



装备科技译著出版基金

含能材料译丛

Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion (3rd Edition)

火炸药燃烧热化学

(第3版)

[日] 久保田浪之介 著

徐司雨 姚二岗 裴庆 赵凤起 译

WILEY



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

含能材料译丛

火炸药燃烧热化学

(第3版)

Propellants and Explosives: Thermochemical
Aspects of Combustion (3rd Edition)

[日]久保田浪之介 著

徐司雨 姚二岗 裴庆 赵凤起 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2018-044 号

图书在版编目(CIP)数据

火炸药燃烧热化学:第3版/(日)久保田浪之介著;徐司雨等译.
—北京:国防工业出版社,2019.9

书名原文:Propellants and Explosives

Thermochemical Aspects of Combustion(Third,
Revised and Updated Edition)

ISBN 978-7-118-11872-8

I. ①火… II. ①久… ②徐… III. ①火药-燃烧化学-
热化学 ②炸药-燃烧化学-热化学 IV. ①TQ56 ②O643.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第116126号

Translation from the English Language edition:

Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion

By Naminosuke Kubota

Copyright©2015 John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with National Defense Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

本书简体中文版有 John Wiley & Sons, Ltd. 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

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100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 31¼ 字数 578 千字

2019年9月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价168.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

本书是《火炸药燃烧热化学》的最新版,即第3版,由日本国际著名固体推进剂专家久保田浪之介(Naminosuke Kubota)教授编著。作者20世纪70年代初在美国普林斯顿大学攻读博士学位,师从美国著名的火箭推进与推进剂燃烧专家Martin Summerfield教授,主要研究含催化剂的双基推进剂的超速燃烧机理。回日本后在日本防卫厅本部第三研究所历任高级科学家和所长等职务,在火炸药燃烧领域颇有造诣,为日本首席固体推进剂专家,并跻身于固体推进剂研究的世界知名学者之列。作者于2003年首次来燃烧与爆炸技术重点实验室讲学,并赠送当时该书的第1版原版。鉴于该书具有很高的理论和实用价值,当时即在重点实验室内部组织人员对该书进行翻译校对,并由重点实验室内部出版。自该书的第1版出版以来,经过作者不断修订、丰富和完善,相继于2007年和2015年出版了该书的第2版和第3版,该书是火炸药燃烧热化学领域中难得的全面性论著之一。

本书全面系统地总结了火炸药燃烧热化学方面的理论和试验研究的成果与经验,内容涉及燃烧热化学理论基础,推进剂、发射药、炸药和烟火药的燃烧以及火箭发动机中推进剂的燃烧,是一本理论性和实用价值都很高的著作。全书共15章:第1章介绍了爆发动力学基础;第2章介绍了燃烧热化学基础;第3章介绍了火炸药燃烧过程中燃烧波的传播;第4章介绍了火炸药的燃烧性能;第5章介绍了聚合物和晶体氧化剂等的燃烧;第6章介绍了双基推进剂的燃烧;第7章介绍了复合固体推进剂的燃烧;第8章介绍了改性双基推进剂的燃烧;第9章介绍了炸药的燃烧;第10章和第11章介绍了含能烟火剂的组成和燃烧特性;第12章介绍了燃烧产物的散发特性;第13章介绍了火药与烟火药的瞬态燃烧特性;第14和第15章分别介绍了火箭发动机的推力控制以及冲压发动机的推进剂原理及固体火箭冲压发动机中推进剂的燃烧性能等。译者相信,本书的翻译出版将对我国从事火炸药研究、设计、生产和使用的专家、工程技术人员起到借鉴与促进作用。同时本书也可作为在读硕士、博士研究生的一本极有价值的参考书。

