

413037

内 燃 机 燃 烧 学

何学良 李疏松 编著



机 械 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书比较系统、全面地论述了内燃机的燃烧过程。对燃料、喷油系统、气流运动和燃烧室等影响燃烧过程的主要因素及其良好匹配作了深入介绍。对着火过程、放热规律、示功图分析以及有害物的生成机理和影响因素等也都作了全面论述。汽油机的燃烧过程和燃烧室也占有一定的篇幅。

本书是作者长期从事内燃机科研工作并涉猎众多的国内、外有关文献的研究总结。全书贯彻了理论结合实践的原则，提供了大量的统计数据、试验数据、回归公式和图表。书中收集了当代国内、外内燃机先进的科研成果。本书是内燃机科研、设计、教学和生产人员以及大学生、研究生的重要参考文献。

内燃机燃烧学

何学良 李疏松 编著

责任编辑：钱既佳 责任校对：刘志文

封面设计：郭景云 版式设计：冉晓华

责任印制：尹德伦

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

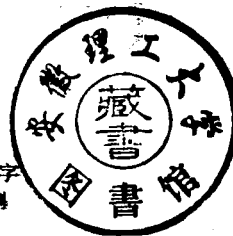
开本 787×1092¹/₁₆·印张 33·插页 2·字数832千字

1990年5月北京第一版·1990年5月北京第一次印刷

印数 0,001—1,055·定价：37.40元

科技新书目：215-005

ISBN 7-111-01433-2/TK·59



前 言

随着我国社会主义事业的迅速发展，内燃机工业和科研工作也获得了长足的进步。在这种情况下，很需要出版一本理论结合实践的《内燃机燃烧学》，以适应我国内燃机工业和科研工作发展的需要。

作者长期从事内燃机的科研工作，进行了大量的试验研究，并接触到众多的国内、外有关文献。因此，全面地认真总结作者在长期研究工作中的经验，并将它介绍给读者（特别是青年读者）是作者长期的宿愿。

本书的特点是：强调实用，讲求实效，坚决贯彻科研为国民经济建设服务的指导思想。为此，书中给出了大量可供实用的数据和图表，并结合内燃机实际的燃烧过程作了理论论述。

鉴于国内内燃机行业对内燃机燃料，特别是燃料的物理化学特性对燃烧过程品质及各参数的影响研究不多，而这却是研究内燃机燃烧过程所必须了解和掌握的知识，所以书中写了“内燃机燃料”一章。

我国内燃机行业所使用的名词术语（特别是燃烧过程中的名词术语）长期以来不很统一，这与翻译各国文献的影响有关。鉴此，本书所使用的名词术语，尽量采用新的国家标准《往复活塞式内燃机名词术语》。

本书第一至十章及十三章为何学良撰写，第十一章、十二章为李疏松撰写，并由何学良定稿。本书得到蒋德明教授的全面审阅和程宏、张景贤教授的部分审阅，并提出了许多宝贵意见。这对提高和完善本书很有帮助，深表谢意。

本书的错误和不足之处，恳请读者不吝指正。

作 者
(上海内燃机研究所)

本书使用的主要符号

a	声速	h	气门升程
A	空气	H	汽化热
B	温度系数、宽度	H_m	摩尔热值
BSU	波许烟度单位	$H_{m, \text{理}}$	理论混合气热值
c	速度	H	高热值
$^\circ\text{CA}$	曲轴转角、($^\circ$)	H_0	低热值
$^\circ\text{CaA}$	凸轮轴转角、($^\circ$)	H_v	体积热值
c_d	油滴飞驰速度	i	一台发动机的气缸数
c_m	活塞平均速度	I	火焰光强度
c_s	喷孔处喷注初速	J	焦耳
c_p	活塞瞬时速度, 柱塞速度, 定压比热容	k	千
c_v	定容比热容	Kb	波尔兹曼常数
d	相对密度, 直径	k_r	反应速度常数
D	气缸直径	l	长度
d_s	喷孔直径	l_0	燃料所需的理论空气量
d_t	油滴直径	L	连杆长度
d_{1s}	进气门座直径	m	毫
d_{1v}	进气门直径	min	分
d_{1c}	活塞顶内燃烧室口部直径, 副燃烧室直径, 通道直径	M	质量、兆、甲醇
e	偏心距	m	质量
E	能量, 活化能, 乙醇	n	发动机转速 分子中碳原子数
f	频率, 面积	n_0	油泵凸轮轴转速,
f_s	一个喷嘴喷孔的总面积, 燃烧压力振荡频率	n_1	涡流转速
f_n	通道截面积	n_1	压缩多变指数
f_p	柱塞截面积	n_2	膨胀多变指数
F	面积, 燃油	N	总数
F_p	活塞名义尺寸截面积	N_0	阿伏加德罗常数
g	克	N_0	无量纲涡流值
g_e	有效油耗率	p	压力
g_i	指示油耗率	p_b	气缸内背压
g_p	颗粒排放率	p_e	平均有效压力
g_{NO_x}	NO_x 排放率	p_i	平均指示压力
g_{HC}	HC 排放率	p_{10}	喷油压力
g_{CO}	CO 排放率	p_{100}	启喷压力
G	质量流量, 消耗量	p_m	平均机械损失压力
G_s	喷油量	p_c	最高燃烧压力
h	升程, 活塞顶内燃烧室深度	p_{1s}	着火时缸内压力
h_s	针阀升程	P_e	有效功率
		P_{e1}	单缸有效功率
		P_i	指示功率

