

PW4077风扇叶片断裂引发的重大故障简析

Analysis to the Faults Caused by Fracture of PW4077 Fan Blades

■ 陈光

近年来，以PW4077为动力的波音777-200飞机连续发生风扇叶片断裂的安全事故，引发美国联邦航空局（FAA）的关注，要求对进气道与风扇整流罩重新进行设计与评估，缩短风扇叶片裂纹检查周期并加强人员培训。

美国联合航空公司的一架波音777-200客机于2021年2月20日执行由丹佛飞往夏威夷的UA328航班任务，在起飞约4min爬升到3800m高度时，机上人员听到一声巨响，随后飞机出现极大的振动。机上乘客从舷窗向外看时，发现右侧发动进气道与风扇整流罩全部脱落，暴露在外的发动机后部燃起大火，如图1所示。飞行员随即打开灭火系统，将火扑灭，并用左侧发动机将客机平安降落在起飞机场。该飞机从起飞到着陆历时24min，所幸没有人员伤亡，此次事故称为UA328事件。

机场人员对着陆后的飞机进行检查，发现发动机的进气道、风扇整流罩全部脱落。一个风扇叶片的近叶根处发生断裂，紧邻的一个叶片在中



图1 燃烧着的发动机

部产生断裂。风扇所有叶片的叶尖及前缘均有伤痕，一个风扇叶片断片卡在包容环中。包容环布满伤痕，但仍保持着圆形。发动机侧面显示有燃烧过的痕迹，如图2所示。飞机机身也

有多处外物打伤的痕迹。

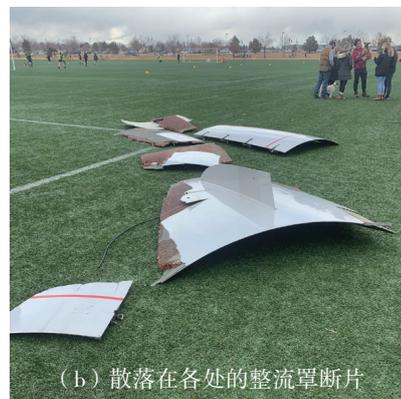
脱落的部件基本都在地面被发现。硕大的进气道（外径近3.5m）坠落于一处居民小院中，除一个断口外基本完整，如图3（a）所示；



图2 发动机后部被火烧过



(a) 坠落的进气道



(b) 散落在各处的整流罩断片

图3 丢失的部件

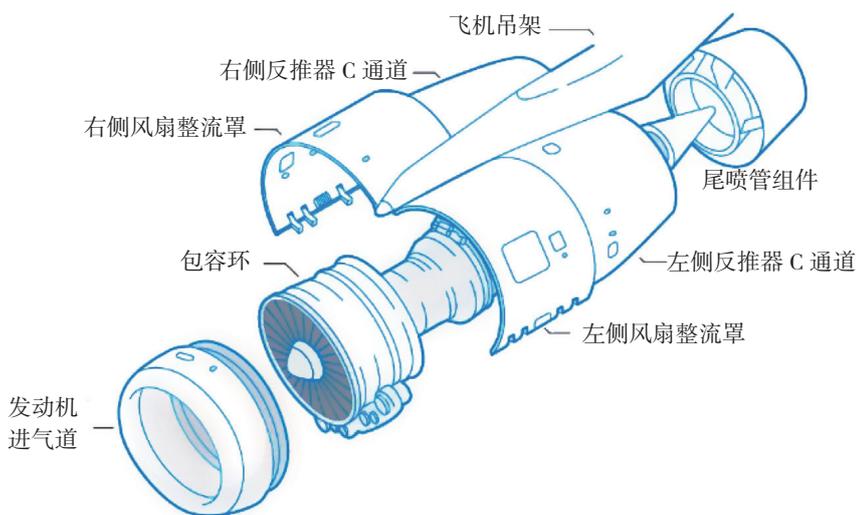


图4 PW4077发动机

整流罩的十几个断片在多处被发现，如图3(b)所示。

发动机简介及故障调查

PW4077发动机是美国普惠公司研制的PW4000发动机中的第三个系列，其风扇直径为2.84m，装有22个由钛合金制成的空心宽弦风扇叶片，是普惠公司第一次采用空心风扇叶片的发动机。风扇叶片长103cm，叶尖处的宽度为56.5cm，叶根处的宽度为31.75cm，每片叶片的质量为15.81kg。飞机的动力装置由进气道、风扇整流罩、发动机与反推装置组成，如图4所示。

