



基于 TEMPO 氧化纤维的功能性滤棒的制备及其应用研究

车静^{1,2,3}, 李昕昕^{2,3}, 李赞^{2,3}, 韩磊^{2,3}, 雷珊珊¹, 江军刚¹, 张一帆¹, 王磊¹

1. 湖北工业大学 绿色轻工材料湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北中烟工业有限责任公司, 湖北 武汉 430040;

3. 湖北中烟卷烟材料厂, 湖北 武汉 430050

摘要: 基于传统造纸法再造烟叶生产技术, 结合 2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基(TEMPO)氧化纤维改性技术, 制备绿色低碳植物纤维功能性滤棒, 并将其应用于常规烟支进行感官评价研究。结果表明, 制备植物纤维功能性滤棒的适宜条件为: $m(\text{针叶木纤维}):m(\text{醋酸纤维})=8:2$ 、TEMPO 用量 0.01 mmol/g 、打浆度 $(25\pm 2)^\circ\text{SR}$; 在此条件下, 滤棒原纸定量 45 g/m^2 , 松厚度 $2.88 \text{ cm}^3/\text{g}$, 透气度 $93 \mu\text{m}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$, 湿抗张指数 $3.073 \text{ N}\cdot\text{m/g}$; 涂布的植物纤维功能性滤棒卷烟的圆周、圆度、硬度和吸阻分别约为 24.14 mm 、 0.39 mm 、 87.2% 和 $331 \text{ mm H}_2\text{O}$, 均符合卷烟企业滤棒标准(圆周 $(24\pm 0.20) \text{ mm}$ 、圆度 $\leq 0.40 \text{ mm}$ 、硬度 $\geq 82.0\%$ 和吸阻 $(310\pm 30) \text{ mm H}_2\text{O}$)。与传统纯醋纤滤棒相比, 涂布的植物纤维功能性滤棒卷烟的感官评价总分相差不大, 降低了 2 分, 但主流烟气中有害成分的释放量均明显降低。因此, 本研究制备的植物纤维功能性滤棒性能均能达到标准要求, 这为绿色低碳、生物可降解和加香烟用滤棒的开发开辟了新途径。

关键词: 功能性滤棒; TEMPO 氧化纤维改性技术; 物理指标; 烟气指标; 感官评价

中图分类号: TS426 **文献标识码:** A

0 引言

随着全球环保及公共卫生意识的不断增强, 吸烟带来的一系列环境问题也日益受到广泛关注^[1-2]。其中, 烟头作为卷烟产品被丢弃最多的部分, 每年产生约 $7.7\times 10^8 \text{ kg}$ 有毒垃圾, 烟头在分解过程中会释放微塑料、重金属和许多其他化学物质, 严重危害生态

系统。因此, 提高卷烟材料的环保性, 减少环境污染, 已成为烟草行业亟待解决的重要课题。

目前, 市场上流通的主要卷烟滤棒材料包括聚丙烯纤维、醋酸纤维丝束、纸质滤棒等, 每种材料都有其独特的优势和局限性^[3]。其中, 聚丙烯纤维吸味口感较差, 已被逐渐淘汰。醋酸纤维丝束作为卷烟过滤嘴的传统材料, 以良好的选择性吸附能力和

收稿日期: 2024-07-26; 修回日期: 2024-12-24

基金项目: 湖北省楚天英才计划科技创新团队项目(2024065)

作者简介: 车静(1988—), 女, 湖北省武汉市人, 湖北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为滤棒材料分析及成型工艺。

E-mail: chejing@hjl.hbtobacco.cn

通信作者: 王磊(1982—), 男, 山东省日照市人, 湖北工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物基功能材料与纤维。

E-mail: wanglei@hbut.edu.cn



相对合适的价格, 在市场中占据主导地位^[4]。然而, 醋酸纤维素性质稳定、分解速率慢, 且生产过程中增塑剂的添加使醋酸纤维滤棒难以自然降解^[5]。此外, 中国烟用过滤材料用量约为 1.5×10^5 t (2022 年烟草工业数据), 每吨单价约为 7.0 万元, 市场约为 100 亿元, 每年需从海外市场进口约 20%。因此, 亟需开发新一代绿色低碳材料代替传统醋酸纤维滤棒, 降低生产成本。纸质滤棒以其可生物降解性、低成本及对焦油和烟碱的高截留效率, 展现出巨大的应用潜力^[6-7]。目前, 纸质滤棒的技术研究已经取得重要进展, 例如, 为充分发挥纸质滤棒的过滤作用, 熊姗姗等^[8]开发了一种点线式螺纹纸质滤棒, 所制备的滤棒外观更为美观, 吸阻变异系数为 4.9%, 降焦油幅度最高可达 24.46%。尹嵩等^[9]研究发现, 添加竹类纤维的滤棒试样可降低纸质滤棒的刺激性, 丰富卷烟香气, 改善卷烟抽吸品质; 将麻类、竹类纤维进行复配应用在纸质滤棒中, 可降低烟气中焦油的含量且改善卷烟抽吸品质。王健^[10]将针叶浆、竹浆、马尼拉麻浆分别与醋酸纤维进行配抄, 研究成纸的抗张强度、透气度、柔软度等物理性能的变化。结果表明, 3 种植物纤维浆的添加比例均以 30% 为佳。此外, 邬宪娜等^[11]采用半干起皱法生产滤棒填充原纸, 制备的纸质滤棒具有较高的柔软度。

