

# 航空发动机热端部件安全性提升方法研究与应用

## Research and Application of Safety Improvement for Aero Engine Hot Section Parts

■ 卢婷婷 邵传金 / 中国航发商发

发动机热端部件失效是导致飞机安全性事件最主要的原因之一，有针对性地制定应对措施，并在相关的设计、制造、工艺和使用维护过程加以落实，可以提升航空发动机安全水平。

航空发动机安全性设计不足会威胁人员人身安全、导致航空器损坏乃至产生机毁人亡等灾难性后果<sup>[1]</sup>。设计、工艺、制造以及人为差错等都是影响发动机安全性的主要原因<sup>[2]</sup>。通过分析研究成熟民用航空发动机运行数据及安全性事件信息，可以发现发动机热端部件的问题是引起民航飞行安全事件的重要原因。对热端部件的失效机理进行研究，识别失效的根本原因，并在设计至使用维护全过程的关键环节落实改进措施或补偿措施，可从根本上提高发动机产品的安全性，具体过程如图1所示。

### 失效机理研究

航空发动机典型热端部件主要包括燃烧室、涡轮、反推装置和喷管等，通常在高温、高速、动载荷下工作，将热能转变成机械能或传递机械能，工况及环境条件严苛，一旦失效可能导致严重后果。以高压涡轮转子叶片为例，进行失效机理研究，包括高压涡轮转子叶片的工况与受力情况、失效类型以及典型失效模式分析，识别高压涡轮转子叶片失效的根源性问题，为发动机安全性提

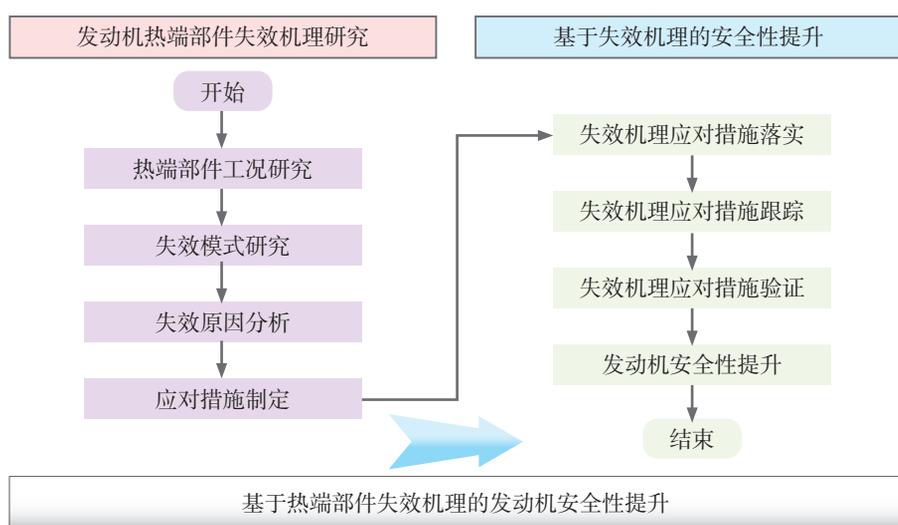


图1 基于热端部件失效机理的发动机安全性提升工作流程

升与优化提供依据。

### 工况及受力

发动机高压涡轮转子在高转速、高温状态工作，叶片受力包括机械离心载荷、热载荷、气动载荷及振动载荷。叶片在高温燃气下运转且承受共振环境，主要的失效抗力指标为高温蠕变及热疲劳性能，受力情况包括：在高速旋转情况下产生的离心拉应力；通过驱动空气实现能量转化，气体作用于叶片产生弯曲应力；由于环境温度分布或变化等因素产生的热应力；运转时气流扰动引起振动、扭转

及交变弯曲产生的振动应力。

### 失效类型

高压涡轮转子叶片的失效类型主要有断裂、变形和损伤。

高压涡轮转子叶片疲劳断裂包括由离心力叠加弯曲应力引起的疲劳断裂、振动环境引起的颤振疲劳断裂、扭转共振引起的疲劳断裂、弯曲振动引起的疲劳断裂、环境介质和接触状态引起的高温疲劳和微动疲劳，以及腐蚀损伤导致的疲劳断裂。叶片断裂失效会损坏其他叶片，进而导致发动机丧失推力，影

