

辐照乙烯-四氟乙烯共聚物的热老化性能

曹丹¹ 王长进¹ 史丛丛² 李建喜^{1,2}

¹(中广核三角洲(太仓)检测技术有限公司 苏州 215400)

²(非金属材料寿命评价与管理技术实验室 苏州 215400)

摘要 对吸收剂量为60 kGy、120 kGy和180 kGy的乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)样品进行270 °C热老化处理,通过残炭率、热延伸、拉伸性能、体积电阻率和傅里叶变换红外光谱(FTIR)对热老化不同时间的样品进行测试和表征。结果表明:随着吸收剂量的增大,样品残炭率逐渐增大,热延伸逐渐减小,断裂拉伸应变呈现下降趋势,吸收剂量为120 kGy时,材料交联度最高;随着热老化时间延长,样品的拉伸强度和断裂拉伸应变均呈下降趋势,体积电阻率也呈下降趋势,在吸收剂量为120 kGy时ETFE体积电阻率最高,绝缘性能最优;FTIR表明辐射交联ETFE材料的非晶组分随热老化时间延长而先增加后降低。

关键词 乙烯-四氟乙烯共聚物,辐射交联,热老化

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.040202

Thermal aging properties of irradiated ethylene-tetrafluoroethylene copolymers

CAO Dan¹ WANG Changjin¹ SHI Congcong² LI Jianxi^{1,2}

¹(CGN-DELTA (Taicang) Testing Technology Co., Ltd., Suzhou 215400, China)

²(Life Evaluation and Management Technology Laboratory of Non-Metallic Materials, Suzhou 215400, China)

ABSTRACT Ethylene-tetrafluoroethylene copolymers (ETFE) were aged at various absorbed doses (60 kGy, 120 kGy, and 180 kGy), and then, they were estimated and characterized by carbon residual rate, tensile test, thermal elongation test, volume resistivity analysis, and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. The results showed that the carbon residual rate of these aged samples increased with the absorbed dose while the thermal elongation decreased. With increasing absorbed dose and aging time, the tensile properties of the aged ETFE copolymer samples degraded, which could be attributed to chain breakage. Furthermore, the formation of crosslinking networks led to a change in the volume resistivity of the aged samples. The aging sample with an absorbed dose of 120 kGy showed the highest value and the best insulation performance. In addition, the FTIR results indicated that with increasing aging time, the amorphous structure of the aged samples first increased and then decreased.

KEYWORDS Ethylene-tetrafluoroethylene copolymer, Radiation crosslinking, Thermal aging

CLC TL13

随着我国航空航天事业的飞速发展, 航空航天设备部件的研发和应用引起了越来越多的关注。

航空用线缆是飞机内动力电源、控制信号以及数据信息传递的主要部件, 连接飞机内的电气和控

第一作者: 曹丹, 女, 1988年10月出生, 2014年于西安交通大学获硕士学位, 工程师

通信作者: 李建喜, E-mail: lijianxi@cgnam.cn

收稿日期: 初稿 2020-01-03; 修回 2020-03-20

First author: CAO Dan (female) was born in October 1988, and obtained her master's degree from Xi'an Jiaotong University in 2014, engineer

Corresponding author: LI Jianxi, E-mail: lijianxi@cgnam.cn

Received 03 January 2020; accepted 20 March 2020

制系统^[1-3]。

常规线缆材料, 只需满足机械性能、电气性能等要求即可, 但是为了满足国防科工等高尖端领域的需求, 航空用线缆还需要具备良好的耐辐射、耐磨、耐高温、耐环境性以及耐化学溶剂等特性^[4-5]。乙烯-四氟乙烯共聚物(Ethylene-tetrafluoroethylene copolymer, ETFE)具有优秀的耐化学腐蚀性能、热性能、电性能以及阻燃性能, 它是最重要的含氟聚合物之一, 在工业上有着广泛的应用。此外, 该材料制成的电线电缆还具有外径小、质量轻等优点, 已被作为特种线缆绝缘料广泛应用于航空航天和核电等领域^[6-8]。

