



CSTAM 2009-0042

超燃冲压发动机燃烧室热-结构试验研究

吴先前，吴臣武，宋宏伟，黄晨光

中国科学院高超声速科技中心

中国科学院力学研究所

第二届高超声速科技学术会议

2009年11月2-4日 安徽·黄山

超燃冲压发动机燃烧室热-结构试验研究

吴先前^{1,2}, 吴臣武^{1,3}, 宋宏伟^{1,2}, 黄晨光^{1,2}

(1 中国科学院高超声速科技中心, 北京海淀区 100190)

(2 中国科学院力学研究所 水动力与海洋工程重点实验室, 北京海淀区 100190)

(3 中国科学院力学研究所 先进制造工艺力学重点实验室, 北京海淀区 100190)

摘要 针对高温合金材料体系的某超燃冲压发动机燃烧室实验条件, 设计了结构外壁面温度和应变测试方案: 以热电偶监测外壁面典型区域的温度演化历程, 以高温应变片监测外壁面典型区域的应变演化历程。本文介绍了试验方案的主要设计思想, 描述了试验实施的关键步骤, 分析了试验结果的大致规律, 并与前期理论研究结果做了比较讨论。并且, 就其它可能的试验测试手段进行了初步探讨, 为更全面的监测燃烧室热-结构行为提供参考。

关键词 燃烧室, 温度, 应变, 试验研究

引言

超燃冲压发动机燃烧室在极其恶劣的热载荷作用下, 超高温效应将显著降低材料强度; 同时, 高温度梯度导致较高的热应力, 当应力达到或超过材料“当时当地”强度时, 将萌生材料/结构的损伤、断裂和失效破坏。因此, 确定燃烧室在典型工况的温度分布特征和应力状态, 是评价系统结构可靠性以及进行结构优化设计的前提。此前, 根据结构热载荷的特征, 有文献^[1]报道了基于有限元法对结构温度场和变形场的数值分析结果, 获得了一些规律性的认识。然而, 热-结构数值模拟基于给定的热边界条件和相应的材料热-物性、力学性能参数, 其中许多关键的条件参量很难做到精确定量; 若要进一步精细化描述结构温度和应力分布特征, 使结构模型化研究更好的为设计和制造服务, 就需要对结构典型工况下的温度分布和变形进行必要的试验监测、测试。

实际上, 温度和应变作为结构热试验的重要被测参量, 一直受到试验力学工作者的密切关注, 相应的测试手段也层出不穷^[2,3,4]。然而, 非电量的电测法仍然是最基本的测量手段, 相关的测量传感器正逐渐实现小型化、强适应性和高动态精度; 当然, 其中仍然存在一些亟待提高的地方, 譬如高温和快速加热条件下的高温应变片粘贴技术, 以及高温动态应变

测试的热输出修正方法等。结构热测试技术发展的另一个重要趋势是, 传统的接触式电测方法与非接触式光测方法的并行发展。因为, 我们知道, 光测技术的发展使常规的“点”式测量向“场”式测量转变, 能为在大面积范围内研究结构的温度、应力状态提供直观、准确的手段。

考虑到测试对象的复杂性和一些因素的不可预见性, 本文分别讨论了接触式/非接触式温度/变形测试方法的适用性。

针对结构外表面温度测试, 本文介绍了基于红外成像原理的红外热像测温技术和基于金属热电效应的热电偶测试方法。阐述了红外热像温度测试的基本原理、标定方法及其测试精度; 并将热电偶测温结果与前期理论研究结果进行比照, 对 FEM 热分析模型进行校核。

针对结构热变形的试验测试, 本文介绍了基于 CCD 高速摄影技术的表面纹理分析方法和基于金属电阻-应变效应的高温应变片测试方法。针对表面纹理分析方法, 阐述了该方法的基本原理和后期数据分析算法; 针对应变片测试方法, 阐述了影响测试精度的主要因素, 并给出了结构局部应力估算算法。

