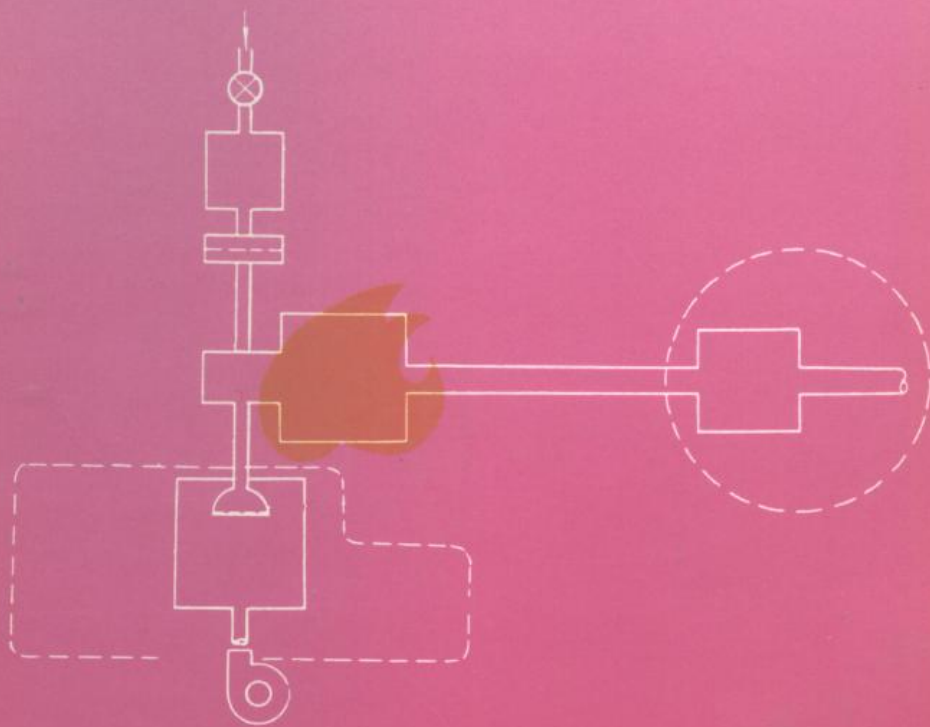


燃气脉冲燃烧技术

周伟国 秦朝葵 编著



同济大学出版社

72.55
340

燃气脉冲燃烧技术

周伟国 秦朝葵 编著

34500/1-1

江苏工业学院图书馆
藏书章

同济大学出版社

内 容 提 要

脉冲燃烧是一种高效低污染的新型燃烧技术,其应用前景十分广阔,国际上已得到广泛研究与开发。本书较为详尽地论述脉冲燃烧基本原理与工程应用。全书分八章,分别介绍脉冲燃烧运行稳定性、换热特性、低 NO_x 排放性质、消声及其应用情况。

本书广泛吸收国内外有关最新技术及研究成果,并结合同济大学燃气教研室的研究成果,阐明燃气脉冲燃烧中的一些关键问题。

本书可供从事煤气、天然气及液化石油气燃烧应用研究、燃烧设备设计的科技工作人员和高等院校燃气专业教师、研究生阅读、参考。

责任编辑 吴味隆

封面设计 吴建明

燃 气 脉 冲 燃 烧 技 术

周伟国 秦朝葵 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

上海市印刷七厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 7.75 字数: 190 千字

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1-500 定价: 16.00 元

ISBN 7-5608-1863-3 / TB · 36

前 言

脉冲燃烧是一门新型的燃烧技术，具有热效率高、燃烧污染低等特点，目前已成功地应用于热水、热风等领域。脉冲燃烧技术的推广将大大推动节能工作的开展。

脉冲燃烧是一门涉及传热、燃烧、声学等多学科的交叉学科。迄今国内尚无这方面的专业书籍。本书收集了近年来国内外关于脉冲燃烧的理论和经验，综合了同济大学燃气教研室十年来的研究成果，可作为高等院校燃气、热能专业的师生和研究人员以及有关工程技术人员参考书。

全书共分八章，其中第四章～第六章由周伟国编写，第一章～第三章和第七章、第八章由秦朝葵编写。全书由周伟国统稿并主编。

姜正侯教授、章成骏教授、吴念劬副教授等在本书成稿过程中提出了宝贵的意见，在此谨表谢意。

由于作者水平有限，加之时间仓促，粗疏之处在所难免，恳请读者予以指正。

周伟国 秦朝葵

1997年4月于同济大学

目 录

第一章 概述	1
第一节 脉冲燃烧的历史	1
第二节 脉冲燃烧的研究现状	2
第二章 脉冲燃烧的基本原理	10
第一节 脉冲燃烧器的基本结构	10
第二节 脉冲燃烧的基本原理	12
第三节 脉冲燃烧器种类	15
第三章 脉冲燃烧器的运行特性	16
第一节 频率特性	16
第二节 压力特性	29
第三节 脉冲燃烧子过程及其他特性	32
第四节 运行稳定性	39
第四章 脉冲燃烧器换热特性	46
第一节 脉冲燃烧器的对流换热系数	46
第二节 脉冲燃烧器对流换热系数的计算	50
第三节 振荡幅值与频率对换热系数的影响	55
第五章 脉冲燃烧产生的氮氧化合物	59
第一节 NO_x 及其生成的机理	59
第二节 脉冲燃烧器低 NO_x 的排放	62
第三节 脉冲燃烧器低 NO_x 排放的原因	64
第六章 脉冲燃烧器噪声与防治	68
第一节 燃烧振荡与噪声	68
第二节 脉冲燃烧的噪声及其降低	72
第七章 脉冲燃烧数学模型	83
第一节 零维热力模型	83
第二节 气柱振荡理论	91
第三节 计算机模拟	93
第四节 一维数值模拟	94
第五节 小结	95
第八章 脉冲燃烧产品的开发	98

