

基于完全析因设计的 KDF4/AF4 成型机组滤棒得率提高分析

王坤明<sup>1</sup>;刘杰<sup>1</sup>;窦峰<sup>2</sup>;韩勇<sup>1</sup>;厉昌坤<sup>1</sup>;朱占营<sup>1</sup>;闫鲁<sup>1</sup>;郑金和<sup>1</sup>

1 山东中烟工业公司, 济南市高新区新区科航路 2006 号, 邮编 250104

2 南通醋酸纤维有限公司技术中心, 南通市钟秀东路 27 号, 邮编 226008

**摘要:** 成型机是将烟用丝束卷制成滤棒的设备。KDF4/AF4 是德国虹霓公司生产的新一代高速滤棒成型机组, 最高加工速度可达 600 米/分钟。选择螺纹辊速比 ( $V_2/V_1$ )、预张力辊压力 ( $P_0$ )、丝带宽度为试验因素, 按照完全析因试验设计要求完成全部试验。分析试验结果显示利用南纤 3.0Y35000 丝束加工滤棒时, 优化工艺参数为: 螺纹辊速比 ( $V_2/V_1$ ): 1.48; 预张力辊压力  $P_0$ : 0.5 (bar); 丝带宽度: 宽 (20-22cm)。采用优化工艺参数后, 可以使滤棒硬度均值提高 2%; 目标吸阻滤棒重量降低 0.004 克; 目标吸阻滤棒得率提高约 0.68%。

**关键词:** 完全析因试验; KDF4/AF4 机组; 滤棒得率

成型机是将烟用丝束(以下简称丝束)卷制成滤棒的设备。KDF4/AF4 是德国虹霓公司生产的新一代高速滤棒成型机组, 最高加工速度可达 600 米/分钟。KDF4 是采用“PROTOS”刀头设计的滤棒卷制分切设备, AF-4 是其前道丝束开松设备。垂直放置的螺纹对辊组成 AF4 丝束伸展区。在伸展区内集束单丝得到分离, 卷曲形成的丝束紧密网络结构得以铺展, 但是这种短时、超高速网络结构铺展往往伴随着内部应力的非均衡特性。紧接着丝束通过松弛区, 松弛区为消除丝束网络内不均衡应力提供平衡时间和空间。在松弛区内还设置有增塑剂喷洒装置, 可以有效提高滤棒的硬度, 便于滤棒分切后形成的滤嘴与烟支卷接。最终施加了增塑剂并且充分展宽的丝束通过一个集束轮收拢, 在送丝喷嘴的牵引作用下, 填充入滤棒卷制分切设备—KDF4 中。由于丝束开松成型过程中采用了多项专利设计, 如“U”形开松系统<sup>[1]</sup>以及增塑剂喷嘴施加系统<sup>[2]</sup>等, 德国 HUNI 公司宣称 KDF4/AF4 机组可以在 600 米/分钟的超高速条件下, 保障滤棒加工质量, 提高滤棒得率。本文主要是对 KDF4/AF4 机组在吸阻质量稳定性、滤棒产品得率进行初步的研究探讨。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设备、仪器及材料

选用规格为 3.0Y35000 丝束 (南通醋酸纤维有限公司生产)、26.5mm\*30g\*5000m 的成型盘纸 (四川恒丰纸业)、三醋酸甘油酯 (济南华阳公司)。

KDF4/AF4 成型机组 (德国 HUNI 公司)、QTM 滤棒性能综合测试台 (英国 Cerulean 公司)、30cm 钢板直尺 (南昌航天现代科教仪器厂)、秒表 (上海秒表厂)。

### 1.2 试验设计

试验分为两个步骤。第一步用于分析试验因素对滤棒吸阻  $cv$  和滤棒硬度等质量因素的影响; 第二步用于分析试验因素对目标吸阻滤棒重量的响应。第二步没有采用第一步中滤棒重量数据进行分析的原因, 是由于考虑到增塑剂对滤棒重量的不确定影响, 其次在于实际制作中的滤棒吸阻不可能恒定, 无法确定一个滤棒重量比较的基准。所以必须通过第二步试验, 制作不添加增塑剂的滤棒特性曲线方式的获得滤棒重量数据。