q	每循环喷油量	μ_c	喷孔流量系数
q_r	着火后的喷油量 (后期喷油量)	μ_o	气道流量系数
q_d	扩散燃烧的燃油量	μ_v	气门处流量系数
q_i	滞燃期内的喷油量 (前期喷油量)	ν	运动粘度、表面张力
q_o	预混合燃烧的燃油量	ρ	密度
Q	放热量	ξ	修正系数
r	半径	τ	时间
R	半径, 曲轴回转半径, 波许烟度, 通用 气体常数	τ_1	滞燃期
R_c	哈却立奇烟度	τ_1	冷焰诱导期
s	喷嘴端部伸出气缸盖底平面的距离	τ_{2-3}	蓝、热焰诱导期
S	活塞行程, 喷注贯穿距离	τ_{ob}	物理滞燃期
S_d	标准离差	τ_{cb}	化学滞燃期
SMD	邵特平均直径	τ_c	汽化持续期
t	摄氏温度, °C	φ	曲轴转角
t_i	排气温度	ϕ_c	燃烧持续角
T	热力学温度 (绝对温度), K	ϕ_{io}	喷油持续角
T_z	最高燃烧温度	ϕ	燃空当量比
U	单位	Ω	涡流比
v	比容	$\frac{dG_i}{d\varphi}$	喷油率
V	容积	$\frac{dG_c}{d\varphi}$	燃烧率
V_c	压缩室容积	$\frac{dG_v}{d\varphi}$	汽化率
V_r	活塞顶内燃烧室容积, 副燃烧室容积	$\frac{dQ}{d\varphi}$	放热率
V_s	压力室	$\left(\frac{dp}{d\varphi}\right)_p$	最大压力升高率
W	反应速度	$\left(\frac{d^2p}{d\varphi^2}\right)_p$	最大压力升高加速度
α	过量空气系数, 凸轮轴转角	$\left(\frac{dQ}{d\varphi}\right)_p$	放热率峰值
α_o	各喷注投影之间的夹角	$\left(\frac{d^2Q}{d\varphi^2}\right)_p$	最大放热加速度
β	喷注锥角, 喷油器安装角 (与气缸轴线 之间的夹角)	注脚代号:	
γ_c	各喷孔组成的锥角	a	空气、轴向
Δ	差值, 间隔	b	开始、起始、背压
Δp	压力差	c	燃烧、喷孔、凸轮轴、压缩、锥角
τ_{io}	喷油持续期	d	油滴、扩散
τ_c	燃烧持续期	e	有效
δ	活塞顶面至气缸盖底平面的间隙 (顶隙)	f	燃油
ϵ	压缩比	h	哈却立奇 (烟度)
η	效率	i	喷油、指示、滞燃期内
η_i	热效率	in	喷油
η_v	充量系数	ig	着火
θ	喷油提前角		
λ	曲柄连杆比, $\lambda = \frac{R}{l}$, 喷注贯穿率		
λ_i	着火时的喷注贯穿率		
μ	动力粘度, 流量系数		

VIII 本书使用的主要符号

<i>k</i>	通道, 喉口, 副室	<i>s</i>	涡流
<i>m</i>	平均, 主要, 摩尔	<i>t</i>	热, 切向
<i>o</i>	初始	<i>v</i>	容积, 定容, 气门, 汽化, 充量
<i>p</i>	压力, 定压, 活塞, 柱塞, 峰值, 颗粒, 预混合	<i>w</i>	水、壁
<i>r</i>	排气、径向	<i>z</i>	最高

目 录

前言		技术要求	147
第一章 内燃机的燃料	1	第二节 喷嘴的结构型式和几何参数	148
第一节 石油系液体燃料的基本组成及发展趋势	1	第三节 喷油过程的参数	154
第二节 石油系液体燃料的物理-化学特性及其相互关系	17	第四节 喷油速率和喷油规律	161
第三节 醇类燃料	31	第五节 喷注的基本结构和物理状态	164
第四节 植物油燃料	44	第六节 喷注的贯穿规律及其计算方法	169
第五节 气体燃料	51	第七节 异常喷油	181
参考文献	55	参考文献	187
第二章 柴油机的燃烧室	57	第五章 柴油机的混合气形成过程	191
第一节 概述	57	第一节 混合气形成的各种方式及其特点	191
第二节 开式燃烧室的结构和示例	59	第二节 对混合气形成的技术要求	195
第三节 半开式燃烧室的结构和示例	62	第三节 燃油的雾化过程	195
第四节 直喷式燃烧室形状尺寸及其对燃烧和性能的影响	75	第四节 燃油的吸热、汽化和扩散过程	209
第五节 分开式燃烧室的结构和示例	84	第五节 混合气形成的能量	217
第六节 各种燃烧室的分析比较	96	第六节 充量的增加和混合气的浓度	220
参考文献	99	参考文献	228
第三章 柴油机进气、压缩和燃烧过程中的气流运动	104	第六章 柴油机的着火过程	231
第一节 概述	104	第一节 燃烧化学反应动力学的基础理论	231
第二节 形成进气涡流的方法及其比较	107	第二节 着火前燃料的物理-化学过程(焰前反应)	243
第三节 进气过程中的动力效应及其利用	113	第三节 柴油机的滞燃期及其影响因素	253
第四节 进气过程中气缸内的气流运动	120	第四节 滞燃期的计算及比较与分析	264
第五节 压缩过程中气缸和燃烧室内的气流运动	130	第五节 滞燃期对燃烧过程和柴油机性能的影响	274
第六节 燃烧过程中气缸和燃烧室内的气流运动	133	参考文献	278
第七节 涡流室燃烧室中的气流运动	137	第七章 柴油机的燃烧与放热过程	281
第八节 预燃室燃烧室中的气流运动	143	第一节 燃烧过程的分段和始终点的确定	281
参考文献	144	第二节 燃烧的进程	287
第四章 柴油机的喷油过程	147	第三节 放热规律计算及有关参数的确定和误差影响	292
第一节 喷油过程的重要性及对它的			

