



XIAOFANG GONGCHENG XILIE

XIAOFANG GONGCHENG XILIE

XIAOFANG GONGCHENG XILIE

高等教育安全科学与工程类系列规划教材
消防工程专业系列规划教材

燃烧学

陈长坤 主编
林其钊 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

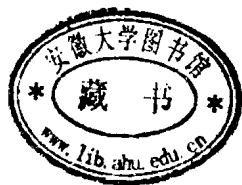


免费电子课件

高等教育安全科学与工程类系列规划教材
消防工程专业系列规划教材

燃 烧 学

主 编 陈长坤
副主编 路 长 姚 斌
参 编 李 智 王建国 涂艳英
董韶峰 刘久兵
主 审 林其钊



机 械 工 业 出 版 社

本书共8章,主要讲述燃烧的基础理论、火灾规律及防火技术等内容,具有较强的知识性、系统性和技术性;在内容方面,注重理论基础与实践应用相结合的特点,各章在进行燃烧理论介绍时,重视燃烧理论在消防工程领域中的应用,通过对火灾中的燃烧现象进行举例分析,加深读者对相关理论及应用的理解。同时结合每一章所讲述的内容,在章节末尾都设计了习题及思考题,并加入典型案例的讨论。书中标有“*”号的部分为选修内容,任课教师可根据实际教学情况自行安排。

本书主要作为高等学校消防工程、安全工程专业本科教材,也可作为相关专业的研究生及工程技术人员的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧学/陈长坤主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 8

高等教育安全科学与工程类系列规划教材 消防工程专业系列规划教材

ISBN 978-7-111-38959-0

I. ①燃… II. ①陈… III. ①燃烧学—高等学校—教材
IV. ①O643. 2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第138154号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:冷彬 责任编辑:冷彬

版式设计:霍永明 责任校对:潘蕊 张玉琴

封面设计:张静 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2013年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.5印张·456千字

标准书号:ISBN 978-7-111-38959-0

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

安全工程专业教材编审委员会

主任委员：冯长根

副主任委员：王新泉 吴 超 蒋军成

秘书长：季顺利

委员：（排名不分先后）

冯长根	王新泉	吴 超	蒋军成	季顺利	沈斐敏
钮英建	霍 然	孙 熙	金龙哲	王述洋	刘英学
王保国	张俭让	司 鹤	王凯全	董文庚	景国勋
柴建设	周长春	冷 彬			

消防工程专业系列规划 教材编审委员会

主任：徐志胜

副主任：蒋军成 杜文锋 余明高

顾问：霍 然 张树平

委员：（排名不分先后）

徐志胜	蒋军成	杜文锋	余明高	魏 东
王 旭	牛国庆	朱铁群	方 正	田水承
秦富仓	周汝良	邓 军	李耀庄	赵望达
韩雪峰	陈俊敏	白国强	刘义祥	路 长
尤 飞	蔡周全	贾德祥	张国友	李思成
王 燕	王秋华	汪 鹏	徐艳英	白 磊

秘书长：姜学鹏

序一 安全工程专业教材序

“安全工程”本科专业是在1958年建立的“工业安全技术”、“工业卫生技术”和1983年建立的“矿山通风与安全”本科专业基础上发展起来的。1984年，国家教委将“安全工程”专业作为试办专业列入普通高等学校本科专业目录之中。1998年7月6日，教育部发文颁布《普通高等学校本科专业目录》，“安全工程”本科专业（代号：081002）属于工学门类的“环境与安全类”（代号：0810）学科下的两个专业之一^①。据“高等院校安全工程专业教学指导委员会”1997年的调查结果显示，自1958~1996年年底，全国各高校累计培养安全工程专业本科生8130人。近年，安全工程本科专业得到快速发展，到2005年年底，在教育部备案的设有安全工程本科专业的高校已达75所，2005年全国安全工程专业本科招生人数近3900名。

按照《普通高等学校本科专业目录》（1998）的要求，原来已设有与“安全工程专业”相近但专业名称有所差异的高校，现也大都更名为“安全工程”专业。专业名称统一后的“安全工程”专业，专业覆盖面大大拓宽。同时，随着经济社会发展对安全工程专业人才要求的更新，安全工程专业的内涵也发生很大变化，相应的专业培养目标、培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化，学生毕业后的执业身份是注册安全工程师。但是，安全工程专业的教材建设与专业的发展出现尚不适应的新情况，无法满足和适应高等教育培养人才的需要。为此，组织编写、出版一套新的安全工程专业系列教材已成为众多院校的翘首之盼。