第一节	脉冲燃烧产品的设计.....	98
第二节	脉冲燃烧热水炉.....	107
第三节	脉冲燃烧暖风机.....	107
第四节	脉冲燃烧产品开发中的若干问题.....	108
附 录	脉冲燃烧研究中的测试方法介绍.....	111

第一章 概述

脉冲燃烧是一项高效、节能、低污染的新型燃烧技术。本章主要介绍脉冲燃烧的历史和研究现状，从下面的介绍中不难看出，脉冲燃烧技术的研究与能源状况密切相关。

第一节 脉冲燃烧的历史

我们从脉冲燃烧器不同结构的演变，来考察脉冲燃烧技术的发展历史。

§ 1-1-1 机械阀脉冲燃烧器

脉冲燃烧最早可追溯到 1777 年由拜伦·希金斯（Byron Higgins）所报告的燃烧驱动的振荡现象，那时主要是将脉冲燃烧用于燃气轮机方面，遗憾的是直到 100 年之后，这一现象的积极有利的一面才引起人们的注意。1906 年埃思诺特-皮特里（Esnault-Pelterie）申请了一个法国专利(图 1-1)——使用的是机械阀脉冲燃烧装置，其同事马康纳特（Marconnet）于 1909 年提议直接使用单个空气动力阀的脉冲燃烧器用于产生推进动力（图 1-2）。卡拉沃黛（Karavodine）于 1906 年获得的专利与埃思诺特-皮特里的用途相近，也使用机械阀(图 1-3)。与此同时，阿曼高（Armengaud）获得了与其相差不大的专利。这些脉冲燃烧器的特点是，采用轴对称或非轴对称的直径大小不一的共鸣管，其阀门或为机械阀或为空气动力阀，主要用途在于直接产生推进力。

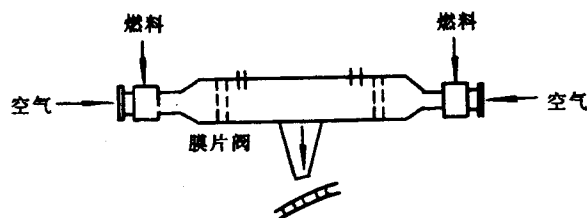


图 1-1 埃思诺特-皮特里 1906 年设计的脉冲燃烧器

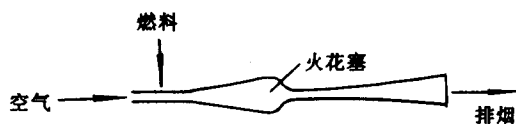


图 1-2 马康纳特设计的脉冲燃烧喷射器

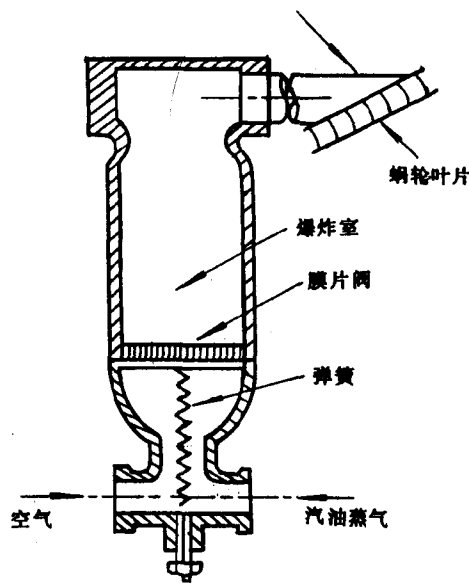


图 1-3 卡拉沃设计的脉冲燃烧器

斯密特 (Schmidt) 于 1931 年获得如图 (1-4) 的脉冲燃烧器专利。显然, 该装置有点像埃思诺特-皮特里脉冲燃烧器的一半, 其特点是燃料射流位于机械阀的下游, 而不是上游。以后这种燃烧室和尾管具有相同截面积的脉冲燃烧器就被称为斯密特型脉冲燃烧器。1940 年斯密特又研制出了一种燃用汽油的脉冲燃烧喷气发动机, 但其中的进气阀和燃料射流尚存在一些问题。后来在纳粹德国的逼迫下, 斯密特与阿古斯 (Argus) 公司的人员合作, 于 1941 年研制成功了用于推动 V1 蜂鸣飞弹的阿古斯-斯密特管 (图 1-5), 其阀门由 9 个呈方阵排列的簧片阀—燃料喷嘴—文丘里喷嘴所构成。首批 V1 飞弹是在飞机上发射的。当飞行距离较短时, 也

