

# 最大 50 $\mu\text{m}$ 碳氟固体润滑涂层工艺实践

## Technical Practice of Lubricating Fluorocarbonated Coating With Maximal Thickness 50 $\mu\text{m}$

北京航科发动机控制系统科技有限公司 沈琳

**[摘要]** 针对某航空发动机燃油调节系统使用最大厚度达 50 $\mu\text{m}$  的碳氟固体润滑涂层,本文对使用背景、涂层性能、加工方式、涂装工艺参数、表面预处理、喷涂作业、涂层补充加工、涂层质量评价等工艺实践进行了介绍。

**关键词:** 碳氟固体涂层 润滑涂层 聚四氟乙烯 (PTFE) 工艺实践

**[ABSTRACT]** About the aeroengine fuel control system parts coated with lubricating fluorocarbonated of maximal thickness 50 $\mu\text{m}$ . The technical practice is introduced on using background, coating performance, processing methods, coating technical parameters, pre-processing, spraying operation, add-processing, coating quality and so on.

**Keywords:** Fluorocarbonated coating Lubricate coating Polytetrafluoroethylene Technical Practice

北京航科发动机控制系统科技有限公司某型航空发动机燃油调节系统部分零部件由于工况恶劣、使用磨损强度高,且发生电偶腐蚀等情况,无法满足长时间运转要求。为解决上述问题,决定在零部件的机械配合面涂覆一种碳氟固体润滑涂层。该涂层以聚四氟乙烯 (PTFE) 为固体润滑剂,最大使用厚度可达 50 $\mu\text{m}$ ,具有润滑效果好,耐磨、寿命较长、防电偶腐蚀性能好,加工工艺简单等特点,为国内首次在航空发动机燃油调节系统零部件上使用的涂层。

### 1 涂层性能

#### 1.1 基本性能

涂层特性如表 1 所示。

#### 1.2 与其他润滑涂层的性能比较

与同类碳氟类固体润滑涂层相比,该涂层在相同试验条件下具有更长的耐磨寿命;与  $\text{MoS}_2$  固体润滑涂层相比,该涂层具有附着性良好、施工简单、工艺性较好等优点,不足之处是耐热性和耐负荷性稍差<sup>[1]</sup>;该涂层在高载荷下不如  $\text{MoS}_2$  涂层耐磨,但在低载荷下,耐磨寿命是普通  $\text{MoS}_2$  涂层的几十倍。表 2 相关试验数据反映出负载对涂层耐磨寿命的影响:在国产 MM-200 摩擦

损试验机上进行涂层耐磨性试验,对偶试件为 GCr15 钢环,速度为 200r/min。试验结果显示,负载越大,涂层耐磨寿命越短。

表1 涂层特性

参考项	参数	
连续使用温度	200 $^{\circ}\text{C}$	
最高使用温度	300 $^{\circ}\text{C}$	
最低使用温度	-200 $^{\circ}\text{C}$	
表面粗糙度 $R_a$	0.4 < $R_a$ < 2.5	
涂层耐磨性	MM-200, min	204min*
涂层摩擦系数	MHK-500A	0.26**
基体材料	钢、铜合金、铝合金(阳极化或未阳极化均可)、钛合金等	

注: \* 为用国产 MM-200 摩擦试验机评价,对偶试件为 GCr15 钢环,速度:200r/min,负荷为 100N; \*\* 为用国产 MHK-500A 环块摩擦试验机评价,对偶试件为渗碳钢环,速度:1000r/min,负荷为 196N。

表2 负载对涂层耐磨寿命的影响

序号	负载 /N	耐磨寿命 /min
1	245	153
2	490	48
3	980	29

#### 1.3 涂层厚度

一般固体润滑涂层使用厚度在 5~30 $\mu\text{m}$  之间,如石墨、 $\text{MoS}_2$ 。本涂层使用厚度为 25~50 $\mu\text{m}$ ,可以耐受长时间磨损,延长机械零部件使用寿命。

