

柴油机的燃烧

马春霆

编译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书从理论和实验研究上，全面而系统地叙述了柴油机的燃烧基础理论知识，各种类型柴油机的燃烧及燃烧中的共性问题，以及改进柴油机燃烧的几个专门问题，并概括地研讨了柴油机排气和黑烟的污染问题。

本书叙述的重点是改善燃烧和提高效率，并对排气污染和噪声等问题也进行了探讨，同时还指出了柴油机燃烧研究方面的发展趋向和研究课题。

本书可供从事内燃机研究、设计和运行部门的有关人员参考，亦可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

柴 油 机 的 燃 烧

马春霆 编译

*

国防工业出版社 出版

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装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 12¹/₂ 318 千字

1983年3月第一版 1983年3月第一次印刷 印数：0,001—4,800册

统一书号：15034·2393 定价：1.55元

出版说明

本书系根据日本“内燃機関”杂志 1972 年 2 月号临时增刊“内燃機関の燃烧”中有关部分编译而成。

本书共分十五章，从理论上和实验研究上全面而系统地介绍了柴油机的燃烧问题，其叙述的重点是改善燃烧和提高效率，并对减小排气污染和噪声进行了探讨，同时还指出了在柴油机燃烧研究方面的发展趋向和研究课题。

由于原书各部分系由不同的作者所编写，其取材的着眼点以及深广度均有所不同，这一点希望读者注意。

本书是在潘承孝教授和河北工学院科技情报组的组织领导下，由马春霆编译的，并经潘承孝教授审校定稿。由于水平所限，谬误之处一定不少，希望批评指正。

本书可供从事内燃机研究、设计和运行的有关人员的参考，亦可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

目 录

第一章 燃烧的理论基础	1
§ 1 引言	1
§ 2 火焰的分类	1
§ 3 火焰的构造	4
§ 4 火焰的传播机理	11
§ 5 点火与着火	20
§ 6 燃烧极限	25
§ 7 火焰中的固体碳	27
§ 8 火焰的稳定性	32
§ 9 火焰的辐射	37
§ 10 燃料粒的燃烧	39
§ 11 符合反应规律的燃烧器	45
第二章 燃烧的计算	48
§ 1 燃烧反应	48
§ 2 反应方程式	48
§ 3 燃烧用的空气量计算	50
§ 4 燃烧废气量的计算	54
§ 5 燃烧废气的组成	56
§ 6 燃烧温度的计算	56
§ 7 化学平衡	61
§ 8 化学平衡时的燃烧温度	67
第三章 喷雾油滴的燃烧	70
§ 1 喷入柴油机燃烧室的油滴的过程	70
§ 2 着火与熄火	75
§ 3 油滴在高温气体介质中的过程	76
§ 4 燃烧率	79
§ 5 火焰形状	90

§ 6 火焰过渡风速	91
§ 7 火焰温度	92
§ 8 燃烧油滴的内部温度	93
§ 9 飞行油滴的阻力	93
第四章 喷雾油滴群的燃烧	95
§ 1 概述	95
§ 2 油滴群的燃烧	96
§ 3 实际的喷雾燃烧火焰	105
第五章 压燃式发动机的混合气形成	111
§ 1 燃料喷射机构	111
§ 2 喷射条件的各种主要因素	123
§ 3 喷雾的各种主要因素	139
§ 4 混合气的形成过程	148
第六章 压燃式发动机的燃烧过程概论	159
§ 1 燃烧过程的四个时期	159
§ 2 着火延迟	160
§ 3 热发生率对最高压力和指示热效率的影响	164
§ 4 影响有效热效率的各种因素	169
§ 5 燃烧室形状与燃烧概论	170
第七章 压燃式发动机喷射与燃烧的相互关系	173
§ 1 概述	173
§ 2 运行条件对喷射率和蒸发率的影响	174
§ 3 运行条件对热发生率的影响	179
§ 4 影响热发生率的因素分析及其同喷射的关系	187
§ 5 热发生率的理论表示法与推定法	190
§ 6 热发生率与发动机性能的关系	203
第八章 预燃室式发动机的燃烧	207
§ 1 预燃室式发动机的循环	207
§ 2 热发生率	212
§ 3 排烟浓度与燃烧的关系	223
§ 4 预燃烧室的形状与各部分的功用	228
第九章 涡流室式发动机的燃烧	230

