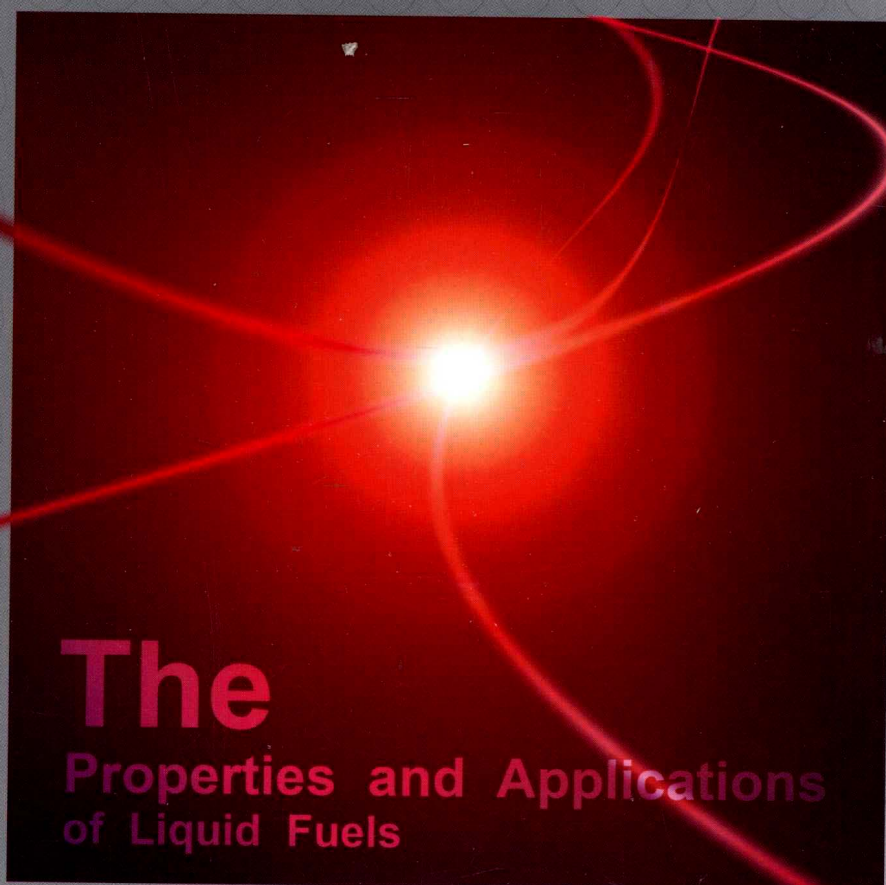




液体燃料 的 性质及应用



许世海 熊云 刘晓 编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

内 容 提 要

本书系统介绍各种发动机燃料的理化性能和燃烧性能,以及各种燃料的牌号和使用,重点介绍了液体燃料各种性能的概念、意义、影响因素、评价方法和改进措施。本书分上、中、下三篇。其中,上篇介绍液体燃料的各种理化性质;中篇介绍了燃烧的基本理论和燃料在各类发动机中的燃烧过程;下篇主要讨论液体燃料的种类、牌号、质量管理以及替代燃料。

本书可作为油料应用专业和相关专业本科及研究生的教学用书,也可作为从事石油生产和储运、油品应用、发动机设计等方面工作的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液体燃料的性质及应用 / 许世海, 熊云, 刘晓编. —北京: 中国石化出版社, 2010. 2

ISBN 978 - 7 - 5114 - 0245 - 5

I. ①液… II. ①许… ②熊… ③刘… III. ①液体燃料 - 研究
IV. ①TQ517. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 015785 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 27.5 印张 610 千字

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

定价: 66.00 元

前 言

本书主要讨论以石油产品为主的发动机燃料的性质和应用问题，共分上、中、下三篇。其中，上篇着重讨论液体燃料的理化性质，包括蒸发性和雾化性、安定性、腐蚀性、低温性、洁净性、润滑性、静电着火性、清净性等；中篇介绍燃烧的基本理论，汽油、柴油和喷气发动机的燃烧过程及其对燃料燃烧性的要求；下篇主要阐述液体燃料的种类、牌号、使用和质量管理的，同时介绍了替代燃料应用和汽车节油技术。

为了便于读者学习，本书在叙述各主要理化性质时，对一些基本概念和必要的理论基础给予了适当的阐释，力求做到理论联系实际，深入浅出，说理清楚，通俗易懂。但由于编者水平有限，缺点错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	(1)
----------	-------

