

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.03.021

福建沿海某区域 10 kV 架空绝缘导线失效分析^{*}

陈云翔¹, 蔡建宾¹, 林德源¹, 庄建煌², 江祖瑄¹, 黄伟林¹, 邵艳群³

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007; 2. 国网福建省电力有限公司莆田供电公司, 福建莆田 351100;

3. 福州大学材料学院, 福州 350108)

摘要: 通过宏观拍照、傅立叶变换红外光谱 (FTIR)、热重 (TG) 分析和扫描电子显微镜 (SEM) 等方法详细分析了福建省沿海某区域雷击烧蚀的部分失效样品, 使用有限元分析方法分析了绝缘子负荷侧的受力情况。结果表明, 失效样品主要表现出断链, 氧化老化较少。炭黑量过多会使绝缘层过早失效。绝缘子负荷侧存在最大的应力和应力变形, 使得设计上“先天不足”架空绝缘导线在电弧电流产生的堆积热量和应力作用下力学性能降低, 产生大量裂纹。绝缘材料本身避免“绝缘薄弱处”是从根本上真正提高架空绝缘导线寿命的关键。

关键词: 架空绝缘导线; 失效; 老化; 有限元分析

中图分类号: TM 246 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2017)03-0094-04

Failure Analysis on 10 kV Overhead Insulated Conductors from A Certain Area of Fujian Coast

Chen Yunxiang¹, Cai Jianbin¹, Lin Deyuan¹, Zhuang Jianhuang², Jiang Zuxuan¹, Huang Weilin¹, Shao Yanqun³

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China; 2. State Grid Putian Electric Power Supply Company,

Putian 351100, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The failure samples of lightning strike from a certain area of Fujian coast were analyzed in detail by the macro photography, FTIR, TG and SEM. The stress conditions on the load side of insulator were analyzed using the finite element analysis. It's shown that failure samples mainly show the broken chain and less oxidative aging. The excessive amount of carbon black can make insulated layer untimely failure. The insulator load side exist the biggest stress and deformation. The intrinsic shortcomings of overhead insulated conductor leads mechanical properties to be reduced under the effect of cumulative energy and stresses from the arc current, resulting in a large number of cracks. The key to improve the life of overhead insulated cables is to avoid "weak insulation" of insulation material itself.

Keywords: overhead insulated conductors; failure; aging; finite element analysis

1993 年国家颁发《额定电压 10 kV、35 kV 架空绝缘电缆》标准, 1996 年颁发《架空绝缘线配电线路设计技术规程》标准, 配电架空线路绝缘化取得了快速发展。推广 20 多年来, 配电线路的供电可靠性和线路通道的利用率不断提高, 有效地解决了城市绿化中的树线矛盾。但是, 雷害多、容易进水氧化等问题也日益突出^[1-2]。曾有统计绝缘导线雷击事故占绝缘导线总事故数的 36.8%, 雷击断线率为 96.8%^[3-5]。因此雷击断线成了研究热点, 也有了比较认可的结论: 绝缘层和绝缘子同时击穿和闪络是由雷电过电压幅值足够大引起的, 被击穿的导线绝缘层呈针孔状。周围的绝缘层阻碍了接续的工频电弧的移动, 使得弧根只能固定在针孔处燃烧, 导致导线在极短的时间内被整齐烧断^[6-9]。同时也发现断点主要位于离开绝缘子轴线 200~400 mm 左右处^[1,9]。

广大科研工作者从金具、防雷击方法等电学角度提出了系列解决方法, 但并没能阻止雷击发生; 考虑到电缆的使用环境, 老化研究^[10-14]以及材料选型^[15]也受到重视。例如, 在热带西沙试验站对不同的电缆材料与不同工艺加工的电缆进行海洋自然大气环境试验, 观察其老化行为^[12]。但是从材料学角度对失效电缆的系统研究还未见报道。