§1 概述	230
§2 涡流室的燃烧	230
§3 涡流室式发动机的燃烧	239
§4 涡流室式发动机的一些问题	245
第十章 直接喷射式发动机的燃烧	255
§1 概述	255
§2 混合气形成	255
§3 浅盘形燃烧室的混合气形成与燃烧	259
§4 气流的产生	266
§5 深盆形燃烧室的混合气形成与燃烧	273
§6 M 燃烧法	279
§7 喷射率与燃烧率的关系	281
第十一章 吸入副燃料对发动机燃烧的改善	287
§1 概述	287
§2 副燃料吸入的方法	288
§3 吸入副燃料对发动机性能提高的影响	289
§4 副燃料的种类与低十六烷值燃料的使用	293
§5 吸入副燃料时的示功图	296
§6 吸入燃料的燃烧前反应	301
§7 空气利用率与燃烧的改善	304
§8 对排气成分的影响	306
§9 结束语	308
第十二章 高增压发动机的燃烧	309
§1 概述	309
§2 影响燃烧条件的各种主要因素	309
§3 各种因素对燃烧性能的影响	312
第十三章 低质燃料油在发动机中的燃烧	327
§1 概述	327
§2 低质燃料油的现状	328
§3 低质燃料油的净化处理	330
§4 低质燃料油的燃烧	333
§5 低质燃料油燃烧方面的问题	344
§6 低质燃料油燃烧的今后课题	349

第十四章 多种燃料发动机的燃烧	350
§ 1 概述	350
§ 2 以物理效果为主缩短着火延迟时期的方法	351
§ 3 以化学效果为主缩短着火延迟时期的方法	358
§ 4 同时采用达到物理和化学效果的方法	365
§ 5 曼恩-M 燃烧方式	367
§ 6 外部点火的方法	369
§ 7 燃料喷射方面的各种问题	370
第十五章 压燃式发动机的排气与黑烟	372
§ 1 概述	372
§ 2 柴油机的排气排出物	372
§ 3 柴油机排出物的测定法	375
§ 4 柴油机的排出物法规	381
§ 5 各排出物的发生原因及其措施	386

第一章 燃烧的理论基础

§ 1 引言

煤和石油是人类自古以来就接触到的化石燃料。现在,已出现由核反应而产生能量的核燃料,而且在一些国家里也已实现了原子能发电。但是,核反应目前还要通过大型的反应堆才能进行,尚不能轻易地广泛应用,所以在最近的将来,还不能由核燃料完全来代替目前依靠化学反应的化石燃料。关于能源的开发与变迁,目前举世都在关切地注视着。

在使用普通的化石燃料时,为了要从中获取热能,都是利用燃烧现象的。而且,几乎在所有的情况下,都伴随有火的产生。因而,煤和石油系燃料的燃烧,正如同它的文字形象所示,是同火有着不可分割的关系。

虽然对于火的探讨,从远古石器时代就像神话似地进行过,可是关于它的本质,直到现在还是没有被充分说明。其原因在于燃烧现象确实是非常复杂的,就连像极其简单的氢的燃烧,也存在着许多的反应过程,还伴随有像气体热力学、分子扩散、热传导等传质传热的物理过程。尽管如此,最近由于电子仪器及光学仪器等的惊人的进步与发展,已能够对超短时间的变化进行追踪,这个燃烧之谜里面所包藏的现象已逐渐被剥去它的外衣,从而现出它的一些真像。在燃烧的基础研究方面,目前进展非常迅速,真正的兴旺时期即将到来。

§ 2 火焰的分类

火焰大致可以分为两类。其一,是在产生火焰之前,燃料同作为氧化剂的空气预先混合均匀,然后点燃而产生火焰,这种火

焰称为**预混火焰**。其二，燃料和氧化剂互相隔开，在产生火焰的领域内，于初次接触的条件下，燃烧而产生火焰，这种火焰称为**扩散火焰**。

例如，就本生灯的火焰来说，从灯管下部流入的燃料气体就把周围的空气带入，一面混合，一面上升，在这期间达到了充分的预混合，然后在管端产生火焰，这就是预混火焰。只把燃料气体由灯管向大气中放出，然后同周围的空气进行相互扩散，这时产生的火焰就是扩散火焰。就发动机来说，汽化器式发动机中的火焰可以说与预混火焰相近，柴油机中的火焰可以说与扩散火焰相近。

此外还有别的分类方法。依据气流的状态，又可以区分为**层流火焰**和**紊流火焰**。在前一情况下，反应物和生成物的各成分的混合和移动，全是由各向同性的分子运动所构成。在后一情况下，则是由各向异性的涡流所造成，因此就成了复杂的现象，进行定量的处理是困难的。

