2014年2月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2014)01-0145-05

玻璃陶瓷带状线体击穿与传输特性

刘 毅,谌 怡,王 卫,夏连胜,章林文

(中国工程物理研究院 流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:为将玻璃陶瓷材料应用于脉冲功率系统以实现紧凑性,探究了2mm厚玻璃陶瓷样品的体击穿场强 E₄,并测量了电极宽度 W与极板间距 d之比(W/d)在 0.6 至 2 范围内的玻璃陶瓷带状传输线的特性阻抗。考虑到回路分布参数的影响,实验中通过测量失配情况下传输线主脉冲的脉宽、幅值和反射脉冲的幅值,计算了其特性阻抗,并提出了对近似公式的修正。利用高压脉冲对样品两端加载的方式,在脉宽 250 ns 的脉冲电压下测量了 2 mm厚玻璃陶瓷样品的体击穿场强 E₆, 铌酸盐体系样品 E₆达到 20.2 kV/mm, B₂O₃体系样品 E₆大于 29.6 kV/mm。

Bulk breakdown and transmission characteristics of glass-ceramic bi-plate transmission line

LIU Yi, SHEN Yi, WANG Wei, XIA Lian-sheng, ZHANG Lin-wen

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Manyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For compactness of pulsed power system by using glass-ceramic, bulk breakdown field strength $E_{\rm B}$ of 2 mm glass-ceramic slices is discussed and transmission characteristics of glass-ceramic bi-plate transmission line with the ratio of electrode width and distance between electrodes in the range of 0.6 to 2 are measured. Considering the influence of circuit distribution parameters, characteristic impedance is calculated by measuring pulse width, amplitude and reflected wave amplitude in the case of unmatched load, and a revised formula is presented. Experimental results show that $E_{\rm B}$ of niobate sample and B_2O_3 are 20.2 kV/mm and above 29.6 kV/mm by measuring $E_{\rm B}$ of 2 mm glass-ceramic sample under pulse voltage with 250 ns pulse width, respectively.

Key words: glass-ceramic; bi-plate transmission line; pulse waveform; characteristic impedance; bulk breakdown field strength

当前主要的高功率脉冲功率系统,由于液态储能介质的储能密度较低,导致脉冲功率系统体积和重量很大, 限制了其应用范围。固态高储能密度介质材料成为发展紧凑型、轻重量、小体积脉冲功率系统的关键。与液态储 能介质相比,固态储能介质如纯陶瓷和玻璃陶瓷,现已实现更高的储能密度(玻璃陶瓷最高可达 15 J/cm³,去离 子水和变压器油均远小于1 J/cm³)^[1],从而可以减小脉冲形成线的长度和体积,简化辅助设备,有利于实现脉冲 功率系统的紧凑和轻便。如,若以固态的脉冲形成线作为储能和脉冲形成器件来搭建高功率微波发生器,不仅结 构简单轻便,并且可以省去复杂的高功率脉冲变压器^[2]或者微波脉冲压缩设备^[3]。

纯陶瓷在烧制过程中不可避免地存在孔隙,其体击穿场强的提高受到限制^[4]。玻璃陶瓷是将玻璃原料先通过 高温熔融和快速冷却工艺,制备出无孔隙的玻璃基体,然后在一定温度下经过结晶化处理,均匀析出纳米尺寸的 高介电常数陶瓷相^[5-6],所以玻璃陶瓷具有低缺陷、无空隙、介电常数可控的特点,同时具有高体击穿场强和高 介电常数,是一种很好的高功率脉冲功率系统储能介质^[7]。带状传输线在脉冲功率系统中广泛应用,如介质壁直 线感应加速器^[8]。当设计带状传输线时,要求其具有比较精确的特性阻抗,以便与系统阻抗匹配,从而减少反射 和损耗。带状传输线特性阻抗的计算公式有局限性,特别是当电极宽度W与极板间距d之比W/d不是很大时, 如果采用通常的近似公式,由于边缘效应,会带来偏差^[9]。在目前对介质壁加速器脉冲功率系统的设计中,带状线宽厚比W/d<2,文献当中尚无这一范围玻璃陶瓷带状传输线特性阻抗的计算公式。本文通过实验获得了W/d 在 0.6 至 2 范围内玻璃陶瓷带状线的特性阻抗,并对经验公式进行了修正。