上篇 液体燃料的物理化学性质

第一章 液体燃料的蒸发性和雾化性	(9)
第一节 液体蒸发的一般概念	(9)
第二节 蒸发的动力学基础	(10)
第三节 蒸发的类型	(13)
第四节 影响蒸发的因素	(15)
第五节 液体燃料蒸发性的评定方法	(29)
第六节 液体燃料的雾化性	(33)
第七节 发动机中混合气的形成	(39)
第二章 液体燃料的安定性	(56)
第一节 燃料安定性的意义	(56)
第二节 评定液体燃料安定性的指标	(58)
第三节 烃类的液相氧化过程	(63)
第四节 影响燃料氧化变质的因素	(67)
第五节 提高燃料氧化安定性的添加剂	(75)
第六节 液体燃料的热安定性	(80)
第七节 我国液体燃料的安定性	(88)
第三章 液体燃料的腐蚀性	(100)
第一节 金属腐蚀的一般概念	(100)
第二节 液体燃料中的腐蚀性物质	(105)
第三节 评定液体燃料腐蚀性的方法	(109)
第四节 防止燃料腐蚀的基本措施	(113)
第五节 燃气对发动机的腐蚀	(115)
第四章 液体燃料的低温性	(121)
第一节 发动机对燃料低温性的要求	(121)
第二节 影响燃料低温性的因素	(122)
第三节 评定液体燃料低温性的方法	(129)
第四节 改善喷气燃料低温性的措施	(133)
第五章 液体燃料的洁净性	(138)
第一节 液体燃料对洁净性的要求	(138)

第二节	影响液体燃料洁净性的物质	(139)
第三节	燃料洁净性的评定方法	(143)
第四节	保证液体燃料洁净性的措施	(147)
第六章	液体燃料的静电着火性	(151)
第一节	液体燃料中静电的产生	(151)
第二节	液体燃料静电着火的条件和发生的规律	(157)
第三节	防止燃料静电着火措施	(161)
第四节	液体燃料的抗静电添加剂	(167)
第七章	燃料的润滑性	(173)
第一节	喷气燃料的润滑性	(173)
第二节	柴油的润滑性	(180)
第八章	液体燃料的清净性	(182)
第一节	汽油机沉积物及其危害	(182)
第二节	汽油机沉积物的生成机制与影响因素	(186)
第三节	沉积物的控制技术	(189)

中篇 液体燃料在发动机中的燃烧

第九章	燃烧的基本知识	(195)
第一节	燃烧的基本化学反应	(195)
第二节	混合气浓度的表示方法	(196)
第三节	燃烧产物	(197)
第四节	烃类及混合气的热值	(201)
第五节	烃类着火前的氧化过程	(203)
第六节	液体燃料的着火	(211)
第七节	火焰传播速度	(226)
第十章	点燃式发动机中的燃烧	(234)
第一节	点燃式发动机中的正常燃烧	(234)
第二节	爆震燃烧	(236)
第三节	烃类燃料的抗爆性	(244)
第四节	燃料抗爆性的评定方法	(249)
第五节	提高燃料抗爆性的添加剂	(256)
第十一章	柴油机中燃料的燃烧	(265)
第一节	柴油机中燃料的燃烧过程	(265)
第二节	影响柴油机中燃烧过程的主要因素	(268)
第三节	柴油发火性的评定	(271)
第四节	提高十六烷值的添加剂	(278)
第五节	球型燃烧室中柴油的燃烧过程	(279)

第十二章 喷气发动机中燃料的燃烧	(281)
第一节 涡轮喷气发动机中燃料的燃烧过程	(281)
第二节 燃料性质对喷气发动机起动性能的影响	(283)
第三节 喷气燃料燃烧的稳定性和燃烧完全度	(285)
第四节 喷气燃料的燃烧完全度	(287)
第五节 喷气燃料生成积炭的倾向	(292)
第六节 喷气燃料的密度和热值	(298)
第十三章 汽车排放污染与控制	(305)
第一节 汽车排放污染物种类及危害	(305)
第二节 汽车尾气污染物的形成机理	(306)
第三节 尾气污染物的控制与净化	(310)
第四节 汽车排放污染物试验方法与控制标准	(317)
第五节 燃料成分对尾气排放的影响	(325)

下篇 液体燃料的种类、牌号、使用与质量管理

第十四章 液体燃料的种类、牌号和使用	(331)
第一节 液体燃料的分组和规格	(331)
第二节 车用汽油	(333)
第三节 航空汽油	(340)
第四节 柴油	(345)
第五节 喷气燃料	(355)
第六节 锅炉燃料	(362)
第七节 航空洗涤汽油	(365)
第十五章 替代燃料	(367)
第一节 替代燃料概述	(367)
第二节 醇类燃料的性质和使用	(369)
第三节 天然气和液化石油气	(380)
第四节 生物柴油	(382)
第五节 其他替代燃料	(391)
第六节 通用燃料与战时应急代用燃料	(394)
第十六章 液体燃料的质量与安全管理	(396)
第一节 液体燃料在储存中的质量变化	(396)
第二节 液体燃料质量管理的措施	(398)
第三节 防火	(401)
第四节 防毒	(403)
第十七章 汽车技术节油的基本途径	(405)
第一节 汽车燃料的能量消耗	(405)

