

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.11.029

吸水性对中压绝缘用尼龙 66 电气性能的影响^{*}

蔡凡一,薛健,周柏杰,陆德鹏

(南京南瑞集团公司智能电气装备事业部,南京 211000)

摘要:针对电力电网行业对中压用绝缘材料的性能要求,考察了吸水性对尼龙 66(PA66) 电气性能的影响情况。将 PA66 样品在不同条件下进行吸水处理后,分别对材料进行了介电强度、介电常数、介电损耗、电阻率等进行测试,获得了吸水率对 PA66 电气性能影响的规律。结果表明,PA66 的电气性能随着吸水率的增加而相应降低,但仍保持一定的绝缘能力,该结果将为 PA 等热塑性材料替代传统高性能环氧树脂绝缘材料、实现电力绝缘材料的环保化提供依据。

关键词:吸水性;尼龙 66;电气性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)11-0087-04

Influence of Moisture on Electrical Properties of Medium Voltage Insulation Nylon 66

Cai Fanyi, Xue Jian, Zhou Baijie, Lu Depeng

(Department of Intelligent Electrical Equipment, Nari Group Corporation, Nanjing 211000, China)

Abstract : According to the essential requirements on the medium-voltage insulation materials used in the power industry, the various standard and experimental moisture conditioning methods on electrical performance of nylon 66(PA66) such as dielectric strength, dielectric constant, dielectric loss and volume resistivity were studied. The effect of water absorption on the electrical properties of PA66 was obtained. The results show that electrical performance of PA66 decreases with the increase of water absorption, but still maintains a certain insulation capability. This results show that traditional epoxy resin insulation materials can be replaced by PA, which can provide reference for the environmental protection of electric insulation material.

Keywords : moisture ; PA66 ; electrical performance

中压开关、配电绝缘子是配电网中广泛应用的电气设备,其电压等级一般在 12~40.5 kV。随着电网及终端电力用户对开关设备小型化、维护成本、耐用性等要求的提高^[1-3],采用环氧树脂、酚醛树脂等作为绝缘介质的紧凑型、小型化电气设备的应用日渐广泛。但上述产品制件厚度大、产品笨重以及抗开裂性较差,同时以上材料均为热固性材料,在成型固化后无法回收并重新利用,形成的固体废料在正常条件下难以降解成对环境无害的产物或可重复利用的化工原料^[4],将对环境造成累积型污染,与环保型、可持续发展型社会的建设与发展需求相悖,同时也严重降低产品技术优势和生命周期。国外知名电气厂家已纷纷开展利用轻质高强尼龙(PA)作为环氧绝缘制件的替代材料的研究工作,并陆续推出相关产品。这项技术革新在提高产品性能、降低制品成本和重量的同时,亦可解决绝缘产品的回收问题。同时,将大大降低 CO₂ 的排放量,仅固封极柱一项产品,即可减少约 50% 多的 CO₂ 排放(每年约为 3 000 t)^[5-6]。

PA 及其复合材料具有强度高、耐冲击、耐高温、优异的加工特性以及绝缘性能好等诸多优点^[7],是一种综合性能优异的绝缘材料。PA 材料用于交流绝缘电器实例包括交流接触器^[8]、继电器^[9]、小型断路器^[10]等。但目前国内电气厂家的产品,除了绝缘拉杆外,PA 制品主要用于低压电器领域(低于 10 kV),其原因在于 PA 具有较高的吸水性,通常认为 PA 材料不适合作为高频和在湿态下工作的电绝缘材料。所以,PA 材料在中高压领域的应用受到很多限制^[6]。

笔者主要考察了尼龙 66(PA66)在不同条件下的吸水情况,以及在不同吸水率情况下包括击穿强度、介电常数、介电损耗等电气性能指标变化情况。为 PA 材料在中压电气领域中的产品设计和应用提供实验依据。

^{*} 国家电网公司 2014 年科技项目(可循环利用环保型固体绝缘材料研究)

