

SSRF 储存环高频屏蔽波纹管的研制

蒋迪奎 姜晓丽

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 建造中的上海光源即上海同步辐射装置 (SSRF) 储存环将采用内装高频屏蔽机构的波纹管——高频屏蔽波纹管。SSRF 采用了由接触指和弹簧指构成的双指型屏蔽机构。屏蔽机构的关键设计参数是由 SSRF 壁电流和壁电场所决定的指间接触力和高次模决定的相邻接触指间的缝隙宽度和长度。对高频屏蔽波纹管进行了热测试和阻抗测试。测试结果表明,接触力、缝隙和阻抗都适合 SSRF 的实际运行条件。

关键词 束流, 波纹管, 高频屏蔽机构, 接触力, 缝隙, 阻抗

中图分类号 TB754⁺.9

建造中的上海光源即上海同步辐射装置 (SSRF) 储存环真空室设计周长 432 m, 分成上百段, 由上百个波纹管互相连接成一个环。波纹管是环真空系统的重要部件。它们吸收储存环运行和真空系统烘烤期间真空室的热胀冷缩, 为相邻真空室段的连接提供工作空间, 补偿真空室制造和安装误差。

处于光速的多个短束团组成的高流强电子束流穿越波纹管内腔, 使得作为束流真空室构成部分的波纹管处于特殊的工作环境之中。一是电子束流在束流真空室上感应相同值的镜像电流 (也称壁电流), 由于波纹管的壁电阻远大于束流室的壁电阻, 波纹管上将产生壁电流的较高热负载。二是波纹管的波纹状结构是一种类腔结构, 增加了束流和真空室之间的耦合阻抗。因此, 常规波纹管已不适用于储存环, 必须在常规波纹管内部设置高频屏蔽机构来屏蔽电子束流, 构成所谓的高频屏蔽波纹管 (也称 RF 屏蔽波纹管)。

高频屏蔽机构是电阻很小的金属丝或金属条构成的、和束流室截面一致的包络, 两端和束流室接触。它桥接了波纹管的波纹状结构, 构成镜像电流的直接通路。这样, 壁电流在屏蔽机构上流动, 整个环真空室避免了类腔结构, 减少了高次模 (HOM) 的激励。同时金属条之间的缝隙成为包络内外的气体通道, 便于波纹状结构内的气体的抽除。

高频屏蔽波纹管从阻抗和可靠性两方面来说都是麻烦的, 许多光源遇到了这个问题。精明的做法是评估其他实验室的高频屏蔽波纹管, 选择最适合 SSRF 的进行仿制。纵观世界各国的高频屏蔽机构, 主要是指型和网状型二类。指型机构又分单指和双指两种。单指型机构只有一种弹性指压在束流管

(也称内管) 上, 它既提供接触力, 又是镜像电流通路。双指型机构把这两种功能分开, 分别由弹簧指和接触指承担^[1]。指型屏蔽机构允许波纹管组件有较大的压缩和拉伸冲程, 保证 SSRF 全环近百个高频屏蔽波纹管, 无论处于何种压缩和拉伸状态都保持屏蔽指包络的截面不变并和束流室一致, 且指间接触力不变。较大的冲程适用于烘烤时热胀冷缩量较大的 SSRF 的长段铝真空室。屏蔽指包络截面和接触力不变对要求高束流稳定性和长束流寿命的 SSRF 有利。因此, SSRF 采用双指型屏蔽机构和焊接波纹管构成的高频屏蔽波纹管, 并研制了样机。

1 SSRF 的高频屏蔽波纹管及其双指型屏蔽机构描述

SSRF 的高频屏蔽波纹管样机有 RFBDN100 和 RFBDN150 两种, 总长均为 200 mm, 二端分别采用 CF100 和 CF150 法兰, 内管截面分别为八边形和钥匙形, 如图 1 所示。



