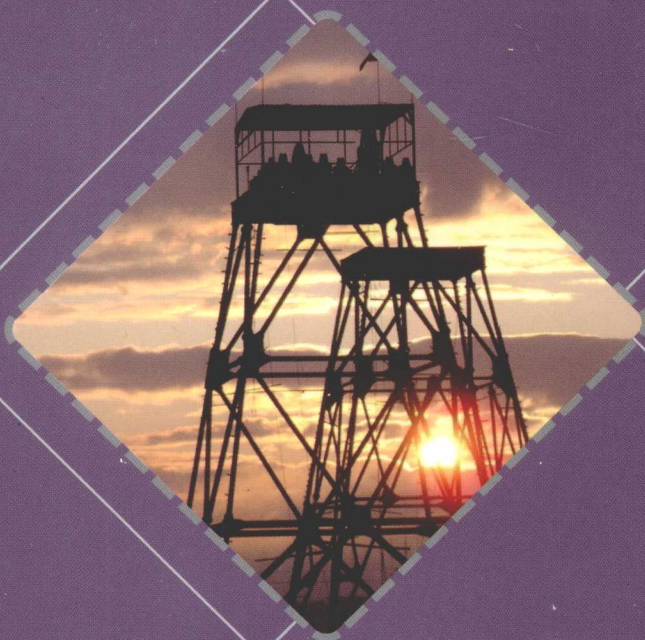


高等院校规划教材

防火防爆理论与技术

主 编 朱建芳



煤炭工业出版社

X932-43
02

· 014009758

高等院校规划教材

防火防爆理论与技术

主 编 朱建芳
副主编 齐黎明 何 宁 胡 洋
马 辉



X932-43

02

煤炭工业出版社

· 北 京 ·



北航

C1695973

图书在版编目 (CIP) 数据

防火防爆理论与技术/朱建芳主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2013

高等院校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4165 - 6

I. ①防… II. ①朱… III. ①防火—高等学校—教材
②防爆—高等学校—教材 IV. ①X932

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 000079 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 19³/₄

字数 465 千字 印数 1—3 000

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

社内编号 6988 定价 32.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

827000110 .

内 容 提 要

结合我国目前安全生产的现状,本书系统地介绍了火灾爆炸的基本理论和防控技术知识。全书共 11 章,包括火灾爆炸基本理论、燃烧学基本理论、着火理论、可燃气体燃烧与爆炸、可燃液体燃烧与爆炸、可燃固体燃烧与爆炸、建筑防火、电气防火防爆、灭火技术、物理爆炸预防与控制、火灾爆炸监测监控等内容,并将燃烧爆炸基本理论与火灾爆炸预防技术进行了有机的整合。

本书适合高等院校安全工程专业及相关专业本科教学之用,也可以作为从事安全工程技术及安全管理相关人员的参考书。

前 言

火灾和爆炸是各行各业常见的事故类型,涉及范围非常广泛。它们不但出现在各行业的生产过程中,也可能出现在人们的日常生活中,所以防火防爆对于安全生产具有普遍意义。火灾和爆炸事故的发生不仅造成直接的人员伤亡和财产损失,往往还会造成继发灾害,引起触电、坍塌等伤害。近年来我国的火灾爆炸事故持续频发,给人们的生命财产造成了重大损失。防止火灾爆炸事故的发生和降低事故的影响已成为安全科技工作者的迫切任务。

该书内容体系按照“基本理论→着火理论→三种相态物质的燃烧爆炸→火灾爆炸的预防控制”一条主线,构成三大模块,即防火防爆基础理论模块、三相态物质燃烧爆炸理论模块和工程实践模块。各部分再分别展开即成为完整的体系内容。其中防火防爆基础理论模块包括两部分内容,一部分是通用基础理论模块,主要内容是三大守恒定律中涉及燃烧爆炸内容的部分,如热力学基础、化学动力学基础、其他物理化学基础;另一部分是着火燃烧的基础理论,主要有谢苗诺夫热自燃理论、弗兰克—卡门涅茨基热自燃理论、链锁自燃理论、强迫着火理论、阿累尼乌斯定律等。三相态物质燃烧爆炸理论模块主要是考虑可燃气体、可燃液体和可燃固体的燃爆过程及特点,分别介绍三种相态物质的燃烧和爆炸理论,主要内容包括可燃气体燃爆理论,如层流预混燃烧火焰传播、湍流燃烧理论及模型、可燃气体爆炸、爆炸极限理论、爆轰、气体爆炸预防;可燃液体燃爆理论,如液体燃烧特点、液体蒸发燃烧、闪燃、爆炸温度极限、液体火灾的蔓延和储罐火灾等;可燃固体燃爆理论,如固体燃烧理论、固体阴燃、粉尘爆炸和炸药爆炸等。工程实践模块主要针对不同行业或特定的情形下火灾和爆炸的特点,从火灾爆炸预防及控制的角度介绍建筑防火、电气防火、灭火等方面的理论与实践,并介绍了另一种爆炸类型——物理爆炸的相关知识。以上内容构成了完整的防火防爆理论与技术体系。

