

燃料热值对不同燃烧方式下燃气轮机燃烧特性的影响

肖俊峰,王 峰,李晓丰,王 玮
(西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710054)

摘 要:针对燃气轮机运行过程中出现的燃烧不稳定和污染物排放高的问题,开展了燃料热值对不同燃烧方式下燃气轮机燃烧特性(燃烧稳定性和污染物排放影响规律)影响的研究。以某重型燃气轮机分管燃烧室为研究对象,在扩散燃烧和预混燃烧方式下,保持燃料流量、空气流量及大气温度等参数不变,仅改变燃料热值,采用数值仿真方法对燃烧室设计监测点处压力、燃烧室出口温度及污染物排放等数据进行分析。研究表明:在扩散燃烧方式下,热值较低时,燃烧室高频压力脉动较大,热值增加,燃烧室低频压力脉动先减小后增加;在预混燃烧方式下,热值增加,燃烧室高频压力脉动减小;在两种燃烧方式下,热值增加,燃烧室出口 NO_x 排放均增加,而热值变化对燃烧室出口 CO 的排放影响较小。

关 键 词:燃气轮机;分管燃烧室;燃烧稳定性;污染物排放;预混燃烧;扩散燃烧;燃料热值

中图分类号:TK472 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.06.014

[引用本文格式]肖俊峰,王 峰,李晓丰,等. 燃料热值对不同燃烧方式下燃气轮机燃烧特性的影响[J]. 热能动力工程,2022,37(6):97-104. XIAO Jun-feng, WANG Feng, LI Xiao-feng, et al. Effect of fuel calorific value on combustion characteristics of gas turbine in different combustion modes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6):97-104.

Effect of Fuel Calorific Value on Combustion Characteristics of Gas Turbine in Different Combustion Modes

XIAO Jun-feng, WANG Feng, LI Xiao-feng, WANG Wei
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an, China, Post Code: 710054)

Abstract: Aiming at the problems of combustion instability and high emissions during gas turbine operation, the effects of fuel calorific value on gas turbine combustion characteristics which included the influence rule of combustion stability and pollutant emission in different combustion modes were studied. Taking a heavy-duty gas turbine can-type combustion chamber as the research object, the parameters such as fuel flow, air flow, atmospheric temperature were kept constant in the diffusion and premixed combustion modes, only the fuel calorific value was changed. And the numerical simulation method was adopted to study and analyze the data of the design monitoring point pressure and outlet temperature of combustion chamber and the pollutant emission. The research results show that the high-frequency pressure pulsation of the combustion chamber is larger when the calorific value is lower, and the fuel calorific value is increased, the low-frequency pressure pulsation of the combustion chamber is decreased initially, followed by an increase in the diffusion combustion mode. In the premixed combustion mode, when the fuel calo-

收稿日期:2021-01-20; 修订日期:2021-04-08

基金项目:华能国际电力股份有限公司科技项目(HNKJ20-H42);陕西省自然科学基金(2022JQ-490)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of HUANENG Power International, Inc. (HNKJ20-H42); Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China(2022JQ-490)

作者简介:肖俊峰(1974-),男,陕西西安人,西安热工研究院有限公司研究员。

通讯作者:王 峰(1982-),男,陕西合阳人,西安热工研究院有限公司高级工程师。

rific value is increased, the high-frequency pressure pulsation of the combustion chamber is decreased. In two combustion modes, when the fuel calorific value is increased, the NO_x emission is increased at the outlet of combustion chamber, while the change of fuel calorific value has little effect on the CO emission of the combustion chamber outlet.

Key words: gas turbine, can-type combustion chamber, combustion stability, pollutant emission, premixed combustion, diffusion combustion, fuel calorific value

引 言

燃气轮机早期的燃烧方式为扩散燃烧方式,该燃烧方式燃烧稳定性较好,但热力型 NO_x 排放高。通过在燃气轮机燃烧区注水、注蒸汽的方法可以降低 NO_x 排放,但是对燃气轮机部件寿命及检修周期等会产生不利影响。同时,CO、未燃碳氢(UHC)的排放量也有所增加。基于上述原因,干式低 NO_x 燃烧(DLN)方法逐渐替代了通过注水、注蒸汽降低 NO_x 排放的方法。DLN 采用贫燃预混的燃烧方式,使燃烧在偏离理论空气量条件下进行,从而控制火焰温度,降低 NO_x 排放。但由于 DLN 燃烧方式的燃料空气比已接近贫燃熄火极限,在大气环境、压气机特性、燃烧室部件特性发生变化时,燃气轮机易产生燃烧不稳定现象,严重影响燃气轮机运行的安全稳定,导致燃烧室、透平等热通道部件寿命缩短,甚至损坏。此外,燃烧不稳定还会使污染物排放升高^[1]。

