

# 弹箭外表面接插件高温高湿度耦合 环境试验方法研究

夏吝时, 徐莹, 那伟, 石宝丽, 王双全, 孙波

(北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 在地面条件下更真实地模拟弹箭外表面电器接插件在雨、雪、雾等高湿度条件下的飞行环境, **方法** 利用数值分析方法, 通过综合对比相同喷嘴结构下不同出口尺寸的外流场形态、不同压差下喷嘴出口流量等计算结果, 确定喷嘴尺寸和工作压力。通过涡流黏度云图, 确定接插件与喷嘴的相对位置关系。通过建模对喷淋方案进行效果预测后, 搭建配套试验系统, 并在石英灯加热器热辐射环境下开展高温高湿度耦合环境实效模拟试验。**结果** 试验中加热条件能够满足飞行过程中的表面温度及总加热量要求, 水气环境模拟达到 1.82 mm/min 条件。试验后, 对参试产品进行阻值测试、剖面碳化层厚度测量和热解产物分析, 表征电气特性良好。**结论** 所述试验方法能够同时有效模拟高温高湿度飞行环境, 能够对雨、雪、雾等高湿度条件下的接插件产品的飞行可靠性进行有效评估。

**关键词:** 电器接插件; 高温高湿度; 耦合环境; 实效模拟; 可靠性评估

中图分类号: TJ7; V416 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)10-0009-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.10.002

## Research on the Test Method of Coupled High Temperature and High Humidity Environment of the Outer Surface Connector of Air Vehicle

XIA Lin-shi, XU Ying, NA Wei, SHI Bao-li, WANG Shuang-quan, SUN Bo

(Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to more truly simulate the flight environment under ground conditions with high humidity conditions such as rain, snow and fog on the outer surface of the bullet and arrow electrical connectors. using numerical analysis methods, by comprehensively comparing the calculation results of the outer flow field shape of different outlet sizes under the same nozzle structure and the nozzle outlet flow rate under different pressure differences, obtained the required nozzle size, pressure and relative position. After predicting the effect of the spraying scheme through modeling, the supporting test system was established and a high temperature and high humidity coupled environmental effective simulation test was conducted under the heat radiation environment of a quartz lamp heater. The heating conditions in the test can meet the requirements of surface temperature and total heating during flight, water vapor environment simulation reaches 1.82 mm/min. After the test, the resistance value test, the thickness measurement of the carbonization layer of the profile and the analysis of the pyrolysis products

收稿日期: 2021-07-18; 修订日期: 2021-08-19

Received: 2021-07-18; Revised: 2021-08-19

作者简介: 夏吝时(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器地面防隔热试验及试验技术。

**Biography:** XIA Lin-shi (1984—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: aircraft ground insulation test and test technology.

引文格式: 夏吝时, 徐莹, 那伟, 等. 弹箭外表面接插件高温高湿度耦合环境试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 009-015.

XIA Lin-shi, XU Ying, NA Wei, et al. Research on the test method of coupled high temperature and high humidity environment of the outer surface connector of vehicle[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 009-015.

were conducted, and the electrical characteristics were good. The test method can effectively simulate the high temperature and high humidity flight environment at the same time, and can effectively evaluate the flight reliability of connectors under high humidity conditions such as rain, snow and fog.

**KEY WORDS:** electrical connector; high temperature and humidity; coupling environment; effective simulation; reliability assessment

