

传统汽车及新能源汽车用氟聚合物的创新

雷俊¹, 孟庆文², 黄军², 兰若童²

(1. 巨化集团有限公司, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江巨圣氟化学有限公司, 浙江 衢州 324000)

[摘要] 含氟聚合物因具有优异的耐化学品性能、耐高低温、阻燃性和低渗透性等特征, 并且伴随绿色低碳的政策驱动以及新能源车的快速发展, 使其在传统燃油与新能源车核心部件中的应用需求持续增长。简述了氟橡胶(FKM)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚偏氟乙烯(PVDF)等氟聚合物在汽车领域的应用, 浅析国内外同行技术差距, 展望未来发展方向。

[关键词] 传统汽车; 新能源汽车; 氟聚合物; 应用

[中图分类号] TQ124.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 07-0083-05

Innovations in fluoropolymers for traditional and new energy vehicles

LEI Jun¹, MENG Qingwen², HUANG Jun², LAN Ruotong²

(1. Juhua Group Co., Ltd., Hangzhou 310020, China; 2. Zhejiang Jusheng Fluorine Chemical Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

Abstract: Fluoropolymers, renowned for their outstanding chemical resistance, high and low temperature resistance, flame retardancy and low permeability, have witnessed sustained growth in automotive applications for both conventional fuel-powered and new energy vehicles. This expansion is driven by green and low-carbon policy initiatives and the rapid development of new energy vehicle technologies. The application of fluoropolymers such as fluoroelastomers (FKM), polytetrafluoroethylene (PTFE), and polyvinylidene fluoride (PVDF) in the automotive field is described, the gap in technologies between domestic and foreign counterparts is briefly analyzed, and future development directions are put forward.

Key words: traditional vehicles; new energy vehicles; fluoropolymers; application

0 引言

我国是世界最大的萤石生产国及消费国, 2023年我国萤石产量约占世界总产量的64.77%, 奠定了氟化工产业的资源优势。经过数十年发展, 我国已形成完整的氟化工产业链(见图1)。从基础原料萤石或磷矿石制成氢氟酸、氟氯烃、氟单体, 再到氟化工产业链下游含氟聚合物、含氟共聚物和含氟精细化学品, 随着加工深度增加, 产品的附加值和利润率呈几何级倍数增长^[1](见图2)。2024年我国氟聚合物产能超过60万t, 其中聚四氟乙烯(PTFE)、聚偏氟乙烯(PVDF)、氟橡胶(FKM)是主要产品, 被广泛应用于汽车、电子、能源等领域。含氟聚合物的单体众多、结构各异, 主要包括氟树脂(PTFE、聚全氟乙丙烯(FEP)、可溶性聚四氟乙烯(PFA)、乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)、PVDF等)和FKM两大类^[2], 其核心性能见表1^[3]。PTFE具有极低的摩擦系数(0.04)和优

异的耐化学性^[4]; FKM氟含量高(66%~71%), 在200℃高温和燃油环境中表现稳定^[5]; PVDF则兼具良好的机械强度(屈服强度46MPa)和电化学稳定性^[6], 这些特性在传统燃油汽车和新能源车中展现出巨大的应用潜力。尤其在“双碳”目标的政策驱动下, 燃油汽车排放标准从国I到国VI日益趋严, 以及新能源车技术的不断突破, 汽车工业的发展对更安全、更环保的材料性能提出了越来越高的要求, 从而使得含氟聚合物在汽车领域的应用和创新备受人们关注。因此, 笔者旨在对传统燃油汽车及新能源汽车用氟聚合物的现状和创新进行浅述, 并展望未来发展方向。

