



装备科技译著出版基金

含能材料译丛

Chemical Rocket Propulsion—A Comprehensive Survey of Energetic Materials

化学火箭推进 用新型含能材料

[意] Luigi T. De Luca [日] Toru Shimada 著

[俄] Valery P. Sinditskii [法] Max Calabro

庞维强 樊学忠 胡松启 李军强 赵凤起 等译

 Springer



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

化学火箭推进用新型 含能材料

Chemical Rocket Propulsion

—A Comprehensive Survey of Energetic Materials

[意] Luigi T. De Luca [日] Toru Shimada

[俄] Valery P. Sinditskii [法] Max Calabro

著

庞维强 樊学忠 胡松启 李军强 赵凤起 等译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2018-069 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化学火箭推进用新型含能材料 / (意) 路易吉·T·卢卡等著; 庞维强等译. —北京: 国防工业出版社, 2019.5

书名原文: Chemical Rocket Propulsion —— A Comprehensive Survey of Energetic Materials

ISBN 978-7-118-11830-8

I. ①化… II. ①路… ②庞… III. ①火箭推进剂—火箭燃料—化学燃料—研究 IV. ①V511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 040632 号

First published in English under the title

Chemical Rocket Propulsion: A Comprehensive Survey of Energetic Materials
edited by Luigi T. De Luca, Toru Shimada, Valery P.Sinditskii and Max Calabro
Copyright © Springer International Publishing Switzerland, 2017

This edition has been translated and published under licence from
Springer Nature Switzerland AG.

※

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 29 插页 12 字数 548 千字
2019 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 219.00 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

由意大利米兰理工大学 Luigi T. De Luca 教授、日本航空航天开发部空间航空科学研究所 Toru Shimada 教授、俄罗斯门捷列夫化工大学 Valery P. Sinditskii 教授和法国普瓦西 Max Calabro 教授主编的《化学火箭推进用新型含能材料》(*Chemical Rocket Propulsion—A Comprehensive Survey of Energetic Materials*) 一书,系统论述了推进用含能材料的国际研究现状,确定可用于新型火箭推进配方中有前景的含能材料,对世界先进实验室正在研究的具有很大发展潜力的新型含能配方提出深刻见解,并从化学推进及其含能材料应用角度建议未来广泛关注的方向,另外,讨论了几个鲜为人知的推进主题,如催化技术和纳米材料等。

全书由分别来自俄罗斯、美国、德国、意大利、法国、以色列、日本、韩国、印度、土耳其及中国的全球从事含能材料、纳米技术、固体推进、固液混合推进、航空航天推进等领域的知名专家撰写。这些作者结合自身多年的科学研究成果,详细阐述了他们对含能材料的设计、制备、表征及在航空航天推进中应用和燃烧的卓越的科学见解、精湛的理论知识和丰富的实践经验。此书反映了作者在含能材料及在航空航天推进中应用领域最新的理论和实践的现代水平,是一本能够提供指导和非常实用的著作。

为了扩大和加强与国外学者的技术交流,在国防工业出版社的领导和老师的指导、支持和帮助下,经瑞士 AG Springer 国际出版社的许可和授权,我们组织翻译了此书(部分章节),现以中文版出版,希望读者能从书中发现新型含能材料及其在化学推进领域中应用以及燃烧的精髓,并从中获益。

本书由庞维强、樊学忠、胡松启、李军强、赵凤起、毕福强、秦钊、黄海涛、闫宁、杨燕京、翟连杰、汪营磊、姚二岗、裴江峰、张伟、郑启龙、梁导伦、伍秋子、李国峰、刘长义等译;全书由庞维强整理、校核。

值此书中文版出版之际,作为译者,在此首先要感谢全书的译者和校核者,感谢他们所付出的艰辛劳动和始终如一的热情;非常感谢原作者意大利米兰理工大学 Luigi T. De Luca 教授欣然为本译著作序,并给予支持;感谢多位原作者

在翻译过程中给予的帮助；在整个翻译过程中得到了南京理工大学沈瑞琪教授的鼎力支持和对本译著提出的宝贵意见，在此表示衷心地感谢；感谢国防工业出版社的领导，感谢他们为出版此书所做的努力；最后感谢西安近代化学研究所的各级领导同事对本译著所提供的指导、帮助和建议。

