

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.026

氧化铝陶瓷典型缺陷结构对电场分布的影响研究

李平安¹, 张朋¹, 李秀峰¹, 王文成¹, 王小强²

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 远东电缆有限公司, 江苏 宜兴 214257)

摘要: 在高电压环境下, 显微缺陷结构的存在会导致绝缘材料内产生电场畸变, 是影响氧化铝陶瓷绝缘强度的重要因素之一。为了研究高电压环境下氧化铝陶瓷典型缺陷结构对材料内电场分布的影响, 建立了包含缺陷结构的细观陶瓷结构模型, 并采用有限元软件分析了晶粒尺寸、玻璃相以及气孔的存在对电场分布的影响规律。结果表明: 晶粒尺寸对电场畸变程度的影响较小, 而玻璃相的存在对电场畸变程度的影响较大。玻璃相对电场畸变的影响与晶界方向有关, 晶界与电场方向夹角越大, 玻璃相处的电场畸变程度越大。与晶粒尺寸和玻璃相的影响相比, 气孔缺陷的存在对氧化铝陶瓷内部电场畸变的影响最大, 其中, 晶粒内气孔导致场强最大值提高了46.8%, 而晶界处的气孔导致场强最大值提高一倍以上。气孔尺寸对电场畸变的范围影响较大, 而对场强最大值的影响较小。

关键词: 氧化铝陶瓷; 有限元法; 电场畸变; 晶粒尺寸; 玻璃相; 气孔

Research on Influence of Typical Defect Structures of Alumina Ceramics on Electric Field Distribution

LI Ping'an¹, ZHANG Peng¹, LI Xiufeng¹, WANG Wencheng¹, WANG Xiaoqiang²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Shandong Zibo 255000, China; 2. Far East Cable Co., Ltd., Jiangsu Yixing 214257, China)

Abstract: In high voltage environment, the existence of micro-defect structure can lead to electric field distortion in insulating materials, and is one of the most important factors that influence the insulation strength of alumina ceramics. For studying the influence of typical defect structures of alumina ceramics on the electric field distribution, a mesoscopic model with defect structures of alumina ceramic is set up, and the influence of the existence of grain size, glass phase and porosity on electric field distribution is analyzed by using the finite element software analysis. The results show that the influence of grain size on electric field distortion is less, while the existence of glass phase has a great influence on the electric field distortion. The influence of glass phase on electric field distortion is related to grain boundary direction. The bigger the included angle between grain boundary direction and electric field direction, the higher the electric field distortion at the glass phase. Compared with the influence of the grain size and glass phase, the influence of the existence of porosity defect on the electric field distortion inside the alumina ceramics is highest. Specifically, the maximum electric field due to the porosity in the grain is increased by 46.8%, and that due to porosity at the grain is more than doubled. The influence range of porosity on electric field distortion is higher and on the maximum value of the field strength is lower.

Key words: alumina ceramics; finite element method; electric field distortion; grain size; glass phase; pore

0 引言

氧化铝陶瓷作为粒子加速器和热核聚变反应

堆的射频窗、高功率微波器件的介质窗以及真空开关的管壳等在现代工业中获得了广泛应用^[1-3], 其绝缘强度对电力设备的安全可靠性具有重要影响。

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-12-13

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2019MEE100)。

Project Supported by National Natural Science Foundation General Projects of Shandong Province(ZR2019MEE100).

氧化铝陶瓷的绝缘强度除了受外形结构、应用环境、表面状态^[4]、电极结构^[5]等因素影响外,主要取决于其自身的成分和微观结构特征^[6-7]。其中,晶粒尺寸、玻璃相成分与含量、气孔大小、气孔数量以及气孔位置等因素对绝缘强度的影响较为显著。法国学者 LIEBAULT J 等^[8]研究发现高纯度氧化铝陶瓷(99.99%)的介电强度随着晶粒尺寸的增加而减小,并认为晶间玻璃相能够促进电子迁移、减少电子集聚,因此,减小晶粒尺寸、增加晶界数量可以提高氧化铝陶瓷的击穿场强。然而,也有研究表明多晶陶瓷的击穿场强远低于单晶材料,如 NEUSEL C 等^[9]测得的氧化铝单晶的击穿场强高达 2.4×10^7 V/m,而 MALEC D 等^[10]测得的 96% 氧化铝陶瓷的击穿场强约为 1.6×10^7 V/m。LI S T^[11]的研究表明,陶瓷材料中由于缺陷产生的陷阱能级是决定陶瓷绝缘强度的主要因素。而晶界、玻璃相、气孔等缺陷结构正是通过影响陷阱能级分布而改变材料的介电强度。综上所述可以看出,对于晶粒、晶界、玻璃相等缺陷影响氧化铝陶瓷绝缘强度的机制仍缺乏统一的认识。另一方面,对于气孔率影响介电强度的研究则具有较一致的结论。LIEBAULT J 等^[8]的研究表明,当氧化铝陶瓷的气孔率由 15% 降低到 5% 时,其介电强度由 0.6×10^7 V/m 增加到 1.3×10^7 V/m。国内陶瓷绝缘方面的学者,例如谢清云^[12]、程焰林^[13]等人的研究也证明了气孔率、气孔大小和形状等都对陶瓷的击穿强度具有显著影响,并且认为气孔主要通过电场畸变和局部放电的方式导致陶瓷材料绝缘强度降低。

