# 航空发动机复材外涵机匣静热强度 试验方法研究

# 杨峰<sup>1,2</sup>, 史剑<sup>3</sup>, 姚明格<sup>1,2</sup>, 贾林江<sup>3</sup>, 李鑫<sup>3</sup>, 周焕阳<sup>1,2</sup>

(1.天津航天瑞莱科技有限公司,天津 300462; 2.北京强度环境研究所,北京 100076; 3.中国航发四川燃气涡轮研究院,成都 610500)

摘要:目的 提出一种飞机发动机外涵机匣静热强度考核试验方法,实现对高温环境下机械载荷与气流压力 载荷同时作用时外涵机匣的强度考核。方法 以典型外涵机匣模拟件为试验件,利用所设计的试验装置与外 涵机匣模拟件合围成一套能够施加温度载荷、机械载荷以及内腔气压载荷的被试结构,在通过温度加载系 统、静力加载系统和气压加载系统同时对被试结构模拟飞行过程中的真实工况环境。结果 通过设计的试验 能同时施加飞行过程中外涵机匣所承受的主要温度、机械及气流压力载荷。结论 提出的静热强度试验方法, 能够充分对航空发动机外涵机匣飞行过程中的综合环境进行地面模拟考核,取代以往金属外涵机匣考核的 温度载荷等效方式,可实现对复材外涵机匣工艺件进行考核,为外涵机匣减重设计提供依据。 关键词:航空发动机;外涵机匣;复合材料;机械载荷;压力载荷;温度载荷 中图分类号:V216 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2021)06-0030-06 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.06.005

#### Research on Static Thermal Strength Test of Composite Bypass Casing of Aero-engine

YANG Feng<sup>1,2</sup>, SHI Jian<sup>3</sup>, YAO Ming-ge<sup>1,2</sup>, JIA Lin-jiang<sup>3</sup>, LI Xin<sup>3</sup>, ZHOU Huan-yang<sup>1,2</sup>

(1.Tianjin Aerospace Reliability Technology Co., Ltd, Tianjin 300462, China; 2.Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China; 3.AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a static thermal strength test method of composite bypass casing of aero-engine and consider mechanical and pressure loads in high temperature environments. The simulated structure of a typical bypass casing was taken as the test object, the designed test device and the simulated structure of a typical bypass casing were used to form a tested structure that can apply temperature load, mechanical load and pressure load, and then the temperature loading system, the static loading system and the pneumatic loading system were used simultaneously to impose the real working environment during the flight on the tested structure. The actual load conditions that affect the strength of the bypass casing can be applied simultaneously through the designed test. The static thermal strength test method proposed in this paper can replace the previous method and is generally applied to the bypass casing of metal materials, using pressure load instead of temperature load. The method proposed in this paper can be used to test composite bypass casing and provide an important basis for the weight reduc-

收稿日期: 2020-12-21; 修订日期: 2021-03-06

Received: 2020-12-21; Revised: 2021-03-06

作者简介:杨峰(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向为可靠性与环境试验。

Biography: YANG Feng (1988—), Male, Master, Engineer, Research focus: reliability and environmental test.

引文格式:杨峰,史剑,姚明格,等.航空发动机复材外涵机匣静热强度试验方法研究[J].装备环境工程,2021,18(6):030-035.

YANG Feng, SHI Jian, YAO Ming-ge, et al. Research on static thermal strength test of composite bypass casing of aero-engine[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 030-035.

tion design of the bypass casing.

KEY WORDS: aero-engine; bypass casing; composite material; mechanical load; pressure load; temperature load

航空发动机是一种高度复杂和精密的热力机械, 其内部各结构件的设计都要满足相应的热力载荷需 求。外涵机匣是航空发动机形成外涵流道<sup>[1-2]</sup>,实现 结构完整性及发动机功能等用途的重要结构单元。外 涵机匣位于中介机匣后、涡轮后机匣前,包围在核心 机单元体的外部。外涵机匣形成的外涵流道,保障了 发动机的有效推力<sup>[3-8]</sup>,也承担着高温高速气流带来 的复杂载荷。

