

纳米电刷镀技术在发动机叶片再制造中的应用

Nano Brush Electroplating Technology Application in Remanufacturing of Engine Blades

成都航利集团 黄选民 赵云强 杜宇 侯廷红 李本事

[摘要] 某型发动机高压压气机整流叶片,材料为镍基高温合金。服役过程中因叶片榫头两侧与机匣榫槽发生微动磨损,尺寸减小,导致叶片停用。通过采用现代纳米电刷镀方法,对报废叶片进行再制造,使叶片重新满足使用要求。

关键词: 发动机 高压整流 电刷镀 再制造

[ABSTRACT] One type engine's high-pressure-compress-communication-blade is made of nickel-based superalloy. During service, retting wear was happened in both side of the blade's rabbet and mortise which located in cartridge receiver. The retting wear result in the blade's size reduces and out of work. By using modern brush plate method, the rejected blades canbe remanufactured to meet the requirements of reusing.

Keywords: Engine High-pressure communication Brush-plate Remanufacture

某型发动机高压压气机整流叶片共十级。包括进口整流叶片、第一至八级整流叶片、高压压气机出口整流叶片。进口整流叶片为双支点支撑;而第一至八级整流叶片、高压压气机出口整流叶片为悬臂式支撑。进口整流叶片、第一级和第二级整流叶片为可变弯度叶片,可根据 n_{2np} 换算转速进行协调转动;高压压气机出口整流叶片由两排叶片组成,焊接在外环上。外环和叶片的材料为镍基高温合金,工作温度范围 164 ~ 496℃,叶片工作最大压力 3.65MPa。

第三到八级整流叶片设计规定,叶片与压气机机匣榫槽的配合为“间隙 0.01mm,过盈 0.01mm”,服役过程中因榫头两侧与机匣榫槽发生微动磨损,尺寸减小,导致叶片停用。如能采用现代方法,对报废叶片进行再制造,使叶片重新满足使用要求,不仅能突破俄方技术封锁,解决型号任务的急需,而且同替换新件相比成本更低(一般只有新件制造成本的 15%),符合国家节能减排和保障部队作战训练需求的发展方向。因此,开展某型发动机高压压气机整流叶片榫头再制造技术工艺的研究势在必行。

1 研究内容

1.1 失效分析

微动磨损是发生在相对静止的机件上,因两个接触表面之间没有宏观相对运动,但在外界变动载荷的影响下却有小振幅的相对振动^[1]。某型发动机高压压气机第 3 至 8 级整流叶片(每台共 648 片,每级叶片数量分布如表 1 所示)在服役过程中,因采用悬臂式支撑,叶片在气流载荷的作用下,叶片榫头与榫槽之间发生了小振幅振动和滑移,最终导致零件产生微动磨损(如图 1、图 2 所示)。微动磨损使叶片与榫槽配合精度下降,变松,使零件不符合装配要求。发动机大修时,微动磨损故障

表1 高压压气机静子第3至8级整流叶片分布表

级数	第3级	第4级	第5级	第6级	第7级	第8级
片数	84	96	100	108	128	132

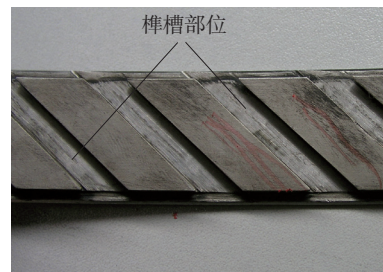


图1 机匣榫槽部位

Fig.1 Cartridge mortise position

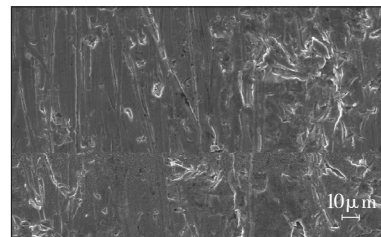


图2 叶片榫头微动磨损后形貌

Fig.2 Microstructure of vane rabbet fretting wear

发生率约 5%，如果按年修理发动机 50 台计算，每年需再制造的叶片约 1600 片，总价值达 800 多万元。

1.2 现状分析

我国现行工艺为先镀镍、镀铬、热喷涂，再磨削、精加工等多道工序才能完成。镀铬工艺环境污染大，成本高，效率低，易对基体产生氢脆；热喷涂技术制备涂层硬度高、结合强，但设备投资成本高、操作难度大、工序麻烦^[2]。

