

某型航空发动机活塞特种 固体润滑涂层的加工

北京航科发动机控制系统科技有限公司 (102200) 沈琳

我厂某型发动机燃油调节器上的活塞, 图样要求内孔及外圆表面涂覆一种黑色的, 以 PTFE (聚四氟乙烯) 为润滑剂、聚酰胺为粘结剂的有机加热型固体润滑涂层。该涂层与润滑油的相容性较好, 在中速低负荷条件下, 与润滑油配合使用, 可以改进初期磨合, 防止起动咬合, 并可延长零件使用寿命。该涂层采用类似于油漆的涂装工艺, 在摩擦部件表面上成膜, 以降低其摩擦与磨损, 是一种新型润滑技术, 为国内首次在航空发动机上使用。涂层生产过程比较复杂, 满足图样要求有较大的加工难度。

在产品试制初期, 存在的主要问题如下:

(1) 涂层质量不稳定, 经常产生起泡、内部疏松、不致密等问题。

(2) 机械加工涂层时, 出现局部车削不着, 边缘崩边掉块, 零件外圆涂层加工时尤为突出。

不合格涂层返修耗时费力, 涂层厚度容易超差, 造成零件报废。高返修率、易出废品的问题不解决, 将直接影响产品质量和生产进度。为此, 公司成立联合攻关小组, 最终解决上述问题, 提高了固体润滑涂层加工质量。

一、技术要求

1. 活塞涂覆部位图样要求

涂层厚度: $0.025 \sim 0.050\text{mm}$ 。内孔: $\phi 12^{+0.027}_0\text{mm}$,

(3) 酒精、氮气的纯度一般要求 $\geq 95\%$, 水份 $\leq 0.5\%$, 金属切屑液, 确保 pH 值 $8 \sim 10$, 防腐性 A 级。

(4) 空炉预热到温很重要, 装炉、加密封圈盖严、排气升温应及时、迅速, 球铁材质不适合长时间气体软氮化, 保温阶段取 $2 \sim 4\text{h}$ 最合理。

5. 结语

曲轴表面出现小坑“麻点”, 且在麻点处堆有黄色

外圆: $\phi 17^{+0.006}_{-0.017}\text{mm}$ 。外圆与 $\phi 6\text{mm}$ 孔之间跳动量不大于 0.04mm (参见图 1)。

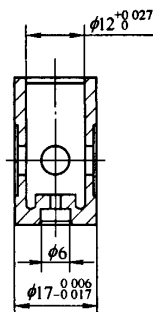


图 1 零件涂覆部位

2. 攻关技术指标

(1) 保证零件涂层均匀、致密, 无疏松, 涂层厚度满足后续机械加工要求。

(2) 保证涂层机械加工后, 外观及厚度均符合图样要求。

二、难点分析

(1) 该零件要求内孔及外圆均进行涂覆及机加处理, 工艺流程的设计直接关系到能否加工出合格的零件。试制初期, 为了方便加工, 内孔和外圆一同喷涂涂层, 再一同机加涂层, 经常出现内孔涂层完好而外圆涂层不合格的情况。经过分析, 我们认为只有外圆涂层不

金属锈蚀物是典型的金属电化学腐蚀现象——点蚀。主要是曲轴低温装炉后, 升温排气不及时或炉罐本身就漏气严重, 如果曲轴抛光后不清洗, 这样就给附着一层溶有杂质水膜的曲轴提供了含氧的电解质, 轴颈表面及其他部位的铁和碳、硫等杂质构成了无数的原电池, 氮化炉提供了温度, 且随着炉体升温加速形成电化学腐蚀。

MW (20100821)

合格,说明不单纯是涂覆或机加工的问题,而可能是两道工序安排不合理造成的。设计正确的工艺流程,合理安排涂覆工序和机加工序顺序,是本次攻关成败与否的基础。

(2) 该固体润滑涂层属于热喷涂加工涂层。但与传统热喷涂不同,不是将涂料加热,而是将待涂零件加热到一定温度,借助压缩空气,趁热将涂料雾化沉积在待喷涂表面,直至达到需要的涂层厚度,最后高温固化烧结成膜。由于涂层工艺尺寸较厚,需重复多次喷涂及干燥方可达到厚度要求,过程控制难度较大,易受环境因素影响。因此,根据零件特点,选择行之有效的涂覆工艺参数,是喷涂合格涂层的保障。