然而, 纸质滤棒在卷烟中的应用仍面临诸多挑战, 如纸质滤棒吸阻不稳定、有害成分过滤效率不高、纸味明显等问题, 这限制了其在卷烟市场的广泛应用^[12]。近年来, 2,2,6,6-四甲基哌啶氧化物 (TEMPO) 氧化体系因对多糖类高分子的高选择性氧化特性, 成为材料改性领域的研究热点^[13]。T. Saito 等^[14]将该体系应用于纤维素改性研究, 发现其可选择性氧化纤维素的 C₆ 位伯羟基, 生成的醛基在纸页成型过程中能够在纤维分子之间生成半缩醛键共价键, 从而大幅提高纸张的湿强度, 这对稳定滤棒的吸阻一致性具有明显效果。

基于此, 本研究以植物纤维与醋酸纤维丝束为原料, 采用植物纤维原料配方优化、TEMPO 氧化纤维改性等技术制备功能性滤棒, 并对制备的滤棒原纸涂布烟草浸膏, 用以增强卷烟吸阻稳定性、提高

对烟气有害成分的截留量和过滤效率及改善卷烟抽吸品质, 为实现功能性滤棒的规模化生产提供有益的理论支持。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

常规烟支、醋酸纤维丝束 (0.8 mm)、漂白针叶木浆板、漂白阔叶木浆板、烟草涂布液, 湖北中烟工业有限责任公司; TEMPO 氧化试剂、NaClO、NaOH、HCl、无水乙醇, 均为分析纯, 国药集团有限公司。

1.2 主要仪器与设备

066 型抗张强度测试仪、166 型透气度测试仪、912 型纤维形态分析仪, 瑞典 L&W 公司; NICOLET-6700 型傅里叶红外光谱仪, 美国 Thermo Fisher 公司; SU8010 型高分辨场发射扫描电子显微镜, 日本 Hitachi 公司; Empyrean 型多晶 X 射线衍射分析仪, 马尔文帕纳科公司; DDSJ-308F 型电导率仪, 上海仪电公司; P95854.3A 型凯塞快速纸页成型器, 奥地利 PTI 公司; YL21 型滤棒成型机, 上海烟草工业机械厂; HY05-Y2D 型滤棒综合测试台, 郑州海艺科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 滤棒原纸的抄造 采用凯塞快速纸页成型器上进行滤棒原纸的抄造, 将针叶木纤维、阔叶木纤维和醋酸纤维按照一定比例进行 17 组滤棒原纸的配抄实验 (见表 1), 抄造原纸定量为 45 g/m^2 , 并根据相应国家标准检测其抗张强度^[15]、湿强度^[16]、透气度^[17]、柔软度^[18]和松厚度^[19]。

1.3.2 TEMPO 氧化纤维制备 配制 0.1 mmol/L TEMPO 溶液、1 mol/L NaOH 溶液和 1 mol/L HCl 溶液。将质量分数 3% 的针叶木纤维水悬浮液置于三口烧瓶中, 分别加入 0.01 mmol/g、0.10 mmol/g、0.50 mmol/g 的 TEMPO 溶液 (以绝干纤维质量计), 磁力搅拌, 反应过程中每隔 30 min 补加 3 mL 0.9 mmol/L NaClO 溶液, 并用 HCl 溶液和 NaOH 溶液调节 pH 值为 9~10, 反应 2 h 后加入 10 mL 无水乙醇终止反应, 得到 TEMPO 氧化纤维, 洗涤至中性, 风干, 备用。

表 1 滤棒原纸配抄比例			
Table 1 The blending ratio of filter rod base paper			
编号	针叶木/%	酸酸纤维/%	阔叶木/%
1	100	0	0
2	0	100	0
3	0	0	100
4	80	20	0
5	70	30	0
6	60	40	0
7	50	50	0
8	40	60	0
9	30	70	0
10	20	80	0
11	0	20	80
12	0	30	70
13	0	40	60
14	0	50	50
15	0	60	40
16	0	70	30
17	0	80	20

1.3.3 TEMPO 氧化纤维形态分析 采用纤维形态分析仪对 TEMPO 氧化纤维长度和宽度进行测定与分析。测试前,浆料需充分分散,浆料为 0.05%。

1.3.4 TEMPO 氧化纤维表面官能团、结构及羧基含量测定 1)FT-IR 分析。采用傅里叶红外光谱仪对 TEMPO 氧化纤维进行红外光谱扫描,扫描波数范围为 4000~600 cm⁻¹,扫描次数为 32 次,分辨率为 4 cm⁻¹。

2)XRD 分析。将冷冻干燥后的 TEMPO 氧化纤维均匀铺放在玻璃载片上,采用多晶 X 射线衍射仪进行扫描,扫描速率为 10 °/min,散射角(2θ)扫描范围为 5°~60°。参考文献[20]的方法计算相对结晶度。

