

复合绝缘子在变电站中的应用研究

分析了在变电站中应用复合绝缘子相对于瓷质绝缘子的诸多优势。介绍了变电站用复合绝缘子的生产概况、生产企业及部分应用实例。归纳总结了在变电站中推广复合绝缘子应用的必要性和可行性，并对复合绝缘子在变电站中的应用研究方向进行了展望。

关雪飞/上海电力设计院有限公司



关雪飞/工程师

目前国内各电压等级变电站的高压设备外绝缘主要采用瓷质绝缘和复合绝缘两大类。瓷质绝缘子为无机材料制成，因为其技术发展较为成熟，电气性能和力学性能稳定，耐腐蚀性能较好，不存在老化问题，仍在变电站高压外绝缘占据主流地位。但瓷质绝缘子由于本身材料特性，存在着通过技术手段无法解决的缺点，如在设备内部压力过大的情况下可能发生爆炸；具有地震易损性；耐污闪和冰闪性能相对较差；制造过程中需要利用稀缺矿产资源且能耗相对较高；报废后无法重复利用；瓷质材料本身较为笨重，对变电站门型构架载荷要求较高。复合绝缘子为有机材料制成，比无机材料容易老化。但是，目前国内复合绝缘子的损坏事故大多表现在内绝缘击穿和芯棒脆断上，主要是由早期不成熟的设计、生产工艺和材料配方造成的。国内电力部门曾组织过对运行合成绝缘子的性能检测，现场调查未显示出复合绝缘子憎水性、硬度和撕裂强度的变化与运行年限的显著相关性，这表明复合绝缘子的上述性能主要受运行环境的影响。复合绝缘子产品由玻璃纤维环氧树脂引拔棒、

硅橡胶伞裙和金具三部分组成。其硅橡胶伞裙采用整体注压工艺，从而解决了影响复合绝缘子可靠性的关键问题界面电气击穿。玻璃引拔棒与金具的联接采用最先进的压接工艺，配有全自动声波探伤检测系统，强度高、外型美观、体积小且重量轻，金具镀锌可防锈蚀，可与瓷质绝缘子互换使用。

复合绝缘子电气性能优越、力学性能高，有效提高了安全运行的可靠性；耐污性能好，抗污性能好，抗污闪能力强，其湿耐受电压和污秽耐受电压为相同爬距瓷质绝缘子的2~2.5倍，且不需清扫，能在重污秽的去安全运行；体积小、重量轻且结构轻巧，便于运输和安装，节约门型构架钢材用量。硅橡胶伞裙具有良好憎水性能，其整体结构保证了内绝缘不受潮，不需进行预防性绝缘监测试验，不需清扫，减少了日常维护工作量。密封性能好，耐电蚀能力强，伞裙材料耐漏电起痕达TMA4.5级水平，具有良好的耐老化、耐腐蚀及耐低温性能，适用地区广泛。具有很强的抗冲击性和防震性能，其良好的防脆性和抗蠕变性，不易破碎、抗弯曲且抗扭强度高，可承受内部压强，防爆力强，可与瓷质绝缘子、玻璃绝缘子互换作用。

当变电站处于污秽等级较高的地区，特别是电气一次设备采用户外布置时，在变电站内实践复合绝缘子的应用，探讨全站采用复合材料外绝缘的可行性，对于复合绝缘子在变电站中的应用推广具有重要意义。

