

文章编号: 2095-4980(2019)02-0332-06

聚合物绝缘子表面微孔阵列构筑

霍艳坤, 刘文元, 柯昌凤, 罗维熙, 段 荔

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 针对表面微孔阵列的构筑方法与微孔阵列参数对绝缘子真空沿面闪络性能的影响, 设计了 2 种阵列结构, 利用激光旋转微加工的方法在圆柱形有机玻璃绝缘子侧面进行了 2 种阵列的构筑, 同时控制激光作用参数分别获得直径为 300 μm 与 200 μm 的 2 种表面微孔, 最终得到 4 种微孔阵列结构。扫描电镜(SEM)与三维轮廓仪分析表明, 通过激光旋转微加工的方法, 实现了直径分别为 300 μm 与 200 μm , 深度为 50 μm 左右的微孔点阵构筑。沿面闪络测试表明, 表面微孔构筑能够有效地提升沿面闪络电压(实验中闪络电压提升 50%以上), 微孔直径越小提升效果越好; 在同种微孔直径下, 点阵结构对闪络电压无明显影响。

关键词: 沿面闪络; 有机玻璃; 微孔阵列; 激光刻蚀

中图分类号: TM215.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0332

Construction of micro-hole array on polymer insulators

HUO Yankun, LIU Wenyuan, KE Changfeng, LUO Weixi, DUAN Li

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: To study the construction method of the surface micro-hole arrays and the effect of lattice parameters on the surface flashover characteristics of the insulators, a couple of lattices are designed and constructed by laser spinning carving on cylindrical Poly Methy-Methacrylate(PMMA) insulators. Then, micro holes with the diameters of 300 μm and 200 μm are acquired by changing the laser parameters. Finally, four kinds of micro-hole lattices are obtained by the combination of hole diameters and the lattice structures. The Scanning Electron Microscopy(SEM) test and 3-D profile analysis of the surface morphology indicated that the designed arrays are obtained on the lateral surface of the cylindrical PMMA insulators by laser treatment with the hole diameters of 300 μm , 200 μm and 50 μm in depth. Surface flashover voltage test shows that construction of micro-hole array on the surface of insulator could enhance the flashover strength of the insulators efficiently(over 50% flashover voltages increase is obtained in the experiment); the flashover voltage increases with the decrease of hole scales, but has no obvious relationship with the array structure.

Keywords: surface flashover; Poly Methy-Methacrylate; micro-hole array; laser carving

绝缘子的真空沿面闪络是指一种在表面脱附气体中发生的贯穿性放电现象, 闪络电压一般远低于绝缘材料的体击穿电压和真空击穿电压^[1-2]。在脉冲功率系统中如高能粒子加速器、Z 箍缩、高功率激光器等, 绝缘子的破坏或失效经常表现为真空沿面闪络。绝缘子真空沿面闪络现象的发生, 严重制约着高压真空设备的耐压能力, 影响设备正常运行, 耐压的失败甚至造成巨大的损失。现阶段对脉冲功率装置提出了向高功率、小型化和高可靠性的需求, 需要在更小尺寸的绝缘部件上承受更高的电压; 真空沿面闪络现象已成为限制这一发展的“瓶颈”问题, 对绝缘子沿面闪络的方法进行研究以提高绝缘子的真空沿面闪络性能具有重要的应用价值。

对于真空沿面闪络现象, 前人进行了大量的研究工作^[3-6], 提出了众多的发展机理。当前比较主流的理论是二次电子发射雪崩理论^[7], 该理论将整个沿面闪络发展分为初始电子发射、二次电子倍增雪崩形成、表面气体释放电离形成放电通道等过程。根据该理论, 在表面进行形貌构筑形成障碍能够阻挡电子运动, 从而有效抑制沿面闪络的发展, 提高沿面闪络电压。一般做法是通过机械刻槽、打磨粗糙化等方法改变绝缘子表面形貌^[8-9],

