

文章编号: 1007-4627(2008)04-0350-05

# SFC引出静电偏转板高压放电的研究\*

李兆龙<sup>1,2</sup>, 满开第<sup>1, #</sup>, 郭秋街<sup>1</sup>, 杨雅清<sup>1</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 根据SFC引出静电偏转板的特殊工作环境和运行中发生的现象, 对其高压放电机理进行了深入的研究和大量的电磁场计算。计算结果表明, 在电场和磁场的共同作用下, 盖板损伤的发生部位与实际运行中的打火痕迹完全符合。最后阐述了SFC引出偏转板的高压放电过程, 并对其改进措施进行了研究。

**关键词:** 加速器; 束流引出; 偏转板; 真空绝缘

**中图分类号:** O562

**文献标识码:** A

## 1 引言

分离扇聚焦加速器(SFC)在兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)系统中作为注入器使用, 而静电偏转板(见图1)是SFC引出系统中的关键元件。SFC引出静电偏转板由两段组成, 如图1(a)所

示。第一段入口处使用了厚0.5 mm、长200 mm的直线型钽片作为切割板, 与其相对应的高压电极的截面形状也为直线; 第一段偏转板其余部分和第二段偏转板的切割板与高压电极的截面均为双曲线, 如图1(b)所示。其中, 切割板接地, 高压极接负高压电源。

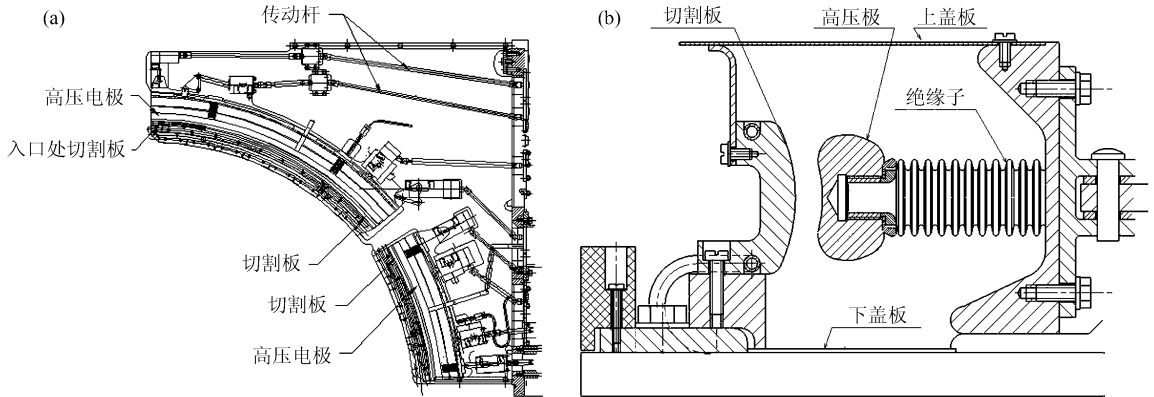


图1 SFC引出静电偏转板示意图

(a) 偏转板总图, (b) 双曲线型偏转板横截面图。

近几年对偏转板的改造首先是从材料选择上入手的, 主要包括: 高压阴极材料用钛合金取代了紫铜; 上下盖板各增加了一层钼板; 切割板除入口处材料选用了钽外, 其余部分仍然采用紫铜材料。经

过几年的运行检验证明: 改进后的偏转板性能有了很大提高。但随着HIRFL-CSR的建成, 要求SFC所提供的束流能量和流强都比过去有了很大的提高, 使偏转板的工作条件更加苛刻, 打火现象比以前有

\* 收稿日期: 2008-02-29; 修改日期: 2008-06-04

\* 基金项目: 国家九五大科学工程式冷却储存环资助项目(CSR191)

作者简介: 李兆龙(1982-), 男(汉族), 山东日照人, 硕士研究生, 从事加速器技术研究; E-mail: lzhaolong@163.com

# 通讯联系人: 满开第, E-mail: mankd@impcas.ac.cn

明显增加,因此很有必要对其做进一步的改进。

SFC引出偏转板工作在强磁场(磁场变化范围为0.8—1.6 T)环境中,偏转板内的最高电场强度可达110 kV/cm,所引出束流的能量和流强也较高(分别为8.4 MeV/u, 15  $\mu$ A)。相关的研究表明<sup>[1]</sup>,不仅高压阴极的材料和表面状况对偏转板的放电有着重要影响,而且构成偏转板其它部件的材料和表面状况对偏转板的放电也有同样重要的影响。因此要提高SFC引出偏转板的耐压性能,首先就要清晰地认识放电过程中发生的与各种因素有关的事件(如电极及相关部件的形状、材料和表面状况等),其次要了解这些事件发生的顺序,从而最终找出最有可能改善性能的方法和途径。

