

内燃机构造与原理

下 册

长沙铁道学院 主编

高等学校试用教材

中国铁道出版社

内 容 简 介

本书是按照铁道施工及养路专业《内燃机构造与原理》课程教学大纲编写的，分上、下两册出版。上册讲构造，下册主要讲内燃机的基本工作过程、特性，曲柄连杆机构动力学，内燃机的增压及试验等内容。

本书第十一、十三、十四及十九章由长沙铁道学院谢逢申编写；第十二、十五、十六、十七及二十一章由长沙铁道学院李飞鹏编写；第十八章由西南交通大学沈权编写；第二十章由西南交通大学陈玉华编写。

参加本书审稿和教材大纲讨论的有铁道兵工程学院、工程兵工程学院、华北水利水电学院等单位。西南交通大学倪志镛教授审阅了全书。本书由李飞鹏主编；沈权、赵位西主审。

长沙铁道学院赵敬业、马坤荣、张荣华、龙力强曾对本书的编写工作给予大力支持和帮助。

高等学校试用教材
内燃机构造与原理（下册）

长沙铁道学院主编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{4}$ 印张：12.5 字数：310 千

1981年8月第1版 1981年8月第1次印刷

印数：0001—7,500册 定价：1.35元

常用符号表

<p>C_m——活塞平均速度 (米/秒)</p> <p>D——气缸直径 (毫米)</p> <p>G_a——空气流量 (公斤/小时)</p> <p>G_f——燃油消耗量 (公斤/小时)</p> <p>g_b——发动机每循环供油量 (毫米³/循环)</p> <p>g_e——燃油消耗率 (克/马力·小时)</p> <p>g_i——指示燃油消耗率 (克/马力·小时)</p> <p>g_N——比重 (公斤/马力)</p> <p>H_u——燃料的低热值 (千卡/公斤)</p> <p>i——气缸数</p> <p>K——空气绝热指数; 发动机适应性系数</p> <p>l——连杆长度(连杆大、小头中心距) (毫米)</p> <p>l_o——燃烧1公斤燃料实际上所需空气量 (公斤气体/公斤燃料)</p> <p>L_o——燃烧1公斤燃料实际上所需空气量 (公斤摩尔/公斤燃料)</p> <p>L_i——指示功 (公斤力·米)</p> <p>M——马赫数</p> <p>M_e——内燃机输出扭矩 (有效扭矩) (公斤力·米)</p> <p>M_i——指示扭矩 (公斤力·米)</p> <p>M_N——倾覆力矩 (公斤力·米)</p> <p>N——功率 (马力)</p> <p>N_e——有效功率 (马力)</p> <p>N_b——标定功率 (马力)</p> <p>N_i——指示功率 (马力)</p> <p>N_l——升功率 (马力/升)</p> <p>N_m——摩擦功率 (马力)</p> <p>n——发动机转速 (转/分)</p> <p>n_1——压缩多变指数</p> <p>n_2——膨胀多变指数</p> <p>p_0——大气压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_a——进气终点压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_b——膨胀终点压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_c——压缩终点压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_e——平均有效压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_i——平均指示压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_k——增压压力 (公斤力/厘米²)</p>	<p>p_m——平均机械损失压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_r——残余废气压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_T——涡轮前排气管内压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>p_z——最高爆发压力 (公斤力/厘米²)</p> <p>P——作用力 (公斤力)</p> <p>P_g——气体压力 (公斤力)</p> <p>P_j——往复惯性力 (公斤力)</p> <p>p_N——(活塞)侧向力 (公斤力)</p> <p>P_r——离心力 (公斤力)</p> <p>P_z——总作用力 (作用在活塞上的气体压力与往复惯性力之和) (公斤力)</p> <p>r——曲柄半径 (毫米)</p> <p>S——活塞行程 (毫米)</p> <p>$T_0(t_0)$——大气温度 [K, (°C)]</p> <p>$T_a(t_a)$——进气终点温度 [K, (°C)]</p> <p>$T_b(t_b)$——膨胀终点温度 [K, (°C)]</p> <p>$T_c(t_c)$——压缩终点温度 [K, (°C)]</p> <p>$T_k(t_k)$——增压空气温度 [K, (°C)]</p> <p>$T_r(t_r)$——排气温度 [K, (°C)]</p> <p>$T_T(t_T)$——涡轮前排气管内温度 [K, (°C)]</p> <p>V_b——气缸工作容积 (升)</p> <p>V_H——发动机总排量 (升)</p> <p>α——过量空气系数</p> <p>β——连杆摆角(弧度); 喷雾锥角</p> <p>γ——残余废气系数</p> <p>γ_s——空气密度 (公斤/米³)</p> <p>$\delta_{稳}$——调速器稳定调速率</p> <p>ε——压缩比; 调速器的不灵敏度</p> <p>ε_e——后期膨胀比</p> <p>η_e——有效热效率</p> <p>η_i——指示热效率</p> <p>η_k——压气机的绝热效率</p> <p>η_m——机械效率</p> <p>η_v——充量系数</p> <p>θ——供油提前角 [曲轴转角(度)]</p> <p>θ_e——排气提前角 [曲轴转角(度)]</p> <p>θ'_e——排气滞后角 [曲轴转角(度)]</p> <p>θ_k——点火提前角 [曲轴转角(度)]</p>
--	---

