

燃气燃烧与瓦斯爆炸

(原著第三版)

[美] 伯纳德·刘易斯 著
京特·冯·埃尔贝
王 方 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2006-3824 号

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气燃烧与瓦斯爆炸：(原著第三版) / (美) 刘易斯，
埃尔贝著；王方译. —北京：中国建筑工业出版社，2010.9
ISBN 978-7-112-12411-4

I. ①燃… II. ①刘…②埃…③王… III. ①可燃气体-燃烧②瓦斯爆炸 IV. ①TQ038.1②TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 168961 号

This third edition of Combustion, Flame and Explosion of Gases by Bernard Lewis & Guenther von Elbe is published by arrangement with ELSEVIER INC, 525 B Street, Suite 1900, San Diego, CA 92101-4495

The moral right of the authors has been asserted

Translation Copyright © 2006 China Architecture & Building Press

本书由美国 ELSEVIER 出版公司授权翻译出版

责任编辑：胡明安 程素荣

责任校对：赵 颖

燃气燃烧与瓦斯爆炸 (原著第三版)

[美] 伯纳德·刘易斯 著
京特·冯·埃尔贝
王 方 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：42¼ 字数：1015 千字

2010 年 9 月第一版 2010 年 9 月第一次印刷

定价：98.00 元

ISBN 978-7-112-12411-4

(19658)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

(邮政编码 100037)

纪念伯纳德·刘易斯 (1899~1993 年)

伯纳德·刘易斯 (Bernard Lewis) 博士, 因长期患病, 于 1993 年 5 月 23 日上午 7 时 15 分在美国宾夕法尼亚州匹兹堡市 (Pittsburgh, Pennsylvania) 逝世, 享年 94 岁。他在患病期间得到了他的妻子 Eunice Norton 和他的儿子 Norton 的精心照料。伯纳德·刘易斯是国际燃烧学会的创立者, 是从理论和实验方面进行研究的先驱, 同时他还是音乐家、美术家、年轻人的良师和我们许多人的益友。

伯纳德·刘易斯博士于 1899 年 11 月 1 日生于英国伦敦, 早年随其父母移居美国, 最初的职业是音乐厅的钢琴演奏家。早在上大学以前, 他曾把全部精力都投入到练琴中, 但当他认识到做音乐教师将是一种面对一些不情愿于枯燥练琴的学生时, 他放弃了音乐这一行。他通过自学, 于 1919 年考入麻省理工学院 (MIT), 四年后获得化学工程学士学位, 紧跟着于 1924 年获哈佛 (Harvard) 大学物理化学硕士学位, 而后他返回英国, 并于 1926 年在剑桥 (Cambridge) 大学获物理化学博士学位。在剑桥的最后一年里, 他曾担任剑桥的示范演讲员, 剑桥大学在 1953 年授予他荣誉科学博士称号。1926~1928 年, 他被美国国家科学院派到明尼苏达 (Minnesota) 大学进行研究工作, 1928~1929 年, 他作为客座研究人员在柏林大学进行研究工作, 在此期间, 他与京特·冯·埃尔贝 (Guenther von Elbe) 一起成为科学史上较多产的科研搭档, 成果与著述具丰。1929 年, 刘易斯博士以一位物理化学家的身份, 加盟于设置在宾夕法尼亚州匹兹堡市的美国资源局 (U. S. Bureau of Mines)。1946 年, 刘易斯博士成为炸药研究领域的首席研究员。1950 年, 由于学科划分的调整, 他成为化学工程师, 后成为炸药和物理科学领域首席研究员, 在这一岗位上他指导有关燃烧、火焰、爆炸和炸药的研究。这一研究范围极广, 包括在布鲁斯顿 (Bruceton) 的资源局实验矿进行的火灾实验研究、在实验室里的火灾实验研究、火灾理论研究、气体和粉尘爆炸, 以及静电火花点燃理论等。

最初开展火花点燃研究的主要目的是为了更好地了解燃烧现象, 但是它很快就被用于消除操作室的爆炸, 导致了最低点燃能、熄灭距离和过余焓概念的产生。他选择这一主题, 作为他在第四届国际燃烧会议 (1952 年 9 月在麻省理工学院召开) 的引言。下面这段就摘自该引言:

“……我们很早以前就了解到, 根据热模型即使对气体的火花点燃作一粗略的处理, 也能得到跟实验数据吻合的相当合理的对比关系。现在已有可能通过引入一个更简单的概念即过余焓, 再作进一

