

航空发动机成附件橡胶件的 “积木式”试验设计

张腾, 张天宇, 何宇廷

(空军工程大学, 西安 710038)

摘要: 在飞机结构“积木式”试验的基础上, 提出了针对航空发动机成附件橡胶件元件级、模拟件级、工装级和系统级试样的四级“积木式”试验。明确了各级试验的试验对象、主要任务、试验目的和基本试验思路。提出了在系统级试验的开展中, 保证橡胶件的结构状态、安装状态与实际工作情况一致的方法, 以及“工况谱”编制的主要内容。将“积木式”试验流程应用到橡胶材料中, 为新型航空发动机成附件橡胶件的设计研制提供帮助。

关键词: 成附件橡胶件; “积木式”试验; 元件级; 系统级

中图分类号: V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)06-0059-04

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.06.009

Aero Engine into Accessory Rubber Parts of the “Building Block” Test Design

ZHANG Teng, ZHANG Tian-yu, HE Yu-ting

(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

ABSTRACT: Four “building block” tests are proposed for rubber parts of aero-engine accessories at component level, simulation level, tooling level and system level. The main tasks of tests at all levels are defined. The method of ensuring the structure state and installation state of rubber parts are consistent with the actual working condition in the system-level test is put forward. The “building block” test process is applied to rubber materials, which provides help for the design and development of rubber parts for new aero-engine accessories.

KEY WORDS: rubber parts of the attachment; “building block” experiment; component level; system-level

橡胶件在航空发动机中的主要作用是密封、减振, 根据安装位置, 可划分为发动机本体橡胶件和成附件橡胶件。虽然橡胶件在发动机上的总体用量不大, 但种类和应用部位很多, 直接影响着发动机的整

机寿命和可靠性。若橡胶件失效, 将导致漏油、漏气, 轻则导致成附件故障, 功能失效, 影响装备完好率, 重则引发整机停车, 装备损坏, 酿成安全事故。橡胶材料是一种高分子材料, 在日常使用和储存过程中,

收稿日期: 2021-01-31; 修订日期: 2021-02-24

Received: 2021-01-31; Revised: 2021-02-24

基金项目: 重大专项基础研究项目 (J2019-I-0016-0015); 装备预研领域基金 (61409220202)

Fund: Major Basic Research Project (J2019-I-0016-0015), National Defense Pre-Research Foundation of China (61409220202)

作者简介: 张腾 (1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为结构完整性。

Biography: ZHANG Teng (1987—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: structural integrity.

引文格式: 张腾, 张天宇, 何宇廷. 航空发动机成附件橡胶件的“积木式”试验设计[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 059-062.

ZHANG Teng, HE Yu-ting, ZHANG Tian-yu. Aero engine into accessory rubber parts of the “building block” test design[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 059-062.

材料的性能随时间的增加而降低^[1]。如在我国高温、高盐、高紫外线和工业污染严重的地区,对橡胶的影响是很严重的^[2]。橡胶材料在贮存条件下主要是发生热老化^[3],宏观的表现为力学性能的改变,如拉伸强度,90°剥离粘合强度等^[3-4]。烘箱加速老化、氧弹加速老化、湿热老化、臭氧加速老化、人工气候加速老化、人工抗霉、盐雾腐蚀等试验,是国内外普遍的橡胶研究老化的试验方法^[5],以湿热老化试验与烘箱加速老化试验最常用。随着橡胶老化研究的发展,从早期人们主要研究橡胶材料在非受力状态下的老化情况来测定其性能(如拉伸强度、定伸应力和拉断伸长率等),发展到模拟户外环境来进行老化研究^[4,6]。在研究橡胶材料老化的试验方法方面,我国20世纪80年代初期将橡胶的烘箱加速老化试验方法作为标准方法,制定了GB/T 17782橡胶的烘箱《硫化橡胶压力空气热老化试验方法》以及GB/T 3512胶压力空气《硫化橡胶或热塑性橡胶——热空气加速老化和耐热试验》等^[1,7]。在航空结构的设计研制过程中,不能采用简单试样的试验数据来预计复杂结构件或部件的力学性能,通常采用“积木式”方法进行试验验证^[8]。

