

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.11.022

抗氧化剂 1010/168 对交联聚乙烯性能影响

曹杰¹, 王阳^{1,2}, 宋言¹, 秦轩杰¹, 王欣龙¹, 张文华²

(1. 江西铜业技术研究院有限公司, 南昌 330096; 2. 江西电缆有限责任公司, 江西吉安 343000)

摘要: 为了研究不同抗氧化剂及其含量对交联聚乙烯(XLPE)性能影响, 将不同比例抗氧化剂 1010/168、交联敏化剂三烯丙基异氰脲酸酯以及低密度聚乙烯通过哈克转矩流变仪进行熔融共混, 制备出 7 种含有不同抗氧化剂比例和含量的聚乙烯(PE)。通过电子辐照加速器对 PE 混合物进行辐照得到 XLPE。研究不同比例抗氧化剂 1010/168 对 XLPE 的组织形貌、交联过程、凝胶含量、氧化诱导期(OIT)、老化前后的热延伸、电气性能、羰基指数以及断裂伸长率的影响。研究表明, 抗氧化剂能够在 PE 内部均匀分散, 与无抗氧化剂样品相比, 当抗氧化剂 1010/168 添加量为 0.25 份, XLPE 的凝胶含量从 85.68% 下降到了 76.44%, OIT 从 0.17 min 延长到了 35.26 min, 老化后断裂伸长率保留值从 17.3% 上升到 95.1%, 羰基指数从 2.12 降低到了 0.048。经综合分析, 抗氧化剂能够阻碍辐照交联过程中 PE 的交联, 延长 XLPE 的 OIT。此外经过 165 °C/168 h 老化后含有抗氧化剂的 XLPE 能较好地保持热延伸、电气性能、羰基指数以及断裂伸长率, 有效地抑制 XLPE 的老化。

关键词: 聚乙烯; 交联; 老化; 抗氧化剂 1010; 抗氧化剂 168

中图分类号: TQ317.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)11-0147-07

Influence of antioxidant 1010/168 on performance of crosslinking polyethylene

CAO Jie¹, WANG Yang^{1,2}, SONG Yan¹, QIN Xuanjie¹, WANG Xinlong¹, ZHANG Wenhua²

(1. Jiangxi Copper Technology Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. Jiangxi Cable Co., Ltd., Jian 343000, China)

Abstract : For researching influence of different antioxidant and their contents on properties of crosslinking polyethylene (XLPE), different proportions of antioxidants 1010/168, cross-linked sensitizers triallyl isocyanurate and low density polyethylene by melting and blending with Hack torque rheometer, seven polyethylenes with different proportions and contents of antioxidants were prepared. XLPE were prepared by irradiation with electron irradiation accelerator. The effects of antioxidant 1010/168 of different proportion and content on microstructure and morphology, crosslinking process, gel content, the oxidation induction time (OIT), thermal elongation and electrical behaviour, carbonyl index and elongation at break before and after of thermo-oxygen of XLPE sample were studeid. The results indicate that antioxidant could homodisperse in XLPE, compared to sample with no antioxidant, when content of antioxidant 1010 and 168 are 0.25 phr and 0.25 phr, gel content of XLPE decreases from 85.68% to 76.44%, OIT increases from 0.17 min to 35.26 min, elongation at break retention value after aging increases from 17.3% to 95.1%, carbonyl index decreases from 2.12 to 0.048. Generalized analysis, antioxidant can inhibit the crosslinking of polyethylene during irradiation crosslinking, and increase OIT. XLPE with antioxidant could maintain better thermal elongation, behavior of electricity, carbonyl index and elongation at break than pure XLPE, and effectively inhibit the aging of XLPE.

Keywords : polyethylene ; cross-linking ; aging ; antioxidant 1010; antioxidant 168

随着国民经济的快速发展, 城镇化建设以及工业化建设的步伐不断加快, 电力电缆的用量也越来越大, 对于电缆料的需求也越来越大^[1]。聚乙烯(PE)

因具有质量轻、耐腐蚀、良好的热稳定性和绝缘性等优点被广泛地应用在电气绝缘领域^[2-3]。PE 绝缘料是由直链的 PE 分子组成, 在升温时, 分子间作用

基金项目: 2023 年吉安市科技计划“百博百企”专项(20233-127595)

通信作者: 王阳, 博士, 工程师, 研究方向为电线电缆加工制造

收稿日期: 2024-09-06

引用格式: 曹杰, 王阳, 宋言, 等. 抗氧化剂 1010/168 对交联聚乙烯性能影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(11): 147-153.

