

整体涡轮叶盘叶片的修理研究

潘少杰 张琴 陈豪

中小型航空发动机叶轮机械湖南省重点实验室 湖南株洲 412002

摘要: 本文通过介绍某整体涡轮叶盘叶片的修理案例,探索了整体涡轮叶盘叶片的修理方案。修理后涡轮整体叶盘进行了验证试验,验证了修理方案的可行性,最后对修理方案进行了总结。

关键词: 整体涡轮; 叶片; 修理

The research of the turbine blisk repairing

Pan Shaojie Zhang Qin Chen Hao

Hunan Key Laboratory of Turbo machinery on Small and Medium Aero-Engine, Zhuzhou, China 412002

Abstract: This paper provides the research results of a procedure of the engine blisk repairing by the investigation of the real case. The repaired blisk rotor was validated in a long time engine test job. The repairing procedure is feasible and a conclusion is given in the paper.

1.概述

涡轮整体叶盘是涡轮转子叶片与涡轮盘制成一体的整体结构,一般为整体精铸成型。它的优点是:减轻了转子的重量;避免榫头、榫槽磨损及微动磨损,增加发动机的可靠性;结构简单,减少发动机的零件数。但当叶片损坏后,无法单独更换叶片,整体涡轮叶片损伤后的修理一直扩大应用必须解决的关键问题之一。

本文通过对某涡轮整体叶盘的实际修理案例,探索了涡轮整体叶盘叶片的修理方案。某整体涡轮叶盘为 K424 合金铸造涡轮整体叶盘,叶片表面没有进行处理。在工作过程中,被多余物击伤,在前缘距叶尖 11mm 处形成深度约 0.85mm,长度约 0.9mm 的缺口,如图 1 所示。叶片缺口处会产生应力集中,有可能引起叶片断裂,存在较大的隐患,因无法单独更换叶片且更换零件产生较大的经济损失,因此考虑对损伤处进行修理。

2.修理方案及评估

2.1.修理方案

为消除叶片的缺陷,需将缺陷部位抛修圆滑,为避免产生叶片的“蜂腰”问题,将叶片沿缺陷部位以一定的角度抛修至叶尖,为避免叶型畸变严重,规定了抛修的角度为 11° ;同时叶盆与叶背圆角转接,叶身方向圆滑转接且离叶根不小于 10mm,方案如图 2 所示,图 3 示出了叶片叶尖截面和缺陷截面的抛修量。

示,图 3 示出了叶片叶尖截面和缺陷截面的抛修量。



图 1 叶片损伤情况

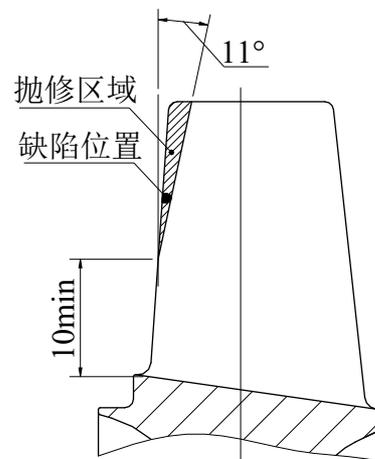


图 2 叶片修理方案

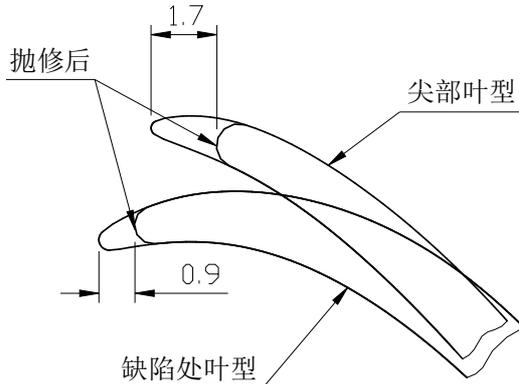


图3 叶片截面抛修量

为评估叶片修理后性能、强度、振动特性方面的影响,需要与理论叶片计算对比分析,为此,模拟修理方案建立了修理后叶片的三维建模,其与理论叶片的差异见图4。

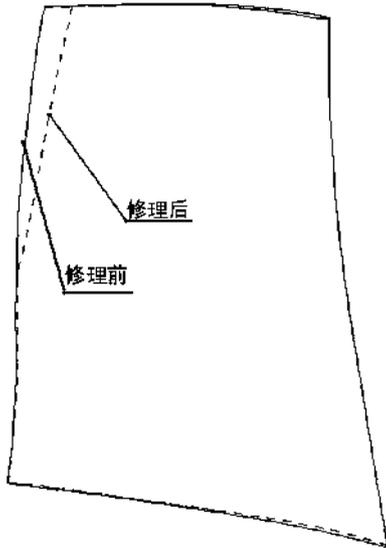


图4 叶片抛修前、后比较

2.2.性能评估

对修理前、后的二级涡轮转子叶片,在设计点进行了三维气动计算对比,计算中,修理前后保持边界条件一致,认为所有叶片均

进行了同样的修理。三维计算中,采用了成熟商用软件 ANSYS/CFX。本文中的计算选用了常用的标准湍流模型,通过定常求解雷诺平均的 N-S 方程获得涡轮性能及内部流场,计算网络见图5,修理后较修理前涡轮气动性能计算结果对比如表1所示。