本书由朱建芳担任主编,齐黎明、何宁、胡洋和马辉担任副主编,第一章由朱建芳和高文蛟共同编写,第二章和第十章由何宁编写,第三章和第四章由齐黎明编写,第五章和第六章由胡洋编写,第七章和第九章由马辉编写,第八章由朱建芳编写,第十一章由王轶波编写,全书由朱建芳统稿。

本书在编写过程中参阅了大量的文献资料，在此谨对原作者表示最诚挚的谢意。本书得到了教育部本科教学工程——专业综合改革试点（华北科技学院安全工程专业）资助，在此表示感谢！

由于编者水平有限，书中疏漏和错误在所难免，敬请读者不吝赐教。

编 者

2013 年 4 月

目 次

第一章 火灾爆炸基本理论.....	1
第一节 概述.....	1
第二节 燃烧的学说与理论.....	5
第三节 火灾基本知识	15
第四节 爆炸的基本知识	29
第二章 燃烧学基本理论	37
第一节 化学热力学基础	37
第二节 化学动力学基础	48
第三节 燃烧物理学基本方程	67
第三章 着火理论	83
第一节 谢苗诺夫热自燃理论	83
第二节 弗兰克—卡门涅茨基热自燃理论	88
第三节 连锁自燃理论	91
第四节 强迫着火理论	94
第五节 阿累尼乌斯定律	97
第四章 可燃气体燃烧与爆炸	98
第一节 层流预混燃烧火焰传播	98
第二节 湍流燃烧与扩散燃烧.....	106
第三节 可燃气体爆炸.....	109
第四节 爆炸极限理论及计算.....	112
第五节 爆炸.....	117
第六节 气体爆炸预防.....	120
第五章 可燃液体燃烧与爆炸.....	123
第一节 液体燃料的燃烧特性及种类.....	123
第二节 液体燃料的蒸发.....	124
第三节 闪燃与爆炸温度极限.....	130
第四节 液体燃料的火灾蔓延.....	135
第五节 油罐火灾燃烧.....	139

第六章 可燃固体燃烧与爆炸	145
第一节 固体燃烧概述	145
第二节 几类典型固体的燃烧	148
第三节 固态可燃物的火灾蔓延	156
第四节 固体可燃物的阴燃	160
第五节 炸药爆炸	161
第六节 粉尘爆炸	190
第七章 建筑防火	194
第一节 建筑构件的耐火性能	194
第二节 建筑物耐火等级及耐火材料的选择	201
第三节 防火分区和防烟分区	209
第四节 安全疏散	221
第五节 灭火装置及其配置	230
第八章 电气防火防爆	239
第一节 电气火灾与爆炸的引发原因	239
第二节 电气线路的防火防爆	241
第三节 常用电气设备的防火技术	243
第四节 电气火灾爆炸危险场所	247
第九章 灭火技术	254
第一节 灭火的基本原理与分类	254
第二节 水及水系灭火技术	256
第三节 气体灭火技术	260
第四节 气溶胶灭火技术	264
第五节 泡沫灭火技术	266
第六节 干粉灭火技术	268
第十章 物理爆炸预防与控制	271
第一节 物理爆炸	271
第二节 水蒸气爆炸和锅炉爆炸	273
第三节 低温液化气蒸气爆炸	274
第四节 压力液化气体蒸气爆炸	278
第五节 锅炉爆炸	286
第十一章 火灾爆炸监测监控	290
第一节 燃爆气体传感器	290

第二节 火灾探测与报警系统.....	295
参考文献.....	305

第一章 火灾爆炸基本理论

火的使用结束了人类茹毛饮血的原始生活方式，促进了工业文明的发展，用火已成为人类生活和生产不可或缺的重要方面。但是，火在给人类生活生产带来便利的同时，由火引起的火灾和爆炸更是给人类带来了灾难。火灾不仅会造成大量财物或财产的毁坏，而且会危及人们的生命。

