

# 直升机用橡胶密封产品环境试验技术研究进展

高蒙, 孙志华, 刘明, 杨丽媛, 潘峤

(中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 以我国直升机在恶劣环境条件下服役导致密封产品频繁发生失效故障为背景, 对航空橡胶密封材料及产品的环境试验与评价技术进行了梳理总结。分析了橡胶密封材料及产品大气暴露试验、户外自然加速暴露试验等自然环境试验技术的发展现状, 介绍了热空气老化、紫外老化、臭氧老化、湿热、低温、盐雾、霉菌及综合环境试验等橡胶密封材料及产品实验室模拟加速试验技术的作用机理及试验方法。在此基础上, 提出了今后应在橡胶密封产品实验室多因素模拟加速试验技术、密封结构件环境效应数据积累和应用等方面加强研究。

**关键词:** 直升机; 橡胶密封件; 环境试验技术; 环境适应性

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.003

**中图分类号:** TG174

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)05-0018-07

## Research Progress on Environmental Test Technology of Rubber Sealing Products for Helicopter

GAO Meng, SUN Zhi-hua, LIU Ming, YANG Li-yuan, PAN Qiao

(Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**ABSTRACT:** Against the background of frequent environmental failure of sealing products on helicopter serving in severe environment, environmental tests and evaluation technologies of aeronautical rubber sealing material and product were reviewed. Current research status of natural environmental test technologies including atmospheric exposure test and outdoor natural acceleration test of aeronautical rubber sealing material and product were analyzed. Theories and methods of simulation acceleration test technology in laboratory including hot air aging, UV aging, ozone aging, damp heat, low temperature, salt spray, fungus and combined environmental test were introduced. Based on these, two research fields including multi simulation acceleration test technology of rubber sealing products in laboratory and environmental effect data accumulation and applications of sealing components should be emphasized in future researches.

**KEY WORDS:** helicopter; rubber sealing products; environmental test technology; environmental adaptability

直升机可担负运输、搜救、预警等多种用途, 在我国航空力量中占据极为重要的地位, 因此, 我国正

大力发展多种直升机型号。然而, 因执行任务需要, 直升机的服役环境往往非常严酷恶劣, 如我国高原荒

收稿日期: 2019-11-29; 修订日期: 2020-01-05

Received: 2019-11-29; Revised: 2020-01-05

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目 (JSHS2017213B001)

Fund: National Defense Science, Technology and Industrial Technology Basic Scientific Research Project (JSHS2017213B001)

作者简介: 高蒙 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境试验与观测、表面防护等。

Biography: GAO Meng (1988—), Female, Master, Engineer, Research focus: environmental test and observation, surface protection, etc.

漠地区、北部极寒地区、沿海地区等。长期处于这些环境中,直升机各个部件失效故障频发,其中由密封件损伤而导致密封泄漏、功能丧失的情况占比极大。密封件虽小,却极其关键,一个不起眼的密封元件失效,就能严重影响直升机装备的使用性、可靠性及安全性<sup>[1-3]</sup>。因此,需要通过环境试验来对密封件的环境损伤(老化失效等)及环境适应性进行研究及评价。文中以直升机上典型密封产品橡胶密封件为对象,对其环境试验技术进行了梳理总结,并在此基础上,提出了直升机密封产品环境适应性研究的发展方向。

## 1 橡胶密封件环境试验与评价技术

### 1.1 自然环境试验

自然环境试验是评价材料及产品环境适应性的

一种重要手段,对于提高产品质量,保证产品的环境适应性和可靠性起着非常重要的作用,可用于产品全寿命周期中的方案设计、工程研制以及使用等阶段。经过多年的探索和研究,自然环境试验技术已逐步形成了相应的试验标准规范,对典型气候地址、设备、暴露方式以及投放周期的选择都有相应的要求<sup>[4-5]</sup>。为了满足我国武器装备对典型或严酷环境的试验需求,我国于 2001 年组建了国防大气环境试验站网,各国防大气环境试验站点及其环境气候特征见表 1<sup>[6]</sup>。依托该站网,各行业单位相继开展了不同种类材料及零部件的自然环境适应性规律研究,积累了大量常用材料及零部件的环境适应性数据。如北京航空材料研究院已积累了 10 余种典型航空橡胶密封材料在不同气候环境下的环境效应数据,并获得了 8~10 年的大气老化规律。

