

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.022

再生聚丙烯生产过程中酚类异味物质溯源与控制

庞承焕¹, 曾可妮¹, 谢晓琼¹, 刘彦伟²

(1. 国高材高分子材料产业创新中心有限公司, 广州 510663; 2. 金发科技股份有限公司, 广州 510663)

摘要: 该研究采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱/嗅闻联用技术(HS-SPME-GC-MS/O), 对再生聚丙烯(PP)生产过程中的挥发性成分进行系统分析。通过高分辨气相色谱分离结合质谱鉴定, 并利用同步嗅闻端口实时记录感官响应, 建立了化学成分与气味特征的直接关联。研究进一步通过半定量分析追踪目标物质的动态变化, 并采用气味活性值(OAV)评估其对整体气味的贡献程度。结果表明, 特征“焦糊味”主要来源于2,4-二叔丁基苯酚。该物质在原料中未检出, 在造粒阶段急剧升高至64.7 µg/kg, 在改性成品中积累至72.5 µg/kg。GC-MS/O分析在保留时间23.3 min处捕捉到强烈气味, 经鉴定为2,4-二叔丁基苯酚(匹配度>85%)。该物质在改性成品中的OAV高达145 (阈值0.5 µg/L), 确认为关键异味物质。机理研究表明, 该物质主要来源于抗氧化剂丁基羟基甲苯和抗氧化剂168在高温(>200 °C)和高剪切(>300 r/min)条件下的热降解。该研究建立了从化学识别到感官验证的溯源方法, 明确了2,4-二叔丁基苯酚为该再生PP的关键异味指示物。研究成果为再生塑料生产企业优化工艺参数和开发高效异味控制技术提供了理论基石, 推动了再生塑料生产从经验导向迈向科学调控。

关键词: 再生聚丙烯; 异味溯源; 气相色谱-质谱/嗅闻; 气味活性值; 质量控制

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0170-06

Traceability and control of phenolic odorants in production process of recycled polypropylene

PANG Chenghuan¹, ZENG Keni¹, XIE Xiaoqiong¹, LIU Yanwei²

(1. National High Material Innovation Center Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Kingfa Sci.&Tech. Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry (HS-SPME-GC-MS/O) was employed to systematically analyze volatile compounds in recycled polypropylene(PP) production process. High-resolution gas chromatographic separation was combined with mass spectrometric identification, and a synchronous sniffing port was utilized to record sensory responses in real time. This approach established direct correlations between chemical compositions and odor characteristics. By semi-quantitative analysis, dynamic changes of target substances were further tracked to evaluate their contribution to the overall odor intensity using odor activity values (OAV). Results demonstrate that the characteristic burnt odor mainly originates from 2, 4-di-tert-butylphenol. This compound is not detected in raw materials, but its concentration increases sharply to 64.7 µg/kg during the pelletization stage and accumulate to 72.5 µg/kg in the modified product. A strong odor is perceived at the retention time of 23.3 min through GC-MS/O analysis, and is identified as 2, 4-di-tert-butylphenol, with a matching rate of over 85%. This compound show an OAV of 145 (threshold: 0.5 µg/L) in the modified product, confirming it as a key odor-causing compound. Mechanistic investigation reveals that it primarily derives from thermal degradation of antioxidants butyl hydroxytoluene and antioxidants 168 under conditions of a temperature higher than 200 °C and a shear rate greater than 300 r/min. The study established traceability methods from chemical identification to sensory verification, and identified 2, 4-di-tert-butylphenol as a key odor indicators in recycled PP. These findings provide a theoretical foundation for recycled plastic manufacturing enterprises to optimize process parameters and develop efficient odor control technologies, facilitating the transition from experience-oriented to scientifically-regulated production in plastic recycling.

Keywords: recycled polypropylene ; odor traceability ; GC-MS/O ; odor activity value ; quality control

通信作者: 曾可妮, 硕士, 主要从事高分子材料及制品分析表征工作

收稿日期: 2025-10-27

引用格式: 庞承焕, 曾可妮, 谢晓琼, 等. 再生聚丙烯生产过程中酚类异味物质溯源与控制[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1): 170-175.

PANG Chenghuan, ZENG Keni, XIE Xiaoqiong, et al. Traceability and control of phenolic odorants in production process of recycled polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 170-175.

