

文章编号 : 1001-4322(2004)03-0395-04

# 陶瓷真空室镀膜工艺改进及脉冲磁场时间特性测量\*

尚 雷, 王相纂, 蒋道满, 王 琳, 赵 枫, 冯光耀

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

**摘 要:** 介绍了合肥光源二期工程注入段陶瓷真空室的改进情况, 采用新的镀膜技术, 大大改善了脉冲磁场的延时特性, 减少了储存环注入时的轨道扰动, 提高了注入束流累积效率。改进了原来的点线圈磁场测量方法, 采用带有积分电路及抗干扰措施的双线圈测量装置测量了真空室内的脉冲磁场延时特性, 使脉冲磁场延时误差测量的分辨率达到 ns 量级, 给出了测量结果。

**关键词:** 陶瓷真空室; 镀膜; 脉冲磁场; 延时; 扰动; 注入效率

**中图分类号:** TL503.3      **文献标识码:** A

在合肥光源(HLS)二期工程新注入系统改造项目中,在国内率先使用了镀膜陶瓷真空室,其内壁镀膜采用了钼金属化法,无论材料与工艺在国际加速器注入系统陶瓷真空室中均未见使用过的报道<sup>[1]</sup>。经过一段时间的探索与研究,逐步改进了其内壁的成膜工艺,使膜的电阻及均匀性达到了物理设计的严格要求。尤其对脉冲磁场的延时特性有了大幅度的改善,同时保持了良好的真空特性。改进后的陶瓷真空室安装到位后,提高了储存环注入束流累积速率。

## 1 陶瓷真空室镀膜工艺的改进

### 1.1 概述

在注入系统铁氧体冲击磁铁内使用了内壁镀膜的陶瓷真空室,目的是使脉冲磁场能够穿透真空室壁,避免使用金属管道时对磁场波形造成的衰减与畸变,同时陶瓷内壁的金属薄膜能够提供壁电流的通路,减少束流耦合阻抗。根据加速器不同的物理设计要求、不同的技术手段及具体的应用场合,使用不同的镀膜工艺与材料,有采用蒸发、溅射镀膜工艺的,也有采用化学气相沉积技术(CVD)的。表 1 列举了国际上几台高能加速器注入系统陶瓷真空室采用的镀膜方法。其中大多数采用溅射镀 Ti 或 TiN 膜,溅射膜的质量较高、附着力强、真空特性好。使用这种方法要先完成陶瓷管道与两端金属法兰的封接,再进行溅射镀膜。阿贡国家实验室 APS 的镀膜比较特别,其正电子累积环、主环注入、引出冲击磁铁真空室均采用了空气中烧结电阻膜的方法<sup>[2]</sup>,最高温度 650,但实践证明这种薄膜的寿命不够长,经过数年使用后发现机器运行时陶瓷真空室发热,并判断导电膜已损坏,1999 年已提出采用其他工艺镀膜重新制造陶瓷真空室,替代原有的真空室。

表 1 镀膜方法  
Table 1 Coating methods

accelerator	CESR	LEP	APS	SNS
coating method	DC diode sputtering	magnetron sputtering	resistive paste firing	magnetron sputtering
material	Kovar	Ti	commercial resistive paste	Ti or Cu with a TiN overlay
resistance or thickness	0.4 /sq, 1.3 /sq	0.25 /sq	0.1 /sq, .25 /sq, .50 /sq	10 $\mu$ m

### 1.2 钼金属化法及其改进

在 HLS 新注入系统项目初期也使用了磁控溅射 Ti 的方法,但随着工程的进展及其他原因的影响,逐步对方案进行了调整,并发展了新颖的钼金属化法。这种方法和电真空领域中普遍采用的陶瓷封接面的金属化方式很相近,薄膜在 1 200 高温氢炉中的还原气氛中烧结而成。优点是金属化层和陶瓷的结合力强、真空性能好,缺点是金属化膏剂的浓度不易掌握,需经过反复实验才能达到要求。另外 Mo 的电阻率较小,比 Ti 的电阻率小一个数量级,因此镀膜很薄,如果陶瓷内壁不够光滑,则既要保持镀膜有足够大的方电阻又要保持其导电的连续性,难度很高。因此烧结之前金属化膏剂涂覆很重要,实践中使用“喷枪法”涂覆,厚度较难控制,mm 量

\* 收稿日期:2003-04-15; 修订日期:2003-08-26

基金项目:国家重大科学工程“国家同步辐射实验室二期工程”项目资助课题

作者简介:尚 雷(1968—),男,安徽阜阳人,博士,副研究员,从事加速器物理与技术工作;合肥 6022 信箱;E-mail: lshang@ustc.edu.cn.

