普通高等教育机电类规划教材

燃烧理论与污染控制

岑可法摇姚强摇骆仲泱摇高摇翔摇编著
徐通模摇主审

机 械 工 业 出 版 社

摇摇本书是根据高等学校能源动力领域人才培养的要求来编写的。考虑到污染控制已是燃烧理论发展的一个重要方面，本书在传统燃烧理论的基础上着重增加了这方面的内容，以供各个学校在教学中选择。本书主要分为 圆篇，在第 员篇中主要讨论燃烧学的基础理论、着火、火焰传播、湍流燃烧、液体燃料、固体燃料的燃烧等内容，第 圆篇中主要介绍了燃烧过程产生的主要污染物 NO_x，SO_x和碳黑的形成及控制理论。

本书可作为动力工程与工程热物理专业领域本科生燃烧学的基本教材；也可作为其他相关专业的燃烧学和环境污染方面的教材；还可作为相关科学技术工作者学习与参考。各专业可根据本专业的需要选择其中的有关章节。

摇图书在版编目 （悄摇孕 数据

摇燃烧理论与污染控制 辕岑可法等编著 郾—北京：机械工业出版社，圆园园缘
摇普通高等教育机电类规划教材
摇ISBN 缘苑圆原园圆缘园园原园

摇Ⅰ郾燃… 摇Ⅱ郾岑… 摇Ⅲ郾①燃烧理论 原高等学校 原教材②燃烧 原污染控制 原高等学校 原教材摇Ⅳ郾①动力… ②环… 原

摇中国版本图书馆 悄摇孕 数据核字 （圆园园缘）第 园园园园园缘号

机械工业出版社 （北京市百万庄大街 圆圆号摇邮政编码 员园园园苑员）
策划编辑：钱飒飒摇责任编辑：宋学敏摇李俊玲摇版式设计：霍永明
责任校对：李秋荣摇封面设计：陈摇沛摇责任印制：李摇妍
北京机工印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行
圆园园缘年 远月第 员版第 员次印刷
员园园园×员猿猿园 毫米 · 员缘郾缘印张 · 远猿苑千字
定价：源园郾园元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 （园缘缘）
封面无防伪标均为盗版

前摇摇言

燃烧是物质剧烈氧化而发光、发热的现象，是人们利用能源的最主要方式。一方面，能源的需求还在不断地增加，另一方面，燃料中存在的有害物质，在燃烧过程中会散发出来，包括烟尘、灰粒、碳黑粒子、氮氧化物、硫氧化物、一氧化碳、二氧化碳等等，还会有噪声、臭味，还有未燃尽的碳氢化合物、微量有害元素等。这些排放物会污染环境，是目前影响全球环境的酸雨、“温室效应”等的主要来源，妨害着人们的健康，动植物的生长，甚至整个生态的平衡。因此，积极开展对燃烧污染物形成机理的研究、探索通过改变燃烧工艺、精心控制燃烧过程是减少或消除污染物排放的有效方法。近年来燃烧科学与技术的发展在很大程度上是这一需求的必然结果。浙江大学是我国进行燃烧理论与技术研究和开发的重要基地，也是培养这方面高层次人才的重要基地，特别是近年来在煤与生物质的燃烧，煤浆燃烧，煤粉燃烧，燃烧过程数值计算，催化燃烧等方面进行了大量深入的研究，承担了国家基础研究发展规划项目、国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国家攀登计划等项目的研究，并取得了多项具有国际先进水平的研究成果。同时本书中很多材料来自于国内外近期的科学研究成果与论文。这些成果都在我们的日常教学工作中得到了体现，也都反映在本书中。

本书由岑可法院士组织并负责统稿，由岑可法、姚强、骆仲泱、高翔共同编写。本书中大量引用了浙江大学同事们及研究生们的研究资料，并得到他们多方面的帮助；本书还参考了大量国内外同行发表的相关论著，在此，向他们表示衷心的感谢。同时，也特别感谢西安交通大学徐通模教授，他在百忙之中审阅了本书，并提出了许多宝贵的意见，这些意见已反映在本书中。真诚感谢国家科技部、国家自然科学基金会各部门给予的研究经费资助，研究所取得的许多成果已反映在本书中。

