

T/CQSES

重庆市环境科学学会团体标准

T/CQSES 38—2026

挥发性有机化合物（VOCs）废气治理用吸收剂产品质量标准

Product Quality Standard for Absorbents Used in Volatile Organic Compounds
(VOCs) Waste Gas Treatment

2026 - 3 - 18 发布

2026 - 6 - 18 实施

重庆市环境科学学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 产品分类与代号	2
5 技术要求	3
6 试验方法	6
7 检验规则	8
8 标志、包装、运输和贮存要求	9
附录 A（资料性）VOC 饱和吸收量测定方法	12
附录 B（资料性）吸收剂再生性能测定方法	14
附录 C（规范性）动态模拟工况测试方法	16
附录 D（资料性）长期运行稳定性试验方法	19
附录 E（资料性）再生能耗测定方法	22
附录 F（资料性）高低温试验方法	24

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由三众环保新材料（重庆）有限公司提出。

本文件由重庆市环境科学学会归口。

本文件起草单位：三众环保新材料（重庆）有限公司、重庆三众环保投资顾问有限公司、重庆华地资环科技有限公司、重庆市科学技术研究院、重庆市生态环境科学研究院、昆明理工大学、重庆化工设计研究院有限公司、中煤科工重庆设计研究院（集团）有限公司。

本文件主要起草人：畅航、畅晟、刘静、龙吉海、赵子龙、张丹、胡伟、聂蕊、江映翔、何卫科、李陵、赵青青、王润泽。

挥发性有机化合物（VOCs）废气治理用吸收剂产品质量标准

1 范围

本文件规定了VOCs废气治理用吸收剂的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于工业VOCs废气治理过程中使用的吸收剂，包括物理型吸收剂、混合型（物理化学）吸收剂等。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法
- GB/T 15608 中国颜色体系
- GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定和气体污染物采样方法
- GB/T 27862 化学品危险性分类试验方法 急性经口毒性试验
- GB/T 30647 涂料中有害元素总含量的测定
- GB 5085.7 危险废物鉴别标准 通则
- GB 16297 大气污染物综合排放标准
- GB 30981 工业防护涂料中有害物质限量
- GB 38508 清洗剂挥发性有机化合物含量限值
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范
- HJ/T 387 工业废气吸收净化装置
- HJ 644 环境空气 挥发性有机物的测定 吸附管采样-热脱附/气相色谱-质谱法
- HJ 734 固定污染源废气 挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法
- HJ 759 环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法
- HJ 1011 环境空气和废气 挥发性有机物的测定 便携式傅里叶变换红外光谱法
- HJ 2000 大气污染防治工程技术导则
- HJ 2026 吸附法工业有机废气治理工程技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

挥发性有机化合物（VOCs） volatile organic compounds

参与大气光化学反应的有机化合物，或者根据有关规定确定的有机化合物。在本文件中特指工业生产过程中排放的、需要治理的挥发性有机化合物，包括苯系物、卤代烃、含氧有机化合物等。

3.2

吸收剂 absorbent solution

以物理溶解、化学吸收为主要作用机理，用于去除废气中VOCs的液态功能材料，包括物理型、混合型吸收剂。

3.3

VOCs 去除效率 volatile organic compounds removal efficiency

本文件中VOCs去除效率计算公式为：

$$\eta=(C_1-C_2)/C_1\times 100\% \cdots \cdots (1)$$

式中:

η ——VOCs 去除效率, %;

C_1 ——吸收塔入口 VOCs 浓度, mg/m^3 ;

C_2 ——吸收塔出口 VOCs 浓度, mg/m^3 。

3.4

吸收剂损耗率 absorbent loss rate

在一个完整的吸收—解吸循环过程中, 吸收剂因挥发、降解等原因造成的质量损失占初始质量的百分比。

3.5

动态吸收容量 (吸收饱和度) dynamic adsorption capacity (adsorption saturation)

在规定的试验条件下, 单位体积 (或质量) 吸收剂达到吸收平衡时所能吸收的VOCs量, 以 mg/g 或 mg/mL 表示。

3.6

再生性能 desorption regeneration performance

吸收剂经解吸处理后, 恢复吸收能力的特性, 通常以再生后的吸收容量与初次吸收容量的百分比表示。

3.7

VOCs 特征组分 characteritic components of VOCs

根据不同行业废气特点, 需要重点控制的VOCs污染物, 主要包括:

——苯系物: 苯、甲苯、二甲苯、乙苯等;

——含氧有机化合物: 甲醇、乙醇、乙酸乙酯、丙酮等。

3.8

吸收剂稳定性 absorbing medium stability

吸收剂在规定的储存、运输和使用条件下, 保持其物理化学性质和吸收性能不发生显著变化的能力, 包括热稳定性、化学稳定性和机械稳定性。

3.9

二次污染 secondary pollution

吸收剂在使用或再生过程中产生的新的环境污染, 包括吸收剂自身挥发、降解产物排放、废弃吸收剂处置不当等造成的污染。

3.10

动态吸收试验法 dynamic adsorption test method

模拟工业废气治理现场工况, 在连续流动的气流中测试吸收剂对VOCs去除性能的试验方法。

4 产品分类与代号

4.1 产品分类原则及方法

根据吸收剂的吸收机理、所适用的VOCs类型和行业 (应用场景) 进行三级分类。具体分类方法, 一级 (高端型) 是指适用于高浓度、复杂组分VOCs治理 (如化工、制药行业), 要求高效、长效、低毒, 满足严苛环保标准的吸收剂; 二级 (通用型) 是指适用于中低浓度VOCs治理 (如印刷、涂装行业), 平衡性能与成本, 满足常规环保要求的吸收剂; 三级 (经济型) 是指适用于低浓度、单一组分VOCs治理 (如小型喷涂、实验室废气、餐饮油烟), 以基础达标为核心的吸收剂。

4.2 产品代号

产品代号由VOCs Absorbent的缩写VAC+类型代码+特性代码+行业代码三部分组成, 采用字母与数字组合表示, 即VAC-X-Y-Z, 格式如表1。

表1 产品分类方法及代号

组成部分	含义说明	编码规则
VAC	产品大类标识 (VOCs Absorbent的缩写)	固定前缀
X	吸收机理类型 (1位大写字母)	P—物理型；M—混合型
Y	目标VOCs类型 (2位数字)	01—苯系物；02—含氧VOCs；03—综合型
Z	应用行业代码 (1位大写字母)	P—石油化工；C—涂装印刷；E—电子制造；G—通用工业

4.3 典型产品分类示例

典型产品分类见表2。

表2 典型产品分类示例

产品全称	产品代号	核心特性	适用场景
苯系物物理吸收剂 (通用工业)	VAC-P-01-G	对苯、甲苯、二甲苯溶解度 $\geq 150\text{g/L}$	机械制造行业喷漆废气
混合型含氧VOCs吸收剂 (石油化工)	VAC-M-02-P	兼具氢键作用与化学反应活性	炼化企业醇类、酯类废气