在有的情况下，很难严格区别预混火焰和扩散火焰。燃料与氧化剂的混合程度取决于接触时间 t_c 与扩散时间 t_d 之比。亦即， $t_d/t_c \ll 1$ 时，为预混火焰，反之在 $t_d/t_c \gg 1$ 的条件下，为扩散火焰。如扩散区域的宽度为 d ，气体流速为 u ，扩散系数为 D ，到反应开始为 C 流过的距离为 l ，则有：

$$t_c \propto l/u, \quad t_d \propto d^2/D$$

所以：

$$t_d/t_c \propto d^2/D \cdot u/l$$

D 和 l 与压力成反比，所以 t_d/t_c 与压力的平方成正比。当相互邻近的燃料与氧化剂的宽度减小时，扩散距离也减小。因而，当 d 减小或压力降低时，扩散火焰逐渐变得与预混火焰相近。图 1-1 表示出 d 减小时的变化。

对液体燃料来说，随其分散状态的不同而有不同的情况，例如石油系的燃料，当分散成 $1/10$ 微米以下的油滴时，如在火焰

的预热区域内进行了气化，就成为预混火焰，而当分散成 $10^3 \sim 10^5$ 微米油滴时，则成为扩散火焰。在液滴表面的气化速度决定燃烧速度的情况下，取气化热与向液滴的传热量相等时，即可求出燃烧速度，而此传热量又取决于与液滴表面接触的气体的速度、密度以及导热系数。

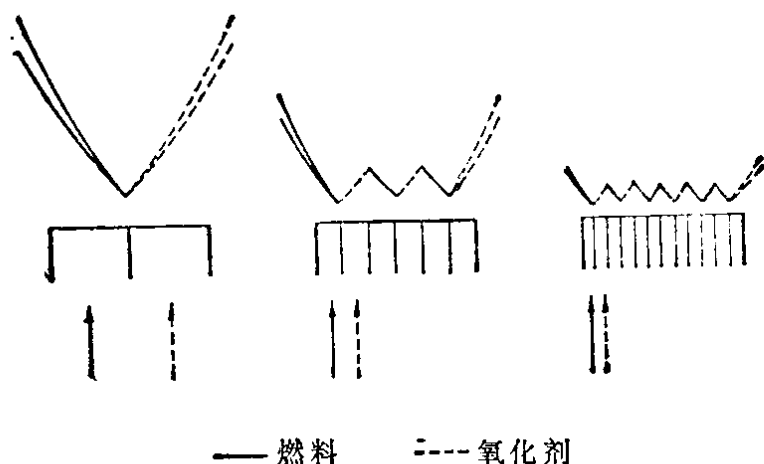


图1-1 扩散火焰的宽度

当液滴非常大时，就成为液面燃烧，这时辐射决定着燃烧

速度，如取辐射发射率为 ε ，斯蒂芬-波尔兹曼常数为 σ ，气化热为 q_v ，火焰温度为 T_f ，则最大燃烧速度可由如下的关系式表示：

$$\dot{m}q_v \approx \varepsilon \sigma T_f^4$$

在此情况下，当表面积大时，就成为紊流火焰，而在空气不足的情况下，火焰温度就降低。在大的火灾以及山火等的情况下，氧气是不足的，燃烧速度就取决于风和其他气象条件。有时火焰本身也会引起空气流动。

也有按火焰的连续性来分类的。有所谓的**分离火焰**或者**细胞状火焰**，以区别于普通的**连续火焰**。火焰被分离的主要原因是连续发生的反应速度不相同，以及使用的燃料是由反应速度不同的二种以上的成分所组成，还有当混合比是处于接近燃烧极限的情况下，例如氢的低燃烧极限的混合气，以及烃的高燃烧极限的混合气等，都可能发生这种分离火焰。

在球形燃烧室的中央，混合气着火时，火焰就从中心向外传播，在传播的同时，火焰波面呈激烈的凹凸形状。在板状火焰中，如混合气接近于可燃极限时，火焰会分成许多细胞状火焰。在氢

的情况下，由下向上传播的火焰，在混合气接近燃烧极限时，便分离成为带状或管状，像海蜇的样子。由此可以看出，燃烧只不过是在部分混合气中进行。图 1-2 所示是一种花状的碳氢的细胞状火焰和处于燃烧极限浓度下的氢火焰的状态。