步的处理。当由导热传递的热量支配着由反应物和生成物的相互扩散而产生的焓的逆向流动时，过剩焓 h 就伴随产生燃烧波。这一概念的成功让世人震惊。首先，它能使人们写出一个计算最低点燃能的公式

$$H = \pi d^2 h$$

式中， d 是测出的熄灭距离； h 是单位面积上的过剩焓，它可以容易地由混合物的热传导率 μ 、燃烧速度 S_u 以及燃烧温度 T_b 求得，即

$$h = \frac{\mu}{S_u}(T_b - T_u)$$

式中， T_u 是新鲜燃气的温度。这些公式都得到了实验验证。尽管我们能预测出这些公式并不能代表最低实验点燃能的区域，这一区域非常小。在这一区域中混合物焓的扩散传输十分剧烈，因此根据热模型计算出的 h 值就过大。像空气中含有大量烃的浓混合物以及空气中含有甲烷的稀混合物那样，其组分都具有较大扩散率，因此通过扩散过程进行的焓的传输就十分剧烈。自然，这些相同的混合物将在蜂窝状火焰结构中显示出扩散特性。此外，与化学计量成分不同而燃烧速度相同的混合物相比，它们具有很小的波宽，这些混合物的最低计算点燃能与实验吻合得相当好。由于燃烧波中的温度梯度很陡，且波宽很窄，因此 h 值较小，这种现象在此混合物中 h 值含量极低的情况下得到证实。这样，就有可能用一条简单的前提来理解许多实验数据。正如 Karlovitz 及其同事报告的那样， h 的概念最近还成功地应用到由剪切流引起的燃烧波间断问题……。”

Karlovitz 是刘易斯在资源局的同事，在上面提到的文章中，他描述了“火焰拉伸”问题，并引入了如下关系式：

$$\frac{1}{U_0} = \frac{dU}{dy}$$

这一关系式乘以燃烧区厚度后就成为后来的卡罗魏兹数 K 。

实际上，早在 1932 年当冯·埃尔贝来到位于匹兹堡市的卡耐基（Carnegie）理工学院工作时，刘易斯与冯·埃尔贝的合作就已经开始，并对燃烧科学做出了贡献。他们合作的第一篇论文是有关 $\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$ 反应问题，刊登在 JACS 54 : 552 (1932)，冯·埃尔贝于 1942 年加盟于资源局，此后他与刘易斯的合作更加密切，这种关系持续了整整 55 年。在这期间建立了许多支持燃烧学科的基本概念。他们发表了 200 多篇论文并出版了专著《燃气燃烧与瓦斯爆炸》。刘易斯和冯·埃尔贝首次出版该书时为 1938 年。1951 年经大幅度修订后重新出版，他们在前言中特别指出这是一本“全新的书”，只是“借用了原版的书名”。此后，1961 年再版面世，1987 年又出了第三版。这部书对刘易斯和冯·埃尔贝来说是非常重要的。1984 年于中国南京，冯·埃尔贝心脏病突发，在去医院的路上，他说：“我必须好起来，如果我不能回去完成我们的书，伯纳德将会死不瞑目”。他要活到完成这本书，他和伯纳德一起在资料铺满地面、位于佛蒙特（Vermont）的车库里艰苦地工作着。冯·埃尔贝博士于 1988 年 4 月 4 日在加利福尼亚州桑塔安娜市（Santa Ana）他女儿的家中病逝。刘易斯和冯·埃尔贝所著的这本书是该领域的权威著作。除了这部最重要的燃烧学

巨著外，刘易斯还编著了另外五本书。

当刘易斯博士 1953 年从资源局退休时，他组建了燃烧和炸药研究公司，该公司是位于匹兹堡市的一家研究和咨询机构。1986 年以前，他一直担任该公司的总裁，直到他去世前他还作为顾问为公司操劳。他在该公司的同事有：Béla Karlovitz、冯·埃尔贝和 Steward R. Brinkley。一位布达佩斯弦乐四重奏成员，在匹兹堡新式音乐联谊会的邀请下访问匹兹堡时，曾把这个研究小组评价为“四炸药”。这个小组研究的基本问题现在已集中在从煤的燃烧到喷气式发动机、火箭推进剂，以及炸药这样广泛的燃烧和爆炸领域。他们着眼于工业安全，分析了许多大的爆炸事故。他们集主要精力于燃烧现象研究，同时也承担一些有关燃烧问题的诉讼，刘易斯喜欢这项工作是因为他擅长文字辩论。他曾描述他是如何打赢一个有关粉尘爆炸的案子，他说他向陪审员要了一片阿斯匹林，然后用手将其磨碎，把碎末抛向空中，并用火柴点燃，结果发生了规模很小的粉尘爆炸。

