

超声速燃烧地面试验的蓄热式 加热器及其关键技术

李龙飞, 王延涛, 杨伟东, 洪 流
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了模拟飞行状态下进入超燃冲压发动机燃烧室的高焓空气, 在地面模拟试验中需要对空气加热, 可再生蓄热式加热器是一种能提供相对纯净高焓空气的试验设备。介绍了蓄热式加热器的工作原理与特点, 分析了关键技术。结果表明, 蓄热式加热器具有加热空气总温高、流量大和相对纯净的优点, 是我国超燃冲压发动机地面试验的发展趋势, 但蓄热阵材料、加热器结构、超高温阀和大范围调节预热燃烧器等是关键技术, 有待进一步研究和攻关。

关键词: 超燃冲压发动机; 空气温度模拟; 蓄热式加热器; 纯净空气

中图分类号: V235-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 02-0016-05

Thermal energy storage heater and its key technologies for supersonic combustion ground test facilities

LI Long-fei, WANG Yan-tao, YANG Wei-dong, HONG Liu
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to simulate the air temperature in the combustion chamber of scramjet, the air used by the ground simulation test should be heated. This paper presents the design specification of a cored brick storage heater, which can supply high temperature clean air to meet the demands of supersonic combustion experiments. Key technologies of developing thermal energy storage heater are analyzed. The results show that with proper material and structural design, it is possible to use a thermal energy storage heater to obtain clean air flow of Mach 6. However, real performance of materials, the heater structure, the ultra high-temperature valve and gas generator still need to be studied to solve the remaining issues in the thermal energy storage heater.

Keywords: scramjet engine; air temperature simulation; thermal energy storage heater; clean air

收稿日期: 2011-09-22; 修回日期: 2011-10-25

基金项目: 国防基础科研项目(B0320110012)

作者简介: 李龙飞 (1977—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体动力系统喷雾燃烧技术

0 引言

超燃冲压发动机的研制需要进行地面试验, 研制成功与否取决于是否充分模拟超燃冲压发动机的工作状态, 从而使地面数据库的基本数据能够准确地与飞行数据相关联。直连试验系统和自由射流试验系统是当前国内外超燃冲压发动机地面的主要技术途径, 两者均需要提供能模拟高超声速飞行状态的高焓、高压、高马赫数和气体组分的来流(简称模拟来流)。为了模拟来流的焓值通常采用加热器加热气流, 并保证试验气体中氧气的体积组分与空气中的一致。加热方式有多种, 如电阻加热、电弧加热、燃烧加热、激波加热和蓄热式加热等^[1]。在这些加热方式中, 连续式电阻加热器能提供纯净来流空气, 但空气一般只能加热到总温 1 000 K 左右, 在高超音速中使用受到很大限制。电弧加热、燃烧加热产生的气体总存在一定污染。因此, 加热方式成为超燃冲压发动机地面模拟试验的关键和基础。本文比较了几种典型的加热方式, 重点介绍蓄热式加热器的工作原理、关键技术及突破途径, 为我国超燃冲压发动机地面试验系统的建设提供参考。

1 加热方式及对比

高超音速风洞和推进试验设备在通过设备喷管膨胀前需要对气流进行加热, 模拟出真实气体条件和化学效应是很重要的。虽然有很多新技术, 但目前最实际和常用的加热方法仍然是: 1) 电弧加热器; 2) 燃烧加热器; 3) 蓄热加热器。

电弧加热的基本原理是高压直流电弧对一个高压腔内气流的放电产生能量, 通过电弧的辐射、传导和对流等将能量传递给冷空气, 产生高温气流。其显著特点是, 加热后的温度可以达到 3 000–10 000 K, 能模拟 8–20 的飞行马赫数范围, 并且可以提供相对较长时间的试验运行能力。电弧加热器产生的气流温度最高, 但存在很大的组分污染, 尤其是氮氧化物。文献 [2] 的研究表明, 在马赫数 8 时, 氮氧化物 (NO_x) 的

摩尔百分比浓度高达 3.5%。此外, 电弧加热器的运行时间受电极寿命和电源的限制。其中, 分段式加热器的电极寿命为几分钟级, Huels 型加热器可能达到 30 分钟(取决于电流)。在电极退化的过程中, 铜将从电极中脱落, 造成铜污染。在大功率运行时, 电源过热也是个问题。

燃烧加热是利用燃烧型加热器燃烧一定量的燃料, 如氢、甲烷、酒精和煤油等提供热量, 并进行补氧, 从而保证产生的气流中氧气含量与空气中相同。燃烧加热方式可以提供至少马赫数 8.0 甚至更高的加热能力, 但燃烧产物中含有 H₂O, CO₂, CO 等组分, 模拟的气流需要补氧, 其物理特性实际上也不等同空气。氢燃烧加热器可将气体加热到 2 600 K, 但试验气体中含有一定量的 H₂O, O, H, OH 和 NO 等, 如采用气氢燃料燃烧加热气流至 1 200 K, 水蒸气的摩尔分数高达 13%。煤油燃烧加热器可将气流加热到约 2 300 K, 但存在 H₂O, CO₂, CO 等。文献 [3] 给出了不同燃料燃烧加热的污染成分(见表 1)。