3)SEM 分析。将冷冻干燥后的 TEMPO 氧化纤维粘贴在导电胶上,喷金后置于样品室,采用高分辨率场发射扫描电子显微镜观察样品的表面形态。

4)羧基含量测定。将 0.1 g 绝干样品置于 50 mL 去离子水中,磁力搅拌使其分散均匀,加入 0.1 mol/L HCl 溶液调节浆料的电导率为 500~600 μS/cm,然后用 0.01 mol/L NaOH 标准溶液进行滴定(每次滴加 100 μL),绘制滴定曲线,计算羧基含量^[21]。

1.3.5 功能性滤棒原纸制备 基于实验室抄造原

料配比的优化实验,在湖北中烟中试生产线进行功能性滤棒原纸的制备。具体工艺参数设置如下:TEMPO 用量 0.01 mmol/g;原料配比 $m(\text{氧化针叶木浆}):m(\text{醋酸纤维})=8:2$;打浆度为 $(25\pm2)^\circ\text{SR}$;上网浓度 $(1.0\pm0.1)\%$;成品定量 $(45\pm2)\text{ g/m}^2$;涂布量 $(8\pm1)\text{ g/m}^2$;分切规格 150 mm。同时,以未涂布的产品为对照样品。

1.3.6 功能性滤棒成型及感官评价 使用滤棒成型机将功能性滤棒原纸制成滤棒,并参考湖北中烟企业烟用滤棒技术标准^[22]测试滤棒的圆周、圆度、吸阻、硬度等指标(圆周 $(24\pm0.20)\text{ mm}$ 、圆度 $\leq 0.40\text{ mm}$ 、硬度 $\geq 82.0\%$ 和吸阻 $(310\pm30)\text{ mm H}_2\text{O}$),并将该滤棒应用于常规烟支进行烟气分析及感官评价。主流烟气有害成分释放量分别按照 YC/T 377—2010^[23]、YC/T 255—2008^[24]、YC/T 254—2008^[25]、GB/T 23356—2009^[26]、YC/T 253—2008^[27]和 GB/T 23228—2008^[28]进行测定。卷烟感官评价按照《烟草及烟草制品感官评价方法》(YC/T 138—1998)^[29]评价。

1.4 数据处理与分析

借助 Excel 2019 对所得数据进行汇总和整理;通过 Omnic 9.2 进行 FT-IR 图谱分析,利用 MDI jade 9.0 进行 XRD 图谱分析;采用 Origin 2019 绘图。

2 结果与讨论

2.1 植物纤维打浆对滤棒原纸物理指标的影响

表 2 为植物纤维打浆对滤棒原纸物理指标的影响。由表 2 可知,针叶木纤维抄造的滤棒原纸力学性能均高于阔叶木纤维,这可能是因为针叶木纤维长度更长,纤维交织更紧密^[30-31]。随着打浆度的升高,干/湿抗张指数及柔软度均呈上升趋势,而松厚度和透气度均呈下降趋势,综合考虑滤棒各项指标的要求,尤其是力学性能对滤棒特性的影响,选择 20~30 °SR 作为滤棒原纸浆料的打浆度。

2.2 滤棒原纸原料配方优化结果分析

基于植物纤维打浆度 25 °SR,为进一步提高滤棒原纸湿抗张指数,添加一定比例的醋酸纤维抄

表 2 植物纤维打浆对滤棒原纸物理指标的影响

Table 2 Impact of beating on physical properties of cigarette filter base paper

编号	针叶木纤维/%	阔叶木纤维/%	打浆度/ °SR	松厚度/ (cm ³ ·g ⁻¹)	透气度/ (μm·Pa ⁻¹ ·s ⁻¹)	柔软度/ mN	干抗张指数/ (N·m·g ⁻¹)	湿抗张指数/ (N·m·g ⁻¹)
1	100	0	15	2.27	98	1260	15.830	3.523
2	100	0	25	2.11	95	1330	19.691	4.542
3	100	0	35	1.82	90	1520	20.829	4.633
4	100	0	45	1.75	88	1708	23.502	4.978
5	0	100	20	2.31	100	1122	11.167	2.851
6	0	100	30	2.22	99	1245	11.829	3.030
7	0	100	40	2.01	97	1298	13.673	3.304

片,并对 17 组滤棒原纸所制滤棒的物理指标进行测试,结果见表 3。由表 3 可知,当针叶木纤维用量 70%~80%,醋酸纤维用量 20%~30%,滤棒原纸的松厚度大于 3.0 cm³/g,透气度 100 μm/(Pa·s),柔软度<500 mN,干抗张指数>7.3 N·m/g。滤棒原纸的各项物理指标基本可满足滤棒成型的要求,尤其可满足滤棒对硬度(≥86%)、圆度(≤0.32 mm)等性能要求,然而滤棒的吸阻仍然偏高(>400 mmH₂O),这是因为滤棒原纸湿强度指标依然较低,易导致热塌陷,因此需进一步提升其湿强性能。