刘易斯博士在燃烧和炸药领域所进行的应用工作是他科学生涯最光辉的一页，他强调运用基础理论解决应用问题。在 1951 年版《燃气燃烧与瓦斯爆炸》一书的前言中，他自己曾作如下评论：“现代发动机的发展已取得显著的成就，然而这种成就只有靠积累大量的经验知识和不断维持庞大而价昂的试验才能获得。可以提出这样的疑问：及时的基础理论研究是否能省去已在世界上广泛进行的并仍继续着的这种实验的一大部分？科学知识是否能大大促进实际应用的发展？”他最近评论说：“我想知道现在进行的燃烧研究是否太多？”

当伯纳德·刘易斯放弃钢琴演奏家这一职业时，他并没有抛弃他对音乐的爱，音乐使他对 Eunice Norton 的爱终生不渝。他与她相识在明尼苏达大学的校园，当时，他作为美国国家科学院的研究员在那里进行研究工作，而她作为音乐厅钢琴师正在作首场演出。他们于 1934 年结婚，对音乐共同的欣赏使得他们建立了匹兹堡新式音乐联谊会。在匹兹堡地区，刘易斯鼓励并培养了许多年轻的艺术家。匹兹堡新式音乐联谊会，把世界上最优秀的艺术家吸引到这里。Eunice 终生为音乐会演奏并教授音乐，几年前，她录制的贝多芬奏鸣曲深受听众的喜爱。我听说，刘易斯博士非常愿意为 Eunice 翻乐谱及为她录制音乐会。

刘易斯博士热情地为他的国家服务并成为荣誉顾问，他是每一个需要燃烧专家的部委的委员。第二次世界大战期间刘易斯博士曾在美国陆军兵工署服役，1951~1952 年他担任美国陆军火箭推进剂及炸药研究室的主任。他多次被授予勋章，包括：1964 年的美国陆军荣誉军团勋章和 1962 年的 Associazione Termotecnica Italiana 金字勋章。1958 年国际燃烧学会开始实施金字勋章奖计划，共设立两枚金字勋章，其中一枚是以伯纳德·刘易斯博士的名义命名的，而另一枚是以 Sir Alfred Egerton 的名义命名的。刘易斯勋章授予燃烧领域的杰出贡献者，而第一位获此殊荣的正是伯纳德·刘易斯博士。

我相信刘易斯博士会把他的主要成就归纳如下：他对研究燃烧现象的贡献并把其研究成果应用于实际，热情帮助艺术界和学术界的年轻人，以及建立国际燃烧学会。他在 1952

年于麻省理工学院召开的第四届国际燃烧会议的开幕词中说：“人们已经受到我们整个学科的复杂性和专业多样化的挑战，这必将导致许多问题的解决，这已打破了物理学、化学、数学和工程学的极限，使我们融入了由工程师和科学家组成的有特色的课题组。在我看来，对这种迅速发展的课题组的要求，迟早将由致力于燃烧科学的分支机构或学会来完成。”

1954 年创立的国际燃烧学会，是在由刘易斯任主席、麻省理工学院的 Hoyt C. Hottel 任秘书以及通用电气公司 (G. E) 的 A. J. Nerad 一起组成的燃烧会议常务委员会的基础上建立起来的，学会创立时对其机构作了进一步的发展。原委员会曾组织了第三、第四、第五届燃烧会议，其排序继美国化学学会在 1928 年举办的第一届、1937 年举办的第二届燃烧会议之后。国际燃烧学会设在特拉华州 (Delaware)，是以慈善、科学和教育为目的的非赢利公司。董事会由在华盛顿召开的筹备会议上选举产生，特拉华州占有 15 席，其中 8 席来自工业实体，4 席来自科研院所，3 席来自政府。第一届董事会会议于 1954 年 9 月 1 日在匹兹堡大学举行，会议选举了董事会的官员，董事长：伯纳德博士；副董事长：Hoyt C. Hottel 教授；秘书长：Glenn C. Williams 教授；财务部长：Stewart Way 博士；财务副部长：Bernard M. Sturgis 博士。董事会还设立了两个委员会：行政管理委员会和国际燃烧学会委员会。国际燃烧学会委员会具有国际代表性，它负责组织和管理公司的国际会议活动，负责出版会议的论文集。原燃烧会议常务委员会 14 个会员国全部成为该委员会的成员。该委员会在宾夕法尼亚州匹兹堡市租用一间办公室，由 Helen Barnes 任执行秘书。

