

# 电化学协同洗护对霉变毛巾的高效抑制及参数优化

任泽华<sup>1</sup>, 杨青波<sup>2</sup>, 胡祝兵<sup>2</sup>, 刘建立<sup>1</sup>

(1. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏无锡, 214122;

2. 无锡小天鹅电器有限公司, 江苏无锡, 214035)

DOI:10.61369/CDCST.2025040014

**摘要:** 针对家庭棉质毛巾易滋生霉菌的现实问题, 以球孢枝孢霉为研究对象, 提出并构建了一种电化学协同洗护装置, 通过结合模拟洗涤与电极氧化双重作用, 实现对毛巾表面霉菌孢子的高效抑制。通过单因素分析明确了电流密度、反应时间与电解质浓度对抑菌效果的显著影响, 进而采用 Box-Behnken 响应面设计对电解参数进行优化, 建立了 Quadratic 二次回归模型, 验证结果表明该模型具有良好的拟合性, 可有效预测参数组合对抑菌率的影响。最终获得最优电解条件: 电流密度 96.27 mA/cm<sup>2</sup>, 反应时间 24.76 min, 电解质浓度 10.64 mmol/L, 此时抑菌率高达 99.91%。该研究为家用纺织品的霉菌防控提供了绿色高效的新路径, 并为抗菌技术在智能洗护设备中的应用奠定了理论基础。

**关键词:** 家庭毛巾; 球孢枝孢霉; 电化学协同洗护; 抑菌率; 抗菌技术; 智能洗护设备

**作者简介:** 任泽华, 研究生, 就读于江南大学纺织科学与工程学院, 主要从事纺织品微生物研究。

E-mail: 1599776101@qq.com。



任泽华

---

家庭毛巾独特的毛圈结构不仅容易藏匿微生物, 并且处于常温常湿的环境下, 使其成为了霉菌污染的重灾区<sup>[1,2]</sup>。其中, 球孢枝孢是一株能够在纯棉毛巾上生长并代谢产生纤维素酶、真菌色素和异味物质的霉菌<sup>[3]</sup>。因此, 选择球孢枝孢霉作为抗菌实验对象, 对家用纺织品的真菌防控具有重要意义。电化学高级氧化技术 (EAOP) 可以高效降解有机污染物, 使不能生化降解的有机物可生化降解或“燃烧”生成无污染的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sup>[4]</sup>, 并且不需要添加额外的化学试剂。但是, 目前针对棉纺织品霉菌污染的电化学处理, 以及对参与抑菌过程中各项电解参数的探讨尚十分缺乏。

因此, 本文搭建了以 Ti/IrO<sub>2</sub> 作为阳极材料, 不锈钢作为阴极材料的小型电化学反应装置。由于球孢枝孢霉在毛巾表面生长产生的微生物膜对孢子起到保护作用, 故加入模拟洗涤装置以破坏微生物膜, 将原本团聚在一起的孢子从纤维表面充分洗脱下来, 从而增加电极产生的活性基团与孢子的反应面积。然后以抑菌率为指标, 探究了电化学协同洗护处理中水温、电流密度、反应时间、电解质浓度对球孢枝孢霉的抑制效果。采用 Box-Behnken 设计探究了各电解参数间的潜在交互影响, 建立了以抑菌率为响应值的回归预测模型。最后通过响应面分析进行了参数优化, 获得并验证了以抑菌率最大目标值下的最终优化电解参数。该协同装置的搭建与电解参数的优化为实现普通棉纺织品抑菌技术产业化应用提供了可行性。

## 1. 实验

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料

测试菌种: 球孢枝孢霉 (*Cladosporium sphaerospermum*), 纯棉毛巾: 34 cm × 76 cm, 毛经细度: 29.2 tex, 地经细度: 36.4 tex, 毛经根数: 600 根/条, 地经根数: 720 根/条, 购于江苏康乃馨织造有限公司。

#### 1.1.2 仪器

NU-425-400S 型生物安全柜 (美国 Nuaire 公司), SU8100(Regulus8100) 型场发射扫描电子显微镜 (日本日立化学仪器有限公司), Hitachi HT-7800 型生物透射电子显微镜 (日本日立化学仪器有限公司), YG020B 型电子单纱强力机 (常州第二纺织机械有限公司)。

### 1.2 方案

#### 1.2.1 电化学协同洗护装置的设计

霉菌生长的毛巾表面附着一层微生物膜, 其能够保护内部的孢子免受外界环境的影响, 即阻碍电化学反应产生的活性氧或间接氧化剂与孢子发生反应。因此, 为了最大化发挥电极的作用, 特意加入模拟洗涤装置 (转速固定为 80 r/min)。霉菌污染毛巾随着滚筒在水中不断运动, 表面的微生物膜以及一部分孢子得以洗脱, 最终毛巾表面仅剩下顽固附着的孢子。原先团聚在一起的孢子被洗脱后散落

在水中，电化学反应产生的活性氧或间接氧化剂对孢子能够发挥最大的灭活作用。由于电极装置安装灵活，能够合理搭载在洗衣机中，而真实的洗涤环境比较复杂，电极材料需要选择具有良好的电化学稳定性和导电性能的环保型金属材料，同时需要具有较好的耐久性，以确保长时间使用后仍能维持其性能。通过前期研究，选择形稳电极作为电化学协同洗护装置中的电极。

