

WJ5A 发动机涡轮叶片 折断及裂纹分析

北京航空材料研究所 孙淑珍 李淑媛 郑运荣

本文分析了 WJ5A 发动机一次事故原因。据目视、荧光、断口和金相检验,在叶片组织中发现了明显的过烧特征。经与试验室模拟试验后的过烧组织进行对比,判断出局部超温达 1290℃,这是引起事故的主要原因。文章还对发动机今后的安全使用提出了建议。

Fracture and Crack Analysis of Turbine Blades of WJ5A Jet Engine

Sun Shuzhen Li Shuyuan Zheng Yunrong

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

In this paper an analysis for an accident of WJ5A jet engine is made. On the basis of visual, fluorescent, fracture and metallographic examinations, obvious trace of overburn is revealed. By means of comparison with structure obtained at the laboratory simulation. We've determined that the temperature of the overheated area was reached to 1290℃, which caused the failure of the blades. Some recommendations are also put forward for the safty service of jet engine in future.

一、事故简况

装有 WJ5A 发动机的某型飞机,起飞 10 分钟后发现左边发动机振动到 7g (允许振动为 6g),报警红灯燃亮,继续飞行 1 小时 28 分钟后,在机场正常着陆。地检人员发现三级涡轮叶片有一片折断,随后送返制造厂进行分析。

该发动机为三级轴流反作用式涡轮发动机,起飞状态涡轮前温度为 852℃,叶片用材是 K5 和 K18 镍基高温铸造合金。

分解检查结果发现,二、三级涡轮叶片各有一片折断,三级涡轮叶片有数片前缘被严重打伤,三级导向叶片有一片擦伤痕迹。荧光渗透检查进一步确定,一级涡轮叶片约 40% 有裂纹;二级涡轮叶片前缘 100% 有裂纹;二级导向叶片 9 片带裂纹。由二级涡轮叶片取样进行化学成分分析,符合 K5 铸造高温合金技术条件要求。为了进一步确定引起叶片折断事故的原因,制造厂将折断的二、三级涡轮叶片以及同台发动机的一、二、三级导向和涡轮叶片共 11 片送交我所进行鉴定。

二、分析结果

1. 荧光渗透检查

检查发现,一级涡轮叶片裂纹数目较多,较短,分布在前缘和上下缘;二级涡轮叶片也普遍带有裂纹,以前缘较严重,裂纹最长达 6mm (图 1);二级导向叶片裂纹也较严重,前、后缘均有,其中一条深入前缘约 8mm (见图 2, A 处);一级导向叶片上缘板处有磨光条带;三级导向叶片和三级涡轮叶片有多处被打伤、擦伤。二、三级涡轮叶片折断和打伤情况见图 3。

2. 断口分析

材料工程

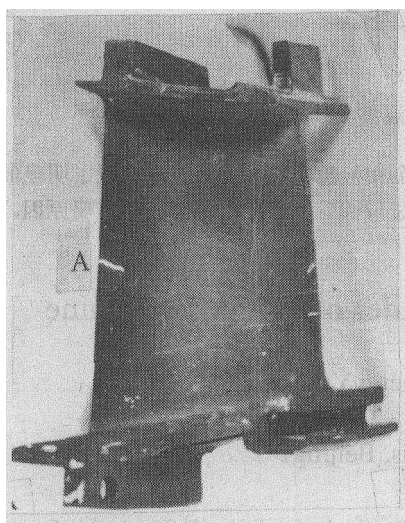
根据各级叶片损伤情况和裂纹分布密度,将断口分析重点定在二级导向和二级涡轮叶片上。

(1) 二级导向叶片:为带空腔的 K18 合金铸造叶片,在图 2, A 处裂纹区打断进行扫描电镜分析,证明断口主要特征为过烧 (图 4)。这种过烧组织与二级涡轮叶片裂纹断口特征相同。

