

火药与装药设计基础

黄人骏 编著

国防工业出版社

火药与装药设计基础

黄 人 骏 编著

国防工业出版社

火药与装药设计基础

PDG

内 容 简 介

本书从火药与装药设计的角度,比较系统地分析了火药能量、燃烧、力学、物理、化学及加工性能与火药配方的关系;装药结构及点火系统与武器弹道性能的关系,并提出了考虑火药综合性能时的火药配方设计及装药设计方法。

本书为火药(或固体推进剂)专业“火药与装药设计”课程教材,也可供内弹道、火炮、火箭等专业的本科生、研究生以及从事武器系统和发射装置研制的工程技术人员参考。

火药与装药设计基础

黄人骏 编著

国防工业出版社出版

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092¹/₁₆ 印张12¹/₂ 288千字

1988年7月第一版

1988年7月第一次印刷

印数:

001—

900册

ISBN 7-118-00080-9/TJ12

定价: 2.10元

前 言

火药是一种含能材料，它无需空气中氧的参与即可迅速而规律地燃烧，并放出大量的热和气体。这些高温高压燃气，可以膨胀做功，能完成一些在特殊条件下其它能源所不易完成的任务。例如，卫星、火箭、导弹、火炮、石油井下油水封隔器的发射；飞船姿态控制和舱门开启装置的驱动；舰船的缆绳抛掷；某些合金材料的压力加工等。

由于火药广泛应用于军事和民用工业，因此，火药与装药设计是火药工作者、各类武器和发射装置设计人员关心的重要课题。然而，现有火药与装药设计的内容，多半被人为地分割成“火药的物理化学性质”、“火药装药设计”等几个部分，并且单独成书，且火药设计也仅限于火药的能量设计，并未考虑火药配方与火药综合性能间的关系，这就不便于人们全面地了解火药与装药。作者根据多年的教学实践和近二十年来各国发表的火药与装药理论及实验资料，系统地阐述了火药与装药设计所需的基础理论知识，提出了先分别考虑满足火药主要性能而后根据火药综合性能进行配方设计的方法，并在仔细分析现有身管火炮火药装药结构与弹道性能关系的基础上，讨论了火药装药弹道设计、装药结构设计、点火系统设计的原则和方法。此外对火炮发射时的有害现象和防止这些有害现象的方法也作了详细介绍。

本书承蒙范钦文、高耀林审阅初稿，侯佐明、孙业斌、欧育湘审定，谢继光组织编写，张翔争绘制图稿，对以上各位的帮助，作者表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中可能存在一些缺点和错误，敬请读者批评指正。

黄 人 骏



目 录

绪 论	1
-----------	---

第一篇 火药设计基础

第一章 火药的能量性质	5	三、复合火药燃烧数学模型	76
第一节 火药的能量示性数	5	第四节 考虑燃烧性质时的火药	
一、火药燃气的比容	5	配方设计	81
二、火药的爆温	6	第三章 火药的力学性质	83
三、火药的爆热	6	第一节 火炮火药的受力破坏	
第二节 火药能量示性数计算		情况及其影响因素	83
方法	7	第二节 火箭火药的力学性质	
一、火药的化学式	7	及其影响因素	93
二、火药的燃烧产物组成及能量		一、火箭火药在制造、贮运和使用	
示性数计算方法	8	时的受力情况	93
第三节 火药能量示性数与火		二、火箭火药的变形能力及其影响	
药成分的关系	27	因素	94
第四节 以能量为主的火药配		第三节 考虑力学性质时的火	
方设计	30	药配方设计	102
一、火药的弹道示性数	31	第四章 火药的物理化学安定性	103
二、火炮火药配方设计	31	第一节 均质火药的物理安定性	103
三、火箭火药配方设计特点	33	第二节 均质火药的化学安定性	105
第二章 火药的燃烧性质	37	一、均质火药化学安定性的分析	
第一节 火药燃烧时的火焰结构	38	方法	105
一、均质火药燃烧时的火焰结构	38	二、均质火药的分解过程、安定	
二、复合火药燃烧时的火焰结构		剂选择及安全使用期估算方法	106
特点	45	第三节 复合火药的安定性特点	109
第二节 火药燃速与各种因素的		一、复合火药用粘结剂的老化	109
关系	48	二、复合火药贮存期的估算	111
一、压力对火药燃速的影响	49	第四节 考虑安定性时的火药	
二、初温对火药燃速的影响	51	配方设计	111
三、气流速度对火药燃速的影响	54	第五章 火药的加工性质	112
四、火药燃速与其结构、成分等		第一节 火药用高聚物的流变	
的关系	55	性质	113
五、导热元件对火药燃速的影响	65	一、高聚物熔体的流变性质	113
第三节 火药燃烧的数学模型	69	二、复合火药药料的流变性质	116
一、均质火药的燃烧数学模型	69	三、高聚物溶液的流变性质	118
二、均质火药非稳态燃烧数学模型	72		

