

# 燃烧技术手册

[美] R. R. 赖歇 主编



石油工业出版社

55

72.55

792  
1

# 燃 烧 技 术 手 册

〔美〕R. R. 赖歇 主编

贾 映 萱 译

石 油 工 业 出 版 社

√ 100634

## 内 容 提 要

本书由美国工业加热设备协会燃烧部组织编写。系统介绍燃烧技术的理论和实践知识,包括燃烧的基础理论、燃烧工艺计算、火嘴设计与操作、设备选用等。其中重点介绍了设备的合理设计以及如何选用最完善的设备,以便得到最高工作效率和保证操作安全。最后两章介绍节约燃料的新技术。

本书可供从事油、气燃烧炉设计的技术人员学习,也可为单位提供选用与操作燃烧设备的理论根据和实践经验。

## Combustion Technology Manual

*Second Edition*

Edited by

Roland R. Reiche

1975

\*

## 燃 烧 技 术 手 册

[美]R. R. 赖歇主编

贾映萱译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

交通印刷厂排版

化工出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

850 × 1168毫米32开本6<sup>1</sup>/<sub>2</sub>印张172千字印1—6,000

1982年8月北京第1版1982年8月北京第1次印刷

书号: 15037·2342定价: 0.83元

科技新书目: 26—163

## 序 言(一)

工业加热设备协会燃烧部组织编写了这本《燃烧技术手册》。其目的是在燃烧工程的理论和实践方面提供最新的技术资料。本书包括了此领域中许多著名权威撰写的丰富的燃烧工程资料。另有一些章节专门论述了节约燃料方面的最新技术。

参加编写本书的各家公司希望，本书能成为有助于沟通燃烧设备厂商和用户的一座桥梁。

美国工业加热设备协会

燃烧部主席

A.D.威尔科克斯

## 序 言(二)

合理燃烧是一切工业加热设备的核心。如何最有效地使燃料燃烧并且获得最高的工作效率，是与加热设备的设计及使用有关的人员长期以来致力的目标。

本书提供了火嘴设计和操作的基础理论和最新的工程概念。

书中专门讲述了双燃料联合火嘴。在一些地方，为了保证生产的正常进行，这种火嘴正在成为必不可少。

对所有设备，安全操作都是最重要的问题。书中强调了合理设计以及选用最完善的设备以得到最佳效率和保证操作安全。

在随后的章节中，特别强调了节约燃料的最新技术。

读者将会看到，本书所提供参考的概念和技术，是经由这一领域内居领先地位的权威们所试验和发展起来的。

《燃烧技术手册》的出版，形象地表明了工业加热设备协会的一个主要宗旨，就是向加热工业界提供成功的工程原理和实践经验。

美国工业加热设备协会

执行副主席

J.J.豪斯顿

# 目 录

序言(一)

序言(二)

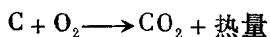
|      |                                            |     |
|------|--------------------------------------------|-----|
| 第一章  | 燃烧基础.....                                  | 1   |
| 第二章  | 流体的流动.....                                 | 17  |
| 第三章  | 燃烧空气.....                                  | 47  |
| 第四章  | 燃料气/空气比率的基本控制方法 .....                      | 59  |
| 第五章  | 空气与燃料气的预混.....                             | 70  |
| 第六章  | 喷嘴及半喷嘴混合火嘴和有关设备.....                       | 77  |
| 第七章  | 油火嘴、双燃料联合火嘴以及燃料油系统.....                    | 86  |
| 第八章  | 燃料气的计量——气体流量计的理论、结构、<br>应用及维修.....         | 111 |
| 第九章  | 火焰安全及程序控制.....                             | 126 |
| 第十章  | 如何确定吸热反应和放热反应煤气发生炉的燃<br>料气/空气混合器及流量计 ..... | 133 |
| 第十一章 | 燃烧监控仪.....                                 | 137 |
| 第十二章 | 选择燃烧设备节约能源.....                            | 149 |
| 第十三章 | 通过操作节约能源.....                              | 157 |
| 附录   | 常用数据及图表.....                               | 168 |

