



装备科技译著出版基金

高能材料

—— 火药、炸药和烟火药

High Energy Materials
(Propellants, Explosives and Pyrotechnics)

[印度] Jai Prakash Agrawal 著

刘育湘 韩廷解 芮久后 赵毅 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013033169

TB34
51

高能材料

——火药、炸药和烟火药

High Energy Materials

Propellants, Explosives and Pyrotechnics

[印度] Jai Prakash Agrawal 著

欧育湘 韩廷解 芮久后 赵毅 译



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1640237

TB34
51

091880810

著作权合同登记 图字:军-2011-088 号

图书在版编目(CIP)数据

高能材料:火药、炸药和烟火药/(印度)阿格拉沃尔(Agrawal, J. P.)著;
欧育湘等译. —北京:国防工业出版社, 2013. 4

书名原文:High Energy Materials
(Propellants, Explosives and Pyrotechnics)

ISBN 978-7-118-08692-8

I. ①高... II. ①阿... ②欧... III. ①高能—功能材料②弹药材料
IV. ①TB34②TJ410.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 052881 号

Originally published in the English language by Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,
Boschstrasse 12, D - 69469 Weinheim, Federal Republic of Germany, under the title
“*High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics*”. Copyright © 2010 by Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

本书简体中文版由 Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 24 1/4 字数 466 千字

2013 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 86.00 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

译者前言

本书汇总了近 50 年的文献资料,并结合作者的实践经验及科研成果,对三大含能材料(炸药、火药及烟火药)的历史、现状及最新发展进行了全面系统的论述,特别是讨论了一些新含能材料的应用前景。

本书与德国 ICT 研究院 Dr. U. Teipel 主编的 *Energetic Materials* 一书(中译本于 2009 年由国防工业出版社出版)不同,Teipel 博士的专著系论述含能材料粒子的结构、性能表征及加工工艺,起点和深度均较高,读者群主要是专业研究和生产人员。本书内容则雅俗共赏,不仅可供业外读者阅读以了解含能材料的全貌,而且业内读者阅读后,也定能领略书中有关含能材料的国际前沿知识、诸多新意和见解,足资借鉴。

本书的作者系国际知名的炸药和聚合物科学家、英国皇家学会会员,前印度国防研究院材料部主任 Dr. Jai Prakash Agrawal,他也是很多研究性出版物的作者,其中 2007 年由 Wiley-VCH 出版社出版的、由他著述的 *Organic Chemistry of Explosives*,即在国际含能领域享有盛誉。译者相信,本书也会成为对新一代含能材料科学家很有价值的一本必备专著。

本书共有六章,第 1 章介绍了炸药的基本特征、要求、分类及应用;第 2 章讨论了现有和未来炸药(包括起爆药)的全貌,涉及的单体炸药(包括近年新出现的)约有 80 种,此章系本书重点之一;第 3 章是混合炸药的配方和加工及炸药性能评估;第 4 章为火药(推进剂及发射药),此章重点论述了用于火药的高性能和生态友好氧化剂,新型含能粘结剂和增塑剂及其他关键性的添加剂,还比较详细地叙述了推进剂在空间技术上的诸多应用;第 5 章为烟火药,包括了纳米含能材料;第 6 章为炸药安全,叙述了含能材料在制造、加工、运输、储存及应用方面必须遵守的安全准则及联合国的有关条款。

译文中有许多化合物的名称、专有名词及术语,系直接采用缩写,它们的全名请见本书的术语缩写表。

本书第 1 章、第 2 章由欧育湘译,第 3 章~第 6 章由韩廷解译,全书由欧育湘审校,芮久后、赵毅整理。

值此书中译本出版之际,作为主译,我在此首先要感谢总装备部“装备科技

译著出版基金”评审委员会的专家们,感谢他们热心的帮助、中肯的指导和厚爱,其次要感谢国防工业出版社的领导和同仁,感谢他们为出版此书所做的努力和与译者、校者和谐的合作。

