

文章编号: 1674-8190(2022)06-017-12

# 面向包容性的航空发动机机匣研究综述

谭毅<sup>1</sup>, 杨书仪<sup>1</sup>, 左建华<sup>1</sup>, 郭小军<sup>2</sup>, 孙要兵<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湘潭 411201)

(2. 中国航发湖南动力机械研究所 结构强度研究部, 株洲 412002)

(3. 中国航发南方工业有限公司, 株洲 412002)

**摘要:** 机匣作为航空发动机的关键部件, 其包容性能是保障飞行安全的必要条件。针对机匣包容性问题, 首先, 简要介绍涉及包容性的机匣类别和结构形式; 其次, 从理论研究、仿真分析及试验测试等方面概述机匣的冲击响应、损伤机理和包容性能等, 按机匣材料类别对包容性数值仿真研究进行分类介绍, 简述机匣包容性试验方法及试验研究进展; 最后, 总结机匣包容性研究状况并从机匣工作条件、受载情况和优化设计角度对机匣包容性研究进行展望。

**关键词:** 航空发动机; 机匣; 包容性分析; 冲击载荷; 结构损伤

**中图分类号:** V231.9

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.06.02

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Review of Aero-engine Casing Containment Research

TAN Yi<sup>1</sup>, YANG Shuyi<sup>1</sup>, ZUO Jianhua<sup>1</sup>, GUO Xiaojun<sup>2</sup>, SUN Yaobing<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

(2. Structural Strength Research Department, AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

(3. AECC South Industry Corporation Ltd., Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** Casings are key components for the aero-engine, and its containment performance is a necessary condition for ensuring flight safety. Firstly, the types and structural forms of the casing related to containment are briefly introduced. Then, the impact response, damage mechanism and containment ability of casings are summarized from aspects of theoretical researches, simulation analyses and experimental tests. Besides, numerical simulation researches about casing containment are introduced according to types of casing material. Test methods about casing containment and its research progresses are analyzed. Finally, the containment research status of casings is summarized and the development tendency of casings containment is looked from the perspective of working condition, loading situations and optimization design.

**Key words:** aero-engine; casing; containment analysis; impact loads; structural damages

收稿日期: 2021-10-21; 修回日期: 2022-03-15

基金项目: 湖南省自然科学基金(2020JJ4026); 湖南省研究生科研创新项目资助(CX20210997)

通信作者: 杨书仪, ysy822@126.com

引用格式: 谭毅, 杨书仪, 左建华, 等. 面向包容性的航空发动机机匣研究综述[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 17-28.

TAN Yi, YANG Shuyi, ZUO Jianhua, et al. Review of aero-engine casing containment research[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 17-28. (in Chinese)

## 0 引言

航空发动机是飞机的“心脏”，被誉为现代工业“皇冠上的明珠”<sup>[1]</sup>。航空发动机可分为活塞式发动机和喷气式发动机两大类。燃气涡轮发动机是目前应用最广泛的喷气式航空发动机，主要结构包括：风扇、机匣、压气机、燃烧室、涡轮和排气装置等。机匣是整个发动机结构组成的主要支撑部件，是发动机可靠运行的关键安全部件。

航空发动机在使用周期内承受的载荷和所处的工况十分复杂，受外物打击、疲劳以及相关缺陷（材料、设计、工艺、维修等）的影响，发动机轮盘、轮毂、叶片等运动部件可能失效并高速撞击机匣<sup>[2]</sup>。若机匣的强度不满足要求，产生的高能碎片穿透机匣，可能继续造成飞机机舱、油箱、液压管路及控制线路等关键部位的损坏，严重危及飞行安全<sup>[3]</sup>。机匣将高能碎片“包”在发动机内，防止碎片穿透机匣而对飞机造成严重的二次损伤的能力，称为机匣包容性能或包容性<sup>[4]</sup>。针对机匣包容性问题，航空发动机规范中有专门条文对其提出严格要求<sup>[5]</sup>。然而，由于机匣包容能力不足而导致的机舱失压、油箱泄漏起火等非包容性事故仍时有发生<sup>[6-9]</sup>，机匣非包容失效仍是引起飞机失事的主要原因之一<sup>[10-11]</sup>。

本文针对航空发动机机匣包容性问题，简要介绍须考虑包容设计的机匣种类和结构形式，从理论研究、仿真分析及试验测试三个角度概述面向包容性的机匣研究成果，指出目前机匣包容性研究暂未解决的问题，以期为航空发动机结构强度研究提供参考。

## 1 涉及包容性的机匣种类

航空发动机机匣种类繁多，按照功能不同可分为：进气机匣、风扇机匣、中介机匣、压气机机匣、轴承机匣、燃烧室机匣、涡轮机匣、涡轮后机匣、加力燃烧室机匣、外涵机匣、附件机匣等<sup>[12]</sup>。各段机匣间相互连接，共同构成发动机的外壳。在风扇机匣、压气机机匣和涡轮机匣内部运行着高速旋转的叶片，如图 1 所示，这些机匣相比于其他机匣还须具备包容飞断碎片的能力。

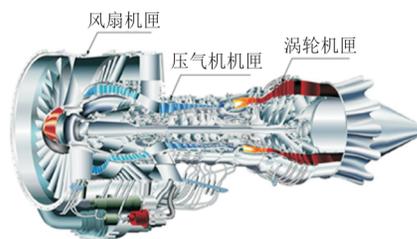


图 1 典型航空燃气涡轮发动机  
Fig. 1 Representative aviation gas turbine engine

风扇机匣是指涡扇发动机上风扇结构单元外壳，主要功能是构成气流通道的，提高进入发动机内空气的压力。同时，风扇机匣承担着承力框架、防止叶片飞出以及吸声降噪的作用。此外，由于风扇处于发动机前端，易受外物打击，且风扇叶片在发动机叶片中质量最大，风扇叶片飞断后对机匣的破坏最为严重，故风扇机匣的包容性能显得尤为重要。目前，针对风扇机匣的包容性结构设计主要分为两类：硬壁结构(hard-wall)和软壁结构(soft-wall)<sup>[13]</sup>，如图 2 所示。硬壁结构风扇机匣作为早期机匣包容性设计的主要结构，采用金属材料制造，沿周向布置有加强筋，以提高其抗冲击能力。硬壁机匣依靠金属材料的塑性变形抵抗碎片冲击，具有较强的包容性能，但在提高机匣安全性的同时增加了机匣重量，其性能难以满足现代高推重比发动机的设计要求<sup>[14]</sup>。随着材料科学技术的不断成熟，具有轻质、高强度的复合材料被应用于软壁结构风扇机匣。软壁结构机匣的轻质金属骨架上包覆有强韧性的纤维缠绕层，最外层覆以环氧树脂，组成复合材料包容结构。叶片飞出时，骨架易被击穿，而外层的纤维材料具有良好的韧性和大变形能力，能有效吸收冲击能量。该类包容结构同样具有良好的包容能力，且大幅度降低了机匣质量，提高飞机推重比和降低油耗，目前已成为航空发动机风扇包容机匣的首选结构<sup>[13]</sup>。

