

内部

火 药 性 能

北京工业学院六系六二教研室

1980, 12

目 录

火药物理化学性能 (一)

(概 论)

§1 定义及基本概念	1
§2 火药的发展简史	5
§3 火药的分类与组成	7
§4 火药的药型	24
§5 火药的性能及武器对火药的要求	25

火药物理化学性能 (二)

(能量性能)

§1 概述	28
§2 火药燃烧产物的组成	33
§3 火药的爆热	60
§4 火药的爆温	65
§5 火药的比容	73
§6 火药力和余容	75
§7 发射药能量性能计算例题	82
§8 火箭固体推进剂的能量性能	91
§9 比冲和特征速度的理论计算	112
§10 推进剂能量性能的实测	133
§11 提高火药能量的途径	137
附表 常用化学反应平衡常数	150

火药物理化学性能 (三)

(燃烧性能)

§1 燃烧的基本概念	156
§2 火药的点火	160
§3 燃烧性能参数	166
§4 火药稳态燃烧机理	184
§5 火药燃烧调节的途径	225
§6 火药的不正常燃烧	233
§7 燃烧转爆轰	235

火药物理化学性能 (四)

(火药的感度)

§1 热感度	242
§2 机械感度	251
§3 冲击波感度	263
§4 静电火花感度	265

火药物理化学性能 (五)

(物理、化学安定性)

§1 火药的物理安定性	271
§2 火药的化学安定性	282
§3 火药的贮存保管	309

火药物理化学性能 (六)

(力学性能)

§1 火药装药的受力分析	317
§2 火药的力学性质特点	325
§3 火药力学性质的测试	348
§4 影响火药力学性质的因素	357
§5 火药的热性质	373

§1 定义及基本概念

1-1 火药的定义

大家都知道，枪炮和火箭导弹是现代战争中的重要武器，而火药就是主要用于这些武器中作为发射弹丸或推动火箭运动的能源物质。通常，把用于枪炮等身管武器中发射弹丸的火药称为“发射药”，而把用于火箭发动机中产生推力的火药称为“火箭固体推进剂”。

在枪炮武器中，火药是装在药室内或弹壳内的。当发射时，火药经底火的点燃作用而进行燃烧，迅速地将火药的化学能变成热能，同时还产生大量的气体。火药在膛内的燃烧时间是很短的，约在万分之一秒到千分之一秒之间，产生的高温可达 $2500 \sim 3500 \text{ K}$ ，这就在武器膛内有限的空间里形成巨大的压力，此压力可达 $2000 \sim 4000 \text{ kg/cm}^2$ 。这种高温高压的燃气在武器密闭的膛内进行膨胀做功，推动弹丸以高速射出，从而达到发射弹丸的目的。火药在枪炮膛内燃烧时所达到的最大压力称为最大膛压（简称膛压），弹丸离开枪炮出口处的速度称为初速。显然，希望火药在膛内燃烧时所产生的膛压要低，而弹丸所获得的初速要高。因此膛压和初速是武器设计的主要技术指标，也是衡量枪炮发射药内弹道性能的两个重要参数。

在火箭武器中，火药是装在火箭发动机的燃烧室里面。发射时，火药经点火装置的点燃作用而燃烧，同时释放出大量的热和气体，这种高温高压气体经由发动机尾部的喷管以高速喷出，从而产生一反作用推力作用于发动机上，使火箭以一定的速度向前飞行。火药气体喷射的速度愈大，质量愈多，则发动机获得的推力也愈大。因而衡量火箭推进剂性能的一个重要指标是它在火箭发动机中所产生推力的大小。

由以上分析可以看出，作为武器发射能源的火药必须具备有一定的条件。首先火药能可靠而快速地点燃，并且在点燃后能迅速地产生化学变化（即燃烧），放出大量的热能来，而且很重要的是这种燃烧不需要外界供给氧。衡量单位质量火药放出热量多少的指标称为爆热，其单位为 J/kg 或 kcal/kg 。

