



·脉冲功率技术·

纳秒脉冲下高压 SF₆ 中同轴绝缘子 沿面闪络影响因素实验研究*

陈旭良, 李俊娜, 崔光曦, 李楚男, 李奇胜, 葛建伟

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 研究纳秒脉冲下的绝缘子沿面闪络影响因素对电磁脉冲模拟装置绝缘结构设计具有重要的借鉴意义。通过搭建绝缘子沿面闪络实验平台, 实验研究了在 0.5 MPa 的 SF₆ 气体中, 脉冲电压波形、绝缘材料和绝缘子沿面场强分布对绝缘子沿面闪络电压的影响。结果表明: 绝缘子的闪络电压具有随着脉冲前沿时间减小而增加的趋势; 相较于脉冲电压全波, 绝缘子在脉冲电压前沿波形耐受下闪络电压较高; 聚酰亚胺材料的绝缘性能最好; 通过降低绝缘子沿面最大场强, 改善电场分布可以有效地提高绝缘子的闪络电压。

关键词: 纳秒脉冲; 沿面闪络; 绝缘材料; 沿面场强; 聚酰亚胺

中图分类号: TM85 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220308

Experimental research on influencing factors of surface flashover of coaxial insulators in high-pressure SF₆ under nanosecond pulse

Chen Xuliang, Li Junna, Cui Guangxi, Li Chunan, Li Qisheng, Ge Jianwei

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Studying the influencing factors of insulator flashover under nanosecond pulse has important reference significance for the design of insulation structure of electromagnetic pulse simulation device. By building an experimental platform for insulator flashover, the effects of pulse voltage waveform, insulating material and surface field strength distribution on the insulator surface flashover voltage were experimentally studied in 0.5 MPa SF₆ gas. The results show that the flashover voltage of the insulator tends to increase with the decreasing of the pulse front time; Compared with the full pulse voltage wave, the flashover voltage of insulator is higher under the front waveform of pulse voltage; The insulation performance of the polyimide material is optimal; By reducing the maximum field strength along the insulator surface and improving the electric field distribution, the flashover voltage of the insulator can be effectively increased.

Key words: nanosecond pulse, surface flashover, insulation materials, field strength along the surface, polyimide

大型电磁脉冲模拟器^[1]通常需要一至二级压缩电路将初级源的能量转化为前沿 2~5 ns、持续时间几十至百 ns 的电磁辐射^[2], 固-气界面沿面闪络往往是脉冲功率设备中绝缘的薄弱环节^[3-4]。工程中通常采用高压的 SF₆ 气体作为绝缘介质, 以提高装置绝缘能力、减小设备的重量。贾志杰^[5]研究了直流下三种形状的绝缘子在 SF₆ 气体中的闪络特性, 结果表明伞裙型绝缘子的闪络电压最高。刘琳^[6]研究了 SF₆ 气体中雷电冲击电压下影响绝缘子闪络电压的沿面电场分布特征, 发现绝缘子闪络电压不仅与沿面电场分布有关, 与电场的切、法向分量的分布也显著相关。田可新^[7]、孙楚昱^[8]也研究了电场分布均匀度和沿面绝缘距离对闪络电压的影响。王增彬^[9]研究了高压快脉冲下绝缘材料的真空沿面闪络机理, 从闪络时延特性和洛伦兹力对电子运动影响两方面, 讨论了脉冲陡度对闪络电压的作用机制。张乔根^[10]研究了陡波冲击电压作用下波头时间对绝缘子闪络电压的影响, 发现闪络电压

* 收稿日期: 2022-09-28; 修订日期: 2022-12-01

基金项目: 装备发展共用技术预研项目 (80924010203)

联系方式: 陈旭良, cxlxl@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者: 李俊娜, uvlina@126.com。