对于燃气轮机燃烧室燃烧不稳定现象,国内外研究人员开展了相关研究。Lieuwen 等人^[2-4]、Straub 等人^[5]和 Mongia 等人^[6]实验研究了燃料/空气当量比变化对燃烧稳定性的影响规律,研究表明,燃料/空气当量比的变化是引起干式低排放燃烧室燃烧不稳定的主要机理。Wang S 等人^[7]提出燃烧不稳定是由燃烧时出现的涡核进动过程使湍流强度增大,然后与燃烧室内的低频振荡互相耦合所引发。Yoon J 等人^[8]指出燃烧压力波动导致火焰结构变形,火焰结构的变化对燃烧不稳定性有很大影响。李祥晟等人^[9]数值研究了燃气轮机预混燃烧室内的燃烧不稳定性,结果表明,燃料从喷射位置到火焰前锋的流动时滞是燃烧不稳定产生的主要诱因,可

通过调整燃料喷射位置或气流流动速度来改变燃料喷嘴到火焰前锋的时滞,使燃烧不稳定得到抑制。张欣刚^[10]对预混燃烧不稳定过程的热声特性进行了研究,结果表明,在不同过量空气系数条件下,燃烧室内整体热释放率的波形与压力振荡的波形相近,周期性的加热过程会驱动声学压力的振荡。

上述研究主要从燃烧稳定性机理着手,采用数值、实验的方法,研究了燃料空气当量比、燃料空气混合物流动速度及燃料喷射位置等参数对燃烧稳定性的影响规律,且在预混燃烧方式下,研究关注的重点多为燃烧稳定性,却对污染物排放的研究较少。而且关于燃料热值变化对不同燃烧方式下全尺寸燃气轮机的燃烧稳定性的影响也鲜有研究。故本文从不同燃烧方式的角度,研究燃料热值对燃气轮机燃烧稳定性和污染物排放的影响规律,为在役同类型燃气轮机机组的安全稳定、低污染物排放运行提供理论参考。

1 数值计算模型

某重型燃气轮机采用逆流轴向分级的 DLN 燃烧室,共有 18 个分管燃烧室,每个燃烧室由 5 个带旋流器的燃料喷嘴构成^[11],具有扩散和预混两路燃料通道,在扩散燃烧模式和预混燃烧模式下分别由扩散及预混燃料通道向燃烧室注入天然气燃料。燃烧室主要由燃料喷嘴组件、喷嘴端盖、前缸、后缸、火焰筒、导流衬套和过渡段等部件组成,具体结构如图 1 所示。根据其结构所建几何模型参见文献[12-14]。

