

# 涡轮泵浮动环 4~8 $\mu\text{m}$ 聚四氟乙烯涂层的喷涂技术研究

竺士伟

首都航天机械公司

**摘 要:** 通过数据选材、数学模型、测厚程序、特性试验、误差分析、参数组合和实际验证的研究,“深入”挖掘喷涂过程的数字内涵,优选最佳配方,并“浅出”为一组简易的技术控制参数,将经验性的喷涂技艺提升为数据化的喷涂制造技术,实现 4~8  $\mu\text{m}$  聚四氟乙烯涂层的可重复性生产。

**关键词:** 聚四氟乙烯; 涂层; 制造技术

**中图分类号:** V432

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2004)01-0027-05

## 1 引言

某型号发动机涡轮泵的浮动环,要求在石墨环内孔喷涂聚四氟乙烯涂层,设计原要求为静电喷涂,涂层厚度 4~8  $\mu\text{m}$ ,基本工况为低摩擦启动和短时间耐 300℃ 高温。喷涂向来以手工技艺见长,但是凭手工技艺喷涂 4~8  $\mu\text{m}$  的超薄涂层,可重复性是难以实现的。实现可重复性的技术途径,唯有将经验性的喷涂技艺提升为数据化的喷涂制造技术,即遵循制造技术的新理念,提炼科学、精准和可传递的技术数据,并转化为合理、简明和可操作的技术参数,实现可重复性生产。研究大纲可简述为:数据选材、数学模型、测厚程序、特性试验、误差分析、参数组合和实际验证。

## 2 数据选材

静电喷涂工艺对所采用的树脂粉末,有两个基本要求。一是粒度一般为  $10^0 \sim 10^1 \mu\text{m}$  数量级,过粗影响质量,过细则不安全;二是在烧结成膜

时具有良好的熔融流动性。聚四氟乙烯树脂的熔融粘度,在加工温度 380℃ 时仍高达  $10^{10} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,即在熔点(327℃)以上也基本上不流动。所以  $10^0 \sim 10^1 \mu\text{m}$  数量级粒度的聚四氟乙烯树脂粉末,不可能通过熔融流动而形成薄膜或涂层,因此不适于静电喷涂工艺。但工业上采用乳液聚合的方法,可制备树脂粒度为  $10^{-1} \mu\text{m}$  数量级的聚四氟乙烯分散液。当粒度降至  $10^{-1} \mu\text{m}$  数量级时,高熔融粘度的聚四氟乙烯树脂,同样能形成表面光滑的薄膜或涂层,因此选用树脂粒度为  $10^{-1} \mu\text{m}$  数量级的聚四氟乙烯分散液,作为喷涂的基本材料是可行的。聚四氟乙烯分散液的 20000 倍电子显微镜图像如图 1 所示,经测算其树脂粒度为 0.2~0.4  $\mu\text{m}$ 。

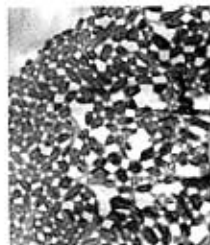


图 1 聚四氟乙烯分散液电子显微镜图像

收稿日期: 2003-09-20; 修回日期: 2003-11-19。

作者简介: 竺士伟(1944—),男,研究员,研究领域为工程塑料、复合材料、特种涂层等高分子材料工程技术。

3 数学模型

描述喷涂过程的数学基础是质量守恒和针阀的流量特性，喷涂的数学模型可表述如下：

$\delta \propto Q T G / S$

$\delta$ : 涂层厚度 (mm)

$Q$ : 喷射液流量 (mm<sup>3</sup>/sec)

$T$ : 喷涂总时间 (sec)

$G$ : 分散液固体含量 (%)

$S$ : 喷涂辐射面积 (mm<sup>2</sup>)

$\therefore Q \propto d C P / f(\eta)$

$T = t \pi D = 60 n / v$

$S = \pi L^2 \operatorname{tg} \alpha^2$

$d$ : 喷嘴直径 (mm)

