

航空电连接器热电耦合试验设计及仿真分析

张彤, 郁大照

(海军航空大学, 山东 烟台 264000)

摘要: **目的** 深入研究应力间的耦合作用, 为多应力试验提供理论支撑。**方法** 以 J599 III 型电连接器为研究对象, 依托现有设备设计典型航空电连接器热电耦合试验, 并分析试验结果。使用 SOLIDWORKS 对电连接器进行建模, 然后使用 COMSOL Multiphysics 进行热电耦合的有限元分析, 与试验结果进行对比。**结果** 电流为 1 A 时, 接触件表面温度最大值位于插针与插孔的接触区域, 最大温度为 24.4 °C, 温升为 0.1 °C, 插针接触区域中心部位温度最高, 达到 26.7 °C。当电流为 8 A 时, 可以产生约 6 °C 的温升。仿真得到的温升值要略高于试验值。接触电阻随温度的升高而增大。**结论** 温度和电负载都会造成电连接器接触部位的温升和接触电阻的升高。

关键词: 航空电连接器; 热电耦合; 试验设计; 建模与仿真; COMSOL

中图分类号: V240.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)06-0071-06

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.06.011

Experimental Design and Simulation Analysis of Thermoelectric Coupling of Aviation Electrical Connector

ZHANG Tong, YU Da-zhao

(Naval Aviation University, Yantai 264000, China)

ABSTRACT: In order to provide theoretical support for multi stress test, the coupling effect between stresses is studied deeply. Based on the existing equipment, the typical thermal coupling test of J599 III electrical connector is designed and the test results are analyzed. SOLIDWORKS is used to model the electrical connector, then COMSOL multiphysics is used to analyze the thermoelectric coupling, and the results are compared with the experimental results. When the current is 1 A, the maximum temperature of the contact surface is located in the contact area between the pin and the socket. The maximum temperature is 24.4 °C, the temperature rise is 0.1 °C, and the temperature at the center of the contact area of the pin is the highest, reaching 26.7 °C. When the current is 8 A, a temperature rise of about 6 °C can be produced. The simulated temperature rise is slightly higher than the experimental value. The contact resistance increases with the increase of temperature. Temperature and load will cause the temperature rise and contact resistance of the contact part of the electrical connector.

收稿日期: 2021-01-30; 修订日期: 2021-02-15

Received: 2021-01-30; Revised: 2021-02-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51375490)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51375490)

作者简介: 张彤 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电连接器损伤。

Biography: ZHANG Tong (1996—), Male, Postgraduates, Research focus: electrical connector damage.

通讯作者: 郁大照 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为腐蚀防护。

Corresponding author: YU Da-zhao (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion protection.

引文格式: 张彤, 郁大照. 航空电连接器热电耦合试验设计及仿真分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 071-076.

ZHANG Tong, YU Da-zhao. Experimental design and simulation analysis of thermoelectric coupling of aviation electrical connector[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 071-076.

KEY WORDS: aeronautical electrical connector; thermoelectric coupling; test design; modeling and simulation; COMSOL

温度、电流是导致电连接器性能退化的主要载荷。温度对电连接器性能的影响主要表现在热力变形和对表面氧化速率的影响,而电应力的影响主要表现为电源的通断电、电压和电流的不稳定等^[1]。温度与电流的影响是相互的,开展热电两应力耦合试验有助于电连接器的寿命计算与优化设计。在电连接器的试验和分析上,欧美发达国家起步最早,在20世纪60年代,根据AGREE报告提出的可靠性工作要求,美国制定了电连接器军用规范。这个标准是以平均无故障工作周期MCBF(Mean Cycle Between Failure)来表示的^[2]。

目前在温度-电流耦合场模拟仿真方面,黄波^[3-4]针对电连接器机械结构的可靠性问题,采用CST和ANSYS模拟技术,获取了USB3.0电连接器的电流密度分布、温度分布及应力-应变分布规律,得到了一系列可为电连接器结构优化提供结论。重点研究了几种典型电连接器的制造工艺、疲劳失效、多物理场耦合及信号完整性等分析模型与技术方法。K. Li等^[5]建立了静态接触的有限元模型,针对接触区域的热应力变化过程,研究了其接触电阻的瞬态变化过程。王龙泉^[6]利用Pro/E5.0进行了各个组成部分零部件的实体建模与整体装配,使用Workbench模拟电连接器在不同电流、环境温度和芯数条件下的热场分布以及分析其温升变化情况,并进一步分析绝缘体材料的导热系数对电连接器温升变化的影响。为了深入研究应力间的耦合作用,为多应力试验提供理论支撑,应力耦合仿真分析十分必要。应力耦合仿真分析可以通过有限元仿真来发现应力间的耦合机制、耦合作用,从机理层面解释电连接器的性能退化,对电连接器的性能研究具有重要意义。