[收稿日期] 2025-05-20

[作者简介] 雷俊(1971-), 男, 浙江遂昌人, 高级工程师, 长期从事氟氯新材料产品技术开发与管理。

[通信作者] 孟庆文(1983-), 男, 湖南炎陵人, 正高级工程师, 长期从事氟聚合物产品研发、生产及技术服务。

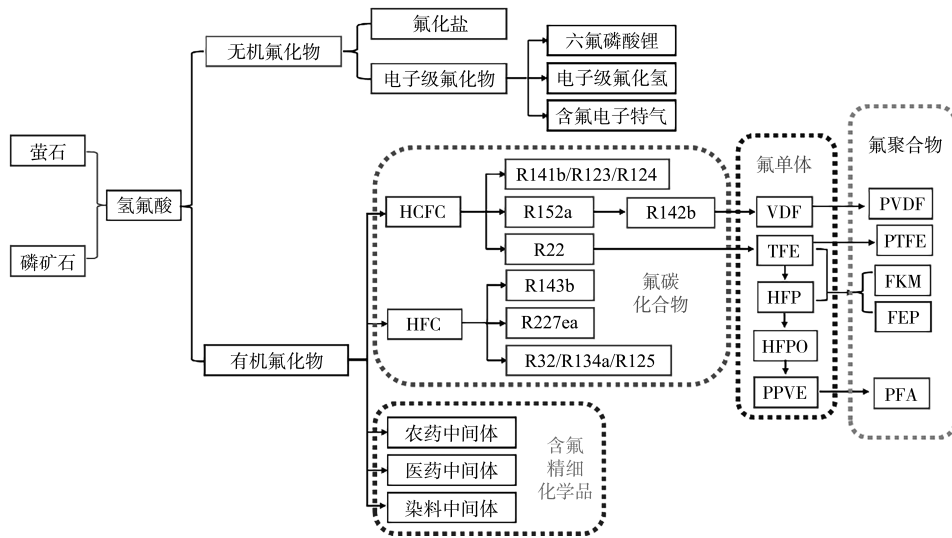


图1 氟化工产业链

Fig. 1 Fluorine chemical industry chain

表1 常见氟聚合物的主要性能参数

Table 1 Performance parameters of the common fluoropolymers

氟聚合物	密度 ^① / (g·cm ⁻³)	屈服强 度 ^② /MPa	断裂伸 长率 ^③ /%	拉伸模 量 ^④ /MPa	硬度 ^⑤ / HD	热变形温度 (0.46 MPa) ^⑥ /℃	极限氧 指数 ^⑦ /%	介电常数 ^⑧ (1 MHz)	耐化学 溶剂 ^⑨	摩擦 系数 ^⑩	吸水率 (24 h) ^⑪ /%
PTFE	2.17	10.0	200 ~ 500	600	60	121	> 95	2.1	极好	0.04	< 0.01
FEP	2.15	12.0	250 ~ 350	500	57	70	> 95	2.1	极好	0.05	< 0.01
PFA	2.15	15.5	300	700	62	73	> 95	2.1	极好	0.20	< 0.03
ETFE	1.74	24.0	200 ~ 500	1 500	75	104	30 ~ 36	2.6	极好	0.06	< 0.03
PVDF	1.78	46.0	20 ~ 150	2 400	79	148	-	-	很好	0.40	< 0.04
PCTFE	2.15	40.0	80 ~ 250	1 500	90	120	-	-	好	-	< 0.01

注：①参照 ASTM D792—2013 方法测定；②按照 ASTM D638—2014 方法测定；③按照 ASTM D2240—1997 方法测定；④参照 ASTM D648—2018 方法测定；⑤参照 ASTM D2863—2019 方法测定；⑥参照 ASTM D150—2011 方法测定；⑦参照 ASTM D543—2006 方法测定；⑧相对钢的摩擦系数；⑨参照 ASTM D570—1998 方法测定。