随着塑料循环利用技术的快速发展,再生聚丙烯的高值化应用已成为塑料废弃物污染治理的重要方向。然而,再生料存在的异味问题严重制约了其在高端领域的应用,其中酚类物质引发的“焦糊味”尤为突出。再生料异味分析面临诸多挑战:首先,其成分复杂,含有大量降解产物和添加剂残留^[1-2];其次,挥发性组分分离难度大,传统分析方法难以实现有效分离;最重要的是,化学成分与感官特征难以建立直接关联,导致异味溯源困难。

酚类物质在再生聚丙烯中的来源主要包括两方面:一是加工过程中抗氧化剂[如丁基羟基甲苯(BHT)和168]的热降解产物,二是来源于废旧塑料中附着的胶黏剂等物质的降解^[3]。由于再生聚丙烯原料来源复杂、加工流程多样,明确酚类物质的形成机制,对异味控制具有重要意义。监测其浓度变化不仅能反映材料所经历的热历史及加工稳定性^[4-5],还可建立酚类物质含量与感官异味强度之间的定量关系,从而将主观气味评价转化为客观、量化的指标。这为再生塑料生产过程中的工艺优化与产品质量分级提供了科学依据。

针对再生塑料体系复杂、难以分离的问题,笔者创新性地采用高分辨气相色谱-质谱(GC-MS)与嗅辨联用(GC-MS/O)技术,结合顶空-固相微萃取(HS-SPME)前处理方法,实现了采样、萃取、浓缩的三合一集成预处理,显著提高了痕量异味物质的富集效率^[6]。该系统通过高分辨GC-MS完成复杂基质中酚类物质的高效分离与精准定性,并借助同步嗅闻端口实时捕获色谱流出物的感官响应,成功将化学成分与特征气味(如“焦糊味”)准确关联,突破了再生料异味溯源中组分复杂、分离困难、气味-物质难以匹配的技术瓶颈^[7]。基于此,建立了“定性-定

量-感官”一体化的评价体系,为实现再生塑料气味的客观评估及生产过程的精准优化提供了可靠的分析依据与管控策略。

1 实验部分

1.1 主要原材料

原生聚丙烯:PPH-Y26,熔体流动速率为25 g/10 min,中科(广东)炼化有限公司;

回收聚丙烯[包括回收原料(RPP-Raw)、清洗后碎片(RPP-Wash)、挤出造粒粒子(RPP-Pel)和未进行除味处理的改性模型样品(RPP-Mod)]:金发环保科技有限公司;

滑石粉:中值粒径(D_{50})涵盖12、5、3 μm (分别对应1 250、3 000、5 000目),英格瓷(芜湖)有限公司;

抗氧化剂1:受阻酚类抗氧化剂,汽巴精化(中国)有限公司;

抗氧化剂2:亚磷酸酯类抗氧化剂,汽巴精化(中国)有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:SHJ-30,南京瑞亚高聚物装备有限公司;

GC-MS仪:Orbitrap Exploris GC,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

串联型嗅辨仪:GERSTEL ODP4,德国哲斯泰公司。

1.3 试样制备

表1为再生聚丙烯配方。按表1配比称取原料,经高混机混匀,在双螺杆挤出机中挤出造粒,螺杆转速设为550 r/min,挤出温度1区为65 $^{\circ}\text{C}$,2区为160 $^{\circ}\text{C}$,3区为190 $^{\circ}\text{C}$,4~12区为210 $^{\circ}\text{C}$ 。助剂组成为抗氧化剂1与抗氧化剂2的质量比为1:1。

表1 再生聚丙烯配方

Tab. 1 Formulation of recycled polypropylene

Item	RPP-Raw	RPP-Wash	RPP-Pel	RPP-Mod
PP content/%	100(RPP-Raw)	100(RPP-Raw)	99.5(RPP-Wash)	75(RPP-Pel)
Additive content/%	0	0	0.5	0.5
Talc content/%	0	0	0	24.5
Processing method	—	Heated abrasive washing	Twin-screw extrusion	Twin-screw extrusion

1.4 测试与表征

HS-SPME/GC-MS测试条件:称取1.0 g样品置于20 mL顶空瓶中,于80 $^{\circ}\text{C}$ 下平衡5 min,采用50/30 μm DVB/CAR/PDMS萃取头吸附30 min,解析

