

高速电弧喷涂再制造曲轴弯曲疲劳寿命及再制造效益评估

田浩亮¹, 魏世丞², 梁秀兵², 徐滨士², 王长亮¹, 郭孟秋¹, 汤智慧¹

(1. 北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095)

(2. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要: 针对重载汽车发动机曲轴的再制造需求, 基于六自由度机器人自动化高速电弧喷涂系统, 采用研制的 FeNiCrAl 涂层及设计的“环形”、“Z”字型喷涂路径对磨损失效曲轴进行了再制造应用。并与采用常规 3Cr13 涂层性能对比, 采用“Z”字形路径喷涂 FeNiCrAl 涂层后的残余应力状态与新品曲轴表面应力状态分布较为接近。依照国标 QC-T637-2000 对喷涂再制造后的曲轴进行弯曲疲劳性能考核, 试验弯矩在 2305.38 N·m, 加载系数 1.2 时, 其疲劳寿命通过 1×10^7 次, 达到国标要求。结果表明: 采用研制的 FeNiCrAl 涂层再制造曲轴弯曲疲劳寿命高于采用常规 3Cr13 涂层喷涂后曲轴。经济性分析表明: 采用 FeNiCrAl 材料喷涂曲轴消耗的粉芯丝材重量仅为制造新品曲轴所需材料的 3% 左右, 单根曲轴再制造成本, 相比制造新品下降了 93.8%, 再制造过程耗时, 相比制造新品曲轴节省了 18%。

关键词: 曲轴; 高速电弧喷涂; 疲劳寿命; 再制造效益

中图分类号: TG115.5⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0538-08

发动机是重载车辆的核心零部件, 也是蕴含附加值最大的重要部件。而曲轴被称为发动机的“心脏”, 重量约为发动机的 10%, 成本约为整机的 10%~20%, 所以曲轴的报废将大大降低发动机的再制造价值^[1,2]。目前再制造修复曲轴的技术有堆焊、低温镀铁、电刷镀和电弧喷涂。堆焊的缺点是曲轴热变形较大, 造成曲轴各表面相互位置精度变化大, 残余应力大, 会降低曲轴抗疲劳强度。低温镀铁不足之处在于曲轴尺寸较大, 需要很长的镀槽, 需大量镀液, 且用后镀液不易保存, 因此单件镀铁成本较高, 且曲轴不镀部分需先遮蔽, 镀后去掉遮蔽, 工艺复杂。电刷镀用于修复曲轴时镀层单边厚度不宜超过 1 mm, 只适用于磨损量较小的轴颈。而采用电弧喷涂技术再制造曲轴制备涂层厚度可控性好, 且具有喷涂效率高、涂层性能优异、成本低、设备相对简单等优势。它可以制备出优于本体材料性能的表面功能薄层, 在恢复零件尺寸的同时, 进一步提升了零件的表面性能^[3]。因此, 针对重载车辆报废曲轴采用热喷涂技术对其进行再制造、再利用, 研究曲轴喷涂过程中的新材料、自动化喷涂工艺、涂层性能控制、再制造曲轴的服役可靠性等关键问题, 可以提高废旧曲轴的再制造效率, 延长其使用寿命, 减少资源和能源浪费, 有利于推动我国汽车零部件再

制造行业的发展^[4]。

现阶段针对曲轴进行喷涂再制造的研究主要集中在喷涂材料的研发、喷涂工艺的优化、涂层性能的研究等^[5-7], 对再制造后曲轴的服役性能及再制造效益评价鲜有报道。汽车发动机在工作过程中, 承受较大交变弯曲载荷, 并且曲轴在发动机中高速旋转运行, 其强度高在在很大程度上决定了发动机的可靠性和寿命, 曲轴的可靠性是再制造阶段须考虑的关键问题。它是容易发生疲劳破坏的一种典型构件, 其中弯曲疲劳破坏是其失效的主要形式^[8]。因此, 本研究采用谐振式曲轴弯曲疲劳台架试验方法考核高速电弧喷涂再制造后的曲轴的弯曲疲劳性能。

曲轴作为发动机的重要部件, 采用传统的手工电弧喷涂方式进行再制造修复的工作效率较低、工人的工作条件较差、劳动强度较大, 很难满足企业大批量生产的需求, 且工人的喷涂经验好坏也影响再制造后曲轴的质量稳定性。另外, 由于曲轴形状复杂, 轴颈扇板之间间距较窄, 连杆轴颈与主轴颈中心不在同一直线, 喷涂工艺实施难度较大。因此, 本研究采用机器人自动化高速电弧喷涂系统进行曲轴再制造, 分别采用“环形”和“Z”字型喷涂路径在轴颈表面制备 FeNiCrAl 和 3Cr13 涂层, 同时对喷涂两种材料再制造

收稿日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(51605455)

作者简介: 田浩亮, 男, 1986 年生, 博士, 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095, 电话: 010-62496449, E-mail: haoliangtian@163.com

后曲轴表面应力状态分布进行分析，对其弯曲疲劳寿命进行评估，评价其使用性能，最终对机器人自动化高速电弧喷涂再制造曲轴的经济性和环境性进行分析，为该技术在工厂的产业化应用提供理论支撑。

