

安装倾角对热声发动机性能影响的试验研究

沈 超, 何雅玲, 卢 杰, 刘迎文

(西安交通大学 能源与动力工程学院 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 为充分利用太阳能作为驱动热源, 开展了驻波型热声发动机在不同安装倾角下热力性能的试验研究。试验结果表明, 热声发动机的安装倾角对热声系统的起振温度、消振温度以及起振时板叠中的温度梯度等参数有着显著的影响, 当系统中氦气压力为 1.3 MPa 时, 在试验的 7 种角度下, 最高起振温度 484 °C, 最低起振温度 428 °C, 该特性为选择合适角度以降低系统起振温度提供了试验依据; 而当系统稳定振荡时, 安装倾角的变化对系统的压比和压力振幅等热力特性的影响较小, 该特性为利用自动跟踪太阳能集热器在不同角度下驱动稳定振荡的热声发动机创造了有利条件。试验结果为设计太阳能驱动的热声发动机提供了试验依据。

关 键 词: 热声发动机; 自然对流; 热力特性; 太阳能

中图分类号: TK513 文献标识码: A

引 言

热声发动机是利用热声效应将热能转换为声能的新型热机, 其优点在于无任何运动部件, 采用对环境无害的气体作为工质, 并能直接利用低品位的热能作为驱动热源^[1~4]; 而热声发动机与热声制冷机的配合更是提供了无运动部件的高可靠性制冷方案。因此, 利用可再生能源作为驱动热源的热声系统成为近年来相关领域关注和研究的热点。

利用太阳能作为驱动热源的热声系统, 以美国海军研究生院的 Hoffer 设计制作的太阳能热声发动机驱动的热声制冷机最为典型^[2]。其热声发动机利用一个直径 0.457 m 的菲涅耳透镜把太阳光聚集到板叠的热端, 将板叠热端加热到 475 °C, 热声发动机产生的声功驱动热声制冷机, 在冷却温度 23 °C、制冷温度 5 °C 的工况下提供了 2.5 W 的制冷量。

太阳能能流密度低, 所以为了达到驱动热声发动机的温度, 须采用聚光型太阳能集热器。而聚光型太阳能集热器的接受角小, 为了能够对热声发动机连续加热就必须对太阳进行自动跟踪。聚光型太阳能集热器驱动热声发动机的最简单方式就是将热声发动

机与太阳能集热器一起固定于自动跟踪台架上对太阳进行连续跟踪^[3]。行波发动机的结构相对比较复杂^[5], 与太阳能集热器搭接尚有一定的困难。驻波发动机结构简单, 与太阳能集热器进行搭接容易实现。本文进行了一系列试验研究工作, 探究热声发动机的安装倾角对热声系统热力性能的影响, 为利用太阳能驱动热声发动机进行了前期研究工作。

1 试验装置和测量系统

1.1 试验装置介绍



图 1 旋转式热声发动机试验平台

试验工作基于自行设计制造的旋转式驻波型热声发动机试验台, 实验台的外貌如图 1 所示。热声发动机是一种将热能转换成交变的压力波的动力装置, 图 2 为热声发动机结构, 主要包括加热器、高温谐振腔、热端换热器、平板板叠、水冷却器、谐振管以及谐振腔。其中高温谐振腔、热端换热器、平板板叠和水冷却器构成了热声发动机的热声核, 图 2(b) 为热声核部分的放大视图。表 1 给出了各部件的主要尺寸。试验中采用硅碳棒加热器对热端换热器进行加热, 而冷端换热器的管外留有螺旋槽道用来通水带

走自板叠传递来的热量,在冷、热端换热器的共同作用下板叠中的温度梯度得以建立并逐渐增大,当板叠中的温度梯度达到临界值时系统起振。为了加快试验进程,系统起振前采用 2 °C/min 的升温速率;为了详细地研究系统起振时的动态过程,当热端换热器温度达到 350~400 °C 之间的一定温度值时,降低加热功率,使热端换热器升温速率保持在 0.5 °C/min 左右。