其次，在火药燃烧放热的同时，还必须生成大量的气体，作为做功的介质，才能将火药的热能转变为弹丸或火箭发动机的动能。衡量单位质量火药放出气体多少的指标为比容，其单位为 ℓ/kg 。

显然，火药燃烧时放出的热量越大，生成的气体越多，则它能做的功也就越大。也就是说，爆热和比容越大的火药给予武器的发射功或推进功也就越大。通常人们称这种爆热和比容大的火药为能量高的火药。衡量一种火药能量高低的综合指标在枪炮发射药中常用“火药力”这一术语，而在火箭固体推进剂中常用“比冲”这一术语。火药力可定义为一公斤火药燃烧后生成的高温气体在一个大气压力下自由膨胀所做的功，其单位为 Nm/kg 或 $\text{kg}\cdot\text{dm/kg}$ 。而比冲可定义为在火箭发动机里燃烧一公斤推进剂所获得的（推力）冲量，其单位为 $\text{N}\cdot\text{s/kg}$ 或 $\text{kg}\cdot\text{s/kg}$ 。

第三，由于各种武器要求有一定的射程和精度，这就还要求火药能有规律而稳定的燃烧，也就是说火药在燃烧时有一定的或可控制的生成气体的速度。决定火药燃烧时生成气体速度的一个重要指标为火药的燃烧速度。它可定义为火药固相沿燃烧表面法线方向消失的速度，其单位为 mm/s 。显然，在燃烧表面积相同的情况下，燃速越大的火药，单位时间放出的热量和生成的气体量也就越大。

综上所述，我们可以给火药下一个概括的定义：火药是这样的一种物质，它可以借简单的点火装置可靠地引燃，并且在不依赖外界供

给氧化元素的情况下，能以严格控制的预定速度进行燃烧反应，放出大量的热能和生成大量的气体并借此作一定的机械功（发射功）的固体能源材料。

1-2 火药的用途

火药主要用于军事上作为枪炮及火箭导弹的发射能源。用于枪炮武器中的火药称为发射药，用于火箭导弹中的火药称为固体推进剂。

固体推进剂具有结构简单、可靠性高、能瞬时发射和成本较低等特点，这使它在军事应用领域中目前占居支配的地位。据估计，西方正在使用或研究的大约一百种火箭导弹武器系统中，约85%使用的是固体推进剂。随着大型火箭工艺学的发展，除了军事领域外，固体推进剂在宇航领域内也得到了日益广泛的应用。如在美国目前使用的十几种空间运载火箭中有些应用的就是固体推进剂。

火药还可以应用于其它的一些民用部门。如用作猎枪发射药，用作驱冰雹火箭、气象探空火箭、飞机起飞火箭的推进剂。火药还可以用于燃气发生器中，作为各种推进驱动装置：驱动涡轮、推动活塞、充作特殊工作的热源、剪切螺栓和金属线、推动火箭叶轮、开动导弹中的燃料泵、从飞机上投掷货物和弹射椅以及一般适用于在比较短时间内需要完全控制的高能动力系统。火药还广泛用于石油开采中作为射孔弹的装药。

1-3 火药化学变化的基本形式

火药在武器中发射时进行的是燃烧反应。但是随着激发化学反应方式的差别和反应进行的环境条件的不同，火药还能进行其它形式的化学反应。即除燃烧以外，火药还可以发生缓慢的化学变化和爆轰。这三种化学反应的本质虽然都是火药本身中原子进行重排变成热力学上更为稳定的化合物的过程，但它们在反应速度和传播性质上却有重

大的差别。

在常温常压下，或在生产和加工条件下，火药及其组分常以缓慢速度进行分解反应。这种反应是在整个火药内部展开的，同时反应速度主要取决于当时的环境温度。常温时反应速度有时慢到短时间内难以觉察，温度升高，反应速度加快，其加快的程度服从于化学动力学的规律。

