

脉动燃烧技术的回顾和展望

北京航空 航天大学 曹传钧 许登峰 朱长海 任 跃

【摘要】 本文着重介绍了脉动燃烧的性质、特点以及它的发展历史和当今国内外在此领域内研究和应用的现状。并且对脉动燃烧研究和应用中现存的问题及困难做了剖析,并对这一领域进一步发展的方向提出了自己的见解。

一、前 言

在航空发动机和火箭发动机中,燃烧室内的脉动燃烧(又称振荡燃烧)容易引起发动机工作状态的偏离,以致发动机结构的破坏。因此,人们极力避免脉动燃烧的发生,在设计中把气流脉动做为消除的对象。那么,根据辨证的原理,能不能变害为利,使脉动燃烧得到技术上的利用呢?答案是肯定的。事实表明,脉动燃烧具有高燃烧强度、高燃烧效率、高传热效率、燃烧器结构紧凑、可以自吸和增压等优点。因此,脉动燃烧装置不但可以节省结构材料,而且省燃料、污染小,尤其是考虑到全球性的日益加深的能源危机和环境保护问题,人们对脉动燃烧技术越来越关注,与之有关的基础研究和应用研究越来越深入广泛。目前,脉动燃烧的应用研究领域主要有:喷气推进、燃气涡轮、锅炉、取暖、烘干等,所用的燃料包括气、油、粉煤、块煤和木屑。

脉动燃烧广为人知的一个例子是“会唱歌的火焰”。1777年,这个领域的先驱们就发现,把气体火焰置于一个圆柱型、竖立的管子里,火焰会引起管子的自激振荡,其声学振型就是这根管子的固有声振模型^[1~6],管子里的声振与火焰在管中的位置、管子的尺寸和形状、燃气输送管的特征有关。随着研究工作的进一步深入,人们还发现,管中的火焰也受到声振的影响,即声振与燃烧存在着耦合作用。从这以后,人们便陆续开始了对脉动燃烧的研究。在应用领域中,有些场合是需要抑制脉动燃烧的产生,然而有些场合则是要充分利用脉动燃烧的优点。

脉动燃烧最早的应用是在喷气推进系统中和燃气涡轮领域,而这些研究对本世纪的技术发展起了重大的推动作用^[2,4,7,8]。脉动燃烧最著名的是第二次世界大战中德国的 V-1 火箭(又称“嗡嗡弹”)了。这种火箭用脉冲燃烧发动机做为推进动力,使它在轰炸伦敦的战斗中名扬天下。脉动燃烧最早的研究成果是在 1933 年 F. H. Reynst 申请了一个名为“Combustion Pot”的专利^[4],这种脉动燃煤炉子是脉动燃烧领域的第一个专利。从那以后,脉动燃烧的理论和应用研究便大规模地开展起来了,在英、法、德、苏、美、日等国家,一批很有才华的科学家纷纷投身于这一研究领域之中。尤其是在 1955-1965 年期间,人们在脉冲喷气、燃气涡轮、锅炉、飞行器推进和粉煤燃烧等方面进行了大量的研究工作。70 年代末以来,由于受石油危机的冲击,人们在以前工作的基础上又对燃气脉动加热器产生了极大的兴趣。各种类

型的脉动加热器不断涌现。到目前为止,已有一些采暖和烧热水的高效脉动燃烧器出现在美国、加拿大等国的市场上^[5,9,10]。

二、脉动燃烧的原理及特点

脉动燃烧器的工作过程和基本工作原理见图 1、图 2。

按图 1、图 2 所示,脉动燃烧可分为 4 个基本过程:(1)点火并燃烧;(2)膨胀;(3)吸入新鲜可燃物;(4)压缩并重新点火。

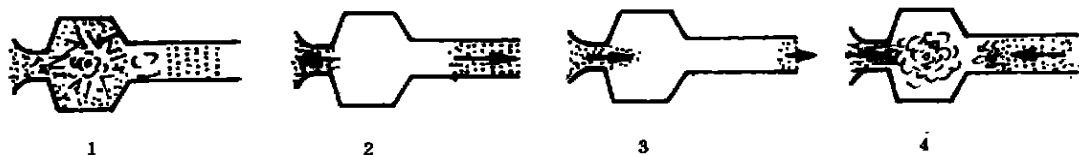


图 1 脉动燃烧器工作过程示意图

在过程(1)中,可燃物被电火花点着,于是燃烧室内温度、压力都开始升高,燃烧产物向两端排出;在过程(2)中,由于气体本身有一定的惯性,因此燃烧产物向两端(主要是向尾管端)的高速运动造成了燃烧室内的负压;在过程(3)中,在负压的作用下,燃料和空气从入口阀门端自动吸入;在过程(4)中,由于负压的作用,尾管中部分高温燃气也以高速返回燃烧室,于是燃烧室内的可燃气和已燃气产生了自动的压缩,并重新点火燃烧。这样,燃烧过程可无限止地自动重复,而不再需要外加点火。