## 2 工艺实践

### 2.1 涂装方式

#### 2.1.1 热喷涂涂装

涂层采用热喷涂涂装,但与传统热喷涂不同。传统热喷涂是利用各种不同的热源,将欲喷涂的各种材料如金属、合金、陶瓷、塑料及其各类复合材料加热至熔化或熔融状态,借助气流高速雾化形成“微粒雾流”沉积在已经预处理的零件表面形成堆积状,与基体紧密结合的涂层<sup>[2]</sup>。该涂层不是将喷涂材料加热,而是将零部件加

热到一定温度,趁热进行喷涂作业。之所以采用加热喷涂作业,是因为涂料溶剂中高沸点物质较多,而在常温下实行喷涂作业不易干燥,影响涂层质量,降低施工效率。

### 2.1.2 手工喷涂

目前,国内大型喷涂企业一般采用自动化喷涂设备完成零部件的涂覆加工。自动化喷涂具有生产效率高、人员影响因素小、产品一致性好等优点,但是由于本公司加工的多为航空精密零部件,存在品种多、批量小,且待涂件体积小、形状极不规则的情况,使用自动化设备涂覆反而存在不宜操作、占用空间大、环境状态难控制等缺点。因此,我公司现采用手工喷涂进行固体润滑涂层的涂装。

## 2.2 工艺流程

在机械加工和热处理完成之后进行零件涂覆工序。具体流程如下:清洗除油→测量涂覆部位涂前尺寸→保护零件非涂覆面→喷砂→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→涂层固化→机械加工涂层(视工艺需要)。

## 2.3 工艺参数

### 2.3.1 涂层工艺厚度

工艺厚度应根据设备的加工精度合理制定,但为了避免出现起泡、针孔、组织疏松等质量问题,涂层工艺厚度一般不超过0.1mm。对于有较高涂层精度要求、必须进行后续补充机械加工的零部件,为了给后续工序留出足够的加工余量,涂层的工艺厚度要大于使用厚度。

### 2.3.2 热喷涂温度及涂层干燥温度

通常情况下,热喷涂温度及涂层干燥温度为80~100℃,具体干燥参数应根据施工现场情况,通过试验获得。干燥程度控制在表面干燥为宜,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,造成涂层不致密。在工艺实践上,零部件需要预加热,主要目的是帮助涂料溶剂挥发。由于需要喷涂多次,层与层之间应进行预干燥。对于多次喷涂的涂层,应在上一次喷涂的膜表面干燥时进行下一次喷涂。

### 2.3.3 涂层固化温度

通常情况下,涂层固化温度为150~180℃,具体涂层固化条件应根据零件大小、形状、基体材料做调整,并与基材热处理温度相适应,否则会影响零件的机械性能。建议按照“高温时间较短,低温时间较长;零件厚重时间长,轻巧时间短”的原则,借助工艺试验获得适合的固化参数。对于加热干燥的涂层,若达不到其所需的干燥条件,会大大降低涂层的力学性能和化学性能;若温度超过涂层所需干燥条件范围,涂料中树脂易会老化、涂层变

暗。

## 2.4 表面预清理

通过工艺实践,我们推荐喷砂前后的粗糙度为:喷砂前的 $R_a$ 小于1.6,喷砂后的 $R_a$ 为: $0.8 < R_a < 2.6$ 。为提高基体表面的活性和表面积,在喷涂作业前通常会对基体表面进行净化和粗化,以增加热喷涂层与基体的结合强度和改善涂层的内应力分布状况。粗化一般选用干喷白刚玉,白刚玉的自锐性好,砂砾有棱角,冲击基体表面能得到尖锐的峰谷状表面,有利于涂层与基体结合。作业时,施工现场选用砂子的颗粒度及喷射压力需与待喷涂基体材料的硬度相适应。对于最大厚度为50 $\mu\text{m}$ 的涂层,干喷砂砂子颗粒度一般选用80~120目。

喷砂处理后的零部件必须用丙酮或其他有机溶剂超声清洗或毛刷刷洗,除去嵌在表面上的砂粒,避免用手直接接触,防止零件在移动过程中被玷污。清洗后的零件应在尽可能短的时间内喷涂,超过12h应重新用有机溶剂清洗一遍,保持喷砂面清洁。