国际燃烧学会仍然只有两名全职管理人员。当我担任董事长的时候，我时常为组建这样一个没有政府干预或者说没有政治色彩并能很好地完成预定目标的国际机构的组织者们的天才所感动。国际燃烧学会的规模现在已发展到超过四千人，设有 26 个部门。大多数部门都能独立地组织地区性的学术会议，或组织某一专题的学术研讨会。由选举产生的董事会的 26 名董事，来自 9 个不同国家。

刘易斯博士是国际燃烧学会的主要创建者，并使之进入国际高档次学会的行列，刘易斯博士是国际燃烧学会之父。

H. F. Calcote

[译自 Combustion and Flame 98: 1~4 (1994)]

纪念京特·冯·埃尔贝 (1903~1988 年)

京特·冯·埃尔贝 (Guenther von Elbe) 博士于 1988 年 4 月 4 日在加利福尼亚州桑塔安娜市他女儿 Jeniffer Cassaboom 的家中病逝。在 1986 年秋季, 他因癌症作过外科手术, 他的身体也因此而得到明显的恢复。但是, 在 1987 年末, 他的病情再度恶化。京特是一位著名的燃烧科学家, 深受同行们的爱戴和尊敬, 同时他的家人也深爱着他, 他也是我的同志和亲密朋友。他的逝世对整个燃烧学科来说是一个巨大的损失。

京特于 1903 年 11 月 27 日出生在德国柏林郊区的波茨达姆 (Potsdam), 1928 年在柏林大学获物理化学博士学位, 1930 年移居美国, 在弗吉尼亚 (Virginia) 大学担任研究员。此后不久, 在伯纳德·刘易斯博士的劝说下, 他迁居到宾夕法尼亚州匹兹堡市。他与伯纳德·刘易斯博士开始了燃烧科学史上最著名的合作关系。从 1932~1942 年, 京特在卡耐基理工学院煤研究室工作, 1942 年他成为美国资源局火焰研究学科的首席研究员。伯纳德·刘易斯当时也在资源局工作。他们在 1953 年离开资源局, 与 Béla Karlovitz 和后来的 Bob Brinkley 一起, 创建了燃烧和炸药研究公司。1961 年京特加盟于大西洋研究公司, 在那里他担任首席科学家达 20 年之久, 直到退休。

当回顾冯·埃尔贝博士在燃烧领域的技术成就时, 人们认识到在他与刘易斯博士不寻常的合作的这 30 年, 正是他学术生涯中最具创造性的多产时期, 这就使得人们常常难以孤立地评价这对杰出人物的个人贡献。

京特最喜欢的科学领域似乎总是化学动力学及机理。他研究分析了无数复杂的化学反应, 在 20 世纪 30 年代, 他集中研究了氢、一氧化碳和氢的氧化问题。他从不自夸, 但通过认识反应 $H + O_2 + M \rightarrow H_2O + M$ 的作用而说明了 H_2-O_2 系统的第二极限时, 他显得特别兴奋。反应动力学一直处在非常原始的状态, 由于对反应机理的定量研究的进展, 使这 10 年是取得巨大成就和令人振奋的 10 年。刘易斯和冯·埃尔贝小组处在这一研究领域的前沿。在他的整个职业生涯中, 冯·埃尔贝一直分析研究反应动力学, 而且他善于把研究成果应用到实际中去。

总的说来, 在 20 世纪 30 年代这一时期中, 刘易斯和冯·埃尔贝对燃烧过程做了深入的研究, 这项工作以 1938 年他们出版第一版《燃气燃烧与瓦斯爆炸》而终结。后来随着人们对燃烧现象理解的进一步发展, 他们在 1951 年对该书做了全面修订。他们把修订后的书定为该书第一版 (此后有 1961 年的局部修订版和 1986 年的修订版), 至今它仍然是燃烧学科的主要专著。

京特的研究覆盖了燃烧学科各个领域，从点燃到火焰稳定直至熄灭无所不包。他开创了火焰传播理论，他对爆震的化学机理具有非凡的洞察力，并极富想象力地把流体力学应用到燃烧过程。

从1953年起，他有时在燃烧和炸药研究公司，有时在大西洋研究公司，都更注重研究实际问题，涉及工业过程、爆炸、发动机燃烧以及诉讼事务。他非常喜欢理论联系实际，挑战和工作节奏，然而，正是在这一时期，他相继单独或合作发表了大量论文。

