

封严环配合止口等离子喷涂再制造工艺

王洪明

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

摘要: 针对航空发动机大修过程中发现的封严环与低压涡轮第 1 级盘配合止口严重磨损问题, 对封严环基体 GH38 合金等离子喷涂镍铬铁钼涂层后进行外观检查, 开展弯曲性能检查、金相组织检查和拉伸结合强度检查试验, 并对封严环基体最大去除量进行强度分析、封严环再制造工艺方法分析和封严环再制造零件几何参数对比分析, 对修复合格的封严环进行长试试车考核验证。结果表明: 修复后的封严环配合止口直径、跳动、粗糙度、同心度符合设计要求, 不平衡量符合设计要求, 试车后在封严环配合止口处镍铬铁钼涂层无脱落、无掉块, 涂层状态及检查结果均完好; 封严环采用等离子喷涂镍铬铁钼涂层修复配合止口喷涂工艺稳定; 封严环配合止口车削加工参数选择正确; 加工工艺方法稳定。

关键词: 封严环; 再制造; 配合止口; 等离子喷涂; 长试试车; 车削加工; 航空发动机

中图分类号: V263.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.05.022

Remanufacturing Process of Sealing Ring Rabbet by Plasma Spraying

WANG Hong-ming

(AECC Shenyang Liming Aero-engine Co., Ltd, Shenyang 110043, China)

Abstract: To solve the problem of serious wear of the mating surface between the sealing ring rabbet and the first-stage disk of the low-pressure turbine found during the overhaul of the aeroengine, visual inspection was conducted after applying plasma spraying Ni-Cr-Fe-Mo coating on the sealing ring base made of GH38 alloy. Bending performance inspection test, metallographic structure inspection and bonding strength tensile test were carried out, and strength analysis for the maximum removal amount of sealing ring, sealing ring remanufacturing process analysis and geometric parameter comparison analysis of sealing ring remanufacturing parts were conducted. A endurance test was carried out to verify the repaired sealing ring. The results show that the diameter, runout, roughness and concentricity of the repaired sealing ring rabbet satisfy the design requirements, and the unbalance meets the design requirements. After the test, the Ni-Cr-Fe-Mo coating of the sealing ring rabbet was in good condition, exhibited no spalling and falling off, and all inspection results passed. The repairing process of plasma spraying Ni-Cr-Fe-Mo coating is stable, the turning process parameters of sealing ring mating rabbet are correctly selected, and the process method is stable.

Key words: sealing ring; remanufacturing; mating rabbet; plasma spraying; long-period test; turning; aeroengine

0 引言

低压涡轮转子是航空发动机的 4 大核心转子之一, 封严环是低压涡轮转子的的重要组成部分^[1], 位于低压涡轮第 1、2 级盘之间, 与低压涡轮第 2 级盘通过配合止口定位, 与第 1 级盘采用定位销子周向定位, 起到封严的作用。在航空发动机大修过程中发现, 封严环与低压涡轮第 1 级盘配合止口磨损较为严重, 二者之间的缝隙变大, 封严环的活动量也随之增大, 使

航空发动机的整体振动趋于恶化^[2-4], 影响其使用寿命和工作效率^[5-7]。若更换封严环新品, 其配件制造周期长、成本高, 亟需开展封严环再制造技术研究。

封严环再制造主要采用等离子热喷涂技术, 通过在磨损表面喷涂涂层修复磨损尺寸, 从而延长零件使用寿命。等离子热喷涂技术广泛应用于零件表面修复^[8], 经验成熟, 且已建立表面修复技术体系^[9-10]。等离子热喷涂技术的应用, 在保证飞机和发动机翻修等方面起到了重要作用^[11-12]。范吉明等^[13]系统地研究了

收稿日期: 2020-04-21 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 王洪明 (1987), 男, 硕士, 工程师, 从事航空发动机修理装配、整机排故工作; E-mail: 375416007@qq.com。

引用格式: 王洪明. 封严环配合止口等离子喷涂再制造工艺[J]. 航空发动机, 2022, 48(5): 180-184. WANG Hongming. Remanufacturing process of sealing ring rabbet by plasma spraying[J]. Aeroengine, 2022, 48(5): 180-184.

