

电子氟化液对不同硫化体系三元乙丙橡胶性能的影响

马妍

(南京科技职业学院, 江苏 南京 210048)

摘要: 采用相容性试验研究了两种电子氟化液对不同硫化体系 EPDM 性能的影响。试验结果表明: 不同的电子氟化液对 EPDM 性能的影响不同, 其中电子氟化液 FC-72 因其更易渗透至橡胶内部, 对 EPDM 力学性能产生的影响相较于电子氟化液 FC-770 更为显著; 电子氟化液对 EPDM 性能的影响与其硫化体系密切相关, 两种电子氟化液对采用过氧化物硫化体系的 EPDM-2 力学性能影响较小, 而对采用硫磺硫化体系的 EPDM-1 影响较大; 过氧化物硫化体系的 EPDM-2 与两种电子氟化液的相容性更好。

关键词: 三元乙丙橡胶; 硫化体系; 电子氟化液; 相容性

中图分类号: TQ333.4

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)11-0040-03

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.11.009

随着人工智能、5G、物联网等新技术的飞速发展, 数据中心的数量与规模急剧增长, 单机柜功率密度不断攀升, 传统风冷技术已难以满足高热密度数据中心的散热需求^[1]。在此背景下, 液冷技术的兴起为高热密度数据中心带来了革新性的解决方案^[2]。液冷系统常用的介质类型多样, 包括去离子水、醇基溶液、氟碳化合物和矿物油等。其中电子氟化液作为一种无色、无味、不燃且低毒性的液体, 具有高介电强度、高热传导性、低表面张力以及宽广的工作温度范围等特性, 成为高端液冷及特殊应用领域的优选介质^[3]。在液冷系统中, 橡胶密封材料直接接触电子氟化液, 二者的相容性直接关系到系统的可实施性、维护成本和使用年限^[4]。然而, 目前很少有针对电子氟化液与橡胶材料相容性的研究报道。

本文选取分别适用于单相、双相液冷系统的电子氟化液 FC-770 和 FC-72 为研究对象, 通过相容性试验探究了两种电子氟化液对不同硫化体系的三元乙丙橡胶 (EPDM) 性能的影响, 旨在开发出与电子氟化液相容性优异的 EPDM 配方, 以期液冷系统用橡胶制品的开发提供帮助。

1 实验部分

1.1 主要原材料

EPDM, 牌号 4450S, 阿朗新科高性能弹性体

(常州) 有限公司; 电子氟化液, 牌号 FC-770、牌号 FC-72, 美国 3M 公司 (如表 1); 其他助剂均为橡胶工业常用市售品。

表 1 电子氟化液的理化特性

性能参数	FC-770	FC-72
平均相对分子质量	399	338
外观	无色透明	无色透明
沸点 / $^{\circ}\text{C}$	95	56
倾点 / $^{\circ}\text{C}$	-127	-90
蒸气压 /kPa	6.568	30.9
运动黏度 /($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	0.79	0.38
液体比热容 /($\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$)	1.038	1.1
液体导热率 /($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	0.063	0.057
表面张力 /($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)	14.8	10
密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.79×10^3	1.68×10^3
闪点	无	无

注: 数据来源于美国 3M 公司的产品说明书。

1.2 配方

硫磺硫化体系 EPDM-1 基本配方 (质量份): EPDM 4450S 100; 炭黑 N550 90; 石蜡油 25; 氧化锌 5; 硬脂酸 0.5; 4,4'-二(苯基异丙基)二苯胺 1; 硫磺 0.5; 4,4'-二硫化二吗啉 1.8; 二正丁基二硫代氨基甲酸锌 0.6。

过氧化物硫化体系 EPDM-2 基本配方 (质量份):

作者简介: 马妍 (1985-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事功能高分子材料的研究及应用工作。

基金项目: 南京科技职业学院科研北斗计划 (2.0 版) (人才类) 项目 (NJPI-RC-2023-05)。

EPDM 4450S 100；炭黑 N550 90；石蜡油 25；氧化锌 5；硬脂酸 0.5；4,4'-二（苯基异丙基）二苯胺 1；过氧化二异丙苯 4；三烯丙基异氰脲酸酯 2。

1.3 主要设备与仪器

XK-200 型开炼机，青岛宙斯智创机械科技有限公司产品；XLB-D 型平板硫化机，青岛汇才机械制造有限公司产品；Digi test II 型全功能弹性体硬度计，德商博锐仪器（上海）有限公司产品；GT-7017-EM 型高温老化箱和 AI-3000 型拉力试验机，高铁检测仪器（东莞）有限公司产品；XB-220A 型分析天平，金博仕（苏州）生物技术有限公司产品。