(3) 目前,国内可以借鉴的加工此类型涂层的经验较少,确定适合的机加工工艺参数是保证零件图样要求的关键。

三、试验工作

涂层加工工艺流程:零件清洗除油→测量涂覆部位涂前尺寸→保护零件非涂覆面→喷砂粗化→清洗→重新保护→零件预热→趁热喷涂(首次)→干燥→重复热喷涂和干燥工序(至工艺要求的涂层厚度)→预固化→清除保护物→涂层固化→检验涂层厚度及外观→后续机加工至图样要求。

1. 涂覆及机加涂层工艺顺序的设计

研制初期,涂覆及机加工工艺顺序为“涂覆内孔及外圆→机械加工内孔及外圆”。机加过程中出现定位困难,不易找正,零件合格率较低等问题。后从零件结构和涂覆工艺特性两方面分析,决定改变涂覆和机加涂层工艺顺序,即将工艺流程调整为“涂覆内孔→以外圆定位加工内孔→保护内孔涂覆外圆→以内孔定位加工外圆”,由一步加工调整为两步加工。虽然加工次数增加,但是降低了机械加工难度。为了适应新加工方法,需要在涂覆和机加工工艺参数方面做出适当的改变。

2. 涂覆工艺参数的选择

要保证涂层均匀,致密,颜色基本一致,无疏松、气泡、针孔、流挂等缺陷,正确的涂覆工艺参数很重要。

(1) 喷砂参数 涂料具有的流动性和对基体表面的浸润性,在喷涂过程中很容易渗入被涂覆材料表面的微小孔隙和凹陷中。当涂料固化后,就被“镶嵌”在孔隙中,形成无数微小的“销钉”,使涂料牢固地附着在固

体材料表面。通过喷砂粗化处理,提高待涂表面的粗糙度,从而增加涂料与基体的结合面积,是提高涂层附着力的简单而有效的方法。活塞材料牌号为 2A12-T4, R 300MPa,试验采用粒度为 0.18 ~ 0.154mm (80 ~ 100 目) 的白刚玉,空气压力 0.1 ~ 0.15MPa,获得良好的喷砂表面状态,表面粗糙度达到 $0.8\mu\text{m} < R_a < 2.0\mu\text{m}$ 。

(2) 喷涂参数 加工涂层的涂料是挥发性涂料,采用空气喷涂,出料量一定时,空气压力不足,涂料雾化不好,导致涂层表面更加粗糙。空气压力过量,料雾反弹严重,不仅涂料浪费大,而且冲击力大容易导致涂层薄厚不均匀,加大机械加工涂层的难度。经过试验摸索,最终确定喷涂空气压力 0.1 ~ 0.2MPa,喷涂距离 15 ~ 25mm。

(3) 涂层厚度的确定 为了给机械加工留出足够的加工余量,涂层的工艺厚度要大于图样要求的使用厚度。涂层过厚,增加溶剂挥发的难度,容易出现起泡、组织疏松等问题。反之,涂层过薄,机械加工余量不够,加工不慎易造成尺寸超差。因此,涂层厚度的设定既要保证能够加工出合格的涂层,又要尽可能地降低加工难度。从加工涂层的方法和设备精度入手,攻关小组成员经过反复的工艺试验,最终将涂层的工艺厚度确定为 0.07 ~ 0.08mm。

(4) 干燥工艺参数 对于多次喷涂加工的涂层,涂料溶剂的挥发程度,决定着固化后涂层的密实程度。为了涂料中的溶剂得以挥发,每一遍喷涂后应通过加热烘干使膜层干燥,程度以膜层表面干燥为宜。膜层干透,会降低层与层之间的结合强度,膜层湿润,影响固化时溶剂挥发。技术人员从涂料特性、零件材料、零件外形及烘干方式等多方面综合考虑,经过试验,最终确定干燥温度为 $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$,保温时间为 5 ~ 15min,可使膜层在下次喷涂前呈干状态。为了帮助涂料中高沸点溶剂进一步挥发,阶梯式延长每次涂层的干燥时间为 10 ~ 15min。