采用弹射机发射。尽管 V1 飞弹的设计时速为 700km/h, 但是当速度达到 600km/h 时, 所产生的冲压效应大大降低了喷气反冲力, 故其最终时速限制在 500km/h。

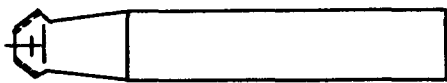


图 1-4 斯密特式脉冲燃烧器

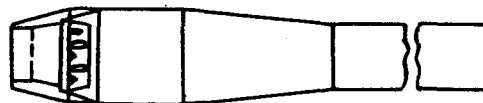


图 1-5 机械阀脉冲燃烧式发动机

除了在第二次世界大战期间作为德军 V1 飞弹推进装置予以大规模使用以外, 脉冲燃烧器作为反冲力发生装置仅局限在小型的模型飞机上, 如图 1-6 所示的戴纳 (Dyna) 喷气发动机。其原因在于同现代的涡轮喷气发动机相比, 使用脉冲燃烧冲力发生装置所产生的冲力低。尽管如此, 脉冲燃烧器仍在很长一段时间内被用在短程、费用低、亚音速飞机 (如无人驾驶的遥控靶机) 的动力装置上。

1946 年, 坦尼 (Tenney) 及同事在图 1-6 所示装置的基础上, 使用了一种新的阀门设计, 这种阀门构成了美军 M3A3 型烟雾发生器 (图 1-7) 的设计基础。1966 年祝伯-奥克罗格 (Zhuber-Okrog) 开始在 1/3 比例的阿古斯-斯密特管上进行一系列实验, 他使用三段不同的共鸣管, 通过多个火花塞, 并借助光学传感器、压力传感器等实验手段, 得出这样的

结论：欲维持稳定的燃烧振荡，必须有剩余的火焰残留在燃烧室内。这一结论与 Kitchen 等得出的结论是一致的。

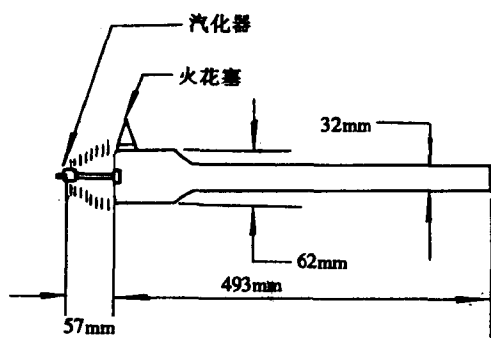


图 1-6 戴纳喷气发动机

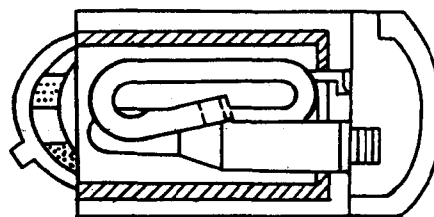


图 1-7 M3A3 型烟雾发生器

1967 年，洛克特达因（Rocketdyne）改进了埃思诺特-皮特里及卡拉沃黛的设计思想，研制了一种新的脉冲燃烧器，该燃烧器使用一种与 V1 飞弹上相近的阀门，并通过多个出口的冲击作用来驱动燃气轮机的叶片（1-8）。

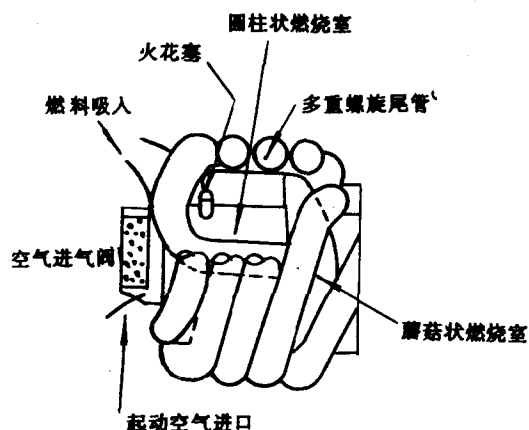


图 1-8 洛克特达因设计的脉冲燃烧器

道奈尔（Dornier）飞机公司将 V1 发动机运行范围扩展至大于马赫数，这一扩展是通过在排气口加一膨胀段，提高背压来实现的（图 1-9）。

第一个商品化的脉冲燃烧器是由休伯（Huber）1948 年制造的，用于加热发动机中的循环水或保持熄火发动机的温度。该设备燃用汽油，采用机械阀，功率为 6kW，由一菱形状燃烧室、螺旋形共鸣管和一消声器组成。1960 年休伯与埃伯斯帕赫（Eberspacher）合作，成功地研制出了一种燃油的脉冲燃烧器，用于汽车内的采暖，其功率为 12kW。

1956 年，凯姆（Kamm）申请了一个用于采暖的使用机械阀的脉冲燃烧器专利，该装置把需加热的新鲜空气压入一环绕燃烧室和共鸣管的声学共耦室。然后将热空气送入采暖区域（图 1-10）。