机械工业出版社是有着50多年历史的国家级优秀出版社，在高等学校安全工程学科教学指导委员会的指导和帮助下，根据当前安全工程专业教育的发展现状，本着“大安全”的教育思想，进行了大量的调查研究工作，聘请了安全科学与工程领域一批学术造诣深、实践经验丰富的教授、专家，组织成立了“安全工程专业教材编审委员会”（以下简称“编委会”），决定组织编写“高等教育安全工程系列‘十一五’规划教材”^②。并先后于2004.8（衡阳）、2005.8（葫芦岛）、2005.12（北京）、2006.4（福州）组织召开了一系列安全工程专业本科教材建设研讨会，就安全工程专业本科教育的课程体系、课程教学内容、教材建设等问题反复进行了研讨，在总结以往教学改革、教材编写经验的基础上，以推动安全工程专业教学改革和教材建设为宗旨，进行顶层设计，制订总体规划、出版进度和编写原则，计划分期分批出版30余门课程的教材，以尽快满足全国众多院校的教学需要，以后再根据专业方向的需要逐步增补。

① 按《普通高等学校本科专业目录》（2011版），“安全工程”本科专业（专业代码：082901）属于工学学科的“安全科学与工程”类（专业代码：0829）下的专业。

② 自2011年10月，更名为“高等教育安全科学与工程类系列规划教材”。

由安全学原理、安全系统工程、安全人机工程学、安全管理学等课程构成的学科基础平台课程,已被安全科学与工程领域学者认可并达成共识。本套系列教材编写、出版的基本思路是,在学科基础平台上,构建支撑安全工程专业的工程学原理与由关键性的主体技术组成的专业技术平台课程体系,编写、出版系列教材来支撑这个体系。

本系列教材体系设计的原则是,重基本理论,重学科发展,理论联系实际,结合学生现状,体现人才培养要求。为保证教材的编写质量,本着“主编负责,主审把关”的原则,编工委组织专家分别对各门课程教材的编写大纲进行认真仔细的评审。教材初稿完成后又组织同行专家对书稿进行研讨,编者数易其稿,经反复推敲定稿后才最终进入出版流程。

作为一套全新的安全工程专业系列教材,其“新”主要体现在以下几点:

体系新。本套系列教材从“大安全”的专业要求出发,从整体上考虑,构建支撑安全工程学科专业技术平台的课程体系和各门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时,统一协调与整合,形成一个完整的、各门课程之间有机联系的系列教材体系。

内容新。本套系列教材的突出特点是内容体系上的创新。它既注重知识的系统性、完整性,又特别注意各门学科基础平台课之间的关联,更注意后续的各门专业技术课与先修的学科基础平台课的衔接,充分考虑了安全工程学科知识体系的连贯性和各门课程教材间知识点的衔接、交叉和融合问题,努力消除相互关联课程中内容重复的现象,突出安全工程学科的工程学原理与关键性的主体技术,有利于学生的知识和技能的发展,有利于教学改革。

知识新。本套系列教材的主编大多由长期从事安全工程专业本科教学的教授担任,他们一直处于教学和科研的第一线,学术造诣深厚,教学经验丰富。在编写教材时,他们十分重视理论联系实际,注重引入新理论、新知识、新技术、新方法、新材料、新装备、新法规等理论研究、工程技术实践成果和各校教学改革的阶段性成果,充实与更新了知识点,增加了部分学科前沿方面的内容,充分体现了教材的先进性和前瞻性,以适应时代对安全工程高级专业技术人才的培育要求。本套教材中凡涉及安全生产的法律法规、技术标准、行业规范,全部采用最新颁布的版本。