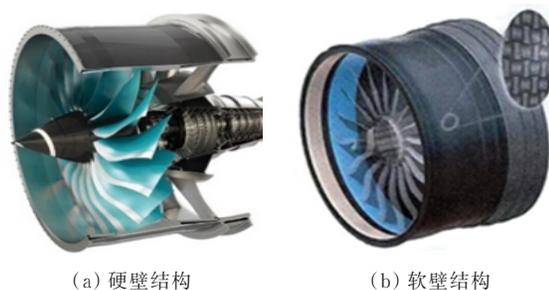


图 2 风扇机匣  
Fig. 2 Fan casings

受温度条件的限制,压气机机匣及涡轮机匣采用金属材料制造,机匣包容性设计体现为“硬壁”包容。目前,航空发动机广泛采用双转子轴流压气机,其包含低压和高压两部分转子。由于低压和高压两部分压气机工作温度存在差异(低压 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高压 $300\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),压气机机匣使用材料有所不同。低压机匣常采用钛合金制造,对于温度较高的高压机匣则采用合金钢制造。在机匣结构上,压气机机匣可分为分半式机匣和整环式机匣<sup>[15]</sup>,如图3所示。分半式机匣结构简单,易安装,但机匣沿周向分布不均,受外载时机匣圆度不易保持,影响压气机效率。整环式机匣各位置刚性均匀,但不易装配,维修性差。在包容能力方面,分半式机匣及整环分段机匣的包容性能对比研究较少。

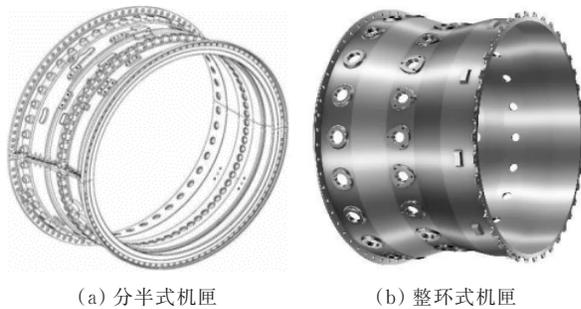


图3 压气机机匣  
Fig. 3 Compressor casings

为了提高机匣的包容性以及控制机匣变形,涡轮机匣采用镍基高温合金制造,机匣形式常采用双层结构<sup>[16]</sup>,如图4所示。由于涡轮机匣处于高温燃气中,冷热变化急骤,为避免机匣出现翘曲变形等问题,一般采用整环式机匣。涡轮双层机匣间通过燃烧室二股气流或某级压气机引来的气体,使涡轮内层机匣不直接与冷空气接触,以减少机匣内外层温差,降低机匣热应力。此外,双层结构可使机匣的受力件与传力件分开,让温度较低的外层机匣受力,从而让内层机匣承受较少的载荷,减少机匣变形量以提高发动机效率。由于涡轮机匣工况的复杂性,研究涡轮机匣包容性难度较大,目前考虑高温、气流作用下的涡轮机匣包容性研究成果仍较少。

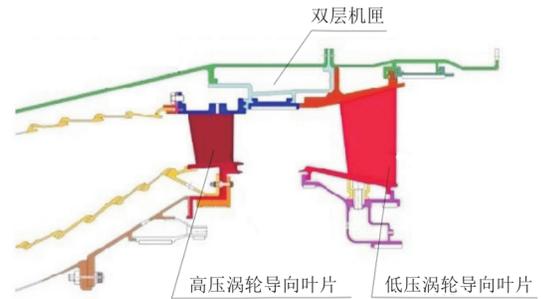


图4 F404高压涡轮双层机匣<sup>[16]</sup>  
Fig. 4 F404 high pressure turbine double casing<sup>[16]</sup>

## 2 机匣包容性理论研究

早在20世纪60年代,麻省理工学院气动弹性与结构研究实验室(Aeroelastic and Structures Research Laboratory)就开始探索理论上预测碎片与机匣之间相互作用行为、瞬态变形和响应的方法<sup>[17]</sup>。1970年,R. B. Mccallum<sup>[18]</sup>建立了一种刚性碎片撞击机匣的力学模型,如图5所示,模拟叶片—机匣相互作用试验中的力学行为;1972年,R. M. Zirin等<sup>[19]</sup>提出了一种近似碰撞分析方法,用于研究断裂叶片与机匣之间的相互作用;1973年,T. P. Collins等<sup>[20]</sup>采用碰撞传递速度法(Collision-imparted Velocity Method)结合有限元理论求解平面内机匣的瞬态弹塑性变形和碎片的运动;1975年,J. H. Gerstle<sup>[21]</sup>基于大扰度理论和有限差分法得到叶片撞击机匣过程中叶片和机匣的运动。

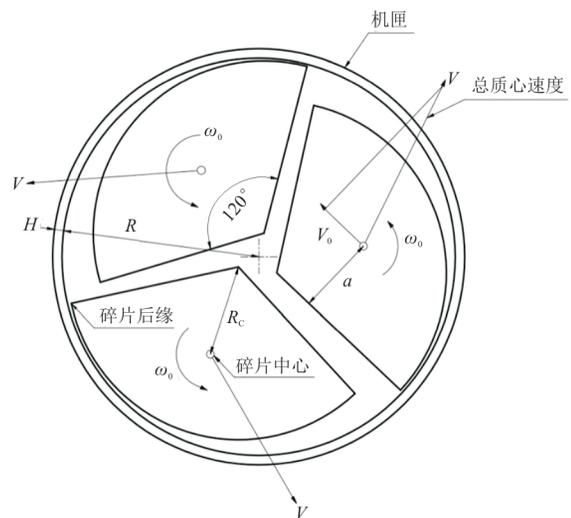


图5 转子碎片撞击机匣理论模型<sup>[18]</sup>  
Fig. 5 Theoretical model of rotor fragments impacting casing<sup>[18]</sup>

国内开展的机匣包容理论研究的成果较少,于亚彬等<sup>[22]</sup>从能量角度分析了机匣的失效模式,提出机匣剪切能小于叶片动能时机匣失效形式为花瓣型失效;郑劲松<sup>[23]</sup>采用能量法建立了一个撞击试验的理论模型,如图6所示,推导出叶片撞击机匣后的凹坑深度。