笔者详细地分析了近期福建沿海某区域雷击断线的架空绝缘导线, 采用有限元方法模拟绝缘子附近受力情况, 提出了“材料是基础, 工艺是保证”的重要性。

^{*} 国家自然科学基金项目 (11374053), 福建沿海区域电网设备腐蚀机理及综合治理技术研究 (52130414004X)

联系人: 邵艳群, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究纳米功能材料、钛阳极的制备技术与应用研究、电化学、材料失效分析

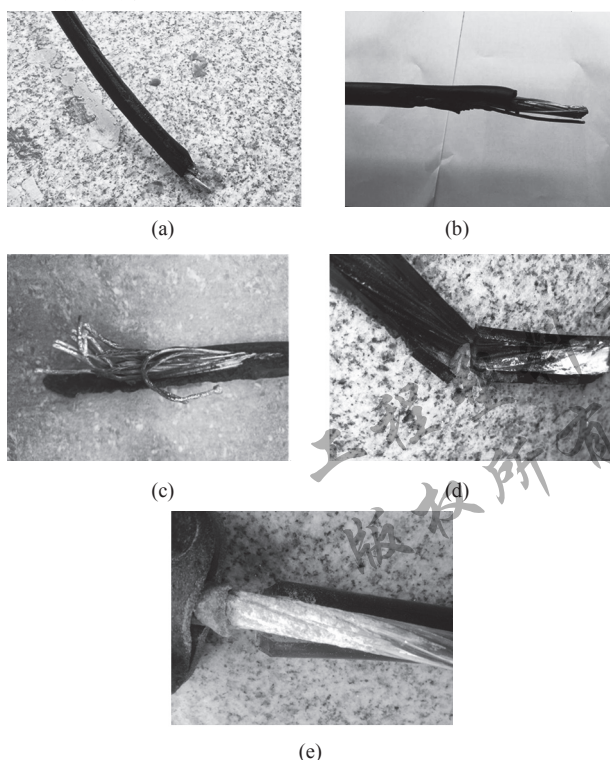
收稿日期: 2016-12-17

1 实验内容

1.1 原材料

国家标准规定架空绝缘导线的绝缘保护层有厚绝缘 (3.4 mm) 和薄绝缘 (2.5 mm) 两种。绝缘保护层的原材料主要是交联聚乙烯或高密度聚乙烯^[16]。

图 1 为福建省沿海某区域的失效绝缘导线。绝缘层的失效行为主要有:绝缘层表面有大量裂纹、断面烧蚀、绝缘层有明显的脆性、绝缘层内部可见明显的与钢芯铝绞线磨损的痕迹、钢芯铝绞线与绝缘层破损处锈迹斑斑。



a—绝缘层表面有大量裂纹; b—断面烧蚀; c—绝缘层有明显的脆性;
d—绝缘层内部与钢芯铝绞线磨损的痕迹;
e—钢芯铝绞线与绝缘层破损处锈迹斑斑

图 1 10 kV 配电线路宏观失效图

1.2 仪器及设备

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: 360 智能型, 美国尼高力公司;

热重 (TG) 分析—动态扫描量热 (DSC) 仪: SDT Q600 V8.2 Build 100 型, 美国 TA 公司;

扫描电子显微镜 (SEM): SUPRA55 型, 德国 ZEISS 公司。

1.3 测试方法

(1) FTIR 分析。

分别截取绝缘导线上断裂部位以及未服役的

绝缘层在 FTIR 上分析失效导线的官能团。

(2) DTA 及 TG 测试。

采用 TG-DSC 仪测试, 氮气 100 mL/min, 升温速率为 20℃/min。

(3) SEM 分析。

先将样品放入真空镀膜机进行喷金处理, 后在 SEM 上观察失效样品的断面。

(4) 有限元模拟分析。

长度 5 m, 绝缘层为聚乙烯 (PE), 导体为钢芯铝绞线, 轴向受力 5 kN, 重力方向的位移是 3 cm。端部与远端设置成不同的接触类型, 模拟导线近端部的受力变形情况。

