

液体火箭发动机试验低温测量问题分析

李万杰 王玉铭 窦双庆

(西安航天动力试验技术研究所, 西安 710100)



摘要: 针对某液体火箭发动机低温试验中暴露出铠装温度传感器选型不匹配、动态响应过大、低温测量偏差等故障, 重点阐述了铠装温度传感器的测量原理以及工作特性, 分析了影响铠装传感器低温测量的主要因素, 结合在低温测量使用过程中出现的故障案例, 详细分析了引起问题的原因, 提出处理措施、排除故障方法, 确保了低温试验测量数据的真实性、准确性。

关键词: 低温测量; 铠装温度传感器; 故障分析

中图分类号: TM93 **文献标识码:** B

Fracture Analysis of Low Temperature Measurement in A Liquid Rocket Engine Test

Li Wanjie Wang Yuming Dou Shuangqing

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100)

Abstract: In the low-temperature test of a liquid rocket engine, faults are exposed such as armoured temperature sensor type selection, excessive dynamic response, and low-temperature measurement deviation. The measuring principle and working characteristics of armoured temperature sensor are expounded, the main factors affecting the low-temperature measurement of armoured temperature sensor are analyzed. The causes of the problems are analyzed in detail, the treatment measures and the methods of troubleshooting are put forward to ensure the authenticity and accuracy of the measurement data of low-temperature test.

Key words: low temperature measurement; armoured temperature sensor; fault analysis

1 引言

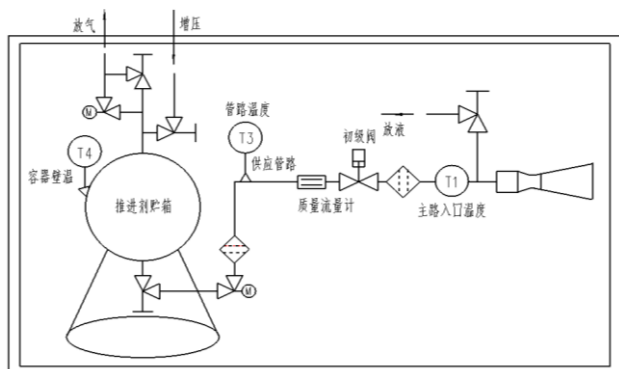


图1 液体火箭发动机低温试验系统

某液体火箭发动机试验目的是考核 -120°C 左右低

温环境下发动机的起动工作性能。试验系统在推进剂入口主管路、工艺管路及容器壁面设置温度测点(T1、T3、T4), 液体火箭发动机低温试验系统见图1^[1]。

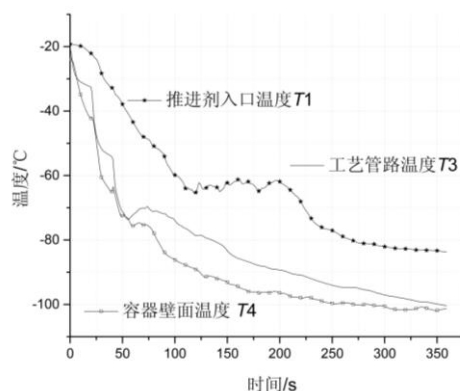


图2 液体火箭发动机高低温舱降温测量曲线

作者简介: 李万杰 (1987), 高级工程师, 机械设计及理论专业; 研究方向: 液体火箭发动机试验技术。

收稿日期: 2022-04-08

工艺系统整体降至 -120°C 左右低温稳定后,管路温度测点 T_3 、 T_4 随降温过程逐渐下降,由于主管路测点 T_1 采取了隔热包覆,初级阀打开前,系统主管路中未充填推进剂, T_1 点不应随试验环境温度下降,随后温度测点 T_1 与 T_3 、 T_4 表现出了相近的下降趋势,试验中温度测量结果见图2,温度测点 T_1 测量数据异常^[2]。

2 低温测量原理及影响因素

2.1 测温原理

目前液体火箭发动机试验测温常用的是热电偶和铠装温度传感器,基本原理是热电效应。热电效应是将两种不同的导体组成一个闭合回路,连接回路的两端存在温差必然产生电动势-热电动势,总热电势与温度函数关系为:

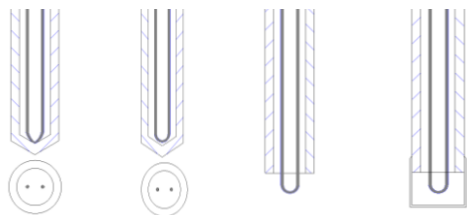
$$E_{AB}(T, T_0) = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \ln \frac{N_A}{N_B} dt \quad (1)$$