关键词/Keywords

复合绝缘子·
复合材料·
外绝缘·
变电站·

变电站用绝缘子面临问题研究

1. 瓷质绝缘子在我国超、特高压变电站中的应用现状

随着电力系统电压等级的逐步升高,从20世纪70年代至今,我国仍未解决超、特高压变电站电力设备用瓷支柱和空心绝缘子进口的问题,也未完全杜绝瓷质支柱、空心绝缘子发生断裂、污闪和雨闪事故,严重影响了我国支柱、空心绝缘子制造能力的提升和技术的进步以及电网的安全可靠运行。近40年来,我国防污闪工作的重点一直放在输电线路,变电站电力设备依然停留在涂覆RTV、加装增爬裙和定期清扫这些防污闪措施上,治标不治本。其根本原因:①我国对大直径、大结构高度的瓷质支柱和空心绝缘子的污秽特性研究不够深入,使得交流瓷质支柱和空心绝缘子的污秽外绝缘配置总体上偏低;②我国制造部门在其制造技术上缺乏系统研究,使得结构高度10 m、抗弯负荷16 kN及以上支柱绝缘子制造成品率低,可靠性较差,不能确保质量一致性;③我国制造部门在其制造设备上缺乏投入资金,使得500 kV及以上电压等级瓷质空心绝缘子供货困难,甚至制造困难(如1 000 kV交流)。为了解决这些问题,应借鉴线路复合绝缘子的成功运行经验,在500 kV及以上交流变电站中加大力度使用交流复合支柱和空心绝缘子。作为解决变电站、换流站电力设备用瓷质绝缘子污闪等问题的新一代产品。

2. 超、特高压变电站支柱和空心绝缘子面临的问题

500~1 000 kV交流支柱、空心绝缘子存在以下主要问题。

1) 确保污秽外绝缘和力学性能的可靠性是最突出的问题。

2) 为了支持母线排和联接金具以及考虑风速、覆冰和抗震能力等,需要更高强度的绝缘子。为了保证所需的力学性能,必须增加绝缘子的主体直径,如支柱可达290~320 mm,空心绝缘子可达600~1 200 mm。

3) 大主体直径绝缘子的污耐压特性比小主体

直径差。运行电压等级越高,积污特性越差,要解决此问题必须增加爬电距离,增加结构高度、优化伞形,无疑增加瓷质绝缘子制造难度。

4) 根据目前我国绝缘子制造现状,要制造结构高度10 m(1 000 kV)以上变电站电力设备用绝缘子不太现实。

3. 解决超、特高压变电站支柱和空心绝缘子面临问题的思路

我国已建变电站污秽外绝缘配置总体上偏低,受站用构架高度限制,采用防污型瓷质支柱、空心绝缘子解决不了污闪问题;制造单柱下元件弯矩在160 kN·m及以上的制造问题十分困难,且单柱式的细长比(高度/杆径)远大于20,其抗震能力差;超、特高压变电站电力设备用瓷质套管的主体直径600~1 200 mm,高度为5~16 m,受大直径空心毛坯的挤制、干燥技术和分节成形后干坯对接再烧成瓷质套管工艺装备及技术等限制,制造十分困难。

综合分析后,解决以上问题的思路是采用复合支柱、空心绝缘子。

变电站用复合绝缘子分类

1. 复合支柱绝缘子分类

复合支柱绝缘子按型式分类可分为瓷质复合支柱绝缘子、复合支柱绝缘子(实芯棒)和复合支柱绝缘子(空心管)三类。

复合支柱绝缘子按内绝缘材料分类可分为湿法和等静压干法成型瓷质芯棒、玻璃纤维增强环氧树脂实芯棒、玻璃纤维增强环氧树脂空心管内充绝缘气体(如 N_2)和空心管内充绝缘材料(如泡膜、聚乙烯等)四类。

