

TJ63

L75

353823

高等学校教材

鱼雷推进剂及供应系统

刘训谦 编

西北工业大学出版社

1991年12月 西安

前 言

本书是水下热动力机械与装置专业“鱼雷推进剂与供应系统”课程的教材。

在编写时，考虑到本专业这方面内容的现状及发展，以及专业扩大面向，归类作了介绍。考虑到与其它课程的分工与衔接，有关内容侧重不一样，如本书热化学内容侧重于应用；燃烧部分侧重于燃烧室设计；供应系统的控制侧重于控制部件的原理与设计，而不是控制系统等。另外，考虑到既能照顾到内容，又受篇幅所限，在气路系统中介绍了调压阀，而在液路系统中介绍了流量调节阀。

本书共分六章，第一章介绍对推进剂的要求及目前和以后可能使用的部分推进剂性能。第二章是在“工程热力学”的基础上详细介绍了使用平衡常数法与最小自由能法计算燃烧产物性能的原理、步骤、算例。第三章介绍供应系统分类、组成，以及气态、液态汽态共存的贮仓设计。第四章介绍燃烧室设计，其中包括液滴燃烧模型、燃烧室尺寸确定、液体燃料雾化、点火用固体药柱设计、外部冷却等内容。第五章对应挤代式输送方案介绍气路系统中的一些问题，其中详细介绍了减压器性能与设计。第六章对应泵供式方案介绍了液压泵原理与设计，以及流量调节阀的性能分析等。

从以上内容可以看出，本书不仅是本专业的教材，而且也可供其他热动力机械专业以及机械工程专业的有关人员参考。

本书是在《鱼雷推进剂与供应系统》讲义基础上改编而成。在编写过程中参考了有关著作的有关内容，在此申明并向有关作者致谢。还要感谢潘宏亮同志在校对、检查、单位换算及插图核对等方面所作的工作。

本书由镇江船舶学院叶祖荫教授审稿，提出许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。

编者

1990年3月

目 录

绪 论	1
§ 0.1 引言	1
§ 0.2 燃料与供应系统对产品性能的影响	1
§ 0.3 本课程的要求	7
绪论习题与思考题	7
第一章 推进剂	8
§ 1.1 引言	8
§ 1.2 对推进剂的要求	8
§ 1.3 推进剂性能	10
§ 1.4 液态推进剂	11
§ 1.5 固体推进剂	16
§ 1.6 对推进剂的继续研究	18
第一章习题与思考题	20
第二章 推进剂燃烧产物性能计算	21
§ 2.1 概述	21
§ 2.2 推进剂的化学式	22
§ 2.3 化学平衡和化学平衡方程	25
§ 2.4 燃烧产物的确定和质量守恒方程	27
§ 2.5 燃烧反应热效应和燃烧室热平衡方程	30
§ 2.6 用平衡常数法计算燃烧产物性能	33
§ 2.7 用最小自由能法计算燃烧产物性能	38
第二章习题与思考题	47
第三章 供应系统与贮舱设计	49
§ 3.1 概述	49
§ 3.2 流体动力输送方式	49
§ 3.3 气态氧化剂(或挤代剂)舱的容积确定和舱内气体工作过程	51
§ 3.4 汽、液两态存贮舱容积和舱内物质状态的确定	53
第三章习题与思考题	57
第四章 燃烧室设计	59

§ 4.1	化学动力学基础及燃烧分类	59
§ 4.2	液滴和液雾燃烧	63
§ 4.3	燃烧室容积和形状的确 定	67
§ 4.4	喷雾器设计的理论与实验研究	77
§ 4.5	燃烧室点火	90
§ 4.6	燃烧室外部冷却	98
§ 4.7	燃烧室强度校核及材料选择	107
§ 4.8	燃烧室试验	116
	第四章习题与思考题	118
第五章	挤代供应系统中主要部件的性能及设计	120
§ 5.1	概述	120
§ 5.2	减压器性能分析及设计中用到的基本关系	121
§ 5.3	减压器静态特性及有关因素对其影响	125
§ 5.4	减压器的动态特性	130
§ 5.5	减压器设计步骤及举例	133
§ 5.6	减压器试验分析	137
§ 5.7	气路中常用的几个装置简介	138
	第五章习题与思考题	141
第六章	泵供系统中主要部件的性能及设计	143
§ 6.1	概述	143
§ 6.2	液压传动中的某些基本概念和关系式	147
§ 6.3	齿轮泵	155
§ 6.4	叶片泵	169
§ 6.5	柱塞泵	175
§ 6.6	阀控流量调节	182
§ 6.7	液压随动系统的工作原理	187
	第六章习题与思考题	190
附录 1	平衡常数	192
附录 2	某些燃烧产物的焓	195
附录 3	一些气体的能焓	197
	参考资料	198

绪 论

§ 0.1 引 言

热能动力机械与装置是靠热能为动力来工作的机械与装置。它包括两大部分：一部分是燃料与供应系统，即燃料及其贮存、燃料各组元按要求比例量及时传输、燃烧及装置等，也可以说是由化学能转变为热能的部分；另一部分是发动机，是由热能转变为机械能的部分。

热能动力机械与装置在现代生活中起着十分重要的作用，各种不同类型、性能的动力装置十分广泛地应用在汽车、拖拉机、火车、轮船、汽垫船、飞机、导弹、宇宙飞船等工农业、交通、军事等各个领域。