限于译、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。

译 者

2018年12月于西安

序（中文版）

如今，中国已成为继美国和俄罗斯之后太空探索领域的世界第三大国。中国不久前发射了第六个载人火箭（“神舟”十一号，搭载两名航天员），这是中国持续时间最长的一次载人飞行任务，总飞行时间长达 33 天。同时，“天空”二号空间实验室为几年后中国空间站的建成铺平道路。对于任何太空探索任务而言，化学推进系统是目前唯一一个逃离重力场的途径。含能材料是所有航天发射器的重要组成部分，该领域的发展主要取决于含能材料在性能、成本、安全性、相容性等方面的进步。

中国最早发明黑火药和烟火制造术，同样在中国出现了最初形式的固体火箭推进系统和世界首次太空探索（据记载，公元 1500 年左右，明代的万户是世界航天第一人）。因为钱学森的缘故，中国得以间接了解冯·卡门（钱学森的导师）领导实施的加利福尼亚理工学院航空实验室（GALCIT）计划，该计划是美国火箭技术迅猛发展的基础。1955 年钱学森回国，为中国的航天发展和所取得的瞩目成就做出巨大贡献。中国目前也是世界太空探索领域的一个重要参与者。鉴于中国在太空探索上的悠久传统和当代的非凡成就，开展了从近地轨道航天活动到太阳表面探索，将本书的英文原版翻译成中文版十分有益。

但是，根据实际需求，中国出版方对原书进行了缩减，仅选取原书中在含能材料领域更符合中国科研兴趣的章节进行翻译。因此，本书的中文版最终从原来的 11 个主题下的 45 章缩减为 6 个主题下的 23 章，主题包括：推进动力用含能材料简介、化学推进新组分、金属粉作为化学推进含能燃料、固体火箭推进、固液混合推进、新型化学火箭推进。

在此感谢参与此项目的所有中国同事，是他们的悉心工作和宝贵付出使此译本得以完成。尤其感谢庞维强博士，他首先提出翻译本书，并在之后的翻译项目中负责整个团队的协调管理。

本书的主编之一 Luigi T. DeLuca 从意大利米兰理工大学退休后，在教学、研究和学术编辑方面与中国多个机构建立了具有建设性、有益的专业合作关系，尤其与以下机构合作紧密：

- 南京理工大学；
- 西安近代化学研究所；

- 西北工业大学;
- 北京理工大学;
- 中国工程物理研究院 (四川绵阳);
- 北方工业公司;
- 中国兵工学会。

感谢以上单位一直以来的热情邀请及日常提供积极帮助。

希望这个国际通力合作的项目能够帮助在相关领域活跃的中国科学家、研究人员和学生加深对含能材料的理解,让他们与国际化学推进领域的专业人员有更多富有成效的联系。

Luigi T. De Luca

2017年1月15日

前 言

这本书来源于第 12 届燃烧和推进国际系列研讨会 (The International Workshop on Combustion and Propulsion, IWCP), 主题为“新型含能材料的空间探索”, 此次研讨会探讨了含能材料及其在化学火箭推进剂中的应用。此次会议在意大利米兰理工大学 Bovisa 校区于 2014 年 6 月 9 日~10 日举行, 约 200 名来自 20 个国家的科技人员参加了会议, 共提供了 37 篇技术论文, 包括 28 篇口头报告论文和 9 篇展板论文。此次研讨会是一个独特的机会, 参会者可自由讨论未来化学火箭推进和空间推进的发展, 来自高校、政府和工厂的著名的科学家和推进工程师受邀参会。

本书包括筛选的研讨会上的高质量论文和一些国际上相关科研团队的约稿。根据大多数高质量出版物相同的广泛的审稿过程, 所有收录的文章都经过严格的 2~5 名匿名国际专家的审稿过程, 每一篇印刷的文章均有 DOI 参考文献。因此, 这一卷不应被认为是会议论文集的整理, 而应该是对在学术或研究中心的毕业生、讲师、教师和科学家以及工程师和工业工作者的完善读物。