1 温度-电流多载荷应力耦合试验

温度与电流是不可避免相互影响的两种载荷。在已有试验设备的支持条件下,设计实施了温度-电流应力耦合试验,通过实时监测接触电阻的变化,发现应力作用条件下,接触电阻的变化规律,分析得出应力间的耦合机理。

1.1 试验设备与多载荷应力试验系统

以航空装备大量使用的J599Ⅲ型电连接器为研究对象,在某研究中心温度-湿度-振动三综合试验箱的基础上,搭建试验平台,如图1所示。通过试验箱控制系统实现温度、电流的施加与控制,通过外接电源实现电应力的施加与控制。实验系统主要包括机械装置和数据采集分析两部分。采用四线法测量接触电阻,接触电阻的数据采集装置由信号处理模块、数据

采集模块和上位机软件等3个单元来构成。



图1 温度-湿度-振动三综合试验箱
Fig.1 Temperature humidity vibration three comprehensive test chamber

1.2 试验实施方案

GJB 599A—93《耐环境快速分离高密度小圆形电连接器总规范》规定,J599系列航空电连接器应在最高200℃的环境温度内连续可靠工作。因此设计试验测试温度为25~200℃,以25℃为间隔,监测电连接器在不同温度环境下的接触电阻,采用的负载电流分别为0.1、1、5 A。当温度分布情况达到稳定状态后,记录温度数据。GJB 1217—91《电连接器测试方法》中方法1005规定,进行温度、电负荷试验的电连接器,试验温度不超过规定的值。实验室环境温度为24.3℃,考虑到试验的便捷性,将温度的第一个取样点设为24.3℃。

1.3 试验结果分析

热的传递是由于物体内部或物体之间的温度不同所引起的,当外界温度与电连接器通电生热产生的温度不一致时,就会发生热传递,因此温度应力与电应力是相互影响、紧密联系的。试验结果如图2所示,电连接器的接触电阻随着环境温度的升高而增大,接触电阻与环境温度之间呈一次线性关系。由于金不易氧化,完好的镀金接触件表面通常薄膜电阻较小,接触电阻主要是由接触件、导线的导体电阻和接触面收缩电阻组成。收缩电阻和导体电阻受金属材料的电阻率影响较大,电阻率与温度呈一次线性关系,随温度的升高而增大。电连接器的电负载越大,接触电阻也呈升高趋势,电负载与环境温度升高对电连接器接触电阻产生的影响趋势一致。

为了进一步分析电负载与环境温度对电连接器接触电阻的叠加影响,在1~8 A(每1 A为间隔)的电流作用下,对电负载引起的温升情况进行了测试,

结果如图 3 所示。由图 3 可知, 电负载越大, 引起的接触件温升越明显。在电流加载的过程中, 开始时温度上升较快; 接近稳定值时, 温度上升缓慢; 到达稳定值后, 基本保持不变。这是因为当电流增大时, 接触区域产生的焦耳热使接触件与环境之间的温度差增大, 从而使自然对流散热系数增大, 与周围空气的换热速度加快, 接触区域温升会减小。鉴于在上述试验条件下, 接触电阻(薄膜电阻和收缩电阻)主要由电导率引起的收缩电阻变化造成, 因此, 可认为环境温度 and 电负载的影响趋势和机制一致, 二者具有叠加作用。