由于使用的目的和环境不同，热能动力机械有其不同的类型和特点。例如，在没有空气的太空，使用火箭发动机及自己的能供系统。对有空气环境的汽车、拖拉机、轮船和水面舰艇，用内燃机及能供系统。而飞机多采用燃气轮机、空气喷气发动机及其能供系统。对于水下的航行体，如鱼雷、潜艇、深潜器等则可采用开式或闭式循环的热动力装置。尽管这些动力装置类型不同，各有特点，但是它们也具有很大程度的共性，即都具有化学能转变为热能的能供系统及热能转变为机械能的热机等两部分，而且，前一部分的共性更多。因此，这一方面使我们可以以某一两类的装置来分析、研究得深入一些。同时，从另一方面说，由于存在共性，即设计原则、工作原理等有共同之处，也可由此扩大到其它类型。

随着科学技术的不断发展，对动力装置的研究也越来越深入，因为这不但对动力装置在能量上要求继续提高（如航速、航程要求增加），而且是由于可靠性要求提高、能源要求节省（降低能耗）、防止环境（特别是大气）污染、降低成本等方面的要求在不断提高，加上国家、企业产品间的激烈竞争等因素，使得对动力装置的研究更加广泛、更加深入。

本课程研究动力装置中的燃料及供应系统。从燃料与供应系统来讲，在没有空气的环境下工作的动力装置比有空气环境时工作的动力装置要增加氧化剂的一部分。因此，介绍前者更具普遍性。

要强调一点，虽然由于篇幅和分工的原因，将动力装置分成两部分来讲，但是，它们是一致的，即燃料与供应系统要供给发动机所要求的工质性能，以及要满足作为整个系统的一些要求。并且往往因为相互协调而不得不受一些限制。

§ 0.2 燃料与供应系统对产品性能的影响

不同热动力产品要求不同性能，如汽车，除了要求发出预定的功率外，还非常强调要求其良好的速度特性、控制性能、经济性、寿命长、污染（废气、噪音）小等。而在无空气环境下的火箭、鱼雷，除要求预定的功率外，还要求重量尽可能轻、体积尽可能小。对鱼雷还要防水、防潮。因此要针对不同产品的特点来不断改进性能。

我们这里举鱼雷的例子来看推进剂与供应系统对其性能的影响。为了比较性能，先介绍

几个参数关系。

一、鱼雷战术技术性能与能源及供应系统的大致关系

鱼雷航速 V 的确定与目标航速 V_T 及鱼雷本身所携带的能量 E 有关。我们知道为克服鱼雷航行阻力所需功率为

$$N = K_1 \rho D^2 V^3 \quad (0-1)$$

式中, ρ 为海水密度; D 为鱼雷直径; K_1 为系数。鱼雷航行全程时间所需要的能量 E' 等于功率乘时间, 航行时间可由航程 R 除以航速 V 求出。于是 $E' = N \frac{R}{V} = K_1 \rho D^2 V^2 R$ 。虽然由于发动机效率、燃烧室效率及剩余燃料等一系列的原因, 鱼雷携带能量 E 只有一部分转化为鱼雷航行所消耗掉的能量 E' , 但它们之间大致可写成 $E = KE'$, 于是

$$E = K_1 K \rho D^2 V^2 R = K_2 \rho D^2 V^2 R \quad (0-2)$$

从 (0-2) 式看出, 鱼雷航速, 航程与 E 有关, 且增大航速是以较大缩短航程为代价的。

如果鱼雷尾追目标, 其攻击距离为 S , 则在 t 时刻击中的关系为 $Vt = V_T t + S$ 。 t 可由燃料总消耗量 Q 除以秒耗量求得, 而燃料秒耗量正比于功率 N 或 V^3 , 于是可得 $S = K_3 \frac{Q}{V^3} (V - V_T)$, 将此式对 V 求导并等于零, 可求得在一定能量消耗下获最大攻击距离的鱼雷航速为 $V = \frac{3V_T}{2}$, 即鱼雷航速为目标航速的一倍半。

作为鱼雷和目标这一对矛盾来说, 只是合理的选择速度仍然是不够的, 因为由 (0-2) 式决定的 E 与 V 、 R 关系随着矛盾的不断发展不一定能满足击中与攻击者自身安全的需要。所以, 随矛盾的发展希望不断的提高 E , 而能量贮备总占一定的体积和重量, 也就是具有一定的能量密度。如果采取增大 D 的办法来提高 E , 从 (0-1) 式可看出是不合算的。而采用增大能源贮备的长度来提高 E 的办法由于受发射装置等的限制也是有限的, 因此, 采用提高能量密度的方法, 即采用能量更高的推进剂, 更轻更小的贮存及供应系统。会使鱼雷的航速、航程有较大的提高。

二、从鱼雷发展看能供系统对其性能的影响

这方面的例子很多。各时期选具有代表性的一些鱼雷, 其动力性能列于表 0-1。

从表 0-1 鱼雷发展过程可以看出:

最初鱼雷采用压缩空气作能源, 压力为 $(25 \sim 180) \times 10^5 \text{Pa}$ 。由于只用物理能, 未用化学能, 能量贮备太少, 航程太短而实用性差。

