

氟橡胶 FKM 技术体系



橡胶技术知识图谱（六）

TECHNICAL SYSTEM OF FLUORORUBBER

目录CONTENTS

01

FKM概述与化学基础

- FKM在现代橡胶工业中的地位
- FKM性能极强的原因
- FKM的化学结构与常见单体
- 氟元素为何如此稳定

02

FKM核心性能与分类

- FKM主要分类体系
- 耐高温/耐油/耐化学核心性能
- FKM耐燃油极强的原因
- FKM主要缺点分析

03

FKM配方、工艺与硫化

- 硫化体系与双酚硫化技术
- 配方体系与酸吸收剂应用
- 补强体系与关键性能指标
- 加工工艺与后硫化处理

04

FKM应用领域与前沿技术

- 航空航天、汽车等核心应用领域
- FFKM：全氟醚橡胶的高端进阶
- FKM与其他高性能橡胶的横向对比
- 前沿技术探索与AI辅助研发应用

05

总结与未来展望

- 构建完整的FKM知识图谱关联节点
- 明确FKM在现代橡胶工业的战略定位
- 展望高性能弹性体的未来发展趋势

01

FKM概述与化学基础

FKM在现代橡胶工业中的地位

氟橡胶（FKM）是现代工业中不可或缺的关键基础材料，也是最核心的**高端耐高温耐化学橡胶**之一。

工业定位：“极端工况密封体系核心材料”



航空航天

发动机密封、液压系统密封件



能源与动力系统

涡轮增压、燃油、高压氢能源密封



新能源汽车

电驱系统、冷却系统、高温油封



高端制造与化工

半导体高纯腔体、耐腐蚀泵阀管道



性能优势总结

- 卓越的耐高温性 (-20°C ~ 250°C 连续使用)
- 极佳的耐化学腐蚀与耐溶剂性，抗老化
- 低气体渗透性，适合真空及高压密封环境

FKM为什么性能极强？



核心特点：分子含大量 氟原子

氟元素是元素周期表中**电负性最强**的元素。它的引入，在分子层面为FKM构建了独特的化学屏障，带来了革命性的性能提升，使其成为高性能密封材料中的“佼佼者”。



超强化学稳定性

氟原子形成致密保护层，有效阻挡酸、碱、氧化剂等各类化学介质的侵蚀，保持材料结构稳定。



超强耐热性

极高的C-F键能赋予了FKM出色的耐高温性能和抗氧化能力，可在极高温环境下长期工作。



超强耐介质性

对各类油、溶剂、液压油等具有优异的抵抗能力，体积变化率极低，是动力传输系统的理想选择。

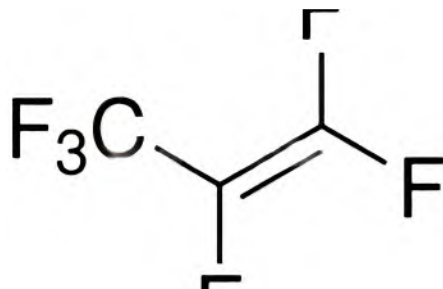
FKM的化学结构：常见单体



01. VDF (偏氟乙烯)

化学式: $\text{CH}_2=\text{CF}_2$

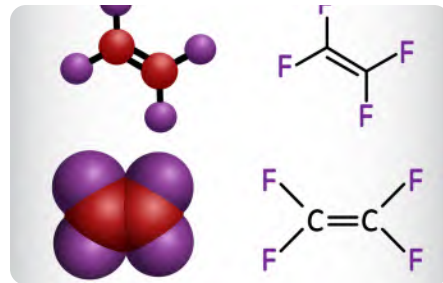
作用：提供弹性和基础性能，是FKM聚合物链中的骨架成分。



02. HFP (六氟丙烯)

化学式: C_3F_6

作用：破坏分子链规整性，降低结晶度，防止材料变脆，赋予橡胶优异的低温弹性。



03. TFE (四氟乙烯)

化学式: C_2F_4

作用：增加聚合物链的氟含量，显著提高材料的耐热性、耐化学介质性及耐溶剂性。

氟元素为什么如此稳定？

核心原因：C-F 键能极高

- 键能表现：EC-F > **480 kJ/mol**，属单键中最强之一。
- 直观对比：远高于 C-H 键 (≈ 414 kJ/mol) 与 C-C 键 (≈ 347 kJ/mol)。