3 min后进样。GC-MS分析使用TG-5SIL MS色谱柱(60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm),进样口温度设定为230 $^{\circ}\text{C}$,载气为高纯氦气(99.999%),流速1.0 mL/min。程序升温时初始温度40 $^{\circ}\text{C}$ 保持1 min,以

15 °C/min 升至 100 °C 保持 1 min,再以 5 °C/min 升至 250 °C 保持 5 min,总运行时间 47 min。质谱接口温度 280 °C,离子源温度 250 °C,扫描范围 35~350。

嗅闻测试条件:传输线温度 250~280 °C,嗅辨口温度 150~200 °C,持续通入 0.5~1.0 L/min 湿化空气维持嗅觉敏感性。色谱流出物按 4:1 比例分流至嗅辨口与质谱仪。

半定量分析:内标法,称取适量色谱纯甲苯,用甲醇溶解并定容,配制成浓度为 10 μg/mL 的内标储备液。准确称取 1.0 g (精确至 0.1 mg) 待测塑料样品于 20 mL 顶空进样瓶中。使用微量注射器向样品中加入 10 μL 上述甲苯内标储备液,使其在样品体系中的理论添加量为 0.1 μg。将加标后的样品立即密封,并按顶空-气相色谱-质谱分析条件进行测定。

表2 气味等级评价表

Tab. 2 Odor intensity rating scale

Level	Intensity description	Sensory definition
1	No odor	Completely undetectable; no odor perceived.
2	Faint/Slight	Perceptible but without distinct characteristics; requires careful sniffing to detect.
3	Noticeable	Clearly noticeable with a defined character, but with weak intensity.
4	Pronounced	Distinct and persistent odor; perceived immediately upon entering environment.
5	Strong	Intense, offensive, and irritating odor.
6	Overpowering	Extremely aggressive and intolerable stench.

2 结果与讨论

2.1 酚类物质的动态变化规律与形成机制

图1为再生聚丙烯各生产阶段 GC-MS 总离子流图。如图1所示,各生产阶段样品的 GC-MS 总离子流色谱图直观地印证了上述酚类物质的动态演变规律。通过对再生聚丙烯生产全流程的多模态分析,发现酚类物质在不同生产阶段呈现明显的动态演变特征。

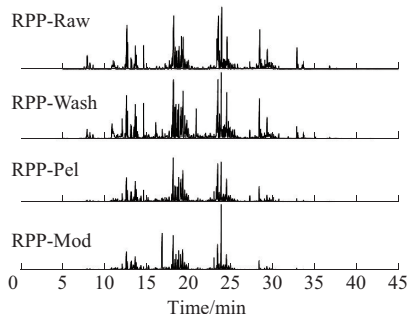


图1 再生聚丙烯各生产阶段 GC-MS 总离子流图

Fig. 1 GC-MS total ion chromatograms of recycled polypropylene at various production stages

表3为再生聚丙烯各生产阶段中酚类物质的含量变化。由表3可知,在原料(RPP-Raw)中未检出显

数据处理:采用 Compound Discoverer 进行解卷积和 NIST 谱库检索,以匹配度大于 850 作为化合物判定标准,同时结合保留指数验证定性结果。通过嗅闻与气味活性值(OAV)确定关键异味物质。

“匹配度”是综合匹配因子、反向匹配因子和纯度等多个指标计算得出的化合物鉴定相似性评分,其数值范围为 0~1 000,分数越高代表质谱图库匹配的可靠性越高。

气味评价:依据大众 PV 3900 标准,干态,在 (80±2) °C 的恒温烘箱中持续加热 2 h。加热结束后,样品需冷却至室温(如 23 °C)方可进行气味评价。采用 3 人评价小组,以 6 级强度标度法对再生塑料气味进行感官评价。该标准将气味强度划分为 1~6 级,分别对应从“无气味”到“强烈异味”的渐进式感官体验,见表2。

著含量的目标酚类物质,清洗后(RPP-Wash)阶段有微量检出,这是由于弱碱和表面活性剂主要用于去除油脂、食物残渣等,而非针对已化学键合或溶解在聚合物相中的小分子极性物质。2,4-二叔丁基苯酚极性较强,更倾向于保留在疏水的聚丙烯相中,导致清洗效率不高。表明破碎、清洗等前处理工序难以有效去除部分极性污染物^[8]。