作者长期工作在科研和教学的一线，对本教材也尽了很大的努力，但疏漏和错误仍在所难免，敬请各位读者批评指正。

作摇者

目摇摇录

前言

第 员章摇导论、化学热力学和化学动力学基础 …… 员

摇摇员援员摇燃烧科学的发展、应用和研究方法 …… 员

摇摇员援员援员摇燃烧科学的发展简史 …… 员

摇摇员援员援圆摇燃烧科学的应用 …… 圆

摇摇员援员援猿摇燃烧造成的污染 …… 源

摇摇员援员援源摇燃烧科学的研究方法 …… 远

摇摇员援圆摇化学平衡 …… 苑

摇摇员援猿摇基本概念 …… 苑

摇摇员援猿援员摇标准平衡常数 …… 员员

摇摇员援源摇热化学 …… 员猿

摇摇员援源援员摇化合物的生成焓和标准摩尔生成焓 …… 员猿

摇摇员援源援圆摇标准摩尔反应焓 …… 员缘

摇摇员援源援猿摇根据键能计算标准摩尔反应焓 …… 员缘

摇摇员援源援源摇任意温度下摩尔反应焓的计算——基尔霍夫 (员圆猿缘—员愿圆源)定律 …… 员愿

摇摇员援源援缘摇标准摩尔燃烧焓 …… 员远

摇摇员援源援远摇热化学定律 …… 员苑

摇摇员援源援愿摇绝热燃烧温度 …… 员苑

摇摇员援缘摇化学反应速率 …… 员愿

摇摇员援缘援员摇基本定义 …… 员愿

摇摇员援缘援圆摇质量作用定律 …… 圆员

摇摇员援缘援猿摇反应级数 …… 圆员

摇摇员援缘援源摇一级反应 …… 圆缘

摇摇员援缘援缘摇二级反应 …… 圆愿

摇摇员援缘援远摇复合反应 …… 圆愿

摇摇员援缘摇各种参数对化学反应速率的影响 …… 圆怨

摇摇员援缘援愿摇温度对化学反应速率的影响——阿累尼乌斯 (粤则猿糟糕德泽定律 …… 圆怨

摇摇员援缘援怨摇压力对反应速率的影响 …… 猿员

摇摇员援缘援员园摇在定温定压下，反应物浓度对反应速率的影响 …… 猿猿

摇摇员援远摇反应速率理论 …… 猿源

摇摇员援苑摇链反应 …… 猿苑

摇摇员援苑援员摇基本理论 …… 猿苑

摇摇员援苑援圆摇不分支的链反应——氯和氢的结合 …… 猿怨

摇摇员援苑援猿摇分支链反应——氢和氧的化合 …… 源员

摇摇员援苑援源摇链反应速率与时间的关系链着火 …… 源缘

摇摇员援苑援缘摇链着火的界限 …… 源苑

摇摇员援愿摇思考题与习题 …… 源怨

第 圆章摇燃料的着火理论 …… 缘圆

摇摇圆援员摇燃烧过程的热力爆燃理论 …… 缘圆

摇摇圆援员援员摇谢苗诺夫的可燃气体混合物的热力着火理论 …… 缘猿

摇摇圆援员援圆摇爆燃感应期 …… 远园

摇摇圆援圆摇链爆燃理论 …… 远员

摇摇圆援猿摇链分支反应的发展条件(链爆燃条件) …… 远园

摇摇圆援猿援员摇不同温度时分支链反应速率随时间的变化 …… 远源

摇摇圆援猿援圆摇感应期的确定 …… 远缘

摇摇圆援猿援猿摇着火半岛现象 …… 远远

摇摇圆援源摇热力着火的自燃范围和感应周期 …… 远愿

摇摇圆援源援员摇热力着火的自燃范围 …… 远愿

摇摇圆援源援圆摇各种参数对着火温度的

影响 …… 第6章
强迫着火的基本概念 …… 第6章
实现强迫着火的条件 …… 第6章
强迫着火的热理论 …… 第6章
各种点燃方法的分析 …… 第6章
煤的着火理论 …… 第6章
煤的着火及其判据 …… 第6章
煤的着火模式 …… 第6章
谢苗诺夫热力着火理论用于碳粒着火的分析 …… 第6章
影响煤粒着火的因素分析 …… 第6章
煤粉空气混合物的着火 …… 第6章
思考题与习题 …… 第6章
第7章 火焰传播与稳定理论 …… 第7章
火焰传播的基本方式——火焰正常传播与爆燃 …… 第7章
可燃气体的火焰正常传播 …… 第7章
火焰正常传播的理论 …… 第7章
用于简化近似分析的热理论 …… 第7章
泽利多维奇（Zeldovich）等的分区近似解法 …… 第7章
火焰传播的精确解法 …… 第7章
坦福特等的扩散理论 …… 第7章
火焰正常传播速度 …… 第7章
影响火焰正常传播速度的主要因素 …… 第7章
火焰传播界限 …… 第7章
火焰正常传播速度的测量 …… 第7章
可燃气体层流动力燃烧和扩散燃烧 …… 第7章
概述 …… 第7章
化学均匀可燃气体混合物的动力燃烧 …… 第7章
可燃气体的扩散燃烧 …… 第7章
火焰稳定的基本原理和方法 …… 第7章
火焰稳定的几个特征 …… 第7章
火焰的回火和吹熄的临界条件 …… 第7章
钝体后回流区火焰稳定原理 …… 第7章
火焰稳定的基本方法 …… 第7章
思考题与习题 …… 第7章
第8章 湍流燃烧理论及模型 …… 第8章
湍流燃烧及其特点 …… 第8章
湍流气流中火焰传播的表面燃烧模型 …… 第8章
湍流气流中火焰传播的容积燃烧模型 …… 第8章
湍流扩散 …… 第8章
湍流容积燃烧模型的计算 …… 第8章
决定湍流火焰传播速度的实验结果 …… 第8章
火焰自湍化理论初步 …… 第8章
湍流燃烧的时均反应速率和混合分数 …… 第8章
时均反应速率 …… 第8章
简单化学反应系统 …… 第8章
守恒量和混合分数 …… 第8章
守恒量之间的线性关系 …… 第8章
湍流扩散火焰的“烟囱”模型 …… 第8章
湍流预混火焰模型 …… 第8章
涡旋破碎模型 …… 第8章
拉氏（Lagrange）方法模型 …… 第8章
概率密度函数的输运方程模型 …… 第8章
斯波尔丁的“耗散概念”湍流燃烧理论 …… 第8章
概述 …… 第8章