第二节 燃料的合理使用与节油	(408)
第三节 润滑油(脂)的合理使用与节油	(413)
第四节 汽车的正确保养、调整与节油	(418)
第五节 正确驾驶与节油	(424)
第六节 节油装置	(427)
附录 I 石油密度换算表	(429)
附录 II 燃料添加剂	(431)
参考文献	(432)

绪 论

一、液体燃料的特点

凡能用来燃烧而取得能量且具有一定经济价值的物质，均称为燃料，包括核燃料和常规燃料。核燃料分为核裂变燃料和核聚变燃料。常规燃料一般按形态分为固体燃料、液体燃料和气体燃料三大类。固体燃料包括煤、木柴、木炭和焦炭等。液体燃料主要包括石油和页岩油产品，如汽油、煤油、柴油和锅炉燃料油等，此外还有甲醇、酒精、动力苯，以及由天然气或煤制取的某些液体产品，它们可以单独用作液体燃料，也可掺在石油产品内混配使用。气体燃料包括天然气、发生炉煤气、沼气，以及石油炼厂和钢铁厂所产生的各种可燃气体。

燃料是当今世界的主要能源。19 世纪以前，人类使用的燃料主要是固体燃料，其中煤炭和木柴占重要地位。自从进入 20 世纪以来，石油和天然气逐步得到广泛开发利用。以石油为主的液体燃料逐渐取代煤而成为世界的主要能源。据统计资料，2007 年世界一次能源消费结构中，石油占 33.6%，天然气、石油气占 23.8%，煤炭占 28.6%，水力发电等占 6.4%，核能占 5.6%。石油是当今世界第一大能源，而液体燃料是石油作为能源使用的主要形式。

我国是一个缺油的国家，石油在整个一次能源消费中所占比例较小。尽管如此，2007 年我国石油消费量达到 3.68 亿吨，占整个一次能源消费量的 19.7%。各种汽车、船舶、飞机、工程机械、坦克以及部分机车等运输工具，都在大量使用液体燃料，这些燃料主要为汽油、柴油、喷气燃料及燃料油等石油产品。少数地区还使用少量其他液体燃料，包括页岩油产品，天然气凝析油和甲醇、乙醇等。可见，无论在发展国民经济，实现农业、工业、科学技术和国防现代化或提高军队战斗力、保卫国防方面，液体燃料的使用都具有重要的意义。

为何液体燃料在国民经济和国防建设中获得如此广泛的应用？这是由于液体燃料无论和固体燃料还是气体燃料比较，具有下列优点：

(1) 热值较高

热值是燃料重要的指标之一。所有燃料都是利用其燃烧时放出的热能来工作的。因此，燃料的热值越高，发动机在相同条件下产生的功率也越大。

燃料中能燃烧发热的主要成分是碳和氢。此外，硫在燃烧时也能放出热量，但一般燃料中含硫量很少。燃料中的氧和水分、灰分等都不能产生热量。从石油中炼制出来的各种液体燃料，主要由碳和氢两种元素组成，不能燃烧的物质含量极少。而固体燃料如木柴、煤炭等，除含有碳、氢两种元素外，尚含有较多的氧、水分和灰分。所以液体燃料的热值比固体燃料的热值高得多。一些主要燃料的热值比较列于表 0-1。

表 0-1 主要燃料的热值

kJ/kg

类别	燃料名称	净热值 Q_i^*	类别	燃料名称	净热值 Q_j
固体燃料	炭(生成二氧化碳时)	33914	液体燃料	航空汽油	43754 ~ 44131
	炭(生成一氧化碳时)	10805		喷气燃料	43335 ~ 43545
	木柴	18841		柴油	42959 ~ 43000
	泥煤	20935 ~ 25140		渣油	37683 ~ 41870
	褐煤	25122 ~ 29309		无水乙醇	29728
	烟煤	29309 ~ 33544	气体燃料	氢	119568
	无烟煤	33544 ~ 37683		一氧化碳	10170
液体燃料	原油	43921		甲烷	50118
	车用汽油	435451 ~ 43921		乙烯	46664
				乙炔	46681

