

专题——航空发动机环境敏感构件腐蚀/老化行为与环境谱编制

发动机典型寿命敏感件环境谱加速 技术研究现状

唐庆云¹, 刘天娇¹, 胡毅², 刘俊邦¹, 张洪彬^{1*}

(1.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 511370;
2.中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412000)

摘要: 对发动机寿命敏感件环境谱加速技术的研究现状进行分析。从加速环境谱的编制原则、编制方法以及当量关系的确定和验证等方面, 详细介绍了加速环境谱的概念内涵。发动机的使用寿命主要受金属敏感件的腐蚀和非金属敏感件的老化制约, 重点从常规加速腐蚀试验、多因素综合腐蚀试验和高温加速腐蚀试验等 3 个方面阐述了加速腐蚀试验方法。从液体介质老化、热氧老化、综合环境老化等方面介绍了以橡胶为代表的非金属加速老化试验方法。最后指出目前当量关系确定方法的局限性和多因素综合模拟方法研究方面的欠缺, 提出应综合材料、腐蚀、力学、环境等多学科的相关理论和实践, 制定更加科学合理的当量关系确定方法, 以及注重新型试验设备的研发等建议。

关键词: 环境谱; 加速试验; 腐蚀; 老化; 寿命评价; 发动机; 当量关系

中图分类号: V216; TB304

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)12-0001-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.001

Research Status of Environmental Spectrum Acceleration Techniques for Typical Life Sensitive Parts in Engines

TANG Qing-yun¹, LIU Tian-jiao¹, HU Yi², LIU Jun-bang¹, ZHANG Hong-bin^{1*}

(1. CEPREI, Guangzhou 511370, China; 2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Hunan Zhuzhou 412000, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the research status of environmental spectrum acceleration techniques for life sensitive parts in engines. The concept and connotation of accelerated environmental spectrum were introduced in detail from the compiling principle, compiling method and the determination and verification of equivalent relation. The service life of engine was mainly restricted by the corrosion of metal sensitive parts and the aging of non-metal sensitive parts. The accelerated corrosion test methods were mainly described from three aspects: conventional accelerated corrosion test, multi-factor comprehensive test and high temperature accelerated corrosion test. The accelerated aging test methods of non-metals represented by rubber were introduced from the aspects of liquid medium aging, hot oxygen aging and comprehensive environmental aging. Finally, it pointed out the limitations of the current method of determining equivalent relation and the deficiency of the research of

收稿日期: 2023-11-01; 修订日期: 2023-12-04

Received: 2023-11-01; Revised: 2023-12-04

基金项目: 广州市科技计划项目(2023A04J0262)

Fund: Science and Technology Planning Project of Guangzhou (2023A04J0262)

引文格式: 唐庆云, 刘天娇, 胡毅, 等. 发动机典型寿命敏感件环境谱加速技术研究现状[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 1-9.

TANG Qing-yun, LIU Tian-jiao, HU Yi, et al. Research Status of Environmental Spectrum Acceleration Techniques for Typical Life Sensitive Parts in Engines[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 1-9.

*通信作者(Corresponding author)

multi-factor integrated simulation method, and put forward the suggestion that a more scientific and reasonable method of determining equivalent relation should be formulated based on the relevant theories and practices of materials, corrosion, mechanics, environment science and other disciplines, and attention should be paid to the research and development of new test equipment.

KEY WORDS: environmental spectrum; accelerated test; corrosion; aging; life evaluation; engine; equivalent relation

涡轴发动机是直升机的主要动力装置,低空、近海飞行是其主要任务场景。与涡扇、涡喷发动机相比,其寿命指标要求明显更长。因此,涡轴发动机在寿命周期内受环境条件的影响更为显著。近年来,我国涡轴发动机故障中,因腐蚀/老化环境影响导致的结构失效主要集中在压气机叶片、涡轮叶片、机匣和本体/成附件橡胶件等环境敏感构件上^[1-2]。金属腐蚀和非金属的老化是发动机发生结构损坏和功能性能下降的重要因素。

为了研究环境敏感件的腐蚀/老化行为,对其服役环境的模拟就显得尤为重要。为缩短试验周期,通常的做法是在实验室进行人工加速试验,为此需要建立对应的加速环境谱。由于金属腐蚀和非金属老化在失效模式、失效机理以及加速模拟方法上存在显著区别,本文对金属腐蚀和橡胶老化的环境谱加速技术研究现状进行了分析,为开展发动机敏感构件的加速腐蚀/老化试验提供借鉴。

1 加速环境谱的概念内涵

1.1 加速环境谱

装备的腐蚀和老化与其服役环境密切相关,服役环境是装备使用寿命的重要影响因素之一。服役环境包括自然环境、诱发环境以及局部环境等,尽管服役环境受到服役时间、地理位置等因素的影响而存在不确定性,但是其变化往往存在一定的周期性^[3]。基于装备经历的环境腐蚀/老化历程,在实验室内通过一定的方法以“谱”的形式^[4],等效地将环境因素作用于研究对象,在短时间内对其腐蚀/老化行为进行评价,是目前工程上常用的研究手段。因此,加速环境谱在装备环境工程领域具有重要的研究价值。

1.2 编制原则

由于装备经历的实际环境复杂多样,完全模拟真实的环境条件在技术上和经济上不具备可操作性。在编制加速环境谱时,一般采用“宜粗不宜细”的处理方式^[3-7],应抓住主要环境影响因素,编制原则主要有:

1) 相关性。在试验中再现具体对象实际服役过程出现的损伤形式、损伤特征和腐蚀产物的组成成分^[5-8]。这实际上是要求加速条件与实际条件下失效模式和失效机理的一致性,是编制加速环境谱的前提。

