

现代固体推进技术



阮崇智文集



XIANDAI GUTI TUIJIN JISHU

西北工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代固体推进技术/阮崇智著. —西安:西北工业大学出版社, 2007. 5
ISBN 978 - 7 - 5612 - 2223 - 3

I. 现… II. 阮… III. 固体推进剂火箭发动机—文集 IV. V435 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 072102 号

出版发行: 西北工业大学出版社

通讯地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编: 710072

电 话: (029) 88493844 88491757

网 址: www.nwpup.com

印 刷 者: 陕西向阳印务有限公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 15.75 插页 4

字 数: 336 千字

版 次: 2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元(平装) 40.00 元(精装)



常规地地导弹



中程地地核导弹

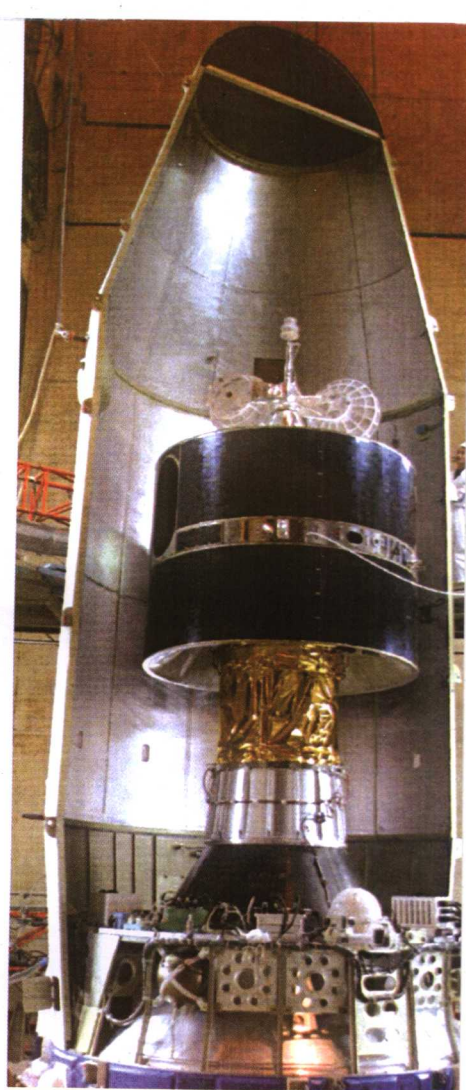


远程战略核导弹

我国固体战略、战术导弹



固体防空导弹



风云二号气象卫星

风云二号气象星，天下云图一览中；
欲攀地球同步点，靠我奋力一举动。
赤道高空求喜雨，银河两岸借东风；
牛郎织女争相看，神州来了小弟兄。

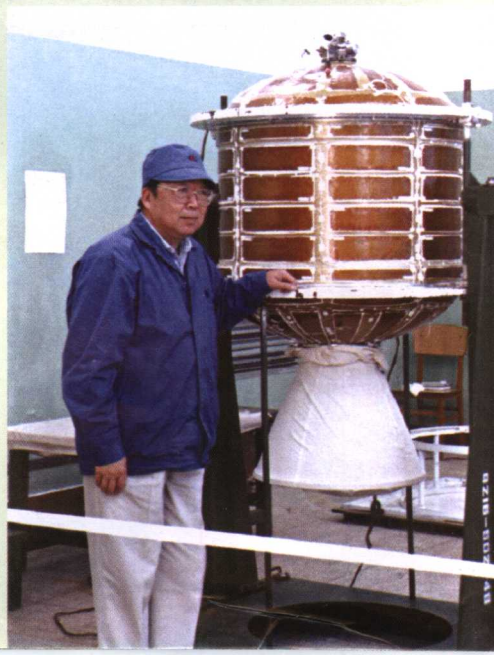
飞燕持铤舞长空，
李广神箭射弯弓。
今日练得好身手，
他年脱手缚苍龙。

导弹空中机动飞行

十年铸剑历风霜，一旦功成非寻常；
倚天抽得千钧剑，远上云霄试锋芒。
誓为平定千秋业，老骥伏枥志千里；
老骥伏枥志千里，一旦功成非寻常。

导弹起飞

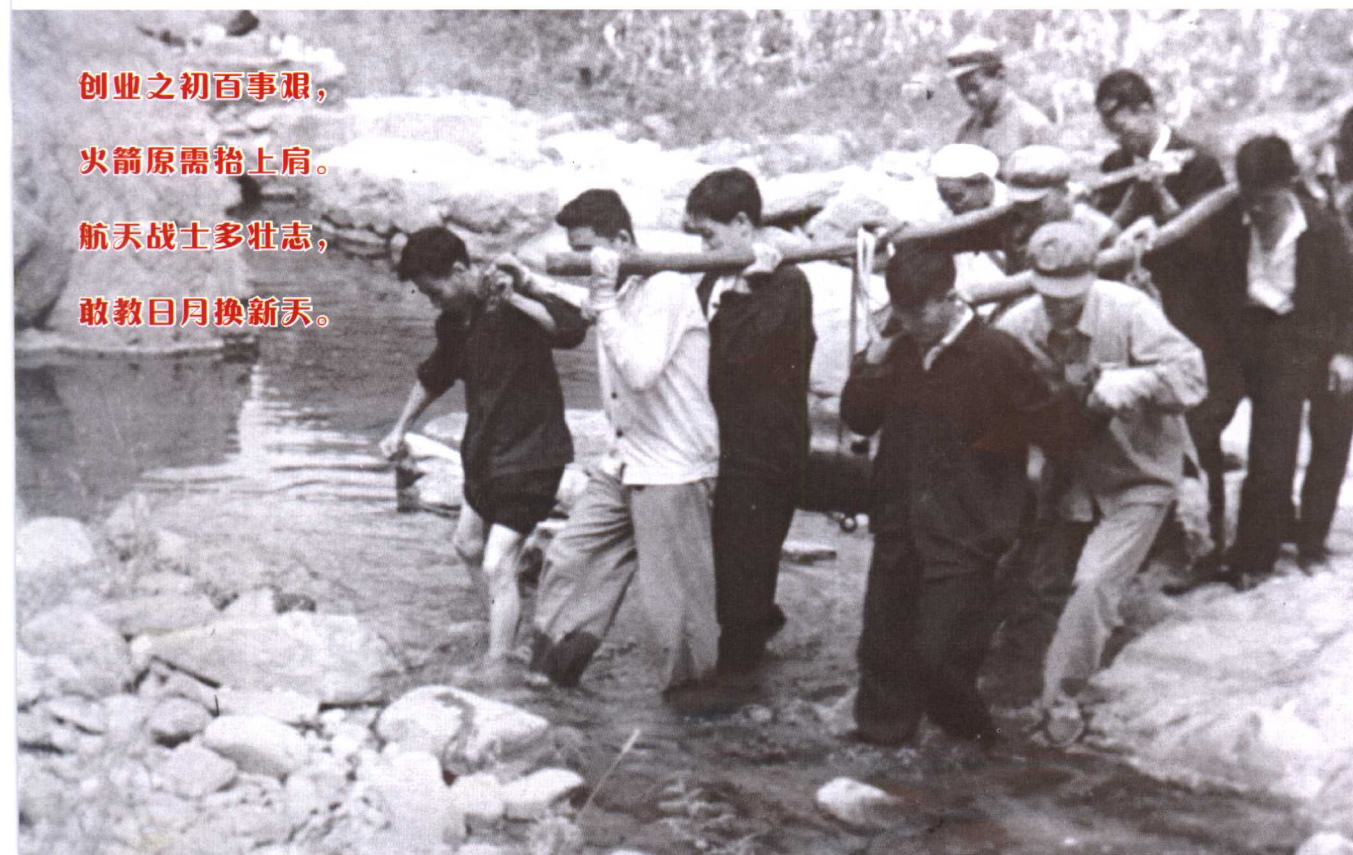
风云二号卫星远地点发动





1965年，钱学森先生与参加航天四院第一次技术工作会议的代表们合影

创业之初百事艰，
火箭原需抬上肩。
航天战士多壮志，
敢教日月换新天。



1962年，年轻的航天战士们肩抬发动机越过小溪，在野外做热试车。前排着白上衣者为本文作者。



与恩师国际宇航科学院院士杨南生先生在一起



与崔国良、王礼恒院士在国际会议上

阮崇智简历

1948—1953 年 晋察冀边区联中学习,并于北京师大附中毕业;

1954—1959 年 莫斯科门捷列夫化工学院学习,以各科全优成绩毕业;

