

普通高等教育
兵工类规划教材

复合火药

马庆云 编著



692

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书比较全面和系统地介绍了复合火药的组成和组分,及其特有的物理化学性能;复合火药制造工艺;复合火药成型的基础;复合火药中主要组分;制造复合火药的技术安全;复合火药的力学性能;复合火药的化学性能及复合火药的发展。

本书可做高等院校的教材,也可供从事这方面科研工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合火药/马庆云编著. —北京:北京理工大学出版社,1997.6

ISBN 7-81045-267-3

I. 复… I. 马… III. 混合炸药-教材 IV. TQ564.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 05354 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码 100081 电话 68422683

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 15印张 363千字

1997年6月第1版 1997年6月第1次印刷

印数:1-800册 定价:19.00元

※ 图书印装有误,可随时与我社退换 ※

出版说明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下,在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务,共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革及提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新及利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、制定质量标准及明确岗位责任,制定了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等个5个文件。根据兵工类专业的特点,成立了十个专业教学指导委员会,以更好地编制兵工专业教材建设规划,加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系列配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵总教材编审室在总结前面两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划,共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的,专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必须对兵工专业教材的系列配套,对提高教学质量和培养国防现代化人才,对促进兵工专业科学技术的发展,起到积极的作用。

本教材由牛秉彝教授主审,经中国兵器工业总公司火炸药专业教学指导委员会复查,兵总教材编审室孙业斌教授审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1994年11月

火药系列教材

复 合 火 药

火药系列教材编审委员会：

主任委员：王泽山

常务副主任委员：孙业斌

副主任委员：牛秉彝 戴健吾 刘继华

委员：(按姓氏笔划)

王泽山	牛秉彝	白木兰	刘继华	孙业斌
肖学忠	罗秉和	陆安舫	赵子立	张端庆
徐复铭	徐德平	谭惠民	戴健吾	

火药系列目录

序号	教材名称	主编人
1	火炮与火箭内弹道原理	张柏生
2	火药装药设计原理	王泽山
3	火药用原材料性能与制备	张端庆
4	火药实验方法	王泽山
5	火药设计基础	黄人骏
6	火药物理化学性能	刘继华
7	单基与多基火药	牛秉彝
8	双基火药	张续柱
9	复合火药	马庆云
10	火药燃烧理论	王伯羲

火药系列教材总序

“火药系列教材”就要问世了，我们谨以这套教材献给我国火药行业的全体同仁，希望它为我国火药科学技术、为培养火药专业后继人才做出贡献。

常期以来，火药不仅在军事上用于枪炮弹丸的发射和火箭导弹的推进，而且在民用方面也有着广泛的用途。火药(后来叫黑火药)是我国古代四大发明之一，公元3世纪我国古代劳动人民就发现了火药的燃烧性能，公元10世纪火药用于军事，此后中国出现了多种火药兵器。公元13世纪，火药才传入阿拉伯国家，进而传入欧洲，得到了广泛的应用。恩格斯曾提到中国的黑火药打破了欧洲16世纪的城堡。直到19世纪末，黑火药一直是各种枪炮和火箭的唯一发射能源，它对军事技术、人类文明及社会进步都产生了深远的影响。近代火药的制造始于19世纪初，1833年法国人布拉科诺(Braconnot)首先制出了硝化纤维素，为火药的革新打开了大门。1865年美国化学家阿贝尔F.A.(Abel F.A.)用细断法制得了安定的硝化纤维素，直到1884年法国化学家维也里P.(Vieille P.)用醇醚混合溶剂处理硝化纤维素，解决了它的密实成型问题，发明了单基火药。由于它燃烧时无烟且威力比黑火药大，从而取代了黑火药作为发射药的地位。1847年意大利人索布雷罗(Sobrero)制造出硝化甘油。1862年瑞典化学家诺贝尔A.B.(Nobel A.B.)开设了第一个硝化甘油工厂，1888年他用低氮量硝化纤维素和硝化甘油发明了巴里斯太型双基火药，为近代火药增加了新品种。第二次世界大战期间，为了满足大口径炮弹、大型火箭及形状复杂的发射装药要求，1937年在德国出现了三基药。1942年美国又研制出了一系列的复合火药，本世纪60年代又出现了高能量、高燃速以及力学性能和工艺性能良好的火药，明显地提高了推进火箭用的火药性能，与此同时，又加强了用于推进弹丸的装药研究。近年来，世界各国继续进行新火药和火药装药研究，也开展了改善单项性能指标的研究，研制适应不同武器要求的特种性能火药。例如研制高能低烧蚀发射药、高能高强度发射药、高能无烟推进剂、高能平台推进剂、高燃速推进剂及低燃速推进剂等，并以提高火药生存能力为重点，发展低易损性火药。

