

脉动燃烧

程显辰 编著
中国铁道出版社



53.5

687

1

~~D649/29~~

脉动燃烧

程显辰 编著

1994/10/1



中国铁道出版社

1994年·北京

1015262

(京) 新登字063号

内 容 简 介

脉动燃烧是介于燃烧学和声学的一门边缘学科。脉动燃烧器具有很高的燃烧效率、热效率、燃烧强度和很低的污物排放。本书详细介绍了脉动燃烧的机理、脉动燃烧器的工作原理、应用技术、实用诊断技术以及脉动燃烧应用的领域,可供热能工程领域的工程技术人员阅读。

脉 动 燃 烧

程显辰 编著

中国铁道出版社出版发行
(北京市东单三条14号)

责任编辑 钟加栋 薛 淳 封面设计 陈东山
各地新华书店经售
中国铁道出版社印刷厂印

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 8.375 字数: 208千
1994年8月 第1版 第1次印刷
印数: 1—1000册

ISBN7-113-01675-8/TK·15 定价: 8.90元

本·津教授序

近年来，人们对脉动燃烧技术的兴趣在日益增强，这是因为它在强化能源转换过程中带来相当大的利益。利用脉动燃烧开发水和空间加热设备的实践已证明，脉动燃烧突出的优越性在于高效率和低污染。这一优越性在诸如干燥、水泥生产、石灰煅烧、金属加热与熔化、焚化等生产过程中体现得尤为突出，显著地节省燃料、提高生产率。但是，目前开发与应用脉动燃烧技术，仍须做大量的研究工作。我希望这本书的出版能把脉动燃烧技术介绍给中国的工程师和科学家们，以促进该项技术的应用与发展，这对于保护能源和改善人民生活具有重要意义。

本·津

乔治亚理工学院航空系教授

Dr. Ben T. Zinn

Regents Professor

School of Aerospace Engineering

Georgia Institute of Technology

1015262

曹传钧教授序

燃烧中存在的稳定性是火箭和其他飞行器发动机工作中的致命的故障。在大约四十年前，这曾经是发展大型火箭导弹的一大障碍。经过科学家们不懈的努力，现在问题基本上解决了，使得在工程上能够研制出正常工作的大型火箭发动机。在探索不稳定燃烧机理的过程中，发现过声振荡对于燃烧、传热和传质都有促进作用。著名的美国火箭发动机专家本·津教授较早地深入研究这个机理，并应用到各种高效燃烧炉的研制中，取得了卓越的成果。现在美国商品化的脉动燃烧加热炉已有几种，但是其潜力还没有完全发挥出来，也还没有普遍到能用各类燃料。所以津教授领导的集体还在继续这方面的研究工作。

本·津现任美国乔治亚理工学院的教授 (Regents Professor)，也是北京航空航天大学的名誉教授。几十年来，他从事发动机燃烧方面的理论与应用研究，成绩卓著。他对中国十分友好，很愿意帮助中国推广脉动燃烧技术，以节约大量能源。同时他还热心地为中国培养人才。如本书的作者——程显辰副教授就是在他指导下，前后四年多参加脉动燃烧的科学研究，得到很好的锻炼和提高，取得优异成绩的中国访问学者之一。

节约能源是国家经济建设和人民生活中一件必须十分重视的大事，脉动燃烧技术的开发和应用将会对我国能源的合理消费起很大作用。当然，要实现这一点，还有一段研究的和工程化的路程要走。这本书的出版对于我国脉动燃烧技术的应用必将会起重要的作用。

曹传钧

北京航空航天大学原校长、教授

1992年3月10日

前 言

能源的保护和节约是当今世界上的重大课题之一。相对来讲,我国的能源并不丰富,问题也更加突出。脉动燃烧技术在能源生产及保护方面有着广阔的应用前景,对节约能源也有着重要作用。无论是人民生活,还是工业生产领域,凡是存在混合、传热、传质过程的地方,都可以利用脉动燃烧技术,改善燃烧过程,提高效率,节约能源。