等离子热喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层以及在表面修复中的具体应用;程林等^[4]分析了不同等离子热喷涂制度对GH4169合金涂层力学性能的影响。但是,GH38合金基材上等离子热喷涂镍铬铁钼涂层及涂层修复技术尚未发现相关报道。

本文针对航空发动机封严环与低压涡轮第1级盘配合止口尺寸磨损进行了等离子喷涂再制造修复,形成了稳定的等离子喷涂镍铬铁钼涂层修复配合止口喷涂工艺、封严环配合止口车削加工工艺。

1 封严环再制造总体方案制定

封严环的壁厚约为5 mm,直径约为500 mm,属于薄壁件。在发动机工作过程中的振动使封严环与低压涡轮第1级盘配合止口发生碰磨,使用1000 h后,封严环与低压涡轮第1级盘配合止口磨损严重,表面质量较差,需要把二者修理光滑,采用等离子热喷涂的方法喷涂镍铬铁钼材料增材,并采用精车削的方法对镍铬铁钼涂层进行车削,保证封严环配合止口尺寸满足与低压涡轮第1级盘配合要求。主要工艺路线如下:

集件→封严环配合止口车削→配合止口等离子热喷涂镍铬铁钼涂层→封严环配合止口涂层车削。

2 封严环配合止口再制造可行性分析

封严环的基材材质为GH38合金,对等离子热喷涂镍铬铁钼涂层进行增材,为确定镍铬铁钼涂层在GH38合金基材上的等离子热喷涂工艺的稳定性,在试片上进行等离子人工喷涂试验(喷涂参数见表1),包括喷涂涂层后外观检查、弯曲性能检查、金相组织检查及喷涂涂层后拉伸结合强度检查等工艺试验,进而确定封严环止口等离子喷涂镍铬铁钼涂层参数,以保证封严环配合止口再制造的可行性。

2.1 喷涂涂层后外观检查

喷涂涂层后的弯曲性能检查、金相组织检查、拉伸结合强度检查试验均进行4组,对喷涂的4组试片(如图1所示)进行外观检查。从图中可见,喷涂镍铬铁钼涂层后外观呈均匀的灰色,表面平整、均匀,喷涂

涂层与GH38合金基体之间无裂纹或翘起,涂层无剥落、掉块等现象,符合企业标准要求,喷涂涂层后外观检查合格。



图1 喷涂试片

2.2 喷涂涂层弯曲性能检查

喷涂涂层弯曲性能检查试验共进行4组,每组有3片试件。每片试件等离子热喷涂镍铬铁钼涂层后,将试样弯曲大于 170° (如图2所示)后检查喷涂涂层质量,外观无剥落,无裂纹,符合企业标准要求,喷涂涂层弯曲性能检查合格。

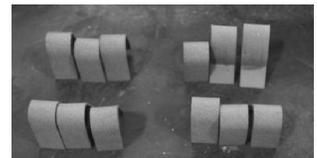
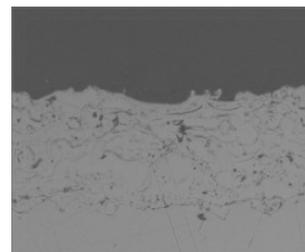


