

基于火花试验装置的真空放电微观特性模拟研究

王党树¹, 栾哲哲¹, 古东明¹, 刘树林¹, 董 振¹, 王新霞²

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西西安 710054; 2. 西安科技大学理学院, 陕西西安 710054)

摘 要: 为了研究火花试验装置中电极在真空中放电的微观特性, 本文建立了在真空环境下, 以钨为阳极材料、镉为阴极材料的二维平行板放电模型. 采用PIC/MCC(Particle-In-Cell/Monte Carlo Collision)方法对该模型进行仿真, 研究了不同电子发射机制下平行板电极放电的发展过程以及空间场强、阴极表面温度和场增强因子对空间电子变化的影响, 得到在场致发射、热发射以及热-场致发射作用下放电过程中的电子浓度和阳极吸收电流的变化以及电子密度和电势的空间分布等. 研究发现, 场致发射是微间隙阴极电子发射的主导发射机制, 当阴极表面温度在焦耳热的作用下达到镉金属的沸点 1040K 时将产生镉蒸汽, 电流密度和电子浓度逐渐增大, 此时热发射将开始作用于微间隙放电; 当温度大于镉金属气化温度后, 场强的影响将大于温度的影响; 当场增强因子很小时, 热发射几乎不起作用, 随着场增强因子不断增大, 热发射的作用逐渐增强, 导致空间电子浓度明显增加, 真空环境下微间隙放电是由热-场共同作用的.

关键词: 场致发射; 微间隙; PIC/MCC; 场增强因子; 火花试验装置

中图分类号: O462 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)12-2449-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200820

Simulation Research on the Microscopic Characteristics of Vacuum Discharge Based on Spark Test Device

WANG Dang-shu¹, LUAN Zhe-zhe¹, GU Dong-ming¹, LIU Shu-lin¹, DONG Zhen¹, WANG Xin-xia²

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to study the micro-characteristics of the electrode discharge in the spark test device in vacuum, this paper established a two-dimensional parallel plate discharge model in a vacuum environment with tungsten as the anode material and cadmium as the cathode material. We simulate the model with the PIC/MCC(Particle-In-Cell/Monte Carlo Collision) method, studies the development process of parallel plate electrode discharge under different electron emission mechanisms and the influence of space field strength, cathode surface temperature and field enhancement factor on the changes of space electrons, and obtains the field emission, thermal emission and thermal-field emission changes in the electron concentration and anode absorption current during the discharge process, as well as the spatial distribution of the electron density and electric potential, etc. The research has found that field emission is the dominant emission mechanism of micro-gap cathode electron emission. When the cathode surface temperature reaches 1040K, the boiling point of cadmium metal under the action of Joule heat, cadmium vapor will be generated, and the current density and electron concentration will gradually increase. At this time, the thermal emission will start to act on the micro-gap discharge. When the temperature is greater than the vaporization temperature of cadmium metal, the influence of the field strength will be greater than that of the temperature. When the field enhancement factor is very small, the thermal emission is almost ineffective. As the field enhancement factor continues to increase, the effect of thermal emission gradually increases, leading to a significant increase in the spatial electron concentration. The micro-gap discharge in a vacuum environment is caused by the combined effect of heat and field.

Key words: field emission; micro gap; PIC/MCC; field enhancement factor; spark test device

1 引言

IEC 安全火花试验装置(IEC-SSTA)是本质安全电路检测的标准设备,该装置在进行本安测试时,铜盘围绕中心点以 80 转/s 的速度不断旋转,钨丝电极以一定速度靠近铜盘,并且划过转动的铜盘,而后两电极分开,两电极周而复始进行开闭运动. 这样的放电试验是一个复杂的动态放电过程,包括微间隙击穿,短路放电,分断放电等过程. 该装置运动电极下微间隙击穿放电是形成火花放电的一个阶段^[1,2],且大部分都是从宏观特性进行研究,主要包括电压电流特性曲线建模,放电特性分析^[3-5]等,而基于 IEC-SSTA 的铜盘和钨丝短路前微间隙放电机理的研究相对较少.

学者们研究初期认为微间隙放电遵循 Pachen 定律. 但 Boyle W, Kisiuk P 和 Germer LH 研究发现当两个电极间距大于某一临界值时放电满足 Pachen 定律,小于临界值时放电特性发生变化^[6,7]. David B. Go 和 Daniel A. Pohlman 建立了包括 Townsend 电离,场发射机理的数学模型,并修正了 Pachen 曲线^[8]; Wallash, Larry Levit 则发现微间隙下预击穿电流是场致发射引起的,研究表明电极间隙 $D \leq 7 \mu\text{m}$ 的放电机理是由场致发射引起的^[9],经过半个世纪的研究大家认为微纳间隙放电的主导机制是场致发射;文献[10]也揭示了火花试验装置短路放电属于微间隙低压放电,阴极电子发射是其击穿放电的主导机制.

