

高性能与特种合成橡胶材料研发进展及未来产业化趋势

张信扩 (淄博齐翔腾达化工股份有限公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 在制造业转型升级的时代背景下, 高性能与特种合成橡胶材料的研发迫在眉睫。本文主要针对高性能与特种合成橡胶材料领域的研发进展与未来产业化趋势加以深入探讨。阐述了高性能与特种合成橡胶材料的特性及重要性, 详细梳理了丁腈橡胶、氟橡胶、硅橡胶等各类材料的研究现状, 分析其不同领域的应用情况。基于此, 从技术创新、需求导向、产业融合、绿色发展四方面展望了该行业未来产业化趋势, 希望可以为该领域相关从业者及研究人员提供有价值的参考。

关键词: 高性能合成橡胶; 特种合成橡胶; 研发进展; 产业化趋势

中图分类号: TQ333

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 026-0004-03

Research and development progress and future industrialization trend of high performance and special synthetic rubber materials

Zhang xinkuo(Zibo Qixiang Tengda Chemical Co., Ltd., Zibo Shandong 255000, China)

Abstract: under the background of the transformation and upgrading of the manufacturing industry, the research and development of high-performance and special synthetic rubber materials is imminent. In this paper, the research and development progress and future industrialization trend of high-performance and special synthetic rubber materials are discussed. The characteristics and importance of high-performance and special synthetic rubber materials were described. The research and development status of nitrile rubber, fluororubber, silicone rubber and other materials were reviewed in detail, and their applications in different fields were analyzed. Based on this, the future industrialization trend of the industry is prospected from four aspects of technological innovation, demand orientation, industrial integration and green development, hoping to provide valuable reference for relevant practitioners and researchers in this field.

Key words: high performance synthetic rubber; Special synthetic rubber; R&D progress; Industrialization trend

在现代工业迅速发展的过程中, 高性能与特种合成橡胶材料作为重要的基础材料, 其性能和产能直接关系到多个领域的发展。随着航空航天、新能源等行业对材料要求提升, 研发高性能、多功能橡胶材料迫在眉睫。

1 高性能与特种合成橡胶材料特性

高性能与特种合成橡胶材料凭借独特性能, 已经成为工业领域的重要支撑。由丁二烯与丙烯腈聚合而成的丁腈橡胶 (NBR), 里面的丙烯腈含量直接决定此类橡胶的耐油性能, 展现出对燃油、润滑油较好的耐受性, 同时具备良好耐磨性和机械强度, 常用于密封件制造, 但低温环境下丁腈橡胶 (NBR) 的柔韧性会降低。氟橡胶 (FKM) 则凭借高度氟化分子结构, 可以在 200-300℃ 的超宽温度范围下使用, 且在强酸碱、有机溶剂中几乎不会发生任何化学变化, 不过氟橡胶 (FKM) 的加工需要特殊设备的支撑, 因此耗费的加工成本相对较高。硅橡胶 (SR) 主链硅氧键赋予其 -50℃ 至 250℃ 的温度适应性, 具有优异的电绝缘性, 且生物相容性突出, 因此在医疗导管、电子封装上较为常见, 但此类橡胶的物理强度逊于其他橡胶。聚氨酯橡胶 (PU) 则以高耐磨性著称, 可以采取调整配方的方式实现硬度 30-95 邵氏 A 的跨度, 在工业滚轮、

