

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-10

某型航空信号灯海洋盐雾环境适应性设计

杜翠玲¹, 徐刚², 刘克刚¹, 梅宇飞¹, 曾登峰¹, 徐永攀¹, 陈傲杰¹

(1. 航空工业上海航空电器有限公司 电器技术研究所, 上海 201101)

(2. 航空工业沈阳飞机设计研究所 人机工效中心, 沈阳 110035)

摘要: 海洋环境下某型航空信号灯关键核心零件——电连接弹簧腐蚀断裂及原材料受制进口问题, 进行耐海洋盐雾环境设计, 保证国家重大装备可靠性和供应链安全。采用场发射扫描电子显微镜(SEM)、材料替代分析法对材料成分、力学性能进行分析对比, 筛选出兼具日产琴钢丝力学性能及英制不锈钢丝成分的国产不锈钢 06Cr19Ni9 替代材料, 进行结构设计、制造以及疲劳寿命、耐盐雾腐蚀等系统级关键性能验证研究。结果表明: 国产不锈钢 06Cr19Ni9 替代材料电连接弹簧可通过 GJB 150.11A 盐雾腐蚀试验, 疲劳寿命可达 30 多万次, 满足某型航空信号灯海洋盐雾环境适应性和疲劳寿命要求, 同时实现了机载基础材料的国产化刚性需求。该研究可为我国航空装备攻克核心技术“卡脖子”问题和保证国家重大装备供应链安全提供科学有效的验证思路。

关键词: 某型航空信号灯; 电连接弹簧; 海洋环境; 盐雾腐蚀; 06Cr19Ni9; 疲劳寿命

中图分类号: V243.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Design of marine salt spray environment adaptability for some aeronautical signal light

DU Cuiling¹, XU Gang², LIU Kegang¹, MEI Yufei¹, ZENG Dengfeng¹,

XU Yongpan¹, CHEN Aojie¹

(1. Institute of Electrical Technology, AVIC Shanghai Aviation Electric Co., Ltd., Shanghai 201101, China)

(2. Ergonomic Center, AVIC Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: To solve the fracture failure problem of electric connection spring of some aeronautical signal light in the marine environment and its raw material are subject to import, which threatens the security of the national major equipment supply chains. Composition and mechanical properties of material are analyzed by means of SEM, material substitution analysis, and the domestic 06Cr19Ni9 is selected as replacement of Japanese piano wire (SWP) and British system unembroidered steel wire. Then experiments and tests of system-level key performance such as fatigue life and corrosion resistance to marine salt spray environment are studied after the structural design and production manufacturing with the domestic material. The results show that the electric connection spring made of domestic 06Cr19Ni9 through GJB 150.11A and the ultimate fatigue life is more than 300 000 times. Electric connection spring made of domestic 06Cr19Ni9 exhibits excellent marine salt spray environmental adaptability and high fatigue life, realized the rigid demand of localization. This research can provide scientific and effective verification ideas for China's aviation equipment to overcome the "stuck neck" problem of core technology and ensure the security of national major equipment supply chain.

Key words: certain aviation signal light; electric connection spring; marine environment; corrosion resistance to marine salt spray environment; 06Cr19Ni9; fatigue life

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2024-05-22

通信作者: 杜翠玲(1987-), 女, 博士, 高级工程师。E-mail: 205060502@163.com

引用格式: 杜翠玲, 徐刚, 刘克刚, 等. 某型航空信号灯海洋盐雾环境适应性设计[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-10.

DU Cuiling, XU Gang, LIU Kegang, et al. Design of marine salt spray environment adaptability for some aeronautical signal light [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-10. (in Chinese)

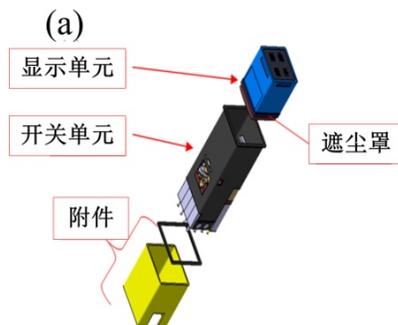
0 引言

环境适应性是装备(或产品)功能、性能以及其他质量特性实现的基础^[1-3]。研究表明,在装备运行试验以及实际使用环境中遇到的部分可靠性问题,实际上属于环境适应性问题,源头是由于环境适应性设计不足所致^[4-5]。据统计,飞行器地面环境中暴露出的质量问题,“设计”类原因占比在20%以上。然而目前国内外指导装备/产品环境适应性设计的仅有《装备环境工程通用要求》^[6]和美军标 MIL-STD-810F^[7],缺少底层针对性强的产品环境适应性设计准则或规范。国内仅有部分专家学者进行了装备环境适应性设计方法研究与实践,强调应采用系统工程的思路进行环境适应性设计,并且需覆盖产品各层级和研制阶段^[4,8-13]。国外 Anees^[14]和 Schmidt^[15]通过分析装备温湿度环境适应性影响因素,提出装备在设计时应采取的控制方法,如材料选择与控制、密封设计和三防设计等。但在国内航空装备领域,尤其针对具体的型号产品方面缺乏科学系统的验证方法,直接影响航空装备的可用性、任务可靠度和战斗力^[16-18],给航空装备的应用前景、飞行安全及国家的财产安全带来隐患^[19-24]。