冯·埃尔贝博士加入大西洋研究公司，他的研究就转向了与航空和推进剂有关的燃烧问题。有几项研究可以作为展示他的创新思想。这些研究甚至在他退休时仍然处于领先地位。他在大西洋研究公司进行的第一项工作就是分析固体推进剂对压力变化的响应，其结果是建立了压力急速下降造成推进剂熄灭条件的预测数学模型。他有意识地力求简化这些理论处理方法，使之为设计工程师理解并获得实际应用。至今，设计工程师们还在使用冯·埃尔贝的处理方法。他还对分析新固体推进剂成分感兴趣，他根据链支化机理对几种情况提出了有力而令人信服的解释，其中包括使支链退化造成二氧化氯蒸气的爆炸裂解现象。

京特也对氟的氧化物感兴趣，开始研究这类化合物的应用问题，正是由于他富于创造性，从而开发了许多应用领域。他尝试以少量的氟化合物引发非限制的燃料-空气爆炸。他分析研究了在高马赫数下超声速燃烧对燃料的要求，并证明使烃非常迅速地燃烧足以达到SCRAMJETS的唯一方法就是使用少量的氟化合物，氟化合物能导致用链支化代替正常的链氧化。在进行这些研究的过程中，他获得了一项用氟反应合成有机化学产品的方法专利。在他退休以后，他和刘易斯博士一起为出版第三版《燃气燃烧与瓦斯爆炸》作准备。

京特发表了大量的论文，获得了多项专利，在无数有关火灾和燃烧问题上担任政府机构的顾问。从国际燃烧学会建立那天起，他就是国际燃烧学会的成员，他参加了1937年召开的第二届燃烧会议，直到最近几年他还参加两年一度的燃烧会议。他在1976年召开的第16届燃烧会议上，因在燃烧领域、特别是在有关化学动力学和燃烧波的研究方面成绩卓著，被授予金质奖章（Bernard Lewis奖章）。京特在科学问题上擅长于个人思考，这是我们所熟知的，也许并不为人们熟知的是他非常推崇社会主义，且善于言谈。除了职业兴趣以外，他用业余时间研究历史，特别是美国内战时期的历史。在他的一生中，他有很多机会去旅行，而且他喜欢研究他所去地方的民族风情。他特别不爱出风头，而且非常友善，尽管他是一个科学家，在任何技术问题上，他都是非常容易接近的人。最后，我代表国际燃烧学会的全体同仁、特别是他终生的朋友——伯纳德·刘易斯及其夫人 Eunice，向在美国及世界各地的京特所热爱的家人表示深切的问候。

Edward T. McHale

[译自 Combustion and Flame 76: 1~3 (1989)]

第 三 版 序

本书第三版严格遵循第一版序言中所述本专著的基本目的，即为了向化学家、物理学家和工程技术人员提供理解燃烧现象的科学基础。

本版主要修订了一氧化碳的氧化动力学及分支更多、更为复杂的烃类氧化动力学。曾发现，一氧化碳-氧物系与已充分了解的氢-氧物系密切相关，以至在没有含氢化合物存在的情况下，无法识别该物系在迅速反应中释放潜在焓的反应路径。有了这一见识，便可解释 Peter Gray 及其同事们所描述的诸如稳定而振荡的辉光之类的现象了。主要是在重新考察早期文献所载的极佳数据的基础上，对烃氧化动力学的论述进行全面修订。近期的研究结果证实并拓宽了早期研究所得出的推论。这证实过去所作的谨慎而系统的研究成果依然是正确的，它经得起时间的考验，尽管那时可用的实验方法和数据简化法与当今的计算技术和众多的现代传感设备及记录设备相差甚远。

在过去 20 年中，计算机程序已被用来处理反应动力学中的复杂问题。这特别适合于诸如在实验流动物系中和在燃烧波中发生的烃燃烧的高温反应。在这样一些物系中，整体反应趋于完成，而且，在这一过程中，凡能想像得到的、在反应物质和众多中间产物之间的反应，实际上都可能发生。尽管我们完全赞同这类问题只有使用计算机技术方能处理，但是我们保留关于诸如在反射冲击波的静止气体中爆炸反应引发等其他问题。在这里，自由基的起始浓度实际上等于零。因而，起始反应速率很小或者是难以觉察到，但在诱导期内却以自加速速率增大到产生爆炸的程度，在本书有关烃的一章中，论述了这类问题。这种论述是以下面的概念为基础的：反应速率从初始为零发展到爆炸速率，只由不多几个链支化反应和链断裂反应所控制；不必考虑只在整体反应的后期才出现的那些组分的反应。相应地，也就不要求提供很广泛的反应一览表，且诱导期的问题也只须反应动力学分析法来解决，而毋须采用计算机程序。