总体来说,由于陶瓷材料体系的复杂性,目前关于陶瓷绝缘强度的研究主要基于实验规律的总结,所提出的相关理论对于实验现象的解释仍具有很大的局限性。尤其是对于显微缺陷结构影响介电强度的确切机制尚不清楚。但无论是基于空间电荷输运理论的解释模型^[8-11],还是基于气体放电或电场畸变理论的解释模型^[12-14],都表明材料内的电场分布情况是陶瓷绝缘失效的关键因素。因此,文中利用有限元仿真软件对陶瓷材料缺陷结构的微观模型进行电场分析,以获得关于缺陷结构影响电场分布的直观认识。文中的研究内容对于氧化铝陶瓷的绝缘失效机理分析具有一定的参考意义。

1 模型建立

1.1 氧化铝陶瓷微观模型及参数

文中对氧化铝陶瓷缺陷结构的建模基于扫描电子显微镜(SEM)图像。在建模时,晶粒尺寸及形状根据文[15]中的 SEM 图像来确定,见图 1。由于陶瓷

材料属于晶相、玻璃相、气相的混合物,在各个方向均不具有对称性,因此,文中未采用二维简化模型,而是基于 SEM 图像建立截面结构,见图 2,然后在垂直于截面方向上进行拉伸,得到如图 3(a)所示的三维仿真模型。图 1 所示的 SEM 图像中,晶粒尺寸从 SEM(a)到 SEM(e)依次减小,图 3(a)所示的仿真模型在 x 、 y 、 z 轴方向的尺寸为 $2.896 \mu\text{m} \times 1.947 \mu\text{m} \times 2.000 \mu\text{m}$ 。在模型垂直于 y 轴的两个表面上设置半径为 $5 \mu\text{m}$ 、厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 的圆形电极板,见图 3(b)。

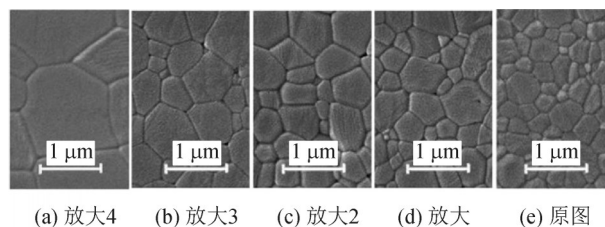


图 1 氧化铝陶瓷 SEM 图像

Fig. 1 SEM pictures of alumina ceramics

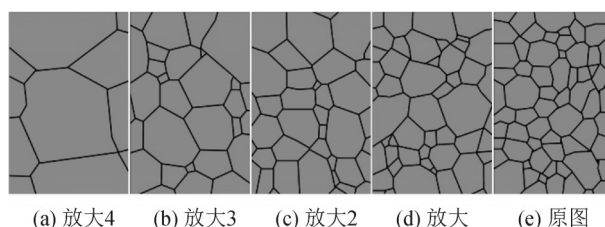


图 2 氧化铝陶瓷仿真模型截面

Fig. 2 Cross section of alumina ceramics simulation model

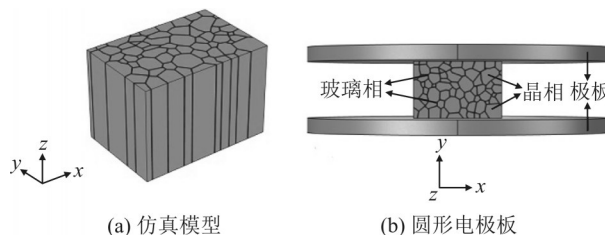


图 3 氧化铝陶瓷仿真模型

Fig. 3 Simulation model of alumina ceramics

玻璃相厚度根据氧化铝陶瓷的纯度来确定。以最常用的 95% 氧化铝陶瓷为例,其中,氧化铝晶相密度为 3.98 g/cm^3 ,玻璃相密度为 2.789 g/cm^3 ^[16],计算得到模型中的玻璃相厚度应为 $0.017 \mu\text{m}$ 。仿真模型中各材料仿真参数见表 1^[17-18]。