图 1 RF 屏蔽波纹管及 RF 屏蔽机构模型

Fig.1 Model of the bellows with RF shield and the double finger shield structure

第一作者: 蒋迪奎, 男, 1945 年出生, 1968 年毕业于东南大学, 研究员, 博导

收稿日期: 2003-08-07, 修回日期: 2004-10-20

它们的主要部件是屏蔽机构、不锈钢焊接波纹管、支撑限位机构和带高频屏蔽圈沟槽的 CF 法兰。双指型屏蔽机构的主要元件是接触指、弹簧指和束流内管,如图 2 所示。

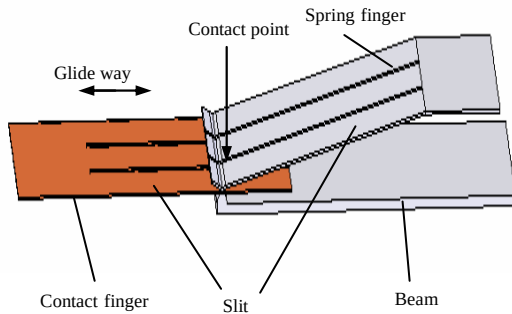


图 2 双指型高频屏蔽机构示意图

Fig.2 Scheme of a double finger shield structure

接触指是宽 5.3 mm、厚 0.2 mm 的 Be-Cu 片,指间缝隙 0.5 mm。弹簧指是宽 4.6 mm、厚 0.3 mm 的 Inconel 片。这些指片用螺钉和压框固定在底盘上,以便拆卸调整弹簧指的预折角,从而调整弹簧指压力。接触指压在波纹管的内管(环束流室的一部分)上构成屏蔽包络。八边形内管和钥匙形内管分别有 32 和 36 个接触指包围。弹簧指一对一地分别均匀压住接触指,提供接触指和内管间的接触力。施加接触力的弹簧指和承受压力的内管位于同一侧,相对位置固定,接触力不会随波纹管冲程的改变或弯曲而变化。接触指和内管的接触点是镜像电流的加热点,它远离弹簧指根部的受力区,避免了根部材料的热疲劳,有利于接触力的长期稳定。接触指不必提供弹力,可以做得较薄,有利于弹簧指把它压紧在内管上,即使波纹管弯曲或两端偏心少许,接触力变化不大。接触指稍宽于弹簧指,以免波纹管扭曲、接触指和弹簧指相对偏移时影响接触力,甚至弹簧指滑离接触指。弹簧指也不能过窄,以便在一定厚度和一定预折角下提供合适的弹簧力。

内管和弹簧指镀银,厚 $1\mu\text{m}$ 。这在弹簧指、接触指和内管间构成了二对不同金属间的摩擦付,避免近似金属间的强摩擦;同时为镜像电流提供了电阻率很低的通路。Be-Cu 接触指的导电性能很好,经 315°C 热处理后直至 200°C 工作温度时,仍能保持良好弹性。内管采用厚 1 mm 的低导磁率 316L 不锈钢板,波纹管为伸缩性很好的 316L 不锈钢焊接波纹管。

接触指指间缝隙越宽和长度越大, HOM 泄漏越大,但抽气流导也越大。缝隙宽度设计为 0.5 mm, HOM 泄漏已不成问题。SSRF 真空系统总体设计决

定了真空系统烘烤时波纹管的压缩冲程为 17 mm,这作为安装空间也已足够。因此,波纹管处于自由状态时的指间缝隙长度设计为 20 mm。也就是说,真空室烘烤 150°C 时,3 mm 长的指间缝隙为抽气通道。在真空室加工和安装准直误差符合设计要求的情况下,波纹管一般不会工作在拉伸状态下,因此只设计 5 mm 拉伸冲程。把拉伸冲程设计为不同于压缩冲程的较小值,有利于缩短屏蔽机构和波纹管总长度。

为了防止波纹管弯曲或偏心时,接触指和内管发生两点接触,形成二个高接触电阻点,导致过热和放电,内管端部要做一个高度 0.5 mm 的凸缘。这将允许波纹管偏心 1 mm、压缩量约 7 mm 时,不会产生两点接触。这个压缩量已远远超过储存束流时真空室的热胀量。用一根 0.5 mm 的银丝钎焊在内管端部形成凸缘,比机加工方便。弹簧指端部弯折,弯折点正好把接触指压在凸缘上。

