

某发动机高压涡轮工作叶片故障与典型修理技术

High Pressure Turbine Blade Fault and Typical Repair Technology of One Engine

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 常敏 马蕾 于萍

为使叶片满足高温、高强度工作条件的使用要求,除在结构设计上采用复杂的空心气冷式换热结构和空-空换热器对冷却叶片的二股气流进行冷却,提高对叶片的冷却效果外,在修理过程中也制定了相当严格的技术要求,如多项试验检查要求和修理技术要求,以保证其各项技术指标及安全措施实施到位。

某高压涡轮工作叶片采用与K413相当的ЖС-6V材料无余量精铸而成。为使叶片满足高温、高强度工作条件的使用要求,除在结构设计上采用复杂的空心气冷式换热结构和空-空换热器对冷却叶片的二股气流进行冷却,提高对叶片的冷却效果外,在修理过程中也制定了相当严格的技术要求,如多项试验检查要求和修理技术要求,以保证其各项技术指标及安全措施实施到位。

主要修理技术指标和试验检查要求

为保证燃烧室出口温度场符合设计要求,修理中要对每个燃烧室出口温度场进行测量;为保证高压涡轮工作叶片内部冷却气流通畅,在对

叶片进行超声波清洗后,按标准对其进行X光检查内腔清洁度;为保证叶片内各腔冷却气流量符合设计要求,要对每个叶片进行水流量检测,检查叶片内各腔的流量和总流量;为保证叶片在损伤限度内工作,要检查并控制叶片叶尖裂纹长度、数量、间距;为控制叶片蠕变量,要对叶片伸长量进行测量检查;为保证叶片型面符合设计要求,对经表面抛修过的叶片壁厚进行测量检查;定时抽样解剖检查叶片材料组织,定期进行恢复性能热处理;定时更换叶片表面涂层修理,保证其在高温下的防护作用,有效地避免零件基材因高温氧化和热腐蚀作用而导致机械性能显著降低,从而达到延长使用寿命的目的。

由此可见,在修理过程中,需通过各种试验、测量检查和维修,保证叶片的状态和工作环境符合要求,才能确保叶片安全可靠地进行工作。

叶片主要技术指标和故障情况

对于高压涡轮工作叶片,在发动机修理中所发现的主要故障主要包括以下几方面。

1 叶片叶尖裂纹

为保证在规定翻修寿命期内,叶片能够在允许的损伤限内安全工作,修理中用荧光法检查叶片叶尖工作中产生的裂纹,根据叶片的工况条件等,规定了允许装机使用的叶尖裂纹长度、数量和裂纹之间间距的要求。修理中叶尖裂纹超过规定要求的叶

片约占叶片总数的8% (主要是裂纹间距和数量超过规定)。

2 叶片水流量

为保证叶片内各腔冷却气流量符合设计要求,叶片修理技术要求规定对叶片各腔冷却空气的流通能力进行水流量测试。在规定的温度、压力等条件下,从叶片底部供水,通过叶片前腔进气边孔排水量为 $(n \sim m)$ L/min;通过叶片后腔排气边缝排水量为 $(k \sim h)$ L/min。从检测结果看,部分叶片的水流量超出规定范围(偏大或偏小)。

3 叶片伸长量

为保证叶片在寿命期内可靠地工作,修理中要求控制叶片蠕变量,对工作后叶片相对于原始状态的伸长量进行测量检查,要求伸长量不大于0.05mm。大修以来因伸长量超差而报废的高压涡轮工作叶片有千余片,其报废有3方面的原因:

(1) 伸长量超过大修规定的故障标准;

(2) 无原始叶片长度值;

(3) 伸长量为负值。

4 叶片壁厚

为保证叶片型面符合设计要求,在修理中规定,高焓叶片更换涂层时,对其进行酸洗去除原表面渗(涂)层,允许表面残余涂层0.015mm;对局部超过残留涂层标准的部位,允许采用局部打磨法去除涂层,对经修磨表面用超声波方法检查叶片壁厚,允许壁厚减薄不超过0.1mm。修理中有数百片叶片壁厚减薄超过规定要求。