CAO Jie, WANG Yang, SONG Yan, et al. Influence of antioxidant 1010/168 on performance of crosslinking polyethylene[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11): 147-153.

力会减弱,在外力的作用下,PE分子之间会发生滑移,宏观上表现为高分子材料发生了变形,不耐高温。

交联聚乙烯(XLPE)是PE分子在射线或者交联剂的作用下由线性高分子通过共价键相互连接而成的三维网络状高分子。XLPE中共价键限制了PE分子间的相互滑移,XLPE相对于PE具有更加突出的物理、化学、力学、电气绝缘性能以及经济性能^[4-6]。由于具有优异的性能,XLPE能够广泛应用于电线电缆中^[7]。但是在自然环境的使用中,电缆绝缘层容易在外界的电、热、光、化学等因素作用下发生不可逆的老化作用,缩短了电缆的使用寿命^[8-12]。因此在电缆绝缘料的制备中,需要添加抗氧化剂来提升抗氧化能力。

PE绝缘料常用的抗氧化剂有苯酚类、硫醇类、烷基酚类、烯酮类、胺类等。受阻酚类抗氧化剂作为主抗氧化剂的一种,可捕捉自由基,延缓聚烯烃老化,因此受到了研究者的广泛关注。Yamazaki等^[13-15]研究了酚类抗氧化剂对PE化学交联反应的影响,研究发现,酚类抗氧化剂能够有效阻止PE化学交联过程中的热氧化,提高其热稳定性。而磷酸酯类作为辅助抗氧化剂配合酚类主抗氧化剂使用,起到更好的抗老化效果^[16]。

抗氧化剂1010和168分别被作为酚类主抗氧化剂和磷酸酯类助抗氧化剂广泛地用于XLPE中。笔者制备了7种抗氧化剂1010、168不同含量的XLPE,并研究了抗氧化剂对XLPE的老化性能、力学性能、凝胶含量、电气性能的影响,并对比主抗氧化剂1010、辅助抗氧化剂168以及1010/168抗氧化剂组合在聚烯烃中的抗氧化性能。

1 实验部分

1.1 主要原料

低密度聚乙烯(PE-LD):苏州伟派塑化有限公司;

抗氧化剂1010、抗氧化剂168:德国巴斯夫股份有限公司;

三烯丙基异氰脲酸酯(TAIC):浙江省三门县西格玛集团有限公司。

1.2 仪器及设备

哈克转矩流变仪:PolyLab OS RheoDrive 7,美国赛默飞世尔科技有限公司;

平板硫化仪:KY6003,江苏开源设备有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM): Apreo 2,赛默飞世尔科技有限公司;

拉伸机:YH-8812WEIX,东莞市越铎电子科技有限公司;

冲片级:CP-25,上海非金属试验机厂;

差示扫描量热(DSC)仪:HCR-1,北京恒久实验设备有限公司;

高阻计:SM7120,HIOKI日置电机株式会社;

高低温介电阻抗温谱仪:DMS20001P,武汉佰力博科技有限公司。

1.3 试样制备

为研究抗氧化剂对聚烯烃性能的影响,将PE-LD,TAIC以及抗氧化剂通过转矩流变仪、平板硫化仪及辐照交联(辐照剂量为250 kGy),制备了7组含有不同比例抗氧化剂1010和168的XLPE试样,试验配方见表1。

表1 试验配方表

Tab. 1 Experimental formula

Samples	phr			
	PE-LD	1010	168	TAIC
1 [#]	99	0	0	1
2 [#]	98.7	0	0.3	1
3 [#]	98.5	0	0.5	1
4 [#]	98.7	0.3	0	1
5 [#]	98.5	0.5	0	1
6 [#]	98.7	0.15	0.15	1
7 [#]	98.5	0.25	0.25	1

1.4 测试与表征

用液氮淬断样品后在断口处喷金,采用SEM对断口微观形貌进行分析。

采用DSC仪进行测试,在40 mL/min空气气泵,200 °C恒温条件下,测定氧化诱导期(OIT)。

采用凝胶含量(C%)来表征样品的交联度。将试样裁剪成0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm的颗粒,剪取孔宽为0.12 mm的不锈钢网,制成约40 mm×40 mm的方形口袋并称重(W_1),将试样放入不锈钢口袋称重(W_2),将装有试样的不锈钢口袋放入到甲苯中进行萃取、烘干、称重(W_3),见式(1)。

$$C\% = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} \times 100\% \quad (1)$$