## 2.5 喷涂作业

### 2.5.1 喷涂距离及角度

为确保涂层厚度均匀一致,在作业时喷枪前端与被涂物应保持距离的恒定,匀速往复运行。针对该涂层的工艺,喷涂距离控制在10~15cm为宜。喷涂距离太近,不仅容易产生流挂,影响涂层均匀性,且易吹凉热喷涂零件导致涂层疏松,如图1所示;喷涂距离太远,则料雾粒子在大气中运行时间长,稀释剂挥发太多,涂膜表面易粗糙,如图2所示。喷涂时喷枪应与被涂表面呈70°~90°角,运行时保持平行,才能使喷涂距离恒定,保证涂膜均匀。

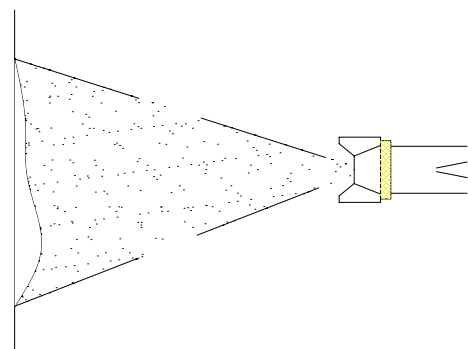


图1 喷涂距离过近

Fig.1 Coating space too near

### 2.5.2 压缩空气调节

正确的喷涂气压是膜层质量的关键。一般情况下,选用0.1~0.2MPa空气压力进行喷涂作业。压力增大,涂料喷出量增加,但超过一定限量,则会减少。压力增大时,喷雾图形幅宽增加,但超过一定限量,图形中心部位有变窄直至断开的倾向;反之,压力较小,图形幅度会

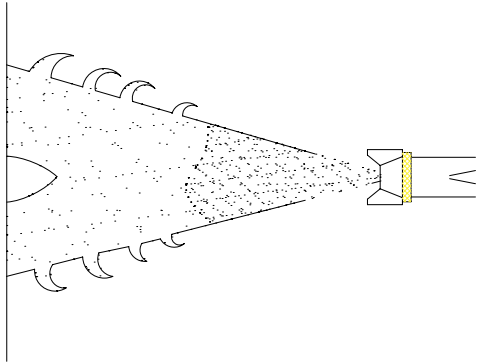


图2 喷涂距离过远  
Fig.2 Coating space too far

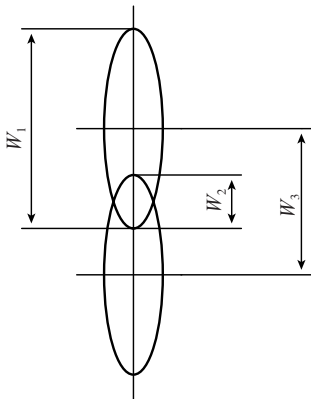


图3 喷雾图形的搭接  
Fig.3 Intersection of spraying area

表3 喷涂图形搭接推荐表

喷雾图形形状	重叠宽度	搭接间距
椭圆形	1/4	3/4
橄榄型	1/3	2/3
圆形	1/2	1/2

减小,且中心部位会增厚。压力高,料雾粒子细,但料雾分散多,涂料损失大;反之,料雾粒子粗,涂膜表面粗糙,会产生桔纹、针孔等缺陷。

### 2.5.3 喷雾图形搭接

喷涂作业时,必须使前后喷雾图形相互搭接,才能使涂膜均匀一致,如图3所示。搭接宽度应视喷雾图形的形状不同而各有差异。控制相互搭接的宽度,可以控制涂膜厚度的均匀性。一般情况下,按表3中推荐的搭接宽度进行喷涂,可获得平整的涂膜。

### 2.5.4 喷涂次数

通过少量多次喷涂完成较厚涂层的喷涂作业,有助于膜层溶剂的彻底挥发,降低涂层起泡、组织疏松等问题的发生。例如:如果把一次喷涂和干燥划分为一个工作单元,针对工艺厚度为0.06mm的涂层,一般分4~8个喷涂工作单元完成。