<p>θ_i——进气提前角 [曲轴转角(度)] θ'_i——进气滞后角 [曲轴转角(度)] θ_s——喷油提前角 [曲轴转角(度)] λ——压力升高率; 连杆比 μ_M——扭矩储备系数 μ_n——转速储备系数 π_k——增压比 ρ——初期膨胀比 τ——冲程系数(四冲程: $\tau=4$; 二冲程: $\tau=2$) τ_i——滞燃期 [曲轴转角(秒或度)] $\varphi(\alpha)$——曲轴转角 (弧度) φ_e——排气持续角 [曲轴转角(度)] φ_i——进气持续角 [曲轴转角(度)]</p>	<p>使用单位制的补充说明 根据国务院1977年颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》,我国计量单位制,将逐步采用比较科学的国际单位制(SI),故本书采用质量作为基本单位(公斤——千克),而力的单位,国际单位制用牛顿(N),即1牛顿=0.102公斤力;考虑到国内实际情况,仍沿用重力单位制中力的单位,即公斤力。由于重量单位习题上常用公斤(或吨)表示,因此本书还是用公斤(或吨)作重量的单位。</p>
---	--

目 录

常用符号表.....	1
第十一章 燃料与燃烧	1
第一节 内燃机燃料的一般知识	1
第二节 关于发动机中燃料的发火和燃烧的基本概念	1
一、热自燃	2
二、链式反应	3
三、烃的氧化反应	4
第三节 车用汽油的使用性能	5
一、汽油的蒸发性	5
二、汽油的抗爆性	7
三、车用汽油的品种和规格	8
第四节 柴油的使用性能	9
一、柴油的发火性	9
二、柴油的蒸发性(馏程)	10
三、柴油的雾化性	10
四、柴油的低温流动性	10
五、轻柴油的品种和规格	11
第五节 燃烧热化学	12
一、燃料燃烧所必需的空气量	12
二、燃烧前后的工质数量变化及分子变化系数	14
第六节 内燃机的大气污染	15
第七节 内燃机的噪声和消减措施	17
一、关于噪声的基本知识	17
二、内燃机的噪声和消减措施	18
第十二章 内燃机的性能指标及其提高途径	21
第一节 内燃机的指示指标	21
一、指示功和平均指示压力	21
二、指示功率	23
三、指示热效率和指示燃油消耗率	23
第二节 内燃机的有效指标	24
一、机械效率和有效功率	24
二、平均有效压力和升功率	25
三、由吸入空气量计算平均有效压力	26
四、有效热效率和燃油消耗率	27
第三节 标志内燃机整机性能的其他参数	28
一、活塞平均速度	28
二、强化系数	28
三、比重量	29

第四节 提高内燃机动力性能和经济性能的途径	29
第十三章 内燃机的热力循环	32
第一节 内燃机的理论循环	32
第二节 理论循环的分析和比较	33
第三节 内燃机的实际工作过程	36
第四节 内燃机的热平衡	41
第十四章 换气过程	44
第一节 四冲程发动机的换气过程和换气损失	44
一、换气过程	44
二、四冲程发动机的换气损失和泵损失	46
第二节 四冲程发动机的充量系数	50
一、四冲程发动机充量系数的分析式	50
二、影响充量系数的因素分析	53
三、进气马赫数 M	56
四、提高发动机充量系数的措施	58
第十五章 汽油机的燃烧过程	62
第一节 正常燃烧	62
一、燃烧过程的三个时期	62
二、火焰传播速度与燃烧速率	62
第二节 不正常燃烧	63
一、爆震燃烧	63
二、早燃	64
第三节 影响燃烧过程的因素	65
一、运转因素对燃烧过程的影响	65
二、构造因素对燃烧过程的影响	67
第十六章 柴油机的混合气形成与燃烧	69
第一节 柴油机的燃烧过程	69
一、柴油机混合气形成的特点	69
二、柴油机燃烧过程的四个时期	69
第二节 影响燃烧过程的因素	70
一、运转因素对燃烧过程的影响	70
二、构造因素对燃烧过程的影响	72
第三节 燃料的喷雾	73
一、喷注的形成及特性	73
二、影响喷注特性的因素	74
第四节 改善柴油机混合气形成与燃烧的途径	75
第十七章 内燃机的特性	77
第一节 内燃机的工况与特性	77
第二节 调节特性	77
一、汽油机的燃料调节特性	78
二、汽油机的点火调节特性	79
三、柴油机的喷油提前角调节特性	79
第三节 负荷特性	80

一、汽油机的负荷特性	80
二、柴油机的负荷特性	80
第四节 速度特性	81
一、汽油机的速度特性	82
二、柴油机的速度特性	84
第五节 调速特性	85
第六节 万有特性	86
第七节 内燃机功率的标定以及大气状态变化时功率和燃油消耗率的换算	87
一、功率的标定	87
二、大气状态对发动机性能的影响	88
三、功率和燃油消耗率换算的方法	89
第十八章 内燃机的增压	90
第一节 内燃机增压的基本概念及有关基础知识	90
一、内燃机增压的基本概念	90
二、气体流动的一些运动规律	91
三、滞止参数	92
四、声速 a 及马赫数 M	93
第二节 增压方法	93
一、机械增压系统	93
二、废气涡轮增压系统	94
三、复合增压系统	94
四、气波增压器	94
第三节 废气涡轮增压器	95
一、离心式压气机	96
二、废气涡轮	105
三、废气涡轮增压器的结构及其型号	109
四、废气涡轮增压器与柴油机的配合特性及调整	114
第四节 废气涡轮增压柴油机	119
一、废气涡轮增压柴油机理论示功图	119
二、柴油机废气能量的利用	119
三、机械负荷和热负荷	122
四、有关参数和机构的改变	123
第十九章 曲柄连杆机构动力学	124
第一节 曲柄连杆机构运动学	124
一、活塞的位移 x	124
二、活塞位移的图解法	125
三、活塞速度 v	126
四、活塞加速度 j	127
第二节 曲柄连杆机构的质量简化	127
一、沿气缸轴线作往复运动的零件——活塞组	127
二、作旋转运动的零件——曲轴	128
三、作平面运动的零件——连杆组	128
第三节 曲柄连杆机构的受力分析	130
一、惯性力	130

