

# 气相催化氟化合成一氟甲烷的反应条件优化研究

闫浩<sup>1</sup>, 郭一博<sup>1</sup>, 陈晓勇<sup>1</sup>, 孟庆森<sup>2</sup>, 杨振建<sup>2</sup>, 孙凤娟<sup>3</sup>, 徐振生<sup>4</sup>, 马舜<sup>4</sup>

1. 中国民航大学民航热灾害防控与应急重点实验室, 天津 300300

2. 天津绿菱气体股份有限公司, 天津 300280

3. 绿菱电子材料(天津)有限公司, 天津 301714

4. 中铁建发展集团有限公司, 北京 100043

DOI:10.61369/ME.2025030040

**摘要：** 一氟甲烷作为半导体行业中不可或缺的含氟蚀刻气体，展示出独特的应用价值。本研究对铬基催化剂采用了 X 射线衍射 (XRD)、比表面积测定 (BET)、X 射线光电子能谱 (XPS) 分析及 NH<sub>3</sub> 程序升温脱附 (NH<sub>3</sub>-TPD) 等手段进行深入表征，明晰了催化剂的晶体结构、比表面积特性、表面铬元素的化学态及其酸性特征。细致探究反应温度、停留时间及原料比例 (n(HF)/n(CH<sub>3</sub>Cl)) 等关键因素对氟化反应效率的影响，本研究旨在探索一种生态友好型的一氟甲烷制备技术。实验数据表明，在反应温度设定为 290℃、停留时间设为 10 秒、且原料配比 n(HF)/n(CH<sub>3</sub>Cl) 等于 10 的条件下，一氟甲烷的产率达到了最优水平。

**关键词：** 一氟甲烷；气相催化；反应条件优化；铬基催化剂

## Optimization of Reaction Conditions for the Synthesis of Methyl Fluoride via Vapor-Phase Catalytic Fluorination

Yan Hao<sup>1</sup>, Guo Yibo<sup>1</sup>, Chen Xiaoyong<sup>1</sup>, Meng Qingsen<sup>2</sup>, Yang Zhenjian<sup>2</sup>, Sun Fengjuan<sup>3</sup>, Xu Zhensheng<sup>4</sup>, Ma Shun<sup>4</sup>

1. Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Hazards Prevention and Emergency Response, CAUC, Tianjin 300300

2. Linggas Materials Tianjin, Co., Ltd., Tianjin 300280

3. Linggas(Tianjin), Co., Ltd. Tianjin 301714

4. China Railway Construction Development Group Co., Ltd. Beijing 100043

**Abstract :** This research focused on optimizing the reaction conditions for producing fluoromethane (CH<sub>3</sub>F) through gas-phase catalytic fluorination, a crucial etching gas widely used in semiconductor manufacturing. The study involved thorough characterization of chromium-based catalysts using techniques like X-ray diffraction (XRD), specific surface area analysis (BET), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and NH<sub>3</sub> temperature-programmed desorption (NH<sub>3</sub>-TPD) to understand their phase structure, surface area, chemical states of Cr species, and acidic properties. By examining key parameters such as reaction temperature, residence time, and feed molar ratio (n(HF)/n(CH<sub>3</sub>Cl)) on the fluorination process, the aim was to design an eco-friendly production method for fluoromethane. The experimental findings revealed that the highest yield of fluoromethane was obtained at a reaction temperature of 290℃, a residence time of 10 seconds, and an HF/CH<sub>3</sub>Cl molar ratio of 10. These results signify the potential for sustainable production processes in the semiconductor industry.

**Keywords :** fluoromethane; gas-phase catalysis reaction; condition optimization; chromium-based catalyst

一氟甲烷（化学式为 CH<sub>3</sub>F，亦称甲基氟、HFC-41 或 R41），作为一种至关重要的含氟蚀刻气体，其具体物理性质及参数参见表 1<sup>[1]</sup>。在半导体生产领域，一氟甲烷展示出了非凡的优势，其碳氟摩尔比低至 1 : 1，这一特性在众多主流蚀刻气体中堪称最低，从而使得氟甲烷在硅化物薄膜的选择性蚀刻方面表现出色。根据表 2 的数据，一氟甲烷在 3D NAND、DRAM 以及 Fin-FET 等前沿半导体器件的制造流程中，能够实现纳米级别的精确图形传递，尤其适合于那些对选择比有极高要求的复杂结构加工过程<sup>[2]</sup>。