使用冲片机将7组XLPE板材切为II型哑铃片。按照GB/T 2951.11-2008规定,单位面积负载20.4 N,200 °C条件下进行试验。

根据GB/T 1040-2006规定,在室温25 °C,拉伸速度200 mm/min条件下测试拉伸性能。

通过高阻计、高低温介电阻抗温谱仪测试样品体积电阻率和介电性能。

2 结果与讨论

2.1 抗氧化剂对 XLPE 交联特性的影响

图 1 为 7 个添加不同含量抗氧化剂的 XLPE 试样的淬断截面。从图 1 可以看出,试样淬断截面有河流状的韧窝,呈现明显的韧性断裂。图片中未出现明显的团聚现象,说明抗氧化剂均匀分散在 XLPE 中。

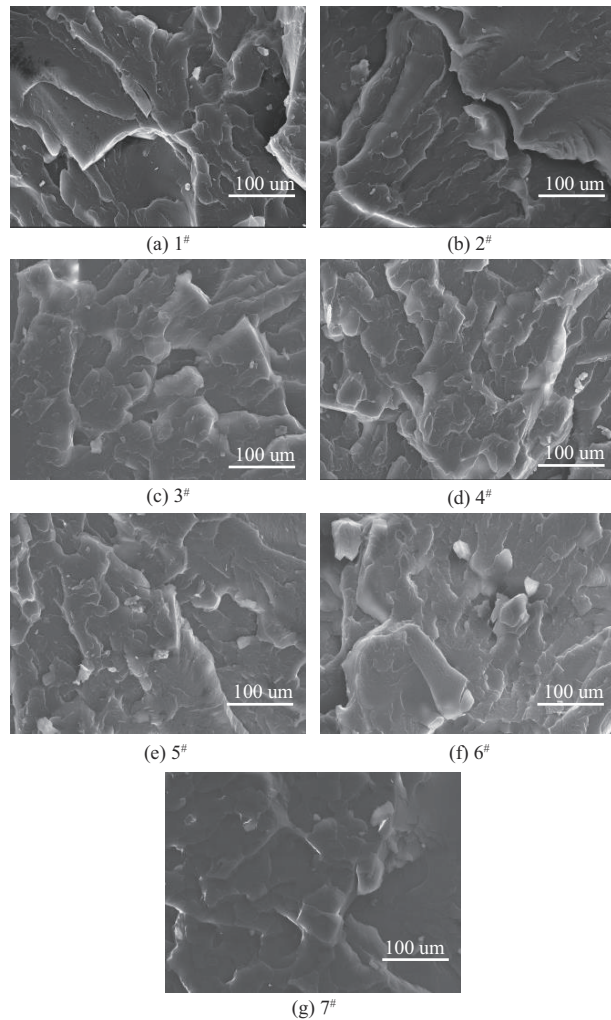


图 1 7 种样品淬断截面 SEM 照片

Fig. 1 SEM photos of seven kind of samples

通过凝胶含量和热延伸率可以判断材料的交联程度,从而能够研究抗氧化剂含量对 PE 交联的影响。表 2 为辐照交联之后试样的热延伸和凝胶含量。从表 2 可以看出,添加抗氧化剂后,XLPE 荷载下热延伸从 35% 上升到 90%,凝胶含量从 85.68% 下降到 76.44%。这是因为样品中的抗氧化剂在辐照交联的过程中捕捉了自由基,抑制交联,降低了

XLPE 的交联度。

表 2 辐照交联后 7 种配方的凝胶含量和热延伸

Tab. 2 Gel content and thermal elongation of XLPE of seven formulations after irradiation crosslinking

Samples	Thermal elongation/%	Gel content/%
1 [#]	35	85.68
2 [#]	50	77.19
3 [#]	50	70.92
4 [#]	75	77.03
5 [#]	85	81.88
6 [#]	55	75.81
7 [#]	90	76.44