第一节 概 述

一、火灾和爆炸的特点

火灾和爆炸都是常见的事故类型，涉及范围非常广泛。它们不但出现在各行各业的生产过程中，也可能出现在人们的日常生活中。火灾和爆炸事故的发生不仅造成直接的人员伤亡和财产损失，往往还会造成继发灾害，引起触电、坍塌等伤害。与其他事故类型相比，火灾和爆炸事故的特点可以归纳为事故后果严重性、事发突然性、原因多样性、灾害状况复杂性、灾害连锁性以及事故人为性等。

1. 事故后果严重性

火灾和爆炸事故的后果往往比较严重，容易造成重大人员伤亡和财产损失。例如，1994年12月8日的新疆克拉玛依市友谊宾馆在进行文艺演出时发生火灾，造成325人死亡，其中小学生288人，烧伤130人，其中重伤68人，直接经济损失100万元。2000年12月15日河南省洛阳东都商厦发生特大火灾事故，造成309人中毒窒息死亡，直接经济损失275万元。2005年2月14日辽宁省阜新矿业（集团）有限责任公司孙家湾煤矿海州立井发生特大瓦斯爆炸事故，造成214人死亡，30人受伤，直接经济损失4968.9万元。2003年10月24日宁夏回族自治区宁煤集团白芨沟煤矿南二2421（一）综放工作面采空区发生瓦斯爆炸，并在持续百余次爆炸后，采煤工作面支架多处出现明火，在封闭火区过程中，又多次发生瓦斯爆炸。由于采取了立即停电撤人的果断措施，没有造成人员死亡。灾后恢复生产时，宁煤集团上报的事故经济损失约1.5亿元。综上所述可以看出火灾和爆炸事故的后果非常严重。

2. 事发突然性

很多火灾爆炸事故是在人们生产、生活的场所内突然发生，且事发的时间和地点有着很大的偶然性，人们往往始料未及。同时灾害事故的发展迅速，来势凶猛，可波及的区域很广，进一步扩展方向的随机性大，能够在很短的时间内产生很大的破坏作用。尤其是爆炸事故的瞬时性更强，往往在几秒钟内就完成了破坏过程。因此，人们要保护自身及财产的安全，就必须要在没有多少精神准备的条件下，对发生的灾害做出快速的反应。一旦反应迟缓或判断失误，就难免会遭受重大损失。

3. 原因多样性

发生火灾和爆炸事故的原因往往比较复杂。例如，发生火灾和爆炸事故的条件之一着火源，就有明火、化学反应热、物质的分解自燃、热辐射、高温表面、撞击或摩擦、绝热压缩、电气火花、静电放电、雷电和日光照射等多种。至于另一个条件可燃物就更多了。各种可燃气体、可燃液体和可燃固体种类繁多，特别是化工企业的原材料、化学反应的中间产物和化工产品，大多属于可燃物质。加上发生火灾爆炸事故后，由于房屋倒塌、设备炸毁、人员伤亡等，也给事故原因的调查分析带来了不少困难。

4. 灾害状况复杂性

由于发生火灾爆炸的建筑物不同、可燃物质与火源的多样性、人员的复杂性、消防基础条件的不同，使得这些灾害的发生、发展状况存在很大的差别。实际上没有哪两次建筑火灾的状况是完全相同的。比如，化工生产过程的事故爆炸和煤矿瓦斯爆炸的发展过程与危害形式存在着很大差异。再如，矿山井下火灾的火势发展与井下通风系统互相影响，并且煤矿井下还存在易爆的可燃气体——瓦斯，一旦处理失误就会造成瓦斯爆炸。因此预防控制火灾爆炸事故必须密切结合行业的特点进行。

5. 灾害连锁性

灾害的连锁性是指一种灾害的发生后又可以引起其他灾害的发生。火灾和爆炸本身就是两种密切相关的灾害，爆炸产生的高温为火灾的发生提供了引火源，火灾产生的不完全可燃气体或造成的可燃气体泄漏可以为爆炸提供可燃物，两者可以互为助长，形成连锁灾害。并且火灾或爆炸造成电气设备或线路的绝缘破坏可以造成人员触电。火灾或爆炸造成的建筑物支撑强度下降可引起坍塌事故。其他事故造成的短路也有可能为火灾或爆炸提供引火源。