根据超燃冲压发动机燃烧室的工况特征, 结合前期热-结构有限元分析结果, 本文首先

介绍了试验监测区域的选择思路，然后描述了基本试验原理，最后给出了典型试验结果，并

1 试验方案

1.1 测点区域分析

根据前期燃烧室热-结构分析结果（长时间试验的有限元模拟结果，以温度为例，如图 1 所示），在温度、应变的典型区域及极值区域进行重点测试。

图 1 显示的是侧板、带凹腔板和不带凹腔板 3 块壁板（考虑到左右侧板的对称性，仅给出一块侧板结果）外表面中轴线路径的温度投射。可见燃烧室外壁面的温度从进气端到尾喷端逐渐上升至约 970K（约 700℃）；对应加强筋的地方，加强筋外表面的温度都相应的降低了约 70K。

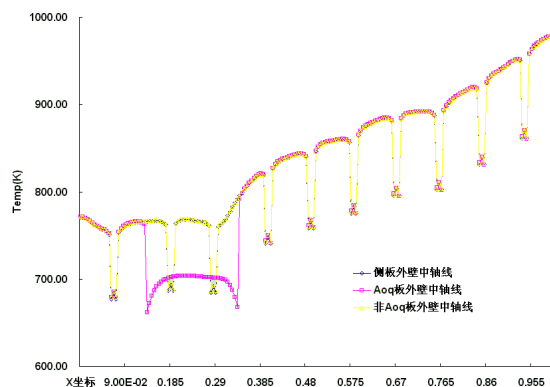


图 1 燃烧室外表面温度路径投射曲线

综合考虑外表面温度、应变分布特征以及实验操作的可行性，在每 2 条筋条之间的壁板外表面中心区域以热电偶和高温应变片分别进行局部温度和应变测试，如图 2 所示。



图 2 热电偶、应变片试验位置图示

1.2 试验方法的基本原理

1) 热电偶测温

热电偶的工作原理是基于塞贝克效应，即：如果由两种不同成分的均质导体组成闭合回路，当两端存在温度梯度时，回路中就有电流通过，那么两端之间就存在塞贝克电势-- 热

对试验方法存在的现实问题进行了分析。

电势。其值与组成热电偶的金属材料性质、热端与冷端的温度差的大小有关，而与热电极的长短、直径大小无关。

2) 电阻应变计

电阻应变片的基本原理是利用金属丝的电阻-应变效应，将结构的机械变形量转化为电量。将应变片粘贴在被测结构的表面，当结构受力变形时，敏感栅随之变形，电阻值发生变化，根据电阻变化率与结构变形之间的对应关系，可以获得结构的应变数值。

3) 红外热像测温技术

红外测温仪是根据物体的红外辐射特性，依靠其内部光学系统将物体的红外辐射能量汇聚到探测器(传感器)，并转换成电信号，再通过放大电路、补偿电路及线性处理后，在显示终端显示被测物体的温度。

4) 基于 CCD 摄像的表面变形分析方法

将全结构在长度方向划分为若干个关注区域，在关注区域进行以机械或其它方法制造离散的标记点、以 CCD 动态图像采集系统采集标点图像，然后对标点图像进行后处理，分析表面变形场。

2 试验结果

2.1 测温结果

本文采用 K 型热电偶测试燃烧室外壁面典型区域的温度历程，试验之前采用冰水混合物和沸水对热电偶进行了标定。以电火花放电的方式将热电偶焊接在典型测点，该焊接方式操作相对简单，焊点牢固。