基金项目：国家重点研发计划（No. 2023YFC3010202）；天津市教委科研计划自然科学基金重点项目（2021ZD003）；天津市科技计划项目（21ZXJBGX00010/250307）。

作者简介：闫浩（1986-），男，河北人，博士研究生，研究方向为电子特种气体和高洁净化学气体灭火剂的开发及产业化。

| 表1 一氟甲烷的物性数据表 <sup>[1]</sup><br>Tab. 1 Physical Property Data of Fluoromethane |        |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 物化性质                                                                           | 数值     |
| 相对分子质量                                                                         | 34.03  |
| 熔点 /°C                                                                         | -141.8 |
| 沸点 /°C                                                                         | -78.4  |
| 临界温度 /°C                                                                       | 44.5   |
| 临界压力 /MPa                                                                      | 5.88   |
| 临界密度 /(g · cm <sup>-3</sup> )                                                  | 0.3012 |
| 临界压缩系数                                                                         | 0.251  |
| 气体相对密度 /(kg · m <sup>-3</sup> )                                                | 1.409  |
| 气体定压比热容 Cp/[kJ · (kg · K) <sup>-1</sup> ]                                      | 1.13   |
| 汽化热 (-78.4°C C)/(kJ · kg <sup>-1</sup> )                                       | 519.2  |
| 液体密度 (25°C )/(g · cm <sup>-3</sup> )                                           | 0.566  |
| 蒸汽压 (20°C )/MPa                                                                | 3.3    |

一氟甲烷（CH<sub>3</sub>F）的工业化生产主要存在以下五条路径：①气相加氢脱氯工艺中，贵金属催化剂易失活且再生难度大，成为该技术的瓶颈<sup>[3, 4]</sup>；②甲醇氟化法不仅能耗偏高，而且催化剂稳定性不足，导致生产成本攀升<sup>[5, 6]</sup>；③二甲醚氟化工艺面临着副产物繁多以及催化剂迅速失活的双重问题<sup>[7, 8]</sup>；④硫酸二甲酯液相氟化工艺则伴随着大量含硫废水的排放，环境污染严重<sup>[9, 10]</sup>；⑤气相催化氟化工艺（以氯甲烷为原料）因其高度的原子经济性和连续化生产特性，展示出了最大的产业化潜力<sup>[11-14]</sup>。本研究采用铬基催化剂，深入探究了反应温度、停留时间及原料配比等关键因素对氟化反应的具体影响，为构建环境友好型的一氟甲烷（CH<sub>3</sub>F）生产流程提供坚实的理论基础。

| 表2 一氟甲烷的刻蚀性能 <sup>[2]</sup><br>Tab. 2 Etching Characteristics of Fluoromethane |                                |                  |    |                                                  |                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|----|--------------------------------------------------|------------------------------------|
| 气体                                                                             | 蚀刻速率                           |                  |    | 选择性                                              |                                    |
|                                                                                | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | SiO <sub>2</sub> | Si | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub> | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Si |
| CH <sub>3</sub> F                                                              | 26                             | 1                | 2  | 26                                               | 13                                 |
| CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>                                                 | 28                             | 16               | 8  | 1.8                                              | 3.5                                |
| CHF <sub>3</sub>                                                               | 145                            | 55               | 61 | 2.6                                              | 2.3                                |

## 一、实验材料和方法

### （一）实验材料

活化的铬基催化剂、高纯氟化氢（HF）由绿菱电子材料（天津）有限公司提供。高纯的一氯甲烷（CH<sub>3</sub>Cl）与氮气（N<sub>2</sub>），均采购自瑞银气体销售有限公司。

### （二）催化剂表征

#### 1.X射线衍射（XRD）分析

催化剂活性成分的晶相构成采用 Rigaku SmartLab SE型 X射线衍射分析仪进行测试，测试流程严格依据标准《JY/T 0587-2020 多晶体 X射线衍射方法通则》执行。

#### 2.比表面积（BET）分析

催化剂的比表面积数据通过 Micromeritics ASAP 2460型四站式全自动比表面积分析仪获得，整个测试流程严格遵循《GB/T 19587-2017 气体吸附 BET法测定固体物质的比表面积》。

