

# 汽轮机末级叶片表面防水蚀处理工艺及发展

胡平

(广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510600)

**[摘要]** 针对国内某汽轮机厂生产的 135MW 机组汽轮机频频在投运后第 1 次检修时,即发现低压转子末级叶片进汽边侧存在多条裂纹的情况,介绍了汽轮机末级叶片的防水蚀表面处理工艺的种类及发展,总结了末级叶片的表面防护措施可分为局部加覆盖层和表面淬硬两大类。对各种处理工艺的特点、可靠性、防护层的性能要求、质量检查及测试方法进行了探讨,并根据今后大容量机组的特点,提出了叶片表面防护工艺的发展方向。

**[关键词]** 汽轮机;末级叶片;水蚀;表面处理

**[中图分类号]** TG178

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2008)06-0078-03

## Development of Anti-erosion Surface Treatments Used in Last Blades of Steam Turbine

HU Ping

(Guangdong Power Testing and Research Institute, Guangzhou 510600, China)

**[Abstract]** Based on cracks occurred on last blades of 135MW steam turbines in one-year operation time, anti-erosion surface treatments used in last blades of steam turbine were introduced. Protecting treatments in last blades of steam turbine included partial overlay and surface quenchhardening. The characteristic, reliability, performance requirements and testing methods of protecting coatings were discussed. The development trend of protecting treatments was put forward as well.

**[Key words]** Steam turbine; Last blade; Erosion; Surface treatment

### 0 引言

近两年来,国内某汽轮机厂生产的 135MW 机组汽轮机频频在投运后第 1 次检修时,经表面探伤即发现低压转子末级叶片进汽边侧存在裂纹,每台机组有裂纹叶片达到数十片,单个叶片的裂纹数量从 1 条到 20 多条不等,如图 1 所示。为消除安全隐患,均将低压转子运回制造厂家进行更换叶片处理,这给业主方带来了极大的经济损失并延误工期。据厂家资料介绍,此类型机组末级叶片进汽边采用了高频淬火强化工艺以防止叶片水蚀,由于同类型机组连续发生类似问题,由裂纹出现的部位判断

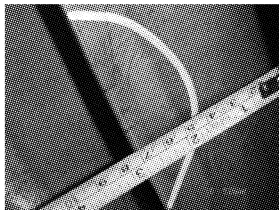


图 1 135MW 机组低压转子末级叶片进汽边侧裂纹

Figure 1 Cracks occurred on last blade of 135MW steam turbine

应是高频淬火工艺的某个环节控制不当引起的。这引起了我们对目前的汽轮机末级叶片防水蚀表面处理工艺可靠性的关注。

### 1 汽轮机末级叶片的水蚀

汽轮机低压部分叶片工作在含有水滴的湿蒸汽中,在水滴的作用下叶片产生水蚀,特别是低压末级叶片,由于蒸汽湿度大,且圆周速度又高,使叶片极易遭到水蚀。一般情况下,叶片发生水蚀的区域为顶部进汽边和根部出汽边,叶片的水蚀会导致叶片出现蜂窝状组织,严重者使叶片进出汽边缘呈现锯齿状,形成很多细小的裂纹。这些部位很容易产生应力集中,抗疲劳强度降低,水蚀发展到一定程度还会改变叶片的振动特性,导致机组发生强烈振动等恶性事故,而且可使级效率下降。按照西屋公司的资料,该公司生产的 393 台汽轮机发生过叶片腐蚀断裂事故。据德国所做的统计,在 35 起低压缸叶片损伤事故中有 13 起主要是由于水蚀引起的<sup>[1]</sup>。

解决汽轮机末级叶片的水蚀问题,一般从以下 2 个方面考虑:

1) 研究进入汽轮机低压部分的湿蒸汽中水滴形成的物理过程,从设计上改进静叶和动叶的型线,以减少水滴的形成或尽量减小水滴的几何尺寸;或采用去湿隔板,以降低蒸汽的湿度,假如进入汽轮机低压区的蒸汽中没有水滴,末级叶片的水蚀就不会发生了,但这在实际是不可能的。

**[收稿日期]** 2008-07-04

**[作者简介]** 胡平(1973-),女,安徽郎溪人,高工,博士,从事电厂金属监督及理化检验方面的工作。

2) 采取消极的防护措施,以减缓末级叶片的水蚀速度,这是目前世界上各大汽轮机制造厂商普遍采用的办法。

## 2 末级叶片的表面防护

末级叶片的表面防护措施可分2大类:第1类是局部加覆盖层,即在进汽边的局部位置覆盖一层新合金,如镶置司太立合金、电火花强化、激光熔覆和喷涂等;第2类是表面淬硬,主要技术手段有火焰淬火强化、高频感应加热淬火、激光表面淬火等。