本文给出了燃烧室底板典型区域的温度结果，如图 3、4 所示。其中图 3 给出的是短时间试验的温度历程，图 4 给出的是长时间试验的温度历程。

图 3 和图 4 的温度采集时间起始点与试验点火时刻基本一致。温度历程结果表明，试验中，由于内壁面隔热涂层的隔热作用，以及主

动冷却措施的热沉作用，外壁面的温度响应在时间上滞后约 10s。

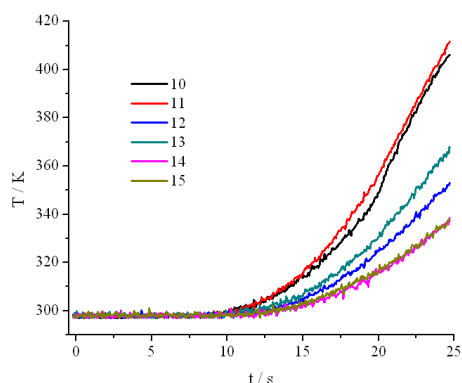


图 3 短时间试验底板典型测点温度历程

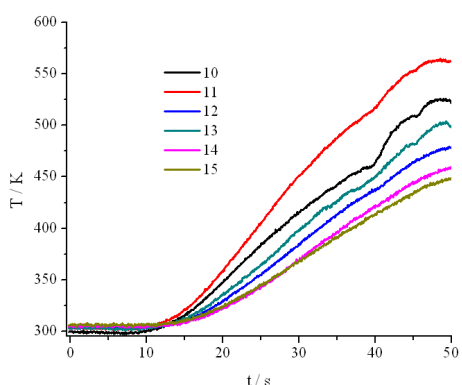


图 4 长时间试验底板典型测点温度历程

2.2 应变测试结果

采用铂钨高温应变片及 YE1301 放大器测量燃烧室凹腔附近及尾喷管附近的应变。采用高温陶瓷粘合剂，在凹腔附近位置粘贴 1#（横向、垂直于轴线）、2#（纵向、平行于轴线）高温应变片，尾喷管附近位置贴 3#（横向）、4#（纵向）高温应变片；并自行设计了石英灯烘烤装置进行烘烤，烘烤过程中以简易数显式热电偶检测烘烤温度；按照该型号陶瓷粘合剂的烘烤规范，人工调节烘烤装置输出功率。

测试过程中，1#、2#、3#、4#号高温应变片分别连接到放大器 1、2、3、4 通道，放大器选用 1/4 桥路连接，放大器放大倍数 100，桥路电压为 2v。

通过放大器读数，得到测点的应变值。放大器放大倍数为 M ，初始读数 U_0 ，时刻 t 读数为 U_1 ，桥路电压为 U ，放大器标定灵敏系数为

K_0 ，应变片标称电阻 R ，电阻温度系数为 α_R ，灵敏系数为 K ，应变片引线电阻 r ，应变片线膨胀系数为 β_g ， t 时刻测点温度升高 ΔT ，则 t 时刻测点应变

$$\varepsilon_t = \frac{K_0}{K} \left(1 + \frac{r}{R}\right) \frac{U_1 - U_0}{MU} - \left(\frac{\alpha_R}{K} - \beta_g\right) \Delta T$$

试验测得典型应变曲线如图 5 所示，其中 1#、2#、3#和 4#分别代表两个测点的两个方向的应变实测值，smoothing 表示对测点的平滑逼近曲线。

可见，与温度变化历程相似，外壁面应变似乎也出现了时间上的滞后。但是，总体看来，从点火开始，正的外壁面应变曲折上升，在燃烧结束点附近应变开始下降并反向增大。

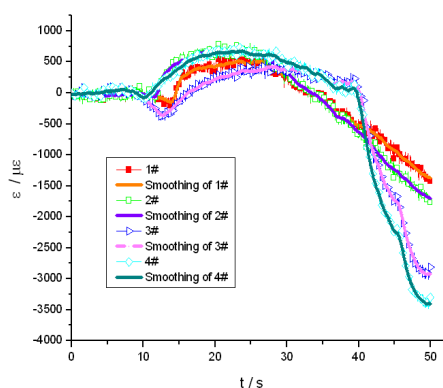


图 5 长时间试验应变片测试典型应变结果

采用高速摄像机测量燃烧室凹腔对应的侧壁上某区域的相对位移（变形）历程。在凹腔侧面分布均匀的测点，实验过程中使用高速摄像机对测点区进行高速摄像，摄像频率为 500 帧/秒，通过图像分析，获得测点位移。某典型测点（28cm，9cm）沿 X、Y 方向的位移随时间变化如图 6 所示。