脉动燃烧的最根本特点是:气体的脉动加强了燃烧室和其排气流中质量、动量和热量的传递。以下列举的脉动燃烧的这些优点都取决于这个根本特点。

1. 燃烧强度高 由于反应物之间扩散掺混的加快及从高温区快速获得热量,因而不气相、液相还是固相,化学反应的速度均得到提高。这一点对劣质燃料的燃烧尤为重要。
2. 传热效率高 脉动气流的冲刷作用使得传热附面层变得薄而不稳定,因而对热量传递的阻碍作用大大降低。
3. 燃烧效率高 由于燃烧化学反应的充分,脉动燃烧器的燃烧效率可达到非常高的值(98%~100%)。
4. 总体热效率高 脉动燃烧器充分燃烧时所需的过量空气量很少($\alpha = 1.02 \sim 1.05$),故其排烟热损失得到很大的降低。

5. 排烟污染小 由于燃烧的充分,故排气中 C、H₂、CO、C_mH_n 的含量均得到了降低,且由于过氧量的减少和燃烧温度的人为降低,故 NO_x 的排放量得到了降低(一般认为, $C_{NO_x} \sim C_0 C_{Ne}^{-E/T}$)。

6. 结构紧凑、节省固定投资 由于燃烧与热传导的改善,因而在一定发热量的前提下,燃烧室体积和换热面面积都可相应地减小。

7. 具有自吸、增压且简单、节能的特点 由于气流脉动与燃烧过程具有耦合效应,故脉动燃烧器可从入口处自吸空气和燃料,然后以一定的压力向出口排放燃气。因此,它不仅不需要鼓风机等辅助设备,而且还可以用来产生一定压力的喷射气流。

脉动燃烧器的缺点有:(1)噪声。由于脉动燃烧本身就是噪声的来源,故必须对燃烧器

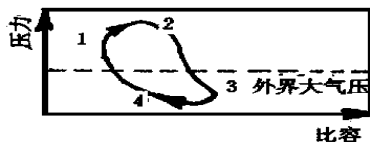


图 2 基本工作原理

进行噪声的隔离。这样，一方面给燃烧器的设计增添了一定的技术难度，另一方面增加了燃烧器的成本和重量。(2) 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。这就使脉动燃烧器在设计生产中的难度大大超出了普通燃烧器。

脉动燃烧的产生是需要条件的。这个条件在理论上被称为“瑞利准则”(Reyleigh's Criterion)。即要求周期性的燃烧放热与系统内气流的压力脉动同步进行(即耦合)以补偿气流在脉动时的能量损失。其数学表示为:

$$\oint Q P' dt \geq \Phi$$

其中, Q 表示周期性的燃烧放热, P' 为脉动压力, Φ 为气流脉动时的阻尼, $\oint$ 为对过程一个周期的积分。

脉动燃烧的产生还需要一定的声学结构。脉动燃烧器的基本结构类型有以下三种:

1. Schmidt 型 又称 1/4 波长型, 是一端开口一端闭口的结构(如图 3)。当年德国 V-1 火箭上用的脉冲发动机就是这种类型的燃烧器。

2. Helmholtz 型 Helmholtz 型与 Schmidt 型的主要区别在于它有一个大的共振腔(见图 4), 但两者的工作原理基本是一样的。当采用进气阀门时, 这两种类型的燃烧器可以把尾管做得很长, 因此换热非常充分。

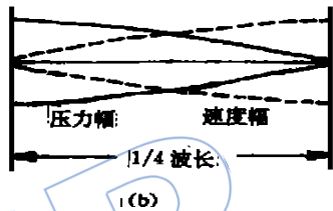
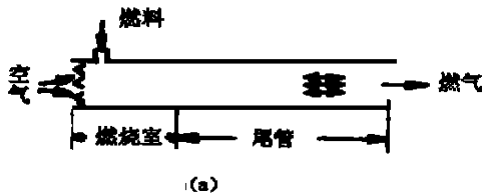