安全是人类最重要和最基本的需求,是人民生命与健康的基本保障。一切生活、生产活动都源于生命的存在。如果人们失去了生命,一切都无从谈起。全世界平均每天发生约68.5万起事故,造成约2200人死亡的事实,使我们确认,安全不是别的什么,安全就是生命。安全生产是社会文明和进步的重要标志,是经济社会发展的综合反映,是落实以人为本的科学发展观的重要实践,是构建和谐社会的有力保障,是全面建设小康社会、统筹经济社会全面发展的重要内容,是实施可持续发展战略的组成部分,是各级政府履行市场监管和社会管理职能的基本任务,是企业生存、发展的基本要求。国内外实践证明,安全生产具有全局性、社会性、长期性、复杂性、科学性和规律性的特点,随着社会的不断进步,工业化进程的加快,安全生产工作的内涵发生了重大变化,它突破了时间和空间的限制,存在于人们日常生活和生产活动的全过程中,成为一个复杂多变的社会问题在安全领域的集中反映。安全问题不仅对生命个体非常重要,而且对社会稳定 and 经济发展产生重要影响。党的十六届五中全会首次提出“安全发展”的重要战略理念。安全发展是科学发展观理论体系的重要组成部分,安全发展与构建和谐社会有着密切的内在联系,以人为本,首先就是要以人的生命为本。“安全·生命·稳定·发展”是一个良性循环。安全科技工作者在促进、保证这一良性循环中起着重要作用。安全科技人才匮乏是我国安全生产形势严峻的重要原因之一。加快

培养安全科技人才也是解开安全难题的钥匙之一。

高等院校安全工程专业是培养现代安全科学技术人才的基地。我深信,本套系列教材的出版,将对我国安全工程本科教育的发展和高级安全工程专业人才的培养起到十分积极的推进作用,同时,也为安全生产领域众多实际工作者提高专业理论水平提供了学习资料。当然,由于这是第一套基于专业技术平台课程体系的教材,尽管我们的编审者、出版者夙兴夜寐,尽心竭力,但由于安全学科具有在理论上的综合性与应用上的广泛性相交叉的特性,开办安全工程专业的高等院校所依托的行业类型又涉及军工、航空、化工、石油、矿业、土木、交通、能源、环境、经济等诸多领域,安全科学与工程的应用也涉及人类生产、生活和生存的各个方面,因此,本套系列教材依然会存在这样和那样的缺点、不足,难免挂一漏万,诚恳地希望得到有关专家、学者的关心与支持,希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提意见和建议。谨祝本系列教材在编者、出版者、授课教师和学生的共同努力下,通过教学实践,获得进一步的完善和提高。

“嘤其鸣矣,求其友声”,高等院校安全工程专业正面临着前所未有的发展机遇,在此我们祝愿各个高校的安全工程专业越办越好,办出特色,为我国安全生产战线输送更多的优秀人才。让我们共同努力,为我国安全工程教育事业的发展作出贡献。

中国科学技术协会书记处书记[⊖]

中国职业安全健康协会副理事长

中国灾害防御协会副会长

亚洲安全工程学会主席

高等学校安全工程学科教学指导委员会副主任

安全工程专业教材编审委员会主任

北京理工大学教授、博士生导师

冯长根

2006年5月

[⊖] 现任中国科学技术协会副主席。

序二 消防工程专业系列 规划教材序

1998年7月,教育部颁布的《普通高等学校本科专业目录和专业介绍》将消防工程归入工学门类,实行开放办学政策。开设消防工程专业的高等院校随之迅速增加,学生数量不断增长,形成了可喜的发展局面。随着我国社会的发展,以人为本的消防安全理念不断深入人心,对高素质消防工程专业技术人才的需求旺盛,消防工程专业已逐渐成为高等教育的热门专业之一。

与大好的专业发展形势不协调的是,目前,我国开设消防工程专业的普通高等院校,还没有一套系统、适用的专业系列教材。为满足学科发展的需求,提高消防工程专业高等教育的培养质量,组织编写、出版一套体系完善、结构合理、内容科学的消防工程专业系列教材势在必行,同时也是众多院校的共同愿望。

机械工业出版社是有着60年历史的国家级优秀出版社,也是国家教育部认定的规划教材出版基地。该社根据当前消防工程专业的发展现状,进行了大量的调研工作,协同较早前成立的安全工程专业教材编审委员会并在其指导下,聘请消防工程领域的一批学术造诣深、实践经验丰富的专家教授,成立了“消防工程专业系列规划教材编审委员会”(以下简称“编委会”),组织编写该专业系列教材。该社先后在西安(2008.11)、株洲(2010.3)、长沙(2010.10)组织召开了一系列消防工程专业本科教学研讨会,就消防工程专业本科教育的课程体系、课程内容、教材建设等问题进行了深入研讨,确定分阶段出版该专业系列教材,以尽快满足众多院校的教学要求与人才培养目标的需求。