# 第一章 燃烧基础

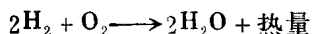
G.A.达达斯

## 一、定 义

燃烧是燃料急速氧化放出可用热量并产生可见火焰的过程，也即烧掉一些物质。碳对氧有很强的亲和力，当它完全氧化时，即形成二氧化碳：



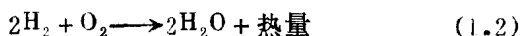
此反应中最重要的部分为释放热量及其放热特性。对氧具有高亲和力的另一元素是氢。氢和氧可在另一放热反应中放出热和形成水：



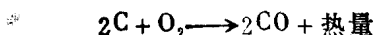
有幸的是，有多种形式的可资利用的碳、氢元素可供加热过程使用。这些元素氢和碳都几乎无例外地以不同比例的化合形式存在。任何碳和氢的化合物都称为碳氢化合物（烃），而几乎所有的碳氢化合物，不论其形态，都是燃料。

燃料的定义是：任何易于被点燃、燃烧并发出热、光或其它有用能量的固体、液体或气体。例如：煤、油、天然气及丙烷等，即分别为固体、液体和气体形式的碳氢化合物燃料。

在基本的反应式中



注意到燃料和氧是以一个非常确定的比例相结合这一点是很重要的。当它们以完全燃烧的准确比例相混合时，称为理想混合物。如在反应中燃料过多或氧不足时，即形成不完全燃烧，在反应式1.1的情况下，将不是生成无害的二氧化碳，而是生成有毒的一氧化碳：



发生这种反应时，产生的热量较少，混合物过富，火力减小。在工业热处理中，有时需要这种不完全燃烧或还原燃烧，但在其它情况下，应避免不完全燃烧。供氧过多时，火焰成为氧化性，但由于碳被完全氧化，故它的发热量与理想燃烧相同：



所不同的是，由于过剩的氧吸收热量，所以这种火焰的温度比理想燃烧时低。

## 二、工业燃料

不同的工业气体燃料，由于在它的每个分子中所含碳和氢的数量不同，而具有不同的特性（见表 1-1）。分子量增加时，它的比重和单位体积的释热量也增加。

表1-1 工业气体燃料的平均特性

| 燃料名称  | 基本组成                                   | 公称热值<br>英热单位/英尺 <sup>3</sup> | 比 重  |
|-------|----------------------------------------|------------------------------|------|
| 煤 气   | $\text{CO} + \text{H}_2$               | 500                          | 0.56 |
| 混 合 气 | $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$ | 700                          | 0.60 |
| 天 然 气 | $\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$   | 1000                         | 0.64 |
| 丙 烷   | $\text{C}_3\text{H}_8$                 | 2500                         | 1.52 |
| 丁 烷   | $\text{C}_4\text{H}_{10}$              | 3200                         | 2.0  |

另一种普通燃料是石油，它是一种液态烃。石油化学是有机化学中的复杂问题，扼要地说，石油中主要有四类烃，即：链烷烃、芳烃、环烷烃以及烯烃。表 1-2 列举了一些烃类及它们的分子式。

各种级别的燃料油由这些烃类的不同组合所构成。所以，划分燃料油级别的最简便的方法是依据它们各自不同的性质，而不是根据它们的组成。

表1-2 石油中的烃类

| 链 烷 烃                   | 芳 烃                             | 环 烷 烃                | 烯 烃                     |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------|
| 乙 烷<br>$C_2H_6$         | 苯<br>$C_6H_6$                   | 环 丁 烷<br>$C_4H_8$    | 乙 烯<br>$C_2H_4$         |
| 丙 烷<br>$C_3H_8$         | 二 甲 苯<br>$C_8H_{10}$            | 环 己 烷<br>$C_6H_{12}$ | 丙 烯<br>$C_3H_6$         |
| 戊 烷<br>$C_5H_{12}$      | 甲 苯<br>$C_7H_8$                 |                      | 丁 烯<br>$C_4H_8$         |
| 三 十 烷<br>$C_{30}H_{62}$ | 1 甲 基 2 异 丙 苯<br>$C_{10}H_{14}$ |                      | 三 十 烯<br>$C_{30}H_{60}$ |