响发动机运行安全。

高压涡轮转子叶片变形是由于选材或工艺不合理以及环境温度高等原因，使得叶片强度降低，进而发生叶片蠕变变形；在发生超转时，过高的离心力作用也会导致叶片变形；叶片在一定的温度环境及载荷作用下还会发生塑性变形。叶片伸长变形后会导致叶片与机匣等静子发生碰磨，进而造成高压涡轮零部件损伤、发动机振动过大以及发动机空中停车等后果，影响发动机运行及安全性。

高压涡轮转子叶片损伤包括高温导致的氧化烧蚀，高温和环境污染共同作用导致的疲劳损伤、硫化烧蚀等。叶片损伤后会发生掉块等情况，进而影响发动机效率以及运营安全性。

### 典型失效模式

在叶片失效类型研究的基础上，结合叶片设计特性及工作环境特性，进一步分析了典型失效模式的失效机理，明确了导致失效的根本原因，如表1所示。

## 提升安全性的改进应用

通过以高压涡轮转子叶片为例，研究发动机热端部件失效机理，可以明确导致热端部件失效的原因，如设计、制造工艺等，针对具体的原因制定了相应的改进措施，希望实现从根源上降低热端部件发生失效的可能性。同时，开展了相应的验证工作，表明改进措施的有效性以及对发动机产品安全性提升的增益性。

### 改进措施

高压涡轮转子叶片烧蚀的失效机理表明，高压涡轮转子叶片冷却小孔的堵塞造成叶片散热能力降低，

表1 高压涡轮转子叶片典型失效模式的机理分析

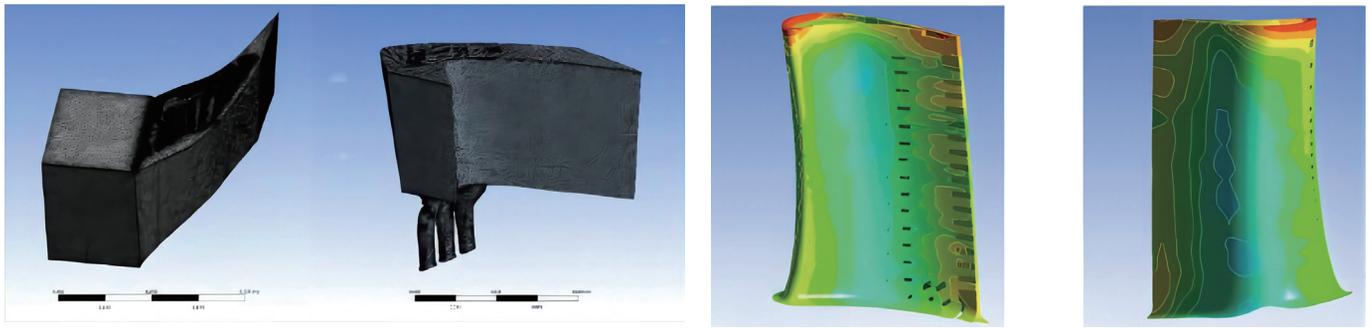
失效模式	失效机理
低周疲劳断裂	当涡轮转子叶片危险区域存在缺陷，且其应力水平超过材料的强度水平；当叶片处于振动、超转等非正常工况，叶片危险区域的应力大于材料的强度水平
扭转共振疲劳断裂	高周疲劳；叶片承受过大的振动力；叶片剩余疲劳强度低；叶片承受较大的振动力和叶片剩余疲劳强度较低的综合作用
弯曲振动疲劳断裂	高周疲劳；尾流激振和颤振；叶片制造偏差
高温疲劳断裂	发动机涡轮转子叶片在高温工况下运转，由于蠕变、疲劳等原因会诱发高温条件下的疲劳断裂
热损伤疲劳断裂	发动机在超温环境下运转
微动损伤疲劳断裂	由于叶冠发生微动磨损导致间隙增大，使得叶片的振动、扭转等应力水平增大；当应力过高，叶片危险区域发生疲劳断裂；轮盘榫头与转子叶片连接处由于接触面间存在微小滑动，会导致发生由于微动损伤而发生的疲劳断裂
腐蚀损伤疲劳断裂	如果在叶片应力最大的位置发生腐蚀等损伤，则叶片会发生疲劳裂纹，甚至导致更为严重的断裂
变形伸长	由于叶片材料本身的问题，如选材不当、工艺不佳；叶片运转工况超温；发动机超转
点腐蚀损伤	外物打伤、表面完整性损伤等，导致腐蚀性物质滞留在外物损伤的坑内
应力腐蚀损伤	叶片运转的环境、所受应力以及材料本身的属性，在某些特定条件下会发生叶片脆性断裂
高温腐蚀损伤（高温氧化）	高温环境下，叶片材料与氧元素发生反应产生氧化物，氧化物的材料属性会发生剥落、破裂等失效
高温腐蚀损伤（热腐蚀）	硫化腐蚀
高温腐蚀损伤（碳化和烧蚀）	燃烧不完全
叶片烧蚀	叶片冷却小孔的堵塞造成叶片散热能力降低，叶片上逐渐递增的高温使叶片被烧伤