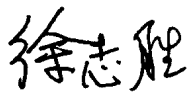
本套系列教材的编写,本着“重基本理论、重学科发展、重理论联系实际”的教材体系建设原则,在强调内容创新的同时,要体现出学科体系的系统性、完整性、专业性等特点。同时,采取“编委会评审、主编负责、主审把关”的方式确保每本教材的编写质量。本套教材还积极吸纳消防工程的设计单位、施工单位和公安消防专业人士的实践经验,在理论联系实际方面较以往同类教材实现了较大突破,提高了教材的工程实用价值。

由于消防工程内容的广泛性和交叉性,开办消防工程专业的高校所依托的行业背景和领域不同,因此,本套系列教材依然会存在不足,诚恳希望得到有关专家、学者的关心和支持,希望选用本套教材的师生在使用过程中多提意见和建议。谨祝本系列教材通过教学实践,获得进一步的完善和提高。

VIII 燃 烧 学

高等院校消防工程专业正面临着前所未有的发展机遇，在此我们祝愿各个高校的消防工程专业办出水平、办出特色，为我国消防事业输送更多的优秀人才。

中国消防协会理事
消防工程专业系列规划教材编审委员会主任
中南大学教授、博士生导师

A handwritten signature in black ink, reading '徐志澄' (Xu Zhizheng).

2011年6月

前 言

1998年,教育部颁布《普通高等学校本科专业目录和专业介绍》,允许地方院校开办消防工程专业。国内相继有多所高等院校开办了消防工程专业,培养专业人才,以满足国家对消防技术人才的需求。

“燃烧学”作为消防工程专业必备的专业基础课程,是消防工程专业培养计划中必修的学位课程,但地方院校消防工程专业一直没有适用教材,亟待结合消防工程的专业特色编写一本合适的“燃烧学”教材,以供各院校的教学与人才培养之用。为此,本教材在中南大学、西安科技大学、河南理工大学、华北水利水电学院等多所高校消防工程专业“燃烧学”主讲教师的共同努力下,在现有专业授课教案的基础上,结合编者的研究工作和教学实践编写而成。

本书主要讲述燃烧的基础理论、火灾规律及防火技术等内容。本书的编写注重将燃烧理论基础与消防工程实践应用相结合,以基础的燃烧理论为主线、以火灾和消防知识为背景,较系统地介绍了燃烧学的主要内容,同时,加入典型火灾案例的讨论,以加强读者对相关概念及理论知识的理解。全书力求简洁清晰、通俗易懂,既突出了燃烧理论的基础性、知识性和系统性,又体现了燃烧学在消防工程专业上的专业性、技术性、应用性和可拓展性。

本书由中南大学陈长坤担任主编。具体的编写分工如下:第1章由陈长坤和中国科学技术大学姚斌共同编写;第2章由陈长坤和西安科技大学王建国共同编写;第3章由陈长坤和西南林业大学李智、河南理工大学路长共同编写;第4章由沈阳航空航天大学徐艳英和陈长坤共同编写;第5章由陈长坤和华北水利水电学院董韶峰共同编写;第6章由路长编写;第7章由陈长坤编写;第8章主要由路长、陈长坤和董韶峰共同编写。

