

CFM56-7B风扇叶片从根部断裂事故简析

Analysis to CFM56-7B's Fan Blades Broke from Roots

■ 陈光 / 北京航空航天大学

风扇叶片叶根截面处局部区域应力过大会造成低循环疲劳，从而导致风扇叶片在榫根处断裂，CFM56-7B曾因此发生了两次严重的事故。

美国西南航空公司的两架737-700客机在2016年和2017年先后发生风扇叶片从根部断裂事故，打坏了两架737-700客机。经过美国联邦航空局（FAA）与美国国家运输安全委员会（NTSB）对两起事故的调查，建议制造商重新设计737-700/-800/-900飞机所用的风扇整流罩，以保证整流罩在风扇叶片断裂后的结构完整性。

事故基本情况

美国西南航空公司的一架737-700客机于2016年8月27日在执行由路易斯安那州新奥尔良飞往佛罗里达州奥兰多的WN3472航班时，当飞机离地爬升至9450m，左发突发非包容故障，碎片击穿飞机机体左侧并打伤机翼与尾翼，造成客舱失压，氧气面罩自动弹出，飞机单发飞行，在20min后降落到彭萨科拉机场，机上载有99名乘客与5名机组人员，无人员伤亡。此事故被称为WN3472事故。

NTSB与FAA对WN3472事故受损的飞机与发动机进行检查分析后，于2016年9月12日发布了初步检查报告指出：发动机中有一个风扇叶片从叶身与叶根交接处折断，叶片的榫根部



图1 WN3472航班发动机进气道已甩离

分仍残留在轮盘的榫槽中，但叶身部分已丢失；在榫根断口上呈现出明显的疲劳条带，其长度为28.9mm，深约为5.5mm，疲劳区的中心部分距叶根前端面53.3mm。另外，左发进气道已脱离发动机（见图1），其碎片打坏机体、机翼与尾翼，机体左侧紧靠机翼上方发现一个129mm×408mm的大洞，但未击穿机体内壁，洞内未发现风扇叶片及进气道的残片。

WN3472事故后的8个月，即2017

年4月17日，美国西南航空公司一架载有144名乘客与5名机组人员的737-700客机在执行由拉瓜迪亚飞往达拉斯拉夫菲尔的WN1380航班时，当飞机爬升至9800m，左发突发非包容故障，造成进气道破碎与风扇整流罩严重受损。其碎片不仅打伤机体、机翼与尾翼，还打坏了靠近14排座椅处的舷窗玻璃，使客舱失压，氧气面罩自动弹出，并将一名坐在14排的女乘客吸出窗外，



图2 WN1380发动机进气部分受损严重

虽然其他乘客与空乘将其拉回并进行抢救，但由于伤势过重而死亡，另有8人受伤。飞机单发飞行，在20min后降落到彭萨科拉机场。这是美国民航从2009年来第一次有乘客死亡的飞行事故，也是西南航空公司成立以来第一次出现有乘客死亡的事故，此次事故被称为WN1380事故。

飞机着陆后，NTSB立即对受损的飞机与发动机进行了初步检查，发现发动机受损情况基本与WH3472一致（见图2），即1个风扇叶片在榫根处疲劳断裂，打坏了风扇整流罩与进气道，其断片打伤机体与机翼各一处，并打破了位于左侧14排座椅处的弦窗玻璃。

事故原因分析

在这两起事故中，虽有1个风扇叶片从榫根处断裂后甩出发动机，但风扇外的包容环却基本完好无损（见图3），使专业人士感到疑惑，是不

适了，因为按现有适航条例叶片是径向甩出发动机的。

两次出现故障的发动机均为CFM56-7B，这是一型可靠性高、性能优越的发动机。在WN1380事故发生两年半后，NTSB于2019年11月19日发布了于2018年4月17日编写的有关WN1380的《飞机事故报告》，在报告中详细分析了发动机风扇叶片断裂的机理与叶片断裂后造成的损伤过程，否定了前述的疑惑。发动机的13号风扇叶片在飞行中，突然从叶身与榫根交接处断裂，是WN1380事故的肇事者。叶片的燕尾形榫根保留在轮盘的弧形榫槽中，榫根断口处有一明显的疲劳区，如图4所示，疲劳区距叶片前缘15.4mm，其中有明显的6根疲劳条带，属于典型的低周疲劳性质，叶片断裂时已工作32636循环（从新叶片开始）。另外，在WN3472事件中，该发动机的