国内对外涵机匣强度试验传统的考核方式大多 是进行常温强度考核<sup>[9-13]</sup>,主要包括常温压力试验和 常温静压联合试验。对于传统钛合金材料的外涵机 匣,在考核同等设计安全系数的前提下,可以利用材 料的高温强度性能降低的比例,等效至常温环境下外 涵机匣所受到的主要载荷的增量系数。这样在常温下 就可以完成对外涵机匣的高温环境强度考核,大大降 低了试验的难度和成本。

随着新一代航空发动机技术发展的需求,对航空 发动机的各项性能指标有了更高的要求,其中就包括 对航空发动机整体质量减重的严格控制。同时随着高 温复合材料技术的发展,外涵机匣的设计也正逐步从 传统的金属材料过渡到复合材料<sup>[14-18]</sup>,从而减轻自重 来保障发动机整体质量指标。由于复合材料的属性在 高温环境下相对复杂,一般呈非线性,甚至在材料级 和结构级会出现不同程度的差异,无法通过传统的常 温等效强度试验模拟高温环境,必须通过施加真实的 高温、静力和气流压力联合载荷进行强度考核。

文中研究的外涵机匣静热强度试验方法正是充 分考虑了外涵机匣同时受到高温、静力和压力载荷的 作用,并有效解决各载荷施加过程的相互影响。提出 的试验方法能够解决外涵机匣在试验过程中压力与 静力载荷的解耦、高温高压下结构变形带来的气密性 问题以及加载过程中密封结构或产品本身少量漏气 时压力载荷的动态稳定控制等问题。

## 1 试验方案设计

#### 1.1 试验系统及原理

试验系统主要包括以下分系统:加热分系统(加 热控制器、加热器、可控硅)、内压加载分系统(压 力控制器、气源、开关阀、密封系统)、静力加载分 系统(静力控制器、油源、液压作动器)和测量系统 等其他辅助模块。

加热分系统利用电加热管通过加热工装连接后, 对被试件进行腔内加热。温度控制传感器将加热过程 中温度值反馈至加热控制器,经闭环控制算法计算, 输出控制信号至可控硅,调节加热器两端电压,达到 温度闭环控制。内压加载分系统通过控制阀门打开, 控制供排气通断。试件系统预留压力传感器安装接 口,压力传感器反馈试件内压力值至压力控制器,压 力控制器通过调节控制阀门的开合,达到压力闭环控 制。静力加载分系统的作动器将加载点安装至试件预 留加载端面,力传感器反馈加载力值至伺服控制器, 调整供油流量达到静力闭环控制。整体试验系统原理 如图1所示。



Fig.1 Schematic diagram of test system

#### 1.2 载荷加载装置

加载装置需要充分考虑外涵机匣同时受到高温、 静力和压力载荷的作用,并解决各载荷施加过程中的 相互影响。图2所提供的试验装置配合控制系统可以 有效解决加载过程中压力与静力载荷的解耦、高温高 压下结构变形带来的气密性问题,以及加载过程中密 封结构或产品本身少量漏气时压力载荷的动态稳定 控制等问题。图2中标识了试验装置的主要结构部 件,其中1为外涵机匣模拟件,作为被试产品;2为 试验底座,与基座固定和安装其他结构;3为内密封 筒,用于合围成压力腔;4为下对接舱段,模拟刚性舱 舱段连接底座与产品;5为上对接舱段,模拟刚性舱 段连接产品与静力加载作动器;6为上承载活塞盘, 承载内腔压力;7为密封垫压板;8为直角梯形状密 封垫;9为螺丝筒,压紧上承载活塞盘;10为中心轴 拉杆,承载内腔压力;11为电加热器,加热产品和 内腔空气;12为内腔压力进气孔;13为内腔压力排气 孔。其中5、6、7、9配合形成可滑动密封接触结构。



Fig.2 Principle of test device

# 2 试验载荷施加方案

## 2.1 热载荷施加方案

加热系统主要由可控硅、加热控制器、加热器以 及温度传感器等组成。可控硅主要元件为晶闸管单相 功率调整器,以数字化中央处理器为核心,采用 PAD 晶闸管输出电压调节的方式,实现加热功率的闭环控 制。调压方式具有负载电流冲击小的优点,降低加热 过程温度波动。