目前对阴极电子发射的研究受到国内外专家及学者的广泛关注^[11-14]. 电子发射的初始阶段为场致发射,但随着场致发射的进行,场致发射电流对阴极表面产生热效应,经过几纳秒或几十纳秒后,阴极表面温度升高,热-场致发射产生,热-场致发射是电子发射过程的重要过渡阶段,为了能准确描述电子发射电流密度,必须考虑热-场的共同作用. 文献[15]首次提出电子发射不能一概采用 Fowler-Nordheim 计算;文献[16]计算了不同温度 ($\leq 6000\text{K}$)、场强 ($\leq 10e10\text{V/m}$) 和功函数 (2~5eV) 下的热-场发射电流密度并考虑了诺廷汉效应的影响;文献[17]提出了阴极费米能级金属电子发射模型,研究发现该模型与 Fowler-Nordheim 公式计算出的电流密度相比有一定偏差;这些研究大多是考虑了温度和电场分别作用和共同作用下对电子发射电流密度的影响,对热-场致发射的电流密度进行近似计算,但与 Fowler-Nordheim 计算出的电流密度有一定偏差;文献[18]研究发现阴极表面周期性条纹结构可有效增强阴极的电子发射能力从而增大发射电流密度;文献[19]研究热-场致发射对安全火花试验装置的铜盘电极表面微凸起的温度变化规律以及温度分布. 文献[20]和文献[21]采用 Pade 近似法得到热-场电子发射电流密度的计算式,该计算式不是完全解析的,仍然涉及积分问

题. 文献[22]建立了电子隧道穿越模型,解释由于温度效应影响电子发射的电流密度与 Fowler-Nordheim 电流密度的偏差的原因,同时也考虑了热-场致发射中温度对电流密度的影响,但公式进行了近似处理,且适用范围小. 以上研究大都是宏观特性方面的研究,不能反映热-场致电子发射过程的瞬态时间响应过程和微观物理细节.

为了进一步了解热-场致电子发射过程的微观特性,本文根据火花试验装置短路放电的第一阶段热-场电子发射机理,推导出热-场发射电流密度通用计算公式,并建立真空环境下二维平行板放电物理模型,在此基础上采用 PIC/MCC 粒子模拟仿真的方法对场致发射、热发射、热-场致发射三种不同发射机制下空间电子的运动过程、电子分布情况进行对比分析,以及空间场强、阴极表面温度和场增强因子对空间电子变化的影响展开研究.

2 发射的基本理论

根据量子力学统计理论得出:热-场致电子发射主要存在隧道效应,其电子发射电流密度与两个因素有关:金属内部垂直表面方向能量为 w 的电子单位时间打在单位面积上的数目,也就是供给函数 $N(W)$;电子穿透势垒的概率,即透射系数 $D(W)$.

根据金属内部自由电子遵从费米-狄拉克统计分布函数,可得电子供给函数 $N(W)$ 的表达式如式(1)所示:

$$N(W) = \frac{4\pi mkT}{h_0^3} \ln \left\{ 1 + \exp[-(W - E_F)/(kT)] \right\} \quad (1)$$

其中: m 为电子质量, k 为波耳兹曼常数, h_0 为普朗克常数, E_F 为阴极电场强度.

本文将考虑外电场和镜像力对金属表面势能的影响,并通过 W. K. B 法求得电子穿透率 $D(W)$ ^[16] 为

$$D(W) = \exp \left[-2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\frac{8\pi^2 m}{h_0^2} (|W| - \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x} - eE_F x)} dx \right] \quad (2)$$

其中, e 为电子电荷量,积分限 x_1, x_2 为动量方程 $\frac{p_x^2}{2m} + eV(x) = W$ 两个根.

对式(2)进行积分变换后最终得到电子隧道穿透系数表达式如式(3)所示.

$$D(W) = \exp \left[-\frac{8\pi\sqrt{2m}|W|^3}{3h_0 e E_F} v(y) \right] \quad (3)$$

$$\text{式(3)中: } v(y) = \sqrt{1+y} \left[L\left(\frac{1-y}{1+y}\right) - yK\left(\frac{1-y}{1+y}\right) \right], y \leq 1$$

$$v(y) = \sqrt{\frac{y}{2}} \left[(y+1)K\left(\frac{y-1}{2y}\right) - 2L\left(\frac{y-1}{2y}\right) \right], y > 1$$

$$y = \sqrt{\frac{e^3 E_F}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{|W|}}$$

其中, K 和 L 为第一类和第二类完全椭圆积分数.

关于电流发射密度的大小, 则主要取决于阴极发射材料的逸出功 W 、阴极表面的局部电场强度 E_F 和阴极表面的温度 T 等因素, 本文通过式(4)计算热-场致发射的电子电流密度.

$$J_{TFE} = e \int_{-\infty}^{\infty} N(W) D(W) dW \quad (4)$$

把式(1)和式(3)代入式(4), 得到既考虑场致发射也考虑热场发射的通用电流密度计算公式如式(5)所示:

$$j(T, E, \phi_w) = \frac{4\pi k T e}{h_0^3} \left\{ \int_{-\infty}^{W_1} \frac{\ln[1 + \exp(\frac{W_x + \phi_w}{kT})]}{1 + \exp[\frac{8\pi(2m)^{\frac{1}{2}} v(y) W_x^{\frac{3}{2}}}{3h_0 e E_F}]} dW_x \right. \\ \left. \int_{W_1}^{\infty} \ln[1 + \exp(\frac{W_x + \phi_w}{kT})] dW_x \right\} \quad (5)$$

$$\text{式(5)中, } W_1 = \sqrt{\frac{e^3 E_F}{8\pi\epsilon_0}}$$

隧道穿透概率 $D(W)$ 可以用 Fowler-Nordheim 近似, 对式(5)第一项, 采用泰勒展开, 取展开式前两项, 再分段积分. 得热-场致发射电流密度表达式如式(6)所示.

$$J_{FN}(T, E, \phi_w) = \frac{\pi K T / d}{\sin(\pi K T / d)} \frac{e^3 E_F^2}{8\pi^2 h_0 \phi_w t^2(\hat{y})} \exp[\frac{-4\pi\sqrt{2m\phi_w^3}}{3h_0 e E_F} v(\hat{y})] \quad (6)$$