6. 事故人为性

火灾爆炸事故除少数由自然灾害如雷击和火山喷发等引起外，大部分事故的发生是由于人类在生产和生活中的失误或疏忽大意直接造成的。例如，我国 2000—2008 年发生的重特大火灾事故中，生活用火不慎、玩火、放火和吸烟四项直接人为原因就占到了总数的 36%；另外其他的原因也大部分都是由于人为因素造成的。因此，在讨论火灾爆炸的预防控制时，除了要重视物的因素外，还必须重视分析人的作用，需要研究人为引发事故的规律、人在灾害过程中的行为特点、人在控制灾害过程中的作用等。需要进行必要的教育培训，提高相关人员的安全意识和技能，并运用一定的安全管理规定和措施来规范人的行为。

二、火灾爆炸的主要危害

1. 火灾危害

火灾的发生能造成非常重大的人员伤亡和财产损失，其对人身造成的危害后果主要由以下因素引起。

1) 高温

火灾作为一种燃烧反应会产生大量的热，这些热量通过对流、传导和辐射的方式加热燃烧产物和周围气体，使得环境温度快速升高。高温不仅可能使心率加快，人体大量出汗，很快出现疲劳和脱水现象，影响人员自救和疏散，并且高温会直接把人烧伤烧死。

2) 烟雾

烟雾是物质在燃烧反应过程中生成的含有气态、液态和固态物质与空气的混合物。通常它由极小的炭黑粒子完全燃烧或不完全燃烧产物、水分以及可燃物的燃烧分解产物所组成。烟雾的危害主要是它们本身的毒害作用造成人员窒息。另外，人在烟雾环境中的能见度会降低，影响人员疏散逃离。再就是人在烟雾中，心理极不稳定，会产生恐怖感，使人的判断力下降，也容易造成自救和逃生失误。

3) 有毒有害气体

火灾时由于可燃物的燃烧会产生大量的有毒有害气体，这些气体中除水蒸气外其他大部分对人体有害，能造成人员中毒或窒息。如 CO 、 SO_2 、 P_2O_5 、 HCl 、 NO 、 NO_2 等。并且火灾发生时，由于燃烧要消耗大量的氧气，使空气中的氧浓度显著下降，人长时间在这种低氧的环境中，就会造成呼吸障碍、失去理智、痉挛、脸色发青，甚至窒息死亡。建筑物内当火灾燃烧旺盛时，还会产生大量的二氧化碳，当人员接触 10% ~ 20% 浓度的二氧化碳后，会引起头晕、昏迷、呼吸困难，甚至神经中枢系统出现麻痹，使人失去知觉，导致死亡。另外，还会产生一些对人体有较强刺激作用的气体，让人无法看清方向，本来很熟悉的环境也会变得无法辨认其疏散路线和出口。

4) 引起爆炸或其他事故

发生火灾后，特别是工业生产中的火灾往往可能造成易燃易爆气体的泄漏，一旦这些泄漏的气体达到它们的爆炸极限就会发生爆炸。特别是在一些封闭空间中的火灾，在水灭火过程中会产生水煤气，达到爆炸极限也会爆炸。另外，由于火灾会造成建筑物或设备的结构破坏，使它们的支撑能力下降，也可能造成坍塌、触电等其他事故。

2. 爆炸危害

与火灾相比，除了火灾的危害后果存在外，爆炸事故还有它自己的特殊危害，这些危害造成的后果相较火灾更甚。

1) 冲击波

爆炸形成的高温、高压、高能量密度的气体产物，以极高的速度向周围膨胀，强烈压缩周围的静止空气，使其压力、密度和温度突跃升高，像活塞运动一样推向前进，产生波状气压向四周扩散冲击。这种冲击波能造成附近建筑物的破坏，其破坏程度与冲击波能量的大小有关，与建筑物的坚固程度及其与产生冲击波的中心距离有关。

2) 碎片冲击

爆炸的机械破坏效应会使容器、设备、装置以及建筑材料等的碎片在相当大的范围内飞散而造成伤害。碎片的四处飞散距离一般可达 100 ~ 500 m。

3) 震荡作用

爆炸发生时，特别是较猛烈的爆炸往往会引起短暂的地震波。例如，某市的亚麻厂发生麻尘爆炸时，有连续三次爆炸，结果在该市地震局的地震检测仪上，记录了在 7 s 之内的曲线上出现有三次高峰。在爆炸波及的范围内，这种地震波会造成建筑物的震荡、开裂、松散、倒塌等危害。

