



核电厂安全壳中压电气贯穿件绝缘支撑盘绝缘耐潮性能试验分析

郭 星, 陈 青, 王广金, 周 天, 邱新媛, 周 缘, 赵雨恒

Test Analysis of Insulation and Moisture Resistance of Insulation Support Plate of Electrical Penetration in Containment of Nuclear Power Plant

Guo Xing, Chen Qing, Wang Guangjin, Zhou Tian, Qiu Xinyuan, Zhou Yuan, and Zhao Yuheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0233>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国内在役核电厂首例电气贯穿件更换改造

Modification of First Electrical Penetration in Domestic Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(2): 140–144

基于三代核电技术的电气贯穿件导体组件研制

Development of Feedthrough Assembly for Electrical Penetration Assembly Based on Third-Generation Nuclear Power Technology

核动力工程. 2019, 40(4): 153–156

核电厂电气贯穿件设备延寿再鉴定方法研究

Study on Life Extension and Re-Qualification Method for Electrical Penetration Assembly of Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(1): 140–144

三代核电厂电气贯穿件用屏蔽双绞导体组件的设计及验证

Design and Verification of STP Feedthrough of EPA for Third Generation NPPs

核动力工程. 2019, 40(3): 155–158

内置稳压隔热水层的设计与数值研究

Design and Numerical Research of Thermal Insulation Water Layer for Built-in Pressurizer

核动力工程. 2019, 40(1): 78–81

核电厂安全壳地坑过滤器化学效应试验研究

Experimental Study on Chemical Effects of Nuclear Power Plant Sump Strainer

核动力工程. 2019, 40(5): 124–129



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)04-0233-06; doi:10.13832/j.jnpe.2021.04.0233

核电厂安全壳中压电气贯穿件绝缘支撑盘 绝缘耐潮性能试验分析

郭 星, 陈 青, 王广金, 周 天, 邱新媛, 周 缘, 赵雨恒

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 针对中国核动力研究设计院 (NPIC) 设计生产的中压电气贯穿件的绝缘支撑盘注塑材料聚砜, 测试其吸水率、介质损耗、相对介电常数, 绝缘电阻、体积电阻率、表面电阻率、介电强度等随环境温度和相对湿度的变化趋势。测试结果表明, 环境相对湿度对聚砜材料的吸水率影响显著, 23℃ 时湿度由 30% 增至 98%, 对应吸水率由 0.012% 增至 0.106%, 增幅高达 783.3%; 绝缘电阻随环境温度和相对湿度的增大而逐渐减小, 降幅最高达 99.82%, 但绝缘支撑盘相间绝缘电阻始终大于 200 TΩ; 绝缘电阻受表面电阻率影响较大, 绝缘电阻和表面电阻率随环境温度和相对湿度的变化趋势非常接近; 相对介电常数和介电强度受环境温湿度影响很小。因此, NPIC 设计生产的中压电气贯穿件绝缘支撑盘耐潮性能和电气绝缘性能优良, 能够在高电压和高温高湿环境中稳定可靠工作。

关键词: 电气贯穿件; 绝缘支撑盘; 聚砜; 吸水率; 绝缘电阻; 介电特性

中图分类号: TL48; TM855 **文献标志码:** A

Test Analysis of Insulation and Moisture Resistance of Insulation Support Plate of Electrical Penetration in Containment of Nuclear Power Plant

Guo Xing, Chen Qing, Wang Guangjin, Zhou Tian,
Qiu Xinyuan, Zhou Yuan, Zhao Yuheng

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: The variation trend with temperature and relative humidity of water absorption, dielectric loss, relative permittivity, insulation resistance, volume resistivity, surface resistivity, and dielectric strength of polysulfone are measured. Polysulfone used as the insulating support plate on the medium voltage electrical penetration is designed and produced by Nuclear Power Institute of China (NPIC). The result shows that the relative humidity of environment has a significant effect on the water absorption of polysulfone. When the ambient temperature is 23℃ and the relative humidity increases from 30% to 98%, the corresponding water absorption increases from 0.012% to 0.106%, with a growth rate of 783.3%. The insulation resistance decreases gradually with the increasing of ambient temperature and relative humidity, with a maximum decreasing of 99.82%. However, the interphase insulation resistance of the insulation support plate of the electrical penetration is always greater than 200 TΩ. At the same time, the insulation resistance is greatly affected by its surface resistivity. The variation trend of insulation resistance and surface resistivity with ambient temperature and relative humidity is very close. The relative permittivity and dielectric strength are little affected by the ambient temperature and humidity. The insulation support plate of