随波头时间的减小而降低。目前,对于绝缘子沿面闪络研究中电压多采用直流、交流、雷电脉冲等,在高气压 SF₆ 中几十 ns 脉冲全波作用下的研究相对较少。

脉冲闪络可以分为脉冲前沿闪络和后沿闪络,前沿闪络会导致脉冲功率装置无法发挥正常功能,而绝缘子若发生后沿闪络,虽然设备尚能进行有限作业,但长期作用也会造成难以恢复的损坏^[1]。绝缘材料后沿闪络电压往往低于前沿闪络电压,因此开展纳秒脉冲全波作用下绝缘材料耐压实验研究具有重要意义。本文设计了平板和盆形两种形状绝缘子,材料分别是尼龙、有机玻璃和聚酰亚胺,样品尺寸较大,而且百 kV 级较大尺寸的聚酰亚胺材料数据鲜有报道。利用有限元分析软件对不同试样进行电场计算,实验研究了绝缘子在三种前沿时间耐受全波和前沿波形脉冲电压下的闪络电压,其中闪络均发生在脉冲电压波形后沿部分,为纳秒脉冲高压下绝缘子设计与选材提供一定的参考依据。

1 实验平台与实验设计

1.1 绝缘子材料及结构

绝缘材料选择了常见的尼龙(Nylon)、有机玻璃(PMMA)和具有优越耐温性能且耐电能力较好的聚酰亚胺(PI)材料。绝缘子形状选择了盆形和盘形两种,盆形绝缘子外径为 180 mm,盘形绝缘子外径为 192 mm,盆形绝缘子实物如图 1 所示,从左至右依次为尼龙、有机玻璃和聚酰亚胺。由于聚酰亚胺材料较昂贵,只做了盆形绝缘子一种形状作为对比。盆形绝缘子试样及电极结构示意图如图 2 所示。盆形绝缘子凸面沿面绝缘距离短,而凹面没有接地点,从而保证闪络一定发生在凸面,并且保证两种形状同轴绝缘子的沿面弧长有效绝缘距离一样,避免了沿面距离不同对闪络电压的影响。

1.2 实验平台与实验方法

为满足实验要求,搭建了一套纳秒脉冲下高气压 SF₆ 气体中的绝缘实验平台,如图 3 所示。高压脉冲从 Marx 发生器经过调波电感输出到实验腔体中,电压监测由两个无感膜电阻分压器完成,分别测量 Marx 输出端电压和绝缘子试样耐受的电压,放置于变压器油中。采用自制的多个无感碳芯小电阻并联,均匀分布的环形结构测量闪络电流,该结构上端与绝缘子试样连接,下端接地,总电阻为 0.2 Ω,响应时间快于 5 ns。

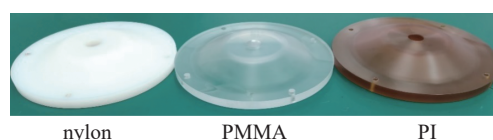


Fig. 1 Specimen of the basin insulator materials

图 1 盆形绝缘子材料试样图

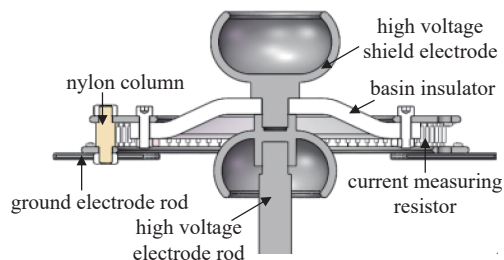


Fig. 2 Schematic cross-section of the basin-shaped insulator sample and electrode structure

图 2 盆形绝缘子试样及电极结构剖面示意图

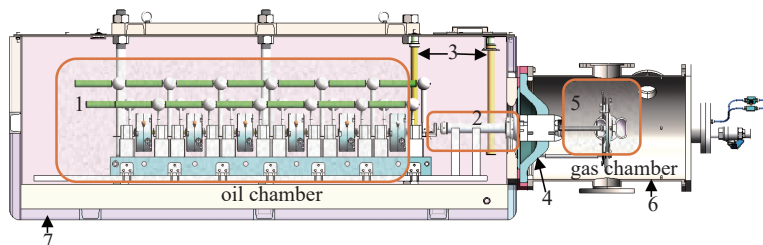


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental platform

图 3 实验平台示意图

脉冲源采用十二级双边充电的 Marx 发生器^[12],通过更换不同大小的调波电感产生脉冲电压的前沿时间 t_f 分别约为 40, 65 和 105 ns(峰值电压 10%~90%的时间)的三种波形,如图 4 所示。图 4 为电容器相同充电电压 32 kV 时,绝缘子试样上的电压波形,由于 Marx 发生器对调波电感和电极试样系统组成的容性负载放电时组成谐振电路,因此输出电压形成振荡。