4) 造成二次事故

发生爆炸时，如果车间、库房（如制氢车间、汽油库或其他建筑物）里存放有可燃物，会造成火灾；高空作业人员受冲击波或震荡作用，会造成高处坠落事故；粉尘作业场

所轻微的爆炸冲击波会使积存于地面上的粉尘扬起，造成更大范围的二次爆炸。

三、火灾爆炸的主要原因

如前所述，火灾和爆炸事故的原因具有复杂性。不过生产过程中发生的工伤事故主要是由于操作失误，设备的缺陷，环境和物料的不安全状态，管理不善等引起的。因此，火灾和爆炸事故的主要原因基本上可以从人、设备、物料、环境和管理等方面加以分析。

1. 人为因素

通过对大量火灾与爆炸事故的调查和分析表明，有不少事故是由于操作者缺乏有关的科学知识，在火灾与爆炸险情面前思想麻痹，存在侥幸心理，不负责任，违章作业等引起的。在事故发生之前漫不经心，事故发生时则惊慌失措。

2. 设备的原因

如设计错误且不符合防火或防爆的要求，选材不当或设备上缺乏必要的安全防护装置，密闭不良，制造工艺的缺陷等。

3. 物料的原因

例如可燃物质的自燃，各种危险物品的相互作用，在运输装卸时受剧烈震动撞击等。

4. 环境的原因

如潮湿、高温、通风不良、雷击等。

5. 管理的原因

规章制度不健全，没有合理的安全操作规程，没有设备的计划检修制度；生产用窑、炉、干燥器以及通风、采暖、照明设备等失修；生产管理人员不重视安全，不重视宣传教育和安全培训等。

在火灾统计中，将火灾原因分为以下几类：电气、生产作业、放火、生活用火不当、玩火、吸烟、自燃、其他原因。

四、火灾与爆炸的关系

燃烧和化学性爆炸就其本质来说是相同的，都是可燃物质的氧化反应，而它们的主要区别在于氧化反应速度不同。例如，1 kg 整块煤完全燃烧时需要 10 min，而 1 kg 煤气与空气混合发生爆炸时，只需 0.2 s，两者的燃烧热值都在 2931 kJ 左右。

通过以上比较可以清楚地看出，燃烧和爆炸的区别不在于物质所含燃烧热的大小，而在于物质燃烧的速度。燃烧速度（即氧化速度）越快，燃烧热的释放越快，所产生的破坏力也越大。根据功率与做功时间成反比的关系，可以计算出一块含热量 2931 kJ 的煤块燃烧时发出的功率为 47.8 kW，含同样热量的煤气燃烧时发出的功率为 1.47×10^5 kW。功率大，则做功的本领大，破坏力也就大。

由于燃烧和化学性爆炸的主要区别在于物质的燃烧速度，所以火灾和爆炸的发展过程有显著的不同。火灾有初起阶段、发展阶段和衰弱熄灭阶段等过程，造成的损失随着时间的延续而加重，因此，一旦发生火灾，如能尽快地进行扑救，即可减少损失。化学性爆炸实质上是瞬间的燃烧，通常在 1s 之内爆炸过程已经完成。由于爆炸威力所造成的人员伤亡、设备毁坏和厂房倒塌等巨大损失均发生于顷刻之间，猝不及防，因此爆炸一旦发生，损失已无从减免。

燃烧和化学性爆炸还存在这样的关系，即两者可随条件而转化。同一物质在一种条件下可以燃烧，在另一种条件下可以爆炸。例如，煤块只能缓慢地燃烧，如果将它磨成煤粉，再与空气混合后就可能爆炸，这也说明了燃烧和化学性爆炸在实质上是相同的。

由于燃烧和化学性爆炸可以随条件而转化，所以生产过程发生的这类事故，有些是先爆炸后着火，例如油罐、电石库或乙炔发生器爆炸之后，接着往往是一场大火；而在某些情况下是先火灾而后爆炸，例如抽空的油槽在着火时，可燃蒸气不断消耗，而又不能及时补充较多的可燃蒸气，因而浓度不断下降，当蒸气浓度下降进入爆炸极限范围时则发生爆炸。

第二节 燃烧的学说与理论

一、燃素学说

物质燃烧现象是古代和近代化学的重要研究对象。古代哲学家把火看做是宇宙的“本原”；炼金家和医药化学家则视火为构成万物的“要素”；化学一度被称为“火术”。当时已知的化学反应大都与燃烧现象有关。特别是到了17世纪中叶以后，随着资本主义生产的发展，金属冶炼、燃烧及其他高温反应都迫切需要对燃烧现象做出理论上的解释，所以建立燃烧理论已成为整个化学发展的中心课题。

