

# 镍海绵浸渍氧化物阴极 在北京质子加速器中的应用和研究

夏德红 史戎坚

(中国科学院高能物理研究所, 北京, 100039)

描述了北京质子直线加速器(BPL)双等离子体源中使用的一种低加热功率镍海绵浸渍氧化物阴极的结构、底金属表面的海绵化处理以及浸渍涂料的制备方法。介绍了该阴极的激活方法和实验结果。讨论了影响氧化物阴极使用寿命的主要因素。该阴极的使用寿命已达 2110 h, 可供引出脉冲束流 200 mA。

**关键词** 阴极 氧化物 浸渍 激活 寿命

北京 35 MeV 质子直线加速器(BPL), 是我国迄今能量最高的质子加速器。离子束的产生采用双等离子体源(图 1), 其放电电流为 40 A, 脉宽 180  $\mu$ s, 重复频率为 10 Hz, 要求引出脉冲电流为 200 mA。双等离子体源由阴极、中间电极和阳极组成。在 1984 年以前, 选用六硼化镧阴极, 由于强流下硼化镧阴极加热功率过高, 受灯丝的使用寿命限制, 阴极的使用寿命偏短(实验记录中最长一次使用寿命仅为 270 h)。因此, 从 1984 年开始研制一种较低加热功率的浸渍镍海绵氧化物阴极。此阴极的发射电流密度大、活性物存贮量大、导电导热性好、耐离子轰击能力强, 更重要的是加热功率比六硼化镧阴极小, 从而使系统的热负荷减小, 极大地改善了系统的热环境。另外, 因采用还原性气体, 使得阴极的抗中毒能力增强。1987 年阴极的使用寿命达到 614 h, 经过随后几年的不断实验和改进, 现在 BPL 双等离子体源上使用的浸渍镍海绵氧化物阴极, 其阴极寿命已达到 2110 h。

## 1 阴极的研制

阴极采用间热式加热方式, 这样可保证阴极表面温度均匀分布, 且工作温度变化小。鉴于阴极的几何形状及制造工艺决定电流在阴极表面的分布, 为使这种分布均匀, 阴极的几何形状选为圆筒状。另外, 在氢气环境下使用的阴极, 要求底金属不能含有有损阴极发射能力并形成闭锁层的有害物质, 因此, 选用电解镍作为阴极的底金属。阴极灯丝选用  $\phi 0.68$  mm 的钨丝, 展开长度为 512 mm, 绕制成鼠笼状。灯丝成型后外径为 20 mm, 高为 15 mm, 表面作电液  $Al_2O_3$  处理。

阴极的使用寿命决定于碳酸盐的浸渍量。为增大碳酸盐的浸渍量, 也就是增加活性物的

储存,将阴极底金属表面作海绵化处理:选用粒度为0.047—0.065 mm(250—350目)的镍粉,配制镍海绵层涂料。通常配制镍粉涂料,还需加入氯化锆、硝棉溶液、醋酸丁脂和甲醇。配制好的溶液,经滚磨处理后,再过325目筛,适当的配比才能得到合格的海绵层涂料。

提高海绵层的孔度是增大碳酸盐浸渍量的关键。镍海绵层孔度由下式表示

$$\text{孔度} = \left(1 - \frac{W}{\rho \pi d h \delta}\right) \times 100\%$$

式中: $d$ 、 $h$ 和 $\delta$ 分别代表镍海绵层的外径、高度和厚度; $\rho = 8.9 \text{ g/cm}^3$ 为镍的密度; $W$ 为海绵层内镍的质量。从式中可见,在固定海绵层面积情况下,为了提高海绵层的孔度,而又尽量少增加镍的质量,在实际操作中,通过反复(多层)筛涂-烧结的工艺,使得镍海绵层孔度增大,以达到充分浸渍的目的。当然,镍海绵层孔度也不可能无限制的增大,因为它还受到灯丝加热功率和活性物蒸发的制约。表1是其中一组实验的孔度对浸渍的影响。

表1 孔度参数

Table 1 Porosity parameters

孔度/%	$d/\text{cm}$	$h/\text{cm}$	$\delta/\text{cm}$	$W/\text{mg}$	浸渍量/ $\text{mg}$
63	2.526	2.03	0.008	424	132
67	2.528	2.03	0.009	429	143
70	2.534	2.03	0.012	517	153

镍海绵层处置一般有筛涂法和模制法2种,本文采用筛涂法,烧结温度为1250℃,获孔度为65%—80%,海绵化面积为16.1 cm<sup>2</sup>。这样的海绵层碳酸盐浸渍量在制作手法掌握合适时,最高可达20—50 mg/cm<sup>2</sup>。阴极表面作海绵化处理是获得长寿命阴极的首要关键。