5 其他故障

在修理中,除上述故障外,还有一些叶片打伤、发动机工作超温导致叶片过热等故障。

故障分析研究

为了分析查找故障原因,提出解

决措施、制定满足发动机修理、使用要求的修理标准和修复方法,根据统计结果,分别对大修中高压涡轮工作叶片叶尖裂纹、水流量、伸长量和叶片壁厚超标主要故障进行了分析、试验研究。

1 叶片叶尖裂纹分析

大修中由于高压涡轮工作叶片叶尖裂纹超差而导致叶片报废问题比较突出,这不仅影响了发动机大修进度,也大大增加了发动机的修理费用。

涡轮叶片是发动机重要的高温转动部件,工作中承受很大的离心力、气动力、振动应力和温度应力作用,工作条件最为恶劣。在火焰筒出口温度高达1650K(1377℃)的情况下,为了提高冷却效果,在设计上采用了复杂的换热结构,并在发动机上专门设计了一个空-空换热器,引入外涵空气对冷却叶片的2股气流进行冷却,这一独特的设计使2股气流温度降低125~210℃,使叶片达到更好的冷却效果;同时,也使叶片内外表面的温差加大,工作中热疲劳加剧;叶尖与一级涡轮导向器外环相磨进一步加剧了裂纹的产生与扩展。

从统计结果看,随着工作时间的增加,叶尖裂纹的产生数量及裂纹长度也是增加的。通过对产生叶尖裂纹的叶片进行解剖、扫描电镜观察和金相分析可以看出:叶片叶尖裂纹属热疲劳裂纹,其形成与发展是热应力和燃气环境共同作用的结果。

2 叶片水流量分析

为了查找叶片水流量超差的原因,从叶片原始水流量和经长期工作后叶片水流量的变化情况2方面进行了试验分析工作。

(1) 新品叶片水流量分布情况。

对两批新品叶片进行了流量测量,第一批流量测量结果表明,叶片进气边孔流量中值为6.196L/min,

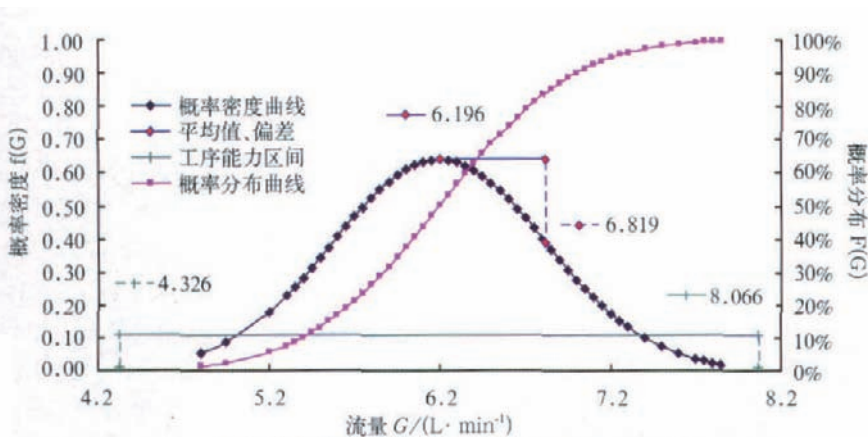


图1 新备件叶片孔的水流量(正态分布)

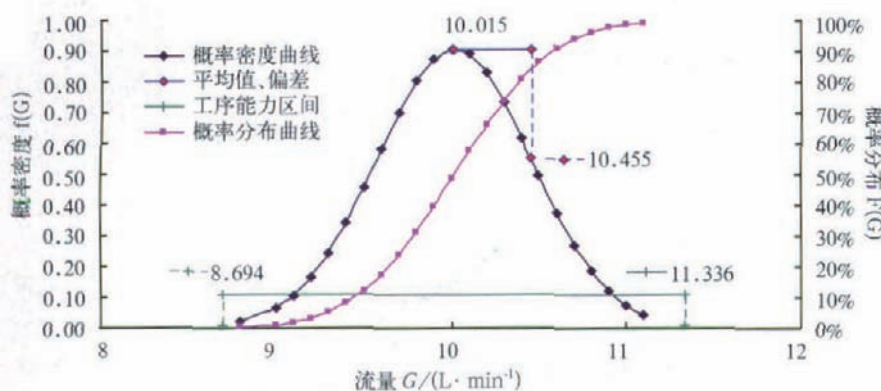


图2 新备件叶片缝的水流量(正态分布)