## 2 SFC引出偏转板放电机理的研究

在高真空状态下气体密度很小,电子和离子的自由程很长,以致在间隙中发生碰撞电离的几率很小,电子和离子数量也将很少。那么最初的放电源必然依赖于电极的表面效应和电极间带电粒子的交换过程<sup>[2]</sup>。研究表明,在实际击穿发生之前,真空间隙内就流动着一个可测得的电流,称为暗电流。暗电流主要由场致发射、微放电和微粒迁移3种类型的过程引起。金属电极间带电粒子的交换可导致从电极上发射气体、蒸气和等离子体,从而能形成通常所观察到的火花放电或电弧。

### 2.1 实验观察

对SFC引出偏转板(电极间隙为10.5 mm)操作的经验表明:电极间电压低于50 kV,就存在暗电流,但很微弱;电压高于50 kV后,暗电流增长较快;电压为70 kV时,暗电流约为0.1 mA;若电压

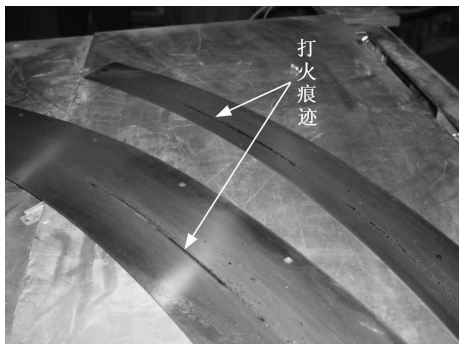


图2 使用过的SFC盖板

继续增加,在阴极和上下盖板之间,将发生沿磁力线的强烈放电。观察使用过的偏转板则发现,上下盖板上各有一道明显的打火痕迹(见图2),高压阴极和绝缘子表面明显地被污染。这与工作环境中不存在强磁场的偏转板的放电现象很不相同,本文将针对SFC引出偏转板放电的特殊性进行研究。

### 2.2 带电粒子的运动分析

由于强磁场的存在,SFC引出偏转板放电过程中产生的带电粒子的运动就会受到影响,而带电粒子的交换又直接关系到偏转板的放电过程。在外电场 $E$ 和外磁场 $B$ 中,一个带电荷 $q$ 的粒子的运动方程可表示为<sup>[3]</sup>

$$\frac{dP}{dt} = q[E + u \times B], \quad \frac{d\xi}{dt} = qu \cdot E, \quad (1)$$

其中, $u$ 为粒子速度, $P$ 为粒子动量, $\xi$ 为粒子能量。

假定SFC引出偏转板工作在沿竖直方向的1.5 T均匀磁场中,电极间隙为10.5 mm,电极间电压为70 kV(实际运行时,电极间隙为10.5 mm时的偏转板工作电压)。利用CST软件对偏转板放电过程中产生的带电粒子的运动(将粒子所处环境分为存在和不存在磁场两种情形)进行仿真,图3给出了场致发射电子和 $H^+$ 离子的运动轨迹(颜色越深,表示该处粒子能量越高)。可见,强磁场的存在极大地改变了电子的运动轨迹,但对 $H^+$ 离子的运动轨迹则无显著的影响。

计算表明:由于强电场的加速,即使场致发射电子的初始速度很低,它的最终速度也将达到相对论速度;电极间间隙和电压不变,磁场强度减为0.8 T时,电子的运动轨迹(图3(a))与磁场强度为1.5 T时的电子运动轨迹(图3(b))相比,无明显区别。求解运动方程(1)时须考虑电子的相对论效应。考虑两个简单情形<sup>[3]</sup>:仅存在均匀静电场时,电子沿电场方向持续加速,运动轨迹为悬链线;在 $E$ 和 $B$ 为相互垂直的均匀静电场且 $|E| < |cB|$ 时( $c$ 为光速),电子绕磁力线作螺旋线运动,同时伴随着一个垂直于 $E$ 和 $B$ 的匀速漂移。可见,利用CST软件模拟的电子的运动(见图3(a)和(b))符合理论分析。根据计算结果和式(1)可知,在SFC引出偏转板中,强磁场的存在对场致发射电子产生极强的聚焦作用,并使电子对称地集中轰击到上下盖板的一个很窄小的范围内(阴极场致发射面沿磁力线在盖板上的投影,

