2019年2月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)01-0174-05

# 金属表面形貌对真空击穿阈值的影响

胡祥刚<sup>1,2</sup>,宋 玮<sup>1,2</sup>,向 导<sup>2</sup>,朱晓欣<sup>1</sup>,李小泽<sup>1</sup>,谭维兵<sup>1</sup>, 张立刚<sup>1</sup>,沈志远<sup>1</sup>,程攀伦<sup>1</sup>,宁 齐<sup>1</sup>,梁 旭<sup>1</sup>

(1.西北核技术研究所 高功率微波技术重点实验室,陕西 西安 710024; 2.上海交通大学 物理与天文学院,上海 200240)

摘 要:探索提高真空击穿阈值的方法,对脉冲功率技术的发展和应用具有重要意义。在金属表面电子发射理论分析的基础上,采用有限元法计算电极表面电场随二极管电压的变化规律,设计实验系统,并开展实验研究。实验对比钛合金 TC4 阴极在不同表面粗糙度下真空击穿阈值,实验表明,当阴极表面粗糙度(轮廓最大高度  $R_2$ )分别为 26.13 m,10.41 m,6.75 m,1.12 m,0.13 m 时,击穿阈值分别为 306 kV/cm,345 kV/cm,358 kV/cm,392 kV/cm,428 kV/cm。当  $R_2$  由 26.13 m 减小至 0.13 m 时,击穿阈值提高 39%。金属表面击穿阈值随  $R_2$ 减小而提高,减小金属表面的  $R_2$ ,是提高真空击穿阈值的有效方法。

关键词:场致爆炸电子发射;表面粗糙度;真空击穿阈值

中图分类号: TN307; O461 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA201901.0174

# Influence of metal surface morphology on the threshold of vacuum breakdown

HU Xianggang<sup>1,2</sup>, SONG Wei<sup>1,2</sup>, XIANG Dao<sup>2</sup>, ZHU Xiaoxin<sup>1</sup>, LI Xiaoze<sup>1</sup>, TAN Weibing<sup>1</sup>, ZHANG Ligang<sup>1</sup>, SHEN Zhiyuan<sup>1</sup>, CHENG Panlun<sup>1</sup>, NING Qi<sup>1</sup>, LIANG Xu<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of High Power Microwave Technology, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shannxi 710024, China; 2.School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: It is important for the development and application of pulsed power technology to explore the way to improve vacuum breakdown threshold. On the basis of metal surface electron emission theory, the change law of electrode surface field with diode voltage is analyzed by finite element method. The experimental system is designed and the research is carried out. The experiment compares the TC4 cathodes' vacuum breakdown thresholds under different surface roughness(R<sub>z</sub>). The experimental results demonstrate that the surface roughness of cathodes is 26.13 μm, 10.41 μm, 6.75 μm, 1.12 μm and 0.13 μm; and the breakdown threshold is 306 kV/cm, 345 kV/cm, 358 kV/cm, 392 kV/cm and 428 kV/cm respectively. When the R<sub>z</sub> goes from 26.13 μm to 0.13 μm, the breakdown threshold is increased by 39%. The metal surface breakdown threshold increases with the decreasing of R<sub>z</sub>. Reducing the R<sub>z</sub> of metal surface is an effective way to improve the vacuum breakdown threshold.

**Keywords:** field-induced explosive electron emission; surface roughness; vacuum breakdown threshold

在脉冲功率驱动源、高功率微波源等电真空器件中,为了满足绝缘需求,同时考虑系统轻型化、稳定性要求,真空常作为一种良好的绝缘电介质,广泛应用在各种装置中。在高功率微波源中,强电磁场处金属表面的电子发射是引起高功率微波源中强电磁场击穿的主要因素,相关学者开展了大量研究<sup>[1-3]</sup>。而脉冲功率驱动源中的击穿问题,是一个静电场击穿问题,相关理论包括场致发射理论、微粒撞击理论、微放电理论等<sup>[4-10]</sup>。导致金属在真空中击穿的因素很多,如材料特性、表面形貌<sup>[11-12]</sup>、电极结构等。实际应用中,提高金属的真空击穿阈值具有重要意义。提高击穿阈值,不仅可以提升系统的安全性、稳定性,而且可以实现系统的小型化和轻型化。文献[12-14]开展了金属表面形貌对击穿阈值影响的实验研究,其中文献[14]得到了不同粗糙度下不锈钢304L和金属铝电极材料的电子发射阈值,当粗糙度为 0.8 μm 时,不锈钢表面的发射阈值为 218 kV/cm,但未进