#### 1.2.1 试验因子对滤棒吸阻 $cv$ 和滤棒硬度的响应试验

在 KDF2/AF2 机型上, 有研究指明需对不同规格丝束设定对应螺纹辊速比 ( $v_2/v_1$ )<sup>[3]</sup>。生产实践表明第三空气开松器处的丝带宽度(以下简称丝带宽度)是保证滤棒硬度的重要指标, 同时它还会对丝束松弛状况产生影响。近年来预张力辊压力  $P_0$  对滤棒质量稳定性<sup>[4]</sup>和对得率<sup>[5]</sup>的影响也越来越受到重视。有必要将这些因素综合起来考虑, 所以最终在此次 KDF4 试验中, 选定了螺纹辊速比 ( $V_2/V_1$ )、预张力辊压力  $P_0$ 、丝带宽度为试验因素。

本部分试验采用的方法是完全析因试验设计方法, 又叫 2k 试验设计,  $K$  表示试验因素, 每个因素只有两个水平。这些试验因素可以是数值型变量也可以是分类型变量<sup>[6]</sup>。响应变量为满足质量要求前提下的滤棒重量最小化。质量要求又可以细分为滤棒吸阻  $cv$  最小化、滤棒硬度最大化。我们使用美国 JMP 公司的 JMP 软件完成这样的 3 因素和 3 响应变量的试验设计和分析, 为了更细致的考察试验因素与响应变量之间



的关系，人为增加了两次中心点的试验处理。根据试验分析和模拟获得优化工艺控制参数，并在实际生产验证的基础上最终完成优化目标。试验设计见表 1。

| 试验处理 | P0 (bar) | V2/V1 | 丝带宽度 |
|------|----------|-------|------|
| 1    | 0.5      | 1.28  | 宽    |
| 2    | 0.5      | 1.28  | 窄    |
| 3    | 0.5      | 1.48  | 宽    |
| 4    | 0.5      | 1.48  | 窄    |
| 5    | 0.6      | 1.38  | 宽    |
| 6    | 0.6      | 1.38  | 窄    |
| 7    | 0.7      | 1.28  | 宽    |
| 8    | 0.7      | 1.28  | 窄    |
| 9    | 0.7      | 1.48  | 宽    |
| 10   | 0.7      | 1.48  | 窄    |

注释：丝带宽度“宽”对应宽度 20-22cm

丝带宽度“窄”对应宽度 16-18cm

### 1.2.2 滤棒吸阻特性曲线的响应试验

这部分试验是根据第一步试验所得到优化工艺参数的基础上做两组试验，这两组实验的吸阻设定值为目标吸阻的上偏和下偏处，每组各取 30 支滤棒，通过数学回归，将滤棒特性曲线计算出来，把目标吸阻带入方程得到滤棒重量后进行数据统计分析。



完全析因试验表

表 2

| 试验处理 | V1/VKDF | P0 ( bar ) | V2/V1 | 丝带宽度 |
|------|---------|------------|-------|------|
| 1    | 1.04    | 0.5        | 1.28  | 宽    |
|      | 1.14    |            |       |      |
| 2    | 1.04    | 0.5        | 1.28  | 窄    |
|      | 1.14    |            |       |      |
| 3    | 1.04    | 0.5        | 1.48  | 宽    |
|      | 1.14    |            |       |      |
| 4    | 1.04    | 0.5        | 1.48  | 窄    |
|      | 1.14    |            |       |      |
| 5    | 1.05    | 0.6        | 1.38  | 宽    |
|      | 1.15    |            |       |      |
| 6    | 1.05    | 0.6        | 1.38  | 窄    |
|      | 1.15    |            |       |      |
| 7    | 1.08    | 0.7        | 1.28  | 宽    |
|      | 1.18    |            |       |      |
| 8    | 1.08    | 0.7        | 1.28  | 窄    |
|      | 1.18    |            |       |      |
| 9    | 1.08    | 0.7        | 1.48  | 宽    |
|      | 1.18    |            |       |      |
| 10   | 1.08    | 0.7        | 1.48  | 窄    |
|      | 1.18    |            |       |      |