1901~1905 年出现燃烧室, 用煤油和压缩空气的燃烧产物作工质, 使能源贮备、能量密度较前有了大幅度的提高, 从而使鱼雷航速、航程有了大幅度提高。当时水面舰艇的航速只有 $15 \sim 20 \text{kn}$ ($1 \text{kn} = 1.85 \text{km/h}$), 且防卫距离小, 因此鱼雷显示了较大的威力。

表 0-1

制造年代、 型号、国别	直径 (cm)	总重 (kg)	装药 (kg)	能源	供应方式 (舱压)	发动机 类 型	最大航深 (m)	航速(kn) 航程(m)
1866年 (俄、奥、 匈帝国)	355	136	8	25 大气压冷压 压缩空气		冷机	2	6.5~ 7 / 640
1987年(俄)	380	450	65.4	100 大气压冷 压缩空气		冷机	4.5	22.5 / 550 30 / 370
1905年(俄) MK5(美)	450	636	90	煤油+压缩空 气	挤代 (150)	星型四缸往 复活塞机	4.5	32 / 1 000 26 / 3 000
1910年(俄)	450	655	100	煤油+空气 +淡水	挤代 (150)	星型四缸往 复活塞机		36 / 1 000 24 / 5 200
1920年(日)				电池		电机		30 / 2 970
1939年(苏) 53-39	533.4	1 755	300	煤油+空气 +淡水	挤代 (200)	卧式双缸 活塞机	14	51 / 4 000 30 / 10 000
1940年 MK15(美)	533.4	1 415		酒精+空气 +淡水	挤代 (195)	涡轮机		45 / 5 500 26.5 / 1 3500
1943年 G-7u(德)	533.4	1 530	300	萘烷+空气 +淡水	挤代 (200)	放射式四缸 往复活塞机	14	44 / 6 000 30 / 14 000
1946年 ЭТ-46(苏)	533.4	1 775	450	铅酸蓄电池 (47Wh / kg)		放射式四缸 往复活塞机		31 / 6 000
1944年 MK16(美)	533.4	1 816	329	酒精+70% 过氧化氢 +淡水		涡轮机	14	46 / 10 000 (航迹小)
1944年 93型(日)	533			煤油+液氧 +海水		双缸往复 活塞机		48 / 18 300
1945年 Steinwal (德)	533.4	1 760		萘烷+过氧化 氢+海水		涡轮机		45 / 21 000 (航迹小)
1946年(美)	584	1 450	550	固体燃料		喷气机		70 / 900

续表 0-1

制造年代、 型号、国别	直径 (cm)	总重 (kg)	装药 (kg)	能源	供应方式 (舱压)	发动机 类 型	最大航深 (m)	航速(kn) 航程(m)
1955年(意)	515	1 000	300	氢化硼+水		喷气机		
1956年 53-56(苏)	533.4	2 000	400	煤油+氧气+水	挤代	卧式双缸 活塞机	14	40 / 13 000 50 / 8 000 (航迹小)
1960年 CAЭT -60(苏)	534.4	1905	300	蓄电池		电机		42 / 13000 35 / 15000
1966年后 MK46-1 (美)	324	258	40	OTTO-II	泵供	凸轮式活 塞机	450	40~ 45 / 11 000
* ASROC 舰对潜火箭 助飞鱼雷 (美)	760	454	装 MK44 或 MK46					1Ma / 14 820
TP-61 (瑞典)	533.4	1 765	250	酒精、过氧化 氢、淡水		往复机	18	50 / 30 000
1972年后 MK48-III (英)	533.4	1 579	267	OTTO-II	泵供	斜盘式 活塞机	914	50~55 / 38 000
A184(意)	533	1 265	250	银锌电池 (75Wh / kg)		电机	350	36 / 10 000
八十年代末 MK50(美)	324	261		Li+SF ₆ 闭式 循环		汽轮机		40kn
海鳞(法) (尚未服役)	324	295		铝-氯化银-次 电 池 (140~ 180Wh / kg)		电机	1 000	53 / 10 000
火箭助飞鱼 雷 ASW- SOW(美)				装 MK50 鱼 雷				航 程 160km
矛鱼(英)	533	1 850		HAP+OTTO -II+海水		燃气轮机	914	55~70 / 约 40 000
65型(苏)	660			闭环热系统或 磁水动力 MHD				50 / 27 000 30 / 54 000

1906~1912年，出现了加淡水冷却燃烧产物的燃烧室，代替前一阶段用气体氧化剂冷却的方法（原法要多用3~4倍正常化合比量的氧化剂），使气体氧化剂量大为减少，提高了能量密度，使V、R又有突破。

随着能源贮备、工作压力的增大，如何能按比例稳定地供应推进剂组分（如氧化剂）从而使燃烧室、发动机稳定工作的矛盾又突出出来，于是产生了双级减压器来解决这一矛盾，使得航程进一步提高。

直到二次世界大战中，这一段时间采用多带燃料及改进发动机使鱼雷航速升到40~45kn，航程8000~6000m。此阶段，水面舰艇航速增到30~40kn，火炮等武器防卫距离有增加，但水下对潜艇的探测距离却不大，因此，在二次大战中鱼雷攻击威力还是大的。二次大战末，武器防卫距离加大，要求进一步提高能量密度，于是采用液态氧化剂（如液氧、过氧化氢）来代替气态氧化剂，进一步减少了氧化剂及贮备容器的重量和容积。如燃烧1kg煤油，约用15kg压缩空气，而用过氧化氢只约8.5kg，用液氧只约4.5kg。使鱼雷航程、航速大为增加。