图 3 Schmidt 型

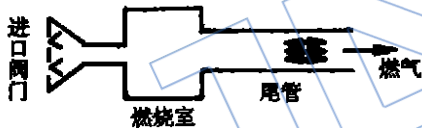


图 4 Helmholtz 型



图 6 Marconnet 型

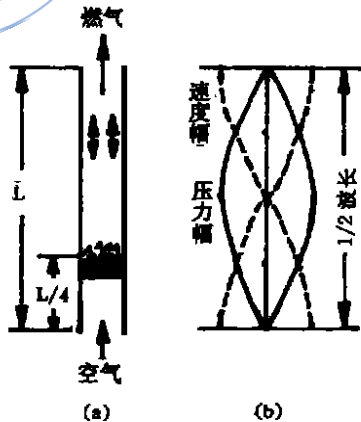


图 5 Rijke 型 (a: 结构示意图; b: 驻波形状基波)

3. Rijke 型 这是一个两端开口的直立长管(如图 5)。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。它的特点在于不仅可以燃用气、液燃料, 而且还可以很方便地燃用固体燃料。

此外, 还有一种 Marconnet 型(见图 6)。这种类型的燃烧器的最大特点在于它的进气口是一个“气动阀”。当燃气从燃烧室向外流动时, 阻力较大; 而当气体向燃烧室内流动时, 阻力则较小。这样, 这种“阀门”起到了一定的自吸作用。这种结构没有易损坏的薄片阀门, 因而结构简单, 很有应用价值。

三、脉动燃烧的应用

脉动燃烧技术的应用现已遍及很多领域。在某一领域内能否获得成功的应用,一方面取决于脉动燃烧技术自身的发展和完善程度,另一方面又与同一领域内其它技术的发展状况有关。现就脉动燃烧技术在几个主要方面的应用做一个介绍。

1. 喷气与推进 这方面的应用与研究主要是在脉动燃烧研究的早期阶段^[4,8,9,11]。除了大家熟知的V-1火箭发动机以外(图7),脉冲喷气发动机有时还被用作小型模型飞机的动力。此外,还有人曾试验把脉冲发动机装在直升机桨片的两端,推动桨片转动^[4]。这些脉冲发动机结构简单紧凑,使用起来轻便可靠,故很适宜用在一些特定场合。近年来,随着航天事业的迅猛发展,有人提出在天地往返运载装置中使用三模态热管式喷气发动机的设想^[11],这种发动机集脉冲发动机、冲压发动机、火箭发动机为一体,其最关键的一处是在低空低速期间使用脉冲喷气发动机代替笨重复杂的涡喷(扇)发动机。这种发动机结构简单、紧凑,重量很轻,是一个极富吸引力的设想。

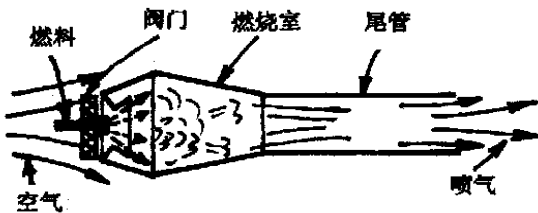


图7 V-1火箭发动机

2. 燃气涡轮 涡轮前小的压力升高,将会使涡轮的工作性能得到大的改善,而脉动燃烧器正具有增压燃烧的特点,所以,从理论上讲,它在燃气涡轮中的应用是颇具吸引力的^[4,8,9]。这方面的研究在本世纪五、六十年代达到了空前的高潮^[4,9]。后来,由于稳态燃烧室技术的成熟加之脉动燃烧技术上的停滞,大型增压脉动燃气涡轮的研究似乎销声匿迹了。尽管如此,有人仍对这一领域抱有信心,尤其是考虑到可在一些特殊场合下应用脉冲燃烧燃气涡轮装置^[9,10](图8)。