(5) 控制固化升温速度 达到工艺厚度后,进行涂层固化。为了涂料溶剂彻底挥发,零件应随炉升温到固化温度。升温过快,溶剂挥发不均匀,涂层易出现气泡、针孔、疏松等缺陷,大大增加涂层返修率;升温过慢,溶剂挥发慢,对涂层质量有益,但生产效率低,占用干燥设备时间长。因此,涂层固化时升温阶段的平均

速度控制在 $\leq 8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 为宜。

3. 机加工工艺参数的选择

几乎所有加热喷涂涂层表面都是比较粗糙的,在要求涂层几何尺寸精度和表面粗糙度的情况下,只有通过精加工才能用作边界润滑条件下的滑动摩擦表面,不正确的加工方法会导致涂层的剥离和开裂。

(1) 机加工设备参数的确定 涂层的机械加工不同于普通整体金属材料的加工,由于涂层组织的特殊性(韧性差、结合强度有限),在制定机加工工艺时,应从刀具的选用、进刀量、车削速度、进给量等多方面考虑。涂层硬度高,导热性差,刀具易磨损,且刃口温度高,容易使涂层残余应力增加,产生鼓皮现象。涂层边缘处不能承受过大的切削应力,否则易出现涂层剥落现象。经过反复试验,最终确定选用金刚石刀具。机加工工艺参数为主轴转速 $880 \sim 1300\text{r}/\text{min}$,进给量 $0.03\text{mm}/\text{r}$,进刀量 $0.02 \sim 0.03\text{mm}/\text{次}$ 。

(2) 选择合理的机加定位部位 按照工艺流程要求,零件车削内孔时,外圆尚未涂覆,可以采用外圆定位加工内孔。如图2所示,零件外圆包含基体原始面和



图2 零件外圆包括原始面和铬酸阳极化表面

铬酸阳极化表面。由于机加时要将夹具固定在零件中间部位,因此选择比较靠近边缘的基体原始面作为定位部位要优于选择其他部位。随着表面精度的提高,定位面积的增加,机加时轴向转动的零件跳动量缩小,操作更容易找正。因此,加工内孔涂层时,应以基体原始面作为定位面,零件合格率有明显提高。

四、试验结果及结论

1. 试验结果

在试验基础上,我们对正式零件进行固体润滑涂层的涂覆及机加工。

相关工艺参数及检测结果见附表。

工艺参数及检测结果

序号	批次	数量	涂覆主要工艺参数			机加主要工艺参数			最终涂层厚度 /mm
			喷涂压力 /MPa	涂层厚度 /mm	干燥 条件	主轴转速 /r·min ⁻¹	进给量 /mm·r ⁻¹	进刀量 /mm	
1	08-01-2 (内孔)	10	0.15	0.08	80℃, 15min	1000-1300	0.03	0.03	0.03-0.04
2	08-01-2 (外圆)	10	0.15	0.08	80℃, 15min	1000 ~ 1300	0.03	0.02	0.025 ~ 0.035
3	08-01-3 (内孔)	20	0.2	0.08	80℃, 15min	880 ~ 1200	0.03	0.02	0.03 ~ 0.4
4	08-01-3 (外圆)	20	0.2	0.08	80℃, 15min	880 ~ 1200	0.03	0.03	0.04 ~ 0.05
5	08-01 (内孔)	20	0.10	0.07	80℃, 10min	880 ~ 1200	0.03	0.02	0.03 ~ 0.04
6	08-01 (外圆)	20	0.10	0.07	80℃, 10min	880 ~ 1200	0.03	0.03	0.04 ~ 0.05
7	08-02 (内孔)	58	0.15	0.07	80℃, 10min	1000 ~ 1300	0.03	0.03	0.03 ~ 0.04
8	08-02 (外圆)	58	0.15	0.07	80℃, 10min	1000 ~ 1300	0.03	0.02	0.03 ~ 0.04

注:涂层固化条件均为 $180^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ 。上述批次均用150车床加工涂层。零件机加后涂层光滑,颜色一致,无气泡、针孔、凹陷、疏松、崩边、异物等缺陷,外形尺寸符合图样要求。

2. 结语

试验结果表明,以上各项试验工作及所采取措施是有效可行的,并取得了较好的效果。经有关人员共同努

力,完成了活塞特种固体润滑涂层加工攻关项目确立的各项技术指标,零件通过随机运转考核。**MW**

(20101222)