

一种热气机用盘式旋流气体燃烧器的试验研究

孙海英, 刘志辉, 刘靖飙

(中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 上海 201203)

摘 要: 为满足小型热气机常温常压条件下燃烧的需要, 在数值模拟的基础上设计了一种盘式旋流气体燃烧器, 并试验研究了不同开孔方式、负荷条件和过量空气系数下燃烧室内的温度分布和火焰形状, 结果表明: 燃气孔为内孔, 空气旋转流动, 同时燃烧器外径减小到原来的 2/5 左右的情况下, 燃气-空气混合均匀, 燃烧稳定, 火焰透明、脱壁且不直接灼烧加热器头部, 高温区分布合适, 满足热气机燃烧要求。

关 键 词: 气体燃烧器; 旋流; 热气机; 数值模拟

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

热气机(又名斯特林发动机)是一种外燃式高效热功转换装置, 热源品质要求低, 能源适应性强, 环境特性优越, 在分布式能源系统中具有较大的优势^[1~2]。热气机的性能优劣是多种因素决定的, 其中外燃系统性能的好坏对其燃烧经济性、工作稳定性和可靠性及燃烧排放等具有重要影响。

目前, 热气机商业化应用比较成功的主要有瑞典的 Kockums 公司、德国的 SOLO 公司和 SunPower 公司、美国的 SIM 公司及新西兰的 WishPergen 公司。根据燃料的不同, 各热气机燃烧器的设计也有很大区别。以气体燃烧器为例, SIM 公司采用的是多个小喷嘴叠加预混燃烧的方式^[3~4], 该种燃烧器加热均匀, 空气预热温度不受限制, 燃烧效率高, 但由于喷嘴数量多, 结构复杂, 流动阻力较大, 生产成本也高。WishPergen 的燃烧器设计主要基于空气的旋流运动, 与燃气混合后形成旋流火焰燃烧^[5~6], 结构较为简单, 比较适合小型家用热气机使用。

除燃料种类、结构和成本考虑外, 热气机燃烧器设计还需具有以下特点: (1) 燃烧稳定, 点火可靠, 不易发生失火、回火等; (2) 加热均匀; (3) 具有合适的火焰形状和长度, 火焰不贴壁, 不直接灼烧加热器(加热管); (4) 可调范围宽, 燃烧完全, 热效率高

等。本文所述盘式旋流燃烧器的创新设计很好地满足了上述要求, 适合在小型家用热气机热电联供系统上的使用。

1 燃烧器结构设计与原理

盘式旋流燃烧器设计的基本思想是将燃气喷入旋转流动的空气流中, 实现燃气与空气的均匀混合燃烧。考虑到小型热气机整体尺寸较小, 将空气喷孔和燃气喷孔整合在一个零件上, 采用全加工的方式制作, 精确保证燃气与空气的混合, 提高燃烧完善程度。



图 1 某热气机燃烧系统示意图

某热气机燃烧系统中的燃烧器即为一种盘式旋流燃烧器, 如图 1 所示。其中, 燃气喷孔和空气喷孔沿圆周均匀布置, 空气与圆周成一定角度切向进入燃烧室并形成旋流, 燃气垂直喷入, 与旋流空气混合。燃气喷孔和空气喷孔的孔径大小由燃料的回火极限和失火极限确定, 而圆锥面角度、空气喷孔切向角度、天然气喷孔与空气喷孔的相对位置、燃烧室形状等通过数值模拟和试验的方法确定。

1.1 CAE 辅助设计

CAE 辅助设计主要应用在直流燃烧和旋流燃

收稿日期: 2009-06-29 修订日期: 2009-07-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776083)

作者简介: 孙海英(1983-)女, 湖南益阳人, 中国船舶重工集团公司第七一一研究所工程师。

烧两种方式的比较以及喷头体结构、燃烧室形状的选择上。利用 CFD 软件 Fluen 进行计算, 考察不同结构和工况条件下燃烧室内的流场和温度场分布。

某直流燃烧器燃烧室中心截面上的温度分布及与加热器的相对位置关系如图 2 所示。可以看出, 该燃烧器对应的喷头体周向尺寸较大, 燃烧室上下两部分尺寸基本一致。燃气从中间通道进入, 空气从最外侧的通道进入, 空气喷孔与斜锥面垂直, 无切向速度, 因而空气无旋流。从温度分布情况来看, 该结构下火焰过长, 已经灼烧到了加热器头部, 不利于加热器的长期稳定工作。