第1章至第3章由赵凤起翻译,第4章由张明翻译,第5章至第9章由徐司

雨翻译,第10章至第13章由姚二岗翻译,第14章、第15章和附录由裴庆翻译。全书由徐司雨统稿,赵凤起审校。

值此书译本出版之际,衷心感谢国防工业出版社“装备科技译著出版基金”和西安近代化学研究所燃烧与爆炸技术重点实验室的大力支持。同时,我们也感谢国防工业出版社肖志力编辑对本书译稿的出版所付出的辛勤劳动。另外,还要感谢李上文研究员、宋秀铎研究员、高红旭研究员、郝海霞副研究员、王晗副研究员、仪建华研究员、姜菡雨工程师等同志在译稿整理和审校中给予的支持和帮助。

鉴于译者水平有限,译文中难免有不妥甚至错误之处,敬请读者批评指正。

译者

2019年2月于西安

第 3 版前言

与第 1 版和第 2 版类似,第 3 版主要还是介绍火炸药燃烧过程中最基本的一些内容。虽然这一版与第 2 版的章节设置基本相同,但该版在相应章节增加了一些与燃烧现象有关的更为有指导意义的说明和相应的实验数据,而且这一版还增加了一些火炸药实际应用中涉及的燃烧数据,而这些数据的获得则需要一些火炸药有关的更为先进的科技知识。

本书在第 4 章中,对常见含能材料的化学制备过程进行了详细阐述。在第 6 章中,对硝基聚合物常见的平台燃烧现象进行了详尽的论述以方便构建更为真实的燃烧模型。同时,在第 6 章也对火箭发动机排气的烟焰特性进行了更为详尽的阐述。由晶态高氯酸铵(AP)颗粒和碳氢类高聚物组成的复合推进剂是目前应用最广泛的一类推进剂,这主要由于该类推进剂具有较高的能量,同时还具有很好的物理化学稳定性,但是 AP 类复合推进剂燃烧时会产生大量的氯化氢气体,而该气体由发动机喷管排出后会与空气中的水蒸气反应形成对环境有很大危害作用的盐酸,因此在第 12 章中重点介绍了一些燃气清洁的新型推进剂,即绿色推进剂。绿色推进剂主要由一些不含 AP 的新型含能材料组成,其物理化学性能目前也可满足实际应用的需要。

在第 14 章中介绍了一些脉冲式火箭发动机的设计概念。采用一级固体火箭发动机的导弹,在飞行总射程的后段是无动力飞行的,发动机关机时,导弹速度越高,射程越大。然而,导弹的阻力与飞行速度的平方成正比,在速度达到最大后阻力很大,无动力飞行时导弹必然很快减速,以致在弹道的末端难以再进行较大的机动。如果采用多级发动机分离的形式,无疑又增大了导弹武器的复杂程度,降低了可靠性。在固体发动机上实现多次点火,把原有的连续推力分配成多段,并控制各段推力的大小、持续时间和时间间隔,可显著改善固体发动机能量可控性差的缺点,极大地提高导弹武器的性能。采用多次点火技术的固体发动机即脉冲固体火箭发动机。脉冲固体火箭发动机通常由两个分离的燃烧室(助推燃烧室和续航燃烧室)和一个发动机喷管组成。助推燃烧室和续航燃烧室内推进剂的点火时间间隔通过精确控制以获得最优的飞行轨迹。

在此作者特别感谢曾经工作过的防卫厅第三研究中心的各位同事,以及

Asahi 化学公司、NOF 公司、Daicel 公司和 Nissan 发动机公司的各位工程技术研究人员,感谢他们在不同推进剂燃速数据方面所提供的巨大帮助。在我所从事的火箭冲压发动机项目研究中,许多有价值的空气动力学数据和燃烧数据均来自于 IHI 宇航公司,对此作者也深表感谢。作者还特别感谢在普林斯顿大学期间的导师 M. Summerfield 教授以及 L. H. Caveny 和 T. J. Ohlemiller 博士,感谢他们在平台双基推进剂燃烧机理研究方面所提供的特别有价值的讨论与建议。