然而, 高温的工作环境是ETFE材料面临的一个挑战, 需交联才能满足使用要求。为了提高ETFE的耐温等级, 常用的交联方法有化学交联和辐射交联等。其中, 化学交联相对较难, 辐射交联较为容易且效果显著。辐射交联中用途最广泛的是电子束辐射交联。在高速电子束辐照下, ETFE分子可形成稳定的交联结构, 因而具有优良的绝缘性能、介电性能和耐高温老化性能等。例如, 交联后的ETFE材料的长期工作温度可从150℃提高到200℃。目前, 世界上ETFE总产量的50%以上用于制造电线电缆, 辐射交联ETFE电线电缆是飞机安装线的主要线种之一, 我国已经实现了交联乙烯-四氟乙烯(Crosslinked ethylene-tetrafluoroethylene, XETFE)线缆的国产化。XETFE材料的研究与使用很大程度上推动了航空线缆领域的快速发展, 随着研究技术的不断深入和提高, 航空线缆对材料性能的要求也越来越高^[9]。运行良好的线缆可以保证飞机各个部件的安全稳定运行, 然而线缆在恶劣环境中长期服役时会受到温度、辐射、湿度、臭氧等环境因素长期的累积影响, 导致材料发生氧化、分解等化学反应, 以及变脆、变硬、龟裂等物理变化, 使其绝缘性和力学性能受到严重破坏。经过物理和化学老化的飞机部件对于航空航天产业具有巨大的安全隐患。材料的老化主要包括机械性能发生变化(断裂伸长率下降, 硬度上升), 绝缘性能下降, 分子链内部结构变化, 而机械性能的变化对电缆的失效影响最大^[10-14]。

老化和降解是聚合物材料在使用过程中面临的重大问题。目前, 已有大量报道对交联前后ETFE性能进行了详细对比, 然而, 对交联后的ETFE耐热老化性能的研究相对较少。在老化性能

研究方面, 当前普遍通过老化过程中材料参数变化来评价其耐热老化性能^[15]。为此, 本文采用剂量率为 2.0×10^5 Gy/h, 能量为1.2 MeV的电子束在空气氛围中对1 mm厚的ETFE样片进行辐射交联, 对不同剂量的交联ETFE在270℃下进行不同时间的热空气老化试验。从残炭率、热延伸、拉伸性能、体积电阻率和红外分析等方面, 对不同辐射交联剂量下的ETFE的热老化性能进行初步探索研究。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

ETFE, C88AXP, 日本旭硝子公司; 压片机, YST-100T型, 东莞市锡检测仪器有限公司; 老化烘箱, RL100, 常熟市环境试验设备有限公司; 电子万能试验机, ETM-A型, 深圳万测试验设备有限公司; 高阻计, ZC-36, 上海第六电表厂有限公司; 红外光谱仪, TENSOR II, 德国布鲁克公司; 1.5 MeV电子加速器, 中国科学院上海应用物理研究所; 马弗炉, SG-XL1700, 中国科学院上海光学精密机械研究所。

1.2 方法

首先, 将ETFE压制成1 mm厚的片材, 采用电子束对其进行辐照, 吸收剂量分别为60 kGy、120 kGy和180 kGy, 剂量率约为 2.0×10^5 Gy/h。其次, 对不同剂量交联后的ETFE在270℃条件下进行不同时间的热空气老化试验。

1.3 测试与表征

采用残炭率来表征ETFE的辐射交联程度, 称取一定质量样品在550℃的马弗炉中焙烧5 min, 氮气氛围保护。残炭率(Carbon residual rate, 以 R_{CR} 表示)按式(1)进行计算。

$$R_{CR} = \frac{W_1}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_0 为焙烧前样品的质量(g); W_1 为焙烧后样品的残留质量(g)。

热延伸测试按照GB/T 2951.21-2008《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第21部分: 弹性体混合料专用试验方法-耐臭氧试验-热延伸试验-浸矿物油试验》^[16]对不同吸收剂量样品进行热延伸测试, 测试温度280℃。