收稿日期: 2020-02-20; 修回日期: 2020-06-22

作者简介: 郭 星 (1993—), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 现主要从事反应堆通用设备设计与研发以及电气设备故障诊断等研究工作,

E-mail: guoxing_npc@163.com

the medium voltage electrical penetration designed and produced by NPIC is with excellent moisture resistance and electrical insulation performance, and can work stably and reliably in high voltage, high temperature and high humidity environment.

Key words: Electrical penetration, Insulation support plate, Polysulfone, Water absorption, Insulation resistance, Dielectric properties

0 引言

电气贯穿件是安装在核电厂安全壳上,用于各类电缆贯穿安全壳屏障的专用设备^[1-2]。在反应堆正常运行和事故工况下,电气贯穿件能够维持设备电气连续性和压力边界完整性,防止放射性物质外泄,为反应堆冷却剂泵电动机提供三相电力^[3-4]。绝缘支撑盘作为中压电气贯穿件起机械支撑和电气绝缘作用的部件,须同时满足电气绝缘性能和机械强度要求,从而既不会因绝缘降低导致沿面放电或绝缘击穿^[5-6],还能抵消短路时电动应力造成的冲击^[7-8]。

近年来我国在运核电厂中压电气贯穿件相继发生两起因绝缘支撑盘处绝缘击穿导致的短路事故,致使非计划停堆。上述故障电气贯穿件均为国外同一厂家同一批次的产品。国内外各贯穿件设计生产厂家均将绝缘支撑盘作为整机的一部分开展试验,未对绝缘支撑盘单独进行试验评估^[1,4]。

中国核动力研究设计院(NPIC)设计生产的中压电气贯穿件绝缘支撑盘所用材料为聚砜(PSU),绝缘性能优良^[9],广泛应用于恶劣环境中的机械支撑结构件和电气绝缘零部件。杨文彬、李明等采用扫描电子显微镜(SEM)等手段对聚砜导热绝缘复合材料的微观形貌和电绝缘性能进行了研究^[10-11],详细研究了复合成型对其导热绝缘性能的影响^[12];西北工业大学李珺鹏等以聚砜改性环氧树脂为基体,研究了不同粒径及不同氮化硼导热粒子用量对复合材料导热性能和电性能的影响^[13]。但是,上述研究及公开发表文献均未涉及聚砜材料应用于实际工程产品时的宏观电气绝缘和耐潮性能。

中压电气贯穿件绝缘支撑盘长期工作于电压较高的湿热环境中,对电气绝缘性能有较高要求。因此,本研究对NPIC中压电气贯穿件绝缘支撑盘的耐潮吸湿性能和介电温湿度性能开展了详细研究,为工程实际和产品设计提供参考依据。

1 试样和试验方法

1.1 试验样品制备

将聚砜绝缘支撑盘按标准规定制备成介电性能温湿度特性测试的试样,用无水乙醇清洗后置于40℃环境中烘干24h备用。

1.2 试验方法

采用AX224ZH/E密度天平,按GB/T 1034的规定测量材料的吸水率^[14];采用ZC-90G高绝缘电阻测量仪按GB/T 10064的规定测试试样的绝缘电阻^[15],按照实际中压电气贯穿件导体在绝缘支撑盘上的安装位置设置电极测试整盘的绝缘电阻;采用精密损耗因数及电容测量电桥按GB/T 1409和GB/T 10580的规定测试材料的介质损耗和相对介电常数^[16-17];采用ZC-90G高绝缘电阻测量仪按GB/T 1410和GB/T 10580的规定测试试样的体积/表面电阻率^[17-18],在测量体积电阻率时施加电压在材料内形成场强应以不改变材料导电机理为前提^[19-20];按GB/T 1408.1和GB/T 10580的规定^[17,21-22]测试试样的工频击穿场强,即介电强度;采用KTHC-015TBS恒温恒湿试验机对聚砜试样在相同环境温度(23℃)、不同环境相对湿度(30%、50%、70%、90%、98%)和相同环境相对湿度(90%)、不同环境温度(15、25、35、45、55℃)下处理24h后开展试验。