1 实 验

喷涂曲轴为某企业生产的斯太尔 6DL 型号曲轴。基体材料为 42CrMoA，曲轴二维示意图如图 1 所示。喷涂前对试样表面进行除油、除污清洗及喷砂粗化处理，喷砂材料选择棕刚玉，喷砂压力 0.6 MPa，喷砂角度 90°。喷涂材料为自制的 FeNiCrAl 系粉芯丝材和商用的 3Cr13 丝材。FeNiCrAl 粉芯丝材选用 08F 高级优质低碳钢带作为外皮，其化学成分及力学性能见表 1。填充粉芯颗粒粒度为 147~175 μm。其化学成分如表 2 所示。丝材的填充率为 25%~30%，(利用北京工业大学的丝材制造设备)，最终生产的丝材直径为 2 mm。

再制造曲轴工艺流程如图 2 所示。采用装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室自行研制的六自由度机器人高速电弧喷涂系统，FeNiCrAl 涂层制备工艺参数为喷涂电压 34 V，电流 180 A，距离 200 mm，压缩空气压力 0.7 MPa；3Cr13 涂层制备工艺参数为喷涂电压 30 V，电流 200 A，距离 200 mm，压缩空气压力 0.7 MPa。

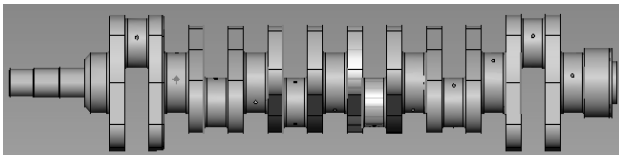


图 1 汽车发动机曲轴

Fig. 1 Schematic of truck engine crankshaft

表 1 粉芯丝材外皮化学成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of cored wire sheath material

Chemical composition (ω/%)					Mechanical property		
C	Cr	Mn	Ni	Other	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%
0.08	≤0.10	0.25~0.50	≤0.25	≤0.035	175	295	35

表 2 FeNiCrAl 系粉芯丝材化学成分

Table 2 Chemical composition of FeNiCrAl based cored wire materials (ω/%)

Ni	Cr	Al	B	Si	RE	Fe
9~15	12	11~13	2~3	2~2.5	0.6~0.7	Bal.

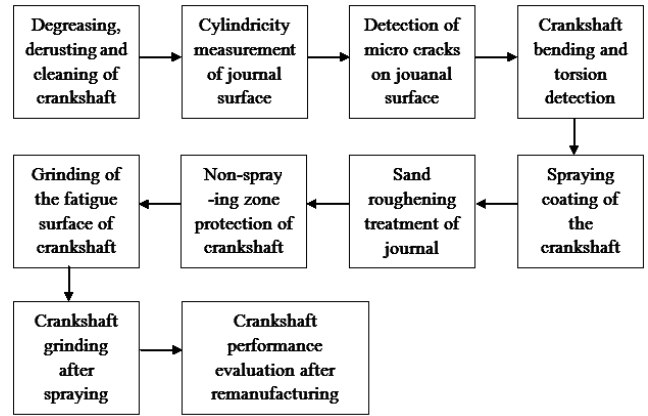


图 2 曲轴再制造工艺流程图

Fig.2 Process of remanufactured crankshaft

采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪进行涂层表面的残余应力测试。选用 Cr K α 靶，波长为 0.228 971 nm， 2θ 扫描步距为 0.1°。分别对再制造后曲轴轴颈 R 角圆周方向上每间隔 10 mm 作为一个测试点。同理，在轴颈表面也均匀选取测试点，按照顺时针方向进行测试，如图 3 所示。

采用装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室自行研制的曲轴弯曲疲劳试验机进行疲劳试验。喷涂再制造后曲轴磨削加工至规定尺寸，安装到谐振式曲轴弯曲疲劳台架试验机上。相对主轴颈而言，连杆轴颈在服役过程中更容易疲劳失效，因此本研究只对曲轴的连杆轴颈进行弯曲疲劳试验。将再制造后曲轴连杆轴颈相邻的两个主轴颈装夹在试验机上，利用电动机激振来考核曲轴的弯曲疲劳性能。试验采用谐振原理，电动机连接有偏心轮安装在主动臂上，试验中电机运行带动偏心轮高速摆动会产生激振，从而使主动臂和从动臂产生受迫振动。因此，装夹在两个摆臂间的曲轴就受到一个对称载荷的作用，谐振可以将偏心轮的激振载荷放大，从而模拟曲轴在工作时的受力情况。试验过程中轴颈表面涂层状态可以由与