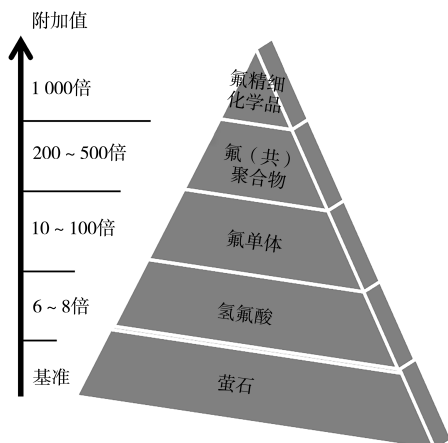


图2 氟化工产品附加值对比

Fig. 2 Comparison of added value of fluorine chemical products

1 氟聚合物在传统燃油汽车中的应用

1.1 密封部件

FKM 是传统燃油车密封件的主流材料，占发

动机密封件用量的 70% 以上，主要用在曲轴油封、气门油封、进排气歧管密封、燃油泵密封、通风阀密封等关键密封部位。FKM 分子结构中氟原子的强电负性形成化学屏障，耐矿物油、合成油及含硫燃油，在 150 ~ 200 °C 下使用寿命达 5 000 h。因此可在发动机高温、高压且存在多种化学介质的恶劣环境下长期稳定工作，有效防止机油、燃油和气体的泄漏，确保发动机的正常运行^[7-8]。PTFE 的摩擦系数极低，且具有自润滑特性，可降低密封件与运动部件间的摩擦阻力，减少能量损耗（如：机械系统中液压/气动密封的摩擦功率损失可降低 30% 以上），同时避免因摩擦生热导致的密封失效，从而有效提高密封性能和使用寿命^[9]。不过在有些燃油泵密封中，纯 PTFE 强度不达标，需通过填充改性（如碳纤维、玻璃纤维）提升硬度至 65 HD，拉伸模量达 800 MPa。改性后的 PTFE 密封环的泄漏量 < 0.000 5%，优于传统橡胶密封件的 0.002 0%，满足

国VI标准对燃油系统密封性的严苛要求。

1.2 燃油管路系统

相比于国V标准,国VI标准要求更低的燃油排放限值和颗粒物排放限值。此外,基于国内2030碳达峰、2060碳中和的碳排放目标,将当前燃油管路系统碳排放的限值继续降低,这就对关键零部件的材料提出更高挑战。四氟乙烯-六氟丙烯-偏氟乙烯共聚物(THV)、乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)及全氟乙烯丙烯共聚物(FEP)等因其耐燃油和低渗透、低析出等特性被广泛用于燃油管路、加注衬套和加油站用多层燃油软管等部件,有效减少燃油的挥发和泄漏率,提高了燃油系统的安全性和可靠性,并且THV还具有良好的柔韧性和加工性能。侯波等^[10]对不同材料和结构的汽车燃油胶管渗透率研究证明,以氟树脂(F-TPV或THV)为主的结构胶管耐渗透性最好,归因于THV的低扩散系数($1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$)。天津鹏翎集团股份有限公司专利^[11]公开一种采用低渗透橡胶和树脂(F-TPV材料层、THV材料层或者FEP材料层),通过特定材料组合燃油管路的四层或五层结构,解决了现有燃油管无法满足高温、高压和新型燃油使用需求的问题,实现了高燃油阻隔性和机械性能的提升。另外,ETFE因具有优良的抗冲击性、化学稳定性和耐环境应力开裂性(苏威公司Solef® ETFE内衬管的耐环境应力开裂时间 $> 1000 \text{ h}$,在 $-40 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 循环测试中无裂纹),燃料渗透系数(CE10, $60 \text{ }^\circ\text{C}$)约 $2.2 \text{ g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,适配乙醇汽油(含20%乙醇)和生物柴油。三樱工业株式会社专利^[12]公开一种多层树脂管,通过在燃油软管中采用ETFE树脂或聚苯硫醚树脂(PPS)、乙烯-乙烯醇树脂(EvOH)、聚萘二羧酸丁二醇酯树脂(PBN)内管,引入高黏结强度的胶黏剂层和聚酰胺树脂中间层,解决了胶黏剂树脂与功能树脂层黏结亲和性不佳的问题,实现了高阻隔性、机械强度和抗燃性能的提升,适用于各种汽车燃油输送,减少了环境污染,提高了燃油利用率。

