

涡轮盘中隐藏多年的瑕疵导致波音 767 烧毁

A Hidden Defect in the Turbine Disk Result in a Boeing 767 Burned

■ 陈光/北京航空航天大学

涡轮盘中隐藏多年的一个瑕疵导致一架客机的烧毁！可见在发动机的研制中，对高速旋转的零件，特别是处于高温下的涡轮盘，要从材料的源头抓起，不仅要精心设计、严格试验，还要在冷热加工过程中一丝不苟，使产品能承受长时间运行的考验。

美国航空公司（AA）的1架装有2台CF6-80C2B6发动机的767-300ER客机，于2016年10月28日执行由芝加哥飞往迈阿密的AA383航班任务，机上载有乘客161人，机组人员9人。当飞机在跑道上加速滑行2000m已达到起飞速度时，只听见“嘭”的一声巨响，右侧发动机推力急剧下降，飞行员根据当时的情况立即终止了起飞，飞机在滑行了820m后停在了跑道上，乘务员当即打开了飞机上的应急滑梯（机身左侧2个，机身右侧前部1个）组织乘客紧急疏散，机上170人均安全逃离飞机。由于左侧发动机并

未停车，发动机排气尾流导致从滑梯逃离的1名乘客重伤，21人轻伤。事故原因是通向发动机的燃油总管，以及机翼内的燃油箱被甩出的发动机高压涡轮第二级轮盘的断块打断与打穿，大量燃油泄漏引发大火，将飞机右侧机翼及机体烧毁，如图1、图2所示。

事故原因

打断燃油总管的涡轮轮盘断块来自于右侧发动机高压涡轮第二级轮盘发生的非包容破裂。当飞机在跑道上加速到140km/h即将离地、发动机处于起飞推力状态时，第二级高

压涡轮轮盘突然爆裂成两大块，其中质量为25.7kg的A块被甩出发动机后，先打断了向燃烧室供燃油的总管，继而又将飞机右机翼油箱底打穿，在将右机翼打出两个洞后飞出895m打穿了联合包裹服务（UPS）公司的仓库屋顶，最后落在仓库内的地板上。轮盘的另一大半块甩出发动机后，砸向跑道摔成三块（B、C、D）飞出近420m分别坠落到另一跑道边的草地上，其中B、C、D块的质量分别为37.8kg、3kg和0.9kg。高压涡轮第二级轮盘最终破裂成4块，如图3所示。



图1 由飞机流出的燃油引发飞机发生大火



图2 飞机右侧机翼与机身严重烧毁

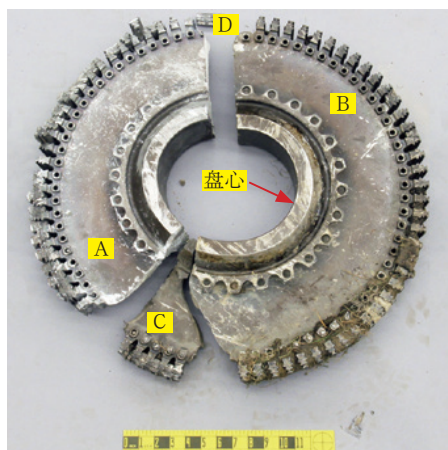


图3 高压涡轮第二级轮盘破裂成4块

出事的CF6-80C2B6发动机由1级风扇、4级增压压气机、14级高压压气机、2级高压涡轮（见图4）与5级低压涡轮组成，发动机已工作了68785h/10984循环。