拉伸性能测试按照 GB/T 1040.3-2006《塑料拉伸性能的测定 第3部分：薄膜和薄片的试验条件》^[17] 对不同老化时间样品进行拉伸强度及断裂伸长率的测试，拉伸速率 50 mm/min。

体积电阻率测试根据 GB/T 1410-2006《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》^[18] 进行测试。

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪上, 采用反射法进行红外光谱测试, 分辨率 4 cm^{-1} , 扫描次数 32 次, 扫描范围 $1\,800\sim600\text{ cm}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 残炭率

由于氟塑料的特殊性, 很难通过测凝胶含量或其他方法来确定 ETFE 的交联度, 所以采用残炭率和热延伸来表征 ETFE 的辐射交联程度。实验中分别对未辐射交联样品以及吸收剂量为 60 kGy、120 kGy 和 180 kGy 的 XETFE 样品于 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下焙烧, 测试样品残炭率; 同样条件下样品在 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下测试热延伸性能, 实验数据如图 1 所示。

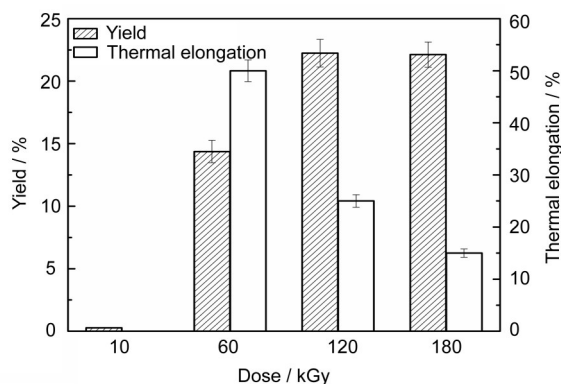


图1 不同吸收剂量下样品的残炭率和热延伸
Fig.1 Carbon residual rates and thermal elongations of ETFE samples at different absorbed doses

从图 1 可知: 未辐射交联的样品残炭率仅为 0.27%, 吸收剂量为 60 kGy、120 kGy 和 180 kGy 的样品残炭率分别为 14.37%、22.24% 和 22.13%; 此外, 未辐射交联的样品热延伸为 0, 而吸收剂量为 60 kGy、120 kGy 以及 180 kGy 的样品的热延伸分别为 50%、25% 以及 15%; 随着吸收剂量的增大, 交联程度逐渐增加, 热稳定性提高, 从而残炭率逐渐提高; 当吸收剂量为 120 kGy 时, 交联程度达到最大, 分解温度和残炭最高; 而吸收剂量

为 180 kGy 的样品残炭率略低于 120 kGy 的样品, 因为随着吸收剂量增大, 发生降解, 分解温度和残炭逐渐降低^[19]。辐射交联后材料的耐热性能明显提高, 吸收剂量越高, 材料交联度越高, 因此耐热性能越好; 但在辐照过程中辐射交联和辐射降解是同时存在的, 所以吸收剂量必须控制在一定的范围之内, 以提高材料的耐热性能和机械性能, 对于 ETFE 材料, 当吸收剂量在 120 kGy 内辐射交联占主导地位, 由测试结果可知, 吸收剂量为 120 kGy 时材料交联度最好。