在这种形势下，首先出现了错误的燃素学说，并统治化学界达百年之久。随后由于气体化学的成就而被推翻，建立了科学的氧化学说，使化学第一次有了关于化学反应的理论。至此化学不仅在元素概念和物质组成上，而且在化学反应上确立了科学体系，奠定了近代化学的最后基石。

1. 燃素学说的统治

处于17世纪中叶的化学，虽然波义耳已从理论上阐明了元素的概念，然而在实际上，人们还难以辨别究竟什么是元素；医药化学家的“三要素”说仍在起着作用，并为燃素学说的产生提供了思想基础。

1669年曾经随同波义耳研究过燃烧现象的德国化学家贝歇尔（J. J. Becher, 1635—1682）提出了燃素学说的基本思想。他在《土质物理学》一书中提到，气、水、土虽然都是元素，但作用并不相同：气不能参加化学反应，水仅仅表现为一种确定的性质，而土才是造成化合物千差万别的根源。他认为土有油状土、流质土、石状土三类，分别相当于硫、汞、盐“三要素”。他还认为一切可燃物均含有硫的“油状土”，并在燃烧过程中放出，依此来解释燃烧现象。

1703年，贝歇尔的学生（Scheele）斯塔尔对他老师的思想加以补充和发展，提出了一个比较完整的燃烧理论，称之为燃素学说。他认为，“油状土”并非是“硫要素”所代表的可燃性，而是一种实在的物质元素，即“油质元素”或“硫质元素”，他把这种元素命名为“燃素”。据此他提出：一切可燃物均含有燃素，可燃物是由燃素和灰渣构成的化合物，燃烧时分解，放出燃素，留下灰渣。燃素和灰渣结合又可复原为可燃物。他依此来解释一切燃烧现象以至所有的化学变化，例如金属燃烧，逸去燃素而留下灰渣；灰渣同富有燃素的木炭共热，又还原为金属，金属溶于酸，则放出燃素（氢气），而留下灰渣

(盐)，等等。这种理论曾足以说明当时所知道的大多数化学现象，这就使斯塔尔深信，燃素为一切化学变化的根本，化学反应为燃素作用之种种表现，因此燃素学说已不只是燃烧理论，而且已扩展为整个化学反应过程的普遍理论了。

应当看到，燃素学说并不是一个正确的科学假说。作为这一学说核心的燃素，是一个假想的、并不存在的“物质”，而对燃烧过程的解释则是本末倒置的。它把金属煅烧同氧结合的过程，看做是金属分解和放出燃素的过程；把金属看成是燃素和灰渣结合成的化合物，而把灰渣却当成了元素，“真实的关系被颠倒了，映象被当做了原形”。显然，燃素学说是经受不住长期实践考验的。

燃素学说的错误随着化学的发展而日益明显暴露出来。既然燃素是一种物质，为什么无人发现过它？特别是，为什么金属燃烧放出燃素之后剩下的灰渣反而更重了？这使燃素学说陷入了无法解脱的困境。1750年著名燃素论者文耐尔（G. Venel, 1723—1775）认为是由于燃素具有反常的“负重量的轻浮性”的缘故。所以燃素并不被吸向地球的中心，而是倾向于上升，从而使金属在放出燃素后的重量增加了。这就把燃素看成是一种不遵守物理规律的神秘东西，实际上是把它看成了早在1540年化学家毕林古乔（V. Biringuccio, 1480—1530）提出的物质中的“灵气”，因而当物质一旦失去后就会像“完全死了的东西一样倒下来，因而变得加重了”。但是，为什么有机物燃烧失去燃素后的重量却反而又减轻了呢？燃素究竟是具有“负重量”还是“正重量”呢？燃素论者就很难自圆其说了。

可以看出，当化学处于幼稚阶段，只需要从质上定性地考察化学变化时，燃素学说还可以说得过去。但是，当化学发展到较高阶段，不仅需要从质上而且还需要从量上加以考察时，燃素学说就显得无能为力而漏洞百出了。