事故调查人员对叶根处折断的风扇叶片的断口做了金相分析，发现断口处存在低循环疲劳条带，而叶身中部断裂叶片断口的金相分析则未发现疲劳条带，确定该处属于大负荷作用下的断裂。因此，可以推测这次重大故障的根源是由风扇叶片靠近叶根处的低循环疲劳造成的。

由以上情况可以大致分析出故

障发展过程：在飞机爬升过程中，发动机处于最大转速下，突然一个叶片在靠近叶根处断裂，断片在极大的离心力作用下甩向包容环，被包容环包住，并断成几块，其中一块卡在包容环中；发动机随即发生喘振，喘振引起的气流回流将另一块断片冲出发动机，对飞机的某些地方造成损伤，同时对进气道与发动机包容环的连接处产生了极大的冲击载荷；当叶片甩离轮盘时，风扇转子的平衡遭到破坏，引起发动

机极大的振动，除对所有风扇叶片与包容环接触产生刮蹭外，还对进气道与风扇整流罩作用了过大的载荷；最终造成进气道脱离发动机，风扇整流罩断裂成多块甩出发动机，其中有些断块还对飞机造成一定的损伤；同时，过大的振动还造成发动机外部一些导管破裂，使部分燃油与液压油外泄，引起燃烧。

另两起类似故障

在此事故发生前，还发生过两起类似的故障，如图5所示。2020年12月4日，日本航空公司的一架波音777-200客机执行由冲绳飞往东京的JL904航班任务，当飞机由冲绳起飞爬升至5000m高度时，发生了风扇叶片断裂引发的重大故障（一侧的风扇整流罩丢失），即JL904事件。2018年2月13日，一架美国联合航空公司的波音777-200客机，执行由旧金山飞往夏威夷的UA1175航班任务时，当飞机还在太平洋上空距夏威夷还有223km时，发生了风扇叶片断裂引发的重大故障，飞机进气道大部分脱落，风扇整流罩全部脱落，即UA1175事件。