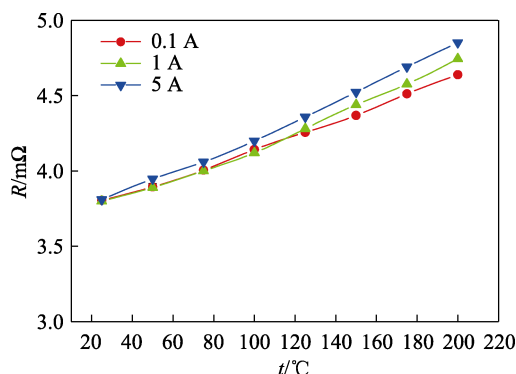


图 2 R - t 关系曲线
Fig.2 R - t relation curve

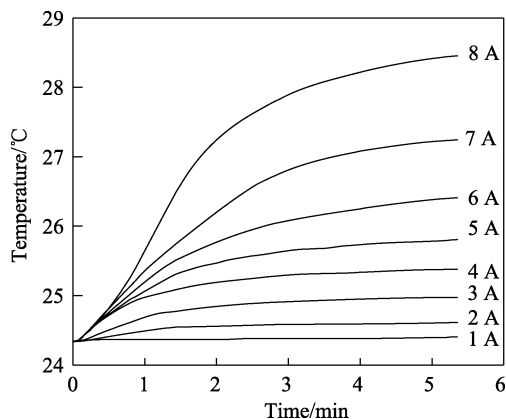


图 3 接触温升变化曲线
Fig. 3 Contact temperature rise curve

2 电连接器热电耦合仿真分析

对于电连接器接触件而言, 由于导体电阻和接触电阻的存在, 难免使接触件在通电时产生热效应, 这就是焦耳热, 电流变化不可避免地会对温度场产生影响。当温度场发生变化时, 由于金属导体的电阻率大小受温度影响, 因此温度场的变化会影响电阻率的大小, 从而使导体的电阻发生变化。温度场变化还会使接触件发生热膨胀变形量, 从而对接触状态产生影响, 温度变化还会使接触材料力学特性、电学特性发生变化, 这些都会影响接触界面的接触电阻。因而对

电连接器进行热电耦合分析十分必要。

2.1 热电耦合分析经典理论

对电连接器接触件热电耦合分析的目的就是研究温度、电流变化时, 对电连接器的电性能影响情况, 主要表现在接触电阻的变化。热点耦合分析以稳态分析为主。稳态热分析中, 系统内产生的热量加上外部流入的热量等于流出系统的热量。

$$Q_{\text{流入}} + Q_{\text{生成}} + Q_{\text{流出}} = 0 \quad (1)$$

静态下电连接器接触件的热生成方式主要是通电产生焦耳热, 由于插针、插孔本身的电阻和插针与插孔配合形成的接触电阻, 当接触件通电时, 就会不可避免地产生焦耳热。温度场发生变化时, 导体的电导率也会随之变化, 焦耳热的产生速度同样发生改变。具有线性电阻率的金属导体, 电导率与温度的关系计算公式为:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0 (1 + \alpha(t - t_{\text{ref}}))} \quad (2)$$

式中: ρ_0 为参考电阻率; α 为电阻率温度系数; t 为当前温度值; t_{ref} 为参考温度值。

对于电连接器接触件而言, 热量的流入与流出都属于热交换。电连接器接触件热量交换的方式有 3 种: 传导、对流和辐射。接触区域不仅实现了插针与插孔的电流交换, 也实现了插针与插孔间的热交换, 即热传导。

电连接器接触件与周围环境存在温度差, 会产生对流、辐射等热交换行为, 以对流换热为主。温度差与换热过程中对流介质的物理性质、换热表面的形状/部位、表面与流体之间的温差以及流体流速都有密切关系。

2.2 模型建立及前处理

根据电连接器生产厂家提供的图纸数据, 建立 GJB 599A 型电连接器插针插孔的三维模型, 并对模型进行合理处理和简化, 单个接触件模型如图 4 所示。对电连接器接触电阻的仿真涉及到电阻热、固体力学的建模, 因此需要选择焦耳热多物理场, 对应电流、固体传热、固体力学物理场接口, 需要考虑的多

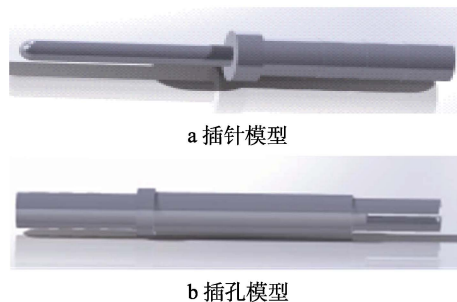


图 4 接触模型

Fig.4 Contact model: a) pin model; b) jack model

物理场为电磁热,对模型进行稳态分析。将接触对插拔后的装配体文件导入 COMSOL 中,进行模型识别。识别导入的网格文件,生成实体,生成的实体对象在物理场所有层中显示,如图 5 所示。定义插针、插孔基体材料为锡青铜,材料属性见表 1 和表 2。