由于脉冲电压后沿为振荡波,可以通过在绝缘子后部加装开关和限流电阻结构来减弱振荡,如图 5 所示,同轴绝缘子低压电极板采用四根导体接地。调节开关气压使开关在脉冲前沿峰值附近击穿,可以屏蔽掉后沿的振荡波,进行脉冲电压前沿绝缘子耐压对比实验。电容器充电电压为 30 kV 时绝缘子试样上三种前沿脉冲电压波形,如图 6 所示。

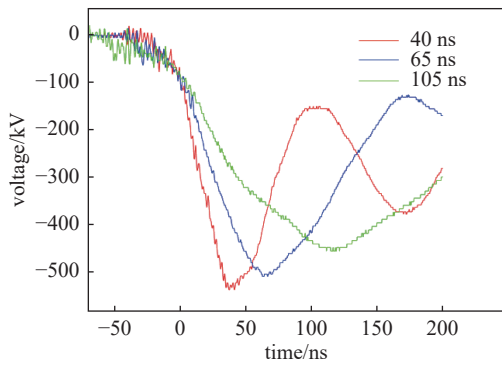


Fig. 4 Full-wave pulse voltage waveforms of the three leading edges on the insulator sample

图 4 绝缘子试样上三种前沿的全波脉冲电压波形图

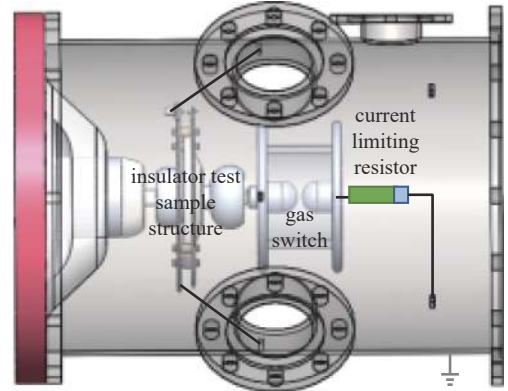


Fig. 5 Schematic diagram of the structure of the insulator switch used together

图 5 绝缘子开关配合结构示意图

实验前用四氯化碳将电极及绝缘子试样擦拭干净、烘干,装配好后放入实验腔体并密封。对腔体进行抽真空处理,之后充入 SF₆ 气体至气压为 0.5 MPa。绝缘子闪络电压采用升压法测量,Marx 里的电容充电电压从 16 kV 开始,每一个等级施加十次电压,若没有发生闪络,则电容器充电电压增加 2 kV,直到绝缘子闪络为止,若在第 n ($n \leq 10$) 次发生闪络,则取这 n 次电压波形峰值的平均值即首次闪络电压记为绝缘子的闪络电压。典型闪络电压电流波形图如图 7 所示。绝缘子闪络之后,需要切除掉绝缘子的表面痕迹,采用相同的加工方式,保证处理之后的绝缘子性能与表面形状不变。