改用液态氧化剂使原先用气态氧化剂时的燃烧剂、氧化剂、冷却剂三者比例发生变化，冷却剂的比例上升较多，于是又出现采用海水代替淡水冷却来提高能量密度的方法，这种办法使航速、航程又有提高。

二次大战末至今，能量密度又提高不少，这是由于鱼雷采用了新的轻型材料、新燃料及进一步改进发动机等方面的进展。其中燃料如单组元液体燃料OTTO-II，这种改进不但因减轻了贮存器重量、供应系统减少等使能量密度提高，而且在制造、使用等方面也带来好处。

从以上情况看出，增大能量密度、改进燃烧及装置使效率提高是很重要的。

鱼雷的隐蔽性涉及攻击者自身的安全，除了在动力类型上选择（如热或电力）、热动力装置类型上的选择（如开式循环和封闭循环）外，在选择燃料上也是有关系的，有的燃料其燃烧产物溶于水比例少，则航迹大，如用压缩空气作氧化剂的燃料，OTTO-II燃料。而有的燃料燃烧产物溶于水比例大，就几乎无航迹，如“矛鱼”所用的HAP+OTTO-II+H₂O燃料。

目前一般水面舰艇航速为30~40kn，一般潜艇航速为15~17kn，原子或核动力潜艇航速为30~36kn，但新型潜艇，如苏联“阿尔法”核动力潜艇报道航速为40~45kn，最大航深800m，这样，从航速、航深等方面来看，又对鱼雷提出新的要求。各国也正在研究新雷，对推进剂及供应系统的研究可以为之提出新的方案或方向，如对OTTO-II燃料添加氧化剂高氯酸羟胺（英文缩写HAP）及用海水冷却可进一步提高能量密度，比OTTO-II重量能量提高近40%，体积能量提高60%以上，且燃烧产物大多溶于水，使鱼雷几乎无航迹，这一方案（英国7525方案）现发

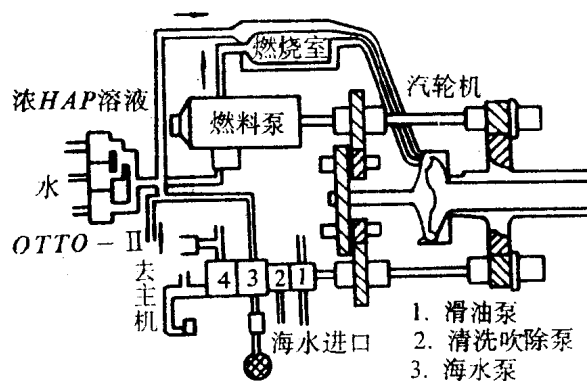
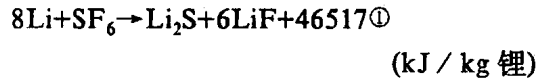


图 0-1 “矛鱼”方安示意图

展为取名“矛鱼”的鱼雷。图 0-1 为此方案的示意图。又如：对推进剂的研究指出金属燃烧剂（铍、铝、镁、锂等）是高能燃烧剂，在综合了其他因素之后如能实施，可提高能量密度。所以采用了锂和六氟化硫为推进剂的方案，现已发展为 MK50 型鱼雷，将代替 MK46 鱼雷，其动力系统为封闭循环，故无航迹，且不受航深影响，推进剂化学反应如下。



此雷动力系统工作原理图及在雷中的布置如图 0-2 和图 0-3 所示。

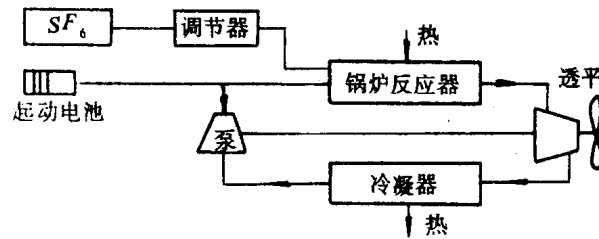
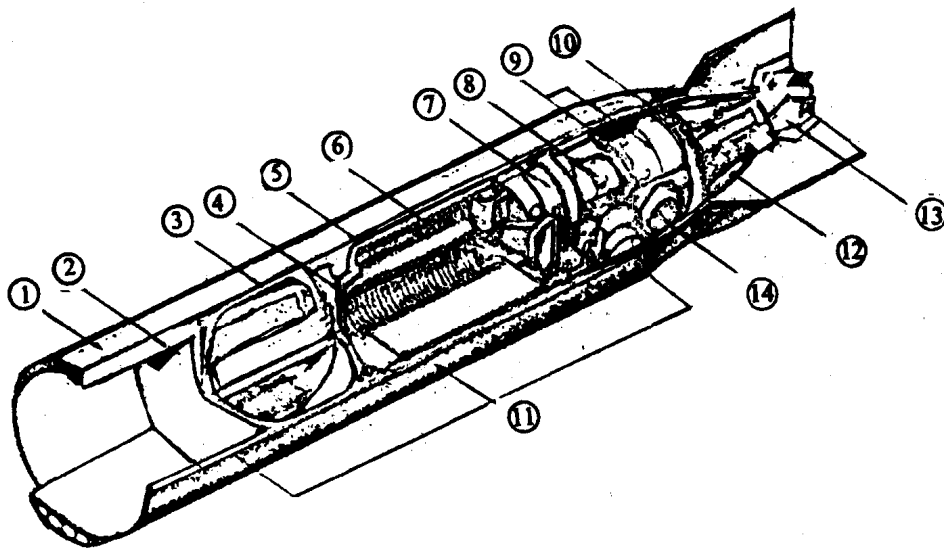