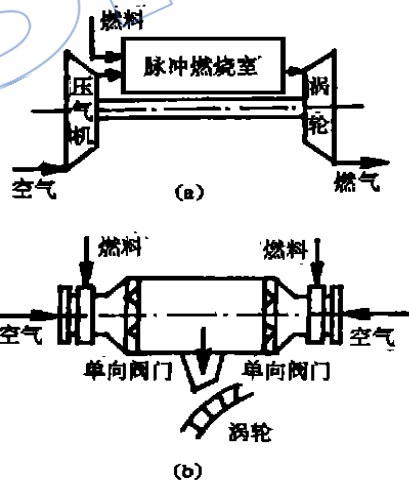


图8 脉动燃烧在燃气涡轮中的应用

(a: 燃气涡轮工作原理示意图

b: 增压脉动燃烧燃气涡轮机构)

3. 锅炉与采暖 出于节能、环保和小巧灵便的考虑,脉动燃烧技术被广泛地应用于锅炉和采暖领域,尤其是70年代末以来,人们对这方面的兴趣越来越大^[3,4,5,8,9,10,12,13]。目前,在西方国家,这方面的研究主要集中于小型燃气热水器上。如美国Lennox公司生产的系列燃气脉动热水器^[5]发热量从40000Btu/hr到130000Btu/hr,日本东芝公司生产的系列脉动燃气热

水器^[5]的发热量范围为21000Btu/hr到60000Btu/hr。此外,还有很多公司的实用产品也都相继投放到了市场上^[5,9,10]。这些脉动燃烧器能自动地吸气和排烟,故不需要任何烟筒或风扇来吸入空气、燃料并排走烟气。而且由于出口烟气可被冷却到接近于室温,故它的热效率非常高。此外,这种热水器发热量大、体积小、节省燃料且排气污染小^[5,10],故在性能方面很受消费者的欢迎。以美国eIf公司生产的TURBOPULS牌热水器为例,这种热水器使用的是气、液燃料。对于额定功率为23kw的坐地式热水器,其外形尺寸为0.85m×0.50m×0.35m,重

60kg; 由于采取了隔音措施, 1m 以外处的噪声小于 50dB; 这种热水器的排气污染很小 ($\text{CO} < 300\text{ppm}$, $\text{NO}_x < 40\text{ppm}$), 排气温度可达 $30\sim 100^\circ\text{C}$, 燃烧效率 (HHV) 可达 $92\sim 99\%$; 它不但可以比普通热水器节省燃料 $10\sim 30\%$, 而且使用和操作都很方便。

用脉动燃烧方式燃烧重油, 尤其是高型号的重油, 也一直是人们致力探索的一个课题。目前, 虽无实用的重油脉动燃烧器投入使用, 但有关的研究表明, 无论是在 Rijke 型脉动燃烧器, 还是在 Schmidt 型脉动燃烧器中, 燃用重油是一种有前途的方案^[6, 10]。

固体燃料的脉动燃烧一直是人们很感兴趣的一个课题。虽然难度很大, 但与之有关的研究从未间断过。木屑的脉动燃烧已被证明是可行的^[10], 在苏联广阔的东部森林地区, 烧木屑的脉动炉已个别投入使用。粉煤的脉动燃烧是一个很有发展前途的领域。Sommers^[4], Severyanin^[9, 10], Zinn 等人先后开展了这方面的研究。在国内, 北航 403 教研室在国家自然科学基金的资助下对粉煤脉动燃烧进行了可行性研究^[12]。这些研究结果都表明, 粉煤的脉动燃烧是可行的, 它可以强化燃烧、减少粉尘, 具有一定的应用潜力, 尤其是可以考虑用脉动燃烧利用质量稍差的粉煤, 或用脉动粉煤预燃室提高粉煤炉的工作性能。

块煤的脉动燃烧也是一个很有希望的领域。Zinn^[8]和北航^[1, 3, 13]的研究都表明, 脉动强化了块煤的燃烧 (炉膛温度提高 $100\sim 250^\circ\text{C}$)、降低了排气污染、具有高的燃烧效率。图 9、图 10 为北航设计的小型热水锅炉示意图, 图 9 中的立式锅炉由北京热风炉厂制造, 它可以燃用普通块煤, 甚至低热值块煤, 由于具有自吸功能, 它不需要外加鼓风机。根据目前的试验结果来看, 若在技术上克服了噪声和传热等问题, 它可能是一种很有希望的新型燃煤锅炉。