联系人:蔡凡一,博士,主要从事绝缘材料的开发与应用研究

收稿日期:2015-09-01

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA66: EPR27, 平顶山神马工程塑料有限责任公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机: CTE35 型, 科倍隆(南京)机械有限公司;

高速混合机: ZHL-100 型, 震龙塑料机械有限公司;

注塑机: SA900 II / 260 型, 宁波海天塑机集团有限公司;

工频高电压设备: 定制, 北京冠测仪器有限公司;

漏电起痕试验仪: NLD-BII 型, 北京冠测仪器有限公司;

高精度高压电容电桥: BR34 型, 上海精密科学仪器有限公司。

1.3 性能测试

介电强度: 采用等直径电极, 按照 IEC 60243 测试标准, 样品尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 升压速率设为 2.0 kV/s 进行测试。

介电常数 / 介电损耗: 采用圆盘状电极, 按照 IEC 60250-1969 测试标准, 样品尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 进行测试。

体积电阻率 / 表面电阻: 采用高精度高压电容电桥, 按照 IEC 60093-1980 测试标准, 样品尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 电化时间 2 min 进行测试。

吸水性: 采用自然敞口放置、恒温恒湿箱调节、水煮、烘箱烘干的方法, 按照 ISO 62-2008 标准, 得到不同吸水率的试样。

1.4 吸水处理

通过真空干燥、室温水浴, 沸水浴、恒温恒湿调节等方法获得了不同吸水率的试样, 处理条件见图 1。不同方式处理后的样品分别标记为 1#, 2#, 3#, 4#, 5#。

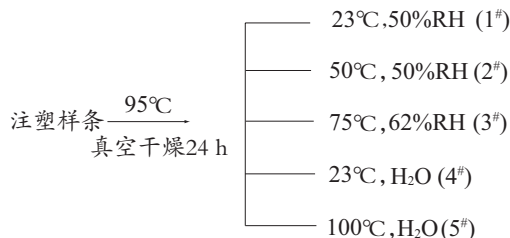


图1 试样的不同吸水处理过程

样品 i 的相对吸水率 C_i 由下式可得:

$$C_i = (m_i - m) / m \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_i 为不同处理方式后样条的质量, m 为在 95°C 真空干燥 24 h 后注塑样条的质量。

2 结果与讨论

2.1 吸水性测试

图2为不同测试方法下 PA66 吸水率的变化。在相同时间内, PA66 的吸水率会随着环境湿度以及温度的增加而增大。在沸水中浸煮 10 h 样品的吸水率即可达到 7% 以上, 而在 $23^\circ\text{C} / 50\%\text{RH}$ 条件下自然吸水 1000 h , 吸水率仅为 1.2% 。由此可见, 不同的测试方法对 PA66 吸水率的影响非常大。

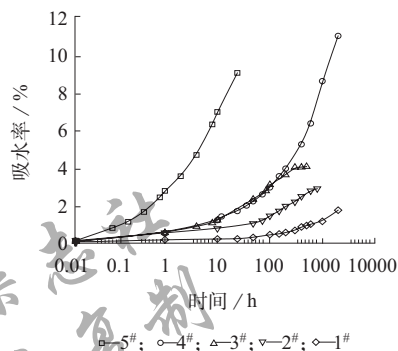


图2 不同测试方法下 PA 吸水率的变化

2.2 不同吸水性对 PA66 介电强度的影响

介电强度 (E) 是指物质能抗击穿 (材料结构遭到破坏) 和放电的最高电压梯度, 定义为击穿电压 (U) 与绝缘体厚度 (d) 的比值, 即 $E=U/d$, 对于不同厚度的试样, 其工频交流击穿强度和试样厚度之间存在指数衰减的相关关系。这是由材料的边缘效应、热效应、材料缺陷三方面的原因导致^[1]。当样品厚度相同时, 绝缘材料介电击穿电压的变化即体现了其介电强度的变化。对不同含水率的 PA66 试样进行介电强度测试, 得到其随吸水率变化的实验数据, 见图 3。