1959—1961 年 在原国防部第五研究院一院六室参加工作,任工程组长;

1982—1984 年 任航天四院四十一所副所长;

1989—1994 年 任航天四院副院长,某重点型号副总设计师;

1996—2002 年 任航天四院科技委副主任,航天总公司科技委常委;

2002 年退休。

曾经主持或参加研发的项目如下:

1. 同步卫星远地点发动机设计

先后主持了“东方红二号”通信卫星远地点发动机 FG—15、FG—15B 和“风云二号”气象卫星 FG—36 远地点发动机设计和研制工作。所有上述三种共 10 台次发动机在轨工作都取得成功,达到很高的可靠性。

1984 年通信卫星发射成功后,记部级一等功。1985 年,作为主要参加者完成的“试验通信卫星及微波测控系统”项目,获国家科学技术进步特等奖。由于 FG—15B 远地点发动机在执行任务时的出色表现,1990 年,FG—15B 发动机获得国家质量金奖。1997 年 FG—36 发动机执行发射“风云二号”气象卫星任务成功。

2. 某重点型号研制

1988—1994 年在模样和初样阶段,担任某重点型号副总设计师,负责各级固体发动机初样研制工作,经过后来的试样研制和飞行试验考核,达到了高性能、高精度和高可靠性的要求,目前该发动机已经定型。

3. 战术导弹固体发动机设计

(1)1995 年,负责某型号固体发动机研制。2000 年,准确判断出飞行试验发动机事故原因,解决了排除故障的关键技术问题,现已成功地进行了后续试验,发动机性能满足导弹总体各项要求,已经定型。

(2)负责某型号预先研制,1999 年 11 月试车成功,是当前性能水平最高的战术导弹固体发动机。



获奖情况：

1978 年	全国科学大会先进工作者
1984 年	国家科技进步特等奖（主要参加者）
1991 年	国家有突出贡献专家,享受国务院政府特殊津贴
1998 年	航天部科技进步二等奖
2001 年	国防科技进步三等奖
2002 年	国防科技进步二等奖
2004 年	国家科技进步二等奖(主要获奖者)

序 言 1



阮崇智同志 1937 年出生于一个革命家庭,成长于革命战争年代,从小受到革命的洗礼,养成了忠诚于革命事业的高尚品格和艰苦奋斗的优良作风。新中国建立后,他接受正规教育培养,1954 年被国家选派到苏联莫斯科门捷列夫化工学院深造,1959 年以优异成绩毕业。学成回国后被分配到国防部第五研究院,投身于固体推进事业的创建,迄今已近 50 年了。50 年来,他兢兢业业,勤奋工作,刻苦钻研,

勇于创造,为这一事业付出了毕生心血,做出了重大贡献,积累了丰富的丰富经验,建树了卓越业绩,成为该领域一位享有盛誉的专家。

我与阮崇智同志自 1957 年同学相识,又先后进入航天系统工作,且都从事固体推进事业,可谓老同学、老同事、老朋友。我深知他为人厚道,谨慎谦虚,感情丰富,言谈风趣,且爱好广泛,多才多艺,尤爱音乐,善演能歌;也见证了他从技术员到研究员、老专家,从一般技术干部到所级、院级技术领导的发展进步;更目睹了他近 50 年做出的无私奉献和取得的卓著成绩,以及他获得的多项奖励和肯定。

我国的固体推进事业,真正是自力更生创建和发展起来的,今已成为我国航天领域的一大门类,为“两弹一星”和“载人航天”伟业做出过应有的贡献,并继续为国防建设和航天发射提供必需的固体推进装置。固体推进技术的发展是一个从无到有、从小到大的艰苦奋斗历程。这个历程的每一步,每一阶段,从不稳定燃烧、药柱裂纹、壳体脱粘等早期技术关键的突破,到由小型到大型各类固体发动机研制技术难题的解决;从新材料、新技术到新型推进剂的研发应用;以及武器系统的从液体到固体、从战术到战略、从陆上到海下、从固定发射到机动发射等重大转变,阮崇智同志都做出了自己的贡献,建树了突出的业绩,多方面渗透着他的心血汗水,闪烁着他的才智光辉。