交联程度能够影响材料的力学性能。图 2 为不同含量抗氧化剂的 XLPE 的应力-应变曲线,表 3 为含有不同含量抗氧化剂的 XLPE 的力学性能。从图 2 和表 3 可以看出,随着抗氧化剂的加入,XLPE 拉伸强度整体降低,断裂伸长率增大。这是因为辐照后,PE 发生交联,分子链间形成共价键,使聚合物的分子结构发生变化,由原来的线性大分子变成不溶不熔的三维网状结构,PE 分子的运动受到限制,分子链滑移变得困难。其次抗氧化剂会影响 XLPE 结晶性能。一般而言,PE 的拉伸强度和结晶度成正比,抗氧化剂分子较大,会占据 PE 结晶时分子链排布的空间,导致 PE 结晶度降低,使得拉伸强度下降。

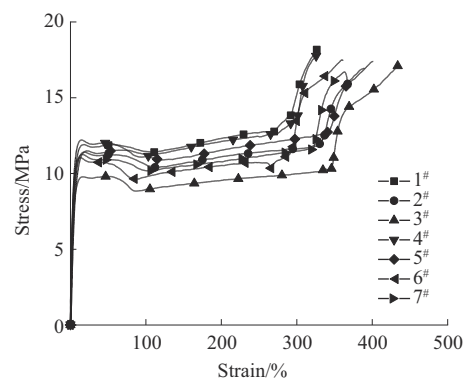


图 2 不同含量抗氧化剂的 XLPE 的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of XLPE with antioxidant of different content

表 3 含有不同含量抗氧化剂的 XLPE 的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of XLPE with antioxidant of different content

Samples	Stress/MPa	Strain/%
1 [#]	18.35	330
2 [#]	17.40	401
3 [#]	17.10	436
4 [#]	17.90	394
5 [#]	16.90	390
6 [#]	17.45	361
7 [#]	16.70	369

而断裂伸长率主要与交联度有关,从凝胶含量中可以反映出,添加抗氧化剂后,凝胶含量降低、断裂伸长率升高。

图3为不同含量抗氧化剂的XLPE的体积电阻率,由图3可以发现,与未加抗氧化剂的XLPE相比,加入抗氧化剂后XLPE的体积电阻率均有轻微降低,可能是添加的抗氧化剂中存在极性基团,在本征解离的作用下,可以产生导电离子,提高了XLPE的导电性,电阻率下降,但均保持在同一个数量级($10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$)。另一方面,纯PE-LD的体积电阻率在 $10^{14} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$,说明添加了抗氧化剂的XLPE的体积电阻率仍能保持较高水准。

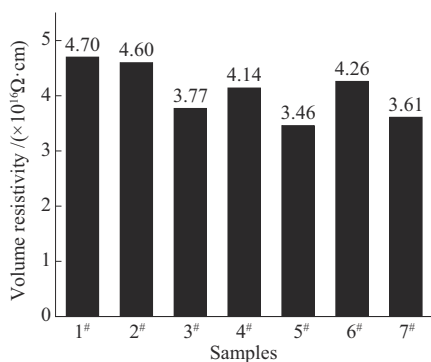


图3 含有不同含量抗氧化剂的XLPE的体积电阻率

Fig. 3 Volume resistivity of XLPE with antioxidant of different content

介电常数(E_r)是判断材料是否为极性物质的指数。通常相对介电常数大于3.6的物质为极性物质;相对介电常数在2.8~3.6范围内的物质为弱极性物质;相对介电常数小于2.8的为非极性物质。图4为添加7种不同配比抗氧化剂的XLPE的 E_r ,从结果可以看出,7种配方的XLPE全为非极性物质。

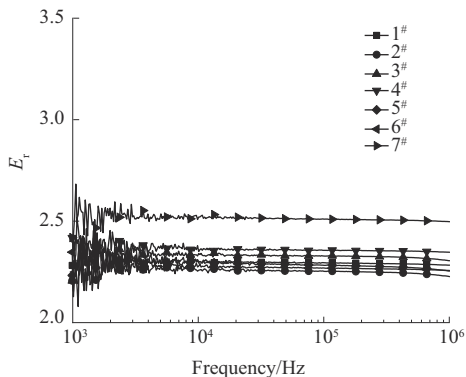


图4 不同含量抗氧化剂的XLPE的 E_r

Fig. 4 E_r of XLPE with antioxidant of different content

OIT是评价材料的耐热氧降解能力的指标。图5为添加了不同抗氧化剂1010/168比例XLPE的OIT,结果显示,XLPE的OIT主要和1010的添加量

有关,随着1010含量上升,XLPE的OIT也越来越长,这是因为在防老化过程中抗氧化剂1010具有捕捉自由基的作用,从源头上就能够起到防止老化的作用。而抗氧化剂168不具有捕捉自由基的能力,不能阻止链自由基的链式反应,所以单一使用168对防止XLPE老化非常有限。但当抗氧化剂1010和168配合使用时,由于抗氧化剂168能够稳定1010与自由基反应产生的物质,因此使用较少的1010的条件下能够较大延长XLPE的OIT。