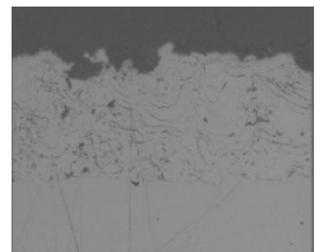
图2 GH38合金弯曲试样

2.3 喷涂涂层金相组织检查

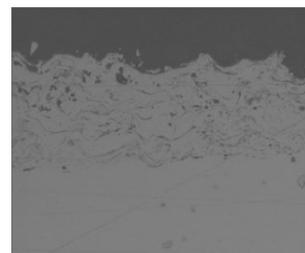
喷涂涂层金相组织检查试验共进行4组,每组有1个试件,如图3所示。在200倍光学显微镜下观察喷涂涂层与基体界面组织结构发现,喷涂涂层与基体界面污染物均小于20%,符合企业标准要求,喷涂涂层金相组织检查合格。



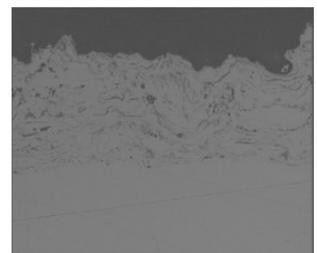
(a) 试件1



(b) 试件2



(c) 试件3



(d) 试件4

图3 GH38合金基体材料喷涂后金相组织

2.4 喷涂涂层后拉伸结合强度检查

拉伸结合强度检查试验共进行4组,每组有3个试件。喷涂涂层后拉伸结合强度应不小于48.2 MPa。其拉伸结合强度见表2。该拉伸结合强度符合企业标准要求。

对封严环基体GH38合金试件进行等离子热喷涂镍铬铁钼涂层增材后,通过喷涂涂层后外观检查和

表1 喷涂参数

参数	数值
喷嘴、电极直径/mm	8
粉末喷口直径/mm	2
粉末入射角/ $^\circ$	90
粉末喷口距离/mm	6.5
主气压力/MPa	1 ± 0.1
主气流量/L/min	140 ± 4

表2 GH38合金基体材料喷涂涂层后拉伸结合强度 MPa

试件	第1组	第2组	第3组	第4组	要求
试件1	53.96	61.45	80.53	77.96	≥48.2
试件2	58.18	71.04	83.21	81.56	≥48.2
试件3	51.98	79.87	83.18	81.53	≥48.2
平均值	54.7	72.1	82.3	80.3	≥48.2
试验结果	合格	合格	合格	合格	

弯曲性能检查、金相组织检查及拉伸结合强度检查等工艺试验,试验结果均合格,镍铬铁钼涂层在GH38合金基材上的等离子热喷涂工艺稳定。可以按照喷涂参数对封严环喷涂镍铬铁钼涂层进行再制造。

3 封严环配合止口再制造工艺方法

3.1 等离子热喷涂镍铬铁钼涂层工艺方法的确定

(1)封严环清洗。为保证喷涂镍铬铁钼涂层的结合强度,用脱脂棉蘸丙酮擦拭清洗封严环待喷涂表面(如图4所示),除去表面油污。

(2)封严环保护及吹砂。对于封严环除待喷涂表面之外的表面,用压敏胶带保护,并用白刚玉砂粒进行吹砂。吹砂参数见表3。

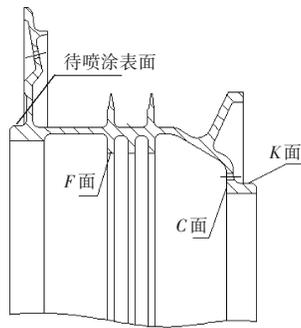


图4 封严环待喷涂表面

表3 吹砂参数

磨料种类	磨料粒度/目	风压/MPa	吹砂距离/mm	吹砂角度/(°)
白刚玉砂	20~40	0.08~0.1	50~100	45~50

(3)封严环保护及喷涂。采用高温压敏胶带对封严环非喷涂表面进行保护。喷涂前用加温枪预热封严环,然后按照确定的热喷涂参数对封严环喷涂表面喷涂镍铬铁钼涂层,喷涂厚度为0.2~1.0 mm。