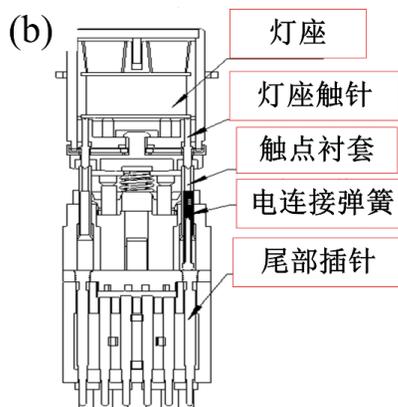
本文针对某型航空信号灯关键核心部件—电连接弹簧的在海洋环境下多次腐蚀断裂导致信号灯失效及其原材料受制国外供应链问题^[25-28],对该电连接弹簧进行环境适应性设计,包括电连接弹簧工作机制及失效分析、国产不锈钢结构设计、耐盐雾腐蚀及疲劳寿命论证等。

1 电连接弹簧工作机制及失效概述

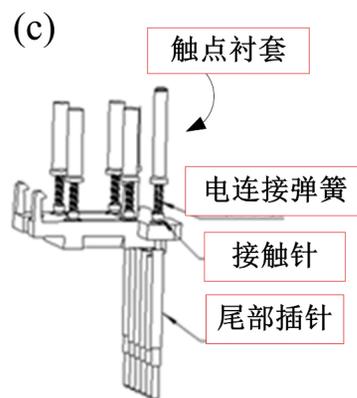
某型航空信号灯为我国航空机载基础重点型号电子元器件,最初是参照同款进口英制型号仿制而成,主要功能为显示告警字符和控制机载电路的通断,其结构如图1所示,可以看出:某型航空信号灯由显示单元、开关单元和附件组成。电连接弹簧作为显示单元亮灭的电气结构连接件,套在开关单元部分的接触针上,组成一个嵌套部件置于触点衬套内。按压灯座时,6根接触针向下移动引起电连接弹簧收缩,导通灯座触针—尾部插针电流回路,进而实现显示告警和机载电路的控制功能。



(a) 某型航空信号灯结构示意图



(b) 某型航空信号灯内部灯座触针—尾部插针导电回路



(c) 电连接弹簧导电回路结构

图1 电连接弹簧工作机制

Fig. 1 Working mechanism of electric connection spring

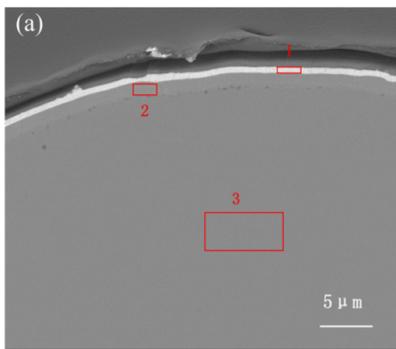
若该电连接弹簧力学或电气性能异常,则导致信号灯功能异常甚至失效。然而实际应用中该型信号灯广泛配套于预警机、反潜巡逻机、直升机等各型海洋环境中的航空装备,多次出现由于电连接弹簧腐蚀断裂而产生该型信号灯熄灭、卡滞、闪烁或者暗灭(忽明忽暗)等失效和异常状态,严重威胁飞行安全。同时,目前该电连接弹簧的基

材采用日产琴钢丝,长期以来一直依赖日本进口,随时面临断供风险。基于此问题,亟需提高电连接弹簧耐盐雾腐蚀性能并进行基材的国产替代。

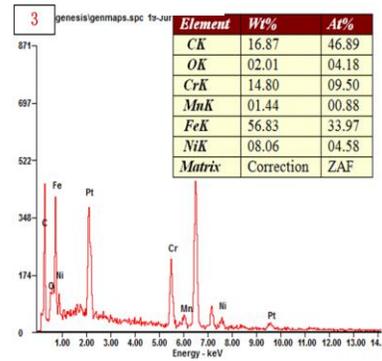
2 进口基材国产替代分析

2.1 英制电连接弹簧材料检测分析

采用扫描电子显微镜及其自带的能谱仪 (SEM&EDS, Inspect F50&Apollo xp)对英制电连接弹簧的基材、镀层材质、结构和厚度进行检测分析,结果如图 2 及表 1 所示。