极强耐热性

高键能需要更高能量才能破坏分子结构，赋予材料优异的耐高温性能。



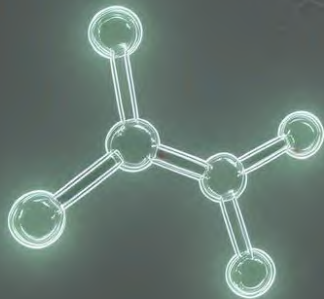
极强耐氧化性

氟原子强电负性使其难以被氧化，可有效抵抗环境中的臭氧与氧气侵蚀。



极强耐腐蚀性

稳固的 C-F 键结构不易被酸碱及有机溶剂攻击，分子链完整性保持极佳。



02

FKM核心性能与分类

CORE PROPERTIES & CLASSIFICATION

FKM主要分类体系

01

二元 FKM

组成：VDF (偏氟乙烯) + HFP (六氟丙烯)

特点：传统工业主流产品，物理机械性能均衡，综合成本相对较低，适用于常规工况。

02

三元 FKM

组成：VDF + HFP + TFE (四氟乙烯)

特点：引入TFE共聚单体后，耐热性、耐化学腐蚀性及耐油耐溶剂性显著增强，是目前应用最广泛的类型。

03

四元 FKM

组成：在三元FKM基础上加入第四种特殊单体 (如 CTFE/PMVE 等)

特点：专为超低温环境、强腐蚀性介质等极端特殊工况而设计，综合性能最强大，通常用于高要求关键部件。

FKM核心性能



超强耐高温

长期工作温度:200°C ~ 250°C
短期峰值:可达300°C



极强耐油性

尤其耐:燃油、液压油、合成润滑油
表现:体积变化小, 物理性能保持良好



极强耐化学性

耐:酸、碱、溶剂、芳香烃等多种化学品
应用:化工、石油开采等领域



极低透气率

特点:气体渗透率极低, 密封性极佳
适用于:真空系统、氢能源系统等

FKM为什么耐燃油极强？

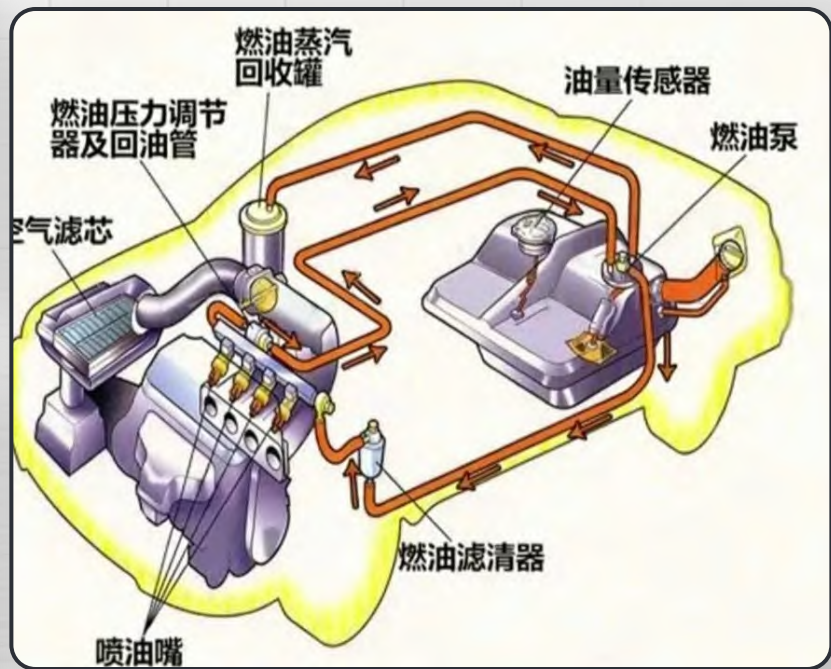
✘ 现代燃油的挑战

现代燃油中含有大量的**芳香烃、添加剂和乙醇**，这些化学成分具有很强的侵蚀性，极易导致普通橡胶材料（如NBR丁腈橡胶）发生严重的**溶胀、硬化甚至开裂**，直接影响密封件的性能与寿命。

