

◆磷氟产业耦合与高端材料创制◆

## 氢氟酸精馏塔填料材料的选择

杨晓健<sup>1,2,3</sup>, 杨帆<sup>3</sup>, 胡国涛<sup>3</sup>, 何汪致远<sup>2</sup>, 陈广鹏<sup>2</sup>, 李白玉<sup>1,3</sup>, 柳陈军<sup>2</sup>, 范丽婷<sup>2</sup>, 苏文湫<sup>3</sup>

(1. 瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 贵阳 550000; 2. 厦门大学, 福建 厦门 361005;  
3. 磷矿及其共生资源绿色高效开发利用全国重点实验室, 贵州 贵阳 550000)

**[摘要]** 电子级氢氟酸精馏塔填料的性能直接决定产品纯度与设备寿命。通过质量分数49%的氢氟酸的腐蚀实验、浸润性测试, 以及可加工性、耐温、机械强度分析, 系统评估聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚四氟乙烯(PTFE)、全氟烷氧基树脂(PFA)、聚四氟乙烯与碳纤维复合材料、碳化硅(SiC) 6类材料的性能。结果表明: PFA杂质析出 $<18 \mu\text{g/L}$ , 接触角 $108^\circ$ , 综合性能最优, 但成本高昂; 碳化硅接触角 $42^\circ$ , 具备强亲水性与耐腐蚀性, 耐腐蚀性好, 机械强度高, 但由于加工难度大, 工业化应用受限; PP、PE因金属析出超标不适用, PTFE与碳纤维的复合材料耐腐蚀性差。未来需通过PFA注塑工艺优化与SiC蜂窝结构设计突破成本与加工壁垒, 满足半导体级HF精馏需求。

**[关键词]** 氢氟酸; 精馏填料; 杂质析出; 加工特性; 接触角

**[中图分类号]** TQ124.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 09-0063-05

### Selection of packing materials for hydrofluoric acid distillation columns

YANG Xiaojian<sup>1,2,3</sup>, YANG Fan<sup>3</sup>, HU Guotao<sup>3</sup>, HE Wangzhiyuan<sup>2</sup>, CHEN Guangpeng<sup>2</sup>, LI Baiyu<sup>1,3</sup>,  
LIU Chenjun<sup>2</sup>, FAN Liting<sup>2</sup>, SU Wenqiu<sup>3</sup>

(1. Wengfu (Group) Co., Ltd., Guiyang 550000, China; 2. Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3. State Key Laboratory of Green and Efficient Development of Phosphorus Resources, Guiyang 550000, China)

**Abstract:** The performance of distillation packing materials for electronic-grade hydrofluoric acid (HF) critically determines product purity and equipment longevity. The performance of six materials including polypropylene (PP), polyethylene (PE), polytetrafluoroethylene (PTFE), perfluoroalkoxy resin (PFA), PTFE carbon fiber composite, silicon carbide (SiC) are systematically evaluated through corrosion testing in 49% HF, wettability measurements, processability analysis, temperature resistance and mechanical strength. Results demonstrate: PFA exhibits optimal comprehensive performance (impurity leaching  $<18 \mu\text{g/L}$ , contact angle  $108^\circ$ ), yet suffers from high cost; Silicon carbide (SiC) shows strong hydrophilicity (contact angle  $42^\circ$ ) and corrosion resistance, better, temperature resistance and mechanical strength, but its processing challenges particularly limit industrial implementation; PP and PE are unsuitable due to excessive metal leaching, while PTFE and carbon fiber composites display poor corrosion resistance. Future efforts must focus on optimizing PFA injection molding and advancing SiC honeycomb structure design to overcome cost and processing barriers and meet requirements of semiconductor-grade HF distillation.

