

预燃室式火花塞在大缸径气体机上的试验研究

徐清祥^{1,2}, 孙永亮^{1,2}, 孔龙^{1,2}, 许有豹^{1,2}

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061;
2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决大缸径气体机燃烧不稳定问题,在大缸径气体机上进行普通火花塞、预燃室式火花塞性能对比试验,及3种预燃室式火花塞对气体机性能影响的对比试验。结果表明:采用预燃室式火花塞可以拓展气体机稀燃极限,大幅提高发动机燃烧稳定性,平均指示压力波动率和最大缸内爆发压力波动率降低约45%,缸内燃烧速度加快,热效率提高约0.5%,涡前排气温度降低约15℃;预燃室式火花塞喷孔直径和数量对气体机燃烧的滞燃期影响较大,较小的喷孔直径更有利于缩短滞燃期,增大喷孔直径导致失火率上升,喷孔数量对失火率影响较小,喷孔直径和数量对燃烧持续期、燃气消耗率和NO_x排放影响较小。

关键词:大缸径气体机;预燃室式火花塞;稀薄燃烧

中图分类号:TK433.95

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)02-0013-05

引用格式:徐清祥,孙永亮,孔龙,等.预燃室式火花塞在大缸径气体机上的试验研究[J].内燃机与动力装置,2023,40(2):13-17.

XU Qingxiang, SUN Yongliang, KONG Long, et al. Experimental study on pre-chamber spark plug for large bore gas engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(2):13-17.

0 引言

近年来,能源危机和环境污染日益加剧,清洁能源在世界范围内受到关注,清洁能源汽车是当前汽车行业的研究热点之一^[1]。天然气储量丰富,采用天然气作为燃料的大功率气体发动机广泛应用于热电联供、电站、沼气发电、瓦斯发电等。天然气具有较高的活化能,着火温度高,火焰传播速度比较慢,燃烧时间长。对于天然气发动机,应优化其燃烧性能,提升点火能力^[2]。预燃室式火花塞是在普通火花塞的点火电极外增加1个预燃烧室,当预燃室中的混合气被点燃后,较小空间中的压力和温度迅速上升,高温火焰和燃烧产物从预燃室小孔喷出,点燃主燃室的混合气。预燃室式火花塞的点火能量为普通火花塞的100~1 000倍,可为主燃烧室中的稀薄混合气提供稳定点火能量,加快混合气燃烧速度,减少未燃混合气,提高天然气发动机热效率^[3-6]。

大缸径气体发动机一般采用稀薄燃烧技术,缸内混合气越稀薄,过量空气系数越大。增大过量空气系数有利于提高发动机的平均有效缸内压力和热效率,降低缸内燃烧温度和排气温度,减少NO_x的产生^[7-8]。但是过量空气系数增大,混合气难以点燃,易出现失火问题,缸内火焰传播速度低,易出现燃烧不充分问题,预燃室式火花塞是解决这些问题的有效方法之一。

本文中在大缸径气体机上进行普通火花塞、预燃室式火花塞对气体机性能影响的对比试验,及3种预燃室式火花塞对气体机性能影响的对比试验,研究预燃室式火花塞对大缸径气体机稀燃极限、预燃室式火花塞喷孔数量和直径对大缸径气体机性能和缸内燃烧状态的影响,为提高气体机的燃烧稳定性和热效率提供参考。

收稿日期:2022-02-11

第一作者简介:徐清祥(1981—),男,山东日照人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为内燃机燃烧与控制,E-mail: xuqingx@weichai.com。

1 预燃室式火花塞与普通火花塞试验对比分析

在1台缸径为180 mm的大缸径气体机上进行普通火花塞和预燃室式火花塞性能对比试验,分析火花塞型式对缸内燃烧状态和发动机性能的影响。采用的主要试验设备如表1所示。