表 1 各材料仿真参数

Table 1 Simulation parameters of each material

材料	相对介电常数	电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)
晶相	10.4	1×10^{-16}
玻璃相	8.5	1×10^{-13}
空气	1.0	8×10^{-18}

对于模型加载电压,文中假设氧化铝陶瓷用于 40.5 kV 电真空开关管中,陶瓷厚度为 1 mm,陶瓷绝缘所承受的典型场强值为 40.5 kV/mm。微观仿真

模型的厚度为1.947 μm ,因此,在图3所示极板上加载78.85 V的工频交流电压(下极板接地),对电场分布进行仿真分析。

1.2 网格划分

采用自由四面体网格对三维模型进行网格划分。对极板采取粗化处理减少计算量,对于玻璃相和气孔等细小结构,增大网格分辨率、减小最小单元大小,以确保得到更准确的仿真结果。其中,每个气孔的四面体单元数都在12 000个以上。网格划分结果见图4。

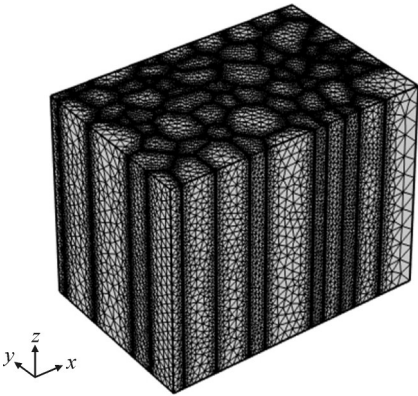


图4 网格划分模型

Fig. 4 The mesh generation model

2 仿真结果与分析

2.1 晶粒尺寸对电场分布的影响

不同晶粒尺寸模型的晶粒尺寸分布情况见图5