$C$ : 阀针-喷嘴间隙

$P$ : 喷涂气压 (MPa)

$f(\eta)$ : 运动粘度函数

$t$ : 单位长度累计喷涂时间 (sec/mm)

$D$ : 工件内圆直径 (mm)

$n$ : 工件旋转圈数

$v$ : 旋转装置的转速 (rpm)

$L$ : 工件-喷枪的距离 (mm)

$\alpha$ : 喷射流锥半角 (°)

$\therefore \delta \propto d C P t D G / f(\eta) L^2 \operatorname{tg} \alpha^2 \propto d C P n G / f(\eta) v L^2 \operatorname{tg} \alpha^2$

$n_1 / n_2 = D_1 / D_2$

喷涂的数学模型为喷涂的技术要素构建了一个数字框架，其细分如表 1 所示。

表 1 技术数字细分表

数字	涂层均匀性优化趋势		依技术积累简化设定	特性要素试验
d	流量适度低	喷嘴直径适度小	0.4mm 进口美术喷枪	
C		阀针与喷嘴间隙适度小	阀针从零间隙左旋的度数	C / $\delta$ 试验
P		喷涂气压适度低	$\leq 0.2$ MPa	P / $\delta$ 试验
$\eta$		运动粘度适度		$\eta / \delta$ 均匀性试验 $\eta /$ 表面粗糙度试验
n	喷涂圈数适度多即每圈厚度适度薄			按 P.C / $\delta$ 推算
G	分散液固体含量适度低			G / 表面粗糙度试验
v	旋转装置的转速适度		~75 rpm	
L	工件与喷枪距离适度大		设定为~150 mm	
$\alpha$	喷射流锥半角适度大		将喷嘴帽拧到底	

4 测厚程序

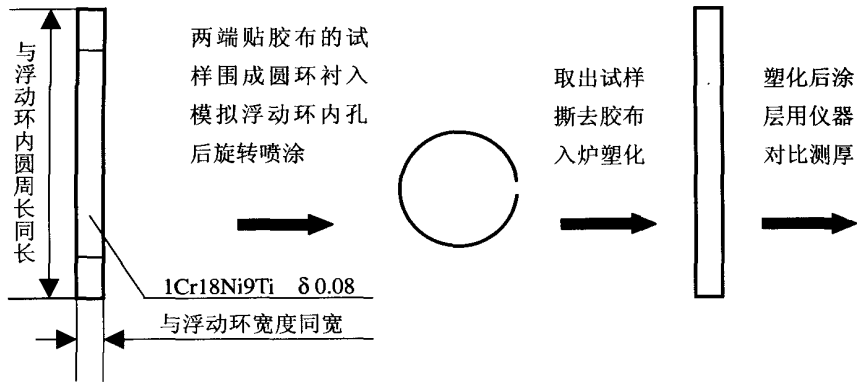


图2 间接测厚程序示意图

5 特性试验

5.1 PTFE 分散液的配方特性试验

配方特性试验结果如表2所示。

表2 不同配方的试验结果

配方	60%PTFE 分散液	40% PTFE 分散液 +适量表面活性剂	40%PTFE 分散液
运动粘度 (mm <sup>2</sup> /s)	10.0	7.9	3.2
涂层厚度偏差 (μm/6~8μm)	~0	~0	宽度方向一侧易偏厚 ≥1
200× 显微图像			

由表2可见：

(1) 40% PTFE 分散液的运动粘度仅为 3.2 mm<sup>2</sup>/s，在旋转干燥的过程中易出现一侧偏厚 ≥1μm 的现象。在 40% PTFE 分散液中加入适量表面活性剂，可将其运动粘度提高至 7.9 mm<sup>2</sup>/s，从而有效改善涂层在宽度方向的均匀性。