2 结果分析

2.1 失效架空绝缘电缆的 FTIR 分析

1630.55 cm^{-1} 处的特征吸收峰是 $-\text{RC}=\text{CR}-$ 的伸缩振动峰, 表明 PE 中存在断链; 1378 cm^{-1} 处是甲基对称变形振动峰, 说明 PE 中存在一定程度的支化; 875, 909, 965 cm^{-1} 处分别对应亚乙烯基、乙烯基、次亚乙烯基的伸缩振动峰, 表明 PE 在老化过程中存在不饱和度变化。氧化产物在 FTIR 谱图中则体现为不同的羰基吸收峰, 包括羧酸羰基 (1700 cm^{-1})、饱和脂肪酮羰基伸缩振动 (1714 cm^{-1})、酯羰基和醛羰基伸缩振动 (1733 cm^{-1})、 γ 内酯羰基伸缩振动 (1780 cm^{-1})。氧化的特征羟基指数为 1714 cm^{-1} 处酮羰基伸缩振动和 3400 cm^{-1} 处羟基的伸缩振动^[10,17]。图 2 为图 1 中 a~d 失效样品的 FTIR 谱图。

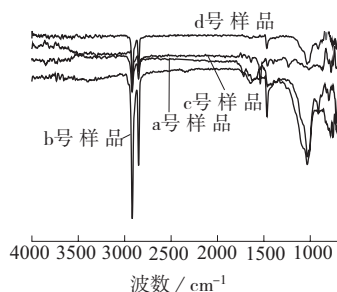


图 2 失效样品的 FTIR 谱图

从图 2 可看出, 样品都有的吸光度波数: 909 cm^{-1} (烯基 CH_2 面外摇摆, 来自于 PE 中微链撕裂、支化形成和不饱和基); 1028 cm^{-1} [$\text{O}(\text{CH}_2)_4$ 左右式异构体振动]; 1468 cm^{-1} (CH_2 面内弯曲振动); 3000~2800 cm^{-1} (脂族 C—H 的伸缩振动)。这些样品不同的地方表现在: a 号试样在 1719.05 cm^{-1} 和 1620.446 cm^{-1} 处的特征峰表明该样品可能存在氧化产物和断链; b 号样品仅有断链; c 号样品出现

了增塑剂 1580 cm^{-1} 处的邻苯二甲酸酯的苯环 C—C 骨架伸缩振动^[18]。从上述分析可看出,失效样品虽然在使用过程中受光、热、氧、水分和其它环境因素等的作用,但主要发生断链、微链撕裂和支化。仅有 a 号样品出现氧化老化现象。这与闫杰等^[12]的研究结果基本一致。老化未开始但力学性能下降。

2.2 TG 分析

图 3 为样品的 TG 分析结果。新样品 PE 失重率为 96.5885%,剩余的为炭黑。炭黑是作为光屏蔽剂加入的。随着炭黑用量的增加,耐光性逐步提高。但随着炭黑的增加,会增大 PE 分子间的距离,从而减弱交链 PE 分子间的作用力,使其耐环境应力开裂能力快速降低。国家标准规定炭黑量 $\leq 5\%$ 。可见除 a 号和 d 号样品外,其它失效样品的炭黑含量均符合要求。过多的炭黑降低了其耐环境应力开裂能力。这可能就是 a 号和 d 号样品过早失效的原因。