其中，金属 Ti 具有高导电、耐腐蚀的优点，高空隙率导致电极表面积较大，增加了电极与电解质之间的有效接触面积，从而促进电化学反应的进行<sup>[5]</sup>。IrO<sub>2</sub> 具有很好的稳定性和抗氧化能力，较高的析氧电位对有机物能够起到电催化作用，因此，选择 IrO<sub>2</sub> 作为涂覆材料。通过定向磁控溅射技术制备 Ti/IrO<sub>2</sub> 高效复合材料，为提高电极的电化学性能以及使用寿命，向氧化铱涂层中添加硅元素以提升涂层的电化学稳定性，延长电极使用寿命。同时，钛基体表面引入锡-锑中间层，降低电极的界面电阻，提高电极的电化学性能。将 Ti/IrO<sub>2</sub> 高效复合材料作为电化学降解装置的阳极（有效面积：40.93 cm<sup>2</sup>），以不锈钢作为阴极材料（有效面积：40.93 cm<sup>2</sup>），极板间距为 2 mm。电化学协同洗护装置（长宽高为 65.8 cm × 23.2 cm × 26.9 cm），直流稳压电源提供电流。电极由无锡小天鹅电器有限公司提供，装置结构设计如图 1 所示，整体为亚克力材质。

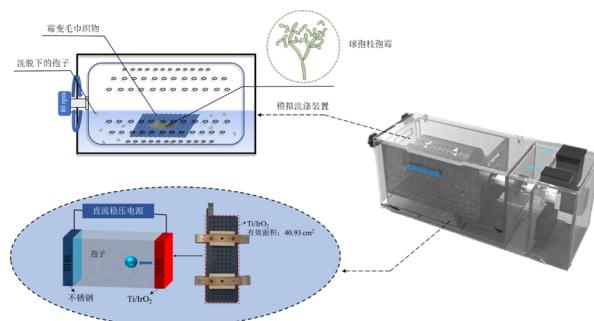


图 1 电化学协同洗护装置结构设计

### 1.2.2 电化学协同洗护装置的设计

由于周期短，在培养的过程中能够及时发现生长差异，且微量的碳源可以模拟毛巾在日常生活中的使用状态。因此在电化学协同洗护处理前准备霉变毛巾试样，将灭菌完的纯棉毛巾平铺在 0.5 % 葡萄糖培养基表面，提取 100 μL 孢子菌液均匀涂在毛巾表面，在温度为 28 °C，湿度为 85 % 条件下培养 3 天。

### 1.2.3 电化学协同洗护处理抑菌指标分析

参照李瑞青<sup>[6]</sup>的方法，统计每组实验得到的菌落数作为各实验条件下存活的菌数，以未经过电化学协同洗护处

理的霉变毛巾所洗脱下的活性菌数作为空白对照组，根据式（1）计算霉菌孢子的抑菌率，以评价电化学协同洗护处理对毛巾表面霉菌的抑制效果，所得结果均由 3 次独立重复实验（平均值 ± 标准偏差）表示。为避免菌落在培养基上生长密度过大影响计数的准确性，培养 2~3 d（此时菌落全部长出，且单个菌落容易辨识）后开始记录拍照。

$$S = \frac{N_0 - N_t}{N_0} \quad (1)$$

$S$ ：霉菌孢子抑菌率，%。

$N_0$ ：空白对照中活性菌落数，CFU/mL。

$N_t$ ：处理组中活性菌落数，CFU/mL。

### 1.2.4 微观形貌与纱线力学性能测试

样品表面形貌观察：用手术镊子分别从电化学协同洗护处理前后的毛巾中抽出纱线，将纱线裁剪至 0.5 cm，然后分别装入 2.5 % 戊二醛的 1.5 mL 离心管中，放入 4 °C 冰箱固定 12~24 h。测试前，取出纱线自然晾干，通过导电胶带粘贴于样品台上后喷金，采用场发射扫描电镜观察毛巾表面微观形貌。

球孢枝孢霉细胞结构观察：准备工作与样品表面形貌观察步骤一致。将对照纱线装入 2.5 % 戊二醛的 1.5 mL 离心管中，封口膜封口，干冰保存送往科学指南针机构进行检测。经过脱水、包埋及聚合、超薄切片、染色后，通过透射电子显微镜 80 KV 下观察细胞结构在电化学协同洗护处理前后产生的变化。

拉伸性能测试：用镊子抽出试样处理前后毛经纱线，通过电子单纱强力机测试纱线的力学性能，其中夹持长度为 40 mm，空白样、电化学协同洗护处理前后样分别测 10 次取平均值。

## 2. 结果与分析

### 2.1 单因素实验

以球孢枝孢霉的抑菌率为指标，在电化学协同洗护装置中开展单因素实验，分别探究温度、反应时间、电流密度、电解质浓度 4 个参数对实验结果的影响。在研究上述某一参数对抑菌率的影响时，其他参数被设置为常数保持不变，即水温为实验室常温（25 °C），电解质浓度 = 8 mmol/L，电流密度 = 73 mA/cm<sup>2</sup>，反应时间 = 10 min，以确