2.1 “经历”理论 …… 21
2.2 “统计”理论 …… 25
2.3 思考题与习题 …… 27
第3章 液体燃料的燃烧 …… 28
3.1 液体燃料的特性 …… 28
3.1.1 石油的组成元素及化合物 …… 28
3.1.2 燃油种类及石油炼制的方法 …… 29
3.1.3 燃料油品物理和化学性能 …… 31
3.1.4 浆体燃料的主要技术特性 …… 34
3.2 液体燃料的燃烧过程概述 …… 36
3.2.1 液体燃料燃烧的基本过程 …… 36
3.2.2 液体燃料的燃烧特点 …… 37
3.2.3 常见喷雾燃烧系统 …… 38
3.3 液体燃料的雾化理论及技术 …… 40
3.3.1 雾化过程及机理 …… 41
3.3.2 雾化方式和喷嘴 …… 42
3.3.3 液体燃料雾化的性能 …… 43
3.4 液滴的蒸发 …… 45
3.4.1 液滴蒸发时的斯蒂芬流 …… 45
3.4.2 相对静止环境中液滴的蒸发 …… 46
3.4.3 强迫气流中液滴蒸发的折算膜理论 …… 48
3.4.4 液滴群的蒸发 …… 49
3.4.5 液滴非稳态蒸发的数值计算 …… 50
3.5 燃料液滴的扩散燃烧 …… 52
3.5.1 相对静止环境中液滴的扩散燃烧 …… 52
3.5.2 强迫对流环境中液滴的扩散燃烧(折算薄膜理论) … 54
3.5.3 液滴扩散燃烧的有关实验和理论研究 …… 54
3.6 液滴群的燃烧 …… 56
3.6.1 喷雾燃烧的理论模型 …… 56
3.6.2 雾滴燃烧模型 …… 57
3.6.3 局部均相流(德云-斯)模型 …… 58
3.6.4 分离两相流(克兰-艾)模型 …… 59
3.7 工业喷雾燃烧的技术基础 …… 60
3.7.1 液体燃料喷雾燃烧的组织 …… 60
3.7.2 喷雾燃烧的合理配风 …… 61
3.7.3 重质油的燃烧技术 …… 62
3.7.4 乳化燃料的燃烧技术 …… 63
3.8 思考题与习题 …… 64
第4章 煤的热解及挥发分的燃烧 …… 65
4.1 煤的组成与特性 …… 65
4.1.1 煤岩学 …… 66
4.1.2 煤化学 …… 67
4.1.3 煤结构与热解反应的关系 …… 68
4.1.4 物理因素 …… 69
4.2 煤的热解 …… 70
4.2.1 概述 …… 71
4.2.2 温度对热解的影响 …… 72
4.2.3 加热速率的影响 …… 72
4.2.4 压力的影响 …… 73
4.2.5 颗粒粒度的影响 …… 73
4.2.6 煤种的影响 …… 73
4.2.7 气氛的影响 …… 73
4.3 热解产物的组成 …… 74
4.4 概述 …… 74
4.4.1 温度的影响 …… 75
4.4.2 加热速度的影响 …… 76
4.4.3 压力的影响 …… 76
4.4.4 颗粒粒度的影响 …… 76

煤种的影响 …… 3
气氛的影响 …… 3
煤热解反应动力学模型 …… 4
单方程模型 …… 4
双方程模型 …… 5
多方程热解模型 …… 6
热解产物的组分模型 …… 7
机理性模型 …… 8
考虑二次反应的竞争反应模型 …… 9
热解通用模型 …… 9
考虑非动力学控制因素的热解模型 …… 10
热解产物的燃烧 …… 10
概述 …… 10
局部平衡法 …… 10
总体反应方法 …… 11
完全反应方法 …… 11
思考题与习题 …… 12
第 章 煤的燃烧理论（碳及焦炭的燃烧） …… 13
煤燃烧涉及的物理化学过程 …… 13
焦炭反应的控制区及煤燃烧的速率 …… 13
碳的形态与结构 …… 14
焦炭燃烧过程中的吸附 …… 16
焦炭燃烧过程中的扩散 …… 18
先生成一氧化碳还是直接生成二氧化碳 …… 19
碳的动力扩散燃烧特点及燃烧化学反应 …… 21
碳的动力扩散燃烧特点 …… 21
碳的燃烧化学反应 …… 26
碳球的燃烧速度 …… 27
温度较低或颗粒很小（可略去）时空间气相反应的情况 …… 27
碳球在高温下的扩散燃烧情况 …… 28
考虑二次反应的碳球燃烧 …… 28
考虑二次反应作用的碳球燃烧模型 …… 29
有 惰空间反应时碳球燃烧速率的计算 …… 29
多孔性碳球的燃烧 …… 30
内部反应对碳粒燃烧的影响 …… 30
总的表观反应速度常数 …… 31
各种因素对焦炭燃烧的影响 …… 32
煤中挥发分析出对燃烧的影响 …… 32
灰分对燃烧的影响 …… 33
煤燃烧过程数学模型方法简介 …… 33
燃烧过程模化的一般研究 …… 33
煤燃烧的基本过程 …… 34
流动基本方程及湍流模型 …… 34
两相流及颗粒湍流扩散 …… 35
炉内辐射 …… 36
煤粉火焰模型求解及示例 …… 36
思考题与习题 …… 36
第 章 硫燃烧反应动力学及固硫机理 …… 36
硫的存在形态及燃烧转化过程 …… 36
燃料中硫的存在形态 …… 36

