

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*

苏兆锋[†] 杨海亮 张鹏飞 来定国 郭建明 任书庆 王强

(西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2013年11月29日收到; 2014年1月23日收到修改稿)

研究了金属表面电子发射阈值的测量原理. 以待测材料为阴极, 以法拉第筒作为阳极收集电子. 在“晨光号”加速器上, 测量了不同粗糙度的304L不锈钢和铝表面电子发射阈值及经表面涂覆工艺处理后这两种电极材料表面电子发射阈值. 研究发现: 电极表面磨光可以抑制电子发射, 随着粗糙度的增加, 电子发射阈值降低; 金属表面涂覆对抑制电子发射效果更为显著, 电子发射阈值增加了一倍.

关键词: 场致发射, 阈值, 法拉第筒, “晨光号”加速器

PACS: 68.37.Vj, 29.20.-c, 79.70.+q

DOI: 10.7498/aps.63.106801

1 引言

在Z箍缩装置中, 要将功率达到几十太瓦至上百太瓦的电脉冲馈送到几毫米间隙的负载, 需要采用磁绝缘传输线(MITL)^[1,2]来保证能量的高效传输和汇聚. MITL阴极材料的电子发射阈值对磁绝缘有重要影响^[3]. 在MITL设计过程中, 不锈钢为常用的阴极材料, 掌握真空中不同处理工艺下不锈钢表面电子发射随电场的变化规律具有重要意义^[4,5].

另外, 铝金属也是MITL的一种常见电极材料. 对铝电极表面进行硬质氧化处理可提高电子发射阈值至200—250 kV/cm. 研究不同阳极氧化处理工艺下铝的电子发射阈值对设计MITL具有重要参考价值.

本文设计了测量金属材料表面电子发射阈值的实验平台, 并在“晨光号”加速器上进行了初步的实验研究. 以待测金属为阴极, 以法拉第筒^[6-8]作为电子收集体, 通过电压与电流密度的对应关系确定电子的发射时刻, 从而得到了材料表面电子发射

的电场强度阈值.

2 基本理论

真空器件中, 常用的阴极分为热电子阴极、冷电子阴极、光电子阴极、次级电子阴极等, 而上述阴极的分类与其电子发射方式有关^[9]. 在高压强场条件下, 主要涉及场致发射现象. 场致发射^[10-12]实质上是电子隧穿表面势垒的过程. 根据金属的自由电子模型, 金属内部势能恒定, 自由电子可以在由离子组成的晶格空间内自由移动, 而在金属与真空的边界上势能按某种规律上升, 从而构成了金属表面的势垒, 这对于电子隧穿是不可忽略的量. 施加外部电场后势垒变窄, 当表面势垒宽度减小到电子波长数量级时会发生隧道效应, 大量电子克服势垒发射出来^[9].

场发射电流密度 j_{FN} 可以通过著名的Fowler-Nordheim公式描述^[13-15], 即

$$j_{\text{FN}} = \frac{q^2 m_e E^2}{8\pi h m [q\Phi_b - (E_F - E_c)]} \times \exp\{-B[q\Phi_b - (E_F - E_c)]^{1.5}\}, \quad (1)$$

* 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金(批准号: SKLIPR1207)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: suzhaofeng@nint.ac.cn

式中, q 为电荷电量, E 为外加电场强度, m_t 为电子横向质量, m 为自由电子质量, h 为普朗克常数, $B = \frac{4\sqrt{2m}}{3qhE}$, $q\Phi_b$ 为势垒高度, E_F 为费米能级, E_c 为导带底能量. 由(1)式可知, 发射电流密度原则上取决于发射体表面的局域电场和逸出功. 因此, 可以通过各种表面处理工艺改变微观电场, 从而达到提高材料表面电子发射阈值的目的.

电子发射阈值的大小表明在外加电场作用下材料发射电子的难易程度. 目前, 电子发射阈值较为普遍的定义是当场发射电流密度达到 10 mA/cm^2 时所需的外加电场强度. 本文采用该定义, 首先测量了 $I-U$ 曲线, 然后根据电流密度对应的电压得到阈值电场.