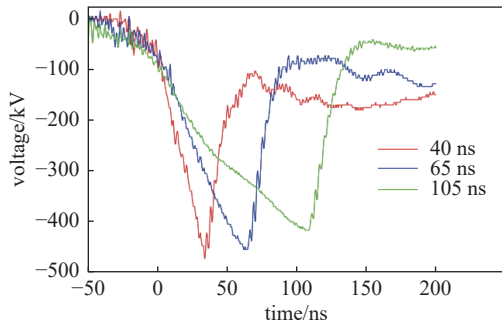


Fig. 6 Voltage waveforms of the three frontiers on the insulator sample

图 6 绝缘子试样上三种前沿的电压波形图

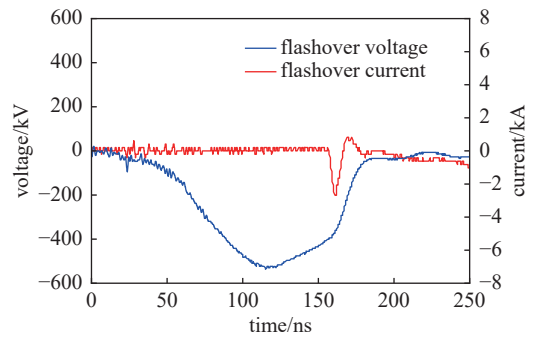


Fig. 7 Typical flashover voltage and current waveform

图 7 典型闪络电压电流波形图

2 实验与分析讨论

2.1 绝缘子沿面电场的影响

实验测量得到尼龙和有机玻璃材料的绝缘子试样的闪络电压见图 8。同种状态下,盘形绝缘子的闪络电压高于盆形绝缘子的闪络电压。其中在 105 ns 脉冲电压前沿下,尼龙盆形绝缘子闪络电压略高于尼龙板形绝缘子,两者都是在电容器充电电压为 30 kV 时发生的沿面闪络,由于 Marx 输出电压峰值会有一定的波动,导致计算的闪络电压均值略有不同,盆形绝缘子在第 4 次发生闪络,闪络电压取这 4 发电压的均值为 423 kV,而盘形绝缘子在第 6 次发生闪络,均值为 416 kV,盘形绝缘子耐压次数较多,绝缘性能稍好点。由于两种形状的绝缘子沿面有效绝缘距离一致,因此闪络电压的差异可能与沿面电场分布有关。

利用有限元分析软件计算两种形状试样的电场分布,设置中央电极外施电压为 500 kV,尼龙、SF₆ 的相对介电常数

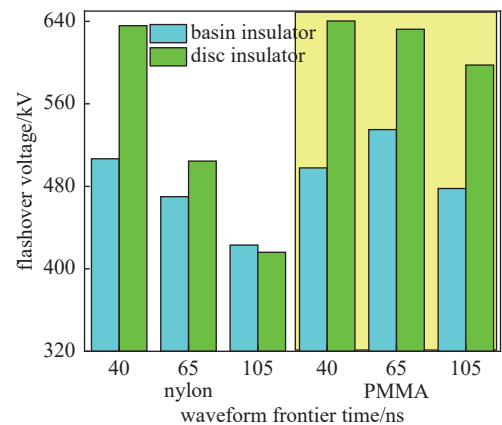


Fig. 8 Flashover voltages of basin-shaped and disc-shaped insulator samples under three full-wave pulse voltages

图 8 三种全波脉冲电压下盆形和盘形绝缘子试样的闪络电压

分别取 3.7, 1.002。盆形和盘形的合成电场和沿面电场分量分布, 如图 9 和图 10 所示。其中图 10 的沿面长度正向是从高压三结合点处到低压端方向, 位于绝缘子的凸面。两种绝缘子在三结合点处电场强度高, 其中切向电场分量在高压和低压端三结合点附近区域较高, 法向电场分量在低压端三结合点附近区域比高压端高。在低压端附近区域, 盆形绝缘子的切向电场高于盘形绝缘子, 而两者的法向电场基本相同, 因此盆形绝缘子的合成场强大于盘形绝缘子的合成场强。从而在较低的外施电压下, 就能达到 SF_6 负离子脱附所需的场强, 产生有效初始电子^[13]。带电质点在高场强作用下, 进行碰撞电离、电子崩发展等过程, 造成该区域的带电质点数目剧增, 有利于电子崩转变为流注发展, 促进闪络通道的贯穿, 进而造成绝缘子沿面闪络。虽然在沿面长度 25~55 mm 的范围内, 盆形和盘形绝缘子沿面法向电场方向反向, 而在盘形绝缘子中, 法向电场吸引电子撞击绝缘子表面, 理论上有利于表面二次电子的产生, 但是可能因为法向场强较低和 SF_6 气体分子对电子亲和力较强, 导致表面二次电子发射量相对较少。