脉动燃烧是指在声振条件下发生的一种周期性的燃烧过程速在燃烧区内,表征这个过程的状态参数,如压力强度、气流速度、温度及热释放率等,是随时间周期性变化的。脉动燃烧大。是自激产生的;也可以是由外部装置,如火花塞、声驱动器等强制产生的。由于压力、速度脉动的结果,很大程度上强化了传热、传质及动量传递(混合)过程,从而使得燃烧器具有很高的燃烧效率、热效率、燃烧强度和很低的污染物(如 NO_x 、烟尘等)排放量。脉动燃烧是一门独立的、介于声学和燃烧学之间的边缘科学。

近三十年来,在欧、美、前苏联、日本等国家,对脉动燃烧机理及应用技术的研究愈来愈深入和广泛。不少研究成果已商品化并取得专利,被广泛地应用在生活及工业领域。在我国,脉动燃烧技术的研究与应用还刚刚起步。本书着重向热能工程等领域中的工程技术人员介绍脉动燃烧的机理和应用技术,以期这门边缘科学能为我国的高效节能工作做出更大的贡献。

本书共分八章。在第一章概论中介绍脉动燃烧的概念、发展历史,以及各阶段中的典型成果及应用领域。第二章突出介绍脉动

燃烧器本身及其在工业生产中的应用方面所特有的优点。第三章叙述常见的几种脉动燃烧器的工作原理。第四章通过大量的实验研究文献分析脉动对混合、传热、传质过程的强化作用，以及减少污染物生成的机理。第五章分析脉动燃烧器的理论模型，重点讨论线性化理论数学模型的建立及其解的分析。第六章讨论脉动燃烧的驱动机理，这是目前脉动燃烧研究的热点和关键问题之一。第七章介绍脉动燃烧研究中的实验诊断技术。第八章以全书四分之一的篇幅介绍脉动燃烧的应用技术，包括脉动燃烧器的构造，煤的脉动燃烧，大尺寸液体燃料脉动燃烧器，工业过程中驱动谐振脉动的应用等。

作为一门新兴的边缘学科，脉动燃烧涉及到多种学科领域，有热力学、流体力学、燃烧化学、声学、机械工程及其他一些诸如环境保护学等等。因而，要完全地理解脉动燃烧现在还难以达到，人们对脉动燃烧机理的认识仍受到一定的局限。至今，在脉动燃烧器设计上还缺乏完整的理性设计方法，在新型脉动燃烧器的设计和产品系列化的方法上，还不得不经过“试验——失败——再试验”的探索过程。总之，在机理研究和应用开发研究两方面都还有很多问题需要去研究和探索。

本书作者长期从事脉动燃烧的研究工作。自1985年以来，又两次赴美，在乔治亚理工学院本·津教授(Dr. Ben T. Zinn)的指导下，对脉动燃烧的机理与应用技术进行了广泛而深入的探索。美国乔治亚理工学院对脉动燃烧的研究目前在世界上处于领先地位。本·津教授从70年代以来一直从事脉动燃烧研究工作，具有很深的学术造诣，是当今世界这一学科领域中的权威专家之一。在本书的编写过程中，本·津教授给予了热情的帮助和提供了大量的宝贵资料。1991年6月他以北京航空航天大学名誉教授的身份来华短期讲学，系统地讲授了脉动燃烧的理论与应用实践。他留给作者的讲课提纲成为本书的重要材料，为本书的出版打下了良好的基础。为了支持这本书的出版，他又为本书作了序。在此，对本·津教授表示衷心的感谢。同时，向对本书的出