第二节 考虑加工性质时的火药配方设计	122	二、求高聚物-增塑剂系统的混溶相图	124
第三节 综合考虑火药全面性质时的配方设计	123	三、求双成分火药的适用温度范围	124
一、计算双成分火药的能量(或弹道)示性数	123	四、求双成分火药的粘度-温度曲线	124
		五、合成	125
第二篇 火药装药设计基础			
第六章 火药装药弹道设计	128	二、底火	158
第一节 火药种类的选择	128	三、点火药包和点火管	159
第二节 线膛炮装药弹道设计	128	第二节 点火系统的点火能力及其影响因素	159
一、定装药弹道设计	129	一、点火药的点火能力	159
二、变装药弹道设计	131	二、点火药量的影响	164
第三节 两相流内弹道简介	135	三、点火药位置及点火具结构的影响	166
一、基本假设	135	第九章 火药装药的附加元件	168
二、欧拉(L. Euler)坐标下的平衡方程	135	第一节 火炮射击时的炮膛烧蚀与护膛剂	168
第七章 火药装药结构设计	142	一、炮膛烧蚀现象及其危害	168
第一节 火药装药结构的类型和特点	142	二、炮膛烧蚀原因	169
一、线膛炮装药结构	142	三、防止炮膛烧蚀的方法	171
二、滑膛炮装药结构	145	第二节 炮膛积铜与除铜剂	177
第二节 火药装药结构与火炮弹道性能间的关系	147	第三节 炮口有害现象及防止方法	177
一、膛内压力波的产生及其表示方法	147	一、炮口有害现象的形成过程	178
二、影响压力波成长的因素	148	二、减少炮口有害现象的方法	180
第八章 点火系统设计	157	第十章 火炮用液体推进剂简介	182
第一节 点火系统的组成及作用	158	附录	185
一、药筒火帽	158	参考文献	193

绪 论

火药是我国古代四大发明之一^[1]，它对武器和科学技术的发展以及人类文明与社会进步所做的重大贡献是举世公认的。

18世纪60年代，英国发生的资本主义产业革命曾经极大地促进了各个工业部门的发展，其中包括冶金和采矿工业。当时，世界上唯一的火药（也是唯一的炸药）——黑火药用于矿山爆破以后，显著地提高了采矿效率，推动了冶金工业的发展，从而也促进了产业革命和社会进步。19世纪后期，随着冶金工业的进一步发展，黑火药的威力已经不能满足矿山采掘工业的要求了。正在这时，瑞典科学家诺贝尔（Alfred Nobel）发明了烈性炸药——爆胶，它最初系硝化甘油与硅藻土的混合物，后来发展为以硝化纤维素吸收硝化甘油制成的胶状物。爆胶的问世，不仅使矿山采掘工业的面貌改观，而且使火炸药工业得到了巨大的发展，诺贝尔也因此成为举世闻名的科学家。从1901年以来，以诺贝尔命名的科学技术界的最高奖赏——诺贝尔奖金，对世界科学技术的发明和创造，一直起着很好的鼓励和推动作用。

火药在发展武器方面的贡献也是人所熟知的。19世纪70年代以前，所有的热武器都以黑火药为能源。但黑火药能量低，发射时产生烟雾，且容易吸湿。1879~1885年，出现了以硝化纤维素和硝化甘油为基础的单、双基药，它们没有黑火药的上述缺点，因而极大地推动了武器的发展。在这以后，各类线膛武器大量涌现，武器的射程和射击精度也大大提高，以致在二次世界大战中，炮兵在苏联被誉为“战争之神”。火箭武器的发展，要求进一步提高火药的能量和增大装药尺寸，于是在20世纪50年代，高能复合火药又应运而生。复合火药的出现，反过来又促进了火箭和导弹技术的进步。现在世界各国的火箭和导弹，80%以上都采用固体火药。

火药在民用工业上的应用也日益增多，火药作为某些动力装置的能源，已为很多部门采用。例如，航天飞机的助推器；宇宙飞船的助推和分离装置；飞船的姿态控制和飞船再入大气层时的减速装置^[2]；气象、探空和防雹火箭；石油开采所用的井下油水分离器^[3]；高压成型技术中的动力装置，以及海难救援、缆绳抛掷装置等均以火药为能源。

可见，无论过去和现在，火药在军事及民用两个方面都具有广泛的用途。火药之所以能广泛应用于军事和民用工业的各个部门，是与它的特点分不开的。火药是一种具有规定形状和尺寸；在适当激发能的作用下，无需外界氧的参与即能迅速而规律地燃烧，同时放出大量热和气体的物质。火药燃烧时产生的高温高压燃气，可以迅速膨胀做功，推送弹丸和火箭飞行，所以，火药是各种武器的发射能源，而且也非常适用于各类太空、地下及水中的动力装置。