(4)封严环清理。将保护封严环的高温压敏胶带清理干净。

3.2 喷涂前封严环配合止口去除量的确定

在工作过程中,与低压涡轮第1级盘通过配合止口接触时,封严环主要受低压涡轮第1级盘给予的过盈力和封严环旋转产生的离心力作用,导致配合止口发生不同程度的磨损,表面质量较差,存在较多的腐蚀物与积炭等,影响喷涂涂层的结合力。因此,在喷涂涂层前需要去除封严环配合止口部分基体材料。

3.2.1 封严环配合止口过盈力计算

封严环与低压涡轮第1级盘配合止口过盈配合,

最大过盈量为0.1 mm,二者接触宽度 $A=3$ mm。封严环配合止口平均压力 P_0 /MPa与过盈量关系为

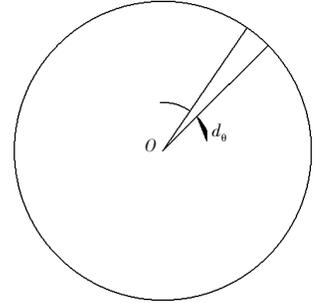
$$P_0=3630e^{1151} \quad (1)$$

式中: e 为封严环与低压涡轮第1级盘过盈量,mm。

取封严环 d_0 弧度(如图5所示)为研究对象,则封严环在 d_0 弧度所受到的过盈力 F_0 /N为

$$F_0=P_0 \times S=3630e \times \frac{A}{\pi D} d_0 \quad (2)$$

式中: S 、 A 、 D 分别为封严环与低压涡轮第1级盘 d_0 弧度接触面积(m^2)、接触宽度(m)、及直径(m)。

图5 封严环 d_0 弧度

计算过盈力得

$$F_0=157000d_0 \quad (3)$$

3.2.2 封严环配合止口离心力计算

设封严环的整体质量为 m /kg,选取 d_0 弧度,则质量为 $\frac{d_0}{2\pi}m$,封严环在工作过程中以角速度 ω 高速旋转,则封严环 d_0 弧度所受到的离心力为

$$F_1=\frac{d_0}{2\pi}m\omega^2r \quad (4)$$

式中: F_1 为封严环 d_0 弧度旋转离心力,N; ω 为封严环旋转角速度,rad/s; r 为封严环半径,m。

计算离心力得

$$F_1=4345d_0 \quad (5)$$

3.2.3 去除量尺寸的确定

封严环与低压涡轮第1级盘配合止口所受的压应力是过盈力与离心力之和,即

$$F=F_0+F_1=161345d_0 \quad (6)$$

封严环配合止口抗弯强度系数为

$$W=\frac{1}{6}rd_0h^2 \quad (7)$$

式中: W 为抗弯强度系数; h 为封严环配合止口厚度,m。

则封严环配合止口所承受最大力矩 M /N·m为

$$M=F \cdot A=484.035d_0 \quad (8)$$

则封严环的抗弯强度 σ /Pa为

$$\sigma=\frac{M}{W} \quad (9)$$

将式(7)、(8)代入式(9)中得

$$\sigma = \frac{484.035d_0}{\frac{1}{6}rd_0h^2} = \frac{2904.21}{rh^2} = \frac{11663.5}{h^2} \quad (10)$$

封严环配合止口位置单边厚度 h 原为 10 mm, 喷涂镍铬铁钼涂层时单边厚度最大减小 1 mm, 则喷涂涂层去除基体量后的抗弯强度 $\sigma=144$ MPa, 小于许用抗弯强度 $[\sigma]$, 满足强度要求。

3.3 封严环再制造技术工艺方法

3.3.1 封严环装夹基准的选择

将封严环(图 4)放至夹具中, 以封严环圆周表面 K 作为径向基准定位, 封严环夹具盖板压紧封严环的端面(C 面)进行端面定位。通过调整封严环, 使封严环内环表面 F 的径向跳动不大于 0.05 mm, 压紧封严环夹具盖板, 准备进行车削。