定义插针与插孔接触面材料定义为金,金的材料属性按照系统内置的表达式表示成为了温度 t 的函数。定义插针插孔接触面为接触对,插针与插孔形成装配体。物理场接口为电流、固体传热和固体力学 3

个模块,多物理场耦合主要为电磁热。网格类型选择为自由四面体网格,整体划分方法为较细化,对接触区域网格进一步细化,最大单元大小不超过 0.0002。

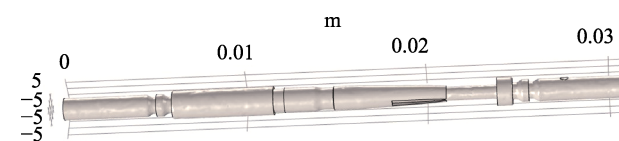


图 5 COMSOL 实体
Fig.5 COMSOL entity

表 1 接触件基体材料热、电属性

Tab.1 Thermal and electrical properties of contact base material

材料类型	电导率/ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	恒压热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热膨胀系数/ K^{-1}	参考电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$)
锡青铜	5.998×10^7	385	8960	400	17×10^{-6}	1.72×10^{-8}

表 2 接触件基体材料力学属性

Tab.2 Mechanical properties of contact base material

材料类型	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比/MPa	屈服强度/ MPa	切变模量/ GPa	摩擦系数	抗拉强度/ MPa	弹性极限/ MPa
锡青铜	9000	103.4	0.32	200	38.6	0.2	330	420

2.3 设置载荷及求解

电流物理场中,由于接触件材料为固态金属,因此材料类型选择为固体。通常针孔结构的电连接器电流流向为从插针流向插孔,所以设置插孔尾端接线端面设为接地面,在插针尾端接线端面施加 1 A 的终端电流。电子接触对选择插针插孔接触对,与 Mikic 弹性相关性模型相比,Cooper-Mikic-Yovanovich 相关性模型是基于接触界面塑性变形的假设模型,因而收缩电导选择 Cooper-Mikic-Yovanovich 相关性,电导率选择基于温度的线性电阻率。

在固体力学物理场中,材料设置为各向同性,杨氏模量、泊松比和密度等材料特性全部来自表 2 给定值。

力学的接触对同样选择插针插孔接触对,接触压力算法采用增强拉格朗日算法。根据 ANSYS 中仿真的接触压力,在接触压力初始值中输入相应值,模型初始温度设为 $24.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在电流物理场中,电导率设置为基于温度的线性电阻率。参考电阻率、电阻率温度系数、参考温度数值都来自材料设定。表面粗糙平均高度设为 $1\text{ }\mu\text{m}$,粗糙平均斜率为 0.4。在固体传热物理场中,环境数据选择某机场的气象数据,物理模型为合金中的传热,模型的导热系数、恒压热容等全部来自材料设定。热通量为对流热通量,对流模式为外部自然对流,模型类型选择直径为 2 mm 的长水平圆柱,流体类型为空气。在固体力学物理场中,由于研究的是稳态行为,因此在结构瞬态行为中选择准静态。

在多物理场选择中,电磁热将电流物理场和固体传热物理场通过耦合接口耦合到一起,热膨胀将固体传热和固体力学通过耦合接口耦合到一起。

2.4 仿真结果及分析

电流为 1 A 时,接触件表面的温度分布如图 6 所示。由图 6 可知,表面温度最大值位于插针与插孔的接触区域,最大温度为 $24.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,温升为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于接触件细长的特殊结构,温度场沿径向的变化并无明显梯度,沿轴向具有一定的梯度,但整体温度分布相对均匀。插针接触区域中心部位温度最高,达到 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,是产生焦耳热差的最主要部分。