2 结果及分析

2.1 材料吸水率

按标准要求制备尺寸(长×宽×厚)为50mm×50mm×2mm的试样3块,在不同环境下试样吸水率试验结果以平均值为准,试样吸水率随环境湿度和环境相对湿度变化趋势如图1所示。

环境相对湿度保持90%不变,随着环境湿度的增加,聚砜材料吸水率逐渐增大,增大速率基本保持不变,呈线性相关。环境温度15℃时吸水率为0.07%,55℃时为0.16%,增幅为128.6%。

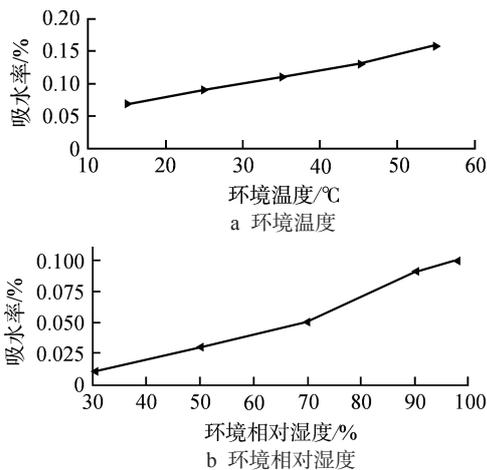


图1 聚砜材料吸水率随环境温度和湿度变化趋势

Fig. 1 Trend of Water Absorption of Polysulfone with Temperature and Relative Humidity

环境温度保持 23℃ 不变，随着环境相对湿度的增加，聚砜材料吸水率逐渐增大，环境相对湿度大于 70% 后，吸水率增大速率进一步增加。环境相对湿度 30% 时吸水率为 0.012%，98% 时为 0.106%，增幅为 783.3%。可以看出，环境温度和湿度均会显著影响聚砜材料的吸水率。

测试聚砜材料在不同温度的水中的吸水率，其随水温变化趋势如图 2 所示。随水温增加，聚砜材料吸水率不断增大，增加速率总体随温度增加呈放缓趋势。在试验水温范围内，温度显著影响该材料的吸水率，水温为 15℃ 时吸水率为 0.1%，55℃ 时为 0.25%，增幅达 150%。

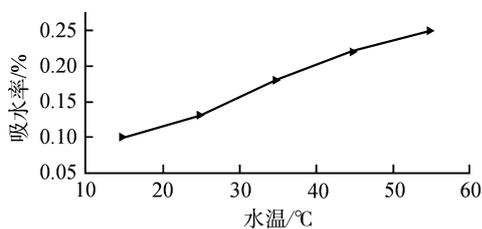


图2 聚砜材料吸水率随水温变化趋势

Fig. 2 Change Trend of Water Absorption of Polysulfone Material with Water Temperature

2.2 绝缘电阻

按标准要求制备尺寸（长×宽×厚）为 100 mm×50 mm×2 mm 试样 3 块，在不同环境下试样绝缘电阻试验结果以平均值为准。试样绝缘电阻随环境温度和湿度变化趋势如图 3 所示。

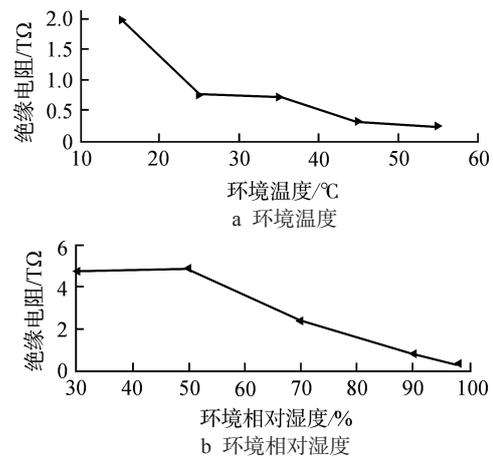


图3 聚砜试样绝缘电阻随温度和湿度变化趋势

Fig. 3 Change Trend of Insulation Resistance of Polysulfone with Temperature and Relative Humidity

环境相对湿度保持 90% 不变，随着环境温度的增加，试样绝缘电阻逐渐减小，其减小速率受温度影响较大，在不同的温度范围下降速率显著不同，下降速率呈先增大后减小又增大的变化规律。