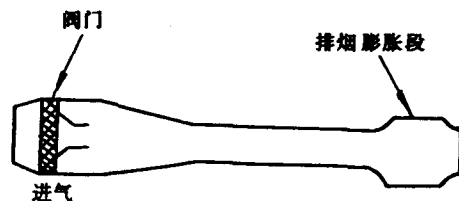


图 1-9 道奈尔飞机公司改进的 V1 发动机

1956 ~ 1961 年间，凯金（Kitchen）根据 V1 发动机和斯威因法尔（Swingfire）燃烧

器的说明，独立开发了用于居民采暖的鲁卡斯-罗泰克斯（Lucas-Rotax）脉冲燃烧锅炉（图 1-11）。这一工作一直持续到 1966 年。之后于 1975 年重新开始并更新为现在的亥

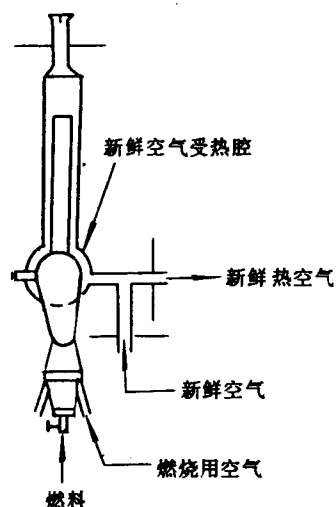


图 1-10 凯姆设计的采暖用脉冲燃烧器

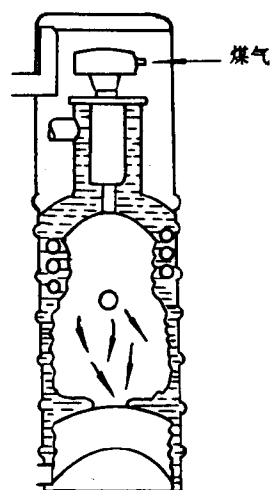


图 1-11 鲁卡斯-罗泰克斯脉冲燃烧锅炉

得罗-帕斯（Hydro-Puls）锅炉。凯金的发明包括燃烧缓冲室、燃烧室及其中的涡流稳焰件、分成多枝的一根共鸣管及多个排气出口，该燃烧器既可燃用液体燃料又可燃用气体燃料。

自 1960 年开始，美国燃气协会的工作人员在格里芬斯（Griffiths）的领导下，借助 GRI 和雷诺克斯（Lennox）公司的赞助，开发成功了商品化的脉冲燃烧暖风机（图 1-12）。另外，在欧洲也开发成功了既可燃用轻质油又可燃用人工煤气的特伯-帕斯（Turbo-Puls）锅炉；在日本，一种燃用气体燃料的蒸汽加热设备在城市的洗衣店中也获得了广泛的应用。

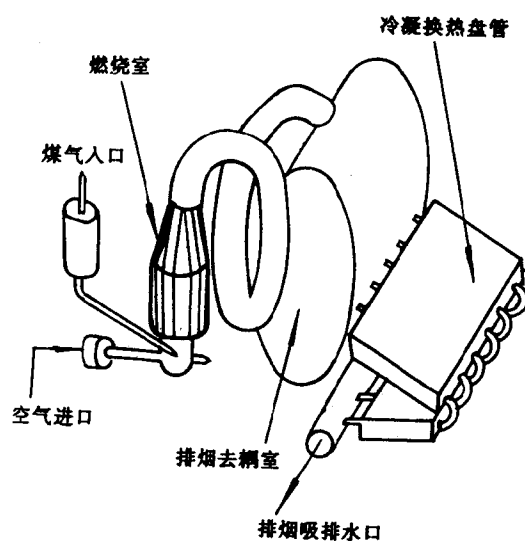


图 1-12 雷诺克斯脉冲燃烧暖风机

1969 年，汉比（Hanby）和布朗（Brown）发表了锥形燃烧室的对比试验结果（使用机械阀的亥姆霍兹（Helmholtz）型脉冲燃烧器），朝向上游呈锥形设计的燃烧室被用来燃

烧粉末状燃料，其运行频率为 75Hz。

§ 1-1-2 旋转阀脉冲燃烧器

采用旋转阀的脉冲燃烧器与使用机械阀的脉冲燃烧器很相似，因为两者在燃烧循环的膨胀段将进气端封闭，所不同的是前者的频率是由阀门的旋转频率决定的，而后者是由系统本身的固有频率所决定的。例如，1971 年昆萨基（Kunsagi）设计了一种使用穿孔旋转盘作为进气阀的脉冲燃烧器（图 1-13）。关于采用旋转阀的脉冲燃烧器，目前仍有不少学者在进行研究。由于本书仅讨论由燃烧装置自身的压力振荡所驱动的脉冲燃烧器，因此对旋转阀脉冲燃烧器在以后的章节中将不再讨论。