行更高光洁度的实验研究。本文结合实际应用需要,设计研究金属表面真空击穿阈值的实验系统,建立实验平台,研究钛合金 TC4 材料的球头阴极的真空击穿阈值随表面粗糙度的变化规律, $R_z$ 可达  $0.13~\mu m$ ,此时 TC4 表面击穿阈值为 428~kV/cm。

#### 1 基本理论

真空间隙击穿过程复杂、影响因素多,常见的主要有 3 种理论:场致发射理论、微粒撞击理论、微放电理论。场致发射理论认为:金属表面存在大量的不规则的微结构,比如微凸起、表面缺陷、夹杂、薄膜、吸附气体、油污等,这些微结构会导致场致发射增强。场致发射电流加热局部区域,能量聚集后将局部材料以爆炸汽化的形式释放出来,爆炸产生的熔融物、蒸汽等与电子流继续作用下形成局部等离子体,进而引发真空击穿。其中阴极表面的微凸起在真空击穿中发挥主要作用,微凸起造成的阴极表面局部电场增强可以用微观场增强因子  $\beta$  来描述。假设阴极表面宏观场强为  $E_0$ ,则局部场强为:

$$\mathbf{E} = \beta \mathbf{E}_0 \tag{1}$$

式中  $\beta$  为场增强因子,由阴极表面微凸起的形状和尺寸确定。微凸起一般可分为锥状球头模型和半椭球模型。本文利用孙钧 $^{[15]}$ 采用自适应网格剖分的有限元方法计算并拟合得到的公式。

对于锥状球头模型,假设其高度为h,球头半径为r,锥角为 $\theta$ ,场增强因子为:

$$\beta = (4.69 + 0.72h/r)(1 - 0.41\theta), \ (0 \le \theta \le 0.8, \ 6 \le h/r \le 100)$$

对于半椭球模型, h,r 分别为其半长轴和半短轴, 记

$$\begin{cases} m = h/r \\ e = \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \end{cases}$$
 (3)

式中: m 为半椭球半长轴与半短轴之比; e 为比例因子。场增强因子为:

$$\beta = \frac{m^3 e^3}{m \ln(m + me) - me} \tag{4}$$

通过以上分析可知,金属表面的微凸起导致局部场增强,从而引发真空击穿。通过金属表面处理,减小微凸起的高度和数量,可有效降低场增强因子,提高真空击穿阈值。

## 2 实验设计

实验装置设计如图 1 所示,主要包括阴极底座、阴极引杆、球头阴极、阳极罩、阳极法拉第筒等。为了在实验中便于观察击穿发生的位置,选用电场比较集中的球头阴极。阳极为法拉第筒,可以收集球头阴极发射的电子,检测发射电流。阳极罩上沿圆周均布了 4 个直径60 mm 的观察窗,观察窗的中心距阳极罩端面距离分别是 100 mm,100 mm,90 mm,110 mm,在观察窗外架设高速像增强探测器(Electron Multiplying Charge Coupled Device, EMCCD),可以从不同角度观察击穿的发展过程。该实验平台基于 TPG700 加速器建立,该加速器的工作电压>500 kV、电压宽度~30 ns,可重复频率运行,电压稳定性优于 5%。电压调节通过控制主开关内的气压以及触发时刻实现。实验

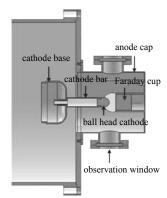


Fig.1 Diagram of experimental device 图 1 实验装置结构图

过程中通过更换球头阴极,可以进行不同金属材料、不同处理工艺、不同表面状态下的真空击穿实验研究。通过调节阴极引杆的长度,研究不同间隙下的击穿过程。

图 2 给出了球头阴极直径 30 mm、阳极法拉第简直径 50 mm、间距 20 mm、二极管电压 500 kV 时,采用有限元法计算了实验装置各个部位的场强分布。球头阴极球冠上最大电场约 500 kV/cm。图 3 给出了不同二极管电压下球冠上的最大电场值,最大电场随二极管电压升高而增大。实验中通过检测二极管电压,计算球头阴极上的宏观电场值。电压、电流的准确测量是实验的可靠保证。二极管电压采用双面挠性覆铜箔电容分压器进行测量。电流采用罗氏线圈和法拉第筒进行测量。两种电流测量手段,可以方便地测量出二极管电流和球头阴极电子束束流;实验中使用 EMCCD 相机对等离子体的发光过程进行诊断,观察击穿的发展过程。实验中通过调整相机的触发延时以及曝光时长,诊断击穿的发展过程。