弹箭在临近发射支点的侧表面上一般设置有电器接插件,作为弹箭与地面系统的分界面,在弹箭起竖后至飞离发射台前,能够保持地面监测系统和弹箭内仪器的正常通讯,以检测弹箭内设备的工作情况,并对故障进行诊断和处理。另有一些弹箭外表面电器接插件用于飞行过程中的星箭或多级分离、轻小型弹箭机动发射控制系统端接、飞行存储器外接数据传输接口等功能<sup>[1-2]</sup>。通常电连接器用于复杂串联系统中,只要其中一个元器件发生失效,就可能导致整个系统出现故障。暴露在弹箭外表面的电器接插件作为关键元器件,不论是在高速飞行过程中,还是在地面静止状态下,都难免遇到雨、雪、雾等高湿度气候环境,而较高的环境温度和相对湿度是造成其失效的关键因素<sup>[3]</sup>,尤其在两者叠加作用下效果更加明显。一方面,在高温条件下非金属材料中的易挥发物质挥发后加速老化,导致插针与插孔接触表面状态变化而造成接触失效;另一方面,高湿度条件下水气的进入将使内部相对湿度升高,电路产生腐蚀,一旦内部出现凝露或积水,就可能造成短路或设备烧毁等绝缘耐压失效情况发生。

现代化、全天候、全方位复杂环境中进行的立体战争,要求弹箭装备适应比以往更为复杂和严酷的贮存、运输和使用环境<sup>[4]</sup>。GJB 1217—91《电连接器试验方法》和 GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》中,都将产品的高温环境试验和潮湿或淋雨试验单独进行<sup>[5]</sup>,并未提出针对复合环境进行综合模拟的试验方法。飞行器地面试验的目的是以最低代价保障试验项目和状态能够覆盖实际使用环境需求<sup>[6]</sup>。文中通过对简单结构喷嘴低压喷射流场环境的数值分析,设计了搭载在石英灯加热器辐射热环境下的喷淋试验方案,成功开展了弹箭外表面电器接插件在飞行过程中主要环境条件动态变化过程的实效模拟试验,并通过阻值测试、剖面碳化层厚度测量和热解产物分析方法,对试验后的产品可靠性进行了评估。

## 1 试验要求与模型

模拟弹箭在对流层内飞行过程中遇云、雾、雨、雪时,水气作用下的外壁接插件所处高湿度气动热环境。需同时开展实际飞行过程中所承受的气动热环境动态变化过程和降雨条件下的水气环境实效模拟,并对试验后接插件产品的可靠性作出评价。

参试产品为弹箭外表面裸露的脱插式接插件,具

有小型化、高密度的特点,插孔间距约 1 mm。非金属绝缘部分尺寸为 30 mm×30 mm×6 mm,带金属法兰的外包络尺寸为 36 mm×50 mm×38 mm,平面结构如图 1 所示。接插件非金属部分材料为聚苯硫醚(PPS),该材料短期耐热性和长期连续使用的热稳定性均优于目前绝大部分的工程塑料,在高温、高湿条件下具有优良的电绝缘性能,并能表现出良好的尺寸稳定性。试验前,接插件外观完好,供电接口、数据传输接口、引脚结构和对应位置编号清晰可见。在常压、常温、室内干燥条件下对其进行通电测试,结果表明,导通性能和电绝缘性良好。

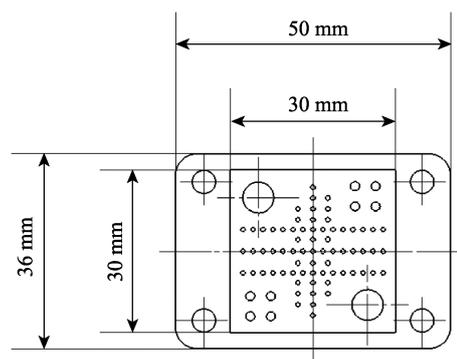


图 1 接插件结构平面

Fig.1 Schematic diagram of connector structure

## 2 试验

### 2.1 设备

试验设备由热环境模拟系统、水气环境模拟系统和配套测试系统 3 部分组成。石英灯热辐射试验系统负责建立飞行过程中弹箭外表面所处的真实高温环境。系统总功率 110 kW,温度闭环控制上位机对试件表面 K 型热电偶的采样率为 10 Hz。加热面积为 400 mm×300 mm,远远大于试件外尺寸。对试件四周进行绝热保护,避免多余热量从非插孔平面进入接插件内部。