第四节 各种柴油机放热规律图形的 比较与分析.....304	烟和颗粒..... 397
第五节 影响放热规律的主要因素.....313	第一节 碳烟的生成机理.....397
第六节 计算放热规律的维别半经验 公式.....317	第二节 影响碳烟形成和排放的诸因素...404
参考文献.....320	第三节 减少碳烟的机内措施.....413
第八章 燃烧过程中的压力振荡324	第四节 消烟添加剂的功能和效果.....417
第一节 燃烧压力振荡的形成机理.....324	第五节 颗粒的组成及与碳烟和碳氢 的关系.....419
第二节 燃烧压力振荡的发展与衰减 规律.....328	第六节 颗粒的形成及其物化特性.....422
第三节 燃烧压力振荡的理论分析计 算.....330	第七节 影响颗粒排放率的诸因素.....428
第四节 影响燃烧压力振荡的主要因 素.....336	第八节 碳烟浓度与烟度示值之间的 关系.....433
第五节 燃烧压力振荡的频谱分析及 其应用.....342	参考文献.....434
参考文献.....344	第十二章 柴油机燃烧过程中的有 害气体..... 440
第九章 柴油机供油系统、气流运动 与燃烧室结构之间的匹配346	第一节 有害气体排放率的水平.....440
第一节 影响燃油喷射、气流运动与燃 烧室结构之间匹配的因素.....346	第二节 氮氧化物的生成机理.....440
第二节 以改变喷油系统参数为主的 匹配.....347	第三节 影响氮氧化物排放率的诸因 素.....446
第三节 以改变进气系统和气流运动 参数为主的匹配.....361	第四节 碳氢化合物 HC 及其生成机 理.....453
第四节 以改变燃烧室结构参数为主 的匹配.....365	第五节 影响碳氢化合物 HC 排放浓 度的诸因素.....455
参考文献.....370	第六节 一氧化碳及其生成机理.....162
第十章 示功图的分析 and 数据处理372	第七节 影响一氧化碳排放浓度的诸 因素.....463
第一节 示功图能提供的信息量.....372	第八节 柴油机油耗率与排放率的关 系.....466
第二节 上止点的确定方法及误差分 析.....373	第九节 气态排放物的测定方法和仪 器示例.....467
第三节 影响示功图正确性的各种因 素.....380	参考文献.....474
第四节 示功图的均化处理与光顺处 理.....382	第十三章 汽油机的燃烧室与燃烧 过程.....477
第五节 拖动示功图和低压示功图.....384	第一节 汽油机燃烧过程的基本情况.....477
第六节 示功图的分析实例.....389	第二节 汽油机的常用燃烧室.....482
第七节 示功图测量与微处理仪示例.....394	第三节 汽油机的分层燃烧及其燃烧 室.....490
参考文献.....395	第四节 汽油机的爆震.....499
第十一章 柴油机燃烧过程中的碳	第五节 汽油机的燃烧波动.....505
	第六节 汽油机的掺水燃烧.....507
	参考文献.....512

第一章 内燃机的燃料

第一节 石油系液体燃料的基本组成及发展趋势

燃料及其喷射、雾化、蒸发与空气的混合过程，是内燃机燃烧过程三要素（油、气、室）之一。要全面、深入地研究内燃机的燃烧过程，燃料（特别是燃料的物理-化学特性）及其喷射、雾化、蒸发和扩散过程是必须研究的内容之一。而后者与前者又是不可分割地联系在一起。

另外，世界性的石油紧缺和能源的大量消耗，使内燃机燃料已向多样化、代用化、低质化、混合化方向发展。所以，研究它们的物化特性及其对着火、燃烧和发动机性能的影响是很有意义的。——内燃机的燃烧过程品质及其评价指标在相当程度上取决于燃用何种燃料。所以，研究内燃机的燃料就包括研究各种可用的燃料（石油系的和非石油系的）：标准燃料、重质和低质燃料、混合燃料（含掺水）、宽馏分燃料，低十六烷值燃料、高凝点燃料和代用燃料等。

近10年来，各国内燃机学术界研究燃料及其对发动机性能影响的学者愈来愈多，研究的内容也日益向纵深和广度发展。进入80年代以来，我国对石油系燃料，醇类燃料和植物油燃料的研究，亦取得了明显的成果。

一、分类及基本组成

石油系液体燃料按原油在蒸馏炼制过程中的馏出温度低、高依次大致可分为：汽油（40~180℃）煤油（航空煤油、灯油，160~250℃）、轻柴油（180~350℃）、重柴油（重质柴油280~380℃）、重油（>350℃）、渣油（>400℃）。