有规律的燃烧和爆轰与上述的缓慢化学变化的主要区别在于：一是燃烧和爆轰都是激烈的化学反应，反应速度很快，放出的热量足以维持反应持续不断地进行。二是燃烧和爆轰不是在火药全体物质内发生的，而是在物质的某一局部比较窄的反应区内进行的，而且二者都是以反应波的形式按一定的速度一层一层地自动传播的。

燃烧和爆轰有本质的不同，它们是性质不同的两种变化过程。一般来说，爆轰是比燃烧更为激烈的反应过程。实验与理论研究表明，它们在基本特点上有如下区别。

首先，从激发反应的机理来看，燃烧时反应区的能量是通过热传导和辐射方式传入相邻未反应区而引起下一层物质的反应的。爆轰的传播则是借助于冲击波对相邻火药强烈的高温高压的冲击作用而进行的。

其次，从波的传播速度上看，燃烧传播速度（燃速）通常约为每秒几毫米到每秒数米，而爆轰过程的传播速度一般高达每秒数千米。

第三、燃烧过程的传播容易受外界条件的影响，特别是受环境压力的影响。如火药在大气中燃烧进行得很慢，但如果将火药放在密闭容器中于高压下燃烧，则过程进行的速度急剧增大。而爆轰过程由于其传播速度极快，几乎不受外界条件的影响，对一定的物质来说，爆轰速度在固定装药密度下是一个常数。

第四、燃烧过程中反应区内燃烧产物质点运动方向与燃烧波移动方向相反，因而波阵面内压力较低。而爆轰时，反应区内爆轰产物质点运动方向与爆轰波传播方向相同，爆轰波阵面内的压力可达数十万个大气压。

火药化学变化过程的三种形式（缓慢化学变化、燃烧和爆轰）在性质上虽然不同，但是它们之间却有着紧密的连关。火药缓慢的化学分解在一定的条件下可以转变为燃烧，而火药的燃烧在一定的条件下又可以转变为爆轰。这种互相区别又互相转化的关系，对我们火药工作者来说具有十分重要的意义，因为在生产和储存火药时要抑制火药的缓慢分解，不使其发展为燃烧，更不能发生爆轰，而在使用火药时，则要求保证火药能可靠地燃烧，而不发生瞎火和爆轰。

§2 火药的发展简史

火药是我国古代的伟大发明。最初的火药是由硝石、硫黄和炭粉混合而成的，现在将这类火药称为黑火药。现在火药在品种方面还是在性能方面，都比当时有了巨大的发展。火药的发展大致可分为三个阶段。

2-1 火药发展的第一阶段

早在公元600年左右，在我国炼丹家孙思邈所著“丹经”一书中就有黑火药的组成及配方的记载。在公元1000年左右，在我国就开始将黑火药用于战争之中。十三世纪左右，黑火药才由我国传入阿拉伯国家，直至14世纪欧洲才开始应用黑火药。这样一直到19世纪后半期，近一千多年时间内，黑火药是唯一的一种火药，也是唯一的一种炸药。

典型的黑火药由15分木炭，10分硫黄及75分硝石组成。黑火药由于其性能差，爆热仅 720 Kcal/kg ，比容仅 280 l/kg ，

火药力仅 $200000 \sim 300000 \text{ kg} \cdot \text{dm/kg}$ ，以及燃烧时生成大量烟和固体残渣，使黑火药作为军用火药的地位现今已完全被其它火药所淘汰。目前，黑火药在军事上的主要用途基本上限于火炮和火箭发动机的点火器。

2-2 火药发展的第二阶段

这一阶段大致由19世纪后半期至本世纪40年代。18世纪末和19世纪初是资本主义萌芽和发展的时期，由于工业的发展和武器的发展，产生了要求一种比黑药性能更好的火药的要求，而当时科学技术有了较快的发展，特别是有机化学的发展使火药技术的革新有了技术上的可能。1832年法国人布拉科诺发明了硝化纤维素，1846年意大利人索布雷诺发明了硝化甘油，这两种化合物就成为火药进一步发展的基础。