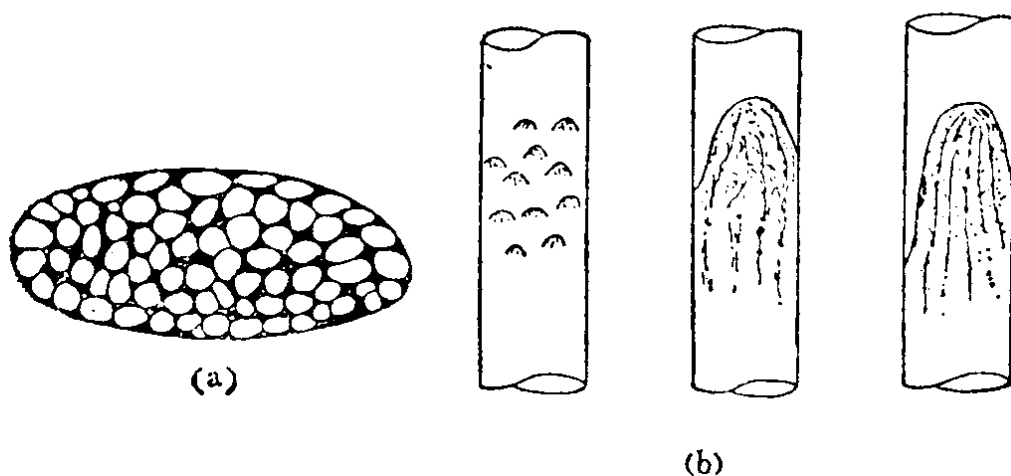


图1-2 分离火焰，细胞状火焰
(a) 碳氢-空气的细胞火焰；(b) 上升氢气火焰的构造。

此外，还可以分为有振荡的火焰与没有振荡的火焰。振荡火焰是由普通的声波所引起的，如把火焰系统取作为能量的封闭体系，必须使音响能量的回授符合相位关系，而且必须补充能量的损失，才能维持振荡。这种回授如果是在 10^5 厘米/秒的量级上进行的话，振荡频率就增高到越过可听领域，而如果是在 $10^{-1} \sim 10^3$ 厘米/秒左右进行的话，就进入可听领域。特别是振荡火焰与燃烧的稳定性有关，所以成为研究的一个焦点。

§ 3 火焰的构造

在简单的层流火焰情况下，预混火焰与扩散火焰的最简单的模型分别示于图 1-3 的 (a) 和 (b)。

由图上可以看到，在预混火焰中，气流在流入反应区域之前的上游处，其温度就已经上升了。这当然是由于火焰的传热及热辐射所致。这一事实可从直接照像与纹影照像的对照中得到证明。纹影照像指出了与密度差有关的火焰的构造，而密度差是由