2.3 植物纤维表面 TEMPO 改性分析

在植物纤维原料类型及配比优化结果基础上,本实验采用针叶木纤维用量 80%、醋酸纤维用量 20%来抄造滤棒原纸。考虑滤棒存在热塌陷的缺陷,以及后续在进行烟草涂布液涂布制备功能性滤棒时,均需要滤棒具有较好的湿强度^[32],因此,采用 TEMPO 氧化的方式对纤维表面进行改性处理,以提高滤棒原纸及成型滤棒的各项指标,尤其是满足吸阻稳定性的要求。

2.3.1 特征官能团结构表征 图 1 为 TEMPO 氧化纤维结构及羧基含量变化图。由图 1a)可知,不同 TEMPO 用量处理后纤维的特征吸收峰基本在同一区域,表明 TEMPO 氧化纤维均保留原有的结构特性。其中,3330 cm⁻¹ 处的吸收峰归属纤维分子中—OH 的伸缩振动峰,2870 cm⁻¹ 处的吸收峰归属 C—H 伸缩振动峰,1630 cm⁻¹ 处的吸收峰归属酮、醛、羧酸等官能团的 C=O 振动峰,1030 cm⁻¹ 归属纤维素分子中醚键和羟基的吸收峰。然而,TEMPO 氧化纤维在 1630 cm⁻¹ 处的羧基峰强存在差异,随

表 3 滤棒原纸纤维类型对物理指标的影响

Table 3 The influence of raw material of filter rod on physical properties

编号	松厚度/ (cm ³ ·g ⁻¹)	透气度/ (μm·Pa ⁻¹ ·s ⁻¹)	柔软度/ mN	干抗张指数/ (N·m·g ⁻¹)	湿抗张指数/ (N·m·g ⁻¹)
1	2.11	95	1330	19.691	4.542
2	—	—	—	—	—
3	2.58	100	1096	16.000	4.333
4	3.03	100	433	8.178	1.867
5	3.48	100	322	7.333	1.711
6	3.75	100	309	6.689	1.244
7	3.88	100	236	5.222	0.644
8	4.21	100	218	3.000	0.556
9	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—
11	3.01	100	508	9.000	1.200
12	3.16	100	422	6.206	0.917
13	3.30	100	311	5.428	0.717
14	3.70	100	295	3.806	0.367
15	3.89	100	284	2.061	0.283
16	—	—	—	—	—
17	—	—	—	—	—

注:—表示纤维无法抄造型。

着 TEMPO 用量的增加,C=O 振动峰强明显增强^[33],当 TEMPO 用量为 0.10 mmol/g 后,峰强基本不再变化,纤维表面氧化反应达到饱和阈值。

由图 1b)可知,TEMPO 氧化前后纤维样品的衍射峰位置基本一致,在 2θ 为 15.6°(110 晶面)和 22.5°(002 晶面)处出现了较强的衍射峰,在 34.4°(400 晶面)处出现了微弱的衍射峰,为典型的纤维素 I 型晶体结构。4 个样品的结晶度之间不存在明显变化,表明 TEMPO 氧化处理基本不会改变原料的晶体结构,与徐一鑫等^[34]的研究结果较相似。