“积木式”试验的概念最早是针对复合材料结构强度验证提出的,由于对飞机复合材料构件的合格鉴定仅通过全尺寸结构验证试验通常是不完整的。比如包含复合材料的全尺寸静强度试验一般只能在室温大气环境下进行,只能使用环境补偿系数来得到与湿热环境下相同的破坏模式,而这需要通过试样、元件等不同级别的试验来证实^[9]。橡胶材料与复合材料同为高分子材料,实际上无论金属结构还是非金属结构,都需要在设计研制阶段应用“积木式”的试验方法。之所以要从小尺寸的元件级试样开始试验,是因为易于将试验过程和分析过程相结合,使得两者相互纠正,相互促进,既能降低试验成本,又能增加分析的精确性^[10]。当采用小尺寸试验件开始研究时,可以很大程度上降低额外因素带来的干扰,便于对研究对象的把握,使实验结果更具有可靠性^[11]。

1 橡胶件“积木式”试验的提出

“积木式”试验的每一级都建立在前一级累积的经验基础上,按照复杂程度渐增。“积木式”试验的设计,需要采用从试样、元件(包括典型结构件)、组合件组成的多层次试验与全尺寸结构验证相结合的方案完成^[12]。一般来说,试验大致分为试样、元件(包括典型结构件)、组合件、全尺寸件4个层次^[9,12]。GJB 775.1中提出试验的设计研制阶段需要元件试验、许用值试验、部件试验和验证阶段的全机试验4个层次^[9,13]。JSSG—2006《美国国防部联合使用规范指南——飞机结构》中的静强度部分和耐久性部分也将实验分为设计研制阶段的4个层次,分别是元件试

验(试样/元件)、结构构型研制试验(子构件/构件)、大部件研制试验、复合材料设计研制试验,以及验证阶段的全机试验^[9,14]。

飞机结构试验就是典型的“积木式”试验,分为元件级、模拟件级、组件级、部件级和全机级^[15]。其每一级的试验目的不同,元件级一般采用标准试验件,主要测试的是材料性能^[16];模拟件级考核的是结构局部细节的加工工艺和设计形式是否满足要求^[17];组件级一般要进行多个结构的连接,并且要具备足够的尺寸,考核结构的连接形式和损伤扩展过程是否满足要求;部件级一般对应飞机的某一功能部件(如一个机翼、一段机身等),主要考核载荷的分配情况;全机级就是针对整架飞机,是以较为真实的载荷形式进行验证^[18-20]。

飞机结构的寿命问题是一个可靠性问题,寿命分散性主要是由材料分散性、工艺分散性、结构分散性和载荷分散性所造成的。从另一个角度来说,飞机结构的“积木式”试验也是分别针对不同类型的分散性进行研究,从而评定飞机结构的寿命。

实际上,橡胶件同样也属于飞机结构,日历寿命问题同样也是可靠性问题,“积木式”试验方法也适用于橡胶件的日历寿命评估。但是,橡胶件有它自己的特征。比如,橡胶件一般结构形式比较简单,体积较小,也没有复杂的连接,但是载荷工况条件比较复杂。因此,橡胶件的“积木式”试验需要比照结构的“积木式”试验进行调整。针对橡胶件提出四级“积木式”试验的方法是合适的,根据试验的复杂程度可以分为元件级、模拟件级、工装级和系统级。橡胶件四级“积木式”试验的主要流程如图1所示。

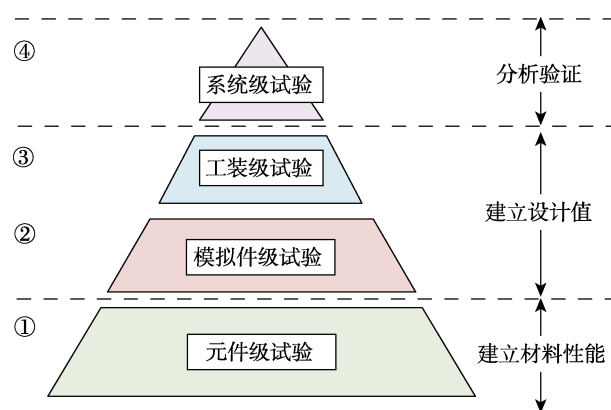


图1 橡胶件的“积木式”试验流程
Fig.1 The “building block” test process of rubber parts

2 橡胶件各级“积木式”试验的主要任务

2.1 元件级试验

元件级主要是测试橡胶材料的性能,也是采用标准

试验件,如狗骨件、圆柱件等。可进行有关力学性能的试验(拉伸、压缩、疲劳等),也可进行环境因素的影响试验(盐雾腐蚀、周浸腐蚀、热老化、光老化等)。

由于橡胶件本身较小,模拟件级、工装级和系统级实际上都是采用完整的橡胶构件作为试验件,只不过试验方式、考核目的以及试验的复杂程度不同。

2.2 模拟件级试验

橡胶件的模拟件级试验主要针对的应是橡胶件的结构特性和工艺特性,开展一些简单工况条件下的结构性能测试,考察橡胶件的成形加工工艺有没有问题。比如模压、挤出、压延这些加工方法使橡胶件成形后在性能上比元件级发生了哪些变化。也可以称为橡胶件的“成品基本性能测试试验”。