(2) 60% PTFE 分散液的运动粘度为 10.0 mm<sup>2</sup>/s，有利于涂层在宽度方向的均匀性，但是从

涂层的 200×显微图像可见，其表面粗糙度较差，不利于低摩擦启动的工况要求。

综上所述，显然 40% PTFE 分散液+适量表面活性剂为喷涂液配方的最佳选择。

5.2 阀针—喷嘴间隙和喷涂气压与涂层厚度的特性试验

阀针—喷嘴间隙和喷涂气压与涂层厚度的特性试验结果如图 3 所示，喷涂液配方为 40% PTFE 分散液+适量表面活性剂，喷涂对象为内孔直径  $\phi 52$  的典型测厚试样。

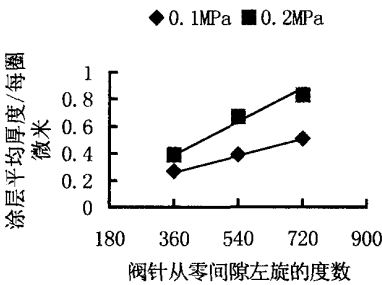


图 3 阀针—喷嘴间隙和喷涂气压对涂层厚度的影响

由图 3 可见，流量随阀针-喷嘴的间隙量和喷涂气压而递增，相应的涂层厚度也随之增加，而工件每旋转一圈的涂层平均厚度，其相应数据为优选组合喷涂的技术参数提供了依据。喷涂气压为 0.1MPa 时，阀针-喷嘴间隙与涂层厚度呈良好的线性关系。

6 误差分析

6.1 仪器误差

PIH-6 光学比较仪的仪器误差为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

6.2 试样误差

间接测厚试样不锈钢带在自身长度的范围内，其厚度偏差为  $\leq 1 \mu\text{m}$ 。

间接测厚试样不锈钢带表面和产品石墨环内孔表面的粗糙度，其轮廓算术平均偏差  $Ra$  分别为  $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$  和  $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。因此对石墨环内孔  $\mu\text{m}$  级的超薄涂层，按不锈钢带试样确定的喷涂圈数应适当增加，以补偿轮廓谷深所消耗涂料量的差异。

6.3 操作误差

喷涂圈数  $n$  以旋转夹具的红色标记读圈为准，因此在读圈的起、终点的内圆表面，局部的偏差是  $n-1$  与  $n$  圈或  $n$  与  $n+1$  圈之差，即喷涂 1 圈的涂层厚度。显然按特性试验的结果合理选择喷涂圈数，是把握涂层圆周方向均匀性的关键。合理的喷涂圈数应使每圈的喷涂厚度薄至  $10^{-1} \mu\text{m}$  数量级，这样涂层在圆周方向局部的厚度偏差值，同样可精确地控制在  $10^{-1} \mu\text{m}$  数量级。

7 参数组合

综合上述特性试验及误差分析，4~8  $\mu\text{m}$  聚四氟乙烯涂层的喷涂技术参数，其设定依据如表 3 所示。

表 3 技术参数组合的设定依据

技术参数名称	设 定 依 据
聚四氟乙烯固体含量	按材料特性试验结果(表 2)设定为 40%。
表面活性剂含量	按材料特性试验结果(表 2)适量设定。
喷涂气压	从喷枪特性曲线(图 3)优选线性特征较佳的喷涂气压 0.1MPa。
阀针与喷嘴的间隙	按操作误差的分析从喷枪特性曲线(图 3)优选阀针/喷嘴间隙即阀针左旋度数，使每一圈的喷涂厚度薄至 $10^{-1} \mu\text{m}$ 数量级。
喷涂圈数	计算圈数 = 目标值 $6 \mu\text{m}$ + 每 1 圈喷涂厚度； 按试样误差的分析为弥补试样与产品粗糙度的差异，适当增加喷涂圈数。
喷枪喷嘴直径	按技术积累简化设定(表 1)，选购市售小规格如 0.4mm 的进口美术喷枪。
喷嘴与工件表面距离	按技术积累简化设定(表 1)，即 $\sim 150\text{mm}$ 。
旋转喷涂装置的转速	按技术积累简化设定(表 1)，即 $\sim 75\text{rpm}$ 。