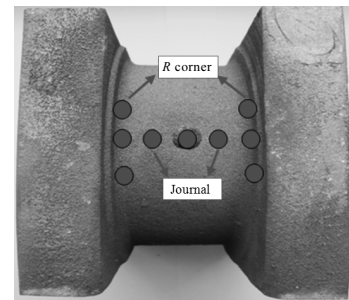


图 3 再制造后曲轴轴颈表面残余应力测试示意图

Fig.3 Residual stress test schematic of remanufactured crankshaft journal

试验机配套的工业相机动态监测，当曲轴断裂时试验机自动停机。

2 结果及讨论

2.1 曲轴再制造工艺规划

曲轴喷涂路径的规划采用离线编程方式，首先在轴颈表面根据形状尺寸，划分出关键点，调整喷枪位置至每一个关键点，同时记存每一点。喷涂过程中，喷枪会按照规划的路径连续作业完成喷涂。利用示教再现的方式进行路径规划。当采用“环形”路径喷涂主轴颈时(如图 4a 所示)，在轴颈表面横向均分 4 个关键点，将轴颈圆周方向分 4 道进行喷涂，喷枪垂直于轴颈表面，曲轴旋转 1 周，完成第一道喷涂，随后喷枪向右偏移 1 定距离，曲轴反转 1 周完成第 2 道喷涂，依次完成整个轴颈表面一层涂层的沉积。当喷涂连杆轴颈时，由于轴颈中心与变位机中心不在同一直线，因此曲轴旋转的同时，喷枪始终与轴颈保持一定距离，跟随轴颈的位置变化而不断调整运动姿态，同理曲轴旋转 4 周完成一层涂层沉积。曲轴共有 13 个轴颈，每个轴颈喷涂 4 道，即曲轴转动 4 周，所以喷涂一遍需要变位机转动 52 周，冷却时再反转 52 周。恰好喷涂一个循环结束，机器人主体和变位机均回到作业原点位置。

如图 4b 所示，采用“Z”字型路径喷涂主轴颈时，首先在轴颈圆角处沿周向均分出关键点，喷枪在这些关键点倾斜 45°，曲轴旋转时喷枪运行轨迹为左右直线运行且在轴颈两侧倾斜，曲轴旋转 1 周即可完成 1 个轴颈的 1 遍喷涂。喷涂连杆轴颈时，曲轴旋转一定角度，喷枪调整姿态在轴颈左侧倾斜 45°，记存第一个关键点，接着旋转同一角度，喷枪需抬起一定高度在轴颈右侧倾斜 45°，保证喷射焰流垂直喷向轴颈圆角处。曲轴不断旋转，喷枪跟踪轴颈且保证距轴颈表面 160 mm。喷涂过程中喷枪在轴颈两侧倾斜，在表面做“Z”字运行的同时绕曲轴回转成一个椭圆型轨迹。随后对涂层进行后续磨削加工，达到曲轴标准尺寸的要求，进行弯曲疲劳寿命考核。

2.2 曲轴喷涂前后的表面残余应力分析

为了考核不同喷涂路径及材料对再制造曲轴表面涂层残余应力的影响，对 4 根曲轴分别采用“环形”路径、“Z”字形路径喷涂 3Cr13 涂层及研制的 FeNiCrAl 系涂层，以及对新旧曲轴进行残余应力测试。如图 5 所示，主要部位是主轴及连杆轴颈中间、拐角处及油孔四周。

图 6 所示为 6 根曲轴表面不同位置处残余应力测试结果。可以看出，在轴颈“R”角位置及轴颈中间

处残余应力以拉应力为主，仅有新品曲轴及采用“Z”字形路径喷涂 FeNiCrAl 涂层在轴颈中部残余应力为压应力。而 6 根曲轴油孔处基本呈压应力状态。

图 6a 所示为新旧曲轴应力测试结果。可以看出，与新品曲轴比较，旧曲轴在经过长期服役后表面残余应力发生变化，在“R”角处旧曲轴平均残余应力约 375 MPa，其值是新品曲轴在该位置处的 1.5 倍，且在轴颈中部位置由以前的压应力状态转变为拉应力状态，这与曲轴在运行过程中“R”角位置容易产生应力集中有关。图 6b 所示为曲轴喷涂 3Cr13 涂层表面残余应力结果。与图 6a 相比可以看出，3 个位置点残余应力值均低于旧品曲轴测试值，且无论是轴颈“R”角位置还是轴颈中部，采用“Z”字形路径制备涂层表面残余应力均低于“环形”路径喷涂结果。这与喷涂前去除应力疲劳层有关，喷涂前曲轴轴颈表面初始状态基本可以认为是零应力状态，3Cr13 涂层在沉积过程中会发生马氏体相变，从而部分抵消拉应力使涂层整体残余应力值较低。如图 6c 所示，可以看出采用“Z”字形路径喷涂 FeNiCrAl 涂层在轴颈及油孔位置处残余应力为压应力状态，在“R”角位置，采用“环形”路径喷涂其拉应力值约 188 MPa，是采用“Z”字形路径喷涂结果的 2 倍多，比较说明采用“Z”字形路径喷涂明显有利于降低涂层表面残余应力值，且在轴颈中部呈压应力状态，与“R”角处拉应力状态相平衡，可以有效避免或减少涂层在使用过程中开裂或剥