表面机械刻槽尺度一般在毫米量级，由于加工难度的限制，百微米级的刻槽研究较少；而打磨粗糙化虽能实现微米级形貌改变，但随机性较大，效果很难保持稳定。为了研究表面规则微结构对沿面闪络的影响，课题组在前期的探究中通过激光刻蚀、材料制备与化学腐蚀等方法分别在聚合物绝缘子表面实现百微米级微槽构筑、可控微孔构筑等可控微结构构筑工作；仿真结果表明，经过微形貌构筑的绝缘子获得了较高的闪络电压与耐压稳定性^[10]，同时发现微形貌的尺寸、形状分布方式等都会对闪络电压产生较大影响。为了研究表面微形貌的尺寸与分布方式对沿面闪络耐压的影响，本文在前期研究的基础上，提出在聚合物绝缘子上进行微孔阵列构筑。工程技术中小孔构筑方法主要有机械钻孔、电化学打孔、电子束打孔、粒子束打孔、激光束打孔^[11-14]；其中机械打孔是最常见打孔方式，但在微孔构筑领域，由于其加工后缺陷较多，应用较少；电化学打孔、电子束打孔、粒子束打孔设备较为复杂，对处理环境要求高；而激光处理具有设备简单、效率高、非接触加工等优点，适合进行绝缘子表面微加工，本文选用激光进行微孔构筑。首先设计了平行阵列与倾斜阵列两种表面阵列结构，而后通过表面激光旋转微加工的方式在绝缘子侧面构筑了具有不同尺寸的 2 种表面阵列结构，并对 2 种表面微孔阵列对绝缘子沿面闪络性能的影响规律进行了测试。

1 实验

1.1 微孔阵列的设计与构筑

在保持密堆积的情况下，设计了如图 1 所示的 2 种阵列方式，第 1 种方式中表面微孔分别与 X、Y 两轴相互平行，称作平行微孔阵列；第 2 种方式中表面微孔与 X 平行，与 Y 轴成 45° 夹角，称作倾斜微孔。2 种阵列结构的设计主要基于二次电发射雪崩理论，对于平行阵列，假定电子向 Y 轴正方向运动，电子会被平行微孔抑制，但在微孔边缘处抑制会变弱，但沿 Y 轴方向微孔密度更大，抑制更强；对于倾斜阵列，电子在向 Y 轴正方向运动时，电子的抑制在第一排边缘处较弱但在下一排处于微孔中心处，抑制较强，但沿微孔 Y 轴方向，微孔密度较小；最终平行微孔对电子的抑制会沿 X 轴方向强弱周期分布，而倾斜微孔沿 Y 轴方向强弱周期分布。本文对 2 种微孔的抑制效果进行探究，同时对微孔的尺寸的影响进行探究。

表面微孔阵列构筑实验采用的材料为有机玻璃，因为其在绝缘领域内应用广泛，价格低廉，适合大样品探索性试验。在进行激光表面微孔处理之前，将有机玻璃棒料加工成直径 30 mm，厚度 5 mm 的圆柱形绝缘子，试验中采用的激光器为 CO₂ 激光器(波长为 10.64 μm)，CO₂ 激光器主要通过光热效应对聚合物材料进行刻蚀；当激光斑点聚焦在有机玻璃绝缘子表面上时，伴随着材料升温断链气化，表面会被激光刻蚀。对于圆柱形绝缘子，采用旋转刻蚀方法对绝缘子侧面进行刻蚀。如图 2 所示，样品被 2 块平行的柱状磁铁夹持在旋转加工平台上，每当绝缘子被旋转平台驱着转过一个小弧度(分割尺寸)，激光便会在该段弧上进行刻蚀，刻蚀的效果受到激光功率、扫描速度、光斑大小以及分割尺寸的影响。试验中通过调节激光作用模式，在有机玻璃绝缘子侧面获得实验设计中的 2 种微孔阵列构筑；同时通过控制激光作用参数得到直径分别为 300 μm 与 200 μm 两种微孔尺寸，并根据微孔大小调节微孔阵列的周期实现在 2 种阵列模式下微孔的密堆积。最终在绝缘子侧面构筑微孔直径分别为 300 μm 与 200 μm，阵列模式分别为平行阵列和倾斜阵列的 4 种表面微孔阵列结构。

