

一种用于重离子加速器电子冷却装置阴极的研制

王小霞 赵青兰 廖显恒 孟鸣凤 李云

(中国科学院电子学研究所中国科学院高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

摘要: 该文主要研制一种用于 HIRFL-CSR 电子冷却装置的氧化物阴极, 测试了该阴极在普通试验二极管中的发射性能及寿命, 研究了成型阴极表面温度均匀性及其分解激活过程。结果表明, 阴极支取直流发射电流密度 0.5 A/cm^2 , 工作温度 $750^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 时具有很好的发射均匀性, 电流加速寿命结果表明, 该阴极在 800°C , 寿命超过 18000 h。

关键词: 氧化物阴极; 电子冷却; 发射性能; 寿命

中图分类号: O462.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2999-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00077

One Type of Oxide Cathode for HIRFL-CSR Electron Cooler

Wang Xiao-xia Zhao Qing-lan Liao Xian-heng Meng Ming-feng Li Yun

(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies,
Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper the characteristic of a type of oxide cathode for HIRFL-CSR electron cooler is discussed, which includes the measurement of the DC emission current density and the lifetime of the cathode. The thermic uniformity of the cathode surface and its decomposing, activating process are also tested. The results show that the cathode has good emission uniformity with 0.5 A/cm^2 at $750^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ and its lifetime is over 18000 h.

Key words: Oxide cathode; Electron cooling; Emission performance; Lifetime

1 引言

作为同步加速器领域束流冷却的重要途径之一, 电子冷却是通过由重离子加速器储存环轨道外强流“冷”电子束和环内具有相同运动速度的热离子束之间的多次库仑作用或卢瑟福散射进行“热交换”, 离子将“热”转移给电子从而降低了温度, 直观对应为减小了离子的横向发射度和纵向运动分量。从而提高加速器储环内已经开始储存束流的品质, 并增加储存寿命^[1]。

在电子冷却装置中, 电子枪是最为核心的部件, 电子枪一般由阴极、成型极、控制极和阳极组成(图1)。成型极用于抑制阴极侧面的电子发射, 阳极主要用于阴极表面电子的引出。控制极与阴极紧邻, 其电势相对阴极电势的微小变化会影响阴极发射面的电子发射区域和电子束密度分布变化。控制极和阳极的共同作用促成了尺寸和密度连续可调的实心 and 空心电子束的产生^[2,3]。

在电子枪中, 阴极作为电子发射源, 它的发射

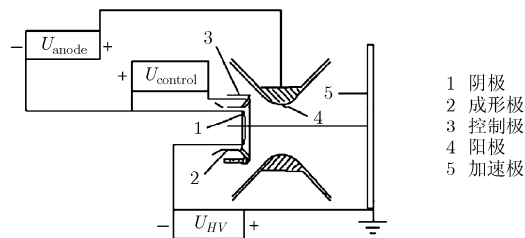


图1 电子枪结构示意图

效率、可靠性及发射均匀性直接影响产生电子束的品质。在 HIRFL-CSR 电子冷却装置中, 阴极的最大工作电流为 3 A, 发射电流密度约为 0.5 A/cm^2 。阴极工作温度低, 约 800°C 以下, 过高的阴极温度会加大阴极发射电子的初速度分布零散性及电子温升, 不利于形成电子束流的品质。阴极加热功率尽可能低, 一般为 $40\text{W} \sim 60\text{W}$, 以减少阴极的热膨胀对电子束流分布径向梯度的影响, 而加热功率低的另外一个优点是确保用于加热阴极的热子有足够的寿命。阴极表面发射均匀好, 阴极表面发射均匀性会影响电子束流横向分布, 而横向分布的不均匀性可能会对冷却重离子束轨迹产生微小的畸变。阴极寿命当然尽可能长, 因为一旦阴极失效, 电子冷

2010-01-22 收到, 2010-05-07 改回

国家自然科学基金 (50702059) 资助课题

通信作者: 王小霞 Wangxx-798@sohu.com

却装置中电子枪就得拆除重新安装, 费用昂贵且耗时又长。

本文主要研制一种适用于 HIRFL-CSR 电子冷却装置的新型阴极, 并对其直流发射性能、发射均匀性、阴极寿命、阴极热效率及其表面温度均匀性进行了研究, 结果表明这种新型阴极能很好地适用于电子冷却装置并将提高其形成电子束流的品质。

