

# SSRF 储存环注入薄切割磁铁 样机的设计和研制

康文<sup>1</sup> 丁小平<sup>2</sup> 韩谦<sup>1</sup> 庞家标<sup>1</sup> 陈森玉<sup>1</sup>

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2 (南京大学物理系 南京 210093)

**摘要** 基于上海同步辐射装置(SSRF)储存环注入系统的需要,在国内首次研制成功了一台涡流板型切割磁铁,其性能指标均达到设计要求,特别是漏场指标,达到了国际同类磁铁的先进水平. 本文对切割磁铁设计和研制的关键技术进行了讨论,对切割磁铁的性能进行了测试,在此基础上对这类切割磁铁的设计和研制提出具有建设性的建议.

**关键词** 涡流板型切割磁铁 漏场 主场

## 1 引言

上海同步辐射装置(简称 SSRF)是我国拟建的一台性能优异的第三代同步辐射光源,它由加速器、光束线和实验站三大部分组成,其中加速器是产生同步光的装置,它又由 300MeV 的直线加速器、3.5GeV 的增强器和储存环以及将它们连接在一起的低能束运线和高能束运线组成. 电子束从直线加速器到增强器,再从增强器到储存环,将分别由增强器的注入,增强器的引出和储存环的注入这三个系统来实现电子束在不同加速器的注入和引出. 涡流板型切割磁铁以其切割板可以作得很薄的特点,目前被世界各大实验室<sup>[1-4]</sup>广泛用作环形加速器注入引出系统的薄切割磁铁. 本文将对 SSRF 储存环注入涡流板型薄切割磁铁样机的物理设计、结构和工艺设计以及性能测试进行研究和讨论,并在此基础上对这类切割磁铁的设计和研制提出具有建设性的建议.

## 2 涡流板型切割磁铁的物理设计

### 2.1 设计要求

表 1 是 SSRF 储存环注入涡流板型切割磁铁的设计要求,其中磁铁孔径是指水平宽度

和垂直高度的乘积.

表 1 SSRF 储存环注入涡流板型切割磁铁设计要求

偏转量	31mrad	孔径 ( $H \times V$ )	$26 \times 15\text{mm}^2$
有效长度	0.6m	切割板厚度	2.5mm(出口)
主场幅度稳定度	$\pm 0.2\%$	主场均匀性	$\pm 1\%$
漏场 ( $\Delta B/B$ )	0.2%	脉冲波形	半正弦波
脉冲底宽	60 $\mu\text{s}$	重复频率	1Hz

## 2.2 理论分析

通过一定的合理假设和近似<sup>[5]</sup>, 可以将涡流板型切割磁铁的三维问题简化为一维问题, 然后利用 Maxwell 方程组可以求出切割板外表面处漏场随时间变化的近似关系式,

$$B(d, t)/B_0 \approx \frac{2\tau}{\lambda_c \sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} e\left(-\frac{d^2\sigma\mu_0}{4t}\right),$$

如果令  $\partial B(d, t)/\partial t = 0$ , 当  $t_m = \frac{1}{2} d^2 \sigma \mu_0$  时, 漏场的最大值为  $B_m(d)/B_0 \approx \frac{2\sqrt{2}\tau}{\sqrt{\pi e \lambda_c d \sigma \mu_0}}$ .

由此我们可以看出漏场的最大值与脉冲宽度  $\tau$  成正比, 与切割板的厚度  $d$  成反比, 与切割板材料的电导率  $\sigma$  成反比. 因此在设计涡流板型切割磁铁时, 首先应考虑从这几方面降低漏场:

- 1) 选择底宽比较窄的脉冲电流励磁, SSRF 涡流板型切割磁铁选用 60 $\mu\text{s}$  底宽的半正弦波脉冲电流励磁实际上就考虑到了这一点;
- 2) 切割板选用高电导率的材料加工制作, 涡流板型切割磁铁的切割板材料一般都选用无氧铜;
- 3) 合理地设计切割板的形状和结构, 从而使其平均厚度达到最大. 我们将切割板紧贴铁芯的面沿注入束流运动方向设计成弧形面, 这样可以在确保注入点处切割板厚度不超过设计要求的前提下, 使切割板的平均厚度达到 4.5mm.

## 2.3 OPERA 程序模拟

OPERA-2D 程序模拟计算的结果表明<sup>[5]</sup>, 采用有效的磁屏蔽措施, 可以将任何时刻、任何位置的漏场降低到 0.2% 以下. 对于储存环注入薄切割磁铁的磁屏蔽, 通常的做法是在切割板与储存环真空管之间夹上一层高导磁材料, 显然这种做法会增大切割板的总厚度. SSRF 储存环靠近切割磁铁的真空管拟采用导磁材料制作, 这样可以使磁屏蔽与真空管合二为一, 节省切割板厚度, 铜切割板和真空管壁在注入点处的厚度分配为 1.4mm 和 0.9mm. 用 OPERA-2D 对这种磁屏蔽方法进行了模拟, 凸轨处漏场最大值为主场峰值的 0.048%, 远小于设计要求的 0.2%. 为了计算切割磁铁的磁有效长度, 我们用 OPERA-3D 程序对磁铁进行了模拟分析, 由切割磁铁纵向磁场的线积分可以得到磁铁的有效长度为 0.617m.