实验中利用扫描电子显微镜(SEM)对表面微孔的平面构筑结果进行表征，如微孔的密度、分布、尺寸与形态；利用三维轮廓仪对表面微孔的垂直方向轮廓，如高度分布、立体形貌等进行表征；利用 X 射线光电子能谱仪(X-Ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)对激光作用后的表面化学状态变化进行表征。通过 3 种分析手段准确地描述微孔的表面形貌与立体结构，同时能说明激光作用后的表面化学状态的变化。

1.2 闪络电压测试系统

微孔阵列绝缘子的真空沿面闪络性能测试在高压脉冲系统上进行，该系统内部为一台四级 MARX 发生器，

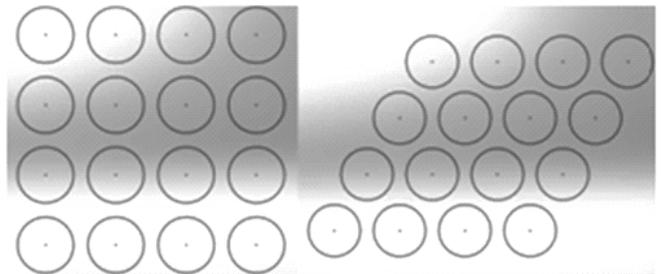


Fig.1 Two micro-hole arrays on insulators
图 1 两种绝缘子表面微孔阵列模式示意图

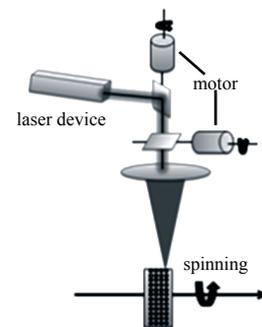


Fig.2 Schematic of constructing micro-hole arrays by laser spinning carving
图 2 激光在绝缘子表面旋转微孔阵列构筑示意图

可以输出 50~180 kV 的脉冲高压。该装置产生的脉冲高压为波头 40 ns、半高宽 500 ns 的脉冲波, 脉冲波的典型波形和发生沿面击穿后的电压波形如图 3(a)所示, 实验中沿面闪络是否发生由闪络现象与输出波形的变化判断。实验前真空腔通过机械泵预抽真空到 2 Pa 以下, 而后利用分子泵进一步抽到更低真空度, 最终达到实验腔体气压低于 5×10^{-4} Pa。实验中将样品夹持到两片圆形状不锈钢电极之间, 如图 3(b)所示, 电极片直径 80 mm, 厚度 10 mm, 电极片边缘圆弧自然过渡, 防止高压放电, 电极两端通过 2 根不锈钢导杆分别与负高压和地面连接; 最后将不锈钢电极和测试样品固定在交联聚苯乙烯支架上, 利用聚酰亚胺螺杆进行固定, 最后放入实验腔体, 进行沿面闪络性能测试。

