

V2500 发动机 HPC 第 5 级转叶缘板磨损检查流程

庞俊杰

北京飞机维修工程有限公司, 北京 100621

摘要 : V2500 航空发动机常见高压压气机第 5 级转叶后缘缘板磨损。而为排除此故障, 往往需要明确缘板磨损发生原因, 制定相应的零件检查方案, 因此有必要针对此故障进行分析研究。本文根据发动机维护手册, 结合大量实际生产实例, 深入分析了 V2500 航空发动机高压压气机第 5 级转叶后缘缘板磨损的原因, 并分析了第 5 级转叶以及相关配合零件的检查措施。

关键词 : 航空发动机; V2500 发动机; 高压压气机第 5 级转叶; 检查流程

The Inspection Process for V2500 Engine HPC Stage 5 Blade Platform Worn

Pang Junjie

Beijing Aircraft Maintenance Engineering Co., Ltd. Beijing 100621

Abstract : Wear of the trailing edge plate of the 5th stage rotor blade in the common high-pressure compressor of V2500 aircraft engine. To eliminate this fault, it is often necessary to clarify the cause of edge plate wear and develop corresponding part inspection plans. Therefore, it is necessary to analyze and study this fault. Based on the engine maintenance manual and a large number of practical production examples, this article deeply analyzes the causes of wear on the trailing edge plate of the 5th stage rotor blade of the V2500 aircraft engine high-pressure compressor, and analyzes the inspection measures for the 5th stage rotor blade and related matching parts.

Keywords : aero-engine; V2500 engine; HPC Stage 5 blade; inspection process

引言

V2500 发动机在孔探检查高压压气机第 5 级转子叶片后缘时, 发现叶片后缘缘板处有接触磨损 (Contact Wear), 部分磨损情况起自叶片后缘缘板, 已扩展至叶片后缘倒角处。并且, 这种磨损情况一般会影响到整级高压压气机第 5 级转叶。

从 V2500 发动机的 OEM 厂家 IAE 的统计的各大修厂家和各运营航线发现的此种故障的总体数量来看, 高压压气机第 5 级转子叶片缘板后缘的磨损情况目前正呈现上升的趋势。虽然此发现项未造成过严重影响 (空停、中断起飞、发动机喘振等), 但对该区域的孔探检查会导致非计划性下发情况的增加^[1]。

因此, 应尽快找到并了解该损伤原因, 在发动机维修期间对损伤的叶片执行正确的检查、隔离故障, 进行相应的修理和更换。

一、V2500 发动机高压压气机转子和静子排布情况

V2500 发动机高压压气机组件为 10 级轴流式压气机组件, 由 10 级转子构成, 其中, 第 3-5 级转叶安装在转子鼓组件上的轴向榫槽内, 通过保持板和锁板固定轴向位置。第 6-12 级转叶周向安装在转子鼓上, 每级由两对锁定叶片 (Locking Blade), 配合锁帽和螺杆来锁定整级转叶的位置。

高压压气机静子机匣分为前机匣和后机匣。高压压气机前机匣为分半机匣, 包括进口可调静叶 VIGVs (Variable Inlet Guide Vanes) 和第 3 至第 5 级的可调静叶 VSVs (Variable Stator Vanes)、第 6 级静叶也安装在分半机匣上。高压压气机后机匣包括后外机匣和第 5 级内环形机匣, 第 5 级环形机匣通过螺栓连接在一起, 第 11 级环形机匣螺栓连接在后外机匣上。前机匣和后外

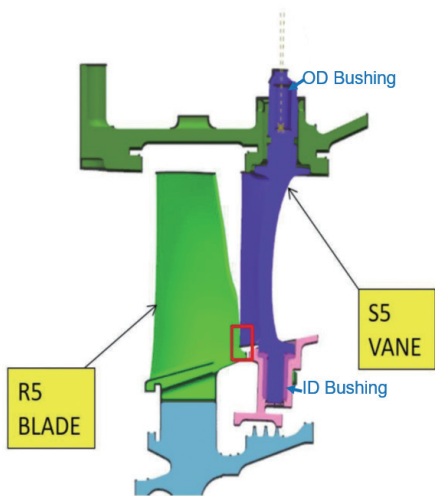
机匣、后外机匣和发动机的扩散机匣通过螺栓连接^[2]。

二、高压压气机第 5 级转叶后缘缘板损伤原因分析

第 5 级可调静叶的外心轴穿过高压压气机前半机匣, 心轴顶部与可调静叶摇臂通过螺纹连接, 机匣外部的可调静叶同步环又将每个摇臂连接组合成为同步运作的可调静叶系统, 当 VSV 作动器运转时, 会带动同步环运转, 同步环会同时带动所有的摇臂和摇臂连接的可调静叶同时运转, 用来控制可调静叶的方向, 达到发动机防喘的功能。可调静叶心轴和高压压气机机匣之间, 安装有石墨制成的衬套 (Bushing), 避免心轴运转时, 对机匣和其本身造成磨损。可调静叶的内心轴穿过 VSV 内罩环, VSV 的内罩环处有磨耗涂层, 是和 HPC 转子鼓上的刀边封严配合, 用来减少