1.1 燃气轮机参数

对几何模型进行适当简化后建立的燃烧室物理模型如图 2 所示。利用分块结构化网格划分技术,

对燃烧室物理模型进行了网格划分,对燃料喷嘴进行了局部加密处理,生成的网格如图 3 所示,通过网格无关性验证,确定的网格总量约为 620 万。

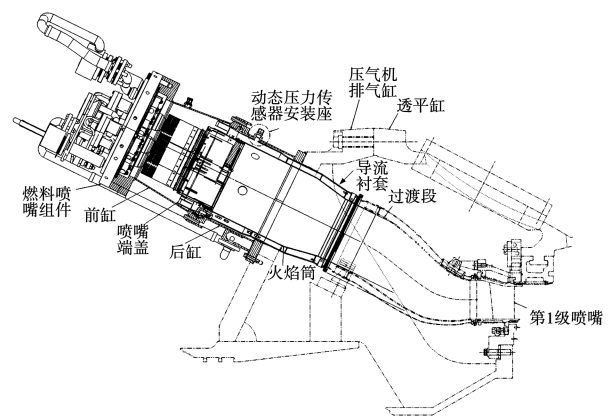


图 1 某重型燃气轮机燃烧室结构

Fig. 1 Combustion chamber structure of a heavy-duty gas turbine

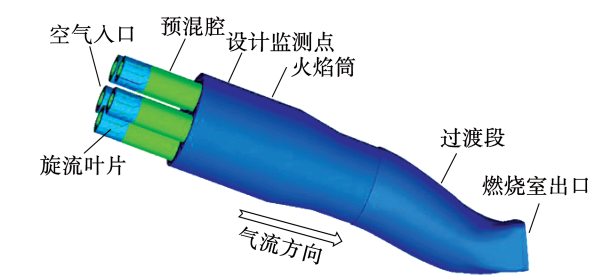


图 2 燃烧室物理模型

Fig. 2 Physical model for combustion chamber

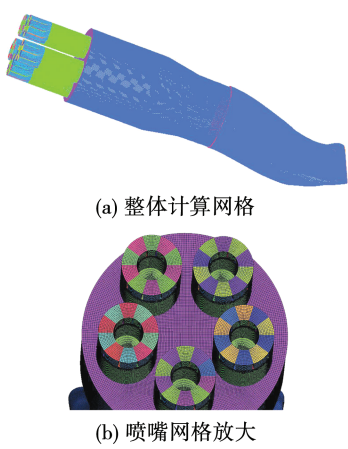


图 3 燃烧室计算网格

Fig. 3 Mesh generation for combustion chamber

1.2 计算边界条件

针对燃气轮机燃烧室高温、高压、高速、高过量空气系数和高燃烧强度等特点,在燃烧室稳态计算时,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,在近壁面处采用标准的壁面函数法;非稳态计算时,需要监测燃烧室内压力的脉动情况,对流场涡流运动的求解精度要求较高,计算采用尺度自适应仿真(SAS)湍流模型,燃烧模型为涡耗散概念(EDC)燃烧模型。采用耦合 Coupled 算法计算流场,采用 PRESTO! 格式对压力项进行插值,QUICK 格式对密度项进行插值。

对于可压缩流动,燃烧室计算域的入口为质量入口边界条件,出口为压力出口边界条件。考虑到固体壁面的传热传质对燃烧室内流场特性的影响较小,因此对火焰筒壁面进行了无滑移绝热壁面处理,不考虑火焰筒辐射换热的影响。计算时,先用稳态计算得到燃烧室的稳态流场,然后以此为初场进行非稳态数值计算,时间步长设为 1.0×10^{-5} s。考虑到天然气的主要成分为甲烷,数值模型中采用甲烷代替天然气,燃烧化学动力学模型利用文献[15]中的甲烷五步化学反应模拟天然气燃料的化学反应。

1.3 数值计算模型验证

利用电厂热平衡专业分析软件计算的燃烧室出口温度与烟气排放连续监测系统现场采集的 NO_x 排放数据,对数值模型计算的燃烧室出口温度与 NO_x 排放数据进行了对比验证,结果吻合^[16]。

2 燃料热值对燃烧稳定性和污染物排放的影响

当燃料热值变化时,燃料/空气比偏离最佳运行工况,导致燃烧室压力脉动增大, NO_x 排放升高,影响燃气轮机机组的安全、经济和低污染运行^[13]。本研究在特定燃烧方式下,仅改变燃料热值,而燃烧室入口空气流量、燃料流量和燃烧室出口压力等边界参数均保持不变的条件下展开。扩散与预混燃烧方式下的具体计算工况如表 1 所示。燃烧室压力、热释放率、声压级和功率谱密度位置均取图 2 的燃烧室设计监测点处的监测值。

表 1 不同燃烧方式下数值计算工况
Tab.1 Numerical calculation conditions in
different combustion modes

燃烧 方式	燃烧室入口 空气流量/ kg · s ⁻¹	燃料流量/ kg · s ⁻¹	燃烧室 出口压 力/MPa	燃料热值/ kJ · kg ⁻¹	燃烧室入 口空气 温度/℃
扩散	18.43	0.29	0.711	43 908	262.8
燃烧	18.43	0.29	0.711	45 824	262.8
	18.43	0.29	0.711	48 314	262.8
预混	30.42	0.81	1.475	43 908	385.6
燃烧	30.42	0.81	1.475	45 824	385.6
	30.42	0.81	1.475	48 314	385.6

2.1 燃料热值对燃烧稳定性的影响

图 4 为不同燃烧方式下,燃料热值不同时燃烧室压力变化曲线。分析燃烧室压力变化曲线可知,扩散燃烧方式下,在燃烧初期,压力随时间变化明显,随着热值增加,其变化趋势减缓,压力变化幅度较小;预混燃烧方式下,压力随时间变化趋势为先平缓后逐渐扩张,随着热值的增加,压力变化趋势逐渐变缓,但压力变化幅度较大。