此外, 根据脉动燃烧的特点, 可以考虑用脉动燃烧的方式焚烧可燃垃圾。但目前尚未见到这方面研究的报导。

4. 烘干 脉动气流可使烘干效率大为提

高。依笔者来看, 脉动烘干将是脉动燃烧技术大显身手的一个领域。运用特制的脉动烘干装置, 脉动烘干可广泛用于烘干食品、粮食、沙石、木材、药物、褐煤、废料等物品^[9, 10]。

5. 打井 利用脉动燃烧所产生的高温脉冲射流, 可以打井或打洞^[10]。尤其是在偏远、交通不便的地区, 这种装置体积小、重量轻, 携带和使用都很方便。

6. 吹灰 脉动燃烧器可以做得非常小巧。根据这一点, 可以做成一些小而紧凑的吹灰装置, 利用脉冲的燃气, 吹净一些装置的工作表面^[10]。例如, 为使大锅炉的某些表面保持高的换热强度, 可采用这种吹灰方法吹净易积灰的换热面。

7. 其它 脉动燃烧的应用范围很广, 有关的技术专利层出不穷。其它的用途可有: 气化、造雾、融化冰雪、深斗油炸锅、脉动流化床、辐射管加热器、化学反应器, 等等。

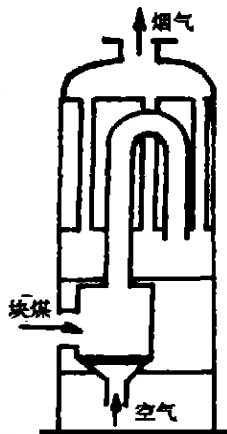


图 9 北航设计的脉动燃煤锅炉

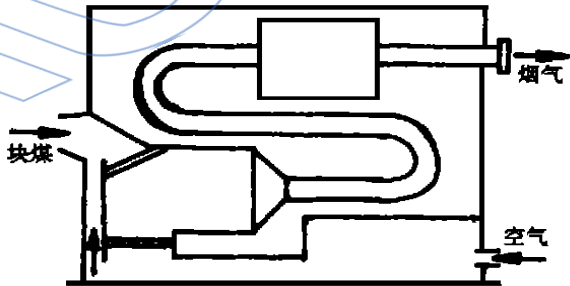


图 10 北航设计的卧式双排炉方案示意图

四、思考与展望

目前,人们对脉动燃烧的研究越来越重视,因此,有关的研究越来越深入广泛。现在,不再限于一些基础的研究工作,一些实用性的产品已投放市场。但是,必须冷静地看到,脉动燃烧技术还很不成熟,摆在我们面前的困难还很大,目前,最大的困难在于,人们对脉动燃烧的机理还缺乏足够深入的认识。在以往的研究中,大量的进展是采用昂贵的不断试换的方法取得的,而不是基于对系统的充分理解而进行的合理设计,因此,当燃烧器的某个条件改变时,很难保证不会遇到新的问题。

摆在我们面前的障碍还有人们的心理因素。人们往往习惯于一种固定的思维模式,而无视其它的模式。由于历史的原因,人们现已对稳态燃烧有了一定的认识,并基本上习惯于用它去思考燃烧领域内的问题,而脉动燃烧却是一个有别于稳态燃烧的全新领域,它有一套设计原则。因此,人们在应用中必须符合它的特点和规律,机械地、不协调地把它应用到一些传统装置中去往往是不明智的。

脉动燃烧在实用上有个很大的障碍是噪声。这要求实用装置有良好的减噪手段(若需要减噪的话)。但是目前的减噪方式使装置的体积和成本大为提高,这很不理想。我们相信,通过对机理认识的不断加深,噪声问题将变得易于解决且成本甚小。

脉动燃烧技术进一步发展的关键在于人们对它的机理的基础研究。笔者认为,在研究方面:①首要的问题是声学问题,即必须准确地把握脉动燃烧器的声学特性;②还有一个关键的问题是,对声—燃烧的耦合机理必须有一个深入的了解才行;③如何使脉动燃烧器不向环境发射噪声或散发的噪声如何消除;④如何保证关键部件(如进口阀门)的强度和使用寿命,或研制性能良好的“气动阀”。

从应用上看,前景是乐观的,脉动燃烧技术可应用到适合它特点的各个领域。而能否成功地应用,则取决于人们对脉动燃烧的充分理解和对这门技术的灵活运用。从目前所掌握的知识来看,烘干、锅炉和采暖似乎很有应用前途,因为在这两个领域内可发挥出脉动燃烧几乎所有的优点。还有很重要的一点是,在锅炉应用中,脉动燃烧可以燃用传统燃烧方法所不能燃烧或烧不好的一些燃料,如高标号重油、低热值煤、高水分木屑,等等。在能源日少、强调环境保护的今天,这是非常重要的一点。