但是，也应看到，燃素学说的错误毕竟同带有宗教神秘色彩的炼金术理论的错误不同，它是在科学实验基础上产生的一种相对错误的学说，是基于正确事实提出的不正确的观念，是比古代哲学家的臆测性、炼金家的宗教性和医药化学家半神秘性的理论要切实得多和进步得多。正因为如此，即使它并非是正确的，然而它的出现却积极推动了化学的发展，应当说，是一个“可用的假说”。它只是到了后期才推迟了化学的进步，妨碍许多优秀的研究者看到他们发现的事实的正确解释，成了一种保守的理论。然而，燃素理论的失败，并非由于它的内在不合逻辑性；相反，它的“燃素的放出与吸入”的逻辑方法，对于化学家研究化学过程的思考也是不无益处的，因此有的科学史家认为，燃素说已为化学方法论打下了基础。虽然在这一学说上的建筑已成废墟，然而我们今天的化学建设却是以它为借鉴进行的。

2. 气体化学的突破

燃素学说的被推翻是以气体化学的突破为线索的。气体化学的成就是建立新的科学的燃烧理论的基础。

人们早在17世纪中叶就开始了了对气体的研究。海尔蒙特提出了气体的概念，并研究过不驯服的野气（二氧化碳）和可燃的油气。波义耳可能是第一个收集过气体的人。

1755年苏格兰化学家布拉克（J. Black, 1728—1799）发表了题为《关于白镁石、生石灰和其他碱性物质的实验》的论文，指出加热白镁石或石灰石可以得到一种具有重量的气体；它不同于一般空气，可以和碱性物质相结合而被固定，由此称为“固定空气”。

他还指出石灰石加热放出“固定空气”后失重约44%，生石灰吸收“固定空气”变成石灰石后增重约44%，失重相等于增重。他还研究了“固定空气”，发现其具有不助燃和可使动物窒息等性质；并证明在空气、天然水和一些盐类（碳酸盐）中都含有“固定空气”等；这就说明“固定空气”确是一种不同于普通空气的新发现气体。

这一发现，从根本上改变了人们对于气体的认识，具有重要意义。第一，它表明气体也像液体和固体一样是实物，也可以同固体物质结合成新物质，并成为其组成部分。因此气体并无任何神秘之处，从而推翻了海尔蒙特关于气体不能参加化学反应的结论，开辟了气体化学研究的新领域；第二，它表明气体并非只具有一种，同液体和固体一样，也具有多样性，由此引起了人们对于气体研究的兴趣；第三，它表明石灰石燃烧重量的变化仅由固定空气引起，而与燃素无关，从而在燃烧过程中第一次排除了燃素的地位，给予了燃素说以有力的冲击。

然而遗憾的是，布拉克本人并未理解他的重要发现的全部意义，他一贯比较重实验而轻理论，行动谨小慎微，未敢在新发现的事实基础上提出新的科学假说。即使在已经证明了燃素学说的错误时，对于氧化说和燃素说的争论也不置可否，而是谨慎地表示中立。这些表现使他未能成为一个具有更大贡献的化学理论家。

1766年，英国化学家凯文迪旭（H. Cavendish, 1731—1810）发表了一篇题为《论人工空气》的论文，认为各种空气都可以用人工的方法从它所存在的物质中提取出来。他发现，锌、铁、锡等金属和稀硫酸作用都可以得到一种可燃的气体，即氢气。由于“不管用什么样的酸来溶解具有相同重量的某种金属时都会产生相同重量的同样气体”，使他误认为氢气是来自金属而不是来自酸，由此把氢气命名为“来自金属”的“易燃空气”。这种错误看法曾一直延续到19世纪初。不仅如此，由于受到燃素学说的束缚，他甚至认为“易燃空气”本身就是“燃素”，他以为当金属在酸中溶解时“所含的燃素便释放出来，形成了易燃空气”。特别是当它被充入气球后会使得气球远离地面而向上飘浮，似乎显示了所具有的“负重量”性质。后来，由于他本人精确测出了氢气的比重，并认清了空气浮力的实质后才否定了自己的看法。凯文迪旭则研究了氢气的多种制法、物理性质、化学性质确定了同空气产生爆鸣的体积比例，从而确认它是一种不同于普通空气的新气体。因此他被公认是氢气的发现人，然而遗憾的是他并未能理解到这一发现的真正意义。

1772年，苏格兰的医生、化学家、布拉克的学生卢瑟福（D. Rutherford, 1749—1819），依照布拉克的建议研究了物质在空气中燃烧后剩余气体的性质。由于他是一位医生，为了得到这种气体，他先用老鼠放在密闭容器中呼吸直至死亡，发现空气体积减少 $\frac{1}{10}$ ，用碱液吸收后体积又减少 $\frac{1}{11}$ ，而剩余气体仍可使蜡烛燃烧，再加入磷燃烧后所得到的剩余气体已无助燃性质了。他把这部分气体称为“毒气”或“浊气”，即氮气，并在一篇题为《固定空气和浊气导论》的论文中发表了这一成果。与此同时，凯文迪旭等人也先后发现了氮气，然而均未及时公布。