读者将会注意到，在解释烃的低温氧化（它以出现已研究得很多的冷焰为标志）方面发展了一个新概念。现在我们看到两种分支反应，一种称为由双过氧化作用决定的链分支反应，另一种称为由烷氧基过氧化物离解决定的链分支反应。结合 Benson 对以往在烃氧化中称之为“负温度”系数的解释，如今已经有可能描述在这种复杂反应工况中出现的一切现象。

在燃烧学术文献中已重刊载了大量的研究成果。自 1962 年起，国际燃烧学会的《燃烧

和火焰杂志》(Journal of Combustion and Flame)有 66 卷,该学会出版的《国际燃烧会议论文集》(International Combustion Symposia)有 13 卷,以及卷数众多的其他学术刊物,其中值得注意的有《燃烧科学与技术》(Combustion Science and Technology)和《能源与燃烧科学的进展》(Progress in Energy and Combustion Science)等,从这些资料可得到大量有关燃烧科学各方面详尽的、公认为优异的研究报道。但是,当本书前一个版本问世时,似乎已充分奠定了这门学科的概念基础,除某些具体细节值得进一步关注外,没有必要对第二篇火焰传播这一课题进行修订。例如,对电火花最低点燃能和熄灭距离这两者实验测定值之间的关系,已提供一种崭新的见解。另一个例子是对下面两种情况有了理论上的理解:在压力不断增加的情况下,每当燃烧速度约超过 50~100 cm/s 时,便可观察到燃烧速度随之增加;当燃烧速度低于此范围时,这种效果就相反。对这种效果的解释,表明人们已认识到在火焰传播中化学所起的作用。

第三篇关于已燃气体的叙述,早在第一版中便作了适当的处理。第四篇中内燃机课题也是如此。

作者非常感激 Aberdeen 试验场弹道研究实验室的 Leland A. Watermeier 和国家标准局的 Robert S. Levine, 他们承担了一氧化碳氧化动力学的研究,第三章就是根据他们的研究写成的。在准备编写第六章中,作者感谢 Béla Karlovitz 给予的忠告和作出的贡献。大西洋研究公司,通过 Edward T. McHale 办公室的出色工作,随时提供绘图和计算机设备,帮了大忙。还要感谢航空化学研究实验室的 Hatwell F. Calcote, 他对火焰中离子课题作了卓有成效的讨论。

Bernard Lewis

Pittsburgh, Pennsylvania

Guenther von Elbe

Alexandria, Virginia

1986 年 5 月

第 二 版 序

在过去 10 年中, 燃烧学科研究的进展速度仍未减慢。人们在对燃烧现象的共同理解方面已取得显著的进步。但是, 至今对这门学科进行科学探索的统一过程尚未完成, 还需要做许多工作来深入了解火焰中各种过程的现象, 这样, 一些理论关系和预示就可建立在可靠而逼真的模型的基础上。

在这次新版中, 特别强调燃烧波在传播过程中的变化, 这种变化是由于传向未燃介质热损失和混合物成分因扩散过程而发生的局部变化所致。这两种效应都是由于在速度梯度很陡的流场中或是在用一个点源点燃的条件下发生的扩张传播的结果。热损失效应对于流场中火焰稳定极限和点火时的最小火焰直径及最低点燃能的数值均有影响。运用火焰拉伸(即指扩张传播过程中火焰面增大)的新概念, 采用类似方法可获得燃烧速度和波宽度这些基本可测的火焰参量与火焰稳定极限及火花点燃数据之间的良好关系。例如, 用这种方法已推导出高速气流中火焰稳定器上的火焰稳定极限。此外, 研究结果表明, 在扩张传播的一切情况下, 混合物组分产生扩散分层的程度, 都取决于混合物中燃料和氧化剂组分的相对扩散系数。这种分层作用所产生的影响, 至少可以作出定性的预计。因此, 在过浓的重烃-氧混合物中的最小火焰直径和最低点燃能, 要比按对原始混合物的火焰拉伸方程式的预计的结果为小, 因为氧向火焰区的扩散比燃料快。同样的道理也适用于火焰稳定。火焰拉伸和扩散分层的概念可用来了解可燃极限的机理。

本版中的其他几篇, 对燃烧波这一课题不需作重大修订。但是, 在讨论中, 特别对爆震过程作了一些修订, 并且增加了有助于对这一课题更深入理解的许多新资料。

Bernard Lewis
Guenther von Elbe
Pittsburgh, Pennsylvania
1961 年 2 月

第 一 版 序

在过去 10 年内, 燃烧学科研究的领域和发展速度增长如此之快, 以致出现许多新的论据和概念, 使以前的有关论文显得完全不能满足当今学生和研究工作者对燃烧学科作现代阐述的需要。本书作者虽然借用了他们在 1938 年出版的旧著的书名, 但是把本书当作该书的第二版来看是不恰当的, 因为除少数简短的几节叙述当时业已弄清楚了的有关课题以外, 本书内容完全是新的。然而, 这本新著的目的仍保持不变, 即为化学家、物理学家和工程技术人员, 提供了解燃烧现象的科学基础。