已经制定了工业标准，将燃料油分为从1号轻燃料油到6号重燃料油的几个等级。工业用油为2、4、5、6号油。2号油为一种馏分油，它能在常温常压下被蒸发气化。4号燃料油为调合油，一般用2、5、6号油调合。5号及6号油为黑色重渣油，它们的化学组成中的碳和氢的成分很相似。这些渣油中的碳含量为 $86\% \pm 1\%$ ，氢含量为 $13\% \pm 1\%$ ，硫含量为 $0 \sim 2\%$ 。

表1-3 为代表性的燃料油级别以及它们的一些特性。

表1-3 60°F时燃料油的物理特性

| 燃料油<br>级 别<br>(CS-12<br>-48) | API<br>重 度 | 比 重    | 磅/加仑 | 英热单位<br>/磅 | 英热单位<br>(高热值)<br>/加仑 | 英热单位<br>(低热值)<br>/加仑 | 磅/<br>42加仑桶 | 磅/英尺 <sup>3</sup> |
|------------------------------|------------|--------|------|------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------------|
| 6                            | 3          | 1.0520 | 8.76 | 18,190     | 159,340              | 152,100              | 368.00      | 65.54             |
| 6                            | 4          | 1.0443 | 8.69 | 18,240     | 158,500              | 151,300              | 365.31      | 65.07             |
| 6                            | 5          | 1.0366 | 8.63 | 18,290     | 157,840              | 149,400              | 362.62      | 64.59             |
| 6                            | 6          | 1.0291 | 8.57 | 18,340     | 157,170              | 148,800              | 359.98      | 64.12             |
| 6                            | 7          | 1.0217 | 8.50 | 18,390     | 156,320              | 148,100              | 357.37      | 63.65             |
| 6                            | 8          | 1.0143 | 8.44 | 18,440     | 155,340              | 147,500              | 354.81      | 63.19             |
| 6                            | 9          | 1.0071 | 8.39 | 18,490     | 155,130              | 146,900              | 352.46      | 62.78             |
| 6                            | 10         | 1.0000 | 8.33 | 18,540     | 154,620              | 146,200              | 350.15      | 62.35             |
| 6                            | 11         | .9930  | 8.27 | 18,590     | 153,740              | 145,600              | 347.71      | 61.93             |

续表

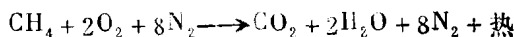
| 燃料油<br>级<br>(CS-12<br>-48) | API<br>重 度 | 比 重   | 磅/加仑 | 英热单位<br>/磅 | 英热单位<br>(高热值)<br>/加仑 | 英热单位<br>(低热值)<br>/加仑 | 磅/<br>42加仑桶 | 磅/英尺 <sup>3</sup> |
|----------------------------|------------|-------|------|------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------------|
| 6                          | 12         | .9861 | 8.22 | 18,640     | 153,220              | 144,900              | 345.28      | 61.50             |
| 6 5                        | 14         | .9725 | 8.10 | 18,740     | 151,790              | 143,600              | 340.53      | 60.65             |
| 6 5                        | 16         | .9593 | 7.99 | 18,840     | 150,530              | 142,300              | 335.91      | 59.83             |
| 5                          | 18         | .9465 | 7.89 | 18,930     | 149,360              | 140,900              | 331.42      | 59.03             |
| 4 5                        | 20         | .9340 | 7.78 | 19,020     | 147,980              | 139,600              | 327.05      | 58.25             |
| 4 5                        | 22         | .9218 | 7.68 | 19,110     | 146,760              | 138,300              | 322.81      | 57.49             |
| 4 5                        | 24         | .9100 | 7.58 | 19,190     | 145,460              | 137,100              | 318.65      | 56.75             |
| 4 2                        | 26         | .8984 | 7.49 | 19,270     | 144,330              | 135,800              | 314.58      | 56.03             |
| 4 2                        | 28         | .8871 | 7.39 | 19,350     | 142,990              | 134,600              | 310.63      | 55.32             |
| 2                          | 30         | .8762 | 7.30 | 19,420     | 141,770              | 133,300              | 306.81      | 54.64             |
| 2                          | 32         | .8654 | 7.21 | 19,490     | 140,520              | 132,100              | 303.03      | 53.97             |
| 2                          | 34         | .8550 | 7.12 | 19,560     | 139,270              | 130,900              | 299.37      | 53.32             |
| 1 2                        | 36         | .8448 | 7.04 | 19,620     | 138,120              | 129,700              | 295.80      | 52.68             |
| 1 2                        | 38         | .8348 | 6.96 | 19,680     | 136,970              | 128,500              | 292.32      | 52.06             |
| 1 1                        | 40         | .8251 | 6.87 | 19,750     | 135,680              | 127,300              | 288.91      | 51.46             |
| 1 1                        | 42         | .8156 | 6.79 | 19,810     | 134,510              | 126,200              | 285.55      | 50.86             |