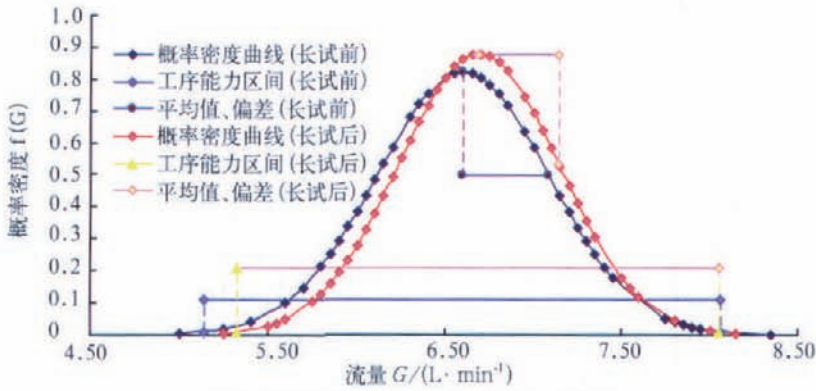


图3 长试前后叶片进气边孔流量 (正态分布)

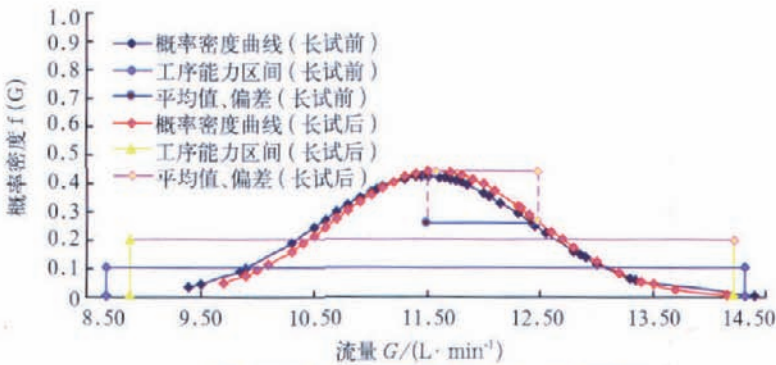


图4 长试前后叶片排气边缝隙流量 (正态分布)

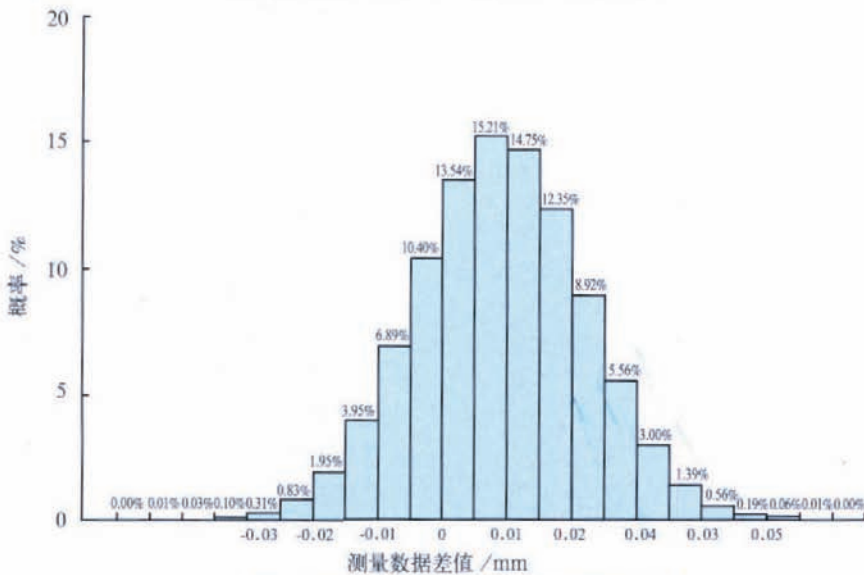


图5 高压涡轮工作叶片伸长量统计测量差值分布

排气边缝流量中值为 10.015L/min (见图 1,2), 第二批叶片进气边孔流量中值为 6.175L/min, 叶片排气边缝流量中值为 11.62L/min。