虽然火药用途广泛、种类繁多，但它们可大致归纳为以下几类。

（1）低分子混合火药。它们是由无机氧化剂和可燃物均匀混合压制而成的，前述的黑火药即是这类火药的典型。这类火药的氧化元素和可燃元素分别含于氧化剂及可燃物中，它的能量比较低且不能制成具有足够强度的大尺寸火药。

(2) 以高、低分子有机炸药为基础组成的火药。这类火药中的典型高分子炸药是硝化纤维素，将它用爆炸性增塑剂增塑即可制得双基药；用非爆炸性溶剂处理即可制得单基药；以这些火药的药料为基底，加入适量低分子固体炸药（如硝基胍、黑索今等），则可制得三基药和硝胺火药。这类火药的氧化元素和可燃元素均含于火药主要成分的同分子中。单、双基药是爆炸性高聚物的增塑体系，其中的炸药不呈分子状态分散，但此种体系的质地比较均匀，因此，也称它们为均质火药。而三基药或硝胺火药，由于硝基胍、黑索今等与硝化纤维素不相溶，它们类似于高聚物中的填料，所以，三基药和硝胺火药是非均质的。

单、双、三基药和硝胺火药的典型配方如表 0-1~表 0-4 所示。

表0-1 单基药的组成

成分	含量(%)	火药类别	枪 药	炮 药
硝化纤维素(N% > 13.0)			94~96	—
硝化纤维素(N% = 12.8~13.0)			—	94~96
二苯胺			1.2~2.0	1.2~2.0
樟 脑			0.9~1.8	—
石 墨			0.2~0.4	—
剩余溶剂及水			1.7~3.4	1.8~3.8

表0-2 双基炮药的组成

成分	含量(%)	火药类别	线膛炮用双基药	迫击炮用双基药
硝化纤维素(N% = 12.0)			56.0	58.5
硝化甘油			26.5	40.0
二硝基甲苯			9.0	—
苯二甲酸二丁酯			4.5	—
中定剂			3.0	1.4
凡士林			1.0	0.1
水 份(100%以外)			0.3	0.3

表0-3 三基药和硝胺火药的组成

成分	含量(%)	火药类别	三 基 药	硝胺火药
硝化纤维素(N% = 12.6)			28.0	29.3
硝化甘油			22.5	22.7
硝基胍			47.7	5.0
黑索今			—	36.5
乙基中定剂			1.5	1.5
苯二甲酸二辛酯			—	5.0
冰晶石			0.3	—

表0-4 双基箭药的组成

成分	含量(%)	火药牌号	JPN(美)	ПСИ-12М(苏)
硝化纤维素			51.4(N% = 13.25)	54.5(N% = 12.0)
硝化甘油			42.9	26.5
二硝基甲苯			—	12
苯二甲酸二丁酯			3.23	—
中定剂			1.0	3.0
凡士林			—	1.0
硫酸钾			1.25	—
蜡			0.02	1.8
炭黑			(0.2)	—
PbO			—	1.2

(3) 以无机含氧酸盐和非爆炸性高聚物为基础组成的火药。这类火药中的氧化剂为高氯酸盐(高氯酸铵、高氯酸钾)和硝酸盐(硝酸铵)等,而非爆炸性高聚物(聚氨酯、聚丁二烯衍生物、聚硫橡胶等)则兼具可燃物和粘结剂的作用,它们对火药的能量、燃烧和力学性能都有重大的影响。由于这类火药中的氧化元素和可燃元素分别含于不同的化合物中,故其中的氧化剂和粘结剂分成明显的两相。因此,这类火药也称为异质火药或者复合火药。

复合火药的典型配方如表 0-5 所示。

表0-5 复合火药的组成

成分	含量(%)	火药类别	HTPB ^① 火药	PVC ^② 火药
高氯酸铵			70.0	58.9
铝粉			18.0	21.1
粘结剂			12.0	8.68
巴二酸二辛酯			—	10.79
其它			—	0.59

① HTPB—端羟基聚丁二烯。

② PVC—聚氯乙烯。

火药是武器和某些动力装置的能源,但它必须装于武器或动力装置中才能发挥作用。因此,火药是武器的重要组成部分,或者说是武器的一组元件。对于某些动力装置(如壳体粘结式火箭发动机),火药甚至是它们的结构元件。

为了保证武器能够正常而安全地发射,火药除了本身应能规律燃烧外,它的组合体在火炮药室和火箭发动机中还应具有一定的结构,且须与其它元件(如点火系统)正确配合,这种以一定形式组合起来、保证武器一次发射时具有规定弹道性能的装药元件的整体,就是武器的火药装药,其典型结构如图 0-1 及图 0-2 所示。

火药及装药设计与武器的关系是非常密切的,武器和动力装置对火药与装药有一系列要求,它们是:

- (1) 火药必须具有足够的能量;
- (2) 武器发射时,火药应能正常燃烧,并具有武器所要求的燃速;
- (3) 火药应具有良好的力学性能、贮存安定性和制造加工性能;

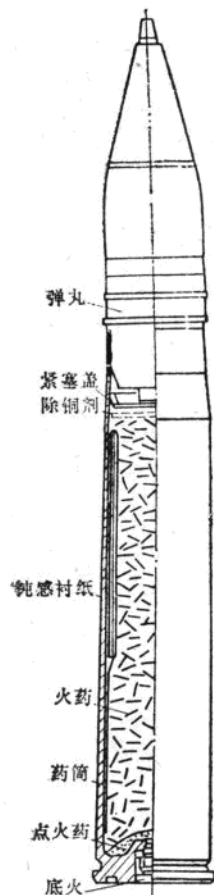


图0-1 55式37mm
高炮榴弹火药装药

- (4) 制造火药的原料一般应由本国生产，且来源丰富；
- (5) 火药应能安全地制造和使用；
- (6) 火药装药应能保证武器弹道具有足够的稳定性和尽可能提高武器的弹道性能。

所有这些要求都是火药与装药设计需要研究和解决的问题。但由于武器和动力装置的多样性和复杂性，一种火药不可能同时满足上述全部要求，故在实际工作中，往往是针对不同武器提出的要求，设计出适用于不同武器的火药（例如火炮火药和火箭火药等）。此外，火药及装药设计与武器设计是相辅相成的，火药固然需要满足武器提出的要求，但火药性能的提高，又将促进武器的革新和发展。因此，一般情况下，火药设计应该先于武器设计独立进行。而为了更好地设计火药与装药，就必须研究火药与装药的性能及其变化规律，掌握火药与装药设计的基本原理，这就是本书下述各章讨论的主要内容。

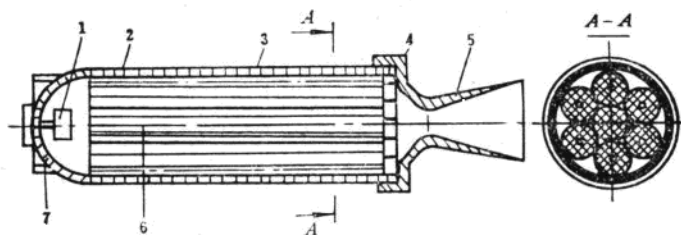


图0-2 自由装填式火箭火药装药

1—点火具；2—绝热层；3—燃烧室；4—挡
药板；5—喷管；6—火药装药；7—连接装置。

新学知

好

PDG

第一篇 火药设计基础

第一章 火药的能量性质^[4]

火药能量设计是火药配方设计的主要内容, 它的任务是研究火药能量与配方之间的关系, 选择合适的火药成分以满足不同武器对火药能量的要求。

火药能量设计需要一些基本条件, 它们是:

- (1) 判断火药能量高低的标准, 即火药的能量示性数;
- (2) 实用的火药能量示性数计算方法;
- (3) 火药成分的基本热力学数据;
- (4) 以能量为主的火药配方设计原则和方法。

下面逐节分析这些问题。

第一节 火药的能量示性数^[5]

火药是射击武器的发射能源。由火炮及火箭内弹道学可知, 用以判断火药在武器中作功能力大小的主要有两个示性数, 即身管武器的定容火药力 f_v 和火箭武器的比冲量 I_{sp} 。它们的数学表达式分别为

$$f_v = nRT_v \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-1)$$

式中 n —— 1 kg 火药燃气的摩尔数 (mol/kg);

R —— 气体常数 (J/mol·K);

T_v —— 火药的定容爆温 (K)。

$$I_{sp} = 44.753 \sqrt{H_c - H_e} \quad (1-2)$$

式中 H_c —— 火箭燃烧室中温度为 T_c 时火药燃烧产物的总焓 (kJ/kg);

H_e —— 喷管出口断面上燃烧产物的总焓 (kJ/kg)。

由式 (1-1) 及 (1-2) 可知, f_v 及 I_{sp} 都与火药的性质有关, 因此可以作为判断火药在武器中作功能力大小的示性数。但 f_v 和 I_{sp} (特别是 I_{sp}) 也与武器结构有关, 它们在设计 and 大量筛选火药配方时使用不太方便。所以, 我们还应该寻找不受武器结构条件限制而仅与火药性质有关的火药能量示性数。

由式 (1-1) 及 (1-2) 看出, 火药的燃气摩尔数 n 和火药的爆温是影响 f_v 和 I_{sp} 的主要因素。因此, 火药的燃气摩尔数和火药的爆温应该可以作为火药的能量示性数。

