

文章编号: 1001—4322(2001)03—0277—05

# 上海同步辐射装置储存环注入冲击磁铁的设计

丁小平<sup>1</sup>, 康文<sup>2</sup>, 韩谦<sup>2</sup>

(1. 南京大学 物理系, 江苏 南京 210093; 2 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100039)

**摘 要:** 开展了上海同步辐射装置储存环注入冲击磁铁的结构和脉冲电源的技术设计, 并进行了磁场分布和励磁电流波形的模拟计算, 还给出了陶瓷真空盒镀膜的设计参数, 提出了计算陶瓷真空盒镀膜接受同步光功率的公式, 研究了防止镀膜和波纹管受到同步光照射的机械布局设计。

**关键词:** 同步辐射装置; 储存环; 冲击磁铁; 陶瓷真空盒

**中图分类号:** TL 503.8 **文献标识码:** A

上海同步辐射装置<sup>[1]</sup>(简称 SSRF)是一台电子能量为 3.5 GeV 的第三代同步光源。它由注入器(包括 300 MeV 电子直线加速器, 重复频率 1 Hz 和能量为 3.5 GeV 增强器及相应低能、高能束流输运线)、储存环和同步辐射实验装置等三大部分组成。SSRF 的核心是储存环的设计, 它是决定光源性能的主要因素。

SSRF 储存环采用如图 1 所示的全能量的水平相空间注入和累积方案<sup>[2]</sup>。电子束从增强器引出后, 经高能束流输运线从内侧注入到储存环中。然后经 S3, S2 和 S1 三块切割磁铁偏转成与储存环平衡轨道平行的方向。另有对称放置的四块冲击磁铁 K2B, K1B, K1A 和 K2A, 在注入区造成局部闭轨凸起, 使注入束俘获在储存环的接收度相椭圆中。

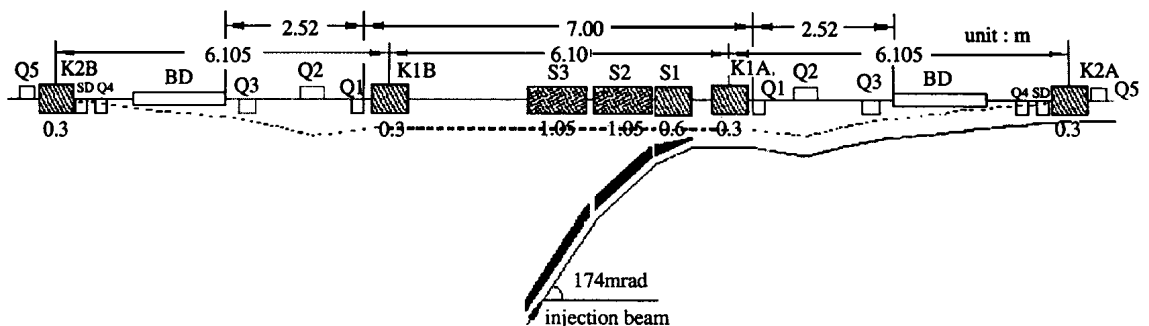


Fig 1 Injection scheme of storage ring

图 1 储存环注入方案

冲击磁铁设计有两个前提条件: 第一个是束流阻抗要小(这是储存环发射度所必须的)。为此, 将选用国际上比较成功、且普遍采用的陶瓷真空盒+ 铁氧体铁芯的方案, 但技术难度较大: 本身是高压、大电流和快脉冲装置; 国内无现成的高性能 NiZn 铁氧体铁芯材料; 跑道形截面镀膜陶瓷真空盒的制造, 国内无经验可寻, 而国外也因不同的机器而异, 真空盒设计及镀膜方式各不相同; 在安装空间有限的情况下, 真空盒的镀膜和与之相连的波纹管需要采用防同步光的设计。第二个前提条件是要求四块冲击磁铁单独供电, 为实现非对称凸轨的注入方案提供可能。脉冲磁场波形为底宽 4 μs 的半正弦波, 对电源的制作与成本有利, 对将脉冲磁铁磁场的频率与采用的结构频率拉开, 使陶瓷真空盒的镀膜厚度适当加大也有利。然而, 对磁间隙内磁场波形的幅度重复稳定性和时间的稳定性要求十分严格, 以保证粒子受到偏转量的误差小于 3%。根据对注入过程进行的粒子动力学计算, 多圈跟踪及误差分析的结果, 冲击磁铁的