注：* 所列净热值系指燃烧产物中水分保持气态而不凝结成水时产生的热量。至于炭及一氧化碳，因不含氢，故所列数值即其燃烧热。

从表中可以看出，要求发出相同的热量时，汽油的需要量只有煤的 2/3 或木柴的 1/2。这样就大大节省了燃料的消耗，减少了燃料占用的空间，也提高了机械的效率。这对要求高速的机械和运输装备来说，显然是极其重要的。

(2) 灰分很少

灰分是指燃料中所含不能燃烧的固体物质(如氧化硅、氧化铁等)。固体燃料中往往含有大量的灰分(如煤中可多达 20% 以上)，燃烧时需要复杂而笨重的排渣装置，处理非常困难。液体燃料中几乎不含灰分，即使含有少量灰分，也往往可以随排气一同排出。这就大大简化了燃烧装置，无需处理灰渣，适于在汽车、坦克、飞机或舰艇的发动机上使用，使机械轻便并能提高其速度和机动性。

(3) 储运方便

由于液体燃料可以自由流动，在装卸和运输过程中可以利用泵和管道，进行各种距离的运输。在储存和运输过程中也便于采用机械化、自动化设备，节约劳动力。此外，储存液体燃料的容器形状不受限制，在汽车、坦克，特别是在飞机和舰艇中，可以充分利用形状复杂而无其他用途的舱室或空隙来储存液体燃料，节省大量有用的空间，使装备更紧凑，从而有利于提高其战斗或运输能力。

(4) 使用便利

由于液体燃料具有流动性和易燃性，可以在需要时迅速点燃，随时熄灭，热效率高，而且可以随时调节燃料的供应量，控制产生热量的多少、温度的高低，或功率的大小，以适应各种工作条件的要求。液体燃料的这种起动迅速、操作便利、运用灵活机动的特点对战斗和运输装备具有特别重大的意义。如使用固体燃料就很难达到上述要求。

气体燃料和液体燃料比较，虽然也不含灰分，热值和热效率很高，但无论在储存方面还是在使用方面，都不如液体燃料安全便利。

由于气体密度很小，产生同样热量所需气体燃料的体积比液体燃料大许多倍，气体燃料需要体积庞大的容器来储存，而且不能漏气。气体压缩储存需要特殊的设

备,也较笨重。空气中混有煤气时很易使人中毒,并易引起着火爆炸,造成伤害事故。

基于上述原因,气体燃料目前多用于一般工业或民用固定设备。近年来,由于石油供应紧张,气体燃料在运输车辆上的使用也逐渐增多,大多采用压缩形式和液化形式,但无论压缩或液化,都需要特殊设备。这些都在很大程度上限制了气体燃料在运输工具等装备上的应用。

液体燃料虽然在使用上具有许多优点,但是和固体燃料相比,在勘探、开采、加工等方面技术都比较复杂,因而成本较高。另外,石油的资源有限,远不如煤的储量丰富。

石油中含有许多有价值的化学成分,是制造塑料、合成橡胶、合成纤维以及染料、炸药、医药等多种化工产品的重要原料。将大量宝贵的石油作为液体燃料烧掉以取得热能,从长远来看是不经济的。

其次,由于液体燃料的易蒸发、易渗漏、易着火和易氧化变质的特性,对液体燃料储存使用的技术要求也较复杂。随着各种内燃机(包括喷气发动机)的出现和不断改进,它们对所用液体燃料理化性质的要求也越来越高。

因此,深入了解液体燃料的物理化学性质及其在发动机中的应用,对于保证液体燃料的质量,充分发挥各种发动机的能力,提高其动力性和经济性,延长机械寿命,以及节约能源,减少环境污染,促进我国建设都有十分重大的意义。

二、发动机对液体燃料的质量要求

液体燃料最早都作为一般家用燃料或锅炉燃料。由于燃烧设备简陋,故对燃料的品质要求不高。随着汽油机和柴油机的出现以及石油加工工艺的发展,液体燃料获得越来越广泛的应用,而对其质量要求也越来越高。在第二次世界大战末期,涡轮喷气发动机已经开始出现。目前,各种喷气发动机已代替活塞式航空发动机成为飞机的主要动力装置。喷气发动机的广泛应用和日益改善对所用液体燃料的质量提出越来越严格的要求。

各种发动机的工作原理和工作条件互不相同,它们对使用燃料的质量要求也不尽相同。但根据长期使用的经验,各种发动机对使用液体燃料的品质也有其共同的要求。

1. 适当的蒸发性和良好的雾化性

各种液体燃料的蒸发性好坏对储存和使用都有密切的关系。就发动机使用而言,蒸发性良好的燃料,较易生成可燃混合气,保证可靠的燃烧,特别在寒区冬季条件下,对保证低温下的迅速起动具有非常重要的意义。但是蒸发性很高的燃料在储存和运输中蒸发损耗较大,容易着火燃烧,无论在装卸油料作业中还是在发动机燃料系统中,高温条件下都易产生气阻。因此,各型发动机对所用燃料的蒸发性都作了严格的规定,既不宜过低,也不宜过高。