图 0-2 MK-46 动力系统工作原理图



- | | | |
|-----------|------------|-----------|
| ①—制导舱壳体； | ②—动力系统控制器； | ③—氧化剂贮存舱； |
| ④—氧化剂控制器； | ⑤—壳体冷凝器； | ⑥—锅炉反应器； |
| ⑦—超音速透平； | ⑧—齿轮箱； | ⑨—发电机； |
| ⑩—给水泵； | ⑪—壳体； | ⑫—操舵执行器； |
| ⑬—泵喷射推进器； | ⑭—发动机减震架。 | |

图 0-3 ALWT 后段剖视图

通过此例的分析看出，了解和研究，并不断改进推进剂及供应系统是十分必要的。同

①些数字为文献[2]中的，文献[4]中为46800。

时, 通过以上例也初步了解了从总体角度对于动力装置, 其中包括推进剂及供应系统的要求, 即鱼雷推进剂及供应系统设计是围绕提高鱼雷航速、航程、隐蔽性等战术技术性能等总目标, 同时, 它们应该是安全可靠、稳定的, 以及在工艺性和经济性有一定要求。

§ 0.3 本课程的要求

正如前面已介绍过的, 学习本课程不但要学习了解和掌握所述基本内容, 而且要多思考, 举一反三, 扩大应用范围。即正确处理矛盾的特殊性与普遍性的关系。

学习本课程除了解书上内容外, 还应重视所安排的实验课, 如激光测雾实验、泵特性实验等, 使知识运用并深入一步, 且在实际能力上有所提高。

除了学习课程内容外, 还要求注意问题的提出、分析和解决问题的处理方法, 以进一步培养和锻炼自己独立分析和解决问题的能力。

绪论习题与思考题

1. 如果两条鱼雷其外形及直径均相同, 而其战术技术性能不同, A 的航速 $V_A = 50\text{kn}$, 航程 $R_A = 30\,000\text{m}$, 而 B 的 $V_B = 40\text{kn}$, $R_B = 20\,000\text{m}$, 可否估计 A 、 B 两雷携带能量的比例为多少?

2. 从鱼雷动力装置的发展过程, 得到哪些启示?

第一章 推进剂

§ 1.1 引言

推进剂是指在外界氧化剂存在的情况下能自持燃烧（快速放热氧化反应），生成大量高温气体分子的材料。

通常，推进剂是由燃烧剂与氧化剂两者组成，而燃料也是由燃烧剂与氧化剂组成。不过，在日常生活中，由于处在有空气作氧化剂的条件下，所以人们往往把一些实际上只是燃烧剂的材料称为燃料，如汽油、煤油、柴油、煤等。应该说，燃料的范围很宽，而推进剂只是其中的一部分。推进剂是指用在外界没有空气作氧化剂或空气不足环境下，必须自带氧化剂与燃烧剂的那些燃料。

推进剂用于火箭、鱼雷、枪炮、气体发生器和压力发生器，当然，也可以是一个热量发生器。在这些应用中，绝大多数都要求在一个开口的或一个封闭的燃烧室中产生高压燃气。工作压力和工作时间取决于应用的场合，不同的工作情况导致不同的燃速。推进剂主要应用于火箭、鱼雷、枪炮，它们都是用高温高压气体来产生推进力的。然而，火箭与鱼雷类似，却与枪炮有着根本的差别：火箭与鱼雷把推进剂和燃烧室包容在它的弹体内；而炮弹通常则不是那样。这种差异导致它们采用不同的工作压力：火箭所用工作压力为1~30MPa；鱼雷所用工作压力为3~40MPa；枪炮所需工作压力为50~500MPa。

推进剂可按其物理状态进行分类：当推进剂为液态时，称为液态推进剂；固态时，称为固态推进剂。也可以按推进剂使用时的组元数来分，当氧化剂与燃烧剂按比例配成一种形态，只需一个存贮器及传输系统时，称此推进剂为单组元推进剂，如果是二个组元，则称双组元推进剂，依次类推。对于固态推进剂，当其氧化剂和燃烧剂组分呈物理性混合态组合在一起时，就叫做异质推进剂，通常也称为复合推进剂，当氧化剂和燃烧剂为化学性结合而形成一种物质时，则称为均质推进剂。

推进剂与炸药在化学结构中都包含有氧化剂和燃烧剂两种成分，并且都能够自持燃烧。然而，从它们的应用看，两者是截然不同的，例如，推进剂靠燃烧现象产生燃气，而炸药则靠爆炸或爆轰现象产生燃气，这就意味着，推进剂的燃烧过程通常是亚音速的，而炸药的燃烧过程通常是超音速的，推进剂用燃气产生推进力，而炸药则靠冲击波形成破坏力。从化学反应角度说，两者反应速度不同，作为推进剂使用，其化学反应速度比炸药的反应速度慢得多。但是，由于化学反应速度受多种条件控制，因此，要严格遵守推进剂的使用条件，防止其使用条件变化到使反应速度急骤上升的情况发生，这一点是应该强调的。