3 测量系统结构设计

基于上述原理, 设计了金属材料表面电子发射阈值的测量平台. 测量系统主要由待测金属电极、电子收集体(法拉第筒)、取样电阻、准直系统、信号引出体、铜支架等构成, 图1和图2分别为测量平台示意图和实物图. 法拉第筒采用拦截法测量束流, 并精确监测束流流强, 以诊断电子发射起始时间. 电子束流穿过法拉第筒真空窗进入法拉第筒, 最终被完全阻止在收集体内, 之后电流流过薄膜分流电阻. 如果此电阻薄膜的电感很小, 在电荷收集体处存在以下关系[6]:

$$U(t) = I(t)R_f, \quad (2)$$

式中, $U(t)$ 为收集体处的瞬间电位, $I(t)$ 为电流, R_f 为薄膜电阻. 电压信号通过电缆传输到示波器.

法拉第筒要结构简单, 易于拆装, 耐电子轰击, 可多次使用, 并与接地系统绝缘. 因此, 需设计一套绝缘支撑, 而且所用材料要绝缘性能良好, 并且有一定的机械强度. 本文测试系统选用聚四氟乙烯材料, 它不但保证了法拉第筒前表面与阴极发射面平行, 电极表面场强均匀, 从而避免了局部提前发射, 而且减少了干扰, 提高了测量准确度. 绝缘支撑和后盖板相连, 用于固定整个测试系统. 后盖板和电子加速器封闭连接, 这具有保证阴阳极同轴和保证电子环境的真空度两个作用.

收集体的作用是收集入射电子, 要求收集体材料具有散射和辐射损失小、升华温度高、热容量大、耐束流冲击、导电性能良好和能承受一定的机械强

度等特点, 实验中选择高纯度石墨作为收集体, 其厚度为 30 mm , 吸收体直径为 140 mm .

取样电阻采用低电感碳膜电阻, 由多个电阻并联成环状组成, 其两端分别固定在后盖板和法拉第筒的中心, 使用微欧计测量其电阻值约为 $8 \text{ m}\Omega$. 法拉第筒与传输线和负载之间匹配良好, 装置结构紧凑, 从而减少了回路电感和信号反射, 提高了法拉第筒的收集效率, 也减少了因反向散射等因素引起的电荷损失.

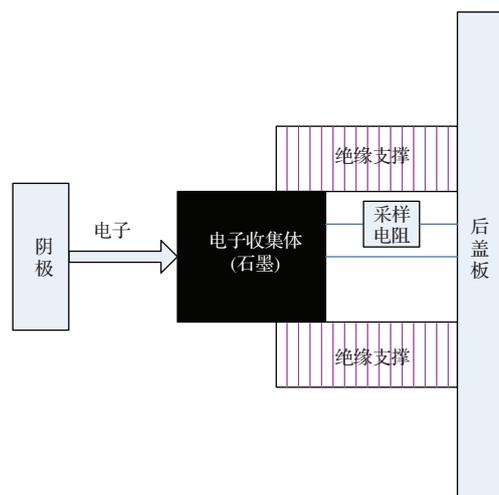


图1 实验平台示意图



图2 测量系统实物图

4 实验结果及分析

利用“晨光号”加速器进行了金属表面电子发射阈值的测量实验研究. “晨光号”加速器是我国第一台强流脉冲电子束加速器. 实验中, 二极管的阴极采用不同粗糙度及镀层的304L不锈钢和金属铝, 直径均为 87 mm , 其作用是发射电子, 阳极法拉第筒直径为 140 mm , 厚度为 30 mm . 阴极与加速器通过不锈钢支杆连接, 支杆有5种长度, 结合垫片可以实现阴极与阳极间隙的精细调节, 调节步长为 2 mm .

4.1 不同粗糙度金属表面电子发射阈值测量

图3给出了不同粗糙度的304L不锈钢作为阴极时,示波器测得的电压信号和法拉第筒测得的电流曲线.图4是不同粗糙度的金属铝作为阴极时,示波器测得的电压信号和法拉第筒测得的电流曲线.