注释：丝带宽度“宽”对应宽度 20-22cm

丝带宽度“窄”对应宽度 16-18cm

### 1.3 取样方法

第一步试验每次试验处理取样规则：当滤棒吸阻靠近目标值后且稳定运行 2 分钟后开始取样，每次处理包含连续 10 组滤棒样品。每间隔一分钟取一组样品，每组 10 支滤棒。一共 10 次处理合计 1000 支滤棒数据进行统计分析。

第二步试验每次处理包含 2 组滤棒样品，这两组样品的吸阻为目标吸阻的上偏和下偏处，每组各取 30 支滤棒。

### 1.4 测定方法

#### 1.4.1 滤棒测试：

滤棒检测实验室的检测的大气条件符合 ISO 3402 的规定，温度 (22.2) °C，相对湿度 (60.5) %，大气压对气体体积流量无影响。测试之前，样品将在中心实验室平衡 48 小时。平衡后的样品在 Cerulean 公司的 QTM 综合测试台顺序完成滤棒水分、重量、圆周、吸阻的测试，硬度在 QTM7 单机完成，所有测试数据通过 RS232 口全部传输至计算机。

#### 1.4.2 KDF4 设备其他固定工艺条件：

螺纹辊压力 (1.2-1.5bar)；关闭送丝喷嘴前面舌头气源；送丝喷嘴供气阀门开度 (19-22%)。

#### 1.4.3 滤棒控制指标：

滤棒标准值：吸阻 280mmH<sub>2</sub>O(+25, -20)；圆周 24.20mm 0.12；硬度 83% 5；长度 100mm。

### 1.5 统计方法



使用美国 JMP 公司的 JMP 软件完成 3 因素完全析因设计。其中预张力辊 P0 压力和螺纹辊速比 V2/V1 为数值型变量，由于在高速开松过程中丝带宽度不恒定，不能用确定的数值表示，所以将丝带宽度确定为分类型变量。详见表 1 和表 2。

## 二、结果与讨论

JMP 软件中全析因试验分析模块，将表 1 和表 2 获得的滤棒试验数据导入软件表单中，对滤棒吸阻 CV 影响因素、滤棒硬度均值影响因素、目标吸阻滤棒重量影响因素和综合影响因素进行系统分析。最终达到通过调节试验因素水平，提高滤棒得率的目的。

### 2.1 滤棒吸阻 CV 影响因素分析

以 100 个吸阻 cv 数据为响应变量，采用标准最小二乘法，对试验进行分析。图 1 为吸阻 cv 整体模型杠杆率图，显示了数据与模型的拟合效果。杠杆率图中见红线为回归方程线，上下各有两条虚线为 95% 置信曲线。如果 95% 置信曲线与水平参考线相交，则该效应显著；如果曲线不相交，则（在 5% 水平上）不显著。由于图 1 中水平参考线未与 95% 置信曲线相交，所以试验因素对模型效应不显著，也就是说说明试验的 3 个因素以及 3 因素内部的交互作用均对吸阻 cv 没有显著影响。