解放前，我国的火药工业发展缓慢，自1895年上海建立第一所单基无烟药厂后，到1945年才建立第一所双基火药厂。

建国以来，我国的火药工业与火药科学技术随着国民经济的迅猛发展，从仿制到自行设计，有了长足发展。我国研制的火药已有很多品种接近或赶上世界先进水平。但就火药学科总体而言，我国还落后于经济发达国家。为了使我国火药科学技术进一步发展，尽快缩小与先进国家的差距，达到国际水平，我们非常需要培养一支掌握现代火药知识且结构合理的技术队伍。这是振兴我国火炸药行业的百年大计，这套火药系列教材就是为了实现这一目的而编写的。另外，我国有一大批在火药园地上辛勤耕耘了几十年的专家，他们在长期的教学、科研和生产中，取得了丰硕的成果并积累了极其丰富的经验，这是我国火药行业非常宝贵的财富。现在这些专家大多年事已高，非常希望把他们多年积累的知识传给后人，进而发扬光大。这套“火药系列教材”也是为了实现专家们的这一心愿及为祖国留下这一宝贵财富而编写的。

“火药系列教材”共10本，包括火药原材料、设计理论、燃烧理论、生产工艺、应用技术、实

验与性能以及安全技术等各个方面内容,取材适当、重点突出、符合专业教材大纲要求。既反映现代火药科学技术水平及最新成果,又结合我国火药科研、生产现状及编著者本人多年积累的教学、科研经验。与国内已出版的同类专著和教材相比,内容有较大幅度的翻新,有一部分教材则系国内首次公开出版。本系列教材全面采用国家法定计量单位,贯彻执行国家现行标准,读后将令人有耳目一新之感。

本系列各门教材均聘请实际经验丰富、学术造诣较深的教授和副教授担任主编,编写大纲于1988年5月经专家审定后,教材的初稿又通过火药系列教材编审委员会初审和专家主审,最后由“兵总”教材编审室审定定稿。

“火药系列教材”的出版,归功于各编者数年来锲而不舍的辛勤劳动,归功于编审委员会各位专家的热情指导,归功于“兵总”教材编审室的积极倡导与卓有成效的努力工作,归功于中国兵器工业总公司教育局及有关领导的关心和支持,还归功于北京理工大学出版社和有关院校印刷厂的鼎力协助,我们对此深表感谢!

为了国防科学技术的现代化,我们期待所有的火药工作者,努力贡献自己的劳动和智慧,攀登火药科学的新高峰!

在我国编写“火药系列教材”尚属首次,限于水平,教材中的缺点、错误或不尽人意之处在所难免,我们热切希望读者不吝赐教。

“火药系列教材”编审委员会

王泽山 孙业斌

1993.2

前 言

随着聚合物化学和物理学的发展和广泛应用,作为固体推进剂重要的一支以聚合物作为主要组分的复合火药,在实用和理论研究上都取得很大进展。有关复合火药的论文、报告、专利等资料虽不少,但都是零星和片断的。对复合火药系统地论述专著却很少。无论是军事上,还是和平事业上,复合火药的研制与应用愈来愈为人们所重视。为此,我们将有关复合火药在科学研究领域的新成就;复合火药的化学与制造工艺和主要特性;以及成型所涉及的基础理论等编写成此书。

书中内容是本着加强基础理论教学,努力体现理论联系实际的原则。着重论述了复合火药的组成;主要物理化学性能;化学与制造工艺和成型的理论基础;制造复合火药的技术安全;复合火药的力学性质;老化性能和复合火药的发展。关于复合改性双基火药内容已列入“双基火药”一书中详细论述,本书不再重复。在编写过程中,得到了牛秉彝教授、刘天河教授的帮助,在此,表示感谢。