在炼油过程中，亦可以按石油产品不同的用途和需要切割不同的馏程。图1-1示出了各种燃料馏程的大致分布。由于各国原油的品质不同和石油资源贫富不同，其燃料的馏程也略有差异。

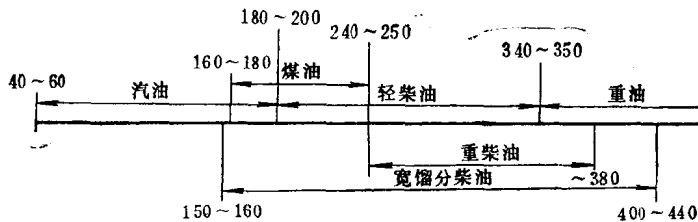


图1-1 石油系燃料馏程的大致分布（单位℃）

各种燃料尽管馏程不同，但它们的基本化学成分都是烃类，而且主要是烷烃、烯烃、环烷烃和芳烃四大类。其中也常把环烷烃并入烷烃一类合称饱和烃。众所周知，不同的发动机

(如柴油机和汽油机)要求燃用不同的燃料(如前者烧柴油,后者烧汽油);而各种不同燃料之间最本质的区别是所含各烃类的百分比不同以及馏程不同。而这就决定了它们在一系列物化特性上的差别,进而影响到它们对着火、燃烧和发动机性能的本质性影响。

内燃机用的汽油,其所含的碳原子数一般为5~14;轻柴油为10~26;重柴油为14~30。相应地汽油的当量分子量为95~120,轻柴油为180~220;重柴油为190~250。

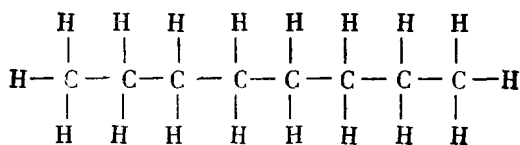
内燃机燃油是烷烃、烯烃、环烷烃和芳烃的混合物。其相互之间的混合比随原油性质(与产地有关)、炼油工艺和市场需求等有关。市场上的商品柴油和汽油,即使牌号相同,其组成和物化特性亦有相当差别。要弄清燃油的物化特性,必须首先弄清其组成部分的烷烃、烯烃、环烷烃和芳烃的物化特性。各烃类之间的根本区别在于它们的化学结构不同;而同类烃中不同的单体烃,其物化特性的区别又取决于它们分子中所含碳原子数的不同(亦是所含氢原子数的不同)。

所以,一切烃类的相对分子质量、相对密度、粘度、热值、辛烷值、十六烷值、常压沸点、熔点、闪点、着火温度、比热容、凝点、冷滤点、汽化潜热、挥发性能、表面张力、氧化安定性、与空气混合后可燃浓度界限,以及在常压、常温下的物理状态(气、液、固态)等几乎一切物化特性,都取决于烃类的分子结构及所含碳原子数(或氢原子数,或氢碳原子数比)。掌握烃类的这些特性,对深入研究单体烃、柴油、汽油等燃料在内燃机中的着火、燃烧、冒烟、废气有害成分的形成以及整机性能等有重要作用。

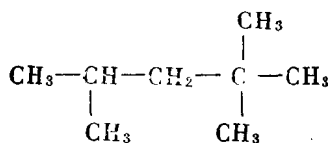
1. 烷烃

烷烃又名石蜡烃,是一种饱和烃。它是燃油中的主要组分:我国柴油中含烷烃40~76%,汽油中含烷烃50~70%。常温、常压下,一个分子中含碳原子数1至4的烷烃呈气态(甲烷至丁烷),含碳原子数5至16的呈液态(戊烷至十六烷),含碳原子数17以上的呈固态。烷烃分子中碳原子之间以单键连接。其化学结构通式为 C_nH_{2n+2} ,即其分子中氢碳原子数比为 $2n+2/n$ 。烷烃由于化学结构上的差别又分正烷烃和异烷烃。

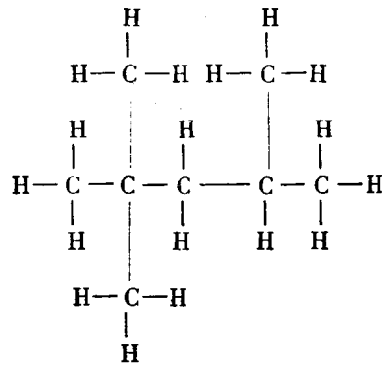
正烷烃是完全的开直链烃,链上没有分支结构。如下面的正辛烷结构式。异烷烃是在开直链结构上(称它为主链)一侧或两侧生出一个或几个支链。所以,异烷烃具有支链结构的特征。如下面的异辛烷(亦称2、2、4三甲基戊烷)结构式。



正辛烷 C_8H_{18} 结构式



异辛烷 C_8H_{18} 结构简式



异辛烷C₈H₁₈结构式

异烷烃与具有同样碳原子数目的正烷烃相比，由于其主链上生有一定数目的支链结构，这一特征是异烷烃物化特性区别于相应正烷烃（即二者碳原子数相同）的本质性原因。这一点就决定了异烷烃与相应的正烷烃相比，除碳、氢原子数及其比例相同外，几乎一切物化特性均不同。表1-1和表1-2列出了正丁烷和异丁烷、正辛烷和异辛烷物化特性的比较。