2) 加速性。大大缩短实际环境下腐蚀历程的时间,使加速腐蚀试验周期和费用减少到工程可接受的

范围^[5-8],这是编制加速环境谱的根本目的所在。

3) 可实施性。能够依据现试验设备能力完成全部谱块的试验,在试验实施上不能太复杂^[8]。这是加速环境谱的客观限制。

4) 当量关系。加速环境谱与实际环境之间的可以通过一定的方法和准则确定当量加速关系^[8]。这是加速环境谱的核心价值。

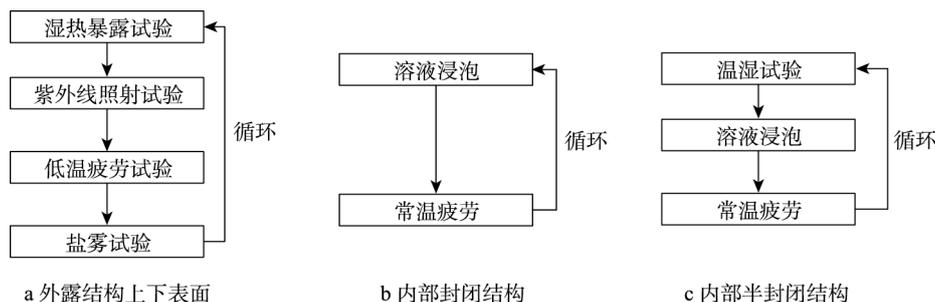
1.3 编制方法

加速环境谱的编制方法总体上可以分为两大类。一类是根据装备服役环境的实测条件,对影响装备的主要环境因素进行当量折算,进而编制加速环境谱。文献[9]提出了自然环境因素向加速环境谱的转化方法,包括环境应力水平、作用时间、作用顺序以及环境谱的转化与综合等。文献[10]利用宁波地区近10年的环境数据编制了自然环境谱,并基于腐蚀电量相等的原理给出了可供实验室加速试验用的宁波地区加速环境谱。

另一类常用的编制方法是参考已知的加速环境谱,结合实际情况,对谱块和试验条件进行剪裁和调整,形成所需的加速环境谱。美国空军编制的针对亚热带地区带涂层体系的载荷/环境谱(CASS谱)较为合理,成为很多研究者的参考对象。文献[3]在CASS谱的基础上,结合后勤装备特点,编制了加速环境谱。崔腾飞等^[11]结合CASS谱编制了某工业海洋地区的加速环境谱,并以7B04-T6铝合金试样为对象开展了试验。结果表明,平均腐蚀电流密度的折算系数与编谱时间的折算系数极为接近。

加速环境谱的编制主要涉及2个关键问题,其一是局部加速环境谱的确定。局部环境是造成装备结构具体腐蚀损伤的决定性因素^[12],但装备的局部环境数据测量比较困难,不同部位的局部环境差异也较大。此外,同样技术状态的产品,在不同的结构区域,所形成的腐蚀损伤也不一样,导致局部环境谱的普适性较差^[4]。为此,需要将“局部”控制在一个合适的区域,在这个区域内,环境数据和产品的环境效应都具有一定的相对独立性。文献[8]按照外部结构上表面和下表面、内部半封闭结构和内部封闭结构等典型结构分区,分别编制了直升机的加速腐蚀环境谱,如图1所示。文献[13]则按照关键部位的不同类型,编制了舰载战斗机的疲劳关键部位腐蚀加速试验谱和腐蚀失效关键部位加速试验关键谱。

其二是气象环境、化学环境、机械载荷等多因素

图 1 直升机不同部位加速腐蚀环境谱^[8]Fig.1 Accelerated corrosion environmental spectrum at different parts of the helicopter^[8]

综合环境谱的编制。文献[12]认为造成结构损伤和开裂的主导因素是交变载荷,环境的作用则是加速这一过程的实现,因此按照“环境服从载荷”的原则对环境谱和载荷谱进行了组合,形成了某结构件的环境/载荷试验谱。文献[14]提出了将温度、湿度和振动同时作用于样品的综合试验谱,加速试验结果与自然贮存试验结果具有较好的一致性。

1.4 当量关系的确定与验证

所谓当量关系,是指在加速环境谱与基准环境谱(如地面停放环境谱)作用下达达到相同腐蚀/老化程度的时间比例关系,与加速系数的概念接近。当量关系可表示为:

$$\alpha = t_1/t_2$$

式中: α 为加速环境谱的当量关系; t_1 、 t_2 分别为基准环境谱和加速环境谱作用下达达到相同腐蚀/老化程度的时间。

由上述定义可知,如何量化表征腐蚀/老化的程度决定是确定当量关系的关键。国内外学者开展了大量的相关研究,目前当量关系的确定方法主要有 3 类^[15],分别是基于电化学原理的腐蚀电流法和环境严酷性指数法,以腐蚀深度、腐蚀面积、腐蚀质量损失、腐蚀等级等指标作为腐蚀损伤程度度量的物理参量法,以及以损伤变量、疲劳强度、疲劳寿命等作为指标的力学损伤对比法。这 3 类当量关系的确定方法从腐蚀的物理本质、宏观表现形式以及最终影响效果等不同的角度对加速环境谱的当量关系进行了度量。

对于当量关系的验证,通常需要将加速试验结果与基准环境谱下的腐蚀情况进行对比分析。比较理想的情况是,可以将加速试验后对象的腐蚀情况,与真实服役一定时限装备的腐蚀情况进行对比。如文献[16]将某结构模拟件加速试验后表面的腐蚀情况与外场不同服役年限飞机结构的腐蚀程度进行了对比,得出加速谱作用 1 个完整的试验周期相当于地面停放 1 a 的结论。然而,加速谱验证需要装备的使用履历、经历的环境条件、维修情况等多方面的信息综合研判,目前更多地是采用自然环境试验结果对加速试验结果和当量关系进行验证。文献[17]对比了某模拟涂装试样加速试验 2 个循环和某地自然环境试验 2 a 后色