收稿日期: 2001-01-08; 修订日期: 2001-03-30

基金项目: 国家大科学工程资助课题

作者简介: 丁小平(1965-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事加速器物理及应用研究。

磁场均匀性要求为  $\pm 0.5\%$ , 励磁电流幅度长期重复稳定度为  $\pm 1\%$ , 触发漂移的时间稳定性为  $\pm 10\text{ns}$ <sup>[2]</sup>。本文主要论述冲击磁铁的物理研究及设计, 重点是铁芯材料选取与结构研究, 陶瓷真空盒的镀膜计算和防同步光的结构设计等。

## 1 冲击磁铁的铁氧体-陶瓷真空盒结构、材料和工艺设计<sup>[2]</sup>

### 1.1 陶瓷真空盒内表面的金属镀膜设计

冲击磁铁的核心问题是内表面金属镀层的陶瓷真空盒的制备。金属镀层的主要作用是减少束流的纵向阻抗。镀层厚度选取除了必须考虑镀层对脉冲磁场的影响和对束流的电磁场屏蔽外, 还必须考虑在镀层中因镜像电流的欧姆热损耗和因脉冲磁场感应的涡流热损耗所产生的总热量, 该热量与电阻率有关, 因而要选取合适的金属材料。金属镀层处于强电磁场和高密度电流的情况下, 还必须保证均匀、一致与整体性, 否则会出现打火、跳弧现象以至被损坏。计算涡流平均热损耗  $P_e$ 、镜像电流的欧姆热损耗  $P_i$ 、穿透时间常数  $\tau_{tr}$ 、快脉冲场畸变和陶瓷真空盒内外管壁的平均温差  $\Delta T$  的公式<sup>[3-5]</sup>如下

$$P_e = f_r \int_0^\tau P(t) dt = \frac{2f_r}{R_{sq}\tau} (\tau B_0)^2 \left[ \frac{w^3}{3} + r(2wr + \frac{\pi w^2}{2} + \frac{\pi r^2}{4}) \right] \quad (1)$$

$$P_i = 449 \frac{I_0^2 C_R l}{b \sigma_z N_b} R_{sq} \quad (2)$$

$$\tau_{tr} = 2\mu_0 w / R_{sq} \pi \quad (3)$$

$$\frac{B_i(f)}{B_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \sin(\omega t - \phi); \quad \phi = \arctan(\omega \tau) \quad (4)$$

$$\Delta T = P_{itc} / K \quad (5)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率。  $l$ 、 $r$  和  $w$  分别为陶瓷真空盒的长度、半高度和半宽度。  $\tau$  为半正弦波的脉冲底宽,  $B_0$  为半正弦波的最大脉冲幅度。  $f_r$  为磁场的脉冲重复率。  $R_{sq}$  为镀膜材料的表面电阻。  $N_b$  为谐波数,  $C_R$  为环周长。  $I_0$  为储存环的束流平均流强。  $\sigma_z$  为束团的自然长度。  $P_i$  为欧姆热损耗与涡流热平均损耗之和。  $K$  为陶瓷的热导率, 在 25 时, 它等于  $0.2\text{W}/(\text{cm}/^\circ\text{C})$ 。  $t_c$  为陶瓷真空盒的壁厚(取 5mm)。