1.4 试样制备

首先将 EPDM 4450S 生胶加入开炼机进行塑炼，均匀包辊后依次加入防老剂、炭黑以及石蜡油等小料进行混炼，再分别按照配方加入硫化剂，调小辊距，打三角包薄通 6 次，混炼均匀后出片，停放 24 h。使用平板硫化机硫化试样，硫化条件为 160 °C /10 MPa× ($t_{90}+3$ min)，停放 16 h 后裁成性能测试所需要的试样。

1.5 性能测试

相容性试验按照美国保险实验室标准 UL-984 的高压釜法^[5]，在高压釜中装入电子氟化液，使试样完全浸入电子氟化液中；密封后将其置入 (90±2) °C 恒温箱中，保持 (70±2) h；室温冷却后打开容器，取出试样，擦干。邵尔 A 硬度按照 GB/T 531.1—2008 进行测试；拉伸性能采用 I 型哑铃状试样，按照 GB/T 528—2009 进行测试；体积变化和质量变化采用 II 型试样，按照 GB/T 1690—2010 进行测试。

2 结果与讨论

2.1 体积变化与质量变化

电子氟化液 FC-770 和 FC-72，作为 C5-18 全氟烷混合物，因其氟原子与碳原子之间显著的电负性差异，赋予了 C-F 键强大的极性，使电子氟化液表现出极高的化学惰性，不易参与化学反应。这种特性决定了电子氟化液与 EPDM 的相容性主要受橡胶对电子氟化液的吸收程度及内部配合剂析出情况的影响。表 2 是 EPDM 试验后的体积与质量变化率。由表 2 可知，EPDM-1 在电子氟化液 FC-770 中的体积与质量变化率均为负值，表明该橡胶对电子氟化液 FC-770 的吸收量小于内部配合剂的析出量。相比之下，EPDM-1 在电子氟化液 FC-72 中的体积与质量变化率为正值，

同时 EPDM-2 在两种电子氟化液中的体积与质量变化率均为正值，且在电子氟化液 FC-72 中的变化更为显著。这归因于电子氟化液 FC-72 的平均相对分子质量较电子氟化液 FC-770 小，且在实验温度下呈气态，使得其分子更易渗透至橡胶内部，导致橡胶体积和质量增加的幅度较大，因此橡胶在电子氟化液 FC-72 中更容易发生溶胀。尽管如此，EPDM-1 和 EPDM-2 在两种电子氟化液中的体积与质量变化均保持在参考指标内，可以满足使用要求。

表 2 电子氟化液对 EPDM 体积与质量的影响

试验橡胶	试验项目	参考指标	试验介质型号	
			FC-770	FC-72
EPDM-1	体积变化率 /%	-5~+5	-1.07	+0.61
	质量变化率 /%	-5~+5	-0.51	+0.25
EPDM-2	体积变化率 /%	-5~+5	+0.42	+1.02
	质量变化率 /%	-5~+5	+0.27	+1.19

2.2 硬度变化

电子氟化液对 EPDM 硬度的影响如表 3 所示。从表 3 可以看出，EPDM-1 和 EPDM-2 这两种橡胶在两种电子氟化液中的硬度变化均较小。其中，EPDM-1 在电子氟化液 FC-770 中的硬度增加稍大，增大了 1.5 度，这主要是由于该橡胶配合剂的析出量超过了其对电子氟化液 FC-770 的吸收量，导致橡胶体积发生收缩。由此可知，这两种电子氟化液对不同硫化体系 EPDM 硬度的影响相对较小。

表 3 电子氟化液对 EPDM 硬度的影响

试验橡胶	试验项目	参考指标	试验介质型号	
			FC-770	FC-72
EPDM-1	邵尔 A 硬度变化 / 度	-5~+5	+1.5	-0.7
EPDM-2	邵尔 A 硬度变化 / 度	-5~+5	+0.3	-1.0

2.3 力学性能变化

试验后 EPDM 力学性能的变化如表 4 所示。从表 4 可以看出，两种电子氟化液对 EPDM-2 的力学性能影响相对较小，而对 EPDM-1 的力学性能影响较为明显。具体地，EPDM-1 在与电子氟化液 FC-770 和 FC-72 进行试验后，其拉伸伸长率分别下降了 21.66% 和 24.82%，这一变化超出了指标下限，因此不能满足要求。分析原因发现，这主要与橡胶的硫化体系密切相关。EPDM-2 采用的是过氧化物硫化体系，其硫化胶的交联键为 C-C 键，该键的键能高于 EPDM-1 所采用的硫磺硫化体系中的单硫键和多硫键等^[6]，因此 EPDM-2 具有更优的耐高温性能，力学性能变化也相对较小。此外，对比两种电子氟化液的影响，发现电子氟化液 FC-72 对两种橡胶的力学性能影