环境温度保持 23℃ 不变，随着环境相对湿度增加，试样绝缘电阻在环境相对湿度低于 50% 时基本保持不变，环境相对湿度大于 50% 后逐渐减小。对比试样吸水率和绝缘电阻随环境相对湿度变化趋势可以发现，吸水率越大，试样绝缘电阻减小趋势显现出一定的饱和特征，试样绝缘电阻下降速率并不随吸水率的增大而持续增加。

在不同环境温度和湿度下，对绝缘支撑盘实际运行时导体组件安装处设置加压电极，整盘绝缘电阻随环境温度和湿度变化趋势如图 4 所示。

环境相对湿度保持 90% 不变，随着温度的增大，整盘绝缘电阻逐渐减小，环境温度低于 45℃ 时整盘绝缘电阻值减小速率更快。环境温度为 25℃ 时整盘绝缘电阻为 $69.9 \times 10^{14} \Omega$ ，环境温度升至 55℃ 时，整盘绝缘电阻为 $1.45 \times 10^{14} \Omega$ ，降幅为 97.93%。

环境温度保持 23℃ 不变，随着环境相对湿度增大，整盘绝缘电阻值逐渐减小，环境相对湿度低于 50% 时下降速率较小，在 50%~70% 时下降速率最快，大于 70% 之后下降逐渐减小。环

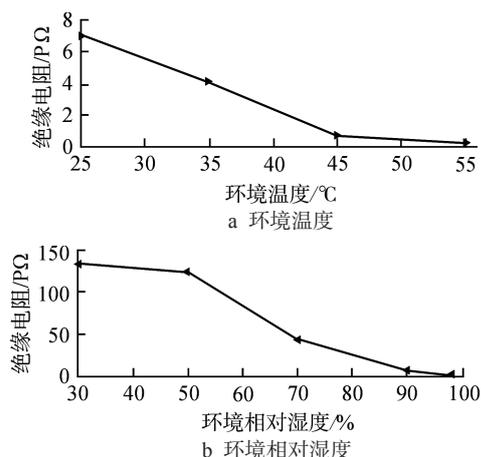


图4 绝缘支撑盘相间绝缘电阻随环境温度和相对湿度变化趋势

Fig. 4 Change Trend of Insulation Resistance of Insulation Support Board with Temperature and Relative Humidity

境相对湿度为30%时,整盘绝缘电阻为 $1340 \times 10^{14} \Omega$, 增加至98%时降为 $2.37 \times 10^{14} \Omega$, 降幅为99.82%, 但整盘绝缘电阻始终大于 $200 T\Omega$ ^[23]。由此可见, 环境温度和环境相对湿度均会显著影响整盘绝缘电阻。

2.3 介质损耗和相对介电常数

按标准要求制备尺寸(长×宽×厚)为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 试样3块, 介质损耗和相对介电常数试验结果以平均值为准, 介质损耗和相对介电常数随环境温度和环境相对湿度的变化趋势分别如图5和图6所示。

环境相对湿度保持在90%不变, 环境温度

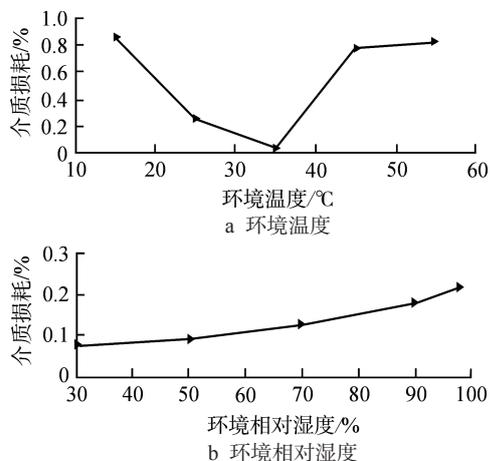


图5 聚砜介质损耗随温度和相对湿度变化趋势

Fig. 5 Dielectric Loss of Polysulfone Change with Temperature and Relative Humidity