现在阮崇智同志已是“从心所欲,不踰矩”之年的老者了,他说将向事业告别了,此时,他把自己毕生尽力所为之所得(应该是一部分吧)汇集成册出版,我看这也是对事业的一份贡献。因为该文集所涉内容很丰富,既有亲历研制实践的经验总结,又有升为理论的探讨,从实践和

理论上讨论了固体推进技术的学科内涵,论述了各类固体发动机的设计思想和研制技术关键的解决途径,还评述了当今世界上固体推进技术的应用和发展,揭示了该学科的发展方向,所以相信它对固体推进技术的从业同行会有所裨益,尤其是对于本学科的后来人定有启迪与促进。

我为老同学、老同事、老朋友阮崇智的一生有为,成绩斐然而高兴。值此文集出版之际,谨表热烈祝贺!

崔国良

2006 年 12 月

序 言 2

我很高兴能为阮崇智同志这本文集作序。航天四院科技委提出编辑这本文集,主要是表彰阮崇智同志 40 多年来为航天、为固体推进技术的发展做出的重大贡献,宣扬他的学术成就和学术见解。

固体推进技术及其动力装置在导弹应用上占有独特的地位,与国防实力密切相关,在航天领域具有广泛的应用。我国的现代固体推进技术是在党的领导下,主要依靠自力更生、艰苦奋斗、大力协同,从无到有,从小到大逐步发展起来的,已为我国提供了一批战略战术武器、运载火箭和航天飞行器所需的动力装置,在“两弹一星”、“载人航天”和当今的高新工程中,做出了重要贡献,是我国自主创新的一个范例。在近 50 年的研制历程中,几代四院人,转战南北,在边疆草原,在大山深处,在十分艰苦的条件下拼搏、奋斗,协力攻关,从理论和实践上发展了这门学科,推进了事业的发展。

崇智同志 1959 年从莫斯科门捷列夫化工学院毕业回国后,就投身于固体推进技术的创业和发展中,参加了不稳定燃烧、药柱强度、 $\Phi 300\text{mm}$ 发动机研制等技术攻关,负责了“红旗四号”、“东方红二号”远地点发动机研制,他也是新一代战略、战术重点型号发动机的技术领导。他在固体发动机总体设计、燃烧、内弹道等领域有深厚的理论基础和丰富的经验,提出或推广了一些新的理论和方法。在固体推进技术的发展方向上,他适时提出真知灼见。他十分关心培养年轻一代,是大家十分尊重的老专家。

本文集收编了他几十年来的主要论文、报告,是他长期辛勤耕耘的结晶,内容涉及现代固体火箭发动机的发展历程、发展方向;热力计算、内弹道计算、大型发动机、中小型战术发动机的主要关键技术;固体火箭冲压发动机技术;介绍了苏联及俄罗斯固体火箭发动机发展情况;提出了固体火箭发动机在航天运载、战区防御武器中的应用;等等。这些内容和学术见解对本领域的发展有重要的参考价值,也是一本不可多得的学习材料。

叶定友

2006 年 5 月 8 日



前 言

编辑这本文集的目的是为了论述现代固体推进技术,说明它是航天技术学科的一个重要门类,应该在科学殿堂上占有一席之地。之所以强调“现代”二字,是因为它与第二次世界大战期间的火药火箭弹技术大不相同。它融会多学科、多门类先进技术成果,突破了大型固体发动机研制的关键技术,成为导弹与航天技术领域内一项十分重要的新兴的现代工程技术。

固体推进技术及其动力装置在导弹上的应用占有独特的地位,与国家防务能力密切相关,是一项十分敏感的技术。我国现代固体推进技术是完全依靠自己的力量,经过艰苦创业,在老一辈技术专家的指导下,逐步发展起来的,现在已经为我国武器装备、运载火箭和航天飞行器提供了所需的动力装置,在“两弹一星”和“载人航天”事业中做出了贡献。在近 50 年的研制过程中,形成了一支长年拼搏奋斗在艰苦地区、具有高度献身精神的技术队伍,也从理论和实践上发展了这一学科。作为其中一名老战士,在行将向事业告别谢幕的时候,留下一本论文集,想告慰苍天的是“我们尽力了”。本书汇集了本人历年来撰写的文章,讨论了这一学科的内涵和固体火箭发动机在当今世界上的应用和发展,从中可以概略看出这一学科的发展方向。文章不涉及技术细节,着重于理论上的探讨、设计思想的阐述、工作经验的总结和国外发展情况的评述。