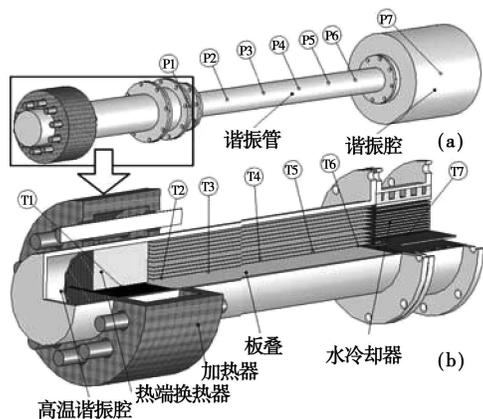


图 2 热声发动机结构

表 1 热声发动机的结构参数

	热端换热器	平板板叠	水冷却器	谐振管	谐振腔
直径/mm	48	54	48	36	150
长度/mm	50	205	50	1 500	170

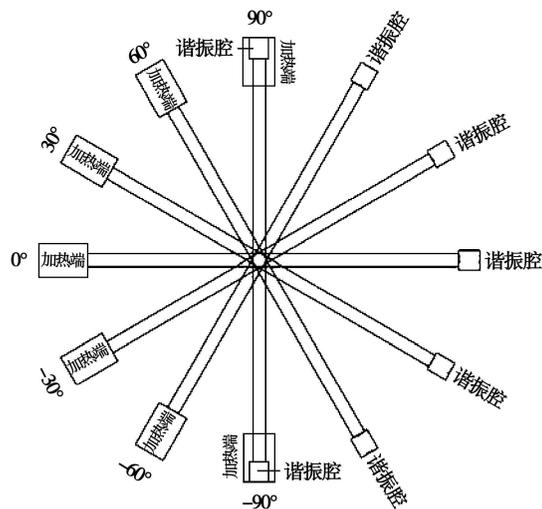


图 3 热声发动机安装倾角变化

试验通过改变热声发动机的空间位置,研究热声发动机的安装倾角对热声发动机起振温度、消振温度、起振时板叠中温度分布以及起振后热声发动机的压比、压力振幅的影响。试验中热声发动机的空间位置由热声发动机的安装倾角表示,热声发动

机的安装倾角为热声发动机的轴线与其在水平面上的投影线之间的夹角,并规定加热端在水平面上方时安装倾角为正,加热端在水平面下方时安装倾角为负,热声发动机的轴线在水平面上时为 0°,安装倾角的变化如图 3 所示。本文在以氦气作为工质,充气压力分别为 1.5、1.3 和 1.1 MPa 的工况下,对图 3 所示的 7 种角度进行了对比试验研究。

1.2 测量系统

试验中,为测量压比、振幅和频率的大小,对系统的压力变化进行了监测,其测点布置如图 2(a)所示,在谐振管和谐振腔的轴线方向每 25 cm 布置一个压力测点,共布置了 7 个压力传感器,压力传感器的电压信号被同时输入到安捷伦 54621D 型混合信号示波器和 SR760 频谱分析仪,系统中压力振幅和频率的变化分别从示波器和频谱分析仪中读取,测压点 P1 为发动机的声功输出位置,是热声发动机压力变化的一个最重要的特征点,需要利用示波器和频谱分析仪实时显示测点 P1 的压力和频率变化,其余点的压力值通过选择开关分别被输入到示波器中。为了监测板叠和冷、热端换热器中温度分布的变化,在热声核部分共布置了 7 个热电偶,其测点布置如图 2(b)所示,其中在热声板叠中心线上均匀布置 5 个测温点(T2~T6),加热器和冷却器中心位置各布置一个测温点,7 个测温点(T1~T7)的温度值由 Keithley 2700 Multimeter/Data Acquisition System 系统进行采集。

2 试验结果与分析

降低热声发动机起振温度是利用低品位热源驱动热声发动机的关键,而热声发动机的热力性能由压比和压力振幅等热力参数衡量。通过试验,研究了热声系统安装倾角对起振、消振温度和临界起振温度梯度以及压比和压力振幅的影响。