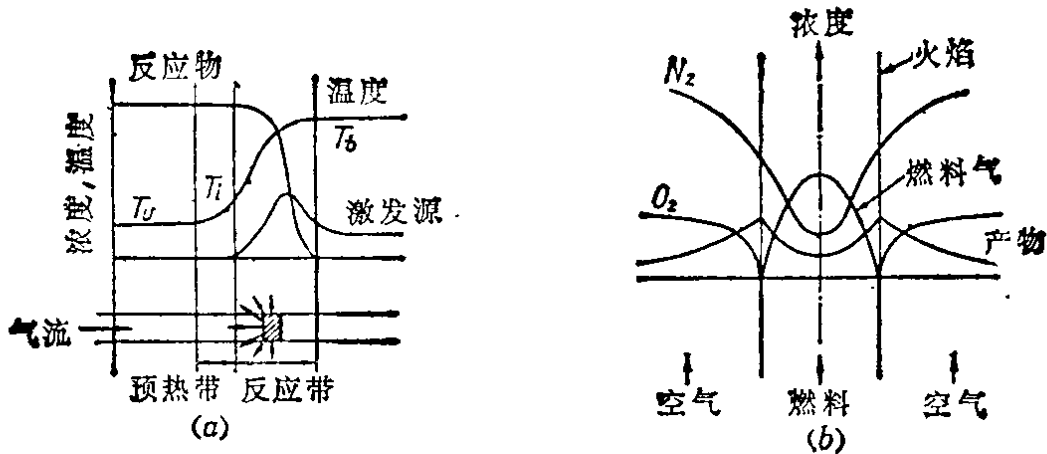


图1-3 火焰的温度与浓度的变化

温度的不同而产生的。

1. 温度分布

火焰各点的发热率，如能从温度分布来求得的话，那么在反应速度给出后，火焰构造就能够弄清楚了。由于这一原因，对温度分布的研究就非常之多。

对丙烷-空气当量比混合气所产生的减压板状火焰，实测了它的温度分布和发热率，图 1-4 和图 1-5 是其中的一个例。

发热率 q 与质量速度 m 、比热 C_p 、导热系数 λ 之间的关系

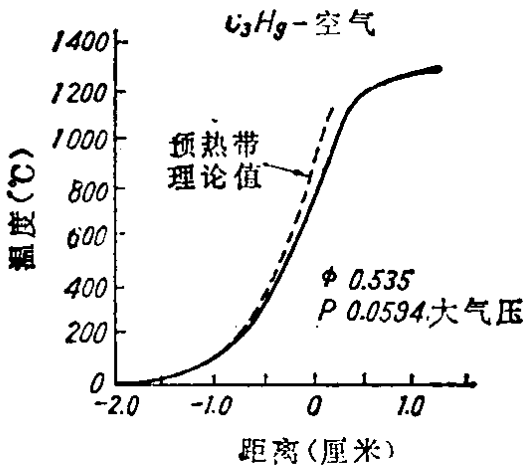


图1-4 火焰的温度分布

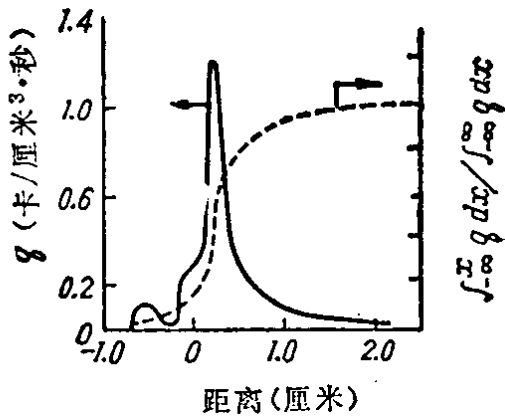


图1-5 火焰的发热率分布

由下式来表示：

$$q = mC_p \frac{dT}{dx} - \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right)$$

可见， q 受温度的影响很大。

如图 1-5 所示，最大发热率是发生在火焰的高温侧，将它与

浓度分布相比较, 就可以看到, 在最大发热率处进行反应的化学成分是一氧化碳和氢, 而且不存在刚开始时未反应的燃料分子。

火焰的平均发热率由下式确定:

$$\bar{q} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} q \cdot dx \right) / \Delta x$$

如能正确地知道火焰的宽度, 当然就能够进行计算, 可是在实际上, 是难于进行精密测量的。图中示出最大发热率为 1.2 卡/厘米³·秒, 并出现在 1100°C 的点上。

对于常压下的板状火焰, 根据热电偶测出的温度和根据折射率导出的氢-氧-氮系的火焰状况, 如图 1-6 和图 1-7 所示, 两种测定值很相一致。

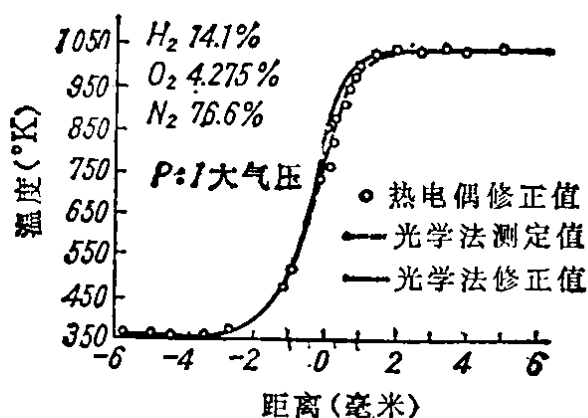


图1-6 火焰的温度分布 (热电偶, 折射率)

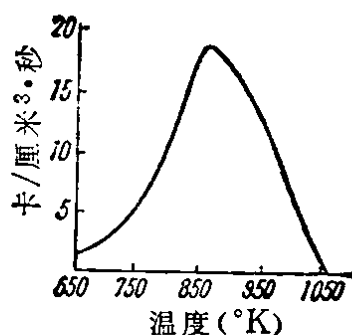


图1-7 火焰的发热率分布

2. 浓度分布

如果已知火焰中化学成分的浓度分布, 则能求出反应速度, 可是, 这种测定同温度分布一样, 还是困难的。如果流速已经给定, 则根据浓度随时间变化的轨迹, 就可以知道反应速度。图 1-8 和图 1-9 示出空气-丙烷系的当量比为 0.93、压力为 1/4 气压时, 这种火焰的浓度分布的一个例。