限于译者、校者的水平,加上书中内容涉及的知识面广而新,译文中不妥甚至错误之处势难避免,期望读者斧正。

欧育湘

2012年8月于北京阳春光华家园

原著序

目前已出版有几本论述炸药、推进剂和烟火药的专著,但大多数关于高能材料(HEM)的最新信息,仍以研究论文或综述评论散见于文献中。本书是第一本汇集了最近 50 年含能材料相关文献信息及其最新进展的论著。此外,本书还从含能材料最终使用的观点,着重论述了一些新含能材料的应用前景。

本书包含六章,第 1 章介绍炸药的基本特征、对军用炸药的要求,以及炸药的应用(包括军用、民用、航空航天、核工业及其他等)。第 2 章根据炸药的特点,重点讨论了现有和未来炸药的状况。第 3 章主要包括炸药配方、加工工艺及性能评估。广泛用于军事及空间技术的推进剂在第 4 章中叙述。此章的很大部分是有关下述几类材料多方面的论述:①高性能和生态友好氧化剂(ADN 及 HNF)。②新型粘结剂(butacene, ISRO 多元醇及含能粘结剂,如 GAP、NHTPB、聚 NiMMO、聚 Glyn 等)。③含能增塑剂(BDNPA/F、Bu - NENA、K - 10 等)。④各种对提高导弹推进剂性能具有关键作用的组分。火箭推进剂的改性及火箭发动机的隔热和它们的新近进展也包括于第 4 章中。烟火药剂(是使用炸药和推进剂不可缺少的)则在第 5 章讨论。第 6 章是炸药的安全,这对高能材料领域相关人员是至关重要的。

本书作者,Dr. J. P. Agrawal 是国际知名的炸药和高聚物科学家,也是很多研究出版物的作者。他在本书内论述的有关高能材料的丰富经验和国际前沿知识,对新一代高能材料科学家和火箭工艺技术人员都是非常有价值的。

本书对现代高能材料进行了最全面的论述,包括了高能材料的很多重要方面,特别是它们的应用。本书的文字流畅、易懂,定能使读者和研究人员大为受益。

Brahmos 航空航天公司(印度新德里)执行董事及首席执行官
杰出科学家

Dr. A. Sivathanu Pillai

原著前言

在炸药领域,近年出现了“高能材料”(High Energetic Materials, HEM)这一名词,它用来指炸药、推进剂和烟火药这几类物质,目的是为了使有关这方面的研究不致过于招人耳目。换言之,HEM 是上述几类物质的通用名称。尽管在战争期间,HEM 被视为“恶魔”,HEM 的处理、运输和储存也被认为是灾难性的隐患,但是,如果考虑到 HEM 对国民经济及工业的巨大作用,以及 HEM 在生活中几乎所有方面的无数应用,HEM 则堪称“天使”。现在已有几本有关炸药、火药和烟火药的专著,但它们大多数抑或是讨论 HEM 一般的科学问题,抑或是重点论述 HEM 的某些专门课题,而没有一本详细涉及 HEM 的现代发展。当然,现在已有很多优秀的综述发表,这无疑弥补了这方面的缺陷。但直到今天,仍然没有一本单一的专著,来论述 HEM 的现代进展及未来前景。这本名为《高能材料(火药、炸药和烟火药)》的书,内容涵盖了 HEM 的全貌,包括 HEM 的现状与未来。本书仅一卷,旨在填补文献空缺。

本书针对的重点问题是:①论述 HEM 的现状。这方面的资料散见于近 50 年的文献中,且多以研究论文和综述发表。②从现代对 HEM 的要求(成本低、可回收、对生态环境友好)出发,探索近期报道的一些 HEM 的应用前景。③可能的 HEM 未来研究方向。因此,本书能为研究人员提供近 50 年发表的但散见于多文献中的 HEM 信息。另外,就化学而言,本书的起点和深度不像某些集中论述 HEM 专门问题的著作那样高,如读者拟对硝化化学作深入了解,可参阅 *Organic Chemistry of Explosives* (J. P. Agrawal 和 R. O. Hodgson),该书对很多 HEM 的合成路线及涉及的化学有详细的讨论。本书第 1 章炸药的特征和第 6 章炸药和化工品安全,以及论述炸药、火药和烟火药的其他章节,无论专业人员还是对 HEM 了解不多或基本不了解的读者,肯定均会感兴趣。