### 2.1 镶置司太立合金片

在叶片进汽边镶置司太立合金片是目前防止汽轮机叶片水蚀冲刷最普遍采用的方法。司太立合金在21世纪初为美国人Elwood Haynes所发明, Haynes把Stellite作为商标,我国则把它译成司太立,定义为钴铬钨三元合金。司太立合金,特别是轧制和压型的整条合金,具有较高的硬度和较好的韧性,水滴撞击时变形量小,抗水蚀冲刷性能好,具有较高的组织稳定性,尽管超过一定范围也会出现水蚀,但抵制断裂能力好,即使出现严重的水蚀,也不易产生裂纹。同时根据运行情况可选择不同形状的合金,当水蚀严重时,可以更换新的合金片,非常适合叶片的工作条件。

早期机组叶片上的司太立合金为矩形片状,仅敷焊在叶片背弧一侧预先加工好的平面上,这种结构不能保证叶片本身的型线,增加叶片入口边缘的冲击损失而且防水蚀效果也不是很好。此外,在湿蒸汽中的微小水滴冲刷下,相邻两片司太立合金片的接缝处会产生应力腐蚀,导致叶片沿司太立合金片间隙处产生横向裂纹。由于上述结构的司太立合金存在诸多缺点,因此目前采用较为普遍的为“丁”型司太立合金片。

镶置司太立合金片的方法主要有高频钎焊司太立短条合金片、氩弧焊短片或长片司太立合金片,以及电子束焊等。钎焊方法具有叶片基材不熔化、温度低、焊接热规范容易控制、叶片变形小等优点,唯一的问题是钎焊强度和钎焊质量不能保证,容易出现合金片脱落。尤其在现场进行司太立合金钎焊工作时,只能选择简单易行的加热源,即氧-乙炔火焰手工加热,这时需进行钎焊温度控制,通常是有选择地对焊接材料进行加热处理,以缓解不同材料焊接时热膨胀差过大的问题,而使接头部分内部残余应力控制在许可范围内。

### 2.2 电火花强化

电火花强化是直接利用火花放电的高密度能量将作为正极的电极材料熔化、涂覆、熔渗进金属工件的表层,形成合金化的表面强化层,从而使工件表面的物理、化学和机械性能得到改善。电火花表面强化工艺具有以下特点:操作简单,不会使工件退火或热变形,强化层与基体的结合为冶金结合,非常牢固,不会产生有毒气体、液体等污染环境,可对工件表面进行局部强化等。一般的研究结果表明,采用硬质合金作强化电极进行电火花强化,在材料表面形成一层一定厚度的硬化层,这层硬化层的硬度较高,耐磨粒磨损、耐水刷能力较强,能较好地保护材料不受损害。硬化层厚度越厚及硬度越高,耐磨粒磨损、耐水刷能力越强。所以,为得到较好的耐水刷硬化层,必须采用硬质合金作电极,用合适的工艺得到一定厚度的高硬度硬化层。但硬化层不能太厚,否则容易产生表面裂纹,从而影响防水蚀效果。

强化层的表面性能在很大程度上取决于所使用的电极材料,国内汽轮机厂使用的硬质电极材料多为YT15(钨钴钛合金),也有的用YG8(WC-W硬质合金),后者虽硬度略低,但强化层均匀、连续,机械和物理性能反而优于前者<sup>[2]</sup>。

### 2.3 热喷涂

热喷涂是指将熔融状态的喷涂材料通过高速气流将其雾化,喷射到工件上形成喷涂层的一种表面加工方法,主要分为火焰喷涂、超音速火焰喷涂、等离子喷涂、电弧喷涂及高速电弧喷涂等。

热喷涂技术在航空航天、化工、机械等行业已得到广泛应用,就电力行业而言,热喷涂技术的应用在几年内已显示出蓬勃发展的势头,并已从传统的火焰喷涂、电弧喷涂转向先进的超音速火焰喷涂和高速电弧喷涂技术。近年来,随着超音速电弧喷涂技术的迅速发展,涂层的硬度和结合强度更高,特别是涂层的孔隙率更低(<2%),氧化物含量更低。采用超音速电弧喷涂与堆焊联合使用,在叶片表面生成一层与基体结合牢固的抗磨耐蚀防护涂层,可获得较好的防护效果。