表 1 给出了 SSRF 储存环注入冲击磁铁陶瓷真空盒的设计参数。其中,  $d_{Ti}$  和  $d_{TiN}$  分别是镀膜材料为钛和氮化钛时的镀膜厚度。表中参数表明, 表面电阻率在  $0.2 \sim 0.4\Omega$  范围内, 都是可以接受的。陶瓷真空盒的镀膜与焊接等制作在国内报价甚高, 可考虑委托国外加工。

表 1 陶瓷真空盒镀膜设计

Table 1 Design for the metallic coating of ceramic chamber

$R_{sq}/\Omega$	$d_{Ti}/\mu\text{m}$	$d_{TiN}/\mu\text{m}$	$P_i/\text{W}$	$P_e/\text{W}$	$\tau_{tr}/\text{ns}$	$1/\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}$	$\phi/(\circ)$	$\Delta T/$
0.2	2.15	1.25	5.09	3.76	120	0.9956	5.38	2.58
0.3	1.43	0.83	7.63	2.51	80	0.9980	4.04	2.96
0.4	1.07	0.63	10.17	1.30	60	0.9989	2.70	3.35

### 1.2 储存环注入冲击磁铁陶瓷真空盒的同步辐射屏蔽设计

如图 2 所示, 设长度为  $l$  和宽度为  $w$  的冲击磁铁的陶瓷真空盒离开其上游弯转半径为  $\rho$  的二极磁铁的距离为  $d$ , 当未采取防同步光的设计时, 陶瓷真空盒的内层镀膜会受到同步光的直接照射, 其照射张角为  $(\theta - \theta_0)$ 。因为  $\theta$  和  $\theta_0$  很小, 根据几何关系, 可以推导出

$$(\theta + \frac{d+l}{\rho})^2 = \frac{w}{\rho} + (\frac{d+l}{\rho})^2 \quad (6)$$

$$(\theta + \frac{d}{\rho})^2 = \frac{w}{\rho} + (\frac{d}{\rho})^2 \quad (7)$$

于是, 陶瓷真空盒内层镀膜接受的同步光功率为

$$P[\text{W}] = \frac{1.41 \times 10^4 (E[\text{GeV}])^4}{\rho[\text{m}]} I[\text{A}] (\theta - \theta_0) \quad (8)$$

式中,  $E$  和  $I$  分别为同步辐射光源储存环的电子能量和束流流强。

四块冲击磁铁中的 K2A 离其上游弯转磁铁最近(距离仅为 1.23m), 在不安装光子吸收器的情况下, 其陶瓷真空盒镀膜接受的同步光最大, 热负荷约为 232W。因为同步辐射呈一个很窄的张角为 0.146mrad 的锥状, 从而镀膜表面的同步光功率密度约为 1.45W/mm<sup>2</sup>。在无冷却情况下, 这个长期的热负荷显然会造成镀膜的发热、变形和损坏等, 因而必须采取措施, 确保同步光打不到镀膜上。图 3 中给出了陶瓷真空盒镀膜在考虑同步辐射屏蔽设计时的真空管道布局方案, 主要办法是加大陶瓷真空盒接受同步光一侧的水平孔径(增加 20mm)和使用偏心法兰结构, 为同步光挡块的布局和设计提供了有利条件。

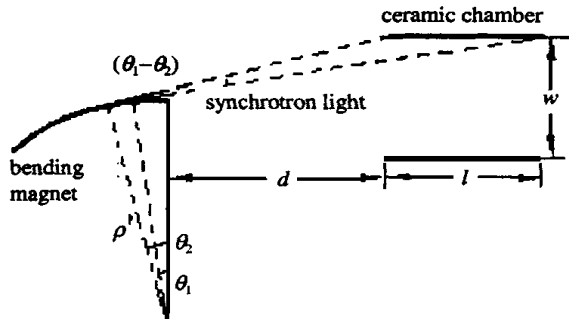


Fig 2 The synchrotron radiation on metallic coating of ceramic chamber  
图 2 接受同步光的陶瓷真空盒镀膜