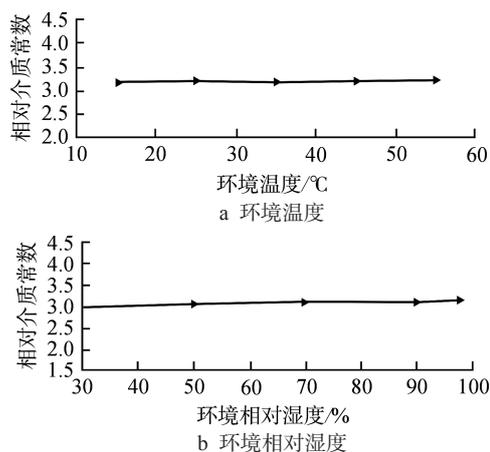


图6 聚砜相对介电常数随温度和相对湿度变化趋势

Fig. 6 Relative Permittivity of Polysulfone Change with Temperature and Relative Humidity

低于 25°C 时, 聚砜材料介质损耗随环境温度增加逐渐减小, 环境温度为 15°C 时介质损耗为 0.859%, 环境温度为 25°C 时介质损耗为 0.242%, 降幅为 71.83%。环境温度大于 25°C 之后, 介质损耗随环境温度增加而不断增大, 增大速率逐渐变小。

环境温度保持 23°C 不变, 随环境相对湿度的增加, 聚砜材料介质损耗逐渐增大, 增大速率随相对湿度的增大而不断变大。环境相对湿度为 30% 时介质损耗为 0.074%, 环境相对湿度为 98% 时介质损耗为 0.222%, 增幅达 200%。

在环境温度和环境相对湿度均发生变化时, 聚砜材料相对介电常数基本不发生变化, 保持在 3.00~3.21 之间。环境温度变化时相对介电常数标准差为 0.017, 环境相对湿度变化时相对介电常数标准差为 0.053。

2.4 体积和表面电阻率

按标准要求制备尺寸(长×宽×厚)为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 试样3块, 在不同环境下体积电阻率和表面电阻率试验结果以中值为准, 体积电阻率和表面电阻率随环境温度和相对湿度变化趋势分别如图7和图8所示。

分别当环境温度保持 23°C 不变、相对湿度从 30%~98% 逐渐增加和环境相对湿度保持 90% 不变、环境温度从 15°C ~ 55°C 逐渐增加时, 聚砜试样体积和表面电阻率逐渐减小, 在不同的环境温度和相对湿度范围内减小速率不同。对比图8、图3和图4可知, 聚砜试样绝缘电阻受其表面电

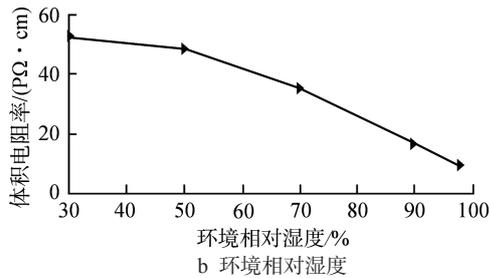
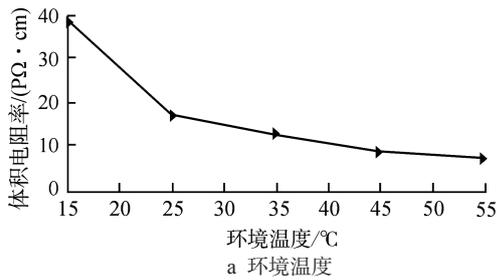


图7 聚砜试样体积电阻率随温度和相对湿度变化趋势
Fig. 7 Dielectric Volume Resistivity of Polysulfone Change with Temperature and Relative Humidity

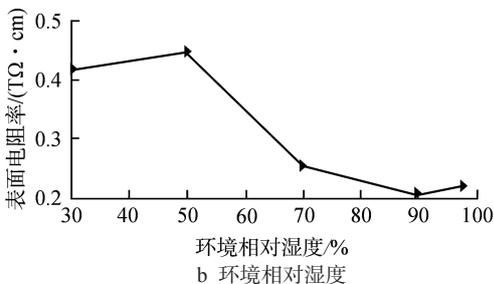
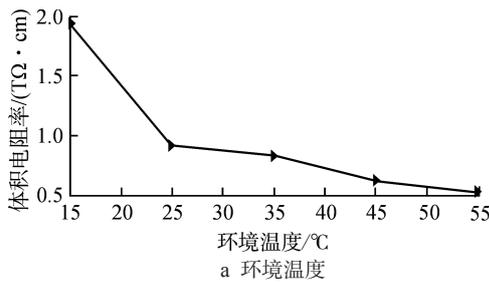