§ 1.2 对推进剂的要求

虽然不同应用对推进剂将提出不同要求，但是仍然存在一些共同性的要求。它们就是要求推进剂能发出预定能量，达到预定温度，存贮安全方便，运输安全方便，制造安全、经济

性好, 使用时能正常传输, 污染小等。

下面我们以两类发动机应用对推进剂的能量特性要求作些分析。

火箭发动机是可以利用热力学和牛顿第二定律直接作出解释的能量转换系统的一个典型例子, 该系统中产生的高压、高温气体进行绝热膨胀, 并把气体的显能转换为动能, 这样, 系统就产生一个反作用力, 此反作用力可用下式计算:

$$F = C_F A_i p_c \quad (1-1)$$

式中, C_F 是无量纲推力系数 (由喷管内燃气流确定的重要参数); A_i 是喷管喉部面积; p_c 是燃烧室压力。

推力还可用(1-2)式表示

$$F = I_{sp} \dot{m}_g g_0 \quad (1-2)$$

式中 I_{sp} 为比冲; \dot{m}_g 是推进剂的质量燃烧速率; g_0 是在海平面处的标准重力加速度。

比冲是用单位重量的推进剂产生单位推力所需的时间; 它也可以定义为每单位时间里燃烧单位重量的推进剂所获得的推力或者说单位重量推进剂所产生的冲量。这样一来, I_{sp} 的单位既可以是秒 (s), 也可以是 $N / (N / s)$ 或 $N \cdot s / N$ 。在估价推进剂燃烧效率时, I_{sp} 是一个非常有用的参数。 I_{sp} 是推进剂化学性质和通过喷管进行的膨胀过程的函数, 可以写为

$$I_{sp} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} R^0 \frac{T_c}{\mu_c} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} + \left[\frac{\gamma+1}{2} \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \sqrt{\frac{R^0 T_c}{\gamma \mu_c} \left[\frac{p_e - p_a}{p_c} \right] \frac{A_e}{A_i}} \quad (1-3)$$

式中, γ 是比热比; R^0 是通用气体常数; μ_c 是燃烧气分子量; T_c 、 p_c 分别是燃烧室温度和压力; p_e 是喷管出口处压力; p_a 是喷管外环境压力; A_e 是喷管出口面积; A_i 是喷管喉部面积。

从式(1-2)、(1-3)可以看出, 要增大推力在不增大 \dot{m}_g 情况下就要增大比冲, 而要提高比冲, 就必须提高火焰温度和 (或) 减小燃烧产物的分子量。这就是说, 选择火箭发动机推进剂时, 从能量特性考虑应注意这两方面。从上述分析也可知, 用 I_{sp} 来对比能量特性时, 必须规定相同的 p_e / p_c 值, 此值国内是 $1 / 100$, 国外是 $1 / 70$, 另外, 国内一般取 $A_e / A_i = 5$ 。

对于热动力鱼雷所用发动机, 除火箭发动机、涡轮机外, 常用活塞式发动机。对于活塞式发动机, 其有效燃料消耗率为

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{M}}{N_e} = K_1 f(p_1, p_2) \frac{\mu_c}{R^0 T_c} \quad (1-4)$$

式中, \dot{M} 是工质秒耗量; N_e 是有效功率; K_1 是系数; $f(p_1, p_2)$ 是汽缸进气压力 p_1 和排气压力 p_2 以及发动机结构参数的函数; μ_c 、 R^0 、 T_c 含义与前相同。式(1-4)也说

明，在发出单位功率时，提高 T_c ，减小 μ_c ，可减少燃料消耗，即提高能量特性。或者说单位质量的燃气作功能力就大。在鱼雷和火箭中，由于体积限制，往往是强调体积能量密度。

推进剂在存贮、使用时安全与方便是很重要的。不应因环境（包括气候）变化而明显改变其主要物理性能，例如，对于液体推进剂不应因存贮或使用环境温度较高而气化，也不应因环境温度较低而严重变稠甚至固化，这样均使使用困难。

必须要求推进剂与材料的相容性（即相互间无化学反应），才能使存贮及传输成为可能。

在存贮、运输、使用以及制造时的安全性包括无毒及无爆炸燃烧的危险。这一条的重要性是不言而喻的。当然，由于使用对象不同，对这些要求的程序可能略有不同，如鱼雷由潜艇携带，其对推进剂的无毒性要求就比空间用火箭的推进剂要求高。

对于开式循环热动力鱼雷，它还要求推进剂燃烧后最终排出的废气溶于水成份多，以使鱼雷无航迹或航迹小。

对于不同状态的推进剂，如液态或固态推进剂，由于使用条件不同也还有各自的一些要求，如要求液态推进剂其各组元密度和粘性随温度变化小，且变化尽可能一致，以防止在使用时因环境温度变化而改变了各组元之间比例，从而改变了推进剂的性能。对液态推进剂的点火性能也要有要求，如对非自燃点火推进剂其着火延迟时间要短，以防止液体燃料在燃烧室中过多积存造成事故。对固体推进剂则对温度灵敏度（初温影响燃速）、机械强度等方面有要求，以使其能完成预定的设计目的。