内管端部 1 mm 壁厚和 0.5 mm 高的凸缘将形成 1.5 mm 高的台阶。台阶高度应小于 1 mm 才能使屏蔽机构的耦合阻抗很小。为此,壁厚 1 mm 的内管内壁沿径向加工成一定坡度,直至端部壁厚小于 0.5 mm,保证台阶总高度小于 1 mm。

为了彻底消除波纹管过度拉伸时接触指从内管上脱落、掉入束流通道的潜在危险,在波纹管组件的真空负载支撑杆上设置最大拉伸限位销钉,同时把接触指增加 5 mm 安全长度。为了防止过度压缩使接触指端部弯折,在支撑杆上设置最大压缩冲程限位销钉。

估计同步辐射的反射功率、壁电流损耗、HOM 泄漏功率等加在 RF 屏蔽波纹管上的热负载约 7 W,因在真空中经薄壁金属的散热很差,故在二端法兰的连接管上设置了冷却水管。

加工时测量了屏蔽机构弹簧指对接触指的压力,发现各指的压力差别很大。为此,调整了弹簧指的预折角,直至所有指的压力在 100 g 左右。

在指间接触力已定的情况下,高频屏蔽波纹管寿命取决于屏蔽机构摩擦付间的摩擦速度和冲程。机器运行时,速度和冲程都很小,真空室烘烤时冲程很大,但速度很小。看来,波纹管在储存环上使用 5000 次寿命(冲程 20 mm)没有问题。但在加工运输安装过程中不能快速压缩拉伸波纹管。

2 SSRF 双指型屏蔽机构设计的关键点

指型屏蔽机构包容高频高流强束流和处于超高真空环境条件下,决定了指型屏蔽机构设计的关键点有两个。

第一个关键点是确定接触指和内管间接触力的优化值。

每个接触点是否过热和放电取决于储存环的壁电流、壁电场特征和接触点的电接触状态,后者主要取决于指间接触力。可以说主要是储存环物理参数决定了接触点不过热和不放电所需的最小接触力。接触点过热主要取决于均方根壁电流的大小,但束流存在高次模时,会改变壁电流密度的分布,如发生在波纹管处,将会加剧接触点过热。放电特征依赖于环境(大气或真空)和电场频率。真空中接触点的放电现象主要和束流室的壁峰值电流密度和壁电场有关。当然,接触力越大,电接触越好。但屏蔽机构拉伸压缩时,弹簧指—接触指—内管间的摩擦严重,可能产生金属及其氧化物的灰尘粒子,粒子的产生是个严重问题。减少摩擦和抑制灰尘产生的一个办法是减少接触力,但这意味着电接触较差。优化接触力必须同时考虑这二个因素。

摩擦产生的灰尘粒子尺寸范围较大,平均尺寸约 $50\mu\text{m}$ 。粒子带电后被束流捕获,将缩短束流寿命和扩大束团尺寸,使同步辐射光的品质下降。灰尘粒子的数量和环境关系极大,当屏蔽机构工作在真空和 Ar 气氛中时,产生的灰尘粒子要少几个数量级。可能是由于从表面上摩擦下来的金属粒子在氧化前再次附着在表面上。在 1Pa 真空或 1 个大气压的 Ar 气中做摩擦试验,就观察到灰尘粒子的明显减少。真空环境虽有利于减少灰尘粒子,但易于引起高频电流的指间放电,也不利于过热点的散热。另一重要因素是摩擦付的材料组合。指的材料必须仔细选择,应考虑其物理和化学特性、硬度、表面光洁度等。接触力越小,电接触越差,接触指和内管间的接触点可能过热和放电。事实上,对指型屏蔽机构而言,在任何场合下,或多或少,灰尘粒子的产生是不可避免的,这是指型机构的缺点。