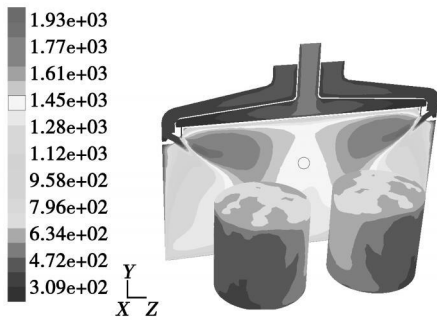


图 2 直流燃烧下的温度分布 (K)

在图 2 计算结果的基础上, 首先通过工质系统的换热计算, 在保证换热量大小的前提下降低了加热器的高度。同时, 为使火焰长度变短, 需减小混合气体的轴向速度, 增加空气喷口的切向速度来实现旋流燃烧。模拟计算的结果如图 3 所示。由图可以看出, 采用旋流组织燃烧后, 火焰与加热器头部的距离明显加大, 避免了火焰对头部的直接灼烧。与燃烧室壁面及加热器上壁面之间也存在一定的距离, 有利于提高外燃系统的工作可靠性。但火焰长度短且集中分布在混合气体出口附近, 整个温度场分布不均; 同时出口烟气温度过高, 温度分布呈中心低周围高的状态, 不利于加热器内部工质的热量吸收。

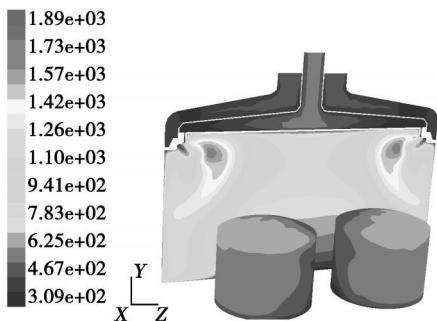


图 3 旋流燃烧下的温度分布 (K)

为使火焰适当向燃烧室中心移动, 将整个燃烧器外径减小到原来的 2/5 左右, 燃烧室上壁面倾斜一定角度, 对气体流动进行导向, 燃烧室结构如图 1 所示, 计算结果如图 4 所示, 燃烧室中心部位整体温度升高, 同时也没有发生火焰直接灼烧加热器头部的情况。进一步的计算还发现, 当燃气喷口位置离混合气体出口越远时, 火焰长度就越短。试验用燃烧器即是在该结构的基础上局部修改后实现的。

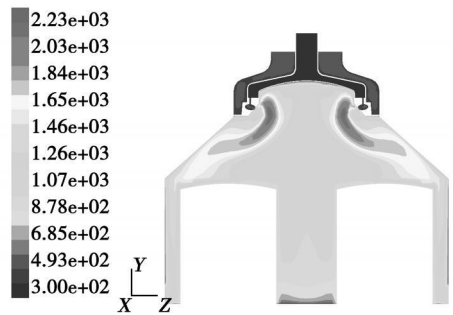


图 4 燃烧室形状变化后的温度分布 (K)

1.2 试验装置与试验方法

根据数值模拟计算的结果, 设计了盘式旋流燃烧器, 并进行了试验研究。试验分两个阶段进行, 第一阶段是开式试验, 即在大气环境下进行燃烧试验 (无加热器), 通过改变燃气—空气混合方式、燃烧负荷及过量空气系数等, 观察燃烧器的点火情况及火焰颜色和形状、火焰长度、稳定性等; 第二阶段是在热机整机上进行燃烧试验, 考察整体燃烧性能的好坏。

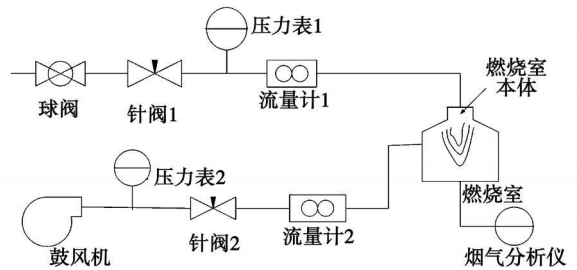


图 5 燃烧器燃烧试验装置示意图

开式燃烧试验主要进行了 3 个方面的试验: (1) 改变燃气喷孔的位置, 考察在内孔、中孔、外孔 3 种方式下的燃气—空气混合情况和火焰燃烧情况 (为配合该试验的进行, 同一试验件上加工了一组空气喷孔和 3 组燃气喷孔); (2) 改变燃烧器负荷大小, 考察 50%、75% 和 100% 负荷条件下的燃烧情况; (3) 改变过量空气系数大小, 考察过量空气系数为 1.24、1.4 和 1.6 的情况下火焰分布的情况。根据 DOE 试验设计方法, 需进行三因子三水平的试验设计, 全因子试

