

脉动燃烧技术及其应用^①

李保国^② 曹崇文 刘相东

(中国农业大学机械工程学院)

摘 要 综述了一种节能、低污染的新型燃烧技术——脉动燃烧技术的发展历史,国内外研究和应用现状,并对脉动燃烧技术进一步研究和开发的重点提出了建议。

关键词 脉动燃烧;综述;研究重点;建议

中图分类号 O 643.21

Pulsating Combustion Technology and Its Application

Li Baoguo Cao Chongwen Liu Xiangdong

(College of Machinery Engineering, CAU)

Abstract The developing history, present application and research achievements of pulsating combustion, which is a new combustion technology and has the advantages of saving energy and reducing pollution, are reviewed. The focal point for further research is proposed.

Key words pulse combustion; review; research emphases; proposal

1 脉动燃烧技术研究的发展过程

脉动燃烧研究的历史可追溯到1777年,Byron Higgs首次报道了燃烧振荡现象:把气体火焰置于一个竖立的圆管里,火焰会引起圆管的自激振荡,其声振模型就是这根圆管的固有声振模型^[1,2]。管中的火焰也受到声振的影响,声振与燃烧存在着耦合作用。燃烧振荡在许多燃烧系统中都会发生,它会产生过大的噪声和振动,甚至可能破坏燃烧装置;因此,人们极力避免脉动燃烧现象的发生,研究如何消除这一振荡。然而,脉动燃烧也有可以利用的一面。它具有燃烧强度高、传热系数大、NO_x排放量小、能自吸和增压,以及装置的结构紧凑等优点。脉动燃烧技术经历了较长的发展过程:1900年Gobble申请了第一个脉动燃烧装置德国专利,由于气流循环控制机构过于复杂,未能实际应用;1906年,Esnault-Pelterie申请了机械膜片阀式自发振荡脉动燃烧器法国专利;1908年Lorin设计了脉动燃烧喷气发动机;1909年法国人Marconnet研制了气动阀式脉动燃烧器^[2,3];1931年,德国人Schmidt研制出了产生推力的脉动燃烧装置;1933年,F. H. Reynst申请了“Combustion Pot”脉动燃烧炉的专利^[4]。

脉动燃烧技术早期的应用是在喷气推进系统和燃气涡轮领域。第二次世界大战期间,德国轰炸伦敦使用的V-1导弹就是以脉动燃烧发动机为推动力。二次大战后,美国NASA对脉动喷气发动机进行了研究,由于效率不高,以及随着火箭发动机和原子能的发展,研究终止。五六十年代,人们开始将脉动燃烧技术应用在加热采暖等方面。Lucax-Rotax脉动燃烧热水锅炉在

收稿日期:1997-10-22

①国家自然科学基金资助项目

②李保国,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)213信箱,100083

加拿大面市,由于噪声大,加上当时燃料价格很低,未能推广^[5]。70年代末以来发生的能源危机,促使人们对脉动燃烧技术重新产生极大兴趣,进行了系统的研究。80年代进入了实用开发阶段,欧、美、日等都致力于开发工业、商业及家用脉动燃烧装置,尤其以美国的脉动燃烧专利为多。由美国的AGA和Lennox公司共同研究开发LENNOX民用暖风机,在商业上大获成功,使人们对该技术的发展前景更加乐观^[6,7]。国内较早开展这项研究的有北京航空航天大学 and 同济大学;北航于1985年开始研究,在开发燃煤脉动燃烧器方面进行了探索;同济从1987年开始研究,并进行了燃气脉动燃烧热水器和暖风机的开发。

2 脉动燃烧装置

脉动燃烧是介于正常燃烧与爆燃之间的一种燃烧方式。Lord Rayleigh于1945年提出了一个用来判断脉动燃烧控制机理的重要准则,称瑞利准则,其含义是:若热量被周期性地加入振荡着的空气或从其中取出,所产生的效果取决于传热与空气振动之间的相位关系,若热量在空气压力最高的瞬间加入或在压力最低时取出则振动将被激励和加强,反之,则振动减弱。根据瑞利准则,能够实现这种效果的脉动燃烧装置有以下3种基本形式:

1) Schmidt型(又称1/4波长型),是一端闭口一端开口的圆柱或锥度很小的锥形管结构,基于声学上的1/4波长谐振管的原理工作的。当年德国的V-1型飞弹采用的即是Schmidt型管的原理。