在经过长期试验的基础上，1884年法国化学家维也里得到第一个用硝化纤维素制得的火药。维也里用醇—醚溶剂来胶化硝化纤维素，然后压制成小粒状枪药或带状的枪药。这样得到的火药即今日的单基药。这种火药由于緻密的结构呈平行层燃烧，因而可以用变化药粒尺寸的办法来控制装药的燃烧时间。

1888年瑞典工程师诺贝尔发明了以硝化甘油胶化硝化纤维素的双基药。由于上述两种以硝化纤维素为基火药的出现，在很大程度上克服了黑药所存在的缺点，使武器射击速度大大提高，重量大大降低，射程及精度都大为改善，因而促进了武器的进一步发展。而黑火药在发射药中的地位就完全为硝化纤维素为基的火药所取代。

2-3 火药的现代化发展阶段

由于第二次世界大战及战后时代武器对火药提出了越来越高的要求，特别是火箭武器的出现和宇宙飞行对推进剂的要求，以及三十多

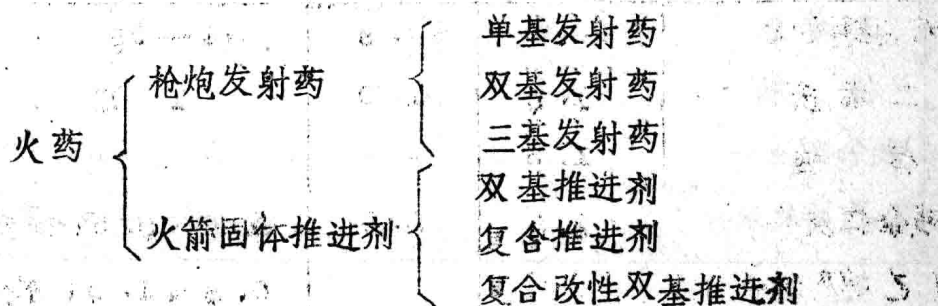
年来科学技术的飞跃发展，使火药进入了一个飞跃发展的新阶段。

早在第二次世界大战期间，双基火药就首先用于各种小型火箭之中，发挥了很大的威力。50年代中期，在美国首先出现了以聚硫橡胶为基的第一个现代复合火药作为火箭的推进剂，使火箭性能有了比较大的提高。此后，在50年代复合火药得到了迅速的发展，在美国先后研究成功了聚氨酯复合火药、聚丁二烯复合火药、聚氯乙烯复合火药、改性双基复合火药等品种繁多的新火药。60年代、70年代又有了进一步的发展。复合火药的出现，使火药在品种上和性能上比前一阶段有质的飞跃。正是由于复合火药的出现，使火药的应用由枪炮武器领域推展到各种火箭导弹武器，直至今天的宇宙飞船之中。

与复合火药发展的同时，以硝化纤维素为基的火药在性能上、品种上、工艺上等各方面也取得了巨大的进展，直至今日，这类火药仍是枪炮等武器的唯一发射药，并在各种小型战术火箭导弹的应用中仍点主要地位，甚至在某些中型火箭导弹武器中也找到了应用。

§3 火药的分类与组成

随着科学技术的发展和要适应各种武器不同的性能要求，火药的品种日趋增多。为了学习研究的方便，需要将火药进行适当的分类。火药的分类方法很多，对于学习本课来说，我们认为比较合理的分类方法是首先将火药按其用途分为枪炮用发射药和火箭固体推进剂，因为这两类火药在性能要求上有较大的区别。然后再按照火药的主要成分，分为不同的类别。这种分类方法简单明了，见表1