氮气的发现对于人们认识空气的组成和本质，揭示物质燃烧的奥秘具有重要意义。然而卢瑟福由于受到燃素说的影响，还未认识到氮是一种元素，是空气的一个组成部分，而只认为是“被燃烧物质吸去燃素后的空气”。

氧气的发现对于推翻燃素说具有着决定性的意义。它最早由瑞典化学家舍勒（C. W. Scheele, 1742—1786）所发现。他在硝石的加热中得到了一种气体，能强烈地助

燃，使点燃的蜡烛发出了耀眼的光芒。他还在硝酸镁、硝酸汞、氧化汞等物质的加热中也制得了这种气体。他认为这就是存在于空气中的“火空气”。随后他写出论文《关于空气与火的化学》，宣告了氧气的发现。然而由于印刷的拖延，直到1777年才得以公开发表。舍勒虽然最早发现了氧，但是并未能认识燃烧的本质，并错把燃烧看成是“火空气”与燃素的结合，从而失去了一次发现真理的机会。

稍后不久，英国化学家普利斯特列（J. Priestley, 1733—1804）也独立发现了氧气，时间虽较舍勒为晚，然而早在1774年就公开发表了成果，最早产生了重大的实际影响。普利斯特列原修神学，后任牧师，撰写过多部神学著作，然而并未学过化学。在38岁以后由于业余爱好而研究化学，并相继发现了氧气、氧化氮、一氧化碳、二氧化硫、氯化氢和氨气等多种气体，被誉为“气体化学之父”，成了一位杰出的化学实验家。当他得知布拉克发现“固定空气”之后深受启发，也很想研究一下存在于各种固体物质中的不同“空气”。1774年，他的朋友送给他一个很大的凸透镜，于是他便以此为工具加热所保存的各种固体物质，以求驱赶出存在于其中的各种“空气”。当他加热红色的三仙丹（氧化汞）时，看到从中放出了大量气体。经研究发现它具有助燃性和有益于动物呼吸的性质，此外，阳光照射下的绿色植物也能放出这种气体。他由于受到燃素学说的束缚，把这种气体称为“脱燃素空气”，即氧气。这样，普利斯特列同舍勒一样，也并未能认识氧气在燃烧过程中的作用。

氧气的发现在化学发展中占有相当重要的地位。日本著名化学史家山冈望认为，“这是18世纪末到19世纪初建设化学大厦的一块坚固的基石”。如果当时尚未发现，“则要建成化学的殿堂就还不知要推迟几十年”。因此，科学史家贝尔纳把氧气的发现誉为是“化学中气体革命的极点”。这就是说，如果认为气体化学的每一个成就都是建立新的科学燃烧理论链条的一个环的话，那么，氧气的发现就是这一链条中的最后一环，是气体化学中的最大突破。

二、燃烧的氧学说

气体化学的成就和定量方法的应用，从化学科学内部不断地冲击着陈旧的燃素学说。而在18世纪后期以英国为主要舞台的工业革命和以法国为主要舞台的资产阶级民主革命，由于促使西欧社会彻底摆脱了僵硬的中世纪封建躯壳，从而推动整个自然科学进入了一个前所未有的发展时期。这就又在化学科学外部提供了推翻燃素学说建立科学燃烧理论的条件。所有这些因素综合在一起，就使得化学家能够把从气体性质中推导出来的物理概念应用到传统的化学中去，建立了新的氧化学说，实现了一场深刻的化学革命。这样，化学也就从传统的经验技术性的学科转变为一门像力学一样的，可以用数学进行定量计算的科学了。

燃烧过程的本质是什么？这个长期未解的化学奥秘终于被杰出的法国化学家拉瓦锡（1743—1794）所揭示。1768年，年仅25岁的拉瓦锡就因对天然水的卓越研究而当选为法国科学院院士。但是，他的大部分时间还是从事包税人和兵工厂经理等社会行政工作，只是靠业余时间坚持化学研究。1772年他开始研究燃烧问题。他发现金刚石燃烧后竟变得无影无踪，由此想到燃烧可能是物质同空气的结合。他又全面考察了18世纪以来的气体化学成果，特别是布拉克“固定空气”的发现，使他深感定量方法的重要。为此，他