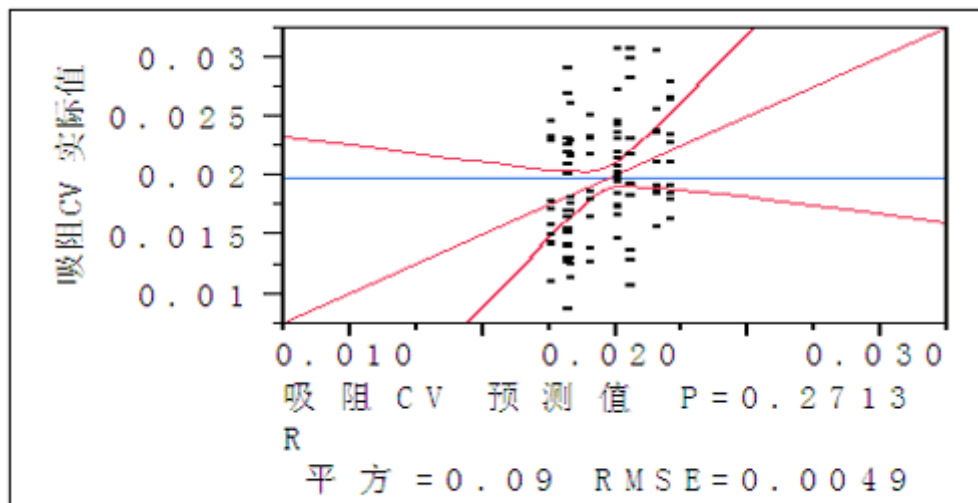


图 1 吸阻 cv 整体模型杠杆率图

关于模型显著与否，还可以通过模型的参数估计表来检验。如表 3 所示，项为命名的估计参数，第一个参数始终为截距。螺纹辊速比（V2/V1）、预张力辊压力 P0、丝带宽度三因素的主效应及它们之间的交互效应都纳入考察。其中最重要的一项为 p 值  $> |t|$ 。如果该值小于 0.05 通常被视为项显著证据。从表 3 看出除了截距项外没有一项的 p 值  $> |t|$  小于 0.05，说明试验的 3 个因素以及 3 因素内部的交互作用均对吸阻 cv 没有显著影响。这也验证前面吸阻 cv 整体模型杠杆率图的结论，即模型效益不显著。



吸阻 cv 线性模型的参数估计

表 3

| 项  | 估计        | 标准误差     | t 比率  | p 值 >  t |
|--|-----------|----------|-------|----------|
| 截距   | 0.0172064 | 0.008175 | 2.10  | 0.0380*  |
| v2/v1                                      | -0.000604 | 0.005423 | -0.11 | 0.9116   |
| 丝带宽度 (mm) [宽]                              | -0.000457 | 0.000485 | -0.94 | 0.3481   |
| (v2/v1-1.38)*丝带宽度 (mm) [宽]                 | -0.001893 | 0.005423 | -0.35 | 0.7279   |
| P0 (bar)                                   | 0.005432  | 0.005423 | 1.00  | 0.3191   |
| (v2/v1-1.38)*(P0 (bar) -0.6)               | -0.087542 | 0.054229 | -1.61 | 0.1099   |
| 丝带宽度 (mm) [宽]*(P0 (bar) -0.6)              | 0.0067757 | 0.005423 | 1.25  | 0.2147   |
| (v2/v1-1.38)*丝带宽度 (mm) [宽]*(P0 (bar) -0.6) | 0.0896286 | 0.054229 | 1.65  | 0.1018   |

## 2.2 滤棒硬度均值影响因素分析

以 100 个滤棒硬度均值数据为响应变量，采用标准最小二乘法，对试验进行分析。图表 2 为滤棒硬度均值整体模型杠杆率图，图中水平参考线与 95%置信曲线相交，可以说明模型效应显著。具体的影响因素可以通过滤棒硬度均值线性模型的参数估计表来查看。