下面概略介绍各类火药的组成及其特点。

3-1 单基发射药

以胶化的硝化纤维素为唯一能源组分的枪炮发射药称为单基药，其主要成分如下：

1. 硝化纤维素：硝化纤维素是这类火药中最主要的成分，一般占90%以上，是唯一的含能材料。

2. 化学安定剂：火药贮存时，其中硝化纤维素会发生自动分解的现象，加入化学安定剂的目的就是为了抑制这种自动分解反应而增加化学安定性。在单基药中常用的安定剂为二苯胺。

3. 钝感剂：它的加入可以使火药的燃速由表及里逐渐增加，得到所谓“渐猛”性的燃烧特性从而可以改善火药的内弹道性能（降低膛压、增加初速）。在单基药中常用的钝感剂为樟脑。

此外，在单基药中有时还加入光泽剂、硝焰剂、降温剂、防湿剂、增塑剂、护膛剂、除铜剂等。单基药在生产过程中通常要应用挥发性溶剂乙醇和乙醚，以使硝化纤维素具有塑性，便于药料成型。虽然在药料成型之后又将挥发性溶剂设法驱除，但是在火药中总要残留少量剩余溶剂，成为火药的组分之一。因此单基药有时也称挥发性溶剂火药。表2为典型的单基药组成

表2 几种典型的单基药组成，%（重量）

成分	枪药	炮药	典型变化范围
硝化纤维素	94.9	95.5	94—98
二苯胺	1.0	1.0	1—2
樟脑	1.3	—	—
残余挥发分 (乙醇及水分)	2.8	2.5	0.2~0.5(挥发分) 0.8~1.5(水分)

单基药在制造时，为了使得溶剂易于排除，火药的厚度不能不受到一定的限制，因而这类火药常应用于中小口径的武器中，如各种步机枪、手枪冲锋枪和火炮的发射药。这类火药含有挥发分和具有一定的吸湿性，因而在保存期间，随着溶剂的挥发和水分的变化，将会使火药的内弹道性能发生一些变化。

3-2 双基发射药

以硝化纤维素和硝化甘油（或其它爆炸性增塑剂）作为产生能量组分的火药称为双基药，它的主要成分有：

- 1) 硝化纤维素：是双基药的主要成分之一。
- 2) 爆炸性增塑剂：起增塑硝化纤维素的作用。常用的爆炸性增塑剂有硝化甘油、硝化二缩乙二醇等。硝化纤维素与爆炸性增塑剂构成这类火药的两个基本能量组分，所以这类火药通称为双基火药。
- 3) 助液剂：增加硝化纤维素在硝化甘油中的溶解度，常用的助溶剂有二硝基甲苯（DNT）、苯二甲酸二丁酯、硝化二乙醇胺（DINA）等。
- 4) 化学安定剂：抑制硝化纤维素（NC）及硝化甘油（NG）的缓慢分解。一般用中定剂，而不用二苯胺，这是因为二苯胺碱性较强，能够皂化硝化甘油。
- 5) 其它附加物：有改进工艺性能的工艺附加物，改进内弹道性能的消焰剂以及光泽剂等，视配方需要而定。

双基发射药可用无溶剂工艺方法制造，这样制得的双基药通常称为巴利斯太型双基药；也可用挥发性溶剂工艺方法制造，这样制得的双基药称柯达型双基药。典型的双基发射药配方如表3所示。

表3 典型的双基发射药配方，%（重量）

成 分	迫 击 炮 药		线 膛 炮 药		典型变化 范 围
	巴利斯太型	柯达型	巴利斯太型	柯达型	
NC	57.7	64.5	58.5	65	30-60
NG	40	34	30	29.5	25-40
DNT	—	—	7.5	—	} 1-5
中定剂	2	1	3	2	
二苯胺	—	0.2	—	—	
凡士林	0.3	0.3	1	3.5	
石墨(100%以外附加物)	0.2	—	—	—	
氧化镁(同上)	—	0.2	—	—	
丙酮(同上)	—	0.5	—	1.5	
水分(同上)	0.6	0.4	0.5	0.5	