差、光泽度等的变化规律和疲劳寿命,试验结果验证了加速试验环境谱的正确性。文献[11]对比了铝合金的加速试验结果和沿海地区自然环境试验结果,认为两者的腐蚀模式一致,机理相同,计算出当量关系为 97.33。

2 典型金属敏感件加速腐蚀试验方法

涡轴发动机的主要金属敏感件是压气机叶片、涡轮叶片、机匣等,涉及的材料有不锈钢、铝合金、钛合金、高温合金等,它们在发动机中的局部环境条件以及损伤机理均有所不同,因此采用的加速试验方法也有区别。

2.1 常规加速腐蚀试验

常规的加速腐蚀试验方法已经发展有十余种,如湿热试验、盐雾试验、周浸试验等^[18-20]。其中,湿热试验又分为恒定湿热试验和交变湿热试验,盐雾试验有中性盐雾试验、酸性盐雾试验、干湿交替循环试验(盐雾试验和恒定湿热试验组合)等。国内外学者研究了锌、镁、铸铁、钢、钛合金、铝合金等多种金属及合金的加速腐蚀行为和机理^[20-34],相关试验结果对于制定加速腐蚀试验谱具有较强的指导意义。如缺少干燥过程的传统盐雾试验与实际腐蚀情况存在较大区别^[30],而干湿交替循环试验则可以较好地模拟碳钢等材料表面液膜的周期性变化情况,与实际情况更接近^[33-34]。盐雾颗粒大小会影响试样腐蚀产物的结构,当颗粒较大时,会对锈层的致密结构产生破坏^[31],单独采用盐雾试验来评价材料服役寿命是不合适的^[32]。

2.2 多因素综合腐蚀试验

为了提高加速腐蚀试验结果与实际腐蚀的相关性,多因素综合试验方法近年来受到了关注。多因素综合试验一般是在考虑腐蚀主要影响因素的基础上,将上述试验手段进行整合,对于判断材料的力学性能、耐腐蚀性能和腐蚀行为预测都有很强的实际意义^[21],但对试验设备的要求比较高。美国的 Q-FOG 循环腐蚀试验机、日本的 CASS 试验机可以开展 3 种以上因素的综合试验^[35]。国内北京航空材料研究院研制的

“人工气候复合环境试验机”^[36]可以根据需要同时调控雨、雾、湿度、温度、风、光辐射以及振动等环境因子；西南技术工程研究所研制了一种可以同时施加光照、盐雾、温度、湿度和风速等5种因素的综合环境模拟加速试验箱，对金属、塑料和涂层的加速腐蚀具有较好的相关性和高加速性^[37]；中国矿业大学、中南大学等高校也建立了相关的综合因素腐蚀实验室。多因素综合腐蚀试验可以有效地提高加速腐蚀试验的模拟性、加速性和相关性，但目前缺少综合试验方法相关的标准，试验设备在环境因素的控制精度、综合因素的施加方法以及试验对象的普适性等方面还需要进一步研究。

2.3 高温腐蚀试验

对于压气机叶片、涡轮叶片等工作温度较高的部件，其腐蚀行为受高温环境影响比较显著。压气机叶片在海洋环境下的腐蚀主要是盐雾和水蒸气的协同作用。早期，人们在样品表面涂覆一层较厚的固体NaCl沉积膜，并在高温水蒸气中进行腐蚀试验。但在实际服役中，叶片表面很难有大量固态盐的沉积，因而这种情况与压气机叶片的真实工况存在较大差距。文献[38]认为，更加接近真实情况的做法是在足够高的温度下对试样喷洒盐溶液。Cao等^[39]建立了一种可以在高温下比较精确地控制盐溶液和水蒸气的模拟试验装置。

发动机热端部件的循环氧化和热腐蚀正在引起日益深入的研究^[40-46]。循环氧化是在高温下试验一段时间后，再在低温下放置一段时间，这样构成一个循环；热腐蚀一般采用涂盐的方法进行模拟。文献[45-46]研究了涂层的循环氧化和熔盐热腐蚀行为，热腐蚀试验均采用涂盐方法进行，每个热腐蚀试验循环后，对样品进行清洗称量，并重新涂盐，开始下一个循环的试验。采用的盐成分有75%Na₂SO₄+25%K₂SO₄、75%Na₂SO₄+25%NaCl以及纯Na₂SO₄。但是研究涡轴发动机近海飞行时，必须考虑氯离子对腐蚀行为的影响。彭新等^[45]对比研究了普通NiCoCrAlYSi涂层和梯度NiCoCrAlYSi涂层在Na₂SO₄+K₂SO₄和Na₂SO₄+NaCl这2种混合盐中的热腐蚀行为，证明了NaCl的存在可以显著加速2种涂层的腐蚀过程。文献[47]认为，由于航空燃油含硫量极低(<0.001%)，涡轮叶片在海洋环境下服役可以看成是单纯NaCl熔融盐膜作用下的热腐蚀，因此采用涂覆饱和NaCl溶液的方法，对DZ40M和K452这2种材料在900℃NaCl熔盐中的循环热腐蚀行为进行了研究。

3 橡胶加速老化试验方法

除了金属件腐蚀，以橡胶材料为代表的非金属件的老化也是制约发动机使用寿命的重要因素。作为高

分子材料，橡胶的老化受到其自身材料特性和外部环境条件等多种因素的影响。温度是橡胶老化极为主要的环境影响因素之一，提高试验温度在大部分情况下可以显著加速老化过程，其理论依据是时温等效原理。高温加速老化的试验结果需要借助于性能退化模型和加速模型(如阿伦尼乌斯模型等)外推到正常使用温度，进而对使用寿命、可靠性等指标进行评价。为提高数据外推的精度，加速老化试验的温度应力水平要求不少于4个，且最高试验温度下老化机理应与正常使用温度下一致，即应确保加速试验条件下的失效机理一致性。由于扩散限制氧化(Diffusion-Limited Oxidation, DLO)效应的存在，样件的尺寸不宜过大。橡胶加速老化试验涉及失效机理一致性验证、性能退化模型建立、加速模型确定等内容^[48]。本文重点对加速老化试验方法现状进行分析，从橡胶件介质环境的角度，加速老化的试验方法可以分为液体介质老化和热氧老化2类，加速老化试验的重点在于对老化试验结果的表征和老化机理的分析。