今后,在新世纪伟大的民族复兴事业中,随着国家防务和航天运载需求的增长和新技术、新材料的问世,固体推进技术会有更大的发展。中国的发展来日方长,希望后来者继续努力,保持本学科始终处于现代科学技术的前沿,为国家和民族复兴做出新贡献。

阮崇智

2006 年 4 月 6 日

目 录

现代固体推进技术.....	1
固体火箭发动机中的一维流问题	20
固体发动机热力学计算	34
关于燃速相关性问题.....	100
固体推进剂远地点发动机的研制和关键技术.....	108
大型固体火箭发动机研制的关键技术.....	121
航天固体火箭发动机的特点.....	131
固体推进航天运载火箭技术.....	144
军用卫星及其固体运载工具.....	154
苏联和俄罗斯固体导弹发展历程.....	168
战术导弹固体发动机的关键技术问题.....	178
空防导弹固体发动机研制中的关键技术问题.....	184
苏联和俄罗斯防空导弹武器发展历程和现状.....	194
战区防御武器的动力装置.....	202
整体式冲压发动机的应用.....	212
固体发动机贮存性能与寿命问题.....	222
2002 年航天四院电视栏目“航天人生”访谈摘要	236

现代固体推进技术

【摘 要】 本文论述了现代固体推进技术。文章简要回顾了现代固体推进技术的形成和发展历程,说明了它的特点和应用;重点论述了方案设计思想,发动机工作过程研究,结构力学分析,推进剂研究,固体发动机工艺学和可靠性系统工程等主要内容,强调了这一学科发展的现代性。其中,还记述了我国固体推进技术的发展和当前技术水平,以及对今后发展的展望。

【关键词】 固体推进剂火箭发动机;性能预计;结构力学;固体推进剂;固体发动机工艺学

大型固体发动机主要应用于中、远程导弹作为动力装置或作为大型航天器的运载工具。经过几十年的发展,它已经成为一类重要的导弹和航天飞行器动力装置。固体推进技术也成为一项独立的工程技术学科。现代固体推进技术是以研制固体火箭为中心,包括研究、设计、制造、试验全过程和产品制造工艺各方面的一项多专业综合性工程技术,其内容主要涉及火箭与发动机工程设计与理论研究,推进剂研究与装药制造工艺技术,结构材料与工艺技术,以及发动机质量监测、性能测试及实验技术。它广泛吸取现代科学技术的成果,形成了许多独特的研究学科和工艺技术,并将不断发展,以适应导弹与航天事业发展的需求。

1 现代固体推进技术的发展

中国是火箭技术的故乡。黑火药火箭发源于宋代,明代戚继光将军的火箭车营中,每营有火箭车 24 辆,装箭 12 920 支,万箭齐发,火力甚猛,是当时世界上最先进的火箭武器。后来这一技术传到欧洲。20 世纪 30 年代,苏联成功制成直径分别为 24 mm 和 40 mm 的火药药柱,研制成功采用 7 根药柱组合装药的 PC—82,PC—132 火箭弹。为了进一步改进这些火箭弹的性能,1933 年,巴卡也夫(А. С. Бакаев)建议采用他所在的第 6 研究所(НИИ—6)研制的含有硝化甘油的 H—火药用于火箭,研制成功齐射式双基药火箭弹。1941 年 6 月 21 日,也就是卫国战争爆发的前一天,斯大林亲自视察了 M—13(PC—132)火箭弹和 БМ—13 发射车,并命令展开批量生产。这就是后来在红军战场上传为佳话的“喀秋莎”火箭。1943 年,巴卡也夫建成了 H—火药连续生产线。整个卫国战争期间,这一类型的火药火箭弹总共生产了 14 400 枚。第二次世界大战以后,不少苏联火箭技术界的学者虽然已经看到复合推进剂的发展前景,但是由于战时火药火箭弹的辉煌业绩和发展惯性,技术的发展依然沿着“喀秋莎”和 H—火药的方向进行。战后,莫斯科热工研究所研制了射程为 70 km 的火箭弹——“月亮”。第 147 研究所

(现为“合金”科研生产联合体)相继研制了“冰雹”(Град)、“风暴”(Ураган)和“旋风”(Смерч)等齐射火箭系统。直到现在,这些武器在世界各地的局部冲突中还有应用。