见图3(b))。

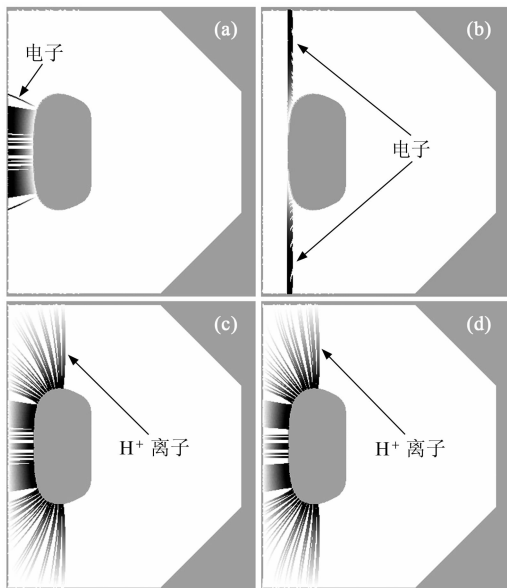


图3 场致发射电子和H<sup>+</sup>离子在不同电磁场环境下的运动轨迹

(a)电子在电场(无磁场)中的轨迹,(b)电子在电磁混合场中的轨迹,(c)H<sup>+</sup>离子在电场(无磁场)中的轨迹,(d)H<sup>+</sup>离子在电磁混合场中的轨迹。

计算表明:由于放电过程中产生的粒子的初始速度较低,H<sup>+</sup>离子的最终速度远小于光速;电极间隙和磁场不变,电极间电压减为40 kV时(此电压下,偏转板工作很稳定,暗电流基本为零),H<sup>+</sup>离子的运动轨迹与电极间电压为70 kV时的(见图3(d))相比,无明显区别。由于是静电场,将式(1)中的第二式对  $t$  积分,可得

$$\Delta\xi=qU, \tag{2}$$

其中, $U$ 为粒子始末位置的电位差。放电过程中产生的带电粒子(电子除外)的荷质比都小于H<sup>+</sup>离子的荷质比<sup>[2]</sup>,初始速度又都较低,因此它们的最终速度也都远小于光速。不考虑相对论效应,带电粒子的运动方程(1)可化为

$$\frac{du}{dt}=\frac{qB}{m}\left(\frac{E}{B}+u\times B_0\right), \quad \Delta\xi=qU \tag{3}$$

其中, $B_0$ 为 $B$ 的单位矢量, $m$ 为粒子的质量。因为放电过程中产生的带电粒子(电子除外)的荷质比都小于H<sup>+</sup>离子的荷质比,所以根据计算结果和式(3),可知在电极间电压大于40 kV时,强磁场对

除电子外的带电粒子运动轨迹的影响都很小(见图3(a)和图3(b))。

### 2.3 偏转板的放电过程

由对带电粒子运动的分析及相关的研究<sup>[4]</sup>可知,强磁场的存在对微放电和微粒迁移的直接影响很微弱,对场致发射过程的影响却很明显。如果SFC引出偏转板的使用环境中不存在磁场,场致发射电子被电场加速轰击到阳极上,阳极被电子轰击的地点将很分散,SFC引出偏转板的放电过程也将与一般偏转板的放电过程相同<sup>[1]</sup>。

实际上,由于SFC引出偏转板的使用环境中存在很强的磁场,阴极的场致发射电子将被集中轰击到上下盖板的一个很窄小的范围内。但盖板材料(钨)的熔点很高,放气率很低。在电极间电压较低时,电场较弱,场致发射电子很少。强磁场对电子的聚焦作用不仅对盖板的表面状态影响很小,还可抑制阴极与切割板间放电现象的发生。根据式(2)可知,单个电子的能量增长与磁场无关。但在电极间电压较高而使得场致发射电流密度较大时,电子的集中轰击将造成盖板因局部温升过高而熔化蒸发,这会使放电进一步加剧,并使盖板产生严重的损伤。这点可从实验中得到证实:对图2中的打火痕迹进行实际测量,发现其位置与理论计算所预测的位置完全吻合。