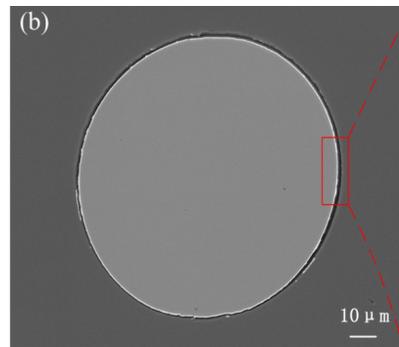


(a1) 镀层显微形貌

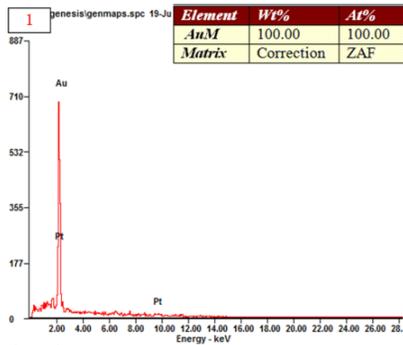


(a4) 区域 3 基材 EDS 能谱图

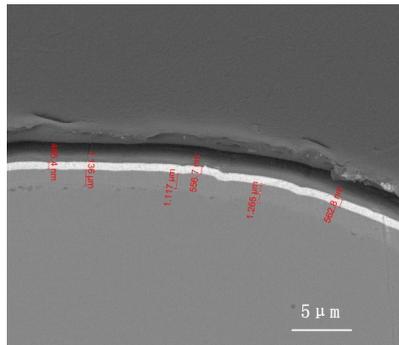
(a) 进口件英制电连接弹簧基材及镀层显微形貌



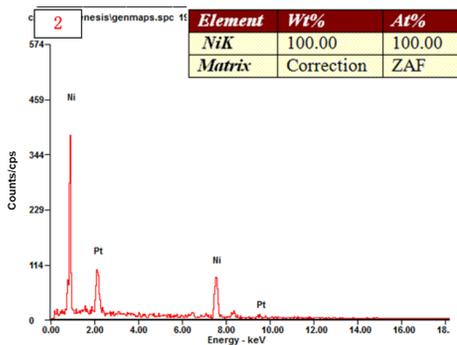
(b) 进口件英制电连接弹簧截面形貌



(a2) 区域 1 面镀层 EDS 能谱图



(c) 进口件英制电连接弹簧截面镀层厚度检测图



(a3) 区域 2 底镀层 EDS 能谱图

图 2 进口件英制电连接弹簧基材及镀层材质显微形貌及 EDS 能谱图

Fig. 2 EDS analysis and micromorphology of material of imported British electric connection spring and its coating

表 1 进口件英制电连接弹簧镀层材质以及厚度分析结果

Table1 Material of imported British electric connection spring and its coating

基材可能牌号		镀层位置	镀层种类	镀层厚度/ μm
不锈钢弹簧钢丝 (国产新标准 GB/T24588-2009)	弹簧用不锈钢丝 (国产旧标准 YB(T)11-1983)	面镀层	纯金层	0.54
		打底层	纯镍层	1.18

从表1可以看出:英制电连接弹簧基材对应的中国金属材料牌号为国产不锈钢06Cr19Ni9或12Cr18Ni9,镀层为镀镍-镀金两层结构,其中纯镍层为打底层,厚度为1.18 μm,纯金层为面镀层,厚度为0.54 μm。

根据我国不锈钢弹簧钢丝的产业及生产现状调研,初步选用国产不锈钢06Cr19Ni9作为国产替代材料进行电连接弹簧结构设计、加工工艺的优化及工程化验证。下文将进行与现有日产琴钢丝电连接弹簧的替代对比分析。

2.2 日产琴钢丝电连接弹簧的材料替代分析

查阅大量材料手册发现,某型航空信号灯电连接弹簧日产琴钢丝材料TS-19-672,与国产替代材料国产不锈钢06Cr19Ni9性能差异较大,因此需进行材料替代分析。

材料的替代遵循性能等强或接近等强的原则,这样可以最大限度地保持与原设计一致,材料替代后可以基本保证零部件使用的安全(基于原设计时安全可靠的),最大限度减少重新验算的工作量。材料替代的主流理论表明^[29-30],高级别的可以替代低级别的(尺寸不变),如高强度钢可以替代一般强度钢,相反则不允许。但还要考虑强度过渡时的逐渐递减原则,将差异控制在最小的范围内,即所选用的钢材强度等级必须满足规范和审批图纸的要求。研究表明,金属材料替代应该比较以下5方面性能^[31-32]。

1) 物理性能:如密度、外观、熔点、电性能、导磁性能等,比如用在航空领域,需要比较密度是否合适,用在热环境下,则需要比较熔点是否足够高,而用在电气方面则比较电阻是否足够小或足够大等等。