二、作用在活塞上的气体压力	131
三、作用在活塞上的合力及其在曲柄连杆机构中产生的各力与力矩	133
第四节 发动机的平衡	137
一、基本概念	137
二、单缸机的平衡	138
三、直列多缸机的平衡	141
四、V型发动机的平衡	147
五、保证发动机平衡的技术要求	152
第五节 曲轴扭转振动的概念与扭振减振器	152
第二十章 内燃机的试验	159
第一节 内燃机试验的目的和分类	159
一、性能鉴定试验	159
二、出厂试验	159
三、研究试验	159
第二节 内燃机试验中测量的主要参数、计算公式及测量仪器的选用	160
一、测量的主要参数	160
二、计算公式	160
三、测量仪器的选用	162
第三节 有效功率的测定	162
一、有效扭矩的测定	162
二、转速的测量	168
第四节 燃油消耗量的测量	168
一、容积法	168
二、重量法	169
第五节 空气流量的测定	169
第六节 温度的测量	171
一、电阻温度计	171
二、热电偶温度计	172
第七节 示功图的测录	174
一、机械示功器	174
二、气电示功器	175
三、电子示功器	178
第八节 内燃机试验方法	179
一、试验方法	179
二、试验数据的整理	183
第二十一章 工程机械用内燃机的特点	185
第一节 工程机械用柴油机的特点和要求	185
第二节 小型汽油机的特点	187

第十一章 燃料与燃烧

第一节 内燃机燃料的一般知识

内燃机所用的燃料主要是液体燃料。而且，多数采用石油作燃料，因为石油作燃料热值高，灰分少，便于运输、保管和使用。

石油是多种碳氢化合物（又名烃，分子式为 C_nH_m ）的混合物。它含有碳 85~87%，氢 11~14%，此外还有氧、硫、氮及灰分（金属盐类）共约占 1%。

组成石油的烃类主要有烷烃、环烷烃、烯烃和芳香烃四种。

天然石油经过炼制，即可得汽油、煤油、柴油、润滑油等多种油料。石油加工主要采用分馏法和裂化法。分馏法就是将原油加热，根据石油中各种烃的沸点不同，按一定的温度范围而分馏出不同的产品，如表11—1所示。裂化法是在一定的温度和压力下，将沸点高的重馏分（即碳原子多的馏分）加热，使碳链断裂，变为沸点低、碳原子少的轻馏分。采用裂化法可提高汽油的产量和质量。

石 油 产 品

表11—1

燃 料	沸 点	碳原子数目	元素成分（重量%）			分 子 量 m_T	低 热 值 H_u (千卡/公斤)	应 用 范 围
			C	H	O			
汽油	200°C以下	$C_5 \sim C_{11}$	0.853	0.145	—	95~120	10500~10550	航空、汽车汽油机燃料、溶解橡胶、制造油漆
煤油	180~300°C	$C_{11} \sim C_{17}$	0.860	0.137	0.003	160~180	10300	喷气式飞机燃料
柴油	250~360°C	$C_{16} \sim C_{23}$	0.870	0.126	0.004	180~200	10150	高速柴油机燃料
重油			0.870	0.125	0.005	220~280	10000	中、低速柴油机燃料
残渣 ^①	360°C以上	C_{23} 以上						

① 残渣继续炼制可获得润滑油、润滑脂（黄油）、凡士林、石蜡、沥青等产品。

第二节 关于发动机中燃料的发火和燃烧的基本概念

在高速内燃机中，燃烧过程的持续时间非常短暂。以转速为3000转/分的发动机为例，每一转只占0.02秒的时间，假定燃烧过程从上止点前30°开始，到上止点后30°结束，即占曲轴转角60°，这只有0.0033秒的时间。燃烧过程必须在这样短的时间内完成，如果燃烧不完全，就使燃料中包含的一部分化学能不能被利用，同时使排气中出现不完全燃烧产物，而这些产物都是有害的，对大气造成污染。如果燃烧迟缓，不能保证燃料在上止点附近燃烧完，那就使燃烧过程的最高压力和温度下降，排气温度上升，引起热能损失，降低循环的热效率（详见第十三章）。同时，燃烧迟缓使燃烧时的散热面积增大，增加了散热损失。因此，内燃机要

力求使燃烧过程在活塞位于上止点附近的短时间内完成，以保证发动机具有良好的动力和经济性能。

一、热自燃

内燃机中的燃料都是以气相参加燃烧的。燃料的燃烧是一种气相氧化反应。由物理学知，任何气体的分子总是在不停地、迅速地运动，时常相互碰撞。两个分子要发生化学反应，只有在碰撞时才有可能。但是碰撞的分子不一定能发生反应。要发生反应，碰撞的分子必须具备一定大小的能量。这个一定大小的能量叫做活化能。不同的反应，需要不同大小的活化能。能量在活化能以上的粒子，称为化学反应的活性中心。

由热力学已知，温度就是气体分子运动平均动能的量度，也是气体分子运动平均速度的量度。因此，在一定的温度下，气体分子运动速度的平均值是一定的。但是由于分子间的碰撞，使得各分子的瞬时速度不同，即各分子具有不同的动能。根据分子速度分布定律，能量超过活化能 E 的分子，即活性分子数 Δn 与分子总数 n 之比，可用下式表示

$$\frac{\Delta n}{n} = e^{-\frac{E}{RT}} \tag{11-1}$$

式中 R —— 气体常数；

T —— 气体绝对温度。

显然，气体反应速率与 $\frac{\Delta n}{n}$ 成正比，因此也与 $e^{-\frac{E}{RT}}$ 成正比。就一定气体来说， R 和 E 都是定值，所以，反应速率随温度的提高迅速增大。