HPC 气路上的气流损失，同外心轴和机匣的结构一样，内心轴和内罩环之间也同样安装有衬套。

随着发动机使用时间的不断累积，当上述衬套出现磨损情况，尤其是 VSV 外心轴与 HPC 机匣之间安装的外径衬套（OD Bushing）的磨损，导致第5级静叶在发动机工作时整体向前发生位移（见图1）^[1]。这样的位移可能会导致静叶及内罩环前缘与转叶缘板后缘接触，转子在转动过程中，造成第5级转叶缘板后缘的损伤。



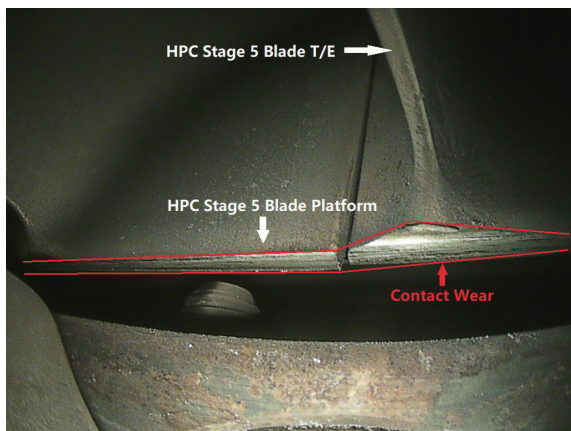
> 图1 高压压气机5级转叶与静叶接触

三、发动机手册（Engine Manual）对损伤区域的检查要求

（一）孔探检查（Borescope Inspection）要求

实际上，V2500发动机的EM和AMM手册相关孔探检查章节对该区域无明确的检查要求和损失标准^[3,4]。

如果为了更好的发现相关区域的损伤情况，在执行该区域孔探检查时，要使用合适视角的孔探探头，可以明显看出，第5级高压压气机转叶后缘缘板（Platform）处有明显的接触磨损（Contact Wear），部分磨损情况从缘板后缘延伸扩展至第5级高压压气机转叶的叶片后缘倒角处（见图2）。并且，这种磨损情况一般会影响到发动机的整级第5级转叶，共64片^[5]。



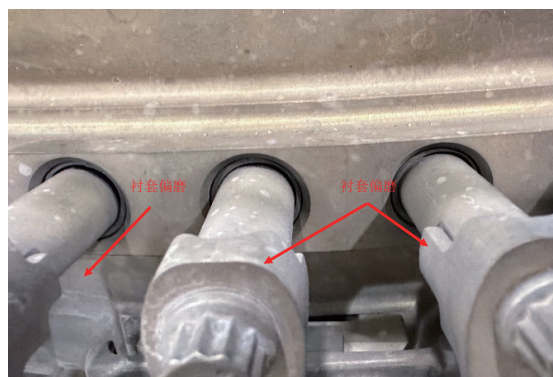
> 图2 孔探检查发现高压压气机5级转叶缘板后缘磨损

从发动机OEM厂家发布的来自航线和大修厂的统计情况看，此种损伤情况目前呈现上升的趋势。

对于发动机大修厂家，发动机进场执行进厂孔探检查时，如果发现该区域有磨损情况，需结合该台发动机高压压气机单元体的工作范围，判定高压压气机单元体的工作范围是否需要升级^[6]，并关注之后零件暴露后的检查过程中的损伤定位和后续零件处理的情况。

（二）界面/组件检查（Interface/Assembly Inspection）要求

在HPC前机匣及静子组件检查阶段，要重点检查第5级VSV内罩环前缘的磨损状况，为更好的观察和发现损伤，可将拆下的机匣及静子组件放置水平；并且，需重点关注机匣外侧衬套可见区域的磨损情况，如衬套明显偏磨（见图3）、破碎导致材料缺失等。



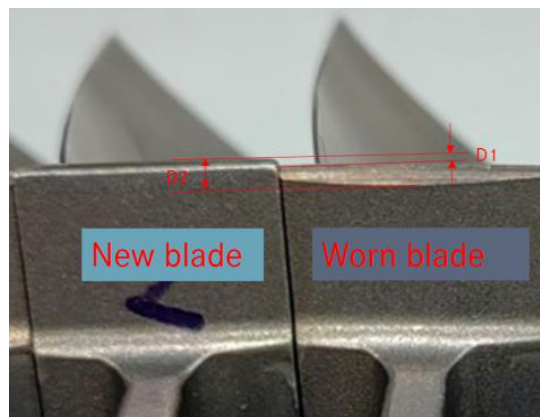
> 图3 第5级VSV衬套偏磨

在高压压气机转子组件检查阶段，根据发动机eMMP（electronic Maintenance Management Plan，电子化维修管理计划），当高压压气机工作范围Level 2及以上时^[6]，高压压气机第5级转叶就会暴露出相关区域，在执行界面检查或者组件检查时，需重点关注检查5级转叶后缘缘板是否存在磨损情况。