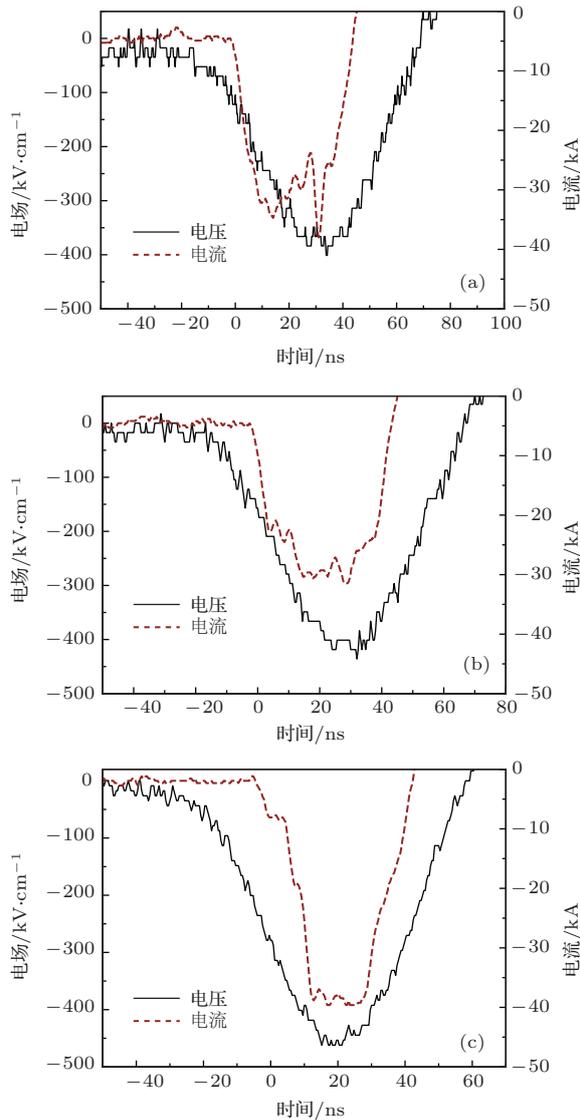


图3 不同粗糙度的304L不锈钢作为阴极时的电压和电流波形 (a)粗糙度为3.2; (b)粗糙度为1.6; (c)粗糙度为0.8

不同表面粗糙度的不锈钢和金属铝的电子发射阈值列于表1,数据显示,随着粗糙度的降低,即金属表面越平整,电子发射阈值越高,这说明表面磨光工艺可以增加电子发射阈值.几乎所有材料的表面都有微观凸起(晶须),高度通常在 10^{-4} cm量级,密度取决于材料表面的粗糙度.由于这些晶须

的存在,导致其尖端处的电场强度比外加宏观电场强度大几百倍.当外加电场达到一定数值时,在晶须尖端处会发生场致电子发射,而表面磨光工艺可以减小晶须的密度和高度,从而达到增加电子发射阈值的目的.

