jinglin等人[33]又介绍了黑火药50%发火和临界发火的隔板厚度。

就目前的研究状况和文献的报道来看,由于烟火剂、点火药和延期药的冲击波点火是一个相当复杂的过程,所以,用实验的办法直接观察还是相当困难的,只能借助于间接的测量和分析来解释其点火过程。冲击波点火的研究尚停留在探索和定性的研究水平和研究阶段上,当前,建立一种定量评价点火药和烟火药冲击点火行为的实验方法,加强冲击波点火机理方面的研究工作十分重要。同时利用已建立的相应的数值模拟程序进行理论预测,还可大大降低昂贵的实验费用。

二、冲击波点火的应用背景

微电子与计算机技术、光电子技术、精确制导技术、新材料技术和自动化制造技术等高新技术的发展,给现代常规兵器带来革命性的变化,对武器的要求也越来越高。发展高技术兵器的关键之一是发展高技术的火工品以及点火、起爆技术。火工品是一切爆炸燃烧装置的起始能源,是常规兵器弹药的重要组成部分,是引信爆炸序列的起点。火工品可靠性是武器正常作用的保证,而火工品的安全性又是武器安全性的关键所在。只有利用现代高新技术设计和制造火工品,发展高水平的点火、起爆技术才能满足高技术兵器的要求,推动现代兵器的发展。现代高技术兵器要求火工

品、点火系统要向着微型化、多功能、高可靠性和高安全性的方向发展。

实现这一目标的关键是改变以烟火剂、点火药和延期药等敏感药剂作为核心药剂的传统火工品和点火系统的现状，实现火工品及点火系统药剂的钝感化。钝感化可有两条途径，一是研制新型配方以满足不同感度的需求。火工品经历近一个世纪的发展，药剂的基本成分变化不大，要设计研制出一种新型的单质火工药剂具有一定的难度，同时需要较长的研究周期；二是对已有药剂进行改性，从而达到钝化的目的。

药剂的钝感化给点火系统的点火技术带来新的要求，迫切需要研究和开发与此相适应的高能量点火新技术，以实现可靠的点火和起爆。近年来，已经出现了一批新型起爆技术[90]。

冲击波点火可通过诸如激光、爆炸桥丝、爆轰波和爆炸箔等形式来完成。它们有以下共同点：

①其本身需要外部提供很高的能量或脉冲方可正常工作，如爆炸网络必须在爆轰波或者冲击波作用下起爆，因此具有相当高的固有安全性；

②输出能量高，可显著提高火工品、点火系统激发的瞬发度和延期精度，保证点火的可靠性；

③具有比较窄的发火与不发火转变区域，点火阈值重现性好；

④传爆序列结构可得到简化，减少影响安全性和可靠性的因素。

由于这些特点，使这些技术已经、正在或者将要广泛地应用于现代兵器的火工品、点火系统中。

传统的爆炸序列中都含有敏感元件，因此在勤务处理及发射引起的冲击震动和电磁环境下，不能排除偶然发火的可能性。为确保传爆序列的安全性，对传爆序列的结构和药剂有了新的要求即取消敏感元件，采用钝感药剂，爆炸序列无需隔爆机构，这种序列被称为“直列式爆炸序列”。直列式爆炸序列要求点火系统的输出能量高，因此，冲击波点火技术是直列式爆炸序列点火的几种形

需要全本请访问 www.ertongbook