和表2。图5中,从图5(a)到图5(e),晶粒平均尺寸逐渐减小。

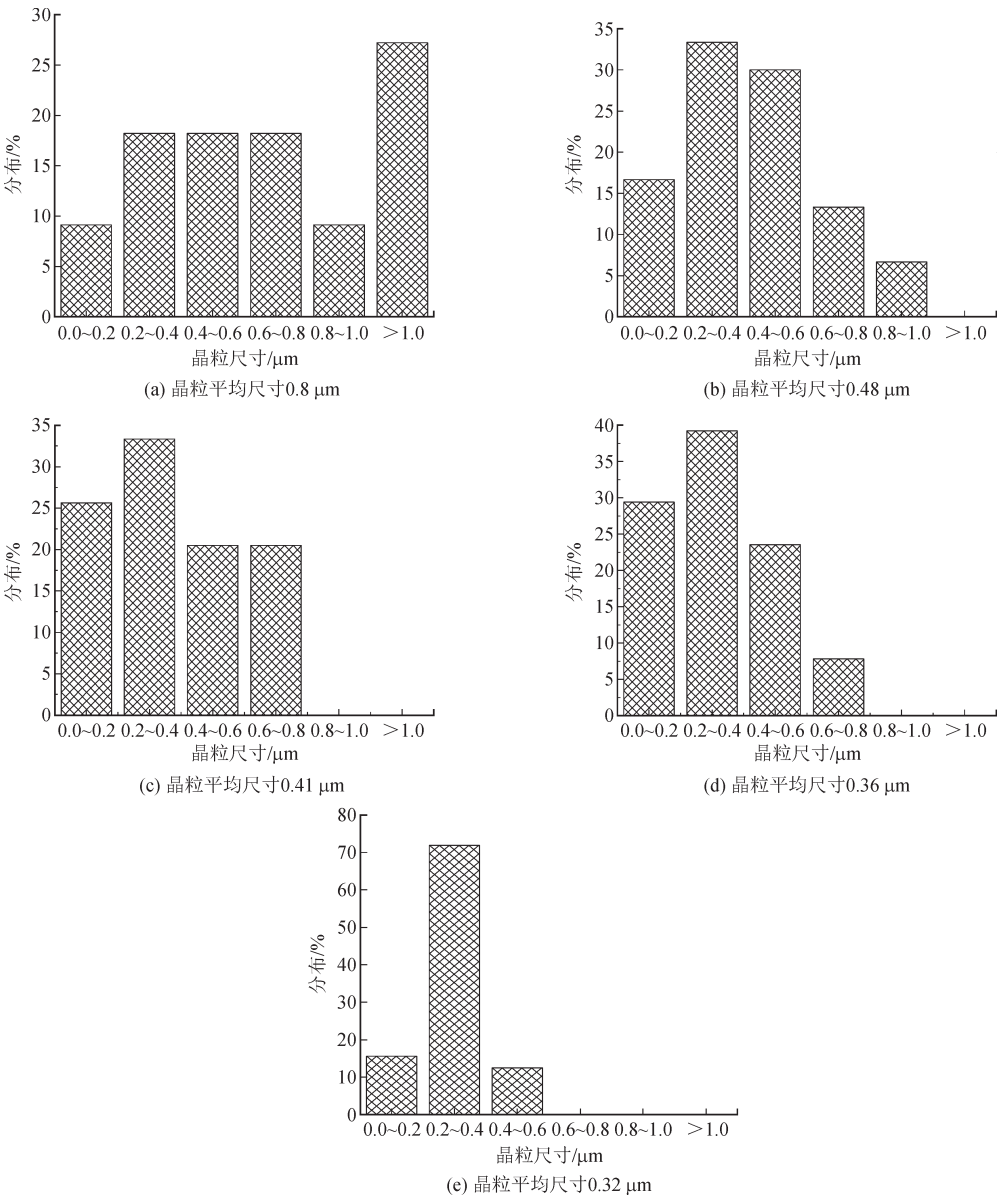


图5 晶粒尺寸分布

Fig. 5 Grain size distribution

表2 晶粒平均尺寸统计

Table 2 Average grain size statistics

图5模型序号	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
晶粒平均尺寸/ μm	0.80	0.48	0.41	0.36	0.32

不同晶粒尺寸的氧化铝陶瓷电场分布情况见图6。从图6中可以看出,随着晶粒尺寸逐渐减小,相应的场强最大值(图中圆点处,依次为 4.98×10^7 、 5.00×10^7 、 5.35×10^7 、 5.06×10^7 、 5.02×10^7 V/m)并没有随晶粒尺寸的减小而显著变化。由此可见,晶粒尺寸的减小对电场畸变程度的影响较小。

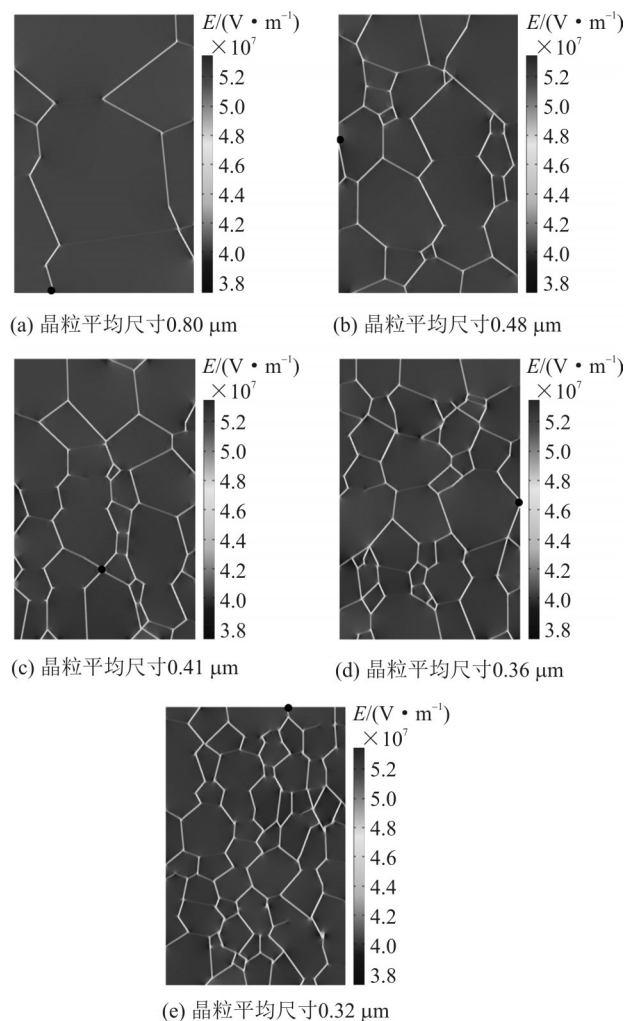


图6 不同晶粒尺寸氧化铝陶瓷的电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of alumina ceramics with varied grain sizes

