

doi: 10.7690/bgzdh.2021.05.002

基于防火隔热涂层的试验发动机快烤研究

夏成¹, 董可海¹, 徐森², 赖帅光¹, 夏磊³

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 南京理工大学, 南京 210094; 3. 烟台市产品质量监督检验所, 山东 烟台 264001)

摘要: 为研究固体火箭发动机防火隔热涂层的防火隔热性能, 对其发动机快烤试验进行分析。从可行性和实际条件考虑, 设计了用于快烤试验的发动机壳体, 将 ZS 系列防火隔热涂料进行复配后喷涂于试验发动机表面, 进行快速烤燃试验, 并通过实例分别对其试验结果及温度场进行分析。试验结果表明: 防火隔热涂层对试验发动机快速烤燃的内表面温度提升有延迟作用, 延迟时间为 ZS 混合型>ZS1000>ZS2000。

关键词: 导弹热安全性; 防火隔热涂层; 固体发动机; 快速烤燃; 温度场

中图分类号: TJ76 **文献标志码:** A

Engine Fast Cook-off Test Research Based on Fireproof and Thermal Insulation Coating

Xia Cheng¹, Dong Kehai¹, Xu Sen², Lai Shuaiguang¹, Xia Lei³

(1. Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

2. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

3. Yantai Institute for Quality Supervision & Inspection of Product, Yantai 264001, China)

Abstract: For researching the fireproof and thermal insulation feature of fireproof and thermal insulation coating of solid rocket, analyze engine fast cook-off test. Based on the feasibility and practical conditions, design the engine shell for fast cook-off test. The ZS series of fireproof and thermal insulation coatings were compounded and sprayed on the surface of the test engine to perform the fast cook-off test. Separately analyze the test results and temperature field by test. The test result show that the fireproof and thermal insulation coating has a delay effect on the internal surface temperature of the test engine, and the delay time is ZS hybrid type>ZS1000>ZS2000.

Keywords: missile thermal safety; fireproof and thermal insulation coating; solid engine; fast cook-off; temperature field

0 引言

随着我国海军新型航母舰队的列装, 舰载战斗机的日常训练与巡航任务增多, 导弹随舰战斗值班的热安全性问题更加不容忽视。笔者以固体火箭发动机防火隔热涂层为研究对象, 以防火隔热涂层延缓固体火箭发动机处于意外火灾环境中, 外界向内部温度传导速率和烤燃响应时间的效果为主要内容, 对 ZS 系列防火隔热涂层防火隔热性能进行了快速烤燃试验研究。

防火隔热涂层是一种降低固体发动机在外界意外火烤情况下响应程度的辅助手段, 涂层减缓外界向发动机内部装药的热传递, 延长发动机受烤燃发生响应的时间或降低其响应剧烈程度。

国内外对防火隔热涂料进行了相关研究: 曾兴华等^[1]通过在浆料中加入陶瓷微珠和聚苯颗粒, 制备成的保温砂浆具有很好的材料属性; 汪艳^[2]将陶瓷微珠用于共混改性聚丙烯; 渠亚男等^[3]烧结空心

微珠以制备超低容重的空心珠泡沫材料; 谢超等^[4]将中空玻璃微珠 (hollow glass microbeads, HGM) 填充到硫化液体硅橡胶 (107 胶), 制备了可膨胀的 HGM 阻燃硅橡胶。由于目前将防火隔热涂层应用于固体发动机的研究很少, 未将二者结合研究; 因此, 笔者将 ZS 系列防火隔热涂料喷涂到发动机表面并设置对照试验, 以验证防护涂层对延长发动机的响应时间和减缓发动机响应程度的作用。

1 发动机壳体设计与实现

由于原弹型较为细长, 而试验所测温度场分布与长度的大小无关; 因此, 从可行性和实际条件考虑, 将原发动机壳体分割成 4 部分, 制作成 4 台试验用发动机, 涂覆不同的防护涂层, 并设置对照组进行可控对比, 分别进行烤燃试验^[5-8]。

1.1 壳体机构设计

根据结构制作成的实际壳体如图 1 所示。

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-02-27

基金项目: 武器装备预先研究基金项目 (51328050101)