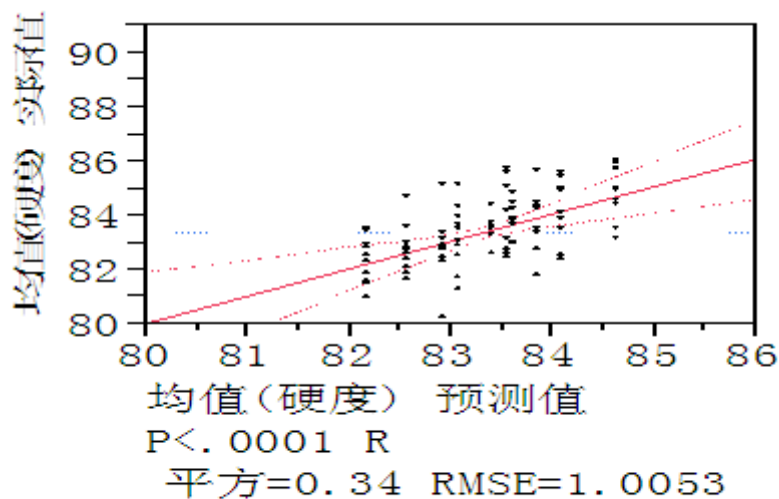


图2 硬度均值整体模型杠杆率图

从表 4 看出截距项、螺纹辊速比 (V2/V1)、丝带宽度、(V2/V1-1.38)\*丝带宽度、(V2/V1-1.38)\*(P0-0.6)的 p 值 > |t| 都小于 0.05，说明上述 5 个因素对硬度均值有显著影响。其中丝带宽度项 p 值 > |t| 达到极显著的水平，这也印证了绪论中“生产实践表明第三空气开松器处的丝带宽度是保证滤棒硬度的重要指标”的论述。



硬度均值线性模型的参数估计

表 3

| 项  | 估计        | 标准误差     | t 比率  | p 值 >  t |
|--|-----------|----------|-------|----------|
| 截距   | 80.014725 | 1.694236 | 47.23 | <.0001*  |
| v2/v1                                      | 2.91625   | 1.12391  | 2.59  | 0.0110*  |
| 丝带宽度 (mm) [宽]                              | 0.4572    | 0.100526 | 4.55  | <.0001*  |
| (v2/v1-1.38)*丝带宽度 (mm) [宽]                 | -2.74125  | 1.12391  | -2.44 | 0.0166*  |
| PO (bar)                                   | -1.05625  | 1.12391  | -0.94 | 0.3498   |
| (v2/v1-1.38)*(PO (bar) -0.6)               | -33.6875  | 11.2391  | -3.00 | 0.0035*  |
| 丝带宽度 (mm) [宽]*(PO (bar) -0.6)              | -1.49875  | 1.12391  | -1.33 | 0.1857   |
| (v2/v1-1.38)*丝带宽度 (mm) [宽]*(PO (bar) -0.6) | -18.9125  | 11.2391  | -1.68 | 0.0958   |

### 2.3 目标吸阻滤棒重量影响因素分析

表 1 只能得到接近目标吸阻滤棒的重量数据，为了比较目标吸阻滤棒重量，必须重新按照表 2 的要求再作一遍试验。将每次试验处理获得的 60 支滤棒数据拟和为一条滤棒得率线，横坐标为滤棒吸阻，纵坐标为滤棒重量。由于滤棒重量和吸阻容易受到环境温度和滤棒圆周的影响，所以通过标准转换公式，将滤棒重量和吸阻分别转换为 6% 含水率标准重量和 24.20 圆周标准吸阻，坐标也同时更改为标准吸阻和标准重量。图 3 是根据表 2 中第一次试验处理获得的数据，绘制的滤棒特性曲线图，类似的滤棒特性曲线图一共有 10 张。利用目标吸阻与滤棒得率线之间的交点数据，也就是滤棒重量数据进行分析比较。