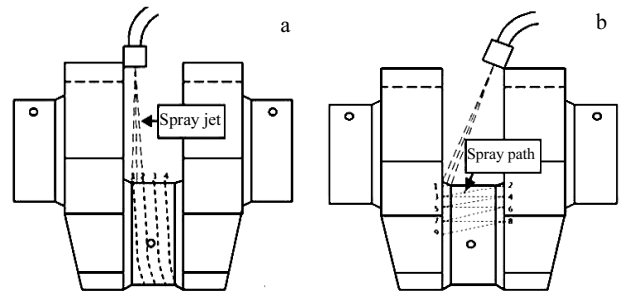


图 4 不同喷涂路径规划示意图

Fig.4 Schematic of different spraying paths: (a) circular path and (b) Z path

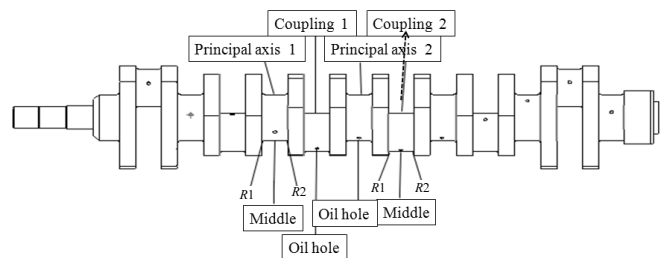


图 5 曲轴二维图

Fig.5 Schematic of 2D crankshaft

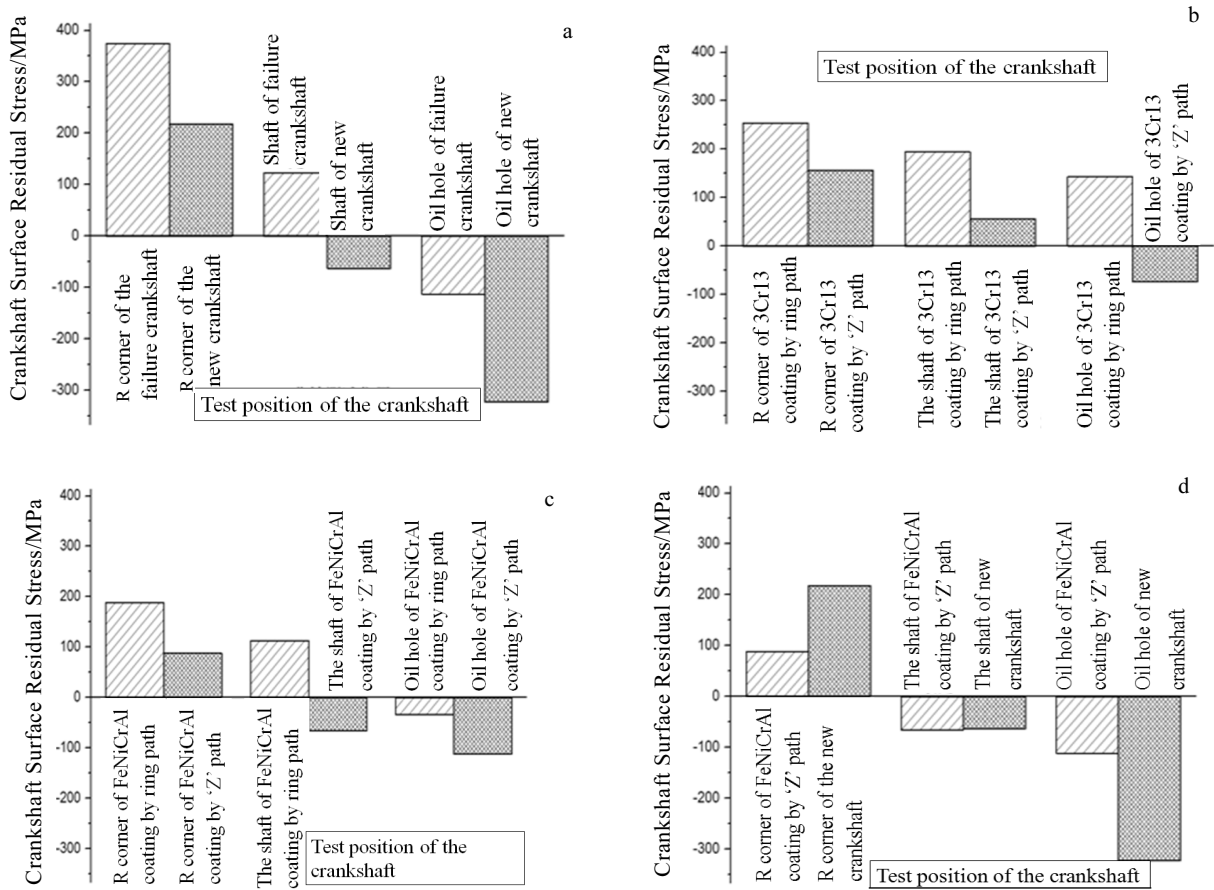


图 6 6 种不同曲轴应力测试值

Fig.6 Residual stress test values of six different crankshaft: (a) new and failure crankshaft, (b) 3Cr13 coating, (c) FeNiCrAl coating, and (d) FeNiCrAl coating and new crankshaft

离的出现。最后分析图 6d，可以看出，采用“Z”字形路径喷涂 FeNiCrAl 涂层后的残余应力状态与新品曲轴表面应力状态分布较为接近，都是在“R”角位置为拉应力状态，在轴颈及油孔处呈压应力状态，但喷涂后曲轴的应力值低于新品曲轴，说明经过再制造后曲轴的性能指标不低于新品。