复合支柱绝缘子按外绝缘材料分类可分为液态硅橡胶LSR和高温硫化硅橡胶HTV两类。

复合支柱绝缘子按伞裙和伞套成型分类可分为注射(模压)成型和单片粘接工艺两类。

2. 复合空心绝缘子分类

复合空心绝缘子按应用设备分类可分为开关类设备空心绝缘子和非开关类设备空心绝缘子。

复合空心绝缘子按外绝缘材料分类可分为液

态硅橡胶LSR和高温硫化硅橡胶HTV两类。

复合空心绝缘子按伞裙和伞套成型分类可分为射（模压）成型和单片粘接工艺两类。

变电站用复合绝缘子优势分析

1. 资源节约与环境友好

瓷质绝缘子主要原料源自长石、粘土和铝矾土等，资源稀缺，生产过程能耗较高，而且绝缘子报废后无法重复利用；而复合绝缘子主要原料硅橡胶源自金属硅矿，玻璃纤维源自石英矿，国内储量丰富，制造过程中碳排放能耗低，硅橡胶可提炼加工硅油等，体现了环境友好的生产理念。

变电站用瓷质支柱绝缘子的杆径大、瓷质件长，生产合格率仅约为40%。增加伞伸出、伞数或伞棱的防污型支柱绝缘子生产更难；而随着复合绝缘技术的进步，复合支柱绝缘子工艺简单、易制造、功耗低、成本低且成品率高，客观上起到了有效节约资源的作用。

2. 机械性能稳定、安全性高

(1) 防爆性能好

空心瓷质绝缘子存在易爆问题，这一点在人员相对输电线路较为密集的变电站危害尤为严重。复合绝缘子提供机械性能的绝缘管是由玻璃钢管制成，外部伞套材料是高温硫化硅橡胶（HTV），伞套和内部绝缘管均为非脆性材料，在运输、安装及运行过程中，不易碰损、爆炸及脆断。即使在内压力过大的极端情况下也不发生爆炸而损坏运行人员人身安全或其他电站设备，而仅仅通过破口或裂缝泄压，存在对周围设备及人员伤害性小，易于抢修等特点。

(2) 抗震性能强

电网中电力设施在地震中破坏的主要原因如下。

1) 变电设备的结构决定了在地震时易受损。电力设施特别是电瓷型高压电气设备的结构特点决定了其在地震中的脆弱性，是地震中的易损件。高压电气设备的特点：变电站电力设备一般都有细长且为瓷质的套管；变电站的各种开关设备一般都是高架的，且支撑结构一般都是瓷质

的，容易在地震的作用下而折断；变电站内的许多设备都是“头重脚轻”，地震时易在根部折断。

2) 瓷质材料本身的特点决定了电瓷型高压电气设备的地震易损性。电瓷型高压电气设备的绝缘部分均由瓷质套管组成，其震害特点大多是在瓷质套管根部断裂。震害的主要原因：①陶瓷是脆性材料，抗弯性能很差，加上设备的结构形状特殊，不仅又细又长，而且上部质量较大，地震时瓷质套管的根部承受很大的弯矩，使瓷质套管强度不足而断裂，尤其是在瓷质套管与其他材料的连接处；②这类设备的固有频率在1~10 Hz范围内，与地震波的卓越频率相接近，同时这类设备阻尼值较小，其主材料瓷柱属脆性材料，储能能力较小，因此在地震中极易因类共振影响设备遭受破坏。

空心复合绝缘子和支柱绝缘子的主体结构是采用环氧玻璃钢制造，其阻尼比是瓷质绝缘子的2倍，地震时动力反应较小；同时，环氧玻璃钢还具有优异的弯曲作用应力和抗弯强度，远远优于瓷质绝缘子，参数对比如表1所示。由表1可以看出，复合绝缘子与瓷质绝缘子相比具有优异的抗震性。另外复合绝缘子重量轻，约为瓷质绝缘子的1/3，大幅降低设备重心，所以电气设备在地震中更不易损坏。

表1 瓷质绝缘子与复合绝缘子性能参数对比

绝缘子类型	弯曲许用应力/MPa	抗弯强度/MPa	阻尼比 (%)
瓷质	21~32	35~90	3
复合	45~76	120~130	6

图1为四川地震后，瓷质绝缘子与复合绝缘子状况对比。复合绝缘子完好无损。



图1 汶川震后某变电站瓷和复合绝缘子受损情况

(3) 灵活性强

复合绝缘子采用的硅橡胶绝缘材料的密度为 1.5 g/cm^3 、环氧玻璃纤维为 2.0 g/cm^3 ，明显低于瓷质的 2.5 g/cm^3 。密度小、重量轻这一优势随着电压等级的提高更加明显，参考750~1 000 kV交直流瓷质绝缘子与复合绝缘子重量对比如表2所示。