逐渐升高的温度使叶片被烧伤。根据有限元分析结果，在稳态温度场中，当叶片所有冷却小孔全部堵塞后，叶片前缘2/3以上的部分受到的热冲击最严重。针对基于失效机理研究识别的根源性问题，制定了高压涡轮转子叶片的改进措施，如表2所示。

### 改进验证

在落实改进措施后，对高压涡轮

转子叶片在使用环境下进行仿真分析，如图2所示，结果显示：由于叶片前缘直接受到来自燃烧室气流的冲击，叶片前缘的温度较高，最高温度分布位置出现在前缘的叶尖处；从前缘到后缘方向，由于受到叶盆面的一系列冷却小孔的冷却影响，温度在小孔区域出现了明显的下降，叶片的后缘位置冷却孔径较大，通



(a) 单级高压涡轮叶片流体域网格

(b) 涡轮叶片叶盆/叶背温度云图

图2 基于失效机理的改进措施验证

过的冷却气流也较多，因此温度不高；叶片整体的温度分布较为均匀，说明叶片的冷却孔径和空间布局比较合理，叶片的散热能力及抗热冲击能力较强。仿真结果验证了进行结构优化、涂层材料优化、冷却方案改进等方式，可以提升高压涡轮

转子叶片抗异物堵塞能力、抗氧化能力与冷却能力，降低叶片烧蚀的可能性，实现了航空发动机安全性水平提升的目的。后续将结合部件、整机试验数据与产品运营数据，进一步验证改进措施在提升产品安全性水平上的有效性与增益性。

### 结束语

安全性是航空发动机产品的生命线，热端部件失效对安全性的影响很大，引入基于热端部件失效机理研究提升安全性水平的方法，可识别导致热端部件失效的根源性问题<sup>[3]</sup>，制定针对性的设计改进措施或使用补偿措施，从根本上提升零部件可靠性以及发动机安全性。加强对发动机安全性影响大的典型零部件的失效机理研究，可以从根源上改进设计、优化流程，实现自底向上的产品安全性提升。

**航空动力**

(卢婷婷，中国航发商发，工程师，主要从事民用航空发动机安全性、维修性等特性设计工作)

### 参考文献

- [1] 郭博智,王敏芹,阮宏泽.民用飞机安全性设计与验证技术[M].北京:航空工业出版社,2015.
- [2] 丁水汀,李果,邱天,等.航空发动机安全性设计导论[M].北京:科学出版社,2019.
- [3] 梁智超,王井科,雷友锋.航空发动机防火安全性设计与验证分析[J].航空发动机,2018,44(2):92-97.

表2 高压涡轮转子叶片的改进措施

失效模式	失效机理	设计改进措施	使用补偿措施
叶片烧蚀	空气中颗粒状杂质被吸进发动机，堵塞高压涡轮叶片冷却小孔，使高温高压燃气直接烧伤涡轮叶片	改变高压涡轮的前旋转封严结构，以避免小颗粒物的堆积成块，降低叶片冷却空气被堵塞的概率	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 监控发动机排气温度，防止发动机超温；</li> <li>· 减小起飞功率，降低涡轮前温度；</li> <li>· 通过维护过程中的孔探，及时发现叶片烧蚀、掉块、裂纹、腐蚀、积炭、冷却孔堵塞等损伤缺陷，排除故障隐患</li> </ul>
	燃烧室喷嘴积炭、回油阀锈蚀卡死、电嘴工作失灵、喷嘴压力过低或雾化不良、漏油阀卡阻或管路阻塞都可能使燃烧室出现富油燃烧，从而导致高压涡轮进口温度超温，叶片烧蚀	叶片前缘涂抹Pt-Al涂层，提高叶片抗氧化能力	
	发动机通过向飞机空调系统、防冰系统提供引气使其实现相应功能，如引气量过大，发动机会自动补燃油以保证持续提供稳定推力，进而发生涡轮进口温度过高，从而发生叶片烧蚀	采用对流、冲击及气膜冷却设计加强冷却效果	