一、火药燃气的比容

因为单位质量 (1 kg) 火药燃气的摩尔数与其体积成正比, 而火药燃气的体积是可以测定的, 所以人们就将 1 kg 火药燃气的体积作为火药的能量示性数之一, 称为火药燃气的比容。它的定义是: 单位质量 (1 kg) 火药燃烧以后生成的燃气, 在标准状态 (273 K, 0.1013 MPa) 下, 燃气中的水不冷凝时占有的体积, 以 V_1 表示

$$V_1 = 22.4 n \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{kg)} \quad (1-3)$$

式中 n —— 1 kg 火药燃气的摩尔数。

火药的燃气是火药在武器中作功的工质。 V_1 越大, 火药的作功能力也越大; 但 V_1 并不是判断火药作功能力的唯一标准。因此, 我们还必须研究火药的爆温。

二、火药的爆温

火药的爆温随燃烧条件不同, 可以有两种表示方法, 即定容爆温和定压爆温。

(一) 定容爆温

它是温度为 298 K 的火药, 在真空或惰性气体中, 定容绝热燃烧以后, 燃气达到的最高温度, 以 T_v 表示

$$T_v = Q_v / n \bar{C}_v + 298 \text{ (K)} \quad (1-4)$$

(二) 定压爆温

它是温度为 298 K 的火药, 在惰性气体中定压绝热燃烧以后, 燃气达到的最高温度, 以 T_p 表示

$$T_p = Q_p / n \bar{C}_p + 298 \text{ (K)} \quad (1-5)$$

上二式中, n —— 1 kg 火药燃气的摩尔数;

Q_v, Q_p —— 1 kg 火药的定容与定压爆热;

$\bar{C}_v, \bar{C}_p$ —— 分别为温度在 298- T_v 及 298- T_p (K) 之间燃气的平均定容和定压摩尔热容。

可见, 火药爆温是较火药比容更能全面地表示火药能量性质的示性数, 因为它包括了火药爆热、燃气摩尔数和热容。火药的爆温越高, 它的作功能力也越大, 所以爆温是火药的主要能量示性数之一。

但是, 火药的爆温不易由实验测定, 目前还只能通过火药的燃气与爆热进行理论计算。因此, 在火药研究和设计过程中, 往往不是以爆温而是选择爆热为火药的 能量示性数。

三、火药的爆热

火药的爆热是火药燃烧时放出的热量。由热力学可知, 体系的放热量与环境有关, 故随燃烧条件的不同, 火药的爆热也有两种表示方法, 即定容爆热和定压爆热。

(一) 定容爆热

单位质量 (1 kg) 温度为 298 K 的火药在惰性气体中绝热定容燃烧, 变成温度为 T_v K 的燃气, 而后冷却至 298 K, 在冷却过程中燃气不冷凝放热, 也不发生二次反应时放出的热量, 以 Q_v 表示

$$Q_v = \int_{298}^{T_v} n C_v dT = n \bar{C}_v (T_v - 298) \text{ (kJ/kg)} \quad (1-6)$$

(二) 定压爆热

定压爆热的定义与定容爆热类似 (但火药在定压下燃烧), 并以 Q_p 表示

$$Q_p = \int_{298}^{T_p} n C_p dT = n \bar{C}_p (T_p - 298) \text{ (kJ/kg)} \quad (1-7)$$

Q_v 与 Q_p 之间有下列关系

$$\begin{aligned} Q_v &= Q_p + P(\Delta V) \\ \Delta V &= V - V_0 \end{aligned}$$

式中 V ——常温下 1 kg 火药燃气的体积;

V_0 ——1 kg 火药的体积。

因为 $V \gg V_0$, 故 $\Delta V \approx V$,

$$Q_v \approx Q_p + PV \approx Q_p + nRT_0 \quad (1-8)$$

式中 T_0 ——常温 (K)。

在定义火药定容爆热时, 曾假设燃气在冷却过程中不冷凝放热。但是实际上, 火药燃气中含有一定量的水, 汽态水在冷却过程中必然会冷凝放热, 这就使实验测定的爆热值比理论计算值大。为了能直接应用实验测定的爆热值, 通常人们还使用水为液态的爆热值。

(三) 水为液态时的爆热

$$Q_{v(l)} = \int_{298}^{T_p} n C_v dT + m_{H_2O} \times 41.5362 \text{ kJ/kg} \quad (1-9)$$

式中 m_{H_2O} ——1 kg 火药燃气中水的摩尔数;

41.5362——水的冷凝热 (kJ/mol)。

$Q_{p(l)}$ 也可以类似公式计算。

由上述分析可知, Q_v (或 Q_p) 和 V_1 仅是火药性质的函数, 并且都可以理论计算和实验测定。火药的爆热和比容越大, 它的作功能力也越大。因此, 爆热和比容是火药的主要能量示性数。