图3 两次发动机故障中包容环均完好无损



图4 燕尾形叶片片身与榫根交接处的形貌

23号风扇叶片也是从叶身与榫根交接处折断的，其断口的形貌与疲劳区的位置与大小，基本与13号风扇叶片相近，此叶片已工作38182循环。

NTSB对风扇叶片的材质与制造等进行了全面的检查，没有发现问题。最终得出发生裂纹的区域处于特别大的应力值下，在工作一段时间后引发初始裂隙，裂隙逐步扩大成为裂纹直致叶片断裂的结论。

在分解发动机后，在风扇叶片与出口导向叶片间的包容环底部发现了2块风扇叶片断片，其中一块长约50.8mm，另一块长约304.8mm，是榫根以上的部分，加上残留在轮盘榫槽中的榫根，残存的叶片断片

占叶片总质量的86%，也即有14%的叶尖部分，轴向流出了包容环。对包容环的检查，发现在底部有3处明显的撞击痕迹，还有1个小的撕裂槽，但无碎片穿出的痕迹。由此可见，叶片断片是在6点钟位置处径向砸向包容环的，撞击后叶片断成几块，因此在事故中，包容环起到了应有的作用，也证实了CFM56-7B的铝制包容环经受住了实际工作中的考验。

图5示出了CFM56-7B整个动力装置，进气道与风扇整流罩由飞机研制单位生产。进气道固定在发动机包容环的前边；风扇整流罩用铰链连接到机翼下发动机的吊架中，整流罩由内、外2块组成，在做地面

维修时它们可以向飞机内侧方向或外侧方向打开，当它们合拢时，在底部用轴向销将其锁住。由于整流罩是一件体积较大的薄壁件，为了维持它的固有形状，在邻近底部结合面处设有1个径向锁紧固定件，使整流罩下方与包容环固定。

CFM56-7B是CFM56系列发动机中的最后一型，在风扇部件中有两处与之前型号不同：叶片采用了宽弦设计，使单片叶片质量加大；包容环的材料由17-4PH合金钢改用了铝合金，相应的结构设计也做了改进，图6示出了CFM56-3与CFM56-7B的包容环设计。用铝合金制造风扇的包容环还是第一次，所以在发动机研制中，对包容环的包容能力进行了8种部件试验台的调试，最后调整完善的包容环进行了两次叶片甩出试验，这在发动机取证试验中是少有的。第一次试验中，叶片断片被包容环包容住了，但叶片在轮盘中的轴向锁紧装置断裂，造成几片叶片甩离轮盘，试验失败。经过近一年的改进