与单基药相比，这类火药由于在制造过程中一般没有挥发性溶剂的排除问题，因而生产周期较短，并适宜于制造厚度较大的火药，所以这类火药常应用于迫击炮及较大口径的火炮中。又因为 NC 和 NG 的比例可以在较大范围内变化，所以这类火药的能量能满足多种弹道性能的要求。但是，这类火药的燃烧温度较高，对炮膛烧蚀较严重。此外在保存期间，NG 可能渗出，出现所谓“汗析”现象，影响物理安定性。

3-3 三基发射药

三基发射药是在双基发射药的基础上加入一定数量的能产生能量的有机结晶化合物，如硝基胍而制得。因为有三种主要含能成分，所以称为三基药。这类火药多用挥发性溶剂工艺方法制造。加入硝基胍后可

以降低火药的燃烧温度，减少对炮膛的烧蚀，所以常称硝基胍火药为“冷火药”。典型的三基发射药配方范围如表4所示。

表4 三基发射药典型配方范围

成 分	% (重 量)
NC (N=12.6~13.15%)	20—28
NG	19—22.50
硝 基 胍	47—55
苯二甲酸二丁酯	0—4.5
二 苯 胺	0—1.5
2—硝基二苯胺	0—1.5
乙基中定剂	0—6.0
石 墨	0—0.1
冰 晶 石	0—0.3

三基发射药多用于各种加农炮及榴弹炮。

3-4 双基推进剂

双基推进剂与双基发射药在成分与组成上类似，也是以 NC 和 NG 或其它爆炸性增塑剂如硝化二缩乙二醇，硝化三缩乙二醇为基本成分，只不过为适应火箭发动机内弹道性能的多种要求，加有各种各样的弹道改良剂，其组成要比双基发射药复杂得多。表4-A 中列出了双基推进剂典型配方范围。双基推进剂可用无溶剂压伸法或浇铸法生产，前者可生产小型及形状较简单的药柱，后者生产的药柱尺寸及形状不受限制。

一般来说，双基推进剂具有悠久的历史，工艺比较成熟，有大工业生产的基础，制得药柱均匀，性能再现性好，在常温下具有好的安定性和力学性能，排气无烟适用于军事用途，因广泛用于中小型火箭

表 4-A 双基推进剂典型配方范围

成 分	% (重量)
NC	50~66
爆炸性增塑剂	25—47
增塑剂 (DNT 或苯二甲酸酯, 三酯酸甘油酯)	0—11
安定剂 (二苯胺或中足剂、硝基二苯胺、二苯脲, 乙基苯基脲等)	1—9
弹道改良剂 (碳黑, 或各种有机酸及无机酸盐类)	0—3
其它附加物 (蜡或凡士林、金属皂)	0—2

导弹中, 如某些地空导弹空空导弹, 反坦克导弹和火箭炮中。双基推进剂的主要缺点是能量较低, 燃速范围较窄, 低温力学性能较差, 再加壳体粘接困难, 所以不宜用于大型火箭发动机装药。

3-5 复合推进剂

复合推进剂是由结晶氧化剂及粉状燃料用合成橡胶或塑料的粘合剂粘结成一体推进剂。复合推进剂的特征是结构的不均匀性, 即其组分的平均尺寸大于分子或胶体的平均尺寸, 所以复合推进剂又称为异质推进剂, 而把双基推进剂称为均质推进剂。

复合推进剂的组分按其作用一般可分为燃料、氧化剂、粘合剂, 而含量少的组分, 如固化剂、催化剂等, 通常称为附加物。但是, 常常有这样的情况, 即一种组分起着多种作用。例如, 粘合剂本身也起着燃料的作用, 而且在某些以高聚物为基的不含金属粉的推进剂中粘合剂是唯一的燃料。加入附加物的目的是多种多样的: 如加速或延长固化时间; 改善药浆的流变性能使易于浇铸; 改善物理性能; 增加火药的不透明度以防止燃烧表面以下的辐射加热; 增加或降低燃速, 改善力学性能等等。表 5 为按照其作用列出的复合推进剂的一些典型组