表 1 国防大气环境试验站及其主要环境特征

Tab.1 National defense atmospheric environment test station and its main environmental characteristics

试验站	气候环境	年平均 温度/℃	年降 水量/mm	年平均相 对湿度/%	日照 时数/h	太阳总辐射量/ (MJ·m <sup>-2</sup> )	Cl <sup>-</sup> 沉积率/ (mg·100 cm <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )
北京站	中温带亚湿润内陆性气候	11.8	458	60	2232	5368	0.021
万宁站	北热带湿润型海洋气候	24.6	1942	86	2154.5	4826	0.388
江津站	亚热带湿热酸性大气环境	18.5	1203	81	1392	2975	—
拉萨站	高原低气压辐射环境	4.5	444.8	55	3100	7598	—
敦煌站	干热沙漠强辐射环境	10.8	35	41	3057	6560	—
漠河站	北寒带寒冷森林型气候	-1.8	491	66	1942	—	—
西双版纳站	热带雨林气候	21.6	1713	84	1716	—	—
西沙站	中热带湿热海洋气候	27.0	1526	82	2675	6240	1.123

#### 1.1.1 大气暴露试验

自然环境下的大气暴露试验是自然环境试验最常用的试验方法。按暴露方式又可分为户外暴露试验、棚下暴露试验、库内暴露试验等。

1) 户外暴露试验,即试样静置暴露在户外自然大气环境中,适用于直升机外露部位用橡胶密封产品,如舱门密封橡胶带。

2) 棚下暴露试验,即试样静置暴露在有顶棚盖的敞开式或百叶窗式棚下,不直接受太阳辐照和雨淋作用,适用于直升机上与空气连通的半封闭区域的橡胶密封产品,如口盖密封垫。

3) 库内暴露试验,即试样静置暴露在库房或其他建筑物内,适用于直升机上与外界大气环境隔离的内部区域的橡胶密封产品或需在室内贮存的橡胶密封制件。

国外有学者<sup>[7]</sup>将不同橡胶样品置于温和、干热和湿热三个不同环境进行自然老化 40 年,并对材料硬度的变化进行了相关研究。王荣华等<sup>[8]</sup>对氟硅橡胶材料在全国 5 个典型气候地区(万宁、漠河、敦煌、西双版纳和济南)进行了库内贮存试验,建立了 5 个地

区受力状态下的贮存寿命方程,以压缩永久变形保留率下降到 50%作为老化的指标,预测压缩率为 25%条件下,西双版纳、万宁、济南、敦煌、漠河等 5 个地区氟硅橡胶的寿命依次为 419、944、1043、2031、3330 d。

#### 1.1.2 户外自然加速暴露试验

由于传统的大气暴露试验存在周期长、重现性较差的缺点,为了缩短自然环境试验周期,同时保留试验结果的真实性和可靠性,国内外开发了在自然条件下的加速暴露试验技术,即通过人为强化某些环境因素而加速样品失效。目前,针对橡胶等高分子材料发展比较成熟的自然加速试验技术有橡胶动态暴露试验、跟踪太阳暴露试验、跟踪太阳反射聚能暴露试验等。

1) 橡胶动态暴露试验,可以使橡胶在大气环境中处于往复拉伸或屈服状态下进行老化,研究橡胶在应力状态下的老化规律和评价橡胶制品的性能。

2) 跟踪太阳暴露试验,通过活动暴露支架对太阳跟踪转动来强化光和热的效应,从而加速橡胶材料或制品暴露面上试样的老化速度,可强化大约 2 倍固

定水平角的太阳辐射。

3) 跟踪太阳反射聚能暴露试验, 在跟踪太阳暴露上增加带反射镜的系统, 经聚光反射到试样表面, 增大试样收到的太阳辐射量, 可大约强化 8 倍跟踪太阳辐射。

以上三种加速暴露试验技术主要是强化太阳辐射的作用, 除此之外, 还有一些用于强化光的热效应作用的试验技术(如黑箱暴露试验及玻璃框暴露试验等)。户外自然加速暴露试验技术在国外一经开发出来, 很快得到了推广, 获得许多企业及单位的积极采用, 并形成了 ISO、ASTM 等试验标准。然而, 国内对于该技术在橡胶密封材料及产品环境适应性评价的标准化应用上仍需开展进一步的研究<sup>[9-11]</sup>。