表2 瓷质绝缘子与复合绝缘子重量对比

绝缘子类别	电压等级/kV	复合/t	瓷质重量/t
空心绝缘子	750	1.3	2.5
	1 000	3.3	6.5
支柱绝缘子	± 800	2	4.5
线路绝缘子	± 800	0.09	0.85
	1 000	0.06	0.65

密度小、重量轻为复合绝缘子提供了较强灵活性，从而拓展和加强了相对于瓷质绝缘子的优势：①直径和长度不受制造工艺限制；②安装运输维护方便；③整体尺寸及受风面积较小，对构架载荷要求低，有效降低构架尺寸，节约材料。

(4) 优异的耐污闪和冰闪性能

污闪事故对国家电网的安全可靠运行构成极大的威胁，其中瓷质绝缘子和玻璃绝缘子污闪事故占据绝大多数。

绝缘子在长期运行中，绝缘体表面会逐渐沉积一层污秽物，当遇有雾、露、雨、融冰和融雪等潮湿天气时，污层电导率增加，从而导致污闪的发生。硅橡胶的憎水性达WC1~WC4级使得绝缘子在潮湿、污秽条件下的污耐受电压值比相同爬电距离的瓷质、玻璃绝缘子高达120%~150%，甚至更高。复合绝缘子的伞裙和伞套采用了憎水性优异的高温硫化硅橡胶绝缘材料，使其绝缘表面呈现无数孤立的细小水珠，与瓷质、玻璃绝缘子的绝缘体表面存在连续水膜明显不同，这样表面电阻大，泄漏电流小，放电不易发展，闪络不易发生，从而具有优良的湿工频、操作闪络特性和污耐压特性，而且使复合绝缘子具备了在运行过程中可免清扫、免维护的特性。复合绝缘子与瓷质绝缘子憎水性比较示意如图2所示。瓷绝缘子积污后，表面憎水性消失，而硅橡胶表面憎水性仍没有丧失。

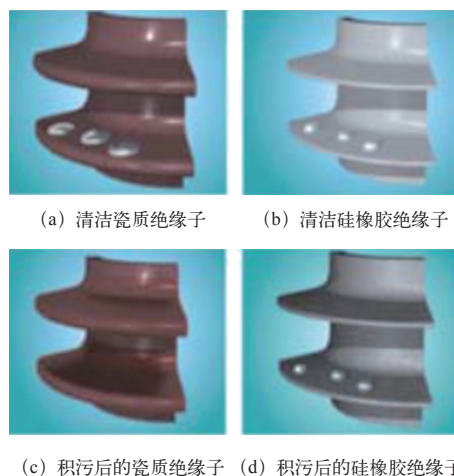


图2 复合绝缘子与瓷质绝缘子憎水性比较

瓷质绝缘子覆冰后，冰棱桥接，容易发生冰闪事故；复合绝缘子由于硅橡胶材料特有的良好热容性及憎水性，不易形成连接的冰棱，避免了溶冰时形成电流泄漏通道而引发闪络。2008年南方冰雪灾中，江西某500 kV变电站中复合绝缘子与瓷质绝缘子覆冰对比情况如图3所示。由对比可以看出，复合绝缘子表面覆冰冰凌长度明显小于瓷质绝缘子。