图8 聚砜试样表面电阻率随温度和相对湿度变化趋势
Fig. 8 Dielectric Surface Resistivity of Polysulfone Change with Temperature and Relative Humidity

阻率影响较大，聚砜试样绝缘电阻和表面电阻率随环境相对湿度和温度的变化趋势很接近。

2.5 介电强度

按标准要求制备尺寸(长×宽×厚)为100 mm×100 mm×3 mm 试样3块,在不同环境下介电强度试验结果以中值为准,介电强度随环境温度和相对湿度变化趋势如图9所示。

聚砜材料介电强度受环境温度和相对湿度

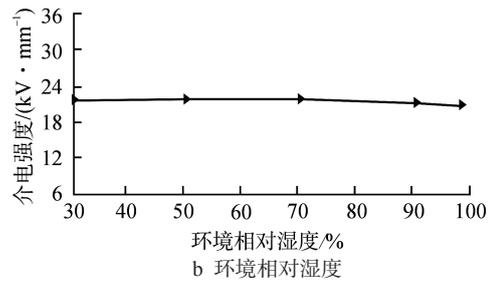
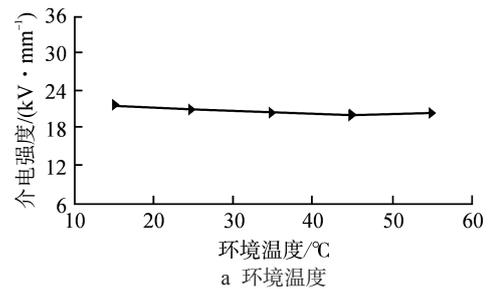


图9 聚砜材料介电强度随温度和湿度变化趋势
Fig. 9 Change Trend of Dielectric Strength of Polysulfone Samples with Temperature and Relative Humidity

度的影响较小,环境相对湿度保持不变且环境温度变化时介电强度标准差为0.421 kV/mm,环境温度保持不变且相对湿度变化时介电强度标准差为0.542 kV/mm。环境温度在15~55°C、环境相对湿度在30%~98%变化时,聚砜材料介电强度基本保持在20 kV/mm左右。

3 性能评价

将NPIC聚砜绝缘支撑盘材料绝缘电阻试验结果与我国2座在运核电厂发生绝缘击穿事故的绝缘支撑盘材料进行对比如图10所示。

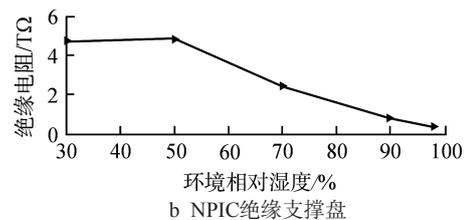
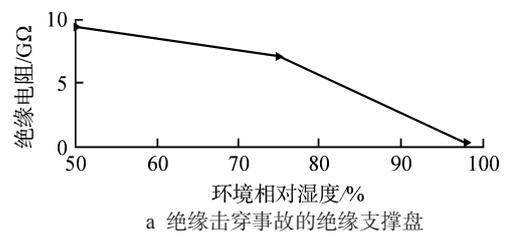


图10 两种绝缘支撑盘的绝缘电阻试验结果对比
Fig. 10 Comparison of Insulation Resistance Test Results of Two Kinds of Insulation Support Plates

发生绝缘击穿事故的绝缘支撑盘的绝缘电阻远远小于 NPIC 绝缘支撑盘的绝缘电阻, 环境相对湿度为 50% 时, 前者绝缘电阻仅为 NPIC 绝缘支撑盘的绝缘电阻的 0.193%, 98% 时仅为 0.056%。

4 结论

本研究主要从试验的角度, 对聚砜材料的绝缘耐潮性能进行试验研究, 获取其绝缘耐潮性能随环境温度和环境相对湿度的变化规律, 得出以下结论:

(1) 环境温度和环境相对湿度均对聚砜材料吸水率影响非常显著, 环境温度为 23℃、环境相对湿度由 30% 增至 98% 时, 对应吸水率由 0.012% 增至 0.106%, 增幅高达 783.3%; 环境相对湿度为 90%、环境温度由 15℃ 增至 55℃ 时, 对应吸水率由 0.07% 增至 0.16%, 增幅为 128.6%。