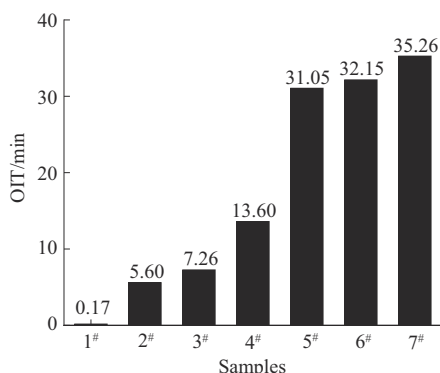


图5 不同配方XLPE的OIT

Fig. 5 OIT of XLPE with different formula

2.2 抗氧化剂对XLPE耐热老化性能的影响

聚烯烃材料易在自然环境中发生热氧老化。为了研究抗氧化剂延缓聚烯烃材料老化的作用,将上述7种含有不同抗氧化剂含量的试样放在165℃的烘箱中老化168 h,测量其性能的变化。

2.2.1 热延伸

不同含量抗氧化剂的XLPE热延伸结果见图6,结果显示老化发生后试样在载荷下延伸率发生了变化,其中1#,2#,3#,4#试样都发生了断裂,说明材料老化比较明显,这是因为在1#,2#,3#试样中不含主抗氧化剂1010,副抗氧化剂168不能阻止老化过程中产生的自由基而终止老化链式反应。4#试样含有的

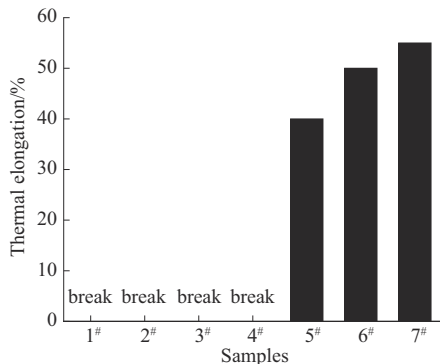


图6 XLPE样品老化后的热延伸

Fig. 6 Thermal elongation of XLPE sample after aging

抗氧化剂 1010 偏少,因此会在热老化实验中较快被耗尽,无法完全抑制 PE 的热氧老化。 $5^{\#}$ 、 $6^{\#}$ 、 $7^{\#}$ 试样由于添加的抗氧化剂 1010 含量更多或添加了 1010/168 互配体系,XLPE 老化的链式分解反应被抑制,XLPE 结构能够较好地保存,因此载荷下没有发生断裂。

含有 7 种不同抗氧化剂配比的 XLPE 老化后的 E_r 如图 7 所示。结果表明,添加 1 份 TAIC 的 XLPE (空白样 $1^{\#}$) 老化后由非极性材料变成了弱极性材料,其他 6 种材料仍是非极性物质。但是相比老化前,其 E_r 都有相应增加,尤其是 $2^{\#}$ 试样,这是因为 XLPE 在老化过程中,生成了羰基,极化能力增强, E_r 增加。此外,由于老化过程中,未加抗氧化剂的 XLPE 主要以极性基团偶极子取向为主,交联网络结构被破坏,促进分子链段自由运动,因此 E_r 会受到频率变化的影响。

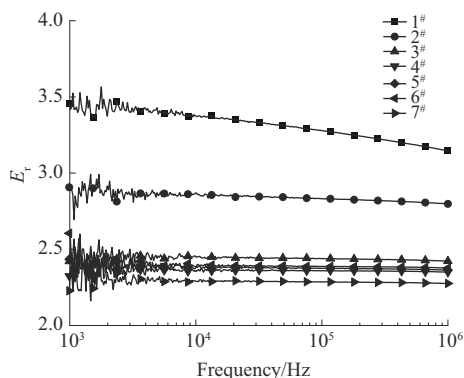


图7 添加不同比例抗氧化剂的 XLPE 样品老化后 E_r

Fig. 7 E_r of XLPE with antioxidant of different content after aging

图 8 为 7 组试样老化后的体积电阻率,可以看出,老化后样品的体积电阻率变小,这是 XLPE 受到热氧老化作用,生成了羰基,经过本征电离的作用产生导电的离子。此外,XLPE 的交联结构变弱,使得自由体积变大,导电离子的迁移率增加,XLPE 的