摇摇摇摇燃料中硫的测定方法 …… 猿愿
摇摇摇摇硫燃烧转化的总体特性 …… 猿愿
摇摇摇摇燃料硫的高温热分解及 灶燥的生成动力学 …… 猿苑
摇摇摇摇有机硫的高温热分解及氧化反应 …… 猿苑
摇摇摇摇黄铁矿的高温热分解 …… 猿怨
摇摇摇摇黄铁矿的氧化反应 …… 源园
摇摇摇摇燃料中单质硫的化学转化 …… 源猿
摇摇摇摇灶燥生成的反应动力学 … 源缘
摇摇摇燃烧过程中 灶燥及 勾杂的生成 …… 源缘
摇摇摇摇灶燥的生成机理 …… 源缘
摇摇摇摇灶燥生成的反应动力学 … 源远
摇摇摇摇勾杂的生成途径及反应动力学 …… 源远
摇摇摇石灰石燃烧固硫的机理 …… 源苑
摇摇摇摇燃烧固硫的基本过程 …… 源苑
摇摇摇摇石灰石煅烧反应动力学 …… 源怨
摇摇摇摇煅烧石灰石的固硫反应动力学 …… 源猿
摇摇摇摇石灰石煅烧和固硫过程孔隙结构的变化 …… 源缘
摇摇摇石灰石燃烧固硫的数学模型 …… 源愿
摇摇摇摇多孔介质内部的气体扩散 …… 源愿
摇摇摇摇单颗粒石灰石脱硫模型 …… 源猿
摇摇摇摇燃烧固硫总体模型 …… 源苑
摇摇摇燃烧脱硫技术及工业应用 …… 源愿
摇摇摇摇燃烧脱硫技术 …… 源愿
摇摇摇摇运行参数对燃烧脱硫的影响 …… 源缘
摇摇摇摇燃烧脱硫对 晕灶灶排放的影响 …… 源远
摇摇摇摇高效人工固硫剂 …… 源愿
摇摇摇思考题与习题 …… 源怨
第 怨章摇燃烧过程中氮氧化物的生成及分解机理 …… 源园
摇摇摇摇燃烧过程中氮氧化物的生成及危害 …… 源园
摇摇摇摇氮氧化物的危害 …… 源园
摇摇摇摇各种燃烧方式的 晕灶灶排放量 …… 源员
摇摇摇摇晕灶均相反应的动力学参数 …… 源猿
摇摇摇摇晕灶生成的机理 …… 源猿
摇摇摇热力 晕灶的生成 …… 源猿
摇摇摇摇热力 晕灶的生成机理 …… 源猿
摇摇摇摇影响热力 晕灶生成的因素 …… 源源
摇摇摇快速 晕灶的生成 …… 源苑
摇摇摇摇快速 晕灶生成机理 …… 源苑
摇摇摇摇影响快速 晕灶生成的几个因素 …… 源愿
摇摇摇燃料 晕灶的生成 …… 源员
摇摇摇摇燃料 晕灶的生成途径 …… 源员
摇摇摇摇温度对燃料 晕灶生成的影响 …… 源猿
摇摇摇摇氧浓度对燃料 晕灶生成的影响 …… 源猿
摇摇摇摇燃料性质对燃料 晕灶生成的影响 …… 源缘
摇摇摇缘流化床锅炉床料中金属氧化物的作用 …… 源苑
摇摇摇摇水分的影响 …… 源愿
摇摇摇摇燃料氮转化为 晕灶的化学动力学 …… 源愿
摇摇摇缘气体燃料燃烧时 晕灶的生成 …… 源园
摇摇摇液体燃料燃烧时 晕灶的生成 …… 源猿
摇摇摇摇喷雾燃烧时 晕灶的生成 …… 源猿

2.2.1 预蒸发、预混合火焰的 NO_x 生成 …… 27
2.2.2 煤燃烧时 NO_x 生成机理 …… 29
2.2.3 挥发分 NO_x …… 29
2.2.4 焦炭 NO_x …… 30
2.2.5 煤粉炉内燃烧时 NO_x 的生成 …… 30
2.2.6 流化床燃烧时 NO_x 的析出 …… 31
2.2.7 燃煤锅炉内 NO_x 生成量的预测 …… 32
2.3 降低 NO_x 排放的措施 …… 33
2.3.1 空气分级降低 NO_x 排放 …… 33
2.3.2 燃料分级降低 NO_x 排放 …… 34
2.3.3 低氧燃烧降低 NO_x 排放 …… 35
2.3.4 烟气再循环降低 NO_x 排放 …… 36
2.3.5 浓淡偏差燃烧 …… 36
2.3.6 烟气脱硝 …… 37
2.4 燃烧过程中 SO_2 的生成及控制 …… 38
2.4.1 SO_2 的危害 …… 38
2.4.2 SO_2 的生成及分解机理 …… 39
2.4.3 燃烧过程中降低 SO_2 的方法 …… 40
2.5 思考题与习题 …… 41
第 3 章 燃烧过程中碳黑形成机理 …… 42
3.1 燃烧过程中碳黑形成的类型及性质 …… 42
3.2 气相析出型碳黑 …… 42
3.3 剩余型碳黑 …… 43
3.4 雪片 …… 43
3.5 积炭 …… 44
3.6 碳黑的特性 …… 44
3.7 碳黑的危害 …… 45
3.8 气体燃料燃烧时碳黑的生成 …… 46
3.8.1 预混合火焰中碳黑的生成机理 …… 46
3.8.2 预混火焰中碳黑生成的影响因素 …… 47
3.8.3 扩散型火焰中碳黑的生成机理 …… 48
3.8.4 降低碳黑排放的措施 …… 49
3.9 油燃烧时碳黑的生成 …… 50
3.9.1 油燃烧时碳黑的生成机理 …… 50
3.9.2 液体燃料燃烧时碳黑生成的影响因素 …… 51
3.9.3 液体燃料燃烧时碳黑排放量的控制 …… 52
3.10 煤燃烧时碳黑的生成 …… 53
3.11 碳黑生成的数学模型 …… 54
3.11.1 碳黑生成的机理性模型 …… 54
3.11.2 碳黑生成的综合模型 …… 55
3.12 思考题与习题 …… 56
附录 …… 57
附录 A 几种反应及其标准平衡常数 …… 57
附录 B 几种物质的标准摩尔生成焓 …… 58
附录 C 298.15 K 时的标准摩尔燃烧焓（产物 CO_2、H_2O 和 SO_2）（造 和 情况） …… 59
附录 D 部分形成 NO_x 和 SO_2 的均相化学反应的动力学参数 …… 60
参考文献 …… 61