对几种烃-空气或氩、氮系的化学当量比混合物求出了反应速度同最大发热率的关系, 如表 1-1 所示。

可以看到, 氢和乙炔同其他烃类相比, 表现出显著不同的

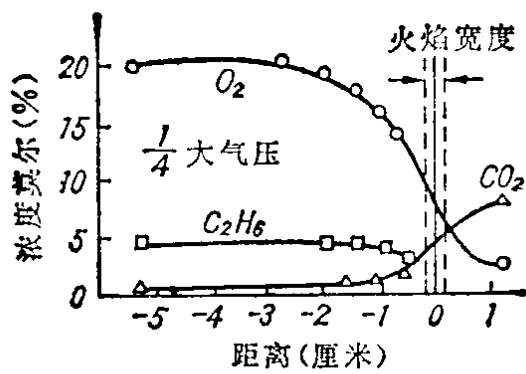


图1-8 丙烷-空气火焰的浓度分布

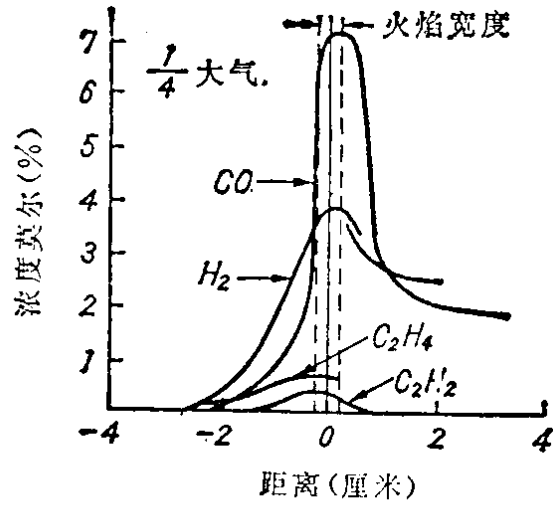


图1-9 丙烷-空气火焰的浓度分布

表1-1 反应速度与最大发热率（初温 298° K， 1 大气压）

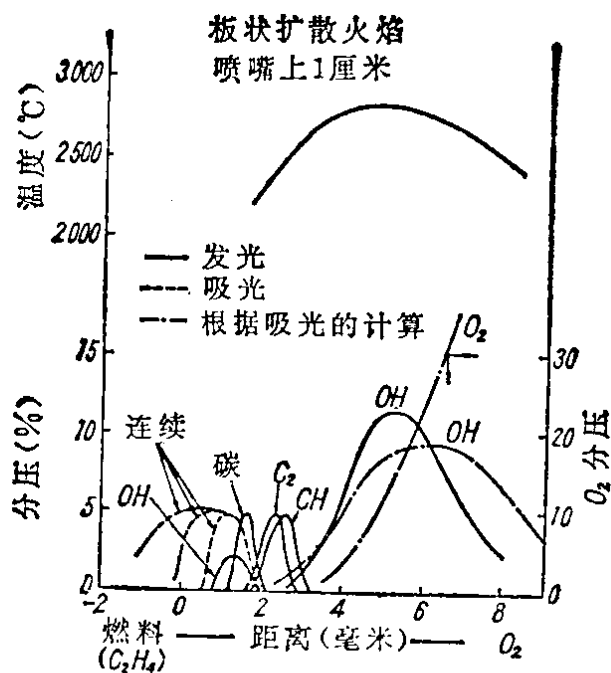
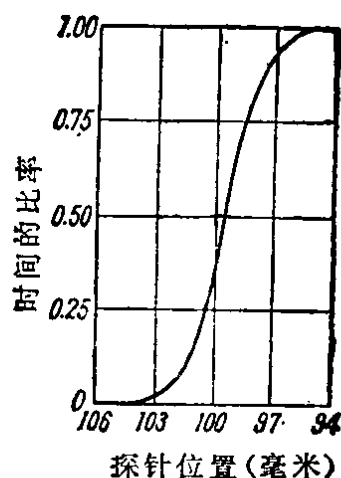
火焰的种类	反应次数	平均反应速度 莫尔/毫升·秒	最大反应速度 莫尔/毫升·秒	最大发热率 10 ⁹ 千卡/米 ³
H ₂ -空气	2.17	169	463	96
CH ₄ -空气	1.60	1.60	5.04	3.5
C ₂ H ₂ -空气	1.60	5.00	15.10	17
C ₃ H ₈ -空气	1.60	1.04	3.27	5.7
C ₃ H ₈ -A-O ₂	1.71	3.82	11.30	20
C ₃ H ₈ -He-O ₂	1.63	2.94	8.40	14.7
i-C ₈ H ₁₈ -空气	1.52	0.24	0.72	3.2