第二节 火药能量示性数计算方法

火药能量示性数是判断火药能量高低的主要标准, 火药配方设计和内弹道计算都需要应用它们, 因而有必要讨论计算这些火药能量示性数的方法。

由前述火药能量示性数的数学表达式可知, 欲求火药的能量示性数, 首先需要知道火药燃烧以后燃烧产物的成分。因为火药的爆热、爆温和比容都是燃烧产物组成的函数, 故若已知火药燃烧产物的组成, 即可利用热力学第一定律求出火药的所有能量示性数。

由火药的爆热定义可知, 火药的爆热是在规定条件下, 火药燃烧时放出的热量。根据化学热力学原理, 它可以由盖斯定律计算。但计算火药能量示性数时, 首先要求建立火药的燃烧反应方程式, 这就需要知道火药的化学式。

一、火药的化学式

对于一般化合物, 我们可以由化学手册查得它们的分子式, 再由分子式根据理论分析估计其反应产物。然而, 火药是由多种物质组成的混合物, 它没有分子式, 只能以化学式表示。

怎样表示火药的化学式呢?

由火药组成可知, 火药的各个成分都是由 C、H、O、N、……等元素组成的化合物, 因此, 也可以用这些元素来表示火药的化学式。因为常用火药都含有 C、H、O、N、

Cl、Al、……等元素，故可将 1kg 火药的化学式表示为



A_C 、 A_H 、……、 A_i 系 1kg 火药中各成分的 C、H、……等元素的摩尔数之和。

由于火药是一种混合物，而且火药的各种成分大部分都有明确的分子式，所以可按下列诸式求出 1kg 火药各成分的元素摩尔数。例如，1kg 硝化甘油 ($C_3H_5O_9N_3$) 的各元素摩尔数为

$$A_C = (1000/227.09) \times 3 = 13.210$$

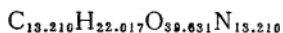
$$A_H = (1000/227.09) \times 5 = 22.017$$

$$A_O = (1000/227.09) \times 9 = 39.631$$

$$A_N = (1000/227.09) \times 3 = 13.210$$

式中 227.09——硝化甘油的分子量。

故 1kg 硝化甘油的化学式为



对有明确分子式的其它火药成分，都可按上述方法计算。但是，火药中还含有一些既没有明确分子式，又没有固定分子量的成分（主要是一些高分子化合物）。例如，硝化纤维素的分子式和分子量都随它的含氮量变化。对于这些化合物，我们可以利用其链节的千克元素摩尔数与取代度的关系求出其化学式。例如，1kg 硝化纤维素各元素的摩尔数为

$$A_C = 37.008 - 1.189N$$

$$A_H = 61.673 - 2.695N$$

$$A_O = 30.839 + 0.437N$$

$$A_N = 0.7139N$$

或者，1kg 硝化纤维素的化学式为



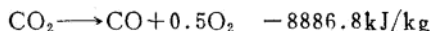
为了便于计算，人们已将火药各种成分的千克元素摩尔数编制成表^[6]（见附录一、二）。利用此表，只要将表列各种火药成分的千克元素摩尔数分别乘以火药中各种成分的百分含量并求和，即可求得 1kg 火药各元素的摩尔数，从而可以求得火药的化学式。

二、火药的燃烧产物组成及能量示性数计算方法

计算火药燃烧产物的组成是计算火药能量示性数的关键。

怎样计算火药燃烧产物组成呢？首先，应该知道火药燃烧以后能生成哪些化合物，这些化合物在燃烧过程中，当外界条件变化时会发生哪些变化。

若已知火药燃烧产物，就可以根据质量守恒、化学平衡和能量守恒原理，列出相应的方程组，解这些方程组即可求得火药的燃烧产物组成。但是，火药是一个多成分混合物，它的燃烧产物一般比较复杂，且随燃烧条件而变化。因此，很难用一般方法简单地确定其燃烧产物。不过，由于火药是负氧平衡系统，即它所含的氧不足以使它本身所含的可燃元素全部氧化为完全燃烧产物。因此，火药燃烧以后，必然会含有完全燃烧产物 (CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 HCl 、 Al_2O_3) 和不完全燃烧产物 (CO 、 H_2)。如果火药在高温低压下燃烧，上述燃烧产物还会离解，例如



对含 C、H、O、N、Cl、Al 的系统，当考虑燃烧产物离解时，燃烧产物可以多达 17 种以上，要确定这 17 种燃烧产物的含量，需要建立 17 个化学平衡方程，解 17 个未知数，这就给计算带来了很大的麻烦。