定后续实验的最佳提取参数范围。

如图2(a)所示，当水温设置为30 °C时，霉菌孢子的抑制率有较为明显的提升，而当水温高于30 °C时，抑制率上升趋势减小，不再出现较大的浮动。这可能与球孢枝孢霉菌的生长特性相关，蔡程山<sup>[7]</sup>在不同的温度下对6株枝孢属霉菌进行培养，发现6株枝孢属霉菌在25~30 °C下最适宜生长，当温度高于35 °C后，6株枝孢属霉菌均不能生长。从图2(b)可以看出，在水温为40 °C时，培养皿中存活的活性菌落相对较少。因此，考虑到本实验所接种的球孢枝孢同属于枝孢属霉菌，可能存在着相似的生长特性。当水温低于30 °C时，孢子的死亡是由电化学氧化反应导致的，而水温在35~45 °C时，抑制率提升并不显著。在实际的洗涤过程中，水温越高虽然更容易溶解洗涤剂，加速污垢的溶解，从而提升清洁效果，但也会导致织物容易受损和褪色。综上，考虑到实际的洗涤环境，在后续的实验中，将水温设置为常温。

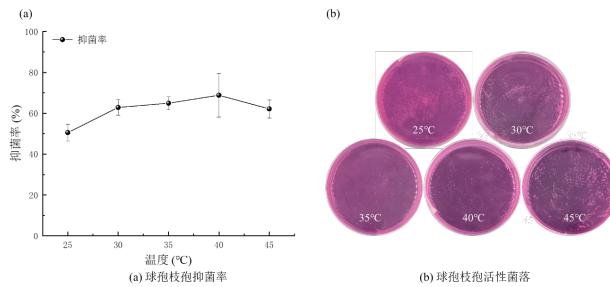


图2 温度参数对抑制毛巾表面霉菌孢子效率的影响

如图3(a)所示，孢子抑制率与反应时间总体上呈正相关性。随着时间的增长，抑制率逐渐提升。在10 min之前，抑制率的增长幅度较缓，而在10 min之后，上升趋势陡然增加。这是由于球孢枝孢菌落定殖在毛巾试样的表面，分泌出了部分胞外聚合物（微生物膜，EPS），对孢子形成了一定的保护作用，短时间内活性基团无法与所有孢子反应。随着时间的增长，胞外聚合物被模拟洗涤装置水洗分离，电极反应产生的羟基自由基、活性氧和间接氧化剂能够与孢子最大程度接触反应。在反应时间为25 min时，孢子抑制率达到最大值，并且增长幅度相对降低。从图3(b)中也可以直观地看出，随着时间的增长，活性菌落数目越来越少。因此，反应时间控制在25 min内可以得到较高的抑制率，长时间增加电流则会增加能耗。因此，在后续Box-Behnken实验设计中将反应时间范围控制在15~25 min之间。

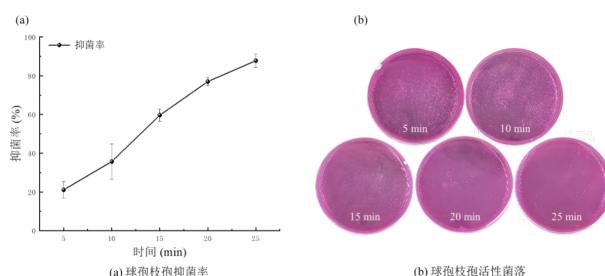


图3 反应时间参数对抑制毛巾表面霉菌孢子效率的影响

图4(a)为电流密度的影响。在24~49 mA/cm<sup>2</sup>时，抑制率没有较大的变化，这可能同样与球孢枝孢分泌的微生物膜相关。当电流密度低于49 mA/cm<sup>2</sup>时，电极反应产生的羟基自由基、活性氧和间接氧化剂不足以破坏表面的微生物膜，对微生物膜包覆的孢子没有产生较大的影响。当电流密度高于49 mA/cm<sup>2</sup>时，抑制率有了明显的上升趋势。这是由于单位时间内电流密度增加，电极反应速率加快，电极反应产生的羟基自由基、活性氧和间接氧化剂的速率增大，从而加速破坏微生物膜，电化学反应活性基团与孢子发生充分反应，从而提升对霉菌孢子的抑制效率。当电流密度达到122 mA/cm<sup>2</sup>时，抑制率的增长趋势骤然下降，并且从图4(b)中可以看出，电流密度为98 mA/cm<sup>2</sup>和122 mA/cm<sup>2</sup>所对应的培养皿中，活性菌落数目没有较大的差异。因此，考虑到能耗问题，在Box-Behnken实验设计中将电流密度参数范围控制在49~98 mA/cm<sup>2</sup>。