雾化性是和混合气形成质量密切相关的重要性能,雾化性主要决定于燃料的黏度大小,黏度过大,燃料不易雾化,油雾颗粒直径大,蒸发速度慢,对燃烧不利;黏度过小,燃料雾化过细,则喷射距离短,燃料不能充满燃烧室空间,造成混合气局部过浓,对燃烧也不利。

2. 良好的燃烧性

各种燃料都是在发动机一定的工作条件下进行燃烧的。由于发动机工作原理和使用条件不同,对燃料的燃烧性能要求也不同;例如,汽油发动机要求使用的燃料能在点燃条件下进行正常的燃烧,而柴油机则要求所用燃料在压燃条件下能进行正常的燃烧,往往在汽油机中燃烧良好的燃料,在柴油机中却会产生工作粗暴,不宜采用。所有发动机都要求燃料燃烧完全而稳定,以保证发动机充分发挥其动力性能和经济性能,同时工作可靠,此外,所有燃料都应具有较高的热值,以保证发动机有较高的效率。

3. 高度的安定性

所有燃料都应性质安定,不易氧化变质,适于储存和使用。性质不安定的油料经过较长时期的储存,往往产生大量胶质,使燃料变色,有时还会产生悬浮物或沉淀,在使用中会堵塞油滤或管道,造成燃油供量不足或中断,燃烧后会生成大量积炭,影响机械的工作和寿命。燃料性质不安定还会在氧化过程中生成较多的酸性物质,对储存和使用的金属设备引起腐蚀。在近代超音速飞机上,由于气动加热效应较强,燃料的温度升高较多,因此,良好的燃料不仅要求在常温储存条件下性质稳定,在高温使用的条件下也应性质稳定。

4. 无腐蚀性

燃料在储存、运输和使用过程中,经常要与各种不同的金属接触。因此,要求燃料对发动机燃料系统和储油金属容器无腐蚀性。燃料对金属的腐蚀不仅会缩短机械设备的使用寿命,而且生成的腐蚀产物往往是有害的物质。燃料中含有较多的硫时,燃烧后会产生硫的氧化物,与燃气中的水分结合后,停车时会生成具有强烈腐蚀性的亚硫酸或硫酸,严重腐蚀燃烧室及排气设备,也污染发动机中的润滑油。当硫的氧化物排入大气时,则造成严重的环境污染。因此,良好的液体燃料均应限制其硫含量和其他引起腐蚀的成分,保证对金属无腐蚀性。

5. 良好的低温性

各种燃料均应保证在所使用的低温条件下(包括飞机在高空低温下)具有适当的流动性,以便在发动机中能够实现顺利供油,不发生故障。如燃料的低温流动性不好,或在低温下出现烃类和冰晶固体,则会堵塞供油系统,影响工作。同时,低温流动性不好的油料对装卸油料作业也会带来很大困难。这对军用油料,特别是战斗装备用油尤为重要。为此通常对喷气燃料、柴油以及锅炉燃料油的凝点(或结晶点)以及低温黏度要作严格规定。

6. 良好的洁净性

近代发动机都是由许多精密部件组成,要求使用洁净程度很高的燃料。燃料中如混入固体杂质,不仅容易堵塞油路,影响正常供油,而且会造成油泵等部件的磨损,缩短其使用寿命。燃料中的水分不仅影响正常燃烧,低温下还会结成冰粒,影响供油。储油容器中含有水分会影响添加剂的效果,降低燃料的安定性,增加对容器的腐蚀。所以,各种燃料在储存和运输过程中,都应注意保持容器清洁,严防水分和各种杂质混入。

7. 良好的润滑性

柴油发动机和喷气发动机的油泵、喷油器等部件工作压力较高，运动速度快，容易发生磨损，而这些部件靠燃料自身进行润滑，因此燃料也应有良好的润滑性，保证燃料系统运动部件正常工作。

8. 良好的抗静电着火性

液体燃料在输送、加注过程中，与过滤器、管道，甚至与空气之间发生摩擦，都会产生静电，由于燃料导电性差，产生的静电逐渐积聚可以产生很高的电压，在一定条件下会发生静电放电，从而引起火灾。为了防止发生静电着火，液体燃料应有较高的电导率，以便及时将产生的静电导走。