通过对轮盘残骸的断面进行观察，发现在轮盘前缘的盘心处有明显的黑灰色区域（见图5），轮盘是由此处开始断裂的。对断裂区进行

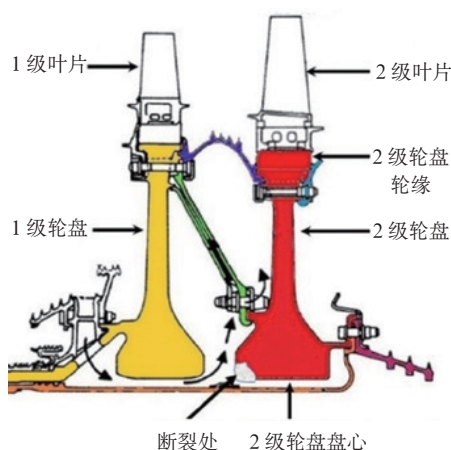


图4 CF6-80C2高压涡轮转子组件

电子显微镜观察，发现在轮盘表面下细晶包围出一个3.81mm×2.54mm的白色区域，如图6所示，此区域中有多个条纹与裂纹，被称为“不连续的白斑点区”。通过进一步的观察与分析，不连续的白斑点区是由于材料中存在微米级的氧化物造成的。由于轮盘表面下（即轮盘内部）存在着由杂质产生的微裂纹与条纹，

在长期处于低循环条件下工作，裂纹逐渐增长直至轮盘爆裂。出现故障的轮盘是在工作10984循环后爆裂的，其设计寿命为15000循环。

经过美国国家运输安全委员会（NTSB）与GE航空集团的分析与研究，确认轮盘材料中存在的微米级氧化物是在轮盘材料熔炼过程中未能清除而残留在材料中的，且在生产当年以及投入使用后，也无法探测到。

CF6-80C2B6的高压涡轮第二级轮盘所用材料为In718镍基合金，出故障的轮盘是1997年生产的。首先是由美国的ATI特殊材料公司根据GE的技术文件要求，采用三重熔炼法（真空感应熔炼、电渣重熔与真空电弧重熔）获得In718的铸锭。采用三重熔炼是为了消除材料中的杂质，保证材料的各项指标符合要求。浇铸的铸锭直径为254mm，交给威曼高登公司作进一步的热加工，首先将铸锭的顶端与底部切割掉，然