1 玻璃陶瓷耐压特性

在测试玻璃陶瓷耐压特性中,高压脉冲电源的输出脉冲经变压器升压后,通过铜质圆形电极将脉冲高压加载 至夹在电极中间的圆形玻璃陶瓷样品上,调节脉冲电源的输出电压,逐步提高样品两端电压直至样品发生体击穿

(见图 1)。表 1 中 1 至 3 列举了前期对 3 种厚度无电极的玻璃 陶瓷小样的体击穿场强^[10],发现体击穿场强 $E_{\rm B}$ 明显随介质片 厚度增加而降低。原因是在制备过程中玻璃陶瓷介质会不可避 免地存在细微的缺陷,缺陷处比其他位置更容易发生体击穿。 当介质片厚度增加,其存在缺陷的概率更大,因此厚度越大的 玻璃陶瓷介质片,其 $E_{\rm B}$ 越低。

对 2 mm 厚玻璃陶瓷再次进行耐压实验,表 1 中 4 至 6 列 举了不同介质材料和电极工艺对体击穿场强的影响。测试小样 为厚度 2 mm、银电极直径 40 mm 的圆形样品,样品成分为铌 酸盐体系玻璃陶瓷。在 250 ns 脉宽的脉冲电压下样品的 *E*_B为



20.2 kV/mm(图 2 左)。由于电极边缘的场增强效应,所以其 EB低于无电极的样品。

为获得更高的 E_B ,研究中对样品成分和工艺做了新的尝试。实验显示 B_2O_3 体系玻璃陶瓷的 E_B 高于铌酸盐体系的样品,相对介电常数为 20、厚度 2 mm、电极直径 40 mm 的圆形样品,在 250 ns 脉宽的脉冲电压下样品 E_B 为 23.1 kV/mm。而参数相同,电极边缘涂覆氧化锌半导体玻璃釉以弱化边缘场增强的 B_2O_3 体系玻璃陶瓷样品 E_B 大于 29.6 kV/mm(图 2 右)。较之铌酸盐体系, B_2O_3 体系玻璃陶瓷具有更高 E_B ,值得未来对这一体系材料制作的玻璃陶瓷带状线进行深入研究。

表 1 不同参数玻璃陶瓷小样体击穿场强					
no	W/mm	material	electrode	Er Er	$E_{\rm P}/(\rm kV/mm)$
1	0.95	niobate	nought	22	32.6
2	1.88	niobate	nought	22	30.3
3	3.03	niobate	nought	23	28.9
4	1.98	niobate	silver	26	20.2
5	2.05	B_2O_3	silver	20	23.1
6	2.02	B_2O_3	silver, zinc oxide semiconductor glass glaze	20	>29.6

2 玻璃陶瓷带状传输特性

2.1 带状传输线特性阻抗 Z₀的计算公式

带状传输线电磁波传输的主模为 TEM 模,根据传输线理论,TEM 模的特性阻抗 Z₀和波速度 v 分别为:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \tag{1}$$

Fig.2 Niobate (left) and B₂O₃ (right) glass-ceramic samples 图 2 铌酸盐体系(左)和 B₂O₃体系(右)玻璃陶瓷小样

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \tag{2}$$

式中: L₀为单位长度传输线电感(H/m); C₀为单位长度传输线电容(F/m)。

通常,对于 $W \gg d$ 的带状传输线, L_0 和 C_0 近似计算公式为:

$$L_0 = \frac{\mu_0 \mu_r d}{W} \tag{3}$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r W}{d} \tag{4}$$