1.3 传感器及其他部件

氧传感器电线有时需要在高温、复杂化学环境条件下仍保持稳定的电学性能,而含氟聚合物的良好电绝缘性和耐化学稳定性使其成为理想的氧传感器电线,罗伯特·伯世有限公司(Bosch)(以下简称伯世)和美国德尔福公司等主流汽车传感器领域厂商,已全面采用PTFE绝缘线。普通的PVC绝缘线在 $70 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ 即会失效,PTFE绝缘线的耐温可达

$260 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 MHz 介电常数2.1,在高频信号传输中衰减 $< 0.5 \text{ dB/m}$,因而可确保空燃比控制精度。此外,比利时索尔维集团通过改性ETFE(如添加纳米填料或交联剂)提升抗蠕变性,耐温可达 $180 \text{ }^\circ\text{C}$,替代橡胶材料用于中冷器进气管,壁厚从 2.0 mm 减至 1.2 mm ,质量减轻25%,同时可稳定耐受 0.2 MPa 工作压力(橡胶材料在高压下易老化开裂),爆破压力 $> 1 \text{ MPa}$,可靠性提升2倍以上,大大降低爆管风险。还有喷油器等部件也会使用含氟聚合物,利用其耐化学腐蚀和低摩擦特性,确保喷油器的精确和长周期工作,如:喷油器阀针采用PTFE涂层,摩擦阻力降低30%,响应时间从 5 ms 缩短至 3 ms ,提升燃油喷射精度,以及伯世共轨喷油器采用苏威Kalrez®全氟醚橡胶(FFKM)密封件,在 200 MPa 高压燃油环境下通过 1000 h 耐久性测试,每次循环泄漏量始终 $< 0.05 \text{ mm}^3$ 。电装喷油器燃油管路采用ETFE-PTFE复合层,内层PTFE厚度 0.3 mm ,抗氢渗透性能通过SAE J2600标准认证,爆破压力 $> 70 \text{ MPa}$ (正常工作压力 $35 \sim 70 \text{ MPa}$)。国内厂商华域汽车系统股份有限公司联合上海有机氟材料研究所,开发出PTFE基喷油器密封件,成本较进口FFKM降低40%,已通过浙江吉利控股集团有限公司、长城汽车股份有限公司等车企台架测试(寿命达80万次启闭)。通过不断对含氟聚合物进行创新与结构优化,逐步实现了“薄壁化、高可靠、长寿命”的突破,契合汽车行业轻量化、智能精准化、高效环保和安全的发展趋势。因此,含氟聚合物有望在传统燃油汽车管路领域进一步替代传统橡胶和金属材料,将成为未来5~10年的主流解决方案。

2 氟聚合物在新能源汽车中的应用

2.1 电池黏结剂

随着新能源汽车,尤其是锂离子电池新能源汽车的快速增长,应用于锂电池黏结剂的PVDF需求大幅度增加,约占锂电池黏结剂市场的80%,其分子量和纯度直接影响电极性能。PVDF具有良好的化学稳定性、热稳定性和机械性能,作为锂电池黏结剂,能够有效提高电极材料与集流体之间的附着力,确保电池在充放电过程中的结构稳定性,从而提高电池的循环寿命和能量密度。LI等^[13]提出“聚合物诱导相结构调控”策略,设计出新型PVDF基聚合物电解质,室温离子电导率高达 $1.6 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$,锂离子迁移数约为0.66,组装的 $\text{LiFePO}_4/\text{Li}$ 电池在 1 C 倍率下,具有约 $149 \text{ mA} \cdot \text{h/g}$