水气环境模拟采用恒压储气容器对水罐加压的方式,将液态水挤压至喷管内,并通过喷管头部的喷嘴以自由射流的方式喷射至常压大气空间,管路原理如图 2 所示,喷嘴结构<sup>[7-8]</sup>如图 3 所示。其中上游气源最大供气压力为 0.8 MPa。试验过程中,通过对缓冲气瓶上、下游管路上串联的 2 个电磁阀的开闭控

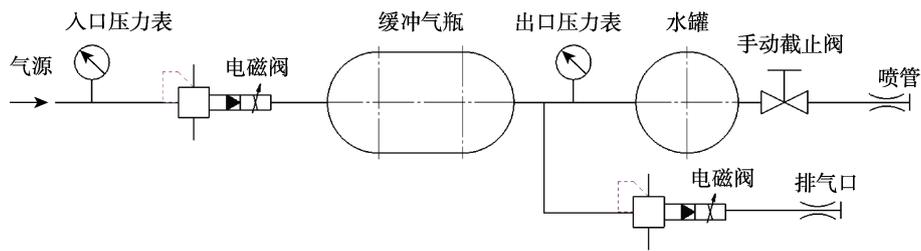


图 2 管路原理  
Fig.2 Pipeline schematic

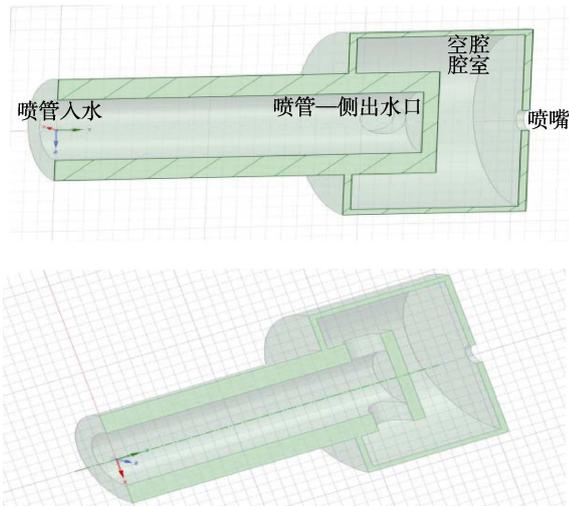


图 3 喷管结构  
Fig.3 Nozzle structure

制，调节进气量和排气量的动态平衡，以维持供气压力的恒定。

配套测试系统由绝缘电阻测试设备、电子显微镜和元素分析仪组成。其中，绝缘电阻随温度的升高和相对湿度的增大而减小，可作为评价高温高湿度环境下电连接器性能的主要指标<sup>[9]</sup>。试验结束后，由绝缘电阻测试设备进行测量。为进一步判断其整体导电性，采用电子显微镜对试验后的接插件剖面进行碳化层厚度测量，并使用元素分析仪测量试验后接插件的热解产物。

## 2.2 水气模拟

针对供水压力 0.1 MPa 条件下不同喷嘴直径时的喷射效果进行了计算，获取了喷嘴出口外  $\phi$  1000 mm×1600 mm 圆柱形空间内的水气分布云图、出口流速和流量等参数。计算条件中，射流工作介质为液态水，环境介质为空气，射流水与空气间发生动量交换和紊动扩散，成为气液两相混合介质射流。采用连续性方程和 *N-S* 方程作为控制方程<sup>[10]</sup>，在圆柱坐标系下径向 *r*、切向  $\theta$  和垂直方向 *z*（图 3 中 *y* 轴方向）的独立变量与直角坐标系中 *x*、*y*、*z* 方向独立变量间的关系由式（1）表示，圆柱坐标系下的不可压缩流动连续性方程和 *N-S* 方程由式（2）、（3）表示。

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \arctan \frac{y}{x} \\ z = z \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_r V_\theta}{r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} = F_\theta - \frac{1}{\rho r}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} + \eta \left( \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \eta$$

$$\left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right)$$

(3)