4.4 特殊类型吸收剂补充规定

4.4.1 再生型吸收剂

在产品代号后加后缀“-R”（如VAC-P-01-G-R），要求再生循环次数 ≥ 50 次，吸收容量保持率 $\geq 90\%$ 。

4.4.2 低毒型吸收剂

在产品代号后加后缀“-L”（如VAC-C-02-E-L），需满足急性经口毒性 $LD_{50} > 1000\text{ mg/kg}$ 。

5 技术要求

5.1 外观

5.1.1 基本外观特征

吸收剂的基本外观应符合表3的规定。

表3 基本外观要求

项目	要求
色泽	应均匀一致，无明显色差。根据产品类型不同，可呈现无色、淡黄色、浅棕色、浅蓝色等，但不得出现异常深色或黑色。
状态	均一透明或半透明液体，无分层、无沉淀、无悬浮颗粒物。允许在低温（0-5℃）储存时出现少量结晶或浑浊，升温至 $25\text{℃} \pm 2\text{℃}$ 并搅拌后应恢复均一状态。
气味	应具有产品特有的轻微气味或无味，无刺激性、恶臭或其他异常气味。
气泡	产品在静置状态下，允许有少量微小气泡，振摇后产生的气泡应能在30分钟内基本消散。
注1：若含有功能性助剂，其分散应均匀，不应出现肉眼可见的助剂团聚或析出物。 注2：经再生处理后的外观应与新吸收剂基本一致，色泽变化不应超过标准样板的2个色号。	

5.1.2 外观异常判定

出现下列情况之一的，判定为外观不合格：

- 色泽明显不均匀，或出现与规定色泽不符的异常深色、黑色；
- 出现明显分层、大量沉淀或肉眼可见的悬浮颗粒物，且在规定温度下搅拌后不能恢复均一；
- 具有强烈刺激性气味、恶臭或其他明显异常气味；
- 振摇后产生的气泡在30分钟内未能基本消散，或产生大量难以消散的泡沫；

- e) 吸收剂出现明显流动性差异或凝胶状物质；
f) 吸收剂出现功能性助剂明显团聚或析出。

5.2 理化指标（通用性质量要求）

5.2.1 通用理化指标

通用理化指标要求均应符合表4的规定。

表4 通用理化指标要求

序号	指标名称	单位	限值要求
1	密度（25℃）	g/cm ³	0.60~1.40
2	pH值（25℃，1%水溶液）	—	4.0~10.0（特殊行业可协议约定）
3	运动粘度（25℃）	mm ² /s	≤100.0
4	水分含量	%（质量分数）	≤5.0（P） ≤10.0（M）
5	蒸发残留物（105℃，2h）	%（质量分数）	≤3.0
6	重金属（以Pb计）	mg/kg	≤200.0
7	急性经口毒性（LD ₅₀ ）	mg/kg	≥1000（大鼠，经口）

5.2.2 专项指标

专项指标要求见表5。

表5 专项指标

序号	指标名称	单位	限值要求
1	VOCs饱和吸收量	g/100g	≥90.0（01类） ≥85.0（02类）
2	亨利系数（25℃，苯）	MPa·m ³ /mol	≤0.15
3	循环使用次数	次	≥50（P） ≥30（M）
4	再生后性能恢复率	%	≥95.0 （与新吸收剂初始性能比）

5.2.3 按应用行业分类的特殊指标

不同行业的特殊指标要求见表6。

表6 行业特殊指标要求

行业代码	行业名称	特殊指标	单位	限值要求
P	石油化工	耐硫性能（H ₂ S≤100mg/m ³ 存在下吸收效率保持率）	%	≥85
C	涂装印刷	与涂料及溶剂兼容性	—	易溶
E	电子制造	金属腐蚀性（铜片，40℃，24h）允许腐蚀量	%	≤0.1

5.2.4 环保性能附加指标

吸收剂环保性能附加指标如表7所示。

表7 环保性能附加指标

序号	指标名称	单位	限值要求
1	自身含低沸点有机溶剂	g/L	≤10.0
2	燃烧性	—	不燃或难燃（闭杯闪点≥60℃）

5.3 性能指标（功能性核心要求）

5.3.1 核心治理性能指标

核心治理性能指标要求见表8。

表 8 核心治理性能指标要求

序号	指标名称	单位	限值要求
1	VOCs去除效率	%	≥90.0（额定工况下，入口浓度≤2000 mg/m ³ ）
2	特定组分去除率	%	苯系物≥95.0；含氧VOCs≥90.0
3	空塔气速适应性	m/s	0.5~1.5（在此范围内去除效率波动≤±5%）
4	液气比敏感性	L/m ³	在0.8~2.0范围内，去除效率变化≤±3%

5.3.2 运行稳定性指标

运行稳定性指标要求见表9。

表 9 运行稳定性指标要求

序号	指标名称	单位	限值要求
1	连续运行寿命	h	≥1500（P）；≥1000（M）
2	温度适应性	°C	5~60（在此范围内性能变化≤±10%）
3	pH值缓冲能力	—	通入酸性/碱性废气（pH波动±2）后，吸收剂pH值变化≤±0.5

5.3.3 安全与环境性能指标

安全与环境性能指标要求见表10。

表 10 安全与环境性能指标要求

序号	指标名称	单位	限值要求
1	比热容	kJ/(kg·K)	≥2.0（P）；≥1.8（M）
2	腐蚀速率	mm/a	≤0.05（对Q235钢，40°C，30d）
3	二次VOCs排放量	g/h	≤50.0（在额定运行条件下）

5.3.4 再生性能指标（适用于R型产品）

再生性能指标要求见表11。

表 11 再生性能指标要求

序号	指标名称	单位	限值要求
1	再生效率	%	≥98.0（单次再生VOCs解吸率）
2	再生能耗	kWh/kg VOCs	≤1.2（P，真空解吸）；≤2.5（M，热解吸）

5.3.5 产品分级指标

一、二和三级产品的指标要求见表12。

表 12 产品分级表

指标类别	指标名称	一级（高端型）	二级（通用型）	三级（经济型）
基础性能	外观	均匀无杂质，无明显异味	基本均匀，轻微异味	基本均匀，允许有一定异味
基础性能	密度 (g/cm ³)	0.8~1.2 (±0.05)	0.7~1.3 (±0.1)	0.6~1.4 (±0.15)
基础性能	pH值	6~8 (中性)	5~9 (近中性)	4~10 (弱酸碱)
吸收性能	静态吸收量 (%)	≥40 (苯系物)	≥30 (苯系物)	≥20 (苯系物)
吸收性能	动态吸收效率 (%)	≥95 (入口浓度500~2000 mg/m ³)	≥90 (入口浓度200~1000 mg/m ³)	≥90 (入口浓度≤500 mg/m ³)
吸收性能	穿透时间 (h)	≥12 (空速1000 h ⁻¹)	≥8 (空速1000 h ⁻¹)	≥4 (空速1000 h ⁻¹)

表12 产品分级表（续）

指标类别	指标名称	一级（高端型）	二级（通用型）	三级（经济型）
耐用性能	再生次数 (次)	≥50 (热解吸后效率保持率≥ 85%)	≥30 (热解吸后效率保持率 ≥80%)	≥10 (热解吸后效率保持率 ≥75%)
耐用性能	抗温性 (°C)	5~60 (效率波动≤5%)	5~40 (效率波动≤8%)	10~25 (效率波动≤10%)
安全环保性	急性经口毒性 (LD ₅₀)	>2000 mg/kg	>1000 mg/kg	≥1000 mg/kg
安全环保性	VOC溶出量 (mg/m ³)	≤10	≤50	≤100
安全环保性	重金属含量 (以Pb计, mg/kg)	≤50	≤100	≤200
行业适配性	适用VOCs浓度 (mg/m ³)	500~5000 (复杂组分)	100~2000 (中等复杂组分)	≤500 (单一/简单组分)