由于复合火药是火药中的一支,它本身涉及的学科范围又十分广泛,因此,在编写工作上存在一定的困难。书中不妥和错误之处在所难免,希望读者批评。

编 者

1997.3

目 录

绪 论	(1)
1. 复合火药的历史	(1)
2. 复合火药的用途	(3)
3. 火箭技术对复合火药的要求	(6)
4. 复合火药的优缺点	(7)
第 1 章 复合火药的种类和组成	(8)
1.1 复合火药的种类	(8)
1.2 复合火药的配方组成	(8)
第 2 章 复合火药的组分	(13)
2.1 氧化剂	(13)
2.2 燃料粘合剂	(27)
2.3 金属和金属氢化物燃烧剂	(35)
2.4 燃烧催化剂	(40)
2.5 固化剂、稀释剂、增塑剂和防老剂	(42)
第 3 章 复合火药主要组分的燃烧性能	(46)
3.1 燃烧过程的表征	(46)
3.2 氧化剂对复合火药燃烧性能的影响	(55)
3.3 燃料粘合剂对复合火药燃烧性能的影响	(60)
3.4 金属燃烧剂对复合火药燃烧性能的影响	(62)
3.5 燃烧催化剂对复合火药燃烧性能的影响	(62)
第 4 章 典型复合火药及其制造	(71)
4.1 几种典型复合火药	(71)
4.2 复合火药的制造工艺	(90)
第 5 章 复合火药成型基础	(107)
5.1 燃烧粘合剂的加工性质	(107)
5.2 燃料粘合剂的加工与松弛过程	(110)
5.3 燃料粘合剂的流动特性	(111)
5.4 影响复合火药流动性的主要因素	(117)
5.5 聚合物的交联与流动性能	(122)
5.6 热塑性聚合物与热固性聚合物粘度变化的比较	(123)
第 6 章 制造复合火药的技术安全	(125)
6.1 复合火药的危险性	(125)
6.2 几种常用的感度实验方法	(129)
6.3 复合火药组分的危险性能	(132)
6.4 复合火药生产的技安措施	(135)
6.5 废药的销毁	(143)
第 7 章 复合火药的力学性能	(145)

7.1	复合火药装药受力状态的计算	(146)
7.2	复合火药的力学性能实验	(149)
7.3	对复合火药力学性能的要求	(152)
第8章	复合火药的老化性能	(171)
8.1	复合火药老化的特征	(171)
8.2	贮存期的估算	(185)
8.3	阻滞复合火药老化的方法	(188)
第9章	复合火药的发展	(194)
9.1	各国对复合火药发展中采用的关键技术	(194)
9.2	高能量密度材料	(197)
9.3	低特征信号复合火药	(197)
9.4	不敏感的复合火药	(200)
9.5	高燃烧速度复合火药	(200)
9.6	今后研究方向	(203)
9.7	复合火药无烟化实验	(205)
9.8	无烟叠氮复合火药	(208)
9.9	叠氮复合火药的安全性能	(216)
9.10	低燃速复合火药	(217)
参考文献	(226)

绪 论

1. 复合火药的历史

复合火药是固体推进剂的一种,属于化学推进剂范畴。复合火药是一种能够燃烧产生气体的结构致密的材料,室温下它是稳定的。它和一般燃料不同之处是不依赖大气中的氧,而自身含有一定的能量,在一定的条件下释放做功。复合火药是由氧化剂(高氯酸盐、硝酸盐),燃料粘合剂(高分子化合物,如聚氯乙烯、聚氨基甲酸酯等),以及其它附加成分等组成的异相体系。

在液体推进剂火箭中,某些聚合物可作为构成火箭的结构材料。在固体推进剂火箭中,聚合物既可作为发动机的结构部分,又可作为产生动力的固体推进剂。

聚合物本身可以作为一种燃料粘合剂提供可燃元素,也可以作为既含氧又含可燃元素的固体推进剂。例如,橡胶火药所用的橡胶就是能提供可燃元素的燃料粘合剂,而硝化纤维素则是氧化剂与燃烧剂的结合体,在同一个分子里,含有硝酸酯— ONO_2 基团和可燃元素碳和氢,均质类硝化纤维素为基的火药(包括单基和双基火药)属于此类火药。