IWCP 由意大利米兰理工大学空间推进实验室 (SPLab) 于 1990 年发起, 发起之初是想尝试拉近东西两大阵营的研究人员之间的距离, 在此之前两方在推进与火箭推进的燃烧应用领域互不往来。意大利地处两大阵营之间, 有着地理优势, 一直努力保持美国和俄罗斯科学家之间沟通渠道畅通, 即便在全球竞争的艰难时期也未放弃。IWCP 旨在营造轻松的氛围, 推动技术和知识的自由交流。会议安排是希望参会的领先国际研究人员能在各自感兴趣的领域进行细致的讨论, 而非让论文作者就范围较广的话题对其研究成果做正式的演示。部分杰出发言人会做全体讲座, 就特定主题做重要的全面论述, 为之后作者之间的细致讨论和所有参会人员的一般性讨论奠定基础。为了确保会议质量, 讲师/发言人/观察员一般限定在少数来自世界各地的受邀人员, 他们不仅技术能力过硬, 还拥有创新视野或颠覆性的方法。会议组织者也尽最大努力确保会议结果能够及时便捷地面向国际读者, 从论文展示到论文发表的各阶段对技术准确性都遵照最高专业标准。

虽然有些会议特色可能随着时间的推移有所淡化或改变, 但基本性质不变。从 IWCP 可以看到来参会的都是国际知名作者, 讨论的话题与时俱进, 反映出系列研讨会在推动含能材料燃烧和加强火箭推进的理解方面所取得的效果和成果。

第 12 届 IWCP 的主题是含能材料领域的现状和未来发展，就火箭推进等应用的推进剂配方及其相关话题对此进行了讨论。研讨会也想从用于化学火箭推进的含能材料相关的许多领域中找到给人启发的新研究角度。

本书将：

- 全面介绍推进用含能材料的国际现状；
- 确定可用于新型含能材料配方的有前景的材料；
- 对世界先进实验室正在研究的具有高潜力的新型含能配方提出深刻见解；
- 提供一些难以获得的来自俄罗斯和中国的信息；
- 从化学推进及其应用到含能材料发展角度建议未来广泛关注的方向；
- 讨论公开文献中比较分散的几个共同来源话题的进展；
- 讨论几个鲜为人知的推进话题，如膏体推进、催化技术和纳米材料。

本书旨在从含能材料角度对化学火箭推进做综合论述。因此，书中涵盖了含能材料的整个“寿命”：从配方设计概念到实际生产，包括理论和实验弹道学研究、性能特性、实验室规模和全尺寸研究、管理问题（处理、储存、老化、危险、撞击、处理和整形）等，每一章针对一个主题，但不会忽视它与其他问题之间的可能联系。所有话题都从国际视野来考虑。为了向读者提供一份关于当前技术问题的全面介绍，本书的编辑人员由太空推进先驱时代的知名专家和来自当今国际最先进实验室的技术专家组成，他们对此项目提供了大量支持。

入选的 23 篇论文分到 6 章内，共同的主题是“通过解决与推进剂相关的各方面问题来改进化学推进系统”（摘自一位匿名审稿人的评语）。

本书的第 1 章对大主题下的所有章节进行了概述，说明这些不同的章节如何凸显主题并相互配合完成最终的目标。第 1 章由主题突出的论文的简要介绍组成，撰写者都是国际公认的相关领域的专家。第 1 章能够引发潜在读者的兴趣，指引他们去详细阅读自己感兴趣的章节或论文。

我们非常感谢以下国际审稿者对本书的高质量出版提供的帮助，没有他们的付出，这本书就不会出版。

S. Anand, H. Aoki, H. Asakawa, V.A. Babuk, M. Balduccini, Y. Batonneau, L. Boccaletto, M.A. Bohn, Ch. Bonhomme, Ch. Bonnal, M. Calabro, L.H. Caveny, S.M. Celin, N. Cesco, H. Ciezki, A. Cumming, B. D'Andrea, E. D'Aversa, W.P.C. de Klerk, L.T. DeLuca, Y. Fabignon, G. Fujii, L. Galfetti, S. Gallier, A. Gany, N.G. Glumac, T.I. Gorbenko, J.F. Guéry, D. Haeseler, O. Haidn, S.D. Heister, K. Hori, N. Ierardo, C. Kappenstein, A. Karabeyoglu, T. Klapötke, M.J. Klopstein, A. Korotkikh, B.M. Kosowski, C.J. Lee, D.B. Lempert, F. Maggi, A.P. Manzara, K. Menke, H. Nagata, I. Nakagawa, B. Natan, A. Neri, J. Neutz, O. Orlandi, B.A. Palaszewski, D. Pavarin, W.Q. Pang, P. Pempie, A. Pivkina, S. Peters, S. Petitot, S. Rashkovskiy, T. Sakurai, K.