2.1 安装倾角对起振、消振温度的影响

图 4 为起振和消振时热端换热器的温度随热声发动机安装倾角的变化情况。从图中可以看出,系统在充以氦气 1.3 MPa 的工况下,当加热器在最下端即-90°时,起振温度最高达到 484 °C 时,当发动机水平安装即 0°时,系统在 428 °C 时即可起振。这主要是由于系统中的 Gedeon 直流的强弱随着系统安装倾角的变化而有着明显的变化。

根据 Gedeon 理论热声系统中总的质量流量^[9]:

$$M_2 = Re[\rho_1 U_1] + \rho_m U_{20} \tag{1}$$

式中: $Re[\rho_1 U_1]$ 一系统中由于声功引起的直流分量,系统起振前该项为零; $\rho_m U_{20}$ 一系统中由于自然对流

引起的直流分量, 在板叠中由于质量直流的存在而将热端热量带到水冷却器端, 热端的热量损失为:

$$Q_{\text{loss}} = M_2 c_p (T_h - T_c) \quad (2)$$

当热端换热器在下、水冷却器在上, 即系统安装倾角小于 0° 时, 在冷热端之间形成强烈的自然对流, 安装倾角越小自然对流引起的直流分量 $\rho_m U_2 v_0$ 越大, 热端换热器的热量损失越大, 板叠中的温度梯度越难建立, 因此热端换热器需要更高的温度才能达到发动机的临界起振温度。随着安装倾角的加大, 自然对流引起的直流分量 $\rho_m U_2 v_0$ 变小, Gedeon 直流引起的热损失变小, Gedeon 直流对板叠温度梯度的影响变小, 起振时热端换热器的温度也随之降低。当安装倾角从 -90° 增至 0° 水平安装时, 起振时热端换热器的温度达到最小值。

当热声发动机的热端在上、水冷却器在下, 即系统安装倾角大于 0° 时, 内部沿声功传输方向的自然对流得到有效抑制, 热声发动机内部沿声功传输方向的扰动随着系统安装倾角的增加而减弱, 而系统中扰动的存在能大幅度降低系统起振温度^[7], 因此起振温度随着安装倾角的增加反而升高。

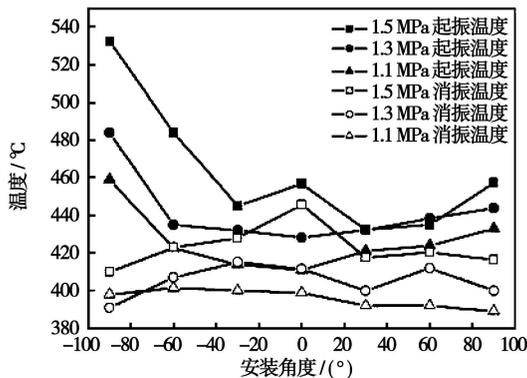


图 4 安装倾角对系统起振、消振的影响

系统消振时热端换热器的温度随着安装倾角的变化与起振时的温度变化刚好相反。从图 4 可以看出, 加热端在下方时系统消振时热端换热器的温度随着安装倾角的增大而升高, 而当加热端在上方系统消振时热端换热器温度随着安装倾角的增加而降低, 热声发动机水平安装时消振温度最高。这主要是由于当加热端在下方时自然对流的方向与声功的传输方向一致, 因此当安装倾角越小, 自然对流越强烈, 系统的消振温度越低, 当热声发动机水平安装时系统消振温度最高; 而当加热端在上方时, 随着安装倾角的增大, 板叠中的温度梯度更容易保持, 因此消振温度越低。

