

1.1 学习燃烧学的动机

正如我们所知,燃烧及其控制对于我们在这个星球上的生存是十分重要的。2007年,美国消费的能源中大约85%来自于燃烧源^[1](见图1.1)。向周围随意一瞥,就可以发现燃烧在我们日常生活中的重要性。例如,你的房间或家里的供热若不是直接来自于燃烧(燃气或燃油的炉子或锅炉),就是间接来自于矿物燃料燃烧所产生的电能。美国的电力需求主体上是通过燃烧来满足的。2006年,只有32.7%的电力来自于核能和水力发电,超过一半的电力来自煤的燃烧,如表1.1所示^[1]。我们的运输系统几乎完全依赖于燃烧。图1.2提供了一个总体的发电能流图。2007年,在美国,地面交通和航空业每天要烧掉1360万桶各种石油产品^[3],相当于美国进口和自己生产的石油的2/3。飞机完全由自身携带燃料的燃烧来提供动力,绝大多数火车的动力也是来自于柴油内燃机。近年来,越来越多的小型设备由汽油机提供动力,如割草机、抛树叶机、链锯、振动除草机等。

表 1.1 2006 年美国的发电量

能源种类	10 亿 kW · h	所占百分比/%
煤电	1900.9	49.0
石油发电	64.4	1.6
天然气发电	813.0	20.0
其他气体燃料发电	16.1	0.4
核电	787.2	19.4
水电	289.2	7.1
其他可再生能源发电	96.4	2.4
抽水蓄能发电	-6.6	-0.2
其他	14.0	0.3
总计	4064.7	100.0

资料来源:文献[2]。

工业生产过程也大量依赖于燃烧。钢铁、铝业和其他金属冶炼工业都先用窑炉来生产粗产品,然后在下游工艺中用热处理炉和退火炉或其他炉子提高粗产品的价值并转变为最终产品。其他的一些工业燃烧设施还包