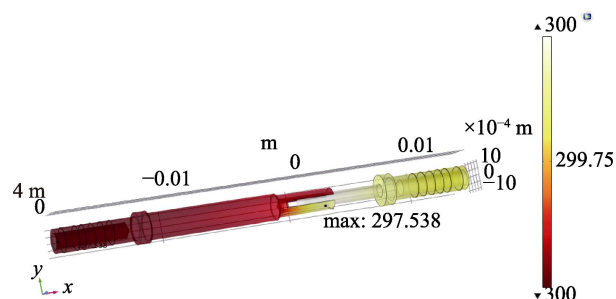


图 6 接触件表面温度分布
Fig.6 Temperature distribution of contact surface

改变电流大小时,仿真得到的温度改变值与相应的试验测试值比较,如图 7 所示。由图 7 可知,随着电流的增大,电流产生的温升效果越明显。当电流为 8 A 时,可以产生约 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温升。在电流变化过程中,

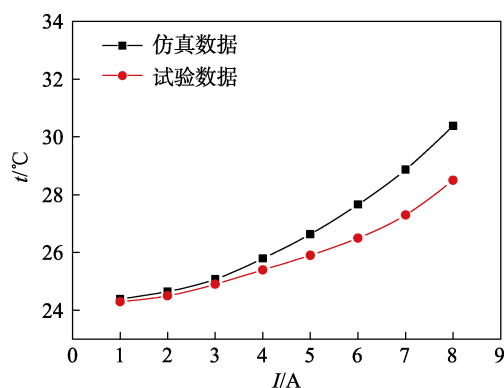


图 7 电流导致温升曲线

Fig.7 Temperature rise curve caused by current

接触件温度值发生变化,但温度分布规律基本不变。

仿真得到的温升值要略高于试验值。一方面是因为仿真中的温升值直接来自于接触件表面,试验中由于设备和测试条件的限制,温度值来自于接触件周围的空气,两者之间会有一定差别。另一方面,因为在仿真过程中环境温度条件等保持恒定,而实际试验过程中,电连接器产热会造成周围环境温度的改变,根据之前的理论分析可知,散热系数等相关参数也会改变,因此试验测试值会略低于仿真值。

在固体传热物理场中,设置模型温度初始值为参变量,并使环境温度与模型温度保持一致,保证仿真过程中接触件不发生热量交换行为,接触件温度不发生改变。仿真得到不同温度条件下接触电阻的大小,如图 8 所示,验证了试验所得的曲线。由图 8 可知,无论在试验测试还是有限元仿真中,接触电阻都随温度的升高而增大,两者的趋势是一致的,在具体数值上略有不同。实际测试时,接触电阻是导体电阻、收缩电阻和膜层电阻之和,而 COMSOL 仿真中,只能计算导体电阻和收缩电阻在温度影响下的变化,膜层电阻随温度变化的仿真难以实现,且接触表面的粗糙程度不同时,对温度变化的敏感程度不同。仿真中只能设置整个接触面一致的粗糙度,与实际情况会有所差别。

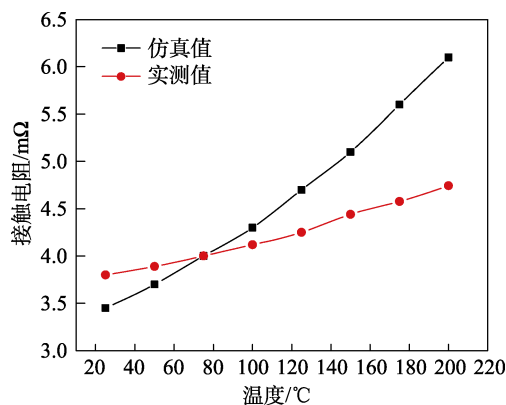


图 8 不同温度条件下接触电阻值

Fig.8 Contact resistance at different temperatures

电流对接触电阻的直接影响通常是微弱的,电流只有在接触表面产生电弧放电导致接触面的熔融、溅射时,才会对接触电阻产生较大影响,而这一过程无论是试验操作还是仿真软件,实现起来都很困难。电流对接触电阻的影响主要还是通过影响温度来实现的,这与 COMSOL 中设置的多物理场耦合接口也是一致的。电流对接触电阻的影响机理如图 9 所示。