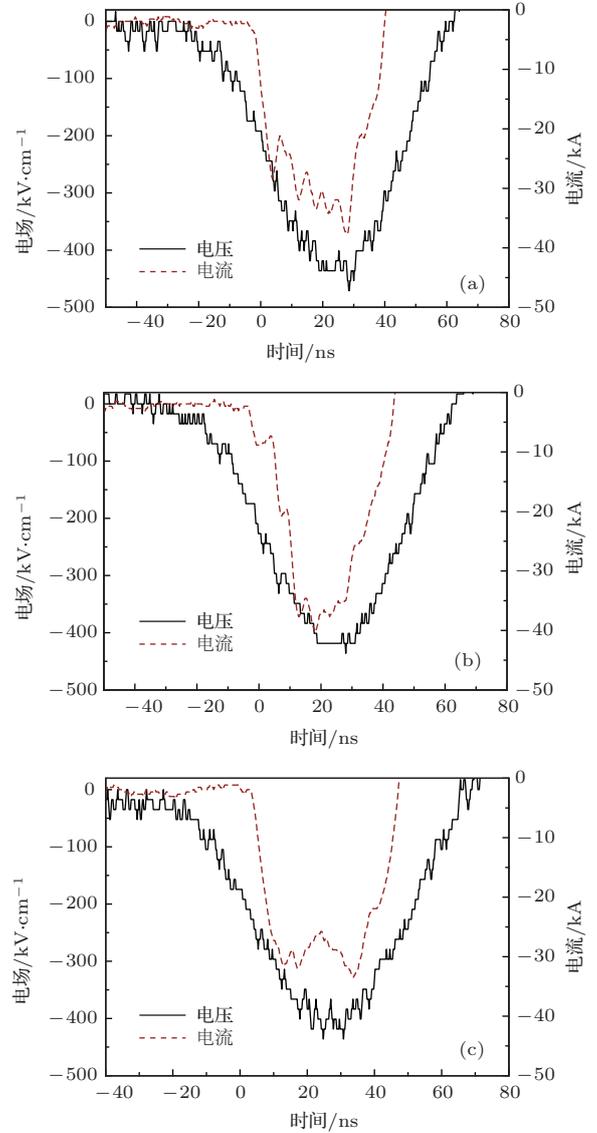


图4 不同粗糙度的金属铝作为阴极时的电压和电流波形 (a)粗糙度为3.2; (b)粗糙度为1.6; (c)粗糙度为0.8

表1 不同表面粗糙度的不锈钢和金属铝的电子发射阈值

材料	粗糙度	发射阈值/ $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$
不锈钢	3.2	122
不锈钢	1.6	174
不锈钢	0.8	218
金属铝	3.2	130
金属铝	1.6	184
金属铝	0.8	195

由表 1 还可知, 粗糙度为 1.6 和 0.8 的金属铝阴极的电子发射阈值相差不大. 铝表面处理工艺难度较大, 很难达到不锈钢的磨光标准, 处理厂家虽然提供了粗糙度为 0.8 的金属铝, 但实际情况未必能达到精度标准. 所以, 粗糙度为 1.6 和 0.8 的金属铝阴极的电子发射阈值相差不明显.

4.2 涂层金属表面电子发射阈值测量

对 304L 不锈钢和金属铝进行了电镀涂层处理, 镀层为 40 μm 厚的 Cr₂O₃. 阴极直径均为 87 mm, 阴极与加速器通过不锈钢支杆连接, 法拉第筒直径为 140 mm, 厚度为 30 mm. 图 5 给出了电镀涂层处理后的不锈钢和金属铝分别作为阴极时, 示波器测得的电压信号和法拉第筒测得的电流曲线.

图 6 给出了多次实验后的铝阴极和法拉第筒阳极实物照片, 从放电痕迹看, 阴极圆弧过渡段没有形成尖端提前放电, 这说明电子发射是均匀的. 电流的起始时刻表示电子开始发射, 该时刻对应

的电压即为电子发射时的阴阳极电压, 结合阴阳极间隙可得到电子发射时的场强阈值. 表 2 列出了两种涂层金属的电子发射阈值. 数据表明, 经电镀涂层工艺处理过的金属表面电子发射特性与裸金属表面电子发射特性差异显著. 在阴阳极电压为 700 kV, 电流为 40 kA, 脉冲宽度为 20 ns 的脉冲电场下, 当外加电场强度为 350—410 kV/cm 时涂层处理后的金属材料表面仍无电子发射, 而当外加电场强度为 120—200 kV/cm 时裸金属表面已发射出电子, 涂层处理后, 金属材料表面电子发射阈值高了一倍. 这些涂层常常能够承受多次脉冲的作用, 可以完全抑制电子发射, 而且一旦产生电子发射, 一些涂层仍然可以起到部分的抑制作用, 它们将发射电流水平限制在空间电荷限制流以下.