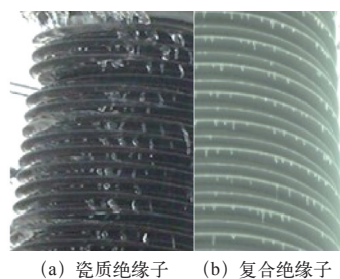


图3 瓷质绝缘子和复合绝缘子表面覆冰对比

(5) 综合性价比高

复合绝缘子的综合性价比体现在质量稳定可靠、交货周期大大缩短及价格只为瓷质绝缘子的80%。

此外瓷质绝缘子为了防止污闪，需定期喷涂RTV/PRTV维护或进行清扫，复合绝缘子免清扫、免维护，所以在电站的全生命周期中瓷质绝缘子维护成本远高于复合绝缘子。

以目前在建的甘肃敦煌沙洲750 kV全复合变电站为例，电站设备用绝缘子均采用复合绝缘子，不仅一次投入比瓷质绝缘子节约超1 000万

元,而且能够做到免清扫、免维护,全寿命周期无维护成本。按考虑40年全寿命周期内,瓷质绝缘子需进行8次喷涂RTV/PRTV或清扫维护,复合绝缘子比瓷质绝缘子节约超4 600万元。经估算,对于普通的500 kV全户外变电站而言,成本节约也可超过1 000万元。

复合绝缘子在变电站中的应用现状研究

1. 概述

我国复合绝缘子2008年的故障率为万分之一,虽然这个数据表明了国产复合绝缘子质量水平达到了新的高度,但绝缘子核心技术仍需要进一步发展。复合绝缘子作为输电线路安全运行的重要设备之一,其技术性能得到电力运行部门及制造业的普遍关注。随着棒形悬式复合绝缘子的广泛应用,输电线路污闪事故逐年下降,安全运行可靠性逐渐提高;而变电站设备用空心瓷质绝缘子由于制造难度大,很难满足超高压电力设备的使用要求。为解决这个问题,借鉴复合硅橡胶在线路上的成功运行经验。2004年,国产复合空心绝缘子、复合支柱绝缘子和复合硅橡胶增爬裙等开始在110~550 kV变电设备上大量使用,并为遏制污闪事故的发生起到了重要作用。

20世纪90年代以前,国内基本上以瓷质绝缘子为主,玻璃绝缘子用量较少,而复合绝缘子尚处于研发阶段。棒形悬式复合绝缘子是在1995年以后开始进入实用化阶段。此后,复合绝缘子入网数量连年翻番。尤其是2001年以后,整体注射成型、压接式连接及多种形式密封措施等关键制造技术不断成熟,并积累了大量的成功运行经验,为复合绝缘子的推广应用提供了契机,使复合绝缘子成为我国解决污秽地区输电线路外绝缘污闪问题最为有效的方法之一。2004年以后,300~550 kN产品相继成功研发,国产产品逐渐占据主导地位,引领世界复合绝缘子制造技术的发展。目前全国复合绝缘子制造企业已超过100家,占市场主导的企业有10多家。电网的高速发展促进了复合绝缘子产业的迅速壮大,使我国硅橡胶复合绝缘子制造技术居世界领先水平。

随着硅橡胶复合绝缘子在变电站推广应用并取得良好的运行效果,变电站设备外绝缘复合化优势和趋势日渐突出。各级变电站母线门型构架进出线上的耐张串、跳线串和悬垂串等逐渐使用棒形悬式复合绝缘子;各类变电设备,包括变压器、断路器、避雷器、互感器、电抗器、隔离开关、GIS组合电器、电缆终端、穿墙套管和母线支柱等大量使用硅橡胶复合绝缘子。以硅橡胶材料的复合绝缘结构改变了传统瓷质为主的外绝缘结构,为高压输变电设备开拓一些新的技术领域。

2. 生产企业概况

我国绝缘子生产企业从20世纪80年代初开始研制126~550 kV的交流变压器、互感器和断路器等复合套管以及252 kV及以下电压等级交流复合支柱绝缘子。到2008年已能批量制造40.5~1 100 kV电压等级交流复合支柱和空心绝缘子。以下对具有代表性的复合绝缘子生产企业特点进行逐一介绍。