表 1 不同燃料燃烧加热的污染成分 (%)

Tab. 1 Contamination component content in combustion heating process of different fuels

污染组分	实际飞行	H ₂ + AIR/O ₂	CH ₄ + AIR/O ₂	C ₃ H ₈ + AIR/O ₂	CH ₃ N ₂ H ₃ + N ₂ O ₄ /O ₂
H ₂ O	1	5–33	3–21	2–15	3–21
CO ₂	0.03	0.03	1.4–10	1.7–11	1.1–7
CO	0	0	≤0.2	≤0.3	≤0.1
NO	≤0.01	≤1.4	≤1.6	≤1.8	≤1.5
O ₃	≤0.001	–	–	–	–

这些燃烧产物对超燃冲压发动机燃烧过程会产生热力和化学作用, 且已经影响双模超燃冲压发动机运行、降低超燃冲压发动机推力、改变自动点火方式、影响可操作性。文献 [4] 对纯净空气和燃烧加热有污染气流进行对比, 研究表明, 与实际飞行相比, 在燃烧加热器模拟下超音速到双模态的转换发生于更高的油气比。文献 [5] 研究了污染空气对氢燃料超声速燃烧室性能的影响, 结果表明, H₂O, CO₂ 或 H₂O + CO₂ 组合污染

对燃烧诱导压升产生了明显的非线性抑制影响。

在模拟较高马赫数 ($Ma \geq 8$) 的飞行试验中,也可采用激波加热设备。例如, NASA 在 Hyper-X 项目中,对 X-43A 进行马赫数 10 的推进试验是在阿连特 GSAL 的 HYPULSE 设备中进行。该类设备不会产生燃烧加热产物,但是激波加热过程中会在空气中产生微量 NO 等产物,对燃烧效果有影响;此外,激波加热试验持续时间也很短,一般 5~30 ms,在如此短的试验持续时间下,无法确定是否充分模拟了热喉道和边界层分离的进展情况。

为了获得相对纯净的空气,国内外不断发展各种新的加热设备,如表 2。

表 2 相对纯净空气的加热方式
Tab. 2 Heating modes of relatively clean air

加热方式	加热原理	最高模拟总温	使用限制
电阻加热 器	金属 —— 半导体	采用电热元件对气流进行直接加热	1 300 K (Ma 5) 2 100 K (Ma 7)
			难突破 Ma 5 模拟能力,电功率需求高 电功率需求很高,存在热应力
蓄热式加热器	Al ₂ O ₃ 卵石床	通过与化学稳定的高温陶瓷蓄热体	1 800 K (Ma 6)
	Al ₂ O ₃ 空心砖	进行对流换热使气流升温,这个过程没有引入化学变化	2 000 K (Ma 6.5)
	YsZ* 空心砖		2 600 K (Ma 8)

*YsZ 为氧化钇稳定的氧化锆 (ZrO₂) 材料。

美国、日本均建成了空心砖蓄热式加热器,运行结果表明,这种加热方式运行稳定,粉尘污染极低,能很好地满足试验需求,是我国研究高超声速燃烧地面设备的发展趋势。

2 蓄热式加热器

2.1 工作原理与特点

蓄热式加热器的剖面示意图见图 1,主要包括蓄热阵、隔热层、外壳压力容器以及燃烧加热器及相应的配套附件等。其工作过程分为三个阶段:1) 预热阶段:用常规热源(如天然气燃烧器)来产生热量,燃气通过蓄热阵并将热量储存于蓄热阵中。这一阶段蓄热阵中压力较低,一般小于 1 MPa;工作时间很长,一般 4~8 h。2) 增压阶段:待蓄热阵热量满足要求后,燃烧加热器停止工作,高压冷空气从空气进口进入蓄热阵,向蓄热阵增压。3) 超燃试验阶段:打开位于出口隔热衬后的高温阀(图 1 未示出),热量又从蓄热材料中释放出来,传递给冷态空气,升温后向设备喷管供应并膨胀至目标马赫数。