采用钠沉淀法得到二元碳酸盐(Ba、Sr)CO<sub>3</sub>,作为浸涂用的碳酸盐。用此方法得到的针状结晶体比用铍沉淀法得到的球状结晶体发射性能好。配制好含有二元盐的浸涂溶液是获得长寿命阴极的另一关键。通常,配制含有10 ml二元盐的浸涂溶液,需加入一定量的硝棉溶液、醋酸丁脂和甲醇。为了保证达到理想的浸渍,要求配制好的浸涂溶液经过充分的滚磨,以便涂料内的二元盐结晶体均匀分布且颗粒大小合适。

另外,常规增加阴极发射的工艺是在阴极表面喷涂一层面纱,本文在BPL双等离子源上所作的实验表明,这样的工艺会使阴极的激活过程增长,阴极发射反而下降,阴极寿命减少(表2中记录3)。因此,这种常规增加阴极发射的工艺不适于双等离子体源这一特定环境。

## 2 阴极的应用

浸渍镍海绵氧化物阴极应用在BPL上,最重要的就是要完成它的碳酸盐涂层分解为具有电子发射能力的氧化物和单原子钡的过程,即阴极的激活处理过程。这一过程进行得是否彻底,影响到离子源的工作状态,也决定了整台加速器的工作性能。因此,阴极分解激活的过程直接关系到氧化物阴极在加速器上的应用。

双等离子体源所用阴极的应用环境不同于普通电真空器件,它处于一个动态气体环境,氢气流量设计为2 ml/min,在阴极的分解激活处理过程中,通入氢气可作为氧化物阴极分解激

活的还原气体,防止碳酸盐分解过程中的可逆反应,促进氧化物阴极分解激活,并起到保护金属氧化物的作用。但是,由于放电区体积大、流动气体热传导等因素影响,因此,它的激活处理还是难于一般的电真空器件。在多年的阴极激活处理工作中,了解到决定阴极分解激活处理是否彻底的因素主要是温度:温升高,分解速度加快,但高温分解会导致碳酸盐的大量挥发,使得阴极的使用寿命减少,而且会造成起动特性差;温降低,活性物不能得到充分处理,在以后应用过程中,会继续有分解现象而释放出气体,在排除不力情况下,就会引起阴极中毒。所以,适当的温度和温升速度,是阴极激活处理的关键。在阴极激活处理过程中,得出的阴极涂层放气规律示于图2。图中  $I_f$  为灯丝电流,  $T_p$  为激活时间。当灯丝电流  $I_f$  为  $I_1$  和  $I_2$  时,分别是阴极涂层表面和内部放气过程。处理好这2次放气过程,是激活处理的另一关键。只有阴极激活处理得合适,才可能彻底地清除阴极在加工过程中所含的杂质气体,提高阴极的活性并获得良好的发射能力,使阴极处于稳定的工作状态。

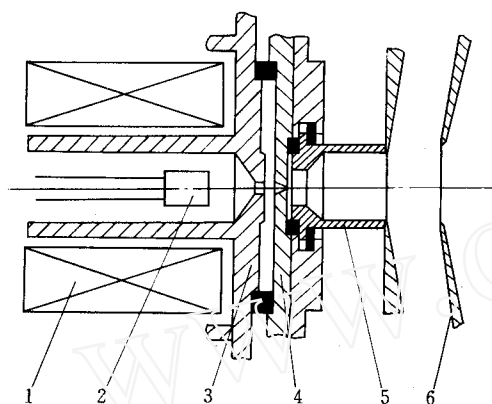


图1 双等离子体源

Fig.1 Schematic diagram of duoplasmatron ion source

- 1——磁场线圈;2——阴极;3——中间电极;
- 4——阳极;5——扩张杯;6——引出电极

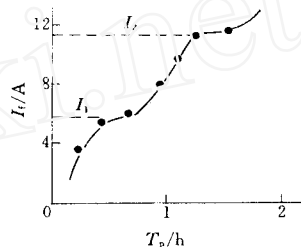


图2 涂层放气曲线

Fig.2 Coat deflation curve

- $I_1$ ——涂层表面放气;  $I_2$ ——涂层内部放气

按通常碳酸盐分解时间 20—50 s/mg,选择的激活时间为 0.7—2 h。具体激活时间的把握,还要以阴极制作过程中的环境(主要是湿度)和阴极的储存时间长短而定。一般干燥天气制作及储存时间短的阴极,在激活处理中放气量偏少,其激活时间也应偏短。实际应用中,阴极涂层的均匀性、底金属的氧化腐蚀程度、灯丝形状及它的丝径均匀性、所充气体是否纯净等因素都影响着阴极分解激活的质量。

BPL 目前主要用于医学上进行短寿命同位素和中子治癌研究,这就决定了这台加速器频繁开、关机的运行机制,因此,阴极在应用过程中还要注意开机时位于阴极筒内灯丝的分档加电压和关机时的缓慢降电压问题,这样的运行程序是为了避免灯丝在冷态下的大电流冲击和灯丝变形、断裂等故障,从而提高阴极的使用寿命,达到离子源较长时间的稳定运行。表2为部份运行实验记录。