在本书编写过程中,内蒙古农业大学刘久兵老师以及中南大学硕士研究生李建、申秉银、纪道溪、康恒、周慧等也参加了本书书稿的部分文字工作,在此特表示感谢。

本书的编写参考了许多现有的相关教材和科研成果(见本书参考文献),它们为本书的完成提供了很多宝贵的资料,在此向其作者一并表示感谢。

由于编者学识水平有限,书中难免存在缺点、错误和不足之处,敬请广大读者和专家批评指正。

编 者

目 录

序一	
序二	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 燃烧(火)与人类的关系	1
1.2 人类对燃烧现象的认识过程	2
1.3 燃烧学与消防工程专业的关系	5
复习题	5
第2章 燃烧的化学基础	6
2.1 燃烧的本质、特征、条件及应用	6
2.2 燃烧的氧化机制	11
2.3 燃烧反应速度方程	16
2.4 反应热、生成热和燃烧热	24
2.5 燃烧时空气需要量及火焰温度的计算	29
2.6 燃烧产物的毒害作用及参数计算	33
复习题	40
第3章 燃烧的物理基础	41
3.1 燃烧的热量传递	41
3.2 燃烧的物质输运	48
3.3 燃烧物理学基本方程	58
复习题	65
第4章 着火与灭火理论	66
4.1 着火与灭火的基本概念	66
4.2 谢苗诺夫热自燃理论	67
4.3 强迫着火	74
4.4 开口系统的着火和灭火分析	81
4.5 链锁反应自燃理论	84
4.6 链锁理论的灭火分析	87
复习题	88
第5章 可燃气体预混燃烧	89
5.1 可燃气体燃烧的分类	89
5.2 可燃预混气体层流燃烧	94
5.3 可燃预混气体湍流燃烧	107
5.4 可燃预混气体的爆炸	115
5.5 可燃预混气体的爆轰	130
复习题	137
第6章 可燃气体扩散燃烧	138
6.1 可燃气体扩散燃烧的特点	138
6.2 无反应层流自由射流	139
6.3 层流射流扩散火焰	148
6.4 同轴射流扩散火焰	153
6.5 湍流扩散火焰	155
复习题	157
第7章 可燃液体燃烧	159
7.1 可燃液体燃烧的特点	159
7.2 可燃液体的蒸发及蒸气浓度计算	160
7.3 可燃液体的闪燃与爆炸温度极限	164
7.4 可燃液体的稳定燃烧	173
7.5 可燃液体的液面或固面燃烧	177
7.6 原油和重质石油产品燃烧时的沸溢和喷溅	187
7.7 液滴的蒸发和燃烧	191
复习题	203
第8章 可燃固体燃烧	204
8.1 可燃固体的燃烧特点、重要参数及主要影响因素	204
8.2 可燃固体的着火与燃烧理论	208
8.3 木材的燃烧	212
8.4 高聚物的燃烧	223
8.5 煤和碳粒的燃烧	230
8.6 可燃固体的阴燃	248
8.7 固体粉尘的燃烧爆炸	257
复习题	272

附录.....	274	系数 (D_{AB})	276
附录 1 国际燃烧学领域三大金奖		附录 3 1atm 下空气、氮气和氧气不同	
获奖情况	274	温度下的性质参数	278
附录 2 1 个大气压下的二元扩散		参考文献.....	280

绪 论

1.1 燃烧（火）与人类的关系

1.1.1 火与人类的文明

火与人类的文明及社会的发展息息相关，它极大地促进了人类在生理、生活、文化与生产等各方面的发展，在人类社会的变革中也起到了举足轻重的作用，在人类文明前进的每一步，火的作用和影响都不容忽视，并产生了深远的影响。

1.1.2 火与人类的生产和生活

火推动了冶炼技术的发展，进而推动了生产能力和社会的进步。在距今一万多年的新石器时代，人类已经开始利用火进行制陶；而早在公元前 2200 年，我们的祖先就建立了青铜冶炼工业，而后在春秋时期又掌握了炼铁技术，从而彻底告别了石器。战国中期，铁农具的使用已经相当普遍，农业有了更快的发展。另外，因为使用了火，春秋时期，制陶、煮盐、纺织、皮革、酿酒等行业也都普遍得到了发展。而战国时铁农具的使用促进了农业的更快发展，铸币的广泛流通，则刺激了工商业的发达并促成了城市的繁荣和壮大。公元前 200 年的汉代西汉早期已开始用煤，而魏晋时期便可以利用煤进行炼铁，1000 多年前的隋唐时期则发明了火药。这些都极大地推动了当时生产力的提高与经济的发展。

欧洲自 11 世纪以来工业获得了巨大发展，在制陶、化铁、炼焦、烧石灰、制玻璃及蒸酒精等工业中都广泛使用了火。17 世纪以后，随着工业的进一步发展，特别是在冶金和化工工业等方面，火的使用范围和规模扩大了，这也促进了人们对燃烧的本质进行不断的思考与探索，进而推动了燃烧学科的建立与发展。

现代社会中火仍然是一种提供能量转化的重要方式，将化学能、生物能等转化为热能，进而为生产生活提供动力。例如，石油、天然气仍然是世界的主要能源，它们的利用离不开有效的燃烧，而油价是衡量经济发展的一个重要指标，影响着世界经济的稳定。

另外，人类使用火并发明人工取火后，生活发生了巨大变化，食物被熟食后变成的营养物质，更易于被人体吸收，有利于人类大脑的改善和体格的强壮，使人彻底完成了从猿到人的进化过程。目前，火仍然是提供人类照明、取暖、熟食等基本生活活动的重要方式。