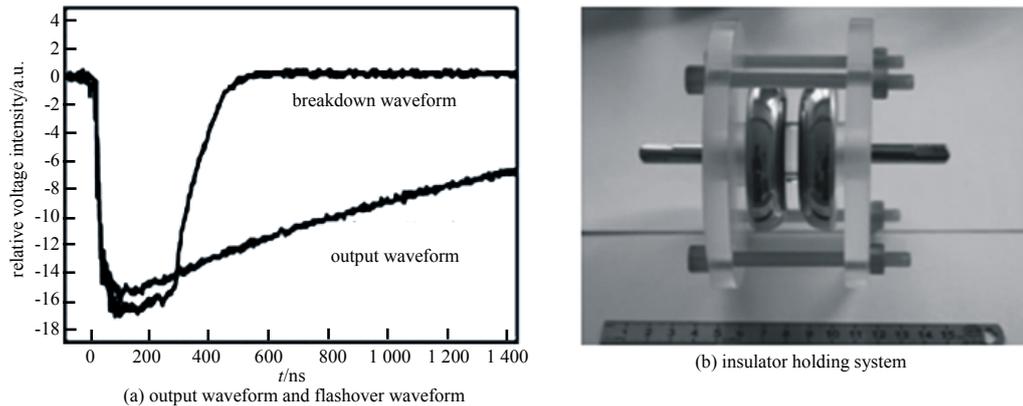


Fig.3 Voltage waveform of the test system and the insulator holding system
图 3 绝缘子真空沿面闪络测试电压波形与加持系统

闪络电压测试实验中, 每种绝缘子样品进行 3 次平行测试。实验过程中, 通过加压旋钮控制施加电压从 60 kV 开始, 每次大约升压 2 kV。在升到的每一个电压下, 对绝缘子样品施加 5 次电压脉冲, 由示波器记录的电压波形和放电时真空腔内的现象判断闪络是否发生。当闪络首次出现时, 记录下施加的电压记做初始闪络电压(Initial Flashover Voltage); 继续升高电压, 当 5 次电压脉冲均能引发闪络时, 记录下达到的电压记做老练闪络电压(Conditioned Flashover Voltage)。

2 实验结果与分析

2.1 微孔阵列构筑结果

利用扫描电子显微镜对圆柱形有机玻璃绝缘子侧面上 4 种微孔阵列的平面构筑效果进行表征, 结果如图 4 所示。其中, 图 4(a)为微孔直径为 200 μm 的平行阵列结构, 图 4(b)为微孔直径为 200 μm 的倾斜阵列结构, 图 4(c)为微孔直径为 300 μm 的平行阵列结构, 图 4(d)为微孔直径为 300 μm 的倾斜阵列结构。对比图 4(a)、图 4(b)或图 4(c)、图 4(d)可知, 通过激光作用模式的调节, 在绝缘子侧面构筑了 2 种微孔阵列; 通过对比图 4(a)、图 4(c)或图 4(b)、图 4(d)可知, 通过调节激光作用的参数可以控制微孔构筑的孔径大小, 得到了 2 种尺度的微孔; 微孔形状为圆形, 大小均一, 分布均匀, 周期性较好。

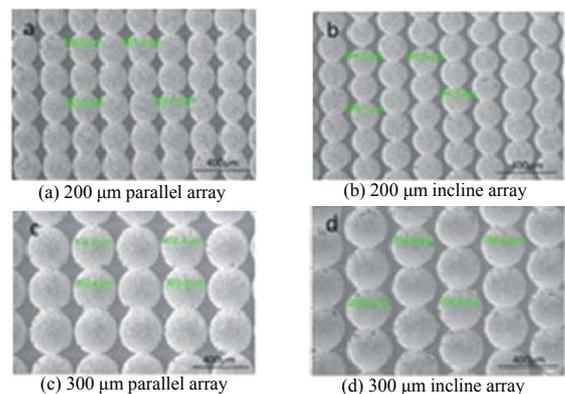


Fig.4 Morphologies of the four micro-hole arrays on PMMA insulators
图 4 有机玻璃绝缘子表面微孔阵列形貌

利用三维轮廓仪对直径为 200 μm 的 2 种微孔阵列的立体形貌进行分析, 结果如图 5 所示。其中图 5(a)为平行微孔阵列的平面效果图, 图 5(b)为平行微孔阵列的立体效果图, 图 5(c)为倾斜微孔阵列的平面效果图, 图 5(d)为倾斜微孔阵列的立体效果图。从图 5(a)与图 5(c)中可以看出, 在相同的激光参数下表面微孔的深度在 50 μm 左右, 而从 5(b)与 5(d)可以形象地看出, 表面微孔深度较为均一, 各个微孔形状基本一致, 同时可以看出倾斜微结构将表面分割得更加均匀。