文献[3]中阐述了在清河发电厂4号机(100MW)的两列末级叶片上实施喷涂的效果,由于进汽边司太立合金片已水蚀掉约30%,故对末级叶片的进汽边及出汽边同时进行了喷涂。经过4年的运行考验,电弧喷涂涂层完好如初,出汽边涂层与叶片、进汽边涂层与司太立合金都结合得很好,表面硬度依旧。

### 2.4 激光熔覆

激光表面熔覆是将具有某种特性(耐磨、耐热、耐蚀等)的合金预制粉末涂覆于金属工件表面,或在激光处理的同时喷于激光处理区,使之在激光作用下熔化、扩展并凝固,与基体以冶金方式结合,形成性能优良的表面包覆层。

作为一种新的局部加覆盖层的方法,激光熔覆体现出较为明显的优越性。在进汽边的局部位置用激光产生一层新合金的方法具有可实现自动化控制,可按不同要求调节合金成分以及不存在结合面剥离问题等特点。所以可以替代目前的钎焊司太立合金片、热喷涂、堆焊等表面处理技术,适合于中大功率机组各种材料叶片的水蚀防护。

文献[4]中对2Cr13马氏体不锈钢叶片进行激光熔覆处理,综合考虑合金的工艺性能与抗水蚀性能,选用钴基自熔合金粉末作为熔覆用粉。通过准确设计激光加工设备,优化加工工序及激光熔覆工艺参数,在叶片进汽边获得了一定厚度、与叶片型线吻合且均匀平整的熔覆层,并克服了热影响区的影响,处理的叶片经过探伤、变形检查及静频测定均符合验收标准,已装机运行,这证明了激光熔覆技术的可行性。但科学地确定叶片激光熔覆的技术要求,减小激光熔覆合金层的稀释度,有效地控制叶片热变形和防止裂纹产生仍是叶片激光熔覆技术中有待深入研究的问题。通过进一步工作,激光熔覆技术可望在叶片生产上推广应用,并取得显著的经济与社会效益。

### 2.5 表面淬硬

#### 2.5.1 火焰淬火强化

火焰淬火强化是在叶片进汽边用乙炔-氧或煤气-氧的混合气体燃烧的高温火焰加热淬火,以获得高硬度马氏体组织和淬硬层。该方法工艺较简单,但温度不易控制,易产生变形、裂纹和硬度不均匀等问题,目前已应用较少,主要采用的是高频淬火

及局部激光表面淬火强化。

### 2.5.2 高频淬火强化

高频淬火是利用电磁感应方法在工件表面产生高频率的感应电流(即涡流),依靠这种电流和工件本身的电阻,使工件表面迅速加热到淬火温度,而心部温度仍接近室温,然后立即喷水冷却,使工件表面淬硬。此方法便于机械化和自动化,适用于大批量生产。目前国内几大汽轮机制造厂生产的不同类型机组都有采用高频淬火的末级叶片。

由于叶片一般是三维空间扭曲成型,型线复杂,高频淬火加热时不易保证淬火部位受热均匀。因此在操作时影响叶片高频感应淬硬的因素较多,主要有:高频设备控温的灵敏度、叶片装夹位置的偏差及叶型的偏差、感应线圈适应性、测温仪和测温点选择及各类工艺参数(淬火温度、回火温度、电流/电压参数、机床运行速度、叶片与感应线圈的间隙、感应线圈包覆宽度)等,必须按叶片的实际情况通过试验确定。在实际操作中若某个因素控制不恰当,即有可能出现工艺的不稳定,因此必须针对每一种叶型设计专用工装、感应线圈,同类型叶片淬火时装夹位置须一致,操作要方便,以保证良好的重复性。

### 2.5.3 局部激光表面淬火

当激光束扫描经过黑化处理涂有吸能材料的金属表面时,激光束能量被吸收到金属材料表层内,使温度达到相变点以上,当激光束快速从金属表面移开时,热量由表面迅速传至芯部,使表面得到快速冷却,从而使金属表层发生快速淬火,引起相变硬化。由于高的冷却速度产生高密度位错强化,相同的材料经过激光表面淬火处理后,硬度要比感应淬火硬度高 20%,变形很小,晶粒也要细得多。该方法适合于马氏体不锈钢叶片材料,如 2Cr13、1Cr13、2Cr12MoV、AISI403 等,其硬化深度范围为 0.1~2.5mm<sup>[5]</sup>。