式中: $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率; $\varepsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m 为真空介电常数; $\mu_r=1$ 为玻璃陶瓷的相对磁导率; ε_r 为玻璃陶瓷的相对介电常数。

根据式(1)~式(4)可得到 Z₀和 v 的近似计算公式为:

$$Z_0 = 377 \frac{d}{W\sqrt{\varepsilon_r}}$$
(5)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left(c \, \text{为真空光速} \right) \tag{6}$$

对于W > d的一般情况,式(5)的 Z_0 有修正的近似公式^[11]:

$$Z_0 = 377 \frac{d}{(W+d)\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{7}$$

在设计如介质壁加速器的带状传输线时,采用的宽厚比一般 W / d < 2,式(7)对于这种情况依然不够精确,故本文将通过对这一宽厚比范围的玻璃陶瓷带状线进行实验,以获得更精确的规律。

2.2 实验布局

实验中使用的样品是带状线结构的铌酸盐体系玻璃陶瓷(见图 3)。玻璃陶瓷本体为 300 mm×30 mm 长方形片, 厚度从 2 mm 至 6 mm。介质片两面采用丝网印刷技术镀银电极,电极尺寸为 280 mm×4 mm,厚度约 20 μm。

如图 4 所示,实验采用单传输线结构,直流充电,2 个 500 MHz 探头分别监测传输线充电电压、放电波形和 负载上输出波形。由于单根传输线输出波形的脉宽太窄,约 10 ns,分布参数的影响很明显,不利于观察输出波 形,故将 2 片相同的传输线用铜箔首尾相连,脉宽增至大约 20 ns。实验中选用的负载是 70 Ω 或 150 Ω 的无感陶 瓷电阻,该阻值大于传输线特性阻抗,形成正失配,输出波形中有反射脉冲,通过测量主脉冲脉宽、幅值和反射 脉冲的幅值,可计算出传输线的特性阻抗。



2.3 实验结果与讨论

实际测量到脉宽(半高宽)2π=15.7(±0.2) ns,根据单传输线型高压脉冲形成线波过程的分析^[12],脉宽 2π:

$$2\tau = \frac{2l}{v} = \frac{2l\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}}{c} \tag{10}$$

式中: *l*为传输线长度; r 的物理意义是电压波在传输线中的单程渡越时间。由式(10)可知,脉宽与玻璃陶瓷厚度 (即电极间距)无关,所以在不同电压、不同厚度玻璃陶瓷平板传输线的实验中所得到的脉宽是一致的。由于高频 下玻璃陶瓷带状线的相对介电常数 er 不易测量,故根据式(10),通过测量带状线长度和输出波形的脉宽,计算得 到实验所使用的玻璃陶瓷的相对介电常数在该电脉冲频率和环境下为 er=16.5(±0.5)。图 5 为 4 mm 玻璃陶瓷带状 线分别在实验和 XFDTD 模拟(基于时域有限差分法)中的输出波形。脉冲波形前沿很小,为 tr=1.02(±0.09) ns,前 沿响应良好。但是由于带状线尺寸小、脉宽短,分布参数(如测量回路中的电感)对波形影响很大,因而较之模拟 结果,实验中获得的波形前沿出现过冲,脉冲平顶出现振荡。平顶中部的缺口则是由于 2 块带状线连接处玻璃陶 瓷和空气共同作为传播介质使得特性阻抗变大导致的。 根据单传输线波过程的分析^[12],并考虑到开关内阻和回路电感,负载上电压为:

$$U_R^{(1)} = \frac{R}{R + X + Z_0} U_0, \quad 0 < t < 2\tau$$
(11)

$$U_{R}^{(2)} = \frac{R}{R + X + Z_{0}} \left(\frac{R + X - Z_{0}}{R + X + Z_{0}} \right) U_{0} , \quad 2\tau < t < 4\tau$$
(12)