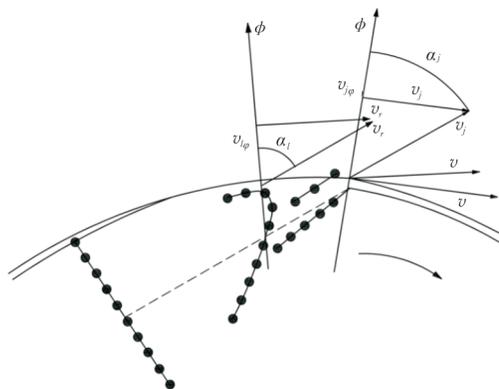


图6 叶片撞击机匣理论模型<sup>[23]</sup>

Fig. 6 Theoretical model of blade impacting casing<sup>[23]</sup>

由于冲击过程涉及多种非线性问题,机匣包容理论研究局限于简单结构机匣,且对载荷条件等进行了一定程度的简化,难以适用于复杂结构机匣。随着电子计算机技术的快速发展,许多大型非线性有限元程序被开发和应用。由于这些程序具有高效的求解器以及丰富、实用的非线性材料库,机匣包容性研究取得突破性进展<sup>[24]</sup>。近年来,国内外研究人员广泛采用数值仿真与试验测试相结合的方法来开展机匣包容性研究工作。

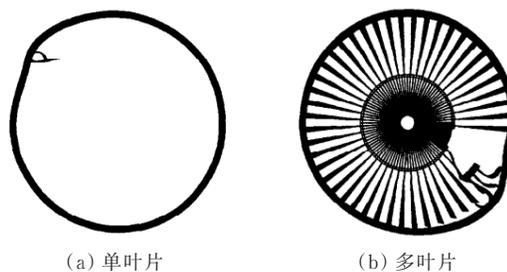
### 3 机匣包容性数值仿真

机匣包容性试验在短暂而强烈的动载作用下实现,碎片撞击过程中能获取的动态响应参数较少,试验费用昂贵、周期长,因此,在发动机研制前期通常采用数值仿真结合试验测试的方法,以加快研制速度和降低研制费用<sup>[25]</sup>。机匣包容性仿真分析按材料类别可分为两类:传统金属机匣和新型复合材料机匣。目前,金属机匣在航空发动机上占主导地位,但在风扇机匣的应用和研究上,复合材料机匣正逐渐取代金属机匣<sup>[26]</sup>。

#### 3.1 金属材料机匣仿真分析

金属机匣材料主要分为铝合金、钛合金和合

金钢。1991年,T. B. Dewhurst<sup>[27]</sup>采用ANSYS预测多叶片脱落过程中叶片施加在钢制机匣上的时变载荷函数,获得机匣应力应变分布情况;1993年,J. Mathis等<sup>[28]</sup>采用仿真分析软件ABAQUS和DYTRAN研究了合金钢平板和机匣受刚性体撞击的冲击响应过程;1996年,S. Sarkar等<sup>[29]</sup>采用有限元程序DYNA3D建立了不同数量叶片撞击铝合金机匣的数值仿真模型,如图7所示,该模型能有效模拟高速碎片撞击机匣的大变形及失效,以等效塑性应变作为材料失效准则,评估了飞断叶片和转子叶片之间的多次碰撞对包容过程的影响,并与单叶片的情况进行比较。



(a) 单叶片

(b) 多叶片

图7 不同数量叶片撞击机匣仿真模型<sup>[29]</sup>

Fig. 7 Simulation models of different number of blades impacting the casing<sup>[29]</sup>

国内机匣包容性仿真研究发展于21世纪初,研究人员使用有限元软件对叶片撞击机匣过程开展了初步研究。于亚彬等<sup>[30]</sup>基于LS-DYNA对叶片撞击20钢机匣的过程进行了数值仿真分析,评估了机匣不同厚度、叶片不同材料及转速下机匣的包容性能;姜涛等<sup>[31]</sup>基于LS-DYNA分析了叶片撞击TA7机匣过程中叶片与机匣的能量变化历程、机匣应力状态及叶片运动轨迹。近年来,针对机匣包容性问题,主要从以下三个方面展开了相应的研究工作。

叶片飞断后撞击机匣时其姿态具有随机性。何庆等<sup>[32]</sup>采用数值仿真方法研究了不同偏航角对叶片动能损耗规律及靶体失效模式的影响,如图8所示,结果表明:随着偏航角的增大,靶体破坏面积增大,叶片耗散能量增多且弯曲变形严重,靶体失效模式由充塞失效转变为缺口撕裂;万云帆等<sup>[33]</sup>开展了带俯仰角叶片撞击钛合金机匣的数值仿真研究,得出了不同俯仰角下机匣的临界包容速度,分析了不同俯仰角下机匣的失效模式。

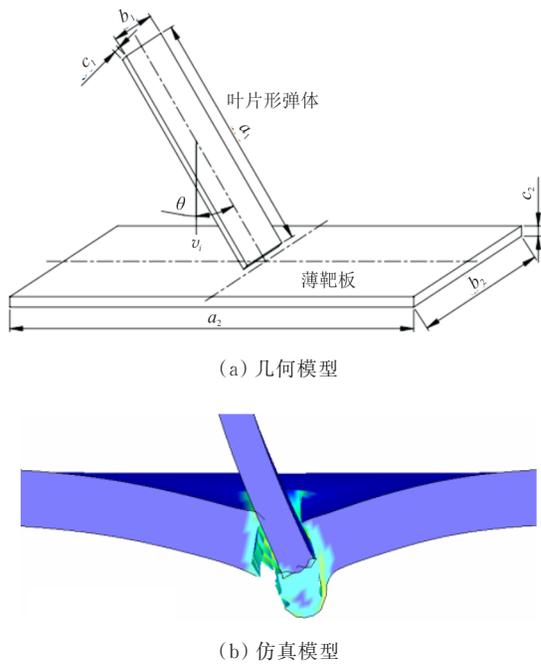
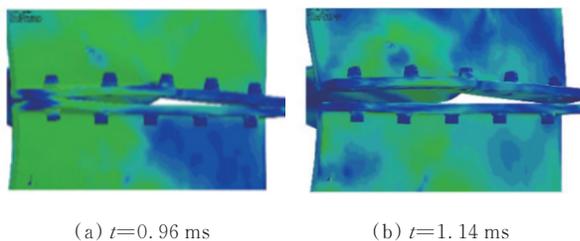


图 8 叶片撞击平板模型<sup>[32]</sup>

Fig. 8 Model of blade impacting plate<sup>[32]</sup>

机匣结构参数对机匣包容性能的影响受到关注。杨乐等<sup>[34]</sup>采用数值仿真方法研究了层间距及厚度分配对双层机匣包容性能的影响; Bai C 等<sup>[35]</sup>研究了涡轮盘碎片作用下 U 型机匣凹槽深度对机匣包容性能的影响, 结果表明凹槽深度影响了机匣的轴向包容能力, 并说明了碎片与机匣间的能量传递过程; 陈苍<sup>[36]</sup>建立了铝蜂窝夹层板结构机匣的有限元模型, 分析了不同厚度下机匣的包容性能; 曹振忠等<sup>[37]</sup>对带有安装边螺栓连接结构的机匣进行较为全面的有限元仿真, 如图 9 所示, 考虑叶片撞击角度、撞击位置、定距套和止口对机匣包容能力的影响, 并揭示了受叶片冲击后螺栓发生剪切和拉伸断裂的原因。