公式(11-1)表明， $\frac{\Delta n}{n}$ 只决定于气体性质与绝对温度，而与气体密度无关。当温度一定而气体密度增加时， $\frac{\Delta n}{n}$ 不变，但 n 增加， Δn 与 n 成比例地增加，则单位容积单位时间内的反应量与活性分子数 Δn 成正比，因此，当气体温度一定而压力增加时（密度随之增加），单位容积单位时间内的反应量随之增加。如果是放热反应，则单位时间的发热量随压力提高而增加。

如果一个容器盛着可燃混合气，则在不同温度和压力下，由于气体反应的发热速率 dq_1/dt 随气体温度而变化的关系将如图11-1 a)的曲线所示。这族曲线说明两个问题：1) 温度升高，气体的反应速率增加，因此发热速率也增加。2) 温度一定而压力升高时，由于活性分子数 Δn 增加，而单位时间内的反应量与 Δn 成比例地增加，因此发热速率也增加。

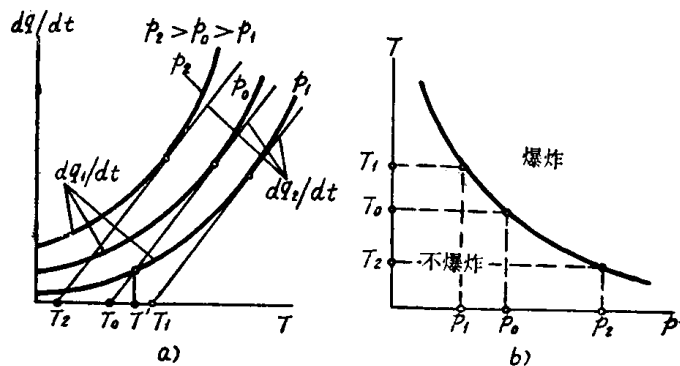


图11-1 热爆炸条件的说明及热爆炸界限

我们再看看进行反应的可燃混合气向容器壁的散热情况：如果容器温度保持为 T^* 。则气体向容器壁散热的速率 dq_2/dt 与气体温度和容器温度 T_0 的差额成正比，如图中直线所示。直线的斜率随传热系数而变，传热系数越大，散热越快，直线越陡。在一定的温度下，气

*注：实际上容器温度会因传热而逐渐升高，由于反应时间很短，我们可忽略这一温度变化。

体向容器壁的散热速率决定于容器的温度。容器的温度越低，散热速率越大。因此，改变容器温度时，气体向容器壁的散热速率直线也改变，由此得一族散热速率曲线。

以上我们分析了反应气体的发热和散热情况，现在就可以进一步讨论可燃混合气的反应情况了——在甚么情况下会发生爆炸，在甚么情况下不会发生爆炸。如果容器中气体的初始压力为 p_1 ，容器和气体的初始温度为 T_0 ，由图可见，气体在 T_0 下的发热速率大于散热速率，即 $dq_1/dt > dq_2/dt$ ，因此气体温度逐渐升高，到温度 T' 时，两速率相等，气体温度就不再上升；反应速率不再提高，结果不会发生燃烧爆炸现象。但如气体的初始压力为 p_2 ，温度为 T_0 ，则随着气体的温度升高，气体的发热速率始终高于散热速率（发热速率曲线与散热速率直线不相交），因此，反应速率将越来越快，最后以发生燃烧爆炸而告终。所以，就容器和气体的初始温度为 T_0 来说，若气体的初始压力高于 p_0 ，则会发生燃烧爆炸，若初始压力低于 p_0 ，则不会发生爆炸。另一方面，就一定的气体初始压力 p_0 来说，若容器和气体的初始温度低于 T_0 ，则不会发生爆炸，若高于 T_0 ，则会发生爆炸。

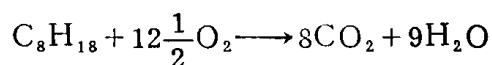
由图11—1 a 可得不同气体初始压力下发生燃烧爆炸的临界温度，绘成曲线如图11—1 b 所示。此图表示可燃混合气单纯因热而引起的爆炸界限。单纯因热而引起的爆炸称为热爆炸或热自燃。

当散热条件改变时，例如改变容器的材料从而改变气体向容器壁散热的传热系数，则图11—1 a 上的散热速率直线也将改变，因此，一定的气体初始压力下发生爆炸的临界温度也就改变。故图11—1 b 的热爆炸界限曲线也随着改变。

综上所述，可知一定的可燃混合气并没有一定的发火温度，即可燃混合气的发火温度不是物理常数。一定的燃料更并没有一定的发火温度，实际的发火温度随具体情况而变。

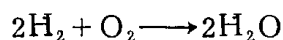
二、链式反应

以上所述，并没有考虑到燃料分子化学变化的具体过程。例如辛烷的燃烧，按照表观的化学反应方程式是这样的：



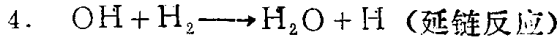
使一个 C_8H_{18} 分子氧化完毕，需要 $12\frac{1}{2}$ 个氧分子。但是在气体中，三个活性分子碰在一起的机会已经很少，更不要说十多个分子了。所以， C_8H_{18} 要氧化成最终产物 CO_2 和 H_2O ，必须经过复杂的过程，经过一系列中间变化，形成一连串的中间物质。