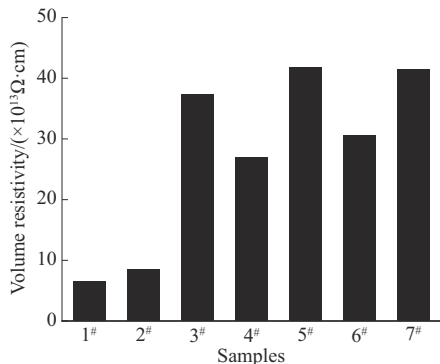


图8 样品老化前后体积电阻率

Fig. 8 Samples volume resistivity after aging

导电性增大,体积电阻率下降。另一方面,加入抗氧化剂 168 和 1010 后,由于其抑制热氧老化作用,使得材料中 PE 分子链中产生的羰基类极性基团减少,从而抑制体积电阻率降低的幅度,依然维持在 10^{14} 的水平。

2.2.2 羰基指数

以 2916 cm^{-1} 甲基振动峰吸收强度 (I_{2916}) 为内标,计算 1712 cm^{-1} 处羰基振动峰吸收强度 (I_{1712}) 的相对含量 X ,即羰基指数,计算公式见式(2)。

$$X = \frac{I_{1712}}{I_{2916}} \quad (2)$$

热老化使得 XLPE 内部的分子结构发生变化。图 9 为 7 个配方样品老化前后的羰基指数,可以发现,在经历 $165\text{ }^{\circ}\text{C}/168\text{ h}$ 老化后, $1^{\#}$ 、 $2^{\#}$ 、 $3^{\#}$ 样品的羰基指数明显上升。这是因为在老化过程中主链断裂,生成羰基。而 $4^{\#}$ 、 $5^{\#}$ 、 $6^{\#}$ 、 $7^{\#}$ 样品中含有大量的抗氧化剂 1010 和 168,起到俘获自由基的作用,与过氧化自由基 $\text{ROO}\cdot$ 反应,生成稳定的非自由基型产物,分解氢过氧化物,生成稳定的化合物,阻止了复合材料氧化反应的进行,减缓了 XLPE 内羰基的生成。

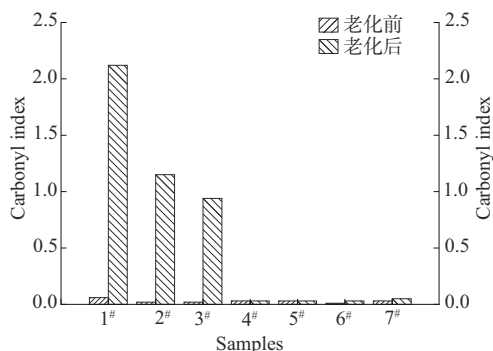


图9 不同配方样品老化前后的羰基指数

Fig. 9 Carbonyl index of samples with differernt formular

2.2.3 老化后断裂伸长率保留值

根据 JG/T 442-2014 和 JG/T 441-2014 中寿命评定试验的规定,试验温度为 $165\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验时间 168 h,断裂伸长率保留率不小于 50%。在本研究中,XLPE 经过 $165\text{ }^{\circ}\text{C}/168\text{ h}$ 老化后, $1^{\#}$ ~ $3^{\#}$ 试样的断裂伸长率保留值均小于 50%, $3^{\#}$ ~ $7^{\#}$ 试样断裂伸长率保留值均大于 50%,见图 10 所示。未添加抗氧化剂的 $1^{\#}$ 试样断裂伸长率大幅降低(保留值为 17.3%),主要是因为热老化过程中 PE 分子链大范围老化分解,导致样品严重变色、变形,甚至出现脆化现象,表明其抗老化性能差。仅添加抗氧化剂 168 的 $2^{\#}$ 、 $3^{\#}$ 试样断裂伸长率也大幅降低(保留值分别为 6.0% 和 11.7%),