(a)  $t=0.96$  ms (b)  $t=1.14$  ms

图 9 带安装边螺栓结构机匣破坏过程<sup>[37]</sup>

Fig. 9 Failure process of casing with bolted flanges<sup>[37]</sup>

建立高精度仿真模型以反映真实机匣包容过程。柴象海等<sup>[38]</sup>建立了高精度风扇机匣包容性仿真预测模型, 拟合得到了叶片载荷与机匣厚度之间的关系曲线; He Q 等<sup>[39]</sup>建立了全叶片—机匣仿真模型, 如图 10 所示, 研究单个叶片脱落后其余叶片作用对钛合金以及高温合金机匣包容性能的影响; He Z 等<sup>[40]</sup>建立了全叶片—机匣仿真模型, 分析了发动机压气机叶片撞击不锈钢机匣的包容特性和机理。

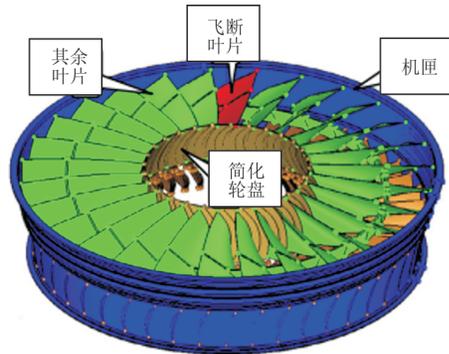


图 10 全叶片—机匣包容性仿真分析<sup>[39]</sup>

Fig. 10 Containment simulation analysis of full blades-casing<sup>[39]</sup>

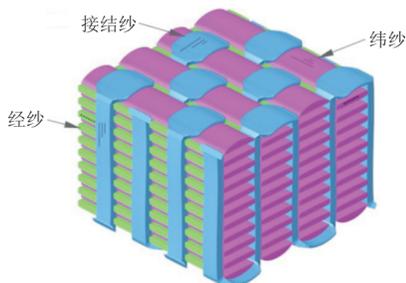
### 3.2 复合材料机匣仿真分析

先进复合材料应用于飞行器结构能有效地降低其重量, 显著提升飞行器性能<sup>[41]</sup>。其中, 轻质复合材料由于具有质量轻、强度大的特性, 能够在保证机匣具备优异包容性能的同时, 降低航空发动机整体重量。因此, 轻质复合材料机匣已成为近年来风扇机匣包容性研究的主要对象<sup>[14]</sup>。

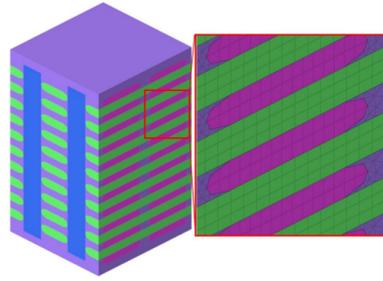
早在 1975 年, J. H. Gerstle<sup>[21]</sup>开发了一个大变形有限元程序, 用于复合材料机匣的包容性能测试, 其结果与试验数据能较好地匹配; 2007 年, J. B. Husband<sup>[42]</sup>基于 LS-DYNA 开发了一个计算风扇叶片脱落载荷的显式整机发动机模型, 建立了 Kevlar 缠绕格栅铝型风扇机匣, 研究了风扇叶片脱落后与后续叶片之间的相互作用对机匣的影响; 2009 年, I. V. Vintilescu<sup>[43]</sup>针对风扇叶片脱落事件, 提出了纤维缠绕型机匣数值模拟方法, 复合材料机匣模型如图 11 所示, 基于已完成的包容性试验数据, 验证了数值模拟的正确性。

图 11 复合材料机匣包容性有限元模型<sup>[43]</sup>Fig. 11 Finite element model of composite material casing<sup>[43]</sup>

由于复合材料机匣内编织纤维具有各向异性,建模方法不同于具有各向同性的金属材料。国内外针对编织材料建模方法,发展了纱线模型、连续介质模型和单胞模型,如图 12 所示。纱线模型基于具体编织微观结构,如图 12(a)所示,典型三维编织纱线模型包括经纱、纬纱和接结纱,能够模拟编织材料之间的相互作用,从而有效预测纤维结构的失效模式。纱线模型从微观层面反映纤维结构的变形机制,但由于建模方法的局限性,在计算效率方面相对较低。连续介质模型基于织物的宏观力学性能,将编织材料等效成各向异性均质体,通过试验测得具体织物结构的本构关系,建立编织复合材料仿真模型。编织复合材料连续介质模型建模方法与金属材料建模方法类似,因此具备计算效率高的特点,但无法表现编织结构间的运动行为及力学作用。单胞模型的基本原理是将织物中重复出现的最小单元结构等效成各项异性连续体,如图 12(b)所示,在单胞内基于纱线结构建立编织结构之间的力学关系。基于宏观分析方法的单胞模型具备上述建模方法的优点,难点在于如何准确描述编织结构内纱线运动、变形的力学关系<sup>[44]</sup>。



(a) 纱线模型



(b) 单胞模型

图 12 编织复合材料建模方法<sup>[45]</sup>Fig. 12 Modeling method of braided composites<sup>[45]</sup>

P. A. Roy 等<sup>[46]</sup>采用连续介质建模方法对 Kevlar 纤维材料和泡沫铝组成的复合材料包容机匣进行了包容性仿真分析,结果表明该类机匣具有优异的包容性能;时起珍<sup>[47]</sup>基于单胞模型对软壁机匣包容性能进行了仿真分析,结合弹道冲击试验验证了单胞模型的准确性。浙江大学宣海军教授团队针对编织复合材料机匣开展了较为广泛的研究。2014 年,刘璐璐<sup>[48]</sup>开展了二维三轴编织碳纤维复合材料多尺度建模方法研究,对比分析了纱线模型、单胞模型和连续介质模型的仿真准确性及工程适用性;2015 年,牛丹丹<sup>[49]</sup>对纤维缠绕增强机匣包容性进行了系统研究,基于打靶仿真对比了纱线模型和连续介质模型的计算效率、仿真预测准确性等;2017 年,何泽侃等<sup>[50]</sup>基于连续介质模型建立了 Kevlar 缠绕机匣有限元模型,研究了叶片冲击复合材料机匣的包容过程;2020 年,宋曼丽<sup>[51]</sup>针对三维编织/机织复合材料机匣,采用连续介质模型对旋转打靶试验结果进行仿真计算。

## 4 机匣包容试验研究

机匣包容试验按实施的难易程度可分为平板打靶试验、旋转叶片试验、整机包容试验等<sup>[25]</sup>。适航规范中要求在真实发动机上完成机匣包容性试验。由于整机包容试验的不可修复性,试验成本极其昂贵,故在发动机机匣的设计阶段,普遍采用具有机匣—叶片特征的模拟试验,以研究机匣的损伤机理和验证机匣的包容性设计<sup>[52]</sup>。