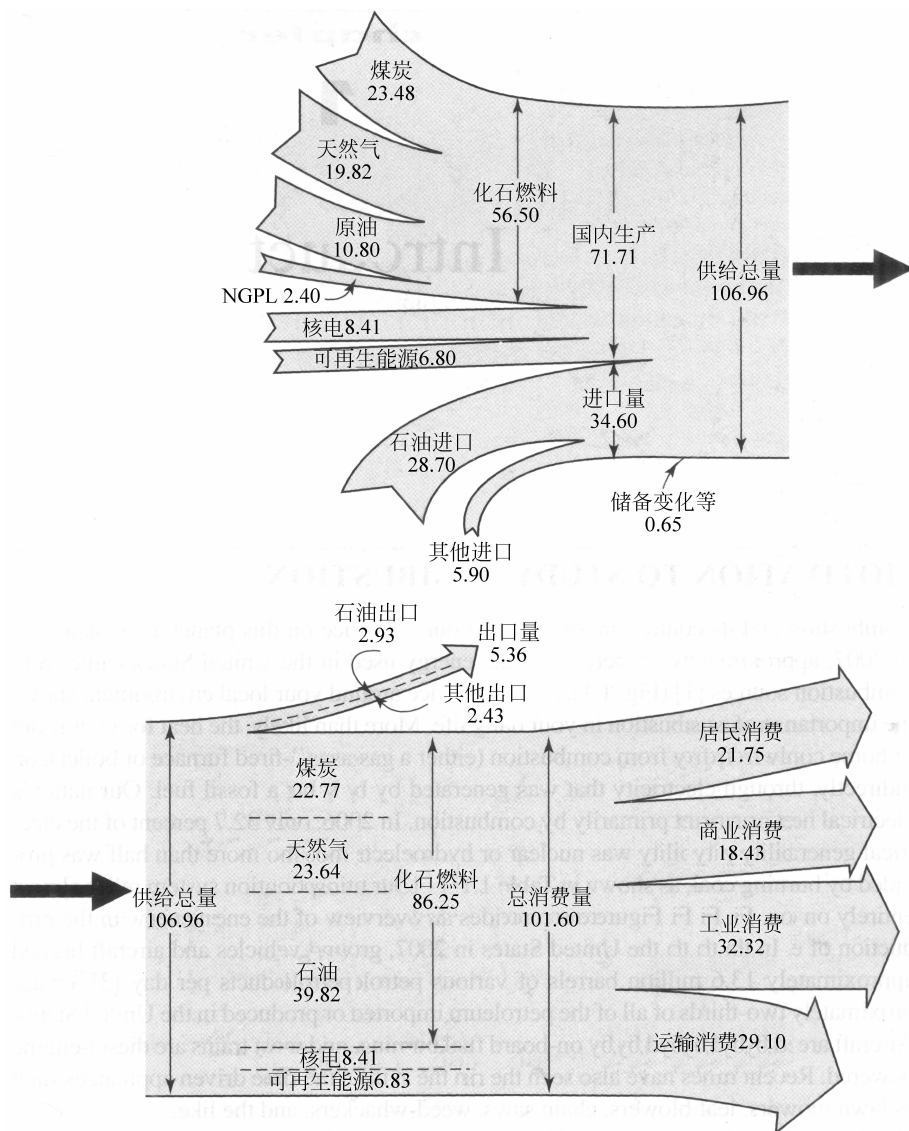


图 1.1 美国 2007 年能源及其终端消费能流图(单位 10^{15} Btu),其中可再生能源包括传统的水电 (2.463×10^{15} Btu),生物质 (3.584×10^{15} Btu),地热 (0.353×10^{15} Btu),太阳能/光伏 (0.080×10^{15} Btu)和风能 (0.319×10^{15} Btu)。(资料来源:文献[1])