## 1.2 实验室模拟加速试验

实验室模拟自然环境加速试验(简称模拟加速试验)方法是为了研究自然环境下材料腐蚀/老化及产品失效主要影响因素的相互作用规律及其机理, 快速评定产品的环境适应性, 并预测其长期可能发生的环境损伤情况和使用寿命。针对橡胶制品, 最早发展起来的实验室加速老化试验是热空气加速老化、人工气候加速老化(氙灯等)、湿热老化、人工抗霉等单项试验方法, 通过以上加速老化试验可以获得单一环境因素对橡胶产品性能的影响作用。

### 1.2.1 热空气老化试验

橡胶在氧气和温度的作用下, 会发生热氧老化, 导致橡胶出现交联、降解等化学反应。交联使材料变硬、变脆、伸长率下降; 降解使材料分子量下降, 材料变软而发黏, 抗张强度和模量下降。因此, 实验室多采用热空气(烘箱)加速老化试验方法来研究氧气与温度因素下橡胶的老化机理。这种方法是将试验样品暴露在一定温度、风速条件下的烘箱内, 并周期性地取样、检测试样的外观及性能变化, 从而评定其耐热性。苏正涛等<sup>[12]</sup>研究了飞机高温影响区用密封材料苯基硅橡胶 PS5360 在不同条件下的热空气老化性能, 以硬度变化 15°且拉伸伸长率变化-50%作为橡胶失效判据, 得出 PS5360 在 200、250、300 °C 可以连续工作的时间分别为 1200、360、48 h。

此外, 橡胶在贮存条件下也主要发生热氧老化, 还可利用热空气加速老化试验估算橡胶的贮存寿命和使用寿命, 即在一定温度范围内, 假定橡胶老化动力学符合活化能不变的 Arrhenius 模型, 通过三个以上温度点的加速老化结果外推计算而获得。夏洪花等<sup>[13]</sup>对航空通用的丁腈橡胶在 353、363、373、383 K 共 4 个温度条件下进行加速老化试验, 通过动力学方程  $P=f(t)$  与 Arrhenius 方程结合起来, 得到  $P=F(t, T)$  的表达式, 以恒定压缩永久变形率  $\epsilon=25\%$  作为密封失效的临界值, 预测丁腈橡胶在 25 °C 贮存条件下的寿命约为 10.2 年。

耐热老化性能是橡胶材料及产品最为关注的性能指标之一, 在相关的材料及产品规范中均有规定。我国也已将热空气加速老化试验方法标准化, 制定了 GB/T 3512 等标准。需要指出的是, 热空气加速老化试验方法是以温度作为加速应力, 未考虑光照、辐射、雨水等环境因素对橡胶产生的效应, 因此该方法不能全面地反映橡胶密封件在实际环境中使用时的性能变化。

### 1.2.2 紫外老化试验

太阳辐照中的紫外光是导致橡胶密封件发生光(氧)老化的最主要原因, 这种老化是橡胶密封件“大气老化”的主要形式。有研究者认为<sup>[14]</sup>, 光氧老化是因为橡胶中的分子在光的作用下转变为激发态分子, 在有氧的情况下, 产生自由基, 进而发生自由基链式反应, 并且光氧化反应一旦开始, 可再引发一轮又一轮新的光氧化反应。实验室采用紫外辐照试验方法进行橡胶光(氧)老化机理研究, 该方法是将试样暴露在一定波长范围或指定波长的紫外光下(可涵盖温度或冷凝水作用), 经过一定暴露时间后, 检测试样的颜色外观、力学性能等指标的变化。国内常用相关试验标准有 GB/T 16585 等。