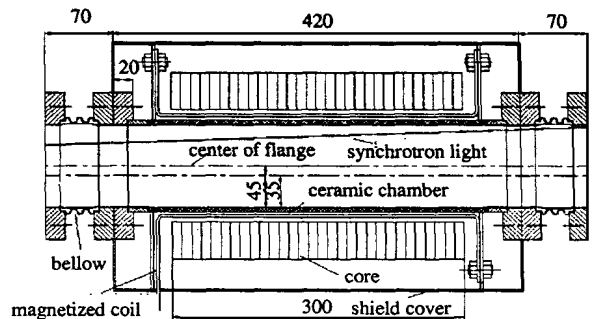


Fig 3 Layout of ceramic chamber with synchrotron radiation shield

图 3 陶瓷真空盒镀膜在同步辐射屏蔽设计时的真空管道布局

### 1.3 冲击磁铁的技术参数和基本结构

经优化设计确定冲击磁铁技术参数如表 2 所示。冲击磁铁的基本结构形态如图 4 所示。

表 2 冲击磁铁主要技术参数

Table 2 Main specification of kicker magnets

parameter	value
deflection angle/mrad	2.9
magnet length/m	0.3
magnetic field/T	0.14
aperture of ceramic chamber/mm <sup>2</sup>	90 × 30
wall thickness of ceramic chamber/mm	5
magnetic aperture/mm <sup>2</sup>	122 × 44
width of ferrite core/mm	40
contour size of magnet core/mm <sup>2</sup>	202 × 124

### 1.4 铁氧体铁芯设计

储存环注入冲击磁铁的铁芯采用 NiZn 软磁铁氧体, 目的是使其也能用于工作频率要求较高(脉冲磁场的高频部分~20MHz)的增强器注入和引出的冲击磁铁。在电磁性能上, 铁氧体应具有极好的高频特性, 磁响应要快, 起始磁导率要高, 饱和磁感应强度要大, 矫顽力、剩磁和损耗要低, 电阻率、致密度和居里温度要高等。参照国外冲击磁铁普遍应用的 Philips 公司生产的 8C11 型和 Ceramic Magnetics 公司生产的 CMD5005 型 NiZn 铁氧体性能, 我们已在国内研制出主要电磁性能参数如表 3 所示的 NiZn 铁氧体材料。

铁氧体铁芯采取积木组合式拼装, 在束流的穿越方向, 为防止结构共振和减少涡流损耗, 铁芯采用 12 层厚度各为 25mm 的叠片加以叠装, 每层由两个“C”形整体块对合而成, 对合处用 2mm 厚的铜板隔

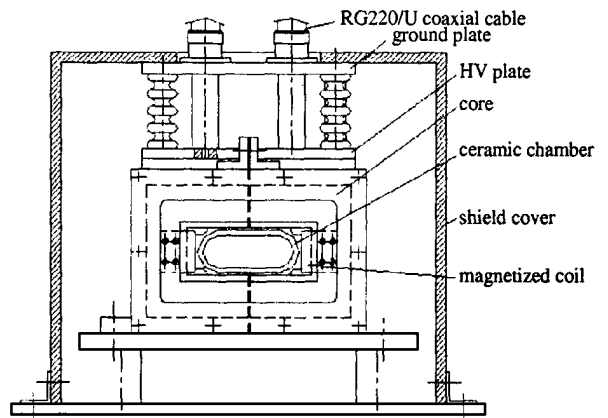


Fig 4 Structure of kicker magnets

图 4 冲击磁铁结构图

开,以减小纵向束流阻抗。为便于真空盒的安装,铁芯要从铜隔板处向左右可分开拆卸,且重复安装精度要高。为此,先将左右各 15 个“C”形叠片分别组装和固定到由绝缘材料聚碳酸酯制成的“C”槽箱块内,然后再在同一块用聚碳酸酯制成的大底板上将两个“C”槽箱块对合,并在箱块顶部将两箱锁紧即可。为保证叠装精度,叠片要求平整,无浪皱和漂曲,表面光滑,无裂纹、凸包、砂眼、孔洞或翘角等缺陷。每个拼装的铁氧体块要通过精磨,以确保表面粗糙度、平直度、垂直度、厚度和宽度等公差要求。