2.2 玻璃相对电场分布的影响

陶瓷材料玻璃相的成分取决于配方中烧结助剂的种类,而最常见的氧化铝陶瓷配方主要成分是 Al_2O_3 、 CaO 、 SiO_2 和 MgO ,因此,文中分析所用的玻璃相主要成分为铝硅酸盐玻璃。从图6中可以看出,玻璃相对氧化铝陶瓷的电场分布有明显的畸变作用,场强最大值均位于玻璃相附近。除此之外,晶

界的角度对电场畸变的影响较为显著。以 x 轴作为极轴,对晶界数量最多的图6(e)进行统计,得到的晶界角度对电场畸变的影响规律曲线见图7。从图7中可以看出,玻璃相处的电场强度随着晶界与 x 轴夹角的增大呈现先减小后增大的趋势。其中,当晶界与 x 轴垂直时,即晶界方向与外加电场方向平行时,玻璃相处的场强最小。与晶粒内部场强最大值相比,晶界的存在导致场强最大值增大,提高幅度在0%~25%之间。

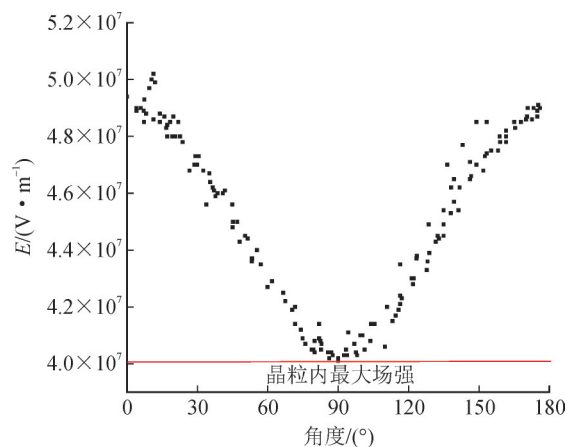


图7 不同角度晶界电场强度分布值

Fig. 7 Electric field intensity at grain boundaries with different angles

2.3 气孔对电场分布的影响

气孔缺陷的存在不仅影响氧化铝陶瓷的机械性能^[19],还会影响材料的光学性能^[20]和介电性能^[21]。但是,由于制造工艺特点,陶瓷中总是会有5%~10%的残余气孔,这些气孔或者残留在尺寸较大的晶粒内部,或者由于晶粒的长大和晶界的移动而在晶粒交界处残留^[22]。以图1所示SEM图像中的气孔为例,对晶粒内部和晶界交点处的气孔分别进行电场仿真。晶粒内部的气孔以图1(d)所示SEM图像中的气孔为参考对象,设置半径为 $0.027 \mu\text{m}$ 高度为 $2 \mu\text{m}$ 的圆柱形气孔,见图8。晶界交点处的气孔以图1(b)和图1(c)所示SEM图像中的气孔为参考对象,分别设置了截面边长为 $0.064 \mu\text{m} \times 0.086 \mu\text{m} \times 0.09 \mu\text{m}$ 、高度为 $2 \mu\text{m}$ 的三棱柱形气孔,见图9。边长为 $0.63 \mu\text{m} \times 0.68 \mu\text{m}$ 高度为 $2 \mu\text{m}$ 的矩形气孔,见图10。由于陶瓷是在高温环境下烧结而成,无论是晶粒还是气孔的边缘都不存在尖角结构,因此,对三棱柱形气孔和长方体形气孔的棱角进行了圆角处理,圆角的弧度均为 $0.01 \mu\text{m}$ 。