2.3 再制造曲轴弯曲疲劳寿命评估

2.3.1 曲轴疲劳试验的载荷标定

曲轴在弯曲疲劳试验过程中需要加载一定的应力水平，从而轴颈会承受一定的弯矩，但是在试验过程中曲轴瞬时承受的弯矩不能在线读出，需要在试验前预先在曲轴上施加一定的载荷和弯矩，试验过程中则按照这个载荷力的作用动态进行测试。本试验系统采用了基于应变法的“静标动测”的原理^[9]。首先对曲轴单个轴颈进行静态载荷标定，建立静力矩与应变之间的关系；然后进行动标以确定试验系统工作时的激励频率和曲轴圆角上产生的动应变之间的关系。试验过程产生的弯矩 P_1 与曲轴标准名义弯矩 P_{-1} 的关系为：

$$P_1 = kP_{-1} \quad (1)$$

$$P_{-1} = \lambda R G = \lambda \left(p_z \frac{L_1}{L} \right) G = \lambda \left(\frac{\pi}{4} D^2 P_z \frac{L_1}{L} \right) G \quad (2)$$

式 (2) 中， D 为发动机活塞直径， P_z 为发动机运行过程中气缸内产生的最大爆发压力， λ 为支撑系数， R 为支反力。

该试验系统集成的加速度传感器、PLC（可编程控制器）及转速传感器等控制部分，实现了电机转速的全自动控制、动态标定的自动化及曲轴出现裂纹或涂层剥落等失效形式的自动诊断功能。试验过程中，曲轴出现裂纹到失效的过程会造成系统的刚度下降，则振动加速度也随之下降，从而电机转速下降。而通常认为，相比标定转速，电机转速下降 1 Hz 则曲轴失效，系统通过监测电机转速和加速度的变化情况判断曲轴是否断裂并自动停机。

试验用曲轴材料为 42CrMoA 钢，工作弯矩为 1921.15 N·m。表 3 为曲轴试验所用的参数。表 4、5 分别为曲轴第 3 拐的静标和动标主要标定数据。图 7 为“静标动测”拟合后的曲线。其结果为：试验弯矩 = 3073.84 N·m，强化系数 = 1.6，圆角应力 = 573.58 MPa，试验转速 = 2204.99 r/min，加速度 = 10.67 g。

表 3 曲轴基本参数

Table 3 Basic size of the test crankshaft

Cylinder diameter/mm	Crankshaft radius/mm	Spindle journal/mm	Cranks thickness/mm	Modulus elasticity/MPa	Burst pressure/MPa	Support coefficient
112	67.5	37	28	210	16	0.75

表 4 静态标定数据

Table 4 Static calibrated data

Bending moment/N·m	Strain value of strain gauge 1/ μE	Strain value of strain gauge 2/ μE
1213.28	816.46	964.34
2143.63	1267.28	1352.43
2537.64	1537.61	1846.52
3054.37	1864.84	2197.64
3467.82	2034.67	2264.37
3964.53	2349.51	2546.83
4254.13	2676.54	2738.49
4428.46	2846.54	2984.67

表 5 动态标定主要数据

Table 5 Dynamical calibrated data

Speed/r·min ⁻¹	Strain value of strain gauge 1/ μE	Strain value of strain gauge 2/ μE
914.57	75.345	76.547
1588.57	284.34	311.53
1679.86	322.08	378.47
1760.27	403.52	457.58
1954.15	564.27	615.46
2065.55	710.46	785.58
2164.28	867.854	954.76
2237.64	1018.46	1094.67
2307.13	1168.54	1254.37
2354.57	1345.85	1415.46
2491.15	1846.13	1767.64

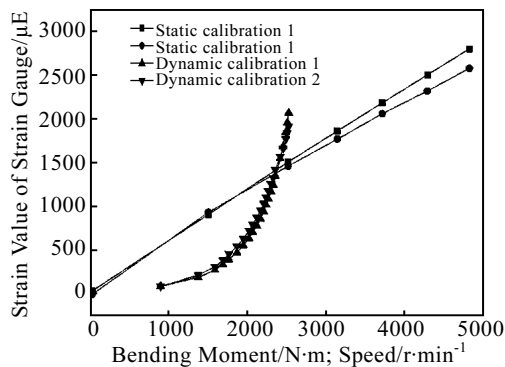


图 7 “静标动测”拟合曲线

Fig.7 Calibrated regression line and course of calibrating

2.3.2 曲轴疲劳试验结果与分析

根据机械零部件的工作状况不同，在工件的疲劳性能试验中其寿命可以大致分为 3 个区间：即短寿命区、中等寿命区和长寿命区，它们分别指在较高应力、中等和较低应力水平下工作时试件的疲劳寿命达到 10^4 、 $10^4 \sim 10^6$ 和 10^6 次循环以上。曲轴是发动机中的关键部件，其工况比较复杂且更换比较麻烦，因此要求其在较低应力水平下工作达到长寿命区^[10]。根据 QC-T637-2000 汽车发动机曲轴弯曲疲劳试验方法标准中规定，在一定应力水平下疲劳循环基数 N_0 为 10^7 作为曲轴的疲劳强度极限^[11]。表 6 和 7 分别为采用 FeNiCrAl 及 3Cr13 涂层材料再制造后曲轴多个试验点的数据统计。