2) 化学性能:如耐热性、抗氧化性、耐腐蚀性、

耐晒性、感光特性等,如果用在高温环境,则需要对比抗氧化性,而用在硫酸、盐酸或沿海高盐环境是否耐腐蚀,是否生锈等等。

3) 力学性能:如硬度、强度、塑性、韧性、冲击、疲劳、弹性等等,需要比较硬度、强度是不是相当,弹性和疲劳性能是否一致,塑韧性如何。

4) 工艺性能:工艺性能是指加工成为一定形状的零件的难易程度。比如锻造性能、铸造性能、焊接性、热处理性能等等,其中又可以细分,如铸造性能里面有流动性、收缩性等,热处理有淬透性、淬硬性、氧化脱碳性、白点敏感性等等,因此需要看二者的加工性能是否相近。

5) 经济性能:成本价格是否相当,所含有的合金元素、资源是否丰富等。

由于本次需更替材料的电连接弹簧属于某型航空信号灯的关键零部件,因此替代后的国产电连接弹簧需满足产品的装配要求(即其关键性功能尺寸、结构要满足邻近零部件的装配尺寸)、功能性及环境适应性。

根据以上分析,需进行国产替代材料不锈钢06Cr19Ni9的物理性能、化学性能、力学性能和工艺性能与现有日产琴钢丝材料电连接弹簧TS-19-672对比分析,结果如表2~表4所示。

表2 日产琴钢丝与国产替代不锈钢材料06Cr19Ni9规格及力学性能对比

Table 2 Comparison of specifications and mechanical properties Japanese piano wire (swp) and domestic substitute material 06Cr19Ni9

材料名称	材料牌号及供应商	抗拉强度/ (N·mm ²)	线径/mm
日产 琴钢丝	TS-19-672 (Suzuki Metal Industry Co., Ltd.)	2 990~ 3 290	ϕ 0.13 ^{-0.001} _{-0.004}
国产 不锈钢丝	06Cr19Ni9(GB/T 24588-2009)	2 373(压制)	ϕ 0.13 ^{-0.001} _{-0.004}

表3 日产琴钢丝及国产不锈钢替代材料06Cr19Ni9的化学成分对比/%

Table 3 Comparison of Chemical composition of Japanese piano wire and domestic substitute material 06Cr19Ni9

材料名称及标准			元素百分比/%							
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
日产琴钢丝	旧标准 YB(T) 11-1983 弹簧用不锈钢丝	0Cr19Ni10	0.80~0.85	0.12~0.32	0.60	0.025	0.025	0.15~0.22	—	
国产不锈钢 替代材料	新标准 GB/T 24588- 2009 不锈钢弹簧钢丝	06Cr19Ni9	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	18.00~20.00	8.00~10.50	0.01

表 4 日产琴钢丝及国产替代材料不锈钢 06Cr19Ni9 的物理及化学性能

Table 4 Physical and chemical properties of Japanese piano wire and domestic substitute material 06Cr19Ni9

材料名称	采用状态	物理性能		化学性能
		密度/ (g·cm ³)	电阻率 (20℃)/ (Ω·m)	
琴钢丝	冷拉	7.81	13.0×10 ⁻⁸	不耐 GJB 盐雾试验,易锈蚀、断裂
国产不锈钢 06Cr19Ni9	冷拉	7.85	80×10 ⁻⁸	耐腐蚀,耐高低温,用于腐蚀或高低温工作条件下的小弹簧

可以看到,国产不锈钢 06Cr19Ni9 为低碳钢,日产琴钢丝为高碳钢,前者抗拉强度仅为后者的 0.72~0.79,并且前者的电阻率和耐盐雾性能也与后者相差巨大。因此,需进行国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧的盐雾环境性设计及验证,包括结构设计、试制,试制后装配性、耐盐雾腐蚀性能、疲劳寿命验证,确保满足产品级使用要求和系统装备完好性和任务成功性要求。

表 5 日产琴钢丝和国产替代材料不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧几何参数对比

Table 5 Comparison of geometrical parameter of electric connection spring with Japanese piano wire (swp) and domestic substitute material 06Cr19Ni9

序号	1	2	3	4	5					
参数代号	d	D	H_y	H_o	H_{o1}					
参数名称	线径/mm		压簧中径/mm	未预压高度	自由高度/mm	有效工作 弹簧圈高度/mm(参考)				
	标准值	公差	标准值	公差	标准值	公差				
日产琴钢丝	0.13	-0.01~-0.04	0.9	±0.03	/	/	16.91	-0.4	8	/
国产不锈钢 06Cr19Ni9	0.13	-0.01~-0.04	0.9	±0.03	17.2	±0.2	16.65	±0.26	/	/
序号	6	7	8	9	10	/				
参数代号	t	n_1	n	H_b	/	/				
参数名称	节距/mm(参考)		总圈数/圈 (参考)	有效工作 弹簧圈数/圈 (参考)	压并高度/mm	旋向	/			
	标准值	公差	标准值	公差	标准值	公差	/			
日产琴钢丝	0.40		46		40	6.2 ±0.35	左	/		
国产不锈钢 06Cr19Ni9	/		46		38	6.2 ±0.35	左	/		