第二次世界大战以后,在冷战阴云影响下,苏联和美国在吸取德国火箭技术的基础上,使火箭技术进入了一个飞速发展的新时期。展开了以苏联液体火箭技术与美国固体火箭技术之间的竞争。在苏联,火箭技术研究所(ГДЛ, РНИИ)的领导人,如著名的第一特种设计局(ОКБ—1)总设计师科洛廖夫(Королев)等,都是从1929年开始就研究液体火箭的。因此,在战后时期苏联液体火箭的研制规模和取得的成就都很大,研制出了P—7洲际导弹,发射了第一颗人造卫星和第一艘载人飞船,在液体火箭技术上领先。但是它的双基药火箭弹技术已经过时。美国采取了相对均衡的发展策略,在液体火箭技术上暂时落后,但在特别适用于军用导弹的固体火箭技术方面却遥遥领先。现代固体火箭的雏形就是在美国喷气推进实验室(JPL)孕育成型的。钱学森先生是当时美国火箭技术的开拓者,也是现代固体推进技术的奠基人。按照当前的技术水平,火箭技术的主要特点如下:

- 1)采用浇注成型、内孔燃烧、与壳体壁面黏结的复合推进剂药柱,制成大型发动机,其直径达3m以上,装药量可达几十到几百吨,工作时间可长达130s;
- 2)采用新型结构材料,质量比(W_p/W_m)在0.9以上;
- 3)发动机具有较高的推进动力特性和精度(称为“精密弹药”);
- 4)有推力向量控制能力。

1956年,美国成功地研制出“北极星”固体导弹,标志着现代固体推进技术趋于成熟。打开了研制大尺寸、高性能、长时间工作的固体发动机的发展之路。之后,美国又先后发展了“海神”、“三叉戟”、“民兵”和“MX”等中、远程固体导弹和大型航天运载工具上的固体发动机,使得美国成为现代固体推进技术方面力量最雄厚、产业规模最大的国家。

1.1 固体发动机是导弹武器的主要动力装置

当前,除巡航导弹外,世界各国都采用固体发动机作为导弹的动力装置。它之所以能得到如此广泛的应用,与其本身特点有关,主要是:

- 1)结构简单,工作可靠;
- 2)易于维护,使用方便;
- 3)长期待命,立即发射;
- 4)启动迅速,善捕战机;
- 5)体积紧凑,便于装载。

更为重要的是,经过几十年来的发展,固体发动机的性能不断提高,功能日臻完善,已经能够满足从野战火箭到机动洲际导弹的多方面要求,成为导弹武器的主要动力装置。

冷战结束以后,导弹技术的发展呈现一些新的趋向。一是导弹-核武器的发展不再追求射程和爆炸当量。美国主要是发展低辐射或常规高爆弹头,以作为用于实战的先发制人的武器。俄罗斯主要发展“白杨”(Тополь)系列导弹,有可机动变轨弹头,提高了突防能力,应对美国导

弹防御系统。二是加紧发展导弹拦截技术。美国发展了爱国者导弹(PAC-3)和标准3(SM-3)导弹,以及国家导弹防御系统(NMD)。俄罗斯则着重发展C-300,C-400空防导弹;同时,相应地发展了弹头侧向喷气校准技术和动能杀伤器(KKV)技术等。三是固体推进技术不但在发达国家得到发展,而且得到许多发展中国家的关注。

也正因为如此,固体推进技术成为一项十分敏感的技术。我国现代固体推进技术是完全依靠自己的力量,经过艰苦探索发展起来的。1982年10月12日,潜艇水下发射固体火箭取得成功。1983年12月,大型固体发动机试车成功。又经过20多年的不断努力,目前我国固体推进技术已经比较成熟,可以满足国家武器装备各方面的要求(见图1),其性能水平如表1所示。

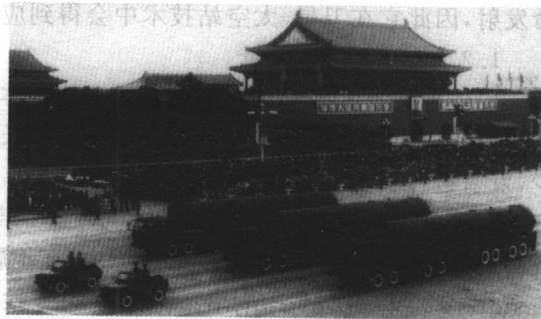


图1 我国固体导弹部队在阅兵式上

表1 我国当前固体发动机的性能水平

状 态		一般水平	较高水平
比冲/($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)	地面状态	2 400 (7MPa)	2 548 (9MPa)
	高空状态	2 840	2 940
质量比 W_p/W_m	金属壳体	0.85	0.88
	复合材料壳体	0.9	0.92