对激光作用前后的有机玻璃表面进行 XPS 分析, 结果如图 6 所示。从图 6(a)可以看出, 有机玻璃的 C_{1s} 峰是分立的, 能够分为 4 个峰, 这 4 种峰分别对应插图中标注的 4 种不同化学环境中的碳原子, 即 4 种不同的碳

原子成键结构。4 种结构的 C_{1s} 轨道能量分别为： $-\text{CH}_2-$ 能量 284.7 eV； $>\text{C}<$ 能量 285.8 eV； $\text{CH}_3-\text{O}-$ 能量 287.5 eV； $>\text{C}=\text{O}$ 能量 289.1 eV。对比图 6(a)和图 6(b)可以发现， C_{1s} 4 个峰的位置基本相同，表明激光作用前后表面的碳元素的化学态并没有发生变化，说明表面化学成分基本保持一致。峰 4 的降低与峰 1 的上升说明表面 $\text{C}=\text{O}$ 极性官能团的数量降低， $\text{C}-\text{H}$ 键增多，整体极性降低；这可能是因为在高能量激光作用下，表面部分含氧官能团的氧元素断键之后以 CO_2 的方式溢出。

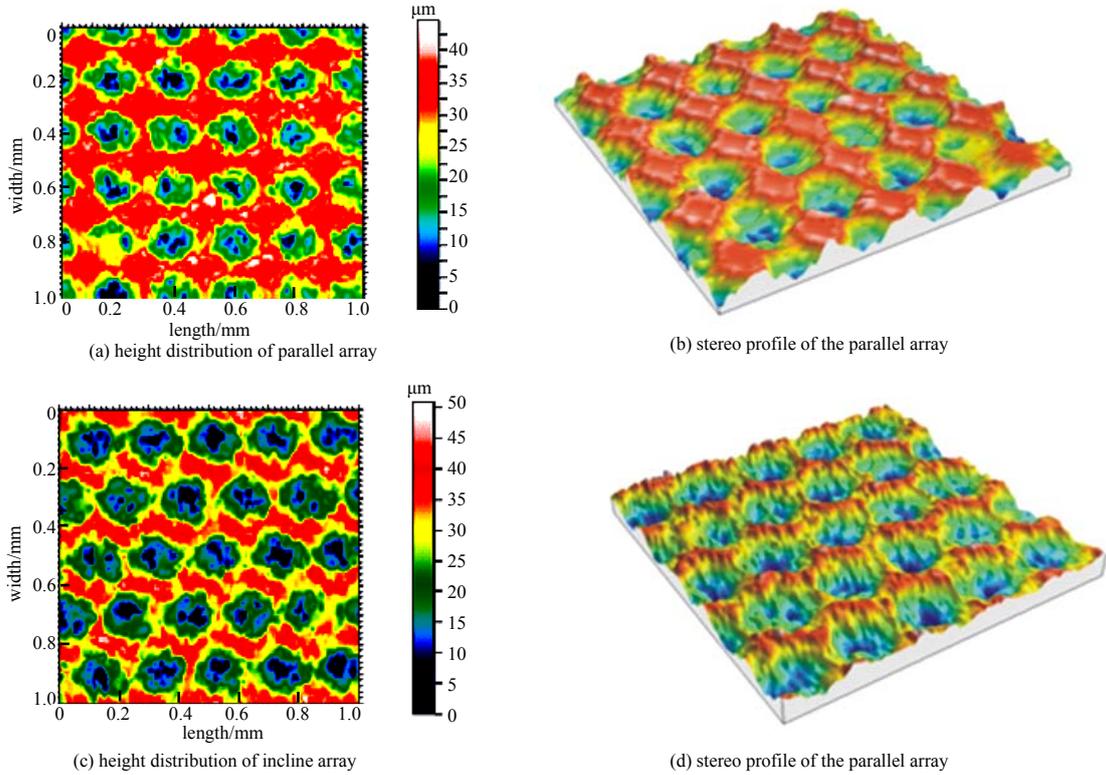


Fig.5 Stereoprofile of the 200 μm micro-hole arrays on PMMA insulators

图 5 有机玻璃绝缘子表面 200 μm 微孔点阵立体轮廓

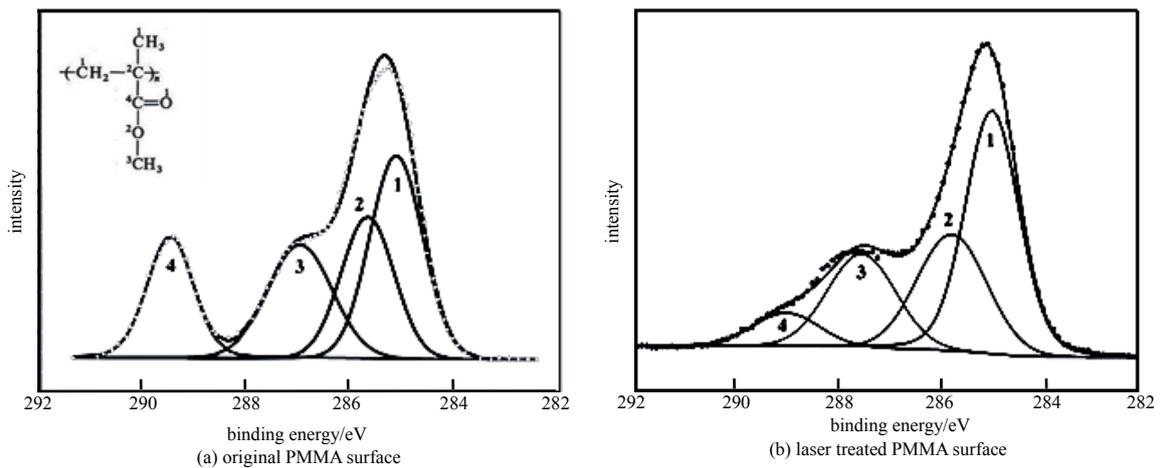


Fig.6 C_{1s} XPS spectra of the original and the laser treated PMMA surfaces