久保田浪之介

2014 年 12 月于日本横滨

第 2 版前言

描述火炸药燃烧现象的基础即燃烧动力学,其主要关注的是可产生热和反应产物的热化学转变过程。火炸药燃烧产生的高温燃烧产物可形成推力、破坏力以及各种不同类型的机械力。与火炸药类似,烟火剂发生燃烧反应时主要产生高温的凝聚相和(或)气相燃烧产物。火药主要用于火箭发动机和枪炮武器中,并通过发生爆燃而产生推力,而烟火药主要用于与烟火有关的体系中,如冲压发动机、气体混合发动机以及点火器和照明弹中。第 2 版增加了烟火剂的热化学过程,以介绍其在火药和炸药中的潜在应用。

火药、炸药与烟火剂的燃烧特性主要取决于其不同的物理化学性能参数,如能量性能、氧/燃比、氧化剂的粒径和燃料组分的分解过程。虽然金属粉已作为火炸药中的高能燃烧组分以及烟火药中的重要组分使用,但其与氧化剂发生的氧化和燃烧过程仍然非常复杂,对该过程的机理研究也非常困难。

与第 1 版相同,第 2 版的第一部分主要介绍燃烧动力学基础,即主要介绍含能材料的燃烧基础。第二部分主要介绍含能材料的应用,即火药、炸药和烟火剂。同时还详细介绍和讨论了火箭发动机燃烧时可产生的瞬态燃烧、振荡燃烧、点火瞬间以及侵蚀燃烧现象。冲压发动机是一种新型的推进系统,其使用烟火剂后燃烧性能明显增强。

推进剂燃烧表面处通过边界层流动的传热、传质过程在火箭发动机的有效控制中起主要作用。在冲压发动机入口处形成激波是实现冲压发动机高推进性能的重要过程,因此在附录 B~D 中主要介绍了空气动力学和热传递方面的基础知识,以作为研究燃烧动力学的基础。

久保田浪之介
2006 年 9 月于日本东京

第 1 版前言

由含能材料组成的火药和炸药在燃烧时可产生高温高压。这一燃烧现象包括从固态到液态或气态的复杂的物理化学变化,并伴随有快速的放热反应。关于燃烧方面的书已出版过不少,例如在 1985 年由纽约 Benjamin/Cummings 出版的 F. A. Williams 著作《燃烧理论》第 2 版,就是一本优秀的理论性书籍;又如 1977 年纽约科学出版社出版的由 I. Glassman 所写的《燃烧》一书,是一本适合于研究生的参考书。但是迄今为止还没有一本关于固态含能材料燃烧方面的参考书出版。因此本书试图为从事火箭推进和炸药行业的读者提供一本在含能材料燃烧方面的介绍性教科书。

本书分为四个部分。第一部分(第 1~3 章)主要对化学能转化为燃气热能的基础知识作简单的回顾。附在每章后的参考文献可帮助读者更好地理解能量转化过程的物理基础,如热量生成、超声速流动、冲击波、爆轰和爆燃。第二部分(第 4 章)列举了一些用于火药和炸药中的化学物质的能量性能,如生成焓、爆热、绝热火焰温度和比冲。第三部分(第 5~8 章)主要介绍不同类型的化合物、火药和炸药的燃速测试结果。根据对燃烧机理的理解,也讨论了从气相到凝相的热反馈过程和燃烧波结构。列举在本章中的数据主要来源于作者以前所做的实验和分析结果。但本书并没有对固相到液相或气相的热分解机理作详细介绍。第四部分(第 9 章)主要描述火箭发动机工作过程中可能遇到的一些现象,如火箭发动机的稳定性准则、温度的敏感性、瞬态点火、烧蚀和振荡燃烧等。对变流量冲压火箭的基本原理也作了介绍。对用于冲压火箭的气体发生剂(即富燃料推进剂)的燃烧特性和能量进行了讨论。

目前,多种含能材料已应用于火炸药中,但我们不可能对每种含能材料的燃烧过程都给予全面介绍。本书仅介绍了典型晶态含能材料、聚合物以及各类推进剂的燃烧过程,以便为读者理解燃烧机理提供一种通用的方法。