## 2.6 不合格涂层的处理

不合格涂层应通过喷砂或机械方法清理干净,再按照原工艺流程重新进行加工。固化后涂层不合格的零件,无法进行涂层修复。

## 2.7 涂层补充加工

由于涂层是热喷涂层,表面粗糙,对于外形尺寸有较高形位公差或表面光度要求的零部件,需要通过精加工加以保证。现有试验数据显示,涂层经过机械加工处理后表面光度有较大提高,如涂层加工前粗糙度 $R_a$ 为1.2~1.6,铣削加工后涂层粗糙度 $R_a$ 降低为0.3~0.8。目前,本公司采用车削和铣削的方法加工此类涂层,具体工艺参数应针对零部件个体,借助试验获得。

## 3 涂层质量检验

### 3.1 外观检验(100%)

涂层颜色必须一致、均匀、光滑,无小孔、划痕、凸泡、异物等缺陷。

### 3.2 厚度检验(100%)

#### 3.2.1 零件尺寸检验

涂层厚度必须满足图样要求。零件表面清理前及涂覆周期结束后的尺寸差即为涂层厚度。

#### 3.2.2 涂层厚度检验

根据零件基体材料的不同,可以选用磁性或电涡流方法测量涂层厚度。涂层厚度检查可以采用厚度测量仪进行。

### 3.3 随附试件评价工艺符合性

针对工艺符合性评估,采用的是随附试件的形式,辅助监控操作过程。试件最好选用零件,也可以选用与零件材料相同、形状相似的试件,但涂覆面的表面粗糙度和精度(尺寸公差、圆度、圆柱度、平行度、平面度等)应与零件相同,试件加工工序与零件相同。涂覆周期结束时,随附试件需包含3个分区,每个分区至少有 $3\text{cm}^2$ ,分别用于表示初始表面状态、表面清理后的状态(即喷砂表面)、涂层表面。通过对随附试件3个区的检验,可以得到超出喷砂后粗糙度高点的真实厚度,并可核实是否与加工工艺一致。

### 3.4 附着力检验

对于新的基体材料,应进行此项检验。在涂后的试片上,试验是依照GB/T 9286—88做划格试验,然后贴抗剥强度 $\geq 6\text{N/cm}$ 的胶带。将胶带撕下后,涂层外观应符合标准的0级或1级。

## 4 结束语

采用本文工艺制得的碳氟固体润滑涂层经过200h

(下转第82页)