本书共六章,分别讲述炸药的特征,炸药的现状,炸药、火药、烟火药的加工及性能评估,炸药和化工品的安全。另外,各章末均附有参考文献,总文献超过 1000 篇。本书综述了过去 50 年来文献报道的 HEM 的现状,并从物理性能、化学性能、热安定性及爆炸性能出发,预估了这些 HEM 的应用前景及它们可能的未来发展方向。还有,采用本书强调的安全措施,可以减少甚至消除炸药工业和化学工业中的火灾和爆炸事故。

作者希望本书将对涉足 HEM 领域的所有人员均具有意义和价值,包括实验室研究人员,大专院校师生,生产人员,质量监控人员,国家安保人员,法院实验室人员,化学工业人员和陆、海、空三军部队。另外,本书对从事工业炸药和有关化工品的生产厂家也是极其有用的。

总之,作者在撰写本书时,尽最大努力囊括 HEM 的所有最新动态和军用炸药及民用炸药部门可能感兴趣的有关信息,但这只是作者的初衷,而很可能有少数有意义的 HEM 和一些有关资料被忽视了而未写入本书中,对此作者深表歉意。如有读者希望得到这些被忽略的信息,可与作者本人或出版社联系,而且将在本书再版时予以补充,并对读者深致谢意。

Dr. Jai. Prakash Agrawal

印度 浦那

感 谢

作者在撰写本书过程中,发现列于本书中的专著、研究报告和综述是非常有价值的,如果没有这些 HEM 先行者们的论著,撰写本书将是十分困难的。作者对这些论著的作者和出版商表示衷心的感谢。

为撰写本书,印度科技发展部(DST)“发挥退休科学家作用项目”为作者立项研究,对此作者深为感谢。作者还要特别感谢印度高能材料研究实验室(HEMRL)主任 Dr. A. S. Rao 为撰写本书提供办公室及图书馆设备,感谢 HEMRL 技术信息中心所有官员和职员在全书整个撰写过程中给予的帮助和支持,感谢印度国防科学信息和文献中心(DESIDOC)主任 Dr. A. L. Moorthy 和他的同事提供使用图书馆的方便。

HEMRL 前主任 Mr. K. Venkatesan 是和作者交往已 30 余年的老朋友,他仔细审阅了本书的手稿,为提高本书质量做出了卓有成效的贡献,作者对他满怀感谢之情。此外,HEMRL 的科学家们和作者以前的同事们,在作者撰写本书时,提供了大量科学信息,为此,我要深深感谢:Dr. Mehilal, Dr. R. S. Satpute, Dr. A. K. Sikder, Mr. G. M. Gore, Dr. D. B. Sarwade, Dr. K. S. Kulkarni, Ms. F. Manuel, Ms. J. Nair, Mr. R. S. Palaiah, Dr. G. K. Gautam, Mr. H. P. Sonawane, Ms. S. H. Sonawane, Mr. B. R. Thakur, Mr. J. R. Peshwe, Dr. B. M. Bohra, Mr. S. G. Sundaram, Mr. P. V. Kamat, Dr. R. G. Sarawadekar, Mr. U. S. Pandit, Mr. S. R. Vadali, Mr. C. K. Ghatak, Mr. N. L. Varyani 和 Dr. A. R. Kulkarni。

此外,我还要感谢为本书打字的 Ms. S. S. Dahitule,为本书作图的 Mr. Bhalerao,感谢为本书撰写提供过各种帮助的人:Mr. K. K. Chakravarty, Ms. R. Pilankar, Ms. R. Thakur 和 Mr. P. M. Mhaske。