表 3 Ni-Zn 软磁铁氧体的电磁性能参数

Table 3 Technical specification of Ni-Zn ferrite

parameter	value	
initial permeability	$1000 \pm 20\%$	(25 ; 10kHz; 0.1mT)
maximum flux density/mT	$> 280$	(250C; 10kHz; 250A/m)
coercive force/A/m	20	
remnant flux density/mT	$< 150$	(25 ; 10kHz; 250A/m)
resistivity/( $\Omega \cdot m$ )	$\sim 1 \times 10^5$	(DC; 25 )
curie temperature/	120	
loss factor( $\tan \delta/\mu_i$ )	$\sim 0.01$	(10MHz)

## 1.5 励磁导体设计

冲击磁铁由靠近磁轭内孔表面的两侧无氧铜励磁导体板进行整体一匝供电。为安装瓷真空盒,在结构设计上,两侧励磁导体板在磁轭纵向的一端面将通过可拆卸的跨桥结构连到一起。在磁轭纵向的另一端面,两侧励磁导体将以可拆卸的结构,用向上的引线分别过渡连到位于箱块顶部的高压板与接地板上。高压板与接地板之间用 70mm 高的螺纹状聚碳酸酯件隔开。RG220/U 高压同轴电缆的内导体与外屏蔽层分别接到高压板与接地板上,以完成脉冲电源与铁的相互连接。励磁导体用聚碳酸酯绝缘组件与铁芯间绝缘开。

## 1.6 冲击磁铁的场分布计算

图 5 是在铁芯中间无铜隔板情况下用 OPERA 程序对冲击磁铁内磁间隙中间水平面的磁场分布进行计算的结果(中心在 119.5mm 处)。可见,水平面内中心两侧  $\pm 40\text{mm}$  的磁场分布  $\Delta B/B$  是 0.70%, 优于所要求的指标,但设计入瓷真空盒金属镀层对场分布的影响,尚有待在预研的实验中测量。

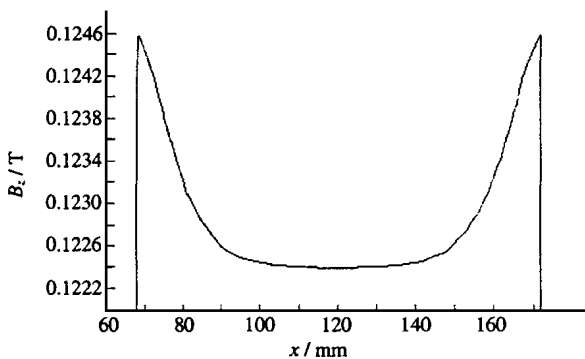


Fig 5 Flatness of magnet field in a horizontal and median plane

图 5 冲击磁铁中间水平面磁场分布

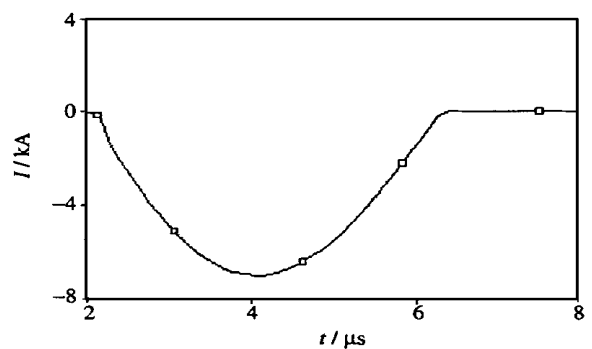


Fig 6 Waveform of magnetized current

图 6 励磁电流波形(PSpice 模拟结果)