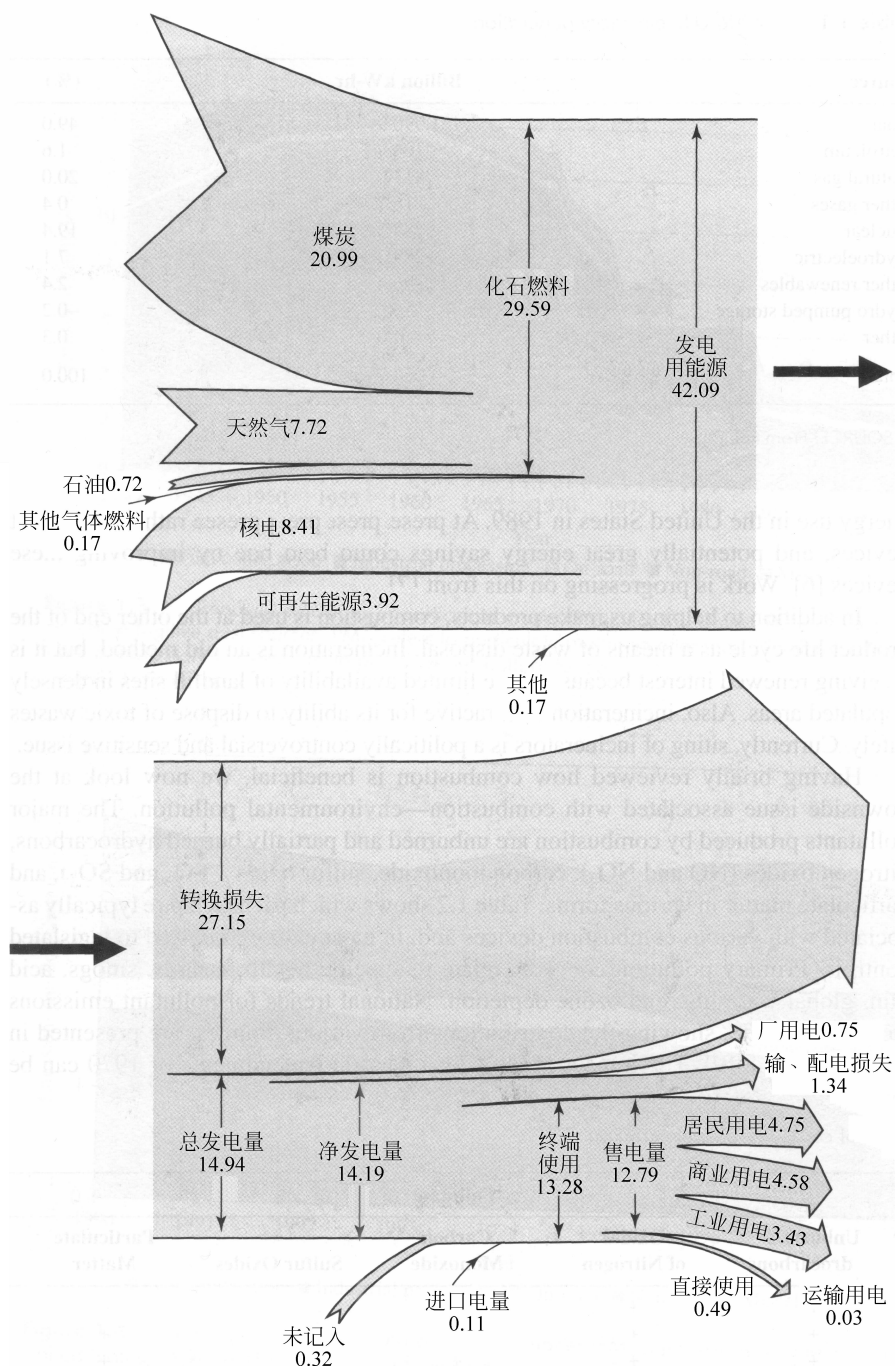


图 1.2 美国 2007 年发电、终端用电、输电和配电损失能流图(单位 10^{15} Btu)。(资料来源: 文献[2])

括锅炉、炼油厂和化学加热炉、玻璃熔化炉、固体物料烘干机、表面涂层加工、烘干炉和有机臭气焚烧炉^[4,5]等,这种例子不胜枚举。水泥制造业也大量使用燃烧产生热能。1989年美国用来生产水泥熟料的回转窑消耗了 0.4×10^{15} Btu 的能源,相当于全年工业用能的 1.4%。目前,回转窑还是效率不高的设备,改进这些设备将有很大的节能潜力^[6]。而这一前沿的工作也正在进展中^[7]。

在帮助我们生产产品的同时,在产品寿命周期的另一端,燃烧又可作为废物处置的一种手段。焚烧是一项古老的技术,出于在人口密集地区对填埋场地的限制,使其又重新受到关注。此外,焚烧技术的吸引力还在于其能够为有毒有害废物提供安全妥善的处置。当前,焚烧地点的确定依然是一个在政治上有争议和敏感的话题。

在简单地回顾了燃烧是如何有益于人类之后,现在来看一下燃烧伴随着的不利的一面——环境污染。燃烧产生的主要污染物有未燃尽(部分燃尽)的碳氢化合物、氮氧化物(NO 和 NO₂)、一氧化碳、硫氧化物(SO₂ 和 SO₃)及各种形式的颗粒物。表 1.2 列出了不同的污染物与不同的燃烧设备之间的关系,这些关系在许多情况下要服从于法规的要求。污染产生的主要问题包括特殊的健康损害、烟雾、酸雨、全球气候变暖和臭氧减少等。1940—1998 年美国全国的不同源的污染物产生的趋势如图 1.3~图 1.8 所示^[9]。在这些图中可以清楚地看出 1970 年颁布的《清洁空气修正案》的影响。在过去几十年中与燃烧相关的污染减排情况如图 1.9 所示。

表 1.2 来自不同源的典型污染物

污染源	污染物				
	未燃烧碳氢化合物	氮氧化物	一氧化碳	硫氧化物	颗粒物
汽油发动机	+	+	+	—	—
柴油发动机	+	+	+	—	+
燃气轮机	+	+	+	—	+
燃煤电站锅炉	—	+	—	+	+
天然气燃烧装置	—	+	+	—	—

令人惊讶的是,只有极少的工程师有一些粗略的燃烧知识,这与我们社会生活中燃烧的重要性是不相配的。然而由于已经存在的课程结构,期待对这一主题能得到比现在更多的关注是不现实的。但是,具有一些燃烧知识背景的工程师可以获得更多的机会来发挥他们的专长。除了纯粹的实用动机,燃烧学的引人入胜之处在于其融合了所有的热科学知识,同时还 将化学引入到工程实际之中。