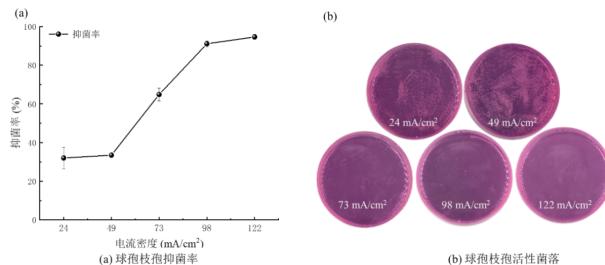


图4 电流密度参数对抑制毛巾表面霉菌孢子效率的影响

图5(a)为电解质浓度的影响，在电解质浓度低于10 mmol/L时，随着电解质浓度的增加，抑制率持续稳定上升，这是因为电解质浓度增大导致电解质的离子浓度增加，从而提升电导率使电化学反应的速率增加，单位时间内能够抑制更多的霉菌孢子。当电解质浓度超过10 mmol/L时，抑制率展现出较大的提升。这是因为电解质NaCl的浓度在一定范围内持续增大后，电解过程中产生的Cl<sup>-</sup>会吸附在阳极表面，形成较薄的氧化态氯吸附层，两个吸附氯位复合和解析成为气态氯<sup>[8]</sup>。Cl<sub>2</sub>进一步水解生成具有强氧化性HClO，破坏霉菌的细胞壁和细胞膜，使其内容流出，造成蛋白质失活。而过高的电解质浓度则会使得反应产生

$\text{Cl}_2$ 的速率过大，导致气泡聚集在电极表面，影响电极表面的反应速率。从5(b)中可以看出，电解质浓度12 mmol/L下的活性菌落数目相比其他浓度下较少。因此，在后续 Box-Behnken实验设计中将电解质浓度参数范围控制在8~12 mmol/L之间。

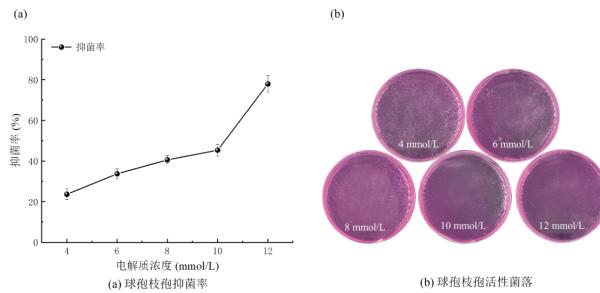


图5 电解质浓度参数对抑制毛巾表面霉菌孢子效率的影响

## 2.2 Box-Behnken优化实验设计

在单因素实验的基础上，利用响应面法设计电化学协同洗护处理抑制毛巾表面霉菌孢子的效率，选取电流密度( $X_1$ )、反应时间( $X_2$ )、电解质浓度( $X_3$ )作为电解处理优化的因素，以抑菌率 $R$ 为响应值，采用Box-Behnken设计确定三因素三水平实验。表2为详细参数-编码水平布置表，其中，水温固定为25 °C。

表2 Box-Behnken设计的变量以及编码水平

参数	低水平	中水平	高水平
	(-1)	(0)	(1)
$X_1$ : 电流密度 /mA·cm <sup>-2</sup>	49	73.5	98
$X_2$ : 反应时间 /min	15	20	25
$X_3$ : 电解质浓度 /mmol·L <sup>-1</sup>	8	10	12

表3为Box-Behnken实验设计与数据，电化学协同洗护处理抑制毛巾表面霉菌的最大效率在运行第5次时，为99.34%。此时的电流密度为98 mA/cm<sup>2</sup>，反应时间为25 min，电解质浓度为10 mmol/L。最小抑菌率在运行第10次时，仅为72.42%，此时的电流密度为49 mA/cm<sup>2</sup>，反应时间为20 min，电解质浓度为12 mmol/L。为了进一步观察抑菌率的规律，基于响应面优化结果，以箱型图的形式展示抑菌率在3组参数内的分布。如图6所示，电流密度和反应时间参数下的箱型图位置分布存在着高度的相似性。其中，在电流密度参数中，抑菌率的最高值出现在98 mA/cm<sup>2</sup>中。在反应时间参数中，抑菌率的最高值出现在25 min中。表明在电氧化反应中，抑菌率与电流密度和反应时间的关系成显著的正相关性，即随着电流密度和反应时间的不断增加，抑菌率不断提高。然而，在电解质浓度参数中，抑菌率的最高值出现在中间值10 mmol/L中，意味着在电氧化反应中，NaCl的浓度在10~12 mmol/L之间可能存在

在一个更合适的浓度，使电解参数优化，从而进一步提升毛巾表面霉菌抑制效率。综上，在电化学协同洗护处理中，电流密度、反应时间和电解质浓度与毛巾表面霉菌的抑制效率存在着紧密的联系，其中电解质浓度可能还存在进一步的优化空间。

表3 Box-Behnken实验设计与数据

Run	编码参数			实际参数			抑菌率 /%
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
1	0	1	-1	73.50	25	8	93.05
2	1	0	0	98.00	15	10	86.93
3	0	1	1	73.50	25	12	86.45
4	0	-1	-1	73.50	15	8	72.84
5	1	1	0	98.00	25	10	99.34
6	0	0	0	73.50	20	10	98.98
7	1	0	-1	98.00	20	8	75.66
8	-1	-1	0	49.00	15	10	81.06
9	0	0	0	73.50	20	10	97.60
10	-1	0	1	49.00	20	12	72.42
11	-1	0	-1	49.00	20	8	80.10
12	1	0	1	98.00	20	12	89.15
13	-1	1	0	49.00	25	10	90.05
14	0	0	0	73.50	20	10	95.92
15	0	-1	1	73.50	15	12	79.14
16	0	0	0	73.50	20	10	96.70
17	0	0	0	73.50	20	10	98.80