(2) 二级涡轮叶片:为 K5 合金铸造实心叶片。服役发动机叶片在距叶冠 1/3 处折断后,匹配断口被抛出发动机,在其保留的一段低倍断口上可以看到有一条贯穿裂纹从进气缘起一直深入到叶片内部约 6mm (图 5 箭头所指)。在低倍光学照片上,枝晶组织明显可见,是典型的枝晶间开裂。在图 5 所示的 A、B、C、D、E 各区分别扫描,可以明显地看出在叶片进气边缘附近的断口表面上 (图 5, A 区) 有许多小枝晶,没有固态撕裂的痕迹,这是

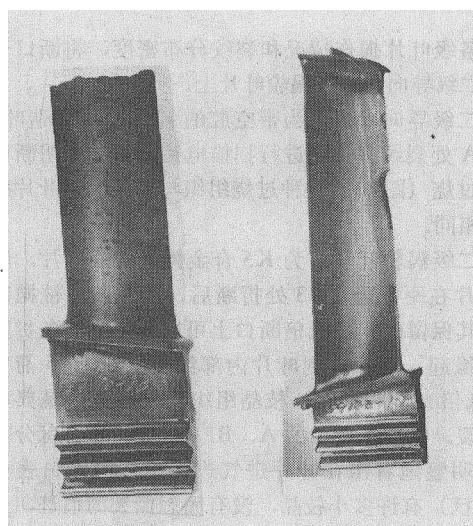


合金中出现液相的主要特征, 这些小枝晶是熔化了了的金属



0.8×

图2 二级导向叶片的裂纹显示



(a)二级

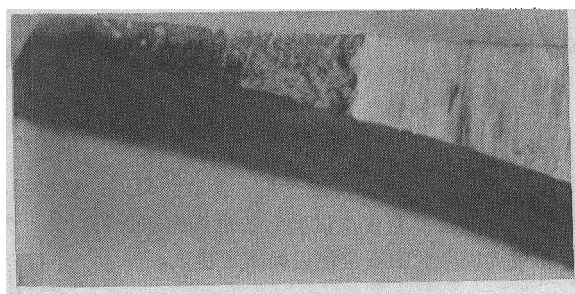
(b)三级 0.7×

图3 二、三级涡轮叶片折断和打伤情况

液在冷却时再次凝固形成的, 由于冷却速度较快, 所以枝晶尺寸较小。在图 5A、B、C、D 区的扫描电镜照片上, 均可见到小枝晶, 但离进气缘越远, 熔池区也越来越少, 这是因为在 A 到 E 区存在着温度梯度, 所以显微组织呈梯度变化。在 D 区熔池已逐渐变窄, 二次凝固的枝晶只在二维方向得以发展, 断口上只有少量熔池, 到 E 区 (图 6) 已观察不到熔池, 即没有过烧的特征, 而代之以固相撕裂的粗大韧窝和沿结晶学平面的断裂小面, 属于过热区常见的断口特征。

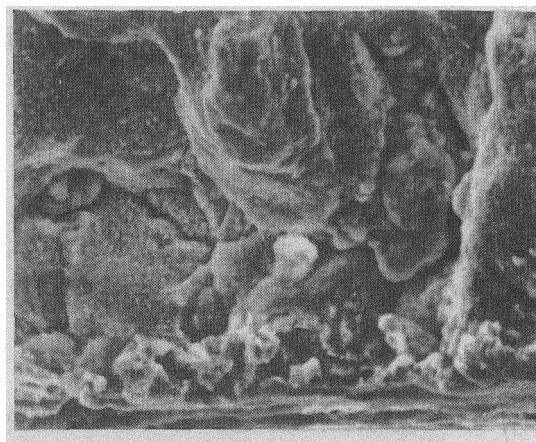
(3) 三级涡轮叶片: 为 K18 合金铸造实心叶片, 进气边缘有明显的打伤痕迹, 低倍断口属于冲击过载断口, 其放射形不十分明显。高倍断口可见撕裂韧窝, 没有过烧特