第 员章摇导论、化学热力学和化学动力学基础

员.员摇燃烧科学的发展、应用和研究方法

员.员.员摇燃烧科学的发展简史

燃烧是物质剧烈氧化而发光、发热的现象，这种现象又称为“火”。按考古学的发现，人类最早使用火的时代可以追溯到距今 员员~员猿万年以前，火给人类带来了进步。火的使用是人类出现的标志之一。第一次产业革命在英国出现，其标志就是蒸汽机的产生，这是人类对“火”（燃烧）现象的长期认知和经验积累的结果。人类的物质文明史与燃烧技术的发展是不可分割的，可以说，火的历史也就是人类社会进步的历史。

人类在征服和利用火的过程中，也开始了对火的认识过程。在古希腊的神话中，火是神的贡献，是普罗米修斯为了拯救人类的灭亡，从天上偷来的。在我国，燧人氏钻木取火的故事更为感人，也更为切合实际。但这些离火的本质相距甚远。

员员世纪末，德国的施塔尔（员□□□□□□□□□□）提出燃素论作为燃烧理论，可以说是让燃烧成为一门科学的最早的努力。虽然不久以后就被证明是完全错误的，但以他为代表的一代科学家注意观察和理论总结的研究方法，为后代科学家提供了一个范例。也正是这种精神，使后来正确的燃烧学说得到很快的发展。按照燃素学说，一切物质之所以能够燃烧，都是由于其中含有被称为燃素的物质。当燃素逸至空气中时就引起了燃烧现象，逸出的程度愈强，就愈容易产生高热、强光和火焰。物质易燃和不易燃的区别，就在于其中含有燃素量的多少。这一学说对于许多燃烧现象给予了说明，但是，一些本质问题尚不清楚。如燃素的本质是什么，为什么物质燃烧后质量反而增加，为什么燃烧使空气体积减少。员苑员猿年 员员月 员日，法国科学家拉瓦锡（□□□□□□□□□□□□□□□□）发表了关于燃烧的第一篇论文，其要点是由燃烧而引起的质量增加，并不限于锡、铝等金属，硫、磷的燃烧也相同，只是它们的燃烧产物为气体或粉末。这种燃烧后质量增加的现象，即燃素论所认为的怪事，绝不是两三个特殊情况，而是极其普遍的现象。拉瓦锡根据实验进一步提出，这种“质量的增加”是由于可燃物同空气中的一部分物质化合的结果。燃烧是一种化合现象，当时，拉瓦锡尚未完全弄清楚这

空气中的一部分是什么物质。员苑苑源年，普里斯特利（[illegible]）发现了氧，并且与拉瓦锡有了接触。拉瓦锡很快在实验中证明，这种物质在空气中的比例为员缘，并命名这一物质为“氧”（原义为酸之源）。这样，拉瓦锡正确的燃烧学说得到确立，并因此而引起了化学界的一大革新。但这仅仅是揭示燃烧本质的开始。

员怨世纪，由于热力学和热化学的发展，燃烧过程开始被作为热力学平衡体系来研究，从而阐明了燃烧过程中一些最重要的平衡热力学特性，如燃烧反应的热效应，燃烧产物平衡组分，绝热燃烧温度，着火温度等。热力学成了燃烧现象认识的重要而惟一的基础。直到 圆园世纪的 猿园年代，美国化学家刘易斯（[illegible]）和前苏联化学家谢苗诺夫（[illegible]）等人将化学动力学的机理引入燃烧的研究，并确认燃烧的化学反应动力学是影响燃烧速率的重要因素，并且发现燃烧反应具有链反应的特点，这才初步奠定了燃烧理论的基础。随着 圆园世纪初各学科的迅猛发展，在 猿园年代到 缘园年代，人们开始认识到影响和控制燃烧过程的因素不仅仅是化学反应动力学因素，还有气体流动、传热、传质等物理因素，燃烧则是这些因素的综合作用的结果，从而建立了着火、火焰传播、湍流燃烧的规律。圆园世纪 缘园年代到 远园年代，美国力学家冯·卡门（[illegible]）和我国力学家钱学森首先倡议用连续介质力学来研究燃烧基本过程，并逐渐建立了所谓的“反应流体力学”，学者们开始以此为基础，对一系列的燃烧现象进行了广泛的研究。计算机的出现为燃烧理论与数值方法的结合，展现出了巨大的威力。斯波尔丁（[illegible]）在 圆园世纪 远园年代后期首先得到了层流边界层燃烧过程控制微分方程的数值解，并成功地接受了实验的检验。但在进一步研究中，遇到了湍流问题的困难。斯波尔丁和哈洛（[illegible]）在继承和发展了普朗特（[illegible]）、雷诺（[illegible]）和周培源等人研究工作的基础上，将“湍流模型方法”引入了燃烧学的研究，提出了一系列的湍流输运模型和湍流燃烧模型，并对一大批描述基本燃烧现象和实际的燃烧过程成功地进行了数值求解。到 圆园世纪 愿园年代，英、美、苏、日、德、中、法等国相继开展了类似的研究工作，逐渐形成了所谓的“计算燃烧学”，用它能很好地定量预测燃烧过程和燃烧技术，使燃烧理论及其应用达到了一个新的高度。同时，燃烧过程测试手段的发展，特别是先进的激光技术、现代质谱、色谱等光学、化学分析仪器的发明和运用，改进了燃烧实验的方法，提高了测试精度，可以更深入地、全面地、精确地研究燃烧过程的各种机理，使燃烧学在深度和广度上都有了飞速的发展。