燃烧、火焰和爆炸这三个术语, 远在人们具有明确的科学概念以前, 就已成为常用语言的一部分, 因此使用这些术语仍然多少带点任意性和灵活性。在本书中论述的课题有: 链反应理论和气体燃料与氧之间的化学反应动力学, 燃烧波、爆震波和射流火焰的流体动力学, 及已燃气体的热力学。在这方面, 我们沿用旧著所用的方式, 认为用它来叙述上述领域已证明确属有价值。将 13 年前的知识水平与今天的比较一下, 可以发现, 在化学动力学的领域中有颇大的进展, 在点燃和燃烧波传播的领域里出现了许多新事实和概念, 以及在对扩散火焰和爆震波的理解方面有显著的进步。另一方面, 燃烧热力学早在许多年以前就已成熟, 所以, 虽然可靠数据的数量显著增多, 但看不到重大概念性的进展。

读者将会看到从最新的可利用的证据导出的一些新的化学反应机理, 并把它看成是本书作者在目前情况下最完善的见解。建议将这些反应机理作为进一步实验和讨论的基础。在研究工作人员中, 早已在许多地方取得了一致的意见, 希望这些新的分析能使这个范围扩大。已论述过的物系有氢-氧、一氧化碳-氧和烃-氧。其中, 了解得最透彻的是氢-氧物系。对一氧化碳-氧物系来说, 这种反应机理在某种程度上看来已接近澄清, 虽然目前关于这方面的定量数据仍感缺乏。对烃-氧物系的认识已取得显著的进展, 而早日澄清烃的氧化机理, 至少对于低级烃来说, 显然是可能的。关于在高级烃的氧化反应方面, 也可以看出理论与实际相吻合的趋势。这些物系反应机理之间的内在联系和相互依赖的关系已引起注意, 当对选定的混合物作进一步的研究时, 必需使各反应机理之间互不矛盾, 这种要求对最终阐明各种基元化学反应来说将是一个有力的因素。

在本书的第二篇中论述火焰传播, 讨论的重点由反应动力学转向流体动力学。后者是用于燃烧波、爆震波及燃料射流燃烧的科学分支。近年来, 在点燃和燃烧波传播的课题方面取得了极显著的进展。第一次了解到烧嘴火焰中燃烧波的稳定性和临界直径管道中熄灭

作用之间的关系。对管内火焰传播的各种现象也有所理解。特别重大的进展是用最低点燃能的概念综合整理有关火花点燃数据的工作，这种最低点燃能的概念是从一个点燃源发展成燃烧波的研究推导出来的。已经证明能够将流体动力学方程式加以简化，以便得出熄灭距离与燃烧速度及其他可测量之间的相互关系。

在爆炸气体混合物中燃烧波和湍流运动之间相互作用方面，由于 Karlovitz 最近进行的理论和实验的研究而取得了重大进展。在层流和湍流的燃料射流燃烧的领域内，自从 Burke 和 Schumann 关于层流扩散火焰的早期工作以来，已取得颇大的进展。

将关于燃气射流引射空气的理论与火焰稳定理论结合起来，可以得到烧嘴工作性能的理论。预料该进展将有助于解决燃气工业中燃料互换性问题，本书中包括了这个课题的讨论。

尽管 Chapman、Jouguet 和 Becker 的工作已使爆震波理论达到很高水平，但是通过 von Neumann、Brinkley 及 Kirkwood 的工作，又使它得到进一步地发展。对于经常观察到的爆震波的间断型和螺旋型的传播现象，提出了一些新的解释。对于爆震波结构，以及激波峰面与反应区之间的相互作用，得到深入理解。

基础理论研究最终应有助于深入理解和控制工程燃烧过程，特别是发动机内燃烧过程。为了达到这个目的，必须依据启动和运转的各个不同阶段中出现的基本物理和化学过程，去分析发动机的整个过程。目前，在这方面仅作了很少的工作。而且对发动机的研究，往往也限于考察燃料和工程参数对总体性能的影响，这样就不可能对起控制作用的物理和化学过程有所认识。现代发动机的发展已取得显著的成就，然而这种成就只有靠积累大量的经验知识和不断维持庞大而且价昂的试验设备才能获得。可以提出这样的疑问：及时的基础理论研究是否能省去已在世界上广泛进行的并仍继续着的这种试验的一大部分？科学知识是否能大大促进实际应用的发展？本书中收集了有关基本特性方面所缺乏的数据，其企图是：首先，证明用一个比较简便的方法来估计 Otto 发动机的爆震限制行为就原理而论是完全可能的；其次，说明仔细考查喷气发动机内的火焰结构，可取得对发动机性能极有限有用的资料。