### 3 涡流板型切割磁铁的结构工艺设计

SSRF 储存环注入薄切割磁铁研制的关键和技术难点是:

1. 如何在注入点切割板总厚度不超过 2.5mm 的前提下,将漏场降低到 0.2% 以下;  
2. 涡流板型切割磁铁是利用快脉冲磁场在切割板内产生的涡流效应来屏蔽漏场,然而快脉冲磁场在铁芯内的涡流效应又会引起严重的铁芯损耗,因此如何降低铁芯损耗也是研制磁铁所需解决的关键问题;

3. 同样由于涡流效应,快脉冲磁场不能穿过金属真空盒壁,因此间隙内不能放置真空盒,注入束流将直接从磁铁孔径中通过. 这就意味着铁芯、线圈及其绝缘材料都将处于高真空环境中,同时也意味着它们将有可能直接面对注入电子束的轰击,由此会产生一系列的与真空和辐射问题相关的技术难点.

为解决这些问题,我们对国内外的相关技术进行了调研和学习,找到了比较满意的解决方法:

(1) 首先在武钢定做了 0.15mm 厚的无取向硅钢片 WTG150,并在切割磁铁的工作状态 8000Hz,0.8T 下,对材料的性能进行了测试,能够满足切割磁铁的要求;

(2) 硅钢片绝缘漆膜用 C-5 半有机绝缘材料,它的特点是真空出气率低,具有良好的绝缘性能和比较好的抗辐射性能. 然而 C-5 涂层工艺很特殊,需要由专门的涂层机器来进行,而且 C-5 涂料国内没有厂家生产,需要从国外购买. 由于受到条件的限制,我们只好用手工的办法完成了硅钢片的涂层;

(3) 线圈绝缘材料选用聚酰亚胺薄膜(Kapton)和环氧玻璃丝带,这两种材料,特别是 Kapton,具有良好的绝缘性能、抗辐射性能、耐磨性能、吸湿性以及较低真空出气特性;

(4) 切割板的热负荷主要来自涡流加热、同步光辐射以及注入束流的轰击;分析的结果说明<sup>1)</sup>,每一项的加热功率都不高,另外切割板也暴露在空气中,有很好的散热性能,因此切割板不需要采取强制冷却措施;

(5) 切割板在焊接时应考虑到脉冲磁场对它的冲击作用,因此切割板与上下盖板之间先用插销将它们固紧,然后再进行焊接. 切割板与上下左右盖板用电子束焊接,由于电子束焊接能量集中,焊缝深宽比大,焊件变形小,非常适合于切割板 1.4mm 厚的薄端与右盖板的焊接;

(6) 水、电进出真空的穿墙件采用陶瓷密封件结构,它是切割磁铁的一个关键部件,

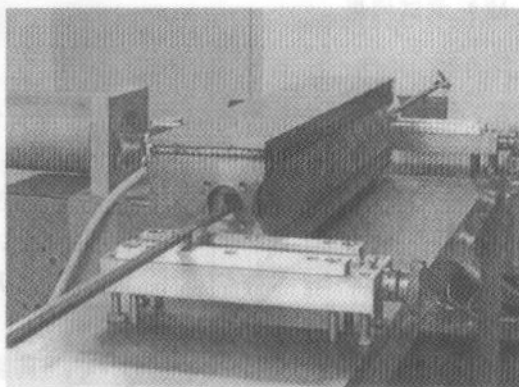


图1 切割磁铁样机

1) 康文, 博士毕业论文, 中国科学院高能物理研究所

线圈引出磁铁时的绝缘和真空密封都由它来实现. 图 1 是 SSRF 储存环注入涡流板型切割磁铁的实物图.

## 4 性能测试结果

### 4.1 真空性能测试结果

表 2 是切割磁铁真空测试结果, 经过三次反复烘烤后, 切割磁铁入口处的真空度达到了  $6.80 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ , 基本满足了设计要求.