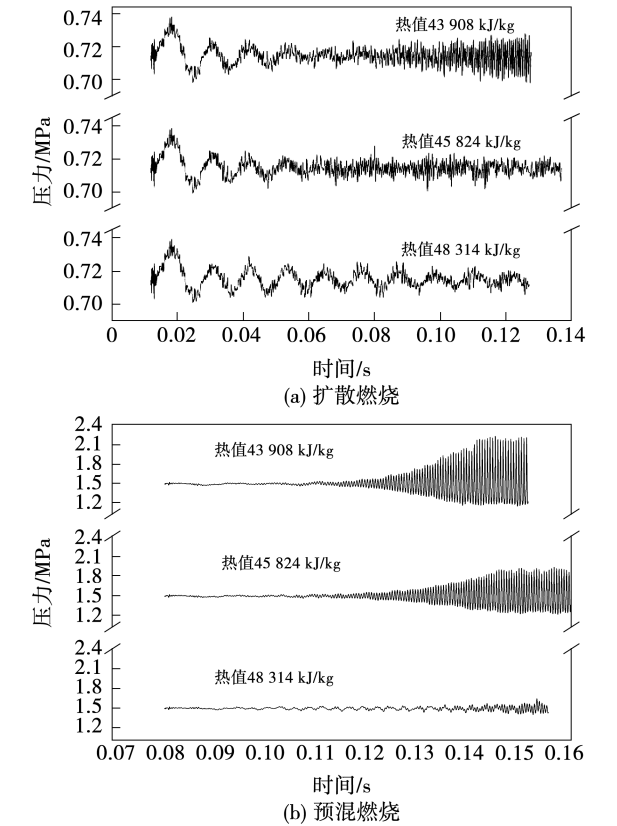


图 4 燃烧室压力变化曲线

Fig.4 Pressure change curve of combustion chamber

图 5 为不同燃烧方式下,燃料热值不同时燃烧室热释放率曲线。扩散燃烧方式下,热释放率变化明显;预混燃烧方式下,在低热值时热释放率在高频时变化明显。

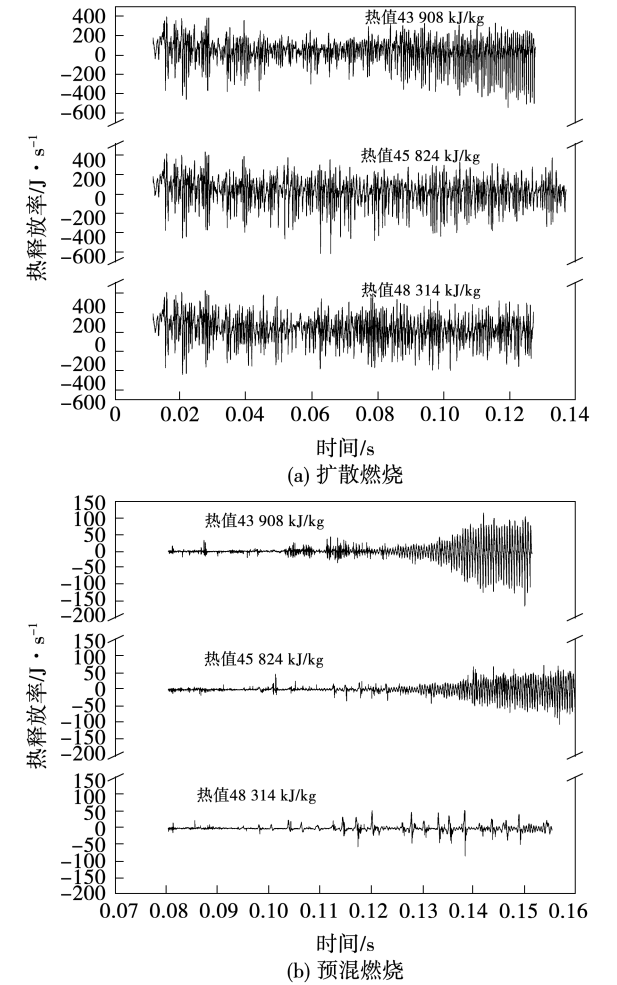


图 5 燃烧室热释放率变化曲线

Fig.5 Heat release rate change curve of combustion chamber

由图 4 和图 5 可知,在扩散和预混燃烧方式下,热释放率变化曲线与压力变化曲线的变化规律类似,表明燃烧室压力与热释放率相互影响。

图 6 为不同燃烧方式下,燃料热值不同时燃烧室压力频谱分析结果。图中标注的数据由两部分组成,中间用逗号隔开,逗号前的数据为频率,逗号后的数据为相应的幅值。由图可知,扩散燃烧时,燃烧室低频压力脉动频率在 87 ~ 88 Hz,低频压力脉动幅值在 0.002 79 ~ 0.005 57 MPa,高频压力脉动频率在 1 640 ~ 1 656 Hz,高频压力脉动幅值在

0.001 05~0.003 75 MPa 的范围内波动。扩散燃烧方式下,随着热值增加,燃烧室低频压力脉动幅值先减小后增大,高频压力脉动逐渐减小;预混燃烧时,燃烧室低频压力脉动频率在 352~375 Hz 范围内,低频压力脉动幅值在 0.002 5~0.014 8 MPa 范围内,高频压力脉动频率在 1 963~2 053 Hz 范围内,高频压力脉动幅值在 0.014 6~0.125 MPa 范围内。预混燃烧方式下,随着热值增加,燃烧室低频压力脉动增加,高频压力脉动逐渐减小;相同热值时,预混燃烧较扩散燃烧在同一频段压力脉动幅值大。预混燃烧的高频压力脉动频率较扩散燃烧的高频压力脉动频率大。