2 HIRFL-CSR 电子冷却装置阴极的设计

氧化物阴极具有工作温度低的特点, 一般工作温度在 800℃左右, 在氧化物阴极中稀土氧化物阴极与贮存式氧化物阴极具有发射电流密度大、寿命长的特点, 由于贮存式氧化物阴极具有抗中毒性能强、根据对阴极不同性能的要求可以有多种变体, 所以更适合应用于真空电子器件中。而在贮存式阴极 Ni 网表面制备 Ni 海绵既能提高阴极表面碳酸盐与 Ni 网的粘接, 又能降低表面涂层电阻, 还能提高阴极在实际应用中(如阴极直径大于 20 mm)阴极表面温度的均匀性^[4]。所以本文设计一种 Ni 海绵贮存式氧化物阴极, 其结构如图 2 所示。

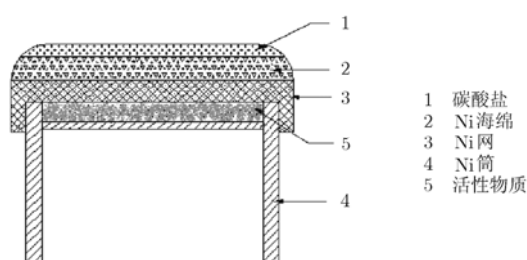
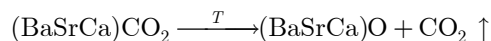


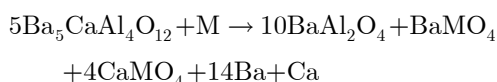
图 2 阴极结构示意图

该阴极由基底贮存小室中的活性物质(铝酸盐与激活剂)、Ni 网、粘接在 Ni 网表面 Ni 海绵及浸涂在 Ni 海绵中的碳酸盐组成。在阴极工作过程中一般经历下面 3 个阶段:

(1) 浸涂在 Ni 海绵上的碳酸盐在温度作用下分解成氧化物



(2) 贮存小室中的活性物质发生反应生成金属钡



(3) 金属钡通过 Ni 网及 Ni 海绵层扩散到阴极表面与阴极表面钡锶钙氧化物晶粒形成低逸出功的发射中心, 在强场作用下金属钡释放出两个电子通过微孔发射到真空。发射电子后, 阴极表面 Ba^{++} 离子沿氧化物晶粒向 Ni 网表面扩散, 与 Ni 网表面贮存小室产生扩散上来的金属 Ba 交换电子, 从而维持涂

层中金属 Ba 的浓度。在涂层深处维持一定的 Ba 浓度可以保证阴极能支取较大的连续波发射电流, 而贮存小室中主要单相结构的铝酸盐与 3 种不同活性的激活剂反应可以源源不断地产生盈余 Ba, 保证阴极有较长的寿命^[5,6]。当阴极表面的盈余 Ba 由于中毒、打火、蒸发损失时, 在浓度作用下涂层中的盈余 Ba 向阴极表面扩散, 涂层中盈余 Ba 的减少促使阴极小室中产生更多的盈余 Ba, 所以这种阴极具有良好的抗中毒能力。

3 Ni 海绵贮存式氧化物阴极的发射性能

3.1 阴极制备及其测试条件

Ni 海绵的制备方法: 在阴极 Ni 网(Ni 网孔度 0.1 μm , 孔密度 15.5 孔/平方毫米)表面制备一层约 0.15 mm~0.2 mm 的 Ni 海绵并在氢气炉中烧结, Ni 海绵孔度 70%~75%。在阴极镍筒贮存小室中填入贮存活性物质, 点焊上烧结有 Ni 海绵的镍网帽, 在镍网 Ni 海绵孔中浸渍满并喷涂一层约 20 μm ~40 μm 三元碳酸盐, 完成阴极的制备。

阴极发射性能的测量采用普通试验二极管, 阳极采用厚 0.3 mm 直径 30 mm 的 Mo 片, 阴极、阳极之间距离 0.9 mm~1.1 mm。阴极在分解过程中真空度不低于 3×10^{-4} Pa, 在激活过程中真空度不低于 2×10^{-5} Pa, 阴极经分解、激活后封离排气台, 850℃老炼 30 h 后进行发射性能及寿命测试。采用 UJ36a 型电位差计(精确度 0.1 mV)、直径 0.08 mm Ni-Mo 热电偶测量阴极温度, DHY5001 型稳压直流电源(精确度 0.1 V, 1 mA)测试阴极发射电流, DHY-12 型寿命测试台(0.1 V, 0.1 mA)测试阴极寿命。