§ 1.3 推进剂性能

这一节将介绍一些反映推进剂能量特性、点火与安全特性、影响使用与传输的性能术语含义。

一、能量性能

热值：单位推进剂在标准状态（ $1\text{atm} = 101\,325\text{Pa}$ 及 $25^\circ\text{C} = 298.16\text{K}$ ）时，燃烧剂与恰当化合比的氧化剂完全燃烧所测得的发热量。如果单位是单位重量，则称为推进剂的重量热值（ kJ/kg ）。如果是单位容积推进剂所得，则称为推进剂的容积热值（ kJ/l ）。

热值按所测燃烧产物中 H_2O 呈液态或气态而有高、低热值之分。如果燃气温度较高，水蒸汽不能凝结成水，水蒸汽吸去了汽化潜热，故所测得的是低热值。

关于热值，这里要说明，即单位重量推进剂热值与单位重量燃烧剂热值不同，后者是指单位重量燃烧剂。在氧中完全燃烧所得热量。

标准生成热：在标准状态下，由元素的单质合成 1mol 化合物时的热效应，称此化合物的标准生成热。

标准生成焓是标准生成热的负值。要注意区别一些书上两者名称。

燃烧热：在标准状态下， 1mol 物质在氧气中完全燃烧并生成稳定氧化物，此反应的热效应称此物质的燃烧热。（对某些复杂氧化物，如 H_2O_2 、 HNO_3 等，定义其分解为单质和稳

定氧化物时放出的热为燃烧热)。

爆热: 1kg 推进剂在 298K, 在惰性气体中反应所得热量 Q_V 。

能量密度: 单位容积推进剂的燃烧产物在兰金(Rankine)循环中所作的功。

氧平衡: 即推进剂中自身所能提供的氧占它完全燃烧时所要求的氧的比例。可以看出, 当氧平衡为 100% 时为完全燃烧, 小于 1 为贫氧推进剂, 其能量未能充分发挥。大于 1 为富氧推进剂。

在前面已经提到的比冲也是一个重要的能量特性参数。

二、安全性能与点火性能

闪点: 液体燃料蒸汽和空气混合与火接触而初次发生蓝火焰的闪光时温度, 有开杯式和闭杯式两种。此温度比着火点低。

燃点(即着火点): 燃料蒸汽和空气混合物与火接触发生火焰不少于 5 秒时的温度。

涉及到耐冲击性能的参数有数个。落锤冲击感度是表达在表明的锤重及落锤高度下冲击推进剂时能否引起爆炸。枪击感度是表明用何种枪械, 何种子弹, 距一定距离射击时, 推进剂是否爆炸或燃烧。

另外还有殉爆感度及绝热压缩敏感度。

殉爆感度是指在推进剂的某一距离有一个一定量的其它爆炸, 其冲击波将冲击此推进剂, 能否引起推进剂的爆炸或燃烧。

绝热压缩敏感度: 当液体推进剂在传输时, 由于挤代气体绝热压缩而冲击和温度上升, 可能引起推进剂发生意外, 绝热压缩敏感度是接触液体推进剂的单位容积气体所允许的最大绝热压缩功。

安全性参数除上述外, 还有对于振动的敏感度、有无毒性及毒性大小等。

三、其他性能参数

密度、平均分子量、粘性系数、表面张力、冰点、沸点或蒸汽压、比热等参数都是推进剂在容积能量计算、热化学计算、存贮、传输、使用等情况下必不可少的参数。

§ 1.4 液态推进剂

液态推进剂包括单组元推进剂与多组元推进剂。其中燃烧剂与氧化剂绝大部分是液态, 我们将少数燃烧剂是液态、氧化剂是气态的推进剂在这里作为对比也一并介绍。

燃烧剂主要由可燃元素组成, 它在燃烧反应过程中受到氧化。而氧化剂主要由能使燃烧剂氧化的元素组成。

一、液态燃烧剂

常用的液态燃烧剂有烃类(碳氢化合物)、醇类(C、H、O 化合物)、胺类(C、H、N 化合物)以及 C、H、O、N 化合物。对于鱼雷推进剂来说比火箭推进剂更强调无毒性及安全性, 故一般不用胺类。下面简要介绍这几类燃烧剂。

(1) 烃类燃烧剂: 其中包括煤油、汽油、萘烷($C_{10}H_{18}$)、甲苯(C_7H_8)、松节油($C_{10}H_{16}$)等

碳氢化合物。

煤油和汽油均为石油产品，它们是相当多种碳氢化合物的混合物，其成分和性能在某种程度上取决于石油产地及加工方法(蒸馏、裂制、氢化)，因此没有一定的分子式。煤油和汽油重量组成中，碳约85%、氢约15%、氧少于1%。煤油和汽油具有较高的热值，煤油的约为46 054kJ/kg，汽油的约为46 473kJ/kg，但煤油密度较汽油大10~15%，故就容积热值而言，仍是煤油较好，加之煤油不易挥发、安全性比汽油好，所以在鱼雷中采用煤油作燃烧剂。

茶烷、甲苯、松节油等的重量发热量较煤油、汽油低，但它们的密度较大，所以按容积发热量相差不大。

(2) 醇类燃烧剂：鱼雷曾用乙醇(C_2H_5OH)、甲醇(CH_3OH)等。醇类燃烧剂的热值较烃类低，但因其中含有可形成氧化的氧，所以燃烧时所需氧化剂数量可减少，这样，作为推进剂整体来说，其热值并不低。特别是当氧化剂为气态时，此推进剂可提高容积热值。