1.2 固体发动机是航天发射技术中的重要力量

当前,固体发动机已广泛用于各种航天飞行器和运载工具。在运载工具技术发展过程中,美国采用液体发动机为芯级,固体发动机为起飞级的动力结构。这是他们贯彻始终的设计思想。它充分发挥了两类动力系统的优势,确实是一条实用、经济和可靠的技术途径。对此,Thiokol公司还做了专题研究。对于现有国家运载系统,借助固体助推器,可以满足30 000~186 000 lb(13 620~84 444 kg)有效载荷的发射要求。由于它在运载能力上的灵活性,工作的可靠性和低成本,在下一代运载工具中仍将得到应用。美国新一代运载火箭“德尔它—4”和“宇宙神—5”就都采用了固体捆绑助推器。

这一设计思想也影响到法国和日本。在1999—2002年5年间,在西方工业发达国家中形成每年100台份,装药量8 000 t的规模,使固体推进技术在民用航天和军用导弹方面相得益彰。俄罗斯航天界在航天运载工具上只采用液体发动机,没有给固体推进技术一个发挥其优势的机会。我国的情况与俄罗斯类似,现代固体推进技术的发展主要限于导弹技术方面。在固体推进航天运载技术的近期发展规划上,应该有相应的重点项目。这将缩小固体推进技术

与发达国家相比的差距,促进其生存与发展。

固体发动机在航天领域中可用作大型运载工具的第一级或捆绑起飞助推器;也可用作全固体的运载火箭;它还可用作航天飞行器的近地点发动机、远地点发动机、变轨发动机和宇航员座舱的逃逸火箭或返回舱降落时的制动发动机。由于它能在太空环境中长期贮存,随时待命发射,因此它在卫星-太空站技术中会得到应用。

1.2.1 大型运载火箭

固体推进技术的特点在运载火箭上主要体现在以下几个方面:

1)使用方便。固体发动机可以在发射前长期处于待发射状态,不需要临场加注,检测项目少,发射过程安全性好,准备时间短。

2)可靠性高。在固体发动机中,可动作的部件较少,可以花费较少地面试验的代价,取得较高的可靠性。在美国航天发射故障中,真正属于固体发动机的失败,只有航天飞机助推器、Castor—120 和 GEM—40 等少数几次,可靠性高达 0.996。

3)密度高。固体推进剂的密度高。从单位质量比冲的角度看,液体推进剂比冲高;但从单位体积比冲看,固体推进剂的比冲高(见表 2)。固体发动机轻巧灵便,特别适用于体积受限的场合。

4)启动性能好。善于在较短时间内发挥很大推力,特别适用于起飞助推器。

由于固体发动机密度比冲高,又能在短时间内发挥出很大推力,因此,西方国家运载工具中,惯常在第一级上应用固体发动机。这些发动机的推力在起飞推力中占了很大的百分比。因此不应称之为助推器或“零级”发动机,应该视为第一级发动机。这类发动机大都采用分段技术,每段的质量接近 150 t。日本 H2A 火箭的 SRB—A 的推进剂重为 65 t,是当前最大的不分段的发动机(见表 3)。

表 2 推进剂的密度比冲

推进剂	HTPB/AP	UDMH/N ₂ O ₄	液氧/煤油	液氢/液氧
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.8	1.15	1.05	0.35
理论真空比冲 $I_{\text{sp}}/(\text{kN} \cdot \text{s}^{-1})$	3 038	3 332	3 528	4 508
密度比冲 $I_{\text{sp}} \times \rho$	5 468	3 831	3 704	1 578
体积比	1.0	1.5	1.5	3.0

表 3 第一级固体发动机在起飞推力中的百分比

运载工具	航天飞机	大力神—4B	阿利安—5	H2A(日本)
固体发动机	RSRM	SRMU	MPS	SRB—A
R/(%)	82	100	93	80