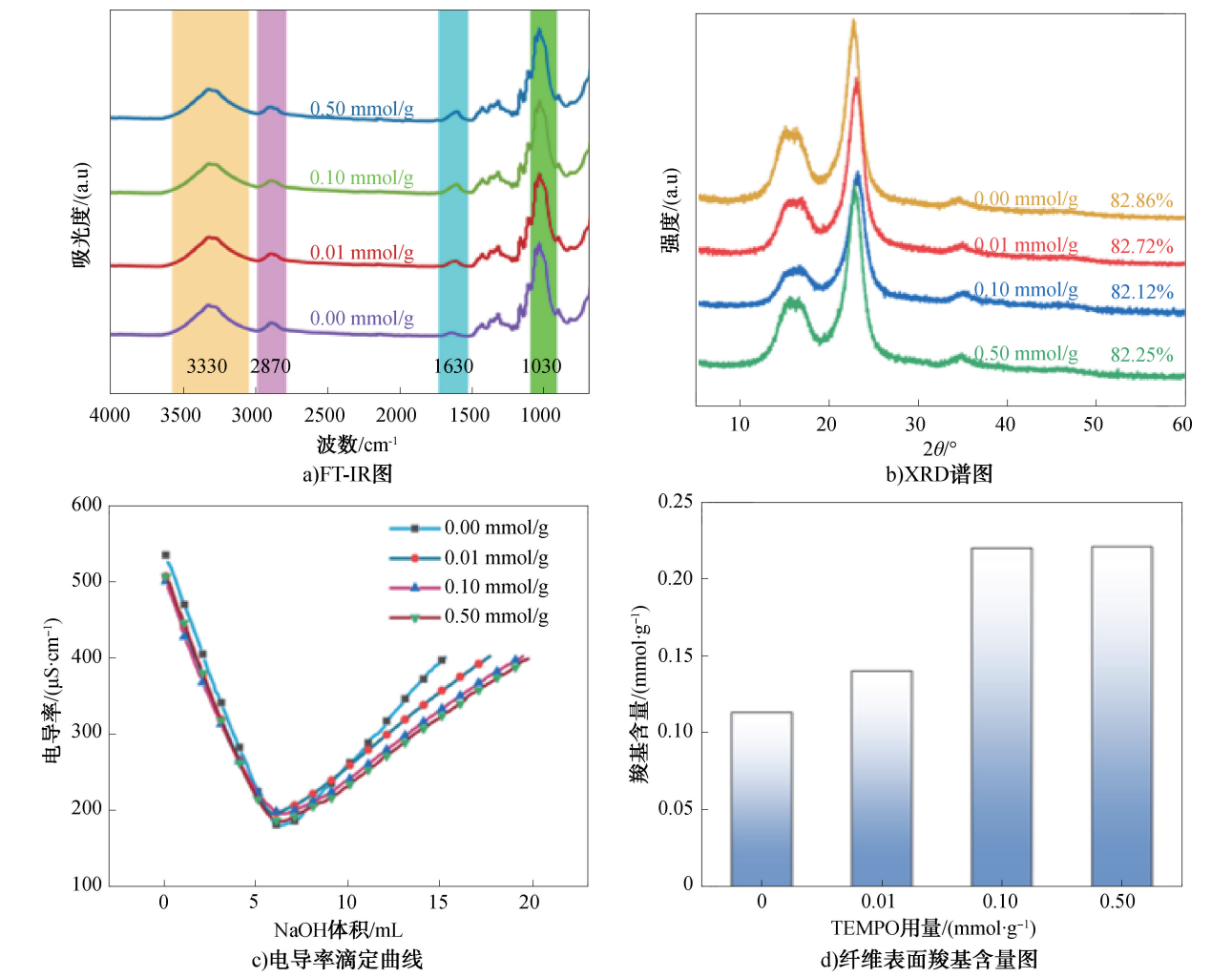


图 1 TEMPO 氧化纤维结构及羧基含量变化图

Fig. 1 The effect of TEMPO-mediated oxidation on fiber structure and carboxyl content

由图 1c) 和 d) 可知,经过 TEMPO 处理后,纤维的羧基含量从 0.113 mmol/g 增加到 0.221 mmol/g,呈现先升高后基本不变的趋势,与 FT-IR 分析结果较一致,表明氧化反应基本完成。

2.3.2 TEMPO 氧化纤维表面形貌分析 图 2 为 TEMPO 氧化纤维的 SEM 图。由图 2 可知,针叶木纤维表面有均匀的圆孔,是其特有的纹孔结构^[31]。TEMPO 改性对纤维表面形貌有一定的影响^[35],当 TEMPO 用量为 0.01 mmol/g 时,纤维表面出现轻微起毛的现象,表明用量较低的 TEMPO 氧化对纤维表面结构影响有限,这可能是由于 TEMPO 分子虽然开始与纤维表面的基团发生反应,但反应程度较低,不足以引起剧烈的形貌变化;随着 TEMPO 用量增加到 0.10 mmol/g,纤维表面分丝帚化程度显著增加,进而影响了滤棒原纸的物理指标。

同时,TEMPO 用量对纤维的长度和宽度也均有影响。随着 TEMPO 用量的增加,纤维宽度略有增加,长度略有减小,这可能一方面是因为 TEMPO 对纤维的润胀作用^[34];另一方面,在氧化过程中纤维表面变粗糙引起的^[36]。纤维表面接触面积的增加,会导致抗张强度(尤其是湿强度)增加,同时也会在一定程度上降低滤棒原纸的松厚度。TEMPO 改性通过调控纤维表面形态和结构特征,提升了滤棒原纸的物理性能。

2.3.3 TEMPO 用量对滤棒原纸性能的影响 表 4 为 TEMPO 用量对滤棒原纸性能的影响。由表 4 可知,经 TEMPO 氧化后,针叶木纤维的理化指标均有明显提升。当 TEMPO 用量为 0.01 mmol/g 时,干抗张指数提高了 33.12%,湿抗张指数提高了 64.68%,松厚度、透气度均略有降低,这与纤维表面结构及