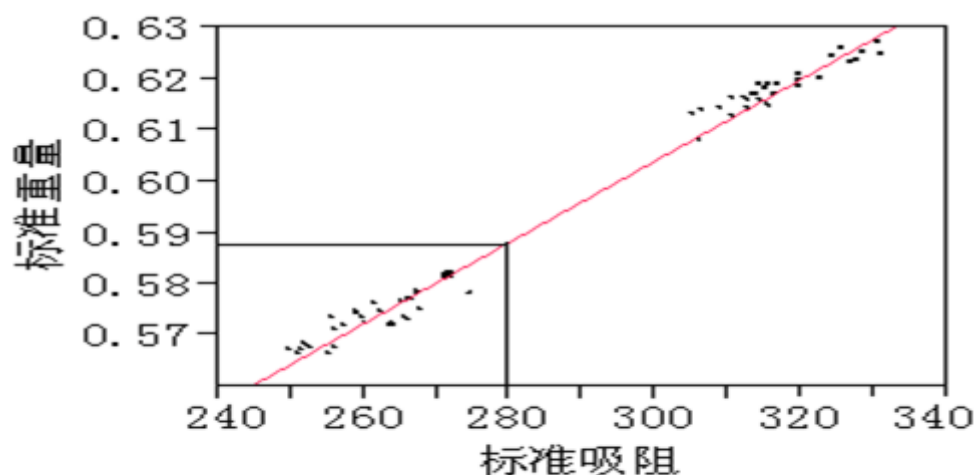


图3 第一次处理对应的滤棒特性曲线

图 4 为目标吸阻滤棒重量整体模型杠杆率图，图中水平参考线与 95% 置信曲线相交，所以模型效应显著。从表格 5 所有因素的 p 值 > |t| 都小于 0.05，说明上述 3 因素以及因素内部的交互作用对目标吸阻滤棒重量均值有显著影响。



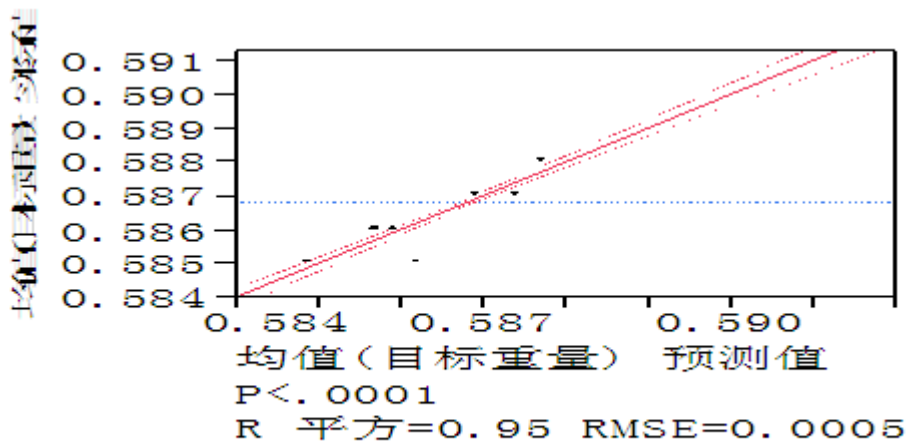


图4 目标吸阻滤棒重量整体模型杠杆率图

| 项   | 估计      | 标准误差     | t 比率   | p 值 >  t |
|---|---------|----------|--------|----------|
| 截距  | 0.60315 | 0.000786 | 767.55 | <.0001*  |
| v2/v1                                     | -0.0075 | 0.000521 | -14.39 | <.0001*  |
| 丝带宽度 (mm) [宽]                             | -0.0006 | 4.663e-5 | -12.87 | <.0001*  |
| (v2/v1-1.38)*丝带宽度 (mm) [宽]                | 0.0025  | 0.000521 | 4.80   | <.0001*  |
| P0 (bar)                                  | -0.01   | 0.000521 | -19.18 | <.0001*  |
| (v2/v1-1.38)*(P0 (bar)-0.6)               | 0.125   | 0.005213 | 23.98  | <.0001*  |
| 丝带宽度 (mm) [宽]*(P0 (bar)-0.6)              | 0.005   | 0.000521 | 9.59   | <.0001*  |
| (v2/v1-1.38)*丝带宽度 (mm) [宽]*(P0 (bar)-0.6) | -0.075  | 0.005213 | -14.39 | <.0001*  |