因此,必须根据 SSRF 的实际运行束流,确定较小的恰好可以避免过热和放电的优化接触力。

第二个关键点是确定相邻接触指指间缝隙的宽度和长度。

束流中的 HOM 经指间缝隙(它也是抽气通道)漏入波纹管和屏蔽包络之间的同轴空间内是指型屏蔽机构的先天弱点,这对于高流强、高束团的储存环来说是一个重要问题。TM 型 HOM 产生的磁场的方向只位于束流室的截面内。因此,只要指间缝隙宽度足够小,如 0.5mm ,TM 型 HOM 就足以被屏蔽。事实上,对于具有轴对称截面的束流管道来说,束流只产生 TM 型 HOM。假如束流室内存在阻抗源,如光子吸收器和泵、规管安装口等,束流

将产生 TE 型 HOM。TE 型 HOM 不同于 TM 型 HOM,它具有径向磁场分量,和缝隙方向一致,能经指间缝隙漏入波纹管和屏蔽包络间的空间内。由于 TE 型 HOM 泄漏功率大小依赖于缝隙长度,有必要在维持波纹管组件足够冲程的同时尽量减少缝隙长度。

上述两个关键点存在某种关联。尽管 HOM 泄漏功率只和指间缝隙长度有关,但泄漏功率加热接触指和屏蔽结构,可能改变弹簧指的弹性,影响接触力,增大接触电阻,加剧接触点过热,甚至导致接触点放电。因此,确定接触力大小既要考虑储存环的均方根壁电流密度和峰值壁电流密度,也要考虑 HOM 泄漏功率的影响,留有安全系数。

3 SSRF 屏蔽机构的热测试

KEKB 的测试经验表明,对于 KEBB 壁电流和壁电场不发生过热的接触力也不会发生放电。另外,放电测试必须在真空中进行,测试装置更为复杂。因此,我们只利用 KEBB 的测试装置,和日本科技人员共同对 SSRF 的屏蔽机构进行了热测试,测试装置如图 3 所示。屏蔽机构和两侧的铝锥形过渡管必须配置一个表面镀银的内导体,构成一节阻抗约 50Ω 、驻波比小于 1.32、反射系数 0.138 的高通器件。微波流经内导体,在锥形过渡管和屏蔽机构上感应出壁电流。我们用 HFSS 程序计算了内导体和锥形过渡管内腔的曲面形状和主要尺寸。



图3 热测试装置

Fig.3 The heat test setup

后分三步对屏蔽机构样机输入 508MHz 微波功率,具体测试程序如下:

分别输入 0.17 、 1 、 5 、 7 、 10kW ,屏蔽机构不水冷,看接触指和法兰温升;

分别输入 1 、 5 、 7 、 10kW ,屏蔽机构水冷流量 4L/min ,观察接触指和法兰温升;

输入 10kW ,改变水流量 (4.8 、 4 、 3 、 2 、 1L/min),看接触指和法兰温升。

输入功率 0.17 、 1 、 5 、 7 、 10kW 在屏蔽机构上

感应的 RMS 壁电流密度分别是 SSRF 运行值的 1、2.4、5.4、6.4、7.7 倍, 流经每个接触指的电流分别为 9.4、22.5、50.6、60、72 mA。显然, 测试条件比实际运行条件苛刻得多。

各接触指平均温升和输入功率的关系示于图 4。对 0.17 kW, 无水冷时温升仅 0.9°C。对 10 kW, 水冷和不水冷时的温升分别为 10.8°C 和 26.6°C。对 10 kW, 水流量从 4.8 降到 2 L/min, 温升没有增加。测试对 SSRF 屏蔽机构作出如下结论:

1) 屏蔽机构样机即使不水冷也能够承受 SSRF 的运行束流, 90 g/finger 的接触力适合 SSRF 的束流。

2) 法兰颈部的水冷是有效的。考虑到 SSRF 束流的较高频率分量和真空环境, 水冷是需要的。但 2 L/min 的水流量已足够。

3) 对 10 kW 输入功率, 没有发现屏蔽机构弹簧指的疲劳现象, 不必担心屏蔽机构的寿命。

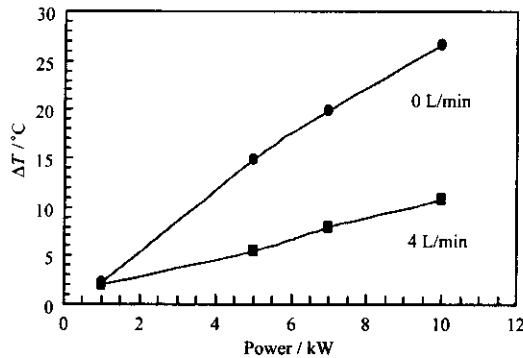


图 4 接触指平均温升和输入功率的关系

Fig.4 Relationship between average temperature increase of contact fingers and input power