如表 6 所示，由曲轴喷涂 FeNiCrAl 涂层后的弯曲疲劳试验结果可知，当加载系数大于 1.3，即试验弯矩高于 2497.495 N·m 时，疲劳循环次数都没有达到设定的标准基数门槛值 10^7 次。当加载系数为 1.2，试验弯矩为 2305.38 N·m 时，6 组试验中 3 组通过。安全系数降低到 1.0 时，3 组试验全部通过。而如表 7 所示，当加载系数为 1.3 时，曲轴弯曲疲劳寿命约 37×10^4 ，加载系数降低为 1.2 时，3 组试验平均疲劳寿命是 264×10^4 。加载系数降低为 1.0 时，3 组试验平均疲劳寿命是 487×10^4 。

表 6 喷涂 FeNiCrAl 再制造曲轴的弯曲疲劳试验数据

Table 6 All test results of bending fatigue test of spraying

FeNiCrAl remanufacturing crankshaft					
Number	Bending moment/N·m	Safety factor	Fillet stress/MPa	Cycle/ $\times 10^4$	Test result
1	3265.95	1.7	597	21.1	Spalling
2	2881.725	1.5	528	74.3	Spalling
3	2305.38	1.2	418	1137	Pass
4	3073.84	1.6	563	54.3	Spalling
5	2689.61	1.4	487	174.1	Crackle
6	2305.38	1.2	423	384.7	Crackle
7	2689.61	1.4	495	183.6	Crackle
8	2497.495	1.3	458	348.8	Crackle
9	2305.38	1.2	423	1034	Pass
10	2689.61	1.4	491	161.5	Crackle
11	2305.38	1.2	427	635.8	Crackle
12	1921.15	1.0	393	1027	Pass
13	2305.38	1.2	422	1107	Pass
14	2305.38	1.2	414	317	Crackle
15	1921.15	1.0	387	1120	Pass
16	1921.15	1.0	382	1067	Pass

表 7 喷涂 3Cr13 再制造曲轴的弯曲疲劳试验数据

Table 7 All test results of bending fatigue test of spraying 3Cr13 remanufacturing crankshaft

Number	Bending moment/N·m	Safety factor	Fillet stress/MPa	Cycle/ $\times 10^4$	Test result
1	2497.495	1.3	455	37	Spalling
2	2305.38	1.2	424	244	Spalling
3	1921.15	1.0	392	410.4	Crackle
4	2305.38	1.2	433	221.7	Spalling
5	1921.15	1.0	387	518.8	Crackle
6	2305.38	1.2	432	328	Spalling
7	1921.15	1.0	390	533.5	Crackle

图 8 为再制造曲轴弯曲疲劳试验结束后轴颈表面涂层失效形貌。如图 8b 和 8c 为加载系数为 1.2，试验弯矩为 2305.38 N·m 时，弯曲疲劳试验约 244 万次后，3Cr13 涂层出现裂纹和剥离失效后试验终止。主要发生在轴颈“R”角位置，且在其圆周方向上出现裂纹较多，大面积剥离严重。而如图 8d 所示为曲轴喷涂 FeNiCrAl 涂层，加载系数为 1.2，弯曲疲劳试验约 635

万次后涂层的损伤形貌。在“R”角处仅出现轻微裂纹，剥离现象不明显。比较可知，曲轴喷涂 FeNiCrAl 涂层与基体具有较高的结合强度和服役寿命。

为了精确评价喷涂 FeNiCrAl 涂层曲轴的疲劳极限，对试验结果采用配对升降法进行了统计分析。根据上述试验结果（表 6），选取 1900~2700 N·m 之间的低载荷数据，在四级应力水平下作出配对升降图（如图 9 所示）。可以看出终点 13 为越出（即通过考核），可断定依次进行的第 14 个试件的试验弯矩水平必将达到 1900 N·m。这样，数据点 14 和起点 2 位于同一应力水平上，故该图属于闭合式的升降图。根据疲劳可靠性定义：指定循环基数 N_0 下的中值（50%可靠度）疲劳强度的估算量^[11]。取散点图中的有效数据可得出曲轴的中值疲劳极限为：

$$M_{0.5} = (2700 \times 3 + 2300 \times 6 + 1900 \times 3) / 12 = 2300 \text{ (N·m)}$$

由于曲轴的设计工作弯矩 M_1 为 1921.15 N·m，则喷涂 FeNiCrAl 涂层的再制造曲轴平均强度安全系数为：

$$n = M_{0.5} / M_1 = 2300 / 1921.15 = 1.197$$

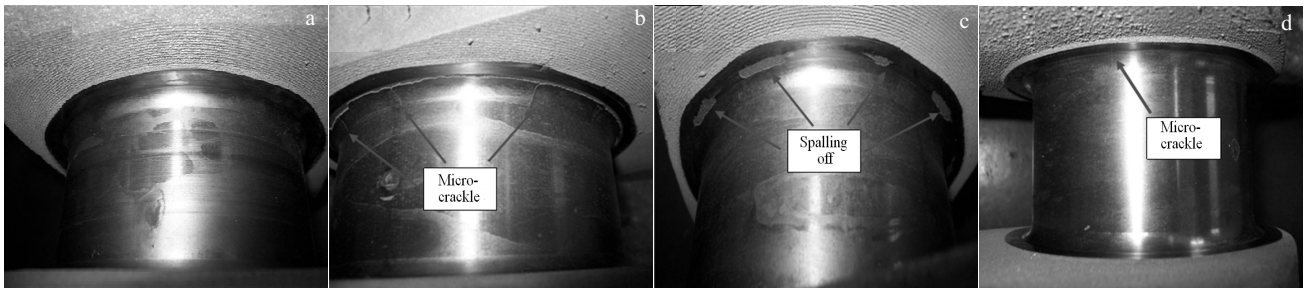


图 8 喷涂曲轴弯曲疲劳试验后涂层失效形貌

Fig.8 Failure morphologies of crankshaft bending fatigue: (a) 3Cr13 coating before test, (b) 3Cr13 coating cracks, (c) 3Cr13 coating flaking, and (d) FeNiCrAl coating micro-crack