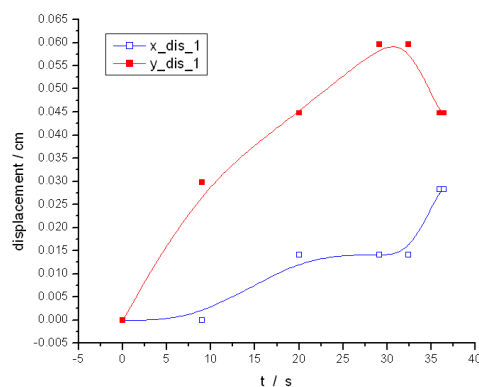


图 6 长时间试验 CCD 摄像典型位移结果

可见，在前期，外壁面观测点的纵向位移一直单调上升，燃烧结束点附近到达最大值，这在规律和量值上与前期数值计算的结果基本一致（如图 7 所示），此后开始反向；横向位移持续上升，直到试验监测结束仍然没出现反向恢复，这反应了壁板变形的相对复杂性。需要说明的是，数值计算结果仅仅给出了加载阶段，没有给出停止加热后结构的卸载变形行为。

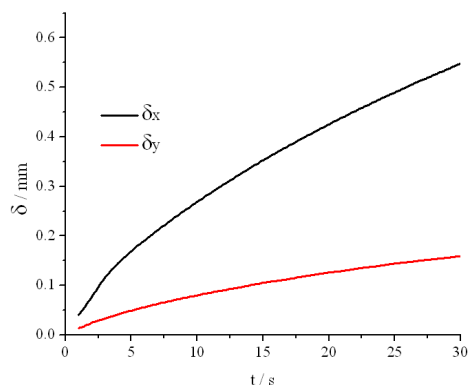


图 7 长时间试验有限元计算典型位移结果

3 结 论

热电偶对外壁面温度的测试结果表明，热障涂层和主动冷却的作用，使外壁温度响应滞后约 10s 左右；长时间试验时，被测区域的温度峰值在 575K 左右。

应变片监测结果表明，燃烧室外壁面筋条约束以及主动冷却结构等，将导致壁板的应变状态相对比较复杂。

外壁面的变形和应变也存在类似的滞后现象；外壁面的典型观测点的位移和应变在燃烧结束时，都出现了拐点。表明相应的监测手段时间跟随性能满足试验要求。

参考文献

- 1 吴臣武, 黄晨光, 张坤. 超燃冲压发动机典型异质材料连接结构的有限元分析. 第一届高超声速科技学术会议论文集 CSTAM 2008-0025
- 2 孔德仁等, 工程测试技术, 南京: 南京理工大学, 2000
- 3 周锡仪等, 结构热试验技术, 北京: 中国宇航出版社, 1993
- 4 吴宗岱等(译), 恶劣环境和高温测量技术, 北京: 航空工业出版社, 1988

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE TEMPERATURE AND STRAIN OF THE OUTER WALL OF THE COMBUSTION CHAMBER OF SCRAM-JET

WU Xianqian^{1,2} WU Chenwu^{1,3} SONG Hongwei^{1,2} HUANG Chenguang^{1,2}

(1 Hypersonic Research Center CAS, Beijing 100190, China)

(2 Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

(3 Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract The experiments were designed to investigate the temperature and strain at the outer wall of the combustion chamber of a scram-jet under the loading conditions in laboratory. The thermal couples were adopted to test the history of the temperature and high temperature strain gauge were adopted to test the history of the strain of typical regions at the outer wall. In this paper, the designing concepts and the key procedures are demonstrated firstly. Then, the experimental results are analyzed and compared with the theoretical predictions. Finally, the other possible test methods are discussed to provide a reference for further experimental investigation.

Key words combustion chamber, temperature, strain, experimental