征, 小面上有明显的滑移 (图 7)。



(a) 裂纹断口

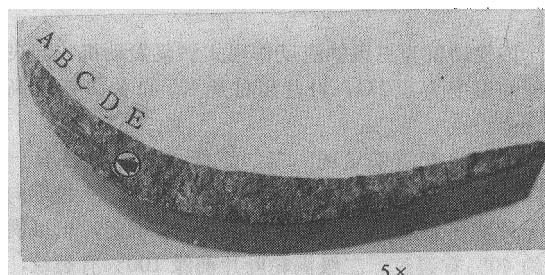
10×



(b) 过烧特征

800×

图4 二级导向叶片裂纹打开的断口及其过烧特征



5×

图5 二级涡轮叶片低倍断口

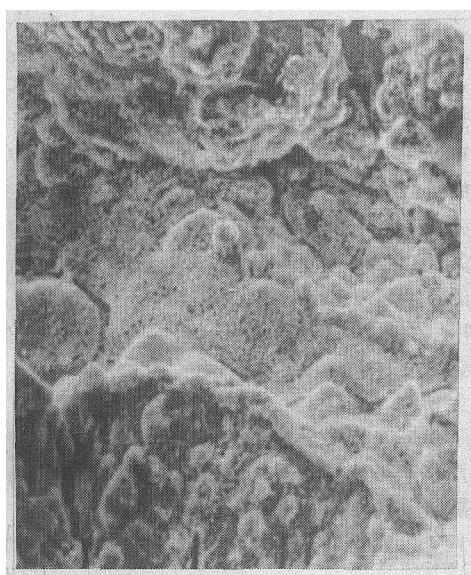
3.金相分析

(1) 一级涡轮叶片: 为 K5 合金铸造的带圆孔的空心叶片, 在距叶冠 2/5 叶身处横切检查, 仅在进气边缘较近处 (约 10~20 μm) 有过热现象, 偶尔可见初熔区, 在叶冠处切片检查表明, 缘板转角处温度最高, 显示出 γ' 全部固溶区, 该区放大 40 倍即可发现沿晶界和枝晶间多处开裂 (图 8)。在放大 1000 倍的光学照片上可以看到枝晶干 γ' 有明显的回熔现象。在更高倍数下, 可以发现晶界严重熔化, 在枝晶间出现溶池, 属于典型过烧组织。

(2) 二级导向叶片: 沿断口方向磨制金相试片, 分区检查其显微组织有明显的过烧特征, 与二级涡轮叶片类似。

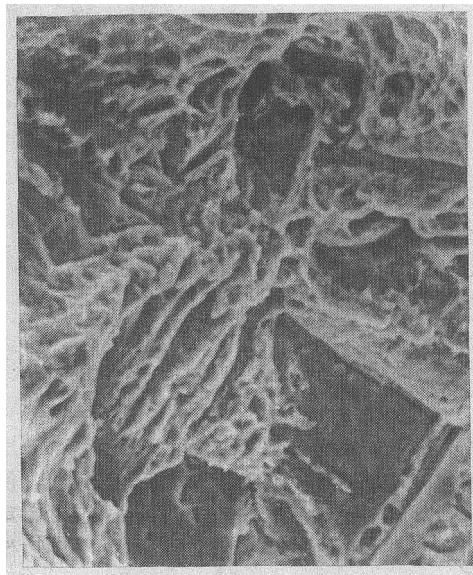
(3) 二级涡轮叶片: 在离断口 8mm 处横切叶片作金相分析, 发现在距进气边缘 6mm 区域内的枝晶和晶粒难