表 2 SSRF 储存环注入涡流板型切割磁铁真空测试结果

时间	第一次烘烤后	第二次烘烤后	第三次烘烤后
3h			$6.70 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
5h	$7.79 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	$1.70 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	
6h	$6.89 \times 10^{-3} \text{ Pa}$		
8h		$1.00 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	$2.10 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
10h		$8.01 \times 10^{-4} \text{ Pa}$	
14h		$6.00 \times 10^{-4} \text{ Pa}$	$1.50 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
25h	$1.70 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	$4.80 \times 10^{-4} \text{ Pa}$	$1.20 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
49h	$7.79 \times 10^{-4} \text{ Pa}$		
55h			$9.11 \times 10^{-5} \text{ Pa}$
79h			$6.80 \times 10^{-4} \text{ Pa}$

### 4.2 磁性测试结果

#### a) 间隙主磁场

图 2 是主场波形和电流波形, 它们在相位变化上保持同步, 底宽都是  $60.27 \mu\text{s}$ .

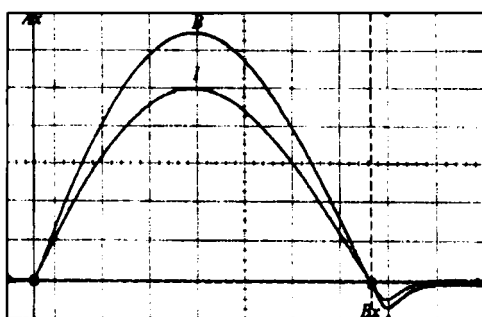


图 2 主场和电流波形

电流幅度从  $4000 \text{ A}$  逐渐增大到  $8500 \text{ A}$  的过程中, 磁铁的励磁效率始终在  $97\%$  以上, 磁铁的实际工作点在  $0.6028 \text{ T}$ , 其线性动态调节范围在  $\pm 0.1 \text{ T}$  以上.

图 3 是磁铁间隙内主场的横向分布, 在离切割板  $3.5 \text{ mm}$  到  $18.5 \text{ mm}$  的范围内主场的均匀性为  $\pm 0.49\%$ . 图 4 是主磁场的纵向分布曲线, 对曲线积分后再除以曲线的平顶值, 即可得磁铁的有效长度为  $615 \text{ mm}$ , OPERA-3D 程序模拟计算的结果是  $617 \text{ mm}$ ,

两者非常接近. 在磁铁端部, 主场迅速下降, 并且波形也发生畸变, 逐渐偏离半正弦波. 主场幅度在 30 分钟内的稳定性小于  $\pm 0.15\%$ .

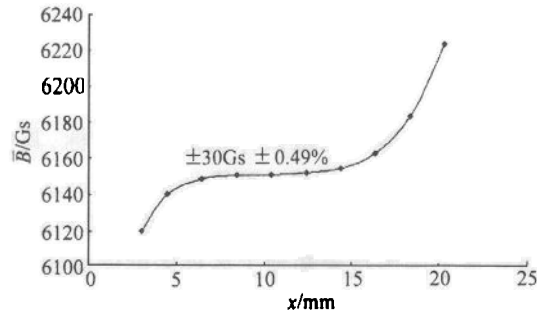


图 3 主场的横向分布

$I = 7572\text{A}, h = 15.0\text{mm}$

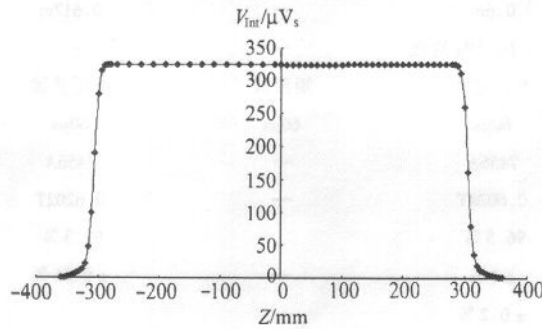


图 4 主场的纵向分布

$I = 7532\text{A}, \text{short coil}; A = 7.465 \times 10^{-4} \text{m}^2, n = 7.$

b) 漏场测量

图 5 的曲线分别是距离切割板 2.5mm 处, 5mm 处和 8mm 处的漏场波形, 漏场最大值分别是主场幅值的 1.44%, 0.85% 和 0.58% .

图 6 的两条曲线分别是没有磁屏蔽和有磁屏蔽时漏场的横向分布曲线. 漏场经过磁屏蔽后大大地降低, 在凸轨处 (距离切割板 7mm 处) 其最大值是主场幅值的 0.011%, 远远小于设计要求的 0.2% .