纯净空气与蓄热阵通过对流换热得到快速升温,加热为纯物理过程,没有给气流引入化学变化。因此,它能提供相对纯洁的高焓空气来流。

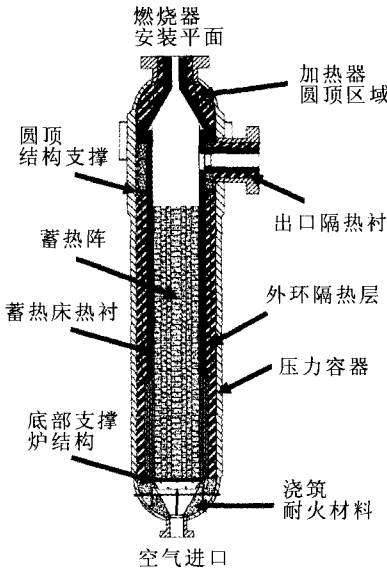


图 1 蓄热式加热器剖面示意图

Fig. 1 Diagrammatic cross-section of thermal energy storage heater

早期的蓄热式加热器多采用球卵石作为蓄热体,加热温度最高可达 2 200 K,但缺点除启动时间长外,在使用过程中存在相当严重的粉尘污染和卵石漂浮问题。这是因为热应力水平高、相邻卵石之间具有很高的点对点接触碰撞载荷和磨损,导致卵石变形、破损、粉尘生成和蓄热阵紧缩等。目前,蓄热体使用最多的是空心砖型,由

各种尺寸的空心高温陶瓷耐火砖垂直堆砌而成。空心砖块在蓄热阵中形成若干紧密相间、均匀和竖直的平行通孔, 燃气和被加热气流将从这些通孔通过。

2.2 关键技术

空心砖型蓄热式加热器具备加热温度高、无污染等优点, 但这种加热方式目前在技术上也存在一些挑战。

1) 蓄热材料。

蓄热式加热器的蓄热材料必须满足以下要求: 致密性、高热容和良好的导热特性; 在高温下具有足够的强度以支撑大的重量; 具有低的热膨胀系数, 能容忍快速传热导致的热应力作用而不发生散裂或破坏。此外, 经济性要好。蓄热材料首选材料为两种: 一是高纯氧化铝陶瓷, 它具有耐高温、强度大、抗热震性好、比热容高、化学稳定等优点, 但使用温度在 2 000 K 以下; 二是氧化锆陶瓷, 它具有使用温度高、挥发性低的特点, 但存在晶相结构不稳定的问题。通过添加适当的稳定剂可以获得完全稳定或者部分稳定的氧化锆材料。

2) 蓄热阵设计技术

蓄热阵的设计包括材料选择、蓄热阵几何设计、热性能和热应力分析。基于加热器使用温度选择适当的蓄热材料, 以换热性能为目标, 以蓄热量为标准, 以热应力破坏为限制因素进行蓄热阵几何设计, 难点和关键在于热应力分析。热应力考虑的目的在于, 预测加热器运行过程(包括加热和冷却)中空心砖蓄热床的热应力水平, 评估材料的抗张强度, 保证蓄热阵的安全、可靠工作。蓄热阵的应力分析相当复杂, 存在种种不确定的影响因素。文献 [6] 给出了一个工程实用的空心砖热应力预测模型, 并建议在热应力分析预测中, 考虑到各种不确定因素, 安全因子不小于 2。

3) 超高温开关阀

超高温阀工作在 1 800 K, 5 MPa 以上的高温高压环境, 工作条件极为恶劣。研制的难点在于高温富氧环境下的阀门烧蚀和氧化, 温差较大可能使得阀门结构变形和密封失效。此外, 由于蓄热器可能存在一定量的粉尘或固体颗粒, 还需

要考虑高温部件的抗冲刷。高温阀的首选形式是截止阀(如图 2 所示), 需要重点考虑的是热承载部位的冷却结构、高温高压的密封设计。

4) 大范围调节预热燃烧器

预热燃烧器为蓄热床提供热源, 一般分两步完成: 首先是长时间小流量将蓄热阵加热至一个稳定状态; 然后是大流量快速加热, 在蓄热阵自上而下形成恒温段和斜坡段(如图 3 所示)。预热燃烧器的技术难点在于: 具有大范围流量调节的能力; 燃气流速尽可能低, 流场均匀以及高温下的可靠冷却。