(2) 中压电气贯穿件绝缘支撑盘相间绝缘电阻随环境温度和环境相对湿度的增加逐渐递减, 降幅最高达 99.82%, 其中环境温度对中压电气贯穿件绝缘支撑盘整盘绝缘电阻的影响最为显著。整盘绝缘电阻在环境温度为 15℃~55℃、环境相对湿度为 30%~98% 时始终高于 200 TΩ。

(3) NPIC 生产的中压电气贯穿件绝缘支撑盘耐潮性能和电气绝缘性能优良, 其绝缘电阻性能远优于国内部分电厂所使用的的同类型产品, 能够在高电压、高温、高湿环境中稳定可靠工作, 完全满足 ACP1000 核电厂对中压电气贯穿件的绝缘耐潮性能要求。

参考文献:

- [1] 王胜, 向文元, 赵月扬. 1E级电气贯穿件设备鉴定[J]. 机电信息, 2011(24): 239-240.
- [2] 俞高伟, 马涛, 孙健, 等. 核电站严重事故下电气贯穿件鉴定的研究[J]. 电工电气, 2019(6): 62-66.
- [3] 李银, 张广来. AP1000电气贯穿件安装工艺[J]. 中国新技术新产品, 2014(11): 126-126.
- [4] 俞高伟, 胡子婴, 吴珂科, 等. 标准研究AP1000中压电气贯穿件合格鉴定电气试验要求[J]. 发电设备, 2013, 27(2): 142-144.
- [5] 陈鑫. EPR核电站核岛电气贯穿件介绍及安装[J]. 机电信息, 2016(18): 63-64.
- [6] 刘刚, 黄冬艳, 方文治, 等. 核电厂安全壳电气贯穿件泄漏率计算分析[J]. 发电设备, 2018, 32(1): 32-34.
- [7] 郑开云. 核电厂中压电气贯穿件短路电动力试验探讨[C]//中国电机工程学会核能发电分会学术交流会. 北京, 2017.

- [8] 朱幼君. 核电站电气贯穿件的应力评定及试验验证[J]. 发电设备, 2019, 33(2): 103-107.
- [9] 于金旭, 李亚明, 杨延安, 等. 电气贯穿件用聚砜绝缘射频同轴电缆的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017(3): 15-17.
- [10] 杨文彬, 张凯, 杨序平, 等. BN/聚砜导热绝缘复合材料的制备及性能[J]. 西南科技大学学报, 2011(01): 27-30.
- [11] 李明, 张凯, 杨文彬, 等. h-BN/SiCw/聚砜导热绝缘复合材料的协同导热效应[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 031(4): 73-77.
- [12] 李明, 杨文彬, 张凯, 等. 复合成型对聚砜复合材料导热绝缘性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 031(3): 153-157.
- [13] 李珺鹏, 齐暑华, 曹鹏, 等. 不同粒径氮化硼填充环氧树脂/玻璃纤维绝缘导热复合材料的研究[J]. 中国塑料, 2011(6): 44-47.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 塑料吸水性的测定: GB/T 1034—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 3-6.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 测定固体绝缘材料绝缘电阻的试验方法: GB/T 10064—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 2-4.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 测量电气绝缘材料在工频、音频、高频(包括米波波在内)下电容率和介质损耗因数的推荐方法: GB/T 1409—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 7-8.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 固体绝缘材料在试验前和试验时采用的标准条件: GB/T 10580—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 2-6.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 绝缘材料电气强度试验方法 第1部分: 工频下试验: GB/T 1408.1—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 2-12.
- [19] MA B, ANDERSSON J, GUBANSKI S M. Evaluating resistance of polymeric materials for outdoor applications to corona and ozone[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2010, 17(2): 555-565.
- [20] MONTANARI G C. The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(3): 309-315.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 电气绝缘用树脂基活性复合物第1部分: 定义及一般要求: GB/T 15022.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-7.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. 电气绝缘用树脂基活性复合物 第2部分: 试验方法: GB/T 15022.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 3-6.
- [23] 中国国家标准化管理委员会. 核电厂安全壳电气贯穿件: GB/T 13538—2017[S]. 北京: 中国质检出版社, 2017: 10-11.

(责任编辑: 杨灵芳)