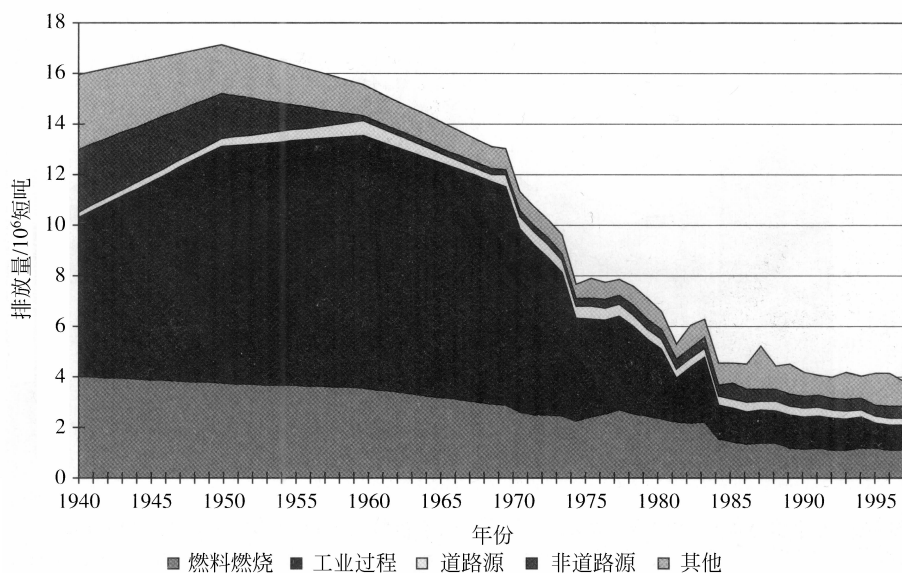


图 1.3 美国 1940—1998 年间颗粒物污染 (PM_{10}) 的趋势, 其中没有包括易变的尘土源。 PM_{10} 表示颗粒物小于 $10\mu m$ 的颗粒物。图例从左到右相应在图中标识为从下到上。(资料来源: 文献[9])注: 1 短吨 = 907.1847kg。

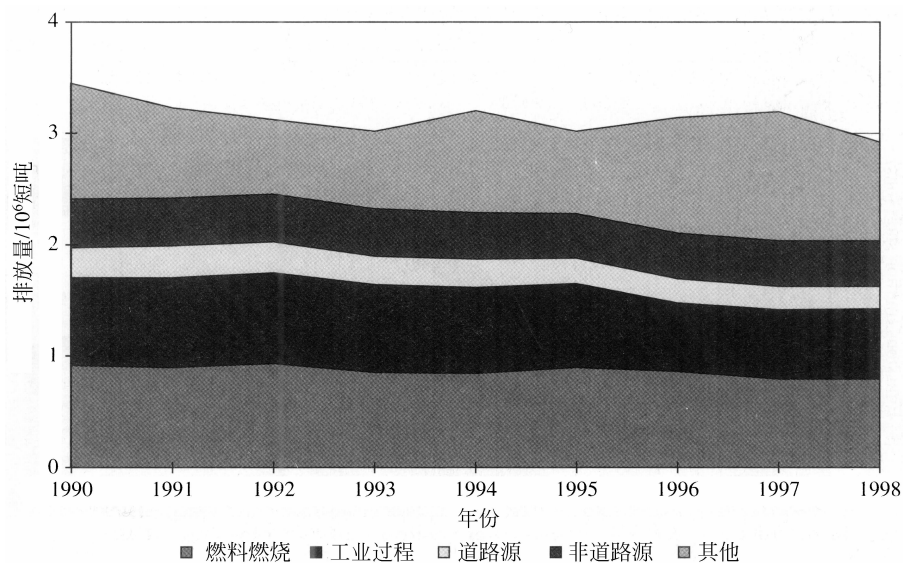


图 1.4 美国 1990—1998 年间颗粒物污染 ($PM_{2.5}$) 的趋势, 其中没有包括易变的尘土源。 $PM_{2.5}$ 表示颗粒物小于 $2.5\mu m$ 的颗粒物。图例从左到右相应在图中标识为从下到上。(资料来源: 文献[9])