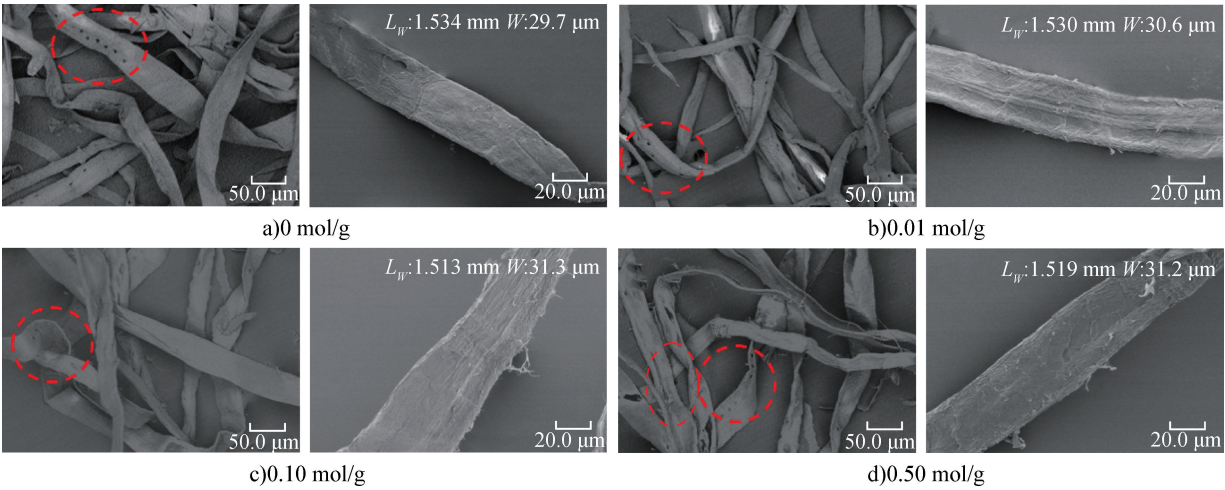


图 2 TEMPO 氧化纤维的 SEM 图

Fig. 2 The morphology and SEM image of TEMPO-mediated oxidation of softwood fibers

形态的变化结果较一致。TEMPO 氧化纤维表面暴露出大量的羧基,在纸张成型过程中,羧基与纤维表面的醛基形成羧醛键,从而显著提升了纤维的湿强性能,这与纤维表面官能团及羧基含量的变化结果较一致,且与刘刚等^[37]的研究结果相符。

2.4 植物纤维功能性滤棒性能及其对卷烟感官评价的影响

表 5 为不同滤棒物理指标测试结果。由表 5 可知,滤棒的吸阻、硬度等性能均符合企业滤棒生产标准。与传统纯醋纤滤棒相比,植物纤维功能性滤棒的各项指标差别不大,但由涂布/未涂布的纤维滤棒整体变异系数(Coefficient of Variation, CV)可知,吸阻 CV 较大(约 20%),这可能是由纤维滤棒原纸的挺度较高、定量不稳定、滤棒成型填充不均匀等因素造成的^[10]。

表 6 为不同滤棒卷烟感官评价结果。由表 6 可知,与传统纯醋纤滤棒卷烟相比,植物纤维的功能性滤棒卷烟感官评价得分降低了 2~4 分,其中涂布的植物纤维功能性滤棒卷烟感官评价得分 82.7 分(降低了约 2.4%);与未涂布的纤维滤棒相比,涂布液添加后,卷烟感官评价高 2.6 分,提升主要体现在香气、刺激性和余味等方面,或许是因为涂布液赋予了烟支更多的烟草香气。表 7 为不同滤棒卷烟主流烟气有害成分的释放量。由表 7 可知,植物纤维功能性滤棒卷烟的主流烟气有害成分释放量均有降低,其中,HCN 释放量降低了约 23%,且两种植物纤维功能性滤棒卷烟的主流烟气有害成分释放量相差不大,表明植物纤维功能性滤棒对烟气有害成分的截留量和过滤效率更强,为后续开发功能性加香滤棒提供了新的思路。

表 4 TEMPO 用量对滤棒原纸性能的影响

Table 4 Influence of TEMPO-mediated oxidation on properties of raw papers

TEMPO/ (mmol · g ⁻¹)	干抗张指数/ (N · m · g ⁻¹)	湿抗张指数/ (N · m · g ⁻¹)	柔软度/ mN	松厚度/ (cm ³ · g ⁻¹)	透气度/ (μm · Pa ⁻¹ · s ⁻¹)
0	8.157	1.866	449	3.02	100
0.01	10.859	3.073	560	2.88	93
0.10	13.724	5.331	711	2.70	85
0.50	13.813	5.428	723	2.68	84

表 5 不同滤棒物理指标测试结果

Table 5 The results of physical properties for cigarette filter rods

样品名称	圆周/mm	圆周 CV/%	圆度/mm	圆度 CV/%	硬度/%	硬度 CV/%	吸阻/mmH ₂ O	吸阻 CV/%
纯醋纤滤棒	23.75	0.36	0.32	14.56	86.9	0.85	285	3.56
植物纤维功能性滤棒 (未涂布)	23.83	0.58	0.36	20.65	86.7	4.15	307	17.75
植物纤维功能性滤棒 (涂布)	24.14	0.87	0.39	22.42	87.2	5.87	331	20.98

表 6 不同滤棒卷烟感官评价结果							
Table 6 Sensory evaluation results of cigarettes							分
样品名称	光泽	香气	协调	杂气	刺激性	余味	总分
纯醋纤滤棒	5	28.5	5.5	13.9	15.2	16.6	84.7
植物纤维功能性滤棒(未涂布)	5	27.8	4.8	13.1	13.9	15.5	80.1
植物纤维功能性滤棒(涂布)	5	29.1	4.5	12.8	14.8	16.5	82.7