的初始比容量,且循环500次容量保持率达98%,2 C倍率下,具有142 mA·h/g的初始比容量,800次循环后仍保有84.5%的比容量,实现高离子传导与超长循环。阿科玛公司推出的高纯度PVDF(如Kynar[®]HSV900,相对分子质量50万)的黏结强度达15 N/cm,比普通PVDF(10 N/cm)提升50%,电池循环3 000次后容量保持率>85%,且热稳定性提升至200 ℃。针对固态电池和锂金属电池,阿科玛正在开发官能团改性的PVDF(如Kynar[®]HSV1810),其柔韧性和界面兼容性更优,可缓解锂枝晶生长对黏结剂的破坏。此外,PTFE微孔膜(孔径0.2~0.4 μm)作为隔膜涂层,通过物理屏障也可有效抑制锂枝晶生长,提升安全性,归因于其疏水性(接触角120°)和机械强度(拉伸强度30 MPa)。

2.2 燃料电池隔膜

隔膜是电池的关键组件之一,其性能直接影响电池的安全性和循环寿命。全氟磺酸树脂(如Nafion[®])是质子交换膜燃料电池(PEMFC)的核心材料,在燃料电池中起到传导质子、分隔氧化剂和还原剂的重要作用,提高燃料电池的效率和耐久性^[14]。美国科慕公司通过纳米限域技术,优化磺酸基团分布,将每克样品中磺酸基团物质的量从0.9 mmol提升至1.2 mmol,质子传导率提升至0.1 S/cm(80 ℃),同时机械强度提高30%。国内东岳氟硅科技集团有限公司开发的燃料电池膜DF260采用梯度交联技术,拉伸强度达45 MPa,耐水解寿命从1 000 h提升至6 000 h,已应用于宇通燃料电池客车。随着燃料电池车技术不断发展和推广,全氟磺酸树脂的应用也将会有一定的增长。

2.3 智能电子系统

新能源汽车作为5G移动智能终端,对高频低介材料的需求量不断增加。可熔聚四氟乙烯(PFA)、FEP、PTFE等氟聚合物因其优异的电气性能,如低介电常数(1 MHz下介电常数低至2.1),被广泛用于汽车PCB板(印刷电路板)、数据传输线、电子线等。在高频信号传输过程中,这些氟聚合物能够减少信号的衰减和失真,保证数据的高速、准确传输,满足新能源汽车智能化、网联化发展对电子系统的需求。特斯拉Model 3的高速数据总线全部采用PTFE绝缘双绞线,因为高纯度PTFE($w(\text{金属离子}) < 0.000 1\%$)用于高频PCB基材,介电损耗角正切 $< 0.000 2$ (1 MHz),在ADAS系统中可确保雷达信号的精准处理。松下公司开发的FEP基覆铜板,厚度公差 $\pm 2\%$,适配10层以上高密度

电路板,已应用于特斯拉HW5.0自动驾驶域控制器的20层板,在-40~85 ℃环境下的信号完整性保持率>98%,满足车规级AEC-Q200标准。相比PTFE基覆铜板,松下FEP基材料成本降低了30%,且加工效率提升50%(成型周期从4.0 h缩短至2.5 h),在高频高速领域,其性能已接近罗杰斯4350B(介电常数为3.48),但价格仅为后者的60%,加速了国产替代进程。

3 氟聚合物在汽车领域的创新现状

在氟聚合物创新方面,美国科慕公司、日本大金工业株式会社、比利时索尔维集团等跨国公司一直走在前列。这些公司投入大量研发资金,不断研发新型氟聚合物材料和应用技术。例如,科慕公司的Teflon[™]氟聚合物产品包含多种系列,其FEP粉末涂料(牌号620X)在锂电池核心材料生产设备的喷涂施工中表现出色,具有不黏性、耐磨、自润滑性和耐高压击穿等卓越特性,且磁性物质含量极低。日本大金工业株式会社在氟橡胶和氟树脂的研发和生产上具有深厚的技术积累,不断推出高氟含量和高性能的G-558和G-902($w(\text{F}) 71\%$)等牌号产品,在250 ℃下压缩永久变形 $< 30\%$ (1 000 h),满足国VI发动机涡轮增压后的严苛密封需求。此外,针对下一代固态电池的耐高温需求,日本大金工业株式会社正在开发耐250 ℃以上的PFA复合材料。通过引入全氟醚侧基,其长期使用温度可从200 ℃提升至220 ℃,该材料在硫化物电解质环境中表现出优异的化学稳定性,可耐受锂枝晶生长带来的机械应力。比利时索尔维集团在PVDF等氟聚合物领域也有重要的技术创新和专利布局,推出创新性Solef[®]5130,PVDF质量分数 $> 99.9\%$, $w(\text{Cl}^-) < 0.000 5\%$,用作电池黏结剂与隔膜涂层,电池月自放电率 $< 5\%$,优于普通PVDF的10%,对于增强电池的电气性能、延长电池寿命、提高电池安全性至关重要。

