

A stylized flame graphic in orange and yellow, composed of several nested, upward-pointing arches that form a central flame shape. It is positioned behind the title text.

火焰的结构、 辐射与温度

中国工业出版社

火焰的结构 辐射与温度

— 中国科学院南京地质古生物研究所 —

火焰的结构、辐射与温度

(修订第二版)

[英国] A. G. 給 登 著
H. G. 沃弗哈尔德
韓 昭 滄 譯

中国工业出版社

本书根据英国1960年出版, A.G. Gaydon、H.G. Wolfhard
著“Flames, their structure, Radiation and Temperature”
一书修訂第二版譯出。书中討論了气体可燃混合物燃烧时火焰的
有关特性、火焰中所进行的主要物理化学过程以及火焰的传播机
理。此外, 在本书中还論述了扩散火焰中的各种过程、各种現代
化的火焰温度測量方法以及火焰中的电离現象。

本书可供科学研究人員和高等学校的学生使用, 对冶金工业
和其它工业部門的工程技术人員也有参考价值。

A.G. Gaydon, H.G. Wolfhard
FLAMES THEIR STRUCTURE, RADIATION AND
TEMPERATURE
SECOND EDITION REVISED
CHAPMAN & HALL LTD.
LONDON 1960.

* * *
火焰的结构、輻射与温度

韓 昭 滄 譯
*

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊編輯室編輯

(北京灯市口 71 号)

中国工业出版社出版(北京修羅閣路 10 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 110 号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售
*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $11^{3/4}$ · 插頁 11 · 字数 291,000

1965 年 3 月北京第一版 · 1965 年 3 月北京第一次印刷

印数 0001—3,030 · 定价 (科六) 2.20 元
*

統一书号: 15165 · 3123 (冶金-512)

序 言

現在，燃燒學所涉及的領域已非常之廣，它包含了多方面的問題，因此事實上已不可能在一本書中將這一問題的各個領域都包括進去，或者，只靠兩個作者就能將問題的各个方面都討論到。本書的目的是着重從物理方面對那些和靜止的火焰有關的問題作一比較深入的討論。

彭和唐奈的著作“煤氣的火焰和燃燒”(Bone and Townend, *Flame and Combustion in Gases*, 1927)對有關火焰結構的許多方面的問題都曾作過清楚的說明，並且在歷史上有一定的價值，但現在已經過時了。一些比較新的書籍，例如宙斯特的“爆炸和燃燒過程”(Jost, *Explosion and Combustion Processes*)，以及劉易斯和埃爾柏的“火焰的燃燒和爆炸”(Lewis and Von Elbe, *Combustion Flames and Explosions*)一書的修訂本，曾對燃燒問題作了非常全面的介紹，特別是在化學方面。但是，由於各種不同的原因所限，在這些著作中，仍有許多問題還沒有完全包括進去。本書的重點是：火焰速度的測量，火焰傳播理論，火焰中碳粒的生成方法，火焰的輻射，高溫火焰的溫度測量以及火焰的電離。這些專題中的許多題目都已被劉易斯和埃爾柏研究過，但是還很不成熟和值得爭論，不過它們都是一些最有意義的問題。有些問題，象燃燒過程的化學動力學，冷火焰，最小點火能量，臨界熄滅距離以及火焰的穩定性，在上述著作中已得到很好的闡明，因此在本書中除了為保持本書的系統性而作必要的敘述外不再詳加討論。值得提出的是，雖然本書也包括了我們最近在低壓火焰以及平面擴散火焰結構方面的光譜研究成果，但和“光譜學及燃燒理論”(Gaydon, *Spectroscopy and Combustion Theory*, 1948)一書卻很少有重複。在茨林的“關於火焰和爐子的科學”

IV

(Thring, *The Science of Flames and Furnaces*) 一书中, 对于用大型工业火焰加热炉子的问题曾作了很好的说明, 但是却很少和本书所讨论的实验室火焰有共同之处。

本书的目的是尽可能清楚地说明火焰中所进行的主要物理过程。当然, 我们深深知道我们所掌握的资料还不够多, 因此, 书中难免有不妥当之处。此外, 在编写时我们避免对问题进行纯数学的讨论, 很少热衷于对燃烧过程进行抽象的数学分析, 因为这通常要涉及到许多未知的和常常是不可知的参数。