### 4.1 平板打靶试验

打靶试验具有周期短、成本相对较低等特点,一般在研制初级阶段采用,如图 13 所示,其发射装

置通常为气炮或滑膛炮,发射物为金属平板片、金属圆柱等。通过打靶试验可以初步获得机匣的失效模式和冲击过程中的动态响应<sup>[24]</sup>。

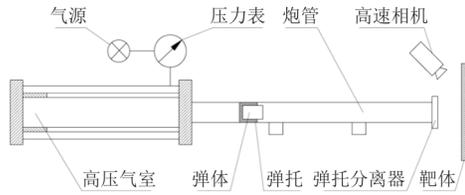


图13 平板打靶试验

Fig. 13 Flat-panel shooting test

1974年,A. C. Hagg等<sup>[53]</sup>采用不同长度和直径比例的铁棒撞击铁板,获得铁板受冲击载荷下的失效模式;R. P. Gogolewski等<sup>[54-55]</sup>在1995年通过打靶试验研究多层金属结构的机匣包容适用性,又在1999年进行钛合金子弹冲击2024-T3铝合金靶体,确定靶体失效模式;2014年,段玥晨等<sup>[56]</sup>搭建了滑膛炮试验测试系统,开展了真实叶片在多种速度下撞击某型钛合金机匣的垂直打靶试验;2016年,K. A. J. Vander<sup>[57]</sup>对复合材料风扇机匣进行冲击试验,研究了复合材料的冲击行为。

为了探究涡轮机匣材料的冲击性能及其高温下的材料行为,J. J. Demange等<sup>[58]</sup>在2009年研究了不同热处理条件下镍基高温合金板的冲击行为;此后,B. Erice等<sup>[59]</sup>对不同温度下沉淀强化Inconel 718镍基高温合金板进行了打靶试验,如图14所示;Xie W等<sup>[60]</sup>的研究表明,Inconel718和617板在高温和高速冲击下的穿孔模式为压缩和剪切联合破坏。

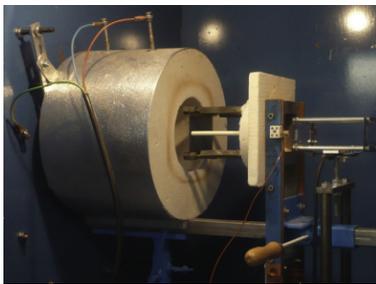


图14 高温打靶试验<sup>[59]</sup>

Fig. 14 Shooting test at high temperature<sup>[59]</sup>

## 4.2 旋转叶片试验

打靶试验中弹体径直撞击平板,简化了真实叶片脱落运动轨迹和机匣几何特征。旋转叶片试验考虑到机匣的结构形状、叶片与机匣碰撞姿态

等关键因素,更能体现断裂碎片冲击机匣后叶片及机匣的破坏模式及失效机理<sup>[61]</sup>。旋转叶片试验一般在专用旋转试验台上进行,采用预制缺口叶片,当转速达到一定值时,叶片脱离转子撞击机匣,通过在机匣上安装测试系统测量机匣的瞬态响应,如图15所示。

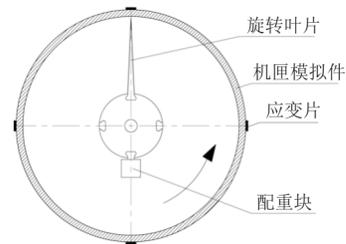


图15 单叶片包容试验

Fig. 15 Single blade containment test

1964年开始,美国海军航空推进试验中心建造并使用高速旋转试验台,开展了多种尺寸转子的机匣包容试验<sup>[62]</sup>。国内起步相对较晚,1992年,龚梦贤等<sup>[63]</sup>在浙江大学叶轮超速破坏试验台上进行了单个叶片包容性试验,确定了叶片撞击机匣的碰撞姿态、叶片与机匣的损伤模式,测量了碰撞过程中机匣的应变响应;2000年,吴荣仁<sup>[64]</sup>在高速旋转试验台上进行了矩形叶片撞击机匣试验,分析了机匣的危险撞击区域;2006年,Xuan H等<sup>[65]</sup>对断裂叶片与机匣的撞击过程开展试验研究,提出应高度重视叶片与机匣碰撞的第二次撞击区域;同年,张伯熹等<sup>[66]</sup>搭建了旋转叶片包容试验测试系统,对比研究高能长叶片和高能短叶片对机匣的撞击变形和破坏作用;2007年,范志强等<sup>[67]</sup>进行多叶片作用下叶片脱落的包容试验,研究表明,飞断叶片在其他叶片的作用下第二次撞击引起机匣剪切破裂;2012年,何庆等<sup>[68]</sup>同样在高速旋转试验台上进行包容试验,研究多叶片作用对机匣包容性能的影响;2017年起,He Z K等<sup>[69-70]</sup>开展一系列旋转叶片冲击试验,研究Kevlar纤维缠绕软壁机匣的包容性能。

## 4.3 整机包容试验

整机包容试验是取得适航许可证的关键条件之一,也是验证机匣包容性能最直接有效的方式。由于发动机造价极其昂贵,且该测试为不可修护的破坏性试验,一般作为航空发动机研制阶段的最后一项试验<sup>[71]</sup>。整机包容试验在专用设备上进

行<sup>[72]</sup>,如图 16 所示,试验台上装有高速摄像设备及配套灯光装置用来记录叶片撞击机匣的相互作用过程。为了更加清晰地辨别风扇叶片断裂位置,预制断裂叶片一般涂成彩色,其余叶片涂以白色。当发动机转速达到最大时释放叶片,叶片飞脱方式包括:预制裂纹法、电加热法和爆破法等<sup>[73]</sup>。其中爆破法因兼具转速控制精度高和主动释放叶片的优点而被广泛采用。



图 16 整机包容试验<sup>[72]</sup>

Fig. 16 Aero-engine containment test<sup>[72]</sup>

近年来,公开资料显示国外已完成了多项整机包容试验。整机包容试验程序一般包括发动机启动前准备、慢车阶段、最大状态和试验结果评定<sup>[74]</sup>,如图 17 所示。1993 年,GE 公司对 CFE738 发动机进行了整机包容试验,完成了联邦航空局的认证测试<sup>[43]</sup>。1999 年,霍尼韦尔公司在 FAA 要求的官方认证测试之前,对一台全尺寸 HTF7000 发动机进行了整机包容试验<sup>[43]</sup>。英国罗罗公司分别在 2003 年和 2007 年完成了 Trent 900 和 Trent 1000 发动机的整机包容试验<sup>[10,75]</sup>。2016 年,GE 公司对世界上最大商用航空发动机 GE9X 进行了整机包容性试验<sup>[33]</sup>。