分，但十分不完全，因为在过去的 15 ~ 20 年中，总共试验和发展了达数百种元素和化合物作为复合推进剂的组分，无法一一列举。

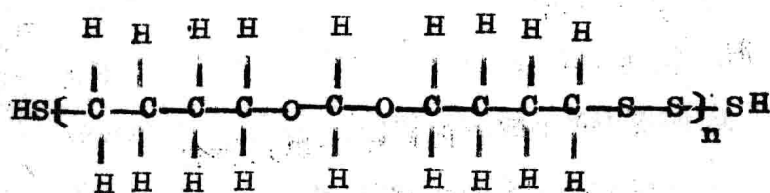
表 5 复合推进剂的典型组分

作用	组分名称	缩写代号
燃料	铝粉	AL
	钡粉	Bo
氧化剂	过氯酸铵	AP
	环四次甲基四硝胺 (奥克特金)	HMX
	环三次甲基三硝胺 (黑索近)	RDX
	硝酸铵	AN
	聚丁二烯—丙烯腈—丙烯酸	PBAN
(高聚物)	聚丁二烯—丙烯酸	PBAA
	端羧基聚丁二烯	CTPB
	端羟基聚丁二烯	HTPB
	聚硫橡胶	PS
	聚丙二醇	PPG
	聚氨酯	PU
	聚氯乙烯	PVC
	固化剂	
固化剂	甲苯二异氰酸酯	TDI
	六次甲基二异氰酸酯	HMDI
	氮丙啶	MAPO
	环氧化物	

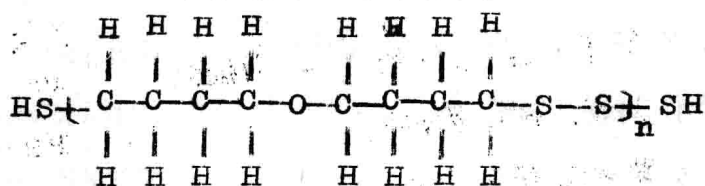
过氯酸铵是最常用的氧化剂，铝粉是最常用的燃料，而目前广泛应用的粘合剂有 PVC、PS、PU 及各种聚丁二烯预聚体。下面扼要介绍一下用这些粘合剂制得的复合推进剂的主要特点。

3-5-1 聚硫橡胶推进剂

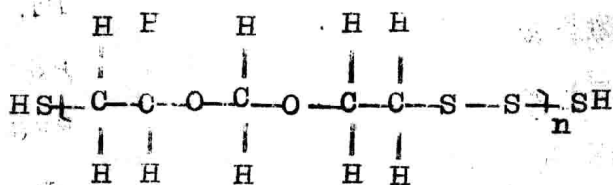
聚硫橡胶推进剂是以液态聚硫橡胶及过氯酸铵为基的复合推进剂。所用的液态聚硫橡胶为丁基缩甲醛聚硫橡胶或丁醚聚硫橡胶，乙基缩甲醛聚硫橡胶等，而以后者用得较为广泛，但丁基缩甲醛聚硫橡胶制得的推进剂的低温力学性能较好。



丁基缩甲醛聚硫橡胶



丁基醚聚硫橡胶



乙基缩甲醛聚硫橡胶

液态聚硫橡胶可用金属氧化物、有机过氧化物或对苯醌二肟氧化成高分子而固化。

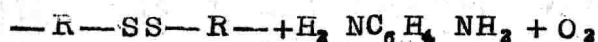
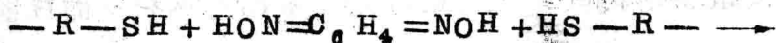
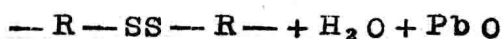


表6和表7中列出两个典型的聚硫橡胶推进剂配方。