图 6 原始的有机玻璃 C_{1s} 分峰与激光刻蚀后的有机玻璃 C_{1s} 分峰结果

2.2 表面微孔阵列绝缘子闪络测试结果

4 种微孔的沿面闪络电压测试结果如图 7 所示，对比可知，在相同的微孔尺寸与微孔密度下，不同的点阵结构闪络电压基本保持一致；在相同的点阵结构下，表面微孔尺寸较小的绝缘子达到了相对较高的闪络耐压。说明在一定尺寸范围内，微孔直径越小对沿面闪络发展的抑制越强烈；而在相同的微孔密度与微孔直径下，闪

络电压与微孔的排布方式无关。

综上所述,通过激光在有机玻璃绝缘子表面进行微孔阵列的方法探究,成功地利用旋转刻蚀的方法在圆柱形有机玻璃绝缘子侧面上构筑了微孔阵列,微孔均一性、周期性良好,且激光作用后表面成分基本不发生变化。实验中可以通过控制激光的刻蚀参数、作用模式调节微孔的大小与阵列方式得到具有不同微孔尺寸与分布状态的阵列结构。微孔构筑的聚合物绝缘子能够有效地提升沿面闪络电压,在一定的孔径范围内,闪络电压的提升效果随微孔的直径降低而增加,而微孔的阵列方式对闪络电压影响较小。根据二次电子发射雪崩理论,抑制二次电子发射雪崩的形成能够有效地提升绝缘子的沿面闪络电压;表面微孔的构筑能够打断电子的运动从而抑制二次电子雪崩的形成,进而提升闪络电压。对于单个微孔,抑制效果只与微孔的尺寸和深度相关;在相同的深度下,孔径越大电子越容易在微孔内部形成倍增,抑制效果越差,在闪络性能上表现为较大的微孔阵列的闪络电压低于较小微孔。而在相同的微孔尺寸下,单个微孔的抑制能力相同,总体抑制效果取决于微孔的密度;在微孔分布均匀,密度相同时,对闪络的抑制能力相同,在闪络性能上表现为闪络电压不受微孔阵列方式的影响。