从表 5 可以看出:电连接弹簧由日产琴钢丝材质替换为国产不锈钢 06Cr19Ni9 后,其自由高度 H_o 变大,由 16.51~16.91 mm 变为 16.41~

3 国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧盐雾环境适应性设计及性能验证

3.1 结构设计

某型航空信号灯用日产琴钢丝电连接弹簧由 2 段相同的有效工作弹簧圈,通过中部支承圈串联而成,结构如图 3 所示。

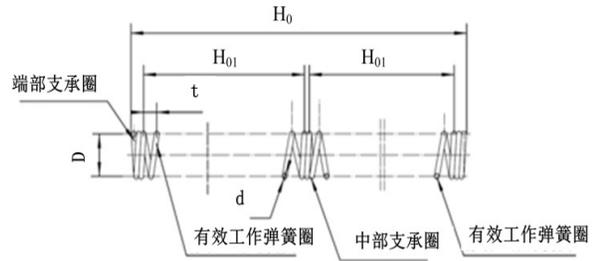


图 3 电连接弹簧结构

Fig. 3 Structure of electric connection spring

按图 3 试制国产不锈钢 06Cr19Ni9 材质电连接弹簧,其结构参数与日产琴钢丝电连接弹簧对比如表 5 所示。

17.41 mm,而其他几何参数未变,均在公差范围内。自由高度 H_o 太大易导致指定高度负荷变化,最终导致上端显示单元无法盖合和按压手感(负

荷反馈)异常,因此需进行装配性和指定高度负荷验证。

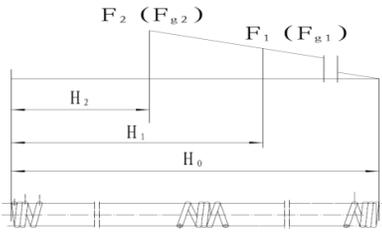
经产线装配高级技能人员验证,变大的自由高度 H_0 并不影响上端显示单元的盖合,装配后按压手感也无异常。进一步对其指定高度的负荷进行验证,结果如表 6 所示。

可以看到,国产不锈钢 06Cr19Ni9 试制的电连接弹簧在高度 6.8 mm 处负荷 0.88 N 满足 0.27~0.34 N 范围要求。而在高度 13.4 mm 处,90% 数

量的弹簧验证负荷满足要求,而 10% 数量的验证负荷为 0.26 N,略低于负荷范围的最低值 0.27 N。进一步将此二种力值的电连接弹簧进行装配性验证,结果显示该二种电连接弹簧和相邻触点衬套、触针等内部零件之间未出现间隙、干涉等不良现象,产品能正常工作,并且按压手感与日产琴钢丝电连接弹簧并无明显区别,说明采用国产不锈钢 06Cr19Ni9 试制的电连接弹簧装配性和指定高度负荷符合要求。

表 6 国产替代材料不锈钢 06Cr19Ni9 材质电连接弹簧负荷验证结果

Table 6 Result of load verification of electric connection spring with domestic substitute material 06Cr19Ni9

电连接弹簧载荷——变形简图		高度		负荷	
代号	数值/mm	代号	要求数值/N(日产琴钢丝)	实测值/N(国产不锈钢 06Cr19Ni9)	
	H_1	13.4	F_1	0.27~0.34	0.26(10% ^a) 0.27~0.34(90% ^b) 0.29(均值)
	H_2	6.8	F_2	0.75~1.05	0.88

注: a:10% 指力值处于 0.26 N 的电连接弹簧比例为 10%; b:90% 指力值处于 0.27~0.34 N 的电连接弹簧比例为 90%。

3.2 耐盐雾腐蚀性能验证

将日产琴钢丝、英制不锈钢和国产不锈钢 06Cr19Ni9 材质电连接弹簧进行《军用装备实验室环境试验方法第 11 部分:盐雾试验》^[33],考察其耐盐雾腐蚀能力,结果如图 4 所示(图(a)中①为国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧(无电镀层);②为英制不锈钢;③为日产琴钢丝电连接弹簧(含电镀层),图(b)中①为国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧(无电镀层);②为英制不锈钢;③为国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧(含电镀层))。