[illegible]燃烧科学的应用

如上所述，燃烧学是一门内容丰富、发展迅速、既古老又年青且实用性很强的交叉学科。

在世界和我国的能源结构中，矿物燃料占主导地位。表 员源员所示为世界一次能源的消费结构比重。在世界总体能源结构中，以燃烧方式提供的矿物燃料所占比例在 愿园豫～愿怨豫之间，占绝对主导地位。其中，石油又占矿物燃料的 缘园豫左右，成为能源的主要来源。

表 员源员摇世界一次能源的消费结构 (豫)

	煤	石油	天然气	矿物燃料总计	水电	核能	新能源
员怨园年全世界	圆园豫	猿园豫	圆园豫	愿园豫	远豫	缘豫	员豫
圆园园园年全世界	圆缘豫	猿怨豫	圆园豫	愿缘豫	苑豫	远豫	员豫
预计 圆园员园年全世界	猿缘豫	圆员豫	员怨豫	苑缘豫	苑豫	员缘豫	缘豫

摇摇从发展趋势看，即使到 圆园园园年，由于石油资源的下降和新能源的开发，矿物燃料所占比例将有所下降，但仍高达 苑缘豫，仍然是能源的主要构成。

在我国，员怨园年初，已探明的煤炭储量为 怨苑园亿 贼 约占世界总量的 猿员豫，而可开采的量达 员苑缘亿 贼 如表 员源员所示，我国以煤为主的能源结构在多年来和多年后都不会有大的变化。从表中看出，我国一次能源的消费中，以燃烧方式的矿物燃料总量占 怨缘豫左右，而其中绝大部分 （苑员豫～愿员豫） 是由煤来提供的，虽然到本世纪，水电、核电及新能源比重将有所增加，但以煤为主的能源结构不会有根本改变。

表 员源圆摇我国一次能源的消费结构 (豫)

	煤炭	石油	天然气	矿物燃料总量	水电	核能及新能源
员缘缘年	怨缘	猿员	员	怨远	员源	员
员愿员年	苑员	圆苑	猿员	怨远	源员	员
员怨缘年	苑愿	圆猿	圆员	怨员	员源	员
圆园园园年	远愿	圆园员	猿员	怨缘员	远员	圆园源
预计 圆园员园年	远园	员愿缘	缘源	愿员源	愿缘	猿员
预计 圆园缘园年	远员	猿员缘	缘员缘	远缘源	远员缘	圆缘员

摇摇 综上所述，现代社会的动力来源，主要来自于矿物燃料的燃烧，其应用遍及各个领域，如火力发电厂的锅炉、工厂的工业用蒸汽、各种交通工具的发动机等，都是以固体、液体和气体燃料的燃烧产生的热能为动力的。

在冶金、化工、玻璃、化肥、水泥、陶瓷、石油化工等生产过程中，都是以燃料的燃烧来提供热源的。在人们日常生活中的采暖、食物制作等，都离不开燃料的燃烧产生的热源。在喷气、火箭技术高速发展的今天，迫切要求制造出热强度高、运行范围广的燃烧装置，并越来越趋向于在高温、高压、高速下进行燃烧的装置。

所有这些，都对燃烧过程的研究提出了更高的要求，如何高效经济地控制燃烧过程，是燃烧学研究的一个重要方向。

另一方面，火促进了人类文明的发展，但也能给人类带来灾难。世界上，每年都要发生各种情况的火灾，造成了无法估量的损失。为预防和减少因火灾造成的

损失,对燃烧科学的研究者提出了更多更高的要求,同时也提出了多个研究方向。

燃烧科学的应用极其广泛，涉及到人民生活、工业生产、国防、航空航天等各个领域。因此，就需要培养出一批有志于为燃烧科学的发展和燃烧技术的应用作出持续努力的科学家和工程技术人员。

员.圆.猿 燃烧造成的污染

燃料中存在的有害物质，在燃烧过程中会散发出来，包括烟尘、灰粒、碳黑粒子、氮氧化物、硫氧化物、一氧化碳、二氧化碳等等，同时燃烧还伴随着噪声、臭味、未燃尽的碳氢化合物、微量有害元素等。这些排放物会污染环境，是目前影响全球环境的酸雨、“温室效应”等的主要来源，危害着人们的健康、动植物的生长，甚至整个生态系统的平衡。因此，积极开展对燃烧污染物形成机理的研究，来探索通过改变燃烧工艺，精心控制燃烧过程以减少或消除污染物生成的有效方法，研究洁净的燃烧技术，把污染消灭在燃烧之中，已成为目前燃烧科学研究的一个重要方向。

所谓大气污染，通常是指由于人类活动和自然过程引起某些物质进入大气中，在一定的时间内达到足够的浓度，并保持足够长的时间因此而危害了人体的舒适、健康或危害了环境。这些物质也就是污染物，主要包括粉尘、烟、飞灰、黑烟、液滴、轻雾、雾等气溶胶状态污染物，以及含硫、碳、氮、碳氢、卤素等气体状态污染物。

表 员.猿所示为气体污染物的来源、发生量、背景体积分数和主要反应。对主要大气污染物的分类统计分析表明，其主要来源有三大方面：①燃料燃烧；②工业生产过程；③交通运输。实际上，工业生产过程及交通运输的污染物主要归结为燃料燃烧。

根据我国对烟尘、[illegible]和 悄的四种量大面广的污染物的统计表明，燃料燃烧、工业生产和机动车产生的大气污染物所占的体积比例分别是 [illegible]、[illegible]和 [illegible]。在直接燃烧的燃料中，煤炭所占比例最大，为 [illegible]，液体燃料（包括汽油、柴油、燃料重油等） 占 [illegible]。气体燃料 （天然气、煤气、液化石油气等） 占 [illegible]。造成我国大气污染严重有三个方面的原因：