当人类结束了氏族社会进入奴隶社会的整个历史阶段，火不但成为人类日常生活的工具、也成为征伐战争的重要手段，从一定程度上也促进了社会的变革。例如，古代烽火被用

于边防军事的通信，烽火的燃起代表了国家战事的出现。现代战争中，火依然是摧毁敌军目标的重要手段，燃烧不但提供了飞机、舰艇、导弹等战争工具行进的动力，战争中所产生的火灾，也构成了二次破坏，对敌军产生了严重的威胁。

1.1.3 火的灾害性

火同时又有灾害性的一面，当火失去控制后，将形成火灾。火灾是指在时间和空间上失去控制的燃烧所造成的灾害。在各种灾害中，火灾是最经常、最普遍地威胁公众安全和社会发展的主要灾害之一。例如，2001 年美国“9·11”恐怖袭击事件中，火灾是最终导致高楼发生坍塌的重要原因，结果造成了 3000 多人死亡。2008 年 9 月 20 日，深圳市龙岗区龙岗街道龙东社区舞王俱乐部（歌舞厅）由于舞台上燃放烟火而造成一起特大火灾，导致 43 人死亡。2010 年 11 月 15 日，上海市静安区胶州路一座高层公寓大楼发生特别重大火灾，造成 58 人死亡，71 人受伤。表 1-1 给出了 2001 ~ 2010 年我国火灾发生的次数及所造成的人员伤亡和财产损失情况。可以看出，随着社会和经济的发展，火灾形势越来越严峻，消防工作的重要性越来越突出。

人类用火的历史与同火灾作斗争的历史是相伴相生的，人们在用火的同时，不断总结火灾发生的规律，尽可能地减少火灾及其对人类造成的危害。火灾绝对不发生是不可能的，而一旦发生火灾，就应当及时、有效地进行扑救，减少火灾的危害。

表 1-1 2001 ~ 2010 年我国火灾事故统计

年 份	发生火灾次数/万起	死亡人数/人	受伤人数/人	财产损失/亿元
2001	21.7	2334	3781	14.0
2002	25.8	2393	3414	15.4
2003	25.4	2482	3087	15.9
2004	25.3	2558	2969	16.7
2005	23.6	2496	2506	13.6
2006	22.3	1517	1418	7.8
2007	15.9	1418	863	9.9
2008	13.3	1385	684	15.0
2009	12.8	1148	613	15.8
2010	13.2	1108	573	17.7

注：本表的统计不含森林、草原、军队、矿井地下部分火灾。

1.2 人类对燃烧现象的认识过程

人类在用火的过程中，也一直都在探索火的本质，对燃烧的认识过程主要分为以下几个阶段。

1.2.1 初期探索阶段

最初人类还不懂得用火,后来明白了火可以烧熟食物,还能照明、取暖。到了地皇时期,“蓝田人”(距今约80万年)就已经学会了用火,还设置了专人保管,这种保存火种的办法一直持续了数十万年。而后,原始人类在漫长的用火经验中摸索发明了人工取火的方法,从而解决了火源的问题。在中国,据古代传说是燧人氏发明了钻木取火。

随着社会的进步和文明的发展,古代人也试图将对火的自然表现认识提升到科学学说的高度,并认为火是构成万物的本原物质之一。如我国“五行说”的“金、木、水、土、火”,古希腊“四元说”的“水、土、火、气”,以及古印度“四大说”的“地、水、火、风”等,这些学说的提出表明人类开始思考并试图解释火的本质问题。

1.2.2 火的燃素学说

17世纪以后,随着工业的进一步发展以及燃烧在工业中的大规模应用,人们开始了对燃烧本质的不断思考与探索,他们在对物质和金属的焙烧过程中,虽然提出了不少看法,但均未能接触到它们的实质。其中最著名的当属17世纪德国的化学家史塔尔,他认为,所有可燃的物体中都含有一种特殊的物质,叫做燃素。燃素在燃烧时释放出来,当含有的燃素完全跑掉后,燃烧也就停止了;不含燃素的物质不能燃烧;物质燃烧时需要空气,是因为空气能够吸收燃素;燃烧过的产物,只需任何含有多量燃素的物质如木炭等供给它燃素,它就能恢复为原来的物质。