从表1-1看出：异丁烷的闪点、着火温度和辛烷值均比正丁烷高。这三个物化特性恰恰标志着烃类着火和燃烧的难易程度。这就证明异烷烃由于其存在支链结构，与相应的正烷烃相比，起化学反应和着火较难，即在内燃机中滞燃期较长（在相同条件下）。

表1-1 正丁烷与异丁烷物化特性的比较

物 化 特 性	正 丁 烷	异 丁 烷
相对密度, 25°/4°	0.584	0.551
常压沸点(°C)	-0.55	-11.73
闪 点 (°C)	92	99
着火温度, 常压下(°C)	431	550
高热值 (燃烧热) (MJ/kg)	49.16	48.90
标准生成热(kJ/mol)	124.8	131.5
辛烷值(MON)	92	99
与空气的混合气爆炸极限(%V)	1.6~8.5	1.9~8.4
熔 点 (°C)	-138	-145

表1-2 正辛烷与异辛烷物化特性的比较

物 化 特 性	正 辛 烷	异 辛 烷
相对密度, 25°/4°	0.707	0.692
常压沸点(°C)	125.6	99.3
气化热(kJ/kg)	300.2	293.1
表面张力(10 ⁻³ N/m)	21.9	18.85
液态导热系数, 30°C时[J/(cm·s·K)]	12.8 × 10 ⁻⁴	9.63 × 10 ⁻⁴
最高火焰温度(°C)	2251	2302

前面已提到：烃类几乎一切物化特性都随其分子中所含碳原子数（因而亦随所含氢原子数）而变。下面以正烷烃为例进一步加以论述。

烃类的分子量随其所含碳原子数的增加而增加是不言而喻的。正烷烃的相对分子质量 M 与其分子所含碳原子数 n 成线性关系： $M = 14n + 2$ 。

图1-2给出了正烷烃液态相对密度 d 随所含碳原子数 n 的变化曲线。由该图可知：随分子所含碳原子数增加，液态正烷烃的相对密度先是急剧增加，继之增加得益趋缓和。这是因为当含碳原子数较少时，每增加一个次甲基 CH_2 ，则正烷烃的相对分子质量增加的相对量较大；而当所含碳原子数增多后，同样增加一个次甲基 CH_2 ，则其相对分子质量增加的相对量较小。如从甲烷到乙烷，相对分子质量从16增至30.1，相对增加量为88.1%；而从壬烷到癸烷，同样增加一个次甲基 CH_2 ，相对分子质量从128.3到142.3，相对增加量只有10.9%。烃类的这个特点影响到它一系列的特性曲线的形状，如热值、相对密度、与空气燃烧的理论所

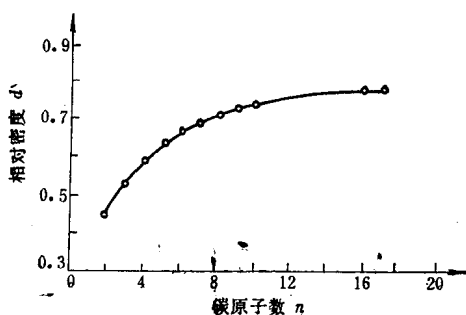


图1-2 正烷烃液态相对密度 d 随分子中碳原子数 n 的变化关系

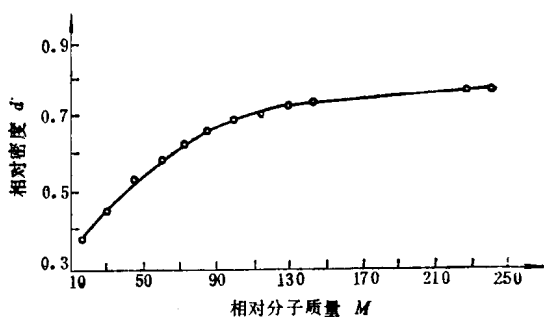


图1-3 正烷烃液态相对密度 d 随其相对分子质量 M 的变化关系

需空气量等。图1-3给出了正烷烃液态相对密度随其分子量的变化。图1-4给出了正烷烃相对密度（空气为1）随碳原子数的变化。图1-5给出了正烷烃常压沸点 T_b 随碳原子数 n 的变化。