从两批叶片水流量测量结果看, 新品叶片水流量超差率为 20.4% (按原标准), 并且大部分超差叶片的水流量低于标准值。

(2) 长试前后叶片水流量分布及变化情况。

长试前后高压涡轮叶片水流量测量结果见图 3、4。其中, 图 3 为长试前后叶片排气边孔流量分布, 图 4 为长试前后叶片进气边缝隙的流量分布。由图可见, 长试前叶片水流量孔中值为 6.60L/min, 长试后为

6.69L/min, 缝隙流量长试前中值为 11.49L/min, 长试后为 11.58L/min。长试后, 叶片水流量有增加的趋势。

以上试验、统计结果表明: 大修故检中出现的叶片水流量超差问题主要是由叶片原始状态超差所致; 经过长期工作的叶片, 其水流量有增加趋势, 但变化量较小, 并不是导致叶片水流量超差的重要因素。

3 叶片伸长量分析

为查找叶片伸长量超差的原因, 从叶片伸长量测量系统和经长期工作后叶片的组织变化及叶片蠕变分析方面进行了统计、试验和计算工作。

(1) 叶片伸长量测量统计。

针对高压涡轮叶片伸长量的问题, 在测量上进行了大量的统计、分析工作, 首先对外购新品高涡叶片备件进行入厂复测, 并与提供的叶片原始长度值进行比较, 通过正态分布统计分析 (见图 5) 得出, 双方对于叶片长度测量平均值相差 0.01mm (偏差相差 0.0001), 54% 的叶片实测结果与原始长度值相差在 0.01 ~ 0.05mm 之间, 其中差值小于 0 的占 7%, 大于 0 的占 46.8%。由此可见, 大修故检中近 50% 的叶片伸长量的测量值大于实际叶片伸长量 0.01mm 以上。经咨询了解到, 某修理厂在高涡叶片故检中, 很少出现因伸长量超差而报废的现象。为此进行叶片伸长量对比测量, 发现测量结果相差较大, 与某修理厂测量的数据相比, 叶片伸长量平均值偏大 0.024mm。

(2) 叶片金相组织分析。

挑选工作时间分别为 300h、600h 左右的伸长量分别为合格、超长、缩短 3 种状态高涡叶片各 3 片 (共 6 片) 进行解剖金相分析其组织变化情况, 其结果为: 工作 300h 和 600h 的伸长量为合格、超长、缩短的叶片材料组织 (碳化物的形态、数量、尺寸和分布, γ' 相的形态和尺寸) 无明显区别, 其组织都处于初始蠕变阶段。

表1 高压涡轮叶片工作1500h蠕变变形计算结果

材料	蠕变伸长量 /mm		
	X方向	Y方向	Z方向
实际载荷谱	0.0548	0.0466	0.0246
设计载荷谱	0.113	0.168	0.062

(3) 蠕变计算分析。

按照国内某发动机实际使用载荷谱及设计载荷谱,采用三维有限元非线性应力计算方法,对高压涡轮转子叶片进行了蠕变变形计算分析,蠕变变形分析计算结果见表1。计算结果表明,与设计载荷谱相比,国内实际使用工况下高压涡轮工作叶片在1500h使用期内的蠕变变形较小,高压涡轮叶片在整个工作期间,蠕变变形不是非常明显,伸长量测量点在设计载荷谱下的蠕变仍在第二阶段,因此可以确定,单从蠕变伸长量考核,实际载荷工况下1500h的寿命期

内,叶片蠕变伸长量不会超出规定的容许伸长量标准。

经以上分析可以得出,发动机修理故检中高压涡轮工作叶片伸长量超标报废的主要是因测量系统与外方测量系统存在较大差异造成的。

4 叶片壁厚分析

针对修理中叶片壁厚减薄超差问题从修理工艺和测量2方面进行了分析。

(1) 修理对叶片壁厚的影响。

在修理由于需对高压涡轮工作叶片更换涂层,首先对其进行酸洗去除原表面渗(涂)层(酸洗去除厚度的经验值为0.04mm),对局部超过残留涂层标准的部位采用局部打磨法去除涂层,酸洗和打磨将使叶片壁厚减薄。