以显示, 这是因为超温而使合金内 γ' 固溶造成的。



(a) A 区

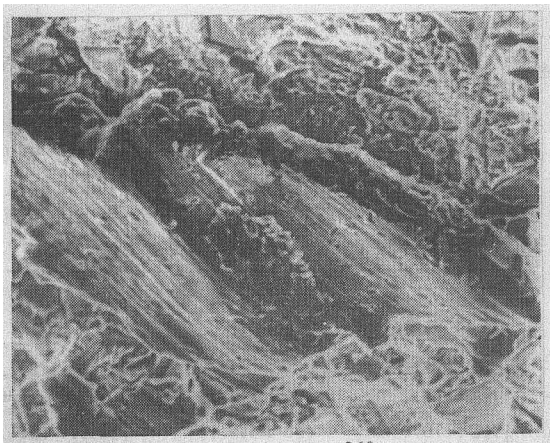
1000×



(b) E 区

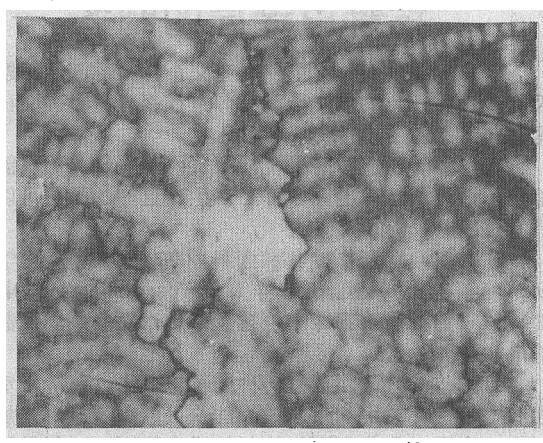
1000×

图6 二级涡轮叶片断口的扫描电镜照片



360×

图7 三级涡轮叶片断口的扫描电镜照片



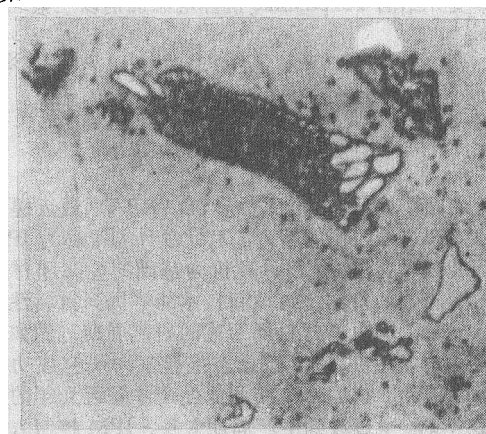
40×

图8 一级涡轮叶片的光学显微照片

为了进一步证实断口分析中图 5A、B、C、D、E 区中存在的温度梯度和相应显微组织变化, 再次在切面上划出相应的 A、B、C、D、E 区进行观察, 结果发现, 在 A 区内次生 γ' 全部固溶, 共晶 γ' 则全部熔化在枝晶间区形成初溶池, 此区温度最高, 估计可达 1290℃ 以上, 在 B 区共晶 γ' 大部分未熔化, 但它四周已出现少量初熔 (图 9), 部分次生 γ' 没有溶解, 在 C 区, 共晶 γ' 保持完好, 枝干区 γ' 已固溶, 枝晶间区仍保留较多 γ' 。E 以外区域为 K5 合金的正常组织。

有关文献认为, 超温对涡轮叶片显微组织中的 γ' 相和次生碳化物影响最大, 它们的变化情况可作为过热检查的依据。在叶片内出现初熔区和初生共晶 γ' 的急剧溶解是过烧的特征。国外对涡轮发动机中使用的 IN-738 合金叶片的过热显微组织进行了一系列的研究。国内也对 K5 合金涡轮叶片进行了超温试验, 当叶片在 1310℃ 保温 1 分钟时, 枝晶间出现较大的初熔池, 沿枝晶间区还出现液膜并产生热裂, 在叶片表面可以看到溶液外渗后形成的空

洞。现将服役断裂叶片的过烧组织与试验室模拟过烧组织作一对照 (见图 10), 从而有力地说明两者的超温条件非常近似。



1000×

图9 K5 合金二级涡轮叶片 B 区的光学显微照片