加热控制器通过采集试件内壁温度作为温度闭 环控制反馈,经 PID 闭环控制算法计算后,输出控制 信号(4~20 mA)至调功器,调功器改变施加在加 热器的电压,实现加热功率调节,达到温度闭环控 制功能。

加热器是结构热试验的热源,根据加热元件的不同,加热器包括石英灯、电加热管、石墨以及火焰加 热器等。考虑本试验中需要对加热器结构外形进行灵 活设计,同时加热器还需要能够承受相应的压力载 荷,所以采用电加热管加热器。本方案设计的电加热 管加热器的外形结构呈环状,与外涵机匣外形结构相 匹配,以充分提高加热效率。所用电加热管的结构为 外层不锈钢辐射管通过绝缘导热填充材料包裹内置 的电加热丝,电加热管的外层不锈钢辐射管可根据需 要,通过焊接固定于试验装置底座上。电加热管加热 器的结构如图 3 所示。



图 3 环形加热器模型 Fig.3 Ring heater model

加热器的设计涉及试验系统中所有高温环境结构件的受热情况分析<sup>[19-22]</sup>,应该满足整体加热功率的要求。

被试结构吸收热流密度 q 为:

$$q = c\rho\delta(\mathrm{d}T/\mathrm{d}t) \tag{1}$$

式中: *c* 为结构材料比热容, J/(kg·℃);  $\rho$  为结构 材料的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\delta$  为试件结构厚度, m; d*T*/d*t* 为温升率, ℃/s。

加热器单位面积输出功率 W为:

$$W = q/\eta \tag{2}$$

式中:η为加热器的热效率,该装置可按 0.2~0.4 计算。

加热器加热功率Q为:

 $Q = W \cdot A \tag{3}$ 

式中:A为加热区的受热面积, $m^2$ 。

由于试验装置存在漏热情况,需对漏热功率进行 计算。漏热主要包括外涵机匣的热传导以及与外部环 境的对流换热,考虑外涵机匣的热阻和外界空气的热 阻。外涵机匣热阻 *R*<sub>1</sub>为:

$$R_{\rm l} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\rm b}} \ln\left(\frac{d_{\rm z}}{d_{\rm w}}\right) \tag{4}$$

式中: $\lambda_b$ 为机匣的导热系数, $W/(m \cdot C)$ ; $d_z$ 为机 匣外表面的直径, m; $d_w$ 为机匣内表面直径, m。

机匣外表面到外界空气的热阻 R<sub>2</sub>为:

$$R_2 = \frac{1}{\pi \alpha d_z} \tag{5}$$

式中: α为机匣外表面与空气的对流换热系数, 参考取值为 10 W/(m<sup>2</sup>·℃)。

试验装置的热损失 q 题为:

加热总功率 O 点为:

$$q_{\text{H}} = \frac{\Delta t}{R_1 + R_2} (1 + \beta) \tag{6}$$

式中: β 为热损失附加系数,一般选取 0.3; Δt 为温差, C,可保守取机匣内壁与外界环境温差。

### 2.2 内压载荷施加方案

压力加载系统主要加载分系统由气源、电磁阀、 管路等组成,用于试验装置内腔加压。如图 4 所示, 4 套电磁阀控制试件内部压力达到目标压力,内压加 载系统设计为内压加载粗调和微调 2 种模式。启动内 压加载后,开启 1#电磁阀,接通气路。加载控制程 序根据设置的粗调和微调压力范围进行判断,粗调模 式下,启动 2#电磁阀快速充压。当试件内的压力达 到微调压力范围内,关闭 2#电磁阀,开启 3#电磁阀 慢速充压,防止试验件内压力超压。当压力达到目标 压力后,关闭所有进气电磁阀,进入保压程序。内压 加载过程中,因环境温度升高,导致内压升高,打开 4#电磁阀,开启泄压程序,将压力调节至目标压力后, 关闭 4#电磁阀。