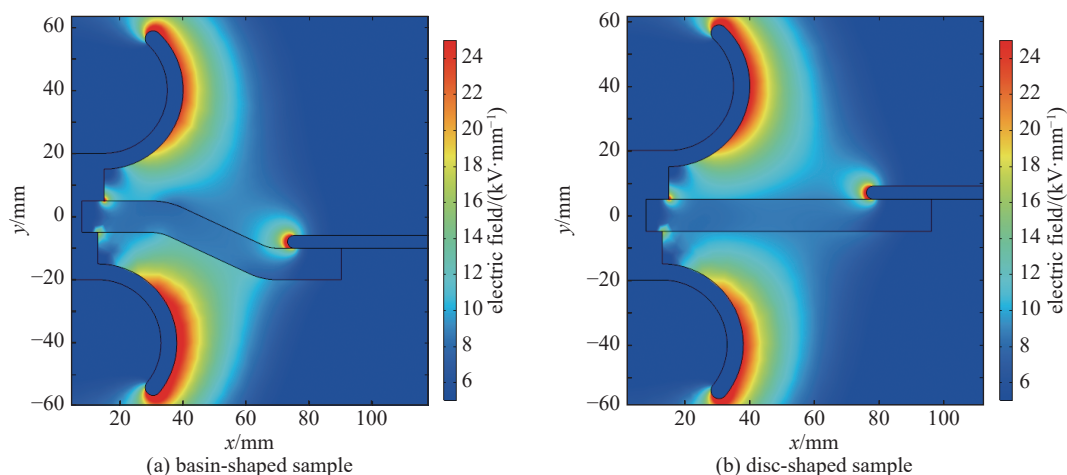


Fig. 9 Cloud diagram of electric field distribution of basin-shaped and disc-shaped insulator samples

图 9 盆形和盘形绝缘子试样的电场分布云图

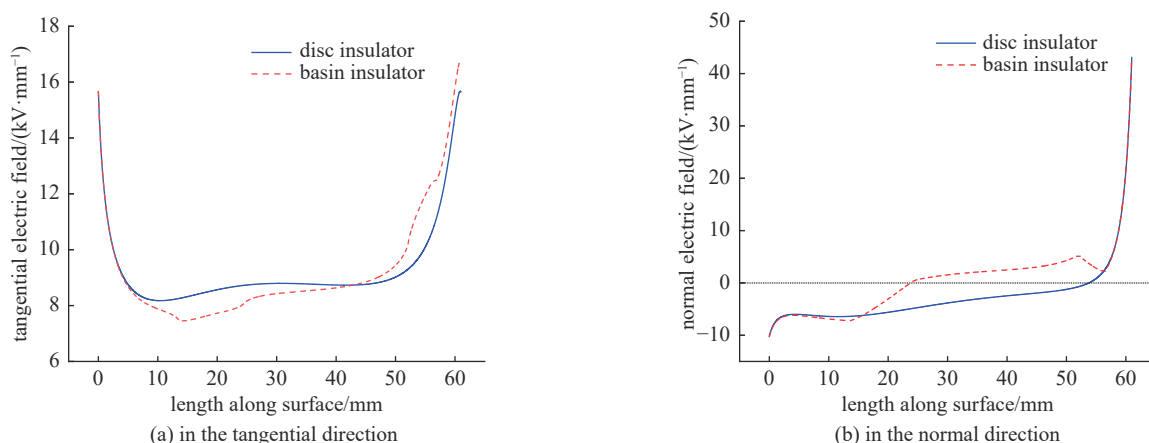


Fig. 10 Electric field distribution along the plane of the insulator sample in the tangential and normal directions

图 10 绝缘子试样的沿面切向和法向电场分布图

采用优化绝缘子外屏蔽罩的结构以达到降低三结合点电场、优化绝缘子沿面电场分布的目的。通过缩短高压端屏蔽球与盆形绝缘子的距离, 增大屏蔽作用, 而在低压端使用 2 mm 的尼龙垫片, 使低压端远离绝缘子表面, 从而改善绝缘子两端电场。优化电场之后, 通过相同的电场模拟计算, 低压端三结合点场强最大值由 48.9 kV/mm 下降到 21.2 kV/mm, 降幅超过 50%, 高压三结合处的场强也有所下降, 整体电场得到明显的改善。