式中: e ——单位电荷; k ——波乐兹曼常数; N_A 、 N_B ——导体A、B的电子密度,为温度函数; T 、 T_0 ——代表热端和冷端的温度; $E_{AB}(T, T_0)$ ——热电偶闭合回路中总的热电动势。由式(1)可以看出热电动势的大小与热电偶的材料、热端与冷端的温度有关,而与热电偶的长短、直径和形状等无关。

2.2 铠装温度传感器

铠装温度传感器一般由热偶丝、绝缘材料、金属防护套组成。传感器防护套材质一般为1Cr18Ni9Ti不锈钢,其在强酸、强碱性环境下有较高的化学稳定性,且有良好的机械加工特性和焊接能力,最重要的是热传导系数较小,便于在气体、低温介质下使用^[3]。

铠装传感器前端一般是封闭焊接式,以保证传感器的整体承压,碰底式(图3a)是将热电偶测量端和金属外套管焊接在一起,相比不碰底式(图3b)的响应时间略长。露头式(图3c)、帽型式(图3d)测量端直接暴露在测量介质中,响应时间短,但介质易进入传感器金属外套头部。



a 碰底式 b 不碰底式 c 露头式 d 帽型式
图3 铠装温度传感器测量端类型

2.3 测量影响因素

依据铠装温度传感器的测温原理、结构组成、制作工艺及实际应用,主要影响其测量的因素有热偶丝类型、绝缘形式、探针直径、安装位置等^[4]。

不同分度类型热偶丝适用于不同范围的温度测量;其次铠装温度传感器前端分为接壳式或露头式,主要影响响应速度的快慢;铠装温度传感器的绝缘性能直接影响测量误差,热电偶丝内部填充料受潮、绝缘电阻下降,测温端热电动势会受到一定影响;安装位置主要考虑管路的内外径、传感器的插入深度以及焊接接管嘴的长度,传感器探头前端应处于管路的 $1/2 \sim 2/3$ 管道半径处。

3 低温测量故障分析

3.1 选型不匹配

低温试验目标温度为 -100°C 以下,传感器温度范围应选择覆盖 -200°C 。试验系统常用的镍铬-镍硅(测温范围 $-50 \sim 1300^{\circ}\text{C}$)、铜-康铜(测温范围 $-200 \sim 50^{\circ}\text{C}$),两种热偶丝在外观上差异不明显,若使用人员误将两种热偶丝混装在测量系统中,将导致在低温测量过程中无法准确测量温度^[5, 6]。

3.2 压套松动、内壁热偶丝脱落

试后复查 T_1 、 T_3 、 T_4 测量通道对应关系、热偶丝选型以及转接环节均正确;图2中温度测点 T_1 实际表现的是试验环境温度下降过程,随后详查发现铠装传感器热偶丝进/出线的压套处出现明显松动,在长期使用过程中,压套处的低温固定密封胶几乎完全脱落,防护套内的热偶丝与外腔呈通腔状态,导致降温过程冷却媒充填至铠装温度传感器内腔,与防护套之间进行热交换,待交换热平衡后, T_1 点温度继续随试验环境温度下降,表现在图2曲线中出现暂短的“平衡+波动”段,且进一步复查中证实,原本为碰底式焊接的结构,已和防护套内壁脱离,故 T_1 与工艺管路温度 T_3 、容器壁面温度 T_4 的降温趋势表现相近,未真实反映出推进剂入口管路中的温度状况。

3.3 绝缘电阻增大

发动机试验系统初级阀打开,低温推进剂充填至主管路,试验温度测量数据见图4,试后检查:温度传感器探针长 29mm ,供应系统主管路的规格为 $\Phi 6\text{mm} \times 1\text{mm}$,传感器安装工装为 $M14\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 焊接接头,实际插入管道壁面内约 1.8mm ,满足工艺管路铠装插入式温度的插入深度安装要求。图4曲线显示温

