

风扇叶片脱落适航验证及条款演化

Specifications and Clauses Evolution for Fan Blade off Airworthiness Verification

■ 冯建文 何歆 甄博 / 中国民用航空适航审定中心 侯亮 史同承 / 中国航发商发

风扇叶片脱落是大涵道比涡扇发动机的一种危险的风扇叶片失效模式，是涡扇发动机包容性中最为突出和重要的问题，相应的适航验证及条款也随发动机设计的改变而不断演化。

风扇叶片脱落（FBO）时，高速运动的碎片可能击穿相邻结构、油箱、机体、系统构件和其他安装在飞机上的动力装置，会引起重要结构或系统的损伤、不可控火情、客舱快速失压等严重影响飞机安全飞行和着陆的情况，甚至会导致飞机硬着陆、人员严重伤亡、整机失事等灾难。随着涡扇发动机涵道比的不断增大，风扇叶片的包容性问题变得越来越突出：一方面，较大的暴露面积使得风扇叶片容易遭受发动机吸入外物（鸟、冰、雹、沙石等）的打击；另一方面，大尺寸、大质量的风扇叶片所导致的冲击力和不平衡载荷都会对飞行安全构成严重威胁。近期欧洲航空安全局（EASA）发布的发动机适航审定规章修订征询意见草案中涉及风扇叶片脱落试验条款的重大更改，这标志着发动机制造商及局方吸取了以美国西南航空公司1380号航班事故为代表的风扇叶片脱落导致发动机风扇罩损坏事故的教训，从规章层面对于风扇叶片包容性提出了更加全面的要求。

FBO适航验证及条款的制定

自大涵道比发动机问世伊始，风扇

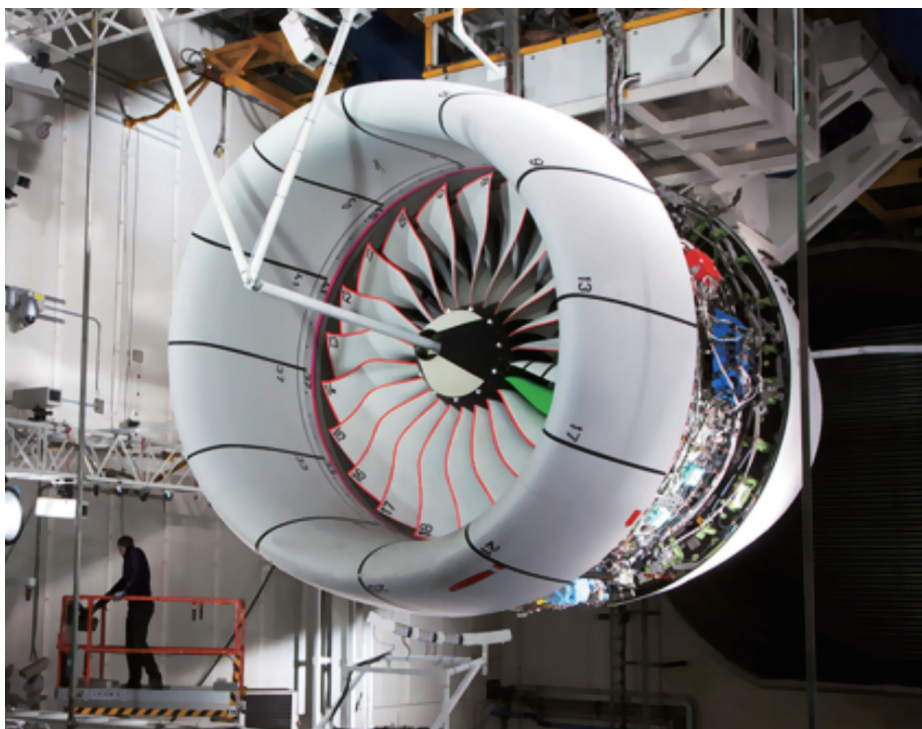


图1 FBO试验台架

叶片脱落对发动机的安全影响就备受关注。20世纪70年代，美国联邦航空局（FAA）组织发动机和飞机制造商对高能碎片包容以及整机响应进行了广泛研究^[1-2]。1980年11月，FAA发布NPRM80-21，在适航规章中增加了FAR33.94“叶片包容性和转子不平衡试验”条款，规定了发动机叶片失效包容性试验。FAR33.94

要求开展发动机整机试验，以证明在发动机以最大允许转速运转期间，最危险的一个叶片失效，发动机能包容损坏件至少运转15s不着火，并且其安装节也不失效。欧洲适航规章EASA CS-E中与FAR33.94对应的条款为CS-E810“压气机和涡轮叶片失效”，条款要求与FAR33.94接近。

