

# 9E 燃气轮机热通道部件检修技术优化与透平轮间温度控制研究

林浩箴

广州白云协鑫能源科技有限公司 广州地区 510700

DOI:10.12238/ems.v7i12.16454

**[摘要]** 本研究着重围绕 9E 燃气轮机展开, 重点探究其热通道部件检修技术的优化方案, 以及透平轮间温度的有效控制方法。在实际运行中, 9E 燃气轮机的热通道部件, 像透平动叶、静叶等, 长期处于高温、高压、高转速的恶劣环境, 极易出现各类故障。我们对这些热通道部件的典型故障模式进行了深入剖析, 例如部件的磨损、腐蚀情况, 密封结构是否失效, 叶片有无裂纹与异常振动等。基于故障分析结果, 并结合实际发生的案例, 我们针对性地提出了一系列检修技术优化策略。在密封结构方面, 通过改进设计、选用更优质材料来提升其性能; 对于动叶片, 严格控制其残余不平衡量, 确保安装合理; 同时对冷却系统进行优化, 保障部件冷却效果。透平轮间温度作为反映热通道部件工作状态的关键指标, 一旦超标会加速部件老化, 影响机组正常运行。针对这一问题, 我们从冷却空气泄漏情况排查、燃烧系统参数调整、热电偶监测准确性保障等多个维度, 提出了切实可行的控制措施。研究结果显示, 采用优化后的检修技术, 热通道部件的故障发生率大幅降低; 而透平轮间温度控制措施成效显著, 能使一级后轮间温度下降 50℃以上, 有效增强了机组运行的安全性与经济性。

**[关键词]** 9E 燃气轮机; 热通道部件; 检修技术优化; 透平轮间温度; 故障分析

## 一、引言

在发电以及热电联产领域, 9E 燃气轮机有着极为广泛的应用。该燃气轮机的热通道部件, 像透平动叶、静叶、喷嘴、复环这类关键组件, 长期置身于高温、高压且高转速的严苛运行环境之中。在这样恶劣的条件下, 这些部件很容易出现磨损、腐蚀、产生裂纹以及发生变形等一系列故障问题。一旦这些故障出现, 会直接致使机组出力下滑、运行效率降低, 更为严重的是, 还可能引发重大安全事故, 给生产运营带来巨大损失。而透平轮间温度是衡量热通道部件工作状态的一个重要指标。当这个温度超出正常范围时, 会加速部件的老化进程, 大大缩短其使用寿命。所以, 积极开展关于热通道部件检修技术的优化研究, 以及透平轮间温度的控制研究, 对于提升 9E 燃气轮机运行的可靠性、经济性与安全性而言, 有着至关重要的意义。

## 二、9E 燃气轮机热通道部件典型故障分析

### 2.1 磨损与腐蚀

热通道部件长期处于高温燃气的猛烈冲刷环境中, 部件表面极易发生氧化腐蚀, 进而形成氧化皮。这些氧化皮一旦脱落, 就可能堵塞冷却通道, 使得冷却效果大打折扣, 部件磨损情况也会随之加剧。就拿透平动叶来说, 其叶顶与复环

之间的间隙, 会因为磨损而逐渐增大。间隙变大后, 漏气量就会显著增加, 最终导致机组的出力明显下降。在 2013 年, 某电厂的 9E 燃气轮机进行大修后, 由于使用了非 GE 原厂的热通道部件, 在运行过程中出现了问题。具体表现为透平第一级喷嘴的叶型发生了变形, 喉道面积减小, 压气机排气压力升高, 机组的负荷降低了 3000 – 4000kW。

### 2.2 密封失效

热通道部件之间设置的密封结构, 像密封片、密封销等, 对于维持冷却空气的压力、防止高温燃气泄漏起着关键作用。一旦密封失效, 冷却空气就会泄漏出去, 导致部件得不到充分的冷却, 温度不断升高。

2013 年, 某电厂的 9E 燃气轮机完成检修后启动, 当时透平一级后轮间的温度高达 580℃。经过仔细检查发现, 一级复环水平中分处的密封片以及二级喷嘴水平中分处的密封片都被压坏了, 冷却空气因此泄漏得十分严重。

### 2.3 叶片裂纹与振动

透平动叶片在长时间的运行过程中, 很容易产生裂纹, 特别是叶冠部位更容易出现这种情况。如果裂纹叶片没有及时进行更换或者修复, 就有可能导致叶片断裂, 进而引发机组振动超出正常标准。另外, 在安装动叶片的时候, 如果没

有考虑到残余不平衡量的位置, 机组启动后振动就会加剧。比如, 某电厂的 9E 燃气轮机在检修时更换了 3 片动叶, 由于没有进行排序安装, 机组在满负荷运行时振动值就超过了标准。