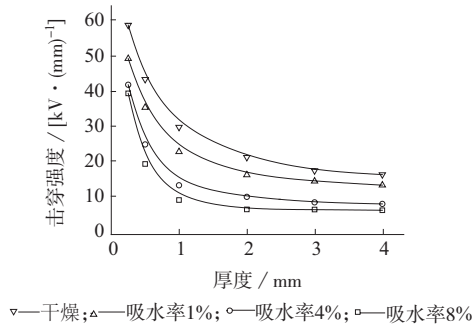


图3 样品厚度、吸水率对 PA66 击穿强度的影响

对于相同厚度的标准样片 (IEC 60243-1) 而言, 吸水率每增加 1% , 其介电强度约降低 $6\% \sim 8\%$ 。这是因为当 PA66 的吸水率增大时, 材料结晶度随之下降, 导致材料的局部缺陷增多。同时由于介电损

耗增加,导致在交变电场作用下产生热效应增加,导致样品更易被发生热击穿。但需要指出的是,吸湿状态下的 PA66 材料仍具有一定的绝缘性能,仅就介电强度这一项指标而言,1% 吸水率的 4 mm 厚的 PA66 样品,其击穿电压约为 54 kV,这在中压领域 (12 ~ 40.5 kV) 的应用仍是有一定余量的,即材料发生本体的击穿可能性不大。

另一方面,样品通过不同的方法达到相同吸水率时,材料的性能也会有一定的区别,该变化很可能是由于材料在厚度方向吸水分布的不均一所导致。笔者考察了通过不同处理方法达到相同吸水率时 PA66 材料的介电强度,见图 4。经过水煮,快速吸水材料相较于自然吸水的材料,其介电强度约有 2 ~ 3 kV 的降低。

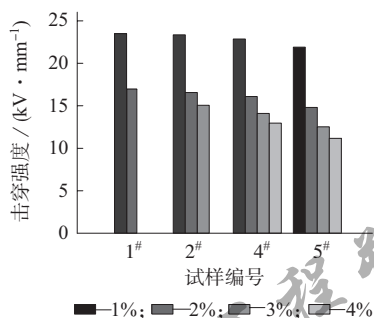


图 4 不同处理方法达到相同吸水率时 PA66 的击穿强度

2.3 吸水率对体积电阻率的影响

PA66 的体积电阻率对吸水率的依赖性见图 5。

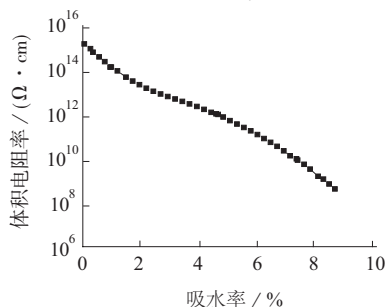


图 5 吸水率对 PA66 体积电阻率的影响

对于 PA,在干态至 8% 吸水率的情况下,吸水率每增加 1%,体积电阻率就减小约 1 个数量级。究其原因,PA 的分子结构决定了其导电性能,PA 材料为极性高分子,而水分子的存在将会增加极性高分子——PA 的极化度,同时其极性基团 (酰胺基) 在极性水分子的作用下将会导致分子间库仑力降低,极性基团可能发生本征解离,提供导电离子。故吸水率的增加将会导致 PA 电阻率的降低。类似介电强度,即使 PA66 的吸水率达到 4%,其体积电阻率也在 $1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,仍具有一定绝缘性能。

而国标对于中压环氧的电阻率指标也在相同数量级 (参照 IEC 60455-3-1-2003 的系列化标准及 GB/T 15022-1994 系列化标准)。

2.4 吸水率对介电常数、介电损耗的影响

吸水率对 PA66 介电损耗和介电常数的影响分别见图 6 和图 7。随着吸水率的增加,这 2 项参数均随之增加。水在低频条件下,以离子电导的形式增加电导电流,从而引起介电损耗。