2) Helmholtz型,其结构与Schmidt管相似,区别在于它有一个共振腔,尾管直径小于燃烧室直径,是基于声学上的Helmholtz谐振器原理工作的,是目前应用最广的脉动燃烧器。

3) Rijke型,是一个两端开口的直立长管,当热源在进口端 $L/4$ 处时,或冷源在出口端 $L/4$ 处时,便可产生声-热耦合的脉动。

进气阀是脉动燃烧器的主要部件,它分为机械阀和气动阀2种。机械阀又分为簧片阀、膜片阀和旋转阀3种。

簧片阀。是最早使用的阀门,V-1飞弹脉冲喷气发动机上使用的单向阀就是一种典型的簧片阀。其主要缺点是簧片在高温、高频条件下工作,极易疲劳破坏,寿命短。

膜片阀。由带通气孔的圆盘阀座、膜片和止动盘组成。当阀左侧的气体压力小于右侧时,压差产生的作用力把膜片压向止动盘,阀门通气孔打开,空气或燃料经通气孔进入燃烧室;当阀门右侧的气体压力大于左侧时,膜片压向阀座圆盘,关闭通气孔,阻止燃烧室内高压气体倒流。止动盘还有防止火焰对阀片侵蚀的作用。膜片阀是目前应用较多的一种阀。

旋转阀。在燃烧室头部预混合室的圆柱壁面上,开有沿圆周均布的数个径向通孔,形成阀座,外面套有一个同轴的与其相配合的阀门转筒,转筒壁上开有与阀座相对应的孔。电机带动阀筒旋转,当两孔相对时,空气通过孔进入燃烧室;当两孔错开时,空气通道被堵住,燃烧室内的高压气体不能倒流。因脉动燃烧器的工作频率仅取决于其声振条件——几何尺寸及温度分布,不取决于阀门开启或关闭所造成的空气流间断的频率,若旋转阀的开关频率与燃烧器声振频率不匹配,则自吸无法进行,会熄火停止工作。这就要求有一个精密的误差应在1%以内的同步装置来控制旋转阀的转速,因而增加了系统的复杂性,故较少应用。

气动阀(又称无阀)。其设计思想是:在进气时流动阻力小,从燃烧室反向流出时阻力大。气动阀可以采用简单的钻孔或装设喷嘴的方式构成,也可以采用复杂结构。气动阀通气量大,没

有运动部件,但由于常使一部分燃烧产物倒流至进口气流中,抑制了燃烧器的自吸能力;因此,气动阀设计时应有一定的漏气比(=回流时的动压力损失/进气时的动压力损失),一般在4~20之间。

3 脉动燃烧器的工作原理

脉动燃烧器可以燃烧气体、液体和固体燃料。燃气和空气可通过上述各种型式的阀门进入燃烧室;液体或固体燃料可直接喷入燃烧室,也可随空气进入燃烧室。脉动燃烧器的工作循环由以下4个基本过程组成(见图1)。

1) 点火燃烧。进入燃烧室的可燃物由电火花点火,燃烧室内的温度和压力开始升高,燃烧区膨胀,燃烧产物向两端排出,工作点由A到达B。

2) 气体膨胀。该过程中气体膨胀向外流出,燃烧室压力由点B开始下降,由于气流的惯性,使得燃烧室压力降到大气压以下(点C),燃烧室内形成负压。

3) 吸入可燃物。在燃烧室负压作用下,燃料和空气由进气阀自动吸入,与此同时,尾管中的燃烧产物也反回燃烧室,使燃烧室内的压力由点C升到D。

4) 压缩重新点火。回流气体的惯性使燃烧室内的气体压缩,压力由点D升到A,空气和燃料急速混合,被回流的高温气流点燃,开始下一循环。燃烧过程自动重复,不再需要外加点火。