级的小尺度范围的均匀性不好。经过一段时间探索,采用“定量沉积法”较好地解决了这个问题。另外一个改进措施是增加了镀膜面的绝缘条纹数目,减小了绝缘条纹的宽度,图 1 是改进后的镀膜图案,绝缘条纹由 2 条增加到 4 条。采取这些措施后,镀膜中涡流所引起的脉冲磁场时间滞后减小了,实际测量的一个陶瓷管内不同位置脉冲磁场前沿时间变化小于  $\pm 4\text{ns}$ 。

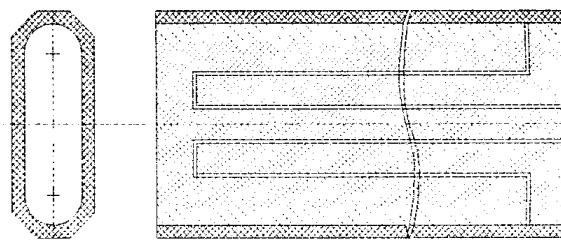


Fig. 1 Improved coating pattern

图 1 改进的镀膜图案

## 2 物理参数对镀膜的要求

HLS 新注入系统采用了 4 块冲击磁铁 ( $K_1 \sim K_4$ ), 它们均位于 3m 长的直线节之内,和老的三冲击磁铁注入系统相比,新的布局中凸轨的形成基本上与环的聚焦结构参数相对独立,不同的聚焦模式凸轨形状都相同,减小了对环聚焦参数设计的约束,简化了注入参数的调整。但是新系统也对磁场时间、幅度误差提出了更高的要求,注入跟踪计算表明<sup>[3]</sup>,要使已设计的所有聚焦模式都能实现单圈或多圈注入,系统的公差要求为:(1) 脉冲磁场延时误差在  $K_1, K_2$  之间或  $K_3, K_4$  之间小于  $\pm 5\text{ns}$ ,  $K_1, K_2$  磁铁对和  $K_3, K_4$  磁铁对之间小于  $0.1\mu\text{s}$ ; (2) 脉冲磁场纵向积分不一致性(凸轨范围内)在  $K_1, K_2$  之间或  $K_3, K_4$  之间小于  $0.5\%$ ,  $K_1, K_2$  磁铁对和  $K_3, K_4$  磁铁对之间小于  $10\%$ 。其中延时误差来源于脉冲磁场抖动引起的随机误差和镀膜引起的真空室内不同位置脉冲磁场上升沿时间的差异,由于一对磁铁  $K_1, K_2$  (或  $K_3, K_4$ ) 由一台电源并联供电,延时误差将主要来源于后者。图 2 给出了当  $K_4$  脉冲磁场滞后于  $K_3$  20ns 时,存储束流在横向 函数最大的四极铁  $Q_7$  处每圈位置的变化,最大变化约  $\pm 20\text{mm}$ 。可见一对磁铁之间的延时误差对轨道的扰动是十分严重的。

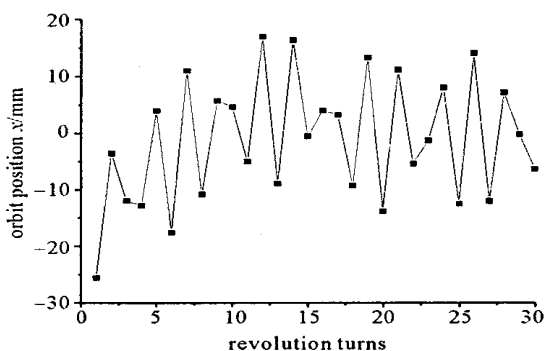


Fig. 2 Changes of orbit position at  $Q_7$  when  $B$ -field of  $K_4$  delayed 20ns compared with  $K_3$

图 2  $K_4$  的脉冲磁场滞后于  $K_3$  20ns 时  $Q_7$  处每圈轨道位置变化

使用三维电磁场程序计算不同厚度、图案的镀膜引起的延时误差,可以确定满足一定误差所要求的镀膜技术参数<sup>[3,4]</sup>。计算及实验测量相结合得到的结论为:应采用带有 4 条以上的绝缘条纹的镀膜,镀膜的方电阻最好在  $0.3 \sim 1.5 / \text{sq}$  的范围内。由于篇幅所限,本文不再详细讨论其他形式公差的影响等内容。

## 3 膜的方电阻测量

使用感应线圈法<sup>[5]</sup>和多用表直接测量相结合,测量了改进前后陶瓷镀膜的方电阻。图 3 是改进前使用喷枪制备的、带有 2 条绝缘条纹的镀膜,数据是用感应线圈法测量的,图中显示  $K_4$  的膜很厚,原因是对于不同的陶瓷管道,使用喷枪法镀膜的厚度重复性较差,这是该方法的最大缺点。