度下降滞后于初级阀打开时间,传感器达到平衡温度的时间也较长,传感器未能及时反映出低温推进剂充填管路的温度过程。

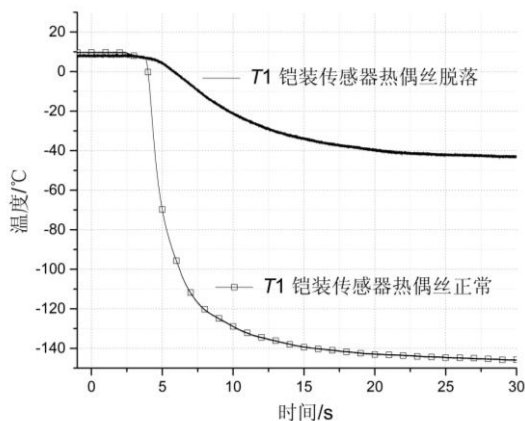


图4 温度传感器试验动态测量数据曲线

对铠装温度传感器的电性能进一步检查发现:热偶丝与铠装壳体间的绝缘增大,即热偶丝已从铠装防护套内壁脱落,导致该铠装温度传感器探针前端对热源的响应时间较长,前期低温测量故障复现。

4 改进措施

4.1 合理选型

铠装温度传感器的基础测温元件为热偶丝,依据测温范围、分度表选择适宜的热偶丝是准确测温的关键。结合JB5582《铠装热电偶》及QJ1088A《火箭发动机试验用热电偶温度传感器技术条件》,试验系统常用铠装温度传感器的类型、分度号及测温范围见表1。

表1 铠装温度传感器类型、分度号及测温范围

铠装热电偶类型	分度号	标准号	允差/ \pm °C			使用温度范围/°C
			A	B	C	
铂铑13-铂	R	GB1598	0.6	1.0	1.5	$0 \leq t \leq 1600$
铂铑10-铂	S	GB3772	0.6	1.0	1.5	$0 \leq t \leq 1600$
镍铬-镍硅	K	GB2614	1.5	2.0	3.0	$0 \leq t \leq 1250$
镍铬-康铜	E	GB4993	0.8	1.5	2.5	$-200 \leq t \leq 0$
铜-康铜	T	GB2903	0.4	0.75	1.5	$-200 \leq t \leq 0$

4.2 改善、测试响应时间

铠装热电偶传感器采用碰底式(测量端与金属外防护套内壁焊接在一起)或者露头式,均可提高测量

动态响应时间。碰底式防护套为整体加工、具有一定的承压能力,露头式须在使用前须进行承压测试^[7]。

铠装温度传感器时间常数的准确检测条件比较严格,实际中为获得响应时间的大致数值,采用100°C左右恒温水槽代替阶跃变化温度,传感器快速、垂直方式进入水槽,由阶跃曲线大致判定的温度响应时间^[8]。

测试试验采用两支外径6mm铠装温度传感器(温度测点以 T_{f1} 、 T_{f2} 表示),防护套1Cr18Ni9Ti、瓷套管防护内引线,测试系统采集速率1000p/s。将温度传感器以自由下落的方式置于65°C左右的恒温水槽中,温度传感器的测量响应时间结果见图5,从曲线显上初步判读温度传感器的响应时间为2.0~2.1s。

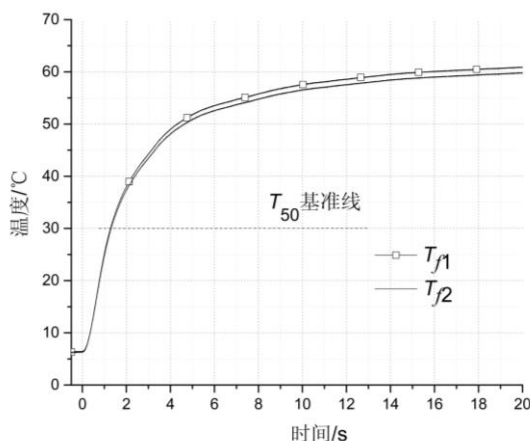


图5 铠装温度传感器响应时间的测试曲线

此外采用软件校正处理方法可以在一定程度上减小因温度传感器的热惯性滞后引起的动态测量误差,但此方法一般作为处理数据的后期处理。

4.3 优化铠装工艺

铠装防护套选用机械性优良的无缝材质,防护管棒料整体加工、一次成型,前端探针采用真空退火工艺,可提高探针整体的抗拉、抗弯、耐腐蚀,同时降低防护管的渗透性,保证内部充填材料的干燥、绝缘性能^[9]。

铠装防护套内部的绝缘材料采用高纯度 MgO_2 ,绝缘粉末均匀致密分布,提高传热性能同时改善传感器的动态性能。温度传感器外引线采用多股形式,以保证活动线缆的耐折性能;压紧套引线处选用低温固化胶+玻璃釉材封装,外表面增加绝缘漆,可提高热偶丝出线口处的密封、绝缘性能,此工艺方法经过多次高/低温试验验证可靠、有效^[10, 11]。