## 2.4 综合分析预测

前面是单独就滤棒吸阻 cv、吸阻滤棒硬度均值、目标吸阻滤棒重量进行了分析和比较，对于实际生产而言，通常要求 3 个响应变量综合考虑。JMP 软件提供了一个很好的多响应变量预测刻画器和意愿刻画图工具。刻画器会显示每个试验变量的预测迹，如图 5 和 6 响应变量与试验因素交集格中的黑色线。预测迹是当一个变量发生变化而其它变量保持当前值不变时的预测响应。“预测刻画器”将在更改试验变量的值时重新计算迹和预测响应（实时）。在意愿刻画图中，每组试验条件输出结果的意愿涉及到 3 个响应。滤棒吸阻 cv 响应最小化，吸阻滤棒硬度均值最大化，目标吸阻滤棒重量响应最小化。将整体意愿定义为每个响应的意愿的几何平均数，软件将自动模拟出综合意愿最佳的试验因素水平。模拟结果如图 5 所示，在使用 3.0Y35000 丝束加工滤棒时候，优化工艺为螺纹辊速比 (V2/V1) :1.48;预张力辊压力 P0: 0.5 (bar)；丝带宽度：宽 (20-22cm)。对应的吸阻滤棒硬度均值为：84.7%；目标吸阻滤棒重量均值为：0.586 克。为了比较工艺差异对 3 个响应变量的影响，再次利用预测刻画器和意愿刻画图工具，将目前济南卷烟厂使用的虹霓调试工艺参数输入软件，模拟出对应的吸阻滤棒硬度均值为：82.7%；目标吸阻滤棒重量均值为：0.590 克，具体结果见图 6。

优化工艺与虹霓调试工艺模拟结果对比显示：采用优化工艺可以使滤棒硬度均值提高 2%；目标吸阻滤棒重量降低 0.004 克；目标吸阻滤棒得率提高约 0.68%，滤棒吸阻 cv 降低 0.002。