验共有 27 组, 数量较多。考虑到不同开孔方式的选择对试验结果的影响较大, 本研究先在全负荷, 过量空气系数 1.25 和 1.4 的条件下进行了分组试验。在确定开孔方式后再进行后续二因子三水平 (共 8 组) 的全因子实验, 试验装置如图 5 所示。

2 试验结果分析

2.1 开孔方式对燃烧的影响

3 种开孔方式对燃烧的影响通过测量燃烧器上壁面中心温度、掺混段出口烟气温度、出口壁面温度等进行比较, 同时观察火焰燃烧的情况来考察。由于燃烧器的燃烧存在一个合适的空燃比范围, 在试验数据的选取上, 当空燃比调节到某个范围 (如 100% 负荷下过量空气系数在 1.4 以上时, 或各工况下过量空气系数小于 1.25 时) 观察发现火焰形状分布出现明显的不合理或燃烧不稳定、不规则时, 对应的温度状况未进行测量。各种工况下的温度测量结果如表 1 所示。

表 1 100% 负荷下温度测量结果

开孔方式	过量空气系数	上壁面中心温度 / °C	掺混段出口壁面温度 / °C	掺混段出口烟气温度 / °C
1 内孔	1.25	690	773	986
2 中孔	1.25	601	793	1 050
3 外孔	1.25	620	630	965
4 内孔	1.40	727	797	820
5 中孔	1.40	630	727	960
6 外孔	1.40	636	670	907

从表 1 上壁面中心温度测量结果来看, 开内孔时中心温度最高, 分析原因, 是由于开内孔时火圈较靠近中心, 受辐射影响中心温度偏高。开中孔时掺混段出口烟气温度较高, 说明在开中孔时火焰在纵向上分布较长, 较长的火焰可能对加热器有损坏作用。而开内孔和外孔时温度较低, 说明此时的火焰长度较为合适。掺混段出口壁面温度表征旋流火焰的扩张程度, 可以看出开内孔时旋流的扩张程度较大。由于掺混段直径较小, 而燃烧室直径较大, 所以火焰需要一定的旋转扩张, 才能保证在燃烧室内均匀地加热加热器头部。从金属颜色变化及热电偶测温来看, 该处温度应在 250 ~ 350 °C 左右。因此, 采用开内孔, 选取较大的旋转张角组织燃烧的方式是切实可行的。

几种情况下燃烧火焰观察的结果显示, 开内孔时火焰更加均匀、透明, 而开中孔、外孔时火焰凌乱,

尤其是小负荷情况下经常出现火焰随燃气的脉冲波动回流至燃气孔的情形, 造成了燃烧的不均匀, 并存在安全隐患。因此, 总体来说, 开内孔时该旋流燃烧器燃烧更完全, 更符合整机的设计要求。

2.2 负荷及过量空气系数对燃烧的影响

由以上试验结果及分析可知, 开内孔时的燃烧情况比较符合设计要求, 因此本研究是基于开内孔的结构方式进行不同过量空气系数 (分别取 1.25、1.4 和 1.6) 与不同负荷条件 (50%、75% 和 100%) 的燃烧试验。通过调节燃气流量和空气流量的大小实现不同工况的调节, 所测结果如图 6 ~ 图 8 所示。

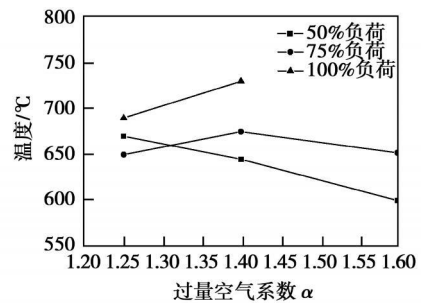


图 6 上壁面中心温度测量结果

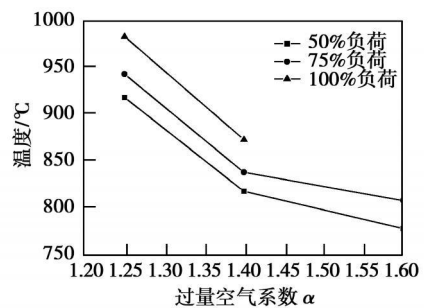


图 7 掺混段出口烟气温度

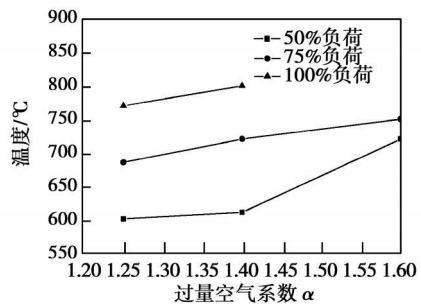


图 8 掺混段出口壁面温度

上壁面中心温度的高低是高温烟气回流与过量空气冲刷共同作用的结果。从图 6 来看, 负荷较高时整体温度偏高。50% 负荷时空气速度较低, 过量空气系数的增加对烟气回流的影响不大, 起主导作