表1 试验测试设备

设备名称	电力测功机	燃烧分析仪	缸压传感器	数据采集系统
型号	AMI 560L 4L BSFTS	LQL1200A	6052CU20S3	NI1000
设备名称	空气流量计	Lambda 分析仪	燃气流量计	
型号	PL-2-DN250	C-Lam/CM-W-PCDB9-3	CMFS050M176N2BZMKZ	

经试验测试,配置普通火花塞和预燃室火花塞气体机稀燃极限的过量空气系数分别为1.65、1.72。试验过程中,调整空燃比和点火提前角使发动机性能达到最优。采用普通火花塞,发动机的最优点火提前角(压缩上止点前曲轴转角)为 26° ,最优过量空气系数为1.58;而采用预燃室式火花塞,发动机的最优点火提前角为 24° ,最优过量空气系数为1.62。选择在2种火花塞发动机性能达到最优时对比缸内燃烧状态和发动机性能。普通火花塞和预燃室式火花塞实物如图1所示。

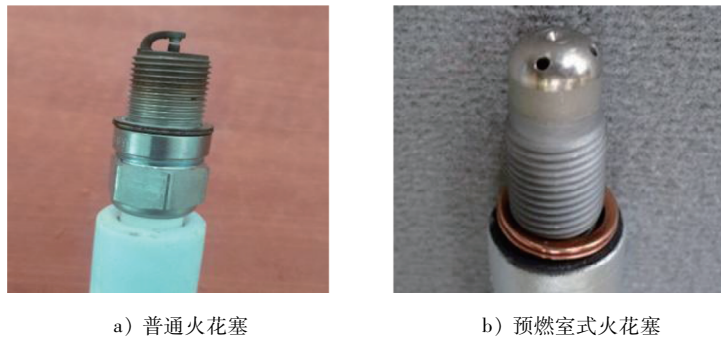


图1 普通火花塞和预燃室式火花塞实物图

1.1 燃烧特性对比

2种火花塞气体机缸内循环平均指示压力、最大缸内爆发压力波动情况如图2所示。由图2可知:采用普通火花塞,气体机的循环平均指示压力波动率在1.6%上下浮动,最大缸内爆发压力波动率在7.5%上下浮动;采用预燃室式火花塞,气体机的循环平均指示压力和最大缸内爆发压力波动率下降约45%,发动机燃烧稳定性明显提升。2种火花塞气体机燃烧持续期对比如图3所示。由图3可知:普通火花塞气体机的燃烧持续期在曲轴转角 66.7° 左右;预燃室式火花塞气体机的燃烧持续期对应的曲轴转角减小约 11° ,这表明采用预燃室火花塞可显著提高缸内燃烧速度,缩短燃烧持续期。

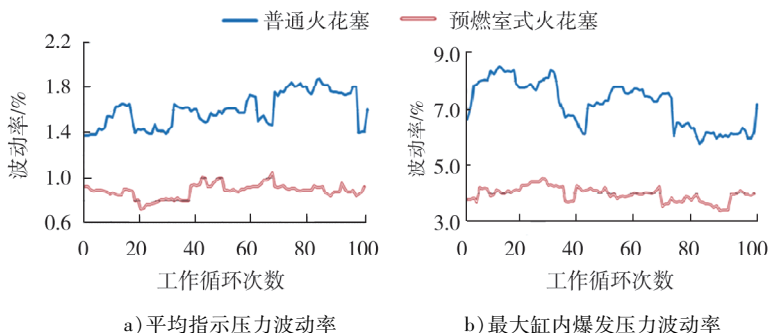


图2 2种气体机缸内循环波动率对比

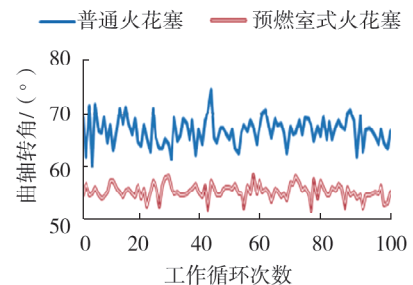


图3 2种气体机燃烧持续期对比

1.2 发动机性能对比

不同负荷率(实际负荷与额定负荷的比)下2种火花塞气体机燃气消耗率对比如图4所示。由图4可知:采用预燃室式火花塞,气体机燃气消耗率在不同负荷率均降低,负荷率为100%时燃气消耗率降低约2 g/(kW·h),气体机的热效率提高0.5%。