(a) ③为日产琴钢丝电连接弹簧



(b) ③为国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧

图 4 不同材质电连接弹簧盐雾试验后宏观照片

Fig. 4 Macromorphology of electric connection spring of different materials

从图 4 可以看出:盐雾试验后,日产琴钢丝材质电连接弹簧严重腐蚀,弹簧圈之间堆积大量黑色锈蚀物,轻拉即可完全断裂;而英制不锈钢和国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧除了局部区域存在少量褐色锈蚀物外,无其他异常现象,并且均可拉伸至钢丝的直线长度而不断裂,说明国产不锈钢 06Cr19Ni9 材质电连接弹簧与英制不锈钢电连接弹簧具有相似的耐盐雾腐蚀性能,能通过《军用

装备实验室环境试验方法 第 11 部分:盐雾试验》。

3.3 疲劳寿命及负荷验证

随机抽取 18 根在 13.4 mm 高度处负荷为 0.27~0.34 N 的国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧装入 3 台某型航空信号灯进行循环工作寿命试验,编号分别为 1#~3#。随机抽取 18 根在

13.4 mm 高度处负荷为 0.26 N 的国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧装入 3 台某型航空信号灯,继续编号为 4#~6#。试验开始前将每台信号灯点亮,并且每隔 7、17 h 记录一次信号灯是否出现熄灭、卡滞、闪烁或者暗灭(忽明忽暗)等异常状态。经 171 循环工作寿命试验后,验证参数及结果如表 7 所示。

表 7 国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧循环工作寿命试验

Table 7 Test of continuous number of cycles of electric connection spring with domestic substitute material 06Cr19Ni9

试验日期	验证参数及结果						合计试验时间/h	正常(√)/ 失效(×)	合计循环工 作寿命/次数
	0.27~0.34 N(正常负荷)			0.26 N(偏低负荷)					
	单日试验时间/h								
年/月/日—时	1#	2#	3#	4#	5#	6#			
2020-05-08 14:00	0	0	0	0	0	0	0	√	0
2020-05-09 09:00	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	19	√	34 200
2020-05-09 16:00	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	26	√	46 800
2020-05-10 09:00	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	43	√	77 400
2020-05-10 16:00	9	9	9	9	9	9	50	√	90 000
2020-05-11 09:00	12.06	12.06	12.06	12.06	12.06	12.06	67	√	120 600
2020-05-11 16:00	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	75	√	135 000
2020-05-12 09:00	16.56	16.56	16.56	16.56	16.56	16.56	92	√	165 600
2020-05-12 16:00	17.82	17.82	17.82	17.82	17.82	17.82	99	√	178 200
2020-05-13 09:00	20.88	20.88	20.88	20.88	20.88	20.88	116	√	208 800
2020-05-13 16:00	22.14	22.14	22.14	22.14	22.14	22.14	123	√	221 400
2020-05-14 09:00	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	140	√	252 000
2020-05-14 16:00	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	147	√	264 600
2020-05-15 09:00	29.52	29.52	29.52	29.52	29.52	29.52	164	√	295 200
2020-05-15 16:00	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	171	√	307 800 (已达标)

说明:产品正常工作打“√”,不正常工作打“X”;试验频率:30次/min。

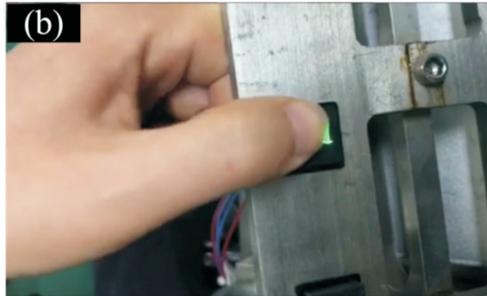
从表 7 可以看出:两种负荷的国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧装灯后均可完成产品要求的“不小于 30 万次循环工作次数”,并且在循环按压过程中一直处于稳定的点亮状态(如图 5(a)所示),说明国产不锈钢 06Cr19Ni9 的电连接弹簧接触可靠性良好,满足额定循环工作寿命要求。

采用人工按压点亮的方式进行循环寿命后功能验证,按压时分别在显示单元部件的四个角、中间位置以及中间偏向四个角的任何位置进行总计

十余次按压(如图 5(b)所示),观察信号灯是否出现异常^[34-36],如熄灭、卡滞、闪烁或者暗灭(忽明忽暗)等状态。结果显示,在显示单元的任何位置按压,信号灯仍均能一直处于稳定的点亮状态,说明国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧具有超额寿命潜质,进一步说明进口零部件国产化时即可仅进行国产材料的环境适应性设计即材料替代分析、结构设计、装配验证及性能验证即可满足装备使用要求。



(a) 试验中点亮状态图



(b) 循环工作 30 多万次后点亮试验状态图

图 5 国产替代材料 06Cr19Ni9 电连接弹簧所制某型航空信号灯点亮试验

Fig. 5 Lighting experiment of some aeronautical signal light with electric connection spring with domestic substitute material 06Cr19Ni9