表3 再生聚丙烯各生产阶段中酚类物质的含量变化

Tab. 3 Content variation of phenolic substances in recycled polypropylene during each production stages

Name	CAS NO.	Content/(μg·kg ⁻¹)			
		RPP-Raw	RPP-Wash	RPP-Pel	RPP-Mod
BHT	128-37-0	N.D.	1.0	58.9	63.1
P-tert-butylphenol	98-54-4	N.D.	N. D.	4.2	3.3
2,4-di-tert-butylphenol	96-76-4	N.D.	3.3	64.7	72.5
2,6-di-tert-butylphenol	128-39-2	N.D.	N. D.	1.8	3.1

Notes: N.D. represents not detected.

真正关键的变化发生在造粒阶段,酚类物质的种类与含量显著提升。2,4-二叔丁基苯酚含量急剧升高至 64.7 μg/kg,占该阶段挥发性酚类物质总量的 50%,成为最主要的酚类组分。该结果表明,酚

类物质的生成是外部污染与内部引发并存,与高温加工过程中的化学变化密切相关。当物料经历高温(>200 ℃)、高剪切(螺杆转速>300 r/min)的造粒过程时,热-机械协同作用诱发了聚合物体系内的降解反应。

至改性阶段(RPP-Mod),2,4-二叔丁基苯酚浓度上升,高于前段工序,说明该类物质热稳定性较高或与基体结合紧密,难以通过后续加工彻底去除。并且新一轮抗氧化剂168的加入加剧了2,4-二叔丁基苯酚的富集^[9]。作为对比,常用抗氧化剂BHT及其他衍生物(如对叔丁基苯酚和2,6-二叔丁基苯酚)在各阶段均未检出显著含量,说明其在材料使用和前处理过程中已大量消耗或转化,进一步佐证了酚类物质的内部生成机制。

2.2 关键异味物质的识别与贡献分析

表4为再生聚丙烯各生产阶段中气味等级和气味类型变化。感官评价结果揭示了再生PP生产过程中气味来源的阶段转移特征。在原料(RPP-Raw)与清洗后(RPP-Wash)阶段,样品呈现的“油脂味”主要源于回收过程中引入的食品残留、油脂等污染物。该阶段测得的各类酚类物质(包括BHT、2,4-二叔丁基苯酚等)含量极低或未检出,证实它们并非前段工序的主要气味来源。值得注意的是,从原料到造粒,气味等级在6.0至5.5之间波动,表明其整体气味强度处于同一较差水平,其气味性质是由化合物成分变化引发的。

表4 再生聚丙烯各生产阶段中气味等级和气味类型变化

Tab. 4 Variation in odor intensity and odor type of recycled polypropylene across production stages

Item	RPP-Raw	RPP-Wash	RPP-Pel	RPP-Mod
Odor intensity score	6	6	5.5	5.8
Odor description	Oily	Oily	Burnt	Burnt

关键的转变发生在造粒(RPP-Pel)与改性(RPP-Mod)阶段。此时,气味描述从“油脂味”明确转变为“焦糊味”,与之同步的是多种酚类物质浓度发生了数量级式的跃升。具体而言,2,4-二叔丁基苯酚的含量从清洗阶段的3.3 μg/kg骤增至造粒阶段的64.7 μg/kg,并在改性阶段进一步积累至72.5 μg/kg,BHT也从1.0 μg/kg增至58.9 μg/kg,并在改性阶段进一步积累至63.1 μg/kg。尽管造粒与改性阶段之间的气味等级(5.5与5.8)差异不大,但其共有的“焦糊味”特征与持续高浓度的酚类物质分布高度吻合。

为识别再生聚丙烯中的关键异味物质,本研究采用GC-MS/O技术对造粒阶段样品进行分析^[10]。在保留时间23.3 min处持续检测到强烈的“焦糊味”,经质谱鉴定为2,4-二叔丁基苯酚(匹配度>850)。为客观评估挥发性组分对整体气味的贡献程度,通过OAV对其气味贡献进行量化分析。OAV(简称 O_{AV})定义为化合物在样品中的浓度与其气味阈值的比值,其计算公式见式(1)^[11]。

$$O_{AV}=C_i/T_i \quad (1)$$

式中: C_i 为化合物*i*在样品中的浓度,单位为μg/kg或μg/L,本研究通过内标法进行半定量分析获得; T_i 为化合物*i*的气味阈值,单位为μg/kg或μg/L。气味阈值是指一半数量的感官评价员能够识别出该物质气味时的最低浓度。