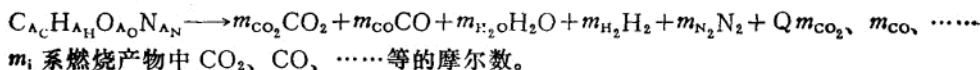
能不能简化这一计算呢？

如果我们先研究元素比较少的系统，并且不考虑燃烧产物的离解，则计算可以大大简化。

(一) 不计离解时均质火药燃烧产物的组成及火药能量示性数计算方法

1. 基本法

不计离解时，均质火药的主要燃烧产物有： CO_2 、 CO 、 H_2O 、 H_2 和 N_2 ，故可建立下列燃烧反应方程



现在，我们来求这 5 个未知数。

(1) 原子守恒方程

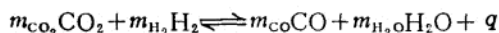
根据质量守恒原理，我们可以写出燃烧反应的原子守恒方程

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CO}} &= A_C, & m_{\text{CO}} &= A_C - m_{\text{CO}_2} \\ 2m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CO}} + m_{\text{H}_2\text{O}} &= A_O, & m_{\text{H}_2\text{O}} &= A_O - A_C - m_{\text{CO}_2} \\ 2m_{\text{H}_2\text{O}} + 2m_{\text{H}_2} &= A_H, & m_{\text{H}_2} &= 0.5A_H - A_O + A_C + m_{\text{CO}_2} \\ m_{\text{N}_2} &= 0.5A_N \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

当火药的化学式确定以后， A_N 即已知，所以 m_{N_2} 可以立即求出。然而，式 (1-10) 中还有 4 个未知数，但只有 3 个方程，因此，还必须再建立一个方程。

(2) 水煤气平衡方程

因为火药燃烧产物中， CO_2 、 CO 、 H_2O 、 H_2 之间存在平衡，因此，我们可以利用水煤气平衡反应



这一反应与压力无关，仅是温度的函数，它的平衡常数为

$$K_w = \frac{m_{\text{CO}} \times m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{CO}_2} \times m_{\text{H}_2}} = f(T) \quad (1-11)$$

K_w 可根据温度 T 由表 1-1 查得。

现在，我们已有 4 个方程，可以用来求解 4 个未知数。然而，水煤气反应平衡常数 K_w 是温度的函数，需要知道温度才能由表 1-1 查出 K_w ，而温度恰好又是我们所要求的未知数。所以，实际上还是 3 个方程求 4 个未知数问题。因此，只能利用逐步近似法求解，即先假设一个温度，解出 m_{CO_2} 、 m_{CO} 、 $\dots\dots$ 等，求出温度 T 。如果求得的温度与假设的温度相差不大（例如， $>50\text{K}$ ），则可以不再进行计算，否则应再假设温度，重复上述计算，直至所求的温度与假设的温度相近为止。

表1-1 水煤气反应平衡常数

T (K)	K_w	$1/(K_w - 1)$	$K_w/(K_w - 1)$	T (K)	K_w	$1/(K_w - 1)$	$K_w/(K_w - 1)$
1100	1.1025	80	81	3600	8.248	0.138	1.138
1200	1.372	2.688	3.688	3700	8.370	0.136	1.136
1300	1.761	1.314	2.314	3800	8.484	0.134	1.134
1400	2.165	0.858	1.858	3900	8.580	0.132	1.132
1500	2.581	0.633	1.633	4000	8.685	0.130	1.130
1600	2.996	0.501	1.501	4100	8.770	0.129	1.129
1700	3.406	0.416	1.416	4200	8.862	0.127	1.127
1800	3.804	0.357	1.357	4300	8.940	0.126	1.126
1900	4.191	0.313	1.313	4400	9.009	0.125	1.125
2000	4.555	0.281	1.281	4500	9.070	0.124	1.124
2100	4.910	0.256	1.256	4600	9.128	0.123	1.123
2200	5.242	0.236	1.236	4700	9.184	0.122	1.122
2300	5.562	0.219	1.219	4800	9.236	0.121	1.121
2400	5.854	0.206	1.206	4900	9.282	0.121	1.121
2500	6.135	0.195	1.195	5000	9.322	0.120	1.120
2600	6.398	0.185	1.185	5100	9.360	0.120	1.120
2700	6.646	0.177	1.177	5200	9.394	0.119	1.119
2800	6.875	0.170	1.170	5300	9.420	0.119	1.119
2900	7.091	0.164	1.164	5400	9.456	0.118	1.118
3000	7.296	0.159	1.159	5500	9.476	0.118	1.118
3100	7.482	0.154	1.154	5600	9.502	0.118	1.118
3200	7.657	0.150	1.150	5700	9.520	0.117	1.117
3300	7.822	0.147	1.147	5800	9.532	0.117	1.117
3400	7.971	0.144	1.144	5900	9.552	0.117	1.117
3500	8.114	0.141	1.141	6000	9.554	0.117	1.117

为了便于计算，可将式 (1-10) 代入式 (1-11)，解出 m_{CO_2} ，即

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{[K_w(A_0 - A_C - 0.5A_H) - A_O] + \sqrt{[K_w(A_0 - A_C - 0.5A_H) - A_O]^2 - 4(K_w - 1)(A_C - A_O)A_C}}{2(K_w - 1)} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 中，除了 K_w 以外，在火药配方一定时，其它各量均为已知数。因此，我们可假设一个温度 T ，由表 (1-1) 查得一个 K_w ，代入式 (1-12)，解得 m_{CO_2} ，再将其回代入式 (1-10)，分别求得 m_{CO} 、 $m_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 m_{H_2} 、 m_{N_2} ，这就是均质火药燃烧产物的第一次近似值。