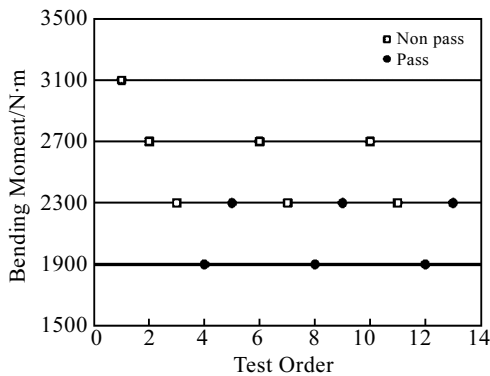


图 9 曲轴喷涂 FeNiCrAl 涂层后疲劳试验配对升降图

Fig.9 Figure of couplement ascend & descend of crankshaft spraying FeNiCrAl coating

该型号新品曲轴的安全系数为 1.2，因此可知经过再制造后曲轴疲劳寿命可达到设定的疲劳极限 10^7 次循环。

图 10 所示为喷涂 FeNiCrAl 再制造后曲轴的弯曲疲劳试验 S-N 曲线。其分别选取在 2497.495、2689.61、2881.725、3073.84 和 3265.95 N·m 5 个不同载荷下对应的疲劳寿命数据，对载荷和疲劳寿命取对数后作出回归曲线。如图所示，过载疲劳特性呈线性关系，试验弯矩增大，寿命下降。由图 10 可知，回归直线相关系数 $R \approx 0.977 06$ ，远大于表 8 中 $n-2=3$ 时的起码值 0.878，且所得数据在正态坐标上呈线性分布，故试验数据符合正态分布，线性拟合有意义。

2.4 曲轴再制造技术应用的经济性评估

分析采用不同喷涂路径再制造曲轴的时间成本，

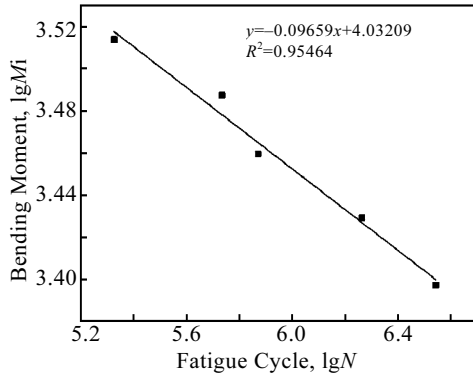


图 10 双对数坐标的再制造曲轴 S-N 曲线

Fig.10 S-N curve of remanufacturing crankshaft in double log coordinates

表 8 相关系数检验表

Table 8 Correlation coefficient test table

n-2	Rudime-ntary	n-2	Rudime-ntary	n-2	Rudime-ntary	n-2	Rudime-ntary
1	0.997	6	0.707	11	0.553	16	0.468
2	0.950	7	0.666	12	0.532	17	0.456
3	0.878	8	0.632	13	0.514	18	0.444
4	0.811	9	0.602	14	0.497	19	0.432
5	0.754	10	0.576	15	0.482	20	0.423

需要喷涂的轴颈共有 13 个，其中 7 个主轴颈，6 个连杆轴颈。采用“环形”路径方式喷涂时，每个轴颈喷涂 4 道，因此喷涂 1 个轴颈曲轴需要正转 4 周、反转 4 周，共 8 周，喷涂 1 根曲轴共需要旋转 104 周，而旋转一周耗时 0.5 min，则采用“环形”路径喷涂 1 根曲轴共需耗时 52 min。当采用“Z”字形路径喷涂 1 个轴颈过程中，曲轴旋转 1 周即可完成 1 个轴颈的一遍喷涂，加之回转 1 周吹气冷却涂层，曲轴共需旋转 26 周，耗时 13 min。比较得出，采用“Z”字形路径再制造一根曲轴仅需要采用“环形”路径喷涂耗时的

表 9 机器人自动化高速电弧喷涂再制造单件曲轴经济性评估

Table 9 Economic evaluation of single crankshaft remanufactured by robotic automatic HVAS

Item	Material	Consumable material/kg	Consumable time/min	Cost /YMB	Remanufacturing cost/YMB
New crankshaft	42CrMoA	103	—	2800	—
Ring path	3Cr13	3.5	52	200	370
'Z' path	3Cr13	3.0	13	150	300
Ring path	FeNiCrAl	2.7	52	135	215
'Z' path	FeNiCrAl	2.7	13	135	175