感谢 CFEES 的主任 Mr. J. C. Kapoor 及 Dr. S. C. Agarwal 为本书提供安全方面的文献,特别深切感谢 Dr. R. W. Millar(DinetiQ 公司,英国国防部)和 Dr. N. Wingborg(瑞典国防研究院),他们为本书提供了很多含能粘结剂和氧化剂的资料,并与作者就本书的一些技术问题进行过讨论。还有,Dr. B. M. Kosowski(美国 MACH I)提供了 SFIO 的文献,Dr. B. Finck(法国 SNPE)提供了 Butacene 800 的资料,VSSC 前主任 Mr. M. C. Uttam 提供了关于炸药在宇宙空间应用上的详细情况,英国剑桥大学 J. E. Field 教授和 Dr. S. M. Walley,英国健康和安全实验室的 Dr. R. D. Hodgson,前炸药首席检验员(Nagpur) Mr. M. Anbunathan,炸药检验员 Dr. S. M. Mannan 和科学家 Dr. R. P. Singh(NCL)都为本书提供了宝贵的资料,

并不时为作者的撰写给予帮助和支持,在此对他们表示衷心的感谢。

作者还要感谢下述版权机构,它们允许本书从它们的出版物上复制图表:英国皇家化学会, J. 烟火药公司, 国际烟火会议, Pergamon 出版社(现属于 Elsevier 公司), Springer 科学和实业传媒公司, 美国国防战备协会, 德国 ICT 研究院 (Fraunhofer), Wiley - VCH 出版社及联合国有关组织。

这里,我要对我的妻子 Sushma 表示最深切的感谢,没有她无条件的支持、鼓励和关爱,没有她不知疲倦的帮助,本书不可能完成,也不可能如期出版。此外,我要感谢我的女儿 Sumita、我的女婿 Vipul 和我的儿子 Puneet,感谢他们在我撰写本书的整个过程中对我的理解和付出的耐心。

最后,我还要感谢 Wiley - VCH 出版社 (Weinheim, 德国) 的 Dr. M. Preuss (材料科学委任编辑) 和 Dr. M. Graf 及他们的同事,感谢他们的支持及经常给予的宝贵建议。

Dr. Jai Prakash Agrawal

印度 浦那

附:推荐阅读书目

1. Fordham, S. (1966) *High Explosives and Propellants*, Pergamon Press, Oxford, UK.
2. Sucaska, M. (1995) *Test Methods for Explosives*, Springer - Verlag, New York, USA.
3. Kohler, J., and Meyer, R. (1993) *Explosives*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany.
4. Sutton, G. P. (1992) *Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineering of Rockets*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
5. Bailey, A., and Murray, S. G. (1989) *Explosives, Propellants and Pyrotechnics*, Land Warfare: Brassey's New Battlefield Weapons Systems and Technology Series, (eds F. Hartley and R. G. Lee), vol. 2, Brassey's (UK) Ltd, London, UK.
6. Agrawal, J. P., and Hodgson, R. D. (2007) *Organic Chemistry of Explosives*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
7. Akhavan, J. (2004) *The Chemistry of Explosives*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
8. Conkling, J. A. (1985) *Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
9. Provatas, A. (2000) Energetic polymers and plasticizers for explosive formulations: a review of recent advances. AAMRL Report No. DSTO - TR - 0966.
10. Agrawal, J. P. (1998) Recent trends in high energy materials. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 24, 1 - 30.
11. Agrawal, J. P. (2005) Some new high energy materials and their formulations for specialized applications. *Prop., Explos., Pyrotech.*, 30, 316 - 328.