3种气孔所对应的电场分布情况见图11~13。从图中可以看出,气孔缺陷对电场的畸变具有显著影响。当气孔位于晶粒内部时,场强最大值为 $7.43 \times$

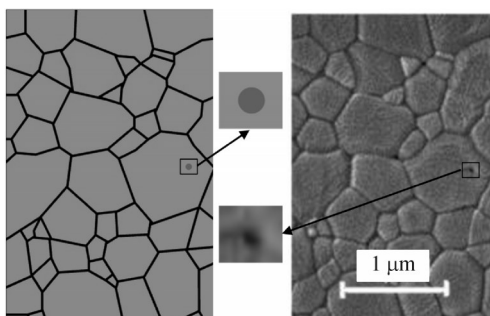


图8 晶粒内部气孔

Fig. 8 Pores inside the grain

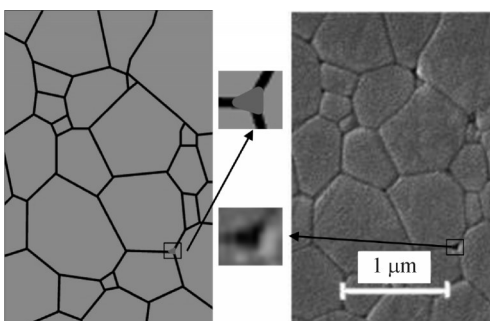


图9 三晶界交点处气孔

Fig. 9 Pores at the intersection of three grain boundaries

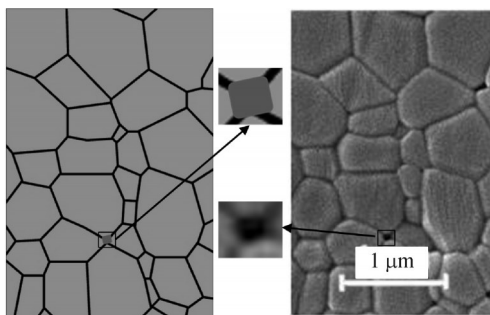


图10 四晶界交点处气孔

Fig. 10 Pores at the intersection of four grain boundaries

10^7 V/m, 见图11, 与不含气孔的场强最大值, 见图6(d), 相比提高了46.8%。而三棱柱形气孔和长方体形气孔周围的场强最大值分别为 10.93×10^7 V/m 和 10.92×10^7 V/m, 见图12、13, 均超过图6(b)、(c)所示的不含气孔时场强最大值的两倍。由此可见, 气孔的存在会导致陶瓷内部电场的严重畸变, 并且位于玻璃相处的气孔比位于晶粒内部的气孔对电场的畸变程度更大。

以晶粒内部的圆形气孔作为研究对象, 保持图11中圆柱形气孔的位置不变, 改变气孔的孔径为 $0.047 \mu\text{m}$ 和 $0.067 \mu\text{m}$ 进行仿真分析, 以此研究气孔尺寸对电场分布的影响。不同孔径气孔对附近径向电场分布的影响见图14。

由图14可知, 当气孔尺寸发生变化时, 其附近电场分布趋势相同, 电场强度最大值也基本相等, 电场畸变区域约为气孔尺寸的5倍, 气孔尺寸越大,

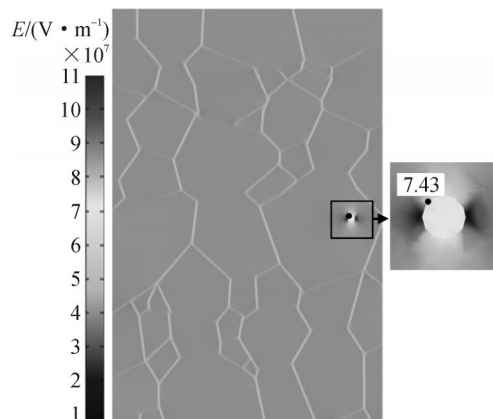


图11 晶粒内部气孔电场分布

Fig. 11 Electric field distribution with pores inside the crystal grain

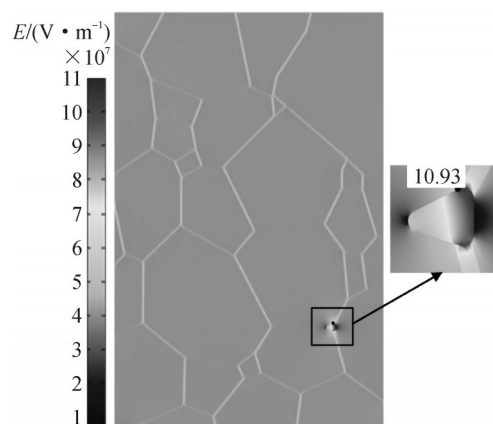


图12 三晶界交点处气孔电场分布

Fig. 12 Electric field distribution with pores at the intersection of three grain boundaries