3.1 液体介质老化

橡胶材料作为密封件，其工作环境离不开油介质环境，因此研究橡胶材料的耐油介质老化行为具有重要的意义。目前学者们对于橡胶材料在润滑油、液压油、绝缘油、变压器油等多种油液环境下的介质老化行为进行了研究，一般是将橡胶试样浸没在盛有油液的玻璃瓶、烧杯、密封罐等容器内，然后连同容器放入烘箱中进行高温加速老化^[49-52]。橡胶材料在油液中老化后的宏观性能指标受到研究者的广泛关注，油介质对橡胶具有萃取和溶胀作用，老化后橡胶诸如硬度、拉伸强度、扯断伸长率、定伸应力等指标均会发生变化，即便是同一个性能指标，不同材质的橡胶在不同介质老化后的变化规律往往不同，甚至可能相反。特种氟橡胶在柴油机油中老化后硬度增加^[53]，而崔志博^[54]研究的橡胶在耐润滑油介质老化试验后，其硬度下降，且扯断伸长率和拉伸强度均下降。老化试验时间也是一个重要的试验因素，试验时间较短，可能无法观察到明显的性能变化，但试验时间的设定客观上取决于材料的耐介质老化能力，主观上与研究目的密切相关。苏正涛等^[55]研究了FS6265硫化胶在150℃的RP-3燃油中的老化性能，老化10d后，FS6265仍有较好的力学性能，在-50℃低温条件下仍具有较好的密封性能，借此表明FS6265是航空煤油的优秀密封材料。

造成橡胶老化后宏观性能变化的原因在于橡胶分子链发生了变化，总体上分为交联反应和断链反应，这2类反应中占优势的反应类型将主导老化后的物理和力学性能变化。Mofidi等^[56]研究了NBR在不同油介质中的老化试验，结果表明，造成橡胶老化后磨损的原因可能是内部交联网络裂解或机械破损。

Guo 等^[57]研究了硅橡胶在人工模拟环境 (PEM 燃料电池环境) 下的加速老化, 老化后硅橡胶的表面粗糙度随着老化时间的增加而增加, 最后发生裂纹扩展。老化的主要原因是表面发生化学降解, 老化机理是主链的断裂和交联键的水解。

影响橡胶在介质中老化的因素除了橡胶自身的材料特性外, 还与填料、介质中活性基团的含量有关。朱杰等^[58]研究了填料 (BaSO_4 、白炭黑、石墨、 SnO_2) 对四丙氟橡胶耐腐蚀介质性能的影响。研究表明, 在 HCl 溶液介质中试验一定时间后, 4 种填料配合剂填充的性能均降低, 其中 BaSO_4 配合剂填充的橡胶, 力学性能最好。在 H_2S 溶液介质试验后, 四丙氟硫化胶的各项性能也呈现下降趋势, 相对于其他 3 种填料, 经过石墨配合剂填充过的四丙氟橡胶的各项性能保持得较好。Torbacke 等^[59]研究了不同基体的流体介质对橡胶弹性体力学性能的影响, 结果表明, 流体介质中羧基含量会影响促 NBR 降解作用。

3.2 热氧老化

导致橡胶老化的影响因子有很多, 其中最常见的一种是热空气老化, 热氧老化是研究橡胶物理和化学变化的通用方法^[60], 具有操作方便、测试成本相对较低、能够在较短的时间内获得足够样本数据的优点。

进行热氧老化试验时, 扩散限制氧化效应是值得关注的一个现象, 对老化试验结果影响较大。Celina 等^[61]在 85~140 °C 条件下对 NBR 的热氧老化试验表明, 材料表面老化程度大于材料内部, 这是由于 O_2 进入橡胶内部的速率比内部消耗 O_2 的速率要小。研究显示, 一般的橡胶老化都遵循扩散限制氧化规律。Patel 等^[62]对比研究了室温硫化硅橡胶在 200 °C 密闭系统中的热氧老化和空气中的热老化行为, 通过压缩强度、硬度等宏观性能的变化和分子链动力学分析, 证明了密闭条件下的研究方法更接近该橡胶的实际服役条件。

与介质老化类似, 不同材质的橡胶热氧老化后指标的变化趋势可能并不相同, 这与橡胶的分子结构和老化机理有关。裴涛等^[63]研究了氟硅橡胶在 200 °C 条件下的热空气老化, 在 200 °C 热空气环境试验 22 d 后, 氟硅橡胶 100% 定伸应力和硬度小幅度上升, 扯断伸长率下降。张录平等^[64]研究了特种氟橡胶材料的在不同温度的热氧老化对其力学性能和交联结构的影响, 100% 定伸应力先增加、后减小, 而扯断伸长率是先减小、后增大, 老化初期主要是以交联反应为主, 后期则是以降解反应为主。

橡胶老化研究中活化能是一个重要的概念, 可以在一定程度上反映出老化机理的改变。Elena 等^[65]开展了 NBR 热氧加速老化试验, 研究了老化前后 NBR 的拉伸强度、扯断伸长率、吸氧量、残留应力以及质量等指标的变化。研究表明, NBR 试样应力增

加的过程对应于热降解第一阶段的活化能 (87~88 kJ/mol); 而热降解的第二阶段活化能 (116~117 kJ/mol) 对应于 NBR 橡胶的吸氧量和扯断伸长率减小的过程。