🛡️ FKM的解决方案：高氟屏蔽结构

FKM分子链上密集排布的氟原子，形成了一个疏油拒水的“**天然屏蔽层**”，能像坚固的城墙一样有效阻挡燃油分子渗透，保持橡胶的物理尺寸与密封性能长期稳定。

🔑 **核心关键：高氟含量赋予的优异化学惰性**



FKM主要缺点

尽管性能卓越，FKM也并非完美，其在应用与生产端仍存在一些不可忽视的局限性：



01. 成本极高

价格高昂

原材料成本远高于NBR、EPDM、SBR等通用合成橡胶，大幅拉高了整体采购预算。

应用受限

极高的成本限制了其仅能应用于耐化学性、耐高温要求极高的关键工业部件，难以大规模普及。



02. 耐寒性一般

低温性能短板

在低温环境下弹性会显著下降，容易出现硬化、变脆甚至龟裂现象，密封性能随之降低。

配方改善方案

需通过引入四元共聚单体等特殊配方技术，才能有效改善低温屈挠性能，且成本会进一步增加。



03. 加工难度高

工艺要求严苛

生胶粘性大，混炼与硫化过程对温度、时间控制要求极高，容易产生焦烧或欠硫等不良品。

需二次后硫化

为保证最终性能，制品通常需经历漫长的高温二次后硫化处理，增加了生产周期与能耗成本。

03

FKM配方、工艺与硫化

FORMULATION, PROCESS & VULCANIZATION

FKM硫化体系

01 过氧化物硫化

■ 核心原理

利用有机过氧化物受热分解产生的自由基，攻击橡胶分子链上的活性位点，从而引发分子链之间的交联反应，形成稳定的三维网状结构。

■ 主要特点

硫化速度快，加工效率高，适合厚制品。但硫化过程可能释放挥发性物质产生气味，且成品的压缩永久变形性能相对较差，耐热水性一般。

02 双酚硫化 (多元胺硫化)

■ 核心原理

以双酚类化合物（如双酚AF）为主硫化剂，配合苄基三苯基氯化磷（BPP）等促进剂，与FKM分子链中的含氟基团发生脱氟化氢缩合反应，形成碳-碳交联键。

■ 主要特点

这是目前高性能FKM应用的主流选择。具备极低的压缩永久变形率、优异的耐高温和耐化学介质性能，且无味环保，综合物理性能最均衡，广泛用于各类严苛密封环境。

FKM配方体系基础结构

一个典型的FKM配方由以下几个关键组分构成，它们协同作用，共同决定了最终橡胶产品的物理性能与化学稳定性。



FKM 生胶

基础聚合物

配方体系的骨架
提供耐化学性基础



炭黑 / 白炭黑

补强体系

赋予材料机械强度
改善耐磨性与撕裂强度



酸吸收剂

稳定剂 (MgO等)

中和分解产生的HF
保护设备与交联键稳定性



硫化体系

交联成型 (双酚等)

构建三维网状结构
实现橡胶化与最终定形



加工助剂

分散与脱模

改善混炼流动性
防止粘连，提升生产效率

FKM为什么需要酸吸收剂?