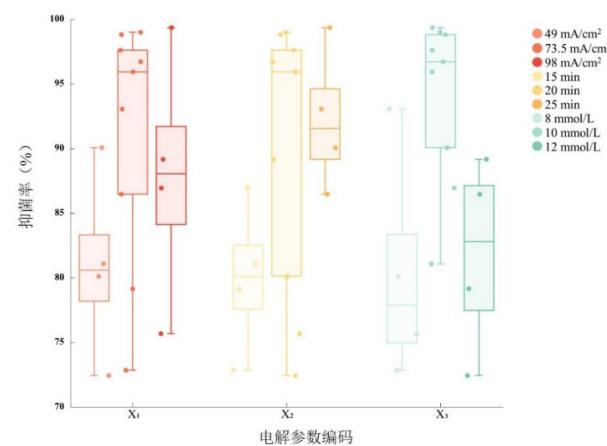


图6 抑菌率在各电解参数中的箱型图分布规律

## 2.3 模型拟合与方差分析

对表3Box-Behnken实验设计与数据进行二次多项式回归模型方程拟合，得到以电流密度( $X_1$ )、反应时间( $X_2$ )、电解质浓度( $X_3$ )为影响因素的电化学协同洗护抑制球孢枝孢霉的回归方程：

$$R=0.9760+0.0343X_1+0.0612X_2+0.069X_3+0.0085X_1X_2+0.0529X_1X_3-0.0322X_2X_3-X_1^2-0.0236X_2^2-0.01237X_3^2 \quad (2)$$

响应值 $R$ 的学生化外残差与正态概率的对比如图7(a)所示，几乎分布在一条直线上，表明差异较小，模型可信

度较高<sup>[9]</sup>。图7(b)描述了运行次数与残差之间关系，分布较离散，表面模型较为准确，所有点均在-4到4之间，即均在红线内，说明无异常点<sup>[10]</sup>。图7(c)为实际值与模型预测值之间的对比，几乎重叠分布在一条直线上，说明不存在较明显的正态性问题，该模型充分性较好<sup>[11]</sup>。因此，在本次实验中，Quadratic模型能够很好的预测和描述数据。

表4为Quadratic模型下的降解参数的ANOVA方差分析，根据方差分析可以有效证明该模型对响应值预测的显著性。根据响应值R的模型拟合分析，回归模型相关系数 $R^2=98.80\%$ ，说明回归模型极显著， $R_{adj}^2=97.26\%$ ，说明回归模型具有良好的拟合度， $R_{pred}^2=87.75\%$ ，说明模型具有良好的预测性<sup>[12]</sup>。以上说明模型与实验存在高度拟合，不同因素间的差异具有统计学意义，自变量与响应值之间的线性关系具有显著性<sup>[13]</sup>，回归方程对实际情况模拟度较高，可用于毛巾表面球孢枝孢霉抑菌实验预测。

从回归模型系数显著性检验结果看， $X_3$ 和 $X_1X_2$ 不存在显著影响，其他项均对抑菌率产生显著影响( $P < 0.05$ )。其中，电解参数一次项 $X_2$ 和 $X_1^2$ 均对响应值R具有极显著影响( $P < 0.01$ )，二次交互项 $X_1X_3$ 对响应值R的影响要高于 $X_1X_2$ 和 $X_2X_3$ 。在Quadratic模型下对响应值R产生显著影响的一次项顺序依次为 $X_2$ 、 $X_1$ 、 $X_3$ ，对响应值R产生显著影响的二次项顺序依次是 $X_1X_3$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_1X_2$ 。

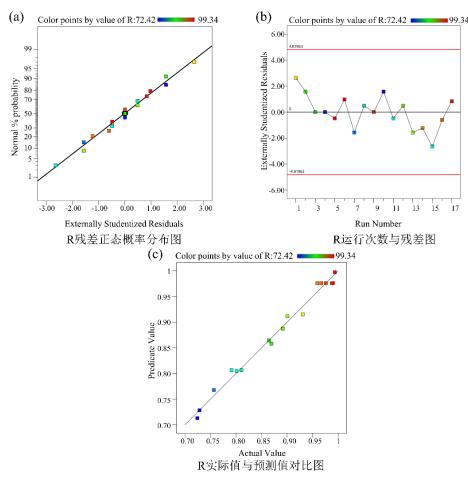


图7 Quadratic模型适用性检测

不同因素的F值反映了它们对试验指标的显著性影响程度，F值越大表明该因素对试验指标的影响越显著<sup>[13]</sup>。由表4-4可知，对抑菌率的影响由大到小依次为 $X_2$ 、 $X_1$ 、 $X_3$ 。