2.2 安装倾角对起振温度梯度的影响

图 5 为系统起振时板叠中的温度梯度随系统安装倾角变化情况。从图中可以看出, 系统安装倾角为 -90° 时, 起振时温度梯度最小, 随着安装倾角的变大起振时的温度梯度变大。当安装倾角大于 0° 时, 起振温度梯度仍随安装倾角的变大而变大, 但受其影响的力度已经明显变弱。这主要是由于当加热端在下方时, 强烈的自然对流增加了系统内部与声功传输方向一致的扰动, 该扰动的存在会减小热身发动机的临界起振温度梯度。当加热端在水平位置或在上方时, 系统内部沿声功传输方向的自然对流被抑制, 因此其临界起振温度梯度相对于加热端在下方时要大, 由此可以看出, 自然对流引起的沿声功传输方向扰动的强弱影响临界起振温度梯度的大小。

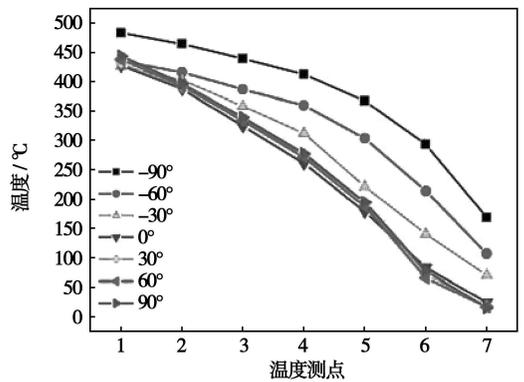


图 5 安装倾角对系统起振温度梯度的影响

2.3 安装倾角对系统压比和压力振幅的影响

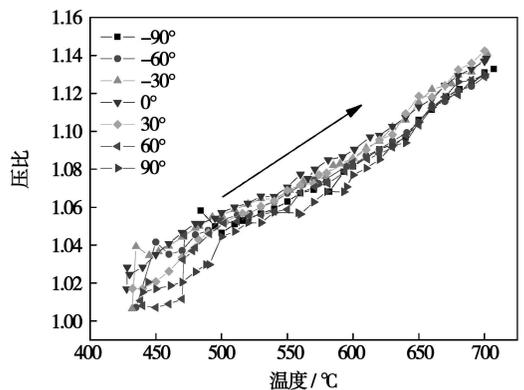


图 6 升温过程系统压比的变化

图 6 和图 7 分别为热声发动机在不同的安装倾角下, 在升温过程中系统的压比和压力振幅随温度变化关系曲线图, 而图 8 和图 9 分别为降温过程中系统的压比和压力振幅随温度变化的情况。由图可知, 在不同的安装倾角下, 系统的压比和压力振幅均随加热温度的升高而逐渐提高, 随加热端温度的降低而减弱。这主要是由于冷端换热器的温度变化相对于热端换热器要缓慢得多, 从而使得热声板叠两

端的温度梯度变化,而热声板叠两端的温度梯度是产生热声振荡的驱动力,最终导致系统压比和振幅随着加热温度的提高而增大。图中显示当系统起振以后,系统压比和压力振幅随安装角度的变化很小,很多情况下甚至互相交叠在一起,因此当系统稳定起振后安装倾角对系统压比和压力振幅的影响甚微。该现象主要是由于系统起振以后,系统内部主要显现出的是保持一定频率的热声振荡,而安装倾角引起的自然对流被热声振荡抑制。

3 结 论

对热声发动机在不同安装倾角下的热力特性进行了试验研究,所获得的试验数据和试验结果有助于对热声振荡现象的进一步理解和认识,对利用太阳能驱动热声发动机提供了试验参考。

(1) 热声发动机的安装倾角对热声系统的起振温度和消振温度有着显著影响,加热端位于冷却端下方时,强烈的自然对流使得板叠中的温度梯度难以建立,加热端在正下方时热端换热器的温度高达 484 °C 系统才能起振,随着安装倾角的增加起振温度降低。而当加热端位于冷却端上方时,在声功传输方向的自然对流得到完全抑制,使得在声功传输方向的扰动变小,安装倾角越大声功传输方向的扰动越小,系统的起振温度越高。该特性为选择合适的安装角度以降低系统起振温度提供了试验依据。