表 2 电镀 Cr₂O₃ 后两种金属的电子发射阈值

材料	发射阈值/kV·cm ⁻¹
不锈钢(涂层)	410
金属铝(涂层)	348

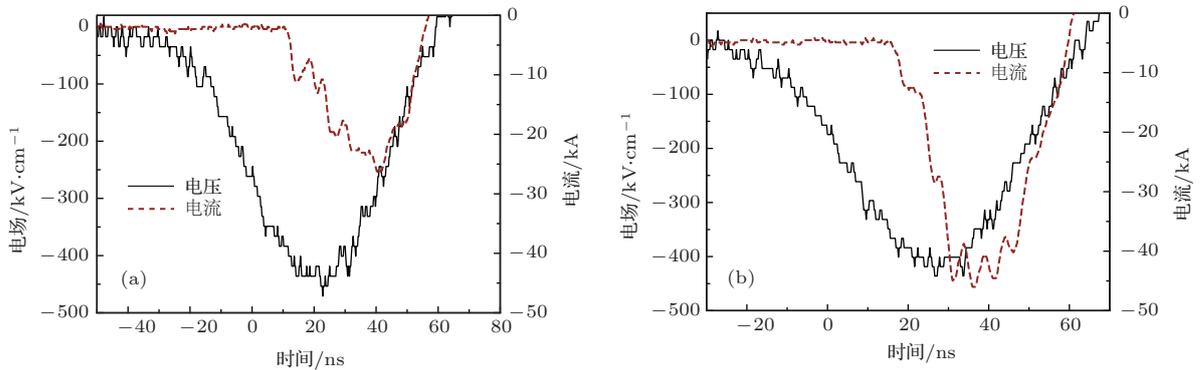


图 5 涂层处理后的不锈钢和金属铝分别作为阴极时的电压和电流波形 (a) 不锈钢; (b) 金属铝

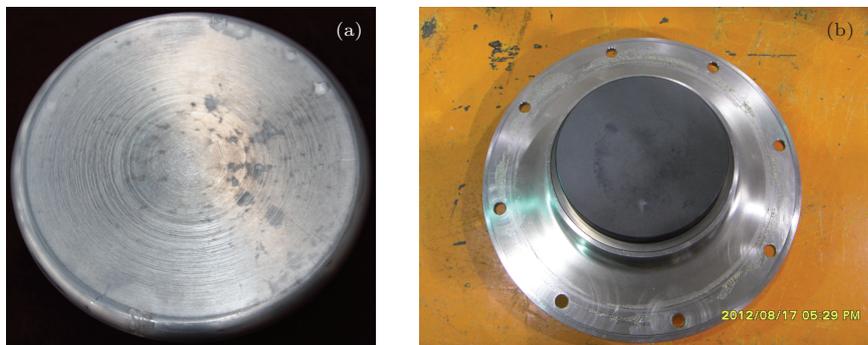


图 6 多次实验后的铝阴极和法拉第筒照片 (a) 铝阴极; (b) 法拉第筒

5 结 论

本文设计了基于法拉第筒的金属表面电子发射阈值的测量系统, 测量得到了在不同处理工艺情况下两种典型电极材料的电子发射阈值. 当粗糙度为3.2, 1.6, 0.8时, 304L 不锈钢表面电子发射阈值分别为122, 174和218 kV/cm, 而金属铝表面电子发射阈值分别为130, 184和195 kV/cm, 其随粗糙度的变化不明显. 电镀涂覆处理工艺对抑制电子发射效果更为显著, 电子发射阈值增加了一倍, 经涂覆后的不锈钢和金属铝表面电子发射阈值增大到410和348 kV/cm.