纳米颗粒复合电刷镀技术是近年发展起来的高新技术。纳米复合刷镀液中分散有近 90% 数量的固体颗粒，镀层相对耐磨性为普通电刷镀镍层的 2.1 倍以上，对原基材而言有强化作用。同时，镀层结合强度增加，镀层孔隙率降低，镀层微观结构更加致密，镀层强度、耐磨性、耐温性等综合性能显著增加。因此结合发动机叶片结构和损伤特点，开发以纳米电刷镀为主导的发动机叶片再制造技术并实现工程化应用，对于完善我国发动机再制造体系，提高航空装备保障能力，延长使用寿命和降低使用成本都具有积极的推动作用。

1.3 工艺流程设计

通过实验，结合零件实际特点，设计专用夹具，并在工艺中增加了特殊镍打底层（1~4 μm 的镍），以增加镀层结合强度，优化工艺如下：
丙酮除油→干燥→非镀面绝缘→水砂纸打磨→去油污除油→自来水清洗→电刷镀特殊镍→电刷镀纳米镍→自来水清洗→去绝缘保护漆→除氢。

工艺参数^[3]如下所示：

- 电刷镀特殊镍电压：18V 冲击镀 5S，12V 镀 60S；
- 电刷镀（纳米）电压：（5~12）V；
- 相对速度：（6~10）m/min；
- 镀液温度：室温 45℃。

1.4 叶片再制造后性能检测

针对叶片的实际使用情况和恢复尺寸的厚度，纳米

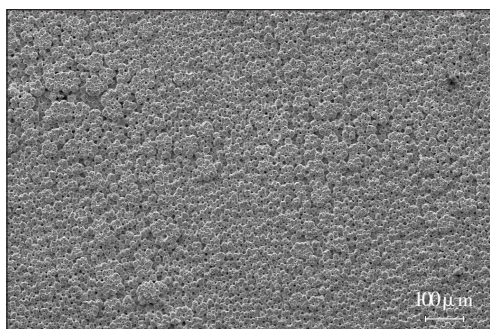


图3 纳米三氧化二铝镀液电刷镀后形貌
Fig.3 Microstructure of plating with Nano- Al_2O_3

电刷镀层选择镍包纳米三氧化二铝（如图 3 所示）和镍包纳米二氧化硅，普通刷镀选择刷镀快镍，分别对 3 种工艺进行性能测试。

1.4.1 结合强度测试

镀层结合强度按 GB 5270 选用机械剪切和冷热循环进行试验，机械剪切是在试片上加工完镀层后进行，不应有镀层的剥落。冷热循环试验：300℃保温 15min——室温水淬 5 次。试验以 GH2150 为试片，按照上述工艺加工 3 种镀层进行检测，结果 3 种镀层未见脱落，结合强度均合格。

1.4.2 硬度测试

镀层硬度采用显微硬度计检测，载荷为 50g。以 GH2150 为试片，检测以 5 个点的平均值作为镀层硬度，结果如表 2 所示。

表2 3种镀层的硬度检测结果

镀层类型	材料牌号	硬度 HV					硬度平均值
		1	2	3	4	5	
镍包纳米三氧化二铝	n- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$	528.6	539	528.4	533.9	531.9	632.36
镍包纳米二氧化硅	n- SiO_2/Ni	596.3	587.4	552.0	562.3	570.9	570.6
快速镍刷镀	Ni	492.6	391.3	383.9	388.3	469.9	425.2

1.4.3 再制造过程对基体渗氢量测试

以 GH2150 为试片，分别按相同的工艺加工，氢含量测试结果见表 3。

表3 再制造过程对基体渗氢量对比表

电刷镀层类别	镀层组成	基体渗氢量 / 10^{-6}
镍包纳米三氧化二铝	n- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$	17.60
镍包纳米二氧化硅	n- SiO_2/Ni	19.85
快速镍刷镀	Ni	33.60

1.4.4 镀层摩擦磨损性能评价

刷镀层磨损损失重测试结果见表 4、表 5。以快速镍刷镀层的相对耐磨性为 1.0，分析几种复合刷镀层的相对耐磨性能，结果见表 4 所示。

表4 刷镀层磨损损失重测试结果

电刷镀层类别	镀层组成	试验记录 ($M_0 - M_1$) / mg			$\Delta M/\text{mg}$
快速镍刷镀	Ni	55.6	54.2	56.7	55.5
镍包纳米二氧化硅	n- SiO_2/Ni	21.3	21.8	23.2	22.1
镍包纳米三氧化二铝	n- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$	26.3	24.8	24.1	25.2