表4 Quadratic模型下电解参数的ANOVA方差分析

来源	R: 抑菌率 /%					
	平方和 (Sum of Squares)	自由度 (Df)	均方 (Mean Square)	F值	p值	显著性 (Significance)
Model	0.14228	9	0.0159	64.00	< 0.0001	**
$X_1$	0.0097	1	0.0094	38.022	< 0.0005	*
$X_2$	0.0299	1	0.0299	120.70	< 0.0001	**
$X_3$	0.0004	1	0.0004	1.53	0.2554	
$X_1X_2$	0.0003	1	0.0003	1.18	0.3137	
$X_1X_3$	0.0112	1	0.0112	45.18	0.0003	*
$X_2X_3$	0.0042	1	0.0042	16.76	0.0046	*
$X_1^2$	0.0146	1	0.0146	59.09	0.0001	**
$X_2^2$	0.0023	1	0.0023	9.47	0.0179	*
$X_3^2$	0.0645	1	0.0645	260.06	< 0.0001	*
残差	0.0017	7	0.0002			
失拟项	0.0010	3	0.0003	1.99	0.2581	不显著
纯误差	0.0007	4	0.0002			
统计	0.1445	16				
$R^2 = 0.9880 \quad R_{adj}^2 = 0.9726$						

注：\*\*表示极显著( $P < 0.01$ )；\*表示显著( $0.01 < P < 0.05$ )。

## 2.4 模型优化与最优化电解参数确定

按电流密度( $X_1$ )、反应时间( $X_2$ )、电解质浓度( $X_3$ )对抑制球孢枝孢霉的交互作用影响的响应面3D图和等高线图如图8和9所示。研究三个因素两两交互作用对抑菌率的影响时，另一个参数取Box-Behnken设计编码中的中间值(即电流密度=73.5 mA/cm<sup>2</sup>，电解质浓度=10 mmol/L，反应时间=20 min)。通过观察曲面图中的优化区域，倾斜度表明因素对响应值的影响程度。曲面坡度越陡，表明因素交互作用越显著。另外，等高线的形状可以揭示交互作用的强弱。若等高线呈现椭圆，则表明两因素存在显著的交互作用，若为圆形则交互作用不显著<sup>[13, 14]</sup>。

如图8(a)-(c)所示，所有3D图中的曲面均向上凸起，表明交互存在最大值。所有等高线图均形成椭圆，表明三因素两两交互作用显著。其中，图9(a)为电流密度和反应时间交互作用对抑菌率的影响，在电解质浓度固定的前提下，抑菌率随着电流密度和反应时间的增加而显著性提升，说明电流密度和反应时间对抑菌率的影响具有显著的正相关性。如图9(b)-(c)所示，当电解质浓度( $X_3$ )分别与电流密度( $X_1$ )和反应时间( $X_2$ )交互作用时，均在等高线图的中间形成椭圆形，这表明电解质浓度与另外两个参数交互显著，但未形成正相关性。

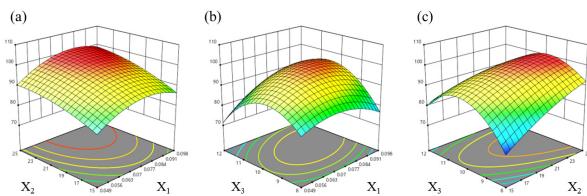


图8 (a)-(c) 电流密度( $X_1$ )、反应时间( $X_2$ )、电解质浓度( $X_3$ )对电化学协同洗护处理过程中球孢枝孢抑制率的交互影响的响应面3D图

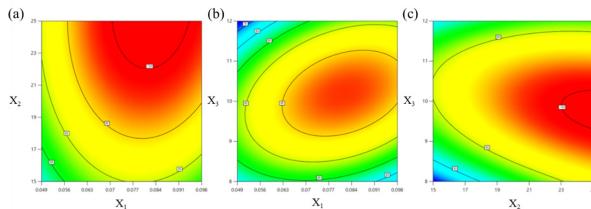


图9 (a)-(c) 电流密度( $X_1$ )、反应时间( $X_2$ )、电解质浓度( $X_3$ )对电化学协同洗护处理过程中球孢枝孢抑制率的交互影响的等高线图

由于电解质浓度分别与电流密度、反应时间交互时未形成正相关性，再次验证了电解参数还有进一步优化的空间。因此，根据方差分析结果、响应面3D图以及等高线图分布，以抑菌率的最大值为目标值，在1-100组优化方案下得出最优参数搭配，如图10所示。优化后的电解参数分别为：电流密度=96.27 mA/cm<sup>2</sup>，反应时间=24.76 min 电解质浓度=10.64 mmol/L时。在以上条件下进行优化实验，预测抑菌率R能够达到99.67 %。

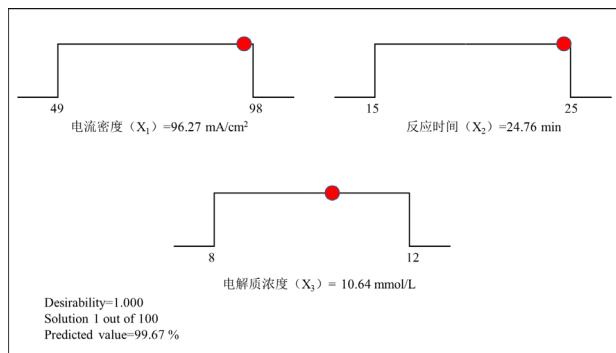


图10 以抑菌率最大值为目标值的电解参数优化方案

## 2.5 模型验证与织物测试

以抑菌率最大值( $R_{\max}$ )对应的模型预测参数为实验变量，模型预测值和实验实际值对比验证结果如表5所示。通过3组平行实验测试，抑菌率相比预测值略有提升，最高达到99.91%。说明以抑菌率最大值对应的模型预测的电解参数可以进一步提升抑制毛巾表面霉菌的效果。