3.3.2 刀具及加工参数的选择

封严环基体 GH38 合金和喷涂涂层镍铬铁钼材料的硬度值均比较大, 因此选取 YD15 硬质合金的刀具进行车削。封严环配合止口的根部为导圆转接, 为达到封严环的设计要求, 采用成型刀具进行车削。喷涂涂层镍铬铁钼的脆性较大, 因此切削深度要求不大于 0.02 mm。

3.4 封严环再制造技术测量参数的确定

3.4.1 基础参数测量

选取 5 件配合止口需要喷涂镍铬铁钼涂层修复的封严环, 分别对其配合止口尺寸、配合面跳动量及不平衡量等数据进行测量、对比分析, 结果见表 4。从表中可见, 经过喷涂镍铬铁钼涂层修复再制造的封严环的各参数均符合设计要求, 并且较修理前有所改善。

表 4 封严环修复前、后测量结果对比

台份	状态	配合止口直径/mm	配合止口跳动/mm	封严环不平衡量/(g·mm)
T1	修理前	497.80	0.04	2480
T1	修理后	498.05	0.02	2200
T2	修理前	497.85	0.05	2300
T2	修理后	498.05	0.02	2250
T3	修理前	497.77	0.04	1850
T3	修理后	498.02	0.03	1500
T4	修理前	497.82	0.03	1980
T4	修理后	498.04	0.02	1950
T5	修理前	497.81	0.04	2020
T5	修理后	498.06	0.03	1900
设计要求		$498_{+0.01}^{+0.09}$	≤ 0.05	≤ 5000

3.4.2 封严环配合止口形位公差测量

选取 5 件封严环, 分别对其配合止口车削后表

面的粗糙度、相对于 K 面的同心度进行测量, 结果见表 5。从表中可见, 经过喷涂镍铬铁钼涂层修复再制造的封严环, 其配合止口粗糙度及相对于 K 面的同心度均符合设计要求。

表 5 封严环车削后测量结果

参数	T1	T2	T3	T4	T5	设计要求
配合止口粗糙度 R_a	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
同心度/mm	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05

4 封严环配合止口再制造技术长试验证

长试考核验证是在地面试车台模拟实际工况及航空发动机实际工作时长, 对各零组件的性能和强度进行考核验证。封严环是航空发动机的重要旋转件, 再制造后, 需要通过长试考核, 以验证喷涂镍铬铁钼涂层修复配合止口尺寸的稳定性。将修复合格的封严环搭载发动机进行长试考核, 试车后在封严环配合止口处镍铬铁钼涂层无脱落、无掉块, 涂层状态及检查结果均完好。

5 结论

- (1) 采用喷涂镍铬铁钼涂层修复封严环配合止口的喷涂工艺稳定;
- (2) 封严环配合止口加工选择参数合适、加工工艺方法稳定;
- (3) 封严环配合止口再制造后通过长试考核验证, 涂层不存在脱落和掉块问题, 状态良好, 封严环再制造技术稳定。

参考文献:

- [1] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 1-2.
LIAN Xiaochun, WU Hu. Aeroengine principle[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005: 1-2. (in Chinese)
- [2] 王洪明, 孙汕民, 李希顺. 封严环的不平衡量及配合关系对低压系统振动的影响分析[J]. 航空科学技术, 2018, 29(8): 23-27.
WANG Hongming, SUN Shanmin, LI Xishun. Analysis of the influence of the unbalance of the sealing ring and the matching relationship on the vibration of the low pressure system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(8): 23-27. (in Chinese)
- [3] 王宇飞, 谢永鹏. 旋转机械转子不平衡故障的诊断与分析[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2009, 9(5): 6-7.
WANG Yufei, XIE Yongpeng. Fault diagnosis and analysis of rotor imbalance of rotating machinery[J]. Journal of Hunan Industry Polytech-