1/4。为了考核采用不同喷涂材料及不同喷涂工艺再制造曲轴的经济性与环境性，在中国重汽富强动力有限公司对再制造后曲轴进行了试车应用。并对其经济性成本进行分析，结果如表 9 所示。采用“Z”字型路径喷涂 3Cr13 涂层整个再制造过程所需的费用约 300 元/根，与采用“环形”路径喷涂相比单件降低 70 元。而采用“Z”字型路径喷涂 FeNiCrAl 涂层的再制造费用为 175 元/根，与喷涂 3Cr13 涂层费用相比降低 50%。比较分析，采用 FeNiCrAl 材料喷涂曲轴再制造消耗的粉芯丝材重量仅为制造新品曲轴所需材料的 3%左右，单根曲轴再制造成本，相比制造新品下降了 93.8%，再制造过程耗时，相比制造新品曲轴节省了 18%。因此，该技术的经济效益和社会效益显著，具有很大的应用推广前景。

3 结 论

1) 采用“Z”字形路径喷涂 FeNiCrAl 涂层后的残余应力状态与新品曲轴表面应力状态分布较为接近，即在“R”角位置为拉应力状态，在轴颈及油孔处呈压应力状态，喷涂后曲轴的应力值低于新品曲轴。

2) 当试验弯矩在 2305.38 N·m，加载系数为 1.2 时，喷涂 3Cr13 涂层的曲轴平均弯曲疲劳寿命为 264×10^4 次。喷涂 FeNiCrAl 涂层曲轴的弯曲疲劳寿命通过 1×10^7 次，达到国标要求。

3) 采用 FeNiCrAl 材料喷涂曲轴再制造消耗的粉芯丝材重量仅为制造新品曲轴所需材料的 3%左右，单根曲轴再制造成本相比制造新品下降了 93.8%，再制造过程耗时相比制造新品曲轴节省了 18%。

参考文献 References

[1] Zhang Wei(张伟), Guo Yongming(郭永明), Chen Yongxiong(陈永雄) et al. *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2011, 24(6): 1

[2] Liang Xiubing(梁秀兵), Chen Yongxiong(陈永雄), Bai Jinyuan(白金元) et al. *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2010, 23(2): 112

[3] Bai Jinyuan(白金元), Xu Binshi(徐滨士), Xu Yi(许一) et al. *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2006, 19(5): 267

[4] Chen Yongxiong(陈永雄), Xu Binshi(徐滨士), Xu Yi(许一) et al. *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J]. 2006, 19(5): 169

[5] Tian Haoliang(田浩亮), Wei Shicheng(魏世丞), Chen Yongxiong(陈永雄) et al. *Surface Technology*(表面技术)[J], 2013, 42(3): 99

- [6] Tian Haoliang(田浩亮), Wei Shicheng(魏世丞), Chen Yongxiong(陈永雄) *et al. Materials Science and Technology* (材料科学与工艺)[J], 2013, 21(5): 51
- [7] Tian Haoliang(田浩亮), Wei Shicheng(魏世丞), Chen Yongxiong(陈永雄) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2013, 38(4): 92
- [8] Yu Xiaoli(俞小莉), Zhou Xun(周 迅), Liu Zhentao(刘震涛) *et al. Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 2004, 25(3): 368
- [9] Zhou Xun(周 迅), Yu Xiaoli(俞小莉), Li Ying(李 迎). *Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 2006, 27(4): 712
- [10] *Crankshaft Fatigue Test Method for Automobile Engine*(汽车发动机曲轴弯曲疲劳试验方法) QC-T637-2000[S]. Beijing: National Bureau of Machinery Industry, 2000
- [11] Zhou Xun(周 迅), Yu Xiaoli(俞小莉). *Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 2007, 28(7): 885

Bending Fatigue Life and Remanufacturing Benefit Evaluation of High Velocity Arc Spraying Remanufacturing Crankshaft

Tian Haoliang¹, Wei Shicheng², Liang Xiubing², Xu Binshi², Wang Changliang¹, Guo Mengqiu¹, Tang Zhihui¹

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material Beijing, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: According to the demand of remanufacturing engine crankshaft used for the automatic, high velocity arc spraying system based on the six degree freedom robot, employed the self-design FeNiCrAl wire and ‘circular’, ‘Z’ spraying path for remanufacturing the worn failure crankshaft. Compared with the conventional 3Cr13 coating performance, the residual stress of FeNiCrAl coating through ‘Z’ spraying path is similar to the results of a new crankshaft. The bending fatigue performance of spraying FeNiCrAl coated crankshaft was examined according to the national standard QC-T637-2000; when the test bending moment was 2305.38 N·m, and the load factor was 1.2, the fatigue life exceeds 1×10^7 , which meets the demand of national standard. The results show that the bending fatigue life of FeNiCrAl coated crankshaft is higher than that sprayed by 3Cr13. The remanufacture benefit analysis indicates that the weights exhaust of FeNiCrAl spraying cored wire is about 3% of that to produce a new crankshaft, the cost of remanufacturing a single crankshaft is decreased by 93.8%, and the remanufacturing process saves time by 18% compared with producing a new one.

Key words: crankshaft; high velocity arc spraying; fatigue life; remanufacture benefit

Corresponding author: Tian Haoliang, Ph. D., Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material Beijing, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China, Tel: 0086-10-62496449, E-mail: haoliangtian@163.com