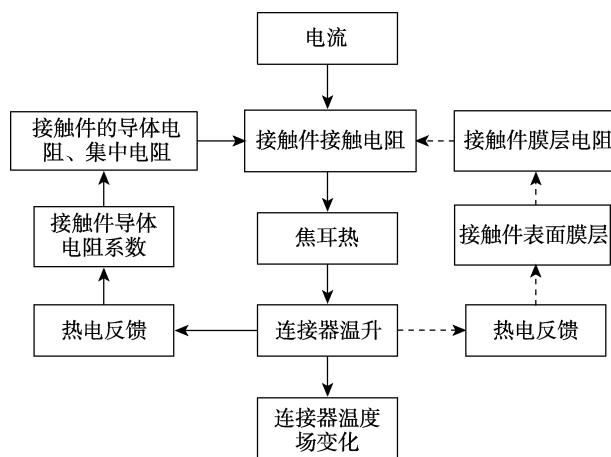


图 9 电流影响接触电阻原理

Fig.9 Principle of current influence contact resistance

电流对接触电阻的影响,主要是电流流经导体时在导体电阻的作用下产生焦耳热。焦耳热使得接触件温度升高,温度升高会影响导体的电阻率。通常金属导体的电阻率都是随温度的升高而增大,导体电阻率 ρ 与温度 t 变化的关系为 $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, 其中 α 为电阻温度系数, ρ_0 为材料在 $t=0$ °C 时的电阻率。导体的电阻率升高,电阻值会相应增大,产生的焦耳热也会相应增多。连接器温度的升高同样会加速导体表面的氧化作用,表面氧化膜层的变化对接触电阻的膜层电阻有直接影响。接触件的受热膨胀同样会影响接触件的接触状态,具体影响效果受接触方式、结构类型等多种因素影响,需要根据具体问题进行具体分析。

3 结语

电连接器的工作并不是在单一应力条件下进行的,多种应力的同时作用也并不是简单的叠加,应力间的作用存在着促进、抑制或更复杂的关系。首先设计实施了温度-电流应力试验,研究了温度、电应力综合施加对接触电阻的影响规律。温度和电负载都会造成电连接器接触部位的温升和接触电阻的升高,环境温度升高和电流增大造成接触电阻增大的原因:一方面,因为高温导致的接触件温度变形会对接触压力产生影响,并软化金属镀层;另一方面,温度的升高导致电接触件的基体材料、镀层材料和导线的电阻率的增大。

通过 COMSOL 仿真软件对电连接器接触件的

热-电应力进行了耦合分析, 分析比较了应力耦合作用下接触件的温度、接触电阻和应力应变情况, 并与试验结果进行了对比研究。一方面有助于完善试验方法和试验过程; 另一方面, 从机理层面解释了应力耦合作用, 对电连接器在综合应力作用下的性能退化机理有利更进一步的认识。

参考文献:

- [1] 杜永英, 孙志礼, 王宇宁, 等. 基于热分析的电连接器的温度应力研究[J]. 机械设计与制造, 2013(10): 42-44.
DU Yong-ying, SUN Zhi-li, WANG Yu-ning, et al. Study on temperature stress for electrical connector based on the thermal analysis[J]. Machinery design & manufacture, 2013(10): 42-44.
- [2] 《可靠性设计大全》编撰委员会. 可靠性设计大全[M]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Editorial Committee of Reliability Design Encyclopedia. Reliability design encyclopedia[D]. Beijing: China Standards Press, 2006
- [3] 黄波, 李迅波, 曾志, 等. 电连接器多物理场耦合分析方法研究[J]. 中国科技论文, 2017, 12(5): 507-512.
HUANG Bo, LI Xun-bo, ZENG Zhi, et al. Research on multi-physics coupling analysis method for electrical connectors[J]. China sciencepaper, 2017, 12(5): 507-512.
- [4] 黄波. 电连接器耦合失效机理及可靠性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
HUANG Bo. Research on coupling failure mechanism and reliability of electrical connector[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [5] LI K, SU X P, LI Z G, et al. The finite element model and analysis of static contact resistance and thermal process for contact with film[C]// 44th IEEE Holm conf on electrical contacts, Washington DC: [s. n.], 1998.
- [6] 王龙泉. 基于有限元分析的电连接器接触件接触特性与温度场模拟研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
WANG Long-quan. Simulation of contact characteristics and temperature field of electrical connector contact based on finite element analysis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [7] 朱海峰. 环境应力作用下航天电连接器可靠性试验方案研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
ZHU Hai-feng. Research on reliability test scheme of aerospace electrical connector under environmental stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.