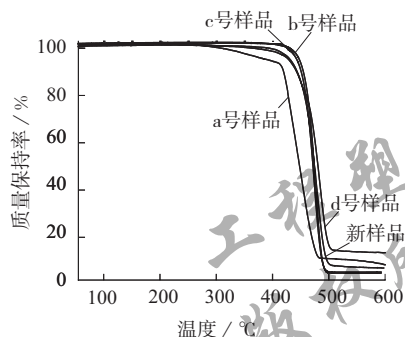
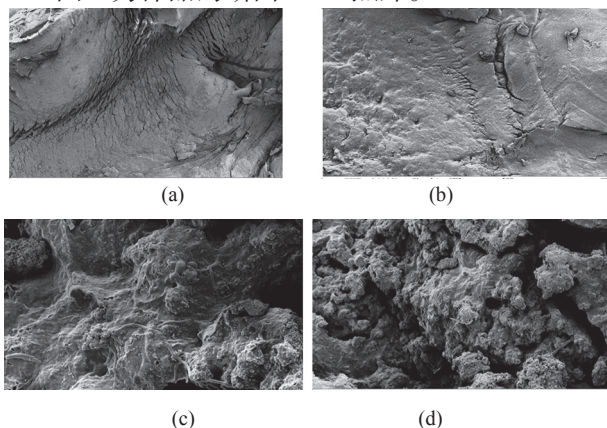


图 3 失效样品的 TG 曲线

2.3 SEM 分析

图 4 为样品的断面 SEM 照片。



a—a 号样品; b—b 号样品; c—c 号样品; d—d 号样品

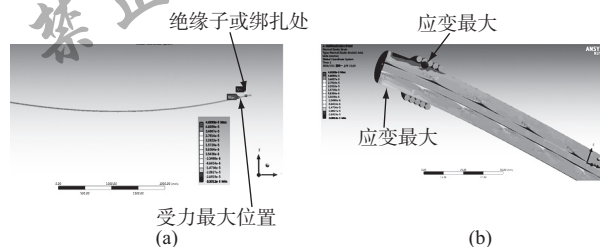
图 4 失效样品的 SEM 照片

从图 4 可看出,所有样品上都有大量裂纹。a 号样品断面平整,表面存在裂纹源,周围裂纹大量萌生,裂纹向纵深处发展,具有典型的脆性断裂特征。这可能与老化有关。b 号样品既有脆性断裂又有

韧性断裂区域。c 号样品尽管有裂纹,但断口呈纤维网丝状,网丝狭长、间隙微小,具有明显的韧性特征。d 号样品孔洞较多,不够致密,这可能与炭黑量较多有关。

2.4 断线处有限元初步模拟分析

图 5 为三维实体模型电缆架设状态 (5 m) 及电缆束缚处(绝缘子附近或绑扎处)静止时受力不均模拟结果。静止状态下,导线主要受到自重产生的轴向张力以及风动对束缚物产生的弹力。若有雷电,还可能存在雷电的电磁推力^[2]。图 5a 为束缚位置如绝缘子或绑扎处的受力情况,可知,在离束缚位置一定距离的地方存在最大的应力。在架空情况下(图 5b),束缚处的下部的应变变化范围较大,其中离束缚处一定距离应变最大。在导线上部的束缚处也存在一个范围较小的应变最大位置。这就说明了宏观失效图中导线的绑扎处下部裂纹明显很长,而相对应的另一边裂纹较少且绑扎处的左右没有明显裂纹的原因。这可能也是绝缘子附近容易出现“针孔”的诱因。



a—应力最大位置; b—应力最大位置附近的应变分布

图 5 三维实体模型电缆架设状态 (5 m) 及电缆绑扎处受力不均模拟结果

3 原因分析

3.1 架空绝缘导线“先天不足”

架空绝缘导线遭受雷击 80% 以上都是感应雷造成的^[1]。感应雷电流一般不会很大,大部分的感应雷电流不超过 1 kA,但感应过电压可以超过 384.6 kV,远远大于 10 kV 架空绝缘导线线路的耐压水平。有文献表明^[9],10 kV 配电线路跳闸的次数远远大于 35 kV 线路,因为 10 kV 线路的绝缘水平不可能做得很高,防雷存在着先天不足。电缆制备过程中存在炭黑过多增加了脆性。制备过程中很可能因为导线厚薄不均匀(某厂生产的绝缘导线厚度测试结果为 1.80~2.32 mm),在高感应过电压和受力作用下,容易在薄处出现针孔,在针孔处大电流产生的热量在短时间内破坏绝缘导线,导致导线的烧断。