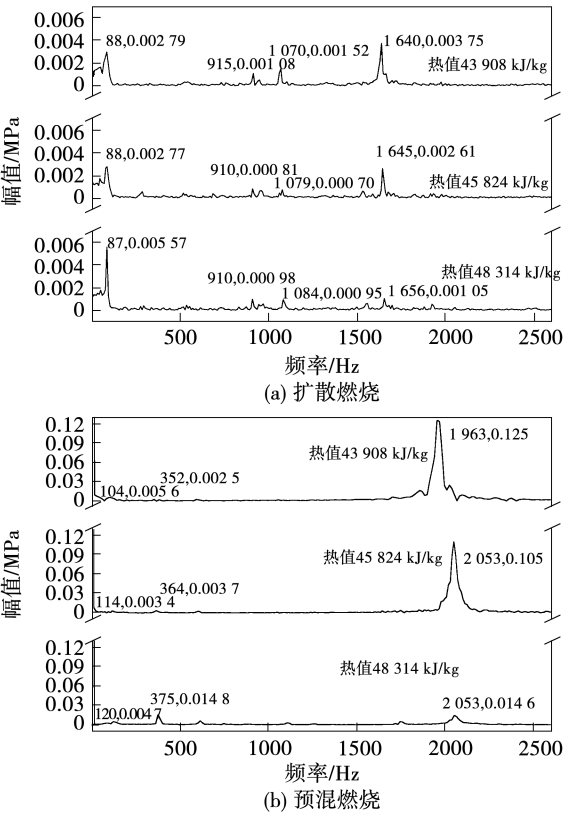


图 6 燃烧室压力频谱分析

Fig. 6 Pressure spectrum analysis of combustion chamber

利用燃气轮机设计监测点处的压力脉动监测数据,对扩散与预混燃烧方式下压力脉动的频率和幅值进行了对比,在低频时,压力脉动幅值均小于 0.048 MPa,燃烧室运行稳定。分析燃机运行数据,高频时压力脉动幅值需小于 0.007 MPa,当超过时燃气轮机将会出现燃烧不稳定问题。在本文所模拟的工况,扩散燃烧时,燃烧室稳定燃烧;预混燃烧时,

在高频段出现了燃烧不稳定现象。
通过与燃烧室设计监测点压力脉动数据的对比可知,燃烧室数值模型很好地预测了设计监测点燃烧稳定性。

图 7 为不同燃烧方式下,燃料热值不同时燃烧室的热释放率频谱分析。

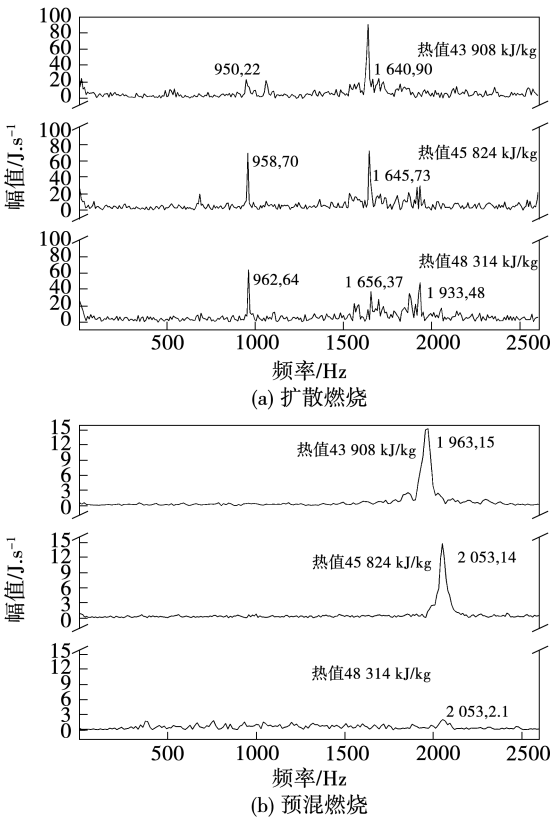


图 7 燃烧室热释放率频谱分析

Fig. 7 Heat release rate spectrum analysis of combustion chamber

由图 7 可知,相同热值时,在同一频段,扩散燃烧的热释放率比预混燃烧的热释放率大。扩散燃烧方式下,高频段热释放率幅值为 37~90 J/s;预混燃烧方式下,高频段热释放率幅值为 2.1~15 J/s。这是因为热值一定,扩散燃烧时燃料与空气中的 O₂ 边混合边燃烧,燃烧不均匀,局部热释放率高。预混燃烧时,燃料与空气中的 O₂ 预先混合均匀,然后在燃烧室点火燃烧,燃烧相对均匀,热释放率较低。
与燃烧室压力频谱分析结果相比,在扩散与预混燃烧方式下,压力频谱与热释放率频谱在高频时对应的频率一致,二者相互耦合。