由于 Marx 发生器建立电压的限制, 只对改善电场之后的盆形绝缘子在 40 ns 前沿的脉冲全波电压下进行了绝缘耐压实验, 闪络电压如图 11 所示。电场改善之后的三种材料的盆形绝缘子闪络电压都有提升, 有机玻璃的闪络电压提升幅度最大, 甚至略微超过了聚酰亚胺的闪络电压, 可能是因为有机玻璃材料对电场分布更加敏感。实验结果也证明了通过改善绝缘子的电场分布, 降低沿面的最大合成场强, 是提高绝缘材料绝缘性能的重要方式。

2.2 脉冲电压波形的影响

2.2.1 脉冲前沿时间的影响

图 12 给出了不同脉冲电压波形下的盆形绝缘子闪络电压。由于试验次数有限,绝缘子闪络电压具有一定的分散性,PMMA 绝缘子在 40 ns 前沿 500 kV 脉冲电压等级下第七发发生了沿面闪络,而在 65 ns 前沿 535 kV 脉冲电压等级下(比 500 kV 高一个等级)第一发就发生了闪络,造成 65 ns 前沿脉冲电压下闪络电压高于 40 ns 脉冲电压。从整体上看,相同形状和材料的绝缘子的闪络电压在 $t_f=40$ ns 脉冲前沿作用下,闪络电压最高, $t_f=105$ ns 前沿脉冲作用时闪络电压最低,即绝缘子都在脉冲后沿击穿的情况下,闪络电压也有随着波前时间的增加而减小的趋势,也可以理解为外施电压脉冲前沿越陡,闪络电压越高。这与孙楚昱^[14]和成永红^[9,15]等人的研究结果相一致。在绝缘耐压实验中,闪络均发生在脉冲电压的后沿部分,即电压下降阶段,外界电压的减小,会使流注在向前传播时能量逐渐减少,当流注在前期积累的能量,少于电压下降阶段减少的能量时,流注的传播过程可能会中止,闪络通道没有形成贯穿。因此当脉冲前沿越短时,即在较高电压作用下的时间越短,为了满足流注持续发展所需的能量,就需要更高幅值的脉冲电压,更高的场强。

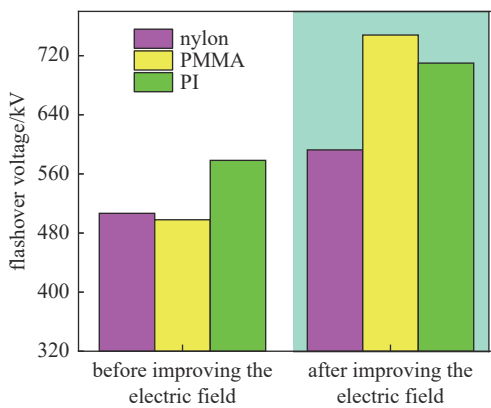


Fig. 11 Comparison of flashover voltage before and after electric field improvement of basin-shaped insulators

图 11 盆形绝缘子电场改善前后闪络电压对比图

2.2.2 脉冲电压峰值后沿的影响

通过引入开关进行脉冲电压前沿绝缘子耐压对比实验,采用相同的实验操作流程,得到了盆形绝缘子脉冲前沿耐受下的闪络电压,值得注意的是此时闪络还是发生在脉冲电压后沿部位,脉冲全波和脉冲前沿绝缘耐受的闪络电压对比如图 13 所示。对比耐受脉冲电压全波作用下的闪络电压,同种状态下在脉冲电压前沿电压作用下,闪络电压均有所增加。这主要与施加电压的大小有关,由于开关的存在,脉冲前沿波形在全波峰值处瞬间下降到较低的电压水平,相同时刻的电压大小要比全波时低得多,即后续的沿面场强较全波作用下低得多,所以闪络通道的完全贯穿需要更高的电压来弥补后续电压降低造成的场强损失。在脉冲前沿绝缘耐受实验中,实验数据很好地再次验证了闪络电压随着脉冲电压前沿时间的增加而降低的规律。这也侧面证明了脉冲前沿闪络电压高于后沿闪络电压,设计绝缘结构时,以后沿闪络电压作为依据,则结构包含一定的绝缘余量。