### 三、燃 烧 化 学

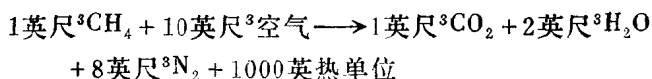
为了简化的缘故，假设天然气为 100% 的甲烷。甲烷与氧的反应为：



由于反应物和生成物都为气态，故可以表示为：一立方英尺甲烷和两立方英尺氧反应，生成一立方英尺二氧化碳和两立方英尺水蒸汽以及最重要的产物——热。由于氧气昂贵而且不易大量取得，因而很少使用。空气的来源充足，所以绝大多数燃烧系统使用空气作为氧的来源。作为燃烧设计参数，可以认为空气由 80% 的氮和 20% 的氧组成。天然气（甲烷）和空气一起燃烧的反应为：

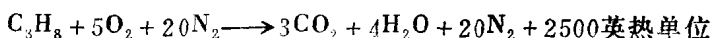


由于一立方英尺甲烷释放1000英热单位的热量，故可以表示为：



氮是一种惰性气体，氮分子除了吸收热量外，并不参加燃烧反应。

丙烷的燃烧反应是：



1 立方英尺丙烷和25立方英尺空气反应，将产生二氧化碳、水蒸汽以及2500英热单位的热量。在丁烷的反应式中，每立方英尺丁烷需要32立方英尺空气以完成反应，产生烟气产物以及3200英热单位热量。

以上可以概括为：



最重要之点是不论使用何种燃料，在空气和燃料的反应中，每消耗1立方英尺空气，即在反应中放出100英热单位的热量。在一定的限度之内，对各种固体、液体及气体燃料，在反应中每释放出100英热单位热量，就需要1立方英尺空气。对于燃料油所需的空气量也相同。当燃料的热值为已知时，即可确定出燃烧所需的空气量。这对燃烧包括垃圾在内的任何东西都是正确的。例如，焚烧炉制造厂即按每小时若干磅来表示焚烧炉的能力，并且也用英热单位/磅来标定所焚烧的材料。

这样，为了正确地设计一座焚烧炉，先定出每小时的释热量后，设计者即可求出为将废物完全燃烧所需的空气量。例如，一座100磅/小时的焚烧炉焚烧热值为6500英热单位/磅的废物，每小时的释热量为650000英热单位。由于每释放100英热单位的热量需要1立方英尺空气，通过简单的除法即可得知，为了使废物完全烧掉，需要的空气量为6500英尺<sup>3</sup>/小时。

## 四、空 气 量

空气是燃烧系统中最重要因素。实际上，所有的燃烧系统都是按所要求的风量进行设计的。在正常燃烧条件下，根据每1000英热单位/小时需要的空气量为10立方英尺确定进风管尺寸后，只要用燃料气调节器或者可调喷口来获得适当的流率，就可以用任何燃料来得到相同的总放热率。例如：1,000,000英热单位/小时的燃烧系统，将需要1) 10000英尺<sup>3</sup>/小时的空气以及1000英尺<sup>3</sup>/小时的天然气，或2) 400英尺<sup>3</sup>/小时的丙烷，或3) 大约8加仑/小时的2号燃料油。这样，所有这些燃料都可在此系统中给出相同的放热率。