实验证实了化学反应过程的复杂性。例如最简单的燃料氢，其表观化学反应方程式十分简单：



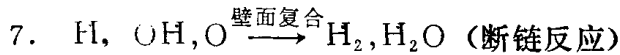
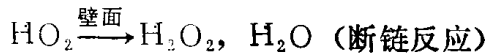
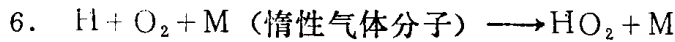
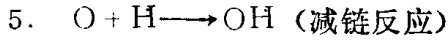
但却不具有图11—1 b 所示的双曲线形爆炸界限，而具有复杂的S形爆炸界限（与图11—2类似）。这种情况绝不是上述热爆炸理论所能解释的。实际上，氢和氧的反应具有如下的过程：

1. $\text{H}_2 \xrightarrow{\text{热作用}} 2\text{H}$ （发链反应）
2. $\text{H} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{OH} + \text{O}$ （支链反应）
3. $\text{O} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{OH} + \text{H}$ （支链反应）



这种一环扣一环的，借助活性很强的活性中心如游离原子H、O和游离基OH发展的连续反应过程，称为链式反应。有些反应如1，由于分子间碰撞等原因，由较不活性的分子产生活性很强的活性中心，称为发链反应。有些反应如2、3，使活性中心越来越多，称为支链反应。有些反应如4，以等量的活性中心使反应链延续下去，称为延链反应。在支链反应中，活性中心按几何级数增加，反应速率随之剧增，可引起爆炸。这样通过链式反应引起的爆炸，在相对较低的温度也能实现，称为链爆炸。

但是，由于还存在着活性中心的复合，活性中心与惰性气体分子(M)的碰撞，冷壁面的作用等导致活性中心减少或消灭的过程，称为减链反应或断链反应，如



氢和氧的混合气在某种情况下是否能爆炸，就要看当时条件是有利于支链反应还是有利于断链反应。

由此可知，即使像氢的氧化这种表面上看来很简单的化学反应，其反应过程也很复杂，不能单纯从热的观点来理解，引起爆炸的原因不一定是高温。而且，在燃料链爆炸以前，必然经过一段反应量逐渐积累的阶段，这段时期称为诱导期或着火落后期（在柴油机中称为滞燃期）。

三、烃的氧化反应

烃是复杂的碳氢化合物。它的氧化反应当然比氢的氧化反应更加复杂。由于高分子烃在发火前的链反应比较多，所以在较低温度下也能引起燃烧。作为一个实例，图11-2表示异辛烷的发火情况。

约在300°C以下，由于温度较低，烃被缓慢氧化生成过氧化物，同时温度逐渐上升。当过氧化物达到一定浓度就出现淡青色火焰，因为火焰的温度较低——在300~400°C范围之内，故称为冷焰。此时烃的过氧化物急速分解，生成甲醛。甲醛再被氧化，生成一氧化碳。这段时期（产生冷焰及冷焰诱导期）的反应式如下：

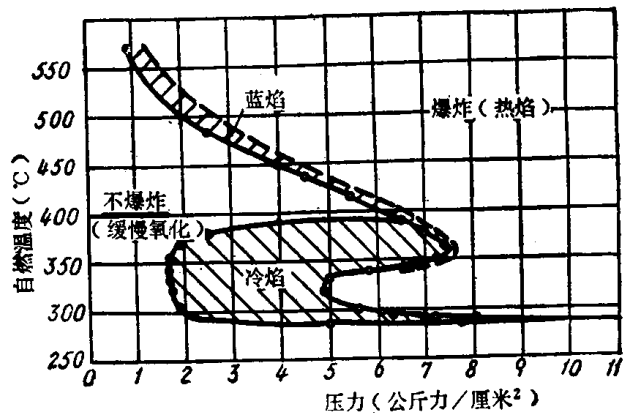
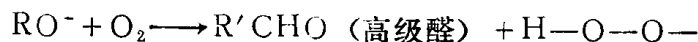
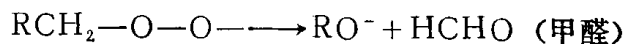
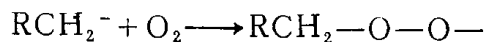
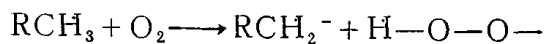
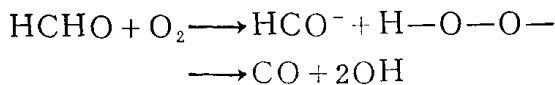


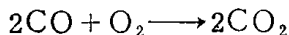
图11-2 异辛烷的爆炸界限



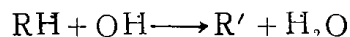
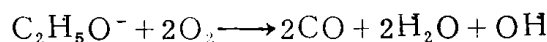
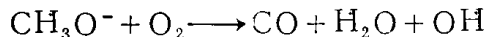


式中R、R'表示烃基，如CH₃、C₂H₅、C₃H₇等等。

温度继续升高，则发生蓝色火光，称为蓝焰。这时发生的反应是CO燃烧生成CO₂



一旦越过发火温度，就产生黄色的热焰，其有代表性的反应为



由于H₂O大量形成，特别是上述第二过程，发热量很大，可以引起迅速的高温氧化过程，达到爆炸的程度。这种爆炸以链式反应起始，以热爆炸告终，称为链热爆炸。烃的燃烧，都是这种链热爆炸。

与烃链热爆炸的过程相对应，燃料发火过程的时间，即着火落后期τ 将为冷焰、蓝焰、热焰三个着火落后期之和：τ = τ₁ + τ₂ + τ₃ (图11-3)。总落后期τ 决定于燃料的性质、