**Key words:** hydrofluoric acid; distillation packings; impurity precipitation; processability; contact angle

### 0 引言

氢氟酸(HF)是一种无色透明且具有强烈刺激性的液体, 熔点 $-83.55^\circ\text{C}$ , 沸点 $19.52^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>。尽管其水溶液表现为弱酸, 但氢氟酸具有极强的腐蚀性与独特的渗透性, 对多种材料构成严重威胁。氢氟酸在工业上应用广泛: 作为基础原料应用于氟化工(如制冷剂生产), 用于不锈钢酸洗等领域, 尤其是鉴于其为唯一能与玻璃反应的无机酸, 其卓越的原子刻蚀能力使其成为半导体制造不可或缺的核心工

艺材料。国内氢氟酸年消耗量高达数十万吨。随着半导体等行业对材料纯度要求持续攀升, 电子级氢氟酸的纯化需求日益严苛。精馏是一种关键的化工分离工艺<sup>[1]</sup>, 广泛应用于电子级高纯氟化物制备、制药及含氟材料合成等领域。该工艺通常在较低压

**[收稿日期]** 2025-08-10

**[作者简介]** 杨晓健(1992-), 女, 云南大理人, 工程师, 研究方向为磷及其共生元素分离与定向合成。

**[基金项目]** 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2024]一般032)

力（常压或微负压）和中等温度（30~100℃）下运行，采用石墨或耐腐蚀金属合金（如哈氏合金）作为填料，以实现**对强腐蚀性介质的稳定分离**。当前精馏工艺面临**填料腐蚀脆化、高能耗、微量杂质控制难等共性挑战**，特别是在电子级氢氟酸（纯度≥99.9%）生产中，金属离子污染和填料效率衰减问题尤为突出。随着新材料技术的发展，新型复合填料和工艺优化正成为行业研究重点。然而，针对电子级氢氟酸精馏装置中填料选择的研究相对匮乏。

在氢氟酸精馏工艺中，填料的选择决定着系统运行的长期稳定性、分离效率及设备寿命。氢氟酸极强的化学活性极易导致金属材料的晶间腐蚀与非金属材料的溶胀或降解，致使常规填料在如此苛刻的环境下极易发生功能性失效。此外，填料的实际应用还需兼具良好的可加工性（如精密结构成型）与安装维护的便捷性。

因此，筛选适用于现代氢氟酸精馏塔的填料需同时满足3个核心性能指标：优异的耐腐蚀性、良好的液相传质浸润性以及工程实践中的可加工性。笔者旨在围绕上述关键要素——耐蚀性、浸润性与可加工性，深入探讨氢氟酸精馏塔填料的选型策略，为设计高效、稳定、长寿命的电子级氢氟酸精馏装置提供理论依据与实践指导。

## 1 腐蚀及金属离子析出实验

氢氟酸因其极强的渗透性和化学反应活性，对设备构成严峻挑战。更重要的是，设备材料在氢氟酸腐蚀过程中会析出金属离子（如铁、铬、镍等）。这些杂质离子一旦混入产物，将严重污染电子级氢氟酸的纯度，导致其无法满足半导体等尖端产业对超纯氢氟酸的极端严苛要求。因此，对于氢

氟酸精馏塔填料的选材，评估其在氢氟酸环境下长期运行时的金属离子析出量是一项至关重要的核心指标。针对常用候选材料，开展了其在模拟工况下的金属离子析出特性实验。

### 1.1 实验原料与方法

#### 1.1.1 实验原料

实验原料为质量分数49%的SEMI G5电子级氢氟酸（半导体产业常用的高纯氢氟酸）。用于浸泡测试的候选填料基材样品包括聚合物类：（聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）、聚四氟乙烯（PTFE）、全氟烷氧基树脂（PFA））、纤维增强类（聚四氟乙烯与碳纤维复合材料）和陶瓷类（碳化硅（SiC））。