直升机与固定翼飞机相比, 应用在外露部位的橡胶密封产品数量及种类较多, 因此需重点关注并考察相关橡胶材料的耐紫外老化性。有学者研究发现<sup>[15]</sup>, 直升机外露上表面区域用三元乙丙橡胶 (EPDM) 在光氧老化中引发交联反应的时间明显短于热氧老化, 且材料老化的诱导期很短, 在短时间内即出现材料的氧化降解。相同紫外辐射条件下, 材料的光老化和热氧老化程度均随时间的延长而加剧。SEM 显示, 光氧老化降解程度比热氧老化更为严重。

### 1.2.3 臭氧老化试验

臭氧是空气中含量较为稀少的气体之一, 具有很高的化学活性, 容易与橡胶中的不饱和键作用, 使材料发生降解。当橡胶处于拉伸状态等应力作用下时, 臭氧将从橡胶的表面缺陷渗透至材料内部, 与分子发生反应, 引起分子链的交联、断裂, 宏观上表现为材料出现龟裂、性能下降等臭氧老化现象<sup>[16]</sup>。实验室一般采用臭氧老化试验方法对橡胶的耐臭氧老化性能进行评价和研究, 相关的试验标准有 GB/T 7762 等。

### 1.2.4 湿热试验

当空气中湿度过高时, 会在橡胶件的表面附着一层肉眼不可见的水膜。水膜中的水分子通过橡胶的毛细孔和分子间隙渗透、扩散到其内部, 使其绝缘性能降低, 体积膨胀变形, 从而加速橡胶的老化变质。目前, 实验室评价橡胶耐湿热大气影响或耐湿热老化能力常用的试验方法有 GJB 150/150A.9 以及 GB/T 15905 等。沈尔明等<sup>[17]</sup>对航改燃气轮机中典型密封件用丁腈橡胶、氟橡胶与氟硅橡胶三种材料开展了湿热

老化研究分析,先经过 1.5 年储存期老化试验后,再依据 GJB 150.9 方法分别进行 0、5、10、20、60 天的湿热试验。结果表明,湿热环境对丁腈橡胶影响较小,氟橡胶的吸湿量较大,但没有对力学性能产生明显的老化影响,而氟硅橡胶在储存后期已出现明显的老化迹象,湿热试验后力学性能变化显著。

### 1.2.5 低温试验

低温环境是造成橡胶密封件失效的一个重要因素。在较低温度下,分子热运动减弱,分子链段及分子链被冻结,橡胶会逐渐失去弹性。动力系统橡胶密封材料在低温条件下,出现微裂纹的概率增加,橡胶变硬,密封能力降低。当长期在低温下使用或贮存时,会造成密封失效<sup>[18]</sup>。直升机上用典型橡胶密封材料的低温性能见表 2<sup>[19]</sup>,可以看出,氯丁橡胶与氟橡胶的耐寒性较差,当在高原高寒地区贮存和使用时,易产生结晶硬化和脆化,失去弹性,存在密封泄漏的风险。因此,相关单位应着重开展橡胶材料及产品在低温环境下的考核评价。常用的试验方法有 GJB 150/150A.4 等。

表 2 直升机用典型橡胶密封材料低温性能  
Tab.2 Low temperature performance of typical rubber sealing materials for helicopters

序号	种类	典型牌号	低温性能	
			脆性 温度/°C	压缩耐寒 系数
1	丁腈橡胶	5860	-55	0.22
2	三元乙丙橡胶	8360-1	-60	—
3	硅橡胶	SE6180	-65	0.45
4	氯丁橡胶	4161	-30	—
5	氟橡胶	FX-2	-30	—

### 1.2.6 盐雾试验

随着直升机在沿海环境下服役任务的日益增多,橡胶密封件不断暴露出盐雾腐蚀/老化问题,严重地影响了相关部件的使用性能<sup>[20]</sup>。研究表明,在盐雾环境下,水蒸气会携带 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>和氧气沿微裂纹渗入橡胶内部,对表面裂纹产生冲刷、摩擦作用,使裂纹逐渐增大且加深。随着裂纹的发展,原来不连通的许多微裂纹连接成大裂纹,当几条大裂纹汇聚在添加剂颗粒处时,颗粒脱落,在橡胶内形成孔洞,造成缺陷<sup>[21]</sup>。鉴于盐雾环境对橡胶性能的影响情况,相关研究及使用单位逐步要求在材料研制以及密封产品考核阶段开展盐雾试验评价。目前,实验室常用的盐雾试验方法主要分为连续喷雾试验及间歇/循环喷雾试验两类,涉及的试验标准主要有 GB/T 10125、GB/T 35858 以及 GJB 150/150A.11。黄琪等<sup>[22]</sup>针对沿海地区橡胶密封材料老化现象进行了表面防护试验研究,