因其作为辅助抗氧化剂,对分子链自由基稳定的作用不大,故样品在热老化过程中也会呈现出PE分子链大范围老化分解的情况。4[#]试样因为添加的主抗氧化剂1010较少,尽管其有稳定自由基的作用,但在热老化过程中很快被消耗,抗氧化剂无法完全抑制PE分子链的分解,因此断裂伸长率也会有较大程度降幅(保留值约60.4%)。5[#]试样中添加的主抗氧化剂1010较多,在热老化过程中抗氧化剂需消耗很长时间,可以抑制材料的氧化反应,所以断裂伸长率降幅较低(保留值约84.6%)。6[#],7[#]试样中添加了抗氧化剂1010和168,1010和168的互配能够在添加较少抗氧化剂下具有较强抗氧化能力,降低了分子链的老化分解,所以断裂伸长率降幅较小(保留值为83.7%和95.1%)。

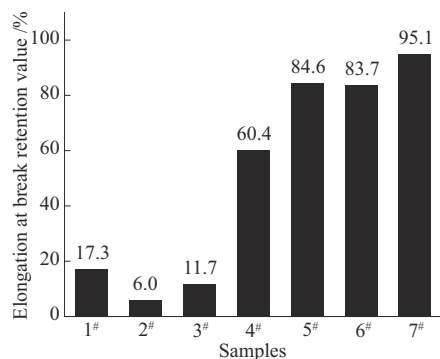


图10 不同配方XLPE老化后的断裂伸长率保留值

Fig. 10 Elongation break retention value of XLPE with different formulations after aging

从老化后的断裂伸长率来看,7[#]试样的断裂伸长率保留值最高,达到95.1%。这是因为在7[#]样品中分别添加了0.25份的主抗氧化剂1010和辅助抗氧化剂168。XLPE在热氧老化的过程中一些相对较弱的共价键会发生断裂生成自由基R·,自由基会快速地与氧气反应生成ROO·,ROO·会夺取XLPE链上的H,分子链失去氢而形成新的自由基,从而形成一个老化过程。在7[#]试样中,同时含有受阻酚类链终止性抗氧化剂1010和亚磷酸酯ROOH分解剂168,1010能够给ROO·供H生成ROOH,所以加入1010能够提高XLPE的使用寿命,但是ROOH不太稳定,能够分解成RO·,HO·以及ROO·,产生新的老化循环,所以1010对XLPE使用寿命的增加能力有限。抗氧化剂168能够和ROOH生成稳定的物质,故1010和168配合使用能够大幅度提升XLPE的使用寿命。

3 结论

(1) PE辐照交联过程中,抗氧化剂1010会捕捉辐照产生的自由基,具有抑制交联作用。

(2)通过OIT发现,添加了抗氧化剂1010相比添加168的PE具有更好的抗氧化能力,抗氧化剂1010能够和自由基反应生成ROOH,抗氧化剂168能够和ROOH反应生成更稳定的化合物。因此1010和168互配使用能够显著提升XLPE的OIT,增强了XLPE的抗氧化能力。

(3)因为抗氧化剂1010和168在XLPE老化过程中相互配合,阻断老化的链式反应,所以165℃/168h热老化后,未添加抗氧化剂和只添加抗氧化剂168的XLPE的断裂伸长率保留值低,羰基指数和体积电阻率变化大,添加了1010/168的XLPE的断裂伸长率保留值较高(95.1%),羰基指数和体积电阻率变化小,有效起到抗氧化的效果。

参考文献

- [1] 尹游,李诗雨,胡佳,等.基于抗老剂含量分布的交联聚乙烯电缆绝缘层老化特性[J].工程塑料应用,2022,50(9):115-120.
YIN You, LI Shiyu, HU Jia, et al. Aging characteristics of cross-linked polyethylene cable insulation based on content distribution of anti-aging agent[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):115-120.
- [2] CHEN Chi, CHENG Chuanhui, WANG Xia, et al. Space charge characteristics for XLPE coaxial cable insulation under electrothermal accelerated aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2):727-736.
- [3] CHEN Yun, HAO Yanpeng, HUANG Tao, et al. Voltage equivalence of partial discharge tests for XLPE insulation defects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2):683-692.
- [4] 刘刚,谢月,李立涅.110 kV交联聚乙烯电缆绝缘层老化状态研究[J].广东电力,2015,28(10):72-77.
LIU Gang, XIE Yue, LI Liying. Research on aging state of insulating layer of 110 kV XLPE cable[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(10):72-77.
- [5] 王阳,朱若林,秦轩杰,等.27.5 kV电缆低偏心绝缘线芯的制备和性能研究[J].铜业工程,2023(4):108-114.
WANG Yang, ZHU Ruolin, QIN Xuanjie, et al. Preparation and property of low eccentric insulated core for 27.5 kV cable[J]. Copper Engineering, 2023(4):108-114.
- [6] 郁利超.160 kV直流电缆绝缘材料老化特性及击穿特性研究[D].保定:华北电力大学,2017.
YU Lichao. Research on aging and breakdown characteristics of 160 kV HVDC cable insulation material[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [7] 胥智勇,赵洪,陈俊岐,等.交联度对交联聚乙烯树枝老化特性