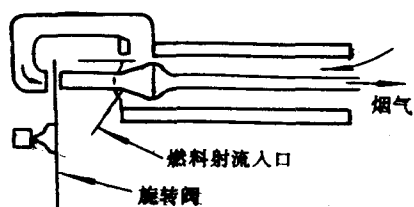


图 1-13 昆萨基采用旋转阀的脉冲燃烧器

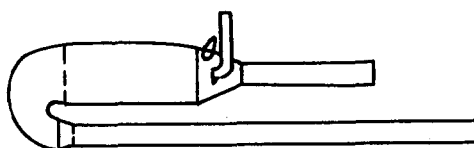


图 1-14 埃克累威斯型空气动力阀脉冲燃烧器

§ 1-1-3 空气动力阀脉冲燃烧器

所谓空气动力阀（Aerodynamically-Valved）又称气动阀（Aerovalved），是指一正反流量比例较大的流体元件，其作用是维持供气系统的流动单向性。与机械阀不同的是，空气动力阀单向性的实现是借助于流道本身的流体力学特性，而不是机械结构。

对于空气动力阀脉冲燃烧器贡献最大的当推斯纳克马（SNECMA）研究机构，该机构的研究始于 1943 年，1946 年开发出首台可稳定运行的空气动力阀脉冲燃烧器，但需要持续的鼓风方可维持脉冲燃烧。以后在该基础上不断改进，1950 年，埃斯库皮特（Escopette）型设计面世，1953 年，埃克累威斯（Ecrevisse）型设计也出现（图 1-14）。截止 1971 年，已有 40 多项关于空气动力阀的专利和论文，这些专利和论文所关于的空气动力阀脉冲燃烧器均旨在产生推进力。

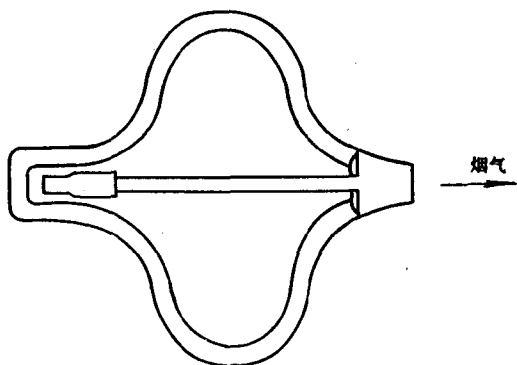


图 1-15 肯费得设计的增压器

另一个对空气动力阀研究作出贡献的是肯费得（Kentfield），他的第一项工作与斯纳克马机构的埃斯库皮特型有些相似，但其中采用了不同的流体转向设施，旨在改善燃气轮机增压设备的进口流量。他的工作还包括对脉冲燃烧器在进口和出口处的声学耦合的研究。

另一个较为突出的工作是他类似于埃斯库皮特型的设计上加了一段带共鸣器的排气管（图 1-15）。

1943 年，兹威基（Zwicky）发表了关于类似与肯费得管的“气动脉冲”燃烧器的研究论文。1944 年，斯伯特（Schubert）把“气动脉冲”发展为采用空气动力阀的燃烧设备，其中用一根直径很小的进气管代替机械阀。

在以后的一段时期内出现过许多改善正反流动比例的尝试。1955 年，泊特（Porter）和佩塞基诺（Persechino）曾进行过采用机械阀脉冲燃烧器驱动直升飞机旋转叶片的研究，以后研究转移到空气动力阀方面上，研究工作主要在于将空气动力阀脉冲燃烧器用于燃气轮机增压装置和粉状褐煤的燃烧。图 1-16 是他们设计的一种空气动力阀脉冲燃烧器。

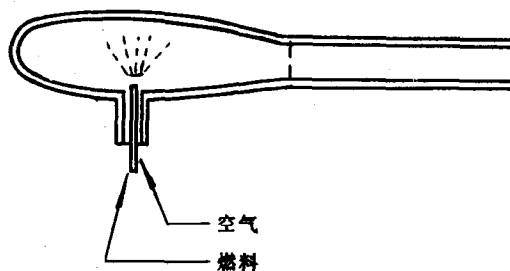


图 1-16 罗甘脉冲燃烧发动机

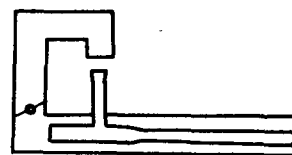


图 1-17 贝尔特燃用粉状褐煤的空气动力阀脉冲燃烧器

1965 ~ 1969 年间，贝尔特（Belter）及其在矿业研究站的同事在罗甘（Logan）脉冲燃烧发动机的基础上，研制成一种用于干燥褐煤并燃用粉状褐煤的空气动力阀脉冲燃烧器，他们使用三种不同尺寸的燃烧器（图 1-17），长度分别为 3.66m、6.10m 和 10.7m，其中最小的负荷范围为 0.31 ~ 1.37kW，褐煤湿度小于 10% 且其中 70% 煤粉粒径小于 $74\mu\text{m}$ ，最大的负荷为 7.3kW，运行频率为 15Hz。

1962 年，巴伯金（Babkin）设计了燃用重油双体空气动力阀脉冲燃烧器（图 1-18），其研究工作始于 1953 年，研究过程中由于机械阀的故障才导致采用空气动力阀。巴伯金所设计的燃烧器负荷最大为 50MW，运行频率为 31Hz，负荷最小为 15MW，运行频率为 68Hz，但这些燃烧器燃烧所需空气都不是依靠燃烧系统自身压力振荡吸入的。