3.2 电弧电流与“热”降低了绝缘材料的性能

在电弧中存在多种形式的粒子,带电粒子在频繁而激烈的无规律的紊乱碰撞过程中沿(或逆)电场方向运动,使带电粒子达到高温状态,把电能转换成热能。由于质量上的差异,电子的运动速度比正离子运动速度大得多,因此从电源吸取电能转换为热能的作用几乎完全是由电子来承担,在弧柱中外加电能大部分转换为热能,使绝缘材料的性能下降。由于工频续流未能及时切除,持续时间较长,受雷击时,若绝缘导线处于单向拉伸应力,主要呈现塑性;而当绝缘导线处于3个方向(电磁推力的反作用力垂直分量,自重产生的2个轴向张力)的应力下,则主要呈现脆性,尤其处于交变应力的作用,更因为脆性而发生断线事故^[2]。

4 结论

(1) 绝缘层的失效行为主要有:断面烧蚀、绝缘层表面有大量裂纹、绝缘层有明显的脆性、绝缘层内部可见明显的与钢芯铝绞线磨损的痕迹、钢芯铝绞线与绝缘层破损处锈迹斑斑。

(2) 失效样品主要表现出断链程度,氧化老化较少。炭黑量过多会使导线过早失效。

(3) 模拟实验表明,在绝缘子负荷侧存在最大的应力和应力变形。

(4) 架空绝缘导线设计上“先天不足”和电弧电流产生的热量的堆积使得绝缘导线力学性能降低,产生大量的裂纹。

总之,绝缘材料本身避免“绝缘薄弱处”是从根本上真正提高架空绝缘导线寿命的关键。其次要从生产、运输、安装、使用等过程确保绝缘电缆的绝缘性能处于允许的范围内。一旦绝缘导线投入运营,快速抑制和及时切断直击雷和感应雷在绝缘子附近的绝缘薄弱处所产生的工频续流是防止雷击断线的最重要措施。

参考文献

- [1] 刘仁洪. 浅谈 10 kV 配电线路常遭雷击的原因及防护[J]. 农村电工, 2006, 14(4): 30-31.
Liu Renhong. Discussion on the causes and protection of 10 kV distribution line struck by lightning[J]. Rural Electrician, 2006, 14(4): 30-31.
- [2] 谭振宁. 10 kV 配电线路雷击断线的机理与防护[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
Tan Zhenning. Mechanism and protection of 10 kV distribution broken by lightning[D]. Nanning: Guangxi University, 2011.
- [3] 李朝伟, 李洋. 提高 10 kV 配电线路标准化施工水平的措施研究[J]. 电子测试, 2016(3): 111-112.
Li Zhaowei, Li Yang. Research on the measures to improve the level of standardization construction of 10 kV distribution line[J]. Electronic Test, 2016(3): 111-112.
- [4] 王希, 王顺超, 何金良, 等. 10 kV 配电线路的雷电感应过电压特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 599-605.
Wang Xi, Wang Shunchao, He Jinliang, et al. Characteristics of lightning induced overvoltage of 10 kV distribution lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 599-605.
- [5] 韩晋平, 王晓丰, 马心良. 10 kV 架空绝缘导线雷击过电压与防雷综合措施研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2395-2399.
Han Jinpin, Wang Xiaofen, Ma Xinliang. Research on comprehensive protections of 10 kV overhead insulated distribution lines from lightning[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2395-2399.
- [6] 陈维江, 沈海滨, 陈秀娟, 等. 10 kV 配电网架空绝缘导线雷击断线防护[J]. 电网技术, 2007, 22(11): 34-37.
Chen Weijiang, Shen Haibin, Chen Xiujuan, et al. Measures to prevent lightning-caused breakage of overhead insulated conductors in 10 kV distribution networks[J]. Power System Technology, 2007, 22(11): 34-37.
- [7] Gimenez W, Hevia O. Method to Determine the parameters of the electric arc from test data[C] // appendice III: Articulos publicados en congresos internacionales. Tokyo: Ipstconf Org, 1999: 41-46.
- [8] Constantin S, Anghel P. Electric arc model for high power interrupters[J]. IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies, 2005, 24(3): 331-336.
- [9] 张鑫, 邓鹏, 徐鹏, 等. 10 kV 架空绝缘导线雷击断线原因机理分析及防护措施[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 65-69.
Zhang Xin, Deng Pen, Xu Peng, et al. Mechanism analysis and protective measures on the lightning break reason of 10 kV overhead insulation conductor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 65-69.
- [10] Grzybowski S, Rakowska A, Thompson J E. Aging of polyethylene for cable insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1988, 22(6): 729-734.
- [11] Seguchi T, Tamura K, Ohshima T, et al. Degradation mechanisms of cable insulation materials during radiation-thermal aging in radiation environment[J]. Radiation physics and chemistry, 2011, 80(2): 268-273.
- [12] 闫杰, 程德斌, 刘丽红. 几种常用电缆热带海洋环境下的老化趋势研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2015, 33(3): 7-10.
Yan Jie, Cheng Debin, Liu Lihong. Study on the aging trend of several frequently-used cables in tropic marine atmospheric environment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2015, 33(3): 7-10.
- [13] 霍振星. 基于 10 kV XLPE 电缆的绝缘老化分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.