作者简介: 夏成 (1995—), 男, 山东人, 硕士, 从事航空工程研究。E-mail: 986574686@qq.com。



图1 试验发动机壳体

1.2 防火隔热涂层实现

为确保涂层具有良好持久的附着力，所有表面必须清洁、干燥且无污染物，具有一定的粗糙度，进行 ZS2000、ZS1000 和 ZS 混合型涂料调配后，喷涂于发动机壳体表面，厚度为 2 mm。为防止试验期间受潮湿等环境因素的影响，在外表薄涂一层防水防腐涂料作为防护层，利用 DR9000s 钢结构涂层测厚仪进行厚度测量，再进行相应局部调整。最终喷涂完防护涂层的 4 台试验发动机壳体如图 2 所示。

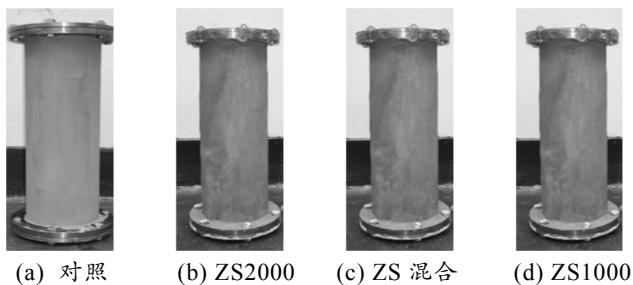


图2 最终壳体涂层固化效果

2 快速烤燃试验方案

2.1 试验方法

该试验方法参照美国 MIL-STD-2105D 中的快速烤燃试验及 QJ20153-2012《固体推进剂快速烤燃试验方法》^[9]，并根据试验实际情况进行一定的调整。

如图 3 所示，烤燃试验系统主要由监测系统（计算机、高速摄像机）、测温系统（GL220 温度数据采集仪、热电偶、红外摄像机）、烤燃系统（试验发动机、燃烧池）3 部分组成。

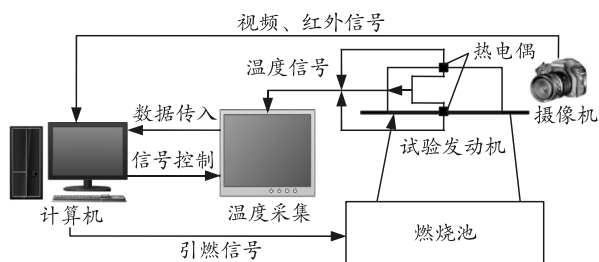


图3 快速烤燃试验原理

以航空煤油作为燃料，点火后，在发动机上下端火焰温度达到 550 °C 时推进剂开始点火计时，由于试验发动机内无装药；因此，假定热电偶采集温度值到达 550 °C 作为着火点，通过对比有无防护涂层及不同防护涂层的着火点，分析得出防火隔热涂层对发动机受热的温升速率和响应延迟时间的影响。

2.2 快速烤燃试验研究进展

1) 测温系统。

火焰温度由红外摄像机进行实时监控测量，系统中每个特征点的温度变化由连接到数据采集器的热电偶模块进行测量。热电偶固定位置如图 4 所示。



图4 热电偶固定位置

2) 烤燃系统。

如图 5 所示，试验采用钢制的方形油池，发动机放于支架上，燃料选用 3# 航空煤油，燃油量应保证受试发动机达到试验要求温度的持续时间不小于 10 min。



图5 烤燃系统

3) 监测系统。

将采集到的温度变化数据输入控制计算机进行监控和处理，试验全过程用地面架设的高速摄像机进行拍摄。

3 烤燃试验结果及分析

3.1 试验现象

快速烤燃试验过程中，首先点燃燃油，迅速蔓延至整个油池表面，均匀燃烧，且火焰高度足够覆盖试验发动机壳体。由图 6 可以看出：4 台试验发动机壳体很好地被火焰包裹，接受的热量较为均匀。

试验过程的燃油量充足, 持续燃烧了 20 min, 其中达到试验温度条件 ($\geq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的时间大于 10 min, 达到试验标准。



(a) 点火后 0.5 min



(b) 点火后 2 min



(c) 点火后 5 min



(d) 点火后 10 min

图 6 快烤试验过程

在烤燃试验过程前中期, 3 种防火隔热涂层均完好无损; 在试验过程中后期, ZS1000 涂层出现鼓包现象; 当火焰逐渐熄灭, 3 种涂层均出现裂纹和脱落现象。其中, 严重程度为 $\text{ZS2000} > \text{ZS1000} > \text{ZS 混合型}$; 1—3 号试验发动机壳体结构均完整, 4 号试验发动机的尾喷管由于未涂覆隔热涂层导致喷管烧断。