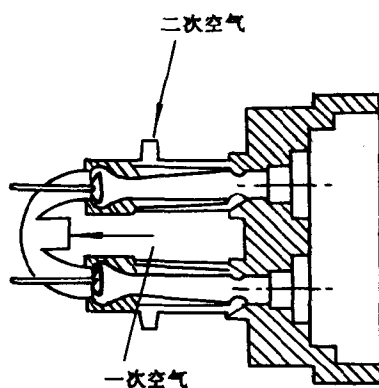


图 1-18 燃用重油双体空气动力阀脉冲燃烧器

在自 1965 年起的一系列论文中，凯兹奈尔（Katsnel）报导了大量关于空气动力阀脉冲燃烧器不同形状的燃烧室，图 1-19 所示燃烧室为这些研究中的最优形状。所设计的脉冲燃烧器最小负荷为 1.5MW，燃用液体燃料，运行频率为 62 ~ 100Hz，但这些燃烧器燃烧所需空气也都不是依靠燃烧系统自身压力振荡吸入的。

塞维亚宁（Severyanin）在 1970 年设计了如图 1-20 所示的偶极子脉冲燃烧器。这一系统实际上是由两串联的斯密特式脉冲燃烧器，在排烟处与一半波长长度的共

鸣管相连而成。

空气动力阀脉冲燃烧器广泛应用于干燥领域，这是因为所需设备的结构相对简单，而且在这种应用场合下，空气动力阀的回流是有利的（在大多数应用情况下空气动力阀的回流是不利的）。

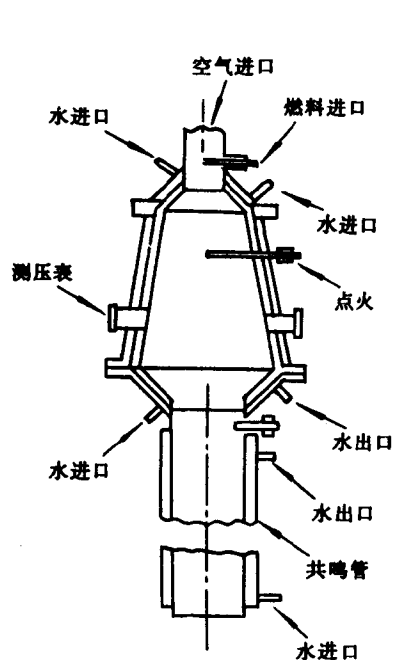


图 1-19 凯兹奈尔高效脉冲燃烧室

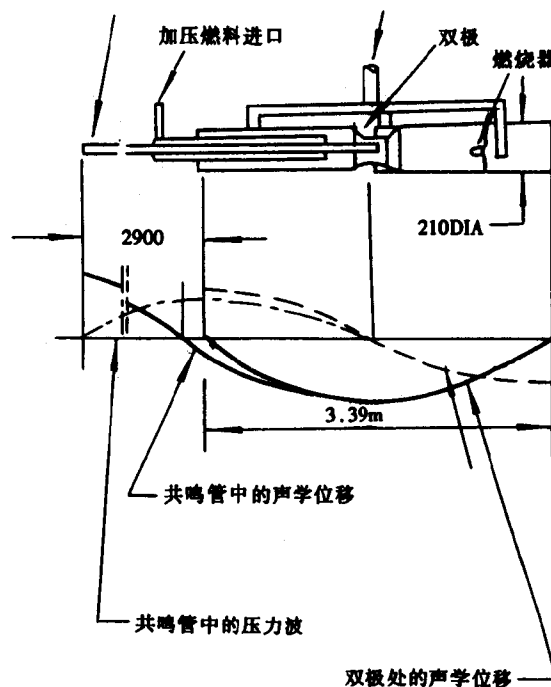


图 1-20 塞维亚宁设计的偶极子脉冲燃烧器

§ 1-1-4 雷恩斯特 (Reynst) “脉冲罐”



图 1-21 雷恩斯特脉冲罐

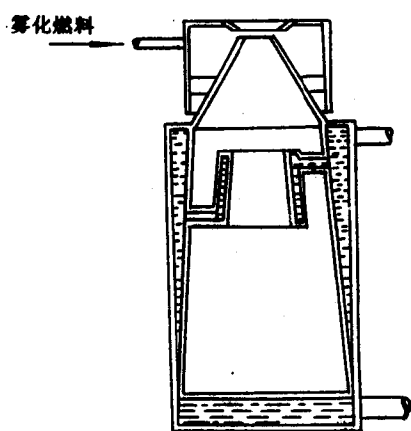


图 1-22 雷恩斯特脉冲燃烧器

1933 年，雷恩斯特报道了他所观察到的“脉冲罐（图 1-21）”现象：将一点燃的火柴仍进一装有高挥发性液体燃料的罐子里，燃烧气体通过与壁面的热交换作用会产生低频振

荡。1938 年他获得了基于同一原理的“脉冲罐”脉冲燃烧器的专利，并进行了大量实验与分析，发现了如图 1-22 所示的结构能以自然声频产生脉冲燃烧。他设计的脉冲燃烧罐与一般脉冲燃烧器不同的是，燃料和空气的射流与烟气的排出位于燃烧罐的同一侧，并且使用了涡流喷嘴。