氧化剂和燃烧剂是物理结合体时,聚合物作为燃料源,再加上氧化剂高氯酸铵等固体组分组成异相混合物,称之为复合火药。

黑火药是复合火药的始祖,其中氧化剂为硝酸钾,燃烧剂为木炭,燃料粘合剂为硫。由于黑火药的能量和机械性能皆差,不能应用于现代固体火箭之中。直到 1884 年才开始第一次用聚合物硝化纤维素代替了黑火药。

40 年代初,首次应用沥青和高氯酸钾混合物是最初的复合火药。当时,沥青火药用于喷气助推火箭,实际比冲为 $1850 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{kg}$ 左右,机械性能很差。但是,当时只有硝化纤维素为基的均质火药的情况下,它为进一步发展性能优良的复合火药开辟了新领域。

从 40 年代到现在,复合火药得到了迅速的发展。目前,复合火药已具有较为理想的能量、机械性能和燃烧性能。例如,用聚硫橡胶、聚氨酯、聚氯乙烯等高分子化合物代替沥青,用高氯酸铵代替高氯酸钾而做成的聚硫橡胶火药、聚氨酯火药、聚氯乙烯火药,以及利用增塑的硝化纤维素做为燃料粘合剂的复合改性双基火药(已在火药化学与工艺学中详细论述)等都是现代广泛应用的复合火药品种。

应该指出,聚硫橡胶火药对固体推进剂最大的贡献是可使用简单的浇铸技术而能将其与火箭发动机壳体紧密地连接在一起,使制造过程简化,也减低了发动机的壁厚,合理地提高功效。复合火药的出现与发展大大地促进了固体推进剂火箭的发展与提高。

复合火药经点火可在瞬间燃烧,放出高温气体。此高温气体在不同的条件下做功,可推进火箭、导弹、炮弹……前进。复合火药是固体推进剂火箭应用的重要固体推进剂。

固体推进剂火箭具有结构简单、可靠性高、能瞬间发射和成本较低等特点。因此,它在军事和空间技术方面占有重要地位。

中国研制的大型复合火药柱(直径 210mm)是在 1958 年 6 月由任玉立领导的科研组完成

表 1 一些复合火药的组成与特性

复合火药类型	比冲 ($N \cdot s \cdot kg^{-1}$)	火焰温度 ($^{\circ}C$)	密度 g/cm^3	金属含量 $\times 100$	燃速 mm/s	压力 指数 n	抗拉强度/延伸率				工艺 方法		
							低温		室温			高温	
							(MPa/δ) $\times 100$	$^{\circ}C$	(MPa/δ) $\times 100$	$^{\circ}C$		(MPa/δ) $\times 100$	$^{\circ}C$
复合改性双基火药	2 600~2 690	3 593	1.80	20	19.81	0.4	19.33/4.5	-51.1	2.792/48	25	0.984/44.9	48.9	浇铸
聚氯乙稀/高氯酸铵	2 300~2 400	2 538	1.69	0	11.18	0.38	1.896/4.5		0.541/175				浇铸 挤压
聚硫橡胶/高氯酸铵/铝粉	2 300~2 400	2 593	1.72	0	8.89	0.43	4.078/11 0.4/11	-45.6	1.195/85	-5	0.844/70	65.6	浇铸
聚硫橡胶/高氯酸铵/铝粉	2 400~2 500	2 760	1.72	3	7.87	0.33	2.109/14 0.207/14	-45.6	8.44/33	25	0.696/42	65.6	浇铸
聚氨酯/高氯酸铵/铝粉	2 600~2 650	~3 000	1.77	16~20	6.99	0.15	0.807/5.4	-51.1	29	25		82.2	浇铸
聚丁二稀一丙稀酸一丙稀脂/高氯酸铵/铝粉	2 600~2 630	3 204	1.77	16	13.97	0.33	0.807/5.4		0.689/29	29	0.048		浇铸
聚乙二稀一丙稀酸/铝粉	2 600~2 650	2 962~3 315	1.77	14	8.13	0.35	3.615	-45.6	0.541	25	0.288	65.5	浇铸
端羟基聚丁二稀/高氯酸铵/铝粉	2 600~2 650	3 093~3 209	1.77	15~17	11.43	0.40	2.277/26	-50	0.907/57	25	0.661/75	54.4	浇铸
端羟基聚丁二稀/高氯酸铵/铝粉	2 600~2 650	3 093~3 204	1.85	4~17	10.16	0.4							
氟碳聚酯富氧火药													研制中