符号含义

符号	英文名称	中文名称
A	Frequency factor	指前因子
C_p	Specific heat at constant pressure	比定压热容
C_v	specific heat at constant volume	比定容热容
g	Acceleration due to gravity	重力加速度
I_{sp}	Specific impulse	比冲
n	Pressure exponent/index	压力指数
R	Universal gas constant	通用气体常数
Q	Heat of explosion	爆热
ρ	Density	密度
η_b	Ballistic efficiency	弹道效率
η_p	Piezometric efficiency	压力效率
γ	Specific heat ratio i. e C_p/C_v	比热比, 即 C_p/C_v
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$	Polymorphic forms of explosives	炸药的多晶型

内 容 简 介

本书全面系统地论述了含能材料(炸药、火药、烟火药)的历史、现状和未来发展,重点内容有:近 80 种(含近年出现的)单体炸药的合成、性能及应用,混合炸药的配方、性能及加工工艺,火药(推进剂及发射药)用高性能和生态友好氧化剂、新型粘结剂、增塑剂及其他关键性添加剂,纳米含能材料和含能材料安全等。全书汇总了近 50 年的文献资料及作者本人的实践经验和科研成果,是一本极有价值的最新含能材料专著。

本书可供含能材料专业从事科研、生产、教学、管理、物流的技术人员使用,也可作为专业教材及参考书。



北航

C1640237



目 录

第 1 章 炸药的基本性能	1
1.1 导言	1
1.2 定义	2
1.2.1 放热	2
1.2.2 反应的快速性	2
1.3 炸药的分类	3
1.3.1 军用炸药	3
1.3.2 民用炸药	8
1.4 基本特征	10
1.4.1 相容性和安定性	10
1.4.2 氧平衡	12
1.4.3 感度和敏感性	15
1.4.4 生成热	20
1.4.5 爆热和爆炸气态产物	21
1.4.6 爆速	23
1.4.7 爆压(DP 或 P_{CJ})	24
1.4.8 威力	25
1.4.9 猛度	26
1.5 对军用炸药的其他要求	26
1.5.1 挥发性	26
1.5.2 毒性	27
1.5.3 吸湿性	27
1.5.4 密度	27
1.5.5 寿命	27
1.5.6 供应能力、价格和循环应用(民用)	27
1.5.7 生态友好性	28
1.6 炸药的应用	29
1.6.1 军用	30
1.6.2 民用	33
1.6.3 军用炸药及装置的民用	35

1.6.4 宇宙空间的应用	38
1.6.5 核应用	42
1.6.6 其他应用	47
参考文献	50

第2章 炸药	55
2.1 历史沿革	55
2.2 炸药的现状及未来	56
2.2.1 黑药	56
2.2.2 TNT	56
2.2.3 特屈儿	57
2.2.4 硝化甘油	58
2.2.5 代那迈特	58
2.2.6 季戊四醇四硝酸酯(PETN,太安)	58
2.2.7 硝化棉	59
2.2.8 聚乙烯硝酸酯	60
2.2.9 雷汞	61
2.2.10 叠氮化铅	61
2.2.11 苦味酸、苦味酸铅和苦味酸铵	62
2.2.12 斯蒂芬酸铅(2,4,6-三硝基间苯二酚铅)	63
2.2.13 二硝基重氮酚	63
2.2.14 四氮烯	64
2.2.15 5-硝基四唑汞	64
2.2.16 研究部炸药	65
2.2.17 高熔点炸药	66
2.2.18 耐热或热稳定炸药	67
2.2.19 高性能(高密度、高爆速)炸药	79
2.2.20 熔铸炸药	85
2.2.21 不敏感炸药	88
2.2.22 含能粘结剂和增塑剂	92
2.2.23 用五氧化二氮合成的含能材料	93
2.2.24 新炸药	94
2.2.25 基于 TATB、CL-20 及 NTO 的重要配方	95
2.2.26 钝感弹药及某些新的钝感炸药/配方	100
2.2.27 碱性叠氮化铅	105
2.2.28 六(叠氮甲基)苯	106