§ 1-1-5 里克 (Rijke) 管现象

所谓里克管现象是一根直径为 100mm，长为 1.5m 的垂直管，在管内置一金属丝网，该金属丝网距管底部的距离为 1/4 管子长度，电加热金属丝网会产生由浮力所致的自然对流，并伴随相应于管子固有频率的强烈鸣叫。里克管现象常被用来解释由热驱动的振荡现象。

1954 年普特奈姆 (Putnam) 等总结了 1946 ~ 1947 年间采用天然气代替电作为加热源的研究，得出如下结论：自热源向环境气流的释热落后与气流速度的 1/8 周期，故若速度领先于系统声压 1/4 周期，则释热超前于系统声压 1/8 周期，根据瑞利 (Rayleigh) 准则，会发生稳定的气流振荡。

第二节 脉冲燃烧的研究现状

§ 1-2-1 脉冲燃烧研究的现状

如上所述，脉冲燃烧已有 200 多年的历史，但是商品化的脉冲燃烧还是比较零星的，缺乏系列化。这一现状说明，至今脉冲燃烧的理论研究还远远落后于产品开发的实践。

在本世纪 80 年代之前，关于脉冲燃烧理论和实验研究始终侧重于整体特性方面上，诸如传热、热效率、运行频率及排气中有害物质含量等。至于阐明脉冲燃烧器内在运行机理的文献几乎没有，而脉冲燃烧的产品开发几乎全部依赖于反复的实验摸索。

导致这一情形的原因，既有对燃烧现象理解的局限性，更多的是由于脉冲燃烧内在的复杂机理。脉冲燃烧器运行过程中，不仅涉及到流体力学、化学反应动力学等一般的燃烧理论，而且还包括声学、不可逆热力学等多学科的知识。至今还没有一种理论能够完整地预测脉冲燃烧器的运行工况。

随着先进测试手段的出现，如激光多普勒测速仪 (LDV)、激光测距系统 (LRS)、瞬时温度测量系统 (TLAF)，自 80 年代中期以来，对脉冲燃烧的研究开始转移到机理方面。通过实验手段，加深对瞬时流场、温度场、浓度场的认识。凯勒 (Keller) 等先后建立了特征时间等概念，在一定程度上揭示了脉冲燃烧得以稳定运行的内在因素。

国内对脉冲燃烧的研究起步于 80 年代中期，同济大学燃气教研室在姜正侯教授的带领经过多年的努力，取得了相当的成果，并开发出了燃气脉冲燃烧热水炉和暖风机。

§ 1-2-2 脉冲燃烧的应用前景

作为一种高效低污染的新型燃烧技术，脉冲燃烧的应用前景十分广泛。表 1-1 列出了普特奈姆等人统计的脉冲燃烧可能的一些应用场合。

脉冲燃烧可应用的范围虽然很大，但是相应的脉冲燃烧产品却非常少。迄今为止，最为成功的商品化脉冲燃烧产品是雷诺克斯暖风机、大阪煤气工业液体加热炉和东京煤气快餐油余炉。另外，亥得罗-帕斯热水锅炉和因-帕斯暖风机也获得一定程度的推广。脉冲燃烧

产品开发的困难主要在于脉冲燃烧固有的复杂性。

表 1-1 脉冲燃烧的应用范围

用途	应用场合
产生冲力	推进、竖直升降设施；产生扭矩；表面清洗；除垢等
产生压力	燃气轮机燃烧器；烟气再循环装置
加热液体	热水采暖；蒸汽发生；便携式热水器；液体粘度控制；石油工艺等
间接加热空气	车辆采暖；住宅及工业建筑采暖等
直接加热空气	各类物质干燥；机械设备加热装置；土壤杀菌；烘房等
其他用途	烤炉；冰雪融化器；垃圾焚化炉；燃料气化炉；热泵等

§ 1-2-3 本书主要内容

由第一节的介绍可知，脉冲燃烧所采用的燃料可以是液体燃料、固体燃料（粉状化）和气体燃料，本书仅讨论燃用气体燃料的脉冲燃烧，即燃气脉冲燃烧。但讨论的有关内容同样适用于液体燃料或固体燃料脉冲燃烧。

本书在详细介绍燃气脉冲燃烧器各种运行特性的基础上，着重说明脉冲燃烧与一般燃烧几个主要方面的差异，诸如换热性能、氮氧化物排放、噪音等，并结合理论研究，阐述了燃气脉冲燃烧产品开发的方法和存在的问题。