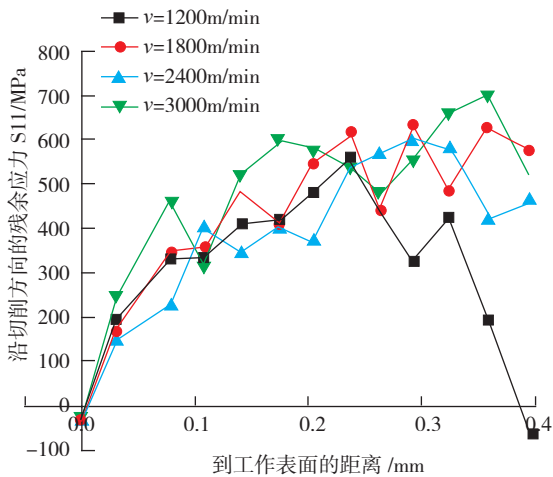


图4 切削速度对工件表层残余应力S11的影响

Fig.4 Effect of cutting speed on residual stress of machined surface

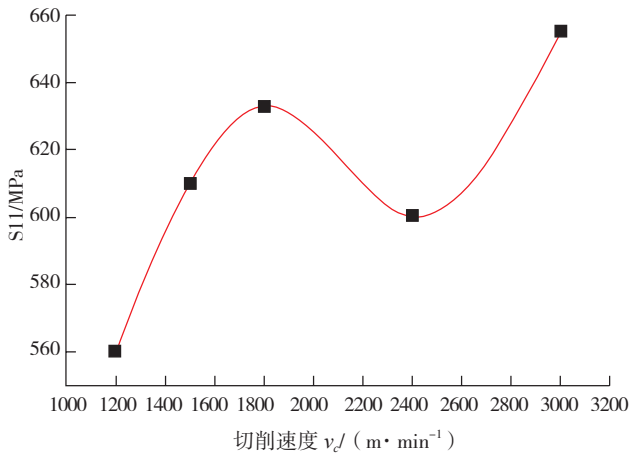


图5 切削速度对工件表层最大残余应力的影响

Fig.5 Effect of cutting speed on maximum residual stress of machined surface

最大残余压应力呈增大趋势。

#### 4 结论

在高速干切削过程中,随着切削速度的增大工件表层的残余拉应力增大,残余压应力的幅值总体上呈增大趋势。而工件内部的压应力随切削速度的增大有向内部深入的趋势,即残余压应力层的增大。另外工件内部的残余压应力幅值也随切削速度的增大而增大,有利于提高工件的抗疲劳性能,提高工件的表面质量。这为广泛应用与航空航天的高温合金材料的切削工艺研究提供了理论依据。

#### 参考文献

[1] Sasahara H. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45% C

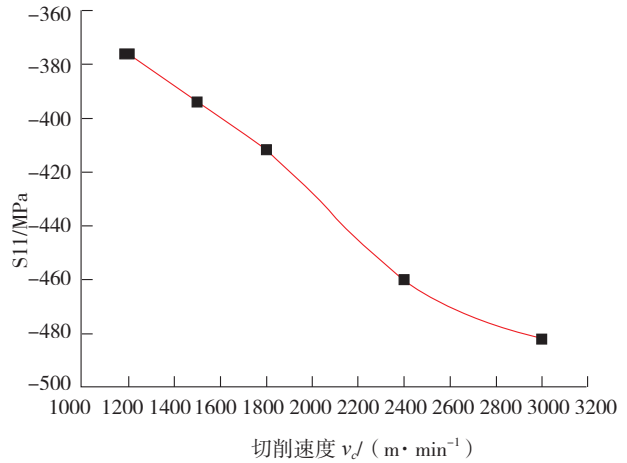


图6 切削速度对工件内部最大残余压应力的影响

Fig.6 Effect of cutting speed on internal maximum compressive residual stress

steel. Machine Tools Manufacture,2005,45: 131-136.

[2] Dudzinski D. Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. Journal of Materials Processing Technology, 2011,211:1590-1598.

[3] Ihara R. Prediction of residual stress distributions due to surface machining and welding and crack growth simulation under residual stress distribution. Nuclear Engineering and Design,2011, 241:1335-1344.

[4] Dias M. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96:225-233.

[5] Shet C, Deng X. Residual stresses and strains in orthogonal metal cutting. Machine Tools Manufacture, 2003, 43: 573-587.

[6] Bäker M. Finite element simulation of high-speed cutting forces. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176: 117-126.

[7] 刘志峰,张崇高,任家隆.干切削加工技术与应用.北京:机械工业出版社,2005.

(责编 深蓝)

(上接第 78 页)

出厂寿命考核和温度变化考核,无明显磨损,基本满足产品设计要求。自 2008 年本公司采用本工艺以来,尚未发生由于涂层质量问题引起的零部件返厂返修。

该涂覆工艺在航空航天等军工领域,及其他机械行业的精密配合件上有一定的推广意义。利用涂层的润滑性能,在中速低负荷状态下,与润滑油脂配合使用,可以防止配合件的咬合和磨损,有效地维持设计间隙,并可延长零部件使用寿命。

#### 参考文献

[1] 薛群基,陈建敏. 粘结固体润滑涂层的研究及其应用 // 中国机械工程学会. 1999 年第二届表面工程国际会议论文集. 北京: 中国机械工程学会, 1999:13-18.

[2] 李国英. 表面工程手册. 北京: 机械工业出版社, 1997.

(责编 夏宛)