燃料空气混合比、压力和温度。在一定的压力、温度范围内，τ可用下式表达

$$\tau = aP^{-n}e^{E/RT} \quad (11-2)$$

式中 a —— 决定于燃料种类的常数；
n —— 反应指数（与反应式有关）；
E —— 活化能；
R —— 气体常数。

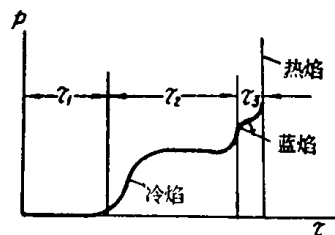


图11-3 烃的多段发火和着火落后期

第三节 车用汽油的使用性能

一、汽油的蒸发性

汽油是在化油器内的高速气流中喷散雾化，然后蒸发而形成可燃混合气的。因此，汽油蒸发性的好坏对汽油机的性能影响很大。汽油蒸发性好，在较低的温度和流速下也能形成可燃混合气，发动机比较容易起动。此外，汽油的蒸发性与汽油机产生汽阻的可能性、暖车的快慢、加速性的好坏、各气缸燃料分配的均匀性、燃烧的完全程度、对曲轴箱机油的稀释作用以及对进气温度的影响等都有密切的关系。

汽油的蒸发性通常可用两种曲线表示：

(一) 隔绝蒸馏曲线 如图11-4所示，将汽油在与空气隔绝的条件下加热，每隔10°C测定馏出量，最后画出如图11-5实线所示的曲线。隔绝蒸馏试验比较简单，但其中汽油的蒸发条件与实际汽油机中的情况差别较大。实际汽油机中的汽油是在高速气流中、在与空气混合的情况下蒸发的。其汽化率比相同温度下隔绝蒸馏时要高得多。但是隔绝蒸馏曲线用来相对比较不同牌号的汽油和其它燃料的蒸发性能是很适宜的。

(二) 平衡空气蒸馏曲线 将空气与燃料以一定比例混合，保持一定的温度，使燃料蒸发，然后测定到达平衡状态时的蒸发量比例。在不同的混合比和温度下，测得的平衡空气蒸馏曲线如图11-5虚线所示。由图可见，汽油的平衡空气蒸馏温度比隔绝蒸馏温度低得多。这

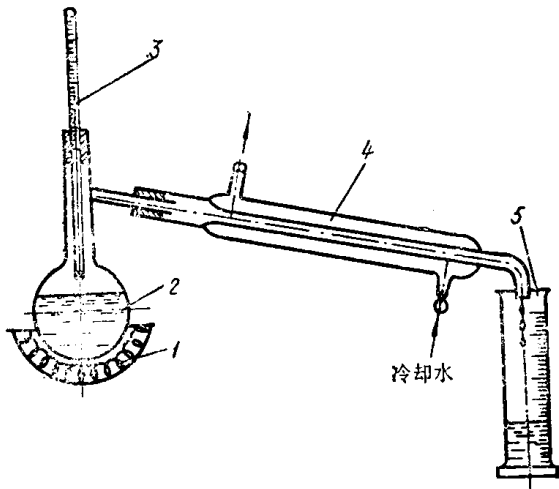


图11-4 燃料蒸馏试验装置

1——加热器；2——被试燃料（100毫升）；
3——温度计；4——冷凝器；5——量筒。

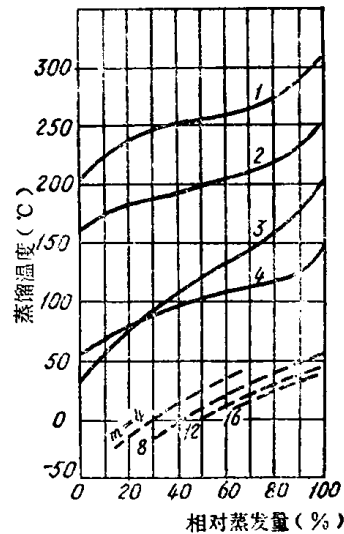


图11-5 燃料隔绝蒸馏曲线（实线）和车用汽油平衡空气蒸馏曲线（虚线）

1——轻柴油；2——煤油；3——车用汽油；4——航空汽油。

和实际汽油机中的情况比较接近。图11-5中的 m 表示空气-燃料的重量比，简称空燃比。

现就汽油蒸馏曲线与汽油机性能的关系，分述如下：

1. 起动性 由试验得知，可燃混合气的实际空气-燃料重量比在12:1~13:1时，最易点燃。起动时由于发动机转速低，温度低，汽油不易雾化和蒸发，进入发动机中的汽油实际上只有1/5~1/10汽化。因此，如果将化油器调整到最佳的表现混合比，则实际形成的混合气太稀，不能着火起动。所以，汽油机一般都采用起动加浓装置，在起动时供给表现混合比为1:1左右的燃油量，使实际的混合比接近最佳，此时，只要有8%左右的燃料汽化，就可以达到实际的空气-燃料重量比接近12:1~13:1的要求。

汽油的10%馏出温度越低，表示其低温时的蒸发性能越好（和10%馏出温度较高的汽油比较）。因此，采用该种汽油时，汽油机较易起动。图11-6表示汽油10%馏出温度及表现混合比 m 对汽油机起动性影响的试验结果。所以，10%馏出温度点可看作是起动性的指标。

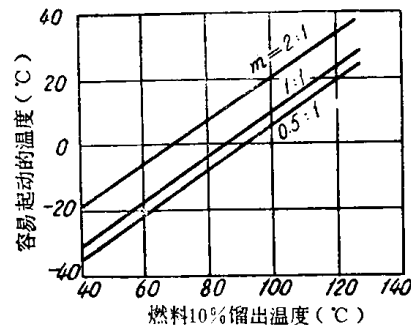


图11-6 汽油10%馏出温度及表现混合比 m 对汽油机起动性的影响

2. 汽阻 10%馏出温度点过低的燃料，在从油箱向化油器供给的途中可能因受热而形成汽油蒸汽泡，使油流不畅，甚至使汽油泵丧失工作能力而停止供油，造成发动机熄火，工作不稳，甚至停车。这种情况在汽车高速行驶、发动机大负荷运转后突然低速或停车时特别容易发生。因为此时机温高，油管中的汽油流速又慢，在高温下汽油吸热，急速蒸发而形成汽阻。这时，如不排除汽阻，就不能再次起动。因此车用汽油10%馏出温度点不能太低，否则必需要求发动机具有较高的防汽阻能力，如对汽油管路采取隔热措施，提高汽油泵的泵油能力等。