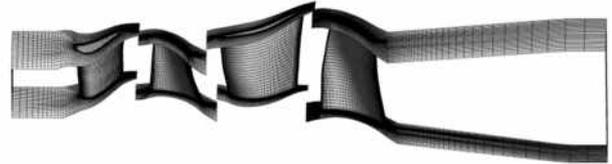


图5 涡轮气动性能计算网络图

表1 涡轮气动性能计算结果对比

功率(kW)			涡轮效率		
第一级	第二级	总功率	第一级	第二级	总效率
0.047%	-0.835%	-0.359%	0.002%	-0.074%	-0.374%

从计算结果中可以看出,整体涡轮叶盘这样的修理方案对性能有一定的影响,但是影响十分有限。在32个叶片全部修理的情况下,涡轮总功率仅下降了0.359%,总效率仅下降了0.374%,在仅有一个叶片进行修理的情况下,其对性能的影响几乎可以忽略不计。

2.3.强度评估

对工作叶片来说,其主要承受了气动力、离心力和热载荷。基于以下两点,仅对截面的拉伸应力进行评估:

(1)同样条件下,修理前与修理后的气动力、热载荷基本一致;

(2)通过计算分析,修理前叶片的重量为13.50g,修理后叶片的重量为13.39g,重量仅相差0.8%,离心弯曲应力不会相差不大。

为简化计算,选取了4个截面进行拉伸应力的计算,选取的4个截面为:缺口处截面、缺口上方5mm、缺口下方5mm,叶根截面,计算结果见表2。

表2 截面拉伸应力计算结果对比

截面号	修理前				修理后			
	1	2	3	4	1	2	3	4
截面半径	92.75	87.75	82.75	69	92.75	87.75	82.75	69
材料密度					7870kg/mm ³			
转速					50000r/min			
截面以上质量(g)	2.10	3.70	5.53	12.39	2.02	3.60	5.40	12.28
截面以上质心半径(mm)	96.33	93.68	90.25	81.76	96.31	93.64	90.82	82.21

截面离心力(N)	5546	9505	13682	27771	5334	9242	13445	27678
截面面积(mm ²)	39.077	42.765	50.625	79.905	38.086	42.013	50.462	79.905
截面拉伸应力(MPa)	141.9	222.3	270.3	347.5	140.0	220.0	266.4	346.4

从表 2 可以看出, 修理后各个截面的拉伸应力比修理前的截面拉伸应力均有一定程度的下降, 但下降程度非常有限, 其中 1 截面下降了 1.3%, 2 截面下降了 1.0%, 3 截面下降了 1.4%, 4 截面下降了 0.3%, 综上所述, 叶片修理前、后的强度相当。

2.4. 振动特性评估

叶片修理后, 几何尺寸发生改变, 可能导致叶片的频率发生改变, 因此需对叶片频率的改变情况进行分析, 避免共振频率裕度减小。叶片的频率主要受离心力、温度场、叶片扭角、根部连接情况、叶片几何形状的影响, 考虑到修理前、后叶片的离心力仅相差 0.3%(见 2.3)、温度场、扭角、根部连接情况一致, 为简化计算, 只对叶片常温下的静频进行计算。

静频计算采用 ANSYS 软件, 除了修理前、后叶型的差异外, 其余的计算条件完全一致, 有限元网络图见图 6, 计算结果见表 3。



图 6 叶片有限元网络图

表 3 叶片静频计算结果

	一阶	二阶	三阶
修理前	3592	8338	10779
修理后	3583	8151	10723
相对偏差	-0.25%	-2.2%	-0.52%

从表 3 可以看出, 修理前、修理后叶片的静频基本没有改变,

可以推出该修理方案对叶片的振动特性影响不大。

3. 试验验证

整体涡轮叶盘经修理后, 进行了动平衡及荧光检查, 再配装发动机上继续使用。发动机经过了长时间的运行, 完成了多个科目的技术鉴定试验。试验过程中, 发动机工作正常, 性能没有明显变化, 发动机分解后, 整体涡轮叶盘未发现异常现象。

4. 结束语

本文介绍了某整体涡轮工作叶片前缘损伤后的修理, 修理方案经过了性能、强度、振动特性评估, 修理后的零件经过了试验考核, 证明了修理方案合理可行。

因不带叶冠的涡轮工作叶片与整体涡轮工作叶片结构相似, 没有叶冠的载荷施加在叶身上, 因此该方案也可应用到无冠叶片的修理上。

涡轮工作叶片的排气边也经常被多余物损伤, 其处理一定程度上也可以参考本方案进行。从涡轮的设计特点来看, 涡轮叶片的排气边对涡轮性能有较大的影响, 制定修理方案时, 需要更深入的评价, 避免较大的性能损失。

此外, 修理时还应注意:

- (1)本文中整体涡轮叶盘没有进行表面处理, 对于进行了表面处理的叶片, 修理后应进行补充处理;
- (2)本文中的整体涡轮叶盘的材料为等轴晶, 对于单晶、定向晶的涡轮叶片在修理过程中, 还需进一步的研究, 以避免再结晶问题。

作者简介: 姓名: 潘少杰, (出生: 1979 年 6 月-), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 福建省泉州市, 学历: 大学本科, 学位: 学士, 职称: 高级工程师, 研究方向: 航空发动机设计