## 2 冲击磁铁脉冲电源技术设计<sup>[2]</sup>

为产生励磁电流大于 4kA 和底宽  $4\mu\text{s}$  之半正弦波,冲击磁铁脉冲电源采用了 CX1154 型重氢闸流管开关的  $0.5\mu\text{F}$  串联电容谐振放电的办法。其中,置于隧道中的冲击磁铁等效为  $1.2\mu\text{H}$  和  $2\text{m}\Omega$  串联之负载,并与脉冲电源之间用 15m 长四根并联的大功率低阻抗高压射频电缆连接。充电电源与脉冲电源之间用电抗器 LB 和高反压二极管 DB 隔离,闸流管与储能电容器之间实现低漏感连接。为加速闸流管

的关断速度, 延长使用寿命, 在闸流管两端并上了RT和CT分别为540Ω与400pF的RC支路。为了消除叠加在半正弦励磁电流波形上的传输电缆寄生参数引起的高频振荡, 在传输线始端引入了滤波支路。LC振荡必将引起反向波, 这是绝对不允许的, 为此将采取两项措施, 一是当储能电容呈现反压时, 由其旁路的20μH回授电感器进行旁路回馈, 它不仅可以将回馈储能电容的能量, 而且可以减小反向电压。由于回馈缓慢, 不足以消除反向波, 因此必须同时采用电感变化范围从0.5μH到80μH的饱和电抗器, 以此来加速闸流管的关断和抑制反压。脉冲电源的P Spice程序模拟结果如图6所示。

### 3 结 论

依据本文的设计, 已经对SSRF储存环冲击磁铁进行了必要的预制研究, 获得了一些初步的结果, 证实了本设计的可行性。我们将另文报道具体的实验结果。

致 谢 对北京大学的陈佳洱教授、方家驹教授, 国家上海同步辐射中心的陈森玉研究员对本项工作的支持表示感谢。

### 参考文献:

- [1] Chen S Y, et al. Shanghai synchrotron radiation facility[A]. *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference*[C], New York, 1999.
- [2] 丁小平. 上海同步辐射装置的冲击磁铁设计研究[R]. 北京大学博士后研究报告, 北京: 2000.  
[Ding X P. Design and study of kicker magnets for the storage ring injection of Shanghai synchrotron radiation facility. Postdoctoral Research Report of Peking University. Beijing: 2000](in Chinese)
- [3] Petersen J M. Requirements for resistive coating on ceramic tubes in kicker magnets[R]. Single Pass Collider Memo, CN-49, 4/81.
- [4] Milburn J, Shin N. Pohang light source[R]. Bump Magnet Ceramic Chamber Coating. Engineering Note N-011, PAL, 1993.
- [5] Chao A W, Tigner M. Handbook of accelerator physics and engineering[M]. World Scientific 1999. 396.

## Design of kicker magnets for the storage ring injection of Shanghai Synchrotron Radiation Facility

DING Xiaoping<sup>1</sup>, KANG Wen<sup>2</sup>, HAN Qian<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China;

2. Institute of High Energy Physics, Box 918, Beijing 100039, China)

**Abstract** Fast pulsed kicker magnets will be used to inject the full energy 3.5 GeV beam into the storage ring in Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). The kicker magnets in the storage ring are window frame type with a Ni-Zn ferrite core in air. The injection scheme is introduced in this thesis. The technical design of kicker hardware including magnets and pulse generators is presented and discussed. The basic requirement of a Ni-Zn ferrite core is given. The result of computer simulation for the pulse generators with PSpice program is shown. The OPERA-2D software is employed to compute the field flatness in the horizontal and median plane of the magnetic gap. As one of the critical parts of the design in the kicker magnets of storage ring, the formulae of synchrotron radiation inside a ceramic vacuum chamber are deduced, the choice for thickness of coating inside the ceramic vacuum chamber and the mechanical layout to avoid direct contact of coating with synchrotron radiation are also studied in detail.

**Key words:** synchrotron radiation facility; storage ring; kicker magnet; ceramic vacuum chamber