3.3 综合环境老化

机械应力是影响发动机橡胶件老化的重要因素之一, 因此机械应力与温度、介质等综合环境下的老化更贴近橡胶的实际服役条件。机械应力的作用形式有持久拉伸、持久压缩等, 目前关于持久压缩状态下橡胶加速老化试验的研究较多。文献[66]开展了 FX-4 橡胶在不同介质环境下的持久压缩老化试验, 压缩率为 10% 和 25%, 结果表明, 试验温度和压缩率是影响其老化的主要因素。文献[67]研究了 EPDM 在 25% 压缩率的持久压缩下的热氧老化行为, 对压缩状态下的贮存寿命进行了推算。文献[68]对比研究了 NBR 在自由状态和 15% 压缩率承压状态下的加速老化行为, 结果表明, 机械应力对密封圈的热氧老化有显著的促进作用, 但这种促进作用随着试验温度的升高而减弱。

在持久拉伸老化试验方面, 需要设计适当的工装夹具给橡胶试样提供加速老化试验期间所需的拉力。文献[69]设计了一种可调节拉伸应力大小的工装, 研究了 3 种橡胶材料在 0~40% 等不同拉伸率下的加速老化试验, 结果表明, 应变量的施加可以明显加速老化进程。

目前国内对橡胶老化的研究对象集中在已经大规模应用的较成熟的橡胶牌号, 关于发动机用氟醚橡胶、氟橡胶等新型橡胶材料的加速老化试验方法、机理等的报道较少。老化试验中, 重点考虑了气候环境因素、介质环境、恒定机载载荷等因素的影响, 尚未形成关于动载荷 (如往复运动、旋转运动等) 对橡胶密封件的完整试验方法。以橡胶为代表的非金属加速老化试验方法研究仍不够系统和深入。

4 结语

根据寿命敏感件的服役环境特点, 制定加速环境谱, 并开展加速腐蚀/老化试验, 是快速研究发动机寿命敏感件腐蚀/老化行为的主要手段。目前, 国内外在加速环境谱的制定、加速腐蚀试验和加速老化试验等方面开展了比较全面的研究, 但仍存在一定的不足, 主要体现在以下 2 个方面。

1) 加速环境谱当量关系的确定方法需要进一步深入研究。目前的方法存在一定的局限性, 如腐蚀电流法不适用于非金属涂层, 且由于腐蚀过程中电流的变化和测量的不确定性, 现行方法多将腐蚀电流作为常量, 与实际情况存在差距。以腐蚀深度、腐蚀面积、腐蚀质量损失、腐蚀等级等指标作为腐蚀损伤程度量的物理参量法则严重依赖于各参量的测量准确度,

而实际上,由于客观或主观原因,这些参量的测试也存在不确定性。力学损伤对比法主要依靠自然环境试验结果与加速试验结果的对比,难以体现发动机局部环境的影响,且加速腐蚀损伤数据的分散性较大。因此,随着发动机可靠性和寿命要求的不断提高,应综合材料、腐蚀、力学、环境等多学科的相关理论和实践,制定更加科学合理的当量关系确定方法。

2)多因素综合模拟方法的研究比较欠缺。考虑实际服役环境的多因素综合加速模拟还存在较大的技术难度,如模拟在高温燃气环境下涡轮叶片的疲劳腐蚀,较高液体压力下橡胶密封件的快速运动等。多因素综合模拟方法的实现应在强化耦合条件下腐蚀/老化理论研究的基础上,注重对新型试验设备的研发。

综上所述,针对目前环境谱加速技术领域的现状,需要在当量关系确定方法和多因素综合模拟方法上开展进一步研究,为发动机的定寿和延寿工作提供技术支撑,助力新时代装备的高质量发展。

参考文献:

- [1] 陈聪慧. 航空发动机机械系统常见故障[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
CHEN C H. Common Failures of Aero-Engine Mechanical System[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.
- [2] 黄朝辉. 航空发动机燃油控制系统典型零组件失效与预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
HUANG Z H. Fuel Control System of Aeroengine Failure and Prevention of Typical Components[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [3] 张勇, 陈跃良, 吴剑峰, 等. 后勤装备防腐涂层加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 147-151.
ZHANG Y, CHEN Y L, WU J F, et al. Study of Environmental Spectrums of Accelerated Testing of Anti-Corrosion Coatings of Logistics Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 147-151.
- [4] 陈群志, 刘桂良, 崔常京, 等. 军用飞机结构局部环境谱编制的工程方法[J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 53-56.
CHEN Q Z, LIU G L, CUI C J, et al. Engineering Method on Establishment of Local Environmental Spectrum for Military Aircraft Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(2): 53-56.
- [5] 孙祚东. 军用飞机典型铝合金结构腐蚀损伤规律及加速腐蚀试验方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
SUN Z D. Study on Corrosion Damage of the Typical Aluminum Alloy of Air Force Plane and the Test of Accelerated Corrosion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [6] 崔常京. 军用飞机地面腐蚀环境谱的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
CUI C J. Study on the Ground Corrosion Environment Spectrum of Warcraft[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [7] 刘文斑, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109-112.
LIU W T, LI Y H, CHEN Q Z, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109-112.
- [8] 吴瑜, 张晓娟. 某型直升机加速腐蚀试验环境谱编制及应用[J]. 直升机技术, 2021(2): 63-68.
WU Y, ZHANG X J. Compilation and Application of Environment Spectrum for Accelerated Corrosion Test of a Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2021(2): 63-68.
- [9] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 34-38.
WANG Y Y, SHU C, LI C. Method for Conversion of Natural Environmental Spectra to Accelerated Test Environmental Spectra[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 34-38.
- [10] 杨晓华, 张珂. 宁波地区自然环境对铁塔材料力学性能的影响[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 49-53.
YANG X H, ZHANG D. Effect of Natural Environment of Ningbo Area on Mechanical Performance of Iron Tower[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 49-53.
- [11] 崔腾飞, 刘道新, 徐星辰, 等. 高强度铝合金典型沿海地区腐蚀行为加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 33-39.
CUI T F, LIU D X, XU X C, et al. Accelerated Test Method for High Strength Aluminum Alloy in Typical Coastal Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(5): 33-39.
- [12] 赵朋飞, 辛燕, 孙颖, 等. 装备关重件腐蚀-疲劳环境/载荷试验谱编制方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 8-13.
ZHAO P F, XIN Y, SUN J, et al. Study on Compiling Method of Corrosion-Fatigue Environment & Load Test Spectrum for Materiel Key Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 8-13.
- [13] 陈跃良, 陈亮, 卞贵学, 等. 先进舰载战斗机腐蚀防护控制与日历寿命设计[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 525786.
CHEN Y L, CHEN L, BIAN G X, et al. Corrosion Protection Control and Calendar Life Design of Advanced Carrier-Based Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 525786.
- [14] 李迪凡, 李泽华, 李景育, 等. 一种综合加速试验谱构建方法研究[J]. 环境技术, 2021, 39(4): 206-211.
LI D F, LI Z H, LI J Y, et al. Research on a Method of Constructing Comprehensive Accelerated Test Spectrum[J]. Environmental Technology, 2021, 39(4): 206-211.
- [15] 江雪龙, 杨晓华. 加速腐蚀当量加速关系研究方法综