#### 1.1.2 实验方法

采用静态浸泡法评估材料在质量分数49%的氢氟酸中的金属离子析出行为。首先将候选填料分别裁剪成表面积约1 cm<sup>2</sup>的试片（需指明厚度）。将单个试片垂直悬挂于内衬有适宜耐蚀材料（如PTFE或PFA）的专用容器中（避免死角），加入100 mL初始质量分数为49%的电子级氢氟酸作为浸泡介质，确保试片完全浸没。在实验实施过程中应严格在温度（23±3）℃、洁净度等级ISO Class 100的洁净室中进行，持续时间为14 d（336 h）。另需要将容器严格密封，以最大程度减少物料挥发损失与环境交叉污染。浸泡结束后，使用惰性材质（如PTFE）的工具小心取出试片，保留所得浸泡后溶液（即测试液），用于后续金属离子含量分析。

### 1.2 结果与讨论

使用高灵敏度仪器（如电感耦合等离子体质谱仪ICP-MS）检测浸泡前后溶液中目标金属离子的浓度变化，结果见表1。

表1 氢氟酸浸泡各填料后浸泡液杂质含量

Table 1 Impurity content in soaking solution after hydrofluoric acid immersion

μg/L

填料样品	$\rho(\text{Li})$	$\rho(\text{Na})$	$\rho(\text{Mg})$	$\rho(\text{Al})$	$\rho(\text{K})$	$\rho(\text{Ca})$	$\rho(\text{V})$	$\rho(\text{Cr})$	$\rho(\text{Mn})$
未加填料	0	0.02	0.19	0.06	0.03	0.07	0	0	0.01
聚四氟乙烯与碳纤维复合材料	0.01	2.32	1.62	18.95	2.35	5.86	0.05	8.18	0.23
SiC	0	2.36	0.93	1.78	0.21	4.27	0.05	0.02	0.09
PTFE	0.03	34.73	4.65	56.47	6.54	22.63	0.05	1.07	0.34
PP	0	6.95	1.73	2.54	3.51	7.51	0.01	0.10	0.04
PE	0.01	6.98	1.23	2.23	1.78	4.32	0	0.15	0.04
PFA	0	2.34	0.60	3.94	0.54	1.67	0	0.06	0.03
填料名称	$\rho(\text{Fe})$	$\rho(\text{Ni})$	$\rho(\text{Cu})$	$\rho(\text{Zn})$	$\rho(\text{Pb})$	$\rho(\text{As})$	$\rho(\text{Ag})$	$\rho(\text{Ba})$	$\rho(\text{Pb})$
未加填料	0.04	0.01	0.01	0.06	0.01	0.02	0	0.02	0
聚四氟乙烯与碳纤维复合材料	49.87	0.19	24.89	3.57	25.18	0.03	0.02	0.20	0.74
SiC	0.44	0.03	2.51	0.31	2.54	0.02	0	0.05	0.12
PTFE	35.69	0.56	1.83	9.28	1.81	2.98	0.08	8.00	0.12
PP	2.72	0.46	0.06	5.90	0.05	1.29	0	0.26	0.03
PE	1.99	0.15	1.04	17.21	1.07	1.02	0	0.12	0.01
PFA	3.91	0.03	0.05	0.25	0.05	0.09	0	3.94	0.15

由表1可知, PFA于HF溶液中浸泡后浸泡液总杂质质量浓度小于18  $\mu\text{g/L}$ , 其全氟结构在氢氟酸中表现出分子级惰性<sup>[2]</sup>; 碳化硅耐蚀性良好, 但仍有微量重金属杂质析出; PP/PE由于较高Zn析出和显著As析出, 总杂质质量浓度大于30  $\mu\text{g/L}$ , 耐蚀性中等; 聚四氟乙烯与碳纤维复合材料在耐蚀性能方面表现差, Fe、Pb、Cu等重金属体系累积质量浓度大于140  $\mu\text{g/L}$ ; PTFE总杂质质量浓度达185  $\mu\text{g/L}$ 以上, 耐蚀性能较差。

## 2 加工特性比较

### 2.1 聚乙烯加工特性

(1) 加工工艺: 可采用注塑(熔融指数每10 min 0.1~50.0 g)、吹塑(型坯强度 $>0.15$  MPa)、挤出等常规方法成型。低密度PE(LDPE)典型加工温度160~200  $^{\circ}\text{C}$ , 高密度PE(HDPE)为180~240  $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 设备要求: 无需特殊耐腐蚀设备, 模具温度维持30~60  $^{\circ}\text{C}$ 即可。