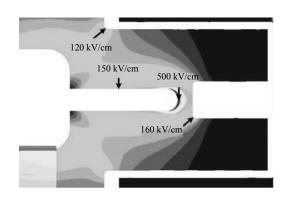


Fig.2 Electric field distribution of diode voltage 500 kV 图 2 二极管电压 500 kV 时电场分布

#### 3 实验结果及分析

阴极和实验装置如图 4 所示。由于金属表面微凸起、表面缺陷、介质夹杂、介质薄膜、吸附气体、油污等均对击穿阈值有重要影响,为了尽可能排除其他因素的影响,当阴极加工完毕后,实验前对所有阴极均做相同的预处理,主要包括:超声清洗(3 次)、烘烤除气、封装。实验前使用激光共聚焦扫描显微镜对球头阴极的

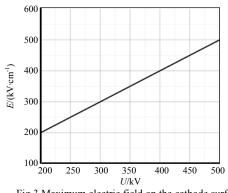


Fig.3 Maximum electric field on the cathode surface varies with the diode voltage

图 3 阴极表面最大电场随二极管电压变化规律



Fig.4 Cathode and experimental device 图 4 阴极及实验装置

表面进行测试,测试球冠上 5 个位置的  $R_z$ ,并取其平均值作为该球头阴极  $R_z$ 。实验中对比了 5 种不同粗糙度下  $R_z$  和真空击穿阈值的相互关系,每个  $R_z$  各一件,  $R_z$  分别为 26.13  $\mu$ m,10.41  $\mu$ m,6.75  $\mu$ m,1.12  $\mu$ m,0.13  $\mu$ m, 实验

中对比了不同  $R_z$ 下金属的真空击穿阈值。搭建的实验系统和球头阴极如图 4 所示,当实验腔体的真空度优于  $5.0\times10^{-3}$  Pa 时开始实验。由于老炼对真空击穿阈值的提高有明显好处 [16],在实验中采用逐级升压法,一方面保证阴极足够的老炼次数,另一方面能够比较准确地确定击穿阈值。二极管电压从 150 kV 开始,每个电压下 0.1 Hz工作 100 次,每次升压  $20\sim30$  kV。

图 5 给出了击穿前二极管电压、电流以及法拉第筒的波形。实验中通过监测二极管电压,以及法拉第筒的电流波形与幅值来判断击穿是否发生。如图 6 所示,当电流波形畸变或幅值明显增大,说明此时球头阴极发生击穿,此时对应的电压为击穿电压。

图 7 给出了某球头阴极实验过程中,二极管电流和法拉第筒电流随二极管电压的变化曲线。在首次击穿以前,二极管电流随电压增大而缓慢增大,电流小于 0.5 kA。法拉第筒电流仅几十安培。首次击穿时,二极管电流迅速增大到 1 kA 以上。法拉第筒电流也增大到几百安培。首次击穿后,电流会稳定在某一值附近,随着二极管电压增大缓慢增大。当二极管电压在某电压下,每个工作组内(0.1 Hz,100 次),二极管电流和法拉第筒电流大于 2 kA 的次数占总次数的 10%时,认为此时球头阴极完全击穿,该电压为该球头阴极的完全击穿电压。图 8 给出了某次完全击穿时球头阴极的发光图片,图 8 中显示击穿呈点状分布,且并不完全集中在宏观场强最大的位置。

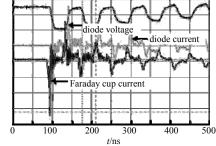


Fig.5 Voltage and current waveforms before breakdown

图 5 击穿前电压电流波形

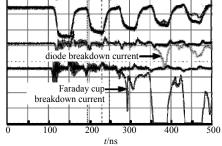


Fig.6 Breakdown voltage and current waveforms
图 6 击穿后电压电流波形

实验结果表明, 当球头阴极的  $R_z$  分别为 26.13 μm,10.41 μm,6.75 μm,1.12 μm,0.13 μm 时, 击穿阈值分别为 306 kV/cm,345 kV/cm,358 kV/cm,392 kV/cm,428 kV/cm, 如图 9 所示。随着  $R_z$ 的减小,击穿阈值升高。当  $R_z$ 由 26.13 μm 减小至 0.13 μm 时,击穿阈值由 306 kV/cm 提高到 428 kV/cm,提高了 39%。