2.2 拉伸性能

分别选择老化时间为 0 h、72 h、120 h、240 h、360 h 和 480 h 的样品进行拉伸性能测试, 结果如图 2 和 3 所示。

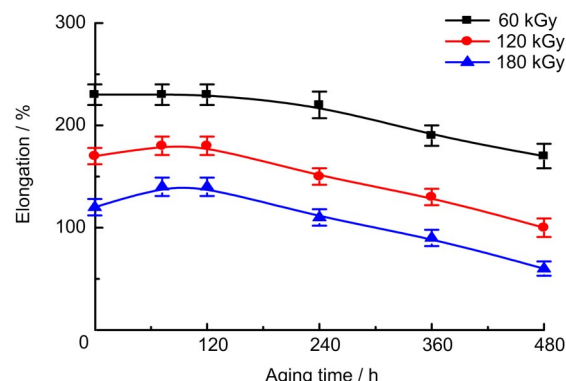


图2 不同老化时间下的断裂拉伸应变
Fig.2 Elongations of ETFE samples at different aging time

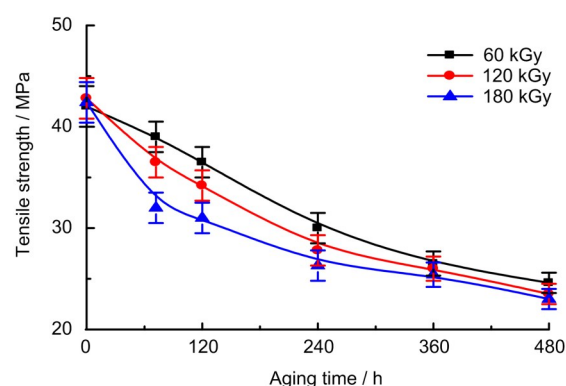


图3 不同老化时间下的拉伸强度
Fig.3 Tensile strengths of ETFE samples at different aging time

从图 2 和图 3 可以看出, 随着吸收剂量的增加, 拉伸强度差异并不显著 (分别为 42.0 MPa、42.8 MPa、42.4 MPa)。随着剂量增加, 断裂拉伸应变呈下降趋势, 原因是辐照过程使 ETFE 共聚物

内部分子链结构发生交联反应,分子链之间的可滑动性降低,高吸收剂量导致样品交联程度较大,宏观表现为断裂拉伸应变降低^[4]。随着老化时间的延长,断裂拉伸应变和拉伸强度均呈下降趋势,其中,不同剂量样品的拉伸强度下降趋势显著且基本一致,高剂量的样品断裂拉伸应变下降趋势较低剂量的样品显著,说明在高温老化处理过程中,不同吸收剂量的交联ETFE分子链的变化程度并不相同。

2.3 体积电阻率

分别选择老化时间为0 h、72 h、120 h、240 h、360 h和480 h的样品进行体积电阻率测试,测试结果见图4。

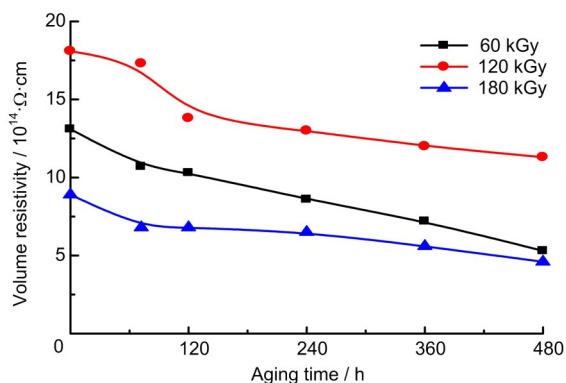


图4 不同老化时间下的体积电阻率
Fig.4 Volume resistivities of ETFE samples at different aging time

从图4可以看出,吸收剂量增加,样品的体积电阻率先增加后降低,其中120 kGy吸收剂量下的样品体积电阻率最高,绝缘性能最好,180 kGy剂量下的体积电阻率最低,未辐照未老化样品体积电阻率为 $3.5 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 。因为ETFE的线性分子链中含有乙烯结构,在电子束的辐照下具有交联倾向,而ETFE熔点为230℃左右,所以未辐射交联情况下270℃老化会熔融。在合适的吸收剂量下,分子链中 CF_2 链和 CH_2 链断裂,产生大分子链自由基及H原子和F原子,可交联形成体型结构^[5]。交联后的ETFE分子结构为立体结构,电子在这种结构中移动的阻力增加,宏观表现为体积电阻率的增加。较低的吸收剂量下,样品交联程度较低,在较高的吸收剂量下,聚合物链段形成交联网状结构后还会导致C-C键的断裂,进而会破坏已经形成的交联ETFE体型结构,因此电子移动的阻力相对减小,宏观表现为体积电阻率较小。