图5 轮盘断面

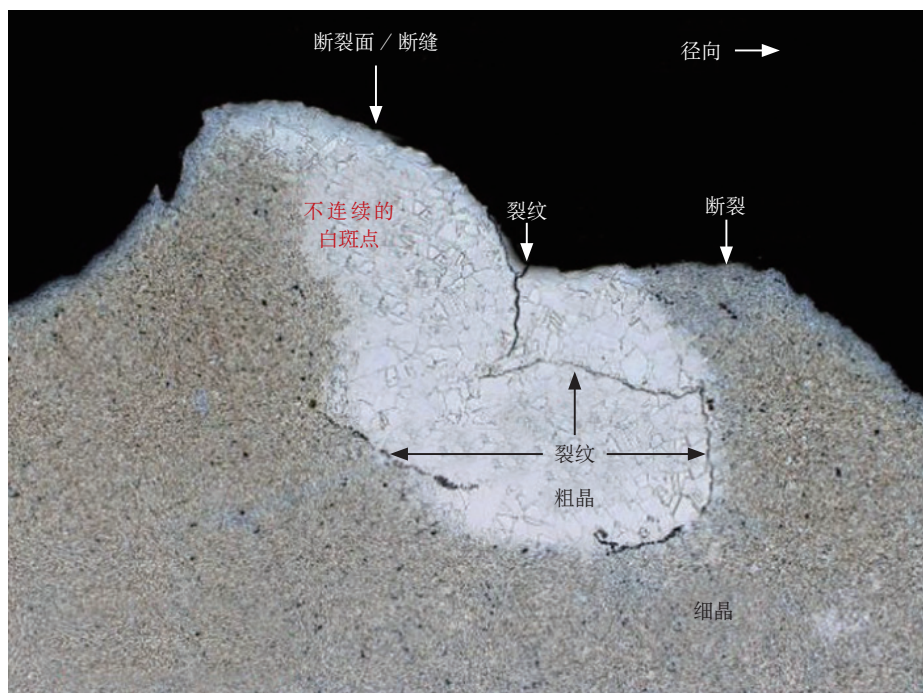


图6 电子显微镜下的断裂区

后再切成9个坯料，每个坯料经过3个方向的多次锤锻以及相应的热处理后，形成可供机械加工的锻坯，1997年8月8日威曼高登公司将符合规范要求的锻坯交给德国的MTU公司。MTU公司对此锻坯加工出最终的轮盘。在各制造工序中，均按GE的要求，采用超声波检测仪对原材料与加工好的轮盘进行过多次探伤，但均未发现引起这次故障的微隙。当年ATI特殊材料公司用于探伤的超声波探测技术与2017年年底该公司用的技术是一样的，所用的探伤设备也是按同一设计制成的。

1998年2月，MTU公司对发生故障的轮盘完成了最终检查后，签发了合格证，发送到GE航空集团，同年3月此轮盘装到CF6-80C2B6发动机上，发动机序号为ESN 690-373。1998年4月30日，波音公司向美国航空公司交付了装有ESN690-373此次发生故障发动机的767客机。

在ESN 690-373发动机服役的18年中，高压涡轮第二级轮盘曾按美国联邦航空局（FAA）适航指令进行过2次强制性的检测，即2011年1月15日与2017年3月25日，检测的手段均符合FAA的有关指令，结果表明轮盘质量无问题，也未发现隐藏在轮盘内的微隙。

由于在熔炼过程中，镍基合金微米级的氧化物未被清除干净，所形成的瑕疵隐藏在轮盘内部无法探测出来，经过一万多次低循环加载与卸载，裂隙逐步扩大发展，最终导致高压涡轮第二级轮盘爆裂。

经核实，与故障件同期（1997年）生产的高压涡轮第二级轮盘共有36件，其中8件仍在用，GE航空集团对此进行了高分辨率的超声探测



图7 高压涡轮第一级轮盘爆裂引发着火

检查，未发现存在问题。

发生在高压涡轮第一级轮盘上的类似故障

CF6-80C2发动机的高压涡轮第一级轮盘曾出现过数次非包容爆裂故障。例如，2000年9月22日美国航空公司的767-2B7(ER)进行地面维修性试车时，1号发动机第一级高压涡轮轮盘爆裂，甩出的断片造成飞机左翼下部着火，使飞机及1号发动机受到损坏；2002年12月28日新西兰航空公司的767-219(ER)，爬升到3400m时高压涡轮第一级轮盘爆裂，断块打穿发动机及短舱，打坏飞机左翼前缘；2006年6月2日美国航空公司的767-223（ER）进行地面调整试车时，高压涡轮第一级轮盘爆裂，断块打坏飞机多处并引发着火（见图7）；另外还有5起类似故障。但是，第二级轮盘出现破裂故障还是第一次。

2008年1月31日，NTSB将CF6-80C2高压涡轮第一级轮盘出现多次非包容爆裂的可能原因归纳为：高压涡轮第一级轮盘为疲劳断裂，是

由于一条晶间裂纹造成的破裂，原因是高压涡轮轮盘设计不完善，造成在榫槽底部后圆角处有一个高应力区，此处的应力接近或等于材料的许用应力，因此只要有一点点小瑕疵就可能造成起裂，裂纹发展后造成轮盘破裂。为此，GE航空集团对轮盘榫槽底部后圆角处进行了设计修改，并要求在加工、装配与使用中，避免在该圆角处出现人为的伤痕，此后再未出现类似的故障。

结束语

从高压涡轮轮盘中隐藏多年的瑕疵引发价值2亿美元的767客机烧毁，以及设计缺陷造成多起高压涡轮第一级轮盘非包容爆裂等严酷事例说明，在发动机研制中，对高速旋转的零件，特别是处于高温下的涡轮盘，要特别认真对待，要从材料的源头抓起，不仅要精心设计、严格试验，还要在冷热加工过程中一丝不苟，使产品能承受长时间运行的考验。

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）