2.3 材料的影响

表 1 对比了三种材料的盆形绝缘子在不同前沿脉冲电压全波作用下的闪络电压,与尼龙材料相比,有机玻璃闪络电压提高约 13%,聚酰亚胺闪络电压提高约 14%~23%。由图 11 也可以看到聚酰亚胺的绝缘性能最好,这可能与材料的分子结构、耐辐射性能和表面二次电子发射率等有关。聚酰亚胺材料介电常数小于其他两种材料,在

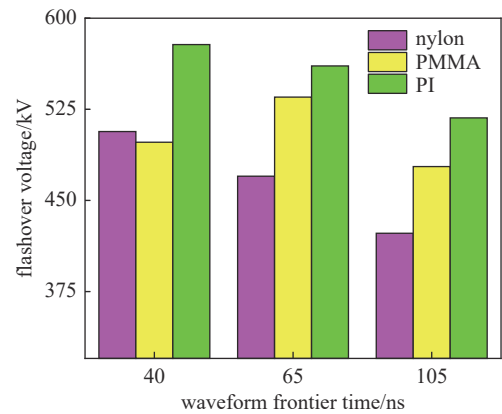


Fig. 12 Relationship between flashover voltage and waveform front time of basin-shaped insulators

图 12 盆形绝缘子闪络电压与波形前沿时间关系图

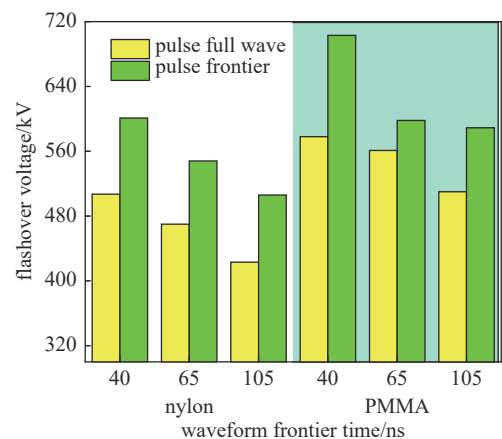


Fig. 13 Comparison of flashover voltages of basin-shaped insulators under pulsed full-wave and pulsed frontier voltages

图 13 脉冲全波和脉冲前沿电压下盆形绝缘子耐受的闪络电压对比图

表 1 不同材料的绝缘子闪络电压对比

Table 1 Comparison of flashover voltages of insulators with different materials

insulator material	flashover voltage/kV	proportion/%	flashover voltage/kV	proportion/%	flashover voltage/kV	proportion/%
	$t_r=40$ ns		$t_r=65$ ns		$t_r=105$ ns	
nylon	506.7	100.0	470.0	100.0	423.0	100.0
PMMA	497.9	98.3	535.1	113.8	477.9	113.0
PI	578.3	114.1	560.7	119.3	518.0	122.5

三结合点处造成电场增强效果较弱,而且拥有优越的抗二次电子发射性能和耐辐射性能,更有利于抑制二次电子崩的发展,因此在纳秒脉冲下 SF₆ 中的沿面闪络电压最高。

3 结 论

本文通过搭建的纳秒脉冲沿面闪络实验平台,研究了在 0.5 MPa 的 SF₆ 气体中绝缘子沿面闪络的影响因素,结果表明:(1)绝缘子沿面电场分布对其闪络电压影响十分显著,合理地优化电场分布,降低沿面最大场强,是提高材料绝缘性能行之有效的方法之一;(2)脉冲电压前沿时间越小,绝缘子沿面闪络电压越高;相比于脉冲电压全波耐受下,绝缘子在脉冲电压前沿波形耐受下闪络电压较高,如果以后沿闪络电压作为结构设计依据,则绝缘子包含一定的绝缘余量;(3)聚酰亚胺的闪络电压最高,拥有较好的纳秒脉冲下的沿面绝缘能力,有机玻璃次之,尼龙绝缘性能最低。

参考文献:

- [1] 冯寒亮,刘逸飞,刘峰. 美国海军全舰电磁脉冲模拟器发展综述[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(5): 69-78. (Feng Hanliang, Liu Yifei, Liu Feng. An overview on the development of the U. S. navy full ship electromagnetic pulse simulators[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(5): 69-78)
- [2] 谢彦召,王赞基,王群书,等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787. (Xie Yanzhao, Wang Zanji, Wang Qunshu, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: a review[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787)
- [3] 林海丹,刘熊,梁义明,等. 绝缘材料沿面闪络发展特性的研究进展[J]. 绝缘材料, 2015, 48(7): 1-8. (Lin Haidan, Liu Xiong, Liang Yiming, et al. Research progress in surface flashover development characteristic of insulating materials[J]. Insulating Materials, 2015, 48(7): 1-8)
- [4] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [5] 贾志杰,张乔根,张斌,等. 直流下 SF₆ 中绝缘子的闪络特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1903-1907. (Jia Zhijie, Zhang Qiaogen, Zhang Bin, et al. Flashover characteristic along the insulator under DC voltage in SF₆ gas[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1903-1907)
- [6] 刘琳,李晓昂,张锐,等. 影响GIS支柱绝缘子闪络电压的沿面电场特征参数[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2740-2747. (Liu Lin, Li Xiaolang, Zhang Rui, et al. Characteristic parameters of electric field along the surface affecting the flashover voltage of GIS pillar insulators[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2740-2747)
- [7] 田可新,王钢. GIS绝缘子在冲击电压下沿面闪络的分析[J]. 高压电器, 2003(6): 14-16. (Tian Kexin, Wang Gang. Analysis of the surface flashover on GIS basin insulator under lightning impulse voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2003(6): 14-16)
- [8] 孙楚昱,张国伟,王海洋,等. 纳秒脉冲下 SF₆ 中的沿面闪络特性[J]. 绝缘材料, 2017, 50(4): 51-55. (Sun Chuyu, Zhang Guowei, Wang Haiyang, et al. Surface flashover characteristics in SF₆ gas under nanosecond pulse voltage[J]. Insulating Materials, 2017, 50(4): 51-55)
- [9] 王增彬,成永红,陈玉,等. 脉冲陡度对快脉冲下真空沿面闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2009, 34(1): 151-156. (Wang Zengbin, Cheng Yonghong, Chen Yu, et al. Influence of pulse steepness on vacuum surface flashover characteristic under steep pulse[J]. High Voltage Engineering, 2009, 34(1): 151-156)
- [10] 张乔根. 陡波前冲击电压下 SF₆ 气体间隙及绝缘子沿面放电特性[D]. 西安: 西安交通大学, 1996. (Zhang Qiaogen. Discharge characteristics of SF₆ gas gap and insulator along the surface under steep wave front impulse voltage[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996)
- [11] 陈玉. 环氧复合材料快脉冲真空闪络特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008. (Chen Yu. Study on pulsed flashover characteristic of epoxy composites in vacuum[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008)
- [12] 邹晓兵,朱宏林,曾乃工,等. 纳秒级高压快脉冲发生器的研制[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 787-792. (Zou Xiaobing, Zhu Honglin, Zeng Naigong, et al. Development of a nanosecond fast pulse generator[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 787-792)
- [13] 冉慧娟,王珏,王涛,等. 纳秒脉冲下 SF₆ 气体放电特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(7): 1690-1696. (Ran Huijuan, Wang Jue, Wang Tao, et al. Breakdown characteristics in compressed SF₆ under nanosecond-pulses[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1690-1696)
- [14] 孙楚昱,王海洋,谢霖桑,等. SF₆ 中氧化铝环氧复合材料的纳秒脉冲闪络特性[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 055002. (Sun Chuyu, Wang Haiyang, Xie Linshen, et al. Flashover characteristics of epoxy/Al₂O₃ composite under nanosecond rising pulses in SF₆ gas[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 055002)
- [15] Mao Jiale, Wang Shuang, Cheng Yonghong, et al. Influence of pulse front steepness on vacuum flashover characteristics[J]. Applied Surface Science, 2018, 448: 261-269.