图2为再生聚丙烯各生产阶段关键异味物质OAV变化。通过对各生产阶段OAV的分析发现,酚类化合物在造粒阶段成为关键异味贡献者。以2,4-二叔丁基苯酚气味阈值0.5 μg/L为例,其OAV从清洗阶段的6.6急剧上升至造粒阶段的129.4,并在改性阶段进一步增至145,这一数量级变化证实了热加工过程中抗氧化剂降解是再生聚丙烯“酚醛味”的主要来源,表明2,4-二叔丁基苯酚为再生聚丙烯造粒阶段的关键异味物质,对整体气味具有突出贡献^[5]。感官评价与化学分析结果高度一致,证明多模态方法在异味物质识别中具有良好可靠性与适用性。

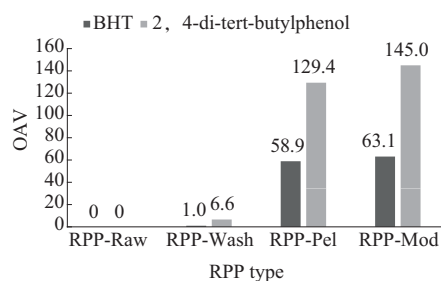


图2 再生聚丙烯各生产阶段关键异味物质OAV变化

Fig. 2 Changes in OAV of key odorants of recycled polypropylene across production stages

综上所述,前期(毛料、清洗)的气味主要由回收污染物控制,其气味强度相对稳定在较差的水平;而后期(造粒、改性)出现的新增“焦糊味”特征,则与酚类物质在高温加工过程中的大量生成与富集直接相关。这一结论精准地区分了不同生产环节异味的主要矛盾,明确了将酚类物质作为后期工序关键控制靶点的必要性。

2.3 机理分析

上述结果揭示了再生聚丙烯生产中酚类物质变化的核心机理:作为酚类抗氧化剂,BHT和抗氧剂168在物料的前期使用和回收加工中通过捕获自由基、自身热降解及挥发等途径被快速消耗。其分子在高温、剪切和氧气作用下发生断链和异构化,转化为分子量更小、极性更强的酚类衍生物^[12]。

2,4-二叔丁基苯酚作为抗氧剂168降解后的稳定终端产物,分子量较小、极性较强(相对于BHT)、沸点较高且与聚合物基体可能存在一定相互作用,导致其在加工过程中难以通过气态方式有效排出。随着加工过程的推进,该物质如同“化学灰烬”一般在体系中持续积累,成为再生聚丙烯中残留的主要酚类物质^[13-14]。其强烈的“焦糊味”特征与其分子结构中羟基和叔丁基的空间排列密切相关,这种结构使其具有较高的气味活性和低气味阈值。

2.4 控制策略与建议

基于2,4-二叔丁基苯酚的形成机理和溯源分析结果,为有效控制再生聚丙烯中酚类异味的产生,需要从多个环节采取针对性措施。

首先,在工艺优化方面,应当适当降低挤出机各区的加工温度,在保证塑化质量的前提下减少热输入,同时优化螺杆转速和组合,以降低剪切生热和物料停留时间^[15-16]。

其次,在抗氧化剂体系选择方面,建议采用耐热性更优、不易产生带有气味降解产物的抗氧化剂品种,从而从源头上减少2,4-二叔丁基苯酚的生成。

第三,在原料预处理方面,需要加强前期分选工作,减少含有大量未知添加剂或已多次回收的废料比例。建立完善的原料质量评价体系,对不同来源的回料进行分级处理,可有效控制原料中的潜在异味前体物质^[17-18]。

3 结论

(1)建立了HS-SPME-GC-MS/O气味溯源分析方法,有效解决了再生塑料异味溯源中化学成分与感官特征关联难的技术瓶颈,实现了关键异味物质的精准识别。提出将2,4-二叔丁基苯酚含量作为再生聚丙烯气味质量的核心评价指标,建立快速检测方法,为生产企业提供有效的质量控制手段。