9. 良好的清净性

燃料储存中氧化生成的胶质和沉淀，以及燃料在使用中发生的裂解、氧化、聚合反应产物，容易在化油器、喷油嘴、进气阀、燃烧室等部位沉积，形成沉积物，影响燃料的供应、雾化和燃烧，从而使发动机油耗增大、功率下降、排放增加，甚至发生故障。为此，现代液体燃料要求具有良好的清净性，以保证发动机进气系统、燃料系统和燃烧系统清洁。

10. 良好的排放特性

汽车发动机排放的污染物是大气污染的主要来源之一，随着环境保护要求不断提高，汽车排放标准日益严格，单靠发动机技术改进已经无法满足排放要求，因此对燃料自身的排放性能也提出了严格的要求。燃料的排放特性除了和清净性密切相关外，还和燃料的组成有很大关系。目前，国内外对车用汽油和柴油的硫含量、烯烃含量、芳香烃含量都作了严格规定。

以上是各种发动机对液体燃料品质的总体要求，但不同发动机工作原理和工作条件各不相同，对燃料各种性能的具体要求也有差别，本书后续各章中将对这些性质作详细讨论。

除上述各项主要品质外，液体燃料还应该本身毒性小，来源充足，便于大量生产。显然，要同时满足上述全部要求是很困难的，人们只能在现有资源条件下，努力改进燃料的加工工艺过程，不断提高产品的质量，同时加强对油料的质量管理，使各种机械设备的动力装置经常使用合格的、质量优良的液体燃料，以保证发挥其最大的技术性能。

三、液体燃料的分类和应用范围

根据使用燃料的发动机的工作原理，一般将液体燃料分为点燃式发动机燃料(汽油)、压燃式发动机燃料(柴油)、喷气发动机燃料和锅炉燃料四大类(见表0-2)。

表0-2 液体燃料的分类和应用范围

燃 料	种 类	燃 料 名 称	主 要 应 用 范 围
点燃式发动机燃料	航空燃料	航空汽油	活塞式飞机，快速舰艇
	汽车燃料	车用汽油	汽车，摩托车，移动式抽灌油器材，抽水机，轻型船艇等

续表

燃 料	种 类	燃 料 名 称	主 要 应 用 范 围
压燃式发动机燃料	高速柴油机燃料	车用柴油、轻柴油	各型柴油机汽车，柴油机车，拖拉机及工程机械，牵引车，船艇
		军用柴油	舰艇，坦克，装甲车
	低速柴油机燃料	重柴油	民用船舶和柴油机车
喷气发动机燃料	喷气燃料	航空煤油	喷气式飞机
		宽馏分燃料	喷气式飞机
锅炉燃料	锅炉燃料	舰用燃料油	舰船锅炉
		重油(燃料油)	工业用固定锅炉，工业用炉窑，民用船舶

第一章 液体燃料的蒸发性和雾化性

蒸发性是液体燃料最重要的特性之一，它对燃料的储存、运输和在发动机中的使用都有密切的关系。

在储存和运输条件相同时，蒸发性大的燃料蒸发损耗较大，着火的危险性也较大。蒸发性大的燃料在夏季泵送时，常易产生气阻(气蚀)现象而影响正常输油，使发动机不能正常工作。

但是，燃料中的轻质成分常常是最宝贵的成分，因为各种液体燃料在燃烧前，总是要先与空气组成良好的混合气，然后进行燃烧。蒸发性良好的燃料在发动机中容易气化，易与空气混合形成可燃混合气而进行正常的燃烧，也能更好地保证发动机在低温下的迅速起动，满足在困难条件下发动机正常运转的要求。

液体燃料在发动机中蒸发的快慢，一方面取决于燃料本身蒸发性的尺寸，另一方面也和发动机的构造、使用条件，特别是外部温度、压力等有密切关系。

第一节 液体蒸发的一般概念

一切物质都是在不断地运动着，蒸发也是物质运动的一种形式。物质由液态变为气态的过程称为气化。蒸发和沸腾是液体气化的两种方式，蒸发一般指低于沸点的条件下在液体表面进行的气化，而沸腾则指液体在沸点时的剧烈气化。蒸发只在液体的表面进行，而沸腾时液体的表面和内部同时进行强烈的气化，因而液体出现翻滚现象。

蒸发是液体表面分子运动的表现。在常温下，一切有自由表面的液体一直都在进行蒸发，不过速度有快有慢。如果将一种液体放进密闭容器中，从液体表面蒸发出的分子便会逐渐聚积在容器内的蒸气层中。这些分子中也有少量由于撞击其他分子或器壁而又重新进入液体。在开始阶段，由于从表面逸出的分子多于返回液体的分子，容器内液体的蒸气压逐渐上升。当温度保持不变时，容器内液体气压的上升是有限度的。当蒸气压达到某一定值时，单位时间内从液面逸出分子的数量恰好等于返回液面分子的数量，此时液相与气相保持相对的气液平衡(称为动态平衡)，这种现象称之为饱和状态。此时的蒸气称为饱和蒸气，饱和蒸气产生的压力称饱和蒸气压，有时也简称蒸气压。一种物质在一定温度下的饱和蒸气压值是不变的，例如，水在 20℃ 时的饱和蒸气压为 2.33 kPa。各种纯物质液体在不同温度下的饱和蒸气压可在相关的手册中查阅到。