2.3 工装级试验

橡胶件的工装级试验主要应借助工装夹具的作用,对复杂受力状态下的橡胶件性能进行考核。如采用夹板测试胶圈的永久变形,把它放在介质里面,测试压缩载荷与介质作用的耦合影响。再如,可以把胶圈安装在工装夹具上,测试往复摩擦性能、持久拉伸性能等。也可以称为橡胶件的“成品功能性测试试验”。

2.4 系统级试验

工装级试验已经比较接近橡胶结构的实际工况,对研究橡胶件的服役性能有很大的参考意义,但是,对橡胶件的全面定寿还有一定的差距。在实际服役中,橡胶件的服役工况是不断变化的。例如,针对作动筒中的密封胶圈,随着作动筒的负载发生变化、伸出位置和动作状态的变化、工作时间的长短等,胶圈所受到的油液压力、油液温度、载荷状态是不同的。因此,需要模拟实际的复杂交变工况,开展橡胶件的综合试验验证,从而评定其服役寿命。这个综合验证试验,就是橡胶件“积木式”试验的最顶层,可以称之为“系统级试验”或者“台架试验”。

3 橡胶件“积木式”试验的关键问题

开展橡胶件的系统级试验,首先要保证橡胶件的结构状态、安装状态与实际工作情况保持一致,最好的做法是直接安装在对应的机件中,从而可以保证试验条件尽可能地与实际情况一致。当然,从试验成本的角度考虑,可以适当地做一些简化,设计一些液压往复摩擦试验台、油封寿命试验台、脉冲试验台、旋转试验台等开展台架试验测试,但应保证台架试验条件(如温度、旋转速度、压力、摩擦系数等)与实际机件中的情况一致。

系统级试验的核心是“工况谱”的确定,系统级试验应按照“工况谱”下的工况顺序进行实施。“工况谱”的编制可参照飞机结构载荷谱和环境谱的编制

方法,主要工作包括:进行各类实际工况的测试;把对橡胶件损伤影响极小的次要工况剔除,进行关键工况要素的提取;确定典型的工况状态;根据飞机/发动机的任务剖面,确定典型工况顺序;编制能够反映任务剖面特征的“工况谱”。

需要注意的是,单纯考虑系统工作状态的台架试验不能完全反映橡胶件的老化情况,类似于飞机结构的全机疲劳试验不能反映结构腐蚀损伤带来的影响。可以采取两种方式解决:1)参照飞机结构的处理方式,在元件级、模拟件级和工装级试验过程中,研究老化作用和工况载荷作用的耦合影响规律,引入老化影响系数;2)鉴于橡胶件系统级试验规模较小,可以在试验过程中直接引入腐蚀老化作用。例如,运转20 h,停机4 h,在停机期间开展加速老化试验。当然,针对加速老化试验的加速方法、交替频次和加速系数等,还需要在探明机理的基础上开展进一步的研究。

开展“积木式”试验需要注意以下几个要点。

1)明确试验目的。虽然各级“积木式”试验的研究对象和研究宗旨是明确的,但同一级试验下的研究目的可能是有所差别的。按研究目的划分,可以分为设计验证试验、寿命试验、性能测试试验、机理研究试验等。

2)注意试验结果的统计分析,特别是在寿命试验中,要考虑到试验结果的分散性,从可靠性分析的角度进行处理。

3)结合实际情况,明确橡胶件的失效形式。橡胶件的失效形式往往是复杂的,对应的测定参数较多(如永久变形量、溶胀率、弹性等),但往往其中的1个或几个是影响其功能失效的主要形式,应以实际应用情况为准,选取关键的形式作为其性能衰减的指标。对于橡胶圈,一般以泄漏量来衡量。

4)明确试验条件。选择试验条件时,要注意选择对橡胶件失效机理的发展有促进作用的试验条件,且应控制这些条件在合理范围内,保证由这些条件所激发的失效机理与实际使用状态相同。