其中: ϕ_w 为金属逸出功,

$$\hat{y} = \sqrt{\frac{e E_F}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\phi_w}}$$

$$t(\hat{y}) = v(\hat{y}) - \frac{2}{3} \hat{y} \frac{dv(\hat{y})}{d\hat{y}}$$

$$d = d(E_F, \phi_w, \hat{y}) = \frac{h_0 e E_F}{2\pi\sqrt{2m\phi_w} t(\hat{y})}$$

3 物理模型建立

3.1 安全火花试验装置

IEC 安全火花试验装置如图 1 所示, 在充满爆炸性气体的密闭气室内钨丝和钨盘相互运动. 开始两电极有一定间隙, 钨丝电极在电机带动下以 $v(t) \approx 0.25\text{m/s}$ 左右的速度靠近钨盘直至短路, 再划过钨盘表面后与钨盘分开, 两电极周而复始进行开闭运动.

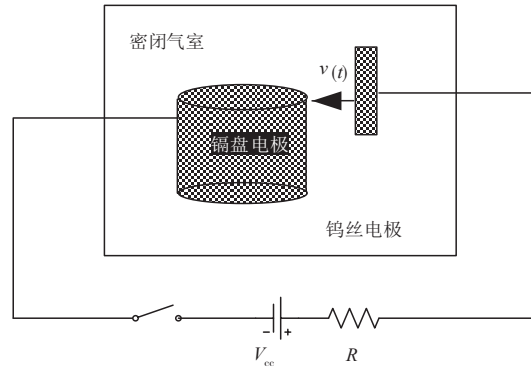


图1 IEC火花试验简易模型

3.2 电极系统物理模型

为了了解真空环境下电极之间放电的产生机理及放电规律, 重点研究阴极表面温度、空间场强、场增强因子和电子发射电流密度之间的关系, 如图 2 所示, 建立平行板场致发射物理模型, 阳极材料为钨金属、阴极材料为钨金属, 两电极间隙距离为 D , 在阳极端加入电压 U . 电子从阴极表面发出进入电极间隙区最终到达阳极, 模拟区域压强设置为 1atm .

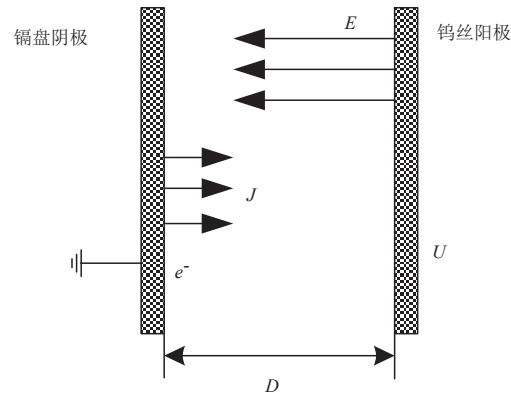


图2 电极模型图

4 PIC 静电模型

为了分析真空环境下放电时空电子的运动情况, 本文建立二维平行板静电模型, 利用自洽的静电粒子模拟仿真的方法, 对热-场致电子发射过程进行模拟.

PIC 静电模型关键是通过计算出当前时刻阴极发射电流密度 J , 由此决定仿真时每次发射的宏电子数量 dN_e , 即 $dN_e = JSdt/e$, 其中: S 为阴极表面有效发射面积, e 为电子的电荷量, dt 为时间步长. PIC 静电模拟流程图如图 3 所示.

4.1 电荷分配

在仿真区域内以 h 为步长将求解等间距划分为 $M \times$

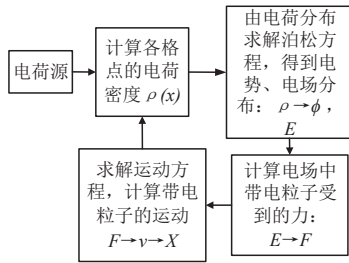


图3 PIC模拟流程图

N 个正方形网格,每次发射的宏电子数量为 dN_e ,利用权重函数进行二维电荷分配,实现电荷向网格节点的分配.图4为面积权重电荷节点分配的示意图,利用式(7)计算节点 A 的面积权重.其中 (x_p, y_p) 为粒子点的位置坐标,正方形单元网格的边长 $AB=h$.

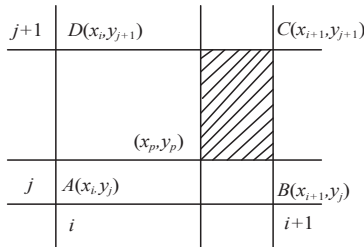


图4 面积权重电荷分配示意图

$$S_{pa} = \frac{(x_{i+1} - x_p)(y_{j+1} - y_p)}{h^2} \quad (7)$$

$$\rho_{A(x_i, y_j)} = \sum_p q_p S_{pa} \quad (8)$$

式(8)中: q_p 为任意在与 A 节点相邻的四个网格内的一个带电电荷, S_{pa} 为该电荷对于 A 点的面积权重.即 A 点的电荷密度等于所有这些带电电荷向节点权重分配之和.同理求得 B 、 C 、 D 三个点的权重.

