

DOI: 10.19333/j.mfkj.2018010321207

# 基于响应面分析法的人发漂白铁媒预处理工艺优化

廖喜林 刘让同 朱方龙 胡泽栋 耿长军

(中原工学院 服装学院 河南 郑州 450007)

**摘要:** 铁媒预处理是黑色人发双氧水漂白中极为重要的一环,其影响因素众多,为寻找最佳处理工艺,分析各单因素及相互作用对人发漂白的影响,并对处理工艺进行优化。以草酸用量、硫酸亚铁用量、pH值、处理时间、处理温度为因素,以白度和断裂强力为指标,采用响应面分析法对人发铁媒预处理工艺进行优化。通过单因素实验,以Box-Behnken中心组合实验原理和响应面分析法研究各自因素及其相互作用,并对各因素的影响程度进行分析。结果表明:最佳铁媒预处理工艺为:硫酸亚铁9.5 g/L,草酸3 g/L,pH值1,时间95 min,温度70℃。在此铁媒预处理工艺下,漂白后人发的白度值为63.66,断裂强力为68.20 cN。

**关键词:** 黑色人发; 铁媒预处理; 漂白; 工艺优化; 响应面分析法

中图分类号: TS 195.4

文献标志码: A

## Process optimization of bleaching with iron pretreatment based on response surface analysis

LIAO Xilin, LIU Rangtong, ZHU Fanglong, HU Zedong, GENG Changjun

(College of Clothing, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450007, China)

**Abstract:** Black human hair bleaching pretreated with iron as mordant is a very important method. In order to optimize the treatment process, the influence factors and the processing technology were studied. The oxalate dosage, ferrous sulfate dosage, pH value, treatment time and treatment temperature were used as factors, whiteness and breaking strength were taken as indexes to optimize the human hair iron mordant pretreatment process by response surface analysis. Through single-factor experiments, Box-Behnken central combination experimental principle and response surface analysis of their respective factors and their interactions, as well as the extent of the impact of various factors were analyzed. The results showed that the best iron mordant pretreatment process were: ferrous sulfate 9.5 g/L, oxalic acid 3 g/L, pH value 1, 95 min temperature 70℃. In this iron media pretreatment process, white hair after bleaching L value was 63.66, breaking load was 68.20 cN.

**Keywords:** black hair; iron mordant pretreatment; bleaching; process optimization; response surface analysis

我国对假发的利用有着悠久的历史,早在春秋时期就得以盛行,到汉朝时期更是根据《周礼》制定了发型与发饰<sup>[1]</sup>。随着现代科学技术的发展和世界多民族文化的交流碰撞,人们对假发的颜色不再局限于几种天然人发颜色,追求更加绚丽多彩的颜

色,假发制品的颜色越来越多。天然人发是制备假发的最佳材料,具有健康舒适和美观等优点,但是我国人发大多为黑色,因此用于制作其他颜色的假发,需要经过一系列的物理化学加工处理来改善外观。目前一般采用的加工过程是:剥鳞→铁媒预处理→漂白→染色→定形<sup>[2-4]</sup>,其中铁媒预处理是十分关键的一个环节。现有研究表明:普通的氧化漂白只能去除人发中的一部分色素,漂白效果不佳,达不到使用要求,而通过金属离子的络合催化可以提高双氧水的分解效率<sup>[5-6]</sup>,特别是亚铁离子对蛋白质纤

收稿日期: 2018-02-02

第一作者简介: 廖喜林, 硕士生, 主要从事纺织印染助剂开发和应用的科研工作。通信作者: 刘让同, E-mail: ranton@126.com。

维中的黑色素具有很好的吸附作用,同时又能实现对双氧水的定向催化分解,防止双氧水的无效分解导致对纤维强力性能的破坏<sup>[7-9]</sup>。由于铁媒络合催化过程复杂,受多种因素及其交叉作用的影响,且有多个评价指标,目前对于人发漂白铁媒预处理工艺的研究并不多,且没有系统化,因此选择适合的设计方法对其工艺进行优化显得十分重要。本文在单因素实验的基础上,以白度和强力为指标,应用响应面分析法优化人发漂白铁媒预处理工艺,旨在全面、系统地研究铁媒预处理的最佳工艺,为高档人发产品的染整加工提供理论指导和技术支持。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料及仪器

#### 1.1.1 材料

未经烫染的黑色人发;过氧化氢(30%,洛阳市化学试剂厂);无水焦磷酸钠(天津市科密欧化学试剂科技公司);次氯酸钠溶液(天津市科密欧化学试剂科技公司);硫酸亚铁(天津市科密欧化学试剂科技公司);草酸(天津市风船化学试剂科技公司)。