通过盐雾试验对涂层的防护性能进行了考核。结果显示,未防护橡胶样品在经过 196 h 盐雾试验后,表面出现明显起泡现象,而涂覆防老化涂层橡胶样品则未出现起泡、掉皮等现象,证明此防护涂层耐盐雾能力较好。

### 1.2.7 霉菌试验

霉菌对橡胶类高分子材料的侵蚀(降解作用)主要是通过生物合成所产生的酶蛋白来分解高聚物。此外,橡胶中含有的添加剂为霉菌侵蚀创造了条件,因为大多数添加剂(如增塑剂和稳定剂等)都是低分子材料,它们更容易受到霉菌降解,在橡胶件的表面形成肉眼可见的霉斑。我国东海、南海地区属于湿热或亚湿热海洋环境,空气温度高,相对湿度大,因此在直升机的内部封闭区域或飞机机库等潮湿区域容易滋生霉菌,导致橡胶密封件容易发生霉菌侵蚀。目前,实验室一般依据 GJB 150/150A.10 开展霉菌试验,模拟并加速自然环境霉菌种类的生长情况,以评定橡胶材料及制件的长霉程度。

### 1.2.8 综合环境试验

随着研究的深入,人们发现橡胶密封产品在实际环境中发生老化和失效往往是多种环境因素综合作用的结果。因此为了更加真实地模拟自然环境的综合环境效应,人们开始探索实验室综合环境试验技术。国外有学者设计并制造了一个模拟橡胶户外加速老化的试验箱,可同步实现热老化、臭氧老化、紫外 UV 老化、动态拉伸以及水溶液老化。结果表明,该加速老化装置比传统的单因素循环老化测试更符合实际的户外老化结果<sup>[23]</sup>。

因多因素综合环境试验设备从设计研制到应用仍有一定的差距,国内外相关单位研究并建立了以加速试验环境谱为基础的实验室模拟加速试验技术。该环境试验技术能够在一定程度上反映并加速产品在自然环境中所遭受的环境因素-时间历程,预测并评估产品在某气候环境下的使用寿命。例如美国空军针对 F-18 飞机在亚热带沿海地区服役的环境条件而制定了涂层加速试验环境谱及试验程序(简称 CASS 谱)<sup>[24]</sup>,1 个加速试验周期包含湿热试验、紫外照射、热冲击、低温疲劳、盐雾等 5 个环境谱块(如图 1 所示),可当量实际环境使用 1 年。该谱主要反映了飞机停放时,早晚多受高湿、盐雾作用,白天受紫外辐射、热冲击及载荷作用的实际情况。参考 CASS 谱,王哲<sup>[25]</sup>等设计了某型飞机用新型密封材料的紫外-周浸加速试验环境谱,对 5860 丁腈橡胶、G198 硅橡胶和 JGL-103 密封剂的海洋大气环境适应性进行了考核评价,并与海南万宁试验站大气暴晒试验结果作对比,发现以上牌号密封材料的海洋大气环境适应性均在可接受的范围内,且实验室模拟加速试验结果与实地大气暴露试验结果接近,具有一定的参考性。