- copolymer[J]. European Polymer Journal, 2003, 39(6):1 291–1 295.
- [4] 王曦林,程松波,余剑英,等. 不同单体接枝 SBS 改性沥青的性能研究[J]. 石油沥青, 2008, 22(4):26–29.
- Wang Xilin, Cheng Songbo, Yu Jianying, et al. Properties of grafted SBS modified bitumen with different monomers[J]. Petroleum Asphalt, 2008, 22(4):26–29.
- [5] 黄雪红,许国强. MMA、BA 与 SBS 接枝共聚的研究[J]. 石油化工, 1998, 27(9):648–652.
- Huang Xuehong, Xu Guoqiang. Study on graft copolymerization of MMA and BA on SBS[J]. Petrochemical Technology, 1998, 27(9):648–652.
- [6] 胡健,何金林,张明祖,等. 点击化学在拓扑结构聚合物合成中的应用[J]. 高分子学报, 2013(3):300–319.
- Hu Jian, He Jinlin, Zhang Mingzu, et al. Application of “Click” chemistry in synthesis of topological polymers[J]. Acta Polymerica Sinica, 2013(3):300–319.
- [7] Decker C, Nguyen T, Viet T. High-speed photocrosslinking of thermoplastic styrene-butadiene elastomers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2000, 77(9):1 902–1 912.
- [8] Lotti L, Coiai S, Ciardelli F, et al. Thiol-ene radical addition of L - cysteine derivatives to low molecular weight polybutadiene[J]. Macromolecular Chemistry & Physics, 2009, 210(210):1471–1 483.
- [9] Selvakumar S, Julius J P, Rajasekar S A, et al. Microhardness, FTIR and transmission spectral studies of Mg^{2+} , and Zn^{2+} , doped nonlinear optical BTCC single crystals[J]. Materials Chemistry & Physics, 2005, 89(2–3):244–248.
- [10] David R L A, Wei M H, Liu D, et al. Effects of pairwise, self-associating functional side groups on polymer solubility, solution viscosity, and mist control[J]. Macromolecules, 2009, 42(4):1 380–1 391.
- [11] Romani F, Passaglia E, Aglietto M, et al. Functionalization of SBR copolymer by free radical addition of thiols[J]. Macromolecular Chemistry & Physics, 1999, 200(3):524–530.
- [12] Hermann A, Mruk R, Roskamp R F, et al. Poly(N -isopropylacrylamide)-modified styrene-butadiene rubber as thermoresponsive material[J]. Macromolecular Chemistry & Physics, 2014, 215(1):32–43.
- [13] Moad G, Solomon D H. The Chemistry of free radical polymerization[M]. Oxford UK:Elsevier, 2005.
- [14] David J D, Wilkie C A. Chemical initiation of graft copolymerization of methyl methacrylate onto styrene-butadiene block copolymer[J]. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 1997, 35(5):965–973.
- [15] 李超,成煦,何其佳,等. 不同引发剂引发 SBS 接枝马来酸酐的机理研究[J]. 高分子学报, 2002(6):813–817.
- Li Chao, Cheng Xu, He Qijia, et al. Studies on the mechanism of SBS graft Maleic Anhydride with different initiators[J]. Acta Polymerica Sinica, 2002(6):813–817.
- [16] Schapman F, Couvercelle J P, Bunel C. Low molar mass polybutadiene made crosslinkable by silanemoities introduced via addition of thiol to double bond:3.Synthesis and kinetic study[J]. Polymer, 1998, 39(39):4 955–4 962.
- [16] 陈雷. 电缆图表手册[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社, 2014:169–178.
- Chen Lei. Cable diagram manual[M]. 2nd ed. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 2014:169–178.
- [17] 柯以侃,董慧茹. 分析化学手册(第3分册)光谱分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- Ke Yikan, Dong Huiru. Handbook of analytical chemistry (Edition 3) spectral analysis[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2004.
- [18] 王勇. 热老化对 RVV 电缆绝缘层内部结构与绝缘失效机理的研究[J]. 中国塑料, 2014, 28(12):67–73.
- Wang Yong. Effect of thermal aging on internal structure of RVV cable insulation[J]. China Plastics, 2014, 28(12):67–73.