(a) JL904 外侧风扇整流罩丢失



(b) UA1175 进气道与整流罩丢失

图5 两起风扇叶片断裂引发的重大故障

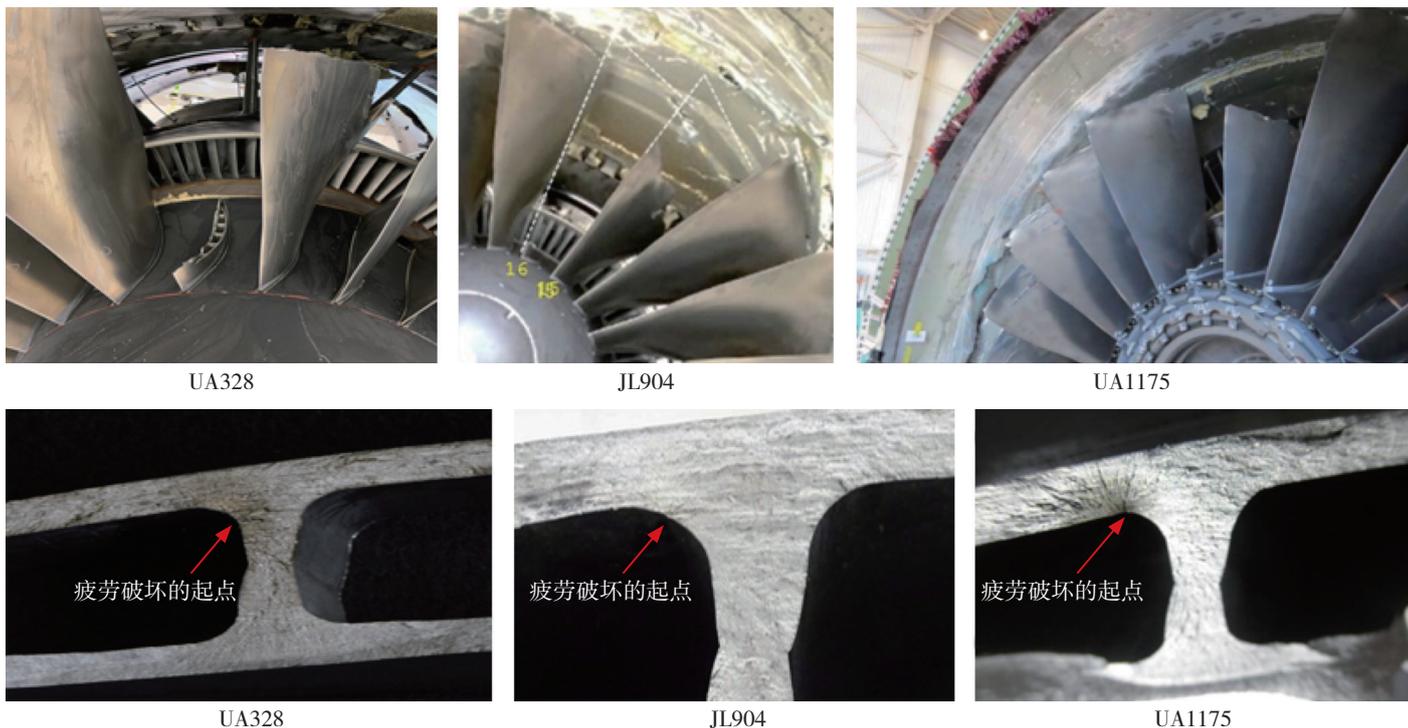


图6 风扇叶片断裂情况与断口疲劳裂纹所处位置

在这两起事件中，风扇叶片断裂情况与断口疲劳裂纹所处位置与UA328事件基本一致，如图6所示，表明3起事件均由风扇叶片疲劳断裂引起的。

发生故障的飞机与发动机，累计的工作时间均较长。以UA1175事件为例，其飞机生产于1995年，至事发时已累计工作89723h/16339循环；其发动机从装机开始，已累计工作77593h/13921循环，从最后一次翻修到事发，已工作8579 h/1464循环。

故障原因简析

由于风扇叶片属无寿命限制的零件，为了探测使用时间较长的空心叶片的芯部结构是否出现初始裂纹，普惠公司于2005年发展了一种热声成像检测（TAI）技术，以检测叶片内部结构是否出现裂纹，据称该技术

的检查效果大致可以满足需求。但普惠公司并没有对此制定一套规范化的培训流程和技术验证规范，导致部分机务人员无法正确判断风扇叶片裂纹的情况，最终导致这3起风扇叶片的空中断裂事故。

此外，发动机取证时通过了严苛的风扇叶片包容试验，即使在使用中出现风扇叶片断裂故障，这3起事故中的严重情形也不应发生。究其原因，在于取证试验中有两点与实际严重不符：一是取证时所用的进气道后加强筋环采用了铝合金，而在飞机上实际使用的却是复合材料，两种材料的力学性能差异较大，在极大的振动条件下，加之风扇叶片断片在向前冲击过程中对加强筋环的冲击载荷，使其断裂破损，导致进气道整体或局部脱离发动机；二是取证试验时，由波音公司设

计制造的风扇整流罩没有装到发动机上，因此整流罩没有经过严苛条件下的考验。除此之外，据波音公司称，由复合材料蜂窝结构制成的整流罩在长期使用中吸收了空气中的水，材质性能变差，在发动机过大振动作用下易于受损，这也是发生如此严重故障的诱因之一。

结束语

在发生这3起事故后，美国联邦航空局（FAA）要求波音公司对发动机的进气道与风扇整流罩进行重新设计、评估，并采取相应措施。对于普惠公司，FAA对其要求缩短TAI检查的间隔，并加强对维修人员有关TAI操作的培训。

航空动力

（陈光，北京航空航天大学退休教授，著名航空发动机专家）