图 4 是改进后的情况,使用定量沉积法成膜,绝缘条纹增加到 4 条,条纹宽度由 3.5mm 减小到 1.5mm。

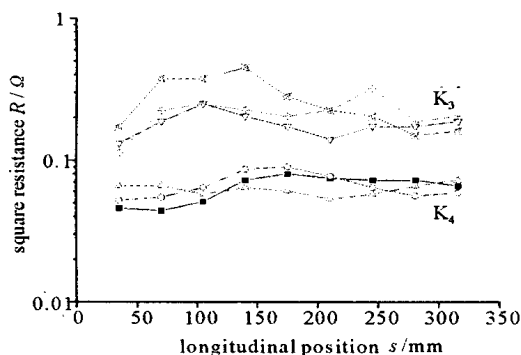


Fig. 3 Square resistance of  $K_3, K_4$  coating before modification

图 3 改进前的  $K_3, K_4$  镀膜方电阻

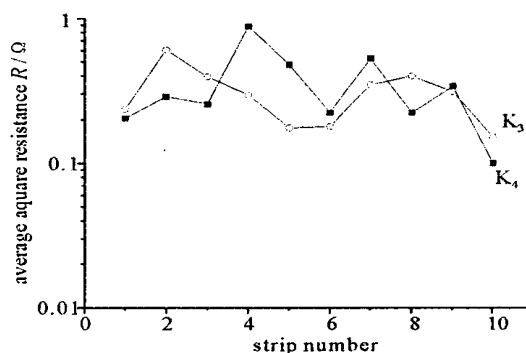


Fig. 4 Average square resistance of  $K_3, K_4$  coating after modification

图 4 改进后的  $K_3, K_4$  镀膜方电阻

不同的陶瓷管道膜厚度的重复性较好。因部分膜的电阻较大感应法线圈测量的灵敏度不够,使用多用表测量更为方便。图 4 给出了陶瓷管上下表面 10 条导电薄膜的平均方电阻,虽然数据看起来和图 3 中  $K_3$  数据类似,但实际上 mm 量级的小尺度范围内均匀性有很大的改进。因感应法线圈测量的是 30mm × 30mm 面积内的平均值,因此均匀性的改善图中没有完全表现出来。

## 4 磁场测量

### 4.1 测量方法的改进

工程初期使用不带积分器的单只点线圈测量方式,基本能实现脉冲磁场峰值的测量,但励磁电流大时十分易于受到干扰,即使增加一个参考线圈也无法测量到磁场脉冲前沿的时间差异。使用带有积分电路及抗干扰措施的双线圈测量系统后,不仅峰值测量效果很好,磁场前沿时间相对误差的测量也达到令人满意的结果,分辨率达到 ns 量级。图 5 是新的脉冲磁场测量方式示意图。

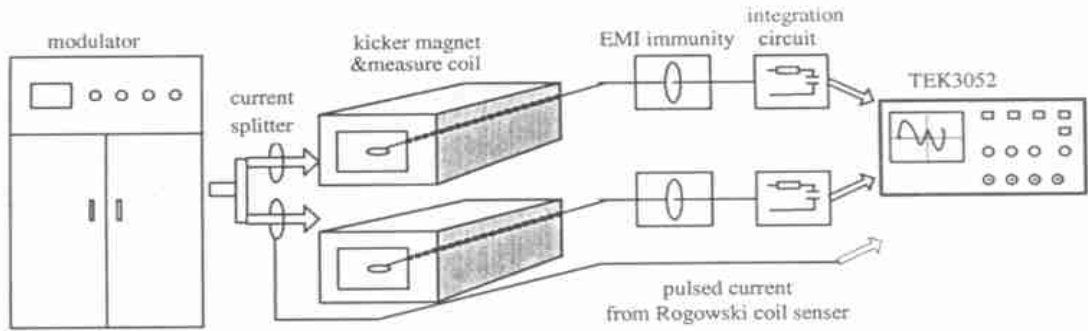


Fig. 5 Pulsed B-field measurement

图 5 脉冲磁场测量系统

### 4.2 测量结果

测量时,将参考线圈置于一块磁铁真空室内,测量线圈在第二块磁铁真空室内移动。图 6 是脉冲励磁电流和磁场的波形。图 7(a)是改进前的情况,不同位置的最大时间差异可达 50 ~ 100ns。改进后因膜引起的时间差异很小,存储示波器的时基选在 10ns/div,可以清晰地观测到两个信号前沿的时间关系随位置的变化。图 7(b)显示改进后的陶瓷管内两个不同位置的时间差异只有 2ns。