表5 几种纳米颗粒复合刷镀层的相对耐磨性

电刷镀层类别	镀层组成	相对耐磨性
镍包纳米三氧化二铝	n-Al ₂ O ₃ /Ni	2.5
镍包纳米二氧化硅	n-SiO ₂ /Ni	2.2
快速镍刷镀	Ni	1.0

1.4.5 镀层的抗接触疲劳性能评价

镀层的抗接触疲劳性能评价如表6所示。

表6 不同载荷下几种刷镀层(镀态)的接触疲劳寿命

刷镀层种类	载荷 /N	接触疲劳寿命试验数据 /10 ⁵ 次					统计处理结果
							特征寿命 /10 ⁵ 次
n-SiO ₂ /Ni	60	4.536	8.064	13.356	17.640	18.396	14.77
	140	3.163	5.837	8.236	18.650	24.622	12.36
n-Al ₂ O ₃ /Ni	60	2.604	2.688	12.60	22.90	44.512	19.80
	140	0.840	1.260	10.248	11.676	30.240	11.94
快速镍刷镀	60	1.848	2.604	5.376	13.104	15.288	9.14
	140	1.032	4.040	5.140	10.625	13.420	8.04

1.4.6 镀层的接触疲劳寿命性能评价

镀层的接触疲劳寿命性能评价如表7所示。

表7 热处理后几种刷镀层的接触疲劳寿命(载荷为140N)

刷镀层种类	接触疲劳寿命试验数据 /10 ⁵ 次					统计处理结果
						特征寿命 /10 ⁵ 次
n-SiO ₂ /Ni	1.772	3.444	4.452	13.356	35.164	13.27
n-Al ₂ O ₃ /Ni	2.115	3.653	4.332	14.18	32.47	12.56
快速镍刷镀	1.092	1.764	2.688	2.772	3.696	2.84

综合镀层结合强度、硬度、渗氢量、磨擦磨损性能以及接触疲劳寿命的检测结果,采用纳米电刷技术制备的以特殊镍作为底层,镍包纳米三氧化二铝、镍包纳米二氧化硅作为面层的纳米颗粒复合镀层,在保证镀层与基体结合强度的同时大幅提高了镀层的硬度,这将使镀层的耐磨性得到提升,同时降低了刷镀过程中渗氢对基体材料造成的氢脆危害。

2 结束语

与普通镀层相比,含有纳米颗粒的复合电刷镀镀层

硬度显著提高,渗氢量大幅降低,可以用于再制造某型发动机高压压气机整流叶片。

采用纳米颗粒电刷镀技术再制造的某型发动机高压压气机整流叶片在发动机上通过了300h长期试车考核,电刷镀层无磨损和脱落现象,镀层结合力良好,满足使用要求。通过技术验证、考核与批量应用,再制造叶片性能优于原设计要求,使用寿命由再制造前的300~500h延长至再制造后至少1000h。

该技术在某型发动机高压压气机整流叶片榫头再制造中的成功应用,解决了引进装备关键零部件再制造的难题,具有重大军事效益。同时该项目的成果可在其他机型发动机上应用,具有广阔的推广应用前景。

参考文献

- [1] 周仲荣. 微动磨损. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 梁志杰. 刷镀技术实用指南. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [3] 徐滨仕. MS-100 纳米电刷镀设备工艺指导书. 北京: 装甲兵工程学院, 2000.

(责编 泰山)

(上接第77页)

间明显减少(23h)。因此,不管是从任务的分配角度还是从设备的利用率来说,此次调度结果都比较理想。

5 结束语

从车间生产的实际情况出发,提出了自动调度与人工调度相结合的双重调度机制。该调度机制能够在基于算法的优化结果之上,通过人工经验对制造资源的加工能力进行分析,并采用统筹学方法对调度结果进行二次优化。最后,通过实例验证了这种机制的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 刘民,吴澄. 制造过程智能优化调度算法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2008:291-304.
- [2] 魏从刚,何卫平,张英,等. 非连续生产的车间作业计划方法研究. 机床与液压, 2006(9):25-28.
- [3] 董蓉. 面向MES的计划调度研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [4] 施杰池. 基于MES的车间作业调度系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [5] 吴秀丽. 柔性作业车间动态调度问题研究. 系统仿真学报, 2008, 20(14):3 828-3 829.
- [6] 毛宁,刘霞,林洁瑜. 关于M类机器的非流水复杂作业排序问题的一种启发式算法. 工程数学学报, 1996, 13(2):65-72.

(责编 小颖)