久保田浪之介

2001 年 3 月于日本镰仓

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 爆发动力学基础 | 1 |
| 1.1 热和压强 | 1 |
| 1.1.1 热力学第一定律 | 1 |
| 1.1.2 比热容 | 2 |
| 1.1.3 熵变 | 4 |
| 1.2 流场中的热力学 | 5 |
| 1.2.1 一维稳态流动 | 5 |
| 1.2.2 冲击波的形成 | 6 |
| 1.2.3 超声速喷管流动 | 9 |
| 1.3 推力的产生 | 11 |
| 1.3.1 动量的变化与推力 | 11 |
| 1.3.2 火箭推进 | 12 |
| 1.3.3 枪炮推进 | 15 |
| 1.4 破坏力的形成 | 18 |
| 1.4.1 压强和冲击波 | 18 |
| 1.4.2 冲击波在固体中的传播与反射 | 18 |
| 参考文献 | 18 |
| 第 2 章 燃烧热化学 | 20 |
| 2.1 热能的产生 | 20 |
| 2.1.1 化学键能 | 20 |
| 2.1.2 生成焓和爆热 | 21 |
| 2.1.3 热平衡 | 22 |
| 2.2 绝热火焰温度 | 23 |
| 2.3 化学反应 | 26 |
| 2.3.1 热解离 | 26 |
| 2.3.2 反应速率 | 27 |
| 2.4 化学能的估算 | 28 |

| | | |
|------------|---------------------------|-----------|
| 2.4.1 | 反应物和产物的生成焓 | 28 |
| 2.4.2 | 氧平衡 | 31 |
| 2.4.3 | 热力学能 | 33 |
| | 参考文献 | 34 |
| 第3章 | 燃烧波传播 | 36 |
| 3.1 | 燃烧反应 | 36 |
| 3.1.1 | 点火和燃烧 | 36 |
| 3.1.2 | 预混和扩散火焰 | 36 |
| 3.1.3 | 层流和湍流火焰 | 37 |
| 3.2 | 预混气体的燃烧波 | 37 |
| 3.2.1 | 燃烧波的控制方程 | 37 |
| 3.2.2 | Rankine-Hugoniot 关系 | 38 |
| 3.2.3 | Chapman-Jouguet 点 | 40 |
| 3.3 | 燃烧波结构 | 43 |
| 3.3.1 | 爆轰波 | 43 |
| 3.3.2 | 爆燃波 | 45 |
| 3.4 | 点火反应 | 47 |
| 3.4.1 | 点火过程 | 47 |
| 3.4.2 | 点火的热理论 | 47 |
| 3.4.3 | 可燃极限 | 48 |
| 3.5 | 含能材料的燃烧波 | 49 |
| 3.5.1 | 燃速的热理论 | 49 |
| 3.5.2 | 火焰自持距离 | 56 |
| 3.5.3 | 含能材料的燃速特性 | 57 |
| 3.5.4 | 燃速温度敏感系数分析 | 57 |
| 3.5.5 | 燃烧波中的化学反应速度 | 60 |
| | 参考文献 | 61 |
| 第4章 | 炸药的能量学 | 63 |
| 4.1 | 晶体材料 | 63 |
| 4.1.1 | 晶体材料的物化性能 | 63 |
| 4.1.2 | 高氯酸盐 | 66 |
| 4.1.3 | 硝酸盐 | 67 |
| 4.1.4 | 硝基化合物 | 68 |