6 试验方法

6.1 外观的测定

取适量实验室样品于无色透明比色管中，在自然光或D65标准光源下目视观察。

6.2 理化指标（通用性质量要求）的测定

6.2.1 通用理化指标的测定

产品的通用理化指标的测定，均需符合表13的要求。

表13 通用理化指标的测定

序号	指标	试验方法
1	密度 (25°C)	按GB/T 4472-2011《化工产品密度、相对密度的测定》进行测定。
2	pH值 (25°C, 1%水溶液)	按GB/T 9724-2007《化学试剂 pH值测定通则》进行测定。
3	运动粘度 (25°C)	按GB/T 265-1988《石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法》进行测定。
4	水分含量	按GB/T 6283-2008《化工产品中水分含量的测定 卡尔·费休法》进行测定。
5	蒸发残留物 (105°C, 2h)	按GB/T 6324.2-2021《有机化工产品试验方法 第2部分：挥发性有机液体水浴上蒸发后干残渣的测定》进行测定。
6	重金属 (以Pb计)	按GB/T 30647-2014《涂料中有害元素总含量的测定》进行测定。
7	急性经口毒性 (LD ₅₀)	按GB/T 27862-2011《化学品危险性分类试验方法 急性经口毒性试验》进行测定。

6.2.2 专项指标的测定

吸收剂专项指标的测定要求见表14。

表14 吸收剂专项指标的测定

序号	指标名称	试验方法
1	VOCs饱和吸收量 (苯系物)	按附录A《VOCs饱和吸收量测定方法》进行测定。
2	亨利系数(25°C, 苯)	按GB/T 22053-2008《液态石油产品 烃类的测定 多维气相色谱法》进行测定。
3	循环使用次数	按附录B《吸收剂再生性能试验方法》进行测定。
4	再生后性能恢复率	综合本文件表3~表11相关指标测定。

6.2.3 安全性能附加指标的测定

安全性能附加指标——燃烧性按GB/T 261-2021《闪点的测定 宾斯基-马丁闭口杯法》进行测定。

6.3 性能指标（功能性核心要求）的测定

6.3.1 功能性核心指标的测定

功能性核心指标的测定要求见表15。

表 15 核心治理性能指标的测定

序号	指标名称	试验方法
1	VOCs去除效率	按HJ 1011-2018《环境空气和废气 挥发性有机物的测定 便携式傅里叶变换红外光谱法》进行测定。
2	特征组分去除率	按HJ 734-2014《固定污染源废气 挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法》进行测定。
3	空塔气速适应性	按附录C《动态模拟工况试验方法》进行测定。
4	液气比敏感性	按附录C《动态模拟工况试验方法》进行测定。

6.3.2 运行稳定性指标的测定

运行稳定性指标的测定要求见表16。

表 16 运行稳定性指标的测定

序号	指标名称	试验方法
1	连续运行寿命	按附录D《长期运行稳定性试验方法》进行测定。
2	温度适应性	按GB/T 10586-2006《湿热试验箱技术条件》进行测定。
3	pH值缓冲能力	按GB/T 9724-2007《化学试剂 pH值测定通则》进行测定。

6.3.3 安全与环境性能指标的测定

安全与环境性能指标的测定要求见表17。

表 17 安全与环境性能指标的测定

序号	指标名称	试验方法
1	比热容	按GB/T 22588-2008《闪光法测量热扩散系数或导热系数》进行测定。
2	腐蚀速率	按GB/T 10124-2021《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》进行测定。
3	二次VOCs释放量	按HJ 644-2013《环境空气挥发性有机物的测定吸附管采样-热脱附/气相色谱-质谱法》进行测定。

6.3.4 再生性能指标（适用于R型产品）的测定

再生性能指标的测定见表18。

表 18 再生性能指标的测定

序号	指标名称	试验方法
1	再生效率	按附录B《吸收剂再生性能试验方法》进行测定。
2	再生能耗	按附录E《再生能耗测定方法》进行测定。

6.3.5 产品分级指标的测定

产品分级的测定要求见表19。

表 19 再生性能指标的测定

序号	指标名称	试验方法
1	外观	按目视法、嗅觉法进行测定。
2	密度 (g/cm ³)	按GB/T 4472-2011《化工产品密度、相对密度的测定》进行测定。

表19 再生性能指标的测定（续）

序号	指标名称	试验方法
3	pH值	按GB/T 9724-2007《化学试剂 pH值测定通则》进行测定。
4	静态吸收量（%）	按HJ 759-2015《环境空气挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱-质谱法》进行测定。
5	动态吸收效率（%）	按HJ 167-2020《环境监测分析方法标准制订技术导则》进行测定。
6	穿透时间（h）	按附录C《动态模拟工况试验方法》C5.1进行测定。
7	再生次数（次）	按附录C《动态模拟工况试验方法》C6.3进行测定。
8	抗温性（℃）	按附录F《高低温试验方法》进行测定。
9	急性经口毒性（LD ₅₀ ）	按GB/T 21605-2008《化学品急性吸入毒性试验方法》进行测定。
10	VOC溶出量（mg/m ³ ）	按HJ 644-2013《环境空气 挥发性有机物的测定 吸附管采样-热脱附/气相色谱-质谱法》进行测定。
11	重金属含量（mg/kg）	按GB 5085.6-2007《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》进行测定。

7 检验规则

7.1 检测分类

根据检验目的、频次和项目范围，将检测分为出厂检验、型式检验、监督检验和仲裁检验四大类，具体分类要求如下：

7.1.1 出厂检验（逐批检验）

出厂检验核心要求见表20。

表 20 出厂检验核心要求

项目	要求内容
检验对象	每一批次生产的成品（以连续生产的同一配方、同一工艺的产品为一个批次，最大批量不超过50t）
检验项目	必检项（共6项）： 1. 外观（5.1） 2. 密度（5.2.1） 3. pH值（5.2.1） 4. 运动粘度（5.2.1） 5. VOCs去除效率（5.3.1） 6. 标签完整性（8.1）
抽样方案	每批次随机抽取3个独立包装（不足3个时全检），每个包装取样量不少于500mL，混合均匀后分为2份（检验用和留样用）
判定规则	所有必检项目均符合文件要求时，判定该批次产品合格；若有1项不合格，应加倍抽样复检，复检仍不合格则判定整批不合格
检验报告	应包含产品名称、型号、批次、检验项目、结果、判定结论、检验日期及检验员签字，随货同行

7.1.2 型式检验（定期/特定条件检验）

型式检验触发条件与要求见表21。

表 21 型式检验触发条件与要求

触发条件	检验项目	检验周期
1. 新产品定型或老产品转产时	全项检验（本文件5章所有技术要求）	—
2. 原材料、生产工艺重大变更时	全项检验	变更后首批次
3. 正常生产时	关键项目（共12项，含出厂检验项+理化指标中80%关键项+性能指标核心项）	每年至少1次
4. 产品停产超过6个月恢复生产时	全项检验	恢复生产首批次
5. 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时	差异相关项目+关键项目	立即执行
6. 国家市场监督管理总局提出型式检验要求时	指定项目或全项检验	按要求执行