#### 3.X射线光电子能谱（XPS）分析

为了解析催化剂表面上铬元素（Cr）的化学态，采用岛津 Kratos Axis Ultra DLD型 X射线光电子能谱仪进行表征。测试的设定条件为，单色化的 Al Kα X射线作为激发源，其功率设置为 150 W，能量为 1486.6 eV（hν 值）。实施高分辨率的轨道扫描

以获取铬元素的氧化态信息。

#### 4.NH<sub>3</sub>程序升温脱附（NH<sub>3</sub>-TPD）分析

催化剂的酸性特性通过 NH<sub>3</sub>程序升温脱附（NH<sub>3</sub>-TPD）技术进行表征，该测试在 AMI-300型化学吸附分析仪上实施。具体的实验操作步骤如下，将样品置于氦气（He）氛围中，以 20 °C / min 的升温速率加热至 800°C，并在此温度下吹扫 30 min 以净化表面，待样品冷却至室温后，通入氨气（NH<sub>3</sub>）直至其达到吸附饱和和状态，再次使用氮气吹扫，直至无法检测到吸附气体的信号，以 10 °C /min 的升温速度将样品加热至 800°C，同时利用仪器内置的热导检测器（TCD）实时监测并记录脱附信号。

### （三）反应性能评价

在自制的 Inconel 合金材质、尺寸为 Φ14×600 mm 的管式固定床反应器内（装置简图见图1）开展反应性能评估实验。高纯度的氟化氢（HF）和一氯甲烷（CH<sub>3</sub>Cl）气体分别密封于专用钢瓶中，经由减压阀稳定压力后，通过 D07-19B 型质量流量计（北京七星华创公司）精确调控其流量，所有流量计均已经皂膜流量计校准以保证其精确度。原料气体在配备有电加热保温措施的管道中输送至混合室进行充分混合，然后通入反应器内，该反应器内填装了 20 毫升活化处理后的铬基催化剂。反应生成的产物气体依次经过 10% 浓度的氢氧化钾（KOH）溶液洗涤、去离子水洗涤

以及硅胶干燥处理后,采用气相色谱仪(GC)进行成分检测与分析。本实验系统地探究了反应温度、气体停留时间以及氟化氢与一氯甲烷的摩尔比( $n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})$ )等因素对反应性能的影响。

产物的定量分析采用岛津 GC-2010 型号的气相色谱系统,该系统装备有氢火焰离子化检测器(FID)。色谱柱选用的是 J&W Scientific 的 PoraPLOT Q 型毛细管柱,尺寸为 30m 长、0.32mm 内径,使用的载气为高纯氮气,柱前的压力设定为 0.1 MPa。程序的升温流程为,初始 30℃ 维持 1 min,以 5℃ /min 的速率升温至 50℃ 并保持 5 min,最后以 10℃ /min 的速率继续升温直至 200℃ 并完成检测。进样口的温度设定为 200℃,检测器的温度则设定为 230℃,同时,检测器所需的气体流量分别设定为氢气 40ml/min、空气 400ml/min。