2.4 红外光谱

分别选择老化时间为0 h、72 h、120 h、240 h、360 h和480 h的样品进行红外光谱分析。吸收剂量120 kGy样品的红外谱图如图5所示。

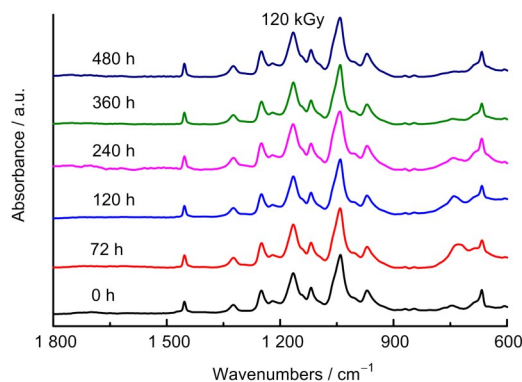


图5 不同老化时间时剂量为120 kGy的样品的红外光谱图
Fig.5 FTIR spectra of ETFE samples with 120 kGy at different aging time

由图5,在1500~900 cm^{-1} 波数范围内,谱线均有尖锐的强吸收峰,且吸收峰的位置基本一致。其中1452 cm^{-1} 是 $-\text{CH}_2-$ 弯曲振动吸收峰,1300~1000 cm^{-1} 是 $-\text{CF}_2-$ 特征吸收峰,1040 cm^{-1} 是主吸收峰^[6-7]。对比3个图谱可以发现,742 cm^{-1} 出现强度不同的吸收峰,该吸收峰为聚合物非晶特征吸收峰,为了更直观地分析交联过程中聚合物链段结构的变化,特增加相对强度系数公式^[17],如式(2)。

$$R_{742} = \frac{A_{742}}{A_{1040}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_{742} 表示742 cm^{-1} 波数处吸收峰峰面积与主吸收峰1040 cm^{-1} 的峰面积比值; A_{742} 表示742 cm^{-1} 波数处吸收峰峰面积; A_{1040} 表示主吸收峰1040 cm^{-1} 波数处吸收峰峰面积。

分别选择老化时间为0 h、72 h、120 h、240 h、360 h和480 h后样品的 R_{742} 结果进行对比,如图6所示。从图6可以看出,742 cm^{-1} 波数的非晶特征吸收峰在经过不同电子束辐照后,相对强度基本一致。随着老化时间的延长,相对强度均显著下降。然而老化72 h后样品的相对强度差异显著,其中吸收剂量为180 kGy的样品的 R_{742} 数值最高,吸收剂量为120 kGy样品的最低,这是因为在高能电子束辐照作用下,ETFE分子结构变化,可形成数个片状晶体区域的联合,交联实质上限制在片晶界面及无定型区域。经过72 h高温处理后,在

残余含氟自由基和热能量的综合作用下，交联的ETFE出现分子链的断链，导致非晶区域的增加，红外光谱上表现为 742 cm^{-1} 波数的非晶特征吸收峰显著。继续对辐照后的ETFE样品进行热老化处理，ETFE分子链出现重组交联现象，该过程是影响热老化性能的主要因素，导致分子结构中非晶区域减少，红外光谱上表现为 742 cm^{-1} 波数的非晶特征吸收峰降低^[20]。

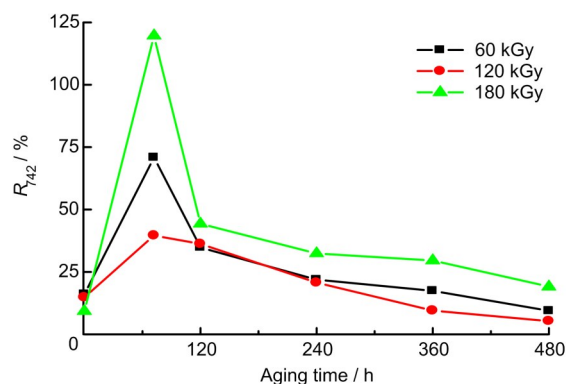


图6 不同老化时间下的 R_{742} 值
Fig.6 R_{742} values of ETFE samples at different aging time