一种液体气化的难易程度称为该液体的蒸发性或挥发性。显然，液体在一定温度下的饱和蒸气压愈大，表示该液体的蒸发性愈高。

对纯物质而言,饱和蒸气压只决定于液体的性质和温度,与该物质在气相、液相中的数量无关,例如在纯物质的气液平衡系统中抽去若干蒸气,液体将自动蒸发一部分,以恢复原有的压力而达到平衡。反之,如自外界加入一部分该蒸气,则将有部分蒸气凝结,最后仍将恢复到原来的饱和蒸气压。

然而,当系统由不纯物质如石油产品组成时,则液体的蒸气压不仅取决于液体的组成和温度,而且还和系统中蒸气和液体的数量比例有关。当平衡的气液相容积比例增大时,由于液体中轻质组分大量蒸发而使液相中轻质组分的浓度降低,蒸气压因而也随着降低。

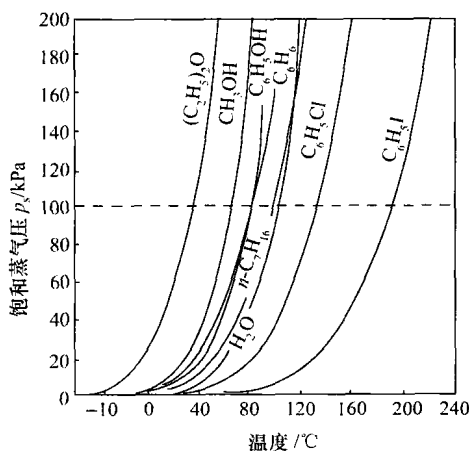


图 1-1 某些液体的饱和蒸气压与温度的关系

温度升高时,分子的平均动能增加,具有逸出液体表面能力的分子数也增加。同时,由于膨胀而使液体分子间的引力减弱,具有较小能量的分子也可能从液体逸出。这两种因素同时作用的结果,使单位时间内从单位表面上逸出的分子数大为增加。因此,只有在更高的蒸气压下,才能达到液体与蒸气的平衡。所以液体的饱和蒸气压总是随着温度的升高而显著增大。几种液体的饱和蒸气压与温度的关系见图 1-1。

从图上可以看出,温度升高时,各种液体的蒸气压均增大,但增大的程度不同。当液体的蒸气压等于外界的大气压时,液体开始沸腾,与此相应的液体温度称为该液体的沸点。液体的蒸发能在任何温度下进行,但外界气压不变时,沸腾却只能在一定的温度下发生。纯物质均有固定的沸点。含有多种组分的液体的沸点随其组成的不同而具有一定范围。

液体的沸点随外界压力的增加而升高,当外压减小,沸点相应地降低,这从图 1-1 中也很容易看出。当不指明压力时,一般所称沸点均指液体在标准大气压 (101.3 kPa) 下的沸点。一般在常温下具有较高蒸气压的液体,其沸点较低。由于沸点较蒸气压易于测定,而且与蒸气压常呈有规律的变化,因此人们经常使用沸点代替液体的饱和蒸气压来说明液体的蒸发性高低。显然,沸点愈低的液体,其蒸发性愈高。

第二节 蒸发的动力学基础

液体的蒸发包括三个过程:

- (1) 汽化过程——液体分子从液面逸出成为蒸气分子;
- (2) 扩散过程——逸出的蒸气分子在气相介质中分散开来;
- (3) 凝结过程——部分逸出的蒸气分子经碰撞后重新被液面吸收。

燃料蒸发的程度, 决定于逸出液面的分子数与重新被吸回液面的分子数之差。这个差数越大, 燃料蒸发的程度就越大。燃料的蒸发速度(单位时间内单位面积上蒸发的数量)则不仅取决于该燃料的汽化和凝结过程, 而且和逸出分子的扩散过程有密切关系。

当液体蒸发时, 位于液体表面层的分子由于热运动, 克服了相邻分子对它的引力, 离开液面, 进入周围空间而变为自由蒸气分子。应该看到, 不是液体表面所有分子都能自由地变成蒸气分子, 只有在某一瞬间具有超过一定速度的那些分子才能顺利地逸出液体表面。这些分子对液面的法向速度分量, 必须大到一定程度, 才能使这些分子能够克服液体内部相邻分子对这些分子的引力。