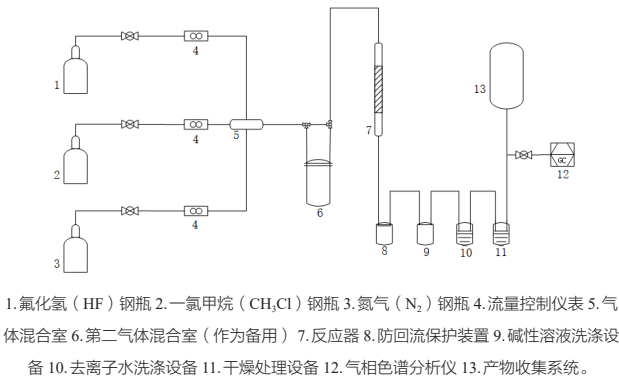


图1 反应性能评价装置图

Fig. 1 Reaction Performance Evaluation Apparatus Diagram

二、结果和讨论

(一) 催化剂的物相结构

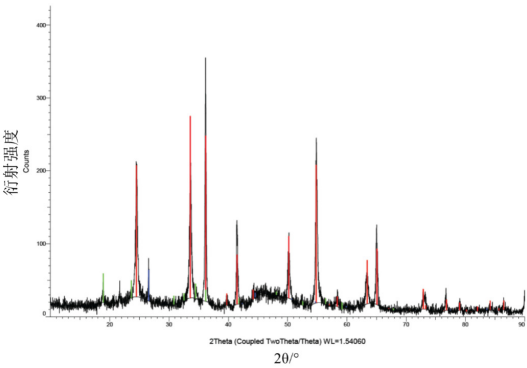


图2 活化后铬基催化剂的 XRD 衍射图谱

Fig. 2 XRD Diffraction Pattern of Activated Chromium-Based Catalyst

图2呈现了活化后的铬基催化剂的X射线衍射(XRD)图谱。将所得图谱与标准卡片(编号01-073-6214)进行对比后,可以观察到,所有的特征衍射峰位置,例如 $2\theta$ 角为 $24.5^\circ$ 、 $33.6^\circ$ 、 $36.2^\circ$ 等处,均与六方晶系的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 相吻合。值得注意的是,催化剂在活化前后的衍射峰位置及其相对强度均未发生显著的变化,这说明活化处理后的催化剂依旧维持了 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 晶体的完整结构,未出现明显的晶型变化或是新相的生成。这一发现进一步

证明活化处理主要作用于催化剂的表面性质,而对催化剂的内部体相结构影响甚微。

(二) 催化剂的比表面积

图3展示了活化后铬基催化剂的 BET 比表面积分析图。根据测试结果,该催化剂的比表面积达到了  $74.67 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ,这一数值相较于常规的铬基催化剂有所增大。比表面积的增大不仅意味着反应物分子能够接触到更多的活性位点,同时也促进了反应物和生成物在催化剂内部的传质与扩散过程,进而对提升催化反应的活性起到了积极的作用。

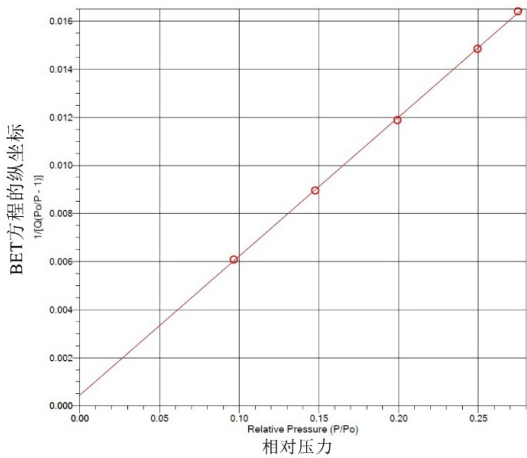


图3 活化后铬基催化剂的 BET 图

Fig. 3 BET Diagram of Activated Chromium-Based Catalyst

(三) 催化剂表面 Cr 的化学状态分析

图4呈现了活化后铬基催化剂的X射线光电子能谱(XPS)图。通过高分辨率XPS图谱的深入分析,可以发现催化剂表面的铬元素主要呈现出两种氧化态,即 $\text{Cr}^{3+}$ 和 $\text{Cr}^{6+}$ 。根据XPS分峰拟合及定量分析的结果(详见表3), $\text{Cr}^{6+}$ 的相对占比高达88.3%,而 $\text{Cr}^{3+}$ 仅占11.7%。这种显著的价态分布差异( $\text{Cr}^{6+}/\text{Cr}^{3+}$ 比值约为7.5)清晰地表明,高价态的 $\text{Cr}^{6+}$ 物种在催化剂的表层占据了主导地位。结合现有的文献资料<sup>[15]</sup>,可以推断,由于 $\text{Cr}^{6+}$ 具备更强的氧化能力和更为活跃的表面性质,它极有可能是该催化体系中的核心活性位点。

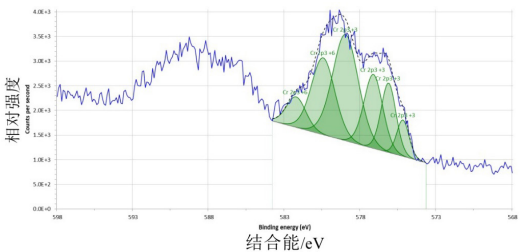


图4 活化后铬基催化剂的 XPS 光谱图

Fig. 4 XPS Spectra of Chemical States for Activated Chromium-Based Catalyst

表3 活化后铬基催化剂表面不同价态 Cr 的含量表  
Tab. 3 Quantitative Distribution Table of Cr Valence States on Activated Chromium-Based Catalyst Surface

| 元素 | 价态 | 占比 (%) |
|----|----|--------|
| Cr | +3 | 11.7   |
|    | +6 | 88.3   |