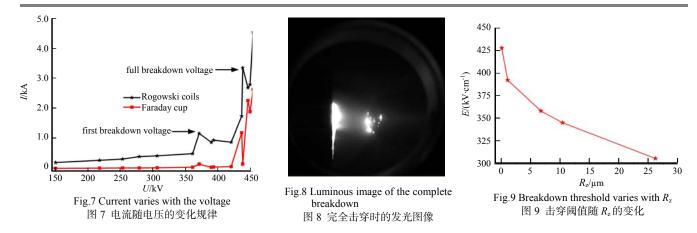
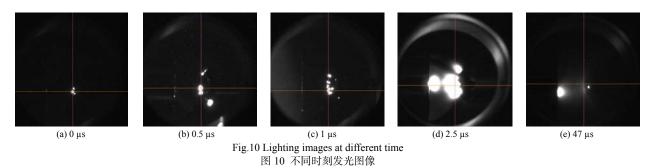


图 10 为相机在曝光时间 1 µs 时,不同延时相机所拍摄到的发光图像。以图 10(a)作为时间零点,此时击穿刚发生。击穿开始于球头阴极,且仅发生在表面的某几个点,击穿位置并未在宏观场强最强处;图 10(b)、图 10(c)分别是 0.5 µs,1 µs 后的图像,此时有更多的点开始发射,呈点状分布。阳极还未观察到发光现象;2.5 µs 时,阴极电子发射遍布整个球冠,等离子体贯穿间隙,阳极发光;47 µs 后,阴极发射结束,此时阳极还未完全熄灭。以上过程表明击穿起始于阴极表面某些微凸起点,逐渐发展之后遍布整个球冠,等离子体运动到达阳极,最后在阳极熄灭。因此,要提高真空击穿阈值,最重要的是控制好表面上的某些微凸起点,通过减小微凸起点的数量、高度等提高真空击穿阈值。



### 4 结论

本文构建了金属真空击穿实验平台,研究了不同  $R_z$ 下真空击穿阈值,并用 EMCCD 相机诊断了击穿发生的全过程,得到以下结论: 真空环境下金属表面的击穿阈值可以通过减小  $R_z$  来提高,当  $R_z$  由 26.13  $\mu$ m 减小至 0.13  $\mu$ m 时,击穿阈值由 306 kV/cm 提高到 428 kV/cm,提高 39%;光学诊断结果表明,击穿发生的位置并不一定在宏观场强最大位置,而是由某些点开始,逐渐发展到其他位置乃至整个阴极球冠表面,等离子体运动扩散后到达阳极。

#### 参考文献:

- [1] 常超. 高功率微波系统中的击穿物理[M]. 北京:中国科学出版社, 2016. (CHANG Chao. Breakdown physics in high power microwave systems[M]. Beijing:Science Press, 2016.)
- [2] 闫二艳,孟凡宝,邱风,等. 高功率微波孔缝击穿特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):729-732. (YAN Eryan,MENG Fanbao,QIU Feng,et al. Preliminary analysis on high power microwave breakdown characteristics in slots[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):729-732.)
- [3] 宋志敏,孙钧,曹亦兵,等. 高功率微波源中强场击穿机理探讨[J]. 现代应用物理, 2016,7(1):24-28. (SONG Zhimin,SUN Jun,CAO Yibing,et al. Preliminary studies of intense field breakdown mechanism in high power microwave source[J]. Modern Applied Physics, 2016,7(1):24-28.)
- [4] ROZANOVA N,GRANOVSKY V L. On the initiation of electrical breakdown of a high voltage gap[J]. Soviet Physics-Technical Physics, 1956(1):471-478.
- [5] BOUCHARD K G. Vacuum breakdown voltages of dispersion-strengthened copper vs oxygen-free, high-conductivity copper[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1970,7(2):358-360.