相比之下,虽然国内企业在含氟聚合物的产能上有了较大发展,但在高端产品研发、技术创新能力和产品质量稳定性等方面与国际先进水平仍存在差距。2024年国内PVDF产能超过25万t,但高纯度电池级产品仅15万t,PTFE产能30万t,中高端悬浮树脂(用于电子级)占比 $< 30\%$,日本大金工业株式会社、美国科慕公司占据高端市场80%份额^[15]。合成工艺,国际企业采用超临界聚合(如科慕的PTFE聚合转化率 $> 98\%$),国内传统悬浮聚合转化率95%,导致分子量分布宽(国内 > 2.5 ,国际 < 2.0);产品稳定性,国产FKM的 $w(\text{F})$ 波动为 $\pm 2\%$,

国际产品 $w(F)$ 控制在 $\pm 0.5\%$, 影响耐温一致性, PVDF 的残留单体 $w(VDF) > 0.005\%$, 国际 $< 0.001\%$, 导致电池内阻升高; 应用技术, 国外企业提供“材料-工艺-检测”整体方案, 如日本大金工业株式会社为丰田汽车公司定制的发动机密封件设计软件, 国内企业多停留在材料供应层面。

4 展望

含氟聚合物凭借独特性能成为汽车工业升级的关键材料, 在传统燃油车的密封、燃油系统, 以及新能源汽车的电池、电子部件中发挥不可替代的作用。未来, 随着全球能源结构转型, “双碳”目标推进和汽车电动化、智能化加速, 含氟聚合物将在材料性能、绿色制造、新兴应用等领域迎来创新机遇, 国内企业需加大研发投入, 构建全产业链竞争力, 助力我国从氟化工大国向强国迈进。

[参考文献]