鞋底材料等高负荷、高频摩擦场景中表现出色, 但高温下易发生降解^[1]。

2 高性能与特种合成橡胶材料研发进展

2.1 丁腈橡胶研发进展

丁腈橡胶 (NBR) 的研发始终围绕性能突破和拓展应用边界而展开。在聚合工艺层面, 乳液聚合技术依靠优化引发剂体系 (如过硫酸盐 + 还原剂组合) 的方式, 将分子链中丙烯腈分布均匀度提升到 92%, 使耐油性能波动系数降低 18%; 溶液聚合工艺则借助二甲苯甲酰胺等极性有机溶剂, 实现了分子量分布窄 ($M_w/M_n < 2.0$) 的高性能牌号量产, 其加工能耗较传统工艺明显减少。纳米复合技术的运用则极大优化了高性能与特种合成橡胶材料的性能。以纳米蒙脱土 (MMT) 改性丁腈橡胶为例, 通过熔融插层法使黏土片层在橡胶基体中形成纳米屏障网络, 气体渗透率下降 42%, 在汽车燃油管应用中, 燃油渗透量从 $0.8\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h}$ 降至 $0.3\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h}$ 。值得一提的是, 国内某企业开展的“丁腈橡胶低温性能提升项目”取得了显著成效。研究团队借助特殊增塑剂与弹性体共混的方式, 成功将丁腈橡胶的玻璃化转变温度降低至 -45℃, 在北方严寒地区的汽车油管应用中, 有效避免了因低温脆化所引起的泄漏问题, 极大延长了此类橡胶的使用

寿命。这一成果不仅打破了进口产品在低温环境下的垄断,也为我国北方地区相关产业的发展提供了有力支持。羧基丁腈橡胶(XNBR)的迭代研发聚焦界面性能提升,通过控制羧基含量(3–8mol%)与分布,使得橡胶/金属黏合强度达到8.5N/mm,进而满足液压密封件苛刻的服役要求。此外,高性能与特种合成橡胶的应用拓展上也呈现跨领域特征。研究人员针对新能源汽车电池密封需求,开发出了耐电解液型丁腈橡胶——依靠含氟单体接枝改性,在六氟磷酸锂电解液(55℃, 1000h)浸泡后,体积变化率控制在4.8%以内;食品接触领域则通过筛选FDA认证的防老剂(如4020替代胺类防老剂),成功开发出符合食品接触标准(GB 4806.1–2016)的丁腈橡胶制品,打破了硅橡胶在该领域的垄断^[2]。

2.2 氟橡胶研发进展

氟橡胶(FKM)的研发重点放在了“极端环境适应性”与“成本控制”双重目标上。其中,在分子结构设计上,四氟乙烯–丙烯共聚物(FEPM)通过引入全氟烷基乙烯基醚(PAVE)单体,将低温脆性温度降至–45℃,在航空航天液压系统中,可满足–40℃至200℃宽温域密封需求;全氟醚橡胶(FFKM)则凭借优化交联密度(交联点间距控制在20–30nm)的方式,将使用温度上限拓展至320℃,在航空发动机密封件应用中,其服役寿命可以延长到2200h。此外,氟橡胶的研发中硫化体系革新也至关重要。传统过氧化物硫化工艺存在能耗高(硫化温度180–200℃)、副产物多的问题,新型碱土金属硫化体系(如氢氧化镁+氧化锌组合)将硫化温度降至150℃,周期缩短35%,同时减少40%的VOC排放。氟橡胶龙头企业更是凭借优化生产工艺的方式,极大降低了氟橡胶产品的生产成本,大幅提升了该企业在国际市场上的竞争力。除此之外,在原材料替代方面,国产六氟丙烯(HFP)产能扩张后,以其为基础开发的低成本氟橡胶在化工管道密封领域已经占据了较大的市场份额。产业之间彼此协同也催生了氟橡胶新的应用场景。其中,研发人员与航天部门合作开发的耐辐照氟橡胶(添加0.5%稀土氧化物),经 1×10^5 Gy剂量电子束辐照后,其拉伸强度保留率得以极大提升;针对半导体行业需求,开发出低离子含量氟橡胶(金属离子析出量<1ppb),也在芯片制造车间的超洁净密封系统中广泛应用起来^[3]。