的,并装入二级大型控空火箭发射成功(作者任技术组长)。一些复合火药的组成特性见表1。

复合火药是多组分的异相体系,除了主要组分氧化剂和燃料粘合剂之外,还有其它多种多样的附加成分。例如,在燃料粘合剂中要加入固化剂(如聚氨酯火药中用的异氰酸酯),提高复合火药能量的高能附加剂(铝粉、硼等),提高复合火药机械性能的增塑剂和交联剂,调节药浆粘度的稀释剂,改善燃料粘合剂和氧化剂互相接触的表面活化剂和键合剂,调节和改善复合火药燃烧性能的燃烧催化剂等。这些附加成分的含量虽不多,但必不可少。

2. 复合火药的用途

复合火药主要用于火箭、导弹和航天飞机的发动机中。现将航天飞机所用的复合火药介绍如下:

航天飞机由四个主要部份组成(图1),载有宇航员及有效载荷的轨道器;装有液氢液氧的外贮箱,以供装在轨道器上主发动机之用;两台固体推进剂起飞助推器;轨道器后部装有三台液体推进剂的航天飞机主发动机。此外,还有用于入轨、修正和脱离轨道的轨道机动系统。轨道器内也装上惯性上面级,用来将载荷送入更高轨道或行星轨道。还有用作姿态控制和轨道修正的反作用控制系统。

起飞时三台主发动机用两台固体助推器同时工作,助推器的推进剂先烧尽并分离,液体主发动机继续工作直至飞行器接近所需轨道时停火。此时,外贮箱分离,航天飞机进入轨道。任务完成后,轨道器重返大气层并滑翔至着陆地点,主发动机在回收后可再次使用。

固体助推器的壳体、喷管及点火器等金属部件经回收修整后可重复使用20次。在助推器的顶部气动罩内装有助推器回收系统及4台助推器分离发动机,尾部裙罩内除喷管摆动操纵系统外,还装有4台分离发动机。

每台复合火药的直径约为3.71m,总长38.71m,总质量约570t,其中复合火药约占503t,能产生真空推力1075t,燃烧时间为121s。为了搬运及加工方便,发动机分成四段(图2),用专门车辆由工厂分段运输至火车站,再用火车运至发射场附近的垂直装配车间,装配后在垂直状态下运至发射场。

助推器的壳体用D6AC钢制成,没有焊缝,喷管用标准的碳—纤维/酚醛复合材料。复合火药装药前部做成有11个星角的星形内孔,逐渐向下游转变成圆形内孔,在装药末端接近喷管处有一段喇叭口,以便安装潜入式喷管。复合火药分四段浇铸,在接口处的药柱前端面进行包覆,后端面则部分包覆,每接口处留有25~50mm的间隙。

由于两台助推器必须同步工作,尤其在点火及接近燃完阶段要求更高,否则,两台发动机的推力不协调会使飞行器产生一个倾斜力矩,图3表示对发动机所要求的性能,推力—时间曲线的变化应在±3%的范围以内。此外,还应满足下列总冲要求:

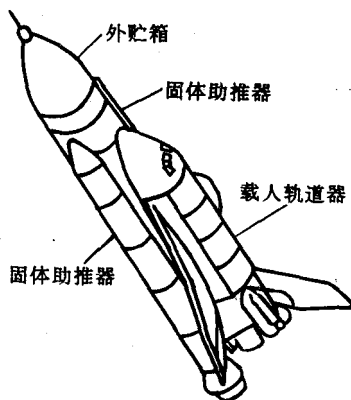


图1 航天飞机

时间间隔	总冲/(kg·s)
$t_0 \sim t_1$	27.07×10^6 (最小)
$t_0 \sim t_1$	27.07×10^6 (最小)
$t_0 \sim t_2$	74.21×10^6
$t_0 \sim t_3$	130.82×10^6 (最小)