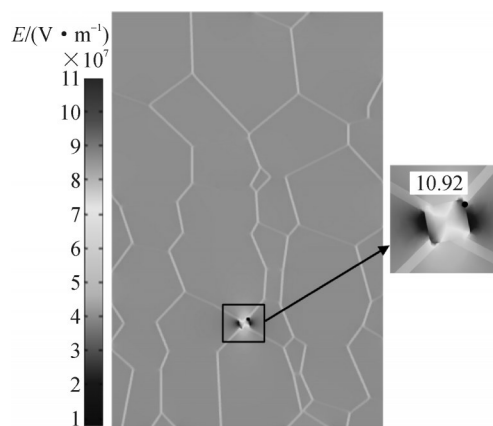


图13 四晶界交点处气孔电场分布

Fig. 13 Electric field distribution with pores at the intersection of four grain boundaries

电场畸变区域越大。由此可见, 气孔尺寸主要影响电场畸变区域, 对场强最大值的影响较小。

3 结论

文中通过对氧化铝陶瓷的微观模型进行电场仿真, 研究了晶粒尺寸、玻璃相以及气孔的存在对氧

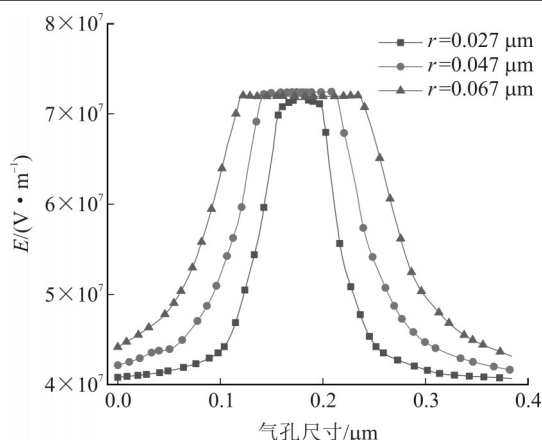


图14 气孔尺寸对电场分布的影响

Fig. 14 Influence of pore size on the electric field distribution

氧化铝陶瓷内部电场分布的影响,得出如下主要结论:

1)氧化铝陶瓷的晶粒尺寸对其内部电场分布影响较小,细化晶粒并不会直接改善氧化铝陶瓷内部的电场畸变。

2)玻璃相的存在对氧化铝陶瓷内部电场分布具有一定的畸变作用,而且晶界的方向对电场畸变的程度具有显著影响。晶界方向越垂直于电场方向,对电场畸变的影响程度越大。

3)气孔缺陷对氧化铝陶瓷内部电场的畸变作用最为显著。晶粒内气孔导致场强最大值提高了46.8%,而玻璃相中的气孔导致场强最大值提高了一倍以上。气孔的尺寸对电场分布范围的影响较大,而对场强最大值的影响较小。

参考文献:

- [1] MIYAUCHI Y, OHISHI Y, MIYAKE S, et al. Improvement of the dielectric properties of rutile-doped Al_2O_3 ceramics by annealing treatment[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26(10/11): 2093-2096.
- [2] 王 凯. Al_2O_3 陶瓷的微波和耐压性能研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
WANG Kai. Researches on the microwave dielectric properties and breakdown strength of alumina ceramic[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [3] 单达文, 饶平根, 吕 明, 等. 陶瓷真空开关管的研究现状及应用[J]. 中国陶瓷, 2008, 44(12): 12-16.
SHAN Dawen, RAO Pinggen, LYU Ming, et al. Present situation and application of ceramic vacuum switch tube[J]. China Ceramics, 2008, 44(12): 12-16.
- [4] ZHANG Tao, LEI Yangjun, YIN Jie, et al. Effects of pores on dielectric breakdown of alumina ceramics under AC electric field[J]. Ceramics International, 2019, 45(11):

13951-13957.