型式检验抽样：从出厂检验合格的连续3个批次中随机抽取，每批次取样量不少于1L，混合后作为代表性样品。

7.1.3 监督检验（第三方/监管机构检验）

监督检验实施规范要求见表22。

表 22 监督检验实施规范

实施主体	检验依据	检验重点项目
市场监管部门	本文件+产品明示质量指标+相关法律法规	1. 安全指标 2. 环保指标 3. 核心性能
第三方认证机构	本文件+企业自我声明指标	全项核查（验证企业声明与文件的一致性）
用户委托检验	双方协议约定项目（不得低于本文件基础要求）	按需定制（通常包含VOCs去除效率、稳定性）

结果处理：监督检验不合格的，企业应立即暂停该型号产品生产销售，限期整改并申请复检，复检合格后方可恢复。

7.1.4 仲裁检验（争议解决检验）

仲裁检验规则要求见表23。

表 23 仲裁检验规则

适用场景	检验机构要求	检验规则
供需双方对产品 质量有争议时	由双方共同认可的、具有CMA资质的第三方检验机构（优先选择国家级/省级检测中心）	1. 按本文件规定的方法和项目进行全项检验 2. 若本文件无明确规定，可采用双方协议方法
产品质量投诉或 行政处罚争议时	由市场监管部门指定的法定检验机构	以本文件为唯一依据，不得采用企业内部标准或协议方法

抽样要求：仲裁检验样品应在双方见证下从争议批次产品中随机抽取，一式三份（检验用、双方留样各一份），密封保存并签字确认。

7.2 检测分类优先级与豁免规则

优先级顺序：仲裁检验>监督检验>型式检验>出厂检验（高优先级检验结果可覆盖低优先级，但不得替代）

豁免条件：连续10批次出厂检验合格的产品，可申请将“运动粘度”“密度”等稳定指标的检验频次降低50%，但需经企业质量部门批准并备案

加严规则：出现2次及以上出厂检验不合格的产品，应自动触发加严检验（检验项目增加50%，频次提高至每批次2次），连续5批次合格后方可恢复正常。

8 标志、包装、运输和贮存要求

8.1 产品标志

产品标志核心要素要求见表24。

表 24 产品标志核心要素

标志类型	位置	强制标注内容	推荐标注内容
产品标签	包装容器 外壁	1. 产品名称（含类型代号，如P-01型物理型吸收剂） 2. 生产企业名称及地址 3. 生产日期/批号 4. 净含量 5. 性能等级（一级/二级/三级） 6. 危险化学品标志（符合GB 13690） 7. 储存条件（如“储存于阴凉干燥处”） 8. 保质期	1. 产品标准编号 2. 环保认证标识（如ECO-Label） 3. 应急咨询电话 4. 网址及二维码（含SDS链接）

表24 产品标志核心要素（续）

标志类型	位置	强制标注内容	推荐标注内容
外包装标志	运输包装表面	1. 收发货单位信息 2. 毛重/体积 3. 向上标志（↑） 4. 怕晒/怕雨标志 5. 堆码极限（如“堆码极限4层”）	1. 运输注意事项（如“禁止与氧化剂混运”） 2. 产品批次追溯码
合格证标志	随货文件	1. 检验合格印章 2. 检验员编号 3. 出厂日期 4. 关键指标实测值（密度、pH值、VOCs去除效率）	1. 型式检验有效期 2. 质量追溯二维码

标志要求：所有标志应清晰、牢固、耐摩擦，在产品保质期内不得褪色或脱落；文字高度不小于5mm，危险化学品标志尺寸不小于100mm×100mm（外包装）。

8.2 包装要求

包装要求见表25。

表 25 包装材料与技术规范

包装类型	适用场景	材料要求	技术要求
小包装	实验室样品、小批量采购（≤20L）	高密度聚乙烯（HDPE）桶或玻璃瓶（耐化学腐蚀等级≥Class 8）	1. 瓶口采用螺旋盖+丁腈橡胶密封圈 2. 桶身厚度≥1.5mm 3. 玻璃瓶需配防碎缓冲包装
中包装	常规用户采购（20~200L）	冷轧钢桶或不锈钢桶（304或316材质）或内衬聚四氟乙烯的铁桶	1. 桶身抗压强度≥0.2MPa 2. 焊接处进行泄漏测试（保压30min无气泡） 3. 配备放液阀门（DN25，聚四氟乙烯阀芯）
大包装/IBC	工业级大用量（1000~1500L）	中型散装容器（IBC），内胆为HDPE，外框架为镀锌钢	1. 底部排放阀符合ISO 15003标准 2. 框架承重≥1.5倍装满重量 3. 配备液位计及防静电接地装置
特殊包装	出口产品或危险品运输	符合UN 31A/Y标准的危险品包装	1. 通过ISTA 3A运输测试 2. 每包装单元附正本危险货物运输证书

包装完整性要求：所有包装在出厂前需进行1.2倍额定容量的水压测试（金属容器）或气压测试（塑料容器，0.1MPa保压10min），确保无泄漏；包装封口处应有一次性防伪标识。

8.3 运输要求

运输要求见表26。

表 26 运输方式与安全规范

运输方式	限制条件	安全防护措施	应急准备
公路运输	单件重量≤30t，车速≤80km/h	1. 车厢底部铺设防泄漏托盘（聚乙烯材质，耐腐蚀性） 2. 货物固定采用防静电捆绑带 3. 配备2kg干粉灭火器及吸附棉（≥5kg/车） 4. 运输车辆需张贴“危险品”标识和“保持车距”警示牌	1. 随车携带SDS纸质版及电子档 2. 配备泄漏应急包（中和剂、围堤沙袋、防护手套） 3. 驾驶员需持危险品运输资格证
铁路运输	仅限棚车或罐车运输	1. 罐车安全阀设定压力0.15MPa 2. 装卸作业时使用防静电接地装置 3. 运输途中每2h检查一次密封情况	1. 提前向铁路部门申报“铁路危险货物运输技术说明书” 2. 配备通讯设备保持实时联系
水路运输	符合IMDG规则要求	1. 舱内设置通风系统（换气量≥10次/h） 2. 与其他货物隔离≥3m 3. 甲板配备喷淋降温装置	1. 船舶需持有“国际防止油污证书”（IOPP） 2. 配备溢油回收设备
航空运输	仅限≤50kg/件，总重≤500kg/航班	1. 采用防震动包装（缓冲材料厚度≥5cm） 2. 每个包装贴“向上”和“易碎”标签 3. 运输温度控制在5~35℃	1. 提前72h向航空公司申报危险品运输文件 2. 包装需通过UN 38.3冲击测试

运输禁忌：严禁与强氧化剂（如硝酸、过氧化氢）、强酸、强碱混运；夏季高温时段（日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ）应选择早晚运输，避免阳光直射。