4.2 电势、电场求解

根据求出的网格节点的电荷密度,利用二维泊松方程实现电势 ϕ 的求解,采用有限差分的方法,将泊松方程离散.其中泊松方程如式(9)所示.

$$\nabla^2 \phi(x, y) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (9)$$

式(9)中, ρ 为电荷密度, ϵ_0 为介电常数, ϕ 为两电极之间电势,对函数 $\phi(x, y)$ 进行四阶泰勒级数展开,并将各个节点所得函数式相加,并略去四阶以上的高阶项即可得离散二维泊松方程如式(10)所示,对式(10)整理后得到位置 $x_{i,j}$ 节点的电势大小,其表达式如式(11)所示.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1} - 4\phi_{i,j}}{4h^2} \quad (10)$$

$$\phi_{i,j} = \frac{1}{4} (\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1} - \frac{h^2 \sum \rho_{i,j}}{\epsilon_0}) \quad (11)$$

由泊松方程解得网格节点 (i, j) 的电势分布,然后对网格节点进行线性差值,即可实现节点电场强度的求解.

$$E = -\nabla \phi \quad (12)$$

$$E_x = \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2h}, E_y = \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2h} \quad (13)$$

其中, E 为空间电场强度, E_x 为 x 方向上的电场强度, E_y 为 y 方向上的电场强度.

4.3 速度、位置求解

带电粒子在电场和带电粒子形成的自洽电场作用下进行运动,且电子运动符合牛顿-洛伦兹力方程式(14)、(15),通过求解牛顿-洛伦兹力方程可以得到电子位置和速度.在计算 x 方向速度 v_x 前,应先通过式(16)计算出新粒子的位置,进而算出 $t+\Delta t$ 时刻电场的大小,再利用式(17),得到新时间步长下的速度分布,这样便实现了电场与运动方程耦合.在经过 Δt 时间后其位置和速度离散方程式如式(16)、(17)所示.

$$\frac{ds}{dt} = v \quad (14)$$

$$m \frac{dv}{dt} = q(E_x + E_y) \quad (15)$$

$$x_j(t + \Delta t) = x_j(t) + \{v_{jx}(t) + \frac{q}{2m} E_{jx}[x_j(t), t] \Delta t\} \cdot \Delta t \quad (16)$$

$$v_{jx}(t + \Delta t) = v_{jx}(t) + \frac{q}{2m} \{E_{jx}[x_j(t + \Delta t), t + \Delta t]\} \cdot \Delta t \quad (17)$$

式中, s 为带电粒子在电场中运动的位移, v_x 、 v_y 分别是在 x 、 y 方向的速度, m 和 q 是带电粒子的质量和电荷;而 y 方向的求解与 x 方向类似.

5 数值模拟与结果讨论

5.1 模型参数设置

模拟计算时模型的参数设置如下:在真空环境下,阴极接地,阳极接入电源,且电势 $\phi = 100V$,极距 $D = 2\mu m$,阴极材料为镉盘,其逸出功为 $4.07eV$,阴极表面不可避免地会存在有微凸起,会增强阴极表面的局部电场强度,在模拟计算过程中,取场增强因子 $\beta = 100$,即阴极表面的电场与电极间隙区的平均电场相比被增强了100倍^[23].其电势空间分布和电场强度分布如图5所示.

5.2 阴极表面温度对热-场致发射的影响

由于阴极表面微凸起的存在,电场强度达到 $1e6V/m$ 以上时,比光洁阴极表面小1~2个数量级便可发生场致发射,极间产生微小电流,阴极表面微凸起在电流作用下产生焦耳热,随着焦耳热作用微凸起顶端发生气化产生镉电子蒸汽.由于温度提高了镉金属的内能,导致

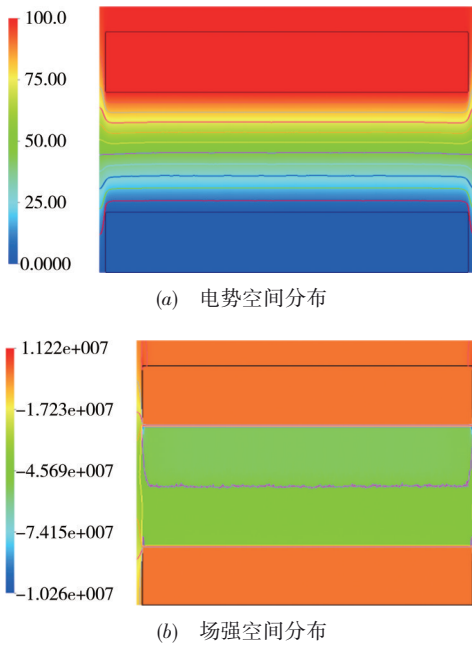


图5 电势-场强空间分布图

电子发射后的动能增大,从图6中可以直观地看出,阴极表面温度达到1040K时,电极间的电子浓度开始增加,随着阴极表面温度的不断增大,电子增加的速率也在明显提高.可见,阴极表面微凸起在焦耳热的作用下,阴极表面温度逐渐达到镉的气化温度,热发射开始作用于阴极发射,使得空间电子浓度开始明显增加.

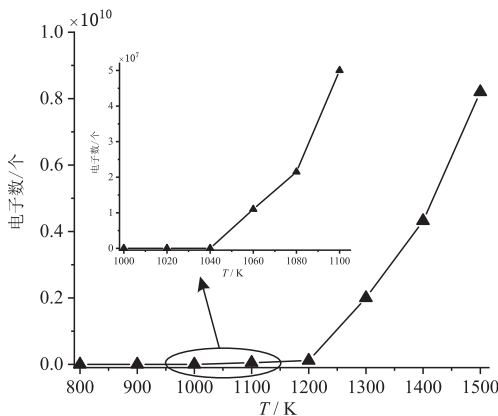


图6 不同温度下热发射的电子数变化曲线

图7为场致发射加入热效应后的电子数变化曲线,与图6进行对比发现,当阴极表面温度不足以达到镉金属的沸点温度时,热发射未作用于阴极发射时,场致发射所产生的电子数量明显多于热发射时产生的电子数,此时的主导发射机制为场致发射;随着电极的短路击穿,产生焦耳热,阴极表面温度逐渐达到镉的沸点时,阴极表面产生镉电子蒸汽,空间电子浓度开始增加,此时阴极发射转换为热-场致发射.