许多燃烧系统在燃烧之前将空气导入或混入火嘴中。这部分空气称为一次空气。如果在燃烧前未能供给燃烧所需的全部空气，则在点燃之后混入的空气称为二次空气。一次空气量一般以理论需要的空气总量的百分比表示。例如，一次空气为70%的混合气中，含有7立方英尺的空气和1立方英尺的天然气。为完全燃烧而需的另外3立方英尺空气即为二次空气。

在很大程度上，火焰的焰型由一次空气量所决定，对预混的喷嘴混合燃烧系统尤为如此。

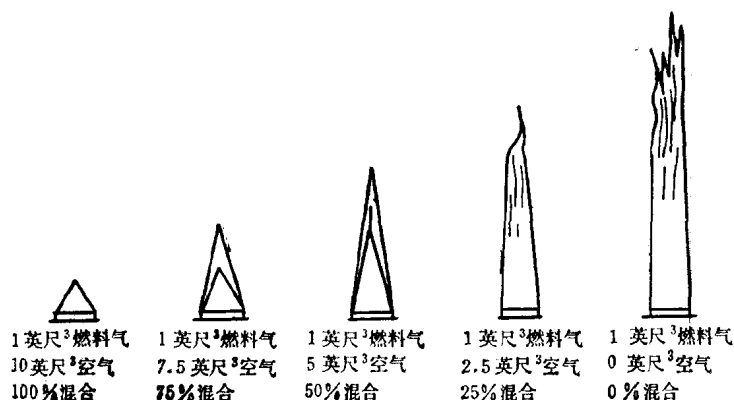


图1-1 焰型与一次空气量的关系

具体来说，混入 100% 一次空气时，为兰灰色的尖形火焰。由于燃烧所需的全部空气已与燃料气混合，在到达喷嘴时即可点燃。混入 75% 一次空气时，由于 25% 的燃料气分子需要一定的时间从二次空气获得氧以进行燃烧，因而火焰呈兰色双锥形而且火焰稍长。一次空气为 50% 时，火焰飘忽，长度增大而且焰梢呈橙色。一次空气为 25% 时，火焰继续变长，仅在喷嘴处稍有兰色，整个火焰以黄色为主。一次风量为 0 % 时，成为纯燃料气火焰，火焰更长并为黄色，为使燃烧完全所需的空气均需由二次空气提供。由于一次空气量较低时燃料气分子需要更多的时间以获得氧进行燃烧，因此风量大小会影响火焰长度。

## 五、焰 型

当风量为 100% 的空气-燃料气混合气从一开口管排出，而且在管口边缘具有引燃火源时，如混合气的出口速度与火焰速度相等，火焰会立即燃着。

如果气体出口速度大于火焰速度，火焰即被吹灭。如火焰速度大于气体出口速度，则火焰会向气源延烧，这称为回火。

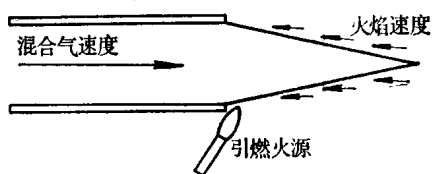


图1-2 混合气速度与火焰速度

对预混燃烧系统，回火是决定它的调压比的因素之一。火焰的速度随所用的燃料而异，不同的火焰速度特性将会对燃烧系统产生影响，对此应有所认识。

如在燃料气管出口施加引燃能量，管缘处的燃料分子即进行反应和产生热。由于链锁反应向中心部分继续发展，因而会有一微小的时间滞后，使后继的反应在距气流出口稍远处发生，从而形成焰型。影响焰型的另一个方面是由于越接近管子中心部分流动阻力越小，因而气流速度越高并产生锥形火焰。