8.4 贮存要求

贮存要求见表27。

表 27 贮存条件与管理规范

贮存环节	环境控制参数	管理要求	保质期与变质处理
仓库条件	温度：0~45℃， 湿度：40%~80%，通风良好 （换气次数 ≥ 6 次/h）	1. 仓库地面采用环氧树脂防腐地坪，设置1%坡度及集液槽 2. 货物堆垛间距：墙距 $\geq 0.5\text{m}$ ，垛距 $\geq 0.3\text{m}$ ，顶距 $\geq 1.0\text{m}$ 3. 分类存放：物理型与混合型分区（间距 $\geq 2\text{m}$ ），不同批次产品标识区分 4. 电气设备采用防爆型（Ex d IIB T4）	保质期： - 物理型吸收剂：18个月（原包装未开封） - 混合型吸收剂：12个月（原包装未开封） - 开封后：密封保存3个月内使用完毕 变质处理：超过保质期或出现分层、沉淀等变质现象的产品，应按危险废物交由有资质单位处置
货架要求	承重能力 $\geq 500\text{kg/层}$ ，采用钢结构货架	1. 货架底部安装防泄漏托盘 2. 每层设置产品信息卡（名称、批次、入库日期） 3. 实行“先进先出”（FIFO）管理	—
安全设施	—	1. 设置可燃气体检测报警系统（报警值 $\leq 25\%LEL$ ） 2. 配备应急喷淋装置（覆盖半径3m） 3. 仓库入口设置洗眼器和紧急淋浴器 4. 严禁明火，张贴“禁止吸烟”标识	—

特殊贮存要求：再生型吸收剂需单独存放，避免与新吸收剂混放。

附录 A (资料性) VOC 饱和吸收量测定方法

A.1 方法原理

基于吸收平衡原理，通过静态或动态实验，使VOC与吸收剂充分接触，当吸收量不再随时间变化时，达到饱和吸收状态，计算单位质量吸收剂吸收的VOC质量。

A.2 主要仪器与试剂

A.2.1 仪器

赛默飞液相色谱质谱联用仪（HPLC-MS）、电子天平（精度0.1mg）、恒温油浴锅、蒸馏装置、圆底烧瓶、锥形瓶等。

A.2.2 试剂

目标VOC标准品（如甲苯、乙酸乙酯等）、吸收剂。

A.3 实验步骤

A.3.1 吸收剂预处理

将一定量的吸收剂置于锥形瓶中，备用；将VOC溶液加入滴定管中备用。

A.3.2 静态吸收实验

- a) 准确称取一定质量（ m ，约10g）的吸收剂置于锥形瓶中。
- b) 逐滴加入一定浓度（ C_0 ）的VOC溶液于锥形瓶中，进行吸收，待达到吸收平衡（通过测定不同时间的浓度及分层现象，确定平衡时间）。
- c) 取样测定平衡浓度（ C_e ），根据公式计算饱和吸收量 $Q_e=(C_0-C_e) \times V/m$ （ V 为VOC溶液体积）。

A.3.3 动态吸收实验

- a) 将吸收剂装入吸收柱，通入一定浓度和流速的VOC气体。
- b) 定期取样测定出口VOC气体浓度，当出口浓度只有进口浓度的5%时，认为吸收饱和。
- c) 根据通入VOC的总量和吸收剂质量计算饱和吸收量。

A.4 数据处理与计算

A.4.1 饱和吸收量计算

$Q_e=(C_0-C_e) \times V/m$ （静态法）；

$Q_e=(C_{进} \times Q \times t - C_{出} \times Q \times dt)/m$ （动态法， Q 为气体流量， t 为吸收时间）。

A.4.2 模型拟合

采用Langmuir模型（ $C_e/Q_e=C_e/Q_m+1/(Q_m \times K)$ ， Q_m 为饱和吸收量， K 为吸收平衡常数）或张中申、郝郑平团队提出的方程 $Q=a \times \rho \times V_c+b \times S_c$ （ ρ 为VOC密度， V_c 为孔容， S_c 为比表面积）进行拟合，确定饱和吸收量。

A.5 影响因素及注意事项

A.5.1 影响因素

- a) 吸收剂性质：密度、pH值、粘度。
- b) VOC性质：分子量、极性（如甲苯分子量较大、极性适中，吸收容量较高）。
- c) 环境条件：温度（温度升高，吸收量下降）、湿度（湿度较高时，极性VOC吸收量下降）。

d) 工况条件：VOC浓度、气流速度、吸收层厚度等。

A.5.2 注意事项

- a) 控制实验温度、湿度等条件，确保实验的重复性和准确性。
- b) 对于易挥发的VOC，需在密封条件下进行实验，防止挥发损失。

A.6 方法应用

该方法可用于评价不同吸收剂对VOC的吸收性能，为废气处理系统中吸收剂的选择和工艺参数的优化提供依据。例如，在处理甲苯废气时，可通过该方法测定不同吸收剂的饱和吸收量，选择吸收性能优良的吸收剂。

附录 B (资料性) 吸收剂再生性能测定方法

B.1 方法原理

通过模拟实际工业再生条件（如热解吸、真空解吸、化学解吸等），使饱和吸收VOC的吸收剂释放被吸收物质，恢复吸收能力。通过测定再生后吸收剂的吸收量、再生效率及多次循环后的性能衰减情况，评价其再生性能。

B.2 主要仪器与试剂

B.2.1 仪器

与《VOC饱和吸收量测定方法》相同的吸收性能测定装置（如气相色谱仪、吸收柱、气体流量控制器等）、再生装置（如管式炉、真空干燥箱、解吸气体发生器）、电子天平（精度0.1mg）、恒温水浴锅。

B.2.2 试剂

吸收已达饱和的VOC的吸收剂（如白油等）、再生介质（如氮气、水蒸气、乙醇溶液等）、目标VOC标准品。

B.3 实验步骤

B.3.1 再生前准备

准确称取一定质量（m）的饱和吸收VOC的吸收剂，记录其吸收饱和时的吸收量（ Q_0 ）。

B.3.2 再生工艺选择

蒸馏再生：将吸收剂置于蒸馏塔中，以一定升温速率（如5°C/min）升至设定低沸点VOC成分沸点温度（如120-200°C），保温一定时间（如30—120min），蒸出吸收成分。

B.3.3 再生后吸收性能测定

按照《VOC饱和吸收量测定方法》中的静态或动态实验步骤，测定再生后吸收剂的饱和吸收量（ Q_1 ）。

B.3.4 循环再生实验

重复“吸收—再生”过程N次（如5—10次），分别测定每次再生后的饱和吸收量（ Q_1, Q_2, \dots, Q_n ）。

B.4 数据处理与评价指标

B.4.1 单次再生效率（ R_1 ）

$$R_1 = Q_1 / Q_0 \times 100\%$$

（ Q_0 为首次饱和吸收量， Q_1 为首次再生后饱和吸收量）

B.4.2 N次循环后的再生效率（ R_n ）

$$R_n = Q_n / Q_0 \times 100\%$$

B.4.3 累积再生效率

通过多次循环的再生效率平均值或衰减曲线斜率，评估吸收剂的长期再生稳定性。

B.5 影响因素及注意事项

B.5.1 影响因素

a) 再生条件：温度（过高可能导致吸收剂挥发，如部分吸收剂超过300°C易挥发）、时间（过短解吸不完全，过长能耗增加）、再生介质流量/浓度。

b) 吸收剂性质：热稳定性（如部分吸收剂需控制再生温度避免分解）、化学稳定性（避免与解吸剂反应）。

c) VOC性质：沸点（高沸点VOC需更高再生温度）、与吸收剂的相互作用强度（如化学吸收需更强的再生条件）。

B.5.2 注意事项

a) 再生过程需防止吸收剂溶液损失或结构破坏（如热解吸时避免剧烈升温）。

b) 在循环实验中保持吸收和再生条件一致，确保数据可比性。

B.6 方法应用

该方法可用于筛选高效再生工艺参数（如最佳温度、时间），评估吸收剂的循环经济价值（如吸收剂经10次热再生后效率仍保持80%以上则具备工业应用潜力），为吸收—再生工艺的工业化设计提供数据支持。