如以 m 表示液体分子的质量, u_x 表示垂直于液面的 x 轴上分子运动的速度分量(即法向分量), ε 为液体分子逸出表面层所作的功, 则可以看出, 液体分子蒸发时必须满足下列条件:

$$\frac{mu_x^2}{2} \geq \varepsilon \text{ 或 } u_x \geq \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m}} \quad (1-1)$$

即分子的动能应等于或大于 ε 。

1. 自由蒸发

假定液体在真空条件下蒸发, 即汽化后不致因碰撞而被吸回液面, 此种情况称为自由蒸发。在自由蒸发条件下, 根据麦克斯韦速度分布公式, 可以计算出在 1s 内, 在表面层 1cm^3 容积内液体分子中具有速度超过 u_x 的分子数目。

舒列依金根据上述原理计算出在自由蒸发时, 液体分子蒸发的速度, 即每秒内自每平方厘米液面上蒸发出去的分子数 n_0 应为

$$n_0 = \frac{N}{\gamma' u} \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{l_i}{RT}} \quad (1-2)$$

式中 N ——阿伏伽德罗常数;

γ' ——液体的比容(单位质量的体积);

u ——液体的摩尔质量;

R ——气体常数;

l_i ——每摩尔液体的蒸发潜热;

T ——绝对温度, K。

因此, 在自由蒸发时, 单位时间内自单位面积上蒸发出的液体重量 w 为:

$$w = h_0 \times \frac{u}{N} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{l_i}{RT}} = \rho \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{l_i}{RT}} \quad (1-3)$$

式中 ρ ——该液体的密度。

如对该式加以修正, 考虑蒸气分子本身所占容积时, 则所得结果与实验数据极为相符。

自由蒸发只是在理论上具有一定的意义。在实际工作中, 液体表面上总是有空气或本身的蒸气分子存在, 因而液体分子在蒸发出液面后不得不碰撞其他分子。在多次碰撞之后, 有部分分子被撞回液面。由于液体表面结构具有某些类似固体的性质, 它

的表面也具有一定的“刚性”。不是所有被撞回液面的分子都被吸收，而是只有部分被吸收，其余部分被弹回而仍处于蒸气状态。

2. 实际蒸发

假设在液体表面每立方厘米气相层中有 C_0 个蒸气分子，则单位时间内在单位面积液面上所发生的蒸气分子撞击次数为 Z 。

$$Z = C_0 j \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-4)$$

式中 j ——常数。

假定在每 ζ 次撞击中有一次被吸回液面，则在单位时间内每平方厘米表面上被吸回液面的分子数为

$$n_0' = \frac{C_0 j}{\zeta} \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-5)$$

当蒸发继续进行，直到平衡状态，即蒸发出去的分子数等于被吸回液面的分子数，此时蒸气达到饱和状态。饱和状态下的蒸气浓度称饱和蒸气浓度 C_s ，这时的蒸气压力称饱和蒸气压力 P_s 。

在饱和状态下

$$n_0 = n_0' = \frac{C_s j}{\zeta} \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

由上式及式(1-2)，可以得出

$$C_s = \frac{N \zeta}{j r' u} e^{-\frac{l_i}{RT}} \quad (1-7)$$

或

$$\frac{1}{\zeta} = \frac{N}{C_s j r' u} e^{-\frac{l_i}{RT}} \quad (1-8)$$

即从饱和蒸气浓度和蒸发潜热 l_i 可以计算出撞合系数 $1/\zeta$ 。

由上述推导也可以计算出在各种情况下，单位时间内在液体表面层每平方厘米表面内蒸发出去的分子数 n ，此时

$$\begin{aligned} n &= n_0 - n_0' \\ &= \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{N}{r' u} e^{-\frac{l_i}{RT}} - \frac{C_0 j}{\zeta} \right) \end{aligned} \quad (1-9)$$

将式(1-8)中 $1/\zeta$ 代入上式后得出

$$n = \frac{N}{r' u} e^{-\frac{l_i}{RT}} \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{C_0}{C_s} \right) \quad (1-10)$$

由于蒸汽分子的浓度通常可以用它们相应的蒸气压表示，故式(1-10)可以写成蒸气压形式：

$$n = \frac{N}{r' u} e^{-\frac{l_i}{RT}} \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{P}{P_s} \right) \quad (1-11)$$

如计算成单位时间内单位面积上蒸发出去的液体质量即蒸发速度则为

$$w = \rho \left(\frac{RT}{2\pi u} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{l_i}{RT}} \left(1 - \frac{P}{P_s} \right) \quad (1-12)$$