涡扇发动机型号合格证申请人

采用FBO试验验证对FAR33.94或者CS-E810条款的符合性。试验中发动机安装在模拟飞机吊挂刚度的台架上，风扇轴红线转速状态下通过爆破使其中一个风扇叶片沿既定截面脱落，并至少15s时间内不得对发动机进行任何操作，以模拟机组成员的危险识别和反应时间。试验通过的判据为不得产生危害性发动机后果，其中危害性发动机后果由FAR33.75“安全分析”条款（或CS-E 510“安全分析”）定义，包括非包容的高能碎片、安装节失效、完全失去发动机停车能力等。除了发动机本体外，FBO试验中还应该包含与该系列发动机相配套的典型进气道和喷管，或相应的等效结构，例如，在影响发动机机匣变形、包

容能力，以及发动机振动响应方面与原结构具有相同的连接载荷和作用的等效结构。但是，FBO试验中为了利用高速摄影观测风扇机匣变形，两侧的风扇整流罩通常是不安装的，如图1所示。在FBO试验中，可能会有部分风扇叶片的碎片从进气道向前飞出或者通过喷管向后飞出，这些碎片的散布角、动能水平应记录在发动机安装手册中供飞机设计方进行飞机结构冲击损伤评估。

近期几起FBO事件的反思

2018年4月17日发生的美国西南航空公司1380号航班事故是一起典型的脱落的风扇叶片被机匣包容但是风扇罩破裂导致碎片击中机体的事

故。事故由飞行过程中CFM56-7发动机风扇叶片疲劳断裂导致，风扇叶片对机匣的冲击力破坏了风扇整流罩底部的径向固定接头，并撕裂部分整流罩，整流罩碎片击碎客舱窗户，造成一名乘客丧生^[3]，风扇整流罩破损状况如图2所示。美国国家运输安全委员会（NTSB）在事故最终报告中建议FAA和EASA在未来的型号审定中要求发动机制造商和飞机制造商协作分析所有危险的叶片冲击位置、可能产生的风扇叶片碎片以及FBO对于短舱结构的冲击载荷^[3]。

2018—2021年，配装PW4000-112发动机的波音777-200型飞机发生了3起因风扇叶片脱落导致的发动机风扇整流罩破损事件，分别为2018年2月12日UA1175航班事件、2020年12月4日JL904航班事件和2021年2月20日UA328航班事件。这3起事件的共同特点是脱落的风扇叶片被风扇机匣包容，但是过大的机匣变形使安装在发动机机匣外部的进气道后加强隔框断裂并导致风扇整流罩破损。NTSB经过调查认为造成风扇罩破损的原因包括^[4]：PW4000-112发动机在进行FBO试验时所用的进气道后加强隔框采用了铝合金，而波音777-200安装的进气道后加强隔框却更改为复合材料，复合材料的冲击吸能水平低于铝合金；整流罩内的复合材料蜂窝在潮湿环境下吸水导致了强度降低；PW4000-112发动机在进行FBO试验时没有带风扇整流罩，而风扇整流罩属于波音777零部件，由波音公司按照FAR25部进行验证，因此在FBO试验中无法考核风扇整流罩的响应。

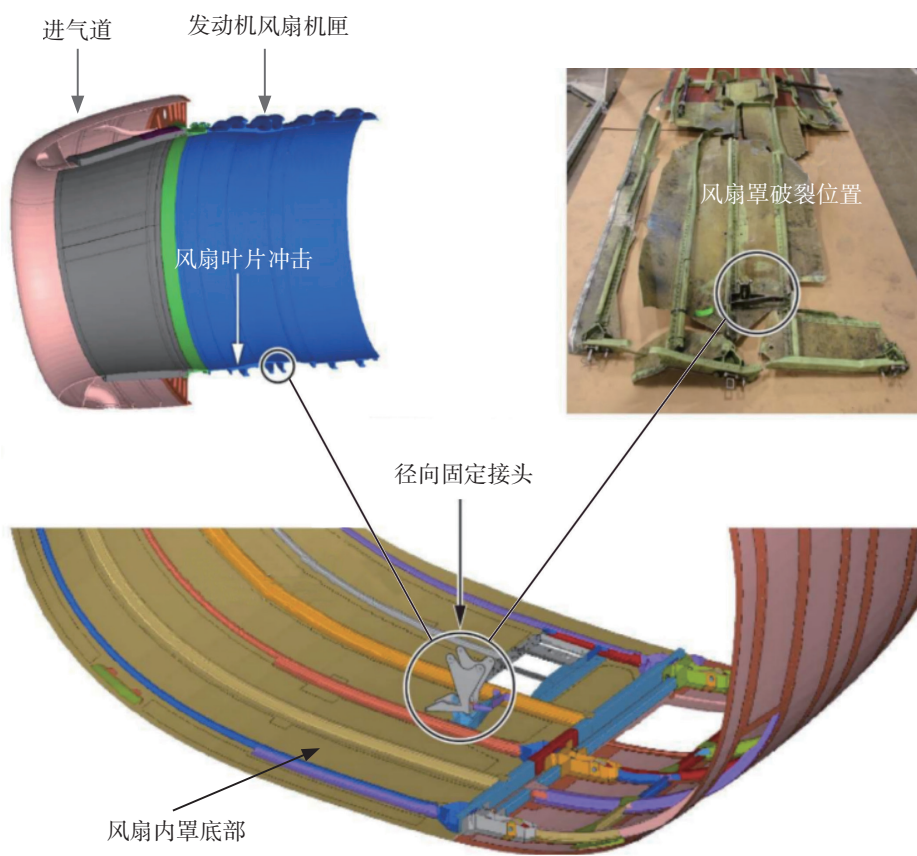


图2 西南航空1380号航班事故风扇整流罩破损状况^[3]