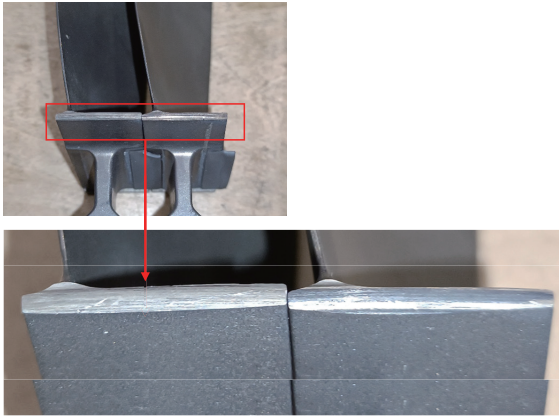
（三）单件检查（Piece Part Inspection）要求

当零件被从发动机单元体或组件上拆下后，就要对拆下的零件清洗完成后，按照工作范围的不同，执行对应工作级别的检查，如目视检查、荧光无损探伤、尺寸测量等。

对于HPC第5级转叶，手册对上述第5级转叶后缘缘板的检查要求为使用0.50mm的划针检查该区域，来确认该区域是否存在磨损情况。实际上，根据新转叶与磨损后转叶的对比图（见图4），此类型损伤一般目视可见。损伤类型和特征较为明显（见图5）。



> 图4 新转叶与磨损后转叶对比



> 图5 转叶磨损状态

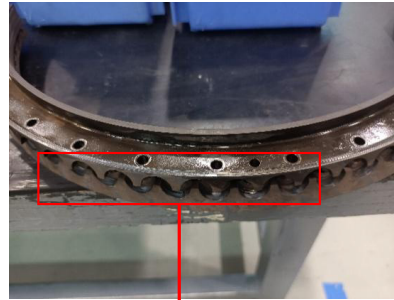
按照之前的手册检查标准，如果发现磨损，该转叶需判定为不可用状态，且手册中没有对应的修理方案，只能更换损伤的叶片。由于厂家转叶供应量不足，很多在厂维修的发动机因为缺少第5级转叶而导致发动机修理暂停，无法按期完成修理而返回客户手中。为解决产能和供应量不足，发动机厂家在技术研判后，对高压压气机第5级转叶该区域的检查标准进行了放宽，并在23年年底通过EA下发了针对该区域损伤的修理方案^[7,8]，该修理方案于24年8月，正式引入到发动机手册中，并发布了正式的修理方案。

该叶片的修理方案为：通过加工方式去除磨损，手册中对修理中的材料去除量进行了明确的限定；对修后的区域需要进行荧光检查、尺寸检查以及加工后的型面强化^[9]。

与高压压气机第5级转叶后缘缘板发生接触磨损的高压压气机第5级内罩环也常见磨损，同样，此损伤一般目视可见（见图6）。按照发动机手册相关检查章节描述，磨损深度不可以超过0.05mm^[4]。按照目前对此故障的统计情况，内罩环报废（Reject）概率较高。

四、结语

目前，V2500发动机高压压气机第5级转叶后缘缘板发生磨损的情况频率依然处于高位，航线运行需结合航线保障、孔探检查



> 图6 VSV内罩环前缘磨损状态

间隔要求，视情关注该区域损伤情况^[9,10]。

对于在厂修理的发动机，尤其涉及可以暴露出高压压气机的工作范围的发动机，进厂孔探检查确认第5级转叶缘板后缘是否有磨损情况，根据孔探检查结果，决定HPC单元体的工作范围是否需要升级，并关注检查（Table Inspection）过程中损伤定位和后续零件处理的情况。

界面/组件检查关注第5级可调静叶内罩环处是否有磨损状况，如出现磨损状况，需同时关注第5级转叶缘板状态；如果前机匣未分解，则需要拆下第5级可调静叶更换相应的衬套。高压压气机第5级转叶零件检查时如果发现缘板磨损，需确认高压压气机前机匣工作范围，如果前机匣未分解，拆下第5级可调静叶更换相应的衬套；或按需通报发动机厂家，扩大前机匣分解深度。

第5级可调静叶内罩环单件检查过程中若发现前缘磨损，第5级转叶缘板后缘磨损概率大，需同时关注检查第5级转叶缘板后缘；此外，也要关注第5级可调静叶叶型处可能与第5级转叶缘板后缘接触到的区域是否有磨损或卷曲的情况发生。

参考文献

- [1] IAE 2023 V2500 REGIONAL REVIEW [Z].
- [2] OPERATING INSTRUCTIONS for the V2500-A1/A5 SERIES COMMERCIAL TURBOFAN ENGINES [Z].
- [3] Airbus A320 Aircraft Maintenance Manual [Z].
- [4] V2500-A1/A5 Series Engine Manual [Z].
- [5] V2500-A5 Series Illustrated Parts Catalog [Z].
- [6] V2500-A5 electronic Maintenance Management Plan [Z].
- [7] Authorization Document 23VG174 [Z].
- [8] Authorization Document 23VG338 [Z].
- [9] A318/A319/A320/A321 MAINTENANCE PLANNING DOCUMENT [Z].
- [10] V2500-A1/A5 Series Time Limits Manual [Z].