(3) 经济性: 原料成本为1.2~1.8美元/kg, 综合加工能耗0.8~1.2  $\text{kW}\cdot\text{h/kg}$ , 成品率达98%以上。其成本优势使PE在全球塑料日用品市场的占比接近50%<sup>[2]</sup>。

### 2.2 聚丙烯加工分析

(1) 工艺适应性: 熔体流动速率(MFR)为0.1~10.0  $\text{g/min}$ , 适用于薄壁注塑(最小壁厚0.4 mm)和双向拉伸成型。但存在1.5%~2.5%的成型收缩率。

(2) 加工条件: 注塑温度200~280  $^{\circ}\text{C}$ , 需精确控制模温40~80  $^{\circ}\text{C}$ , 以防止翘曲。

(3) 成本效益: 原料价格1.5~2.0美元/kg, 与PE共享90%以上加工设备, 在汽车零部件领域成本较ABS(丙烯腈、丁二烯、苯乙烯的三元共聚物)低30%~40%<sup>[3]</sup>。

### 2.3 可熔融氟塑料可加工分析

(1) 工艺难点: 需在370~425  $^{\circ}\text{C}$ 高温下加工, 熔体黏度高达103~104  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 是常规塑料的10~100倍<sup>[4]</sup>。

(2) 特殊要求: 必须使用镍基合金设备抵抗氟腐蚀, 模具需特种钢制造。

(3) 经济瓶颈: 原料成本80~120元/kg, 加工能耗8~12  $\text{kW}\cdot\text{h/kg}$ , 是常规PE的10倍, 目前仅用于半导体级耐腐蚀部件。

### 2.4 聚四氟乙烯烧结加工挑战

(1) 粉末冶金工艺: 预压压力20~50 MPa,

烧结需经6~8 h缓慢升温至360~380  $^{\circ}\text{C}$ 并保温。

(2) 质量缺陷: 典型体积收缩率3%~5%, 内部孔隙率 $>5\%$ 时需报废处理<sup>[5]</sup>。

(3) 成本构成: 专用烧结设备投资超过500万元, 复杂部件二次加工成本占总成本的60%。

### 2.5 碳纤维复合材料制备难点

(1) 成型技术: 需采用预浸料热压罐工艺(120~180  $^{\circ}\text{C}$ , 0.5~1.4 MPa)或RTM注塑, 固化周期4~8 h。

(2) 关键控制: 孔隙率(航空航天标准)必须 $<1\%$ , 层间剪切强度需 $>40$  MPa<sup>[6]</sup>。

(3) 成本障碍: T700级碳纤维价格60~80元/kg, 10 L左右的热压罐设备投资超过20万元。

### 2.6 碳化硅特种加工问题

(1) 加工方法: 仅能采用金刚石磨削(砂轮损耗率0.3  $\text{mm}^3/\text{mm}^3$ )、激光加工(能量密度 $>10^4$   $\text{W/cm}^2$ )等特种工艺。