4 结 论

1) 日产琴钢丝、英制不锈钢电连接弹簧的材料检测分析、材料替代分析结果表明,国产不锈钢 06Cr19Ni9 的化学成分与英制不锈钢电连接弹簧相近,力学性能与日产琴钢丝相近,国产不锈钢 06Cr19Ni9 为合适的国产替代材料。

2) 结构设计结果表明,国产不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧的结构、装配性和指定高度处负荷均满足某型航空信号灯使用要求。

3) GJB 150. 11A 盐雾试验结果表明,国产不锈钢 06Cr19Ni9 制备的电连接弹簧能通过《军用装备实验室环境试验方法 第 11 部分:盐雾试验》,具有良好的盐雾环境适应性,找到了日产琴钢丝材质海洋盐雾腐蚀断裂的原因,并用国产化材料实现了原位替换,提高了环境适应性,保证了产品质量。

4) 疲劳寿命及负荷试验结果表明,国产替代材料不锈钢 06Cr19Ni9 电连接弹簧接触可靠性良好,循环工作寿命可达 30 多万次,满足产品使用要求。

参 考 文 献

- [1] 祝耀昌. 产品环境工程概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
ZHU Yaochang. Introduction to product environmental engineering [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 中国人民解放军总装备部. 装备环境工程术语: GJB 6117-2007[S]. 北京: 总装备部军标出版社发行部.
The General Equipment Department of the People's Liberation Army of China. Material environmental engineering terms: GJB 6117-2007 [S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing House Distribution Department. (in Chinese)
- [3] 丁连芬. 电子设备可靠性热设计手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989.
DING Lianfen. Handbook of reliability design of electronic equipment[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1989. (in Chinese)
- [4] 高贵福, 王刚, 孙建亮, 等. 飞行器环境适应性设计方法研究与实践[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 49-54.
GAO Guifu, WANG Gang, SUN Jianliang, et al. Research and practice of environmental worthiness design of flying object [J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(6): 49-54. (in Chinese)
- [5] 郭玉佩, 王彬文, 杨强, 等. 航空材料的冲击疲劳问题研究进展与展望[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 609-617.
GUO Yupei, WANG Binwen, YANG Qiang, et al. Research progress and prospect of impact fatigue of aeronautical materials [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 609-617. (in Chinese)
- [6] 中国人民解放军总装备部. 装备环境工程通用要求: GJB 4239-2001[S]. 北京: 总装备部军标出版社发行部.
The General Equipment Department of the People's Liberation Army of China. General requirements for materiel environmental engineering: GJB 4239-2001 [S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing House Distribution Department. (in Chinese)
- [7] Department of Defense. Environmental engineering considerations and laboratory tests: MIL-STD-810F[S]. Washington: United States Department of Defense, 2019.
- [8] 赵少奎, 杨永太. 工程系统工程导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
ZHAO Shaokui, YANG Yongtai. Introduction of system engineering on engineering [M]. Beijing: National Defense University Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 刘艳, 陈经纬. C919 民用飞机飞控系统鉴定试验环境设计[J]. 航空工程进展, 2021, 12(6): 153-160.