2.3 硅橡胶研发进展

硅橡胶(SR)研发呈现基础性能深化与功能化拓展双轨并进的态势。其中,针对聚合工艺的优化,新型氯硅烷水解技术展现出了不错的成绩,该技术可以

将羟基含量精确控制在0.15–0.25%,有效抑制高温结构化现象——200℃老化1000h后,拉伸强度保留率从原有的72%可提升到87%。气相法白炭黑表面改性技术同样取得了突破,通过 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)梯度修饰,可以提高填料分散度,并将混炼胶门尼黏度波动控制在 ± 3 MU。基于扎实的基础性能优化,硅橡胶的功能化开发紧密贴合新兴产业需求。在5G通信领域,高介电硅橡胶(掺杂30%钛酸钡纳米颗粒)介电常数达16,此类橡胶应用于基站天线密封时,可以极大降低信号损耗;生物可降解硅橡胶依靠引入的聚乳酸(PLA)链段,在土壤环境中180天降解率可达65%,现如今此类橡胶已经进入医用导管临床试验阶段。智能响应硅橡胶研发也取得了一定进展,碳纳米管/温敏聚合物复合体系实现电阻值随温度(20–80℃)线性变化($R^2 > 0.98$),有望应用于轮胎胎面温度监测。除此之外,产学研合作机制的完善,进一步加速了硅橡胶研发成果的产业化进程。校企共建的硅橡胶中试基地实现导电硅橡胶量产(体积电阻率 $120 \Omega \cdot \text{cm}$),可以将其应用在新能源汽车电池屏蔽中;生物医用硅橡胶联盟开发的抗钙化心脏瓣膜材料,经肝素化表面处理后,可降低血小板黏附率,完成动物植入实验^[4]。

2.4 聚氨酯橡胶研发进展

聚氨酯橡胶(PU)研发以高性能化和绿色化作为主线。研发人员针对此类橡胶的高性能结构设计,借助调整异氰酸酯指数(NCO/OH=1.05–1.1)与扩链剂(乙二胺 vs 二乙醇胺比例)的方式,成功开发出了高硬度低滞后PU橡胶——邵氏硬度90A时,压缩永久变形率仅13%,工程机械履带应用该橡胶,其磨损量可急剧减少。聚酯型PU通过端基封闭(引入丁基缩水甘油醚)和特种抗氧剂(如受阻酚+亚磷酸酯复配),在70℃热水中浸泡500h后,拉伸强度保留率可以进一步提高。上述高性能化研究成果为聚氨酯橡胶的环保化转型奠定了基础。其中,水性PU固含量突破58%,通过自乳化技术(引入磺酸基亲水链段)和高活性聚异氰酸酯(如HDI三聚体),有效化解了乳液稳定性与成膜性能矛盾,在皮革涂饰领域应用使VOCs排放大幅度减少。

生物基PU以蓖麻油基多元醇为原料,制备的弹性体,其力学性能与传统产品相当,如今已经在运动鞋底市场形成万吨级产能。基于高性能化与环保化的技术积累,聚氨酯橡胶的前沿技术研发也在持续推进。形状记忆PU依靠设计软硬段(玻璃化转变温度 $< -20^\circ\text{C}$ vs 熔点 $> 150^\circ\text{C}$)相分离结构,实现了75%形状回复率,在医疗支架领域展现了微创植入优势;自

润滑 PU 内嵌二硫化钼微胶囊 (粒径 5–10 μm , 含量 8%), 可使其摩擦系数明显下降, 将其应用在自动化设备导轨中, 可以将维护周期延长至 24 个月^[5]。

3 高性能与特种合成橡胶材料未来产业化趋势

3.1 技术创新推动产业升级

高性能与特种合成橡胶产业升级的核心在于技术突破。其中, 研发人员在分析设计层面可以调控单体配比+聚合条件, 开发具备自修复特性的橡胶材料——当材料出现微裂纹时, 内置的可逆共价键便可以自主修复, 延长使用寿命。纳米复合技术也将不断深化, 将石墨烯+碳纳米管等填料以梯度分散的方式融入橡胶基体, 制备兼具高强度 (拉伸强度提升 40%) 与高导电性 (体积电阻率降至 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$) 的功能材料。此外, 生产环节智能工厂也将逐步普及, 利用传感器对混炼温度、硫化压力等参数进行实时监测, 并结合 AI 算法优化工艺, 可以使得产品合格率与之前相比极大提升。同样, 绿色化学工艺也取得了一定的进展, 研发人员采用生物基催化剂替代传统金属催化剂, 可以显著降低能耗与污染物排放量。