Sawada, H. Schöyer, T. Shimada, Y.J. Shu, I. Simakova, V.P. Sinditskii, H. Singh, V.I. Trushlyakov, R. Tunnell, D. Yagodnikov, N. Wingborg, Q.L. Yan, V.E. Zarko, F.Q. Zhao.

另外, 许多非英语国家作者的语言表达由 Adam Cumming 博士、Anthony P. Manzara 博士、Bryan A. Palaszewski 先生和 Ruth Tunnell 博士进行了润色, 非常感谢他们耐心的帮助, 我们还要感谢所有作者的投稿和按照施普林格国际出版社 AG 的要求进行的排版所做的工作。

I.G. Assovskiy (谢苗诺夫化学物理研究所, 俄罗斯)、P. Bellomi (Avio, 意大利)、E. Bucci (Avio, 意大利)、Helmut Ciezki (DLR, 德国)、Charles Kappenstein (普瓦提埃大学, 法国)、Bernard M. Kosowski (MACH I, 美国)、K.K. Kuo (宾夕法尼亚州立大学, 美国)、Z. Mansurov (燃烧问题研究所, 哈萨克斯坦)、M. Persson (ECAPS, 瑞典)、S. Schleichriem (DLR, 德国) 和 N. Wingborg (FOI, 瑞典) 等在研讨会上做的更高质量的汇报, 可惜本书不能包含这些作品, 但非常感谢这些参会的作者。另外, 非常感谢 I. Palmucci 女士、D. Trache 先生、庞维强博士和 G. Colombo 先生在整个研讨会的组织和材料的准备中的付出。

这本书由其中的著者之一 (Luigi T. De Luca) 在意大利米兰理工大学发起, 退休后在韩国首尔建国大学继续, 在中国南京理工大学完成。衷心感谢建国大学和南京理工大学提供的优越的环境和专业支持。除了前言中列出的一些章节的作者, 张朝阳博士 (四川绵阳中国物理工程研究院)、张庆华博士 (四川绵阳中国物理工程研究院)、冯昊博士 (陕西西安近代化学研究所) 也提供了一些研究成果。

我们衷心地希望这一国际的共同努力的作品能帮助所有读者对错综复杂的事物、含能材料吸引人的秘密和令人费解的困难获得更好的理解, 拓宽引人入胜的空间推进视野。

Luigi T. De Luca, Toru Shimada, Valery P. Sinditskii, Max Calabro
2015.9.30

目 录

第 1 章 推进动力用含能材料简介	1
1.1 本书背景和简介	1
1.2 化学推进剂新组分	3
1.3 金属作为化学推进剂的含能燃料	5
1.4 固体火箭推进剂配方	6
1.5 固液混合火箭推进	10
1.6 新概念化学推进	11
1.6.1 先进的含能材料	11
1.6.2 材料基因组计划指导下的含能材料创制	12
1.6.3 原子层沉积技术下含能材料的表面工程	15
1.6.4 航天推进用含能离子液体推进剂	18
1.6.5 化学推进中的催化剂	20
1.6.6 高性能/低成本固体火箭发动机	22
1.6.7 太空商业化	23
1.6.8 含能材料的寿命管理	23
1.7 火箭系统推进	25
1.7.1 运载火箭推进	25
1.7.2 固体火箭发动机 (SRM) 系统	27
1.8 含能材料的应用	28
1.9 俄罗斯固体火箭推进技术发展调查	29
1.10 火箭和冲压发动机用膏体推进剂	30
参考文献	32
第 2 章 化学推进用新组分	41
2.1 可用于化学火箭推进剂的新型氧化剂的合成	41
2.1.1 固体火箭推进剂	41
2.1.2 高氯酸铵: 用途与危害	42
2.1.3 合成的氧化剂	43
2.1.4 原碳酸酯	44