醇类的凝固点较低，因此能够在外界环境温度变化较大的范围内使用。

(3) 含氮燃烧剂：即胺类，属于这类燃烧剂的有苯胺($C_6H_5NH_2$)、胍(H_2N 、 NH_2)等。这类燃烧剂由于有毒、安全性差及成本高等缺点，一般不用作鱼雷燃烧剂。

常用液态燃烧剂的主要物化性能如表1-1所示。金属锂在熔化使用时，也作为液态燃烧剂列入此表。

表 1-1 一些燃烧剂的物理化学性能

名称	化学分子式	分子量	凝固点℃	沸点℃	密度 g/cm ³	燃烧热 kJ/mol	生成热 kJ/mol	重量高热值 kJ/kg	备注 低热值 (kJ/kg)
汽油					0.7-0.8			46 473.48	43 542.7
煤油			-20	140	0.81-0.84		192.59	46 054.8	42 705~ 43 124
茶烷	$C_{10}H_{13}$	138.254	-51	195.7	0.895	6 280.2	226.09	45 468.65	42 914.7
松节油	$C_{10}H_{10}$	138.132	-100	158.9	0.85-0.88	6 154.6		45 426.78	42 621.6
甲苯	$C_6H_5CH_3$	92.141	-95	110.6	0.866	3 912.56	12.56	42 452.15	
甲醇	CH_3OH	32.043	-97.9	64.7	0.792	727.12	238.73	22 692.46	17 082
乙醇	C_2H_5OH	46.070	-114.6	78.5	0.789	1 367.66	277.82	29 684.41	26 963
羟胺	NH_2OH	33.032	33.1	56.5	1.204	332.38	106.76	9 755.24	较高温会炸
三乙胺	$(C_2H_5)_3N$	101.194	-114.8	89.5	0.728	4 446.38	61.62	43 919.53	
苯胺	$C_6H_5NH_2$	93.130	-6.2	184	1.022	3 399.26	-35.34	36 508.9	有毒
二甲苯胺	$C_6H_3(CH_3)_2NH_2$	121.184	-54	216	0.978	4 687.96	35.25	38 686.03	
胍	N_2H_4	32.048	0.7	113.5	1.01	622.58	-50.45	19 426.75	极毒
水合胍	$N_2H_4 \cdot H_2O$	50.064	-40	118.5	1.03	615.46	242.63	12 309.19	极毒
锂	Li	原子量 6.939	179	1 317	0.534		0	46 517	

二、氧化剂

一些氧化剂列在表 1-2 中。其中气态氧化剂中空气是最经济安全的，但是它中间包含了大量对氧化无用的氮气，造成很大航迹。列出它的原因，一方面是它目前还在用，另一方面也是与其他氧化剂作比较。

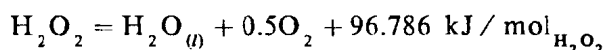
表 1-2 几种氧化剂的物化性能

名称	分子式	分子量	凝固点 ℃	沸点 ℃	状态	密度 (g/ml)	生成热 (kJ/mol)
空气		28.97			气态	0.229 ($P=200$, $T=17^{\circ}\text{C}$)	0
氧气	O_2	32	-218.4	-183	气态	0.285	0
氟	F_2	38.00	-223	-188	气态	1.51(在 -188°C)	0
液氧	O_2	32	-218.4	-183	液态	1.14	0
过氧化氢	H_2O_2	34.016	-0.89	150℃分解	液态	1.438	187.74
硝酸	HNO_3	63.016	-41.6	86	液态	1.502	173.35
四氧化二氮	N_2O_4	92.016	-11.2	21.2	液态	1.45	28.22
六氟化硫	SF_6	146.06	$T_{cr} =$ 45.64	$p_{cr} =$ 37.193atm			1 207.89 ^[17]
高氯酸羟胺	$\text{NH}_3\text{OHCIO}_4$	133.489	85.88	120℃分解	固态	2.06	-272.05 ^[18]

气态氧与液态氧的重量热值相同，但容积热值不同，显然是液态氧构成的推进剂高。氧作为氧化剂的优点是显而易见的，其缺点是它与油接触会爆炸，另外，液态氧沸点低给存贮造成困难。

纯过氧化氢极不稳定，在外界因素(光、热、撞击和其它有机物及某些金属杂质接触)的作用下易分解，甚至爆炸。其凝固点高(-0.89℃)。为了安全，一般使用 80~85%浓度的过氧化氢水溶液，它比较稳定，易于保存，这时的凝固点约为-25℃。为了提高其稳定性，可以加少量稳定剂，如磷酸等。

从过氧化氢分解反应式



可算出每 kg 过氧化氢析出 0.47kg 氧，并同时产生约 2 847kJ/kg 的热量，所以过氧化氢也可作单组元推进剂。

过氧化氢与不锈钢、纯铝、聚四氟乙烯相容，但与有机物及铜和重金属不相容，且对人的皮肤和呼吸系统有强烈刺激作用。

氟是最活泼的非金属元素，为苍黄色气体，有不愉快的气味，密度 1.695g/ml，能分解水，生成臭氧和氟化氢。在暗中就能与氢直接化合。氟化氢蒸汽具有十分强烈的腐蚀性和