#### 1.1.2 主要仪器及设备

SE202F 型电子天平(上海奥豪斯仪器上海有限公司);XMTD-4000 型电热恒温水浴锅(上海科恒实业发展有限公司);SF600 型 Date-Color 测色配色仪(美国国际电子仪器公司);5582 型纺织材料试验机(美国英斯特朗公司);pH510 台式 pH 计(EUTECH 优特公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 人发脱色工艺流程

氯化→脱氯→ $\text{Fe}^{2+}$  媒介处理→稀硫酸清洗→漂白→稀冰醋酸泡洗。

#### 1.2.2 预处理实验方案

以铁媒预处理时的草酸用量、硫酸亚铁用量、处理液 pH 值、处理温度、处理时间为影响因素,具体实验方案为:草酸 2~6 g/L,硫酸亚铁 6~10 g/L,温度 40~80 °C,处理时间 60~120 min, pH 值 1~5,浴比 1:40。实验分为以下 2 步:

第 1 步:单因素实验。通过改变铁媒预处理时草酸、硫酸亚铁的用量和处理液的 pH 值、处理温度、时间,对铁媒预处理后的人发纤维进行漂白处理,并对漂白后的头发进行断裂强力测试和白度  $L$  值测试,根据测试结果确定各因素的最佳取值。

第 2 步:在完成各单因素最佳取值以后,根据 Box-Behnken 的中心组合设计原理,确定试验设计的水平,用响应面软件设计响应面分析试验<sup>[10]</sup>。最终以断裂强力、白度  $L$  值为响应值指标进行响应面

分析,并确定人发漂白铁媒预处理的最佳工艺,其中中心组合实验因素及水平设计见表 1。

表 1 中心组合试验设计中的因素及水平

水平	草酸质量浓度/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	硫酸亚铁质量 浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH 值	温度/ °C	时间/ min
- $\alpha$	1	5.0	0	40	50
-1	2	6.5	1	50	65
0	3	8.0	2	60	80
+1	4	9.5	3	70	95
+ $\alpha$	5	11.0	4	80	110

### 1.3 人发性能测试

#### 1.3.1 白度测试

以 CIELAB 的  $L$  值表征人发的漂白效果,由于 Date-Color 测色配色仪测定人发白度  $L$  值时不能像测定织物一样对折几层,且由于漂白使用的人发量小,不能像测定纱线那样以相同厚度缠绕在一个硬纸片上。所以在测白度  $L$  值时是将人发放入如饮料瓶盖大小容器中,放满压实以取得相同的厚度,每组试样测量 3 次,取平均值。

#### 1.3.2 断裂强力测试

在 YG026H 型单纤维强力仪上测试漂白后人发试样的强力。测试参数为:试样夹持长度 50 mm,拉伸速度 50 mm/min,每个试样测试 10 根,取平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验

#### 2.1.1 草酸对人发性能的影响

固定硫酸亚铁用量和处理液 pH 值、处理温度和时间,对经过清洗的黑色人发在草酸用量不同的情况下预处理,处理时间 90 min,温度 65 °C, pH 值 3,硫酸亚铁 8 g/L。之后进行酸洗和漂白,研究草酸用量对铁媒预处理时人发性能影响。草酸对人发铁媒预处理性能的影响见图 1。

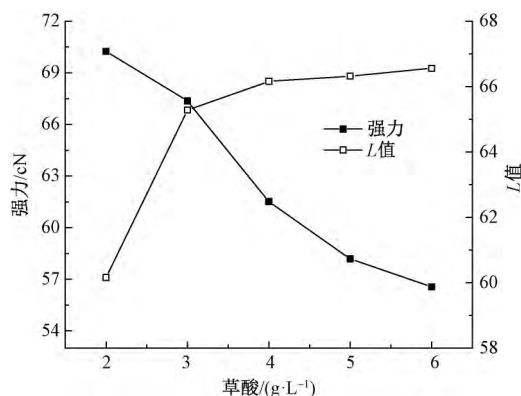


图 1 草酸用量对漂白后人发白度和强力的影响

由图 1 可以看出:在草酸质量浓度较低时,白度

随着草酸质量浓度增大而快速增加,同时强力明显下降,但是当草酸质量浓度达到3 g/L以后,白度的变化速率开始下降。这是因为在草酸质量浓度较低时,随着其质量浓度增加,进入人发内部与色素粒子发生络合的 $Fe^{2+}$ 随之增加,从而促进双氧水的分解和色素的氧化褪色反应。另一方面,在漂白过程中,色素粒子与人发表面都受到双氧水分解造成损伤,所以人发白度快速增加,强力下降。当草酸质量浓度过量时,色素与 $Fe^{2+}$ 的结合会因草酸的质量浓度提高、pH值下降而引起的带有正电荷的蛋白质分子对 $Fe^{2+}$ 的电荷排斥力的增大而减弱。综合考虑强力和白度,确定草酸质量浓度为3 g/L最合适。