蒸发的盖板材料又可以以正电粒子团的形式被电场加速,并最终沉积到阴极和绝缘子的表面上。这可从下面的实验中得到证实:对使用过的阴极和绝缘子的表面污染物进行分析,发现大部分物质是盖板材料<sup>[5]</sup>。盖板材料沉积到绝缘子表面上,就形成一金属层,使绝缘子具有一定的导电能力,这不仅会限制电压的提高,而且绝缘子表面的电流会加热阴极。盖板材料沉积到阴极表面上,就可能形成一层致密的小突起,加剧场致发射,场致发射又反过来加热小突起,使小突起周围的盖板材料更易于聚合而形成较大的突起。但根据相关研究<sup>[5,6]</sup>可以看出,在盖板材料的表面张力系数大于阴极材料的表面张力系数时,蒸发的盖板材料才可能在阴极表面形成小突起;若盖板材料的表面张力系数小于阴极材料的表面张力系数,蒸发的盖板材料将比较均匀地分布到阴极表面上。

因此,电极间电压较高时,阴极的场致发射就

会在各种因素的作用下得到加强,暗电流也上升较快。如果电极间电压再升高,场致发射和盖板材料的蒸发等过程就会形成恶性循环,并在阴极和盖板之间发生沿磁力线的强烈放电。

### 3 SFC引出偏转板的优化

SFC引出偏转板的放电机理表明,抑制阴极的场致发射和盖板材料的熔化蒸发是提高偏转板耐压性能的两个关键方面。当然,SFC引出偏转板的其它部分(如绝缘子)对偏转板的耐压性能也起着重要的作用。

#### 3.1 电场的优化设计

要抑制阴极表面的场致发射,首先要对电极的几何形状进行优化。电极几何形状的优化需满足以下条件<sup>[7]</sup>:(1)在束流的有效通道内,电场分布符合物理设计要求;(2)降低阴极表面的局部电场集中现象,以防止局部击穿的发生。计算表明,阴极边缘是偏转板内电场最为集中的部位(图4给出了阴极横截面的电场分布云图,颜色越深,电场越强)。SFC引出偏转板的实际使用也表明,在阴极的边缘以及直线型偏转板与双曲线型偏转板的结合处,打火比较严重。因此,进一步通过三维电磁场计算对电极形状进行优化十分必要。

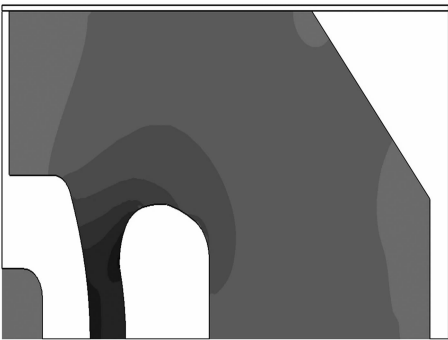


图4 双曲线型偏转板横截面上的电场分布云图

#### 3.2 阴极的材料选择和表面处理

阴极材料的选择应该符合以下几个原则:(1)为抑制场致发射,阴极应选用逸出功较高的材料;(2)阴极的材料应具有硬度较大的特点,以获得较理想的电极表面状态<sup>[8]</sup>;(3)从传热方面考虑,应选择导热系数高的材料;(4)从结构设计的角度考虑,应选择比重小的材料,减小阴极的重量;(5)尽

量保证阴极材料的表面张力系数大于盖板材料的。

根据场致发射理论,要得到可观察的发射电流,阴极电场强度要达到 $10^7$  V/cm的数量级。但实际上在阴极电场强度远低于 $10^7$  V/cm时,便可以观察到电子流。这是因为理想的电极表面是不存在的,阴极表面的缺陷才是低场强下场致发射的主要原因。所以,对电极表面的处理非常关键。在偏转板使用前应对电极表面进行仔细的抛光和清洗,并对偏转板进行较长时间的高压锻炼。

既然阴极表面是场致发射的主要原因,我们就可对电极表层进行涂敷,以提高偏转板的耐压性能。当然涂敷层应具有以下特性:(1)能很好地附着在衬底上以防止脱落;(2)涂层材料的逸出功要高;(3)硬度高以免受损伤;(4)表面光洁度要好。CSR的偏转板采用了阳极化处理过的铝作为阴极的材料,运行状况很好。该阴极材料有如下优点<sup>[8]</sup>:(1)铝经阳极化后所得的氧化膜与金属晶体结合牢固,而且硬度高;(2)铝的比重小,可降低电极重量,减轻对支柱绝缘子的机械负荷;(3)铝的导热系数高,可降低电极的局部过热现象。