3. 暖车 汽油机起动后，必须继续关闭阻风门，空转一段时间，使发动机温度逐渐升

高到一定数值，才能打开阻风门，带一定负荷运转。这段时间称为暖车时间。试验证明，汽油20~50%馏出温度越低，暖车时间可以越短。因而使汽车具有较好的机动性。

4. 加速性 在急开化油器节气门使发动机加速时，虽然进入气缸的汽油与空气量同时增加，但由于汽油的惯性较大及一部分汽油附着于进气管壁，使混合气暂时过稀，发动机不能及时加速。因此，现代化油器设有加速装置以增加供油。至于汽油的蒸馏曲线上哪一点对加速性有重要作用，取决于进气管温度和化油器供给的加速混合比。进气管温度低，混合比相对较稀时，蒸馏曲线的低部较重要。反之，则高部较重要。但进气管温度高且用蒸发性好的汽油时，有加速装置的发动机有时会造成过浓混合气，反而使加速性恶化。对一般的发动机来说，为使加速性好，要求汽油35~65%馏出温度较低，但一般以50%馏出温度点作为指标。

5. 分配 试验表明，在进气管内如有一半左右的燃料蒸发，各缸间的燃料分配就能有满意的均匀性。因而蒸馏曲线50%馏出温度对此十分重要。

6. 燃烧 汽油机要燃烧好，必须使燃料在点火前完全蒸发。因此，混合气的露点要低，而露点由蒸馏曲线90%馏出温度点决定。90%馏出温度点过高，点火时燃料可能还未完全蒸发，因此燃烧就可能不完全、造成冒烟、气缸内积炭增加。但是90%馏出温度点过低的话，供给的混合气很“干”，造成充量系数下降，发动机功率减小，爆燃倾向增强。

7. 曲轴箱机油的稀释 汽油总的蒸发性差，混合气露点过高的话，燃料就可能在气缸壁上凝结下来使曲轴箱机油稀释，产生润滑不良的故障。这在冷起动和暖车期间，化油器阻风门关闭时特别严重。为此，蒸馏曲线90%馏出温度不能太高。

8. 充气量 进气温度下降可使进气密度增大。因而燃料的蒸发性较好时，进气过程中燃料汽化潜热所致的温度下降可使进气量增加。乙醇（酒精）由于蒸发潜热大，而且燃烧所需空气量少，有可能在进气过程中使进气温度显著下降。

以上分析可总结为表11—2。我国的汽油技术规格中规定了各种汽油的10、50、90%馏出温度作为汽油蒸发性的指标。

燃料的蒸发性对汽油机性能的影响

表11—2

蒸馏曲线馏出的百分比	影响的性能项目	要求馏出的温度范围(°C)	
		冬季	夏季
10	起动; 汽阻; 蒸发损失	52~58	61~66
50	暖车; 加速; 分配	107~118	113~120
90	燃烧; 机油稀释	166~177	170~175

二、汽油的抗爆性

(一) 抗爆性的指标及其测定 汽油机的爆燃与很多因素有关。但在一定的发动机结构和使用工况下，主要决定于燃料的性能。燃料对于汽油机发生爆燃的抵抗能力称为燃料的抗爆性。燃料的抗爆性好，就可以承受较高的压缩比，从而改善发动机的经济性。

燃料的抗爆性与其化学组成有关。烷烃抗爆性最差，烯烃次之，环烷烃较好，芳香烃最

好。在同一种烃内，轻馏分优于重馏分，异构物优于正构物，这与各种烃分子的化学安定性大致相符。汽油是多种烃的混合物。而各种烃的抗爆性不同，所以汽油的抗爆性很难用一个理化指标表示。目前广泛采用与标准燃料比较的办法确定汽油的抗爆性。进行比较的试验规范不同，所测定的抗爆性指标也会不同。因此当提到某种汽油的抗爆性指标时，应指出其试验方法与规范。

车用汽油的抗爆性，我国用马达法（SYB2106-59）测定，并用辛烷值作指标。试验用的发动机是专门设计的可变压缩比单缸机，转速、冷却水温度、进气温度、机油温度、混合气温度等均有具体规定。试验时将混合气成分调整到爆燃最强，在4~10范围内改变压缩比，用电力机械感震器测量爆燃强度。标准燃料是异辛烷和正庚烷。两者比重和沸点相差不多（可以任意混合），但抗爆性相差悬殊。我们将异辛烷作为抗爆性优良的标准，定其辛烷值为100；将正庚烷作为抗爆性低劣的标准，定其辛烷值为0。将这两种标准燃料按不同的容积比混合，可得不同的抗爆性等级（辛烷值由0到100）的标准混合燃料。在试验发动机上按上述马达法规定的工况进行测定时，先用待测燃料工作，逐渐增加压缩比，直到爆震仪指示出标准的爆燃强度为止。之后，保持压缩比不变，选配某一成分的标准混合燃料，使发动机产生同样程度的爆燃，此时即表明此标准混合燃料的抗爆性与待测燃料的抗爆性相等。标准混合燃料中所含辛烷的容积百分数，就规定为待测燃料的辛烷值。例如，RQ66号车用汽油的马达法辛烷值为66（表11-3），即表示该汽油的抗爆性与含异辛烷66%、正庚烷34%的标准混合燃料抗爆性相等。