### 2.1.2 硫酸亚铁用量对人发性能的影响

固定草酸用量和处理液pH值、处理温度和时间,对经过清洗的黑色人发在硫酸亚铁用量不同的情况下预处理,处理时间90 min,温度65℃,pH值为3,草酸4 g/L。之后进行酸洗和漂白,研究硫酸亚铁用量对铁媒预处理人发性能的影响。硫酸亚铁用量对铁媒预处理人发性能的影响见图2。

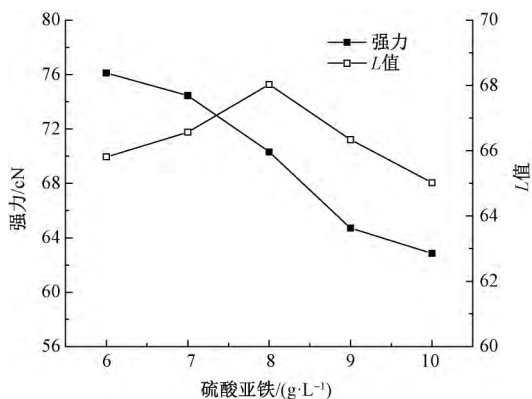


图2 硫酸亚铁用量对漂白后人发白度和强力的影响

由图2可以看出:在硫酸亚铁质量浓度较小时,白度随着质量浓度增加而增加,强力则一直减弱,但是当硫酸亚铁质量浓度增加到8 g/L以后,白度减少,强力减弱加快。这是因为 $Fe^{2+}$ 浓度较低时, $Fe^{2+}$ 主要是被色素粒子吸收,从而促进双氧水的分解和人发的氧化漂白,但是在吸收饱和以后,过量的 $Fe^{2+}$ 会聚集在人发表面,导致双氧水进入人发内部之前无效分解,导致人发表层强烈破坏,因此强力减弱会在此阶段加快,而白度下降。综合考虑白度和强力,确定硫酸亚铁质量浓度为8 g/L时最适合。

### 2.1.3 pH值对人发性能的影响

固定硫酸亚铁、草酸用量和处理温度和时间,对经过清洗的黑色人发在不同pH值的情况下预

处理,处理时间为90 min,温度65℃,草酸4 g/L,硫酸亚铁8 g/L,之后进行酸洗和漂白,研究处理液pH值对铁媒预处理人发性能的影响,结果见图3。

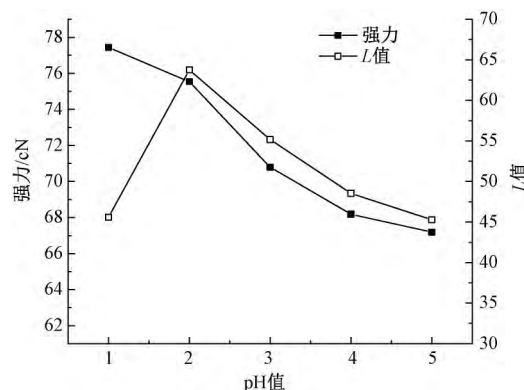


图3 pH值对漂白后人发白度和强力的影响

由图3可以看出:随着pH值的增大,白度值先增后减,而强力一直在减弱。这是因为在pH值较低时,双氧水较稳定不易分解,漂白效果差,而酸水解导致人发受损,所以强力减弱。随着pH值增加,双氧水分解加快,漂白效果提高,白度增加,但是当pH值过高时,会导致双氧水在进入人发内部之前发生无效分解,导致白度降低,强力减弱加速。综合考虑白度和强力,确定pH值为2时最合适。

### 2.1.4 温度对人发性能的影响

固定硫酸亚铁、草酸的用量、处理时间、pH值,对经过清洗的黑色人发在不同温度进行预处理,处理时间为90 min,pH值3,草酸4 g/L,硫酸亚铁8 g/L,之后进行酸洗和漂白,研究处理温度对铁媒预处理人发性能的影响,结果见图4。

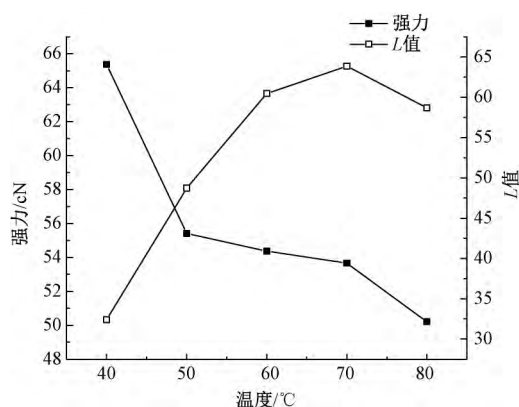


图4 温度对漂白后人发白度和强力的影响

由图4可以看出:温度对白度和强力的影响较大,在低温时随着温度的增加白度快速增加,强力快速减弱,但是温度较高以后,白度增加和强力减弱速率都会减少,而在70℃以后,白度又会下降,强力快速减弱。这是因为温度较低时,随着温度升高,人