这几起事件涉及的发动机在适航取证中都开展了FBO试验，且试验中叶片脱落对应的转速为发动机红线转速，而这几起事件发生时飞机均处于巡航状态，发动机转速应该远未达到红线状态，但仍发生了风扇罩破坏。此外，这几起事件中脱落的叶片均被机匣包容，没有发生碎片穿透机匣的情形，符合现有发动机适航规章条款要求。

这几起事件反映出现有的FBO试验及分析验证中潜在的一些局限性：

- FBO试验中不安装风扇整流罩，导致对于风扇罩的动态响应及强度的考核不足；

- FBO试验中虽然安装有进气道、反推装置和喷管等机体组件，但其作用是调节试验发动机的重心位置以及提供刚度约束，可能不是产品的装机构型，当这些组件更改时需要评估对原有的FBO试验结果的影响；

- 假设风扇红线转速为4000r/min，则叶片转过30°的时间仅为1.25ms，而现有的高速爆破的精度约为数十毫秒数量级，因此脱落叶片在圆周方向击中机匣的位置是不可控的，而机匣上的危险位置包括风扇罩锁扣、电子控制器单元安装位置、重要管路附件安装位置等，所以FBO试验并不能模拟到所有危险的冲击场景。

FBO适航条款的修订

EASA于2021年11月22日发布了CS-E规章修订征询意见草案NPA 2021-13^[1]，其中根据NTSB关于西南航空1380事故的安全建议^[3]，对于涉及FBO的条款进行修订。FAA虽然至今尚未发布条款修订的征询意见草

案，但是根据FAA与EASA近年来持续推动的规章一致化修订，FAA预计提出的征询意见草案内容很可能与NPA 2021-13比较接近，其中涉及FBO的修订包括如下几个方面。

一是在“非包容高能碎片”中增加了可能由于其能量水平和飞行轨迹危害到飞机的，从发动机进气口、排气口飞出的碎片以及从包容结构外部脱落的碎片。

二是在涉及冲击包容强度分析的条款中，NPA 2021-13明确了强度分析的范围为脱落叶片径向包容能力。

三是涉及FBO试验的通过准则中将现行条款要求的“叶片失效不得引起发动机危害性后果”修改为“由于叶片失效引起发动机危害性后果的概率不得超过极小可能”。

FBO适航验证未来发展动向

从NPA 2021-13可以一窥关于风扇叶片脱落的适航验证未来的发展动向。

包容性的含义将外延，现行规章中的包容将被重新界定为径向包容，从发动机进气口、排气口飞出的碎片以及从包容结构外部脱落的碎片也将被纳入包容性考核的范畴。

FBO将告别“一考定终身”，通过一次试验判断符合性的考核方式。分析的作用被进一步强调：叶片在其他角度方位脱落、叶片部分脱落、非红线转速状态脱落、短舱结构修改等试验中没有考核的场景需要开展分析、进行补充。

发动机制造商和飞机制造商在适航取证过程中的配合将愈发重要，发动机FBO试验中涉及的短舱等飞机构件的构型管理将更加严格，且

对于脱落叶片危害性的评估将倾向于在航空器系统级别进行判断。此外，飞机取证过程中对于发动机碎片的评估也需要发动机制造商提供更多的数据。

结束语

发动机FBO适航验证条款会根据运行经验、新型风扇结构形式（复合材料风扇叶片、整体叶盘式风扇、减载装置）的广泛使用以及飞机-发动机高度集成化设计不断演进，需要密切关注其发展动向。

航空动力

（冯建文，中国民用航空适航审定中心，高级工程师，主要从事发动机结构专业审查工作）

参考文献

- [1] FAA. Study to improve turbine engine rotor blade containment, FAA-RD-77-44[R]. Washington D C: FAA, 1977.
- [2] FAA. Study to improve turbine engine rotor blade containment, FAA-RD-77-100[R]. Washington D C: FAA, 1977.
- [3] NTSB. Left engine failure and subsequent depressurization, Southwest airlines flight 1380, Boeing 737-7H4, N772SW, Philadelphia, Pennsylvania, NTSB/AAR-19/03[R]. Washington, D C: NTSB, 2019.
- [4] NTSB. Aviation incident final report, DCA181A092 [R/OL]. [2022-03-11]. <https://data.nts.gov/carol-repgen/api/Aviation/ReportMain/GenerateNewestReport/96738/pdf>.
- [5] EASA. Notice of proposed amendment 2021-13, NPA 2021-13 [EB/OL]. (2021-11-22)[2022-03-11]. <https://www.easa.europa.eu/downloads/132515/en>.