- LIU Yan, CHEN Jingwei. Environment design of qualification test of C919 civil aircraft flight control system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(6): 153-160. (in Chinese)
- [10] 冯丽娟, 李冬, 易贤. 民用航空发动机进气道防冰系统设计方法研究[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 335-341.
FENG Lijuan, LI Dong, YI Xian. Civil aero-engine inlet anti-icing system power requirement definition methodology investigation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 335-341. (in Chinese)
- [11] 高贵福, 王刚, 孙建亮, 等. 飞行器环境适应性设计方法研究与实践[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 49-54.
GAO Guifu, WANG Gang, SUN Jianliang, et al. Research and practice of environmental worthiness design of flying object[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(6): 49-54. (in Chinese)
- [12] 吴锦平. 装备环境工程技术及应用[J]. 绿色科技, 2019(20): 138-139, 141.
WU Jinping. Equipment environmental engineering technology and its application[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019(20): 138-139, 141. (in Chinese)
- [13] 赵婉, 胡彭炜, 程海龙. 基于关键产品把控的舰船装备环境适应性设计对策分析方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 125-129.
ZHAO Wan, HU Pengwei, CHENG Hailong. Environmental worthiness design countermeasure analysis method based on crucial product control for marine material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 125-129. (in Chinese)
- [14] MALIK A U, AHMAD S, ANDIJANI I, et al. Corrosion behavior of steels in gulf seawater environment[J]. Desalination, 1999, 123(2/3): 205-213.
- [15] SCHMIDT D P, SHAW B A, SIKORA E, et al. Corrosion protection assessment of sacrificial coating systems as a function of exposure time in a marine environment[J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 57(4): 352-364.
- [16] 赵保平, 王刚, 孙兰. 基于产品功能的装备环境工程管理思考[J]. 装备环境工程, 2017, 14(11): 1-6.
ZHAO Baoping, WANG Gang, SUN Lan. Consideration of materiel environmental engineering management based on functional equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(11): 1-6. (in Chinese)
- [17] 李秀玲. 航空装备环境适应性要求[J]. 黑龙江科技信息, 2016, (27): 28.
LI Xiuling. Environmental adaptability requirements of aviation equipment[J]. scientific and technological innovation Information, 2016, (27): 28. (in Chinese)
- [18] 骆晨, 李明, 孙志华, 等. 海洋大气环境中飞机环境损伤和环境适应性[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 101-107.
LUO Chen, LI Ming, SUN Zhihua, et al. Environmental damage and environmental adaptability of the aircraft in marine atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 101-107. (in Chinese)
- [19] 张丹峰, 谭晓明, 戚佳睿. 飞机结构件腐蚀监测研究[J]. 环境技术, 2017, 35(4): 32-34.
ZHANG Danfeng, TAN Xiaoming, QI Jiarui. Research on real-time corrosion monitoring of aircraft structure[J]. Environmental Technology, 2017, 35(4): 32-34. (in Chinese)
- [20] 谢义水. 舰载电子设备的三防设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 83-86.
XIE Yishui. Three-proofing design of shipborne electronic equipment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 83-86. (in Chinese)
- [21] 穆山, 李军念, 王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 59-63.
MU Shan, LI Junnian, WANG Ling. Corrosion control technology of electronic facility in marine atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 59-63. (in Chinese)
- [22] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39, 123.
SUN Zhihua, TANG Zhihui, LI Bin. Comprehensive corrosion control of naval aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35-39, 123. (in Chinese)
- [23] 易智全. 当前航空电子设备腐蚀现状与控制[J]. 科技资讯, 2010(17): 45.
YI Zhiquan. Current avionics corrosion status and control[J]. Science & Technology Information, 2010(17): 45. (in Chinese)
- [24] 肖纪美, 曹楚南. 材料腐蚀学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
XIAO Jimei, CAO Chunan. Material corrosion principles[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [25] 朱敏波, 曹艳荣, 田锦. 电子设备可靠性工程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.
ZHU Minbo, CAO Yanrong, TIAN Jin. Reliability engineering of electronic equipment[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2016. (in Chinese)
- [26] 付桂翠. 电子元器件使用可靠性保证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
FU Guicui. Operational reliability assurance of electronic components[M]. Beijing: National Defense University Press, 2011. (in Chinese)
- [27] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业强基工程实施指南

- (2016-2020)[EB/OL]. [2023-11-08]. <https://www.miit.gov.cn/n973401/n1234620/n1234623/c5542102/part/5542107>.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China Implementation. Guidelines for industrial foundation engineering (2016-2020) [EB/OL]. [2023-11-08]. <https://www.miit.gov.cn/n973401/n1234620/n1234623/c5542102/part/5542107>. (in Chinese)
- [28] 董宇. 老龄飞机维修管理对策研究[J]. 航空维修与工程, 2012(2): 81-83.
- DONG Yu. Research on policy of aging aircraft maintenance management [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2012(2): 81-83. (in Chinese)
- [29] STEWART J R, SWINDALL W J. Material substitution [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999: 333-341.
- [30] 叶永青. 谈谈航空产品的选材[J]. 材料工程, 1991(3): 50-51.
- YE Yongqing. Discussion on the material selection of aeronautical products[J]. Journal of Materials Engineering, 1991(3): 50-51. (in Chinese)
- [31] 李红蕊, 种煜. 飞机零组件材料选用和替代管理程序研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(6): 134-141.
- LI Hongrui, CHONG Yu. Research on management procedure of material selection and substituting for aircraft parts [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(6): 134-141. (in Chinese)
- [32] 王一龙. 飞机金属材料的选用探讨[J]. 冶金与材料, 2018, 38(4): 30, 32.
- WANG Yilong. Discussion on the selection of aircraft metal materials [J]. Metallurgy and materials, 2018, 38(4): 30, 32. (in Chinese)
- [33] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法第11部分: 盐雾试验: GJB 150.11A-2009 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
- The General Equipment Department of the People's Liberation Army of China. Laboratory environmental test methods for military materiel-Part 11: salt fog test: GJB 150.11A-2009[S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department. (in Chinese)
- [34] 恩云飞, 谢少锋, 何小琦. 可靠性物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- YunfeiEN, XIE Shaofeng, HE Xiaoqi. Physics of the reliability[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)
- [35] 谢少锋, 张增照, 聂国健. 可靠性设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- XIE Shaofeng, ZHANG Zengzhao, NIE Guojian. Reliability design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)
- [36] 章晓文, 恩云飞. 电子元器件失效分析技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- ZHANG Xiaowen, YunfeiEN. Failure analysis technology of electronic components[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)