

# 镍铬-镍硅热电偶特性分析与应用研究

李建军

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 以镍铬-镍硅热电偶在火箭发动机试验中的应用为研究对象。对其特性和影响测量的主要因素进行了论述。对镍铬-镍硅热电偶在使用中的劣化问题进行了研究和探讨, 结果表明重复使用后的镍铬-镍硅热电偶的劣化是不可避免的, 其劣化程度随封装形式、使用温度、直径及使用时间的不同而异, 并根据多次试验数据的积累, 总结出了相应的处理方法。

**关键词:** 火箭发动机试验; 镍铬-镍硅; k 状态; 择优氧化; 劣化

**中图分类号:** V433.9-33

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2010) 05-0063-04

## Application and characteristic analysis of nickel-chromium and nickel-silicon thermocouple

LI Jian-jun

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

**Abstract:** Taking the application of nickel-chromium and nickel-silicon thermocouple in the rocket engine test as a research object, its characteristic and the main factors of affecting measurement are elaborated, and the degradation existing in the application of the nickel-chromium and nickel-silicon thermocouple is analyzed and discussed. The result shows that the degradation of the nickel-chromium and nickel-silicon thermocouple is unavoidable, and the degradation can be different with its packaging, temperature, diameter and working duration. The K state and preferred oxidation of nickel-chromium and nickel-silicon thermocouple, as well as its effects on measurement are described in this paper. The method of thermocouple treatment is concluded according to the data obtained in the past tests.

**Keywords:** rocket engine test; nickel-chromium and nickel-silicon; K state; preferred oxidation; degradation

### 0 引言

镍铬-镍硅热电偶广泛应用于火箭发动机高

温测量。使用形式上, 一种为铠装结构, 主要用于测量火箭发动机管道温度; 一种为偶丝贴面形式的表面热电偶, 主要用于测量火箭发动机表面

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-05-17

作者简介: 李建军 (1966—), 男, 技师, 研究领域为液体火箭发动机试验测量技术

温度。温度的准确测量对火箭发动机设计、研制及制造工艺有重要意义。由于镍铬-镍硅热电偶特性与其他热电偶有很大的差异,使用中影响其测温的因素很多,而火箭发动机试验时对测温的特殊要求,给温度的准确测量带来很多难题。

关于热电偶的劣化问题,上个世纪60年代以来美国及欧洲一些国家对热电偶应用中的劣化问题进行了大量的试验研究,我国上个世纪90年代也开始了有关热电偶劣化的研究工作,但大多集中在冶炼和热处理行业,有关热电偶在航天领域应用中的劣化研究可参考的文献很少。本文以镍铬-镍硅热电偶在火箭发动机试验中的应用为研究对象,对其特性、影响测温的主要因素进行了分析。重点对镍铬-镍硅热电偶重复使用中的劣化问题进行了分析、探讨,并提出了解决方法和对策。

## 1 镍铬-镍硅热电偶主要特性

在高温测量中,镍铬-镍硅热电偶是使用最多的一种,其测温范围随偶丝直径增大而升高。目前,火箭发动机试验中所用镍铬-镍硅为I级(允差:±1.5或±0.004t),偶丝直径以0.3 mm和0.5 mm两种为主。这里对与其他热电偶进行对比分析。

### 1.1 主要优点

与其他热电偶相比,镍铬-镍硅的优点主要有:热电势与温度关系近似线性,耐高温性能好,灵敏度高;稳定性与均匀性好;抗氧化性能优于其他廉金属热电偶。

### 1.2 短程有序结构变化(K状态)

镍铬-镍硅热电偶在250℃~537℃温度范围内使用时<sup>[1]</sup>,由于其显微结构发生变化,形成短程有序结构,因此将影响热电势值而产生误差,一些研究者也把它称为K状态。它是Ni-Cr合金特有的晶格变化,当Cr含量在5%~30%范围内存在着原子晶格的有序向无序转变,由此而引起的误差。

对于K状态引起的测温误差,美国学者Fenton认为可达2℃的误差<sup>[1]</sup>,英国学者Sibley认

为可达3℃左右<sup>[2]</sup>,澳大利亚研究人员Burley认为可达8℃<sup>[4]</sup>,国内研究者得出的结论为3℃左右。之所以研究者得出的结论不尽相同,主要是由于试验状态和偶丝均匀性的差异造成的。但有一点研究者得出的结论基本一致:即在450℃左右时其测温偏差最大。使用标准温度炉将发动机试验所用镍铬-镍硅热电偶从300℃加热至550℃,每50℃取一点,在测量过程中,发现随着加温时间和加温速度的变化,其偏差大小也不同。与其分度值对比后,发现在450℃时偏差为1.0℃~2.3℃(正偏差)。发生上述异常现象的镍铬-镍硅热电偶,在600℃<sup>[1]</sup>以上经短时间热处理或使用后,其热电特性即可恢复。由于K状态的存在,认为对计量检定部门来说,对该温区判定合格与否时应慎重。