通过优化铠装温度传感器工艺以及动态响应时间测试,试前确认铠装温度传感器的工作性能,低温试

验传感器测量数据曲线见图6,从图中曲线判读温度传感器的低温响应时间大致为2.5s,与试前使用恒温水槽测试温度传感器的响应时间2.1s基本一致,试验曲线真实地反映了初级阀打开后被测推进剂的温度变化过程。

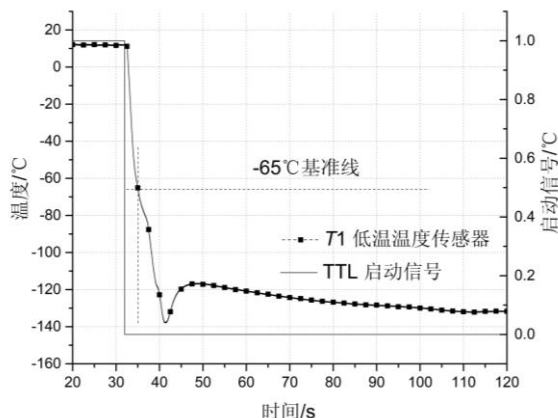


图6 低温试验传感器的测量数据曲线

5 结束语

针对低温测量过程中的故障现象,依据温度传感器测量原理以及工作特性等方面开展故障分析,识别、判断出在液体火箭发动机低温试验测量环节中的故障因素,提出了改善传感器动态响应以及制作工艺的具体措施方法,最终有效地保证了低温试验测试数据的真实性、准确性。

(上接第24页)

在机加时通过优化工序流程,在工艺流程中合理增加时效工序,同时采用TK6511数控卧式铣镗床小切削量、多次切削等措施,减小机加过程变形量,最终实现控制导轨变形的目的,优化后的工序共分为14道工序,分别为:钳-去锈-热-钳-铣削-探伤-铣削-热-钳-铣削-钳-去锈-漆-钳,主要工艺流程见图10。

4 结束语

经试验探索,通过选择合适的导轨淬火介质,细化淬火及回火参数,使导轨获得良好的金相组织,机加性能得以改善;将两根导轨合并下料,整体进行淬火处理,使两根导轨淬火过程中的横向应力相互抵消,减小了热处理过程中的变形量;通过对导轨直角处在

参考文献

- 1 朱永炉,冯红亮,吴硕,等.低温推进剂测量技术研究及系统实现[J].遥测遥控,2017,38(5):36~42
- 2 颜彬,韩龙,马赛尔.某型火箭发动机燃烧室壳体加工质量问题分析及改进措施[J].质量与可靠性,2020,208(4):20~23
- 3 王栗,张宇.低温温度测量研究[J].湖北工业大学学报,2006,21(2):61~63
- 4 赵汉杰.铠装测温元件的性能及其生产工艺[J].东北电力技术,2000(8):48~52
- 5 陈进,王惠龄,王建,等.低温温度电测量研究[J].低温与特气,2006(2):17~19
- 6 陈文丽,杨懿,鲍聪聪.某型号发动机试验中涡轮流量计的故障分析[J].质量与可靠性,2015,175(1):6~8
- 7 孙东,杨金文,孙悦.铜-康铜热偶的低温不均匀性实验研究[J].低温物理学报,2007,29(3):241~243
- 8 宋德华,高鸿春.低温热电偶[M].北京:中国计量出版社,1992,11~18
- 9 陈艳武,夏国斌,周康.航空用铠装热电偶绝缘性能的改进分析[C].第二届民用飞机机电系统国际论坛论文集,南京,2015,43~45
- 10 邹华.具有耐高压高精度的深低温热电偶的研究及应用[J].功能材料信息,2014,11(4):21~22
- 11 王天资,任侃,张磊,等.镍铬-镍硅铠装热电偶测温精度影响分析[J].测控技术,2018(37):308~311

调质、淬火前倒圆角处理,然后在精加工时再将圆角去除,降低尖角处应力集中现象的影响;并在机加过程合理增加时效工序,使导轨内部应力充分释放,最终减小了导轨开裂几率,并使导轨变形量得以控制,通过以上研究成果的应用,现导轨生产质量明显提升。

参考文献

- 1 黄翠环,秦树超,郭明仪.钻头用含硫XGML40Cr钢的开发及其切削性能的改善[J].特殊钢,2017,34(4):60~63
- 2 牛士珍,樊以丁,闫利波.40Cr棒材力学性能研究[J].河北冶金,2006(1):25~27
- 3 赵琳.浅谈40Cr钢热处理工艺及其组织性能[J].机械工程与自动化,2013(2):200~202