附录 C (规范性) 动态模拟工况测试方法

C.1 方法原理

通过构建与实际工业废气处理工艺相似的动态实验装置，模拟连续运行条件下的温度、湿度、污染物浓度、流速等关键参数，使吸收剂在接近真实工况的动态环境中进行吸收—再生循环测试，评估其穿透时间、饱和吸收量、再生效率、长期稳定性等核心指标，为工业放大应用提供数据支撑。

C.2 主要仪器与设备

C.2.1 动态吸收实验系统

- a) 气源/液源系统：VOCs发生器（如鼓泡法、渗透管法）、气体混合器、液体蠕动泵、储液罐。
- b) 吸收柱：不锈钢或玻璃材质（内可加入100 mL吸收剂），带保温夹套。
- c) 参数控制系统：质量流量计（控制气体流量，精度 $\pm 1\%$ ）、恒温水浴/加热带（控制吸收柱温度，精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）、湿度发生器（控制气体湿度，范围10%—90% RH）。

C.2.2 分析检测系统

气相色谱仪（GC-FID/FPD，检测VOCs浓度）、高效液相色谱仪（HPLC，检测液相污染物）、气体检测仪（如PID检测仪，实时监测出口浓度）。

C.2.3 再生系统（若集成）

- a) 热解吸：精馏塔。
- b) 水洗/化学解吸：解吸剂储槽、蠕动泵。

C.2.4 辅助设备

电子天平（精度0.1mg）、气体采样袋、阀门、连接管路（聚四氟乙烯或不锈钢材质）。

C.3 实验装置搭建与流程设计

C.3.1 装置连接

按“气源/液源 → 预处理单元（除湿/预热） → 混合器 → 吸收柱 → 检测器 → 尾气/废液处理”流程连接设备，确保气密性（用肥皂水或氦气检漏）。

C.3.2 吸收剂装填

将预处理后的吸收剂均匀装加于吸收柱中，记录装填质量（m）和床层高度（H）。

C.3.3 工况参数设定

根据实际工业场景设定关键参数（示例值）：

- a) 污染物浓度：VOCs气体500-2000 mg/m³（液相污染物50-500 mg/L）。
- b) 流速：气体空床气速（GHSV）500-5000 h⁻¹（液体空床液速LHSV 0.5-5 h⁻¹）。
- c) 温度：25-80 $^\circ\text{C}$ （根据工艺需求调节）。
- d) 湿度：10%—80% RH（针对气体体系）。
- e) 再生条件（若循环测试）：热解吸温度120-200 $^\circ\text{C}$ ，时间30—120min。

C.4 实验步骤

C.4.1 系统调试

启动气源/液源、温控和流量控制系统，运行30min使污染物浓度、温度、流速等参数稳定，记录初始状态（如进口浓度C₀）。

C.4.2 动态吸收实验

- a) 打开吸收柱进出口阀门，开始计时 ($t=0$)。
- b) 穿透曲线测定：每隔一定时间(如5—30min)或连续在线监测出口污染物浓度(C_1)，直至 $C_1/C_0 \geq 0.9$ (完全穿透)或达到设定运行时间。
- c) 记录不同时刻的 C_t 、温度、湿度等数据，绘制“出口浓度—时间”穿透曲线。

C.4.3 再生性能测试(若需循环评估)

- a) 吸收饱和后，将其放入微型精馏装置进行精馏，接取低沸点溶液(80-150°C)。
- b) 再生结束后，重复“吸收—再生”循环(通常3—10次)，每次循环均测定穿透曲线和饱和吸收量。

C.4.4 数据记录

全程记录实验参数(温度、流量、压力)、进出口浓度、穿透时间、再生能耗等数据。

C.5 关键指标计算与评价

C.5.1 穿透时间 (t_b)

出口浓度达到 $C_0 \times 5\%$ (或10%，根据排放标准)的时间，反映吸收剂的“有效工作时间”。

C.5.2 饱和吸收量 (Q_{sat} , mg/g)

$$Q_{sat} = 1/m \int (C_0 - C_t) \times Q \times dt$$

(Q 为气体/液体流量， t_{total} 为完全穿透时间， m 为吸收剂质量)

C.5.3 穿透吸收量 (Q_b , mg/g)

$$Q_b = 1/m \int (C_0 - C_t) \times Q \times dt$$

(t_b 为穿透时间)

C.5.4 利用率 (η)

$$\eta = Q_b / Q_{sat} \times 100\%$$

(反映吸收剂在穿透前的有效利用程度，理想状态下 $\eta \approx 100\%$)

C.5.5 循环再生效率 (R_n)

$$R_n = Q_{sat,n} / Q_{sat,1} \times 100\%$$

($Q_{sat,n}$ 为第 n 次循环的饱和吸收量， $Q_{sat,1}$ 为首次吸收量，评估长期稳定性)

C.6 影响因素与注意事项

C.6.1 影响因素

- a) 工况参数波动：需严格控制温度、流速、浓度的稳定性(波动范围 $\leq \pm 5\%$)，避免对穿透曲线产生干扰。
- b) 吸收柱装填：确保吸收剂加入量的均一性。
- c) 污染物交互作用：若处理多组分VOCs，需关注组分间竞争吸收对穿透行为的影响(如高沸点组分优先吸收)。

C.6.2 注意事项

- a) 实验前需用惰性气体吹扫管路，去除残留污染物；实验后需用溶剂或高温处理吸收柱，避免交叉污染。
- b) 对于高浓度或有毒污染物，需在通风橱内操作，并连接尾气处理装置(如吸收剂吸附罐、燃烧炉)。
- c) 穿透曲线测定至少进行2次平行实验，相对标准偏差(RSD)应 $< 8\%$ 。

C.6.3 再生次数

- a) 当吸附剂性能达到以下阈值后认为吸附剂失效

吸附容量恢复率 $<70\%$ （或行业约定的最低值）；
穿透时间缩短至新鲜吸附剂的 50% 以下；
再生能耗显著上升（如加热再生时，达到相同脱附效果所需能耗增加 30% 以上）；
吸附剂出现明显的物理破损、粉化，导致床层压降急剧上升。

b) 当吸附剂出现失效阈值时的最大吸附次数即为吸附剂再生次数。

C.7 应用场景

C.7.1 工业废气处理

模拟喷漆、印刷、化工等行业的VOCs废气（如甲苯、乙酸乙酯混合气体）动态吸收过程。

C.7.2 工艺优化

通过调整流速、温度等参数，确定最佳运行条件。

C.8 数据报告要求

C.8.1 实验条件表（吸收剂种类、装填量、污染物浓度、流速、温度等）。

C.8.2 穿透曲线图（含 C_0 、穿透点、饱和点标注）。

C.8.3 关键指标汇总（ $t-b$ 、 $Q-sat$ 、 $Q-b$ 、 η 、 $R-n$ 等）。

C.8.4 稳定性分析（循环测试中吸收量衰减趋势）。

附录 D (资料性) 长期运行稳定性试验方法

D.1 方法原理

通过模拟工业装置的连续或间歇运行模式,让吸收剂经历多次“吸收—再生”循环(或长期静态放置),在接近实际工况的条件下(如温度、湿度、污染物浓度波动),持续监测其关键性能指标(如饱和吸收量、穿透时间、机械强度)的衰减趋势,评估吸收剂的使用寿命和性能稳定性,为工业设备的维护周期设计提供依据。