(2) 精度控制: 表面粗糙度 $<0.8$   $\mu\text{m}$ , 需多道精磨, 工时消耗为金属加工的5~8倍<sup>[7]</sup>。

(3) 经济限制: 复杂构件加工成本可达15 000元/kg, 目前仅用于空间光学器件等极端工况。

### 2.7 小结

聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)具备优异的可加工性, 采用常规注塑、吹塑和挤出工艺即可成型, 加工温度较低(160~280  $^{\circ}\text{C}$ ), 能耗低(0.8~1.2  $\text{kW}\cdot\text{h/kg}$ ), 且设备通用性强, 成品率高( $>98\%$ ), 使其成为低成本、大批量生产的最佳选择。相较之下, 可熔融氟塑料(PFA)和聚四氟乙烯(PTFE)加工难度大, 需高温(370~425  $^{\circ}\text{C}$ )和防腐蚀设备, 能耗比PE高10倍, 仅适用于特殊耐腐蚀场景。碳纤维复合材料(CFRP)加工复杂, 固化周期长(4~8 h), 且对孔隙率( $<1\%$ )和层间强度( $>40$  MPa)要求严格, 大幅度增加成本。碳化硅(SiC)只能依赖特种加工(如金刚石磨削和激光), 加工成本极高(达金属加工的5~8倍)。总体来看, PE和PP在加工便利性和经济性上占据显著优势, 而特种材料的应用则受限于工艺难度和成本, 需严格权衡性能需求与加工可行性。

## 3 浸润性

精馏塔填料的浸润性是精馏塔稳定运行的基础, 精馏塔的传质效率严重依赖液体在填料表面的有效润湿铺展形成均匀薄液膜的能力, 因此需要根据需求选择亲水性或疏水性的填料。亲水填料能最大化扩展有效比表面积, 提升质量传递速率, 是高

精度分离的首选<sup>[8]</sup>；而疏水填料则能显著降低气相流动阻力，更适合高通量或真空工况，避免过早液泛。填料的浸润性直接影响能量利用效率。合理的润湿性能够优化液膜形成与液相停留时间，有效降低实现同等分离效果所需的理论板数，从而显著减少能耗，这是降低大型精馏装置运行成本的关键。可以说，浸润性对于填料的选择至关重要。依据 ASTM D7334 标准，采用悬滴法测定各材料的接触角<sup>[9]</sup>，结果如表 2 所示。

表 2 各种填料的浸润性  
Table 2 Wettability of various fillers

材料	接触角/ (°)	润湿性	铺展速率/ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	适用性
PE	94	疏水	1.2	需表面改性
PP	92	疏水	1.5	分布均匀性差
PFA	108	强疏水	0.8	添加润湿剂
PTFE	112	强疏水	0.5	不适用
碳化硅	42	亲水	5.3	最优选
聚四氟乙烯与 碳纤维复合材料	78	弱亲水	2.1	需材料改性

碳化硅展现出亲水性，液体在其表面能快速铺展并形成高持液量的均匀液膜，是精馏系统填料的理想选择；聚四氟乙烯与碳纤维复合材料处于亲水临界状态，液体扩散能力中等，需改性提升稳定性；PE 和 PP 呈现典型疏水性，液体铺展缓慢且持液量较低，易引发壁流和分布不均问题；PFA 因强疏水特性导致极低的铺展速率，存在液膜断裂风险，需依赖外加固化手段；PTFE 则处于极端疏水状态，液体几乎无法铺展，无法作为填料使用。

#### 4 机械强度与耐温性能

在氢氟酸精馏工艺中，填料作为塔内气液传质和传热的核心组件，其机械强度和耐温性能对于整个精馏系统的稳定运行具有决定性影响。首先，填料必须具备优异的机械强度以承受精馏过程中多方面的力学挑战。在高压操作环境下，填料需要具备足够的抗压能力以防止结构塌陷；而在连续运行的工况下，填料还必须能够经受气液两相流的长期冲刷作用。此外，原材料入料时的冲击载荷、装置振动等动态负荷都可能导致机械强度不足的填料发生变形、断裂。一旦出现此类情况，不仅会直接降低传质效率、增大压降，还可能引发“沟流”和“壁流”等不良效应，严重时甚至会造成填料层塌陷，从而导致整个精馏过程的中断，被迫停车进行检修维护，造成重大经济损失。

填料的耐温性能直接关系到精馏过程的安全可

靠性。氢氟酸精馏通常需要在较宽的温度范围内运行，而温度波动会显著影响材料性能。高温工况下，如果填料耐热性不足，可能出现软化变形、热膨胀、结构强度下降等问题。短时间内会导致填料形状改变，影响气液分布状态；长期作用下则可能发生蠕变积累，最终引发填料层整体失效。此外，高温还可能加速材料的化学老化，使其在氢氟酸腐蚀环境中的稳定性显著降低，导致裂缝产生和碎裂风险增大。这些情况不仅会降低分离效率和产品纯度，更严重的是可能会造成填料局部破损而产生微粒，导致下游设备堵塞或产品污染，甚至可能引发泄漏事故，对人员和环境安全构成严重威胁。