A. G. G.

H. G. W.

修訂版序言

自从六年以前本书第一版写成以来，在燃烧学的各个领域又作了大量的研究工作；仅第 5、第 6 和第 7 届国际燃烧学会就提出了大約 300 篇論文。如果将所有这些研究工作的細节都包括进来，并且对大量的論文都加以陈述，将会破坏本书的系统性。但是，在大段的改写过程中，还是采用了这些新的数据，不过本书的原有結構則仍予保留，因此本书的外貌变化不大。第 14 章和第 15 章是完全重写的，并且把前者的重点改为討論有关火箭燃料的問題（亦即硼、氟和氮的化合物）。我們仍然尽力将重点放在过程的物理本质方面，并力求使本书簡明易懂。不过，所增加的二百多篇新的参考論文，将使讀者有可能通过本修訂本与有关研究領域的各种参考文献保持接触。

A. G. G.

H. G. W.

目 录

序 言

修訂版序言

第1章 緒論	1
火焰 (1) ; 靜止的火焰 (2) ; 运动的火焰 (4) ; 物理还是化学? (5)	
第2章 預混火焰	7
本生灯 (7) ; 梅克尔 烧嘴 (10) ; 层流預混火焰 (10) ; 斯密塞尔火焰分离器 (13) ; 紊流火焰 (15) ; 火焰的稳定性 (16) ; 火焰的熄灭 (17) ; 低压火焰及其结构 (20) ; 点火 (24) ; 火焰传播极限 (29) ; 发光区的位置 (32) ; 多面体火焰和蜂窝状火焰 (34) ; 預混火焰与扩散火焰之間的轉換 (38)	
第3章 气流的分布及火焰的形状	40
从烧嘴流出的气流 (40) ; 气体流量的测量 (42) ; 火焰錐体的照相法 (43) ; 施利尔照相法 (45) ; 干涉仪法 (51) ; 火焰的推力及其对錐体形状的影响 (52) ; 火焰的頂 (54)	
第4章 燃烧速度的测量	55
燃烧速度 (55) ; 古伊法 (55) ; 管嘴法 (59) ; 利茲法 (60) ; 气流經過均匀化的平形火焰法 (61) ; 顆粒示踪法 (62) ; 在拋物綫式速度分布情况下根据錐角来测量 $r/R=0.4$ 处的燃烧速度 (65) ; 确定前焰面位置的方法 (67) ; 反压力法 (71) ; 肥皂泡法 (72) ; 球形炸弹法 (74) ; 改良过的管子法 (75) ; 各种燃烧速度测量方法的比較 (77) ; 燃烧速度与溫度的关系 (79) ; 燃烧速度与压力的关系 (80) ; 碳氢化合物的结构对燃烧速度的影响 (83) ; 冲淡剂及杂质的影响 (85)	
第5章 火焰传播的机理	89
緒言 (89) ; 預热区 (90) ; 着火溫度 (94) ; 反应区 (96) ; 燃烧速度、溫度及化学根浓度之間的关系 (98) ; 关于燃烧速度和	

火焰传播极限的其它证据 (104); 前焰面的某些观测资料 (107); 火焰传播的热力理论 (111); 扩散理论 (116); 紊流中的火焰传播 (122)

第6章 扩散火焰 133

小型火焰的早期研究工作 (134); 紊流火焰 (141); 蜡烛火焰 (144); 平形扩散火焰 (145); 火焰结构的光谱研究 (148); 扩散火焰和预混火焰的对比 (152); 炉内的火焰 (153); 油滴的燃烧 (154); 灯蕊上的火焰; 混合燃料的燃烧 (156); 薄火焰 (157)

第7章 不稳定的火焰 158

敏感性的火焰 (158); 声音对预混火焰的影响 (161); 发声的火焰 (164); 火焰的振动和噪音 (168)