版给以很大帮助的北京航空航天大学前校长曹传钧教授以及张斌全教授、唐嘉瑛副教授表示衷心的感谢。

由于脉动燃烧技术所涉及的学科领域甚多，本人水平有限，书中难免会有错误及不当之处，诚挚地希望读者批评指正。

作者

1992年4月

目 录

符号汇编	1
第一章 概 论	3
§ 1—1 脉动燃烧与燃烧不稳定性	3
§ 1—2 “唱歌的火焰”和对音乐“敏感”的火焰	4
§ 1—3 脉动燃烧应用的最初尝试	6
§ 1—4 瑞恩斯特的“燃烧罐”	10
§ 1—5 施密特燃烧器和V-1飞弹	11
§ 1—6 无阀的脉动喷气发动机	16
§ 1—7 脉动燃烧应用于能源生产领域	18
第二章 脉动燃烧的优点	20
§ 2—1 脉动燃烧器本身特有的优点	20
§ 2—2 生产中应用脉动燃烧技术的优点	22
§ 2—3 脉动燃烧应用中可能碰到的问题	24
第三章 脉动燃烧器的工作原理	25
§ 3—1 四分之一波型脉动燃烧器的工作原理	25
§ 3—2 亥尔姆霍茨型脉动燃烧器的工作原理	29
§ 3—3 用波的传播解释脉动燃烧器的工作过程	31
§ 3—4 带气动式阀的脉动燃烧器的工作过程	37
§ 3—5 瑞克型脉动燃烧器的工作原理	41
§ 3—6 瑞利准则	44
第四章 脉动对混合、传热、传质及NO _x 生成率的影响	49
§ 4—1 脉动强化混合过程	49

§ 4—2	脉动强化传热过程	57
§ 4—3	脉动强化传质过程	69
§ 4—4	脉动燃烧器中降低 NO_x 生成量的机理	73
第五章 理论模型分析		83
§ 5—1	建立理论模型的线性化途径	83
§ 5—2	线性化数学模型的建立	86
§ 5—3	热量加入的作用	91
§ 5—4	质量加入的作用	97
§ 5—5	控制边界上声能的加入和提出的影响	99
§ 5—6	控制边界上的声导纳	105
§ 5—7	理论模型例一：四分之一波型脉动燃烧器	110
§ 5—8	理论模型例二：亥尔姆霍茨型脉动燃烧器	113
第六章 脉动燃烧的驱动机理		119
§ 6—1	概 述	119
§ 6—2	带机械阀的脉动燃烧器的驱动机理	121
§ 6—3	脉动频率和谐波振型的跳变	133
§ 6—4	瑞克型脉动燃烧器的驱动机理	138
§ 6—5	涡脱落驱动脉动燃烧	142
§ 6—6	周期性燃烧面变化驱动脉动燃烧	153
第七章 脉动燃烧诊断技术		160
§ 7—1	脉动燃烧诊断技术的特点及被测参数	160
§ 7—2	燃烧效率和污染物排放量的测量	161
§ 7—3	声学压力的测量	163
§ 7—4	热释放脉动的测量	165
§ 7—5	流场显示技术	169
§ 7—6	速度测量	170
§ 7—7	温度测量	174

第八章 脉动燃烧应用技术	176
§ 8—1 脉动燃烧应用研究与开发	176
§ 8—2 各种脉动燃烧器的构造	185
§ 8—3 煤的脉动燃烧	206
§ 8—4 大尺寸液体燃料脉动燃烧器	220
§ 8—5 在工业过程中驱动谐振脉动的应用	229
§ 8—6 应用脉动燃烧器实例	234
参考文献	247

本书符号汇编

英文字母

A	压力脉动波的振幅
c	声速
\bar{c}	平均声速
c_p	定压比热
c_v	定容比热
e	单位容积内的能量
f	脉动频率
g	格林函数
Gr	格拉晓夫数
k	波数 $k = \omega / \bar{c}$
k_h	波数
L	燃烧器或系统的长度
L_i	第 i 项声学损失
Nu	努塞尔数
n	法向量
p	声学压力
\bar{p}	二阶压力应力张量
Q	周期性加入的热量
R	响应因数 $Q = RP$
R	气体常数
Re	雷诺数
S	控制表面的面积
St	斯特劳哈尔数
T	脉动周期

T	温度
T'	随机温度脉动分量
t	时间
u	声学速度轴向分量
v	速度向量
V	系统的容积
x	横轴坐标值
x	空间位置
Y	声导纳

希腊字母

α	余气系数
γ	比热比
γ_n	本征值
δ	狄拉克 δ 分布函数 (Dirac)
ε	小量
η_n	本征值
\mathcal{N}	第二粘性系数
λ	波长
λ	导热系数
μ	第一粘性系数
ρ	介质密度
τ	时间
τ_c	燃烧时间
ϕ	相位角