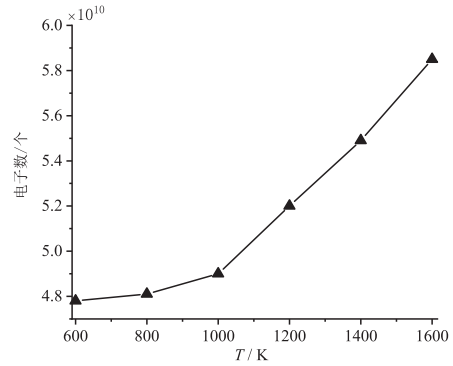


图7 不同温度下热-场致发射的电子数变化曲线

5.3 极间场强和场增强因子对阴极发射的影响

保持阴极表面温度为镉金属的沸点温度不变,通过增大阳极电压来改变空间电场强度,电子数的变化趋势如图8所示,当阴极表面温度达到沸点时,电场强度为5e7V/m,空间电子数达到4.9e7个,此时热发射开始影响微间隙放电,当温度大于镉金属的沸点后,温度对电子浓度的影响远远小于电场强度对电子浓度的影响,随着场强的不断增加,极间电子数明显增多,由此可以得出:当阴极表面温度达到镉金属的沸点后,场强的影响将大于温度的影响,此时电场强度为5e7V/m.

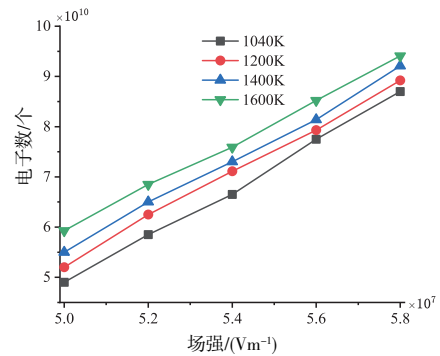


图8 不同场强下的空间电子数对比曲线

通过模拟可以得到场强为5e7V/m,阴极表面温度为1040K时,不同场增强因子下空间电子数的变化曲线如图9所示,场增强因子的改变也就是阴极表面微凸起的改变,宏观场增强因子 β 与阴极表面微凸起高度 h 的关系如式(18)所示:

$$\beta = \frac{h}{r} + 3.5 + 1.202 \left(\frac{h}{D}\right)^3 \quad (18)$$

其中: h 为阴极表面微凸起高度, D 为电极间距, r 为微凸起的半球头半径.

从图9中可以看出,场增强因子对空间电子数的变化影响很大,当场增强因子很小,即阴极表面很光滑时,热发射的作用也很小,随着场增强因子的不断增大,阴极表面存在微凸起,达到击穿的时间相对减

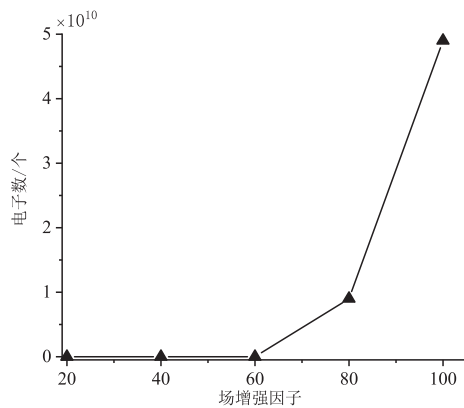


图9 不同场增强因子下的电子数变化曲线

少,由此发生短路产生焦耳热,直到阴极表面温度达到镉金属的气化温度时,阴极将产生镉电子蒸汽,使得电流密度和电子浓度增大,最终得出:场增强因子很小时,热发射几乎不起作用,当场增强因子不断增大时,热发射的作用逐渐增强,导致空间电子浓度明显增加。

5.4 阴极电子发射机制对极间电子密度以及阳极发射电流的影响

三种不同阴极发射机制下产生的空间电子数对比曲线如图 10 所示,从图 10 中可以发现,热发射产生的电子数大约是场致发射产生的电子数的 20%,而场致发射和热-场致发射这两种发射机制产生的电子数相差不多;从图 11 中可以看出,无论在何种阴极电子发射机制下,当时间在 17ps 左右时,电子均已运动到阳极附近,阳极平行板开始吸收电子,形成吸收电流,由于阴极表面温度达到镉金属的沸点时,热发射对平行板放电的影响较小,导致阴极发射的电子数很少,因此形成的电流密度也很小,其吸收电流峰值约为 0.15mA,仅为场致发射和热-场致发射下吸收电流峰值的 1/8,当电极之间的电子运动达到平衡时,热发射所形成的电流约为 0.2mA,为场致发射和热-场致发射下吸收电流的 1/2,在阳极吸收电流增加的时间段内,