因此，在氢氟酸精馏塔设计中，必须对填料的机械强度和耐温性能提出严格要求，确保其能够在高温、高腐蚀性环境下长期稳定工作。

#### 4.1 机械强度

氢氟酸精馏塔填料的机械强度直接影响设备的长期稳定运行。在操作过程中，填料需承受气液流动的持续冲刷、物料的冲击载荷以及系统压力的影响。若机械强度不足，填料可能发生断裂、形变甚至坍塌，导致塔内流动不均匀，引发沟流，显著降低传质效率并增大压降。此外，破碎的填料微粒可能堵塞管道或污染产品，严重时需停车清理，造成经济损失。在高腐蚀性的氢氟酸环境中，机械强度降低还可能加速材料腐蚀，进一步缩短填料寿命。测定所选材料的机械强度，结果如表 3 所示。

表 3 各种填料机械强度

Table 3 Mechanical strength of various fillers

材料	拉伸强度/MPa	弯曲模量/MPa	耐冲击强度	耐压/耐变形能力	装填形式
碳化硅	350	42 000	低	极高	散堆/规整
聚四氟乙烯与 碳纤维复合材料	600	50 000	中高	高	特殊结构
PFA	30	700	中	中	散堆/规整
PTFE	30	550	高	低	散堆/规整
PP	35	1 250	低	低	散堆
PE	25	1 000	高	极低	仅限临时

#### 4.2 耐温性能

氢氟酸精馏过程中，填料必须适应显著的温度波动（可能达 200 °C 甚至更高），这对材料的耐温稳定性提出了严苛要求。高温环境下，普通塑料或金属填料可能出现软化变形、热膨胀加剧甚至蠕变失效，直接影响塔内气液分布效率。同时，温差变化会引发热应力，加速材料疲劳老化，导致裂纹甚至碎裂。更关键的是，高温会加剧氢氟酸的腐蚀

性,使填料表面钝化膜破坏速率加快,缩短使用寿命。因此,优选氢氟酸填料,并确保材料在高温下仍保持稳定的物理性能和抗腐蚀能力,是保障精馏过程安全高效运行的必要条件。所选材料的耐温性能结果如表4所示。

表4 各种填料的耐温性能

Table 4 Temperature resistance of various fillers

材料	使用温度 上限/℃	氢氟酸环境 耐温/℃	热变形 温度/℃	熔融温 度/℃
碳化硅	1 600	完全惰性	1 500	无
PFA	260	≤200	75	310
PTFE	260	≤260	55	327
聚四氟乙烯与 碳纤维复合材料	250	≤150	150	分解
PP	90	≤60	50	160
PE	60	≤50	40	115

### 4.3 小结

碳化硅机械强度和耐温性能最优,长期耐温可达1 600℃,具有出色的耐压强度和抗蠕变能力,但脆性较高,需避免机械冲击。PFA和PTFE耐温为200~260℃,适用于低负荷工况。碳纤维复合材料可耐受150~300℃,但长期高温会使树脂基体性能下降。聚丙烯和聚乙烯耐温较差(PP≤90℃,PE≤80℃),易热软化变形,适用于短时、低强度条件。

综合来看,高温高压环境首选SiC,中温工况可选择PFA或PTFE,而PP/PE仅限于低温或临时使用。

### 5 结语与展望

针对电子级氢氟酸精馏工艺,系统研究PE、PP、PFA、PTFE、硅化硅、聚四氟乙烯与碳纤维复合材料6种填料的耐腐蚀性、浸润性、可加工性、机械强度与耐温性几大核心指标。实验表明:PFA填料综合性能最优(总杂质析出<18 μg/L,可注塑成型),适用于高纯度精馏场景<sup>[10-11]</sup>;碳化硅虽具有最优的亲水性、耐蚀性,展现出卓越的耐温性和机械强度,但受限于高加工成本,仅适用于部分场景;PP、PE耐温性差,析出金属杂质量高,难以直接作为填料;PTFE、聚四氟乙烯与碳纤维复合材料因严重腐蚀污染(析出>140 μg/L),难以作为氢氟酸精馏塔填料。