响要大于电子氟化液 FC-770。这可能是由于在试验温度下, FC-72 呈现气态, 对橡胶的侵蚀作用更为显著。

表 4 电子氟化液对 EPDM 力学性能的影响

试验橡胶	试验项目	参考指标	试验介质型号	
			FC-770	FC-72
EPDM-1	拉伸强度变化率 / %	-10~+10	-7.71	-8.73
	拉断伸长率变化率 / %	-20~+20	-21.66	-24.82
EPDM-2	拉伸强度变化率 / %	-10~+10	-2.36	-7.84
	拉断伸长率变化率 / %	-20~+20	-6.92	-9.09

2.4 试验后的外观检查

表 5 是电子氟化液与橡胶相容性试验后的外观检查结果。由表 5 可知, 所有橡胶试样在试验后均保持完整且富有弹性。然而, 值得注意的是, 试验后电子氟化液的颜色不同, EPDM-1 对应的电子氟化液 FC-770 由无色变为了黄色。这一颜色变化与上述体积和质量变化的分析结果相吻合, 由于 EPDM-1 内部配合剂的大量析出, 导致了电子氟化液 FC-770 的颜色加深。

表 5 试验后电子氟化液与橡胶试样的外观检查

试验介质型号	EPDM-1		EPDM-2	
	介质	试样	介质	试样
FC-770	黄色透明、无杂质	完整、有弹性	无色透明、无杂质	完整、有弹性
FC-72	无色透明、无杂质	完整、有弹性	无色透明、无杂质	完整、有弹性

3 结论

(1)不同的电子氟化液对 EPDM 性能的影响不同, 其中电子氟化液 FC-72 因其更易渗透至橡胶内部, 对 EPDM 力学性能产生的影响相较于电子氟化液 FC-770 更为显著。

(2) 电子氟化液对 EPDM 性能的影响与其硫化体系密切相关, 两种电子氟化液对采用过氧化物硫化体系的 EPDM-2 力学性能影响较小, 而对采用硫磺硫化体系的 EPDM-1 影响较大。

(3) 相较于硫磺硫化体系的 EPDM-1, 过氧化物硫化体系的 EPDM-2 与两种电子氟化液的相容性更好。

参考文献：

[1] 中国信息通信研究院. 数据中心白皮书(2022 年) [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2022.

[2] 齐文亮, 赵亮, 王婉人, 等. 高热流密度电子设备液冷技术研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2022,22(11):4 261-4 270.

[3] 张呈平, 郭 勤, 贾晓卿, 等. 数据中心用浸没式冷却液的研究进展 [J]. 精细化工, 2022,39(11):2 184-2 195.

[4] 严昱昊, 叶恭然, 姚希栋. 适用于相变浸没式液冷服务器系统的电子氟化液的材料相容性研究 [J]. 制冷与空调, 2023,23(10):70-79.

[5] UL-984. Hermetic Refrigerant Motor-Compressors[S]. US:1996:45-49.

[6] 公维颖, 张勇, 邓涛. 交联网络对 EPDM/POE 共混胶耐老化及耐高温性能的影响 [J]. 橡塑技术与装备, 2023,49(7):42-47.

The influence of electronic fluorinated fluid on the properties of ethylene-propylene-diene monomer rubber with different vulcanization systems

Ma Yan

(Nanjing Polytechnic Institute, Nanjing 210048, Jiangsu, China)

Abstract: Compatibility tests were conducted to investigate the effects of two electronic fluorinated fluids on the properties of different vulcanization systems of EPDM. The test results showed that different electronic fluorinated fluids had varying impacts on the properties of EPDM. Among them, electronic fluorinated fluid FC-72 had a more significant effect on the mechanical properties of EPDM compared to electronic fluorinated fluid FC-770, due to its easier penetration into the rubber interior. The impact of electronic fluorinated fluids on the properties of EPDM was closely related to its vulcanization system. Both electronic fluorinated fluids had a smaller impact on the mechanical properties of EPDM-2, which was vulcanized using a peroxide system, but had a greater impact on EPDM-1, which was vulcanized using a sulfur vulcanization system. EPDM-2, which was vulcanized using a peroxide system, had better compatibility with both electronic fluorinated fluids.

Key words: ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber; vulcanization system; electronic fluorinated fluid; compatibility

(R-03)