表5 电解参数最终优化验证结果

$R_{\max}$ : 电流密度 = 96.27 mA/cm <sup>2</sup> , 反应时间 = 24.76 min 电解质浓度 = 10.64 mmol/L		
预测值 / %	实际值 / %	预测误差 / %
99.85	99.87	0.18
99.67	99.91	0.20
99.91	99.91	0.24

未被霉菌污染的纯棉纱线和接种霉菌处理前后的力学性能测试如表6所示。

表6 纱线强力测试结果

样品	空白毛巾试样	霉变样品处理前	霉变样品处理后
平均强力值 / cN	369.33	327	322
断裂伸长率 / %	5.62	4.36	4.28
断裂强度 / cN · tex <sup>-1</sup>	12.65	11.20	11.03

纱线强力测试结果显示，制备的霉变试样在电化学协同洗护处理前，对比于干净的纯棉毛巾中的纱线，其断裂强度和伸长率均有所明显降低。证明了球孢枝孢霉分泌的胞外酶对棉纤维造成了损伤。在霉变试样经过电化学协同洗护处理后，纱线的断裂伸长率和断裂强度仅略微下降，表明该协同装置对纯棉毛巾试样的性能产生轻微影响，这可能与模拟洗涤装置的运作相关。

## 2.6 毛巾表面微观形貌及球孢枝孢细胞结构分析

按照最优化电解参数，对霉菌污染毛巾进行电化学协同洗护处理，然后采用扫描电镜观察处理前后毛巾的表面形貌。如图11(a)-(c)所示，通过扫描电镜发现，未经霉菌污染的棉纤维表面比较光滑，没有出现异物。在电化学协同洗护处理前，纤维表面附着着密集的椭圆状孢子。处理后，棉纤维表面大部分的菌丝和孢子已被水洗去除，但表面仍附着部分难以去除的孢子。如图11(d)所示，对孢子进一步观察，发现原本椭圆状的孢子表面发生了皱缩，表明电化学反应产生的活性基团对孢子形态产生一定影响。

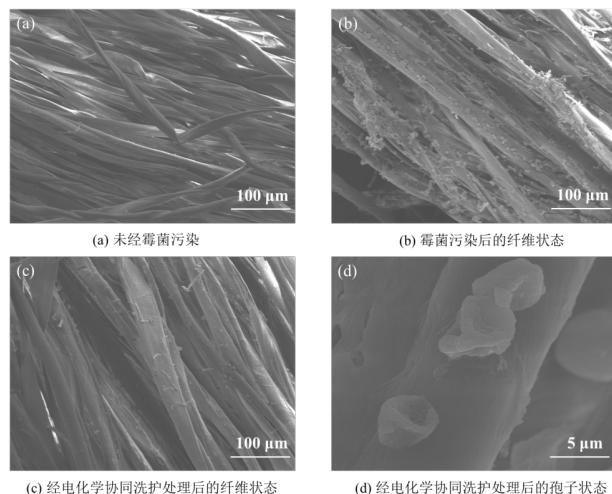


图11 电化学协同洗护处理前后的SEM形貌图

如图12(a)-(b)所示,通过生物透射电子显微镜放大10.0 k后发现,在毛巾表面正常生长的球孢枝孢细胞壁完整,而经过电化学协同洗护处理后,球孢枝孢的细胞壁出现了缺失。因此,大部分孢子在电化学协同洗护洗护处理过程中能够被模拟洗涤装置洗脱,同时,这些散落在水中的孢子与残留在纤维表面的孢子被电极产生的活性氧破坏了细胞壁,失去保护和支撑使得细胞内外压力失衡,从而导致细胞死亡。

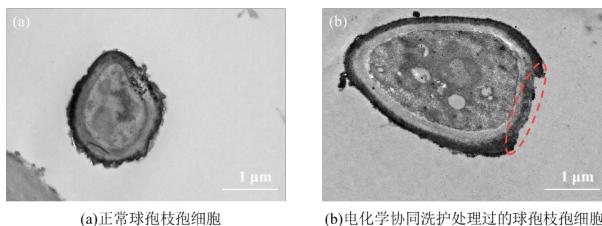


图12 电化学协同洗护处理前后的球孢结构

### 3. 结论

本研究针对霉菌在毛巾表面的生长特性,采取电化学协同洗护处理对霉菌孢子进行抑制。首先,通过单因素实验得出了对霉菌抑制效果作用显著的电解参数( $X_1$ :电流密度、 $X_2$ :反应时间、 $X_3$ :电解质浓度)。采用Box-Behnken实验设计优化了电解参数,建立了以毛巾表面霉菌孢子抑菌率( $R$ )为响应值的预测回归模型,通过模型优化与验证实验得到了以抑菌率( $R_{max}$ )最大值为目标值的电解参数搭配。主要结论如下:

(1) 电解参数中,电流密度与反应时间均与霉菌的抑制率呈正相关性,即随着电流密度的和反应时间的增加,抑菌率不断提升。Quadratic模型能够很好地预测不同电解参数下的抑菌率变化,电解参数对响应值 $R$ 产生显著影响的一次项顺序依次为 $X_2$ 、 $X_1$ 、 $X_3$ ,对响应值 $R$ 产生显著影响的二次项顺序依次是 $X_1X_3$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_1X_2$ 。

(2) 通过验证实验,在最优化电解参数下,电化学协同洗护处理对球孢枝孢霉的抑制率可以达到99.91%,抑菌率进一步提升。通过场发射电镜发现,模拟洗涤装置能够将纤维表面绝大部分的孢子洗脱下来,顽固附着在纤维表面的霉菌孢子受到电化学反应后,表面产生形变,细胞的通透性发生改变。通过生物透射电子显微镜发现,经

过电化学协同洗护处理的球孢细胞壁受到破损,表明电化学反应使孢子失去代谢功能,达到了毛巾表面霉菌的灭活效果。

### 参考文献

- [1] W, PIETSCH K A, LENTENDU G, et al. Characterization of Unexplored Deadwood Mycobiome in Highly PURAHONG Diverse Subtropical Forests Using Culture-independent Molecular Technique[J]. Front Microbiol, 2017, 8: 574.
- [2] MORAIS D S, GUEDES R M, LOPES M A. Antimicrobial Approaches for Textiles: From Research to Market [J]. Materials (Basel), 2016, 9(6).
- [3] 任泽华, 王梦娣, 赵旭, 等. 家庭毛巾表面真菌群落组成与结构分析 [J]. 微生物学杂志, 2025, 45(2): 60-69.
- [4] 董晶晶. 钨酸盐催化双氧水降解典型有机污染物的研究 [D]. 2009.
- [5] 刘恺旺. NiO/TiO<sub>2</sub>纳米电极高效去除地下水硝酸盐的研究 [D]. 2019.
- [6] 李瑞青, 杨自力, 谷雨倩, 等. 表面活性剂强化 LiCl溶液灭活空凋霉菌的研究 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3443-3449.
- [7] 蔡程山, 白飞荣, 王鹏辉, 等. 枝孢霉丝孢真菌生长特性的研究 [J]. 生物学通报, 2022, 57(4): 50-56.
- [8] WANG Y, LIU Y, WILEY D, et al. Recent advances in electrocatalytic chloride oxidation for chlorine gas production[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(35): 18974-18993.
- [9] NAZARI L, YUAN Z, RAY M B, et al. Co-conversion of waste activated sludge and sawdust through hydrothermal liquefaction: Optimization of reaction parameters using response surface methodology [J]. Applied Energy, 2017, 203: 1-10.
- [10] KUMAR T, MOHSIN R, MAJID Z A, et al. Experimental study of the anti-knock efficiency of high-octane fuels in spark ignited aircraft engine using response surface methodology [J]. Applied Energy, 2020, 259.
- [11] HU J, BIAN X, XIA Y, et al. Application of response surface methodology in electrochemical degradation of amoxicillin with Cu-PbO<sub>2</sub> electrode: Optimization and mechanism [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 250: 117109.
- [12] 陈克克, 强毅. 响应面法优化超声波辅助黄精多酚的提取及其抗菌活性 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(01): 91-96.
- [13] 罗美玲. 蜂粮中微生物的分离鉴定及响应面法优化液态发酵条件 [D]. 2018.
- [14] 吴登宇, 李昕宇, 韦体, 等. 响应面法优化马铃薯蛋白水解工艺及其抗氧化活性研究 [J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(8): 61-69.

# Efficient Inhibition of Mildewed Towels by Electrochemical Co-Washing and Optimization of Operational Parameters

Ren Ze-hua<sup>1</sup>, Yang Qing-bo<sup>2</sup>, Hu Zhu-bing<sup>2</sup>, Liu Jian-li<sup>1</sup>

(1. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214122;  
2. Wuxi Little Swan Electric Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214035)

**Abstract :** To address the common issue of mildew growth on household towels, this study focuses on *Cladosporium sphaerospermum* and proposes an electrochemical co-washing system that combines simulated washing with electrode-driven oxidation to efficiently inhibit fungal spores on towel surfaces. Single-factor analysis identified current density, reaction time, and electrolyte concentration as significant factors influencing antifungal performance. A Box–Behnken response surface design was then employed to optimize the electrolysis parameters, and a quadratic regression model was established. Validation results demonstrated that the model had a good fit and could effectively predict the impact of parameter combinations on the inhibition rate. The optimized electrolysis conditions were determined to be: current density of 96.27 mA/cm<sup>2</sup>, reaction time of 24.76 minutes, and electrolyte concentration of 10.64 mmol/L, under which the inhibition rate reached 99.91%. This study provides a green and efficient strategy for mildew control on household textiles and lays a theoretical foundation for the application of antimicrobial technologies in intelligent washing systems.

**Keywords :** household towels; *cladosporium sphaerospermum*; electrochemical co-washing; bacterial inhibition rate; antimicrobial technology; smart laundry care devices