D.2 主要仪器与设备

D.2.1 核心试验系统

a) 动态吸收—再生循环装置(同“动态模拟工况测试系统”):含VOCs/污染物发生器、吸收柱、温控/湿控系统、流量控制器、在线浓度检测仪(如GC、HPLC、PID)。

b) 静态稳定性测试装置:恒温恒湿箱(控制温度25-80°C、湿度10%—90% RH)、密封样品瓶、气相色谱仪。

D.2.2 辅助检测设备

a) 电子天平(精度0.1mg)、抗压强度测试仪(测定机械强度)、比表面积及孔径分析仪(BET)、扫描电镜(SEM,观察表面形貌变化)。

b) 磨损率测定装置(如滚筒式磨损仪)。

D.3 试验设计与参数设定

D.3.1 试验模式选择

a) 循环运行模式(适用于可再生吸收剂):模拟工业“吸收—再生”连续循环,设定循环次数(通常50—100次,或至性能衰减至初始值的80%以下)。

b) 长期静态模式(适用于一次性吸收剂或存储稳定性评估):将吸收剂样品置于恒温恒湿箱中,定期取出测定吸收性能。

D.3.2 关键参数设定(以VOCs吸收为例)

关键参数设定见表D.1。

表 D.1 关键参数设定

参数	推荐范围	工业相关性说明
吸收温度	25-60°C (可模拟夏季/冬季工况波动)	温度升高可能影响吸收饱和度(如吸收剂高温下会被破坏吸收力)
湿度	30%—80% RH (周期性波动)	高湿度可能导致极性VOCs竞争吸收或吸收剂吸收力减弱
污染物浓度	500-2000 mg/m ³ (含冲击负荷)	模拟工业废气浓度波动(如间歇性排放)
吸收—再生周期	吸收4—8h, 再生0.5—2h	匹配典型工业设备运行周期(如RTO+吸收工艺)
循环次数	30—100次	评估1—3年的工业运行寿命(按每日1—2次循环估算)

D.4 试验步骤

D.4.1 循环运行稳定性测试(以热再生吸收剂为例)

a) 吸收剂预处理

取代表性吸收剂样品(如100g),测定初始性能:饱和吸收量(Q_0)、穿透时间(t_{b0})、抗压强度(σ_0)、比表面积(S_0)。

b) 性能监测频率

每5—10次循环测定一次饱和吸收量和穿透时间；

每20次循环取样测定机械强度、比表面积，观察表面形貌变化。

D. 4. 2 长期静态稳定性测试（以存储稳定性为例）

a) 将吸收剂样品（50g）密封于样品瓶中，置于恒温恒湿箱（如温度40°C、湿度70% RH）。

b) 分别在0d、30d、60d、90d、180d取出样品，按“VOC饱和吸收量测定方法”测定吸收性能，对比初始值计算衰减率。

D. 5 稳定性评价指标与计算

D. 5. 1 性能衰减率（D，%）

$$D = \frac{X_0 - X_n}{X_0} \times 100\%$$

（ X_0 为初始值， X_n 为第n次循环后的指标值，如饱和吸收量、穿透时间）

关键阈值：当 $D \geq 30\%$ 时，认为吸收剂已失去工业应用价值。

D. 5. 2 循环稳定性系数（K）

$$K = \frac{Q_{\text{平均}}}{Q_0}$$

（ $Q_{\text{平均}}$ 为多次循环的饱和吸收量平均值，K越接近1，稳定性越好）

D. 5. 3 机械强度保持率（ $R\sigma$ ，%）

$$R\sigma = \frac{\sigma_n}{\sigma_0} \times 100\%$$

（反映吸收剂抗磨损、抗破碎能力，工业要求 $R\sigma \geq 80\%$ ）

D. 6 数据记录与结果分析

D. 6. 1 稳定性趋势图

绘制“循环次数-饱和吸收量”“循环次数-穿透时间”衰减曲线，用拟合方程（如指数衰减模型 $Q_n = Q_0 e^{-kt}$ ）预测吸收剂理论使用寿命（ ta_0 ，性能衰减至80%的时间）。

D. 6. 2 失效原因分析

a) 物理失效：机械损失（蒸发、残留）。

b) 化学失效：吸收剂分解、老化等。

c) 工艺干扰：高沸点VOCs“结焦”（如苯系物聚合）、水热老化（潮湿环境下结构破坏）。

D. 7 注意事项

D. 7. 1 工况波动模拟

每10—20次循环可引入一次“冲击负荷”（如污染物浓度瞬间升高至3000 mg/m³，持续1h），评估吸收剂抗干扰能力。

D. 7. 2 样品代表性

每次循环后取样需混合均匀，避免局部性能差异导致数据偏差。

D. 7. 3 安全防护

长期运行中需定期检查管路密封性，避免VOCs泄漏；热再生时防止吸收剂过热分解（如再生温度不超过250°C部分有机物的分解）。

D. 7. 4 数据重复性

平行试验至少2组，关键指标（如饱和吸收量）的相对标准偏差（RSD）应 $< 10\%$ 。

D. 8 应用示例

吸收剂吸收VOCs的长期稳定性评估。

D.8.1 试验条件

甲苯浓度 1000 mg/m^3 ，吸收温度 30°C ，湿度 $50\% \text{ RH}$ ，热再生温度 150°C ，循环次数50次。

D.8.2 结果

a) 初始饱和吸收量 $Q_0=250\text{ mg/g}$ ，第50次循环 $Q_{50}=190\text{ mg/g}$ ，衰减率 $D=24\%$ ， $K=0.92$ 。

D.8.3 结论

该吸收剂可满足工业运行2年（约700次循环）的稳定性要求，建议每1.5年更换一次以保证处理效率。

附录 E (资料性) 再生能耗测定方法

E.1 方法原理

通过测定吸收剂在特定再生工艺（如热解吸、真空解吸、化学解吸等）中消耗的能量（如电能、热能、化学能），结合再生后吸收剂的有效吸收量，计算单位质量吸收剂的再生能耗或单位污染物解吸能耗，评估再生过程的能量效率，为低能耗再生工艺优化提供依据。