式中： $\rho$  为流体密度；*F* 为体积力； $\eta$  为黏性系数；*V* 为流体中某点的运动速度；*P* 为流体中某点处压强。

使用标准  $\kappa$ - $\epsilon$  模型进行求解<sup>[11-12]</sup>，其中边界条件设为入口表压 0.1 MPa，出口及整个圆柱形外流场计算域为标准大气压环境。获得了出口直径 1.5、2、2.5、3、4 mm 时的流场云图，如图 4a 所示。可以看出，由于周围空气对流场内水气的剪切力相对较小，因此液态水离开喷口后，能够在常压大气环境中喷射较长距离。在各喷口条件下，计算域内的流动状态均为典型的自由射流流场结构。喷嘴出口直径为 2.5 mm 时的核心流长度明显大于其他出口直径条件，且在距喷嘴出口 0.8 m 处，核心流宽度较其他喷嘴出口直径时更大。考虑到射流压差对流场结构的影响，以 0.1 MPa 为间隔，对喷嘴出口直径为 2.5 mm 时入口表压分别为 0.1~0.4 MPa 条件下的喷射状态进行计算，结果如图 4b 所示。可以看出，随着入口压力的增加，喷嘴出口前的最大速度随之增大，流场结构未发生明显变化。由此选择直径 2.5 mm 的喷嘴进一步分析，各工况压力下的喷嘴出口平均速度和对应流量如图 5 所示。

考虑到管路流阻等因素作用，在 0.35 MPa 工况下，测试了喷嘴实际喷射效果。流场结构与仿真结果基本一致，中心核心流从喷口至 1200 mm 清晰可见，水液离开喷嘴出口后，以约 43° 的喷射角向前方空间散射，如图 6 所示。

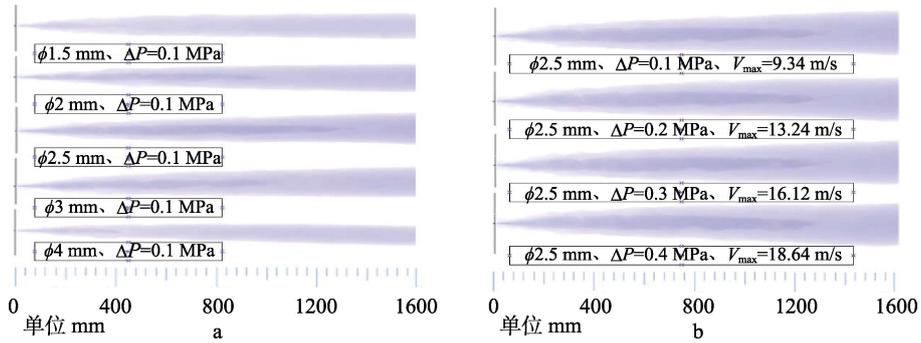


图4 流场结构

Fig.4 Flow field structure

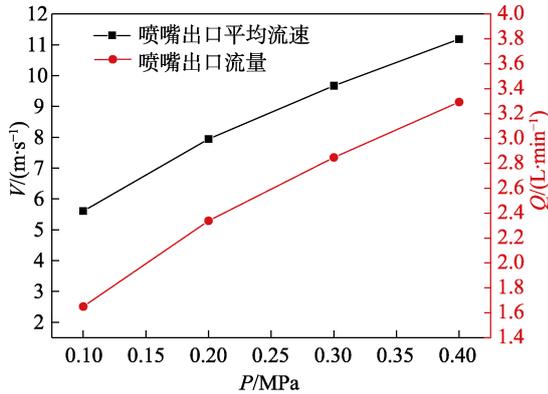


图5 不同工况下  $\phi 2.5$  mm 喷嘴出口速度与流量

Fig.5 The exit speed and flow rate under different conditions ( $\phi 2.5$  mm)

喷嘴内压力分布均匀,水液以略大于实测喷射角度的散射角喷射进入大气环境。在距喷嘴出口中心线 600~800 mm 内,水气速度梯度变化较小,且靠近喷嘴的区域内水气流速较快,适合放置试件。