(2) 叶片壁厚测量分析。

对部分叶片壁厚测量值统计分析得出结论:叶片壁厚测量结果的重复性差,对同一测量点,60%的测量结果存在偏差;叶片酸洗前、后,近70%的测点壁厚无变化,9%测点壁厚加厚,叶片打磨前、后,近60%的测点壁厚无变化,4.5%测点壁厚加厚,这说明测量系统不稳定。叶片壁厚要求数据精确到小数点后2位,如1.17mm、0.79mm等,而测量数据均按0.05mm进位,由此可见,此精度无法满足要求。

由以上分析可知,造成叶片壁厚超差的主要原因是测量系统不稳定和精度低;在修理中采用的酸洗和打磨工艺方法使叶片壁厚减薄,也造成部分叶片正常消耗报废。

修理技术要求和修复方法

经过对叶片叶尖裂纹、水流量、



EASTWARD 伊斯沃公司

在各种产品、零件、整机上打
印中英文字符或图形标记
欢迎拨打免费热线电话: 800-807-6866

ISO9001质量管理体系认证和高新技术认定的外资企业
为用户设计订做各种工业专用标记机



▲ 气动打标打标机系列

- 气动打标打标机系列
- 无噪声气动打标刻印机
- 无噪声气动打标压印机
- 振镜扫描连续激光标记打标机
- X-Y扫描连续激光标记打标机
- X-Y扫描脉冲激光标记打标机

- VIN号数控压字机
- 喷砂标记打标机
- 半导体激光打标机系列
- 光纤激光打标机系列
- 汽车零部件专用打标机
- 智能卡激光专用打标机



▲ 激光标记打标机系列



▲ 光纤激光打标机系列



▲ 激光金属纸标签



▲ PMI54轿车底盘
VIN号数控压字机



▲ 压字机样品



ABC123



品牌, 专业, 不打不相识, 伊斯沃为您解决一切标记问题

中国公司
地址: 重庆市渝北区花卉东路36号 邮编: 401147
电话: (023) 67610571 67607455
传真: (023) 67610577
网址: www.eastward.com.cn
E-mail: canada@eastward.com.cn

各地服务热线
华东服务热线: 13916137046
华南服务热线: 13452001577
华北服务热线: 13594322405
东北服务热线: 13883551512
重庆服务热线: 13808360345

广告索引号 09-123

叶片伸长量、叶片壁厚超标故障的试验、统计分析和修理中故障情况统计可以知道,影响发动机工作可靠性和修理成本的主要故障是高压涡轮工作叶片叶尖裂问题,为此进行了以修复叶片叶尖裂纹为主的修复技术的研究。对产生叶尖裂纹故障的高压涡轮工作叶片进行激光熔焊的方法进行修复研究和热冲击试验及长期试车考核,以制定高压涡轮工作叶片叶尖裂纹修复方案。

1 补焊材料选择

根据叶片材料的主要化学成分及性能,在补焊材料的选材中充分考虑了补焊材料与基体材料要有良好的相容性、热膨胀系数相近和良好的高温力学性能、热疲劳性能等因素,选用填料为镍基高温合金(IMR-03)。

2 叶片叶尖裂纹补焊修复

选出因叶尖裂纹报废的高压涡轮工作叶片(该叶片已工作时间 500~600h),按高压涡轮工作叶片的大修要求对其进行了去除涂层的清洗、故检、荧光检查等工作后,基于满足激光焊工艺并使基体材料损伤最小、彻底清除裂纹的原则,根据裂纹是单直裂纹、密集度裂纹等具体情况,用机械打磨与着色跟踪法清除裂纹。用激光熔焊法进行裂纹修复,修后用超声波处理消除其焊接应力,结合大修工艺对叶片进行了外观检查、荧光检查、恢复性能热处理和复涂涂层等工作。