5)在试验结果分析与处理过程中,要通过对故障原因的分析,判断故障的寿命分布,估计产品的失效率和平均寿命。可以采用失效模式与影响分析(FMEA)的方法进行。

4 结语

依据飞机结构试验典型的“积木式”试验方法,提出了针对航空发动机成附件橡胶件的四级“积木式”试验流程。明确了元件级、模拟件级、工装级和系统级试验的主要任务,提出了开展各级试验的基本方法和注意事项。提出了在橡胶件系统级试验的开展中,保证橡胶件的结构状态、安装状态与实际工作情况一致的基本方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘明. HNBR、EPDM 和 FKMO 形圈的老化[J]. 橡胶参考资料, 2017, 47(2): 38-44.
LIU M. Aging of HNBR, EPDM and FKMO ring[J]. Rubber reference materials, 2017, 47(2): 38-44.
- [3] 易军. 橡胶老化寿命预测及压力条件下分子运动能力的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
YI J. Prediction of aging life of rubber and study of molecular kinematic ability under pressure[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009.
- [4] 于浩. 侵蚀条件下橡胶材料受力性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
YU H. Experimental study on mechanical properties of rubber materials under erosion conditions[D]. Shenyang: Shenyang Architectural University, 2016.
- [5] 王思静, 熊金平, 左禹. 橡胶老化机理与研究方法进展[J]. 合成材料老化与应用, 2009(2): 26-36.
WANG S J, XIONG J P, ZUO Y. Advances in rubber aging mechanism and research methods[J]. Aging and application of synthetic materials, 2009(2): 26-36.
- [6] 游海军. 模拟海洋环境下丁腈橡胶性能演变及寿命预测研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
YOU H J. Performance evolution and life prediction of nitrile butadiene rubber in simulated Marine environment[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016.
- [7] 吴丽平. 发动机橡胶减振垫的疲劳性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
WU L P. Study on fatigue performance of rubber damping pad for engine[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [8] 季文, 刘久战, 范坤. 民用飞机复合材料结构“积木式”验证试验规划探讨[J]. 科技与创新, 2021(1): 81-83.
JI W, LIU J Z, FAN K. Discussion on "building block" verification test planning of civil aircraft composite structures[J]. Technology and Innovation 2021(1): 81-83.
- [9] 强宝平. 飞机结构强度地面试验[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 29-102.
QIANG B P. Ground test for structural strength of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 29-102.
- [10] 李元章, 鲁国富, 任三元, 等. 基于积木式的飞艇桁架式复合材料龙骨结构验证方法[J]. 复合材料科学与工程, 2020(1): 67-71.
LI Y Z, LU G F, REN S Y, et al. Verification method of airship truss composite keel structure based on building block[J]. Composites science and engineering, 2020(1): 67-71.
- [11] 蓝元沛, 王栋, 刘传军, 等. 民机复合材料翼翼盒结构适航符合性验证方法研究[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(4): 69-75.
LAN Y P, WANG D, LIU C J, LI D S. Research on verification method of airworthiness compliance of wing-box structure of civil airplane composites[J]. Fibrous composite, 2020, 37(4): 69-75.
- [12] GJB 67.14—2008, 军用飞机强度和刚度规范——复合材料结构[S].
GJB 67.14—2008, Specification for strength and stiffness of military aircraft—Composite material structures [S].
- [13] GJB 775.1—89, 军用飞机结构完整性大纲——飞机要求[S].
GJB 775.1—89, Outline for structural integrity of military aircraft—Aircraft requirements[S].
- [14] JSSG-2006, 美国国防部联合使用规范指南——飞机结构[S].
JSSG-2006, U.S. department of defense joint use specification guide—Aircraft structure[S].
- [15] 樊则文, 陈挺, 张绪. 民用飞机复合材料后机身结构适航验证方法[J]. 高科技纤维与应用, 2018, 43(2): 36-40.
FAN Z W, CHEN T, ZHANG X. Verification method for airworthiness of composite rear fuselage structure of civil aircraft[J]. High-tech fiber and its application, 2018, 43(2): 36-40.
- [16] 崔深山. 面向积木式试验的复合材料典型结构件分析与验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
CUI S S. Analysis and validation of typical structural parts of composite materials for block test[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [17] 钟涛, 谭一鸣, 李敏. 复合材料结构的积木式方法的运用[J]. 智富时代, 2015(8): 213.
ZHONG T, TAN Y M, LI M. The use of building blocks for composite structures[J]. The fortune times, 2015(8): 213.
- [18] 朱丽莉. 对民用飞机翼梢小翼复合材料结构适航符合性的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
ZHU L L. Study on airworthiness compliance of civil aircraft winglet composite structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016.
- [19] 周凯. 树脂基复合材料多尺度虚拟测试技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
ZHOU K. Research on multi-scale virtual testing technology of resin matrix composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [20] 钟小丹. 民机复合材料增压舱段结构设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
ZHONG X D. Structural design of composite pressurized cabin for civil aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.