由文献[13]查得,推荐的试验降雨条件为 1.7 mm/min。根据式(4)所列喷嘴降雨强度计算公式<sup>[14]</sup>反推得出喷嘴的出口速度应不小于 10.1 m/s 的流速。对照图 5 可以看出,喷嘴压力应不低于 0.3 MPa。按喷嘴入口压力 0.35 MPa 计算得到的降雨量为 1.82 mm/min,大于推荐标准要求,可以此工况进行效果预测。

$$R = \frac{Q \times 60 \times n}{S} \tag{4}$$

式中:  $R$  为降雨强度, mm/h;  $Q$  为喷嘴流量, L/min;  $n$  为喷嘴个数,  $n=1$ ;  $S$  为单个喷嘴在距喷嘴中心线  $x$  位置处的覆盖面积,  $m^2$ 。

### 2.3 喷淋效果

由于试件表面正前方为石英灯加热器<sup>[15-16]</sup>,因此将试件以 45°角放置在距喷嘴出口中心线 800 mm 位置处,建模计算试件表面水气覆盖效果,结果如图 10 所示。分别取流场空间内  $yz$ 、 $xz$  中心截面和  $xy$  距喷嘴 800 mm 截面,观察试件所处流域,如图 11 所示。可以看出,处于核心流中心的试件完全被水气流覆盖。

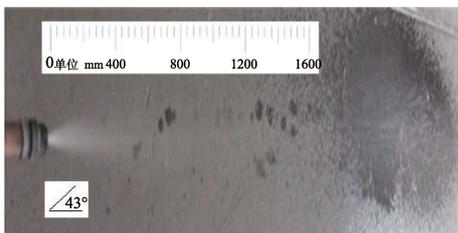


图6 喷嘴实际喷射效果

Fig.6 Actual spray effect

取喷嘴入口压力 0.35 MPa 为条件,计算得到 2.5 mm 直径喷嘴内压力分布、出口速度矢量和外流场的涡流黏度分布规律,如图 7—9 所示。可以看出,

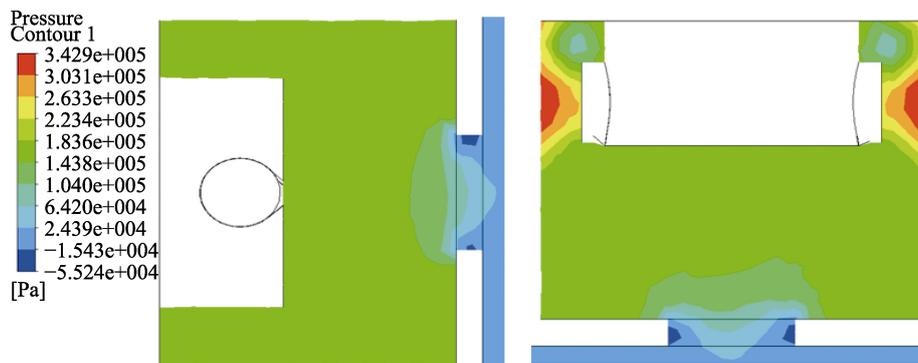


图7 入口 0.35 MPa 时喷嘴内部压力分布

Fig.7 The pressure distribution inside the nozzle (inlet 0.35 MPa)

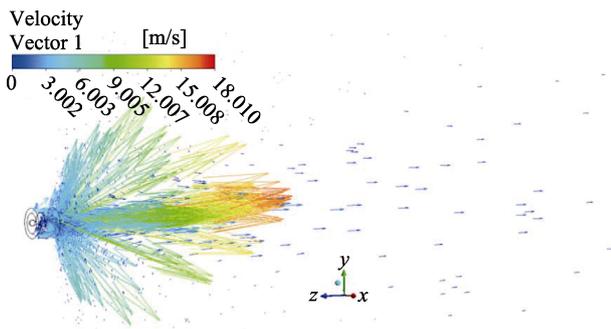


图 8 入口 0.35 MPa 时喷嘴出口速度矢量图  
Fig.8 Nozzle outlet speed vector (inlet 0.35 MPa)