2种火花塞气体机排气温度对比如表2所示。由表2可知:采用预燃室式火花塞后,由于燃烧速度加快,气体机在不同负荷率下排气温度均明显下降;普通火花塞气体机额定功率下的涡前排气温度为660℃,预燃室式火花塞气体机额定功率下的涡前排气温度为645℃,降低了15℃。

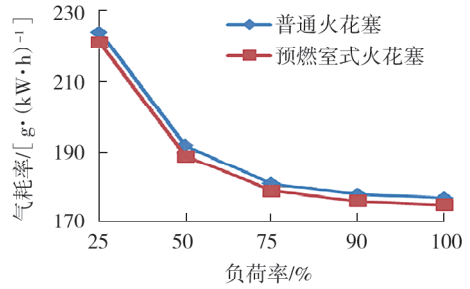


图4 不同负荷率下2种气体机燃气消耗率对比

表2 2种火花塞气体机涡前排气温度对比

火花塞类型	涡前排气温度/℃				
	负荷率 25%	负荷率 50%	负荷率 75%	负荷率 90%	负荷率 100%
普通火花塞	641	652	653	656	660
预燃室式火花塞	631	637	639	642	645

性能对比试验表明:采用预燃室式火花塞后,气体的稀燃极限得到拓展,缸内燃烧速度加快,燃烧稳定性大幅提高,气体机的燃气消耗率和排气温度均有所降低。

2 预燃室式火花塞喷孔试验对比

预燃室式火花塞喷孔直径和喷孔数量是火花塞设计的关键参数。为优化预燃室式火花塞结构,对预燃室式火花塞的喷孔数量和直径进行性能对比试验研究。喷孔直径越小,预燃室式火花塞喷射出的火焰湍流动能越大,有利于提升燃烧速度,但喷孔过小会导致预燃室内部换气不畅,预燃室内燃烧的废气无法有效排出。在相同喷孔截面积下,数量越多,喷孔直径越小,喷孔喷出火焰的辐射范围越广^[9-10]。

为降低开发成本,缩短开发时间,通过仿真对预燃室喷孔方案进行筛选,选取3种典型的预燃室式火花塞方案进行试验,3种火花塞的预燃室与主燃烧室的体积比均为0.45%,喷孔直径、喷孔数量如表3所示,具体喷孔布置如图5所示(图中单位为mm)。