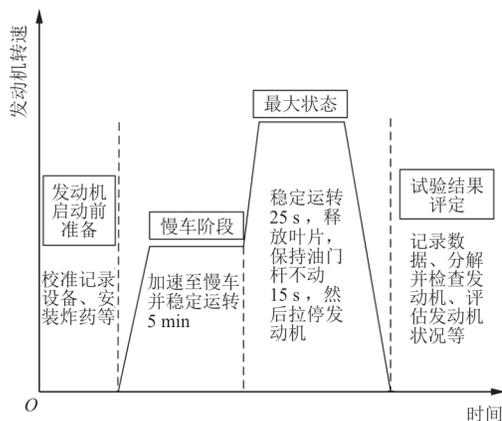


图 17 试验程序<sup>[74]</sup>

Fig. 17 Test procedure<sup>[74]</sup>

## 5 结束语

国内外研究人员围绕机匣包容性问题,采用理论分析、数值仿真及试验测试等方法开展了冲击状态下的机匣动态力学响应、机匣损伤模式等研究工作,研究内容不断拓展:机匣结构由单层机匣到多层机匣;机匣材料由金属材料推广到轻质复合材料;叶片数量从单叶片冲击增加到多叶片冲击;叶片飞断姿态从垂直撞击扩展到多角度撞击;测试方法由平板打靶试验发展到旋转叶片冲击试验。研究结论对机匣包容性设计具有重要指导意义。然而,由于航空发动机结构、工作条件的复杂性,机匣包容性研究还存在以下三个方面的问题有待深入开展:

(1) 多场耦合作用下机匣包容性分析。航空发动机在高温、高压、高转速下工作,在运行过程中工作条件复杂多变,叶片撞击机匣过程是一个涉及热、固、流多方面因素的综合性问题。在叶片脱离转子撞击机匣的过程中涉及温度场和气流场,目前机匣包容性研究绝大多数只考虑了叶片冲击作用,多场耦合作用下的机匣包容性分析还处于起步阶段。

(2) 初始载荷作用下机匣包容性分析。发动机工作时,机匣承受多种载荷,如静子重力、机匣内外空气压力、相邻组合件传来的扭矩及弯矩。大多数叶片/机匣冲击模型往往只施加了固定约束,而忽略了其他初始载荷作用。

(3) 面向包容性的机匣结构优化设计。机匣质量与机匣包容性能存在互相制约的关系,以往的研究很少涉及机匣包容性正向设计,如何优化机匣结构以协调机匣质量和其包容性能是机匣包容性设计的一个重点方向。

## 参考文献

- [1] 刘大响, 陈光. 航空发动机——飞机的心脏[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 1-10.  
LIU Daxiang, CHEN Guang. Aeroengine—the heart of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003: 1-10. (in Chinese)
- [2] 马艳红, 梁智超, 王桂华, 等. 航空发动机叶片丢失问题研究综述[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3): 513-526.  
MA Yanhong, LIANG Zhichao, WANG Guihua, et al. Review on the blade loss of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3): 513-526. (in Chinese)
- [3] 陈光涛. 几种典型机匣结构的包容性研究[D]. 杭州: 浙江

- 大学, 2014.
- CHEN Guangtao. Research on the containment of several kinds of typical casing structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [4] 陈光. 漫谈发动机的包容能力[J]. 航空知识, 1994(4): 20-21.
- CHEN Guang. Talking about the containment capability of engines[J]. Aviation Knowledge, 1994(4): 20-21. (in Chinese)
- [5] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定: CCAR-33-R2 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2016.
- Civil Aviation Administration of China. Aviation engine airworthiness regulations: CCAR-33-R2 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016. (in Chinese)
- [6] The Aviation Herald. Accident: American MD83 at New York on Mar 11th 2009, uncontained engine failure [EB/OL]. (2009-05-12) [2021-10-21]. <http://avherald.com/h?article=41650f96>.
- [7] The Aviation Herald. Accident: Southwest B737 near Pensacola on Aug 27th 2016, uncontained engine failure [EB/OL]. (2016-08-27) [2021-10-21]. <http://www.avherald.com/h?article=49d2d7e3&opt=0>.
- [8] The Aviation Herald. Accident: American B763 at Chicago on Oct 28th 2016, rejected takeoff, fire at right hand wing due to uncontained engine failure [EB/OL]. (2018-02-06) [2021-10-21]. <http://avherald.com/h?article=49ffa115/0003&opt=0>.
- [9] The Aviation Herald. Accident: Southwest B737 near Philadelphia on Apr 17th 2018, uncontained engine failure takes out passenger window [EB/OL]. (2018-04-17) [2021-10-21]. <http://www.avherald.com/h?article=4b7725fb/0005&opt=0>.
- [10] 宣海军, 陆晓, 洪伟荣, 等. 航空发动机机匣包容性研究综述[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1860-1870.
- XUAN Haijun, LU Xiao, HONG Weirong, et al. Review of aero-engine case containment research [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1860-1870. (in Chinese)
- [11] 冯建文, 吴长波, 刘金龙. 航空发动机非包容性失效案例及思考[J]. 航空动力, 2018(2): 75-79.
- FENG Jianwen, WU Changbo, LIU Jinlong. Uncontained engine failures review [J]. Aerospace Power, 2018(2): 75-79. (in Chinese)
- [12] 任军学, 田卫军, 姚倡锋, 等. 航空发动机机匣数控加工关键技术研究[J]. 航空制造技术, 2016(5): 73-77, 92.
- REN Junxue, TIAN Weijun, YAO Changfeng, et al. Research on key technology of aeroengine casing CNC machining [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(5): 73-77, 92. (in Chinese)
- [13] 沈尔明, 王志宏, 赵凤飞, 等. 风扇机匣材料应用现状与发展[J]. 航空制造技术, 2013(13): 92-95.
- SHEN Erming, WANG Zhihong, ZHAO Fengfei, et al. Application and development of material for aero-engine fan case [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(13): 92-95. (in Chinese)
- [14] 宣海军, 何泽侃, 牛丹丹, 等. 航空发动机软壁风扇机匣包容性研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(6): 81-87.
- XUAN Haijun, HE Zekan, NIU Dandan, et al. Investigation on containment of aeroengine soft-wall fan case [J]. Aeroengine, 2015, 41(6): 81-87. (in Chinese)
- [15] 陈光. 航空燃气涡轮发动机结构[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 64-71.
- CHEN Guang. Aviation gas turbine engine structure [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010: 64-71. (in Chinese)
- [16] 洪杰, 马艳红. 航空燃气涡轮发动机结构设计 [DB/OL]. (2021-02-22) [2021-10-21]. <https://www.icourse163.org/course/BUAA-1001607001>.
- HONG Jie, MA Yanhong. Structural design of aviation gas turbine engine [DB/OL]. (2021-02-22) [2021-10-21]. <https://www.icourse163.org/course/BUAA-1001607001>. (in Chinese)
- [17] WU R W H, WITMER E A. Approximate analysis of containment/deflection ring responses to engine rotor fragment impact [J]. Journal of Aircraft, 1973, 10(1): 28-37.
- [18] MCCALLUM R B. Simplified analysis of a trifragment rotor disk interaction with a containment ring [J]. Journal of Aircraft, 1970, 7(3): 283-285.
- [19] ZIRIN R M, WITMER E A. Examination of the collision force method for analyzing the responses of simple containment/deflection structures to impact by one engine rotor blade fragment: NASA-CR-120952 [R]. Washington DC: National Technical Information Service, 1972.
- [20] COLLINS T P, WITMER E A. Application of the collision-imparted velocity method for analyzing the responses of containment and deflector structures to engine rotor fragment impact: NASA-CR-134494 [R]. Washington DC: National Technical Information Service, 1973.
- [21] GERSTLE J H. Analysis of rotor fragment impact on ballistic fabric engine burst containment shields [J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(4): 388-393.
- [22] 于亚彬, 陈伟. 叶片包容机理分析综述 [C]// 探索创新交流——中国航空学会青年科技论坛论文集. 北京: 航空工业出版社, 2004: 251-255.
- YU Yabin, CHEN Wei. An overview of the blade containment theory [C]// Exploration, Innovation and Communication—Proceedings of the Youth Science and Technology Forum of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Beijing: Aviation Industry Press, 2004: 251-255. (in Chinese)
- [23] 郑劲松. 高速旋转平板叶片撞击同心圆筒壳体试验的研究 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 267-272.
- ZHENG Jinsong. Experimental studies on rotating plate pan-