图 8 为不同燃烧方式下,燃料热值不同时燃烧

室的声压级频谱分析。由图 8 可知,扩散燃烧方式下,随着燃料热值变化,声压级最大变化量为18 dB;预混燃烧方式下,随着燃料热值变化,声压级最大变化量为 39 dB。可见,燃料热值变化,预混燃烧方式下更易发生热声振荡引起的燃烧不稳定。

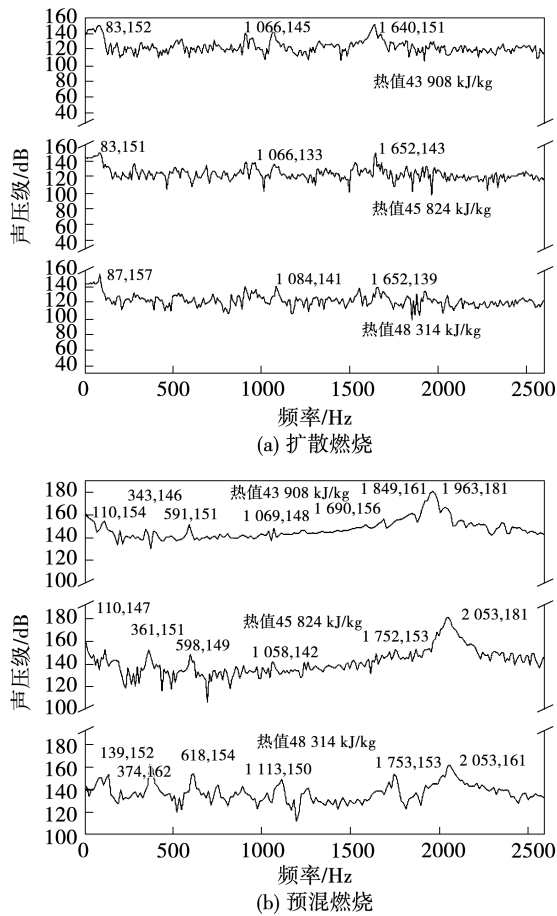


图 8 燃烧室声压级频谱分析

Fig. 8 Sound pressure level spectrum analysis of combustion chamber

相同热值条件下,在频率接近时,预混燃烧方式的声压级值相对较大。因为燃烧室压力变化引起声学脉动,当声学脉动与热释放率脉动频率一致,且相位差小于 90° 时,会导致燃烧不稳定现象产生。

图 9 为不同燃烧方式下,燃料热值不同时燃烧室的功率谱密度频谱分析。由图 9 可知,扩散燃烧方式下,热值不同,低频段与高频段均会引起振动,因为低频段与高频段均可见功率谱密度说明均有振动能量产生;预混燃烧方式下,热值不同,振动能量主要集中在高频段;相同热值,预混燃烧方式在高频时功率谱密度大于扩散燃烧方式高频时的功率谱密