发的孔隙会打开,  $\text{Fe}^{2+}$  可以更好地进入人发内部, 促进双氧水的分解和漂白效果, 所以白度增加, 强力减弱。随着温度进一步升高, 也会加速人发内部  $\text{Fe}^{2+}$  的解析, 导致进入人发内部的  $\text{Fe}^{2+}$  总量减少, 而人发表面的  $\text{Fe}^{2+}$  增加, 会使得双氧水在人发表面提前分解, 所以白度下降, 强力减弱加速。综合考虑白度和强力, 确定温度为  $70\text{ }^\circ\text{C}$  最合适。

### 2.1.5 时间对人发性能的影响

固定硫酸亚铁、草酸的用量、处理温度、pH 值, 对经过清洗的黑色人发预处理不同时间, 处理温度  $65\text{ }^\circ\text{C}$ , pH 值 3, 草酸  $4\text{ g/L}$ , 硫酸亚铁  $8\text{ g/L}$ , 之后进行酸洗和漂白, 研究处理时间对铁媒预处理时人发性能的影响, 结果见图 5。

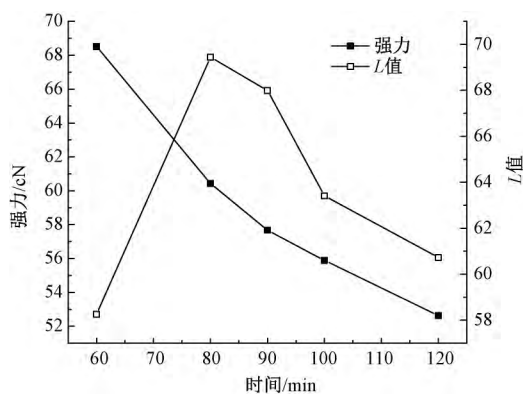


图 5 时间对漂白后人发的白度和强力影响

由图 5 可以看出: 随着处理时间的增加, 人发的强力下降, 先快后慢, 而白度是先增后减。这是因为前期随着时间的增加, 色素粒子对  $\text{Fe}^{2+}$  的吸附在增加, 促进双氧水分解, 从而增强了漂白效果, 所以白度增加, 强力快速下降。而随着时间进一步延长, 色素粒子对  $\text{Fe}^{2+}$  吸附达到饱和以后,  $\text{Fe}^{2+}$  可能产生氢氧化铁或者氢氧化亚铁沉积在人发上, 使得白度下降, 强力变化速率减弱。综合考虑白度和强力, 确定时间为  $80\text{ min}$  最合适。

## 2.2 响应面实验

### 2.2.1 实验设计

利用 Design Expert 8.0 软件, 根据 Box-Behnken 的中心组合设计原理, 以单因素实验中各因素最优值为中心, 得到 5 因素 3 水平共 50 个实验点的实验方案, 实验结果见表 2。

### 2.2.2 回归模型的建立和分析

利用 Design Expert 8.0 软件对表 5 实验数据进行分析, 建立二次响应面的回归模型, 获得人发漂白后的白度和强力对草酸用量、硫酸亚铁用量、处理液 pH 值、处理温度、处理时间等因素的初步二次回归拟合方程, 并进行回归方程方差分析和模型系数显著性检验分析, 结果如表 3、4 所示。