- dle impacting concentric columnar shell[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(3): 267-272. (in Chinese)
- [24] 范晓敬. U形截面包容环包容性仿真研究与结构优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
FAN Xiaojing. Numerical simulation and structural optimization of U-section containment rings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [25] 何庆. 航空发动机机匣包容性机理及数值仿真方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
HE Qing. Research on the mechanism and simulation methodology development for aeroengine casing/blade containment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [26] 纪双英, 王晋, 邢军, 等. 国外航空发动机风扇包容机匣研究进展[J]. *航空制造技术*, 2010(14): 44-46, 48.  
JI Shuangying, WANG Jin, XING Jun, et al. Research development of containment casing of aeroengine fan abroad[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010(14): 44-46, 48. (in Chinese)
- [27] DEWHURST T B. The impact load on containment rings during a multiple blade shed in aircraft gas turbine engines [C]// *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1991: 1-7.
- [28] MATHIS J, PARDUHN S, ALVAREZ P. Analysis of turbine engine rotor containment and shielding structures [C]// *29th Joint Propulsion Conference and Exhibit*. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993: 1-4.
- [29] SARKAR S, ATLURI S N. Effects of multiple blade interaction on the containment of blade fragments during a rotor failure[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1996, 23(2/4): 211-223.
- [30] 于亚彬, 陈伟. 模型机匣/叶片的包容性数值分析[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(3): 429-433.  
YU Yabin, CHEN Wei. Numerical analysis of the modeled blade/casing containment[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(3): 429-433. (in Chinese)
- [31] 姜涛, 覃志贤, 范志强. 航天发动机机匣包容性试验的数值模拟[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2008(4): 34-37.  
JIANG Tao, QIN Zhixian, FAN Zhiqiang. Numerical simulation on aero-engine casing containment test[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2008(4): 34-37. (in Chinese)
- [32] 何庆, 宣海军, 廖连芳, 等. 薄靶板受叶片形弹体撞击的数值仿真研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(4): 234-239.  
HE Qing, XUAN Haijun, LIAO Lianfang, et al. Numerical simulation of a thin plate impacting by blade projectile[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(4): 234-239. (in Chinese)
- [33] 万云帆, 张帆, 曹振忠, 等. 机匣对带俯仰角叶片的包容性试验与仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(5): 58-62.  
WAN Yunfan, ZHANG Fan, CAO Zhenzhong, et al. Targeting experiment and evaluation of aero-engine casing impacted by blade with pitch angle[J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(5): 58-62. (in Chinese)
- [34] 杨乐, 关玉璞, 张涛, 等. 双层金属平板模拟机匣抗冲击性研究[J]. *航空发动机*, 2011, 37(6): 13-16, 20.  
YANG Le, GUAN Yupu, ZHANG Tao, et al. Study on penetration resistance of double-layer metallic flat simulation casing[J]. *Aeroengine*, 2011, 37(6): 13-16, 20. (in Chinese)
- [35] BAI C, XUAN H, HUANG X, et al. Containment ability and groove depth design of U type protection ring[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(2): 395-402.
- [36] 陈苍. 面向包容性的铝蜂窝夹层结构机匣数值仿真与实验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.  
CHEN Cang. Numerical simulation and experiments of containment with aluminum honeycomb sandwich structure casing[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [37] 曹振忠, 张帆, 章定国, 等. 带有安装边螺栓连接结构的机匣包容能力研究[J]. *航空学报*, 2021, 42(9): 349-363.  
CAO Zhenzhong, ZHANG Fan, ZHANG Dingguo, et al. Containment of aero-engine casing with bolted flanges[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(9): 349-363. (in Chinese)
- [38] 柴象海, 张晓云, 侯亮, 等. 航空发动机风扇机匣包容性等效试验与分析方法[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(2): 162-167.  
CHAI Xianghai, ZHANG Xiaoyun, HOU Liang, et al. Equivalent test and simulation verification for fan containment case of aeroengine[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2): 162-167. (in Chinese)
- [39] HE Q, XIE Z, XUAN H, et al. Multi-blade effects on aero-engine blade containment[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 49: 101-111.
- [40] HE Z, GUO X, XUAN H, et al. Characteristics and mechanisms of turboshaft engine axial compressor casing containment[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 171-180.
- [41] 郑锡涛, 陈浩远, 李泽江, 等. 先进复合材料在未来飞行器中的应用[J]. *航空工程进展*, 2011, 2(2): 181-187.  
ZHENG Xitao, CHEN Haoyuan, LI Zejiang, et al. Application of advanced composite materials to future aircraft[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2011, 2(2): 181-187. (in Chinese)
- [42] HUSBAND J B. Developing an efficient FEM structural simulation of a fan blade off test in a turbofan jet engine[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 2007.
- [43] VINTILESCU I V. Explicit finite element modeling of multilayer composite fabric for gas turbine engine containment