第8章 火焰中的固体碳 172

绪言 (172); 扩散火焰 (174); 预混火焰 (177); 压力的影响 (179); 爆炸火焰 (181); 杂质的影响 (183); 碳粒及碳的沉淀物的性质 (185); 碳和燃烧产物之间的平衡 (186); 中间产物的检定 (189); 碳氢化合物的热分解 (191); 碳粒的生成和长大的问题 (194); 碳黑的生产过程 (205)

第9章 火焰中的辐射过程 207

辐射的本质 (207); 能量的等量分配 (212); 由碰撞所产生的激发过程 (215); 辐射的平衡条件 (219); 化学发光 (223); 火焰气体中平衡的偏离 (225); 固体质点的辐射 (228)

第10章 火焰的温度: I. 用谱线转换法测量温度 231

火焰的温度 (231); 谱线转换法 (232); 对反射损失和亮度温度随波长改变所作的校正 (234); 复杂火焰结构的影响 (235); 其它谱线在转换法中的应用 (237); 背景光源 (238); 时间分解研究法 (240); 谱线转换法的精确度和可靠性 (241); 库尔包姆法 (244); 锥间气体温度的测量结果 (245); 反应区中的测量结果 (249)

第11章 火焰的温度: II. 其它测量方法 253

亮度和发射能力法 (254); 色温法 (256); 奥尔斯坦的双线法 (258); 用杜普勒谱线加宽法测量有效平移温度 (260); 旋转温度 (261); 振动温度 (267); 折射指数法 (269); α -质点法和 x -射线法 (271); 声学法 (272); 热丝法 (273); 电离法 (277)

VII

第12章 火焰的温度；Ⅱ. 火焰温度的计算值	279
给定温度下的气体成分的系統計算 (281)；温度的計算 (286)；	
平衡常数等的有效数值 (289)；关于混合浓度变化的影响 (292)；	
某些典型火焰的温度和成分 (293)	
第13章 火焰中的电离	298
平衡电离；薩哈 方程式 (298)；時間 因素；离子的复合 (302)；	
用探針和其它方法所作的測量 (304)；豪尔效应 (307)；微波的	
衰减 (308)；电场对火焰的影响 (310)；火焰气体中的电离程度	
(314)；正离子的識別 (316)；有机火焰高度电离的原因 (317)	
第14章 火箭燃料的燃烧过程	320
用氮的氧化物助燃的火焰 (320)；硝酸火焰 (327)；硝酸盐和亚	
硝酸盐火焰 (327)；喷射推进剂的火焰 (330)；作氧化剂用的卤	
素 (331)；臭氧 (334)；高能燃料 (335)；固体燃料的燃烧 (341)	
第15章 某些火焰問題的近代发展情况	347
参考文献	352

照片目录

照片编号

1. 乙烯的預混火焰和扩散火焰 (彩色)
2. 斯密塞尔火焰分离器, 低压火焰 (彩色)
3. 气流均匀化的平形火焰, 下部有火焰, 空气进入扩散火焰的情况
4. 預混火焰中碳的生成
5. 蜂窝状和多面体火焰结构
6. 火焰照片举例
7. 預热区中的蒸发; 紊流火焰刷
8. 压力及空气的“浊化”对扩散火焰的影响
9. 扩散火焰的直接照片和施利尔照片
10. 紊流扩散火焰的瞬时施利尔照片
11. 平形扩散火焰的光譜
12. 蜡烛火焰和雾状煤油火焰的施利尔照片
13. 火焰中出現紊流的高度; 平形扩散火焰; 流股中出現旋涡的形象
14. 振动火焰的照片
15. 火焰中的碳粒和碳的沉淀
16. 反常激发现象及 OH 旋轉能和振动能的各种变态的光譜
17. 粉状物质和火箭燃料的火焰
18. 含有氮的氧化物的火焰的光譜
19. $\text{CH}_4\text{-NO}_2$, CH_3NO_2 和 CH_3NO 火焰的光譜
20. 甲烷-三氟化氯火焰的光譜