潜在风险: HF (氢氟酸) 释放

在FKM的加工和使用过程中,尤其是在高温条件下,橡胶分子链可能发生微量分解,释放出具有强腐蚀性的氢氟酸(HF)。



解决方案: 加入酸吸收剂

为中和HF、防止其腐蚀设备与模具,并避免HF对橡胶物理性能的危害,在FKM基础配方中加入酸吸收剂是一项必须操作。

它们能与HF反应,生成化学性质稳定的氟化物盐,从而保护整个硫化体系。



氧化镁 (MgO)

最常用的酸吸收剂之一



氢氧化钙 (Ca(OH)₂)

兼具酸吸收与加工助剂功能

核心原理: 化学中和反应

酸吸收剂均为碱性化合物。在硫化和高温使用阶段,它们会迅速与FKM分解产生的微量HF反应,生成不溶于橡胶且化学性质稳定的氟化物盐(如MgF₂或CaF₂),从而有效消除HF的腐蚀和降解作用,延长制品使用寿命。

FKM补强体系

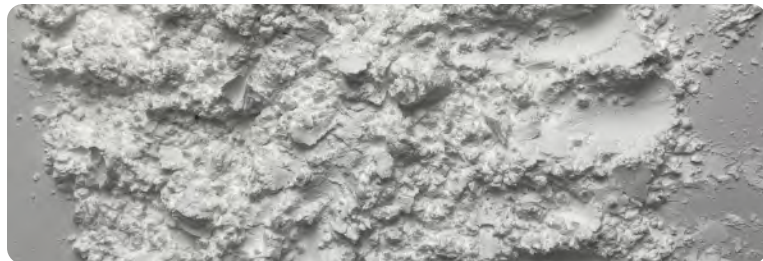
补强剂用于提高FKM的强度、耐磨性和抗撕裂性，是决定橡胶物理性能的关键组分。



炭黑

■ **常用类型：** MT炭黑、N990、热裂法炭黑

■ **特点：** 成本效益高，能为橡胶提供均衡且良好的机械性能和耐磨性，是工业橡胶制品中最常用的补强剂。



白炭黑 (二氧化硅)

■ **特点：** 补强效果优异，同时能赋予橡胶更低的压缩永久变形，改善耐低温性能。

■ **应用：** 常用于对纯度要求极高、不能引入碳污染的严苛应用场合，如半导体、食品医疗、制药等行业。

FKM加工工艺



模压成型

适用于O型圈、垫片等几何形状复杂、结构精密的橡胶密封件产品，工艺成熟。



注射成型

生产效率极高，材料利用率高，适合大批量、高精度的复杂橡胶件制造。



挤出成型

连续化生产工艺，主要用于制造密封条、胶管、电缆护套等具有恒定截面的连续型材。

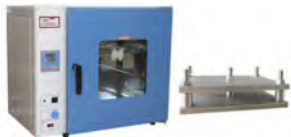


关键步骤：后硫化 (Post Cure) — FKM氟橡胶制品通常必须进行的二次高温处理工序

- ① 完成交联：**使聚合物链间的硫化反应进行得更完全，形成更稳定的三维网状结构。
- ② 去除挥发物：**彻底排出胶料中的低分子挥发物质，显著降低压缩永久变形率。
- ③ 提升性能：**进一步稳定产品在高温环境下的物理性能和化学性能。