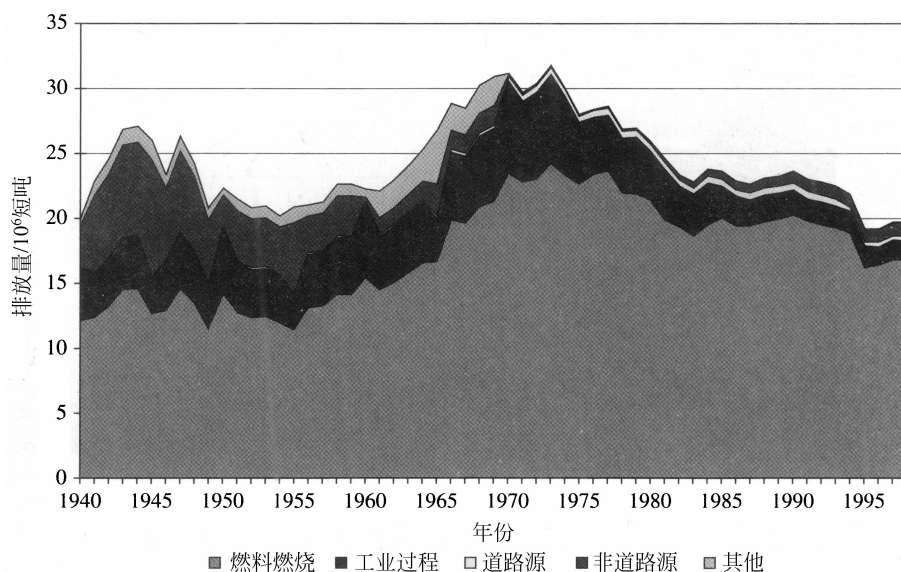


图 1.5 美国 1940—1998 年间硫氧化物污染的趋势。图例从左到右相应应在图中的标识为从下到上。（资料来源：文献[9]）

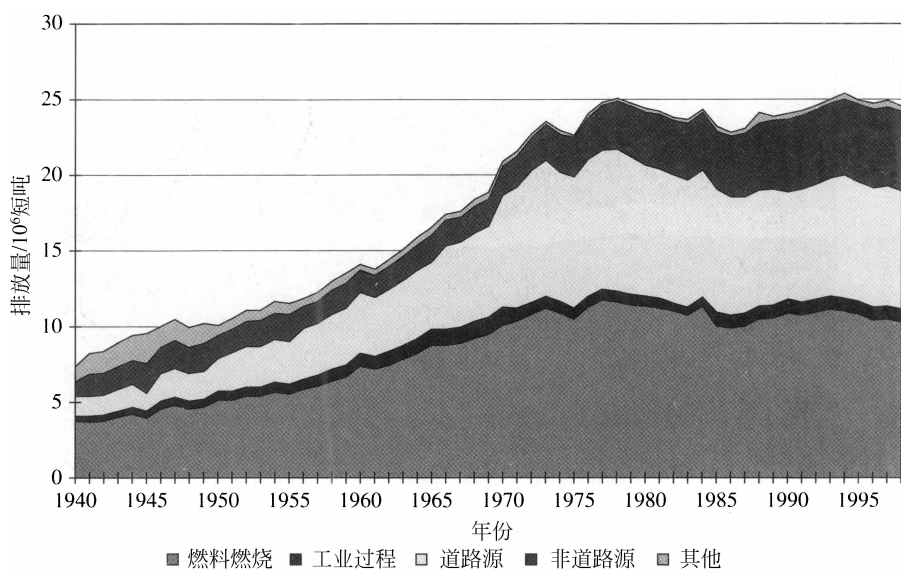


图 1.6 美国 1940—1998 年间氮氧化物污染的趋势。图例从左到右相应应在图中的标识为从下到上。（资料来源：文献[9]）

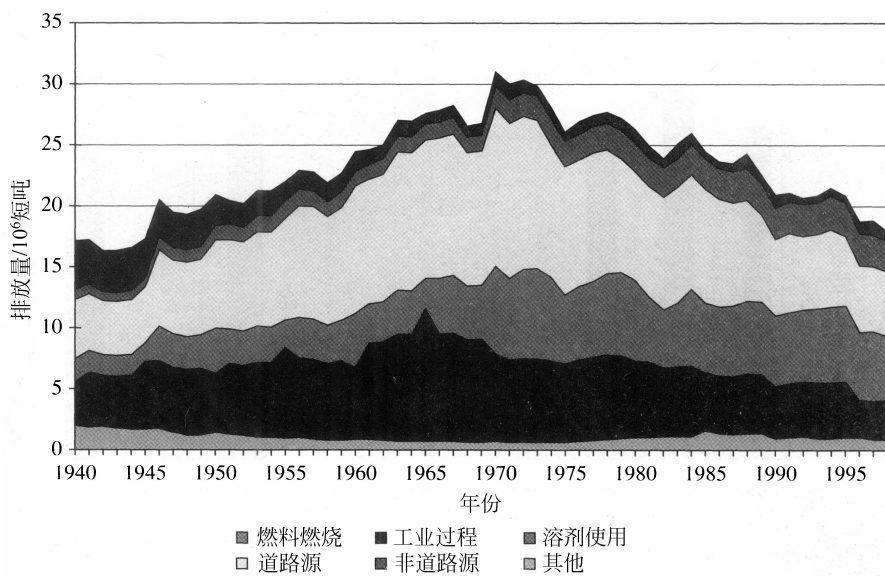


图 1.7 美国 1940—1998 年间挥发性有机物污染的趋势。图例从左到右相应在图中的标识为从下到上。（资料来源：文献[9]）

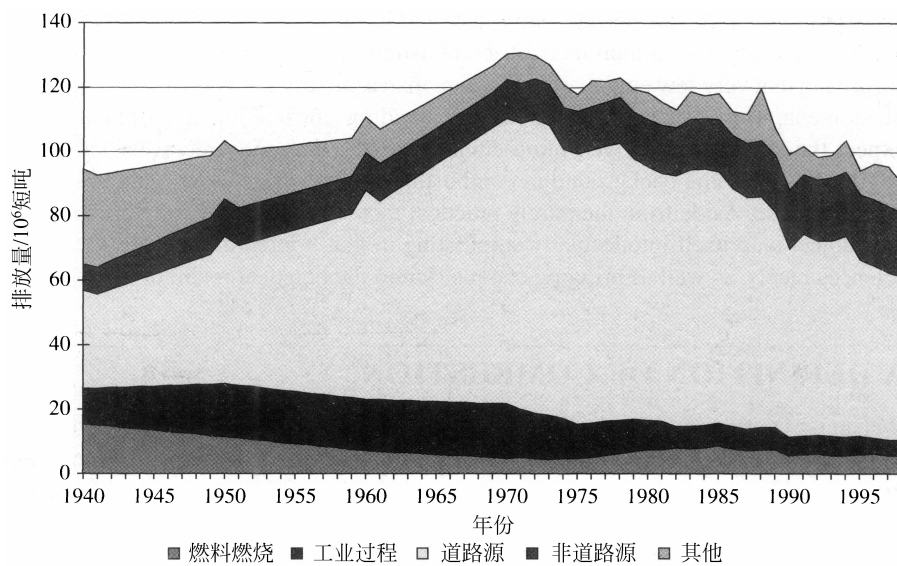


图 1.8 美国 1940—1998 年间一氧化碳污染的趋势。图例从左到右相应在图中的标识为从下到上。（资料来源：文献[9]）

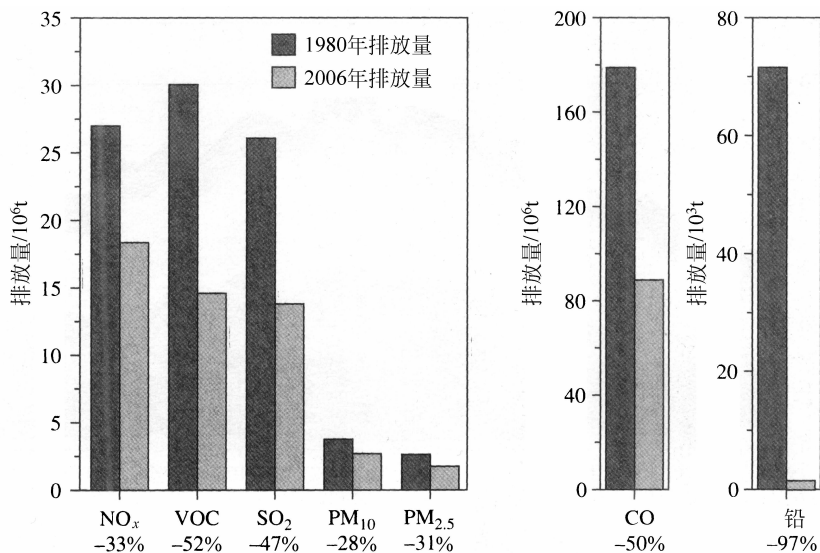