| | | |
|-------|--------------|-----|
| 4.1.5 | 硝胺 | 69 |
| 4.2 | 聚合物材料 | 70 |
| 4.2.1 | 聚合物材料的物理化学性质 | 70 |
| 4.2.2 | 硝酸酯 | 71 |
| 4.2.3 | 惰性聚合物 | 72 |
| 4.2.4 | 叠氮聚合物 | 75 |
| 4.3 | 火炸药的分类 | 79 |
| 4.4 | 火药的配方 | 81 |
| 4.5 | 硝基聚合物火药 | 82 |
| 4.5.1 | 单基发射药 | 82 |
| 4.5.2 | 双基火药 | 82 |
| 4.6 | 复合推进剂 | 87 |
| 4.6.1 | AP 复合推进剂 | 87 |
| 4.6.2 | AN 复合推进剂 | 90 |
| 4.6.3 | 硝胺复合推进剂 | 91 |
| 4.6.4 | HNF 复合推进剂 | 92 |
| 4.6.5 | TAGN 复合推进剂 | 93 |
| 4.7 | 复合改性双基推进剂 | 95 |
| 4.7.1 | AP-CMDB 推进剂 | 95 |
| 4.7.2 | 硝胺 CMDB 推进剂 | 96 |
| 4.7.3 | 三基发射药 | 96 |
| 4.8 | 黑火药 | 97 |
| 4.9 | 炸药的配方 | 98 |
| 4.9.1 | 工业炸药 | 99 |
| 4.9.2 | 军用炸药 | 99 |
| | 参考文献 | 100 |
| 第 5 章 | 晶体物质和聚合物的燃烧 | 103 |
| 5.1 | 晶体物质的燃烧 | 103 |
| 5.1.1 | 高氯酸铵 | 103 |
| 5.1.2 | 硝酸铵 | 104 |
| 5.1.3 | HMX | 105 |
| 5.1.4 | 三氨基胍硝酸盐 | 108 |
| 5.1.5 | 二硝酰胺铵 | 114 |

| | | |
|------------|------------------|------------|
| 5.1.6 | 硝仿肼 | 115 |
| 5.2 | 聚合物的燃烧 | 115 |
| 5.2.1 | 硝酸酯 | 115 |
| 5.2.2 | 聚叠氮缩水甘油醚 | 118 |
| 5.2.3 | 双叠氮甲基环丁烷 | 121 |
| | 参考文献 | 126 |
| 第6章 | 双基推进剂的燃烧 | 130 |
| 6.1 | NC-NG 推进剂的燃烧 | 130 |
| 6.1.1 | 燃速特性 | 130 |
| 6.1.2 | 燃烧波结构 | 130 |
| 6.1.3 | 燃速模型 | 138 |
| 6.1.4 | 气相能量和燃速 | 139 |
| 6.1.5 | 燃速温度敏感系数 | 145 |
| 6.2 | NC-TMETN 推进剂的燃烧 | 148 |
| 6.2.1 | 燃速特性 | 148 |
| 6.2.2 | 燃烧波结构 | 149 |
| 6.3 | 硝基-叠氮推进剂的燃烧 | 149 |
| 6.3.1 | 燃速特性 | 149 |
| 6.3.2 | 燃烧波结构 | 151 |
| 6.4 | 双基推进剂的催化 | 152 |
| 6.4.1 | 超速燃烧、平台燃烧和麦撒燃烧 | 152 |
| 6.4.2 | 铅催化剂的效果 | 153 |
| 6.4.3 | 含催化剂的双基推进剂的燃烧 | 154 |
| 6.4.4 | 超速、平台和麦撒燃烧的燃烧模型 | 159 |
| 6.4.5 | 以 LiF 为催化剂的双基推进剂 | 161 |
| 6.4.6 | 以 Ni 为催化剂的双基推进剂 | 162 |
| 6.4.7 | 超速和平台燃烧的抑制 | 164 |
| | 参考文献 | 166 |
| 第7章 | 复合推进剂的燃烧 | 169 |
| 7.1 | AP 复合推进剂 | 169 |
| 7.1.1 | 燃烧波结构 | 169 |
| 7.1.2 | 燃速特性 | 177 |
| 7.1.3 | 催化的 AP 复合推进剂 | 183 |