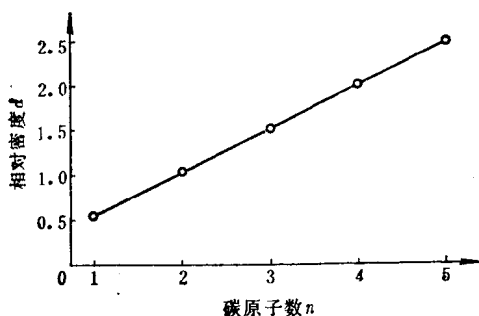


图1-4 正烷烃相对密度 d (空气为1) 随分子中碳原子数 n 的变化关系

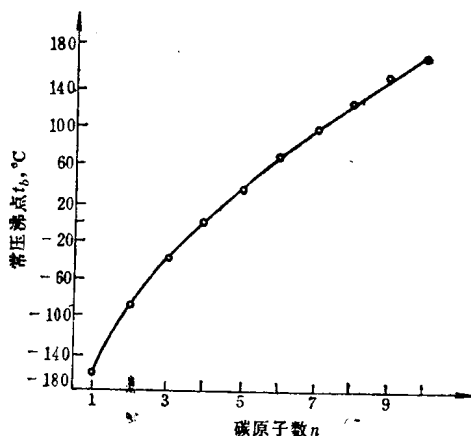


图1-5 正烷烃常压沸点 T_b 随分子中碳原子数 n 的变化关系

正烷烃中含碳原子愈多（如十六烷中含16个碳原子），其直链愈长，因而其碳原子之间的链连接愈脆弱，链愈易断裂，从而容易在高温下起化学作用、着火和燃烧。这就是为什么十六烷（它是常温、常压下含碳原子数最多的液态正烷烃）的着火和燃烧性能较好的根本原

因，也是选用十六烷值作为评价柴油着火性能好差指标的根本原因。

表1-3和表1-4分别给出了主要正烷烃的物化特性和燃烧特性的比较。表1-5列出了国内主要油田轻柴油（含部分煤油）烃族组分的比较^[1]。表1-6列出了国内、外部分油田直馏汽油烃族组分的比较^[1]。

表1-3 主要正烷烃的物化特性比较

烃名	分子式	相对分子质量 <i>M</i>	含碳量 C, (%,m,)	含氢量 H, (%,m,)	液态相对密度 <i>d</i>	相对密度 (空气为1)	常压沸点 <i>t_b</i> (°C)	沸点气 化热 (kJ/kg)	蒸气压 0°C (0.1 MPa)	熔点 (°C)	氢碳 质量比	氢碳原 子数比
甲烷	CH ₄	16.04	75	25	0.43	0.553	-160.15	509.6	175	-182.5	0.333	3.968
乙烷	C ₂ H ₆	30.1	80	20	0.446	1.049	-88.63	488.6	24	-172	0.250	2.976
丙烷	C ₃ H ₈	44.1	81.8	18.2	0.531	1.521	-42.07	425.8	4.6	-158	0.222	2.645
正丁烷	C ₄ H ₁₀	58.12	82.7	17.24	0.584	2.004	-0.55	386.0	1.02	-138	0.208	2.476
正戊烷	C ₅ H ₁₂	72.1	83.33	16.67	0.631	2.45	36.07	364.7	—	-130	0.200	2.381
正己烷	C ₆ H ₁₄	86.2	83.72	16.28	0.664	—	68.70	342.1	—	-110	0.194	2.310
正庚烷	C ₇ H ₁₆	100.2	84.0	16.0	0.688	—	98.42	318.2	—	-90.6	0.190	2.262
正辛烷	C ₈ H ₁₈	114.2	84.21	15.79	0.707	—	125.6	300.2	—	-72	0.188	2.238
正壬烷	C ₉ H ₂₀	128.3	84.38	15.62	0.727	—	150.7	288.5	—	-53.7	0.185	2.202
正癸烷	C ₁₀ H ₂₂	142.3	84.50	15.50	0.734	—	174.1	—	—	-29.7	0.183	2.179

表1-4 主要烷烃的燃烧特性

烃名		单位	甲烷	乙烷	丙烷	正丁烷	异丁烷	正戊烷
质量热值		(MJ/kg)	50.03	47.48	46.35	45.43	45.37	45.30
标态体积 热值	高	(MJ/m ³)	39.86	70.43	101.83	134.03	132.03	—
	低	(MJ/m ³)	35.80	64.35	93.58	123.56	121.64	138.21
爆炸极限 (空气中)	上限	(%)	4.9	3.2	2.4	1.9	1.9	1.4
	下限	(%)	15.4	12.5	9.5	8.5	8.5	7.8
理论空燃比 <i>A/F</i>	质量	(kg/kg)	17.27	16.03	15.63	15.41	—	15.29
	标态 体积	(m ³ /m ³)	9.52	16.7	23.8	30.9	30.9	—
空气中燃烧理论体 积百分比 <i>F/A+F'</i>		(%)	9.47	5.64	4.02	3.12	—	2.55
着火温度		(°C)	632.2	570	510	430.6	—	284.5

从表1-5可以看出：我国主要油田原油所炼出的轻柴油中，正烷烃含量与异烷烃含量之比从0.76到1.90均有。可见，原油的烃族组成对柴油的烃族组成有决定性的影响。

从表1-6可以看出：我国大庆、胜利和大港三大主要油田所炼的直馏汽油（是商品汽油的主要调合组分）中，正烷烃与异烷烃的含量比，差别亦是比较大的（从0.538到2.533均有）。其中大庆原油中含正烷烃较多，胜利原油中含异烷烃较多。

图1-6给出了烷烃液体（常压）粘度随温度的变化曲线；图1-7给出了烷烃蒸气粘度随温

表1-5 我国主要油田轻柴油(含部分煤油)的烃族组分比较(%, m)[1]