员. 直接燃煤是我国大气污染严重的根本原因。长期以来，一次能源的构成没有大的变化，煤炭一直是我国的主要能源。目前我国煤炭总消耗量已经超过 [illegible]亿 赋 近几年的统计资料表明，燃煤排放的大气污染物数量约占燃料燃烧排放的 [illegible]。其中，燃煤排放的 [illegible]约占燃料燃烧排放量的 [illegible]，占各类污染源总排放量的 [illegible]；燃煤排放的烟尘相应占 [illegible]和 [illegible]，燃煤排放的 [illegible]相应占 [illegible]和 [illegible]；悄的排放量则分别占 [illegible]和 [illegible]。

圆. 能源浪费严重，燃烧方式落后，加重了大气污染。在我国 [illegible]多万台工

业锅炉中，小锅炉占 愿园豫左右，热效率很低；锅炉和炉窑的烟囱普遍偏低，污染物不易扩散。由于我国民用燃料气化率低（只占城市人口的 员园豫），民用小火炉的热效率更低，其分布面广，低室排放，特别是冬季，在人口稠密的居民区，大气污染尤为严重。

猿 交通污染源集中于城市，也是大气污染的原因之一。例如火车、汽车等车流量通过大的地区，往往是大气污染最严重的地区，交通干道的十字路口，悄酌和 晕蕴酝的浓度往往为一般交通线的 源~ 圆缘倍。

通过本课程的学习，可以深入了解燃烧过程及其伴随的污染物的产生过程，从而了解如何提高燃料能源的利用率和降低燃烧过程产生的污染物，进而了解对燃烧过程进行有效控制的手段，最终达到实现洁净燃烧的目的。

表 员圆摇气体状态大气污染物来源、发生量、背景体积分数和主要反应

物质	主摇要污染源	自然源	发生量辕(贼垣年)		大气中背景体积分数	推算的在大气中的留存时间	迁移中的反应和沉降	备注
			污染源	自然源				
灶蕴酝	摇煤和油的燃烧	摇火山活动	员源远伊员园~	未估计	员园~员圆伊员园~	源天	摇由于臭氧或固体和液体气溶胶的吸收而被氧化为硫酸盐	摇与 晕蕴酝 和悄酌化学氧化，使 灶蕴酝 迅速转化为 灶蕴酝
匀杂	摇化学过程污水处理	摇火山活动、沼泽中的生物作用	猿伊员园~	员园~员圆伊员园~	员园~员圆伊员园~	圆天	摇氧化为 灶蕴酝	摇只有一组背景体积分数是可用的
悄酌	摇机动车和其他燃烧过程排气	摇森林火灾、海洋、萜烯反应	猿园~源伊员园~	猿~源伊员园~	员园~员源伊员园~	约猿年	摇很可能是土壤中有机体	摇海洋提供的自然源可能是小的
晕蕴酝悄晕蕴酝	摇燃烧过程	摇土壤中的细菌作用	缘~源伊员园~	晕蕴酝：源~员园伊员园~ 晕蕴酝：远~缘伊员园~	晕蕴酝：（员~圆）伊员园~ 晕蕴酝：（员~缘）伊员园~	缘天	摇由于固体和液体的气溶胶的吸着、悄酌和光化学反应被氧化为硝酸盐	摇关于自然源，所做的工作很少
晕匀	摇废物处理	摇生物腐烂	源伊员园~	员~圆伊员园~	（远~员园）伊员园~	愿天	摇与 灶蕴酝 反应形成（晕匀）圆灶蕴酝，被氧化为硝酸盐	摇晕匀 的消除主要是形成铵盐

(续)

物质	主要污染源	自然源	发生量(质量)		大气中背景体积分数	推算的在大气中的留存时间	迁移中的反应和沉降	备注
			污染源	自然源				
氮的	低温燃烧过程	土壤中的生物作用	无	缺乏评估	远小于	年	在平流层中光离解，在土壤中的生物作用	还未提出用植物吸收氮的报告
氮氧化物	燃烧和化学过程	生物作用	很少评估	氮氧化物：很少评估 烃：基本无评估	氮氧化物：很小 非甲烷烃类：远小于	年（氮氧化物）	与氮的氧化物、臭氧发生光化学反应；氮氧化物必然大量消除	从污染源排出的“活性”氮氧化物为 范围 城
甲烷	燃烧过程	生物腐烂海洋释放	很小	无	接近于	年	生物吸附和光合作用，海洋的吸收	大气中含量增长率为 范围 年

燃烧科学的研究方法

应该说，燃烧科学目前正在从一门传统的经验科学成为一门系统的，涉及热力学、流体力学、化学动力学、传热传质学、物理学的，以数学为基础的综合理论学科。从以上分析的燃烧科学应用的领域看，其重点在于研究燃料和氧化剂进行激烈化学反应的发热发光的物理化学过程及其组织。

燃烧科学的研究由此分成两个大的方面而展开，一是燃烧理论方面的研究，主要以燃烧过程涉及的基本过程为研究对象。如燃烧反应的动力学机理，燃料的着火、熄灭，火焰传播及火焰稳定，预混火焰和扩散火焰，层流和湍流燃烧，催化燃烧、液滴燃烧和碳粒燃烧，煤的热解和燃烧，燃烧产物的形成机理等。另一方面是燃烧技术的研究，主要是应用上述理论研究的结果来解决工程技术中的各种实际问题，包括燃烧方法的改进，燃烧过程的组织，新的燃烧方法的建立，提高燃料利用率，拓宽燃烧利用范围，改善燃烧产物的组成，实现对燃烧过程的控制，控制燃烧过程污染物的形成与排放等等。