- 的影响[J]. 绝缘材料, 2017, 50(4):31–35, 41.
- XU Zhiyong, ZHAO Hong, CHEN Junqi, et al. Influence of cross-linking degree on water treeing of crosslinked polyethylene[J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(4):31–35, 41.
- [8] 刘刚, 吴亮, 金尚儿, 等. XLPE 电缆老化状况对绝缘层微观结构的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(8):53–59.
- LIU Gang, WU Liang, JIN Shang'er, et al. Identification of infrared images of cable terminal based on radon transform and fourier-mellin transform[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2016, 44(8):53–59.
- [9] 张小虎, 周厚强, 杨永柱, 等. 受阻酚类抗氧化剂对交联聚乙烯力学性能的影响[J]. 电线电缆, 2009(6):28–32.
- ZHANG Xiaohu, ZHOU Houqiang, YANG Yongzhu, et al. The influences of hindered phenolic antioxidants on the mechanic properties of crosslinked polyethene[J]. *Electric Wire&Cable*, 2009(6):28–32.
- [10] 蔡静, 韩宝忠, 李春阳. 抗氧化剂对聚乙烯电缆直流介电性能的影响[J]. 电站系统工程, 2016, 32(4):75–78.
- CAI Jing, HAN Baozhong, LI Chunyang. Effect of antioxidant on the dc dielectric properties of low density polyethylene[J]. *Power System Engineering*, 2016, 32(4):75–78.
- [11] KUDO K. Fractal analysis of electrical trees[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, 5(5):713–727.
- [12] EICHORN R M. Treeing in solid extruded electrical insulation [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1977, EI-12(1):2–18.
- [13] YAMAZAKI T, SEGUCHI T. ESR study on crosslinking reaction mechanisms of polyethylene using a chemical agent[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1997, 35(2):279–284.
- [14] YAMAZAKI T, SEGUCHI T. Electron spin resonance study on chemical-crosslinking reaction mechanisms of polyethylene using a chemical agent. VI. Effect of α -methyl styrene dimer[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2001, 39(13):2 151–2 156.
- [15] YAMAZAKI T, SEGUCHI T. ESR study on chemical crosslinking reaction mechanisms of polyethylene using a chemical agent—II. The effect of phenolic antioxidants[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1997, 35(2):2 431–2 439.
- [16] 杨浩藐, 胡斌, 吴鹏. 抗氧化剂和光稳定剂对 PE-LLD 紫外光老化的稳定作用[J]. 中国塑料, 2011, 25(10):64–68.
- YANG Haomiao, HU Bin, WU Peng. Stabilization on effect of antioxidants and light stabilizers on UV-light aging of PE-LLD[J]. *China Plastics*, 2011, 25(10):64–68.

(上接第 140 页)

- [12] 彭刚, 王绪财, 魏化震, 等. 装甲防护材料抗弹毁伤性能评价与试验表征技术研究[J]. 防护工程, 2016(4):11–20.
- PENG Gang, WANG Xucai, WEI Huazhen, et al. Research on evaluation methods and experimental technique of ballistic property for armour materials[J]. *Protective Engineering*, 2016(4):11–20.
- [13] EOM J H, SEO Y K, KIM Y W, et al. Mechanical and thermal properties of pressureless sintered silicon carbide ceramics with alumina-yttria-calcia[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, 99(5):1 735–1 741.
- [14] YIN J, LEE S H, Feng L, et al. Low temperature spark plasma densification of nano-SiC powder with novel Al_2O_3 - H_2O_3 additives for SiC/SiC applications[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(11):13 305–13 308.
- [15] 袁进豪. SiC 基陶瓷的致密化与力学性能提升研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- YUAN Jinhao. Research on densification and mechanical property enhancement of sic-based ceramics[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.