3 激光补焊金相组织

金相检查结果表明,补焊区与基体材料为冶金结合,界面无裂纹、无缺陷,补焊区组织为细小的胞枝晶组织。

4 热冲击试验

为考核采用激光熔焊修复叶尖裂纹叶片的抗冷热冲击能力,对焊修后的叶片进行了 300h(折合 1000 次冷、热疲劳循环)的热冲击试验。根据试验结果可知,高涡叶片在很小

的循环次数下就已经出现初始裂纹,但裂纹扩展速度相对比较缓慢,到了 1000 次循环,叶尖裂纹长度没有超过 1.8mm,从裂纹形貌上看,应属于热疲劳裂纹。裂纹的数量和长度,都是符合大修技术要求的,叶片叶身出现不规则的微小显示属于龟裂。热冲击试验后,荧光检查叶尖补焊区未发现裂纹,对经过 300h 热冲击处理的主叶片进行了解剖,制成金相试样后检查叶盆补焊区,没有发现裂纹。用扫描电镜对叶背的激光补焊区分析时发现,补焊区两侧边缘处各有长约 0.6mm 的小裂纹存在,补焊区为正常的热处理组织,没有龟裂,补焊区与基体界面结合良好。

5 工厂和长期试车考核

叶尖补焊的高涡叶片参加了某发动机的工厂试车后,选出 2 片叶片挂片装于长试发动机随机参加了历时 300 余小时的长期试车考核。考核结束后对叶片进行了故检和着色检查,2 片高涡叶片的叶盆、叶背(补焊区和非补焊区)均出现了不同程度的裂纹,裂纹的数量和长度,都符合大修技术要求。为了解长期试车后叶片材料组织变化情况,对 1 片叶片叶背的裂纹补焊区位置附近进行了解剖断面金相检查,从金相检查结果看,补焊区有少量的富 Cr、Mo、W 的粒状相析出,补焊区和基体之间存在明显的扩散层,这是补焊材料和基体材料长期相互作用互扩散的结果,但界面仍为牢固的冶金结合。

结论

(1) 对于工作中产生叶尖裂纹故障的高压涡轮工作叶片,以高 W、Mo 含量的 Ni 基超合金作为填料,采用电火花预置填料与固体激光脉冲优化路径积分焊工艺方法进行修复。修复后的高压涡轮叶片经超声波对激光补焊区去除应力处理、恢复性能热处理、重涂涂层等工作后,通过了 300h(折合 1000 次冷、热循环)

的热冲击试验和长期试车考核,叶片激光焊修部位未出现超出大修故检要求的裂纹,符合叶片修理的故检标准,满足发动机工作要求。该项深度修理工艺已纳入修理技术要求并投入产生,使大量因叶尖裂纹超标报废的叶片恢复了使用功能。

(2) 叶片经长期工作后,冷气通道受气流冲刷影响而变大,使叶片水流量略有增加的趋势。大修中高压涡轮叶片水流量偏小的原因为叶片原始状态超差,新备件测量的结果也说明了这一点。大修中发现的水流量超差的叶片是经过工作寿命考核的,说明流量超差在一定范围内的叶片是可以满足发动机修理和使用要求的。目前在发动机修理中适当调整叶片水流量检查标准,经长期使用和发动机工作验证,该方法效果良好。

(3) 叶片伸长量主要是由于测量系统误差所致,目前在发动机修理中采用了对高涡叶片伸长量标准进行一定量的测量误差修正的方法,同时我们从外方引进了测具,统一了测量系统,消除测量误差,以保证发动机修理要求。该项措施有效地解决了叶片伸长量超差、报废量大的问题。

(4) 修理中叶片壁厚超差故障主要是由于壁厚测量系统不稳定、精度低所致,为提高叶片壁厚测量精确度,已开展了采用 X 光测量叶片壁厚的研究工作,提高叶片测量系统的稳定性,消除测量误差。

通过对某发动机修理中高压涡轮工作叶片故障与典型修理技术研究,提出制定了满足使用要求的技术要求和修理方法,使高压涡轮工作叶片报废率由大修工作前期的约 15%,降至目前的 4%。经生产应用和发动机外场长期工作验证,其效果良好,该项研究降低了发动机修理成本,提高了叶片工作的可靠性。

(责编 淡蓝)