(四) 催化剂的表面酸性

图5描绘了活化后的铬基催化剂的NH<sub>3</sub>程序升温脱附(NH<sub>3</sub>-TPD)测试结果。根据酸性位点的分类标准,脱附温度在100-300℃范围内的峰对应弱酸位点,300-500℃范围内的峰代表中强酸位点,而脱附温度超过500℃的峰则归属于强酸位点<sup>[16]</sup>。测试结果显示,该催化剂的氨气脱附峰主要集中于500℃以上的高温区,清晰地指示其表面含有大量的强酸性位点。这一显著的强酸性特征与前述氟氯交换反应的机理报道相吻合,强酸位点能够高效地活化C-Cl键,从而加速氟氯交换反应的进程<sup>[16]</sup>。综合前期的表征结果,这种卓越的酸性特性与高比例的Cr<sup>6+</sup>物种含量(达到88.3%)之间存在着紧密的关联,进一步凸显了该催化剂在促进氟氯交换反应方面所表现出的显著优势。

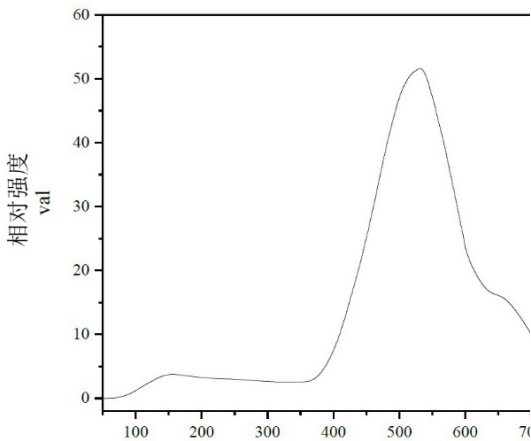


图5 活化后铬基催化剂的NH<sub>3</sub>-TPD分析图

Fig. 5 NH<sub>3</sub>-TPD Profile for Activated Chromium-Based Catalyst

(五) 工艺条件对反应性能的影响

1. 反应温度对反应性能的影响

反应温度是影响催化反应性能的重要因素之一。实验表明,在停留时间为10秒、HF和CH<sub>3</sub>Cl摩尔比为10的条件下,随着反应温度由260℃升至300℃,反应转化率呈现逐渐增加的趋势,从9.38%增加到22.36%。这符合阿伦尼乌斯方程的规律,即提高温度会增加反应物分子的有效碰撞频率,从而促进反应进行。随着温度的升高,选择性在260-270℃略微提高,然而在280℃后开始下降,最终降至93.60%,暗示高温可能会导致副反应发生或催化剂活性位点烧结。当温度达到300℃时,反应转化率达到了峰值,在这种情况下由于选择性下降,最终收率仅略有增加至20.93%,揭示了温度对反应性能的双重影响。虽然高温可以提高反应速率,同时可能降低催化剂的选择性。综合比较,发现290℃是比较适合的反应温度。实验结果表明在催化反应中,适当的温度选择对于实现良好的反应转化率、选择性和收率具有重要意义。

表4 转化率、选择性和收率随反应温度的变化表  
Tab. 4 Temperature-Dependent Table: Conversion, Selectivity and Yield

| 反应温度(℃) | 转化率(%) | 选择性(%) | 收率(%) |
|---------|--------|--------|-------|
| 260     | 9.38   | 98.08  | 9.20  |
| 270     | 16.64  | 98.62  | 16.41 |
| 280     | 19.36  | 97.83  | 18.94 |
| 290     | 21.74  | 95.81  | 20.83 |
| 300     | 22.36  | 93.60  | 20.93 |