| | | |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 7.2 | 硝胺复合推进剂 | 190 |
| 7.2.1 | 燃速特性 | 191 |
| 7.2.2 | 燃烧波结构 | 192 |
| 7.2.3 | HMX-GAP 推进剂 | 194 |
| 7.2.4 | 催化的硝胺复合推进剂 | 197 |
| 7.3 | AP-硝胺复合推进剂 | 204 |
| 7.3.1 | 热性能 | 204 |
| 7.3.2 | 燃速 | 206 |
| 7.4 | TAGN-GAP 复合推进剂 | 210 |
| 7.4.1 | 物化特性 | 210 |
| 7.4.2 | 燃速和燃烧波结构 | 211 |
| 7.5 | AN-叠氮化聚合物复合推进剂 | 212 |
| 7.5.1 | AN-GAP 复合推进剂 | 212 |
| 7.5.2 | AN-(BAMO-AMMO)-HMX 复合推进剂 | 214 |
| 7.6 | AP-GAP 复合推进剂 | 215 |
| 7.7 | ADN、HNF 和 HNIW 复合推进剂 | 216 |
| | 参考文献 | 218 |
| 第 8 章 | CMDB 推进剂的燃烧 | 221 |
| 8.1 | CMDB 推进剂的特性 | 221 |
| 8.2 | AP-CMDB 推进剂 | 221 |
| 8.2.1 | 火焰结构和燃烧模型 | 221 |
| 8.2.2 | 燃速模型 | 223 |
| 8.3 | 硝胺-CMDB 推进剂 | 225 |
| 8.3.1 | 火焰结构和燃烧模式 | 225 |
| 8.3.2 | 燃速特性 | 228 |
| 8.3.3 | 热波结构 | 229 |
| 8.3.4 | 燃速模型 | 234 |
| 8.4 | 催化 HMX-CMDB 推进剂的平台燃烧 | 235 |
| 8.4.1 | 燃速特性 | 235 |
| 8.4.2 | 燃烧波结构 | 236 |
| | 参考文献 | 240 |
| 第 9 章 | 炸药的燃烧 | 242 |
| 9.1 | 爆轰特性 | 242 |

| | | |
|---------------|-----------------|------------|
| 9.1.1 | 爆速和压强 | 242 |
| 9.1.2 | CHNO 炸药爆速的估算 | 243 |
| 9.1.3 | 炸药爆轰状态方程 | 244 |
| 9.2 | 密度和爆速 | 245 |
| 9.2.1 | 含能爆炸性材料 | 245 |
| 9.2.2 | 工业炸药 | 246 |
| 9.2.3 | 军用炸药 | 247 |
| 9.3 | 临界直径 | 248 |
| 9.4 | 爆轰现象的应用 | 249 |
| 9.4.1 | 爆轰波的形成 | 249 |
| 9.4.2 | 聚能效应 | 251 |
| 9.4.3 | Hopkinson 效应 | 252 |
| 9.4.4 | 水下爆炸 | 254 |
| | 参考文献 | 254 |
| 第 10 章 | 含能烟火剂的组成 | 256 |
| 10.1 | 推进剂、炸药和烟火剂的区别 | 256 |
| 10.1.1 | 烟火剂的热力学能量 | 256 |
| 10.1.2 | 热动力学性质 | 257 |
| 10.2 | 烟火剂的能量 | 258 |
| 10.2.1 | 反应物和产物 | 258 |
| 10.2.2 | 热量和产物的生成 | 259 |
| 10.3 | 元素能量 | 260 |
| 10.3.1 | 元素的理化性质 | 260 |
| 10.3.2 | 元素的燃烧热 | 262 |
| 10.4 | 化学物质选择标准 | 266 |
| 10.4.1 | 烟火剂特性 | 266 |
| 10.4.2 | 烟火剂的理化性质 | 267 |
| 10.4.3 | 烟火剂配方 | 269 |
| 10.5 | 氧化剂组分 | 272 |
| 10.5.1 | 含金属的氧化剂 | 273 |
| 10.5.2 | 金属氧化物 | 275 |
| 10.5.3 | 金属硫化物 | 275 |
| 10.5.4 | 氟化合物 | 275 |