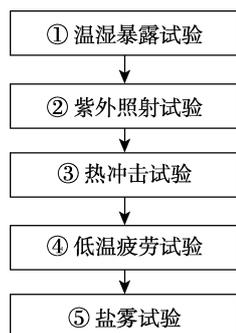


图1 涂层加速试验环境谱 (CASS 谱) 的基本构成  
Fig.1 Basic composition of CASS

### 1.3 环境损伤评价及研究方法

通常对于橡胶件发生环境损伤 (老化或失效) 主要从外观、力学性能、物理性能以及老化机理等方面进行评价分析。橡胶件外观评价主要考察是否存在变硬、龟裂或粉化等现象, 一般通过目视或光学显微镜进行观察; 力学性能则主要考察拉伸强度、扯断伸长率、邵尔硬度、压缩等指标的变化, 以评价橡胶相应的力学性能是否满足使用要求, 一般通过试验机或测量设备进行测试; 物理性能主要考察橡胶的耐介质性、溶胀率等指标的变化; 分析橡胶件老化失效机理则通过微观形貌观察、成分测定、分子结构测定等进行研究, 常用的方法有核磁共振法 (NMR)、红外光谱法 (FTIR)、热重法 (TG/TGA)、X 射线能谱法 (XPS)、扫描电镜法 (SEM) 等<sup>[26-28]</sup>。通过对以上各项性能指标测试结果的综合分析, 结合橡胶密封件的实际使用要求而对其环境适应性做出评价。

## 2 橡胶密封产品环境适应性研究发展方向及建议

1) 加强橡胶产品实验室多因素模拟加速试验技术的研究。目前, 橡胶材料和制品的实验室加速试验方法仍以热空气加速老化试验为主, 以评价及预测橡胶在贮存条件下的寿命情况, 寿命预测模型的建立则主要遵循 Arrhenius 公式。随着橡胶种类及服务环境的日益复杂, 常用的单一因素实验室加速老化试验和寿命评估模型均已不再适用<sup>[29]</sup>。为了更真实地模拟实际环境对橡胶材料老化以及橡胶制品的破坏作用, 应加强多因素模拟加速试验技术的研究。一是开发先进的综合环境试验设备, 模拟盐雾、紫外辐射、太阳辐射、腐蚀性气体 (SO<sub>2</sub> 等) 等海洋大气环境因素的综合作用<sup>[30]</sup>; 二是注重开展适用于橡胶密封产品的模拟实际环境加速试验环境谱的研究和应用工作。

2) 注重密封结构件环境效应数据的积累和应用。随着多用途、多种型号直升机等武器装备的快速发展, 材料级别的环境效应数据及环境适应性规律已不

能满足有关单位关于直升机研发、设计、使用及维护维修的需求。因此, 环境适应性评价对象应逐渐从传统的材料试片过度到模拟件、受力件、结构件、产品零部件、功能件等复杂样品, 所获得的各类型样品的环境效应数据才能真实、有效地为保障相关产品及部件在严酷环境下服役的功能性、使用性和可靠性提供支撑。据统计, 针对直升机上用某些典型牌号的橡胶材料或橡胶制件, 如氟橡胶、硅橡胶等, 已积累了最长 10 年的海洋大气环境效应数据, 但针对能反映密封结构模拟试验件的数据积累却严重缺失, 亟需开展相关研究工作以满足直升机在各种气候环境安全、高效服役的环境适应性需求。

### 参考文献:

- [1] 张彩先, 蒋晓彦, 孙艳, 等. 直升机东南沿海地区环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(1): 66-70.  
ZHANG Cai-xian, JIANG Xiao-yan, SUN Yan, et al. Research on Helicopter Environmental Worthiness in Southeast Coastal Areas[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(1): 66-70.
- [2] 骆晨, 李明, 孙志华, 等. 海洋大气环境中飞机的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 Zhi-hua, et al. Environmental Damage and Environmental Adaptability of the Aircraft in Marine Atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 101-107.
- [3] 吴文涛, 艾剑波, 郭俊贤. 某旋翼液压阻尼器动密封故障分析与处理[J]. 直升机技术, 2013(4): 37-40.  
WU Wen-tao, AI Jian-bo, GUO Jun-xian. Analysis and Solution of Rotor System Hydraulic Lead-lag Damper Dynamic Sealing Problem[J]. Helicopter Technique, 2013(4): 37-40.
- [4] 刘明, 高蒙, 张兴华, 等. 橡胶材料自然环境老化失效研究进展[J]. 环境技术, 2015, 33(6): 31-34.  
LIU Ming, GAO Meng, ZHANG Xing-hua, et al. Progress of Study on Rubbers Environmental Aging[J]. Environmental Technology, 2015, 33(6): 31-34.
- [5] 苏艳, 张伦武, 朱玉琴. 自然环境试验剪裁技术探讨[J]. 标准科学, 2014(4): 47-50.  
SU Yan, ZHANG Lun-wu, ZHU Yu-qin. Study on Natural Environmental Test Tailoring Technology[J]. Standard Science, 2014(4): 47-50.
- [6] 秦晓洲, 郭倩旋. 自然环境试验站典型环境特征及腐蚀图谱[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010: 51-62.  
QIN Xiao-zhou, GUO Qian-ni. Typical Environmental Characteristics and Corrosion Map of Natural Environment Test Station[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010: 51-62.
- [7] BROWN R P, SOULAGNET G. Microhardness Profiles