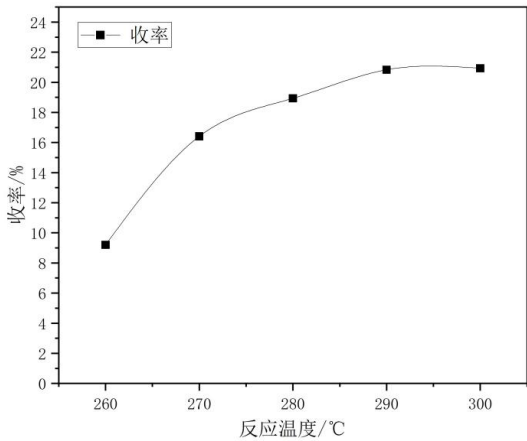


图6 收率随反应温度的变化图

Fig. 6 Yield vs. Reaction Temperature Profile

2. 停留时间对反应性能的影响

有效停留时间是影响反应性能的重要参数之一。实验结果显示,在290℃、HF和CH<sub>3</sub>Cl摩尔比为10的条件下,随着停留时间的增加,反应转化率呈现上升趋势,这是因为更长的停留时间增加了反应物与催化剂之间的接触机会。然而选择性却表现出相反的趋势,说明过长的停留时间可能引发副反应。这种现象揭示出停留时间存在一个“临界值”效应,超过这个值后,转化率的提高已无法弥补由于选择性损失带来的不利影响。根据实验结果,建议将停留时间控制在10秒左右,以达到最佳反应效果和最高产率。在化工生产过程中,适当调整停留时间可以提高反应效率,避免不必要的副反应发生,从而提高产品质量和产率。

表5 转化率、选择性和收率随停留时间的变化表  
Tab. 5 Residence Time-Dependent Table: Conversion, Selectivity and Yield

| 停留时间(s) | 转化率(%) | 选择性(%) | 收率(%) |
|---------|--------|--------|-------|
| 5       | 19.01  | 97.21  | 18.48 |
| 8       | 21.45  | 96.50  | 20.70 |
| 10      | 21.74  | 95.81  | 20.83 |
| 15      | 22.18  | 92.65  | 20.55 |
| 20      | 22.94  | 89.49  | 20.53 |

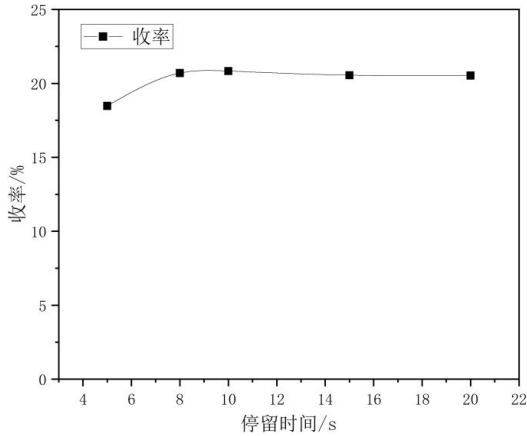


图7 收率随停留时间的变化图

Fig. 7 Yield vs. Residence Time Profile

3. 原料配比对反应性能的影响

根据实验结果,在290℃下反应10秒时,当HF与CH<sub>3</sub>Cl

的摩尔比从2:1增至10:1时, 转化率显著提高, 这是因为过量的 HF 促进了反应向正向移动。在配比为5:1时, 选择性达到了峰值97.20%, 在更高的配比下略有下降, 这充分反映出过量的 HF 可能导致副反应的发生。收率的变化呈现出两个阶段: 从9.68%跃升至20.83%, 主要受到转化率提高的影响 ( $n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})=2:1 \rightarrow 10:1$ ); 收率稳定在20.74%–20.97%之间, 此时转化率的增加与选择性的下降相互抵消 ( $n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})=10:1 \rightarrow 20:1$ )。从经济的角度考虑, 推荐采用10:1的配比。

表6 转化率、选择性和收率随原料配比的变化表

| Tab. 6 Feed Ratio-Dependent Table: Conversion, Selectivity and Yield |         |         |        |
|----------------------------------------------------------------------|---------|---------|--------|
| $n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})$                               | 转化率 (%) | 选择性 (%) | 收率 (%) |
| 2                                                                    | 10.04   | 96.41   | 9.68   |
| 5                                                                    | 18.24   | 97.20   | 17.73  |
| 10                                                                   | 21.74   | 95.81   | 20.83  |
| 15                                                                   | 21.48   | 96.55   | 20.74  |
| 20                                                                   | 21.87   | 95.88   | 20.97  |