## 3 防护层性能要求及测试方法

### 3.1 质量检查

1) 外观检查 对强化区域进行外观检查,不应有裂纹、灼伤、局部熔化等不符合要求的缺陷。

2) 表面探伤检查 对强化区、热影响区(或过渡区)进行表面探伤,不应有裂纹等不符合要求的缺陷显示。

### 3.2 硬度检测

可采用表面硬度测定(如硬度划针)或制成金相试样测试横截面的硬度分布,表面硬度应足够高,且硬度分布均匀,热影响区(或过渡区)不应有明显的硬度降低区。

### 3.3 强度测试

叶片防水蚀,除要求保护层具有一定的硬度和厚度外,还必须具有足够的结合强度,尤其对于局部加覆盖层的防护方法,如镶置司太立合金片等,结合强度更为重要。防护层的结合强度可通过拉伸、弯曲等试验测出。另外,疲劳强度也是汽轮机叶片安全运行的一项重要指标,叶片经处理后的疲劳极限应不低于原材料的疲劳极限。

### 3.4 频率测试

汽轮机叶片固有振动频率(静态频率)是汽轮机运行质量

的重要参数,叶片经防水蚀表面处理后其静态频率应基本不受影响,以满足叶片振动特性能够达到长期安全运行的要求。

## 4 水蚀防护工艺的发展方向

随着单机容量的不断提高,1997 年后发展的特大型长叶片,钢叶片的最大圆周速度已提高到 650m/s 以上,叶片的应力水平更高,镶硬质合金、高频淬硬、火焰淬硬等传统提高叶片抗水蚀能力的技术都伴随着牺牲叶片部分疲劳强度性能。激光表面强化技术在提高抗水蚀能力的同时,能保持材料的韧性不变,而且处理后的叶片的表面应力状况及疲劳强度、抗应力腐蚀能力还有所提高。与其它方法相比,激光强化工艺有如下特点:1)加热冷却迅速,组织高度细化;2)热影响区小,变形小;3)通用性强,可以实现形状复杂的零件的局部表面处理;4)操作简单,自动化程度高,无污染,安全可靠,但相对设备投入较大。激光具有良好的距离能量传输性能,激光器不一定要靠近工件,更适用于自动化控制的高效流水线生产,因而是今后大容量机组叶片防水蚀工艺的主要发展方向。

电子束表面处理技术也是用于汽轮机叶片防水蚀的新的工艺方法。该方法具有功率密度高,控制灵活,重复性好,能够精确控制表面温度和穿透湿度等特点,同时是在真空条件下进行,对金属保护特别好,可以获得较高的结合力和性能,这是包覆涂层、离子注入、沉积等方法难以达到的。随着研究的深入和工艺的成熟,将会在汽轮机防水蚀、防磨损,燃汽轮机耐高温、防腐蚀以及零部件修复等方面得到推广使用。

### [参 考 文 献]

- [1] 文黎. 汽轮机末级叶片镶嵌司太立合金片提高耐腐蚀性的探讨[J]. 天津电力技术, 2006, (2): 38-39, 45
- [2] 王玉珊. 汽轮机叶片表面电火花强化工艺的研究[J]. 江苏机械制造与自动化, 1996, (1): 16-19
- [3] 郭玉双, 夏永军, 赵宝珠, 等. 对汽轮机末级叶片实施防水蚀保护的实践体会[J]. 发电设备, 2004, 18(3): 149-151
- [4] 朱蓓蒂, 曾晓雁, 胡项, 等. 汽轮机末级叶片的激光熔覆研究[J]. 中国激光, 1994, 21(6): 526-529
- [5] 姚建华, 赖海明. 汽轮机末级叶片的激光强化技术[J]. 热力透平, 2006, 35(1): 58-61

专利名称: 一种等离子体增强非平衡磁控溅射方法

专利申请号: 01116734.3 公开号: 1338530

申请人: 大连理工大学

地址: 116024 辽宁省大连市凌工路 2 号

本发明属于材料表面改性技术领域, 特别涉及到磁控溅射沉积技术。该技术通过两个相对放置的 ECR 放电腔磁场线圈产生的磁场和平衡磁控靶磁场在沉积室叠加形成会切场磁场位型, 该磁场位型有效地约束 ECR 放电和平衡磁控靶放电产生的等离子体, 在薄膜生长表面形成高密度的离子、激活基团, 通过控制基片位置、溅射偏压、沉积偏压等工艺参数, 可调节各种反应基团的到达比及能量, 从而得到符合化学配比的高纯度化合物薄膜。