3.2 阴极发射性能

3.2.1 阴极直流伏安特性 图 3 是阴极的直流伏安特性曲线, 从图 3 中可以看出阴极在不同温度的空间电荷偏离点发射电流密度, 在 850℃, 800℃, 750℃, 700℃的发射电流密度分别为 2.30 A/cm², 1.80 A/cm², 1.27 A/cm², 0.72 A/cm²。电子冷却装置要求阴极发射电流密度为 0.5 A/cm², 所以这种阴极在 700℃以上都符合工作要求。但是在电子冷却装置中要求阴极具有好的发射均匀, 一般采用阴极空间电荷区斜率可以来评估阴极的宏观发射均匀性, 图 3 中阴极在 850℃, 800℃, 750℃, 700℃的空间电荷区斜率分别为 1.44, 1.36, 1.31, 1.03。根据文献[7,8], 常用阴极类型在二极管中测试, 曲线斜率一般为 1.33~1.45 时, 具有较好的发射均匀性。所以本文研制的 Ni 海绵贮存式氧化物阴极在 750℃~850℃具有很好的发射均匀性, 鉴于电子冷却装置中对阴极工作温度的要求, 所以确定该阴极在电子冷却装置中的最佳工作温度为 750℃~800℃。

3.2.2 阴极寿命 阴极在工作温度和工作电流下的寿命试验是一项繁琐又费时的的工作，所以一般采用阴极加速试验来评估阴极的寿命。阴极加速寿命试验方法有两种，一种以阴极温度为加速变量，另一种以阴极负荷为加速变量。我们采用阴极负荷为加速变量进行加速寿命试验，即在一定温度下提高阴极发射电流密度，加速阴极物理化学反应，从而达到加速寿命试验的目的。在不考虑其它环境因素影响的条件下，当阴极温度不变时，阴极寿命与支取发射电流密度之间的关系^[9]为 $t = a/j_a^b$ ，两边取对数后得

$$\ln t = a - b \ln j_a \quad (1)$$

式中 t 为阴极寿命， j_a 为支取电流密度， a ， b 分别为常数。也就是说阴极寿命的对数与其支取发射电流密度的对数成线性关系。

在本文中确定阴极温度为 800℃，阴极加速电流分别为 1.0 A/cm²，1.50 A/cm² 进行寿命试验，当发射电流降至初始发射电流的 80% 时阴极寿命结束。寿命试验结果如图 4 所示。

从图 4(a) 得出这种阴极在温度 800℃ 发射电流密度为 1 A/cm² 时的寿命为 6504 h。从图 4(b) 中得出在相同温度下发射电流密度为 1.5 A/cm² 时阴极寿命为 3504 小时。分别将 (1 A/cm²，6504 h)、(1.5 A/cm²，3504 h) 带入式 (1)，得出 $a=6504$ h， $b=1.5253$ 。由此得出这种 Ni 海绵贮存式氧化物阴极在 800℃ 时的电流加速寿命方程为

$$\ln t = \ln 6504 - 1.5253 \ln j_a \quad (2)$$

当阴极支取 0.5 A/cm² 电流密度时，阴极寿命为 18722 h。

阴极在空间电荷限制区工作，支取发射电流密度不变时，阴极寿命与工作温度的关系为^[10]

$$\ln t = A + B/T \quad (3)$$

式中 t 为工作温度为 T 时阴极的寿命， A ， B 为常数。从式 (3) 可以看出在空间电荷限制区，阴极寿命的对数与阴极温度成反比，所以这种 Ni 海绵贮存式氧化物阴极在 750℃~800℃ 低于 800℃ 支取 0.5 A/cm² 电流密度时寿命超过 18722 h。