表 7 不同滤棒卷烟主流烟气有害成分的释放量						
Table 7 Release of harmful components from mainstream flue gas						
样品名称	氨释放量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{支}^{-1}$)	苯酚释放量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{支}^{-1}$)	巴豆醛释放量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{支}^{-1}$)	CO 释放量/ ($\text{mg}\cdot\text{支}^{-1}$)	HCN 释放量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{支}^{-1}$)	NNK 释放量/ ($\text{ng}\cdot\text{支}^{-1}$)
纯醋纤滤棒	6.71	19.51	22.72	12.11	115.78	6.56
植物纤维功能性滤棒 (未涂布)	6.52	18.42	21.83	11.98	89.23	6.01
植物纤维功能性滤棒 (涂布)	6.55	18.45	21.81	11.88	89.10	6.03

3 结论

本研究通过原纸原料配方优化、分析 TEMPO 改性纤维对滤棒原纸性能的影响,制备了一种基于 TEMPO 氧化纤维的功能性滤棒,并将其应用于常规烟支进行感官评价,得出以下结论:采用 80% 针叶木纤维(TEMPO 用量 0.01 mmol/g)与 20% 醋酸纤维的复合体系,在打浆度(25±2) °SR 的优化条件下,原纸松厚度 2.88 cm³/g、透气度 93 μm/(Pa·s)、湿抗张指数 3.073 N·m/g、干抗张指数 10.859 N·m/g、柔软度 560 mN。其中,与未经 TEMPO 氧化原纸相比,湿抗张指数提高了 64.68%,而松厚度和透气度略有降低,这与纤维表面结构及羧基含量的变化一致。所得植物纤维功能性滤棒各项指标均符合卷烟企业滤棒标准(圆周(24±0.20) mm、圆度≤0.40 mm、硬度≥82.0%和吸阻(310±30) mmH₂O),分别为 24.14 mm、0.39 mm、87.2% 和 331 mmH₂O。烟气分析和感官评价结果表明涂布的植物纤维功能性滤棒和传统纯醋纤滤棒卷烟感官评价总分相差不大,但主流烟气有害成分释放量均有所降低。本研究制备的功能性滤棒为卷烟行业提供了一种可工业化生产的绿色替代方案,其低碳、可生物降解的特性符合可持续发展战略,有望推动烟草行业滤棒材料的升级转型。此外,该技术路线还可拓展应用于其他纤维过滤材料,具有广阔的市场前景。

参考文献:

[1] 殷沛沛,刘莹莹,赵梦醒,等.不同外加纤维对烟草复合滤嘴棒用纸性能的影响[J].天津科技大学学报,2024,39(3):41-48,55.

[2] HUANG Z,LIU H,ZHOU W J,et al.Cellulose acetate filter rods tuned by surface engineering modification for typical smoke components adsorption[J].E-Polymers,2024,24(1):20230054.

[3] 郭晓龙,吕惠娇,刘丽婷,等.香烟滤嘴用纤维过滤材料的研究现状[J].染整技术,2023,45(8):12-15.

[4] 高一洲.醋酸纤维素及其衍生物的制备与应用进展[J].精细石油化工进展,2024,25(6):46-52.

[5] 赵金涛,林瑜,张云龙,等.一种再造烟叶纸质滤棒的开发研究[J].林产工业,2023,60(7):51-57.

[6] 刘晶,冯涛,张文军,等.纸质嘴棒及常规嘴棒的现状探讨分析[J].黑龙江造纸,2020,48(4):10-13.

[7] 邓少鹏,杨光远,彭三文,等.纸质滤棒结构重组实验及产品性能研究[J].造纸装备及材料,2024,53(10):1-3.

[8] 熊姗姗,张志龙,肖维毅,等.压纹工艺对纸质滤棒性能的影响[J].纸和造纸,2020,39(4):13-16.

[9] 尹嵩,燕宁宁,沈靖轩,等.功能性纤维在纸质滤棒中的应用研究[J].合成纤维工业,2016,39(1):39-41,47.

[10] 王健.烟用嘴棒填充纸的工艺改进及功能化研究[D].北京:中国制浆造纸研究院,2023.

[11] 郭宛娜,张兆琳.纸嘴棒原纸的半干起皱法生产技术[J].中华纸业,2021,42(10):52-54.

[12] 王健,刘文,朝鲁门,等.烟用滤嘴棒功能化改进及填充纸的技术发展[J].中国造纸,2023,42(2):102-109.

[13] DE NOOY A E J, BESEMER A C, VAN BEKKUM H. Highly selective nitroxyl radical-mediated oxidation of pri-

mary alcohol groups in water-soluble glucans[J]. Carbohydrate Research, 1995, 269(1): 89-98.

[14] SAITO T, ISOGAI A. Wet strength improvement of TEMPO-oxidized cellulose sheets prepared with cationic polymers[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(3): 773-780.

[15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法: GB/T 12914—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纸和纸板 浸水后抗张强度的测定: GB/T 465.2—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纸和纸板透气度的测定: GB/T 458—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纸 柔软度的测定: GB/T 8942—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 纸和纸板厚度的测定: GB/T 451.3—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[20] SEGAL L, CREELY J J, MARTIN A E Jr, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer[J]. Textile Research Journal, 1959, 29(10): 786-794.