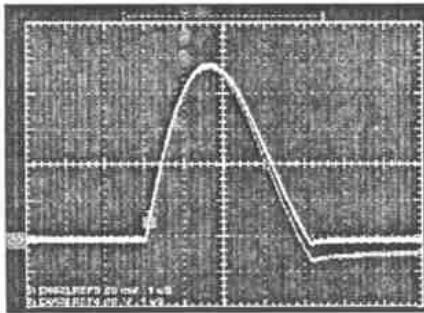


Fig. 6 Pulse current and B-field waveform

图 6 脉冲励磁电流和磁场的波形

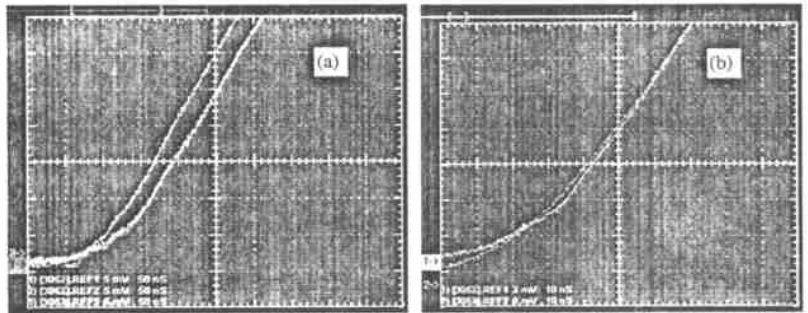


Fig. 7 Rise time difference before (a) and after (b) modification

图 7 改进前(a)和改进后(b)的脉冲前沿时间差异

## 5 运行调束情况

调束运行表明改进镀膜后的真空室安装到位后,储存环注入速率大为提高,在带有约 10mm 的直流辅助凸轨注入模式下,测量到的最高累计速率为 6 ~ 9mA/s。使用束流位置逐圈测量系统对 kicker 的扰动进行测量,也证明了扰动的减小。截止目前,通用光源模式最高累积流达 360 mA,高亮度模式累积束流已超过 50mA。

## 6 问题与讨论

使用钼金属化法镀膜研制的陶瓷真空室是首次使用,其长期运行可靠性有待进一步观测。虽然极限真空、脉冲磁场穿透性能已证明能够满足设计要求,但其抗辐射能力、光电解析特性等需进一步深入研究。

目前的储存环是直流辅助凸轨注入方式,需继续进行环参数调试、公差分析研究,以便最终摆脱直流辅助凸轨。

致谢 作者对何多慧院士、裴元吉教授、刘祖平教授、李为民教授的支持、建议、指导表示感谢,对王筠华等同事的帮助表示感谢;对国内合作单位的彭毅、姜霞、吴涛、刘英忠等同志的大力配合表示诚挚的感谢。

#### 参考文献:

- [1] Chao A W, Tigner M, Handbook of accelerator physics and engineering[M]. World Scientific Publish Co Ltd, 1999. 396—400.
- [2] Milton S, Warner D. APS ceramic chambers[A]. Proceedings of EPAC[C]. London, 1994. 2494—2496.
- [3] 尚雷. HLS新凸轨系统物理设计及陶瓷真空室研制[D]. 合肥:中国科学技术大学, 1999. (Shang L. Physical design of HLS new injection bump system and R&D of ceramic chambers. Hefei: University of Science and Technology of China, 1999)
- [4] 尚雷,裴元吉,王相纂,等. 镀膜陶瓷真空室脉冲磁场穿透特性研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(3): 379—384. (Shang L, Pei YJ, Wang XQ, et al. Studies on the shielding effects of the pulse magnetic field penetrating the coated ceramic chamber in injection kicker. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(3): 379—384)
- [5] 尚雷,王相纂,裴元吉,等. 超高真空陶瓷管内壁镀膜的方电阻测量[J]. 真空科学与技术, 2001, 21(5): 409—411. (Shang L, Wang XQ, Pei YJ, et al. Square resistance measurement of inner surface coating of ultra-high vacuum ceramic pipes. *Vacuum Science and Technology*, 2001, 21(5): 409—411)

## Coating technology improvement of ceramic chamber and measurement of time characteristic of pulsed magnetic field

SHANG Lei, WANG Xiang-qi, JIANG Dao-man, WANG Lin, ZHAO Feng, FENG Guang-yao  
(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology  
of China, P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

**Abstract:** Improvement status of HLS ceramic chambers was presented. A new method of inner surface coating of ceramic chambers with Mo-metallization was developed. The rise time characteristic of the pulsed magnetic field was greatly improved. Injection rate of the storage ring increased after installation of the new chamber. A two-coil method of measuring magnetic field was established. The resolution of rise time reaches nano-second range and the waveforms of measurement were presented.

**Key words:** Ceramic chambers; Coating; Pulsed magnetic field; Delay time; Perturbation; Injection rate