度,可知预混燃烧方式在高频段对应的振动能量大于扩散燃烧方式在高频段的振动能量。

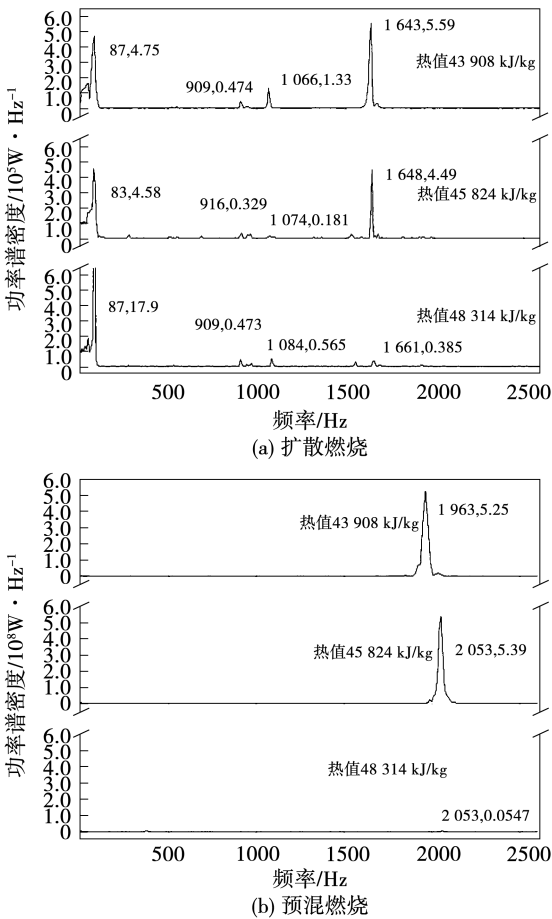


图 9 燃烧室功率谱密度频谱分析

Fig. 9 Power spectral density spectrum analysis of combustion chamber

2. 2 燃料热值对污染物排放的影响

通过 NO_x 排放数值计算结果,分析 NO_x 变化趋势。图 10 为不同燃烧方式下,燃料热值不同时燃烧室出口 NO_x 排放曲线。由图 10 可知,随着热值增加,燃烧室出口 NO_x 排放增加。这是因为在特定燃烧方式下,燃料量相同,热值增加,释放的热量增加,引起燃烧室温度升高,进而导致 NO_x 排放增加。在扩散燃烧与预混燃烧方式下热值变化对燃烧室出口 NO_x 排放的影响规律一致。

图 11 为不同燃烧方式下,燃料热值不同时燃烧室出口 CO 排放变化曲线。由图 11 可知,热值变化对扩散燃烧与预混燃烧方式下燃烧室出口 CO 的排放影响较小。

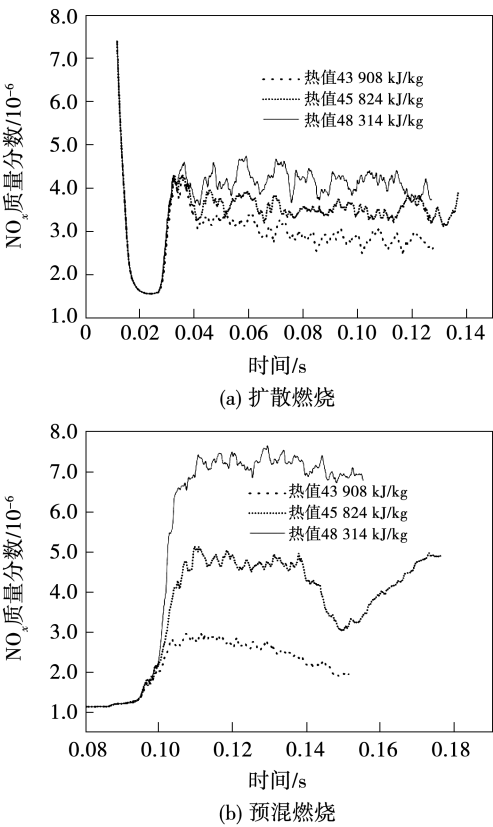


图 10 燃烧室出口 NO 变化曲线

Fig. 10 NO curve of combustion chamber outlet

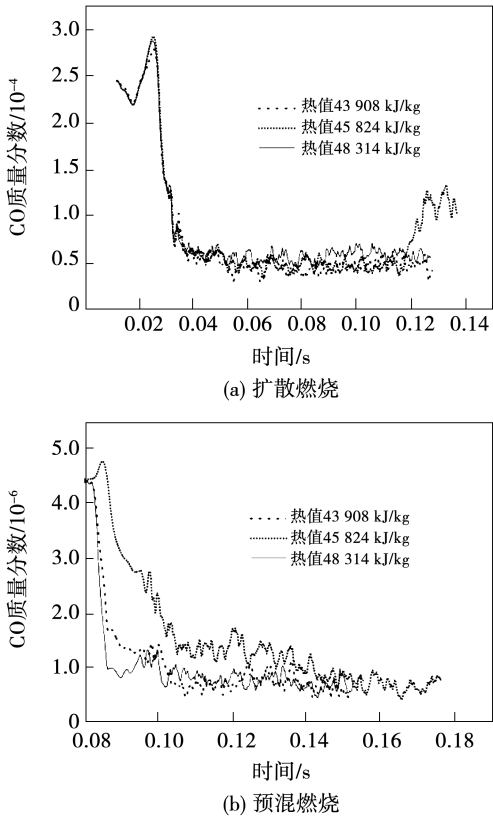


图 11 燃烧室出口 CO 变化曲线

Fig. 11 CO change curve of combustion chamber outlet

3 结 论

(1) 扩散燃烧时,燃烧室低频压力脉动频率在 87 ~ 88 Hz,高频压力脉动频率在 1 640 ~ 1 656 Hz 范围内。热值较低时,在扩散燃烧方式下,燃烧室高频压力脉动较大,高频压力脉动幅值为 0. 003 75 MPa;随着热值增加,燃烧室低频压力脉动先减小后增加,从 0. 002 79 减小到 0. 002 77 MPa,然后再增加到 0. 005 57 MPa。

(2) 预混燃烧时,燃烧室低频压力脉动频率在 352 ~ 375 Hz,高频压力脉动频率在 1 963 ~ 2 053 Hz 范围内。在预混燃烧方式下,随着热值增加燃烧室低频脉动增加,脉动幅值从 0. 002 5 增加到 0. 014 8 MPa,燃烧室高频压力脉动从 0. 125 减小到 0. 014 6 MPa。