根据经典的 Maxwell-Garnett 理论,两相复合材料的近似介电常数 (ϵ) 可近似推算: $\epsilon = \epsilon_m + 3f\epsilon_m \frac{\epsilon_1 - \epsilon_m}{\epsilon_1 + 2\epsilon_m}$, ϵ_1 和 ϵ_m 分别为掺入相 (H_2O , $\epsilon_1=80$) 和基体相绝缘材料 (PA, $\epsilon_m=3 \sim 4$) 的介电常数。那么随着 PA 吸水的增加,其介电常数必然随之增加。同时从图 7 中可以看出,不同的吸水方法会导致水分子与 PA66 材料的结合程度有差别,导致在相同吸水率的情况下介电常数不一致。

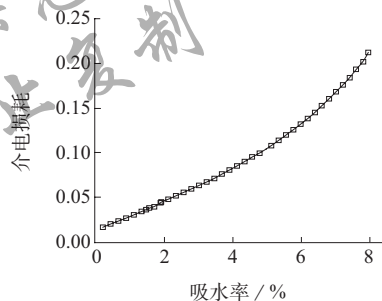


图 6 吸水率对 PA66 介电损耗的影响

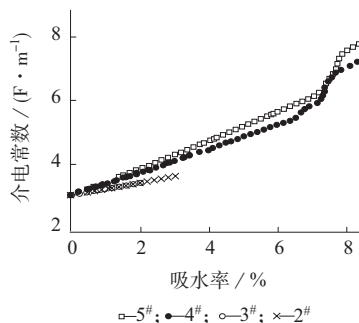


图 7 吸水率对 PA66 介电常数的影响

3 结论

(1) 在不同的吸水测试方法下,PA66 材料的吸水程度差别很大,在沸水中其吸水率在 24 h 内即可达到 9%,而在空气中室温自然吸水 (50%RH) 1000 h 其吸水率仅可达到 1.2%,同时不同的吸水测试方法都有相应的缺陷,可根据需要选择合适的测试方法。

(2) PA66 的介电强度、体积电阻率随吸水率的升高而降低。介电损耗、介电常数也有相应幅度的增加。但在一定的吸水率范围内,PA66 仍具有相

当的绝缘性能,在中压领域仍有一定的应用潜力。

参考文献

- [1] 纪江辉,张杰,王小丽,等.中压开关设备复合绝缘及固体绝缘技术研究[J].电工电气,2015(6):23-29.
- Ji Jianghui, Zhang Jie, Wang Xiaoli, et al. Research on insulation technology of medium and high voltage switchgear[J]. Electrotechnics Electric, 2015(6):23-29.
- [2] 彭蛟.中压固体绝缘技术的发展[J].电气时代,2012(5):76-77.
- Peng Jiao. Development of medium voltage solid insulation technology[J]. Electric Age, 2012(5):76-77.
- [3] 孙竹森,兰剑.环保型金属封闭开关设备的技术特点与发展趋势[J].中国电机(技术版),2014(6):53-56.
- Sun Zhusen, Lan Jian. Technical characteristics and development tendencies of environment-friendly switchgears[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2014(6):53-56.
- [4] 吴仲伟.热固性塑料机械物理法再生及再资源化研究[D].合肥:合肥工业大学,2013.
- Wu Zhongwei. Research on regeneration and recycling of thermosetting plastics based on mechanical and physical methods [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [5] Sekula R, Ruemenapp T, Ljuslinder M, et al. Green for growth—recycling makes products greener[J]. ABB Review, 2009(2):10-16.
- [6] Fugel T, Gentsch D, Klaska A, et al. Breaking ahead of expectations [J]. ABB Reviews, 2010(1):57-62.
- [7] 彭治汉,施祖培.塑料工业手册——聚酰胺[M].化学工业出版社,2001.
- Peng Zhihan, Shi Zupei. Handbook of plastic industry—Polyamide [M]. Chemical Industry Press, 2001.
- [8] 张伟,别群梅,袁锦瑶.高CTI值、无卤阻燃玻纤增强尼龙66的研究及应用[J].工程塑料应用,2006,34(8):50-53.
- Zhang Wei, Bie Qunmei, Yuan Jinyao. Study on high CTI value, halogen free flame-retardant glass fibre reinforced nylon 66[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(8):50-53.
- [9] 石建江,陈宪宏,肖鹏.阻燃玻纤增强尼龙66的研制及其应用[J].工程塑料应用,2006,34(1):35-37.
- Shi Jianjiang, Chen Xianhong, Xiao Peng. Development and application of flame-retardant glass fiber reinforced PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(1):35-37.
- [10] 陈武荣,钟立松,刘有龙,等.无卤阻燃增强尼龙塑料的研究[J].绝缘材料,2007,40(3):1-3.
- Chen Wurong, Zhong Lisong, Liu Youlong, et al. Study on halogen-free flame-retarded nylon molding compound with high strength[J]. Insulating Materials, 2007, 40(3):1-3.
- [11] 吴博,庞承焕.吸水率对尼龙6介电强度的影响研究[J].塑料工业,2010,38(6):44-46.
- Wu Bo, Pang Chenghuan. Study the influence of water absorption on the dielectric strength of nylon 6 [J]. China Plastics Industry, 2010, 38(6):44-46.