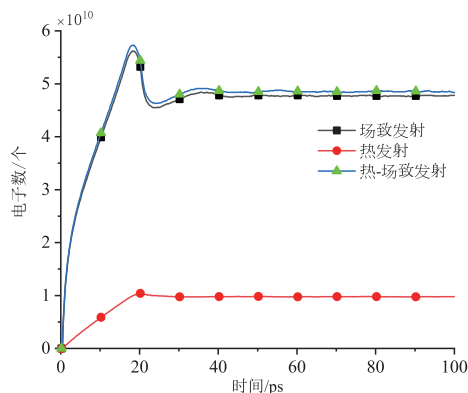


图10 不同发射机制下的电子数变化曲线

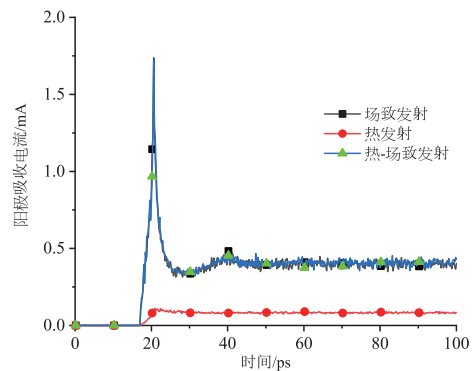


图11 不同发射机制下的阳极吸收电流变化曲线

场致发射下阳极吸收电流的增长速率远远大于热发射下的阳极吸收电流的增长速率,说明热发射时的电流密度很小,不足以影响到间隙的放电情况,而场致发射对平行板放电影响很大,空间电子数突增导致电极之间在短时间内形成一个很大的电流.最终可以得出:影响阴极电子发射的主导发射机制是场致发射;热-场致发射电流密度只有当阴极表面温度达到镉金属的沸点时,才会随温度的变化而有所变化.若阴极表面温度一直增加,此时热-场致发射将会成为阴极电子发射的主导机制。

由于平行板间形成的电场分布是对称的,因此间隙内电子分布较为均匀.图 12 为真空环境下,平行板电极在不同发射机制下放电通道的形成过程,在放电通道形成初期,阴极表面因为场致发射或热发射而形成的一个电子发射区域,随着时间的推移,电子由阴极发射移动到阳极,在此期间,电子由于场致发射或热发射,在模拟空间中迅速增多,当电子移动到阳极时,被阳极平行板吸收,因此会导致平行板电极之间的电子数开始减少,当阴极表面发射的电子与阳极吸收的电子达到平衡时,平行板电极间隙的电子数密度将会保持为一个定值。

从图 12 可以看出,在 10ps 时,热发射形成的电子数密度远远小于场致发射和热-场致发射所形成的电子数密度.热-场致发射由于是场致发射加入热效应之后的一种电子发射机制,当场致发射加入热效应时,就会产生诺廷汉效应,当阴极表面温度处于 1040K 左右时,阴极产生镉电子蒸汽,此时热发射产生的电流密度较小,导致空间电荷效应也比较小,因此热发射的电子数密度相比于场致发射机制下在减小;在 10ps 到 20ps 这段时间内,场致发射、热发射、热-场致发射均使得阴极表面产生大量的电子,平行板电极中的电子数密度也在同时增大;当电子运动 40ps 时,电场中的电子分布处于平衡状态,空间电子数密度也处于定值,稳定后热发射的电子数密度还是远远小于场致发射和热-场致发射的电子数密度.从图 12(b)中可以发现,当热发射的电