第 1 章 緒 論

火 焰

我們對於什么是火焰都有着清楚的概念，但是要對火焰下一個嚴格的定義卻很難。雖然有少數火焰實際上並不發光（例如當用干淨的不含灰塵的空氣燃燒氫氣時），但是在我們的概念中，當想到火焰時，總是要把火焰與發光現象聯繫起來。以後我們將看到，火焰的光與純粹的熱氣無論在量的方面或質的方面都有顯著的區別，並且還要把造成這種情況的原因作為我們研究火焰性質的一個組成部分。火焰的光可以用來判斷前焰面的位置和形狀，這對確定燃燒速度和臨界熄滅距離是很重要的。以後還將討論關於這種火焰研究方法的应用範圍以及其它一些光學方法（例如暗影照相法和施利爾照相法）的应用問題。某些氣體溫度的測量方法以及反應氣體中的平衡狀態的研究方法，也是以高溫火焰氣體的輻射和吸收特性為根據的。的確，光的發射是火焰的最主要的特性之一，因此我們在研究火焰的各種過程時將力求利用火焰的這一特性。

普通火焰的另一個一般特性是溫度的急劇升高，通常都要升高到 1400°K 以上。以後我們將要對燃燒產物最終溫度的計算和測量問題，以及火焰反應區中的溫度梯度問題進行詳細的討論。雖然絕大多數火焰的溫度都很高，但也有一些例外，例如大家所知道的磷光以及碳氫化合物和某些其它有機蒸汽的“冷火焰”就是，它們在 $200-400^{\circ}\text{C}$ 的溫度下就能進行發光反應，在這種可控制的反應中所得到的穩定亮光很難把它叫作是火焰。但是，對於那些雖然溫度變化不大但化學成分卻能發生急劇改變的反應混合物來說，它的光看來還是值得稱為火焰的。這種冷火焰在本書

中将不作詳細的討論。

此外，火焰通常都和氧化过程相联系。虽然如此，但也有一些反应，例如氟及其它卤族元素与氢和碳氢化合物的反应，它們虽然一点也不包含氧气，但显然仍值得算作是火焰。氟与碳氢化合物所形成的火焰，的确与那些由有机燃料和氧所产生的火焰非常相似，这种火焰很亮，并且也能給出像 C_2 等双原子分子那样的带状光譜。这种不需要用空气或氧气助燃的火焰将在本书的倒数第二章內討論到。

真正的火焰通常都和气体之間的强烈放热反应相联系。不过，磨得很細的固体顆粒（例如鋁粉）或者雾化过的液体燃料的燃烧也能出現火焰。虽然本书主要是討論气体燃烧时所产生的一些實驗室規模的小型火焰，但我們也将談到关于油雾和固体顆粒的燃烧問題；在上一情况下，輻射作用是比较重要的，因为它在传热和火焰的稳定性方面起着比平常更为重要的作用。

靜止的火焰

本书的全部内容几乎都是討論靜止的火焰，它和运动的或爆炸式的火焰不同。一般來說，这种火焰在工业上起着非常重要的作用（用于加热和其它目的），并且也最适于用来进行基本的科学研究。为了方便起見，可将靜止火焰分成两种类型。在第一种火焰中，燃料是一面与空气接触一面完成燃烧反应。当火焰尺寸不大时，燃烧过程主要决定于空气和燃料的相互扩散速度，因此我們称这种火焰为扩散火焰。当这种火焰的尺寸較大时，空气与燃料的混合主要是靠气体的扰动或其它运动形式来完成，而扩散作用則居于次要地位，因此这时火焰的稳定性及其尺寸的大小是和各种空气动力学因素有关。这种类型的大型工业火焰在茨林最近发表的著作中曾經談到过[Thring, 1952]；在本书中，我們將着重討論简单的扩散火焰的结构問題。第二种靜止火焰的特点是，燃料和空气或氧气已事先經過混合；我們將概括地（但是稍

微有些不够严格)称这种火焰为預混火焰^①。普通本生灯的火焰就是这种火焰的最好的例子。在本生灯中,事先混合好了的气体从管口流出,其流速大于該混合物的正常燃烧速度,这时在灯口上即可获得稳定的火焰。

預混火焰主要用于家庭供暖和烧飯。对这种火焰所作的科学研究也比扩散火焰多得多,因为,研究这种火焰可以得到許多关于气体混合物的基本性质的知識,例如它的燃烧速度和燃烧温度等。在本书的第2章和第3章我們將首先討論預混火焰,并在第4章中討論燃烧速度的測量問題;第5章則主要討論預混靜止火焰的传播理論問題。