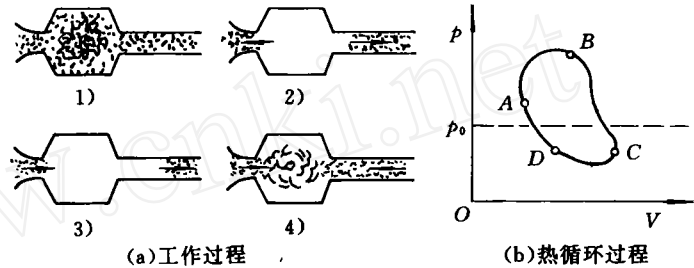


图1 脉动燃烧器工作循环示意图

4 脉动燃烧的特点

优点 与基于稳态燃烧的常规燃烧相比,脉动燃烧具有独特的优点,主要是燃烧过程的脉动性,强化了燃烧和排出气流中质量、动量和热量的传递。

1) 燃烧效率高。由于燃烧化学反应充分,在很低的过量空气条件下燃烧效率可达到非常高的值(98%~100%)。

2) 燃烧强度大。脉动燃烧器中特有的强烈的气流脉动,极大地改善了反应物间的扩散掺混和传热传质过程,从而大幅度提高燃烧强度。据报道,燃烧强度可达 $5.8 \text{ 万 kW} \cdot \text{m}^{-3}$,而常规燃烧器最大燃烧强度只能达到 $840 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3) 热效率高。脉动燃烧充分,所需过量空气少($\alpha=1.02\sim 1.05$),且具有自行排气功能,故可大大降低排气热损失,使总热效率提高到95%左右,有的可达到98%。

4) 传热系数大。脉动燃烧的湍流扰动作用,使传热边界层变得薄而不稳定,因而极大地降低了热量传递的阻力,使燃烧室和排气管的传热系数可达到 $93\sim 174 \text{ W}(\text{m}^2 \cdot \text{C})^{-1}$,比非脉动燃烧装置高1倍。

5) 排烟污染小。脉动燃烧器内强烈的气流脉动,改善了燃烧室内的混合过程,使燃烧充分,排出尾气中的CO,NO_x和烟尘等含量降低。由于燃烧过剩空气少、燃烧室温度较低,NO_x排放量只有 $(20\sim 50) \times 10^{-6}$;采用某些措施后,NO_x排放量可降低到 $(5\sim 7) \times 10^{-6}$ [8]。

6)脉动燃烧器结构简单、体积小,除单向阀外,几乎没有运动部件。

7)具有自吸、自燃及正压排气的特点。

缺点 脉动燃烧的主要缺点是:

1)脉动燃烧本身就是噪声源,所以噪声大是其主要缺点。为消除噪声,不仅会增添燃烧器设计的难度,还使成本和装置的质量加大。

2)脉动燃烧器内的压力脉动,会诱发系统组件的振动,这对构件的强度和工作可靠性造成不利影响。

3)只有在一定的热负荷内,才能保证良好的运行稳定性。在结构设计中必须严格保证一定的声学条件和某些部件的强度。这就使脉动燃烧器设计和应用的难度比普通燃烧器大。

5 脉动燃烧的应用

1)产生推动力。利用脉动燃烧器产生的高速热气流推动飞行器,如早期的 V-1 导弹,还用作小型模型飞机的动力。有人曾试验将脉动燃烧器装在直升机桨片的两端,推动桨片转动^[2]。利用脉动燃烧器推动涡轮机,这一直是一个比较活跃的应用领域,研究方向是设法提高脉动燃烧器内的工作压力和推动效率。此外,还把所产生的高速热气流用来清除表面积炭和积垢等^[5]。

2)锅炉与采暖。出于节能、环保和小巧灵便的考虑,脉动燃烧技术被用于锅炉和采暖领域。在西方国家,这方面的研究主要集中在小型热水器上。如美国 Lennox 公司生产的系列脉动燃烧热水器,其功率为 12~38 kW;日本东芝公司生产的系列脉动燃烧热水器的功率为 6~18 kW;美国 Hydrotherm 公司推出的“Hydropulse”牌热水器使用气、液燃料,对于额定功率为 23 kW 的家用热水器,其外形尺寸为 0.85 m×0.5 m×0.35 m,质量 60 kg,由于采取了隔音措施,1 m 以外处的噪声小于 50 dB,排气污染很小($w(\text{CO}) < 300 \times 10^{-6}$, $w(\text{NO}_x) < 40 \times 10^{-6}$),燃烧效率可达 92%~99%,比普通热水器节省燃烧 10%~30%,且使用操作方便。美国 Forbes 公司于 80 年代末推出了 146.5 kW 的中小型蒸汽锅炉,蒸发量为 200 kg·h⁻¹,总热效率提高到 86%,整个装置的体积只有 0.914 m×1.270 m×1.180 m,可用于旅店、饭店、洗衣房等。脉动燃烧器还用于车辆、住宅和工业建筑采暖等^[5]。