(上接第 97 页)

Huo Zhenxing. Study on the insulation aging of 10 kV XLPE cable[D]. Tianjin:Tianjin University, 2009.

- [14] 戚革庆,林浩,宋文峰,等. 10 kV 架空绝缘导线烧蚀原因及防护措施[J]. 电网技术, 2014, 38(s1):96–100.
- Qi Geqing, Lin Hao, Song Wenfeng, et al. The reason of 10 kV covered conductor erosion and its protective measures[J]. Power System Technology, 2014, 38(s1):96–100.
- [15] 于洪才. 低压架空绝缘电缆选型的探讨[J]. 电线电缆, 1999(6):16–19.
- Yu Hongcai. Discussion on materials selection of low voltage overhead insulated cables[J]. Electric Wire & Cable, 1999(6):16–19.

欧洲塑料包装行业 2017 迎来发展利好

根据欧洲塑料行业的最大协会 IK 近期做的调研,70% 的受访者认为经济形势良好,30% 的受访者甚至对经济表示满意。欧洲塑料包装行业每年产值将近 140 亿欧元,每年生产将近 400 万 t 塑料产品,同时提供 9 万个就业岗位。

对 2017 年第一季度的预期也同样积极。然而,超过一半的受访者预计未来几周原材料成本将上升。IK 认为这可能会拉高包装的价格。

此外,2017 年与塑料包装行业息息相关的是可持续发

展。80% 的受访公司表示,他们将进一步投资能源效率,以此来改善气候平衡。

毫无疑问,补偿不断增加的能源费用将是一项大挑战。尤其是德国的可再生能源征收即能源消费者寻找资金周转的途径已达到创纪录的 6.88 欧分/千瓦时,让许多企业感受到巨大的压力。

IK 的董事总经理呼吁德国中央政府进一步采取措施,目前的补贴模式更像是计划经济产物,最终还是需要通过自由市场所取代。

(工程塑料网)