油田名		大庆	胜利	任丘	陕甘一号	大港	华北唯翎
馏出温度(°C)		145~350	145~350	145~360	—	145~350	145~350
烷	总量	62.6	53.2	65.4	60.2	44.4	75.7
	正构	41.0	23	30	29.0	—	37
	异构	21.6	30.2	35.4	31.2	—	38.7
环烷	总量	24.2	28.0	23.8	26.7	34.4	18.6
	单环	16.4	19.6	17.4	15.8	20.6	15.1
	双环	5.6	7.0	5.4	9.4	10.4	3.0
	多环	2.2	1.4	1.0	1.5	3.4	0.5
芳	总量	13.2	18.8	10.8	13.1	21.2	5.7
	单环	7.0	13.5	7.2	8.6	13.2	4.0
	双环	5.3	5.0	3.4	4.3	7.3	1.6
	多环	0.9	0.3	0.2	0.2	0.7	0.1

表1-6 国内、外部分油田直馏汽油的烃族组分比较(1)(%)

油田名	大庆	胜利	大港	南疆柯参1号	米纳斯(印尼)	惠明顿(美国)	宾夕法尼亚(美国)	伊朗
正烷烃	38	17.5	18.5	72.9	59	35	70	70
异烷烃	15	32.5	22.5	—	—	—	—	—
环烷烃	43	42	47	22.4	40	54	22	21
芳烃	4	8	12	4.7	1	11	8	9

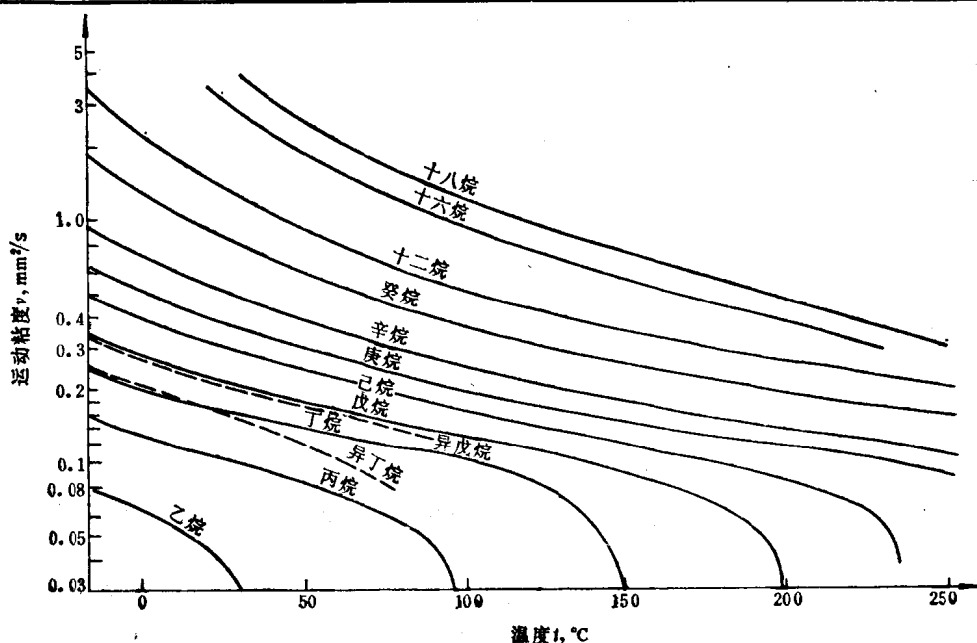


图1-6 烷烃液体(常压)粘度随温度的变化曲线

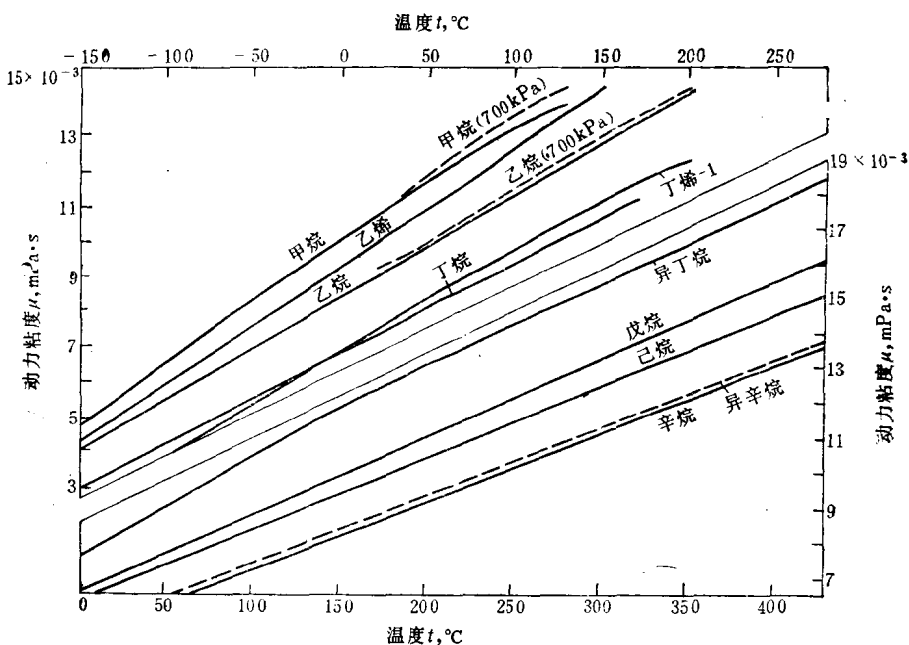


图1-7 烷烃蒸气粘度随温度的变化曲线

度的变化曲线；图 1-8 给出了烷烃表面张力随温度的变化曲线；图 1-9 给出了烷烃蒸气导热系数随温度的变化曲线。

2. 烯烃

烯烃是未饱和烃。这一点反映在它的分子中含有一个双键，这也是烯烃的特征。烯烃的化学结构通式为 C_nH_{2n} ，即其氢碳原子数比为 $2n/n = 2$ 。烯烃的含氢量未饱和，意味着它的含碳量过多。所以，燃用含烯烃较多的燃油时，这过剩分子中的碳往往得不到充分燃烧而以黑烟形式排出。烯烃在柴油和汽油中的含量过多，会引起燃油的安定性变差，同时使结胶明显增加。