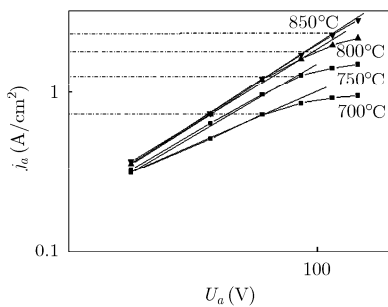


图 3 阴极直流伏安特性曲线

4 HIRFL-CSR 电子冷却装置阴极制备及性能测试

4.1 电子冷却装置阴极制备

电子冷却装置阴极的结构及制备：阴极球面弧度 R 为 48 mm(凸)，选择凸面阴极是更有利于获得实心或空心的电子束，阴极直径 $\Phi 30$ mm，边缘 1 mm 无发射电流是为了更好地控制阴极的侧端发射，避免形成电子束流发散。阴极制备方法与 3 mm 试验阴极制备方法相同。热子选择复绕盘香式氧化物铝粉烧结热子，这种热子的特点是热子与阴极内侧面直接相接触，热子可以通过热传导、热辐射两种方式给阴极加热，从而提高阴极的热效率。热子另一面紧贴加热子隔热屏，隔热屏为纯 Ni 并与热子外形具有相似结构起到很好的固定热子的作用。阴极边缘有 4 个钢支撑腿，在阴极装入电子枪时起连接作用，HIRFL-CSR 阴极、热子、热子隔热屏及支撑件组装好后的实物图如图 5 所示。

4.2 电子冷却装置阴极分解、激活过程

将如图 5 所示的组件置于真空系统中，进行阴极分解，在分解过程中真空度最低不低于 8×10^{-4} Pa，阴极加热功率随时间的变化关系如图 6 所示。从图 6 可以看出该阴极的分解激活过程，在加热功率 32 W 以下时，阴极碳酸盐中的添加剂进行分解，加热功率在 32 W~90 W 时，阴极发射涂层中碳酸钙、碳酸锶、碳酸钡随温度升高逐一进行分解，在 40 W~50 W 时阴极分解时间较长，因为此时有大量的碳酸盐进行分解放出二氧化碳，真空度比较低，若升温太快容易造成电子枪中的部分零件氧化。当加热功率升至 90 W 后阴极已经分解完，可以加阳极电压阴极支取一定电流进行激活。阴极激活后，适当的调节阳极电压、控制极电压及热子功率可以获得所需的电子束。

4.3 电子冷却装置阴极表面温度的测量

在实际应用中，阴极发射均匀性主要取决于两个方面，一是阴极本身的发射均匀性，二是成型阴极表面温度的均匀性。阴极分解激活完后在不同的

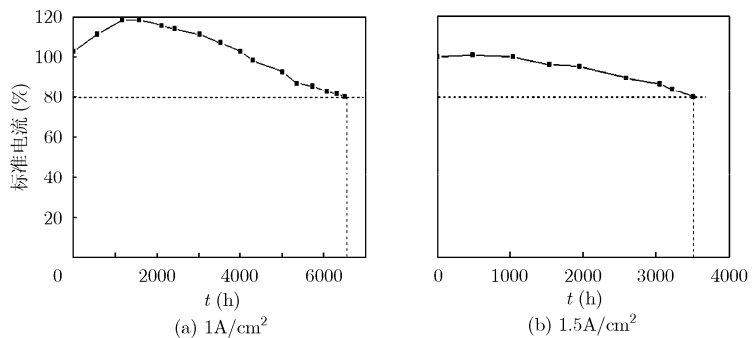


图 4 阴极在 800℃ 不同初始发射电流密度时的寿命曲线



图5 阴极热子组件实物照片

加热功率下进行阴极表面温度均匀性的测量,采用数字红外测温仪测阴极表面温度,在阴极表面分别选择如图5中的标记的5个点进行阴极温度测试,测试结果如表1所示。

表1 阴极表面不同区域的温度(°C)

加热功率(V/A)	1	2	3	4	5
13/3.5	733	730	730	737	740
14/3.6	759	751	754	760	761
15/3.8	789	786	785	791	790
15.5/3.9	806	801	803	805	808

从表1中可以看出该阴极具有两个特点,一是加热功率比较低,具有较高的热效率,阴极加热功率45 W时,阴极表面平均温度约750°C,当阴极加热功率为60 W时,阴极表面的平均温度约800°C,在此温度范围内,阴极支取0.5 A/cm²有比较稳定的发射,而且寿命较长。第2个特点是在每一个温度下,阴极表面各区域温度均匀性很好,温差不超过10°C,阴极表面温度的均匀性在一定程度上影响阴极表面发射电流的均匀性,阴极表面温差小有利于成束电子流的品质。