(2)确证2,4-二叔丁基苯酚是再生聚丙烯中的关键异味物质(OAV=145),其在造粒阶段含量显著升高至64.7 $\mu\text{g/kg}$,并在改性阶段进一步积累至

72.5 $\mu\text{g/kg}$,呈现明显的工艺关联性。揭示该异味物质主要源于抗氧剂BHT和168在高温(>200 $^{\circ}\text{C}$)、高剪切(>300 r/min)条件下的热降解反应,阐明了其在加工过程中的形成机制。

(3)通过多维度技术手段解决了再生塑料异味控制难题,构建的气味溯源分析方法具有普适性,可推广至聚乙烯、聚苯乙烯等其他再生塑料的异味诊断与质量控制,为塑料循环利用行业提供技术支撑。

参考文献

- [1] AL-MALAICA S. Reactive modifiers for polymers[M]. London: Chapman & Hall, 1997:266-291.
- [2] FULLER J, WHITE D, YI H J, et al. Analysis of volatile compounds causing undesirable odors in a polypropylene - high-density polyethylene recycled plastic resin with solid-phase micro-extraction[J]. Chemosphere, 2020, 260. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127589.
- [3] 王晶,李梦圆,彭莹,等.顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱法结合相对气味活度值分析再生聚苯乙烯颗粒中的气味物质[J]. 化学分析计量, 2025, 34(8):88-97.
WANG Jing, LI Mengyuan, PENG Ying, et al. Analysis of odor substances in recycled polystyrene particles by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with relative odor activity values[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2025, 34(8):88-97.
- [4] 杨雪,王静,胡月朦,等.基于HS-SPME/GC-MS/O分析滇绿茶特征香气物质[J]. 分析测试学报, 2024, 43(4):555-565.
YANG Xue, WANG Jing, HU Yuepeng, et al. The analysis of characteristic aroma compounds in Dian green tea by application of HS-SPME/GC-MS/O[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(4): 555-565.
- [5] 柯胜蓝,李晶,刘洋.汽车内饰用再生聚丙烯材料气味溯源与改性分析[J]. 上海塑料, 2023, 51(5):32-38.
KE Shenglan, LI Jing, LIU Yang. Odor tracing and modification analysis of recycled polypropylene material for automotive interior parts[J]. Shanghai Plastics, 2023, 51(5):32-38.
- [6] 熊一鸣,秦舒浩,王莉,等.沸石粉对PP中VOC散发性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(8):118-122.
XIONG Yiming, QIN Shuhao, WANG Li, et al. Effect of zeolite powder on VOC emission in PP[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(8):118-122.
- [7] 池海涛,刘颖,高峡,等.食品接触聚丙烯塑料中抗氧化剂迁移模型研究[J]. 分析化学, 2015, 43(3):399-403.
CHI Haitao, LIU Ying, GAO Xia, et al. Study on migration model of antioxidants in food contact polypropylene plastics[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2015, 43(3):399-403.
- [8] Strangl M, Buettner A, Hinrichs T. Identification of odourants in plastic laminates using sensory and instrumental analytical methods