图 4 压力加载原理 Fig.4 Principle of pressure loading system

试验过程中,内压加载控制程序实施调节压力, 根据压力传感器反馈值,通过快、慢充压和泄压程序, 保证试件内的压力维持在目标压力范围内。内压加载 流程如图 5 所示。



图 5 压力加载流程 Fig.5 Pressure loading process

## 2.3 静力载荷施加方案

静力加载采用成熟的静力协调加载控制系统,通 过对外涵机匣静力载荷条件的分析,将其转换为可具 体实施的加载方案。典型的外涵机匣空间载荷转换方 法如图 6 所示,可通过力的等效转化求解。再根据具 体的加载方案,搭建静力加载框架和系统。典型的外 涵机匣静力载荷加载框架如图 7 所示。



图 6 典型外涵机匣空间载荷转化方案 Fig.6 Typical space load conversion method



图 7 静力加载框架 Fig.7 Static loading frame

静强度载荷试验框架设计过程中,都需要对主要 承载和传递载荷的结构进行强度校核。在典型外涵机 匣静力和压力载荷施加框架中,也需要进行结构的强 度校核。典型外涵机匣加载系统中必要的强度仿真计 算结果如图 8 所示。

#### 2.4 试验实施

典型飞机发动机复合材料外涵机匣静热强度试验的实施如图9所示。外涵机匣试验过程中,一般先施加温度载荷到目标温度等级,再按规定的要求同步施加静力和压力载荷。典型的温度、静力和压力载荷控制曲线如图10所示。通过本试验可以考核发动机复合材料外涵机匣在发动机载荷下的静热强度,获取结构的承载能力,为飞机发动机外涵机匣优化设计提供重要的试验依据。



图 8 强度仿真校核结果 Fig.8 Strength simulation results: a) upper cabin; b) lower cabin



图 9 典型外涵机匣静热强度考核试验实施 Fig.9 Implementation of static heat strength test for typical bypass casing



Fig.10 Typical static load control curves: a) temperature load; b) pressure load; c) static load

# 3 结语

航空发动机外涵机匣设计从传统金属材料过渡 到复合材料,以减轻自重来保障发动机整体质量指标。传统常温等效强度试验模拟高温环境的方法无法 对复合材料结构进行考核,必须通过施加真实的高 温、压力和静力联合载荷进行强度考核。文中提出了 一种复合材料外涵机匣静热强度试验方法,能够充分 对航空发动机外涵机匣飞行过程中的综合环境进行 地面模拟考核,并且能够有效解决加载过程中压力与 静力载荷的解耦、高温高压下结构变形带来的气密性 问题以及加载过程中密封结构或产品本身少量漏气 时压力载荷的动态稳定控制等问题。

#### 参考文献:

 林左鸣.世界航空发动机手册[M].北京:航空工业出版社,2012:45-301.
 LIN Zuo-ming. Handbook of aero engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012:45-301.
 刘长福,邓明.航空发动机结构分析[M].西安:西北工业大学出版社,2006:1-20.

LIU Chang-fu, DENG Ming. Structure analysis of aeroengine[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006: 1-20.

[3] 张宝诚. 航空发动机的现状和发展[J]. 沈阳航空工业 学院学报, 2008, 25(3): 6-10. ZHANG Bao-cheng. State and development of aero-engine [J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2008, 25(3): 6-10.