图 1.9 美国 1980 年和 2006 年污染排放量的比较,显示了主要污染物的减少情况,包括氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOC)、硫氧化物(SO_2)和颗粒物(PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)(左图),一氧化碳(CO)(中间图)和铅污染(右图)。其中颗粒物减排的参考时间不是 1980 年,而是 1990 年($\text{PM}_{2.5}$)和 1985 年(PM_{10})。(资料来源:文献[8])

1.2 燃烧的定义

《韦伯词典》提供了一个最基本的**燃烧**的定义:“产生热或同时产生光和热的快速氧化反应,也包括只伴随少量热没有光的慢速氧化反应”。在本书中,我们将燃烧定义限定在快速反应的部分,因为绝大部分燃烧设备属于这一范畴。

这一定义强调了化学反应在燃烧中固有的重要性。它也强调了燃烧为什么是这样重要:燃烧将储存在化学键中的能量转变为热,并用于很多用途。本书将阐释许多实际的燃烧应用。

1.3 燃烧方式和火焰种类

燃烧以**有火焰**和**无火焰**的两种方式进行,相应地,火焰可以划分为**预混火焰**和**非预混(扩散)火焰**。燃烧的有火焰和无火焰方式的不同可以用发生在电火花点火发动机中的过程来解释(见图 1.10)。如图 1.10(a)所示,存在一个在非燃烧的燃料-空气混合物中传播的很薄区域,其中发生着激烈的化学反应。这一很薄的区域就是我们通常说的火焰。在火焰后面是灼热的燃烧产物。随着火焰在燃烧空间的运动,未燃气体中的温度与压力升高,在一定的条件下(见图 1.10(b)),未燃气体中的很多部位都发生了快速氧化反应,导致了其在整个

区域的非常快速的燃烧。这一在发动机内基本的空间热释放现象叫作**自点火**，并且压力非常快速的升高将导致典型的发动机敲缸声。敲缸是我们不希望发生的，所以，最新的艰巨任务就是在采用无铅汽油后如何最大限度地减少敲缸的发生^①。当然，在柴油机的压燃中，采用自点火设计来开始燃烧的过程。