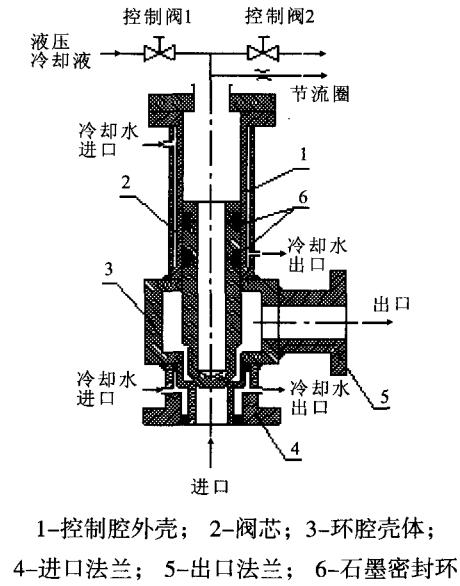


图 2 超高温截止阀示意图

Fig. 2 Schematic of super-high temperature check valve

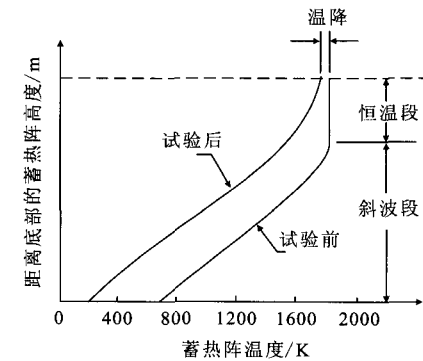


图 3 蓄热阵沿高度方向的温度分布示意图

Fig. 3 Temperature distribution of heaters along altitude direction

(下转第 78 页)

3 结论

对火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置进行了不确定度的分析和评定,认为主标准器、主标准器以及被检温度传感器的电测设备、低温恒温器的温度波动度及不均匀性、数据拟合等对不确定度的影响较大。火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置的测量结果不确定度为 30 mK,满足火箭发动机试验过程中对热敏电阻温度计校准的技术要求。综上所述,北京航天试验技术研究所建立的火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置的测量不确定度符合考核评审要求,可以进行重复性和稳定性的评定,并进一步验证,建立国防计量标准。

参考文献:

- [1] 国家质量技术监督局. JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示[S]. 北京:中国计量出版社, 1999.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1094-2002 测量仪器特性评定[S]. 北京:中国计量出版社, 2003.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1170-2007 负温度系数

低温电阻温度计校准规范 [S]. 北京:中国计量出版社, 2007.

- [4] 龙包庚. 国防计量标准的建立运行与考核指南[M]. 北京:中国计量出版社, 2003.
- [5] 林景星, 陈丹英. 计量基础知识[M]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- [6] 王忠兵, 吴蕾, 赵肃莹, 等. 掺杂对 Ni-Mn-O 系 NTC 热敏陶瓷及其电学性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2009 (6): 927-931.
- [7] HOGE H J. Useful procedure in least squares and tests of some equations for thermistors[J]. Review of Scientific Instrument, 1988, 59(11): 975-979.
- [8] 兰玉岐, 妥万禄, 常爱民, 等. SrCoO_{3-δ} 陶瓷材料的导电机理和低温热敏特性 [J]. 电子元件与材料, 2006, (10): 44-46.
- [9] 中华人民共和国电子行业军用标准. SJ 50601/1-1998 MF5602 型、MF5604 型低温热敏电阻器详细规范 [S]. 北京:中国计量出版社, 1998.
- [10] 兰玉岐, 姜迎春, 陈光明, 等. MF5602 型低温热敏电阻计的特性研究[J]. 低温工程, 2011 (4): 57-59.
- [11] 芳侠, 邵坤鹏, 刘迪. 计量标准测量过程的统计控制的应用[J]. 电子设计工程, 2011, 19(17): 84-87.
- [12] 张晓光, 刘艳, 艾澜, 等. 通信开关电源的电磁兼容性 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (20): 187-189.

(编辑: 马 杰)

(上接第 19 页)

3 结论

1) 蓄热材料、蓄热阵设计技术、超高温阀和预热燃烧器等是蓄热式加热器研制的主要难点,也是当前亟待解决的工程问题。

2) 在蓄热式加热器研制时需结合我国陶瓷材料的水平,充分借鉴国外的设计、建设与使用经验,研制初期重点研究纯刚玉陶瓷材料的性能,完成 Ma 6 的蓄热阵加热器。

参考文献:

- [1] 约翰·霍普金斯大学应用物理实验室编. 冲压发动机技术(下册) [M]. 李存杰, 司徒明, 译. 北京:国防工业出版社, 1980.

- [2] ROGERS R C. Effects of test facility contaminants on supersonic hydrogen-air diffusion flames[C]// Proceedings of 23rd JANNAF Combustion Meeting. Tipo de recurso: Johns Hopkins University, 1986: 377-390.
- [3] PELLET Gerald. Review of air vitiation effects on scramjet ignition and flameholding combustion processes, AIAA-2002-3880 [R]. USA: AIAA, 2002.
- [4] MCDANIEL J C, Jr., KRAUSS R H. Test gas vitiation effects in a dual-mode combustor, AIAA-2003-6960 [R]. USA:AIAA, 2003.
- [5] 罗飞腾, 宋文艳, 刘昊. 污染空气对氢燃料超声速燃烧室性能的影响[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 401-405.
- [6] HEDRICK W S, DECOURSIN D G. Storage heater design study for the hypersonic true temperature tunnel, AEDC-TDR-64-48 (AD442305) [R]. [S.l.]: Fluidyne Engineering Corp., 1964.

(编辑: 王建喜)