- 述[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 50-58.
JIANG X L, YANG X H. Review on the Research Methods of Equivalent Accelerated Relationship in Accelerated Corrosion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 50-58.
- [16] 张蕾, 陈群志, 王逾涯, 等. 某型飞机腐蚀关键结构含涂层模拟件腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 45-49.
ZHANG L, CHEN Q Z, WANG Y Y, et al. Research on the Corrosion Behavior of Simulated Samples with Coating for the Corrosion Critical Component on a Certain Type of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 45-49.
- [17] 卞贵学, 张杨广, 张勇, 等. 飞机某模拟涂装试样加速腐蚀与自然暴露的对比研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 25-32.
BIAN G X, ZHANG Y G, ZHANG Y, et al. Comparative Study on Accelerated Corrosion and Natural Exposure of Simulated Coated Specimen of Aircraft Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(5): 25-32.
- [18] 赵悦彤, 丁红蕾, 邱凯娜, 等. 金属大气腐蚀影响因素及实验方法研究综述[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(6): 527-532.
ZHAO Y T, DING H L, QIU K N, et al. Research Progress on Influencing Factors and Test Methods of Atmospheric Corrosion of Metals[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2022, 38(6): 527-532.
- [19] 朱威. 铝合金焊接件在热带海洋大气环境中的腐蚀行为[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
ZHU W. Corrosion Behavior of Aluminum Alloy Welding Parts in Tropical Marine Atmospheric Environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [20] 吴亚平, 宗立君, 樊志彬, 等. 1050A 铝合金导体材料在模拟典型大气环境中的腐蚀行为与导电性能[J/OL]. 材料工程, 2023: 1-11. (2023-09-15). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1800.TB.20230914.1935.012.html>.
WU Y P, ZONG L J, FAN Z B, et al. Corrosion Behavior and Electrical Conductivity of 1050A Aluminum Conductor Materials in Simulated Typical Atmospheric Environments[J/OL]. Journal of Materials Engineering, 2023: 1-11. (2023-09-15). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1800.TB.20230914.1935.012.html>.
- [21] WANG X M, LI X G, TIAN X L. Influence of Temperature and Relative Humidity on the Atmospheric Corrosion of Zinc in Field Exposures and Laboratory Environments by Atmospheric Corrosion Monitor[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015, 10(10): 8361-8373.
- [22] 曾佳俊. 基于加速腐蚀及 EIS 的防护层保护性能快速评价方法研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2015.
ZENG J J. Evaluation Method Research for Coating Protection Performance on the Basis of Accelerated Corrosion and EIS in a Short Time[D]. Beijing: General Research Institute of Mechanical Science, 2015.
- [23] 牛毓敏. 灰铸铁在中性大气条件下腐蚀行为的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2019.
NIU Y M. Study on Corrosion Behavior of Gray Cast Iron in Neutral Atmosphere[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- [24] 曲宜超. 盐雾环境下 2A12 铝合金与 Ti-15-3 钛合金的接触腐蚀研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
QU Y C. Study on Contact Corrosion of 2A12 Aluminum Alloy and Ti-15-3 Titanium Alloy in Salt Spray Environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [25] LEBOZEC N, JÖNSSON M, THIERRY D. Atmospheric Corrosion of Magnesium Alloys: Influence of Temperature, Relative Humidity, and Chloride Deposition[J]. Corrosion, 2004, 60(4): 356-361.
- [26] EL-MAHDY G A, KIM K B. AC Impedance Study on the Atmospheric Corrosion of Aluminum under Periodic Wet-Dry Conditions[J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(12): 1937-1948.
- [27] ALMARSHAD A I, SYED S. Atmospheric Corrosion of Galvanized Steel and Aluminium in Marine and Marine-Industrial Environments of Saudi Arabia[J]. Materials and Corrosion, 2008, 59(1): 46-51.
- [28] THEE C, HAO L, DONG J H, et al. Atmospheric Corrosion Monitoring of a Weathering Steel under an Electrolyte Film in Cyclic Wet-Dry Condition[J]. Corrosion Science, 2014, 78: 130-137.
- [29] LEBOZEC N, BLANDIN N, THIERRY D. Accelerated Corrosion Tests in the Automotive Industry: A Comparison of the Performance towards Cosmetic Corrosion[J]. Materials and Corrosion, 2008, 59(11): 889-894.
- [30] 龚田太郎. 典型金属材料海洋环境大气暴露试验与实海加速腐蚀试验相关性研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
KONDA T. A Study on Correlation between Typical Metal Materials Marine Environmental Atmospheric Exposure Test and Practical Accelerated Corrosion Test[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.
- [31] 王绍明, 萧以德, 张三平. SO₂/盐雾复合循环加速腐蚀试验模拟锌在户外大气暴露腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(1): 13-17.
WANG S M, XIAO Y D, ZHANG S P. SO₂/Salt-Spray Synergistic Accelerated Test Simulating Atmospheric Exposure Corrosion Behavior of Zinc[J]. Corrosion & Protection, 2005, 26(1): 13-17.
- [32] ZHAO Z W, ZHOU X, LIU Y N, et al. Ultrasmall Ni Nanoparticles Embedded in Zr-Based MOFs Provide High Selectivity for CO₂ Hydrogenation to Methane at Low Temperatures[J]. Catalysis Science & Technology, 2018, 8(12): 3160-3165.
- [33] QIAN Y H, XU J J, LI M S. An Accelerated Testing Method for the Evaluation of Atmospheric Corrosion Resistance of Weathering Steels[J]. Anti-Corrosion