用的是过量空气对热量的吸收以及对壁面的冷却作用,因此随过量空气系数的增加,壁面温度逐渐降低。随着负荷的增大,空气喷孔处的空气流速增大,烟气回流的影响也增大,故75%负荷和100%负荷时出现了温度先上升后下降的变化趋势。由于壁面中心温度是燃烧器工作可靠性的重要指标,必须结合过量空气系数的两方面影响进行合理结构优化。可考虑将空气喷口内壁面斜度增大,同时将燃气喷口向中心移动,并缩小燃气喷口的直径。

掺混段出口烟气温度在很大程度上反映了高温烟气对工质加热能力的大小。从图7温度变化趋势看,随着过量空气系数的增加,温度均有下降。一方面,空气流量增大改善了燃烧,火焰变短;另一方面空气吸收的热量也增大。可见,合适的过量空气系数不仅影响加热器的可靠性,还影响其效率,因此应该将其限定在一最佳的范围。从图8掺混段出口壁面温度(反映火焰的扩张程度)来看,随着过量系数的增加,火焰的张角增大,容易造成贴壁。综合以上试验结果,该旋流燃烧器的最佳过量空气系数应在1.4左右。图9显示了100%负荷、过量空气系数1.4时的火焰图像。

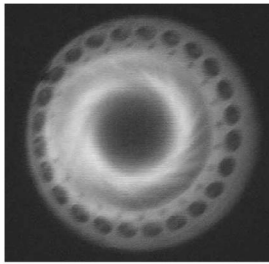


图9 100%负荷, $\alpha=1.4$ 时的火焰图像

2.3 试验结果讨论

开式燃烧试验表明,盘式旋流燃烧器的点火性能良好,火焰蓝色透明,并且伴随很强的旋转,燃气与空气混合良好。火焰在掺混段脱壁,在扩张段逐渐旋转外扩,能够达到均匀加热加热器头部的效果。火焰稳定性较好,在较大的空燃比范围内不熄火。同时燃气孔为内孔时火焰更为均匀透明,长度较短,燃气与空气能更好地混合。由于火焰可以完全脱离掺混段壁面燃烧,该处壁面温度不高,燃烧器可靠性好。另外,可以考虑增加燃烧器内壁斜度,或者设计弧顶以减小高温烟气回流造成的影响。

整机试验是在热气机外燃系统、工质系统、传动系统等整体协同工作的情况下进行的,考察闭式环境下燃烧性能的好坏。燃气和空气管路上均装有流量调节阀调节流量,风机送风,高压点火。以氮气为

工质,电机带动循环,缸径50 mm,额定电功率1 kW。由于闭式试验不利于对火焰形状的直接观察,对燃烧器的考察主要通过测量加热器头部表面温度及试验完毕进行拆检,观察燃烧器表面、加热器表面、燃烧室壁面等颜色变化情况来实现。

从试验情况来看,该燃烧器在燃烧稳定性与均匀性上的表现都较好,4个加热器头部温度未出现明显的不均匀。同时火焰长度合适,没有造成对加热器头部的灼烧,也没有对燃烧室壁面形成明显的烧蚀,整体表现较好。不足之处在于,燃烧器上众多小的燃气、空气喷孔造成了较大的局部阻力和压力损失,因此在燃烧过程中对风机压力的要求较高,风机功率相对较大。

3 结 论

通过前期数值模拟计算及试验研究,对某种用于小型热气机燃烧的盘式旋流气体燃烧器进行开发设计,得出以下结论:

(1) 盘式旋流气体燃烧器将燃气喷入旋转流动的空气流中,能够使燃气和空气充分混合和燃烧,而且其燃烧均匀,结构紧凑,非常适合在小型热气机上使用。

(2) 数值模拟计算的结果表明,通过组织旋流燃烧并适当减小燃烧器整体尺寸和燃烧室上部空间的大小,可以优化燃烧室内的温度场分布,火焰长度短且脱壁燃烧,高温区位置合适,有利于提高热气机的燃烧性能和工作可靠性。