燃素学说在某种程度上统一地解释了大量实验事实,对科学的发展起过一定的积极作用,但燃素究竟是一种什么样的物质,人们从未在实验室中将它分离出来过。17世纪中叶的俄罗斯科学家罗蒙诺索夫(1711~1765年)则坚决反对这种当时占统治地位的燃素说,他借助实验,证明了金属在密闭容器内加热,质量不会增加,而放在空气里加热,质量就会增加,从而发现了“燃素说”无法解释的矛盾,这为后来拉瓦锡彻底推翻燃素说,建立氧化学说,打下了良好的基础。

1.2.3 氧化学说

1773年和1774年瑞典化学家舍勒与英国化学家普列斯特利分别在实验室中发现了氧,在此基础上,法国化学家拉瓦锡(1743~1794年)通过实验揭示了燃烧过程的实质,建立了燃烧的氧化学说,他在1771~1777年的6年中,做了大量的关于燃烧和焙燃的试验,通过对这些结果的综合归纳与分析,他发现燃烧并不是史塔尔所谓的分解反应,而恰恰相反,它是可燃物质跟空气的化合反应。他于1777年向巴黎科学院提交了一篇名为《燃烧概论》的研究报告,其要点为:①燃烧时放出热和光;②只有存在氧时,物质才能燃烧;③空气由两种成分组成,物质燃烧时吸收了空气中的氧,其增加的重量即为所吸收的氧气;④一般的可燃物燃烧后通常变为酸,氧是酸的基本组成元素,而金属煅烧后则形成了金属的氧化物。

氧化学说的建立,揭开了人们长期解释不清的火的神秘,从此近代化学便迅速地发展起来,并开始建立起现代的化学体系。它不仅是化学发展史上的一个重大突破,还为近代火灾与消防学提供了重要的理论基础。

1.2.4 现代燃烧理论的发展过程

法国化学家拉瓦锡提出燃烧是物质氧化的理论，即燃烧是一种氧化还原反应，但其放热、发光、发烟、伴有火焰等基本特征表明它不同于一般的氧化还原反应。自此以后，燃烧学理论便获得了快速发展。

19 世纪，随着当时的热化学和热力学的发展，人们也将燃烧看做一种热力学平衡体系，进而研究了燃烧过程中重要的平衡热力学特性，获得了燃烧热、绝热燃烧温度和燃烧产物平衡成分等重要燃烧特性与计算方法。20 世纪初，前苏联化学家谢苗诺夫和美国化学家刘易斯等人研究了燃烧的化学反应动力学机理，发现反应动力学是影响燃烧速率的重要因素，且燃烧反应中所产生的中间产物具有加速燃烧过程的作用，具有分支链式反应的特点。20 世纪 20 年代，前苏联科学家泽尔多维奇、弗兰克·卡梅涅茨基和美国的刘易斯等发现很多燃烧现象都是受化学反应动力学和传热传质等物理因素相互作用的影响，而且控制燃烧过程的主导因素往往是流动和传热传质，在此基础上，初步形成了燃烧理论，并研究了着火、熄灭、火焰传播，缓燃和爆震以及扩散火焰、预混火焰、层流燃烧、湍流燃烧、液滴燃烧及碳粒燃烧等基本燃烧过程和现象。20 世纪 40 年代到 50 年代，燃烧的研究在航空、航天技术领域得到了迅速的发展，并应用于喷气发动机、火箭等问题。而粘性流体力学和边界层理论也被用于着火、火焰稳定、燃烧振荡、层流燃烧及湍流燃烧等问题的定量分析。20 世纪 50 年代到 60 年代，冯·卡门（Von Karman）利用连续介质力学对燃烧现象进行研究，之后逐渐发展成反应流体力学。到了 20 世纪 70 年代初，随着计算机技术的发展，英国科学家斯波丁（Spalding）等人建立了计算燃烧学理论，提出了一系列流动、传热传质及燃烧的物理模型、数学模型和数值计算方法，并用于燃烧过程的定量计算与预测，将计算燃烧学与工程应用有机地结合起来。另外，美国哈佛大学的埃蒙斯（H. W. Emmons）教授也将质量守恒、动量守恒、能量守恒和化学反应原理运用到建筑火灾的研究领域中，开始了火灾过程和机理的研究。1985 年，英国学者庄斯戴尔（D. Drysdale）教授对此前 10 年间与室内火灾燃烧特性相关的研究成果进行了总结，出版了《火灾动力学》。20 世纪 70 年代中期以来，现代激光诊断技术的出现为燃烧现象的实验测量与分析提供了重要的手段，并用于燃烧过程中气体和颗粒的速度、温度和浓度等重要参数的测量，为深入研究燃烧现象及其规律提供了精确可靠的试验数据。