作者对资源局炸药及物理科学室（the Explosives and Physical Sciences Division of the Bureau of Mines）的同事致以谢意，他们关心并致力于他们的种种研究，为燃烧波传播的新概念提供实验基础有很大的帮助。

Bernard Lewis
Guenther von Elbe
Pittsburgh, Pennsylvania

1951 年 5 月

基 本 符 号

第一篇

D	扩散系数
d	容器直径
F	甲醛
f (以下标表示分子组分)	物质的量之分数
K (以下标表示反应编号)	表面反应的速率系数 (每单位体积中的平均值)
k (以下标表示反应编号)	反应速率系数; 表面反应速率系数中依赖于温度变化的一部分
$[M]$	分子总浓度
$[M]_e$	爆炸极限下的分子总浓度
$\bar{n}$	链载体的平均浓度
P, p	压力
r	球形容器的半径
$\bar{v}$	分子的平均速度
α	链支化系数
δ	三体碰撞中的近似距离
ϵ (有或没有下标是指链载体)	表面的链断裂能力
λ	平均自由径
λ_e	有效平均自由径
σ	分子直径
τ (下标 1 和 2 是指烃氧化过程中的状态) ...	诱导期或着火迟延

第二篇

上标 °	是指平面绝热燃烧波
A	湍流射流的横截面积
a	$c_p \rho_u S_u / \mu_u$
C	点燃的临界电容; 燃料射流挟带空气中喷嘴流体的物质的量之分数
c_p, c_v	分别为定压和定容比热

D	扩散系数； 激波速度； 爆震速度
d	燃料射流混合和燃烧过程中的内管直径
d'	燃料射流混合和燃烧过程中的外管直径
d_o	管子的熄灭直径
d_p	熄灭作用贯穿深度
$d_{ }$	平行板间的熄灭距离
g	边界速度梯度
g_B	脱火时的边界速度梯度
g_F	回火时的边界速度梯度
H	绝对最小点燃能
H_i	每 mol 组分 i 的焓
h	每单位面积燃烧波的过余焓
K	密闭容器内已燃和未燃气体之间能量关系式中的 常数；
K	Karlovitz 数
K_i	组分 i 因化学反应而发生的浓度变化率
k	导热系数
L	燃料射流火焰的长度
l_1	湍流尺度（在一点观测）
l_2	湍流尺度（沿 y 轴同时观测）
M	燃烧波中的质量流
m_i	组分 i 的分子量
n	密闭容器中内容物的已燃分数； Poiseuille 方程式中的常数
n_i	每单位体积组分 i 中物质的量
P, p	压力
P_e	密闭容器中燃烧终了时的压力
P_i	点燃前密闭容器中的压力
q	每单位体积的释热率
R	气体常数； 圆柱气流中的气流半径； 在平行板之间气流内从气流中心到边界的距离
Re	雷诺数
r	离气流中心的距离；

	火焰半径
r_b	中心点燃球形容器中燃烧的半径
r_i	中心点燃球形容器中未燃气体球形体积的预燃半径
S	垂直于任一燃烧波面的相对速度
S_L	层流燃烧速度
S_T	湍流燃烧速度
S_b	垂直于燃烧波的已燃气体相对速度
S_u	燃烧速度
T	温度
T_b	已燃气体的温度
T_u	未燃气体的温度
T_0	燃烧波边缘处的温度
T_I	燃烧波中温度分布曲线拐点处的温度
t	时间
U	质量速度或质点速度（同样也指气体速度）
u'	湍流强度
u	激波和爆震波中的质点速度
V	电压； 容积流量
V_i	组分 i 的扩散速度
v_1, v_2	激波和爆震波中压缩前后的比容
α	未燃气体流和燃烧波垂直线之间的夹角
β	已燃气体流和燃烧波垂直线之间的夹角
γ	定压与定容比容之比
ϵ	涡流扩散率
η_0	燃烧波的特征尺度
μ	黏性系数
ρ	密度
ρ_b	已燃气体的密度
ρ_u	未燃气体的密度

第三篇

下标 0 指温度为绝对零度

上标 $^{\circ}$ 指标准状态

a 吸收系数