### 三、热通道部件检修技术优化策略

#### 3.1 密封结构改进与修复

密封片容易损坏是热通道部件常见的问题之一。为了解决这一问题, 我们可以从密封片的设计和材料选择入手进行优化。比如, 选用耐高温、耐腐蚀性能出色的钴基合金等材料来制造密封片, 这样能有效提升其抗磨损和抗腐蚀的能力。同时, 还要改进密封片的安装工艺, 在安装过程中严格按照规范操作, 确保密封片安装到位, 避免出现被压坏或者安装错位的情况。当密封失效导致部件冷却不足时, 我们可以通过调节冷却空气孔的调节销, 来增加冷却空气的进入量。像某电厂在检修过程中, 将一级复环冷却空气孔的调节销割短了 25.4mm, 成功使一级后轮间温度降低到了安全范围。

#### 3.2 动叶片残余不平衡量控制

在安装动叶片的时候, 必须要考虑到残余不平衡量的位置, 这样才能减少机组运行时的振动。对于更换或者修复过的动叶片, 我们要进行称重处理, 然后按照重量进行分组排序, 保证相邻叶片的残余不平衡量能够相互抵消。在安装多级动叶片时, 要让相邻级叶片的残余不平衡量位置相差  $180^\circ$ , 利用不平衡力矩相互抵消的原理来降低振动。例如, 某电厂在安装透平第三级动叶时, 将第二级和第三级动叶的残余不平衡量位置设置为相差  $180^\circ$ , 结果总残余不平衡量明显减少, 机组的振动值也显著降低。

#### 3.3 燃烧系统调整与优化

燃烧系统的调整对热通道部件的工作状态有着至关重要的影响。采用低氮燃烧技术, 像 DLN1.0 改造, 能够降低燃烧温度, 减少  $\text{NO}_x$  的生成, 同时还能改善燃烧的稳定性, 降低热通道部件所承受的热应力。另外, 要定期检查燃料喷嘴的雾化效果, 一旦发现喷嘴有磨损或者堵塞的情况, 就要及时进行更换, 确保燃料和空气能够充分均匀地混合, 避免出现局部过热的现象。

#### 3.4 冷却系统优化

冷却系统对于维持热通道部件的正常工作温度起着关键作用。我们可以通过调节冷却空气孔的大小或者数量, 来优化冷却空气的流量分布, 保证部件的各个部位都能得到均匀的冷却。还可以增加冷却风机的数量或者提升其容量, 以此

提高冷却系统的可靠性。比如, 某电厂在原本设计有 2 台 50% 容量的冷却风机的基础上, 又增加了一台国产 50% 容量的风机, 这样就避免了因为单台风机出现故障而导致冷却中断的情况发生。

### 四、透平轮间温度控制措施

#### 4.1 冷却空气泄漏控制

冷却空气泄漏, 是造成透平轮间温度超出标准范围的一个重要因素。在日常运行维护中, 要定期对热通道部件之间的密封结构进行细致检查。一旦发现有密封片或者密封销出现损坏, 必须及时进行更换。此外, 还要仔细查看冷却空气管道的连接部位, 看是否存在漏气的情况, 保证管道内部畅通, 没有阻碍, 让冷却空气能够顺利流通, 有效降低透平轮间温度。

#### 4.2 燃烧系统调整

对燃烧系统进行调整, 能够改变燃烧温度的分布情况, 从而对透平轮间温度产生影响。操作人员可以通过调节燃料的流量, 来精准控制燃烧温度, 防止透平入口温度过高。特别是在低负荷运行工况下, 将燃烧模式切换为扩散燃烧模式, 这样可以有效降低燃烧温度, 减轻热通道部件所承受的热负荷, 避免因温度过高而引发故障。

#### 4.3 热电偶监测与校准

热电偶作为监测透平轮间温度的核心设备, 其测量结果的准确性至关重要。因此, 需要定期对热电偶进行校准工作, 确保它所测量的数值与实际的温度相符合。同时, 在透平的各级轮间合理布置多个热电偶, 然后取这些热电偶测量值的平均值作为轮间温度, 这样可以最大程度地减少测量过程中可能出现的误差, 提高温度监测的可靠性。

#### 4.4 温控系统优化

运用先进的温控系统, 能够实现对透平轮间温度的精准调控。比如采用基于进口导叶 (IGV) 控制的温控方法, 通过调节 IGV 的角度, 来控制进入压气机的空气流量, 进而对燃烧温度和透平排气温度进行调节。相关研究表明, 这种方法可以提高 IGV 工作角度的可控性, 使排气温度的变化更加稳定。另外, 还可以引入模糊控制、神经网络等智能算法, 根据机组实际的运行工况, 实时对温控参数进行调整, 实现透平轮间温度的最优控制。