ϕ 燃料/空气混合当量
 比 $\phi = \frac{1}{\alpha}$
 ω 角频率
 ω_H 亥尔姆霍茨谐振频率
 ∇ 梯度算符
 $\nabla \cdot$ 散度算符
 角注
 l 向左传播的
 r 向右传播的
 c 燃烧室的

t 尾管的
 j 射流的
 i 复数之虚数部的
 r 复数之实数部的
 i 入射波的
 r 反射波的
 n 固有的

上标符号

—
 () 稳态量
 ()' 非稳态扰动分量

第一章 概 论

§ 1—1 脉动燃烧与燃烧不稳定性

脉动燃烧指的是与常规的稳态燃烧过程不同的一种特殊的周期性脉动的燃烧过程。

在常规的稳态燃烧器中,燃烧过程在宏观上是稳定的。在燃烧过程中,燃烧室内的压力、温度、流速和热释放率等参数在宏观上是不随时间变化的。但是,在设计为稳态工作的燃烧器中,燃烧过程并不总是在稳定状态下进行的,由于系统的不稳定性,会自发产生或多或少的振动,特别在点火起动之后的一段时间内更加突出,振动的幅度会按指数规律增长,直到在燃烧器内建立起一定振幅、一定频率的压力振动。这种振动的燃烧过程的出现,通常称之为燃烧的不稳定性。

燃烧不稳定性常常出现在喷气发动机、火箭发动机、冲压发动机以及电站锅炉等几乎所有按设计应在稳定状态下工作的各种燃烧系统中。当不稳定燃烧出现在航空、航天的推进燃烧系统中时(在这个领域中称之为振荡燃烧),经常造成不寻常的极高燃烧速率和传热速率,从而导致燃烧器壁面烧穿;经常带来剧烈的振动,以致损坏燃烧装置的机械结构,干扰和破坏控制系统的正常工作。在地面静止的燃烧装置中出现燃烧不稳定时,经常伴随着很大的噪声,甚至发生熄火等故障,使燃烧装置无法正常工作。所以,对设计为稳态工作的燃烧装置,不稳定燃烧的出现是不受欢迎的,是有害的。

为了掌握燃烧不稳定性的产生机理,寻求抑制它出现的途径,科学家们进行了大量的研究和试验,产生了一整套控制和避免不稳定燃烧的理论和方法。与此同时,人们还发现,这种不稳

定的燃烧过程在一定条件下却具有独特的优点。从能量转换效率的角度来看，在可控条件下的某些类型的不稳定燃烧还能成为提高效率、节省燃料的一种有效的途径。因此出现了一些利用燃烧不稳定性，在一定的声学条件控制下，专门工作在声脉动状态下的燃烧器，形成一门特殊的燃烧技术，叫做脉动燃烧技术。

可以说，脉动燃烧是一种特殊类型的不稳定燃烧。脉动燃烧的控制机理在许多方面与燃烧不稳定性产生的机理是相同的。因而，在燃烧不稳定性研究中所获得的信息、理论和方法都可以用于实用的脉动燃烧器的研究和开发，只是两者的研究出发点不同。研究燃烧不稳定性出发点在于如何控制、避免不稳定燃烧现象在设计为稳态工作的燃烧器中出现，而研究脉动燃烧的出发点却与此相反，在于如何驱动燃烧器内的燃烧脉动，以达到更高的能源转换效率。

§ 1—2 “唱歌的火焰”和对音乐 “敏感”的火焰

根据文献记载，人们最早知道有关脉动燃烧现象，大约可以追溯到1777年，希格金斯博士 (Dr. Higgins) 关于“唱歌的火焰”现象的发现^[1,2]。在他的研究中使用的实验装置如图1—1所示。该装置是由一个竖直放置的玻璃管和一个气体燃料的燃烧器构成。当把燃烧器及火焰从下面伸入玻璃管时，玻璃管内便激发起很大的声音来。声音的频率可能是玻璃管的基波振型声振的频率，也可能是某个高次谐波振型的频率。这取决于许多因素，诸如燃烧器的特性，火焰的特性以及玻璃管的几何参数等等。在玻璃管的上方，套上一个可滑动的套筒，上下移动套筒，使得加长或减小管子的长度，声音的频率会随之而变化，就象在唱歌一样。在希格金斯之后，不少人继续他的研究，如德鲁克^[3] (J. A. Deluc, 1796)、什拉德尼^[1] (Chladni, 1802)。法拉第^[4] (Faraday, 1818)、廷达尔 (Tyndall) 和瑞利 (Rey-

leigh) 等。

这些研究表明，这一现象的产生，是由于燃烧火焰系统与玻璃管内气体的声学振动之间的一种正向相互激励造成的。这种正向的相互激励过程只有在满足一系列的条件时才能出现。

继发现“唱歌的火焰”之后，在上世纪中叶，李康特教授 (Le Conte) 偶然地发现了音乐“敏感的火焰”^[1]。他在纽约的一次音乐晚会上，发现了这一现象。他写道：“我观察到，每当音乐一响，烛光火焰便准确地随着音乐节拍的变幻振动‘跳舞’。特别是当大提琴的强有力音符奏响之时，这个现象使在场的每一个人为之惊讶。甚至，火焰的变化能完美地反映出乐器