- sistance of Weathering Steels[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2015, 62(2): 77-82.
- [34] LIN C C, WANG C X. Correlation between Accelerated Corrosion Tests and Atmospheric Corrosion Tests on Steel[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2005, 35(9): 837-843.
- [35] 裴梓博. 碳钢大气环境腐蚀大数据研究及主要影响因素作用规律[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
PEI Z B. Research on Big Data of Atmospheric Corrosion of Carbon Steels and Action Law of Main Influencing Factors[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [36] 李家柱, 李牧铮, 张军, 等. 人工气候复合加速腐蚀试验机的研究[J]. *环境技术*, 2002, 20(1): 2-8.
LI J Z, LI M Z, ZHANG J, et al. Development of an Artificial Climatic Complex Accelerated Corrosion Tester and Investigation of Complex Accelerated Corrosion Test Methods[J]. *Environmental Technology*, 2002, 20(1): 2-8.
- [37] 杨晓然, 赵方超, 杨小奎, 等. 多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱研制[J]. *装备环境工程*, 2022, 19(10): 141-150.
YANG X R, ZHAO F C, YANG X K, et al. Development of Multifactor Integrated Marine Climate Simulation and Acceleration Test Chamber[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(10): 141-150.
- [38] 曹国钦, 陈朝阳, 万冬阳, 等. 高温海洋环境下过渡金属基合金的腐蚀与防护研究进展[J]. *表面技术*, 2022, 51(5): 198-213.
CAO G Q, CHEN C Y, WAN D Y, et al. Research Progress on Corrosion and Protection of Transition Metal-Based Alloys in High Temperature Marine Environment[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(5): 198-213.
- [39] CAO M, LIU L, YU Z F, et al. Studies on the Corrosion Behavior of Fe-20Cr Alloy in NaCl Solution Spray at 600 °C[J]. *Corrosion Science*, 2018, 133: 165-177.
- [40] FAN J F, LIU G, ZHUO X S, et al. In-Situ Reaction Synthesis Al₂O₃ Overlay Modified 7YSZ TBC for NaCl Hot Corrosion[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(16): 22404-22415.
- [41] PRABHAKARAN D, JEGADEESWARAN N, SOMASUNDARAM B, et al. Corrosion Resistance by HVOF Coating on Gas Turbine Materials of Cobalt Based Superalloy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 20: 173-176.
- [42] JITHESH K, ARIVARASU M. An Investigation on Hot Corrosion and Oxidation Behavior of Cobalt-Based Superalloy L605 in the Simulated Aero-Engine Environment at Various Temperatures[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(12): 126530.
- [43] SILVA-LEON P D, SOTELO-MAZON O, SALINAS-SOLANO G, et al. Hot Corrosion Behavior of Ni₂₀Cr Alloy in NaVO₃ Molten Salt[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(8): 5047-5062.
- [44] CHELLAGANESH D, ADAM KHAN M, WINOWLIN JAPPES J T, et al. Cyclic Oxidation and Hot Corrosion Behavior of Nickel-Iron-Based Superalloy[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2018, 37(2): 173-180.
- [45] 彭新, 姜肃猛, 孙旭东, 等. 梯度 NiCoCrAlYSi 涂层的循环氧化及热腐蚀行为[J]. *金属学报*, 2016, 52(5): 625-631.
PENG X, JIANG S M, SUN X D, et al. Cyclic Oxidation and Hot Corrosion Behaviors of a Gradient NiCoCrAlYSi Coating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(5): 625-631.
- [46] 何大雄, 管恒荣, 姜晓霞, 等. Pd-Ni-Al 涂层的循环氧化和在 Na₂SO₄ 熔盐中的热腐蚀行为[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2000, 12(4): 207-210.
HE D X, GUAN H R, JIANG X X, et al. Cyclic Oxidation and Hot Corrosion Behavior of Pd-Ni-Al Coatings[J]. *Corrosion Science and Technology Protection*, 2000, 12(4): 207-210.
- [47] 申聚宝, 崔宇, 刘莉, 等. DZ40M 和 K452 高温合金在 NaCl 熔盐中的循环热腐蚀行为研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2023, 43(2): 280-288.
SHEN J B, CUI Y, LIU L, et al. Cyclic Hot Corrosion Behavior of DZ40M and K452 Superalloys beneath Molten Deposit NaCl[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2023, 43(2): 280-288.
- [48] 刘巧斌. 加速试验方法与智能算法在车用橡胶可靠性评估中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LIU Q B. Reliability Evaluation of Rubber for Vehicles by Accelerated Test Method and Intelligent Algorithm[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [49] 李想. PA66 基复合材料耐热氧、热油老化性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
LI X. Study on Aging Resistance of PA66-Based Composites to Thermal Oxidation and Hot Oil[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [50] 杨雷, 李长皓. 不同炭黑用量对 NBR/TPEE TPV 热油老化前后物理机械性能的影响[J]. *橡塑技术与装备*, 2021, 47(13): 55-58.
YANG L, LI C H. Effects of Different Amounts of Carbon Black on the Physical and Mechanical Properties of NBR/TPEE TPV Thermal Oil before and after Aging[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2021, 47(13): 55-58.
- [51] 向星宇. 不同配方硅橡胶在热油老化条件下电性能优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
XIANG X Y. Research on Electrical Performance Optimization of HTV with Different Formulations under Hot Oil Aging Conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [52] 谭天. 直接氟化改性对高温硫化硅橡胶热-油老化特性的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
TAN T. Effect of Direct Fluorination on Thermal Oil Aging Properties of Silicone Rubber[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [53] 张录平, 李晖, 庞明磊, 等. 特种氟橡胶耐油介质老化