第二章 脉冲燃烧的基本原理

第一节 脉冲燃烧器的基本结构

脉冲燃烧器一般由空气和燃气去耦室、空气和燃气进气阀、混合室、燃烧室、尾管、排气去耦室和排气管等，其构成如图 2-1 所示。

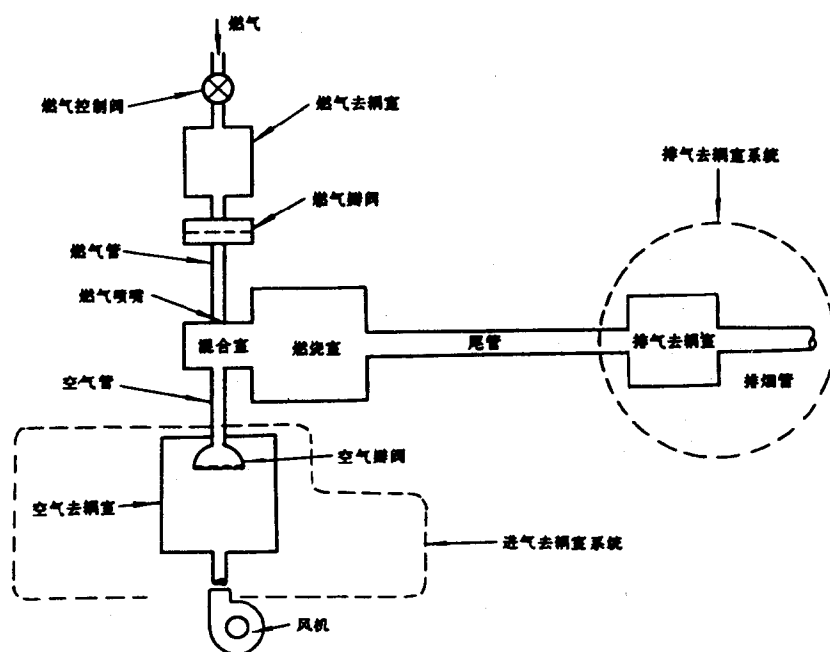


图 2-1 脉冲燃烧器结构示意图

空气和燃气进气阀、混合室、燃烧室、尾管是脉冲燃烧器的基本部件。去耦室主要用来降低脉冲燃烧器工作时的噪音。

脉冲燃烧器中关键部件是空气进气阀和燃气进气阀，阀门主要有机械阀（又称瓣阀）和空气动力阀（又称气动阀）。

图 2-2 是一典型的机械阀结构示意图，主要部件包括前阀板、后阀板、膜片、间隙垫片等。

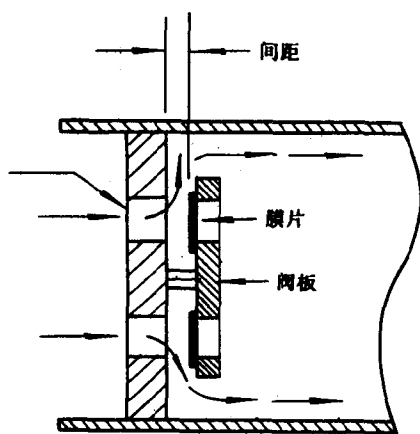


图 2-2 机械瓣阀示意图

前阀板位于气流上游侧，后阀板位于气流下游侧。前、后阀板间距可以由厚度不同的间隙垫片调节。两个阀板上均开有孔口，上、下游气流的压力通过孔口作用在阀板间的膜片上，如果上游的压力大于下游的压力，则在压差的作用下，膜片盖住后阀板的孔口，气流通过前阀板的孔口，经后阀板的外缘流入下游；如果上游的压力小于下游的压力，则在压差的作用下，膜片盖住前阀板的孔口，阻止气流流向下游。因此不难看出，前阀板的孔口主要是作为入流的通道，而后阀板上的孔口主要用于压力信号的逆向传递，通过这种方式使得机械

阀成为一种单向阀。

阀板上孔口有圆形、腰形等形状，孔口的数量和大小应能保证足够的有效流通面积。

机械阀设计应使膜片在压差的作用下，在阀板间移动自如。

目前研究的脉冲燃烧器，大多数采用机械阀，因为该阀具有无反向流动、易调节等优点。

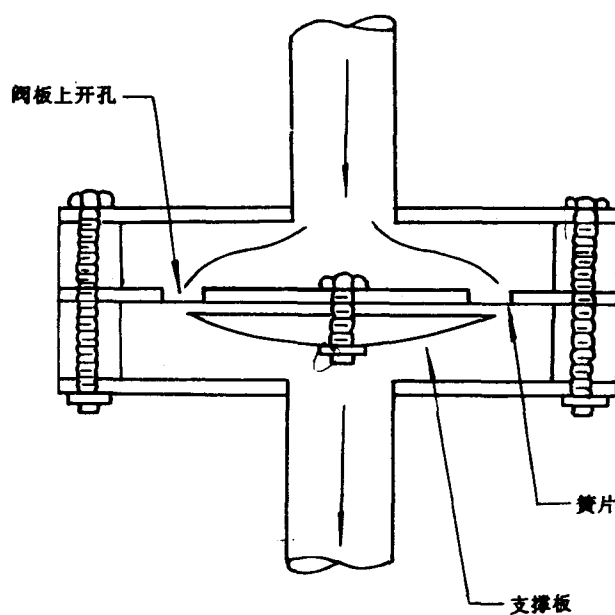


图 2-3 簧片阀结构示意图

另外，有一种簧片阀其结构如图 2-3 所示，在该簧片阀的阀板上中有一圈孔口，簧片是