情况。

对于层流扩散火焰的构造，利用光谱方法测得结果，图 1-10 为其一例。

在发光光谱中，在燃料这一侧，可以看到发亮的碳粒子所发出的连续光谱，紧靠它旁边可以看出 C₂ 及 CH 的光谱。隔开一点就是强的 OH 带，并较广地分布于氧气一侧。在吸收光谱中，示出了 OH 及 O₂ 带。氧浓度在碳带之前被消耗掉，所以碳带是处于烃在没有氧气状态下进行热分解的区域里。

当变成紊流火焰时，预混火焰中的火焰宽度变得厚而短，像层流火焰那样明确的火焰界限变得模糊，而变成宽度大的火焰。

图1-10 $C_2H_4-O_2$ 板状扩散火焰的反应带图1-11 紊流预混火焰
的离子分布

这叫做**火焰刷**。从直接照像或从纹影照像，都可以看到有速度变动的复杂的火焰。在火焰中插入适当的的小的离子探针，改变其位置进行扫描，就可测定火焰中的离子变动率分布情况，其结果之一如图 1-11 所示。

因为探针的位置和离子冲击探针的时间比率是已知的，所以随着向火焰刷中心靠近，离子进行冲击的频度，即占总时间的比率就增大，并近于 1。这样，就表示在火焰中存在着激烈的扰动。

在扩散火焰的情况下，如果使燃料喷射的流速逐渐增大，则在某一速度下，其前锋开始紊乱，在更大的流速下，这种紊乱部分便逐渐向上游发展，而变为树皮状的火焰。火焰的长度随着流速的增大而变长，但后来又随着前锋的紊乱而变短，其后即使流速再增大，火焰长度也几乎不再变化了。图 1-12 示出

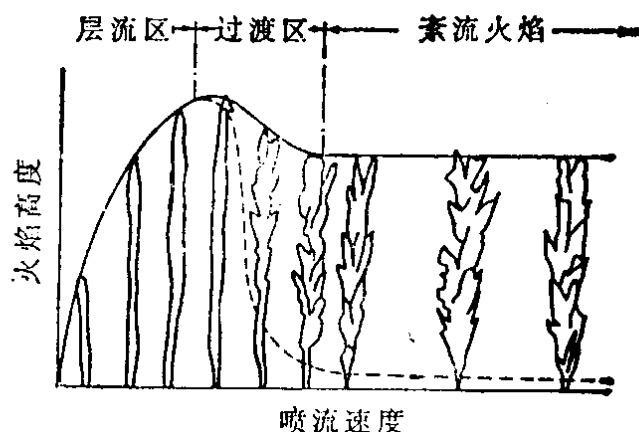


图1-12 喷流速度与火焰形状的关系

它的状态。

图 1-13 以喷射的管径为参变量，表示出火焰长度同流速的关系。

对于所有的燃料，都可以看到有这样的倾向，可是过渡到紊流扩散火焰的流速却依燃料的种类而不同，如按雷诺数来加以整理，则如图 1-14 所示。图中所列举的其中一部分，是加入了一次空气的混合气的扩散火焰的情况。根据这个数值，就可以预先推断出开始过渡的流速。