表 2 响应面分析方案及试验结果

编号	草酸 A/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	硫酸亚铁 B/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH 值 C	温度 D/ $^\circ\text{C}$	时间 E/ min	L 值	强力/ cN
1	1	6.5	3	50	65	48.26	53.58
2	1	9.5	1	70	95	61.86	70.37
3	3	6.5	3	70	65	50.02	54.67
4	2	8.0	2	60	50	55.26	61.28
5	3	6.5	3	50	95	49.73	58.76
6	2	5.0	2	60	80	57.09	60.65
7	3	9.5	1	70	95	64.47	68.47
8	2	8.0	2	60	80	58.35	61.30
9	2	8.0	2	80	80	59.46	60.76
10	2	8.0	2	60	80	57.33	61.33
11	3	6.5	1	70	65	60.32	64.65
12	3	6.5	3	70	95	52.53	54.31
13	3	9.5	3	50	65	47.89	55.13
14	1	6.5	3	50	95	47.14	53.52
15	3	9.5	3	70	95	51.62	54.03
16	3	9.5	1	50	65	60.15	65.31
17	2	8.0	2	60	110	54.87	53.61
18	2	8.0	0	60	80	62.31	77.53
19	1	9.5	3	50	65	47.89	56.57
20	1	9.5	3	70	65	49.17	53.84
21	1	9.5	3	50	95	48.97	55.87
22	3	6.5	1	70	95	63.12	66.04
23	3	9.5	3	70	65	49.03	52.74
24	3	9.5	3	50	95	49.33	54.86
25	2	8.0	2	60	80	55.02	60.30
26	1	6.5	3	70	95	51.87	52.88
27	2	8.0	2	60	80	55.11	58.24
28	2	8.0	2	60	80	55.15	58.33
29	1	6.5	1	70	65	61.68	63.88
30	2	8.0	2	40	80	49.85	57.01
31	3	6.5	1	50	65	60.07	56.57
32	1	9.5	1	50	95	59.79	56.01
33	2	8.0	4	60	80	41.73	50.31
34	1	6.5	1	50	65	58.37	66.84
35	1	6.5	1	50	95	58.03	66.32
36	5	8.0	2	60	80	46.38	58.77
37	3	6.5	1	50	95	60.93	64.58
38	1	9.5	3	70	95	52.39	52.47
39	3	9.5	1	70	65	61.19	65.03
40	2	8.0	2	60	80	56.74	60.84
41	2	8.0	2	60	80	56.69	60.39
42	2	8.0	2	60	80	57.03	60.77
43	4	8.0	2	60	80	56.21	59.79
44	3	6.5	3	50	65	51.3	54.33
45	3	9.5	1	50	95	59.96	67.64
46	1	6.5	1	70	95	62.98	66.39
47	1	9.5	1	70	65	62.34	66.62
48	1	9.5	1	50	65	60.11	68.31
49	2	11.0	2	60	80	56.77	60.21
50	1	6.5	3	70	65	51.53	54.96

表3 白度回归模型方差分析表

参数	平方和	自由度	均方	F 检验值	p-value Prob > F
模型	1 365.49	20	68.27	22.57	<0.000 1
A - 草酸	20.94	1	20.94	6.92	0.013 5
B - 硫酸亚铁	0.14	1	0.14	0.046	0.831 6
C - pH 值	1 186.57	1	1 186.57	392.31	<0.000 1
D - 温度	82.43	1	82.43	27.25	<0.000 1
E - 时间	5.34	1	5.34	1.77	0.194 2
AB	1.55	1	1.55	0.51	0.480 0
AC	0.021	1	0.021	6.947 × 10 <sup>-3</sup>	0.934 1
AD	4.74	1	4.74	1.57	0.220 5
AE	2.02	1	2.02	0.67	0.420 5
BC	3.42	1	3.42	1.13	0.296 5
BD	0.16	1	0.16	0.052	0.821 5
BE	1.07	1	1.07	0.35	0.557 4
CD	0.26	1	0.26	0.087	0.770 3
CE	0.078	1	0.078	0.026	0.873 5
DE	7.72	1	7.72	2.55	0.120 9
A <sup>2</sup>	24.35	1	24.35	8.05	0.008 2
B <sup>2</sup>	9.21	1	9.21	3.05	0.091 6
C <sup>2</sup>	15.28	1	15.28	5.05	0.032 4
D <sup>2</sup>	0.033	1	0.033	0.011	0.917 2
E <sup>2</sup>	0.16	1	0.16	0.052	0.820 9
残差	87.71	29	3.02	-	-
失拟数	77.32	22	3.51	2.37	0.122 1
误差	10.39	7	1.48	-	-
总和	1 453.20	49	-	-	-

表4 强力回归模型方差分析

参数	平方和	自由度	均方	F 检验值	p-value Prob > F
模型	1 456.07	20	72.80	9.23	<0.000 1
A - 草酸	0.013	1	0.013	1.689 × 10 <sup>-3</sup>	0.967 5
B - 硫酸亚铁	0.42	1	0.42	0.054	0.818 7
C - pH 值	1 265.06	1	1 265.06	160.36	<0.000 1
D - 温度	5.37	1	5.37	0.68	0.416 3
E - 时间	0.12	1	0.12	0.015	0.904 5
AB	1.81	1	1.81	0.23	0.635 6
AC	4.20	1	4.20	0.53	0.471 6
AD	0.083	1	0.083	0.011	0.919 0
AE	30.09	1	30.09	3.81	0.060 5
BC	6.12	1	6.12	0.78	0.385 8
BD	0.011	1	0.011	1.379 × 10 <sup>-3</sup>	0.970 6
BE	9.19	1	9.19	1.17	0.289 3
CD	33.19	1	33.19	4.21	0.049 4
CE	1.87	1	1.87	0.24	0.630 3
DE	1.83	1	1.83	0.23	0.633 8
A <sup>2</sup>	4.66	1	4.66	0.59	0.448 3
B <sup>2</sup>	2.77	1	2.77	0.35	0.558 1
C <sup>2</sup>	76.06	1	76.06	9.64	0.004 2
D <sup>2</sup>	2.56	1	2.56	0.32	0.573 2
E <sup>2</sup>	10.66	1	10.66	1.35	0.254 6
残差	228.78	29	7.89	-	-
失拟值	200.09	22	9.09	2.22	0.141 0
误差	28.69	7	4.10	-	-
总和	1 684.85	49	-	-	-