表3 不同预燃室式火花塞方案喷孔参数

火花塞方案	喷孔直径/mm	喷孔数量/个	喷孔截面积/mm ²
1	1.2	4+1	5.652
2	1.6	4+1	10.048
3	1.2	6+1	7.913

注:1个喷孔在中心,其余喷孔沿圆周均匀分布。

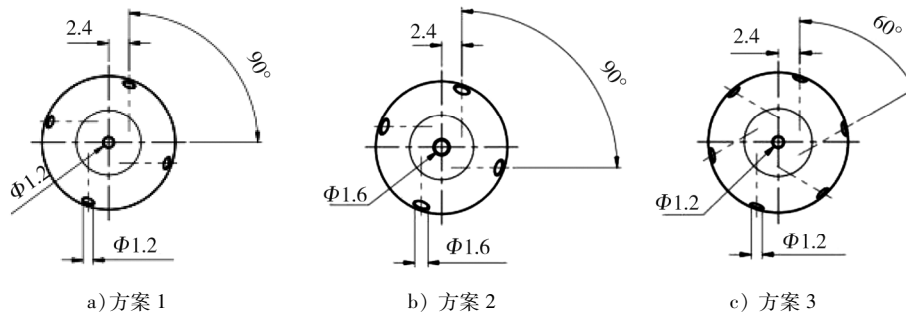


图5 不同预燃室式火花塞方案喷孔布置

2.1 滞燃期

在相同的空燃比下,调整点火提前角,控制不同预燃室式火花塞的 CA10(指从火花塞点火到 10%缸内燃料完全燃烧经过的曲轴转角)相同,记录 CA10,对比火花塞对气体机燃烧滞燃期的影响。方案 1、2、3 气体机的滞燃期分别为曲轴转角 20°、27°、26°。方案 1 气体机的滞燃期最短,方案 2、3 气体机的滞燃期接近,均长于方案 1 气体机,表明滞燃期与预燃室式火花塞的喷孔截面密切相关。增加喷孔数量或增大喷孔直径,增大了火花塞喷孔截面积,降低了预燃室内部高温高压燃气的喷射速度,延长点火滞燃期;喷孔直径对滞燃期的影响更大。从缩短滞燃期的角度分析,方案 1 气体机的性能最优。

2.2 燃烧持续期

燃烧持续期是燃料燃烧 10%~90%对应的曲轴转角,表征燃料燃烧速度,对气体机的经济性、排放均有影响^[11-12]。

在相同的空燃比和 CA50(指从火花塞点火到 50%缸内燃料完全燃烧经过的曲轴转角)下进行试验,方案 1、2、3 气体机燃烧持续期对应的曲轴转角分别为 55°、55°、52°。3 种预燃室式火花塞气体机的燃烧持续期接近,表明预燃室式火花塞的喷孔直径、数量对气体机燃烧持续期影响不大。分析原因为:尽管方案 1 气体机的滞燃期最短,但是在后续的火焰发展过程中,急燃期未缩短,所以燃烧持续期与其他 2 个方案气体机接近。

2.3 失火率

失火率是指在一定循环内发动机失火的比例,失火率越高发动机燃烧越不稳定^[13]。相同的空燃比和 CA50 下,方案 1、2、3 气体机的失火率分别为 1.02%、1.78%、1.22%。方案 1 气体机的失火率最低,方案 3 气体机的失火率与方案 1 接近,方案 2 气体机的失火率最高,表明增大火花塞喷孔直径会导致失火率上升,发动机燃烧稳定性变差,火花塞喷孔数量对发动机失火率影响较小。

2.4 燃气消耗率

燃气消耗率表征气体机的经济性,燃气消耗率越低,气体机热效率越高。相同的空燃比和 CA50 下,方案 1、2、3 气体机的燃气消耗率非常接近,均约为 178 g/(kW·h),预燃室式火花塞喷孔直径和数量对气体机燃气消耗率的影响较小。

2.5 NO_x 排放

NO_x 排放水平是衡量大缸径气体机排放的关键指标。在相同的空燃比和 CA50 下,方案 1、2、3 气体机尾气中 NO_x 的质量浓度分别为 385、360、382 mg/m³。3 种预燃室式火花塞气体机 NO_x 排放水平接近,预燃室火花塞的喷孔数量和直径对气体机 NO_x 排放影响较小。

3 结论

为优化大缸径气体机燃烧性能,通过仿真筛选出 3 种典型预燃室式火花塞方案,在大缸径气体机上进行试验,对比分析普通火花塞、预燃室式火花塞对气体机稀燃极限等的影响,及预燃室火花塞喷孔数量和直径对气体机性能和缸内燃烧状态的影响。

1) 相较于普通火花塞,预燃室式火花塞可以拓展发动机的稀燃极限,发动机燃烧稳定性大幅提高,平均指示压力和最大缸内爆发压力波动率降低约 45%;发动机缸内燃烧速度加快,发动机性能提升,热效率提高约 0.5%,涡前排气温度降低约 15 °C。

2) 预燃室式火花塞喷孔直径和数量对发动机燃烧的滞燃期影响较大,较小的喷孔直径有利于缩短滞燃期;增大喷孔直径导致失火率上升,发动机燃烧稳定性变差;喷孔数量对气体机失火率影响较小;喷孔直径和数量对燃烧持续期、燃气消耗率和 NO_x 排放影响较小。

参考文献:

[1] 饶庆平,郝建刚,白云山.碳排放目标背景下我国天然气发电发展路径分析[J].发电技术,2022,43(3):468-475.