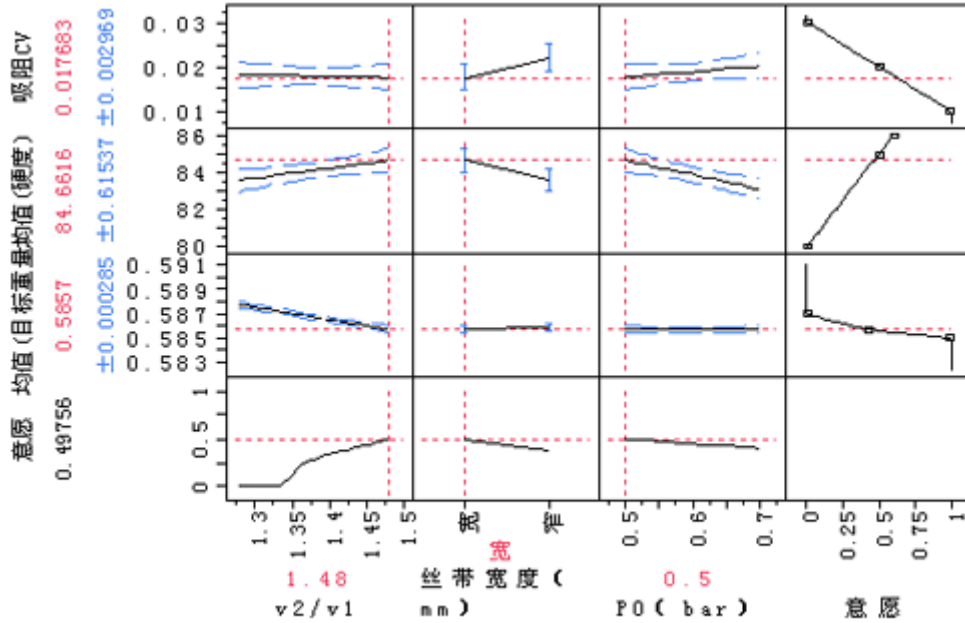


图5 优化工艺预测刻画器及意愿图

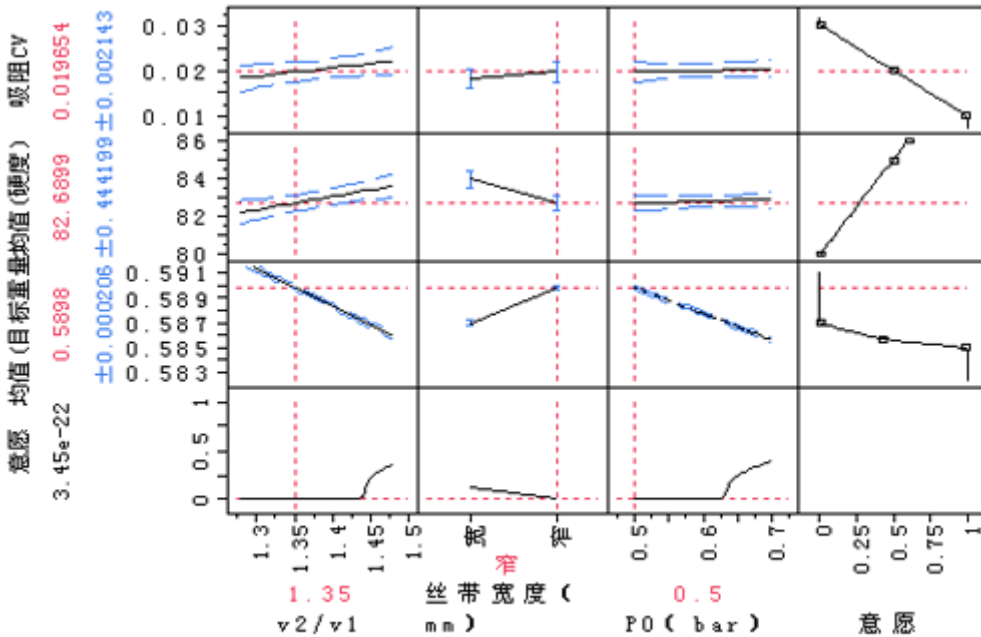


图6 虹霓调试工艺预测刻画器及意愿图

### 3 结论

KDF4/AF4 机组在固定螺纹辊压力 (1.2-1.5bar)、关闭送丝喷嘴前面舌头气源、确保送丝喷嘴供气阀门开度 (19-22%) 前提下, 利用南纤 3.0Y35000 丝束加工滤棒时, 优化工艺参数为: 螺纹辊速比 ( $V_2/V_1$ ): 1.48; 预张力辊压力  $P_0$ : 0.5 (bar); 丝带宽度: 宽 (20-22cm)。采用优化工艺可以使滤棒硬度均值提高 2%; 目标吸阻滤棒重量降低 0.004 克; 目标吸阻滤棒得率提高约 0.68%。

### 参考文献

Chehab et al. Patent No. US 6, 263, 882 B1, 2001





- 2 Pehmoller et al. EP 1389 433 A1, 2004
- 3 古尚开, 李桂珍, 等. 2. 7Y31000 型醋纤丝束成型滤棒的技术研究[J]. 烟草科技 2000, (11):3-4
- 4 常记恒 等 滤棒成型工艺参数与质量稳定性的关系[J]. 烟草科技 2007, (1)
- 5 窦峰, 蔡小宏. AF-2 开松机预张力辊压力设定对制造滤棒吸阻稳定性及得率的影响研究[J]. 安徽烟草 2008, (8)
- 6 Douglas C. Montgomery. Design and analysis of experiments 6th edition[M] john wiley & sons, inc 2005