对回归模型做方差分析得出: 2 个模型的  $F$  检验值分别为 22.57,  $p$ -value < 0.000 1 和 9.23,  $p$ -value < 0.000 1, 说明该模型的拟合度非常高, 能够很好地分析和预测人发漂白效果随铁媒预处理工艺的变化情况。由这 2 个模型可知对响应值亮度作用显著的是  $C$ 、 $D$ 、 $A_2$ ; 对亮度作用不显著的是  $A$ 、 $C_2$ , 影响较小的是  $B$ 、 $E$ 、 $AB$ 、 $AC$ 。响应值强力作用显著的是  $C$ 、 $CD$ 、 $C_2$  不显著的是  $AC$ 、 $BC$ 、 $BE$ 、 $A_2$ 、影响较小的是  $A$ 、 $B$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $AB$ 、 $AD$ 、 $D_2$ 、 $B_2$ ; 而且还可知各因素对白度和强力影响的大小顺序分别为:  $pH$  值 > 温度 > 时间 > 草酸 > 硫酸亚铁、 $pH$  值 > 温度 > 硫酸亚铁 > 时间 > 草酸。

2 个模型的相关系数分别是  $R^2 = 0.963 4$  和  $R^2 = 0.953 9$ , 且都很接近于 1, 表明预测值和真实值之间高度相关, 基本可以用该模型代替真实试验点进行人发漂白铁媒预处理的最佳工艺的预测。同时, 失拟值作为检测模型精确性的依据, 而 2 个模型

失拟值的  $p$ -value 分别为 0.122 1 和 0.141 0, 都大于 0.05, 表示是不显著的, 因此可说模型和实际值之间吻合性好。RSM 软件对所得数据进行回归分析, 经软件对各因素回归拟合后, 分别得到白度和强力的回归方程:

$$L = 56.10 + 0.72 \times A - 0.059 \times B - 5.45 \times C + 1.44 \times D + 0.37 \times E - 0.22 \times AB - 0.03 \times AC - 0.38 \times AD + 0.25 \times AE - 0.33 \times BC - 0.07 \times BD + 0.18 \times BE - 0.09 \times CD + 0.49 \times CE + 0.49 \times DE - 0.87 \times A^2 + 0.54 \times B^2 - 0.69 \times C^2 - 0.03 \times D^2 + 0.07 \times E^2 \quad (1)$$

$$N = 57.90 + 0.02 \times A + 0.10 \times B - 5.62 \times C + 0.37 \times D + 0.54 \times E + 0.05 \times E + 0.24 \times AB + 0.36 \times AC - 0.05 \times AD + 0.97 \times AE - 0.44 \times BC + 0.02 \times BD - 0.54 \times BE - 1.02 \times CD - 0.24 \times CE + 0.24 \times DE + 0.38 \times A^2 + 0.29 \times B^2 + 1.54 \times C^2 + 0.28 \times D^2 - 0.58 \times E^2 \quad (2)$$