FKM关键性能指标

TST



01 压缩永久变形

意义：核心密封指标，反映橡胶在持续压缩下保持弹性的能力。数值越低，密封性能越好，寿命越长。



02 耐介质体积变化

意义：衡量橡胶在特定介质（如燃油、化学溶剂）中浸泡后的体积变化率。变化率越小，耐介质性越好。



03 热空气老化

意义：关键寿命指标，通过在高温热空气中老化后测试其物理性能保持率，评估其耐热老化能力。

04

FKM应用领域与前沿技术

APPLICATION FIELDS & FRONTIER TECHNOLOGY

FKM 最重要应用领域



01 / 汽车发动机密封

尤其在涡轮系统和曲轴油封中，能稳定承受**高温、高速和燃油腐蚀**的多重考验，保障动力系统高效运行。



02 / 新能源汽车

在电驱系统、热管理冷却系统和耐高温油封等关键部位需求呈**高速增长**趋势，适应新的工况挑战。



03 / 航空航天

凭借优异的**极端耐温性和耐航空燃油性能**，被广泛应用于飞机发动机密封和精密液压控制系统。



04 / 化工与半导体

作为关键密封件，能有效应对化工领域的**强腐蚀介质**，并满足半导体制造工艺对**高纯度环境**的严苛要求。

FFKM：更高端的氟橡胶

在FKM之上，还有一个顶级材料——**全氟醚橡胶 (FFKM)**。它代表了橡胶密封技术的最高水准，被誉为“塑料王”级别的弹性体。



结构特性

分子主链上的所有氢原子均被氟原子取代，实现了完全氟化，结构极其稳定。



核心应用

仅用于要求最苛刻的场景，如半导体晶圆制造、航空发动机关键部件及高端石化设备。



卓越性能

性能无限接近PTFE与金属密封，拥有极宽的耐温范围与极佳的耐化学腐蚀能力。



最大短板

成本极其昂贵，价格通常是FKM氟橡胶的数倍甚至数十倍，极大限制了其普及性。



FKM与其他橡胶对比



vs. NBR (丁腈橡胶)

FKM 核心优势

耐高温性能卓越，在高温工况下仍能保持优异的物理性能；耐燃油及耐各类油类的性能远超 NBR，是燃油系统的优选。

NBR 相对优势

材料成本低廉，适合大规模、低成本的应用场景；在常温下具备更出色的弹性和回弹性。



vs. EPDM (三元乙丙)

FKM 核心优势

拥有极佳的耐油和耐化学介质腐蚀能力，在酸碱及油类复杂环境下性能稳定；机械强度更高，耐磨损性能更优。

EPDM 相对优势

耐候性极强，能长期耐受紫外线和臭氧侵蚀；在耐水、耐水蒸气及极性溶剂方面表现极佳，且绝缘性能优异。



vs. VMQ (硅胶)

FKM 核心优势

耐油、耐化学性全面超越硅胶，适用于工业化学品环境；具有更高的机械强度和撕裂强度，使用寿命更长。

VMQ 相对优势

低温(-60°C)柔韧性极佳；耐老化性能优异，且具有很好的生理惰性，广泛应用于医疗及食品接触级场景。

FKM前沿技术



01 / 低温FKM

目标:解决传统FKM低温脆化问题，拓宽应用温度范围，满足更严苛的寒冷工况使用需求。



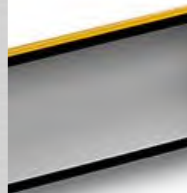
02 / 超低压压缩永久变形FKM

目标:大幅降低材料压缩永久变形率，满足新能源汽车、高端工业设备对密封件长寿命、高可靠性的核心需求。



03 / 半导体级FKM

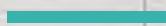
目标:实现材料的超低离子析出和超高化学纯度，满足半导体制造工艺中对洁净度的严苛要求。



04 / 氢能FKM

目标:开发耐氢渗透、耐高压的专用密封材料，解决高压氢气环境下的密封难题，助力氢能汽车商业化发展。

05



总结与未来展望

SUMMARY AND FUTURE OUTLOOK

FKM知识图谱关联节点



上游关联

- 氟化工基础原料体系
- VDF, TFE 等核心氟单体合成



配方关联

- 补强体系: MgO, Ca(OH)₂ 金属氧化物
- 硫化体系: 过氧化物、双酚硫化体系



工艺关联

- 关键环节: 二段后硫化处理工艺
- 成型技术: 精密注射成型、高温硫化(HTV)



产品关联

- 基础件: 耐高温油封、O型密封圈
- 高端应用: 高端化工设备密封、半导体制造密封

FKM在橡胶工业中的真正定位

FKM 本质上是：

“**极端工况高端密封核心胶种**”

其真正价值不在于普通工业应用，而在于**高温 + 化学 + 长寿命**的综合稳定性。

因此，FKM成为现代**航空航天 · 新能源汽车 · 半导体 · 化工装备 · 氢能源**等领域中不可替代的重要战略材料节点。



感谢聆听

THANKS FOR LISTENING