表2 部份运行实验记录

Table 2 Some operational parameters

记录 编号	启用 日期	灯丝 电流 /A	灯丝 电压 /V	杯 偏压 /V	磁场 电流 /A	弧 电流 /A	弧 电压 /V	氢 流量 /ml·s <sup>-1</sup>	加速 高压 /kV	引出 电流 /mA	寿命 /h
1	87.09.03	14.7		66	6.2	57	542	1.70	740	210	438
2	88.12.08	14.3		89	7.2	61	557	1.97	750	176	557
3	89.04.26	13.7		83	7.1	77	568	3.10	745	194	256
4	89.10.18	13.7	11	98	7.9	56	465	2.12	740	220	591
5	90.10.09	15.0	10	100	8.0	58	469	2.60	734	180	1121
6	91.11.29	14.0	11	90	6.0	50	460	1.60	740	180	1050
7	93.11.11	14.0	11	70	8.4	40	360	1.37	742	165	1394
8	94.09.13	14.0	12	70	8.4	40	340	1.84	735	160	2110

### 3 讨论和结论

氧化物阴极在北京 35 MeV 质子直线加速器上已应用 10 多年,通过这些时间的实践,可以看出,影响阴极的使用寿命主要有以下几个因素:

1)浸渍密度 阴极的使用寿命取决于阴极本身活性物的储存量,当阴极发射到它所储存的纯钨全部消耗完,阴极的使用寿命也即终止,所以要得到长寿命的阴极,阴极碳酸盐的浸渍量是至关重要的。

2)过热 氧化物阴极在正常工作温度 800—950℃时,它的使用寿命可达数万小时。提高阴极的工作温度,可以得到大的电子发射,但会缩短它的使用寿命。当过热到 1400℃时,将会很快失去活性的钨层,导致使用寿命終了。所以,从阴极激活时起,就应把握温升不能过高,这样才能保证正常工作时的温度不致过热,启动特性良好。

3)弧电流的调试 由表 2 可以看出,弧电流偏高,可以获得大的引出电流,但引发的后果是阴极的使用寿命缩短。所以在保证一定引出电流的情况下,弧放电电流尽量不要调高。

4)灯丝分档加压 灯丝采取均匀分档加压,可防止灯丝冷态时灯丝电流的冲击,延长灯丝使用寿命,从而也延长阴极的使用寿命。

5)中毒 影响氧化物阴极发射的因素有多种,但残余有害气体引起的阴极中毒是主要的。有害气体主要有 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 等,这些气体的分压强为 10<sup>-4</sup> Pa 时,即可引起阴极中毒,为减少阴极中毒发生,提高阴极使用寿命,对真空系统的真空度和氢气的纯度都提出了相当高的要求。另外,氯的存在也是引发阴极中毒的重要原因,被氯沾污的阴极表面会结块,即使在还原性气体中,也不能恢复原始状态。所以在阴极制备和电子枪组装过程中,要严防唾液、汗渍等的污染。

6)三元盐的实验 1989 年前的实验,运用的是三元盐,阴极的使用寿命多在 500 h 以下。表 2 中 3<sup>#</sup> 是典型的执行喷涂面纱工艺的三元盐阴极,实验结果是阴极寿命极短,仅 256 h。从多次三元盐的实验中,得出的结论是,二元盐更适合强流离子源应用。

高能物理所研究员张华顺、郁庆长和罗紫华对本文提出了宝贵意见,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Year Ji, Heying Luo, Dehong Xia, et al. An Oxide-Impregnated Nickel-Matrix Cathode for 35-MeV Proton Linear Accelerator. *J Vac Sci Technol*, 1987, A5:2424.
- 2 冯辅义. 有害气体对氧化物阴极发射的影响. *真空电子技术*, 1990, 4:53.
- 3 高 矩. 紧凑型荧光灯阴极电子发射性能的探讨. *真空电子技术*, 1991, 4:41.
- 4 张 志, 曹玉奇, 董 强, 等. 电视发射管灯丝电阻的变化规律及热稳态值的探讨. *真空电子技术*, 1991, 4:7.

## THE APPLICATION AND STUDY OF AN OXIDE-IMPREGNATED NICKEL-MATRIX CATHODE FOR BEIJING PROTON LINAC

Xia Dehong Shi Rongjian

(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 918-11, Beijing, 100039*)

### ABSTRACT

A low power consumption oxide-impregnated nickel-matrix cathode used in the Duoplasmatron ion source of the Beijing Proton Linac(BPL) is presented. Its structure, treatment process of nickel-foam rubber on metal matrix surface and manufacture of dipcoating carbonate are briefly introduced. The activation method and experiment results of the cathode are described. The principal factors which influence the cathode lifetime are discussed. The lifetime of the cathode is up to 2110 h while the extracted pulsed beam current is about 200 mA.

**Key words** Cathode Oxide Impregnation Activation Lifetime