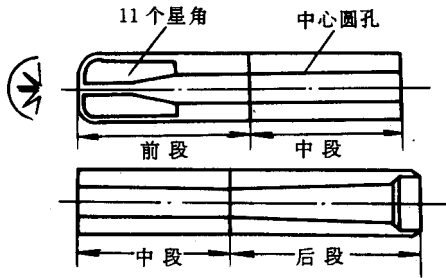


图2 固体助推器

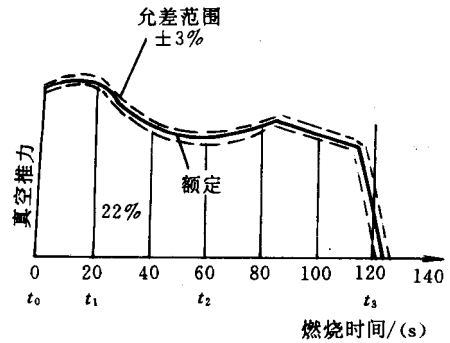


图3 推力时间要求范围

装药的形状设计就是为了满足上述的性能要求。药柱前部的星形内孔使航天飞机起飞阶段的推力增加。往后为了减小“Q”载荷而使推力在60 s以前逐渐减小。在80 s前推力有所增加，以后沿着相应于飞行器加速度为3 g的直线下降。图4表示一对试验助推器QM-1及QM-2的真空推力曲线完全符合设计要求，并且具有很好的再现性。由图可见，在22 s至80 s范围内，实际推力接近上限，在95 s至110 s区间内则处于下限。

表1 复合火药配方

成份	$w_i \times 100$
AP (200 μ m)	48.95
AP (13 μ m)	21.00
铝粉	16.00
PBAN	11.07
Fe ₂ O ₃	0.05
DOA	1.40
环氧树脂	1.53
密度/(g·cm ⁻³)	1.776

发动机壳体之间的接头(图5)是一个关键部位，用117个靠弹簧锁紧的圆柱销来进行固定。每个接头处用主副两个氟碳弹性圈来密封，两圈之间的空腔可以通气增压以检验封性能。据报道，1986年1月28日“挑战者”号在发射后74 s的爆炸，其可能的直接原因就是因为在右侧助推器后部的节间连接处密封失效所造成的。为了保护密封圈免受燃气侵蚀，在两节内衬的界面处充填了一层铬酸锌油灰。节间的密封必须能承受点火时在0.6 s内，压力从零增加

到 6.38 MPa(1atm=101 325 Pa)，在靠近喷管处这种情况更为严重。发动机壳体的安全系数为 1.4。所用材料 D6AC 钢的强度为(0.137~0.155 MPa)。为了防止发动机工作期间由于裂缝的产生及传播而引起壳体破坏，所选材料的断裂韧性达 320kg/mm。

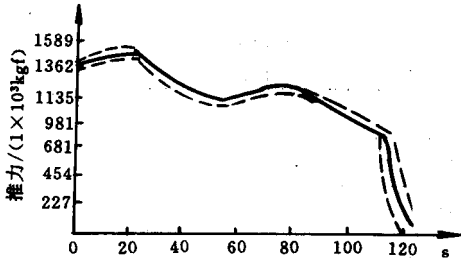


图 4 真空推力—时间曲线

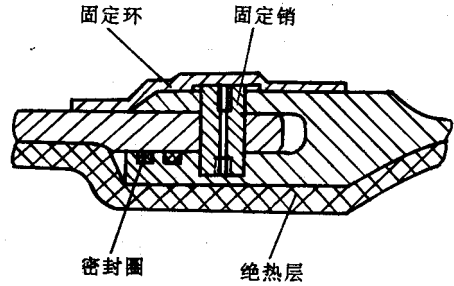


图 5 壳体间接头

发动机的喷管大约有 20% 潜入燃烧室。整个喷管支承在一个柔性轴承上，所以具有全方位的向量控制能力。喷管喉径为 1 384mm，喷管口外径为 3 759mm，喷管膨胀比为 7.16 : 1。喷管全长约 4m，重约 10 t，可摆动喷管通过柔性轴承这种非刚性接头连接到发动机上。柔性接头是由 10 个厚度为 10.8 mm 的 D6AC 锻钢件制成的增强件与 11 个厚度为 7.4 mm 的 TR-3005 天然橡胶制成的弹性件交替组合而成。这些增强件具有共同球心的截球体，这个球心称作几何回转中心。当喷管受到操纵力时，弹性件就产生剪切变形，每个增强件也转动一个与总摆角成比例的角度，喷管即绕着有效回转中心摆动，来实现推力向量控制，最大的摆角为 8°，柔性接头也潜入发动机内。