- systems, Part 4: Model simulation for ballistic tests, engine fan blade-out, and generic engine: DOT/FAA/AR-08/37 [R]. Washington DC: National Technical Information Service, 2009.
- [44] 刘璐璐, 陈伟, 时起珍, 等. 基于单胞模型的Kevlar织物高速冲击数值仿真方法研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(11): 119-125.  
LIU Lulu, CHEN Wei, SHI Qizhen, et al. Investigation on the high-speed impact numerical simulation method of Kevlar fabrics based on its unit cell model[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(11): 119-125. (in Chinese)
- [45] HU Y, HE Z, XUAN H. Impact resistance study of three-dimensional orthogonal carbon fibers/BMI resin woven composites[J]. Materials, 2020, 13(19): 4376.
- [46] ROY P A, MEGUID S A. Containment and arrest of blade shedding in gas turbine engines using novel dual-Ring design [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(7): 1-28.
- [47] 时起珍. Kevlar织物在冲击条件下的数值仿真方法研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
SHI Qizhen. Research and application on numerical simulation method of Kevlar woven fabric subjected to impact[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [48] 刘璐璐. 二维三轴编织带缠绕碳纤维复合材料机匣包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
LIU Lulu. Research on containment of 2D carbon fiber triaxial braided tape wound composite casing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [49] 牛丹丹. Kevlar织物缠绕增强机匣包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
NIU Dandan. Research on the containment of Kevlar fabric reinforced casing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [50] 何泽侃, 宣海军, 胡燕琪, 等. Kevlar缠绕增强机匣包容过程研究[J]. 工程力学, 2017, 34(s1): 308-313.  
HE Zekan, XUAN Haijun, HU Yanqi, et al. Investigation on containment process of case wrapped with Kevlar fabric [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(s1): 308-313. (in Chinese)
- [51] 宋曼丽. 三维编织/机织复合材料机匣包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
SONG Manli. Research on the containment of 3D braided/woven composite casing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [52] 陈国栋, 刘闯, 王洪斌, 等. 航空发动机包容试验研究综述[J]. 航空发动机, 2019, 45(3): 82-90.  
CHEN Guodong, LIU Chuang, WANG Hongbin, et al. Review of aeroengine containment test research[J]. Aeroengine, 2019, 45(3): 82-90. (in Chinese)
- [53] HAGG A C, SANKEY G O. The containment of disk burst fragments by cylindrical shells[J]. Journal of Engineering for Power. 1974, 96(2): 114-123.
- [54] GOGOLEWSKI R P, CUNNINGHAM B J. Terminal ballistic experiments for the development of turbine engine blade containment technology: UCRL-ID-120930 [R]. San Francisco: Lawrence Livermore National Lab., 1995.
- [55] GOGOLOWSKI R P, MORGAN B R. Ballistic experiments with titanium and aluminum targets: UCRL-ID-136691 [R]. San Francisco: Lawrence Livermore National Lab., 1999.
- [56] 段玥晨, 章定国, 陈思佳, 等. 航空发动机机匣包容性打靶试验与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(4): 106-109, 146.  
DUAN Yuechen, ZHANG Dingguo, CHEN Sijia, et al. Targeting experimental and simulation research on casing containment of aero-engine [J]. Computer Simulation, 2014, 31(4): 106-109, 146. (in Chinese)
- [57] VANDER K A J. Experimental impact testing and analysis of composite fan cases[D]. Ann Arbor: Michigan State University, 2016.
- [58] DEMANGE J J, PRAKASH V, PEREIRA J M. Effects of material microstructure on blunt projectile penetration of a nickel-based super alloy[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(8): 1027-1043.
- [59] ERICE B, PÉREZ-MARTÍN M J, GÁLVEZ F. An experimental and numerical study of ductile failure under quasi-static and impact loadings of Inconel 718 nickel-base superalloy [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 69: 11-24.
- [60] XIE W, YANG F, DING L, et al. Predictive models and experiments for high-velocity and high-temperature impacts in Inconel-alloy panels[J]. Materials & Design, 2019, 182: 108032.
- [61] 叶冬. 高速柔性转子突加大不平衡响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
YE Dong. Dynamic response of high speed flexible rotor due to sudden large unbalance [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [62] CHIARITO P T. Status of engine rotor burst protection program for aircraft[J]. Journal of Aircraft, 1972, 9(7): 449-450.
- [63] 龚梦贤, 王旅生, 曹风兰. 叶片包容性试验研究[J]. 航空动力学报, 1992, 7(2): 144-146.  
GONG Mengxian, WANG Lyusheng, CAO Fenglan. Experimental study on blade containment [J]. Journal of Aerospace Power, 1992, 7(2): 144-146. (in Chinese)
- [64] 吴荣仁. 汽轮机、航空发动机断裂叶片冲击机壳的模拟试验研究[J]. 动力工程学报, 2000, 20(4): 775-777.  
WU Rongren. The simulation test research of broken vanes striking the enclosure for turbines and aeroengines [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2000, 20(4):

- 775-777. (in Chinese)
- [65] XUAN H, WU R. Aeroengine turbine blade containment tests using high-speed rotor spin testing facility [J]. Aerospace science and technology, 2006, 10(6): 501-508.
- [66] 张伯熹, 宣海军, 吴荣仁. 航空发动机涡轮叶片包容模拟试验研究[J]. 机械工程师, 2006(10): 114-116.  
ZHANG Boxi, XUAN Haijun, WU Rongren. Research on aero-engine turbine blade containment experiment [J]. Mechanical Engineer, 2006(10): 114-116. (in Chinese)
- [67] 范志强, 高德平, 覃志贤, 等. 航空发动机真实机匣的包容性试验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 18-22.  
FAN Zhiqiang, GAO Deping, QIN Zhixian, et al. Experimental study of real casing containment[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 18-22. (in Chinese)
- [68] 何庆, 宣海军, 刘璐璐, 等. 叶片相互作用对机匣/叶片包容过程的影响[J]. 工程力学, 2012, 29(s1): 180-184.  
HE Qing, XUAN Haijun, LIU Lulu, et al. Multi-blade effects on aero-engine fan blade containment [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(s1): 180-184. (in Chinese)
- [69] HE Z K, XUAN H, BAI C, et al. Containment tests and analysis of soft wall casing fabricated by wrapping Kevlar fabric around thin metal ring[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 61: 35-44.
- [70] 何泽侃. 芳纶纤维布缠绕增强软壁机匣包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
HE Zekan. Research on the containment of soft wall casing wrapped with aramid fiber fabric [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [71] 李娟娟. 圆环/轮盘包容问题的数值评定方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
LI Juanjuan. Investigation of numerical evolution methods for ring/disk containment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [72] 朱倬燊. 突加高能载荷试验若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
ZHU Zhuoshen. Research on the key technologies of sudden high-energy impacting load test [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [73] 吕登洲. 航空发动机包容试验中风扇叶片爆破飞脱技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
LYU Dengzhou. Research on explosive blade-off test in containment of aero-engines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [74] 姜新瑞, 林山, 李诗军. 大涵道比涡扇发动机整机包容试验方法分析[J]. 航空发动机, 2021, 47(s1): 60-63.  
JIANG Xinrui, LIN Shan, LI Shijun. Analysis of engine containment test method of turbofan engine with high bypass ratio [J]. Aeroengine, 2021, 47(s1): 60-63. (in Chinese)
- [75] 梁春华. RR公司完成TRENT900发动机的叶片包容试验[J]. 航空发动机, 2003, 29(3): 44.  
LIANG Chunhua. RR company have completed the TRENT900 engine blade containment test [J]. Aeroengine, 2003, 29(3): 44. (in Chinese)

#### 作者简介:

谭毅(1998-),男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机机匣包容性。

杨书仪(1972-),女,博士,教授。主要研究方向:机械系统动力学、机械工程测试与控制。

左建华(1997-),男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机机匣包容性。

郭小军(1983-),男,硕士,研究员。主要研究方向:航空发动机结构强度。

孙要兵(1986-),男,硕士,中级工程师。主要研究方向:航空发动机制造。

(编辑:马文静)