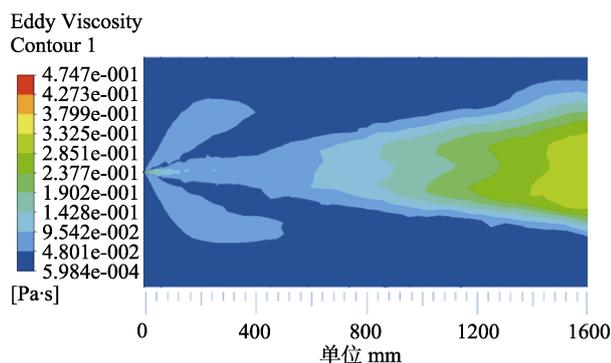


图 9 入口 0.35 MPa 时外流场涡流黏度分布  
Fig.9 Vortex viscosity distribution in external flow field (inlet 0.35 MPa)

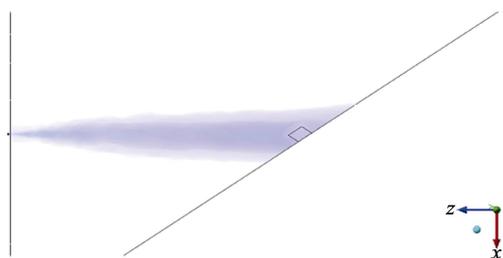


图 10 放置试件时的水气流场  
Fig.10 Water flow field diagram when placing the test piece

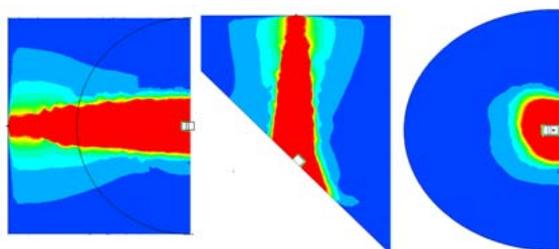


图 11 yz、xz 中心截面和 xy 距喷嘴 800 mm 截面处水气分布  
Fig.11 Water vapor distribution at yz, xz center section and xy section 800 mm away from the nozzle

### 3 结果与评价

按上述分析结果搭建了配套试验系统，将试件安装在试验工位后，在石英灯加热器和水气模拟系统的联合作用下，成功开展了试件表面 400 °C 条件下的水

气喷淋耦合环境实效模拟试验<sup>[17-22]</sup>，其中热环境加载曲线如图 12 所示，试验后试件表面照片见图 13。试验加热条件能够达到飞行过程中的表面最高温度，且总加热量达到了过考核条件。试件在高温和高湿同时作用下，非金属绝缘区的聚苯硫醚（PPS）材料表面有明显熔化和热解的痕迹。

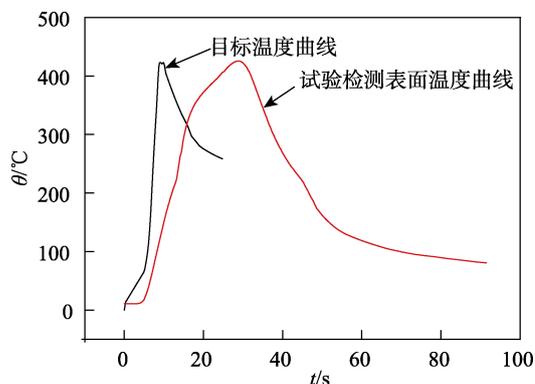


图 12 热环境加载曲线  
Fig.12 Thermal environment curve



图 13 试验后试件表面状态照片  
Fig.13 Photograph of the surface

对试验后的试件样本进行阻值测量，测试结果显示未导通。沿试件长度方向的中心线对其进行解剖，解剖后的显微图片如图 14 所示。可以看出，碳化层深度小于 1.8 mm，其他区域保持原始层状态，说明试件内部不导通。对试件表面的热解产物进行元素分析，结果见表 1。分解产物中含 C、O、F、AL、Si、S、Ca 等元素，其中 C 元素以化合物的形式存在于碳酸钙中，不存在游离的 C 元素。因此从元素分析的角度，得出试验后碳化产物不导电的结论。由此表明，试件在经历了高温高湿度耦合测试环境后，电气性能仍然良好。