2.1.5	结论	60
	参考文献	61
2.2	1,2,4,5-四嗪类富氮含能材料: 热和燃烧行为	66
2.2.1	引言	66
2.2.2	取代均四嗪的通用合成方案	67
2.2.3	CHN 四嗪类含能材料	69
2.2.4	CHN 类四嗪并唑基含能材料	76
2.2.5	CHNO 类四嗪含能材料	82
2.2.6	四嗪的氧化性酸盐	87
2.2.7	四嗪类配位化合物	91
2.2.8	总结	94
	参考文献	95
2.3	空间飞行器推进的新型含能环境友好材料研究	101
2.3.1	引言	101
2.3.2	含能氧化剂	102
2.3.3	含能胶黏剂	104
2.3.4	含能增塑剂	104
2.3.5	含能添加剂	105
2.3.6	结论	108
	参考文献	108
2.4	固液混合火箭的填料性能	110
2.4.1	重要燃料的性能	111
2.4.2	候选材料	113
2.4.3	文献检索—固液混合火箭燃料添加剂	114
2.4.4	热化学计算	120
2.4.5	燃料添加剂和胶黏剂的排序	125
2.4.6	进一步评估的建议	127
2.4.7	实例	127
2.4.8	结论	128
	参考文献	128
2.5	四唑盐作为火箭推进中含能材料	131
2.5.1	引言	131
2.5.2	2-二硝甲基-5-硝基四唑羟胺盐 (HADNMNT)	131
2.5.3	1,1'-二羟基-5,5'-联四唑二羟胺盐 (HATO) 的合成	135
	参考文献	138

2.6	3,4-二(3-氟二硝甲基咪唑-4-氧基)咪唑的合成与表征	140
2.6.1	引言	140
2.6.2	试验部分	141
2.6.3	结果与讨论	143
2.6.4	结论	146
	参考文献	146
第3章	金属粉作为化学推进的含能燃料	149
3.1	改性铝作为含能燃料在化学火箭推进中的发展前景	149
	命名表	149
3.1.1	背景	151
3.1.2	热化学特性	153
3.1.3	nAl 粉末	155
3.1.4	活化 Al 粉末	166
3.1.5	MgB 双金属粉末	171
3.1.6	不同金属粉末对比	174
3.1.7	结论	176
	参考文献	178
3.2	新型微米和纳米燃料: 高能量密度材料的生产、表征和应用	185
3.2.1	引言	186
3.2.2	纳米铝粉 (nAl)	187
3.2.3	微米硼化物	193
3.2.4	结论	196
	参考文献	197
3.3	铝粉在 ADN/GAP 复合推进剂中的燃烧行为	199
3.3.1	引言	199
3.3.2	试验部分	201
3.3.3	结果与讨论	202
3.3.4	结论	211
	参考文献	212
3.4	含不同纳米铝粉的固体推进剂激光点火特性	213
3.4.1	引言	214
3.4.2	试验部分	215
3.4.3	结果与讨论	218
3.4.4	结论	230
	参考文献	231

3.5	铝凝胶燃料在冲压发动机燃烧室的试验研究	235
3.5.1	引言	236
3.5.2	试验系统	237
3.5.3	结果与讨论	240
3.5.4	结论	249
	参考文献	249
第4章	固体火箭推进	251
4.1	推进剂配方对凝聚相燃烧产物特性影响	251
4.1.1	引言	252
4.1.2	推进剂燃烧表面形成 CCP 的详细分析	253
4.1.3	各因素对 CCP 性质的影响	257
4.1.4	结论	265
	参考文献	265
4.2	BAMO-GAP 共聚物基推进剂能量与燃烧特性	268
4.2.1	引言	269
4.2.2	试验部分	269
4.2.3	BAMO-GAP 基推进剂的能量特性	270
4.2.4	BAMO-GAP/RDX/Al 推进剂燃烧特性	277
4.2.5	结论	284
	参考文献	284
4.3	AP 对 HMX 的影响系统研究: 从热分析到燃烧	286
4.3.1	引言	287
4.3.2	试验原料及方法	288
4.3.3	结果与讨论	288
4.3.4	结论	295
	参考文献	296
4.4	含能胶黏剂固体推进剂的燃烧	298
4.4.1	引言	298
4.4.2	燃烧端面弯曲对燃烧速率的影响	299
4.4.3	临界燃烧直径	302
4.4.4	含能胶黏剂的二元混合物的燃烧模型	303
4.4.5	推进剂燃速的温度敏感性	307
4.4.6	结论	310
	参考文献	311
4.5	双氧化剂对复合固体推进剂燃烧的影响	312