参考文献

- [1] Guo F, Li Y D, Wang H G, Liu C L, Hu Y X, Zhang P F, Ma M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 102901 (in Chinese) [郭帆, 李永东, 王洪广, 刘纯亮, 呼义翔, 张鹏飞, 马萌 2011 物理学报 **60** 102901]
- [2] Zhou J, Zhang P F, Yang H L, Sun J, Sun J F, Su Z F, Liu W D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 245203 (in Chinese) [周军, 张鹏飞, 杨海亮, 孙江, 孙剑锋, 苏兆锋, 刘万东 2012 物理学报 **61** 245203]
- [3] Li L Q, Meng L, Deng J J, Song S Y, Zou W K, Liu D G, Liu S G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1643 (in Chinese) [刘腊群, 蒙林, 邓建军, 宋盛义, 邹文康, 刘大刚, 刘盛纲 2010 物理学报 **59** 1643]
- [4] David J J, Harry C I, Mark E S, William A S 2003 *14th IEEE International Pulsed Power Conference* Dallas, Texas, June 15–18, 2003 p1021
- [5] David J J, William E F, Mark E S, William A S 2002 *International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Tours*, France, 2002 p131
- [6] He X P, Shi L, Zhang J S, Qiu A C 2000 *High Power Laser and Particle Beams* **12** 753 (in Chinese) [何小平, 石磊, 张嘉生, 邱爱慈 2000 强激光与粒子束 **12** 753]
- [7] Song X P, Chen R, Bao C Y, Wang D W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4198 (in Chinese) [宋晓鹏, 陈戎, 包成玉, 王德武 2005 物理学报 **54** 4198]
- [8] Yang H L, Qiu A C, Li J Y, Sun J F, He X P, Tang J P, Wang H Y, Huang J J, Ren S Q, Zou L L, Yang L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4072 (in Chinese) [杨海亮, 邱爱慈, 李静雅, 孙剑锋, 何小平, 汤俊萍, 王海洋, 黄建军, 任书庆, 邹丽丽, 杨莉 2005 物理学报 **54** 4072]
- [9] Liu Y X 1995 *Electronic Emission and Photocathode* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p109 (in Chinese) [刘元霞 1995 电子发射与光电阴极 (北京: 北京理工大学出版社) 第109页]
- [10] Zhu C C, Huangpu L J, Huai Y J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 382 (in Chinese) [朱长纯, 皇甫鲁江, 淮永进 2002 物理学报 **51** 382]
- [11] Zuo Y H, Wang J G, Fan R Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 215202 (in Chinese) [左应红, 王建国, 范如玉 2012 物理学报 **61** 215202]
- [12] Bai X, Zhang G M, Wang M S, Zhang Z X, Yu J, Zhao X Y, Guo D Z, Xue Z Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3517
- [13] Wang Y Y, Li Y A, Xu J S, Gu G R 2012 *Chin. Phys. B* **21** 087902
- [14] Wang J S 2008 *Electronic Emission Material* (Beijing: Beijing University of Technology Press) p197 (in Chinese) [王金淑 2008 电子发射材料 (北京: 北京工业大学出版社) 第197页]
- [15] Wang X P, Wang L J, Duan X C, Wang L Y, Zhang L, Lü C R, Lei T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2078

Preliminary experimental research of electron emission characteristics on surface area of two kinds of electrodes*

Su Zhao-Feng[†] Yang Hai-Liang Zhang Peng-Fei Lai Ding-Guo
Guo Jian-Ming Ren Shu-Qing Wang Qiang

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 29 November 2013; revised manuscript received 23 January 2014)

Abstract

The principle of measuring electron emission threshold of surface area metal electrode is presented. The measurement system of electron emission thresholds of two electrodes is developed. The electron emission characteristics of materials with different roughness degrees or Cr₂O₃ coating-deposit 40 μm are measured in “Chenguang” accelerator. The results show that polishing can suppress electron emission. The higher the roughness degree of material, the lower the electron emission threshold is. Material coated with Cr₂O₃ has higher electron emission threshold than polished material.

Keywords: field emission, threshold, Faraday cup, “Chenguang” accelerator

PACS: 68.37.Vj, 29.20.-c, 79.70.+q

DOI: [10.7498/aps.63.106801](https://doi.org/10.7498/aps.63.106801)

* Project supported by the Foundation of State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, China (Grant No. SKLIPR1207).

[†] Corresponding author. E-mail: suzhaofeng@nint.ac.cn