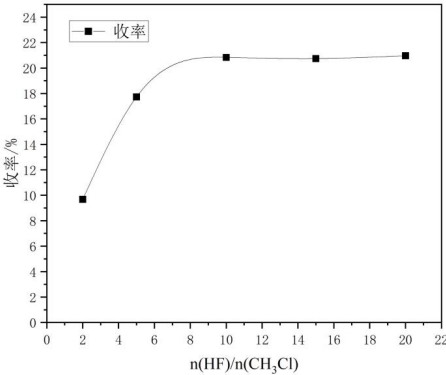


图8 收率随原料配比的变化图

Fig. 8 Yield vs. Reactant Molar Ratio Profile

参考文献

[1]何红振, 张冲, 宋新巍, 等. 一氟甲烷的合成与纯化研究进展 [J/OL]. 化学推进剂与高分子材料, 2022, 20(6): 13–24.

[2]耿谦, 张琴, 姚刚. 一氟甲烷制备与提纯技术研究进展 [J]. 低温与特气, 2022, 40(2): 5–8.

[3]唐浩东, 周楠, 张庆, 等. 一种 Pd–M 合金负载型催化剂制备一氟甲烷的方法: CN109824473B [P/OL]. 2022–03–01.

[4]刘武灿, 张金柯, 金佳敏, 等. 一种一氟甲烷的制备方法: CN104016829A[P/OL].

[5]闫浩, 周晓猛, 郭一博, 等. 一种氟化合成一氟甲烷的方法: CN118851862A[P/OL].

[6]张奎, 林德荣, 杨青, 等. 使用新型催化剂制备氟甲烷的新方法: CN112939726A[P/OL].

[7]张呈平, 杨刚, 郭占英, 等. 一氟烷烃的制备方法 [P/OL]. 2022–03–01.

[8]杨刚, 贾晓卿, 权恒道. 一种从烷基醚气相制备氟代烷烃的方法: CN107739293A[P/OL].

[9]李金龙, 耿谦, 徐海云, 等. 一种一氟甲烷的制备方法: CN112898114A[P/OL].

[10]Method for manufacturing methyl fluoride: 9919990[P/OL]. 2018–03–20.

[11]ZHU Y, FIEDLER K, RÜDIGER St., 等. Aliovalent–substituted chromium–based catalysts for the hydrofluorination of tetrachloroethylene[J/OL]. Journal of Catalysis, 2003, 219(1): 8–16.

[12]BOESE O, UNGER W E S, KEMNITZ E, 等. Active sites on an oxide catalyst for F/Cl–exchange reactions: X–ray spectroscopy of fluorinated  $\gamma$ –Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J/OL]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2002, 4(12): 2824–2832.

[13]ALONSO C, MORATO A, MEDINA F, 等. Effect of the aluminium fluoride phase for the Cl/F exchange reactions in CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> (CFC–12) and CHClF<sub>2</sub> (HCFC–22)[J/OL]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, 40(4): 259–269.

[14]KRISHNA MURTHY J, GROSS U, RÜDIGER S, 等. Mixed metal fluorides as doped Lewis acidic catalyst systems: a comparative study involving novel high surface area metal fluorides[J/OL]. Journal of Fluorine Chemistry, 2004, 125(6): 937–949.

[15]汪云, 张文霞, 宋建冬, 等. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂催化氟化 2–氯–1,1,1–三氟乙烷合成四氟乙烷 [J]. 有机氟工业, 2018(2 vo): 5–10.

[16]HE J, ZHANG M, ZHOU B, 等. Catalytic Gas–phase Fluorination of Hexachlorobutadiene to 1,2–Dichlorotetrafluorocyclobutene over Cr/Zn–based Catalysts[J/OL]. Journal of the Chinese Chemical Society, 2018, 65(6): 760–770.

三、结论

催化剂表征研究表明, 活化后的铬基催化剂保持了完整的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体结构, 具有较大的比表面积和丰富的强酸性位点, 催化剂表面主要有 Cr<sup>6+</sup> 物种存在, 是主要的活性中心。对气相催化氟化合成一氟甲烷反应条件的优化研究发现反应温度、停留时间以及原料比对反应性能有显著的影响。在反应温度为 290℃, 停留时间为 10 秒以及  $n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})=10$  的条件下, 一氟甲烷的收率达到了最优值 20.83%。这项研究为开发高效且环保的一氟甲烷生产工艺提供了理论支持, 有望推动其在半导体制造等领域的应用。