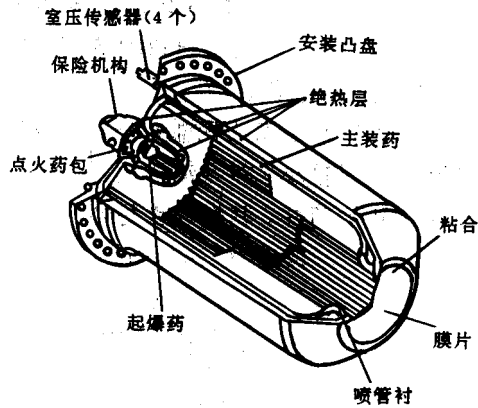


图 6 点火装置

为了装配及搬运方便，喷管扩散段分成前后两个组合件，用法兰盘连结。从法兰盘往后至向量控制动作器安装环这一段的喷管外壳用 7075 号铝制成，出口段用碳布酚醛、硅布酚醛和玻璃布酚醛制成。出口段在发动机工作后用爆炸物爆炸切除连结而脱开，以减轻发动机溅落时的结构冲击载荷，在靠近柔性接头处装有缓冲器，使喷管在溅落时相对于燃烧室的轴向位移不超过 25 mm，完全在柔性接头的位移能力范围以内。前扩散段用 D6AC 钢制成，安全系数在 1.4 以上。为了使金属喷管能重复使用 20 次以上，发动机在工作时，喷管材料的温度不能比环境温度高出 6 °C。喷管出口段的设计保证内衬材料厚度，应为实际烧融材料厚度的两倍，再加上烧融后剩下厚度的 1.25 倍。

图 6 表示安装在发动机最前部的点火系统。由下列元件组成：

- (1) 可多次使用的安全保险机构，这个电磁机械系统用来预防不慎点火，并在应该点火的时候点着；
- (2) 点火起爆器，是一个小型的多喷咀的钢体火箭发动机，内装 30 个星角的星形内孔高

燃速复合火药 0.68 kg, 起爆器由点火药(B-KNO₃ 药)点燃;

(3) 点火器, 由点火起爆器点燃。多次使用的点火器壳体由D6AC 钢制成, 内装 40 个星角的星形内孔高燃速装药约 56 kg, 喉衬材料为模压硅酚醛。

表 2 复合火药性能

HTPB 粘合剂 铝粉(ND-101) AP	单 位	14%(按重量) 18% 68%
比冲	N·s/kg	2 644
密度	g/cm ³	1.77
燃温	K	3 400
特征速度	m/s	1 585
燃速(7.0MPa, 15℃)	mm/s	7.37

发动机壳体有用凯夫拉-49 纤维/环氧树脂缠绕而成, 内表面用 EPDM 橡胶作为绝热层。管状的 HTPB 复合火药用 HTBN 包覆, 这两者有很好相容性; 与 EPDM 绝热层的粘合性也非常好, 而且不易老化。

复合火药的燃速不高, 平均在 7 mm/s 左右, 密度为 1.81 g/cm³, 压力指数约为 0.32, 燃速不高能使喉面积较小, 在发动机长度受限制的情况下, 膨胀比可以大一些。不采用星孔而用端面及内盲孔的药柱, 其燃速也是同一道理。为了加快建立起始压力, 在装药上加工几个导向槽。