式中:  $L$  为白度  $L$  值;  $N$  为强力。

### 2.2.3 响应曲面分析与优化

根据所得的 2 个回归方程, 利用 Design Expert 8.0 软件分析, 得到不同因素间的响应曲面图, 如图 6 ~ 9 所示。

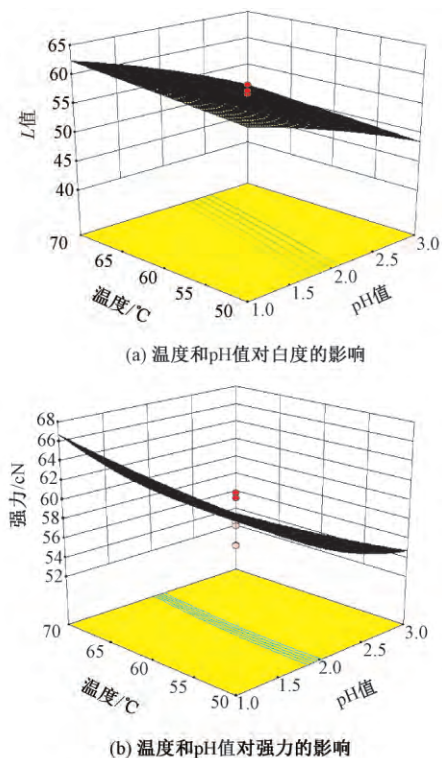


图 6 温度和 pH 值对白度、强力的综合影响

图中响应面的形状反映了因素显著性的大小, 响应面越陡, 显著性越大<sup>[11]</sup>。从图 6 可看出: 温度和 pH 值 2 个因素十分显著, 随着温度的升高, 白度会提高但是强力会下降, pH 值的增大白度和强力都会下降, 因为 pH 值的增大预处理液的碱性加强,  $Fe^{2+}$  离子会和水发生电离产生沉淀, 使得人发纤维对亚铁离子的吸收减少。从而减弱铁媒催化的作用。温度升高白度提高, 显然是由于随温度升高, 人发纤维膨化度提高, 增加了纤维内部空隙, 同时也增加了  $Fe^{2+}$  的动能, 从而有利于  $Fe^{2+}$  扩散进入纤维内部, 然而, 温度过高会导致  $Fe^{2+}$  的解吸。同时, 温度升高, 强力下降。从图 7 可以看出: 在草酸质量浓度比较低的时候, 其强力和白度随着草酸质量浓度增大而增加, 但是当草酸质量浓度大到 2 g/L 时, 强力开始下降, 这是因为草酸的水溶液呈酸性, 随着草酸质量浓度增大其水溶液的酸性加强。当草酸质量浓度为 3 g/L 左右时, 其白度随着草酸的质量浓度增大而减少。这是因为色素与  $Fe^{2+}$  的结合力和因草酸的质量浓度提高、pH 值下降而引起的带有正电荷的蛋白质分子对  $Fe^{2+}$  的电荷排斥力的增大相比要弱得多, 故此导致人发纤维对硫酸亚铁的吸附量下

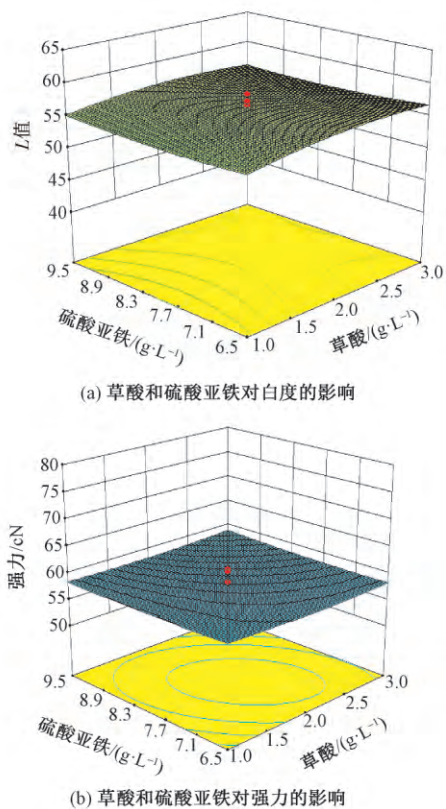


图 7 草酸和硫酸亚铁对白度和强力的综合影响

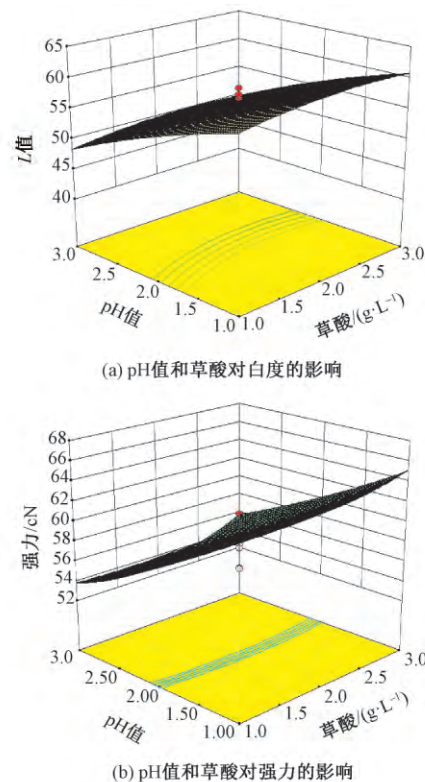
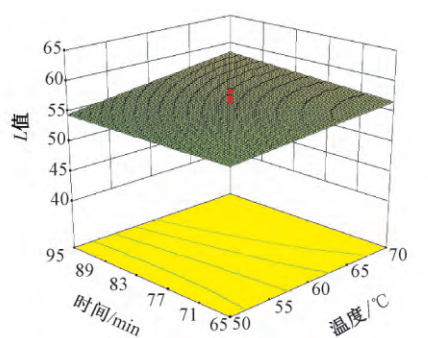
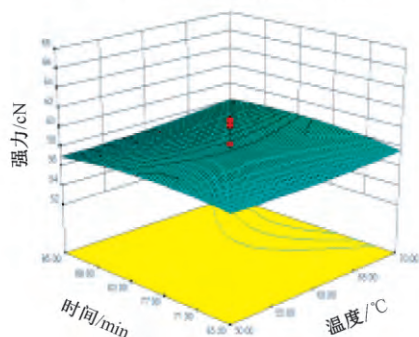