3.2 试验结果分析

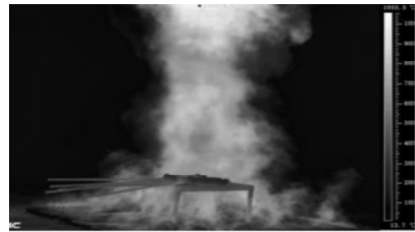
1) 试验现象分析。

在烤燃试验的前中期, 涂层受热完好无损可以验证第 2 章对 3 种涂料性能的测试结果, 表明涂层的机械和耐受性能可以满足固体发动机所处日常环境和烤燃环境的要求。

试验结束后, 分析涂层脱落的原因是由于火焰的熄灭导致外部环境温度迅速下降, 而因涂层的隔热保温性能使内部温度下降缓慢, 涂层内外两端的温度变化速率不同, 而且涂层的热膨胀系数比壳体的大, 导致涂层裂纹和脱落。由于 ZS2000 的热膨胀系数最大, 导致裂纹和脱落程度为 $\text{ZS2000} > \text{ZS1000} > \text{ZS 混合型}$; 扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察可知, ZS2000 的微观结构最为致密, 且填料为膨胀纳米陶瓷粉末; 因此, 受热较其余 2 种涂料更易膨胀。ZS 混合型虽然也产生裂纹和脱落, 但是比其余 2 种涂料的状态好。ZS1000 的涂层出现鼓包现象, 原因可能是: 1) 涂层孔隙较多, 其中的空气分子受热膨胀导致; 2) 涂层未完全干燥, 其中存在水分, 受热后汽化膨胀导致鼓包现象。

2) 温度场分析。

如图 7 所示, 试验过程的火焰温度监控由红外摄像机进行实时监控, 可以很明确地观察到实际火焰的温度。



(a) 100 s



(b) 170 s

图 7 红外拍摄火焰温度

采集了试验发动机壳体上端、下端和整个试验过程中火焰的最高温度, 根据红外温度摄像机采集到的温度数据进行拟合处理, 得到如图 8 所示的温度曲线。

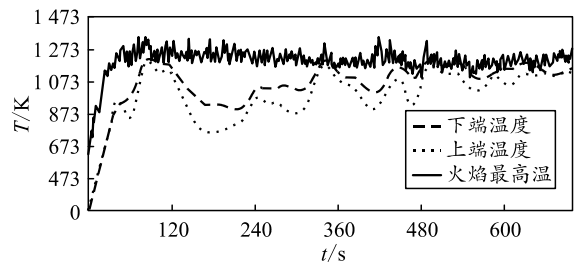


图 8 火焰温度曲线

由上图可以看出：燃料被点燃后，火焰温度迅速攀升，开始 120 s 的平均升温速率为 7.5 K/s，点火开始后分别在 32 和 34 s 时，试验发动机上下端表面火焰温度达到 550 °C，开始计入推进剂烤燃的反应时间，75 s 左右，上下端表面火焰温度达到 800 °C。整体火焰最高温度在整个烤燃试验过程中保持在 1 000 °C 左右，试验发动机的上端温度在试验开始 174 s 左右下降至 480 °C 左右；214 s 左右时，下端温度下降至 620 °C 左右，分析原因为在试验进行到 120~300 s，由于周围环境风速的影响，导致火焰偏向，未将试验发动机包裹住，导致温度下降。由图 7(b) 红外温度图也可以明显看出：火焰明显偏向左侧，试验发动机所处位置温度下降。从整体看，因为下端受火焰辐射量大，试验发动机下端的温度要高于上端温度，但二者的温度趋势保持一致。