[21] Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Carboxyl content of pulp: TAPPI T237cm-98[S]. Atlanta: Chemical Properties Committee of the Process and Product Quality Division, 1998.

[22] 湖北中烟工业有限责任公司. 烟用材料 烟用滤棒 040100 烟用滤棒技术标准: QB/HBZY. WZ. CL. LB-040100-0001[S].

[23] 国家烟草专卖局. 卷烟 主流烟气中氨的测定 离子色谱法: YC/T 377—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

[24] 卷烟. 主流烟气中主要酚类化合物的测定. 高效液相色谱法: YC/T 255—2008[S].

[25] 卷烟. 主流烟气中主要羰基化合物的测定. 高效液相色谱法: YC/T 254—2008[S].

[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 卷烟 烟气气相中一氧化碳的测定 非散射红外法: GB/T 23356—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[27] 国家烟草专卖局. 卷烟主流烟气中氰化氢的测定 连续流动法: YC/T 253—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 卷烟 主流烟气总粒相物中烟草特有 N-亚硝胺的测定 气相色谱-热能分析联用法: GB/T 23228—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[29] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 感官评价方法: YC/T 138—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

[30] 李荣一, 金东柱. 纤维长度和粗度对纸张结构性能的影响[J]. 中国造纸, 2018, 37(7): 49-52.

[31] 王娜, 曾海斌, 高国强, 等. 五种松属树种针叶长度与叶水力功能、结构的关系[J]. 湖南生态科学学报, 2024, 11(2): 26-34.

[32] 邓少鹏, 杨光远, 彭三文, 等. 纸质滤棒结构重组实验及产品性能研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(10): 1-3.

[33] 王丽珍, 李晓天, 王俊跃. TEMPO 氧化结合高压均质制备向日葵秸皮纤维素纳米纤维[J]. 中国造纸学报, 2025, 40(2): 26-33.

[34] 徐一鑫, 石大为, 曹凯伦, 等. 超声-TEMPO 氧化法制备胡麻纤维素纳米纤维[J]. 轻纺工业与技术, 2025, 54(2): 16-19.

[35] 叶剑, 徐卫城, 陈欢欢, 等. TEMPO 氧化预处理对竹浆纤维性能的影响[J]. 纸和造纸, 2021, 40(5): 6-9.

[36] 吴明月, 戴鑫建, 王鑫, 等. TEMPO 氧化处理调控轻木细胞壁纳米结构[J]. 木材科学与技术, 2024, 38(6): 1-7.

[37] 刘刚, 韩卿, 夏安军. TEMPO 选择性催化氧化对纸浆成纸性能的影响[J]. 中华纸业, 2008, 29(7): 50-53.

Research on functional filter rod based on TEMPO oxidized fiber

CHE Jing^{1,2,3}, LI Xinxin^{2,3}, LI Zan^{2,3}, HAN Lei^{2,3}, LEI Shanshan¹,
JIANG Jungang¹, ZHANG Yifan¹, WANG Lei¹

1. Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. China Tobacco Hubei Industrial Co., Ltd., Wuhan 430040, China;
3. China Tobacco Hubei Industrial of Cigarette Material Co., Ltd., Wuhan 430050, China

Abstract: Based on the traditional papermaking process for reconstituted tobacco, combined with 2, 2, 6, 6-tetramethylpiperidine-1-oxide free radical (TEMPO)-mediated fiber oxidation modification technology, functional filter rods made from green and low-carbon plant fibers were prepared and applied to conventional cigarettes for sensory evaluation studies. The results showed that the optimal conditions for preparing the plant fiber-based

functional filter rods were as follows: a mass ratio of softwood fiber to acetate fiber of 8:2, a TEMPO dosage of 0.01 mmol/g, and a beating degree of $(25\pm2)^\circ\text{SR}$. Under these conditions, the base paper of the filter rod had a basis weight of 45 g/m², a bulk of 2.88 cm³/g, an air permeability of 93 μm/(Pa · s), and a wet tensile index of 3.073 N · m/g. The coated plant fiber-based functional filter rod cigarettes exhibited a circumference, roundness, hardness, and pressure drop of approximately 24.14 mm, 0.39 mm, 87.2%, and 331 mm H₂O, respectively, all meeting the filter rod standards of cigarette enterprises (circumference: (24 ± 0.20) mm, roundness: ≤ 0.40 mm, hardness: $\geq 82.0\%$, and pressure drop: (310 ± 30) mm H₂O). Compared with traditional pure acetate filter rods, the total sensory evaluation score of cigarettes with coated plant fiber-based functional filter rods showed little difference, decreasing by only 2 points, while the release of harmful components in the mainstream smoke was significantly reduced. Therefore, the performance of the plant fiber-based functional filter rods prepared in this study can meet the standard requirements, which opens up a new avenue for the development of green, low-carbon, biodegradable, and flavor-enhanced cigarette filter rods.

Key words:functional filter stick;TEMPO modification;physical indicator;smoke indicator;sensory evaluation

[责任编辑:杨晓娟 贾学伟]