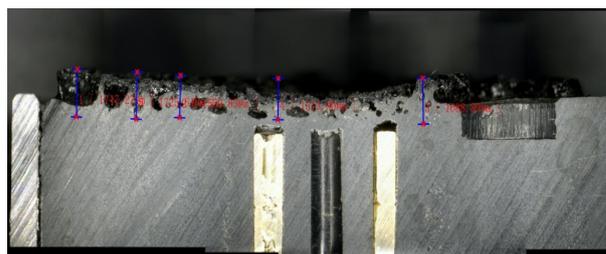


图 14 试件剖面显微图  
Fig.14 Specimen section micrograph

表1 试件热解产物元素  
Tab.1 Table of pyrolysis products elements

元素	C	O	F	Al	Si	S	Ca	总量
质量分数/%	53.00	13.77	5.94	2.05	7.51	11.54	6.19	100
原子数分数/%	68.48	13.36	4.85	1.18	4.15	5.58	2.40	100

## 4 结语

通过分析低压喷嘴射流流场,在石英灯加热器辐射热环境下开展了弹箭外表面电器接插件水气喷淋的高温高湿耦合环境模拟试验,完成了对受试产品的可靠性评价。

1) 在辐射热环境下,对电器接插件表面进行水气喷淋的方法能够建立高温高湿耦合试验条件,可通过试件表面温度实时控制和喷淋流量的调节实现飞行过程中主要环境条件动态变化过程的实效模拟。

2) 数值分析方法可以对试验过程中水气环境模拟相关参数进行选择,并对实施效果进行预测。

3) 对试验后参试产品进行阻值测量、剖面碳化层厚度测量和热解产物分析等测试方法可以对其可靠性进行正确评价。

利用石英灯加热器和低压喷嘴射流流场开展高温高湿度耦合环境模拟的试验方法为地面复合环境综合模拟试验提供了一种新思路。

### 参考文献:

- [1] 龙乐豪. 总体设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 368-382.  
LONG Le-hao. Overall design[M]. Beijing: Aerospace Publishing House, 1991: 368-382
- [2] HUDSON L. Thermal-mechanical testing of hypersonic vehicle structures[R]. NASA-2008-13159, 2008.
- [3] 吴勋, 孟涛. 地地导弹环境适应性分析[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 30-36.  
WU Xun, MENG Tao. Environmental adaptability analysis of surface-to-surface missile[J]. Equipment environmental engineering, 2006, 3(1): 30-36.
- [4] 康蓉莉, 冯雪艳, 何恩山. 兵器装备环境工程发展需求[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 56-58.  
KANG Rong-li, FENG Xue-yan, HE En-shan. Development requirements of weapon materiel environmental engineering[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(3): 56-58.
- [5] 孟春蕾, 范广露. 一种基于降低吹雨试验中试验场环境非正常高温的淋雨箱改造方法[J]. 环境技术, 2017, 35(4): 125-127, 131.  
MENG Chun-lei, FAN Guang-lu. A rain box reformation method based on reduce the abnormal high temperature in the rain test[J]. Environmental technology, 2017, 35(4): 125-127, 131.
- [6] 赵保平, 孙建亮, 庞勇. 航天产品环境适应性问题研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 51-57.  
ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, PANG Yong. Research on environmental worthiness problems of aerospace product[J]. Equipment environmental engineering, 2011, 8(2): 51-57.
- [7] 侯凌云, 侯晓春. 喷嘴技术手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.  
HOU Ling-yun, HOU Xiao-chun. Nozzle technical manual[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007.
- [8] JIANG Yi-tong, ZHANG Li-song, ZOU Yang-hui, et al. Numerical simulation research on cooling effect of high-temperature wind tunnel by water injection[J]. Journal of astronautics, 2018, 39(6): 702-708.
- [9] 薛云智, 党喜龙. 对电连接器绝缘电阻影响因素的研究[J]. 机电元件, 2006, 26(4): 21-25.  
XUE Yun-zhi, DANG Xi-long. Research on influencing factors of electrical connector insulation resistance[J]. Electromechanical components, 2006, 26(4): 21-25.
- [10] 马文涛, 潘俊峰. 高压水射流喷嘴内部流场的数值模拟[J]. 煤矿机械, 2019, 39(9): 17-20.  
MA Wen-tao, PAN Jun-feng. Numerical simulation of water jet flow field and rock breaking characteristics under different nozzle structures[J]. Coal mine machinery, 2019, 39(9): 17-20.
- [11] 郝磊, 高雄, 陈铁英, 等. 基于 ANSYS 雾化喷嘴流场分析及参数优化[J]. 农机化研究, 2016, 38(8): 19-23.  
HAO Lei, GAO Xiong, CHEN Tie-ying, et al. Based on ANSYS atomization nozzle flow field analysis and parameter optimization[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2016, 38(8): 19-23.
- [12] 李俏, 杨斌, 王鹏程, 等. 应用 Fluent 流场模拟分析与结构改进雾化喷嘴[J]. 化学工程与装备, 2017(7): 13-15.  
LI Qiao, YANG Bin, WANG Peng-cheng, et al. Application of Fluent flow field simulation analysis and structure improvement of atomizing nozzle[J]. Chemical engineering & equipment, 2017(7): 13-15.
- [13] GJB 150.8A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第8部分: 淋雨试验[S].  
GJB 150.8A—2009, Laboratory environmental test methods for military equipment—Part 8: Rain test[S].
- [14] 张东亮, 刘蕾. 一种大型淋雨环境模拟试验系统[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(1): 59-62.  
ZHANG Dong-liang, LIU Lei. Large environment simulation experiment system of rain[J]. Aviation precision manufacturing technology, 2019, 55(1): 59-62.
- [15] NIKITIN P V. Thermal protection[M]. Moscow: МАИ,