- 性能研究[J]. 世界橡胶工业, 2011, 38(1): 27-30.
- ZHANG L P, LI H, PANG M L, et al. Study on the Aging Properties of Special Fluoroelastomers in the of Oil Medium[J]. World Rubber Industry, 2011, 38(1): 27-30.
- [54] 崔志博. 橡胶密封材料油介质老化特性及寿命评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- CUI Z B. Study on Oil Medium Aging Property and Life Assessment Method of Rubber Sealing Material[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [55] 苏正涛, 朱华, 吴涛, 等. 氟硅橡胶硫化胶的老化性能[J]. 有机硅材料, 2007, 21(5): 284-286.
- SU Z T, ZHU H, WU T, et al. The Heat Aging Experience on the Properties of Fluorosilicone Rubber[J]. Silicone Material, 2007, 21(5): 284-286.
- [56] MOFIDI M, KASSFELDT E, PRAKASH B. Tribological Behaviour of an Elastomer Aged in Different Oils[J]. Tribology International, 2008, 41(9/10): 860-866.
- [57] LI G, TAN J Z, GONG J M. Chemical Aging of the Silicone Rubber in a Simulated and Three Accelerated Proton Exchange Membrane Fuel Cell Environments[J]. Journal of Power Sources, 2012, 217: 175-183.
- [58] 朱杰, 丛川波, 付志明, 等. 填料对四丙氟橡胶耐腐蚀性能的影响[J]. 橡胶工业, 2011, 58(9): 554-557.
- ZHU J, CONG C B, FU Z M, et al. Effect of Fillers on Corrosion Resistance of Tetrafluoroethylene-Propylene Rubber[J]. China Rubber Industry, 2011, 58(9): 554-557.
- [59] TORBACKE M, JOHANSSON A. Seal Material and Base Fluid Compatibility: An Overview[J]. Journal of Synthetic Lubrication, 2005, 22(2): 123-142.
- [60] TAYEFI M, EESAEE M, HASSANIPOUR M, et al. Recent Progress in the Accelerated Aging and Lifetime Prediction of Elastomers: A Review[J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 214: 110379.
- [61] CELINA M, WISE J, OTTESEN D K, et al. Oxidation Profiles of Thermally Aged Nitrile Rubber[J]. Polymer Degradation and Stability, 1998, 60(2/3): 493-504.
- [62] PATEL M, SKINNER A R, MAXWELL R S. Sensitivity of Condensation Cured Polysiloxane Rubbers to Sealed and Open-to Air Thermal Ageing Regimes[J]. Polymer Testing, 2005, 24(5): 663-668.
- [63] 裴涛, 程俊梅, 赵树高. 氟硅橡胶高温老化性能研究[J]. 有机硅材料, 2013, 27(4): 277-281.
- PEI T, CHENG J M, ZHAO S G. Study on High Temperature Aging Property of Fluorinated Silicone Rubber[J]. Silicone Material, 2013, 27(4): 277-281.
- [64] 张录平, 付建农, 庞明磊, 等. 热氧老化对特种氟橡胶交联结构及力学性能的影响[J]. 弹性体, 2010, 20(4): 25-30.
- ZHANG L P, FU J N, PANG M L, et al. The Influence of Thermal-Oxidative Aging on Crosslink Structure and Mechanical Properties of Special Fluoroelastomer[J]. China Elastomerics, 2010, 20(4): 25-30.
- [65] BYSTRITSKAYA E V, MONAKHOVA T V, IVANOV V B. TGA Application for Optimising the Accelerated Aging Conditions and Predictions of Thermal Aging of Rubber[J]. Polymer Testing, 2013, 32(2): 197-201.
- [66] 商旭静, 党恒耀, 薛志博, 等. FX-4 氟橡胶的老化行为研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(8): 1-8.
- SHANG X J, DANG H Y, XUE Z B, et al. Aging Behavior of FX-4 Fluororubber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(8): 1-8.
- [67] 陶玲, 刘国钧, 程璐, 等. 三元乙丙橡胶的热氧老化及寿命预测[J]. 特种橡胶制品, 2022, 43(6): 60-65.
- TAO L, LIU G J, CHENG L, et al. Thermal Oxygen Aging and Life Prediction of EPDM[J]. Special Purpose Rubber Products, 2022, 43(6): 60-65.
- [68] 唐庆云, 李锴. 丁腈橡胶密封圈高温老化行为——自由状态和承压状态[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 93-96.
- TANG Q Y, LI K. Aging Behavior of NBR Seals under High Temperature—Free-State and Pressured-State[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(12): 93-96.
- [69] 许坚, 叶德县. 应变对橡胶老化性能变化的影响研究[J]. 专用汽车, 2023(6): 74-77.
- XU J, YE D X. Effect of Strain on Aging Properties of Rubber[J]. Special Purpose Vehicle, 2023(6): 74-77.

责任编辑: 刘世忠