5 结论

本文主要研究了一种用于重离子加速器电子冷却装置的Ni海绵贮存式氧化物阴极,试验结果表明该阴极具有工作温度低(750°C~800°C),空间电荷偏离点发射电流密度大于0.5 A/cm²;发射均匀性好,阴极在750°C和800°C时空间电荷区斜率分别为1.31和1.38;寿命长,电流加速试验表明该阴极在800°C,支取发射电流0.5 A/cm²,寿命大于18000 h。电子冷却阴极在阴极温度工作范围内表面温差均小于10°C,该阴极将很好地应用于HIRFL-CSR电子冷却装置中。

致谢 感谢吕艳杰在HIRFL-CSR阴极成型中提供的帮助,李玉涛工程师在阴极球面参数测试中提供的帮助,王其富博士在阴极发射性能测试及发射曲线斜率计算中所做的工作。

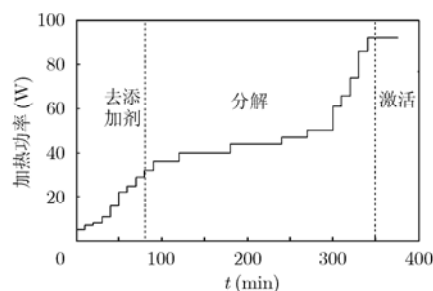


图6 阴极分解时加热功率随时间的变化曲线

参考文献

- [1] Yang Xiao-dong. Electron Cooling in CSRe. //cool09. impcas.ac.cn/, 2009, 9.
- [2] Buble A V, Panasyuk V M, and Parkhomchuk V V, et al. Measuring a hollow electron beam profile. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, 532: 413-417.
- [3] 李杰, 杨晓东, 冒立军等. HIRFL-CSR 电子冷却装置电子枪的参数测试. *原子能科学技术*, 2007, 41(1): 94-97.
Li Jie, Yang Xiao-dong, and Mao Li-jun, et al. Character and test of electron gun for HIRFL-CSR electron cooler. *Atomic Energy Science and Technology*, 2007, 41(1): 94-97.
- [4] 王小霞, 廖显恒, 罗积润等. 一种贮存式氧化物阴极. *电子与信息学报*, 2006, 28(11): 2179-2181.
Wang Xiao-xia, Liao Xian-heng, and Luo Ji-run, et al. A reservoir oxide cathode. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(11): 2179-2181.
- [5] Wang Xiao-xia, Liao Xian-heng, and Luo Ji-run, et al. Recent progress of oxide cathode research for microwave tube applications in IECAS. 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference, Roma, Italy, 2009, 4: 294-295.
- [6] 王小霞, 廖显恒, 罗积润等. 新型贮存式氧化物阴极寿命机理的初步探讨. *物理学报*, 2009, 58(2): 1280-1286.
Wang Xiao-xia, Liao Xian-heng, and Luo Jin-run, et al. Study of the lifetime mechanism of a new type of reservoir oxide cathode. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 1280-1286.
- [7] 阴生毅, 张洪来, 王宇等. 100 A/cm²高电流密度M型阴极的制备及测试. 第十七届学术年会军用微波管研讨会, 宜昌, 2009, 9: 526-530.
- [8] Wang Jin-shu, Wang Yi-man, and Tao Si-wu, et al. Scandia-doped tungsten bodies for Sc-type Cathodes. *Applied Surface Science*, 2003, 215: 38-48.
- [9] 谭学员, 张汉宜, 韩艳芬. 氧化物阴极加速寿命试验与试验二极管(专辑). 四机部标准化研究所, 1982. 3: 4-5.
- [10] Zhang Ming-chen, Zhang Hong-lai, and Liu Pu-kun, et al. Accelerated lifetime studies of new coated dispenser cathodes. *Journal of Electronics(China)*, 2007, 24(3): 717-720.

王小霞: 女, 1976年生, 副研究员, 从事阴极电子学研究。

赵青兰: 女, 1964年生, 实验师, 从事氧化物阴极制备与研究。

廖显恒: 男, 1936年生, 研究员, 从事阴极电子学研究。