3)物料干燥与食品烘烤。脉动燃烧器可用于粮食、沙石、木材、药物、褐煤、废料等物品的干燥。美国矿产局研制出 7.3 kW 的褐煤干燥设备^[9];南非的 Muller 设计出脉动燃烧玉米干燥设备;美国爱德华州的 Sonic 公司成功地将脉动燃烧器用于酒曲的快速干燥,产量和质量都有所提高。Moriah-Israel 研制的脉动燃烧干燥设备用于干燥水果,比常规干燥设备提高产量 3.5 倍^[10,11]。1989 年美国的 Food Processing 报道了美国燃气公司开发的用来干燥浆状和液状物料的脉动燃烧干燥机,由于脉动燃烧产生的高温、高速尾气及声波能的作用,使得物料被打散雾化,从而提高了传热传质速率,可在 0.01 s 内将物料干燥,而且物料温度不超过 60 ℃,特别适合于干燥热敏性物料。此外,还有用脉动燃烧器制成食品烤箱等^[12]。

4)其他应用。脉动燃烧可应用的范围很广,有关的技术专利层出不穷。例如:利用脉动燃烧产生的高温脉冲射流打井、打洞;制成冰雪融化器、辐射管加热器、化学反应器、土壤杀菌器、军用烟雾发生器、杀虫烟雾发生器、机械设备加热装置和化工石油工艺设备等。

6 关于研究重点的建议

脉动燃烧作为一种新型的燃烧技术日益得到重视,但至今人们对其机理还缺乏足够的认识,大量的研制工作采用的是试差法,而不是基于对系统的充分理解从而进行合理设计。脉动燃烧技术进一步研究的重点在于:

1)对脉动燃烧机理的深入研究,结合计算流体力学、化学反应动力学及燃烧理论,建立脉动燃烧的精确的数学模型,使脉动燃烧的产品开发走出反复摸索的时代,进入有理论指导的新阶段。

2)研究从而掌握脉动燃烧的声学特性,对声-燃烧的耦合机理作深入的研究,以期减少噪声污染并利用声波能。

3)研制脉动燃烧器的关键部件——进气阀,选择合适的材料,保证强度和使用寿命,或研制性能良好的气动阀。

4)按目前所掌握的知识,脉动燃烧技术在烘干、锅炉和采暖方面的应用前景十分广阔,应重点研究,因为在这2个领域内,可以发挥出脉动燃烧器几乎所有的优点。

参 考 文 献

- 1 Cao Chuanjun, Xu Dengfeng. An acoustic study of coal combustor. In: Proceedings of International Symposium. Beijing, 1987. 242~248
- 2 Thring N W, ed. Pulsating Combustion — The Collected Works of F h Reynest. New York: Pergamon Press, 1961. 157~176
- 3 Zinn B T. Pulsating combustion. J of Mech Engi, 1985, 53: 58~65
- 4 Brown D J, ed. Proceedings of 1st International Symposium on Pulsating Combustion. Univ of Sheffield, England, 1971. 21~61
- 5 Zinn B T, Dubrov E. Application of resonant driving to increase the productivity and thermal efficiency of industrial processes. In: Proceedings of the International Symposium on Pulsating Combustion. Monterey, California, 1991. 407~419
- 6 Babkin Y L. Pulsating-combustion Chamber as Furnaces or Steam Boilers, VOF VTI. Thermal Engineering, 1967, 12(9): 23~27
- 7 Zinn B T. Pulsating Combustion. In: Weinberg F J, ed. Advanced Combustion Methods. London: Academic Press, 1986. 170~178
- 8 Keller J O, Hongo I. Pulse Combustion; The Mechanism of NO_x Production. Combustion and Flame, 1990, 80: 219~237
- 9 Cheng X C, Daniel B R, Jagoda J I, et al. Dependence of Pulse Combustion Performance Upon Interior Temperature, Acoustic Losses and Combustion Time. In: Proceedings of International Gas Research Conference. Tokyo, Japan, 1989. 395~401
- 10 Zbicinski I, Grad J, Strumillo C. Application of pulse combustion to drying process. In: Drying '96 Proceedings of the 10th International Drying Symposium. Krokow, Poland, 1996. 631~637
- 11 Kitchen J A. Pulse Combustion Apparatus. U S Patent, 4640674. 1987-02-03
- 12 Mujumdar A S, ed. Handbook of Industrial Drying. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc, 1995. 1107~1114