- on Aged Rubber Compounds[J]. *Polymer Testing*, 2001(20): 295-303.
- [8] 王荣华, 李晖, 李倩倩, 等. 自然环境贮存条件下氟硅橡胶的寿命预测[J]. *合成橡胶工业*, 2013, 36(5): 359-364.  
WANG Rong-hua, LI Hui, LI Qian-qian, et al. Life Prediction of Fluorosilicone Rubber Based on Natural Environment Storage Conditions[J]. *China Synthetic Rubber Industry*, 2013, 36(5): 359-364.
- [9] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 63-64.  
WANG Xue-hua. *Natural Environment Test Technology*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003: 63-64.
- [10] 杨晓然, 王俊芳, 殷宗莲. 气候环境试验技术进展及其应用[J]. *上海涂料*, 2013, 51(9): 38-42.  
YANG Xiao-ran, WANG Jun-fang, YIN Zong-lian. Progress and Application of Climatic Environmental Test Technologies[J]. *Shanghai Coatings*, 2013, 51(9): 38-42.
- [11] 肖敏, 周漪, 杨万均. 典型环境中三种自然环境加速试验方法的环境强化效果分析[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(2): 26-31.  
XIAO Min, ZHOU Yi, YANG Wan-jun. Analysis on Enhanced Environmental Effect of Three Different Natural Environmental Accelerated Test Methods in Typical Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(2): 26-31.
- [12] 苏正涛, 秦瑞祥, 朱华, 等. 苯基硅橡胶的热空气老化性能研究[J]. *有机硅橡胶*, 2012, 26(4): 248-250.  
SU Zheng-tao, QIN Rui-xiang, ZHU Hua, et al. Thermal Stability of Hot Air Aging of Methylphenylvinyl Silicone Rubber[J]. *Silicone Material*, 2012, 26(4): 248-250.
- [13] 夏洪花, 王新坤, 吴灿伟. 橡胶材料的老化及寿命预测方法研究[J]. *有机硅橡胶*, 2011, 31(S1): 219-222.  
XIA Hong-hua, WANG Xin-kun, WU Can-wei. Study on Aging and Method on Shelf-life Predictions of Rubber Materials[J]. *Silicone Material*, 2011, 31(S1): 219-222.
- [14] 王荣华, 李晖, 孙岩, 等. 橡胶材料加速老化研究现状及发展趋势[J]. *装备环境工程*, 2013, 51(9): 66-70.  
WANG Rong-hua, LI Hui, SUN Yan, et al. Research Status and Development Trend of Accelerated Aging of Rubber Materials[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(4): 66-70.
- [15] WANG W Z, QU B J. Photo-and Thermo-oxidative Degradation of Photocross-linked Ethylene-propylene-diene Ter-polymer[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2003, 81(3): 531-537.
- [16] 江皖兰编译. 周期性形变及臭氧对橡胶寿命的影响[J]. *世界橡胶工业*, 1999, 26(4): 33-34.  
JIANG Wan-lan. Influence of Periodic Deformation and Ozone on Rubber Life[J]. *The World Rubber Industry*, 1999, 26(4): 33-34.
- [17] 沈尔明, 李晓欣, 王志宏, 等. 长期储存后橡胶材料湿热老化分析[J]. *材料工程*, 2013(7): 87-91.  
SHEN Er-ming, LI Xiao-xin, WANG Zhi-hong, et al. Hygrothermal Aging Analysis of Rubber Materials After Long-term Storage[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013(7): 87-91.
- [18] 谭汉清. 某小型涡扇发动机低温密封问题解决措施及贮存能力研究[J]. *战术导弹技术*, 2011(5): 73-80.  
TAN Han-qing. Research on the Storing Capability and Measure to Solve Rubber Seal Problem Under Low Temperature in a Certain Type of Turbofan Engine[J]. *Tactical Missile Technology*, 2011(5): 73-80.
- [19] 刘嘉, 苏正涛, 栗付平. 航空橡胶与密封材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 3-4.  
LIU Jia, SU Zheng-tao, LI Fu-ping. *Aviation Rubber and Sealing Materials*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 3-4.
- [20] 柳文林, 穆志韬, 段成美. 现役直升机结构腐蚀原因及控制[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2005, 17(5): 358-359.  
LIU Wen-lin, MU Zhi-tao, DUAN Cheng-mei. Corrosion Control and Causation Analysis for Helicopter Structures in Service[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2005, 17(5): 358-359.
- [21] 常新龙, 姜帆, 惠亚军. 导弹橡胶密封件环境失效研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(4): 59-62.  
CHANG Xin-long, JIANG Fan, HUI Ya-jun. Environmental Failure Analysis of Rubber Sealing Components of Certain Missile[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8(4): 59-62.
- [22] 黄琪, 梁志杰, 冯斌, 等. 乙丙橡胶密封件耐老化防护涂层的试验研究[J]. *涂料工业*, 2010, 40(4): 22-24.  
HUANG Qi, LIANG Zhi-jie, FENG Bin, et al. Study on Aging Resistant Coatings for Ethylene-Propylene-Diene Monomer(EPDM) Rubber Sealing Parts[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2010, 40(4): 22-24.
- [23] BART J L, JOSE M C, FREDERICK I. Development of a Service-simulation, Accelerated Aging Test Method for Exterior Tire Rubber Compounds II. Design and Development of an Accelerated Outdoor Aging Simulator[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2002, 75(2): 213-227.
- [24] ROBERT N M, SCHUESSIER R L. Predicting Service Life of Aircraft Coating in Various Environments[J]. *Corrosion*, 1989(4): 17-21.
- [25] 王哲, 雍兴跃, 范林, 等. 典型非金属材料海洋环境适应性技术研究[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(3): 60-64.  
WANG Zhe, YONG Xing-yue, FAN Lin, et al. Technical Research on Ocean Environmental Adaptability of Typical Nonmetal Materials[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(3): 60-64.
- [26] YU H P, LI S D, ZHONG J P, et al. Studies of Thermo-oxidative Degradation Process of Chlorinated Natural Rubber from Latex[J]. *Thermochimica Acta*, 2004, 410(1): 119-124.