3 结论

本文通过激光旋转刻蚀的方法在圆柱形绝缘子侧面进行微孔构筑,成功地在绝缘子表面构筑了直径为 200~300 μm ,深度为 50 μm 的密堆积微孔,微孔的尺寸与阵列方式可以通过控制激光参数与作用模式进行调节。选取了直径分别为 300 μm 与 200 μm ,阵列模式分别为平行阵列与倾斜阵列的 4 种微孔阵列进行研究,结果表明激光构筑的 4 种微孔具有良好的均一性与周期性,在平面上表现为密堆积。闪络电压测试结果表明,微孔构筑能够有效地提升闪络电压,且提升效果随微孔的直径降低而增大。限于激光光斑的直径,只能在百微米量级进行微孔构筑对闪络的影响研究,更小的微孔实现较为困难。后期的探究中将会在此基础上引入更精细的处理手段,在表面实现数十微米的微孔构筑,进一步探究规则微形貌构筑参数对绝缘子闪络电压的影响规律。

参考文献:

- [1] MILLER H C. Flashover of insulators in vacuum:the last twenty years[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016,22(6):3641-3657. DOI:10.1109/TDEI.2015.004702.
- [2] LI S,NIE Y,MIN D,et al. Research progress on vacuum surface flashover of solid dielectrics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017,32(8):1-9.
- [3] SHAO T,YANG W,ZHANG C,et al. Enhanced surface flashover strength in vacuum of polymethyl methacrylate by surface modification using atmospheric-pressure dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2014,105(7):71607. DOI:10.1063/1.4893884.
- [4] CAI L,WANG J,CHENG G,et al. Simulation of multipactor on the rectangular grooved dielectric surface[J]. Physics of Plasmas, 2015,22(11):2120. DOI:10.1063/1.4935385.
- [5] CHANG C,HUANG H J,LIU G Z,et al. The effect of grooved surface on dielectric multipactor[J]. Journal of Applied Physics, 2009,105(12):123305. DOI:10.1063/1.3153947.
- [6] SAMPAYAN S E,VITELLO P A,KROGH M L,et al. Multilayer high gradient insulator technology[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002,7(3):334-339. DOI:10.1109/94.848910.
- [7] ANDERSON R A,BRAINARD J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption[J]. Journal of Applied Physics, 1980,51(3):1414-1421. DOI:10.1063/1.327839.
- [8] CHENG G,CAI D,HONG Z,et al. Variation in time lags of vacuum surface flashover utilizing a periodically grooved dielectric[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation. 2013,20(5):1942-1950. DOI:10.1109/TDEI.2013.6633728.

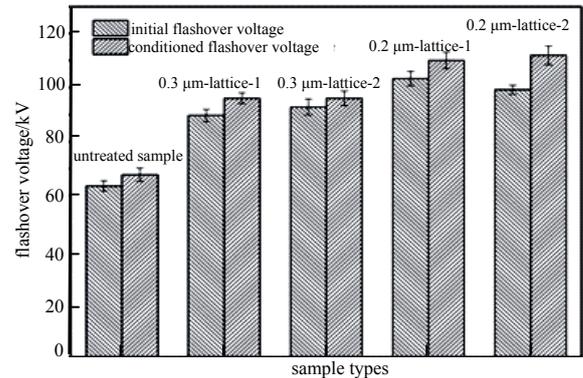


Fig.7 Flashover voltage results of the PMMA insulators with the four micro-hole arrays