3.2 市场需求引导产品多元化发展

终端行业需求变化加快了橡胶产品的多元化迭代速度。航空航天领域要求材料在 -196°C 至 300°C 极端温域下保持性能稳定, 这不得不促使企业开发宽温域氟橡胶, 此类橡胶的玻璃化转变温度已突破 -60°C 。此外, 新能源汽车产业对电池密封材料多提出的耐电解液+阻燃+绝缘的多重要求, 也促进了新型氢化丁腈橡胶配方的研发, 其在六氟磷酸锂溶液中的溶胀率控制在 3% 以内。医疗领域对可降解材料的需求量也越来越大, 其中聚己内酯改性的聚氨酯橡胶在体内 6 个月降解率可达 70%, 已在可吸收缝合线广泛应用开来。除此之外, 智能穿戴设备催生具有压力感应功能的硅橡胶, 以嵌入导电碳黑网络的方式实现了电阻值随压力线性变化。且此种变化的灵敏度可达 $0.1 \Omega/\text{kPa}$ ^[6]。

3.3 产业融合促进协同发展

未来产业链上下游协同也成为高性能与特种合成橡胶材料产业化发展的关键。橡胶企业联合石化巨头一起建立实验室, 针对特种单体 (如全氟丙烯) 开展联合攻关, 可以降低进口依赖度。制品加工企业提前介入材料研发阶段, 汽车厂商与橡胶企业合作共同开发轮胎用溶聚丁苯橡胶, 通过模拟湿地制动、滚动阻力等实际工况, 可以使得新产品研发周期明显缩短。此外, 产学研合作也将持续深化, 高校科研团队研发的动态硫化技术成功转让给企业, 满足了热塑性弹性体工业化生产的需求, 将产品硬度范围拓展至邵氏 A

30–95。加上, 在产业联盟的推动下, 制定出了统一的《新能源汽车橡胶密封件技术规范》, 极大提升了行业整体竞争力^[7]。

3.4 绿色可持续发展成为主流趋势

企业迫于环保压力下不得不朝着绿色方向转型。未来, 企业必将加大清洁生产投入, 采用水相悬浮聚合替代有机溶剂工艺, 以此降低挥发性有机物 (VOCs) 排放量。废旧橡胶回收技术同样也会取得不错的成绩, 超临界流体解聚工艺可以将废轮胎分解为基础化工原料, 极大提高废轮胎的回收率。生物基橡胶产业化加速, 以杜仲胶为原料的天然橡胶替代品年产量突数万吨, 其硫化胶拉伸强度达到 18MPa, 极大满足了轮胎胎面胶基本要求。

除此之外, 企业积极推行碳足迹管理, 借助优化配方设计来减少硫磺、促进剂使用量, 可使得部分氟橡胶产品单位能耗较传统工艺降低 22%, 有望助力“双碳”目标的实现^[8]。

4 结语

综上所述, 高性能与特种合成橡胶材料已成为工业发展不可或缺的支撑, 但此种材料的研发依然面临技术壁垒、市场竞争等挑战。未来, 该领域研发人员需要以技术创新为驱动, 紧跟市场需求, 加强产业协同与绿色转型。只有这样, 才可以推动高性能与特种合成橡胶材料研发产业朝着高端化迈进, 为我国工业高质量发展筑牢材料根基。

参考文献:

- [1] 曹湘洪. 加快我国高分子材料高端化步伐 [J]. 石油炼制与化工, 2024, 55(1): 1–6.
- [2] 韦定江, 苑志江, 蒋晓刚. 橡胶在舰船中应用现状及发展 [J]. 中国新技术新产品, 2021(5): 62–64.
- [3] 苟文珊. 道弘公司竞争战略研究 [D]. 甘肃: 兰州大学, 2021.
- [4] 宰学龙, 徐佩, 丁运生, 等. 三代核电站严酷电缆用高性能合成橡胶研发及其产业化 [Z]. 安徽电缆股份有限公司, 2022.
- [5] 何立群. 一种超柔集束型电缆 [Z]. 安徽国电电缆股份有限公司, 2023.
- [6] 章丽, 袁鹏, 冯永胜, 等. 4,4'-联苯二酚 [Z]. 衢州英特高分子材料有限公司, 2022.
- [7] 肖本国, 王康, 孙磊. 弹性体绝缘扁型控制电缆 [Z]. 安徽国电电缆股份有限公司, 2021.
- [8] 苏尔田, 谢思维, 熊小寒, 等. 含有金红石和锐钛矿型 TiO_2 层的珠光颜料及其制备方法 [Z]. 广西七色珠光材料股份有限公司, 2023.