- [2] MURAKAMI S, 钟恩洋. 燃气发动机的发展现状和未来战略[J]. 国外铁道机车与动车, 2015(2):6-18.
- [3] WU H, WANG L, WANG X, et al. The effect of turbulent jet induced by pre-chamber sparkplug on combustion characteristics of hydrogen-air pre-mixture[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(16):8116-8126.
- [4] LUO Q H, SUN B G, GAO Y L, et al. The effect of equivalence ratio, temperature and pressure on the combustion characteristics of hydrogen-air pre-mixture with turbulent jet induced by pre-chamber sparkplug[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(36):20470-20481.
- [5] SOTIROPOULOU E, KNEPPER S, DEEKEN S, et al. 预燃室火花塞在天然气发动机和氢发动机中的应用及发展[J]. 范明强,译. 汽车与新动力, 2020, 3(5):63-66.
- [6] 何海斌, 阮晓东, 吴杰, 等. 预燃室火花塞式天然气发动机燃烧性能试验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30):12939-12945.
- [7] 刘兰兰, 王学鹏, 牛家强, 等. 天然气发动机单独进气预燃室研究[J]. 内燃机与动力装置, 2016, 33(1):19-22.
- [8] 何海斌, 阮晓东, 吴杰, 等. 预燃室火花塞式天然气发动机燃烧性能试验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30):12939-12945.
- [9] 陈荣祥. 预燃室式火花塞天然气发动机性能研究[D]. 济南:山东大学, 2018.
- [10] 曲闯. 气体燃料船用主机预燃室加浓喷射过程研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- [11] 王梅. 预燃室式天然气发动机流动和燃烧的数值模拟[D]. 镇江:江苏大学, 2018.
- [12] 郑尊清, 王献泽, 王浒, 等. 基于当量燃烧的天然气发动机燃烧室优化研究[J]. 内燃机工程, 2020, 41(4):1-8.
- [13] 黄振华, 梁称邦, 冯宁. 发动机失火原理及排查研究[J]. 时代汽车, 2022(13):138-140.

Experimental study on pre-chamber spark plug for large bore gas engine

XU Qingxiang^{1,2}, SUN Yongliang^{1,2}, KONG Long^{1,2}, XU Youbao^{1,2}

1. State Key Laboratory of Internal Combustion Engine Reliability, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: To solve the problem of unstable combustion in large gas engines, performance comparison tests are conducted with ordinary spark plugs and pre-chamber spark plugs. Three types of pre-chamber spark plugs are also tested. The results show that the use of pre-chamber spark plugs could expand the lean burn limit of gas engines, significantly improve engine combustion stability, reduce the average indicated pressure fluctuation rate and maximum cylinder burst pressure fluctuation rate by about 45%, accelerate cylinder combustion speed, increase thermal efficiency by about 0.5%, and reduce the exhaust temperature before the turbine by about 15 °C. The diameter and number of nozzle holes for pre-chamber spark plugs show a significant impact on the ignition delay period of gas engine combustion. A smaller nozzle diameter is more conducive to shortening the ignition delay period, and increasing the nozzle diameter led to an increase in misfire rate. The number of nozzle holes has a smaller impact on misfire rate, while the diameter and number of nozzle holes has a smaller impact on combustion duration, gas consumption rate, and NO_x emissions.

Keywords: large bore gas engine; pre-chamber spark plug; lean burn

(责任编辑:郎伟锋)