- [J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(9):577–586.
- [9] 岑梅卿,李艳艳. 聚丙烯异味原因分析及对策[J]. *广东化工*, 2022, 49(20):92–94.
- CEN Meiqing, LI Yanyan. Causes and countermeasures of peculiar smell of polypropylene[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(20):92–94.
- [10] STRANGL M, FELL T, SCHLUMMER M, et al. Characterization of odorous contaminants in post-consumer plastic packaging waste using multidimensional gas chromatographic separation coupled with olfactometric resolution[J]. *Journal of Separation Science*, 2017, 40(7):1 500–1 507.
- [11] MEN H, YIN C B, SHI Y, et al. Quantification of acrylonitrile butadiene styrene odor intensity based on a novel odor assessment system with a sensor array[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 33 237–33 249.
- [12] PEETERS A, GODERIS B, VAN PUYVELDE P, et al. The complex morphological, mechanical, and crystalline evolution of polypropylene during recycling[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(9):2 097–2 110.
- [13] 朱秀梅,王裕森,尹国杰,等. 软质聚氯乙烯材料配方气味改善研究[J]. *广东化工*, 2021, 48(5):26–28.
- ZHU Xiumei, WANG Yusen, YIN Guojie, et al. Study on odor improvement of soft polyvinyl chloride material from the perspective of formulation[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(5):26–28.
- [14] 王文虎,代刚,杨亚乔,等. 聚丙烯产品颗粒异味组分分析及降低异味方法探讨[J]. *云南化工*, 2023, 50(增刊1):18–21.
- WANG Wenhui, DAI Gang, YANG Yaqiao, et al. Analysis of odor components in polypropylene particles and discussion on methods of reducing odor[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2023, 50(S1): 18–21.
- [15] 项攀,申洪涛,陈芝飞,等. GC-O-MS结合OAV表征苔香料关键香气化合物[J]. *食品工业*, 2022, 43(3):264–269.
- XIANG Pan, SHEN Hongtao, CHEN Zhifei, et al. Characterization of key aroma compounds in moss fragrance by GC-O-MS and OAV[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(3):264–269.
- [16] 赖昂,陈胜杰,任思华,等. SEBS分子结构及配方组成对改性聚丙烯刚韧平衡性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(7):50–55.
- LAI Ang, CHEN Shengjie, REN Sihua, et al. Influences of SEBS molecular structure and formulation composition on stiffness-toughness balance of modified polypropylene[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(7):50–55.
- [17] 赵一权,董婧晗,张铜柱,等. 汽车外饰用再生聚丙烯材料性能研究[J]. *中国塑料*, 2023, 37(1):112–118.
- ZHAO Yiquan, DONG Jinghan, ZHANG Tongzhu, et al. Study on properties of recycled polypropylene for automobile exterior parts [J]. *China Plastics*, 2023, 37(1):112–118.
- [18] 赵福,任明辉,郭秋彦,等. 车用聚丙烯气味改善技术专利分析综述[J]. *交通节能与环保*, 2022, 18(1): 15–19.
- ZHAO Fu, REN Minghui, GUO Qiuyan, et al. Review on patent analysis of odor improvement technology for polypropylene[J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 2022, 18(1):15–19.

(上接第 163 页)

- [11] 陈严飞,何明畅,宗优,等. 非粘结柔性软管失效模式与控制措施研究进展[J]. *天然气工业*, 2021, 41(11):122–131.
- CHEN Yanfei, HE Mingchang, ZONG You, et al. Research progress on failure modes of unbonded flexible pipe and their control measures[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(11):122–131.
- [12] GIBSON A G, LINDEN J M, ELDER D, et al. Non-metallic pipe systems for use in oil and gas[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2011, 40(10):465–480.
- [13] ZHANG X S, WANG S, MA W L, et al. Study on the influence of bending curvature on the bending characteristics of unbonded flexible pipes[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281. DOI:10.1016/j.oceaneng.2023.114730.
- [14] 赵德喜. 弯曲荷载作用下纤维增强热塑性柔性管损伤失效研究[J/OL]. *海洋工程*, 2025:1–15 [2025–06–03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1423.P.20250603.1426.012.html>.
- ZHAO Dexi. Study on damage failure of fiber-reinforced thermoplastic flexible pipe under bending load[J/OL]. *The Ocean Engineering*, 2025: 1–15 [2025–06–03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1423.P.20250603.1426.012.html>.
- [15] 许艳艳,葛鹏莉,肖雯雯,等. 塔河油田非金属管失效分析与评价体系的建立[J]. *石油与天然气化工*, 2020, 49(4):78–82.
- XU Yanyan, GE Pengli, XIAO Wenwen, et al. Establishment of failure analysis and evaluation system for non-metallic pipes in Tahe oilfield[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2020, 49(4): 78–82.
- [16] 冯昕媛,杨艺,李春雨,等. 西部某油田集输管道内腐蚀特征及控制方案[J]. *腐蚀与防护*, 2024, 45(12):113–118.
- FENG Xinyuan, YANG Yi, LI Chunyu, et al. Internal corrosion characteristics and control scheme of gathering pipeline in a western oilfield[J]. *Corrosion & Protection*, 2024, 45(12):113–118.
- [17] 陈小飞,杨文,骆登茂,等. 气田注醇用柔性复合管服役性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(9):126–132.
- CHEN Xiaofei, YANG Wen, LUO Dengmao, et al. Service performances of flexible composite pipe for gas field alcohol injection [J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(9):126–132.