图 8 pH 值和草酸对白度、强力的综合影响

降。从图 8 可以看出: 随着预处理液的 pH 值增大, 白度和强力都在减少, 因为在弱酸性和中性条件下,  $Fe^{2+}$  易被氧化成  $Fe^{3+}$ , 形成一些有色不溶性的物质沉积在羽毛纤维表面。同时由于  $Fe^{2+}$  减少, 减



(a) 时间和温度对白度的综合影响图



(b) 时间和温度对强力的影响

图9 时间和温度对白度、强力的综合影响

弱了铁媒的催化作用。草酸的水溶液是酸性的,随着质量浓度的增加酸性加强,所以白度和强力都会先提高然后降低。从图9可以看出:随着预处理时间和温度的增加,白度和强力先加强然后降低。

根据响应面分析法预测的最佳工艺为,草酸质量浓度 3 g/L、硫酸亚铁质量浓度 9.5 g/L、温度 70 °C、pH 值 1、处理时间 95 min。为了证实预测结果,用上述工艺进行重复实验,测得人发纤维的白度  $L$  值为 60.31、强力为 64.58 cN。与预测值白度  $L$  值 63.66,强力 68.20 cN 对比,实测值与模型预测值接近,说明实验模型有效,回归方程为人发漂白铁媒预处理提供了一个合适的模型。

### 3 结论

①通过单因素实验,初步确定各因素对人发漂白铁媒预处理的影响规律,选取理想范围进行响应面实验及回归分析,确定了最佳人发漂白铁媒预处理工艺条件为:草酸质量浓度 3 g/L、硫酸亚铁质量浓度 9.5 g/L、温度 70 °C、pH 值 1、处理时间 95 min。

②响应面分析法运用到优化人发漂白铁媒预处

理工艺上是可行的,利用响应面分析法建立草酸质量浓度、硫酸亚铁质量浓度、温度、pH 值、处理时间与人发漂白后的白度和强力之间的回归模型,其关系呈高度显著,经实验验证预测值与实测值相差不大,说明此模型可以用于实际预测,具有一定的实际应用价值。

③通过单因素实验和响应面实验发现:草酸和硫酸亚铁的用量对漂白效果的影响较明显,处理温度和时间对漂白效果的影响相对较小,而且草酸和硫酸亚铁的用量超过一定数值之后,亚铁离子和人发黑色素粒子之间的相互结合会受到限制,使其对漂白效果的影响减弱,因此二者的用量不宜太大。

#### 参考文献:

- [1] 刘让同,李亮,朱雪莹,等. 发制品产品工艺阐释及发展趋势[J]. 天津纺织科技, 2017(1): 60-64.
- [2] 王怀芳,张传杰,朱平. 超声波在黑色人发漂白预处理中的应用研究[J]. 毛纺科技, 2017, 45(11): 32-36.
- [3] 李珂,蒋静,叶挺. 预处理条件对黑色人发漂白性能的影响[J]. 印染, 2017(19): 26-30.
- [4] ROBBINS B. Chemical and Physical Behavior of Human Hair [M]. Berlin: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [5] LARSSON B S. Interaction between chemicals and melanin [J]. Pigment Cell & Melanoma Research, 1993, 6(3): 127.
- [6] 黄方,詹怀宇. 金属离子对过氧化氢漂白的影响[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(4): 51-54.
- [7] 盛亮,杨淑蕙. 铁离子对过氧化氢催化分解的影响[J]. 黑龙江造纸, 2006, 34(2): 11-12.
- [8] OH K, PARK M, KANG T. Effect of mordant bleaching on the optical and mechanical properties of black human hair [J]. Coloration Technology, 2010, 113(9): 243-249.
- [9] IMAI T. The influence of hair bleach on the ultrastructure of human hair with special reference to hair damage [J]. Okajimas Folia Anatomica Japonica, 2011, 88(1): 1-9.
- [10] 赵玉萍,张娟,郭雅琳,等. 基于响应面分析法的超声波洗涤羽毛纤维工艺条件优化[J]. 纺织学报, 2012, 33(7): 24-30.
- [11] 刘嘉坤,张富强,陈广利,等. 响应面分析法优化亚麻籽油超临界  $CO_2$  萃取工艺[J]. 中国油脂, 2017, 42(2): 7-10.