- 2006: 251-287.
- [16] 王德成, 林辉. 石英灯辐射式瞬态热环境试验关键技术分析[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 36-40.  
WANG De-cheng, LIN Hui. Main technical analysis of quartz lamp radiation transient thermal environment experiment main technical analysis[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(5): 36-40.
- [17] 夏吝时, 齐斌, 张昕, 等. 防隔热试验用平板型石英灯加热器热环境分析[J]. 红外技术, 2016, 38(7): 617-621.  
XIA Lin-shi, QI Bin, ZHANG Xin, et al. The thermal-environment analysis of flat quartz lamp heater system for thermal protection & insulation test[J]. Infrared technology, 2016, 38(7): 617-621.
- [18] AFANASIYEV A, BASUKOV C, GOFFIN M. Space shuttle experimental research[M]. Moscow: MAИ, 1994: 19-48
- [19] APPEL G, BAER K, KNAPP T. Thermomechanical test facility of HERMES Winglet Box[C]//5th international aerospace planes and hypersonics technologies conference. Virginia: AIAA, 1993.
- [20] 向树红, 张敏捷, 童靖宇, 等. 高超声速飞行器主动式气膜冷却防热技术研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 1-7.  
XIANG Shu-hong, ZHANG Min-jie, TONG Jing-yu, et al. Research on active film cooling and heat-proof scheme for hypersonic vehicles[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(3): 1-7.
- [21] 张淑蓉. 石墨加热元件在真空炉中的应用研究[J]. 工业加热, 2012, 41(5): 66-68.  
ZHANG Shu-rong. The application research of the graphite heating elements to the vacuum furnace[J]. Industrial heating, 2012, 41(5): 66-68.
- [22] 吴大方, 王峰, 任浩源, 等. 航天器热防护材料不同边界条件下的隔热性能试验研究[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(4): 315-322.  
WU Da-fang, WANG Feng, REN Hao-yuan, et al. Experimental research of thermal insulation performance of thermal protection materials for spacecraft under different boundary conditions[J]. Spacecraft environment engineering, 2018, 35(4): 315-322.