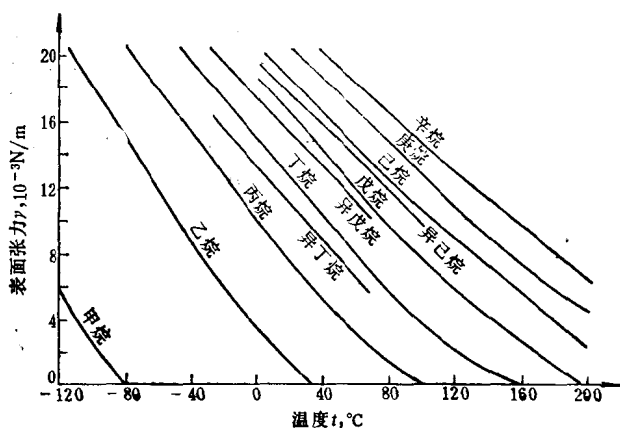


图1-8 烷烃表面张力随温度的变化曲线

由于烯烃的物化特性与烷烃较为接近，二者同属直链烃，加上在燃油中的含量较少，所以，炼油厂常把烯烃加在烷烃上一起统计，构成一个《烷烃加烯烃》总含量，而常不把烯烃单独列出。燃油中烷烃加烯烃的总含量一般为65~76%。这主要与原油品质及炼油工艺有关。

烯烃未饱和的这一特点，决定了它的化学性质比饱和烃活泼，易起加成反应和聚合反应。乙烯是最常用和最简单的烯烃。乙烯在空气中燃烧时，其爆炸区的浓度范围较宽(3.0~33.5%)。其燃烧火焰也比较明亮(因含碳量较多)。烯烃的相对密度、热值、粘度、常压沸点、蒸气压、气化热等主要物化特性随其所含碳原子数的变化趋势与烷烃的同类特性相仿。这是因为烯烃与烷烃同属直链烃之故。表1-7给出了主要烯烃的物化特性。

3. 环烷烃

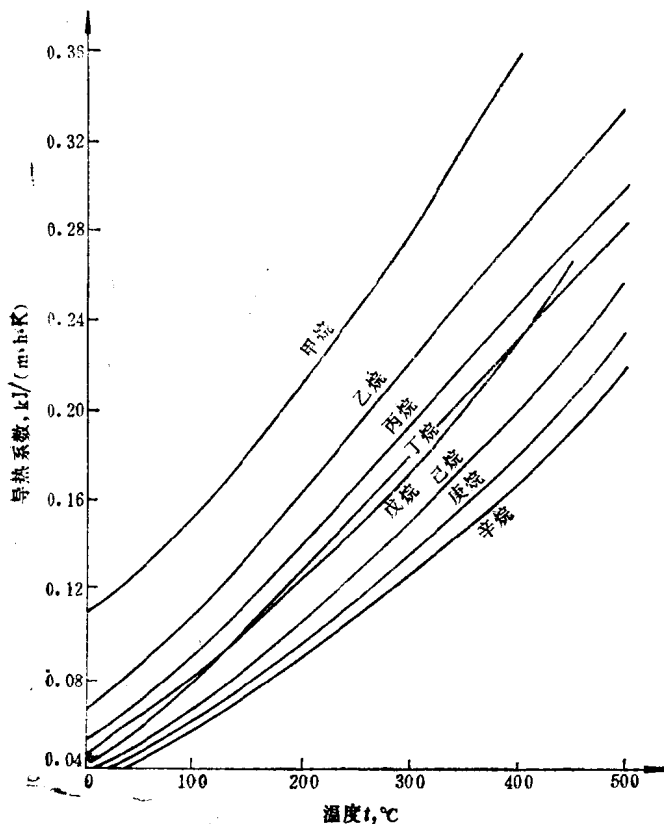


图1-9 烷烃气体导热系数随温度的变化曲线

表1-7 主要烯烃的物化特性

烯烃名	相对分子质量	液态密度, -20°C (g/cm³)	常压沸点(°C)	熔点 (°C)
乙 烯	28.05	0.384(-10°C)	-103.7	-169.2
丙 烯	42.08	0.519	-47.4	-185.3
1-丁 烯	56	0.595	-6.3	-185.4
2-丁 烯	56	0.621	顺 +3.5 反 +0.9	顺 -139.3 反 -105.5
异丁烯	56	0.588(25°C)	-6	-139
1-戊 烯	70	0.641	+30	-138

环烷烃是其分子中环的碳原子间含有单键结构的脂环烃。环烷烃的特性介于烷烃与芳烃之间。环烷烃的通式为 C_nH_{2n} ，其氢碳原子数比也是 $2n/n=2$ 。所以，环烷烃是烯烃的同分异构体。环烷烃的分子中碳原子间互相连接成环状，例如环戊环和环己烷的结构式如下：