陶氏化学推荐易广道™水性环保跑道解决方案

陶氏化学公司是国际领先的多元化学公司,旗下建筑用化学品业务部致力于通过建筑化学专业技术、科学及全球网络,为我国的教育系统提供安全、环保且可持续性的创新性解决方案,其中首推应用于跑道领域的易广道™水性环保跑道专用胶粘剂技术。

“陶氏一直重视青少年的教育和健康成长我们希望能够携手学校和行业,共同努力为青少年构建安全健康舒适的运动环境和完善的校园基础设施体系。”陶氏建筑用化学品亚太区商务总监严载谈道。“水性化产品以其卓越的物理性能、耐久性及环保指标在内外墙涂料、功能性涂料到建筑粘合剂领域,均得到了市场的认可,技术已达到较成熟的阶段。随着大众对挥发性有机物污染的认识以及对校园设施安全的重视,健康安全的水性化产品将有更广阔的前景。”

据第六次全国体育场地普查数据公报,我国的教育系统中共有66万个体育场地,其中中小学体育场地超过58万个,占全国体育场地总数量的34.5%。因此塑胶跑道进一步朝着更加健康环保、充分的运动功能和适当的建设成本等方向发展,对于保障青少年儿童的身体健康、提高身体素质具有重要的现实意义。

采用全新理念研发的易广道™水性跑道胶粘剂以水性纯丙烯酸树脂为基础,不含有害添加剂和溶剂,干燥和固化

速度快,适应喷涂或机械摊铺等不同的施工要求,不仅在施工过程中无异味,不影响学校正常教学和周围居民正常生活,在使用时也无异味、无有害物质排放。采用易广道™水性跑道胶粘剂制作的跑道具有良好的力学性能,满足相关国家标准的要求,保护孩子们的运动安全。其优异的耐水性、耐老化性能和色彩保持能力确保在户外长期使用依然美观耐用。除了对使用者和施工者无危害,其安全性更全面体现在生产、存储、运输过程。

陶氏建筑化学品业务部在推出水性环保型塑胶跑道技术的同时,也向教育系统推出了“健康运动新环境”的整体解决方案,包括运动球场、室内外地坪、防滑走道、弹性屋面涂料、无甲醛保温等技术和产品,为建设绿色校园提供安全、环保、节能的整体解决方案。目前陶氏开发的水性跑道已在上海、北京、吉林、江苏、安徽、湖南、福建、河南、江西、重庆等多地的小学、中学和大学以及健身步道、训练基地等场地应用,受到了施工单位和用户的广泛好评。

2015年4月,陶氏发布了“2025可持续发展目标”,承诺将继续减少自身业务对环境的影响,通过可持续的产品和解决方案,推动社会朝着可持续发展的方向转变。陶氏每年评选最能体现可持续未来的解决方案并授予“责任关怀奖”,陶氏建筑用化学品业务部的易广道™水性环保跑道解决方案荣获2014年度奖项。

(环球聚氨酯网)