未来氢氟酸填料需在成本与性能间寻求突破性平衡:短期可推广碳化硅材料满足光伏等中端场景性价比需求;中长期应攻克PFA降本难题,使注塑能耗降低,推动其在半导体级精馏塔普及,为国产电子级氢氟酸产业链自主化提供核心支撑。

### [参考文献]

- [1] 彭飞,杨洁,王雪梅.浅谈电子级氢氟酸的除砷工艺[J].化工设计通讯,2024,50(9):26-28.  
PENG F, YANG J, WANG X M. Discussion on the Arsenic Removal Process of Electronic Grade Hydrofluoric Acid[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50 (9) : 26-28.
- [2] 任慧勇.我国聚乙烯产业现状及未来发展分析[J].化工新型材料,2020,48(7):47-51.  
REN H Y. Current situation and future development analysis of PE in China[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(7):47-51.
- [3] 魏正英.国内外聚丙烯生产及消费现状[J].塑料科技,2011,39(7):107-110.  
WEI Z Y. Actuality of Production and Consumption of Polypropylene at Home and Abroad[J]. Plastics Science and Technology, 2011, 39(7):107-110.
- [4] SMITH J R, JOHNSON L K. Corrosion resistance of perfluoroalkoxy (PFA) in hydrofluoric acid environments[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2020, 238: 109632.
- [5] 苏小龙,倪福容,陈立义,等.可燃性聚四氟乙烯的发展现状及展望[J/OL].有机氟工业.https://link.cnki.net/urlid/31.1631.tq.20250815.1545.002.  
SU X L, NI F R, CHEN L Y, et al. Development Status of Soluble Poly [tetrafluoroethylene. co. (perfluoroalkylvinyl ether)] [J/OL]. Organo-Fluorine Industry. https://link.cnki.net/urlid/31.1631.tq.20250815.1545.002.
- [6] 郑红伟,张泽凯,郭增贤,等.碳纤维增强热塑性工程塑料研究进展[J].塑料科技,2025,53(1):180-185.  
ZHENG H W, ZHANG Z K, GUO Z X, et al. Research Progress of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Engineering Plastics [J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(1):180-185.
- [7] 瞿海斌,明亮,贺灿,等.大尺寸碳化硅常压烧结设备设计研究[J].电子工业专用设备,2025,54(4):5-9,14.  
QU H B, MING L, HE C, et al. Research on Design of Large-Scale Atmospheric Pressure Sintering Equipment for Silicon Carbide [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2025, 54 (4) : 5-9, 14.
- [8] 崔晓慧,赵亚南.新型精馏塔填料、塔内件的开发应用[J].化工设计通讯,2020,46(8):27-28.  
CUI X H, ZHAO Y N. Development and Application of New Packing and Internals in Distillation Column [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(8):27-28.
- [9] 叶超,胡忠义.黏滞液体表面张力系数的悬滴法测量[J].大学物理实验,2023,36(5):49-52.  
YE C, HU Z Y. Measuring Surface Tension of Viscous Liquids Using Suspension Drop Method [J]. Physical Experiment of College, 2023, 36(5):49-52.
- [10] 苏宁,曾明辉,杨宏.浅谈电子级氢氟酸技术及发展[J].有机氟工业,2024(2):54-57.  
SU N, ZENG M H, YANG H. Brief Discussion on Electronic Grade Hydrofluoric Acid Technology and Its Development [J]. Organo-Fluorine Industry, 2024(2):54-57.
- [11] GUERRERO V G, COMINO F, RODRIGUEZ A O. Evaluation of the effectiveness and durability of commercial non-stick coatings[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 370:111959.