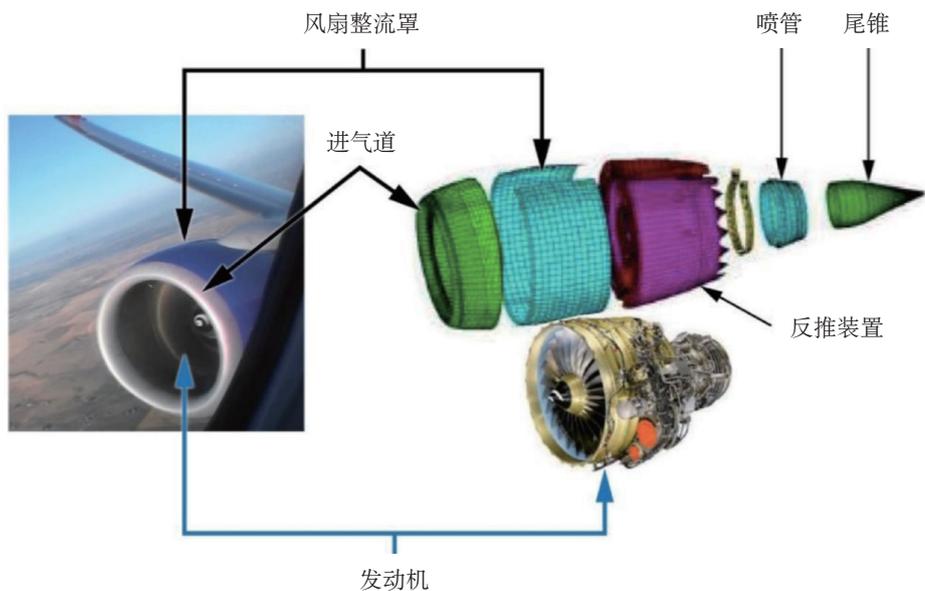


图5 CFM56-7B动力装置

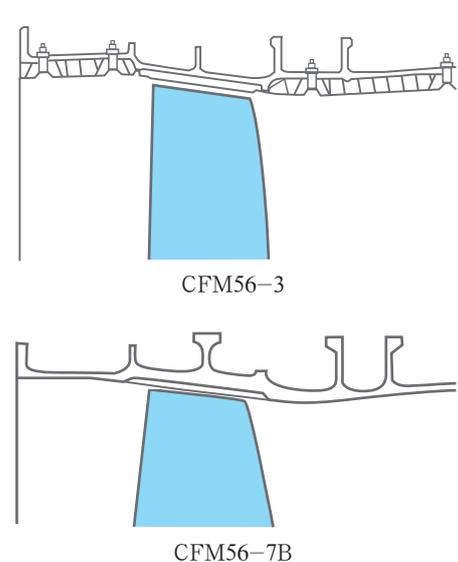


图6 CFM56两型发动机的包容环不同设计



图7 坠落到地面的进气道与整流罩



图8 砸破舷窗玻璃的整流罩断块

与调试后，第二次叶片甩出试验取得成功，才使得CFM56-7B于1996年12月取得适航证。在进行叶片甩出试验时，进气道是装在发动机上的，而整流罩没有装在发动机外部。

在叶片甩出的取证试验中，叶片从根部断裂时叶片所处的位置规定在上方即12点钟的位置。但在WN1380事故中，叶片断裂是在6点钟位置，即发动机下方发生的，这就造成了严重的二次损伤事故。

在WN1380事故中，13号风扇叶片断裂后撞到包容环的下部，叶片断裂成几块，其中2块残留在包容环内，叶尖部分断成的几块（数目不详，也可能就是1块）断片，向前甩出（叶片折断后发动机立即进入喘振，气流在发动机中轴向前、后流动）打坏了进气道与包容环的连接部位，使进气道甩离飞机坠地，图7示出坠落在地上的进气道与部分整流罩。

当叶片砸向包容环底部时，对整流罩的径向锁紧固定件作用了一

个大能量冲击载荷，在这个强劲的冲击载荷作用下，不仅使锁紧固定件破坏，而且将部分整流罩撕裂，其断块甩离飞机时，不仅击伤了飞机几处结构，而且有一块打碎了靠近14排舷窗的玻璃（见图8），造成客舱失压、氧气面罩弹出，还使一位女乘客丧生。

两次CFM56-7B严重故障均由于风扇叶片在叶根截面处，局部区域应力过大而造成低周疲劳导致的，为了不使类似故障再次出现，FAA、欧洲航空安全局（EASA）等适航部门先后发出若干适航指令，要求用户加强对风扇叶片榫根处的超声探伤仪、涡流探伤仪与萤光检验仪检查，看是否有微小裂纹存在。现在的规定大致是，从新件开始到20000循环时进行第一次检查，随后每1600循环检查一次。另外，虽然风扇叶片被规定为无寿命限制的零件，但是2019年8月6日CFM国际公司发出的服务通报称，当风扇叶片工作时间达到55000循环时，应该报废

而不再使用，即风扇叶片从无寿命限制件变成有寿命限制件。

结束语

NTSB在这份有关WN1380的《飞机事故报告》中，最后提出了几条建议，其中首要的是波音公司应确定CFM56-7B断裂的风扇叶片撞击到包容环的关键部位及其影响，重新设计用于737-700/-800/-900飞机所用的风扇整流罩，以保证整流罩在遭受风扇叶片断裂后的结构完整性。当完成这项改进设计后，除要求波音公司在新生产的该型飞机中使用新设计的整流罩外，还要求在役的飞机立即更换新设计的整流罩。另外，还要求飞机与发动机研制厂商共同开展研究工作，以确定在各种工作条件下，叶片断片砸向什么位置会对整流罩结构完整性造成大的影响，从而开发一个适用整流罩结构设计的分析工具。

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）