#### 3.3 盖板材料和结构的改进

盖板材料的选择应该符合以下几个原则:(1)盖板应选用熔点高的材料;(2)尽量保证盖板材料的表面张力系数小于阴极材料的表面张力系数;(3)从传热方面考虑,应选择导热系数和比热容较高的材料。

尽管盖板材料(钼)的熔点很高,但依然会在电子的集中轰击下产生局部损伤。钼的热导率和比热容很低,而盖板仅由一层厚1 mm的钼板组成,导热性能很差。若将盖板做成复合板(在较厚的铜板上沉积一层厚1 mm的钼),结合钼的高熔点和铜的高热导率这两个优点,则可减少盖板材料的蒸发量,从而有效地减弱阴极的场致发射。当然,盖板厚度的增加会使偏转板内部空间更为局促。但经过计算,若将上盖板由原来厚1 mm的钼板替换为厚10 mm的复合板,偏转板内的电场集中系数(电场最大值与电极间隙中平面上的平均电场的比值)仅增大了0.1%,这对于阴极场致发射的影响很微弱。

### 4 结论

综上所述,由于SFC静电偏转板工作在强磁场

环境中, 高压放电将以沿磁力线的上下方向打火为主。对上下盖板的打火部位进行仿真计算, 也发现其与盖板的实际打火部位符合得很好。对SFC引出偏转板放电机理的研究表明: 抑制阴极的场致发射和盖板材料的熔化蒸发是提高偏转板耐压性能的两个关键方面。因此, 对高压阴极的优化处理和对上下盖板的改进就十分必要。实践表明, 阴极采用铝材并对表面进行阳极化处理后, 其耐压性能可大大提高。

当然, SFC引出偏转板的其它部分(如绝缘子)对偏转板的耐压性能也起着重要的作用, 这就需要在以后的实践中进一步对该偏转板加以改进。

### 参考文献 (References):

- [1] Diamond W T. *J Vac Sci Technol*, 1998, A16(2): 707.
- [2] Latham R V. *High Voltage Vacuum Insulation—Basic Concepts and Technological Practice*. London: Academic Press, 1995, 1—295.
- [3] Jackson J D. *Classical Electrodynamics*. Beijing: People's Education Press, 1980, 125—140(in Chinese).  
(杰克逊 J D. 经典电动力学. 北京: 人民教育出版社, 1980, 125—140.)
- [4] Diamond W T. *High Voltage Vacuum Insulation in Crossed Magnetic and Electric Fields*. Proceedings of the Particle Accelerator Conference. Washington: IEEE, 1993, 1 381.
- [5] Re M, Cuttone G, Zappalà E, *et al.* Breakdown Mechanism on Electrostatic Deflectors. Proceedings of the 16th International Conference on Cyclotrons and their Applications. East Lansing: American Institute of Physics, 2001, 151.
- [6] Li H G. *Metallurgy Theory*. Beijing: Science Press, 2005, 94—102(in Chinese).  
(李洪桂. 冶金原理. 北京: 科学出版社, 2005, 94—102.)
- [7] Wu J, Man K D, Yang Y Q, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(9): 1 219(in Chinese).  
(伍 静, 满开第, 杨雅清等. 强激光与粒子束, 2004, 16(9): 1 219.)
- [8] Reynolds Metals Co. *Aluminium Surface Disposal Handbook*. Changsha: Central South University Press, 1988, 87—155(in Chinese).  
(雷诺金属公司. 铝表面处理手册. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988, 87—155.)

## Study on Breakdown of SFC Extraction Deflector<sup>\*</sup>

LI Zhao-long<sup>1, 2</sup>, MAN Kai-di<sup>1, #</sup>, GUO Qiu-xian<sup>1</sup>, YANG Ya-qing<sup>1</sup>

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Due to the special working conditions of the SFC extraction deflector, the breakdown of the deflector is a serious problem. Based on the electromagnetic field calculations and the analysis of electrons and ions in the field, the breakdown mechanism was investigated. The calculated results about the electron hitting spots on the liners are consistent with the observed ones in the operation. At last, an improvement method of the deflector is suggested by using aluminum cathode and combined liners.

**Key words:** accelerator; beam extraction; deflector; vacuum insulation

\* Received date: 29 Feb. 2008; Revised date: 4 Jun. 2008

\* Foundation item: Cooling Storage Ring of National Key Science Engineering Project(CSR191)

# Corresponding author: Man Kai-di, E-mail: mankd@impcas.ac.cn