(2) 热声系统的临界起振温度梯度随安装倾角的增加而变大,加热端在水平面以下时临界起振温度梯度随安装倾角有明显变化,发动机安装倾角为 -90° 时加热器与水冷却器的温差 332 °C,而当发动机水平安装即安装倾角为 0° 时加热器与水冷却器的温差增至 404 °C,加热端在水平位置及水平面上方时该变化很小,但依然随安装倾角的增加而变大。

(3) 热声系统起振后,系统内的不稳定流动被稳定的热声振荡抑制,安装倾角对热声系统的压比和压力振幅的影响很小,系统刚起振时的不同角度下压比和压力振幅的差异在 10% 左右,加热器的温度升至 500 °C 以上时其差异变得更小,这进一步说明利用太阳能驱动热声发动机的可行性。

参 考 文 献:

- [1] SMITH GORDON P. Examination of streaming regions within a heat driven thermoacoustic refrigerator [D] . Oxford: University of Mississippi, 2000.
- [2] ADEFF JAY A, HOFER THOMAS J. Design and construction of a solar-powered, thermoacoustically driven, thermoacoustic refrigerator [J] . J Acoust Soc Am, 2000, 107: 3148- 3166.
- [3] CHEN REH IIN. Design, construction, and measurement of a larger solar powered thermoacoustic cooler [D] . Central County: Pennsylvania State University, 2001.
- [4] 刘迎文. 脉管制冷机及热声热机的理论与实验研究 [D] . 西安: 西安交通大学, 2005.
- [5] 刘 浩, 罗二仓, 凌 虹. 热自然对流对热声起振行为的研究 [J] . 低温与超导, 2002, 30(1): 41- 44.
- [6] DAVID G EDEON. DC gas flows in Stirling and pulse-tube cryocoolers [J] . In R G Ross, editor Cryocoolers, 1997, 9: 385- 392.
- [7] 孙大明, 邱利民, 陈国邦, 等. 外加扰动对热声发动机起振特性的影响 [J] . 太阳能学报, 2004(6): 832- 837.

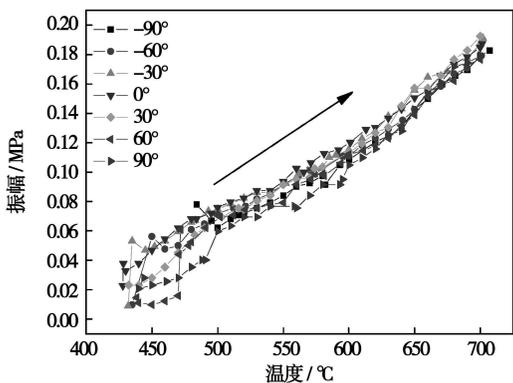


图 7 升温过程系统压力振幅的变化

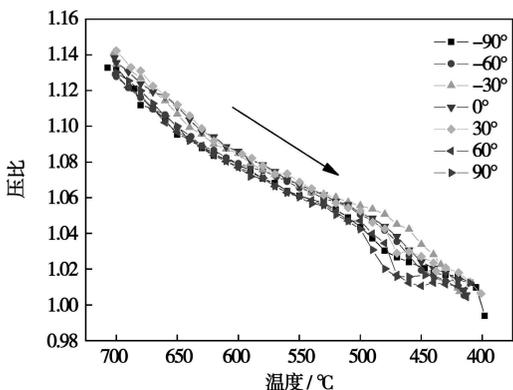


图 8 降温过程系统压比的变化

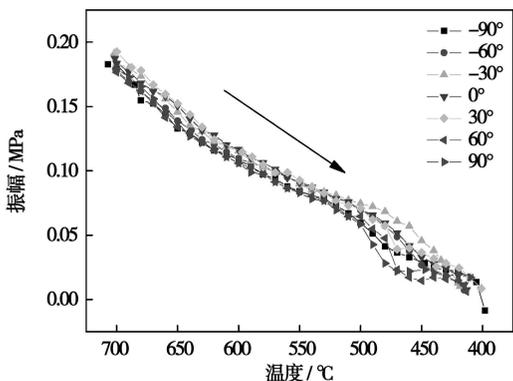


图 9 降温过程系统压力振幅的变化

distribution model. If the integration format is properly chosen, the wide-band k distribution model can attain a calculation accuracy higher than that of the statistical narrow-band model, but comparable to that of the narrow-band k distribution model. For non-isothermal gases between ash wall plates, the calculation error of the wide-band k distribution model is about 10% when its calculation results are compared with those of the line-by-line calculation method, thus greatly enhancing the calculation accuracy and speed of gas radiative characteristics. **Key words:** carbon dioxide, wide-band k distribution model, radiative heat flux