在空气或氧气中燃烧的簡單煤气流股以及灯心上的火焰(在灯心上,由于火焰热量的加热作用不断有可燃性蒸汽生成),都属于扩散火焰。在扩散火焰中,当气体通过火焰时其化学成分发生稳定的变化,并且只有很少几个物理常数可以測量。这时燃烧速度系决定于扩散和混合速度,因此談不到什么燃烧速度的測量問題。比較有意义的是火焰中的温度分布及其輻射問題,虽然扩散火焰某些区域中的温度常常接近于理論上的最大值,但是它并未达到真正的最終燃烧温度,除非空气的供应也和燃料一样可以加以限制,然而这并不是經常可能实现的。在某些封閉体系內,例如在炉內,有可能来确定扩散火焰的温度,或者,更正确地說,是反应終了后燃烧产物的温度。近来已經查明了很多有关扩散火焰結構的有趣特征,这些問題将在第6章中加以討論。例如,从光譜研究中发现,在碳氢化合物-氧气的扩散火焰中,碳氢化合物在和氧气接触之前就会发生热分解。

虽然把火焰分成預混火焰和扩散火焰有其方便之处,但是不应将这种分类过份絕對化。例如,在空气和燃料都向上运动的扩散火焰中,如果一部分煤气和空气未能在烧嘴出口附近达成混合,以便形成一个传播方向与气流运动方向相反从而可以对火焰起稳

① 譯者注:严格來說,完全混合好了的可燃混合物才是預混混合物,由这种混合物所生成的火焰称为預混火焰(Premixed Flames)。

定作用的燃烧区，则火焰就会脱离烧嘴。当压力降低时，扩散火焰底部附近的预混合区变大，而且，当压力足够低时，这种预混合区能扩展到火焰的全部，以致和预混火焰已很少有所区别。又如，当用本生灯燃烧富混合物时，虽然这时火焰具有鲜明的内锥，但是火焰的稳定性还是要取决于外部的扩散火焰或者外锥的情况。还有一点不太清楚的是，许多本来非常稳定的预混火焰，如果将它包围起来，它们也会脱离烧嘴。油雾的燃烧，根据油滴颗粒的大小，看来既可能接近预混火焰，也可能接近扩散火焰。在第8章（固体碳粒的生成和燃烧）和第7章（火焰的振动、火焰的噪音及声音对火焰的影响）中将要谈到预混火焰和扩散火焰中所出现的各种现象。

运动的火焰

无论在密闭容器中或者在肥皂泡装置中所产生的那种不断扩展的球形爆震波对燃烧速度的测量都有一定的意义（第4章），并且有时还能出现某些平形静止火焰那样的有趣的蜂窝状火焰结构。不过，关于在管内和封闭容器中的爆炸火焰的传播问题，在本书中一般都不加讨论。

火焰沿着管子的传播开始时是以相当均匀的速度进行的，这一速度是由基本燃烧速度和火焰的面积所决定。在传播过程中，气体的膨胀迫使前焰面向前发展并使其速度增加，当前焰面的面积进一步增大时，前焰面的速度将变得很大。这种情况就象一个加速的活塞，并产生一种强烈的压力波或冲击波。冲击波能使温度升高并产生紊流边界层。这样，火焰就愈来愈快地在紊流热气中传播下去。如果冲击波变得足够强烈，则在冲击波后面将会发生热力着火，这时火焰的传播就变成另外一种非常猛烈的形式，这就是众所周知的爆震。在爆震情况下，前焰面是以冲击波的形式以相当于音速的速度进行传播，这一速度与冲击波的温度及压力有关。在彭和唐奈〔Bone and Townend, 1927〕以及刘易斯和埃尔柏〔Lewis and Von Elbe, 1951〕的著作中，曾经谈到了关于爆

震問題的早期研究成果，书中并附有許多关于爆震現象的很好的照片。由普通的燃烧轉变成爆震的具体过程現在尚未完全研究清楚，不过在第7届燃烧学会上（1959）已經提出了一些有价值的論文。