通过一座锻造加热炉的例子可以说明控制空气量的重要性。该炉燃烧所需的全部空气都通过火嘴取得。如炉子需要 1,000,000

英热单位/小时的热量，则风机的供风量应为10000英尺<sup>3</sup>/小时。与风量相应，需要1000英尺<sup>3</sup>/小时的天然气或400英尺<sup>3</sup>/小时的丙烷或8加仑/小时的2号燃料油。在这一规范下，加热炉可在约2900°F的温度下运转。如果企图通过增加20%的燃料来使炉子的生产率提高20%，其实际结果将是使炉温和生产率降低。这是因为加入的过量燃料在炉内不会燃烧而只消耗热量，直到炉出口处才能获得所需的空气而点燃之故。正确的作法是增大风量并同时按比例地增加燃料。

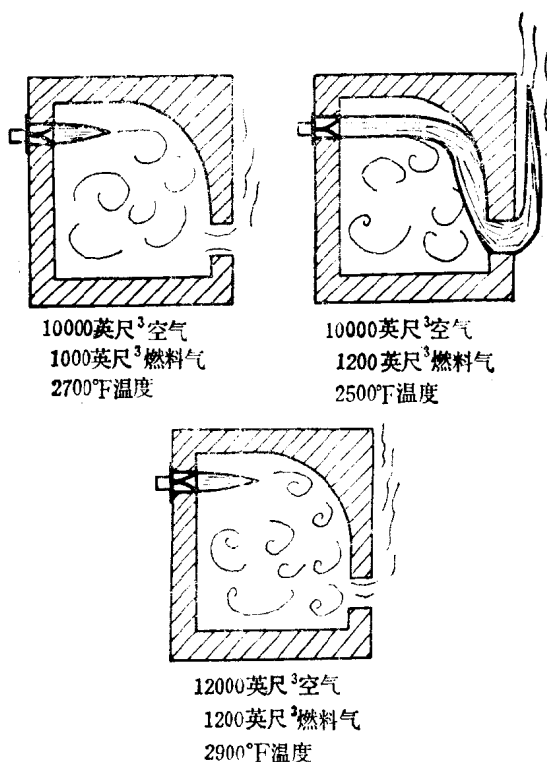


图1-3 锻工炉燃烧图例

为了更夸张地表明空气的重要性，可以说，当没有空气或氧气时，就不能进行燃烧。

## 六、气体燃料的燃烧机理

气体分子总是按直线轨迹不断运动。它们的运动速度取决于温度。温度越高，气体分子运动越快，反之，温度越低，气体分子运动也越慢。

在任一气流中，都有大量的气体分子。当它们作无规律的运动时，许多分子会互相碰撞、弹开和改变方向。随着气体温度和能级的提高，这些碰撞会变得更加频繁和剧烈。

在甲烷(天然气)与氧完全混合的气体中，即使在室温下，一个甲烷分子也可能和两个氧分子相撞。碰撞的能量不足以破坏氧的分子以及碳与氢的结合，因而使氧不能分别与碳、氢结合。但当温度升高时，分子的运动速度增高，并在碰撞时释放出较多的能量。

在1200°F左右，分子获得了足够的速度和能量，从而在碰撞时能产生足够的力量，破坏氧的双键结合，并使甲烷分子的氢与中心的碳的连接断开。此时，处于一种很不稳定的状态。由于碳和氢对氧都有很高的亲和力，从而开始燃烧。

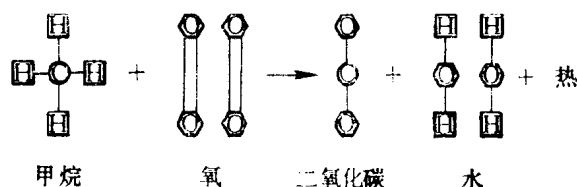


图1-4 甲烷与氧的化学反应

在开始反应的同时，即在碰撞处的周围放出热量，分子的温度近于5200°F。这一热量即向邻近的分子辐射并引起链锁反应。也即由一个分子反应放出的热量将邻近的分子加热，使它们达到一个较高的能量水平并发生反应。一般情况下，采用空气与燃料气的混合气，其中伴有氮分子。氮妨碍热量从甲烷传向氧，而且还吸收热量。对天然气和空气的混合气，理论的火焰温度为3500°F。