(1) 平高集团有限公司

采用穿伞工艺能制造40.5~550 kV交流复合空心绝缘子,主要用于40.5 kV交流真空断路器和SF₆断路器、72.5~252 kV交流敞开式组合电器(HGIS)、72.5~252 kV交流GIS和126~550 kV交流电流互感器等。另外,该公司结构高度11 m、直径1 000 mm的±800 kV直流复合空心绝缘子完成了型式试验。

(2) 江苏神马科技有限公司

采用注射工艺制造40.5~1 100 kV交流和±500~±1 000 kV直流复合支柱、空心绝缘子,并在1 100 kV交流和±800 kV直流工程中得到应用,其中550 kV交流复合空心绝缘子在互感器领域广泛使用。

(3) 上海传奇公司

采用液态硅橡胶LSR和常温注射工艺制造40.5~1 100 kV交流复合空心绝缘子。其中550 kV交流复合空心绝缘子在互感器领域广泛使用。

(4) 西瓷公司

采用经过改良的液态硅橡胶LSR,注射工艺制造40.5~1 100 kV交流、±500~±800 kV直流复合支柱和空心绝缘子。

3. 复合绝缘子在变电站中的应用实例

(1) 复合支柱绝缘子应用实例

1) 隔离开关/接地开关应用复合支柱绝缘子。国外隔离开关/接地开关用复合支柱绝缘子作为外绝缘已经较为普遍。在国内也具备一定程度的应用规模。目前隔离开关/接地开关用复合支柱绝缘子正在逐步向特高压直流换流站领域逐步拓展应用。实例如图4和图5所示。



图4 750 kV交流隔离开关



图5 ±800 kV云南—广东
直流工程复合隔离开关

2) 母线支柱应用复合支柱绝缘子。500 kV及以上母线支柱用复合支柱绝缘子已经逐步应用于国内重点工程，目前亦正在逐步向特高压直流换流站领域逐步拓展应用。实例如图6和图7所示。



图6 500 kV母线
复合支柱绝缘子



图7 ±800 kV云南—广东直流工程
母线复合支柱绝缘子

(2) 开关设备类复合空心绝缘子应用实例

1) 组合电器应用复合空心绝缘子。目前复合空心绝缘子已在500 kV户外GIS套管中得到了较为广泛的应用。实例如图8所示。

2) 装配式断路器应用复合空心绝缘子。目前复合空心绝缘子已在500 kV户外装配式断路器套管中得到了较为广泛的应用。在750 kV及以上电



图8 石钟山变电站500 kV GIS



图9 新疆乌北变电站750 kV罐式断路器

压等级也正逐步进行试点。实例如图9所示。

(3) 非开关设备类复合空心绝缘子应用实例

变压器/高压电抗器套管应用复合空心绝缘子。目前复合空心绝缘子已在500 kV及以上变压器/高压电抗器套管、电压/电流互感器及避雷器等变电站用主要非开关设备中均得到了较为广泛的应用。实例如图10和图11所示。



图10 福州北变电站500 kV变压器套管
应用复合绝缘子



图11 鹤龄变电站
500 kV电流互感器

结束语

1. 复合绝缘子在变电站应用必要性与可行性

由于复合绝缘子符合资源节约环境友好型社会建设要求，具备力学性能稳定、安全性高、重量轻、体积小、灵活性强、耐污闪及冰闪能力强、免清扫、免维护和综合性价比高诸多优势，越来越受到电力行业的普遍关注，特别在重

污地区以及地震多发地区。这种优势随着电力系统电压等级的逐步提高,在500 kV及以上的超、特高压变电站中尤为明显。因此在此类变电站中推广复合支柱绝缘子和空心绝缘子的应用,并且逐步取代传统的瓷质绝缘子,不仅具有充分的必要性,而且正在逐步成为一种趋势。