3 结论

本文通过残炭率、热延伸性能、拉伸性能、体积电阻率和红外光谱分析技术对辐射交联ETFE样品热老化性能进行研究分析，吸收剂量分别为60 kGy、120 kGy和180 kGy。主要结论：（1）残炭率随着吸收剂量的增大先增大后降低，热延伸逐渐降低，吸收剂量为120 kGy时，样品的残炭率最大，说明材料交联度达到最大；（2）不同吸收剂量下样品的拉伸性能不一致，随着吸收剂量的增加，断裂拉伸应变存在下降的趋势，随着热老化时间的延长，拉伸强度和断裂拉伸应变均呈下降趋势；（3）在吸收剂量为120 kGy时，ETFE体积电阻率最高，绝缘性能最优，随着热老化时间的延长，各吸收剂量下样品的体积电阻率均呈下降趋势；（4）红外光谱表明辐射交联ETFE材料非晶结构随热老化时间先增加后降低。

参考文献

- 1 罗孝兵, 赵转萍. 航空电缆故障自动检测集成系统[J]. 工业控制计算机, 2003, **16**(3): 5-7. DOI: 10.3969/j.issn.1001-182X.2003.03.003.
LUO Xiaobing, ZHAO Zhuanping. The integrated system of automatic fault diagnosis for aerial cables[J]. Industrial

- Control Computer, 2003, **16**(3): 5-7. DOI: 10.3969/j.issn.1001-182X.2003.03.003.
- 2 郑伟, 王新营, 严波. 航空线用X-ETFE绝缘料的制备及性能表征[J]. 绝缘材料, 2013, **46**(3): 70-72. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9239.2013.03.019.
ZHENG Wei, WANG Xinying, YAN Bo. Preparation and properties characterization of X-ETFE insulating material for aircraft wire[J]. Insulating Materials, 2013, **46**(3): 70-72. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9239.2013.03.019.
- 3 刘旌平, 张贤灵, 张敬平, 等. 辐照交联乙烯四氟乙烯绝缘电线后处理工艺条件的选择[J]. 电线电缆, 2010(6): 4-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6901.2010.06.002.
LIU Jingping, ZHANG Xianling, ZHANG Jingping, *et al.* Selection of the processing conditions for the after-treatment of irradiated ethylene-tetrafluoroethylene insulated wires[J]. Electric Wire & Cable, 2010(6): 4-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6901.2010.06.002.
- 4 Motyl E. Measurements of interfacial charges in layered PTFE using step electroacoustic technique[J]. Journal of Electrostatics, 2001, **51/52**: 522-529. DOI: 10.1016/s0304-3886(01)00063-8
- 5 Madaras E I, Anastasi R F. Investigating the use of ultrasound for evaluating aging wiring insulation[R]. Virginia: NASA Langley Research Center, 2001.
- 6 胡晖, 杨云飞, 黄雷, 等. 辐照交联乙烯-四氟乙烯绝缘材料的研究和产业化的进展[J]. 广东化工, 2012, **39**(18): 61-62. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2012.18.030.
HU Hui, YANG Yunfei, HUANG Lei, *et al.* Advance in the research and industrialization of the irradiated ethylene-tetrafluoroethylene insulated material[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, **39**(18): 61-62. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2012.18.030.
- 7 史丛丛, 单永东. XETFE电线电缆绝缘料的研究进展[J]. 绝缘材料, 2015, **48**(7): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9239.2015.07.002.
SHI Congcong, SHAN Yongdong. Research development of XETFE wire and cable insulating materials[J]. Insulating Materials, 2015, **48**(7): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9239.2015.07.002.
- 8 王鹏, 吴刚, 周莹, 等. 交联乙烯-四氟乙烯共聚物绝缘线缆辐照交联的质量问题[J]. 电线电缆, 2017(3): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6901.2017.03.004.
WANG Peng, WU Gang, ZHOU Ying, *et al.* The quality problems of crosslinked ethylene-tetrafluoroethylene copolymer cable[J]. Electric Wire & Cable, 2017(3): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6901.2017.03.004.