(3) 能量守恒方程

求得火药燃烧产物组成的第一次近似值后，即可利用火药成分与燃烧产物的生成热（见附录一、二、三）求出 1kg 火药的爆热及其它能量示性数的近似值。

① 爆热

$$Q_p = m_{\text{CO}_2}q_{\text{CO}_2} + m_{\text{CO}}q_{\text{CO}} + m_{\text{H}_2\text{O}}q_{\text{H}_2\text{O}} - q_{p1} = \sum m_i q_i - q_{p1} \quad (1-13)$$

式中 q_{CO_2} 、 q_{CO} 、 $q_{\text{H}_2\text{O}}$ ——分别为燃烧产物 CO_2 、 CO 、 H_2O 的生成热 (kJ/mol)；

m_i 、 q_i ——分别为第 i 种燃烧产物的摩尔数及生成热 (kJ/mol)；

q_{p1} ——火药的生成热 (kJ/kg)。

$$q_{pi} = \sum (10/M_i) q_j x_j$$

式中 M_j, q_j, x_j ——分别为火药中第 j 种成分的分子量、生成热 (kJ/mol) 和百分含量。
于是

$$Q_v = Q_p + nRT_0 = Q_p + (m_{CO_2} + m_{CO} + m_{H_2O} + m_{H_2} + m_{N_2})RT_0 \quad (1-14)$$

式中 T_0 ——常温, 通常取 298K。

③ 爆温

有了火药的爆热和燃烧产物组成, 即可利用燃烧产物热容与温度的经验关系式, 求得火药的爆温为

$$\left. \begin{aligned} t &= Q_v / \sum m_i \bar{C}_{vi} (^\circ\text{C}) \\ T_v &= t + 298 (\text{K}) \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式中 $m_i, \bar{C}_{vi}$ ——分别为火药第 i 种燃烧产物的摩尔数和它在温度为 298~ T_v K 之间的平均定容热容 (J/mol·K)。

火药主要燃烧产物的平均定容热容, 可采用下列经验式计算

$$\left. \begin{aligned} \bar{C}_{vCO_2} &= 41.601 + 22.376 \times 10^{-4}t \text{ (J/mol} \cdot ^\circ\text{C)} \\ \bar{C}_{vCO} &= 23.342 + 10.083 \times 10^{-4}t \\ \bar{C}_{vH_2O} &= 28.421 + 35.434 \times 10^{-4}t \\ \bar{C}_{vH_2} &= 20.116 + 15.786 \times 10^{-4}t \\ \bar{C}_{vN_2} &= 22.865 + 10.610 \times 10^{-4}t \\ \sum m_i \bar{C}_{vi} &= \sum m_i (a_i + b_i t) = \alpha + \beta t \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

$$\alpha = 41.601m_{CO_2} + 23.342m_{CO} + 28.421m_{H_2O} + 20.116m_{H_2} + 22.865m_{N_2}$$

$$\beta = (22.376m_{CO_2} + 10.083m_{CO} + 35.434m_{H_2O} + 15.786m_{H_2} + 10.610m_{N_2}) \times 10^{-4}$$

于是

$$\left. \begin{aligned} t &= (1000Q_v) / (\alpha + \beta t) \\ t &= (-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 400\beta Q_v}) / 2\beta \\ T &= t + 298 (\text{K}) \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

③ 燃气比容

$$V_1 = (m_{CO_2} + m_{CO} + m_{H_2O} + m_{H_2} + m_{N_2}) \times 0.0224 \text{ (m}^3/\text{kg)} \quad (1-18)$$

由上述可知, 基本法原理非常简单, 但计算却很繁琐, 因此需要简化。

怎样简化这一计算呢?

由前述推导可知, 欲求火药的能量示性数, 必须求出火药燃烧产物的组成, 而计算后者的关键又在于求 m_{CO_2} 。但由于 m_{CO_2} 是火药各元素摩尔数和水煤气平衡常数的函数, 因此可将火药能量示性数简化成 A_i, m_{CO_2} 和火药生成热 q_{pi} 的函数。

简化后的 m_{CO_2}, Q_p, Q_v 等的数学表达式可由下列各式求得。

由式 (1-12) 得

$$\left. \begin{aligned} m_{CO_2} &= 0.5 \left\{ A_0 - \left(\frac{K_w}{K_w - 1} \right) (A_c + 0.5A_H) \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\left[A_0 - \left(\frac{K_w}{K_w - 1} \right) (A_c + 0.5A_H) \right]^2 + \frac{4A_c}{K_w - 1} (A_0 - A_c)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$