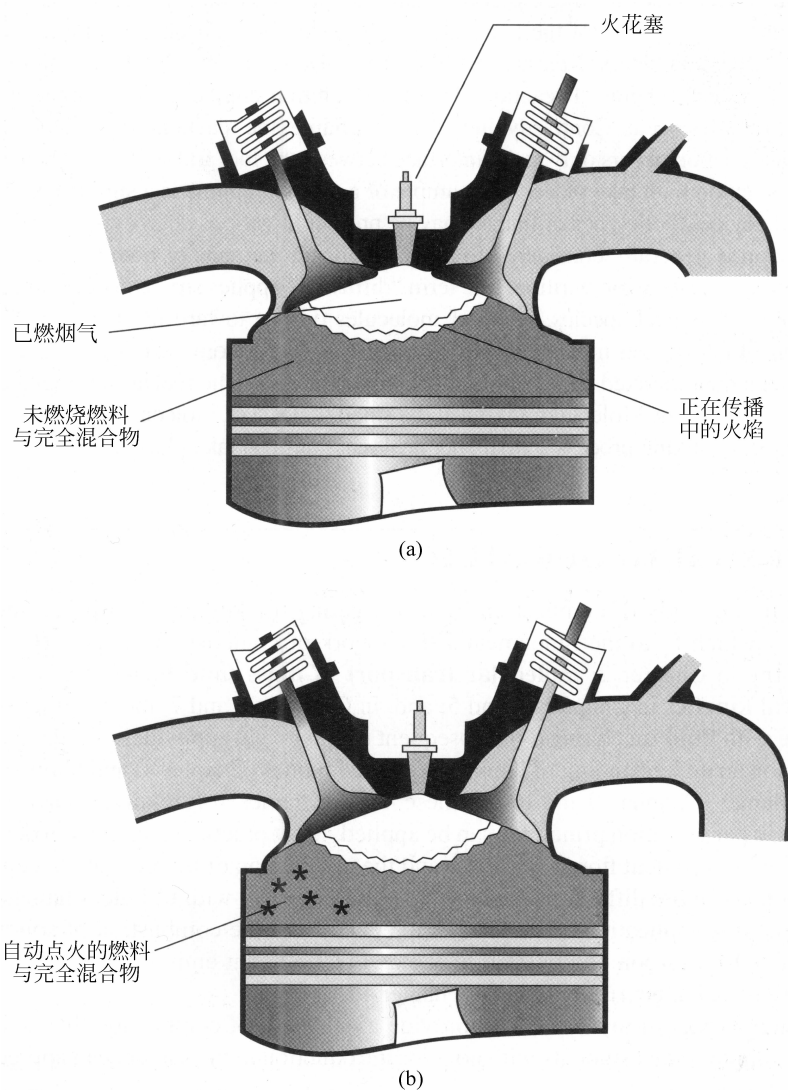


图 1.10 电火花点火发动机中燃烧的(a)有火焰模式和(b)无火焰模式。在传播中的火焰面前的混合物的自着火是发动机敲缸的主要原因。

^① 1921 年 Thomas Hidleg 发现四乙铅可以减少敲缸，这样就能提高发动机的压缩比，改进其效率和功率。

顾名思义,两种典型的火焰——预混和非预混(扩散)表示了反应物的混合状态。在预混火焰中,在有明显的化学反应发生之前燃料与氧化剂就达到分子水平上的混合。电火花点火是典型的预混火焰的例子。相对的,在扩散火焰中,反应物开始是分开的,反应只发生在燃料与氧化剂的交界面上。在这一交界面上,混合与反应同时发生。蜡烛燃烧就是扩散火焰的例子。在实际设备中,两种不同的火焰形式都会有不同程度的体现。一般来说,柴油发动机的燃烧既有预混燃烧又有扩散(非预混)燃烧,并且同等重要。术语“扩散”严格地用于化学组分之间的分子扩散,即燃料分子从一个方向向火焰扩散,同时,氧化剂分子从另一个方向向火焰扩散。在湍流非预混火焰中,湍流将燃料和空气在更宏观的层次上进行对流混合,然后在更小尺度上进行分子混合,即分子扩散,完成混合过程且发生化学反应。

1.4 学习方法

本书将从考察最关键的物理过程或科学原理来开始燃烧的学习。这些过程形成了燃烧科学最基本的框架:第2章中的**热化学**;第3章中**质量(和热)的分子传递**;第4章和第5章的**化学动力学**,在第6章和第7章中将上述这些与**流体力学**联系起来。在后续的章节中,我们将应用这些基本原理来理解层流预混火焰(第8章)和层流扩散火焰(第9章和第10章)。在层流火焰中,可以相对比较容易地看出基本守恒原理是如何应用的。绝大部分的燃烧设备是在湍流流动中工作的,但在这种情况下应用理论概念要困难得多。第11~13章涉及湍流火焰及其应用。最后的章节包括以碳燃烧为例的固体燃烧(第14章);排放(第15章);爆震(第16章)和燃料(第17章)。

本书的主要目的是尽可能提供一个足够简单的处理燃烧的方法,以使从来没有涉及过这一主题的学生能够对其原理和实际两方面都能有所领会。此外,还希望由此激发出学习的动力,从而成为更高级的研究者或实际的工程师,进一步去学习这一令人神往的领域。

1.5 参考文献

1. U. S. Energy Information Agency, “Annual Energy Review 2007,” DOE/EIA-0384, 2008. (See also <http://www.eia.doe.gov/aer/>.)
2. U. S. Energy Information Agency, “Electricity,” <http://www.eia.doe.gov/fuelelectric.html>. Accessed 7/30/2008.
3. U. S. Energy Information Agency, “Petroleum,” http://www.eia.doe.gov/oil_gas/petroleum/info_glance/petroleum.html. Accessed 7/30/2008.