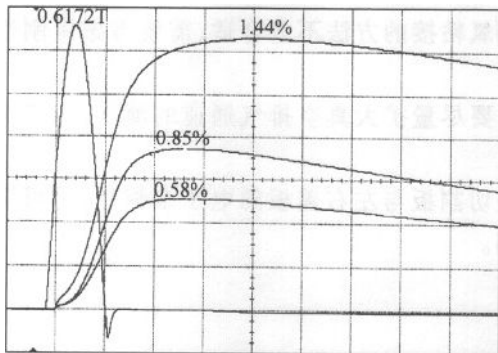


图 5 主场和漏场波形

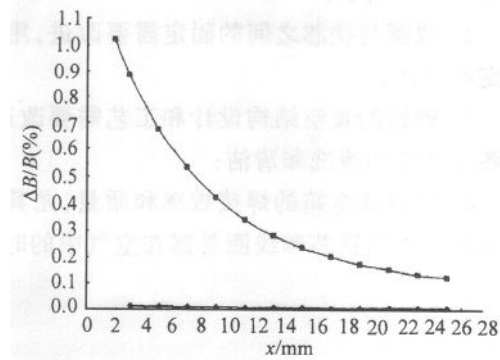


图 6 漏场的横向分布曲线

◆有磁屏蔽管, ■没有磁屏蔽管.

## 5 结论

表 3 综合了 SSRF 储存环注入薄切割磁铁样机的所有指标,其中包括设计要求、理论分析结果、OPERA 程序模拟结果和测量结果.可见切割磁铁的所有指标都达到了设计要求,特别是漏场指标已达到世界上同类磁铁的水平,这说明切割磁铁样机的设计和研制是比较成功的,同时也表明立足于国内技术和加工条件能够完成这类磁铁的研制.另外,实验结果也验证了理论分析和计算机模拟的正确性和可靠性.

表 3 SSRF 储存环注入薄切割磁铁指标

	设计要求	理论分析	OPERA 模拟	测量结果
磁有效长度	0.6m	—	0.617m	0.615m
磁铁真空度	$1.33 \times 10^{-5}$ Pa 量级	—	—	$6.80 \times 10^{-5}$ Pa
电流波形	半正弦波	矩形波	半正弦波	准半正弦波
脉冲宽度	60 $\mu$ s	60 $\mu$ s	60 $\mu$ s	60.27 $\mu$ s
电流幅值	7456A	—	7456A	7572A
主场强度	0.6028T	—	0.6202T	0.6172T
励磁效率	96.5%	—	99.3%	97.3%
主场均匀性	$\pm 1\%$	—	$\pm 0.65\%$	$\pm 0.49\%$
主场稳定性	$\pm 0.2\%$	—	—	$\pm 0.15\%$
切割板厚度 (有屏蔽)	2.5mm(出口) 11.8mm(入口)	—	5.4(平均)	2.3mm(出口) 11.6mm(入口)
无磁屏蔽漏场 (2.5mm)	—	2.15%	0.65%	1.44%
有磁屏蔽漏场 (凸轨处)	0.2%	—	0.048%	0.011%

不过需要指出的是,如果以后再研制这类切割磁铁,建议做以下几个方面的改进:

1. 切割磁铁电源的脉冲电流波形由半正弦波改为全正弦波,这样可以使切割磁铁漏场尽快衰减到零;
2. 线圈与铁芯之间的固定需要改进,用环氧粘接的方法不太合适,需要考虑用刚性固定的方法;
3. 磁铁的真空结构设计和工艺需要改进,要尽量扩大真空排气通道的流导,注意磁铁各个部件的清洗和清洁;
4. 提高真空箱的焊接效率和质量,尤其是切割板与左右盖板的电子束焊接,尽可能多地缩短磁铁铁芯和线圈暴露在空气中的时间。

### 参考文献 (References)

- 1 Lopez F, Mills F, Milton S et al. The APS Thin Pulsed Septum Magnets. 1994, Proc. 4th EPAC:2406—2408
- 2 Rohner F. Magnetic Calculation on the Eddy Current Septum Magnet for the ESRF. 1990, ESRF Internal Note AT/MA/90 - 08
- 3 Kumagai K, Matsui S. IEEE Trans. Magn., 1994, 30(4):2134—2137
- 4 Fabris R, Favari A, Tommasini D. A High Current Passive Septum Magnet for Elettra. 1992, Proc. 2nd EPAC:1460—1462
- 5 KANG Wen, DING Xiao-Ping, HAN Qian et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, 25(3):264—270 (in Chinese)  
(康文, 丁小平, 韩谦等. 高能物理与核物理, 2001, 25(3):264—270)

## Design and Construction of a Thin Septum Magnet Prototype for Injection of SSRF Storage Ring

KANG Wen<sup>1</sup> DING Xiao-Ping<sup>2</sup> HAN Qian<sup>1</sup> PANG Jia-Biao<sup>1</sup> CHEN Sen-Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

<sup>2</sup> (Physics Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract** According to the storage ring injection requirements of Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF), an eddy current septum magnet prototype has been firstly constructed in China. All measured specifications of the magnet are very well satisfied with the requirements of the storage ring injection. In this article, some key issues of the design and construction of the septum magnet are discussed, the measured performances of the septum magnet are given and some constructive suggestions to improve the performance of the septum are proposed.

**Key words** eddy-current septum magnet, stray field, main field