参 考 文 献

- [1] 曹传钧、许登峰,“An Acoustic Study of Coal Combustor”, Proceedings, International Symposium on Coal Combustion, Beijing, 1987.
- [2] 拉乌申巴赫, Б. Б., 张斌全等译,“振荡燃烧”, 科学出版社, 1965 年。
- [3] 朱长海,“块煤在里克管中脉动燃烧的实验与理论研究”, 北航硕士论文, 1987 年。
- [4] Thring, N. W. (ed.), “Pulsating Combustion”—The Collected Works of Reynest, F. H., Pergamon Press, 1961.
- [5] Zinn, B. T., “Pulsating Combustion”, Journal of Mechanical Engineering, 1985.
- [6] Zinn, B. T., Daniel, B. R., “Application of Pulsating Combustion in the Burning of Liquid Fuels”, research report of Georgia Tech, 1986.
- [7] 许登峰,“固体火箭发动机不稳定燃烧”, 北京航空航天大学出版社, 1984 年。
- [8] Putnam, A. A., “Historical Overview of Pulse Combustion with Specific Comments Relative to Noise”, 1985.
- [9] Brown, D. J. (ed.), Proceedings, 1st International Symposium on Pulsating Combustion, Dept. of Chemical Eng., Fuel Technology, Univ. of Sheffield, Sheffield, England, 1971.
- [10] Proceedings, Symposium on Pulse Combustion Applications, GRI Report GRI-82/0009.2, Atlanta, 1982.
- [11] 张国政,“三模态热管式喷气发动机”, 推进技术, No. 1, 1988 年。
- [12] 张迅,“粉煤脉动燃烧的可行性研究”, 北航硕士论文, 1988 年。
- [13] 刘少华,“脉动燃烧锅炉初步研究”, 北航硕士论文, 1989 年。

A FLUX VECTOR SPLITTING EXPLICIT SCHEME AND SIMULATION OF 2-D NOZZLE'S PROPULSIVE JET

Shan Peng

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

On the basis of two steps explicit methods, author investigates the application of the theory of Flux Vector Splitting (FVS) of J. L. Steger and R. F. Warming. Besides the simplified split flux vector formula, a new explicit scheme is proposed for solving hyperbolic differential equation. It is a explicit two steps FVS scheme of second order accuracy. At first it was compared with MacCormack's scheme issued in 1972 (MC72) in numerical computation. And finally a 2-D flow of a rectangular nozzle with its jet plume was analysed numerically by the present scheme. The results indicate some high performances of the present scheme: 1. Numerical vibrations near the front surface of shock waves vanish. 2. The scheme runs without artificial viscosity. 3. It takes just as much time as MC72 takes to solve a flow field. The scheme features the higher inherent viscosity of the scheme compared with that of MC72.

AN ANALYTICAL STUDY OF COMPONENT MATCHING REGULARITY OF TURBOJET ENGINE

Liu Daozhi

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

Many off-design condition phenomena of a turbojet engine are related with the variation of incidence angles at front and rear compressor stages. Based on the component matching regularity, the simple and clear analytical equations of the variation of incidence angles at front and rear compressor stages under engine operating conditions have been derived. With these analytical equations, a series of the off-design condition phenomena in a low or high design pressure ratio engines or in an , axial, centrifugal or combined axial-centrifugal engines, all well as in a two-spool engines are analyzed systematically, their physical natures are clarified, and various off-design condition problems which may occur can be predicted in advance.

A REVIEW AND PROSPECT OF PULSATING COMBUSTION

Cao Chuanjun, Xu Dengfeng, Zhu Changhain, Ren Yue

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

It's well known that pulsating combustion has the advantages in fuel saving, pollutant suppression, enhancement of combustion intensity and efficiency and increase of convective heat and mass transfer rates. The capital investment and operational costs of many systems and processes can be reduced if the pulsating combustion be applied. In this paper, the characteristics of the pulsating combustion are treated and a review with instructive comments on its application is given. The application of the pulsating combustion particularly in the areas of jet propulsion, gas turbine, boiler and heater, drying and ash cleaning is discussed. In the end, its prospects are also remarked.