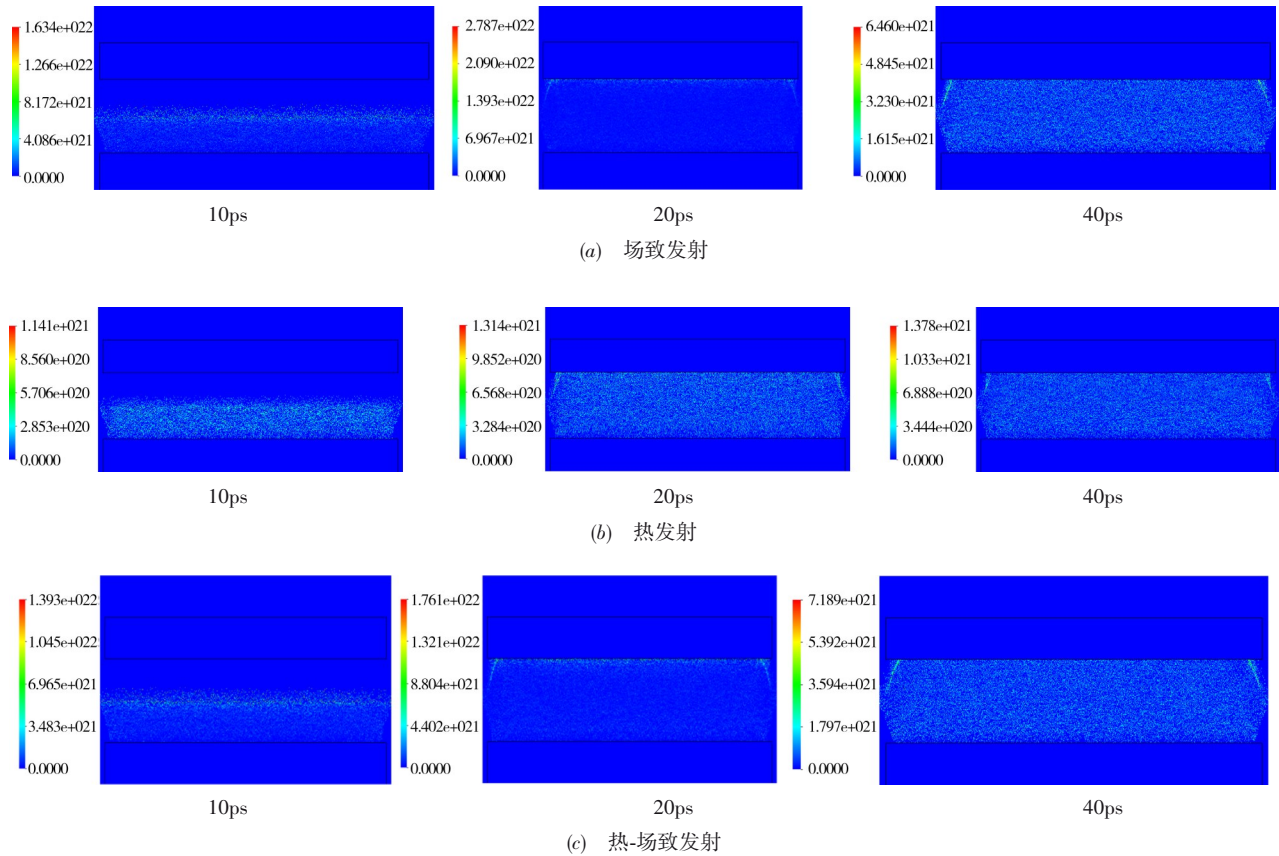


图 12 不同阴极电子发射机制下不同时刻的电子密度分布图

子数密度达到峰值时,由于存在诺廷汉效应,使得电子发射过程引起对发射体的加热,导致阴极电子的发射速率有所提升,与阳极吸收电子的速率达到相同,因此在 20ps 之后热发射机制下的空间电子数将保持不变;从电子密度的空间分布图中也可以得出真空环境下,微间隙放电是由热-场共同作用。

6 实验验证

为了验证仿真模型的正确性,本文将基于 IEC 标准火花试验装置如图 13 所示,在真空环境中,对不同场强以及不同阴极表面的粗糙程度下进行真空放电实验研究,得到电流变化曲线如图 14 所示。

在火花试验过程中平行板电极相互运动,直至接触达到短路,形成放电通道;通过对比实测波形和仿真曲线,可知在真空放电期间,放电电流实测波形和仿真曲线趋势吻合较好,由图 14(a)可以看出,随着极间电场的增强,放电电流也会随之增大,与图 8 中电子数变化趋势吻合。该实验通过改变阴极表面的粗糙程度来模拟场增强因子的变化,其不同阴极表面粗糙程度下的电流变化曲线如图 14(b)所示,从图 14(b)可以看出,阴极表面粗糙时的电流明显大于阴极表面光滑时的电

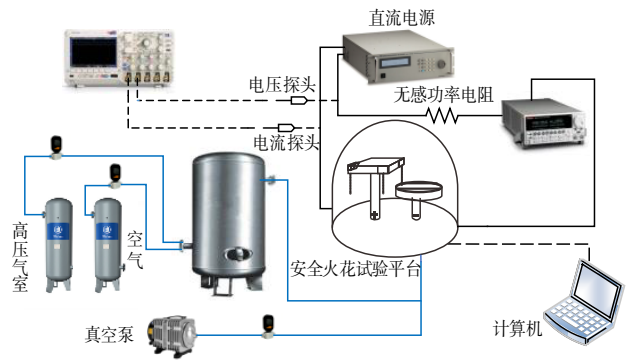


图 13 IEC 火花试验平台示意图

流,这是因为随着真空放电的进行,热效应的产生,温度对粗糙的阴极表面影响更大,导致其极间电流也更大。

因此,本文所建立的平行板短路放电模型不仅能够模拟真空放电过程并得到与实验一致的放电电流的变化趋势,而且从微观方面解释真空放电过程中粒子的运动情况,为研究真空放电机理提供了新的参考。

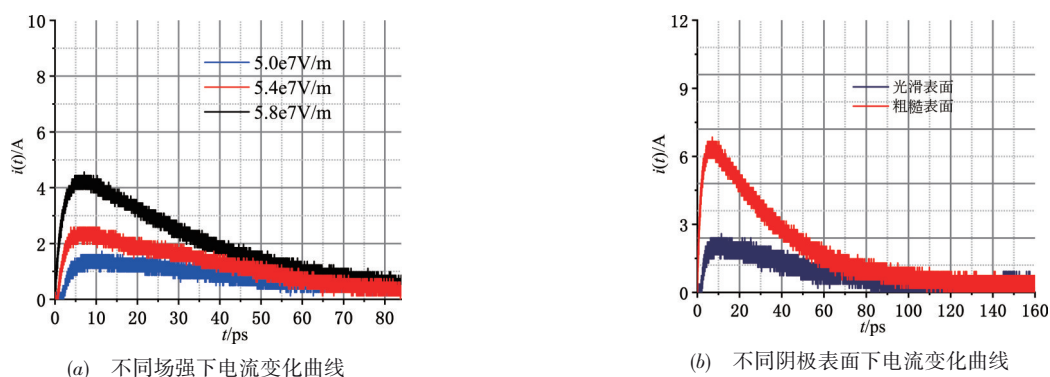


图 14 不同条件下电流变化曲线

7 结论

本文主要研究了在真空环境下,微间隙中不同的阴极电子发射机制和阴极表面温度对平行板微间隙放电的影响,主要得到以下结论:

(1)场致发射是微间隙阴极电子发射的主导发射机制,若阴极表面温度不断增加,在真空环境下微间隙放电将由热-场共同作用。

(2)阴极表面微凸起在焦耳热的作用下使得阴极表面温度达到镉金属的沸点 1040K 左右,此时阴极产生镉电子蒸汽,电流密度和电子浓度逐渐增大,此时热发射将开始作用于微间隙放电。