- [6] SPOLAORE P,BISOFFI G,CERVELLERA F,et al. The large gap case for hv insulation in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997,4(4):389-393.
- [7] 米夏兹 Γ A. 真空放电物理和高功率脉冲技术[M]. 李国政,译. 北京:国防工业出版社, 2007. (MESYATS Γ A. Vacuum discharge and high power pulse technology[M]. Translated by LI Guozheng. Beijing:National Defence Industy Press, 2007.)
- [8] 左应红,王建国,范如玉. 二极管间隙距离对场致发射过程中空间电荷效应的影响[J]. 物理学报, 2012,61(21):329-335. (ZUO Yinghong,WANG Jianguo,FAN Ruyu. Influence of diode gap distance on space charge effects in field emission[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(21):329-335.)
- [9] 左应红. 场致爆炸电子发射的理论分析与数值模拟[R]. 北京:清华大学, 2014. (ZUO Yinghong. Theory analysis and numerical simulation of field-induced explosive electron emission[R]. Beijing:Tsinghua University, 2014.)
- [10] ZHANG Yingyao, XU Xinye, JIN Lijun, et al. Fractal-based electric field enhancement modeling of vacuum gap electrodes [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3):1957–1963.
- [11] ALMAKSOUR K,KIRKPATRICK M J,ODIC E,et al. Cathode surface morphology effects on field emission: vacuum breakdown creation of field emitters[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014,42(10):2582-2583.
- [12] 黄子平,何佳龙,陈思富,等. 高压多脉冲真空间隙击穿实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2008,20(11):1903-1907. (HUANG Ziping,HE Jialong,CHEN Sifu,et al. Experimental research for vacuum gap breakdown in high voltage multipulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008,20(11):1903-1907.)
- [13] 邱旭东. 微秒脉冲下厘米间隙真空击穿特性研究[R]. 西安:西北核技术研究所, 2016. (QIU Xudong. Investigation into vacuum breakdown characteristics of centimeter-scale gaps under microsecond pulses[R]. Xi'an, China: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2016.)
- [14] 苏兆锋,杨海亮,张鹏飞,等. 脉冲电场下两种电极材料表面电子发射阈值特性的实验研究[J]. 物理学报, 2014, 63(10):330-335. (SU Zhaofeng,YANG Hailiang,ZHANG Pengfei,et al. Preliminary experimental research of electron emission characteristics on surface area of two kinds of electrodes[J]. Acta Physica Sinica, 2014,63(10):330-335.)
- [15] 孙钧,刘国治,林郁正,等. 阴极金属微凸起电场增强因子数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(8):1183-1186. (SUN Jun,LIU Guozhi,LIN Yuzheng,et al. Numerical simulation of electric field enhancement factor of metallic microprotrusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005,17(8):1183-1186.)
- [16] 俞永波,杨兰兰,屠彦. 电极表面形态对真空击穿特性的影响[J]. 电子器件, 2014,37(3):385-389. (YU Yongbo,YANG Lanlan,TU Yan. Investigation of the electrodes' surface to vacuum breakdown[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014,37(3):385-389.)

# 作者简介:



胡祥刚(1987-), 男, 陕西省西乡县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率微波技术研究.email:huxianggang@nint.ac.cn.

张立刚(1981-),男,黑龙江省双鸭山市人,硕士,工程师,主要从事高功率微波技术研究.

沈志远(1988-), 男, 吉林省集安市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率微波技术研究.

程攀伦(1992-),男,西安市人,本科,工程师,主要从 事高功率微波技术研究.

宁 齐(1990-),男,湖北省孝感市人,本科,工程师,主要从事高功率微波技术研究.

**梁 旭**(1992-),男,河北省张家口市人,本科,工程师,主要从事高功率微波技术研究.

宋 玮(1982-), 男, 湖北省巴东县人, 博士, 副研究员, 主要从事高功率微波技术研究与开发.

向 导(1981-), 男,成都市人,博士,教授,主要从事先进阴极材料及电子发射机制等方面研究.

朱晓欣(1978-), 女,陕西省渭南市人,硕士,高级工程师,主要从事高功率微波技术研究与开发.

李**小泽**(1981-), 男, 浙江省温州市人, 博士, 副研究员, 主要从事高功率微波技术研究与开发.

**谭维兵**(1988-),男,西安市人,硕士,助 理研究员,主要从事高功率微波技术研究.