| | | |
|---------------|---|------------|
| 10.6 | 燃料组分 | 276 |
| 10.6.1 | 金属燃料 | 276 |
| 10.6.2 | 非金属固体燃料 | 277 |
| 10.6.3 | 聚合物燃料 | 279 |
| 10.7 | 金属叠氮化物 | 280 |
| | 参考文献 | 280 |
| 第 11 章 | 烟火剂的燃烧传播 | 282 |
| 11.1 | 燃烧波的理化结构 | 282 |
| 11.1.1 | 热分解和放热过程 | 282 |
| 11.1.2 | 均质烟火剂 | 283 |
| 11.1.3 | 非均质烟火剂 | 283 |
| 11.1.4 | 点火器用烟火剂 | 284 |
| 11.2 | 金属颗粒的燃烧 | 285 |
| 11.2.1 | 氧化和燃烧过程 | 285 |
| 11.3 | 黑火药 | 286 |
| 11.3.1 | 物化性能 | 286 |
| 11.3.2 | 反应过程和燃速 | 286 |
| 11.4 | Li-SF ₆ 烟火剂 | 287 |
| 11.4.1 | 锂的反应 | 287 |
| 11.4.2 | SF ₆ 的化学特性 | 287 |
| 11.5 | 含 Zr 烟火剂 | 287 |
| 11.5.1 | 与 BaCrO ₄ 的反应性 | 288 |
| 11.5.2 | 与 Fe ₂ O ₃ 的反应性 | 288 |
| 11.6 | Mg-Tf 烟火剂 | 288 |
| 11.6.1 | 热化学性质与能量性 | 288 |
| 11.6.2 | Mg 和 Tf 的反应性 | 290 |
| 11.6.3 | 燃速特性 | 290 |
| 11.6.4 | 燃烧波结构 | 293 |
| 11.7 | B-KNO ₃ 型烟火剂 | 294 |
| 11.7.1 | 热化学性能和能量性能 | 294 |
| 11.7.2 | 燃速特性 | 295 |
| 11.8 | Ti-KNO ₃ 和 Zr-KNO ₃ 烟火剂 | 296 |
| 11.8.1 | 氧化过程 | 296 |

| | |
|--|------------|
| 11.8.2 燃速特性 | 296 |
| 11.9 金属-GAP 烟火剂 | 296 |
| 11.9.1 火焰温度和燃烧产物 | 296 |
| 11.9.2 热分解过程 | 297 |
| 11.9.3 燃速特性 | 298 |
| 11.10 Ti-C 烟火剂 | 298 |
| 11.10.1 Ti-C 的热化学性质 | 298 |
| 11.10.2 Tf 与 Ti-C 烟火剂间的反应活性 | 299 |
| 11.10.3 燃速特性 | 299 |
| 11.11 NaN_3 烟火剂 | 299 |
| 11.11.1 NaN_3 烟火剂的热化学性质 | 299 |
| 11.11.2 NaN_3 烟火剂配方 | 300 |
| 11.11.3 燃速特性 | 301 |
| 11.11.4 燃烧残渣分析 | 301 |
| 11.12 GAP-AN 烟火剂 | 301 |
| 11.12.1 热化学特性 | 301 |
| 11.12.2 燃速特性 | 302 |
| 11.12.3 燃烧波结构和传热 | 302 |
| 11.13 硝胺烟火剂 | 302 |
| 11.13.1 物理化学性质 | 302 |
| 11.13.2 燃烧波结构 | 303 |
| 11.14 B-AP 烟火剂 | 303 |
| 11.14.1 热化学特性 | 303 |
| 11.14.2 燃速特性 | 304 |
| 11.14.3 燃速分析 | 306 |
| 11.14.4 硼在燃烧波中燃烧的位置和方式 | 308 |
| 11.15 烟火剂的摩擦感度 | 309 |
| 11.15.1 摩擦能的定义 | 309 |
| 11.15.2 有机铁离子和硼化合物的作用 | 309 |
| 参考文献 | 312 |
| 第 12 章 燃烧产物的辐射特性 | 314 |
| 12.1 发光原理 | 314 |
| 12.1.1 发光特性 | 314 |