## 七、燃料油的燃烧机理

由于每一种燃料油中的有机化合物很复杂，要一步一步地确定反应的进程就更为困难。每个碳原子需要一个氧分子以进行燃烧，而每一组两个氢原子也需要一个氧原子进行燃烧。以下为一些复杂烃类的有机结构式：

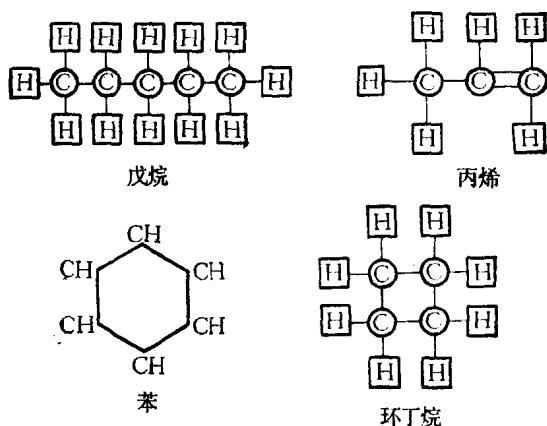


图1-5 复杂烃的有机结构式举例

由于所包含的物质形态不同，油分子的碰撞形式与气体燃料也有所不同。气体燃料的分子并未结合而只以其微小的分子状态漂浮并对碰撞十分敏感。液体燃料中分子呈结合状态而且不易于和氧接触。

在氧化生成  $\text{CO}_2$  及  $\text{H}_2\text{O}$  之前，必须先把液体燃料气化或蒸发，使之成为单个的分子。液体燃料的气化或蒸发是由先气化的燃料分子的部分燃烧热以及点火火源所完成的。

在工业火嘴中，需要高速气化。这是通过将流动的液体燃料分成为最小的液滴而实现的。通常通过油的雾化得到质量和表面积比值很小的显微尺寸的液滴。

当液滴小到足够程度而且有点火火源提供能量时，即可发生

高速气化。如液滴太大，气化就困难，而且也不利于得到无烟燃烧。

被气化的油呈自由气体分子状态。气体分子如任何其它气体一样以高速运动。在接近1200°F的点燃温度时，油和氧分子的碰撞速度相应增大，可以破坏碳和氢的结合以及氧分子的双键，从而开始燃烧。油分子的尺寸以及油分子中的碳原子数目都远超过一般燃料气。碰撞首先将氢分离，然后再将碳分子分开。

氧首先和氢结合形成水蒸汽，碳原子则需等待更多的氧与它结合并氧化成二氧化碳。在这段时间间隔内，碳原子在与空气反应之前温度可能达到1600°F以上，为白炽状态并发出明亮的黄光。这样便产生了大多数油火嘴的高亮度火焰。

## 八、燃料气的燃烧阶段

天然气的燃烧反应是甲烷与氧的机械和化学反应。进一步的研究表明，此反应在完成之前，经历了几个中间阶段。最初和最终的反应物和生成物如图 1-6 所示。

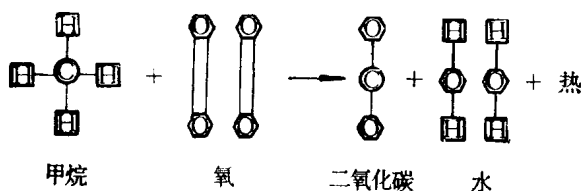


图1-6 甲烷的燃烧反应

但是，实际上所发生的第一阶段反应为图 1-7 所示。

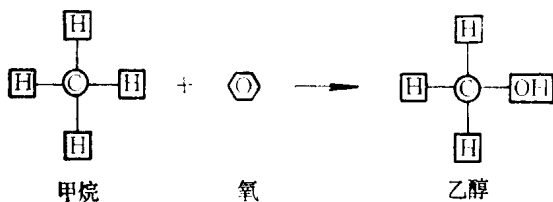


图1-7 甲烷的第一阶段燃烧反应