目前，燃烧学仍然是一门正在发展中的学科，其涉及的领域比较广泛，包括能源、航空航天、环境工程和火灾防治等多个领域，各方面都仍然存在许多有待解决的重大问题，例如高强度燃烧、流化床燃烧、催化燃烧、渗流燃烧、煤浆燃烧技术、燃烧污染物排放和控制、火灾发生机理与防治方法等。燃烧学的研究对国家的科技、经济、军事发展均具有重要意义，例如高效的燃烧技术、高能燃料的开发等对节能与环境保护具有重要意义，而对燃烧的发生、发展和熄灭规律的研究则对消防工程具有重要意义。

燃烧学是一门偏重于工程应用的学科，因此，即使是国际知名学者也很少能因此获得诺贝尔奖。迄今，国际上为了鼓励燃烧学者进行创新研究，专门设立了三大燃烧学奖项（也有人称之为燃烧界的诺贝尔奖），分别是 1958 年设立的刘易斯（Bernard Lewis）奖、伊格尔顿（Alfred Egerton）奖和 1990 年设立的泽尔多维奇（Zeldovich）奖，所有这些奖项都是每两年评选一次（见本书附录 1）。

1.3 燃烧学与消防工程专业的关系

用火之利，防火之害，这一对矛盾永远并生，互相依存。消防工程专业作为专门研究火灾防治技术的学科，必然需要掌握扎实的燃烧学理论基础。“燃烧学”是消防工程专业的其他专业课程，如“建筑防火设计原理”、“防排烟工程”、“火灾监控技术”、“火灾调查”、“阻燃材料与技术”等的前期基础课程。

首先，由于火灾是在时间和空间上失去控制的燃烧现象，因此，要科学地认识火灾、防治火灾、控制火灾，就必须掌握物质燃烧的基本理论和基本知识。学习燃烧学的相关知识，既可以了解各种物质的燃烧条件，为防止火灾的发生提供科学的依据；还可以掌握物质的爆炸规律与预防方法，掌握不同物质的燃烧特性、燃烧规律和灭火条件，了解不同燃烧现象的发生机理与控制手段，为制定有效合理的灭火方案，减少火灾损失提供良好的基础。而掌握描述燃烧过程的数理方程，是进一步学习火灾的数值模拟技术、研究火灾蔓延与烟气流动的数学模型的重要前提。另外，可燃物表面及空间火灾的发生与蔓延、火灾烟气及其毒害物质的生成与释放、阻燃新技术原理等消防工程学科的关键科学技术问题的解决，都离不开对物质燃烧机理的研究与科学认识。可见，“燃烧学”是消防工程专业的一门重要的专业基础课。

其次，与其他专业不同，消防工程专业的“燃烧学”课程侧重于研究火灾的发生、发展和熄灭的基础规律，以及防火、防爆和灭火的一般原理。其主要内容包括：燃烧的物理化学基础，着火和灭火的基本理论，可燃气体的预混燃烧及扩散燃烧，可燃液体的燃烧及固体的燃烧等方面。由于火灾燃烧现象受多种物理化学因素影响，因此，学习燃烧学还需要具有必要的流体力学、传热学、化学热力学与动力学的知识。另外，作为一门实验性很强的课程，很多燃烧或爆炸现象的规律和特征是根据实验归纳总结得到的，因此，在学习该课程时，还应注重实验现象的观察，并善于对燃烧现象和本质的分析与归纳。同时，在学习过程中，要善于理论联系实际，注重对相关燃烧及火灾案例的分析与思考，注重燃烧知识在消防工程中的实际应用。而作为一门年轻的学科，消防工程燃烧学还很不完善，很多方面还有待充实和发展，因此，在学习过程中还应注重了解国内外燃烧及火灾科学的发展现状及研究前沿，及时补充与完善。

复 习 题

1. 以火烧赤壁中“万事俱备，只欠东风”为例，分析燃烧蔓延的影响因素。请查阅文献，进行知识拓展阅读。
2. 结合新近火灾案例，思考案例中的燃烧特点，进一步说明学习“燃烧学”课程的重要性。