2.2.29	顺式双(5-硝基-2H-四唑-N ²)四氨钴(Ⅲ) 高氯酸盐	107
2.2.30	八硝基立方烷	109
2.2.31	硝酸胥镍	111
2.2.32	呋咱、氢化呋咱及四嗪基炸药	111
2.2.33	高氮高能材料	113
2.2.34	燃料—空气炸药	115
2.3	炸药未来的研究方向	117
2.3.1	高能量、热稳定及不敏感炸药	117
2.3.2	熔铸炸药	117
2.3.3	含能粘结剂和增塑剂	118
2.3.4	炸药的粒径	118
2.3.5	生态友好生产工艺与炸药	118
	参考文献	119
第3章	炸药的加工及评估技术	132
3.1	炸药的加工技术	132
3.1.1	浇铸	132
3.1.2	挤出	134
3.1.3	压装	134
3.2	配方设计的基本原则	137
3.2.1	配方现状	138
3.2.2	含铝炸药配方	138
3.2.3	片状炸药	139
3.2.4	塑料粘结炸药	140
3.3	炸药性能评估	142
3.3.1	炸药相容性和安定性的测定	142
3.3.2	炸药的热感度、撞击感度、摩擦感度、火花感度和 冲击感度	145
3.3.3	爆速的测定	159
3.3.4	爆压的测定	164
3.3.5	威力的测定	164
	参考文献	165
第4章	火药	169
4.1	火药的分类	169

4.2	液体推进剂	170
4.3	固体火药	172
4.3.1	均质火药	172
4.3.2	异质推进剂	173
4.4	混合推进剂	175
4.5	触变胶推进剂	175
4.6	火药性能	175
4.6.1	发射药	175
4.6.2	火箭推进剂	178
4.7	发射药配方	182
4.8	发射药组分	183
4.8.1	高能发射药	184
4.8.2	低易损性发射药	184
4.8.3	液体发射药	186
4.9	固体火箭推进剂组分	188
4.9.1	氧化剂	188
4.9.2	粘结剂	195
4.9.3	金属燃料	212
4.9.4	增塑剂	213
4.9.5	键合剂	220
4.9.6	安定剂	222
4.9.7	燃速调节剂	224
4.10	火箭推进剂的抑制技术	232
4.10.1	抑制剂的特性	233
4.10.2	抑制剂的测试	233
4.10.3	抑制推进剂的弹道评估	233
4.10.4	抑制材料	234
4.10.5	抑制技术	235
4.10.6	双基推进剂的抑制	238
4.10.7	复合推进剂的抑制	241
4.10.8	CMDB 推进剂的抑制	246
4.11	火箭发动机的绝热技术	249
4.11.1	绝热体或绝热材料的特性	250
4.11.2	绝热材料	250
4.11.3	发动机绝热工艺	251
4.11.4	未来的绝热材料	251

参考文献	252
第 5 章 烟火剂	269
5.1 导言	269
5.2 烟火剂的一般特征	270
5.3 烟火剂的组分	270
5.3.1 燃料	271
5.3.2 氧化剂	271
5.3.3 粘结剂	272
5.3.4 冷却剂	272
5.3.5 抑制剂	272
5.3.6 颜料	272
5.3.7 生色剂	272
5.3.8 调节剂	272
5.4 烟火剂组分的重要特性	273
5.4.1 密度	274
5.4.2 吸湿性	274
5.4.3 熔点、沸点和分解温度	274
5.4.4 氧化剂的氧含量	275
5.4.5 燃料和包装的热导率	275
5.4.6 燃烧产物的性质	275
5.4.7 烟火剂组分的毒性	276
5.5 烟火剂配方的类型	277
5.5.1 照明弹烟火剂配方	277
5.5.2 延期药配方	287
5.5.3 烟雾剂配方	290
5.5.4 燃烧弹配方	302
5.6 烟火剂配方的性能评估	308
5.6.1 燃点	308
5.6.2 力学性能	308
5.6.3 吸湿性	308
5.6.4 热值和产气体积	308
5.6.5 发光强度	309
5.6.6 红外线强度	309