(3)当场增强因子很小时,热发射几乎不起作用,随着场增强因子不断增大,热发射的作用逐渐增强,导致空间电子浓度明显增加。

参考文献

- [1] Uber C, Runge T, Brunzendorf J, et al. Electrical discharges caused by opening contacts in an ignitable atmosphere - Part II: Spectroscopic investigation and estimation of temperatures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 61: 213 - 219.
- [2] Uber C, Shekhar R, Felgner A, et al. Experimental investigation of low-voltage spark ignition caused by separating electrodes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 822 - 831.
- [3] 孟庆海,王进己.本质安全电感电路电弧放电时间双正态分布[J].电工技术学报,2017,32(2):119-124.
Meng Q H, Wang J J. Dual normal distribution of arc discharge time for inductive intrinsically safe circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 119 - 124. (in Chinese)
- [4] 康骞,许春雨,田慕琴,等.电势电容电路短路火花放电影响因素分析[J].工矿自动化,2020,46(8):38-43,63.
Kang Q, Xu C Y, Tian M Q, et al. Analysis of influencing factors of short-circuit spark discharge in electric potential capacitance circuit[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 38 - 43, 63. (in Chinese)
- [5] 郭昱均,季启政,何锋,等.平板型电极微腔放电的特性[J].高电压技术,2019,45(3):820-825.
Guo Y J, Ji Q Z, He F, et al. Discharge characteristic in micro-channel of plate electrodes[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 820 - 825. (in Chinese)
- [6] Boyle W S, Kisliuk P. Departure from Paschen's law of breakdown in gases[J]. Physical Review, 1955, 97(2): 255 - 259.
- [7] Germer L H. Electrical breakdown between close electrodes in air[J]. Journal of Applied Physics, 1959, 30(1): 46 - 51.
- [8] Go D B, Pohlman D A. A mathematical model of the modified Paschen's curve for breakdown in microscale gaps[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(10): 103303.
- [9] Sun Z, Fu L Q, Gao X, Han B, et al. Study on micro gap air discharge based on atomic force microscope[J]. Journal of Electrotechnics, 2018, 33(23): 5616 - 5624.
- [10] 钟久明,刘树林,王玉婷,等.短间隙的击穿及其短路放电特性研究[J].电工电能新技术,2016,35(4):30-34.
Zhong J M, Liu S L, Wang Y T, et al. Study on breakdown and short circuit character of short gaps[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(4): 30 - 34. (in Chinese)
- [11] Amorim M V, Dall'Agnol F F, den Engelsen D, et al. Numerical analysis of the notional area in cold field electron emission from arrays[J]. Journal of Physics. Condensed Matter, 2018, 30(38): 385303.
- [12] Kristya V I, Ha M T, Fisher M R. Modeling of the influence of the thickness of an insulating film on a cathode surface on its effective secondary-electron emission yield

- in low-current gas discharge[J]. *Journal of Surface Investigation: x-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2019, 13(2): 339 – 343.
- [13] 徐翱, 金大志, 王亚军, 等. 场致发射影响微间隙气体放电形成的模拟[J]. *高电压技术*, 2020, 46(2): 715 – 722.
Xu A, Jin D Z, Wang Y J, et al. Simulation on influence of field emission to the gas discharge in micro-scale gaps [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(2): 715 – 722. (in Chinese)
- [14] 田微, 盖斐, 张俊敏, 等. 径向放电的等离子体阴极脉冲电子束实验研究[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(6): 1338 – 1344.
Tian W, Gai F, Zhang J M, et al. Experiment research on pulse electron beam of plasma cathode with radial discharge[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(6): 1338 – 1344. (in Chinese)
- [15] Murphy E L, Good R H. Thermionic emission, field emission, and the transition region[J]. *Physical Review*, 1956, 102(6): 1464 – 1473.
- [16] Paulini J, Klein T, Simon G. Thermo-field emission and the Nottingham effect[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1993, 26(8): 1310 – 1315.
- [17] Barendolts S A, Litvinov E A, Suvorov V G. A self-consistent model of electron emission from metals[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, 6(4): 430 – 435.
- [18] 郝广辉, 李泽鹏, 高玉娟, 等. 表面形貌对热阴极电子发射特性的影响[J]. *物理学报*, 2019, 68(3): 264v271.
Hao G H, Li Z P, Gao Y J, et al. Effect of surface topography on emission properties of hot-cathode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(3): 264 – 271. (in Chinese)
- [19] 赵永秀, 刘树林, 王瑶, 等. 安全火花试验电极热场致发射模型和温度效应的数值模拟研究[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(20): 4179 – 4187.
Zhao Y X, Liu S L, Wang Y, et al. Research on numerical simulation of thermal field electron emission and temperature effect for safety spark test electrode[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(20): 4179 – 4187. (in Chinese)
- [20] 彭凯, 刘大刚. 三维热场致发射模型的数值模拟与研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 167 – 172.
Peng K, Liu D G. Numerical simulation and study of three-dimensional thermal field emission[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 167 – 172. (in Chinese)
- [21] Benilov M S, Benilova L G. Field to thermo-field to thermionic electron emission: A practical guide to evaluation and electron emission from arc cathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(6): 063307.
- [22] He X, Scharer J, Booske J, et al. Modeling of cold emission cathode by inclusion of combined field and thermionic emission processes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(5): 056107.
- [23] 钟久明, 刘树林, 段江龙, 等. 短间隙短路放电的场增强因子研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2015, 35(9): 1035 – 1040.
Zhong J M, Liu S L, Duan J L, et al. Field enhancement factor in short-circuit discharge across narrow-gap[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(9): 1035 – 1040. (in Chinese)

作者简介



王党树 男, 1976年生, 陕西武功人. 副教授, 从事电力电子技术研究.
E-mail: wangdangshu@126.com