### 1.3 镍铬-镍硅热电偶的正常氧化与择优氧化

多数热电偶以正常氧化为主,即氧化后测量示值偏高。但镍铬-镍硅比较独特,它存在正常氧化与择优氧化。

#### 1.3.1 正常氧化

镍铬-镍硅多次使用后,其热电极表面形成致密的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>保护膜,对其内部合金具有很好的保护作用,劣化进程缓慢,其热电势向正方向变化,即温度示值向偏高方向发展。

#### 1.3.2 择优氧化

由于镍铬-镍硅热电偶生产工艺中存在缺陷或使用温度过高(一般在800℃~980℃<sup>[1]</sup>)引起的氧化,其显著的特征是镍铬中的铬易发生“择优氧化”,从而改变偶丝成分,导致热电势急剧降低,即温度向偏低方向变化。

## 2 镍铬-镍硅热电偶测量误差分析

火箭发动机试验中,热电偶测量的误差,不仅受参考端温度的影响,也受到非测量端各接点处温度的影响,同时重复使用的热电偶由于热电偶局部的金属挥发或氧化而出现的材料不均质及不稳定性的影响,使温度测量变得非常复杂。对于镍铬-镍硅热电偶,实际使用中以下几个方面他对火箭发动机测量的影响是主要的。

2.1 偶丝不均匀性的影响

据参考文献 [1] 介绍，工业中测温使用中的镍铬-镍硅热电偶，有时不均匀电势引起的测温误差达 30 ℃ 以上。这在发动试验中是不允许的。

由偶丝不均质产生的寄生电动势，取决于偶丝自身的不均质程度及温度梯度的大小，对其定量测量极其困难。在热电偶检定规程中，对镍铬-镍硅热电偶不均匀热电动势有要求（参见表 1）。但对不均质没有要求，只有在热电偶生产标准中，对偶丝的不均匀性有要求。

表 1 镍铬-镍硅热电偶不均匀电势要求

Tab. 1 Non-uniform electric potential of nickel-chromium and nickel-silicon thermocouple

直径/mm	等级	试验温度/℃	不均匀热电势/μV
0.3	I 级	700	35
0.5, 0.8, 1.0	I 级	800	40
1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.2	I 级	1000	50

2.2 插入深度的影响

镍铬-镍硅铠装热电偶插入被测场所时，沿热电偶的长度方向将产生热流。当环境温度低时就会有热损失，致使热电偶与被测对象的温度不一致而产生测温误差。热流的损失与插入深度和环境温度有关，而插入深度又与保护管材质有关。金属保护管因其导热性能好，理论上其插入深度应该深一些。对于火箭发动机管道测温，其插入深度与被测量介质状态（液体、气体、静止或流动）有关。如流动的液体或高速气流温度的测量，受上述限制小，插入深度可以浅一些，从多次使用经验来看，其插入深度为测量管道直径的 1/2~1/3 为宜。

2.3 分流误差的影响

所谓分流误差即用热电偶测温时，当热电偶中间部位有超过 800 ℃ 的温度分布存在时，因偶丝两级绝缘电阻下降，易产生的漏电现象。

火箭发动机试验中，要准确测量分流误差很困难，但可以根据分流误差产生的原因采取相应预防措施，在传感器安装中要做到以下两点：传感器安装时偶丝两极（包括补偿导线）的中间部

分要远离火箭发动机高温壳体部分；对靠近高温部分的热电偶要采取包石棉布等隔温隔热措施。

2.4 参考端温度的影响

火箭发动机试验时，镍铬-镍硅采用端点法求斜率  $k$  值，其计算公式如下：

$$k = \frac{E}{u_b - u_{0b}} \tag{1}$$

式中： $E$  为校验电标准值，mV； $u_b$  为加电标准时采集值，mV； $u_{0b}$  为零位时采集值，mV；

热电偶分度值均是参考端温度为 0 ℃ 时给出的，而火箭发动机试验时参考端温度不为 0 ℃。其计算公式如下：

$$u = k(u_s - u_0) + u_k \tag{2}$$

式中： $u$  为试车温度对应毫伏值，mV； $u_s$  为试车实测毫伏值，mV； $u_0$  为零位时记录的毫伏值，mV； $k$  为热电偶校验斜率； $u_k$  为参考点温度对应的毫伏值，mV。

由公式（2）可以看出，参考端温度  $u_k$  的准确测量对镍铬-镍硅热电偶测温有直接影响。目前参考端温度采用 A 级铂电阻传感器实时测量。

3 镍铬-镍硅热电偶的劣化及对策

在高温下铬的选择性氧化导致铬含量降低，是 K 型热电偶劣化的主要原因。目前，火箭发动机试验用的两种形式的热电偶中，铠装热电偶因使用了保护套管，其寿命长，劣化速度较慢，因其测量端焊接在保护管感温端的内壁上，一旦出现严重劣化，不易修复；表面热电偶为裸露使用，易劣化、易损坏，但根据其损坏程度是可以修复的。