- [1] 江建安. 氟树脂及其应用[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [2] 孟庆文,余国军,黄军,等.含氟聚合物在半导体行业中的应用[J].化工生产与技术,2022,28(4):17-19.
MENG Q W, YU G J, HUANG J, et al. Applications of Fluoropolymers in the Semiconductor Industry [J]. Chemical Production and Technology, 2022, 28(4): 17-19.
- [3] 王学军.含氟聚合物技术与市场需求分析[J].有机氟工业,2019(3):36-42.
WANG X J. Analysis on Technology and Market of Fluoropolymers [J]. Organo-Fluorine Industry, 2019(3): 36-42.
- [4] 郭丰镐. 聚四氟乙烯的摩擦磨损特性[J].机械工程材料, 1981(4):5-11.
- [5] 宋荣昊,杨睿,王辰,等.高氟含量氟橡胶在航空润滑油中的老化行为[J].合成橡胶工业,2024,47(2):141-146.
SONG R H, YANG R, WANG C, et al. Aging behavior of fluororubber with high fluorine content in aviation lubricating oil [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2024, 47(2): 141-146.
- [6] 刘建国. 质子交换膜燃料电池关键材料与技术[M].北京:化学工业出版社, 2021.
- [7] 蔡树铭.氟橡胶在汽车工业中的应用[J].中国橡胶,2006(4):24-26.
- [8] 蔡树铭,梁星宇,蔡洪志.氟橡胶应用技术[M].北京:化学工业出版社, 2009.
- [9] 屈盛官,高永忠,杨圣东.聚四氟乙烯油封在车辆上的应用研究[J].工程塑料应用,2001(6):20-22.
- [10] 侯波,薛俊芳,赵玉明,等.不同橡胶材料和结构的汽车燃油胶管渗透率研究[J].世界橡胶工业,2016,43(11):35-39.
- [11] 天津鹏翎集团股份有限公司.一种新型低渗透橡胶和树脂组合燃油管路及燃油系统:CN207609883U[P]. 2018-07-13.
- [12] 三樱工业株式会社.多层树脂管:CN1786539[P]. 2006-06-14.
- [13] LI Y S, YUAN W H, HU Z, et al. Constructing PVDF-Based Polymer Electrolyte for Lithium Metal Batteries by Polymer-Induced Phase Structure Adjustment Strategy [J]. Advanced Functional Materials, 2025: 2424763.
- [14] 张永明,唐军柯,袁望章.燃料电池全氟磺酸质子交换膜研究进展[J].膜科学与技术,2011,31(3):76-85.
ZHANG Y M, TANG J K, YUAN W Z. Progress of fuel cell perfluorosulfonic acid membrane [J]. Membrane Science and Technology, 2011, 31(3): 76-85.
- [15] 中国氟硅有机材料工业协会. 2024年中国氟聚合物行业发展报告[R]. 北京:中国氟硅有机材料工业协会,2024.
- [18] 徐建国,周贞锋,应盛荣.我国氟化钠生产技术的现状及发展趋势[J].化工生产与技术,2011,18(3):18-21.
XU J G, ZHOU Z F, YING S R. Present condition and development trends of production technology of sodium fluoride in our Country [J]. Chemical Production and Technology, 2011, 18(3): 18-21.
- [19] 刁静严.动力电池“退役潮”将至,如何安全高效回收[N].中国城市报,2025-03-31(010).
- [20] 杜遇婷.一种光伏玻璃用的增透膜及其制备方法和应用:CN112147722A[P].2020-12-29.
- [21] 龙潇,敖凡,孙友,等.多组分液体无碱速凝剂的性能研究[J].广东化工,2022,49(2):50-52.
LONG X, AO F, SUN Y, et al. Study on the properties of multicomponent alkali-free accelerator [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(2): 50-52.
- [22] 李太琴,温思成,杨瑞甫,等.一种高纯氟化钠的制备方法:CN117361574B[P].2024-08-30.
- [23] 龚福根,刘毓斌,张玉俊.一种工业级碳酸钠直接制备电池级氟化钠的方法:CN117361573B[P].2024-06-14.
- [24] 李权,丁勇,罗艳,等.氟化钠吸附和解吸氟化氢工艺响应面优化[J].化学工程,2024,52(6):33-39.
- LI Q, DING Y, LUO Y, et al. Optimization of response surface for adsorption and desorption of hydrogen fluoride by sodium fluoride [J]. Chemical Engineering (China), 2024, 52(6): 33-39.
- [25] 柳彤,王少波,董露荣.氟化钠吸附氟化氢最佳工艺参数测定[J].舰船科学技术,2009,31(2):109-111.
LIU T, WANG S B, DONG L R. The optimal technique parameter mensuration of sodium fluoride adsorb hydrogen fluoride [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 109-111.
- [26] 丁勇,李权,高超,等.氟气纯化用氟化钠吸附剂制备及其吸附性能研究[J].山西化工,2024,44(4):17-20.
DING Y, LI Q, GAO C, et al. Preparation and Adsorption Performance of Sodium Fluoride Adsorbent for Fluorine Gas Purification [J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(4): 17-20.
- [27] 李向如,李嘉磊,陈施华,等.改性氟化钠专用吸附剂、制备及应用:CN118302241B[P].2024-10-25.
- [28] 韩莉.氟化钠晶体电注入着色及色心产生与转化机理[D].天津:天津大学,2005.
HAN L. The mechanism of coloring and color center generation and transformation of sodium fluoride crystal by electro injection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

(上接第73页)