(3) 热值相同时,在同一频段,预混燃烧方式较扩散燃烧方式压力脉动幅值大,而扩散燃烧方式的热释放率比预混燃烧方式的热释放率大。

(4) 热值变化时,在扩散燃烧与预混燃烧方式下,燃烧室出口 NO_x 排放的影响规律一致。随着热值增加,两种燃烧方式下燃烧室出口 NO_x 排放均增加;热值变化对扩散燃烧与预混燃烧方式下燃烧室出口 CO 的排放影响较小。

参考文献:

[1] 苏保兴,黄素华,华宇东,等. 燃料组分变化对 DLN 燃烧器运行的影响[J]. 燃气轮机技术,2014(1):48-51.
SU Bao-xing,HUANG Su-hua,HUA Yu-dong,et al. The influence of fuel component to DLN combustor operation[J]. Gas Turbine Technology,2014(1):48-51.

[2] LIEUWEN T,MCDONELL V,SANTAVICCA D,et al. Burner development and operability issues associated with steady flowing syngas fired combustors[J]. Combustion Science and Technology, 2008,180(6):1169-1192.

[3] LIEUWEN T,ZINN B T. The role of equivalence ratio oscillations in driving combustion instabilities in low NO_x gas turbines[J]. Symposium (International) on Combustion, 1998, 27 (2): 1809-1816.

[4] LIEUWEN T,TORRES H,JOHNSON C,et al. A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors

- [J]. Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123 (1): 182 – 189.
- [5] STRAUB D L, RICHARDS G A. Effect of fuel nozzle configuration on premix combustion dynamics[C]//ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers, 1998: V003T06A044 – V003T06A044.
- [6] MONGIA R, DIBBLE R, LOVETT J. Measurement of air-fuel ratio fluctuations caused by combustor driven oscillations[C]//ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers, 1998: V003T06A026 – V003T06A026.
- [7] WANG S, YANG V, HSIAO G, et al. Large-eddy simulations of gas-turbine swirl injector flow dynamics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 583: 99 – 122.
- [8] YOON J, KIM M K, HWANG J, et al. Effect of fuel-air mixture velocity on combustion instability of a model gas turbine combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 54(1): 92 – 101.
- [9] 李祥晟, 丰镇平. 贫油预混燃烧室燃烧稳定性的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(5): 502 – 505.
- LI Xiang-sheng, FENG Zhen-ping. Numerical study on combustion instability in a lean premixed combustor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(5): 502 – 505.
- [10] 张欣刚. 燃气轮机燃烧室预混燃烧自激不稳定性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- ZHANG Xin-gang. Investigation of self-excited instability of premixed combustion in gas turbine combustors[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [11] 王 峰, 肖俊峰, 高 松, 等. 重型燃气轮机燃烧室流动特性研究[J]. 燃气轮机技术, 2017(3): 37 – 40.
- WANG Feng, XIAO Jun-feng, GAO Song, et al. Study on combustion chamber flow characteristics for heavy duty gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2017(3): 37 – 40.
- [12] 肖俊峰, 王 峰, 高 松, 等. 进气压力对燃气轮机预混燃烧稳定性影响[J]. 热力发电, 2018, 47(4): 86 – 91.
- XIAO Jun-feng, WANG Feng, GAO Song, et al. Effect of inlet pressure on premixed combustion stability of gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(4): 86 – 91.
- [13] 李晓丰, 肖俊峰, 王 玮, 等. 重型燃气轮机燃烧室压力变化对 NO_x 排放的影响[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 53 – 58.
- LI Xiao-feng, XIAO Jun-feng, WANG Wei, et al. Influence of combustor pressure on NO_x emission of a heavy duty gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 53 – 58.
- [14] 肖俊峰, 王 玮, 胡孟起, 等. 空气含湿量对燃气轮机燃烧性能影响[J]. 热力发电, 2019, 48(4): 84 – 89.
- XIAO Jun-feng, WANG Wei, HU Meng-qi, et al. Effect of humidity ratio on combustion performance of gas turbine combustor[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(4): 84 – 89.
- [15] 温 正, 石辰辰, 任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- WEN Zheng, SHI Liang-chen, REN Yi-ru. FLUENT fluid simulation application tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [16] 肖俊峰, 李晓丰, 王 峰, 等. 大气温度对某型燃气轮机燃烧稳定性和 NO_x 排放影响的数值研究[J]. 燃气轮机技术, 2020, 33(3): 19 – 25.
- XIAO Jun-feng, LI Xiao-feng, WANG Feng, et al. Numerical study on the influence of atmospheric temperature on combustion stability and NO_x emission of a heavy duty gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2020, 33(3): 19 – 25.

(姜雪梅 编辑)