3.1 铠装热电偶

1) 对于镍铬-镍硅铠装热电偶而言，生产加工中不能使偶丝中有残留畸变产生，否则有可能引起热电偶劣化或特性漂移。

2) 测量端封头处如有微小裂纹或裂缝存在，潮湿气体有可能侵入，使测量端偶丝缓慢氧化。所以，在每次使用中要对其封头处仔细检查，并定期对其热电特性做检定。

3.2 表面热电偶

按通用习惯，其损坏程度分为 4 种：轻度、中度、较严重及严重损坏，其外观如表 2 所示。轻度、中度的损坏可修复；较严重损坏要视损坏程度决定继续使用或报废；严重损坏的热电偶，一般无法修复。据对某型号发动机 25 次热试车中镍铬-镍硅表面热电偶使用情况的统计，轻度损坏约占 20%、中度损坏约占 40%、较严重损坏约 25%，严重损坏约 15%；偶丝直径越细，使用温度越高和时间越长的偶丝劣化或损坏越严重。

表 2 镍铬-镍硅传感器损坏程度外观鉴别

Tab. 2 Discrimination for damaged condition of the nickel-chromium and nickel-silicon sensors

损坏程度	外 观	
	测量端偶丝	外屏蔽保护层
轻 度	呈灰色,有白色泡沫	2~4 cm 范围内发硬,保护套管发黄
中 度	无光泽,且有黄色泡沫	5~10 cm 范围内发硬或有被烧迹象
较严重	无光泽,有绿色泡沫	有绿色点斑,三分之一长度外屏蔽被烧或硬化变
严 重	硬化、成槽渣	有绿色点斑,三分之二长度偶丝被烧或硬化变色

使用后的镍铬-镍硅热电偶其劣化是不可避免的。特别是重复使用过的镍铬-镍硅热电偶，因其长期用于高温测量，损坏及劣化程度均高于其他热电偶，工业用表面热电偶外理方法是对测量端进行清洗和专业的退火处理，之后进行检定，其费用很高。在检定有效期内，从节约试验成本角度考虑，试车用传感器不宜采用退火处理后重复检定的方法，根据多次试验数据积累及经验，总结出了一套有效的处理方法如下：

- 1) 对轻度、中度损坏的，首先沿测量端剪去受污染或氧化部分，确认测量端外屏蔽保护层没有硬化、变色等现象后，重新制作测量端；
- 2) 严重损坏的，应做报废处理；对较严重损坏的，如果整个表面热电偶沿长度方向保护套管或屏蔽层均有不间断烧蚀或裸露现象，则此传感器应报废；如果只是沿测量端方向三分之一被损

坏其余部分完好，则剪掉被损坏的表面热电偶后重新制作测量端，并对新修复的传感器做验证试验，以确保其热电特性的稳定。

验证试验的测温范围应包括使用温度的上、下限。可任选两种测试方法，一种是比较测量法，即将试验热电偶和标准热电偶置于标准恒温测试炉中，且同样的插入深度，然后测出试验热电偶与标准热电偶的差值即为其不稳定电势；另一种方法是将试验热电偶置于恒温测试炉中，偶丝在炉内深度约 300 mm，根据测温范围确定检定点温度，然后测出相应点的热电势，并与对应的分度值比对，确定是否在其允差范围内。

4 结 论

- 1) 镍铬-镍硅热电偶存在 K 状态，择优氧化特征明显，试验和检定过程中应注意防止差错。
- 2) 镍铬-镍硅热电偶的不均匀性、插入深度、分流误差及参考端温度等测温误差是影响测温准确度的主要因素。
- 3) 使用后的镍铬-镍硅热电偶其劣化是不可避免的。劣化是一个量变过程，对其定量十分困难，其劣化程度随封装形式、使用温度、直径及使用时间的不同而异。

参考文献：

[1] 潘圣铭. 温度计量[M]. 北京: 中国计量出版社, 2001.  
[2] 朱悦. 小型高精度恒温系统的研究 [J]. 现代电子技术, 2010, 33(5): 101-103.  
[3] 刘常满. 温度测量与仪表维修问答[M]. 北京: 中国计量出版社, 2000.  
[4] 张棉霞. 热电偶检定及维修技术问答[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010.  
[5] 王魁汉. 温度测量技术[M]. 沈阳: 东北工业学院出版社, 1992.  
[6] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究 [J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 51-55.  
[7] 李建军, 薛宁. 液氧平均流量测量研究[J]. 火箭推进, 2010, 36(1): 67-70.

(编辑：马 杰)