- [5] 程焰林, 向 伟, 雷杨俊. 真空中高压电极结构的单次脉冲沿面闪络耐压研究[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 11-14.
CHENG Yanlin, XIANG Wei, LEI Yangjun. Single-pulsed surface flashover hold-off voltage of electrode geometry in vacuum[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 11-14.
- [6] 千粉玲, 谢志鹏, 孙加林, 等. La_2O_3 对 Al_2O_3 陶瓷显微结构和微波介电性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(12): 1708-1712.
QIAN Fenling, XIE Zhipeng, SUN Jialin, et al. Effect of La_2O_3 addition on microstructure and microwave dielectric properties of Al_2O_3 ceramics[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(12): 1708-1712.
- [7] 石 棋, 范羽宣, 林 铭, 等. 铝粉造孔制备多孔氧化铝陶瓷的研究[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(6): 45-49.
SHI Qi, FAN Yuxuan, LIN Ming, et al. Study on preparation of porous alumina ceramics by Aluminum powders[J]. China Ceramics, 2020, 56(6): 45-49.
- [8] LIEBAULT J, VALLAYER J, GOEURLOT D, et al. How the trapping of charges can explain the dielectric breakdown performance of alumina ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(3): 389-397.
- [9] NEUSEL C, JELITTO H, SCHMIDT D, et al. Dielectric breakdown of alumina single crystals[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32(5): 1053-1057.
- [10] MALEC D, BLEY V, TALBI F, et al. Contribution to the understanding of the relationship between mechanical and dielectric strengths of alumina[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(15): 3117-3123.
- [11] LI Shengtao. Charge dynamics: Linking traps to insulation failure[C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Sydney, Australia: IEEE, 2015: 1-14.
- [12] 谢清云, 黄世兰. 电瓷材料介电性能的几个影响因素[J]. 电瓷避雷器, 1997(4): 11-14.
XIE Qingyun, HUANG Shilan. Several influencing factors on the dielectric properties of electric porcelain materials [J]. Insulators and Surge Arresters, 1997(4): 11-14.
- [13] 程焰林, 谢庆海, 张卫之, 等. 存在气泡缺陷的氧化铝陶瓷绝缘子电场仿真分析[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 120-123.
CHENG Yanlin, XIE Qinghai, ZHANG Weizhi, et al. Analysis of the electric field simulation of Al_2O_3 insulator with air bubble defect[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 120-123.
- [14] 周学明, 尹骏刚, 胡丹晖, 等. 超一特高压长串瓷绝缘子温度分布曲线拼接方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 199-205.
ZHOU Xueming, YIN Jungang, HU Danhui, et al. Temperature distribution curve splicing method for EHV-UHV long

- string porcelain insulators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 199-205.
- [15] NEČINA V, PABST W. Influence of the heating rate on grain size of alumina ceramics prepared via spark plasma sintering (SPS)[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020(40): 3656-3662.
- [16] 高陇桥. 95% Al_2O_3 瓷中玻璃相的组成和性能[J]. 电子元件与材料, 1982(4): 48-49.
- GAO Longqiao. Composition and properties of glass phase in 95% Al_2O_3 porcelain[J]. Electronic Components & Materials, 1982(4): 48-49.
- [17] 王崇鲁. 白宝石单晶[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1983.
- WANG Chonglu. White sapphire single crystal[M]. Tianjin: Tianjin Science And Technology Press, 1983.
- [18] 谢于深, 许 超. 玻璃化学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- XIE Yushen, XU Chao. Glass chemistry[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981.
- [19] 王月民, 刘 军, 王 超, 等. 压力对凝胶注模成型95氧化铝陶瓷性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(5): 1223-1227.
- WANG Yuemin, LIU Jun, WANG Chao, et al. Influence of pressure on properties of 95 alumina ceramics prepared by gelcasting forming[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(5): 1223-1227.
- [20] 张 笑. MgO 对快速烧结制备氧化铝透明陶瓷光学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(12): 3910-3915.
- ZHANG Xiao. Effect of MgO on optical property of alumina transparent ceramics prepared by rapid sintering[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(12): 3910-3915.
- [21] 袁 翠, 陈 成, 李 蔚. TiO_2/MgO 共掺对99氧化铝瓷结构和微波介电性能的影响[J]. 中国陶瓷, 2019, 55(10): 41-45.
- YUAN Cui, CHEN Cheng, LI Wei. Effect of co-doping of TiO_2/MgO on structure and microwave dielectric properties of 99 alumina ceramics[J]. China Ceramics, 2019, 55(10): 41-45.
- [22] 郑元善, 彭建中, 张洪波, 等. 氧化铝陶瓷的微观结构对表面粗糙度的影响[J]. 材料导报, 2000(14): 116-118.
- ZHENG Yuanshan, PENG Jianzhong, ZHANG Hongbo, et al. The influence of the microstructure of alumina ceramics on the surface roughness[J]. Materials Reports, 2000(14): 116-118.
- 李平安(1995—), 男, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 917371415@qq.com)。
- 李秀峰(1974—), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电缆料及电缆附件关键问题与技术、纳米复合电介质特性及应用的研究、电力设备绝缘结构优化设计(通信作者)(E-mail: lixiufeng0910@126.com)。