(3) 试验研究表明,当燃气喷孔相对空气喷孔靠内侧时,燃气与空气混合更加均匀,火焰透明稳定,长度较短;不同的负荷条件和过量空气系数大小对燃烧器的可靠性及火焰稳定性与分布状况有较大的影响,在全负荷工作条件(热气机正常工作状态)下,过量空气系数在1.4左右时燃烧器整体性能最好。

参考文献:

- [1] 朱辰元. 燃气热气机在国内热电联供领域应用的探讨[J]. 上海节能, 2009 245: 25-29
- [2] 丁国忠, 张晓青, 郭方中, 等. 斯特林热机发展综述[J]. EB/OL. <http://www.paper.edu.cn> 2005.
- [3] MARCH DONNA N, CHOLAS R, BRUSSTAR MATTHEW J. Heat engine combustor [J]. U.S. 005321764, 1999-07-13.
- [4] MEIJER ROELF J. Stirling engines with integrated gas combustor [P]. U.S. 5388409, 1995-02-14.
- [5] DONALD MURRAY CLUCAS, GEOFFREY JAMES MENTNK. Stirling engine burner [J]. U.S. 6220030B1, 2001-04-24.
- [6] W. I. SHIPEN GEN. Technical information and user manual [EB/OL]. <http://www.whispergen.com> 2005.

An experimental and numerical simulation were performed of the heat exchange characteristics of the laminar flow in an array of rectangular micro passages with a diameter of $D_h = 0.82$ mm under the action of an isothermal heat source. During the test running water at a normal temperature served as an isothermal heat source. The Reynolds number of fluid flow in the micro passages ranged from 100 to 900 and the temperature difference for the heat transfer was 50 K. A comparison of the data thus obtained with the results of the numerical solutions to the N-S equation of normal sizes heated by a uniform wall temperature shows that when Re number is less than 300 the Nu number will increase with an increase of the Re number. When the Re number is greater than 350 however, the Nu number obtained from the experiment will be approximately a constant. A comparison of the numerical simulation results at the inlet condition being fully developed with the test ones shows that the former is 7.2% higher than the latter. Key words: micro passage heat sink; liquid cooling; intensified heat exchange; single phase flow; laminar flow

质量不平衡对齿轮传动系统振动影响的数值分析 = Numerical Analysis of the Influence of Mass Non-equilibrium on Vibrations in a Gear Transmission System [刊, 汉] / ZHANG Kun, LI Ying-sheng (CSIC No. 703 Research Institute Harbin, China, Post Code: 150036), ZHENG Bai-lin (College of Aeronautics, Astronautics and Mechanics, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 312 ~ 316

For a large sized high-speed gear rotor system, mass non-equilibrium may produce a periodic centrifugal inertia force and cause vibrations to the system, affecting its strength and service life. Based on MSC ADAMS, a bowed and twisted coupled vibration model for a gear system was established with two circumstances being taken into account, namely engagement type coupling and rotor dynamic type one. The gears were processed as a rigid body while the shaft was treated as a flexible one. By adopting a multiple flexible body kinetics analytic method, a numerical simulation was performed and the dynamic excitation forces of the gears and the whirling trajectory of the gear centers under the condition of rotor whirling caused by the normal engagement and mass non-equilibrium of the gears were obtained. On this basis, an analysis and comparison was made to provide an underlying basis for the kinetic analysis of the gear box. A finite element model for such a purpose was established in MSC Patran. By utilizing MSC Nastran, a transient kinetic analysis was performed of the gear box and the vibration characteristics of the box body under two eddy whirling operating conditions caused by the normal engagement and mass non-equilibrium of the gears were obtained respectively. Key words: bowed and twisted coupled vibration; gear shaft system; swirl; mass non-equilibrium; vibration

一种热气机用盘式旋流气体燃烧器的试验研究 = Experimental Study of the Disk Type Eddy Flow Gas Burner for a Hot Air Engine [刊, 汉] / SUN Hai-ying, LIU Zhi-hui, LIU Jing-biao (CSIC No. 711 Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 201203) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 317 ~ 320

To meet the requirement of a small sized hot air engine for combustion under a normal temperature and pressure condition, designed was a disk type eddy flow gas burner on the basis of a numerical simulation. Experimentally studied were the temperature distribution and flame morphology in the combustor under the following conditions: various hole opening modes, loads and excess air factors. The research results show that the gas holes are inner ones and the air assumes a rotation flow. Under the condition that the outer diameter of the burner is reduced to around 2/5 of its original, the gas and air will be mixed uniformly with the combustion being stable and flame transparent, away from the walls and not directly heating the head of the heater. The high temperature zones are distributed properly and meet the requirements of the hot air engine for combustion. Key words: gas burner; eddy flow; hot air engine; numerical simulation