- 9 Subudhi M. Literature review of environmental qualification of safety-related electric cables: Summary of past work. Volume 1[R]. Washington DC: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1996. DOI: 10.2172/226028.
- 10 王成, 方正. 高温交联 ETFE 材料挤出技术在航空电缆的应用[J]. 电子技术, 2013, 42(10): 79-80. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0755.2013.10.027.
WANG Cheng, FANG Zheng. Application of X-ETFE extrusion technology in airspace cables[J]. Electronic Technology, 2013, 42(10): 79-80. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0755.2013.10.027.
- 11 管妮. 聚合物的老化与稳定化[J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38(3): 47-53. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5381.2009.03.012.
GUAN Ni. The aging and stability of polymer[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2009, 38(3): 47-53. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5381.2009.03.012.
- 12 邵春明, 孙洪阳, 陈振华. 乙烯-四氟乙烯共聚物高温老化研究[J]. 化工生产与技术, 2019, 25(1): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6829.2019.01.001.
SHAO Chunming, SUN Hongyang, CHEN Zhenhua. Study on high temperature aging of ethylene-tetrafluoroethylene copolymer[J]. Chemical Production and Technology, 2019, 25(1): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6829.2019.01.001.
- 13 Kissinger H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis[J]. Analytical Chemistry, 1957, 29(11): 1702-1706. DOI: 10.1021/ac60131a045.
- 14 李建喜, 单永东, 张聪, 等. 电子束辐照乙烯-四氟乙烯共聚物的化学稳定性[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2015, 33(6): 060301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rrj.33.060301.
LI Jianxi, SHAN Yongdong, ZHANG Cong, *et al.* Chemical stability of ethylene-tetra-fluoro-ethylene irradiated by electron beam[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2015, 33(6): 060301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rrj.33.060301.
- 15 周环, 俞霖洁, 马利锋, 等. 乙烯-四氟乙烯共聚物的结构表征[J]. 理化检验: 化学分册, 2010, 46(8): 955-959. DOI: 10.1143/JJAP.24.208.
ZHOU Huan, YU Linjie, MA Lifeng, *et al.* Characterization of structure of the copolymer of ethylene and tetrafluoroethylene[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2010, 46(8): 955-959. DOI: 10.1143/JJAP.24.208.
- 16 国家标准化管理委员会.《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第21部分: 弹性体混合料专用试验方法-耐臭氧试验-热延伸试验-浸矿物油试验》: GB/T 2951.21-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Inspection and Quarantine of China, Administration Standardization. Common test methods for insulating and sheathing materials of electric and optical cables-Part 21: Methods specific to elastomeric compounds-Ozone resistance, hot set and mineral oil immersion tests: GB/T 2951.21 - 2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- 17 国家标准化管理委员会.《塑料 拉伸性能的测定 第3部分: 薄膜和薄片的试验条件》: GB/T 1040.3-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Inspection and Quarantine of China, Administration Standardization. Plastics-Determination of tensile properties-Part 3: Test conditions for films and sheets: GB/T 1040.3 - 2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- 18 国家标准化管理委员会.《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》: GB/T 1410-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Inspection and Quarantine of China, Administration Standardization. Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials: GB/T 1410-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- 19 朱长进, 余若冰, 吴永胜, 等. ^{60}Co 辐照对芳基乙炔预聚体热聚合物性能的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2012, 30(6): 339-342. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2012.rrj.30.120604.
ZHU Changjin, YU Ruobing, WU Yongsheng, *et al.* The effect of ^{60}Co irradiation on the properties of polyarylacetylene from prepolymer of arylacetylene[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2012, 30(6): 339-342. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2012.rrj.30.120604.
- 20 胡文婷. 利用红外光谱法对聚乙烯和聚丙烯进行剖析[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(9): 146. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6490.2017.09.127.
HU Wenting. Analysis of polyethylene and polypropylene were carried out by infrared spectroscopy [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(9): 146. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6490.2017.09.127.