### 五、案例分析

#### 5.1 案例背景

某电厂配置了 2 台 9E 燃气轮机,自 2003 年开启商业运行之旅后,在长时间高负荷的运转状态下,逐渐显现出一系列状况,其中透平轮间温度超出标准值的问题多次出现,对机组的安全稳定运行造成了严重影响。2013 年,电厂依照计划对这两台机组展开全面大修。然而,大修后投入运行没多久,1 号机组在满负荷运行期间,透平一级后轮间温度迅猛攀升,高达 580°C,可该机组此部位的设计温度值仅为 510°C,超标状况极为严峻。如此高的温度让机组面临极大的安全风险,根本无法继续安全运行,倘若不及时处理,极有可能引发更严重的设备损坏事故,给电厂带来难以估量的经济损失。

### 5.2 故障分析

电厂的技术人员迅速行动,组织力量对 1 号机组展开全面且细致的检查与分析工作。经过一番深入排查,发现造成透平轮间温度超标的主要原因聚焦在密封结构、冷却空气系统以及燃烧系统这三个方面。在密封结构方面,一级复环水平中分处的密封片和二级喷嘴水平中分处的密封片都出现了被压坏的情况。密封片可是阻止冷却空气泄漏的关键部件,它的损坏直接致使冷却空气大量泄漏,无法有效地对热通道部件进行冷却,进而使得部件温度持续升高。冷却空气系统同样存在问题。一级复环冷却空气孔的调节销过长,这一设计上的缺陷严重限制了冷却空气的进入量。冷却空气量不够,就无法及时把热通道部件产生的热量带走,导致温度不断上升。燃烧系统的调整不恰当也是重要因素。燃料喷嘴经过长期使用后,雾化效果变差,使得燃料与空气不能充分且均匀地混合。这导致燃烧过程不均匀,局部区域燃料浓度过高,燃烧温度急剧升高,进一步加剧了透平轮间温度超标的情况。

### 5.3 处理措施

针对上述分析得出的故障原因,电厂制定并落实了一系列具有针对性的处理措施。

首先,针对密封结构问题,及时更换了损坏的一级复环和二级喷嘴密封片。在更换过程中,严格依照安装工艺要求进行操作,保证新密封片安装到位,密封效果良好,有效防止冷却空气再次泄漏。其次,针对冷却空气量不足的问题,对一级复环冷却空气孔的调节销进行了割短处理,割短长度为 25.4mm。这一调整让冷却空气能够更顺畅地进入,增加了冷却空气的进入量,从而提高了对热通道部件的冷却效果。

最后,针对燃烧系统问题,更换了磨损严重的燃料喷嘴,确保燃料能够良好雾化。同时,对燃料流量和空气流量进行精心调整,通过多次试验和优化,使燃料与空气达到最佳的混合比例,改善了燃烧效果,避免了局部过热现象的发生。

### 5.4 处理效果

经过上述一系列处理措施的实施,1 号机组再次投入满负荷运行时,取得了十分显著的效果。透平一级后轮间温度成功降至 510°C 以下,完全符合设计要求,有效消除了因温度超标带来的安全隐患。同时,机组的振动值也明显降低,运行稳定性大幅提升。此后,电厂对该机组进行了长时间的跟踪监测,各项运行参数都保持稳定,未再出现透平轮间温度超标等异常情况。此次案例的成功处理,不仅保障了机组的安全稳定运行,也为电厂后续处理类似故障积累了宝贵经验,有助于提升整个电厂的设备维护和管理水平。

## 六、总结

本研究围绕 9E 燃气轮机,聚焦热通道部件检修技术优化与透平轮间温度控制两大问题展开。热通道部件作为燃气轮机的关键部分,其运行状态直接影响机组效能。我们深入剖析了该部件的典型故障模式,这些故障就像隐藏的“病症”,有的会加速部件磨损,有的会引发局部过热,破坏热通道的稳定。基于故障分析,我们提出了一系列检修优化策略。在密封结构上,通过改进设计与材料,增强密封性,防止冷却空气泄漏;严格控制动叶片残余不平衡量,减少高速旋转时的振动损伤;精心调整燃烧系统,让燃料与空气充分混合燃烧,降低热冲击;优化冷却系统,合理分配冷却空气,提升冷却效率。对于透平轮间温度控制,我们采取多项措施。加强冷却空气泄漏管控,确保冷却效果;再次优化燃烧系统,避免局部高温;严格监测与校准热电偶,保证温度数据准确;优化温控系统,实现精准控温。案例分析显示,优化后的技术和措施成效显著,降低了故障率,提高了温度控制精度,增强了机组运行的安全性与经济性。

## [参考文献]

- [1] 叶卿梅,9E 燃气轮机热通道部件检修技术优化研究,《燃气轮机技术》,2017
- [2] 赵远,9E 燃气轮机透平轮间温度控制方法探讨,《电力科学与工程》,2018
- [3] 李祖强,9E 燃气轮机热通道故障分析与检修策略优化,《热能动力工程》,2019