4.5.1	引言	314
4.5.2	试验部分	315
4.5.3	结果与讨论	317
4.5.4	结论	327
	参考文献	327
第5章	固液混合推进	331
5.1	日本应用于经济太空发射的混合推进技术发展现状	331
5.1.1	引言	331
5.1.2	符合经济型专用发射器的化学推进的评估	332
5.1.3	固液混合推进空间运输三级发射装置的概念设计研究	335
5.1.4	固液混合推进技术	337
5.1.5	结论	351
	参考文献	352
5.2	固液混合火箭燃烧的内流场特性和低频不稳定性	357
5.2.1	内部流动的基本特征	357
5.2.2	数值方法	359
5.2.3	结果与讨论	360
5.2.4	非声学的低频不稳定性	365
5.2.5	结论	376
	参考文献	377
5.3	固液混合火箭发动机中石蜡燃料性能分析	377
5.3.1	引言	378
5.3.2	能量特性计算	379
5.3.3	热分解特性试验	381
5.3.4	燃料熔融特性试验	383
5.3.5	燃料退移速率测试试验	385
5.3.6	混合火箭发动机内流场数值仿真	388
5.3.7	结论	392
	参考文献	393
5.4	固液混合火箭退移速率增强与内弹道瞬态响应研究	394
5.4.1	引言	394
5.4.2	技术发展水平	394
5.4.3	结果与讨论	401
5.4.4	结论	410
	参考文献	412

第 6 章 新型化学火箭推进	416
6.1 激光增强化学推进的新概念	416
6.1.1 激光化学联合推进的原理	416
6.1.2 激光化学联合推进发动机的弹道	419
6.1.3 结论	420
参考文献	421
6.2 ADN 固体火箭推进剂的老化性能及其玻璃化转变特性	422
6.2.1 引言	422
6.2.2 推进剂配方设计	424
6.2.3 老化试验	426
6.2.4 试验方法	427
6.2.5 结果与讨论	428
6.2.6 结论	444
参考文献	445
原书作者 Luigi T. De Luca 教授写给庞维强博士的信	449

第 1 章 推进动力用含能材料简介

摘要：本书汇集了来自 13 个国家的作者的优秀论文，他们中有些人参与过重大太空探索任务。本章对整本书的结构和主题进行了综述，在众多论文作者和含能材料领域国际专家的支持下得以完成，概括了诸多领域的最新和未来需求的重点，包括化学推进（固体、液体、固液混合、膏体推进）的典型应用、非常规应用的相关领域和含能材料寿命管理等。本章还讨论了未来的新型含能材料和化学推进领域的新理念及相关实际问题，如质量控制、老化、危险、环境影响、废物处理和正在使用或不久的将来即将使用的含能材料的修复问题。本章对书中的每一章都给出了简要介绍，旨在帮助读者根据自己的需求或兴趣确定最适合自己的论文。本书的最后一章对俄罗斯在固体火箭推进的发展进行了历史综述。从理论和试验角度来看，其发展令人惊叹，但出于各种原因，人们对其仍然知之甚少。

1.1 本书背景和简介

本章^[1]对书中的内容所讨论的话题做了整体介绍，共分为 10 节，在众多论文作者和推进剂含能材料领域国际专家的支持和协作下得以完成。美国航空航天局（NASA）所绘制的图 1-1 详细总结了当前推进领域的最新发展。该图利用不同的颜色来区分拥有不同技术成熟水平（TRL）的不同类别的发动机（7~9 级表示可完全操作的系统）。另外，从表示功率密度（kW/kg）的参数化直线可以清楚地看到，在 $10^{-2} \sim 10^4$ 范围上，化学发动机相对电发动机更有优势。当今，化学推进是唯一一条通往太空的途径，并且在未来几十年间都将如此。化学推进的选择包含两种公认已经成熟的技术（固体和液体推进）和两种潜力巨大的技术（固液混合和膏体推进）。图 1-1 强调了目前化学推进的独特性：推重比（T/W）大于 1，但与其他推进装置比，化学推进的比冲表现平平。提高比冲的主要方法是从众多高能量密度材料（HEDM）中找到合适的组分。

本章的各节内容

本章概述了各领域的重要内容和未来需求，包含以下小节：化学推进剂新组分（1.2 节，参考文献[2-7]），金属作为化学推进剂的含能燃料（1.3 节，参考文献[8-12]），固体火箭推进剂配方（1.4 节，参考文献[13-17]），固液混合火箭推进