E.2 主要仪器与设备

E.2.1 再生能耗测量系统

a) 热解吸能耗测定：管式炉/马弗炉（带功率计）、温度控制器、流量计（记录载气流量）、热量计（如差示扫描量热仪DSC，测定相变/反应热）。

b) 真空解吸能耗测定：真空泵（配备功率计）、真空表、恒温加热装置（如油浴锅，带功率监测）。

c) 化学解吸能耗测定：恒温水浴/加热搅拌器（测定加热能耗）、蠕动泵（记录解吸剂用量）、pH计（监测酸碱中和反应热）。

E.2.2 辅助设备

电子天平（精度0.1mg）、秒表、数据记录仪（连续监测功率、温度、时间）、气相色谱仪（测定解吸污染物浓度，计算解吸量）。

E.3 能耗测定方法与步骤

E.3.1 热解吸再生能耗测定（最常用场景）

a) 样品准备

称取 m （如10—50g）饱和吸收污染物的吸收剂，置于锥形瓶中，记录初始吸收量 Q_0 （mg/g，通过前期吸收实验获得）。

b) 再生过程能耗测量

能耗计算：

总能耗 E_{total} （kJ）： $E_{total} = \int P(t)dt + E_{gas}$ （ $P(t)$ 为瞬时功率， E_{total} 为总再生时间； E_{gas} 为载气加热能耗，若载气未加热可忽略）；

单位吸收剂再生能耗 $E_{sorberent}$ （kJ/g）： $E_{sorberent} = E_{total}/m$ ；

单位污染物解吸能耗 $E_{pollutant}$ （kJ/g）： $E_{pollutant} = E_{total}/M$ （ M 为解吸的污染物总质量，单位g）。

E.3.2 真空解吸能耗测定

a) 关键参数：记录真空泵功率 P （kW）、运行时间 t （h）、加热装置功率 P_{heat} （kW）。

b) 总能耗计算： $E_{total} = (P + P_{heat}) \times t \times 3600$ （换算为焦耳：1 kW·h = 3600 kJ）。

E.3.3 化学解吸能耗测定

a) 能耗构成：解吸剂加热能耗（如将NaOH溶液从25°C加热至80°C）、搅拌能耗、解吸剂制备能耗（如酸碱溶液配制）。

b) 示例（加热能耗计算）： $E_{heat} = m_{solvent} \times c_p \times \Delta T$ （ $m_{solvent}$ 为解吸剂质量， c_p 为比热容， ΔT 为温升）。

E.4 影响因素与注意事项

E.4.1 影响能耗的关键因素

a) 再生工艺参数：热解吸温度越高、保温时间越长，能耗越大（如吸收剂从120°C升至200°C，能耗可能增加50%）；真空度越高，真空泵能耗越大。

b) 吸收剂性质：高比表面积吸收剂（如MOFs）可能因传热效率低导致能耗增加；吸收剂含水量过高会显著增加加热能耗。

c) 污染物类型：与吸收剂强相互作用的污染物（如化学吸收）需更高能耗。

E. 4.2 注意事项

a) 仪器校准：实验前需用标准电阻校准功率计，确保能耗测量误差 $<5\%$ 。

b) 热损失修正：对于开放式系统，需通过空白实验（无吸收剂时的空烧能耗）扣除环境热损失。

c) 平行实验：至少进行3次平行测定，取平均值，相对标准偏差（RSD）应 $<10\%$ 。

d) 单位统一：能耗单位建议用“kJ/g吸收剂”或“kJ/g解吸污染物”，便于不同工艺对比。

E. 5 应用示例

吸收剂热再生能耗测定。

E. 5.1 实验条件

饱和吸收甲苯的吸收剂50g，N₂载气流量100 mL/min，升温速率5°C/min，终温180°C，保温60min。

E. 5.2 测量数据

a) 加热功率曲线积分得 $E_{\text{heat}}=1200$ kJ，载气加热能耗 $E_{\text{gas}}=80$ kJ，总能耗 $E_{\text{total}}=1280$ kJ。

b) 解吸甲苯总量 $M=10$ g（通过尾气GC检测计算）。

E. 5.3 计算结果

a) 单位吸收剂能耗： 1280 kJ/50g=25.6 kJ/g。

b) 单位污染物解吸能耗： 1280 kJ/10g=128 kJ/g。

c) 优化方向：通过降低升温速率（如3°C/min）或缩短保温时间（40min），可减少能耗15%—20%，但需确保再生效率不低于85%。

附录 F (资料性) 高低温试验方法

F.1 实验前期准备

F.1.1 实验材料与设备

待测VOC吸收剂样品（至少3份平行样，每份重量/体积统一，如10g或50mL）、目标VOC气体（如甲苯、乙酸乙酯，根据实际需求选择，浓度按需配置）、高低温试验箱（具备温度控制、气体通入/排出接口，温度范围覆盖实验需求，如-40℃~120℃）、气体浓度检测仪（可实时检测进出口VOC浓度）、气体流量控制器（精准控制VOC气体通入流速）、吸收装置（密封式，可放置吸收剂，连接气体管路）、分析天平（精度0.001g，用于称量吸收剂）、计时器、记录表格等。

F.1.2 预实验确认

- a) 先在常温下测试吸收剂对目标VOC的初始吸附率，确认吸收剂在正常状态下的性能基线。
- b) 检查高低温试验箱的温度稳定性，在设定温度下恒温2小时，验证温度波动是否在±1℃范围内。

F.2 实验操作流程

F.2.1 低温耐受实验

- a) 将称量好的吸收剂样品放入密封吸收装置，连接好气体管路，确保装置无泄漏。
- b) 设置高低温试验箱温度为目标低温（如-20℃，可根据需求设置多个梯度，如-40℃、-20℃、0℃），启动试验箱，待温度稳定后，将吸收装置放入箱内。
- c) 恒温放置24小时（模拟长期低温环境，可根据实际需求调整时长）。
- d) 保持试验箱温度不变，通过气体流量控制器以恒定流速（如500mL/min）通入配置好的VOC气体。
- e) 每隔30分钟用气体浓度检测仪检测吸收装置出口的VOC浓度，记录数据，持续检测2小时。
- f) 试验结束后，取出吸收剂，在常温下放置1小时，再次测试其对VOC的吸附率，对比初始性能。

F.2.2 高温耐受实验

- a) 重复低温实验的前两步，将高低温试验箱温度设置为目标高温（如60℃、80℃、100℃，按需选择梯度）。
- b) 恒温放置24小时后，以相同流速通入VOC气体，每隔30分钟检测出口浓度并记录，持续2小时。
- c) 试验结束后取出吸收剂，常温放置1小时，测试其常温下的吸附率变化。

F.2.3 高低温循环实验（可选，模拟极端环境交替）

- a) 设置试验箱温度循环程序，如-20℃保持8小时，然后升温至80℃保持8小时，为一个循环，共进行3个循环。
- b) 循环结束后，按上述方法测试吸收剂对VOC的吸附性能，观察其稳定性。

F.3 数据处理与分析

- a) 计算不同温度下吸收剂的VOC吸附率：吸附率=（进口浓度-出口浓度）/进口浓度×100%。
- b) 对比低温、高温、高低温循环后吸收剂的吸附率与初始吸附率的差值，评估性能衰减情况。
- c) 绘制吸附率随温度变化的曲线，分析温度对吸收剂性能的影响趋势。
- d) 若吸收剂出现外观变化（如结块、变色），需同步记录并分析原因。

F.4 实验注意事项

- a) 实验全程确保装置密封，防止VOC气体泄漏，避免安全隐患和数据误差。
- b) 高低温试验箱升温/降温过程中，需待温度稳定后再进行气体通入操作。

- c) 平行样实验结果偏差若超过5%，需重新进行实验排查原因。
 - d) 实验结束后，剩余VOC气体需通过尾气处理装置（如吸收剂吸附塔）处理后再排放。
-