- [4] 吕春光. 航空发动机外涵机匣结构建模方法研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(1): 29-32.
   LV Chun-guang. Study of modeling for aeroengine bypass duct[J]. Aero-engine, 2012, 38(1): 29-32.
- [5] 陈光. 航空发动机结构分析设计[M]. 北京: 京航空航 天大学出版社, 2014: 10-150.
   CHEN Guang. Aircraft engine structure analysis and design[M]. Beijing: Beihang University Press, 2014: 10-150.
- [6] 洪杰. 航空燃气涡轮发动机总体结构设计与动力学分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 1-50.
   HONG Jie. Aero gas turbine engine structure design and dynamic analysis[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 1-50.
- [7] 肖国树. 航空发动机设计手册(第 5 册): 涡喷及涡扇发动机 总体[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 1-20.
   XIAO Guo-shu. Aircraft engine design manual (the fifth volumes): Turbojet and turbofan engine—Overall[M].
   Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 1-20.
- [8] 江和甫,古远兴,卿华. 航空发动机的新结构及其强度 设计[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(2): 1-4. JIANG He-fu, GU Yuan-xing, QING Hua. New structure and strength design of aeroengine[J]. Gas turbine experiment and research, 2007, 20(2): 1-4.
- [9] THOMAS R D, MICHAEL J H. Engine wars competition for U.S. fighter engine production[C]// 34th AIAA/ASME/ SAE/ASEE joint propulsion conference and exhibit.

Cleveland, OH: AIAA, 1998.

- [10] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业 大学出版社, 2011: 1-8.
  LIAN Xiao-chun, WU Hu. Principle of aeroengine[M].
  Xi'an: Northwestern Polytechnieal University Press, 2011: 1-8.
- [11] 王云. 航空发动机原理[M]. 北京: 北京航空航天大学 出版社, 2011: 52-60.
   WANG Yun. Principle of aeroengine[M]. Beijing: Beihang University Press, 2011: 52-60.
- [12] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008: 15-105.
   WANG Xin-yue. Basis of gas dynamics[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008: 15-105.
- [13] 田大可,袁长龙,徐雪,等.基于气动性能优化的某型 发动机外涵机匣结构设计[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 43-46.
  TIAN Da-ke, YUAN Chang-long, XU Xue, et al. Research on structure design of the bypass casing for a cer-

search on structure design of the bypass casing for a certain type aeroengine based on aerodynamic performance optimization[J] Aero-engine, 2016, 42(4): 43-46.

[14] 赵凯, 刘鹏飞, 刘波浪, 等. 树脂基复合材料外涵道机 匣的研制与应用[J]. 复合材料科学与工程, 2020(4): 112-116.
ZHAO Kai, LIU Peng-fei, LIU Bo-lang, YI Kai. Development and application of Bypass Casing made of resin matrix composite Aero-engine[J]. Aero-engine, 2020(4): 112-116.

[15] 王绍凯,马绪强,李敏,等.飞行器结构用复合材料四 大核心技术及发展[J].玻璃钢/复合材料,2014(9):76-84. WANG Shao-kai, MA Xu-qiang, LI Min, et al. Four key technologies of structural composites for aircraft applications and its evelopment[J]. Fiber reinforced plastics/ composites, 2014(9): 76-84.

- [16] 映红,赵智姝,韩勐.复合材料在飞机结构上的广泛应用[J].装备制造技术,2011(4):138-140.
   YING Hong, ZHAO Zhi-shu, HAN Meng. The wide application of composite material in the aircraft structure[J]. Equipment manufacturing technology, 2011(4):138-140.
- [17] 夏鹤鸣, 朴学奎, 范平, 等. 复合材料机翼液压管路设 计影响分析[J]. 机械设计与制造工程, 2013, 42(5): 52-54.
  XIA He-ming, PIAO Xue-kui, FAN Ping, et al. The analysis of hydraulic system tubing design in composite wing[J]. Machine design and manufacturing engineering,
- [18] LEE I, LEE D M, OH L K, Supersonic flutter analysis of stiffened laminated plates subjected to thermal load[J]. Journal of sound and vibration, 1999, 234(1): 49-67.

2013, 42(5): 52-54.

- [19] FU Y M, CHEN Y, ZHONG J. Analysis of nonlinear dynamic response for delaminated fiber-metal laminated beam under unsteady temperature field[J]. Journal of sound and vibration, 2014,333(22): 5803-5816.
- [20] KEHOE M W, SNYDER H T. Thermoelastic vibration test techniques: NASA T M 101742[R]. Washington, D C: NASA, 1991.
- [21] VOSTEEN L F, MCWITHEY R R,THOMSON R G. Effect of transient heating on vibration frequencies of some simple wing structures: NASA T N 4054[R]. Washington, D C: NASA, 1955.