图 9 所示为通过固定于各试验发动机内表面上下端的热电偶采集的温度数据曲线。

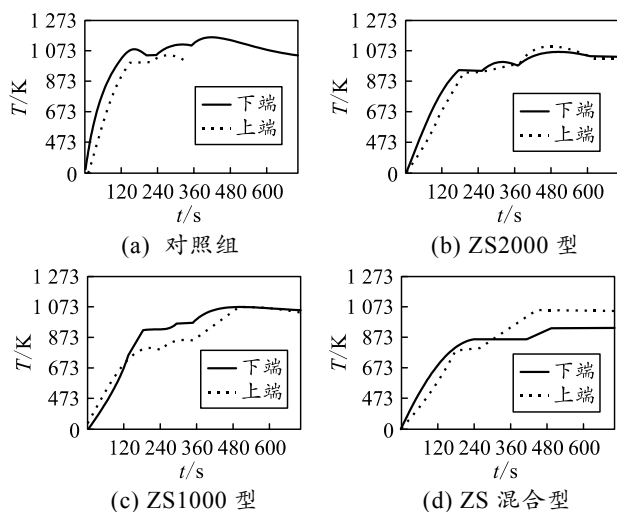


图 9 发动机内表面上下端温度曲线

由上图可知：试验发动机壳体的下端温升速率均比上端的温升速率快，分析原因为下端直接受火焰烘烤，而上端属于“背对”火焰，导致上端的升温速率较下端低；由于对照组上端的热电偶在试验进行 330 s 左右时发生故障，因此没有完整的试验数据，但可以明显地观察到上端温度有下降的趋势；3 台涂有防火隔热涂层的试验发动机上下端温度曲线总体趋势为下端温度 180 s 前升温速率快，后变慢直至稳定；上端温度在 300 s 左右时升温速率由慢变快，这与图 8 火焰温度曲线吻合。

分析原因：对照组未涂覆防火隔热涂层，保温隔热性能差，在 180~300 s 火焰未将发动机包裹住，导致温度下降，而其余 3 台发动机由于涂层的保温

性能只是让温升速率减缓，在 300 s 后，火焰重新包裹住发动机，温升速率继续变大，而 ZS 混合型涂层使该试验发动机的上下端温度差最大，说明 ZS 混合型的防火隔热效果比 ZS1000 和 ZS2000 的效果好。

如图 10 所示，将 4 台试验发动机上端和下端的温度曲线进行横向比较。

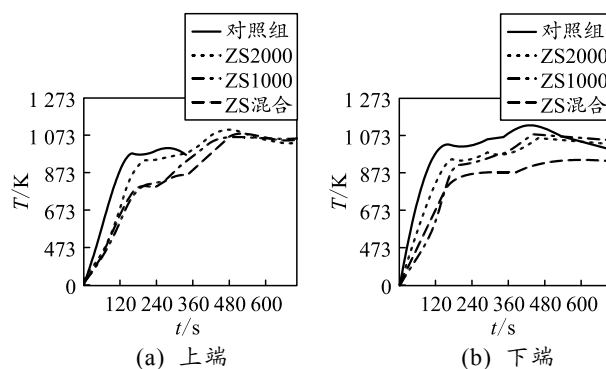


图 10 温度曲线

由图 10(a) 中 4 台试验发动机上端温度曲线比较可知：前 2 min 的升温速度为对照组 > ZS2000 > ZS 混合 > ZS1000，这与 3 种防火隔热涂层的导热系数的大小关系吻合 (ZS2000 > ZS 混合 > ZS1000)。对照组在 103 s 时上端温度达到 550 °C，即点火时间为 71 s，ZS2000、ZS1000、ZS 混合上端温度分别在 149, 254, 264 s 时达到 550 °C，点火时间分别为 117, 222, 232 s，分别比对照组的点火时间延迟 46, 151, 161 s；ZS 混合型涂层在 180 s 前的温升速度比 ZS1000 快，在 190 s 后，相比其余二者温度最低。

由图 10(b) 中 4 台试验发动机下端温度曲线比较可知：前 120 s 的温升速率与图 10(a) 中的相似但更明显，对照组 > ZS2000 > ZS 混合 > ZS1000，对照组在 74 s 时下端温度达到 550 °C，点火时间为 40 s，ZS2000、ZS1000、ZS 混合下端温度分别在 115, 152, 173 s 达到 550 °C，点火时间分别为 81, 118, 139 s，比对照组延迟 41, 78, 99 s。由温度曲线可以看出：在 130 s 前，ZS 混合型组的温度比 ZS1000 的温度稍高，而 ZS1000 的温升速率在 150 s 之前是逐渐上升，150 s 之后的温升速率较其他 3 组也较快，可能是由于涂层出现鼓包所导致的隔热性能下降；在 131 s 后，ZS 混合型试验发动机的下端温度较其余 3 组最低，ZS 混合型涂层的防火隔热效果最好。