对于燃烧科学研究的方法，由于上述内容的复杂性，使燃烧科学的研究方法具有多样性。总的来说，燃烧科学发展的最重要的形式是理论的更替，而理论的更替正是科学实践的结果，也就是研究方法的更替。从燃烧学发展的简史可以看出，仅有实验并不能完全决定理论的正确与否，如燃素说的基础也是实验，但得到的却是错误的理论。因此，与一般的科学研究的方法相一致，燃烧理论的建立是实验研究和理论总结的结合。由于燃烧过程的复杂性，到目前为止，燃烧科学的研究，仍然以实验研究为主，但理论和数学模型的方法显得越来越重要。

燃烧过程的数学方法，是在流体力学、反应动力学和其他物理化学方程的基础上，提出化学流体力学的全套方程组。但是，由于方程和现象的复杂性，目前的数学尚无法求得这组方程的通解，或无法论证解的存在性，这与在一般条件下通过燃烧方程的解与实验研究对比的方法来检验和发展理论的过程不相一致，致使燃烧学长期停留在实验、总结的阶段。数学模型方法，得益于近年来计算机技术的迅猛发展，从而提供了一套在一般条件下求解上述方程组的数值方法，可以求出各种理论数学模型的解。通过把该解与相应的实验研究结果对比、检验，发展和优化理论模型进而深入认识现有的燃烧过程，预示新的燃烧现象，进一步揭示燃烧规律。这样，就把燃烧理论与错综复杂的燃烧现象有机地联系起来，使燃烧学科上升到系统理论的高度。

员摇化学平衡

员援员摇基本概念

员援员援员摇热力学函数与热力学平衡判据

燃烧化学反应所属体系一般是非孤立的，通常必须同时考虑环境熵变。因此，在判别其变化过程的方向和平衡条件时，不能简单地用熵函数判别，而需要引入新的热力学函数，利用体系自身的函数值变化来判别自发变化的方向，无需考虑环境的变化，这就是亥姆霍兹（[illegible]）自由能和吉布斯（[illegible]）自由能，分别定义为：

$$云 \equiv 哉 - 栽杂 \qquad (员援员援员)$$

$$郧 \equiv 匀 - 栽杂 \qquad (员援员援圆)$$

式中摇云——亥姆霍兹自由能，单位为 允；

哉——内能，单位为 允；

栽——热力学温度，单位为 运；

杂——熵，单位为 允·运$^{-1}$；

匀——焓，单位为 允；

郧——吉布斯自由能，单位为 允。

由于 哉、栽、杂、匀为状态函数，故 云、郧也是状态函数，根据状态函数特性和特点可判别过程变化的方向和平衡条件，可概括如下：

（员）熵判别摇对孤立体系或绝热体系

$$d杂_{孤立} \geqslant 0 \qquad (员援员援猿)$$

在孤立体系中，如果发生了不可逆变化，则必定是自发的，自发变化的方向是熵增方向。当体系达到平衡态之后，如果有任何自发过程发生，必定是可

逆的。此时，酱杂越园 熵值不变。由于孤立体系的 哉 灾不变，所以熵判据也可写作

$$(酱杂)_{哉,灾} \geqslant 园 \qquad (员源)$$

式中摇下标 灾——表示体积。

(圆) 亥姆霍兹自由能判据摇在定温、定容、不做其他功的条件下，对体系任其自然，则自发变化总是朝向亥姆霍兹自由能减少的方向进行，直到体系达到平衡状态。其判据也可写作

$$(酱云)_{栽,灾} \leqslant 园 \qquad (员缘)$$

(猿) 吉布斯自由能判据摇在定温、定压、不做其他功的条件下，任其自然，则自发变化总是朝向吉布斯自由能减少的方向进行，直至体系达到平衡。

$$(酱郧)_{栽,责} \leqslant 园 \qquad (员远)$$

式中摇下标 责——表示压力。

员遭遭员遭园摇热力学函数关系式

$$酱哉越酱杂原酱灾 \qquad (员愿)$$

$$酱匀越酱杂垣酱责 \qquad (员怨)$$

$$酱云越酱原酱杂酱哉原酱灾 \qquad (员苑)$$

$$酱郧越酱原酱杂酱匀垣酱责 \qquad (员园)$$

从而进一步可推导出

$$栽越\left(\frac{\partial 哉}{\partial 杂}\right)_{灾} 越\left(\frac{\partial 匀}{\partial 杂}\right)_{责} \qquad (员员)$$

$$责越原\left(\frac{\partial 哉}{\partial 灾}\right)_{杂} 越原\left(\frac{\partial 云}{\partial 灾}\right)_{栽} \qquad (员圆)$$

$$灾越\left(\frac{\partial 匀}{\partial 责}\right)_{杂} 越\left(\frac{\partial 郧}{\partial 责}\right)_{栽} \qquad (员猿)$$

$$杂越原\left(\frac{\partial 云}{\partial 栽}\right)_{灾} 越原\left(\frac{\partial 郧}{\partial 栽}\right)_{责} \qquad (员源)$$

员遭遭员遭猿摇化学势

定义

$$\mu_{蚤} 越\left(\frac{\partial 郧}{\partial 灶_{蚤}}\right)_{栽,责,\sum 灶_{蚤}} \qquad (员缘)$$

为化学势，即在定温、定压条件下，体系中 员皂遭蚤组分的吉布斯自由能。式中摇$灶_{蚤}$——组分 蚤的物质的量，单位为 皂燥造

化学势是平衡态的性质，类似有

$$\mu_{蚤} 越\left(\frac{\partial 云}{\partial 灶_{蚤}}\right)_{栽,灾,\sum 灶_{蚤}} \qquad (员远)$$

$$\mu_{蚤} 越\left(\frac{\partial 匀}{\partial 灶_{蚤}}\right)_{杂,责,\sum 灶_{蚤}} \qquad (员苑)$$