目前国内复合绝缘子生产厂家的支柱绝缘子和空心绝缘子,已经在35 kV及以上电压等级变电站中几乎所有的电气一次设备外绝缘中实现了应用,且均有产品随变电站设备投入了电网运行,由此可见在变电站中推广复合绝缘子的应用,乃至推广全复合外绝缘变电站,已经具备了充分的可行性。

当变电站所处地区污秽较重,在全站推广全复合外绝缘,不仅能够充分发挥瓷质绝缘子的各项优势、节约一次性投资和变电站维护成本,更能提升复合外绝缘这一日渐成熟的新技术在变电站中的应用品质,成为复合绝缘子在变电站中应用的典范。

2. 复合绝缘子在变电站中的应用研究方向

由于硅橡胶复合绝缘子制造水平、质量管理和运行条件等方面存在较大差异以及复合绝缘子使用数量的逐年增多,近年来复合绝缘子发生闪络、损坏事故日趋增多,表现在闪络、力学性能下降、击穿、脆断、劣化及外力破坏等,电网的安全可靠运行造成了一定程度的影响,这也表明在硅橡胶复合绝缘子制造技术上还存在一些尚待研究的问题。应对其力学特性、电气特性、劣化特性和温度特性等进行深入研究,并在此基础上对复合绝缘子的可靠性技术指标提出合理要求,进一步提高其质量水平。考虑按以下思路提高复合绝缘子的可靠性:①优化配方;②优化伞裙形状设计;③优化均压装置设计。

在改进配方及制造工艺、提高复合绝缘子质量的同时,有针对性地开展运行复合绝缘子检测技术的研究对保障电网的安全运行具有重要的意义。目前运行中复合绝缘子的检测技术主要有:紫外成像法检测复合绝缘子表面的碳化通道和电蚀损、红外成像法检测绝缘子局部温升、超声

波法检测复合绝缘子芯棒裂纹、电场分布法在线检测复合绝缘子的内绝缘缺陷和憎水性在线检测等。因这些方法目前并不成熟,应用也不广泛,需加大力度。

另外,对于变电站用复合绝缘子运行可靠性评价的体系尚未完全建立,相关试验与检测的标准亟待完善,而制造企业、运行单位及设计部门对于复合绝缘子各项性能指标的界定也应以国家或行业标准的形式予以统一。

参考文献

- [1] 梁曦东,陈昌渔,周远翔.高电压工程[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [2] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [3] 张锐,吴光亚,袁田,等.我国复合绝缘子关键制造技术的发展与展望[J].高电压技术,2007,33(1):106-110.
- [4] 张勤,吴光亚.交、直流复合支柱和空心绝缘子关键制造技术及可靠性分析[C].中国电机工程学会高电压专委会学术年会论文集(高压绝缘),2009:1146-1150.
- [5] 吴光亚.我国绝缘子的发展现状及应考虑的问题[J].电瓷避雷器,2010(2):7-11.
- [6] 李全文,谢竹青,朱曦,等.交、直流特高压复合绝缘子关键制造技术及可靠性分析[C].2009特高压输电技术国际会议论文集,2009:1-4.
- [7] 吴光亚,蔡炜,苏雪源.复合硅橡胶材料在外绝缘领域的应用[J].高电压技术,2000,26(5):56-60.
- [8] 雷琴,吴光亚.1 000 kV交流变电站用支柱、空心绝缘子存在的问题及解决办法[J].电瓷避雷器,2005(5):16-21.
- [9] 房柯夫,吴光亚,刘志强.1 000 kV交流变电站支柱和空心绝缘子污秽外绝缘设计的探讨[J].电瓷避雷器,2007(1):1-5.
- [10] 黄维枢,王如璋.有机复合绝缘子干式电流互感器[J].电力设备,2007,8(1):15-19.

(收稿日期:2015-01-07) EA