式中: $U_R^{(1)}$ 为 $0 < t < 2\tau$ 内负载上电压幅值; $U_R^{(2)}$ 为 $2\tau < t < 4\tau$ 内负载上电压幅值; R为负载电阻; X为开关内阻 r与回路感抗 X_L 的和; U_0 为充电电压。通过在实验中测量充电电压 U_0 , 4τ 内负载电压幅值 $U_R^{(1)}$ 和 $U_R^{(2)}$,利用式 (11)~式(12)可计算得到带状传输线的特性阻抗 Z_0 :

$$Z_0 = \frac{U_0 R}{2 U_R^{(1)}} \left(1 - \frac{U_R^{(2)}}{U_R^{(1)}} \right)$$
(13)

表 2 列举了在直流 100 V 至 700 V 充电电压下对不同厚度的玻璃陶瓷带状线反复实验,将所得到的 $U_0, U_R^{(1)}$ 和 $U_R^{(2)}$,代入式(13),得到不同宽厚比的带状传输线的特性阻抗。

表 2 中,4 mm 玻璃陶瓷带状线实验测得的特性阻抗为 47.75 Ω,由图 5 中模拟结果计算得到的特性阻抗为 48.38 Ω,相差 1.3%,说明实验与模拟结果较为符合。



Fig.5 Output waveform from experiment and simulation of 4 mm glass-ceramic bi-plate transmission line 图 5 4 mm 玻璃陶瓷带状线在实验和模拟中的输出波形

由公式(5),特性阻抗 Z_0 可视作宽厚比W/d的函数,即:

$$Z_0 = 377 \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r} f(W/d)}$$
(14)

表 2 中数据经过线性拟合,见图 6,可得到修正 因子 *f*(*W*/*d*)并将式(14)化为:

$$Z_0 = 377 \frac{d}{(0.91W + 1.10d)\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}}, \quad 0.6 < W / d < 2$$
 (15)

即玻璃陶瓷带状线在宽厚比 0.6 至 2 的情况下, 其特性阻抗满足上式。较之近似公式(7),在设计这一 宽厚比范围内的带状传输线时,参考修正公式(15)可 得到更精确的结果。



图 6 修正因子与宽厚比的关系

3 结论

在通常的高功率脉冲功率系统中,多采用液态储能介质,由于液态储能介质的储能密度较低,使得高功率脉冲功率系统体积大、重量重,且使用不便利。因此,发展固态高储能密度介质材料成为发展紧凑型、轻重量、小体积脉冲功率系统的关键。玻璃陶瓷具有低缺陷、无空隙、介电常数可控,是一种很好的固态高储能密度介质,本文对该类材料的击穿和传输特性予以研究,具有科学意义。

本文对不同厚度(宽厚比)的铌酸盐体系玻璃陶瓷带状传输线进行了单传输线结构的脉冲形成实验,脉冲前沿 和脉宽具有较好的脉冲形成线特质,但是由于尺寸较小,线路中分布参数的影响使得脉冲平顶较差,需进一步对 回路结构进行优化。根据实验结果,对材料为玻璃陶瓷带状传输线特性阻抗近似公式在宽厚比 0.6 至 2 范围内进行了修正,为这一范围的带状传输线设计提供了依据。在小样的耐压实验中,250 ns 脉宽下 2 mm 铌酸盐体系玻璃陶瓷体击穿场强达到 20.2 kV/mm,而 B₂O₃玻璃陶瓷在同样条件下体击穿场强大于 29.6 kV/mm,因而这一材料的玻璃陶瓷值得进行更深入地研究。

参考文献:

- Sampayan S,Caporaso G,Chen Y J,et al. Development of Compact Pulsed Power for the Dielectric Wall Accelerator[C]// Power Modulator Symposium. Livermore:[s.n.], 2006:411-414.
- [2] 张钊,谈效华. 高功率脉冲变压器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(5):626-634. (ZHANG Zhao, TAN Xiaohua. Design of high power pulse transformer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(5): 626-634.)
- [3] 张鹏,和天慧,沈旭明. 微波脉冲压缩研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008,6(2):156-159. (ZHANG Peng,HE Tianhui,SHEN Xuming. Pulse Compression for High Power Mircowave[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008,6(2):156-159.)
- [4] Gerson R, Marshall T C. Dielectric breakdown of porous ceramics[J]. Journal of Applied Physics, 1959, 30(11):1650-1653.
- [5] 王磊,张庆猛,杜军. PbO-Na₂O-Nb₂O₅-SiO₂ 系复合玻璃陶瓷的结晶行为和介电性能[J]. 功能材料, 2010,41(8): 1481-1484. (WANG Lei,ZHANG Qingmeng,DU Jun. Crystallization and dielectric properties of PbO-Na₂O-Nb₂O₅-SiO₂ composite glass-ceramics[J]. Journal of Functional Materials, 2010,41(8):1481-1484.)
- [6] 杜军,唐群,罗君,等. Pb₂Nb₂O₇-NaNbO₃-SiO₂ 纳米复合材料的制备及其介电性能[J]. 中国有色金属学报, 2008,18(2): 301-306. (DU Jun,TANG Qun,LUO Jun, et al. Preparation and dielectric characterization of nano-composite in Pb₂Nb₂O₇-NaNbO₃-SiO₂ system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008,18(2):301-306.)
- [7] Du J,Jones B,Lanagan M. Preparation and characterization of dielectric glass-ceramics in Na₂O-PbO-Nb₂O₃-SiO₂ system[J]. Mater lett., 2005,59:2821-2826.
- [8] Sampayan S,Caporaso G,Chen Y J,et al. Development of a compact radiography accelerator using dielectric wall accelerator technology[C]// Proceeding of Pulsed Power Conference. Livermore:[s.n.], 2005:50-53.
- [9] 计策,关永超,曹文彬. 带状线参数和绝缘安全尺寸计算[C]// 第三届高能电子学学术交流会会议文集. 2003:155-160.
 (JI Ce,GUAN Yongchao,CAO Wenbin. Strip transmission line parameters and insulation safety computation[C]// Proc. of 3rd HEE Conference. 2003:155-160.)
- [10] 刘毅,谌怡,王卫,等. 玻璃陶瓷介质片体击穿特性研究[C]// 中国核学会三核论坛论文集. 杭州:中国核学会, 2012:90-95. (LIU Yi,SHEN Yi,WANG Wei,et al. Investigation on characteristics of breakdown of glass-ceramic dielectric slice[C]// Proceeding of 9th NNN Conference. Hangzhou:Chinese Nuclear Society, 2012:90-95.)
- [11] Adler R J. Pulse Power Formulary[M]. Albuquerque,NM:North Star Research Corporation, 1989.
- [10] 韩旻,邹晓兵,张贵新. 脉冲功率技术基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2010:37-45. (HAN Min,ZOU Xiaobing,ZHANG Guixin. Basic Pulsed Power Technology[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2010:37-45.)

作者简介:



刘 毅(1987-),男,成都市人,在读硕士 研究生,主要研究方向为脉冲功率技术.email: 109854434@163.com.

夏连胜(1970-),男,江苏省扬州市人,博士,研究员, 主要研究方向为强流二极管物理和高梯度加速器. **谌 怡**(1984–),男,四川省广安市人,硕士, 研究实习员,主要研究方向为介质壁加速器相关 技术.

王 卫(1985-),男,重庆市人,在读硕士研 究生,助理工程师,主要研究方向为固态开关技术.

章林文(1962-),男,福建省宁德市人,博士, 研究员,主要研究方向为加速器物理、脉冲功率 技术.