- [27] KUMAR A, COMMEREUC S, VERNEY V. Ageing of Elastomers: A Molecular Approach Based on Rheological Characterization[J]. *Thermochimica Acta*, 2004, 410(1): 119-124.
- [28] 张录平, 李晖, 刘亚平, 等. 橡胶材料老化试验的研究现状及发展趋势[J]. *弹性体*, 2009, 19(4): 60-63.  
ZHANG Lu-ping, LI Hui, LIU Ya-ping, et al. Research Status and Development Trend on Aging Test of Rubber Materials[J]. *China Elastomerics*, 2009, 19(4): 60-63.
- [29] 张国彬, 王玉森, 许文, 等. 航天用硅橡胶制品贮存试验技术研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(1): 26-29.  
ZHANG Guo-bin, WANG Yu-sen, XU Wen, et al. Research Progress on Storage Aging Tests Technology of Silicone Rubber for Spaceflight Application[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013, 43(1): 26-29.
- [30] 周阳红生, 张洪彬, 薛海红, 等. 我国综合环境试验现状与发展建议[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(5): 44-47.  
ZHOU Yang-hong-sheng, ZHANG Hong-bin, XUE Hai-hong, et al. Current Situations and Development Suggestions of Combined Environmental Test in China[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(5): 44-47.