3. 火箭技术对复合火药的要求

- (1) 为保证火箭具有较大的射程, 要求复合火药能量高, 比冲 $\leq 2\,000\text{ N}\cdot\text{s}/\text{kg}$;
- (2) 为减少火箭发动机装填火药的结构容积, 要求复合火药的密度大, $\leq 1.6\text{ g}/\text{cm}^3$;
- (3) 要求复合火药燃烧性能稳定;
- (4) 复合火药燃烧后, 燃烧产物的相对分子质量要小, 比容不应 $< 800\text{ l}/\text{kg}$;
- (5) 复合火药的物理和化学安定性要良好, 保证能长期贮存和安全运输;
- (6) 在 $\pm 60^\circ\text{C}$ 下应有足够的延伸率 ($\leq 30\%$) 和抗拉强度 (0.8~1.0 MPa, 壳体粘结) 以及尽量低的玻璃化温度 ($< -50^\circ\text{C}$);
- (7) 复合火药的燃烧速度范围应宽, 并且有较低的压力指数和温度系数;
- (8) 要求复合火药在整个加工过程中安全可靠, 无爆炸和燃烧的危险;
- (9) 复合火药燃烧后, 燃烧产物无毒, 少腐蚀;
- (10) 复合火药所用原料来源丰富, 价廉易得等。

对同一种火药来讲, 很难达到具备上述全面的要求。实际工作中, 应根据火箭发动机设计的具体要求和技术指标, 取其主要达到的要求, 选定合适的基础配方, 再通过实验改进, 以尽量满足各方面的要求。

从上述要求可见, 有些要求之间是相互矛盾的, 例如高比冲火药常用加入金属粉来提高燃烧热, 但此时火药燃烧后燃烧产物的相对分子质量要大, 且比容减少, 所以十全十美是因

难的。但是，只要掌握这些原则，通过具体配方计算和实验，是能够选择优良的复合火药配方的。

4. 复合火药的优缺点

复合火药与双基火药相比较，具有如下一系列优点：

(1) 具有较高的比冲，一般情况下其比冲约为 $2\ 100\sim 2\ 520\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg}$ ，而一般双基火药则为 $2\ 000\sim 2\ 200\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg}$ ；

(2) 具有在低压下能稳定燃烧的特性，一般情况，复合火药在大气压下能稳定燃烧；而双基火药的稳定燃烧压力在 $30\sim 40$ 大气压 ($1\text{atm}=101\ 325\text{Pa}$)；

(3) 可以通过选择不同颗粒度的氧化剂来调节复合火药的燃烧速度，使复合火药具有较宽的燃烧速度范围，一般情况下，含高氯酸铵的复合火药的燃烧速度约在 $2.5\sim 100\text{mm}/\text{s}$ ；

(4) 复合火药的密度较双基火药的大，约为 $1.64\sim 1.74\text{g}/\text{cm}^3$ ，双基火药的密度为 $1.58\sim 1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，因此，复合火药在火箭燃烧室中装填密度较大；

(5) 一般情况下，复合火药使用的温度范围较双基火药为宽。以聚氨基甲酸酯火药为例，其使用温度范围为 $-60\text{℃}\sim 150\text{℃}$ ，而一般双基火药的正常使用温度范围为 $-40\text{℃}\sim 50\text{℃}$ ；

(6) 复合火药的原料来源广泛丰富。双基火药的主要原料都是来源于棉花和油脂，而复合火药则可应用各种各样的高分子化合物和无机、有机氧化剂；

(7) 复合火药的生产工艺可以是多种多样的，它能采用挤压和浇铸加工成型，而且较双基火药生产过程安全和简单。

从火药发展历史上看，正是由于复合火药的出现，从而增多了火药的品种，扩大了火药原料的来源，增添了生产工艺的多样性，简化了旧有火药的制造工艺与技术，提高了火药某些物理化学和弹道性能。并添补了双基火药不能制造大直径火药柱和直接与发动机粘结的空白。特别是复合火药直接浇铸于火箭发动机之中，与壳体联接成一整体的工艺方法，使复合火药独树一帜，在大、中型固体推进剂火箭中占有显著的地位。直接浇铸大型火箭发动机装药工艺是一般双基火药无法比拟的。美国的“民兵”第三级“尾刺”续航发动机，“北极星”导弹等所用固体推进剂皆为复合火药。其中以聚丁二烯推进剂和聚氨酯推进剂最受到人们重视。据报导：日本防卫厅技术研究本部在 1977 年曾研究端羟基聚丁二烯等复合火药用于反坦克和机载战斗导弹；在空间应用方面曾试验直径为 231cm 的药柱用于大型发动机。

复合火药的缺点是：发射时产生烟雾，这是因为用高氯酸铵作氧化剂时，燃烧后产生氯化氢所致。