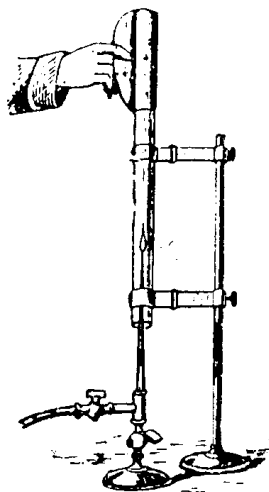


图 1—1 希格金斯博士
“唱歌的火焰”的
实验装置 (1777年)

发出的颤音，这是非常有趣的。也许聋子能从火焰面上看到音乐的旋律。”李康特对此现象进行了研究。后来，廷达尔等人又独立地研究了气体火焰对外界声激励的响应^[1]。实验中，把气体燃烧火焰用一个短短的玻璃管包围起来，然后用外部的声音去激发它。他们的研究发现，在合适的频率和振幅下，从外部施加的声音会引起管内的寂静的火焰“唱歌”，熄灭或“跳舞”。这取决于火焰的特性，火焰在管中的位置，以及这个包围火焰的玻璃管的几何尺寸。在对不用玻璃管包围的“裸露”火焰的研究中，证实了李康特的发现，外界声音的激励确实可以剧烈地改变火焰的特性。火焰对外界声音的这种反响，是由外界声音的频率和声音所碰到的火焰区的结构决定的。

“唱歌的火焰”和对声音“敏感的火焰”所描述的，正是脉

动燃烧过程中的两个基本激励过程：燃烧可以在某种条件下激发燃烧器中的声学脉动；反过来，声脉动可以改变燃烧的特性。脉动燃烧正是在特定条件下，这两个激励过程的正的相互反馈所形成的一种特殊的燃烧过程。

§ 1—3 脉动燃烧应用的最初尝试

在“唱歌的火焰”和对音乐“敏感的火焰”这种燃烧现象发现之后，人们开始了对脉动燃烧现象的探索与研究。在开始，只限于对原理及特性的研究，以求认识它，理解它。直到20世纪初，才开始考虑应用这种脉动燃烧现象。最初的尝试是在早些时候出现的内燃机的影响下开始的。在内燃机中往复循环的燃烧过程，实际上也可以看作为强迫脉动的燃烧过程。这些早期的脉动燃烧应用研究，主要是在由空气供氧的推进装置和燃气涡轮动力装置等领域中展开的。

1906年，艾斯诺尔特-培尔特里 (Esnault-Peltre) 燃烧器在法国取得专利权。它是一台利用脉动燃烧器推动燃气涡轮的装置^[6, 8]，如图1—2(a)所示，它的基本结构相当于两个带机械阀的四分之一波型脉动燃烧器，在出口平面互相对接在一起组成的。推动涡轮旋转的喷管设在中央。在每个周期内，两半边燃烧室交替燃烧、排气、做功。如图所示，在前半周期，当左边单向阀门关闭、燃烧、膨胀排气时，右边的单向阀门打开，吸进新鲜空气和燃料。在后半周期内，右边燃烧、膨胀，而左边吸入新的反应物。两半边燃烧室依次排气吹动涡轮旋转。燃烧器内沿轴线的压力分布〔见图1—2(b)〕表明，这台燃烧器内声学压力沿轴线的分布，与两端封闭的谐振管内的压力波型结构十分相似。

1908年，劳林(Lorin)提出的脉动喷气发动机方案，明显地反映出当时内燃机出现的影响(见图1—3)^[7, 8]。在这个装置中，燃烧发生在气缸内。燃烧产物通过喷管向外排出产生推力。气缸内装有活塞，与曲柄连杆机构相联接，可用以接受燃烧前压