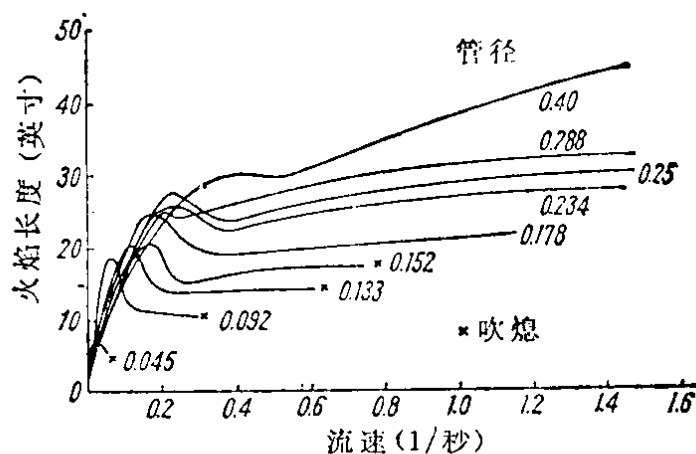


图1-13 流速同火焰长度的关系

在火焰传播方面，还存在着熄火距离的问题。亦即，一旦有冷的壁面存在，则在距此壁面的某一定的短距离内，火焰就不能

存在。这是由于激发源或热量被壁面所吸收而消耗掉，安全灯和火焰传播防止器等就是基于这种原理而制成的。再有，为了产生火焰，即为了着火，需要有某一定的能量，据此可以求出最小着火能量。此最小能量随物质的不同而不同。熄火距离 d_q 同最小着火能量 E_{min} 之间存在着密切的关系。如取火焰速度为 S ，火焰宽度为 δ ，介质压力为 p ，则有如下关系：

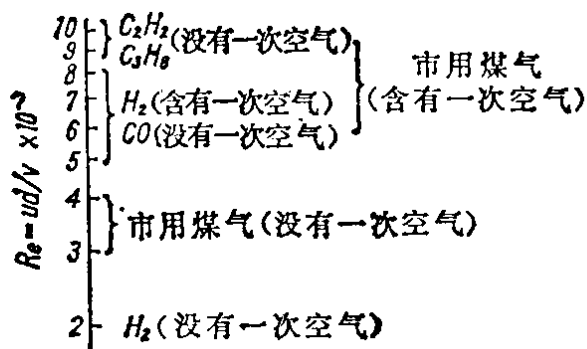


图1-14 发生过渡的雷诺数

熄火距离 d_q 同最小着火能量 E_{min} 之间存在着密切的关系。如取火焰速度为 S ，火焰宽度为 δ ，介质压力为 p ，则有如下关系：

$$d_q \propto \delta \propto \frac{1}{pS}$$

火焰传播得愈快，熄火距离就愈短，介质压力如降低，熄火距离

就增长。

熄火距离同最低着火能量之间存在着如下所示的关系：

$$E_{min} = \pi d_q^2 \frac{\lambda}{S} (T_{\infty} - T_0)$$

式中 λ ——火焰气体的平均导热系数；
 T_0 和 T_{∞} ——分别是气体的初始温度和终了温度。

对最小着火能量和熄火距离分别取对数时，如图 1-15 所示，成为斜率为 2.2 的直线关系。

至少对于烃类来说，取 $\frac{\lambda}{S} (T_{\infty} - T_0)$ 为常数是没有问题的，所以根据这个图，上式的关系就可以得到证明。

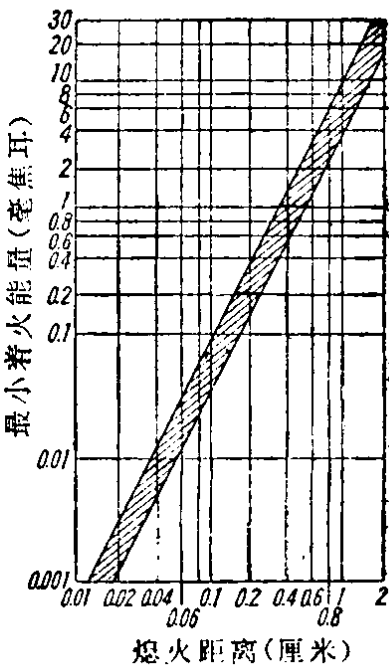


图1-15 最小着火能量与熄火距离的关系

为了产生火焰所需要的氧化剂中，除氧之外，还有臭氧、卤素、氧化卤素、氮化合物以及羟基酸、过氧化氢、原子氧、氢氧基等，不但可使活性的碱金属、原子氢、碳的卤化物、硅、磷、硫等燃烧，甚至也能使氮进行燃烧。作为燃料成分来说，可以列举出来的有烃、周期表左侧元素的氢化物，例如乙硼烷、氢化铝、氢化镁等。

这样，可由各种组合来产生火焰，其火焰参数的代表值列于表 1-2。

表1-2 火焰的参数

	最低值	最高值	代表值	指数
气体的初温度°K	4	1000	300	
上升温度°K	31	4700	1700	
燃烧气体温度°K	35	5000	2000	
燃烧速度厘米/秒	1	10 ⁴	70	P ^{-1/4}
压力，大气压	10 ⁻³	10 ³	1	
火焰宽度，毫米			1	P ⁻¹ , S ⁻¹
反应速度莫尔/厘米 ³ ·秒		10 ⁻³		P ² , S ²
安热率卡/厘米 ³ ·秒		20		P ² , S ²