图 7 四种微孔阵列的有机玻璃绝缘子闪络电压对比

- [9] 郎艳,王艺博,苏国强,等. 表面粗糙度对有机玻璃材料真空沿面闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015,41(2):474-478. (LANG Yan,WANG Yibo,SU Guoqiang,et al. Influence of surface roughness on vacuum flashover characteristics of PMMA[J]. High Voltage Engineering, 2015,41(2):474-478.) DOI:10.13336/j.1003-6520.
- [10] HUO Y,LIU W,KE C,et al. Sharp improvement of flashover strength from composite micro-textured surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 2017,122(11):115105. DOI:10.1063/1.4991934.
- [11] ZHANG Y,LI S,CHEN G,et al. Experimental observation and simulation of keyhole dynamics during laser drilling[J]. Optics & Laser Technology, 2013,48(6):405-414. DOI:10.1016/j.optlastec.2012.10.039.
- [12] SEBASTIANI M,EBERL C,BEMPORAD E,et al. Depth-resolved residual stress analysis of thin coatings by a new FIB-DIC method[J]. Materials Science & Engineering A, 2011,528(27):7901-7908. DOI:10.1016/j.msea.2011.07.001.
- [13] AHN S H,SHI H R,CHOI D K,et al. Electro-chemical micro drilling using ultra short pulses[J]. Precision Engineering, 2004,28(2):129-134. DOI:10.1016/j.precisioneng.2003.07.004.
- [14] KAI E,MIZUTANI K. Micro-drilling of monocrystalline silicon using a cutting tool[J]. Precision Engineering, 2002,26(3):263-268. DOI:10.1016/S0141-6359(01)00113-1.

作者简介:



霍艳坤(1992-),男,河南省沈丘县人,硕士,研究实习员,主要研究方向为复合材料、聚合物真空绝缘材料.email:18209287265@163.com.

刘文元(1973-),男,山西省临汾市人,博士,研究员,主要研究方向为高分子材料合成、聚合物成型、聚合物绝缘材料.

柯昌凤(1981-),男,湖北省阳新市人,硕士,副研究员,主要研究方向为聚合物成型、金属无机复合材料.

段 荔(1976-),女,山西省襄汾市人,博士,副研究员,主要研究方向为功能高分子材料.

罗维熙(1986-),男,四川省乐山市人,在读博士研究生,助理研究员,主要研究方向为电磁辐射效应、气体开关技术.

(上接第 326 页)

- [14] KOO J,WANG K,RUBY R,et al. A 350 μ W 2 GHz FBAR transformer coupled Colpitts oscillator with close-in phase noise reduction[C]// IEEE Custom Integrated Circuit Conference. Austin,TX,USA:IEEE, 2017:1-4.
- [15] WERNER D H,JIANG Z H. Ultra Low-Power MEMS-Based Radios for WBAN[M]. [S.l.]:Wiley-IEEE Press, 2016.

作者简介:



陈振雄(1992-),男,福建省泉州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为模拟射频集成电路.email:511800757@qq.com.

高同强(1970-),男,河北省邯郸市人,博士,副研究员,主要研究方向为模拟/射频集成电路.

赵思琦(1993-),女,吉林省辽源市人,在读硕士研究生,主要研究方向为模拟/射频集成电路.

方康明(1992-),男,广东省湛江市人,在读硕士研究生,主要研究方向为模拟/数模混合集成电路.

杨海钢(1970-),男,上海市人,博士,研究员,主要研究方向为微电子学与集成电路技术、可编程信号处理器架构与 SoC 设计.

赵 湛(1958-),男,山西省太原市人,博士,研究员,主要研究方向为微型单片集成传感器及微纳制造技术.