- nic, 2009, 9(5): 6-7. (in Chinese)
- [4] 王娟, 史新宇, 王文宇. 发动机转子平衡测量稳定性技术研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(7): 17-21.
WANG Juan, SHI Xinyu, WANG Wenyu. Research on the measurement stability technology of engine rotor balancing [J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(7): 17-21. (in Chinese)
- [5] 罗立, 唐庆如. 航空发动机振动与平衡研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2014, 25(2): 57-60.
LUO Li, TANG Qingru. Research on vibration and balance of aero-engine[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2014, 25(2): 57-60. (in Chinese)
- [6] 周骏, 潘晓铭, 周哲为. 转子动平衡的技术研究[J]. 机械设计与制造, 2007(4): 151-153.
ZHOU Jun, PAN Xiaoming, ZHOU Zhewei. Rotor dynamic balance technology studies[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(4): 151-153. (in Chinese)
- [7] 张大林. 离心泵不平衡振动的故障诊断分析[J]. 建设机械技术与管理, 2015, 28(12): 67-69.
ZHANG Dalin. Diagnosis and analysis of unbalance vibration fault for the centrifugal pump[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2015, 28(12): 67-69. (in Chinese)
- [8] 王飞, 张超, 周隐玉, 等. 表面涂层技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 21-24, 29.
WANG Fei, ZHANG Chao, ZHOU Yinyu, et al. Research status of surface coating technology[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(10): 21-24, 29. (in Chinese)
- [9] 尹志坚, 王树保, 傅卫, 等. 热喷涂技术的演化与展望[J]. 无机材料学报, 2011, 26(3): 225-232.
YIN Zhijian, WANG Shubao, FU Wei, et al. Evolution and prospect of thermal spraying technique[J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(3): 225-232. (in Chinese)
- [10] 何金梅, 蔡卿, 张麓娟. 表面工程技术在航空发动机制造中的应用与发展[J]. 金属加工(冷加工), 2016(24): 1-2, 8.
HE Jinmei, CAI Qing, ZHANG Fanjuan. Application and development of surface engineering technology in aeroengine manufacturing [J]. Metal Working(Metal Cutting), 2016(24): 1-2, 8. (in Chinese)
- [11] 周立仁. 认真总结经验, 加快表面工程技术在飞机翻修中推广应用[J]. 中国表面工程, 1997(4): 9-10.
ZHOU Liren. Summing up experience conscientiously, Accelerating the popularization and application of surface engineering technology in aircraft refurbishment[J]. China Surface Engineering, 1997(4): 9-10. (in Chinese)
- [12] 申振华. 热喷涂技术的发展及其在航空工业中的应用[J]. 航空发动机, 2001(2): 14-18.
SHEN Zhenhua. Development of thermal spraying technology and its application in aviation industry [J]. Aeroengine, 2001(2): 14-18. (in Chinese)
- [13] 范吉明. Cr₃C₂-NiCr涂层的等离子喷涂及在再制造工程中的应用研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
FAN Jiming. Plasma spraying of Cr₃C₂-NiCr coating and its applications in remanufacturing engineering[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009. (in Chinese)
- [14] 程林, 李红, 罗钢. 热处理对等离子涂层GH4169高温合金的力学性能的影响[J]. 农业装备技术, 2017, 43(2): 57-60.
CHENG Lin, LI Hong, LUO Gang. Effect of heat treatment on themicrohardness of the plasma cladding GH4169 coating [J]. Agricultural Equipment & Technology, 2017, 43(2): 57-60. (in Chinese)
- [15] 蔡凡, 李初晔, 马岩. 过盈配合产生的接触压力和拔出力计算[J]. 机械设计与制造, 2010(10): 7-10.
CAI Fan, LI Chuyue, MA Yan. Contact pressure and pull-out force reflect on the interference fit [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(10): 7-10. (in Chinese)

(编辑: 贺红井)