选择性非催化脱硝不同还原剂的比较试验研究 = A Contrast and Experimental Study of Various Reduction Agents for Selective Non-catalytic Denitration Process [刊, 汉] / LI Ke-fu, WU Shao-hua, QIN Yu-kun (Combustion Engineering Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), GAO Guan-shuai, LI Zhen-zhong (Technology Research Center of National Power Plant Combustion Engineering, Shenyang, China, Post Code: 110034) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23 (4). — 417 ~ 420

An experiment of selective non-catalytic reduction (SNCR) process was performed on a CRF (Combustion Research Facility) test rig. Carbamide, ammonia water, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ and NH_4HCO_3 were used to reduce NO_x in flue gas and a reduction agent was sprayed into the CRF furnace through an atomization nozzle. The test results show that for the reduction agents used, with an increase of NH_3/NO molar ratio, the NO reduction efficiency will gradually increase. As for the reduction agents, such as carbamide, ammonia water and $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, NH_4HCO_3 etc., which have an ammonia/nitrogen molar ratio of 1 to 2.5, the denitration efficiencies will be 65%—89%, 62%—86% and 45%—84% respectively. As regards NH_4HCO_3 which has an ammonia/nitrogen molar ratio of 0.8 to 1.5, the denitration efficiency will be 46%—73%. The temperature windows of various reduction agents are different. The reaction temperature suitable for conducting the SNCR process is the highest for carbamide and the lowest for ammonia water. **Key words:** selective non-catalytic reduction (SNCR), NO_x , reduction agent, amide

安装倾角对热声发动机性能影响的试验研究 = An Experimental Study of the Influence of Installation Inclination Angles on Thermoacoustic Engine Performance [刊, 汉] / SHEN Chao, HE Ya-ling, LU Jie, et al (National Key Laboratory on Multiple-phase Flow in Power Engineering, College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23 (4). — 421 ~ 424

To fully utilize solar energy as a driving heat source, an experimental study was carried out of the thermodynamic performance of a standing-wave type thermoacoustic engine installed at various inclination angles. The test results show that the installation inclination angle of the thermoacoustic engine can exercise a remarkable influence on such parameters as the vibration-initiation temperature, vibration-fading temperature of the thermoacoustic system and temperature gradient in a plate stack during the initiation of vibration etc. When the nitrogen pressure in the system has reached 1.3 MPa, at the seven angles used during the experiment, the highest vibration initiation temperature is 484 °C and the lowest, 428 °C. These characteristics can provide an experimental basis for choosing an appropriate angle to lower the vibration-initiation temperature of the system. When the system is in a stable oscillation state, any change of the installation inclination angle has a relatively small influence on such thermodynamic characteristics of the system as pressure ratio and pressure vibration amplitude. These characteristics create favorable conditions for driving at different angles thermoacoustic engines operating in a stable oscillation state by utilizing an auto-tracking solar energy collector. The test results can well provide an experimental basis for the design of solar-energy-driven thermoacoustic engines. **Key words:** thermoacoustic engine, natural convection, thermodynamic characteristics, solar energy

水煤浆流经小曲率半径弯管的阻力特性研究 = A Study of Resistance Characteristics of Coal-water Slurry Passing Through a Tube Bend with a Small Curvature Radius [刊, 汉] / LIU Meng, CHEN Liang-yong, DUAN Yu-feng (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23 (4). — 425 ~ 428

On a self-made test stand, studied were the local resistance characteristics of water-coal slurry passing through a 90° horizontal tube bend with a small curvature radius along with an analysis of the influence of various curvature radii R_c on the