（二）抗爆剂 提高汽油抗爆性最常用的方法是给汽油添加抗爆剂。应用最普遍的是四乙铅 $Pb(C_2H_5)_4$ ，它是一种金属有机化合物，能溶解于汽油等有机溶剂中，而不溶于水。四乙铅抗爆作用的机理，在于中断氧化反应中的支链反应，使可燃混合气的氧化反应速度降低，在火焰面到达之前不发生自燃，从而避免爆燃。

四乙铅是一种无色透明的液体，有剧毒，能经皮肤、肺部或消化道侵入人体内。所以含有四乙铅的汽油皆加色标明，以便识别。

含四乙铅的汽油在燃烧后，会在燃烧室壁产生氧化铅沉淀，使气门关闭不严，火花塞短路，所以纯四乙铅不适于作抗爆剂。实际加到汽油中的是四乙铅和携出剂的混合物，称为乙基液。携出剂是溴乙烷 C_2H_5Br 或二溴乙烷 $C_2H_4Br_2$ ，它在燃烧过程中与铅形成易挥发的盐类，随废气排出。

三、车用汽油的品种和规格

我国车用汽油按辛烷值数值编号。现行国家标准规定有66、70、74、76、80和85等品种（表11-3）。66号汽油适用于压缩比 $\epsilon=6$ 左右的低压缩比发动机；70号适用于 ϵ 略大于6的发动机；74、76号用于压缩比更高的发动机，其中74号为无铅高级汽油，80号、85号高辛烷值汽油是74号高级汽油再加四乙铅得到的，适用于高压压缩比汽油机。

在表11-3中，除辛烷值和馏程以外，还列有评定汽油质量的其它指标，但是影响汽油机燃烧和使用性能最主要的指标是辛烷值和馏程两项。

国产车用汽油规格

表11-3

项 目	质 量 指 标						试 验 方 法
	RQ66 (GB489-65)	RQ70 (GB484-65)	RQ74 (GB490-65)	RQ76 (GB484-65)	RQ80 (SY1004-65)	RQ85 (SY1004-65)	
辛烷值 不低于	66	70	74	76	80	85	GB503-65
四乙铅含量(克/公斤) 不大于	1.3	1.3	无	0.8	1.0	1.0	GB377-64
馏程:							
10%馏出温度(℃) 不高于	79	79	70 ^①	75	75	75	
50%馏出温度(℃) 不高于	145	145	105	120	120	120	
90%馏出温度(℃) 不高于	195	195	165	180	180	180	
干点(℃) 不高于	205	205	180	195	195	195	
残留及损失(%) 不大于	4.5	4.5	2.5	3.5	3.5	3.5	
残留量(%) 不大于	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	
饱和蒸汽压(毫米汞柱) 不高于	500	500	500	500	500	500	GB257-64
实际胶质(毫克/100毫升) 不大于	7	7	2	7	10	10	GB509-65
诱导期(分) 不少于	240	360	900	480	480	480	GB256-64
硫含量(%) 不大于	0.15	0.15	0.05	0.15	0.15	0.15	GB380-64
腐蚀	合格	合格	合格	合格	合格	合格	GB378-64
水溶性酸及碱	无	无	无	无	无	无	GB259-64
酸度(毫克KOH/100毫升) 不大于	3	3	1.5	3	3	3	GB258-64
机械杂质及水分	无	无	无	无	无	无	②

注: ① 此外规定初馏点不低于35℃。

② 将试样注入直径40~60毫米的量筒中观察, 应透明, 无悬浮物及沉淀物。在判断上发生争执时, 按GB511-65(机械杂质测定法)和GB260-64(水分测定法)进行仲裁试验。

③ 冬季使用的各号汽油蒸汽压, 在9月1日到2月底期间, 南方允许到600毫米汞柱出厂。

④ 在石油公司的石油站及仓库交付用户的汽油的实际胶质, 允许到25毫克/100毫升, 10%馏出温度允许增高1℃, 各中间馏分的馏出温度允许增高2℃, 干点允许增高3℃, 残留物允许增高0.3%。

⑤ 实际胶质、诱导期及酸度的测定 须于加乙基液前在汽油产地进行。

⑥ 加入乙基液的汽油应有明显颜色, 包装上应有明显标志。

第四节 柴油的使用性能

一、柴油的发火性

柴油机依靠压缩自行发火, 所以燃料的发火性(自燃性)对燃烧过程质量和柴油机运转有较大的影响。燃料的发火性好, 滞燃期(在柴油机燃烧过程中, 着火落后期称为滞燃期, 即从开始喷油到开始着火的时间)短, 则柴油机工作柔和, 且易于低温起动。

评定燃料发火性的指标是十六烷值。其测定方法与汽油的辛烷值类似。标准燃料由正十六烷 $C_{16}H_{34}$ 和 α -甲基萘配制而成。正十六烷最易自燃, 定其十六烷值为100; α -甲基萘最不易自燃, 定其十六烷值为0。柴油的发火性介于正十六烷和 α -甲基萘之间。当被测燃料的发火性与所配制的标准燃料的发火性相同时, 标准燃料混合液中所含正十六烷的容积百分数即定为被测柴油的十六烷值。例如10号柴油的十六烷值为50, 即表示10号柴油的发火性与含正十六烷为50%的标准燃料的发火性相同。

燃料的十六烷值高, 发火性好, 柴油机工作柔和。但十六烷值过高也不适当, 因为十六烷值越高的柴油馏分越重, 因而燃料蒸发性差, 而其滞燃期又短, 因此还来不及和空气均匀