密閉容器中的爆炸燃烧主要是用于內燃机中。的确，这个問題一直是大量研究和发展的对象。一般來說，对这一問題的研究主要还是技术性的，而对內燃机汽缸中的火焰本身則研究得較少。現在有一些有趣的化学方面的問題，例如敲击現象，它的产生是由于主前焰面之前的混合物提早着火所引起的，并且，在一定範圍內，当向混合物中加入一点化学葯剂时（例如四乙鉛），就能将这种敲击現象制止。研究这些現象就必然要涉及到关于热力着火、冷火焰的生成、以及二級着火过程等問題，它們都已超出了我們对火焰的研究范围。这些問題在許多著作中都有所說明 [Jost, 1946; Lewis and Von Elbe, 1951]。

物理还是化学？

燃烧学当然是一門介于物理和化学之間的科学。但是，过去一直是比較多地把它当作化学的一个分支来看待，从最早的燃素理論直到近来的鏈狀反应理論以及化学动力学，研究燃烧学的主要貢獻都是在化学方面。虽然如此，但从最近几年以来，燃烧学的研究重点已愈来愈轉向物理过程方面。

在低溫区，对于研究冷火焰、确定着火溫度以及混合物的着火极限（火焰自动传播的浓度极限）來說，看来化学过程可能是最重要的。

从实用角度来考虑，有意义的不是那些极限条件下的問題，而是已經建立起来的高溫火焰的稳定性、它的結構、放热以及輻射問題。化学反应的放热仅仅是所有过程的一个开始，而过程的決定因素則主要是在物理方面。对于扩散火焰來說，化学反应速度一般是不重要的；这时，決定燃烧速度的是反应介质相互之間的扩散速度（对于尺寸較大的火焰來說則是混合速度）。燃烧系統

的空气动力学条件(气流的紊动性, 空气的引入情况等), 是决定火焰尺寸及其稳定性的最重要的因素。我們也会遇到传导传热和輻射传热的問題。在研究預混火焰时, 总的問題和扩散火焰都差不多, 但这时燃烧速度是决定于化学反应速度, 虽然这时火焰的传播也和前焰面之前的传热速度以及活性核心的扩散速度有关。火焰的稳定性也可能受到由于共振或外界噪音所引起的振动作用的影响(例如发声的火焰及敏感性火焰)。

許多研究火焰的方法都要用到物理方面的測量。例如, 火焰速度的研究就要涉及到火焰的照相問題, 并由此引起許多复杂的光学問題。火焰溫度的測量主要是用光学法进行, 并且将在第10章和第11章中加以討論。第9章中談到的是关于火焰的輻射問題。

在詳細研究反应区的結構和調整高速放热开始后的平衡問題时, 我們將涉及到一些詳細的分子过程, 例如振动能、电子激发能与其它能量之間达成均匀分配时的滯后現象等。这些問題将在第9章中討論。火焰气体中发生高度电离的原因及其作用也是一个很有意义的問題; 它們将在第13章內加以討論。

天体物理学家在研究星球的大气层方面已通过輻射光譜的定量測量取得了很大的成就。事实上, 我們几乎可以毫不夸大地說, 我們現在对某些星球的大气层中所进行的过程的了解程度, 要比对本生灯中的燃烧过程的了解程度还要大。的确, 在可控制的實驗室条件下, 通过輻射光譜和吸收光譜的研究, 我們一定能够掌握到比現在多得多的知識。关于光譜学的問題在給登所著的“火焰光譜学”(Gaydon, *The Spectroscopy of Flames*, 1957)一书中有專門的介紹, 該书与本书之間的重叠之处并不多。在本书中增加了关于有机火焰反应区中的高度电子激发問題以及扩散火焰的光譜和結構問題的研究成果。我們在本书中也討論了輻射平衡的偏离所产生的影响。到目前为止, 我們並不認為所采用的这种天体物理学的方法已經給我們带来了很大的成就, 但是它的初步成果是很清楚的, 我們期望它能在关于火焰的結構、輻射及其溫度的研究上不断地為我們带来新的进展。