4 SSRF 屏蔽机构的阻抗测试

储存环中, 真空部件的阻抗是引起束流不稳定性的主要原因。实验测量真空部件的阻抗对分析研究束流不稳定性有着重要意义。我们利用清华大学的阻抗测量平台, 设计加工了专用匹配过渡段, 采用同轴线法纵向耦合阻抗测量法, 测量了 SSRF 的屏蔽波纹管的阻抗^[2]。

测试原理图和测试系统图分别示于图 5 和图 6。在待测件中心穿过一根细导体丝并拉紧, 在细导体丝与待测件组成的同轴线上通过脉冲电流, 记录进入待测件的电流脉冲和由待测件出来的电流脉冲, 比较它们的形状, 得到电流脉冲通过待测件形状的变化。通过脉冲电流形状的变化计算得出该电流脉冲经过待测件的尾场, 进行傅立叶变换, 就得到待测件阻抗。利用网络分析仪可以直接在频域进行阻抗测量, 即将待测件看作一个二端口网络, 测量待

测件的 S_{21} , 计算后可以得到待测件的阻抗。测量结果示于图 7。

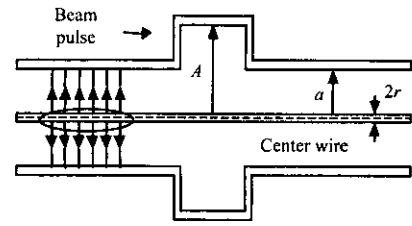


图 5 同轴线方法测量耦合阻抗的原理图

Fig.5 Scheme for measuring coupling impedance with coaxial cable

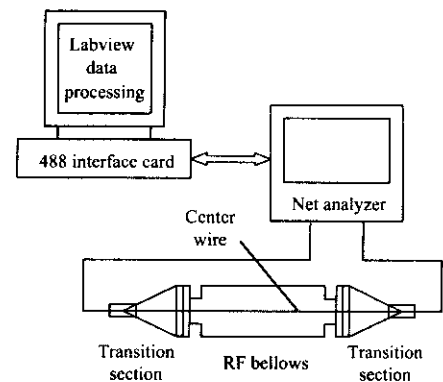


图 6 阻抗测量系统图

Fig.6 Test system for measuring coupling impedance

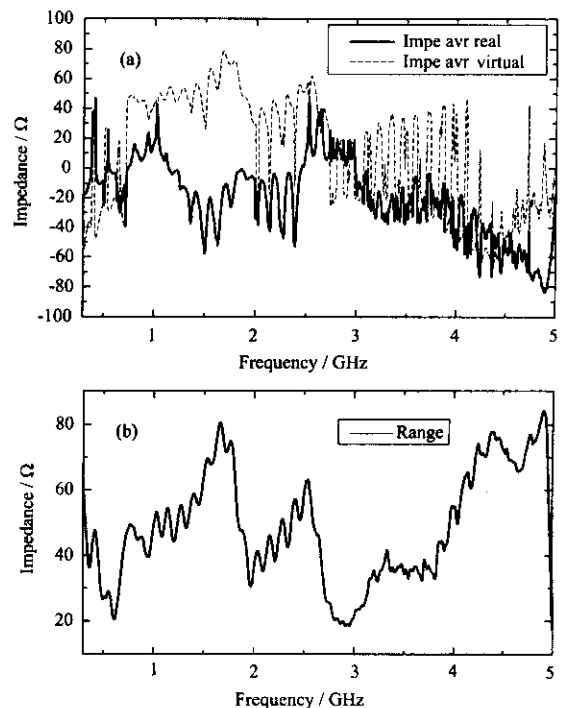


图 7 SSRF RF 屏蔽波纹管阻抗的实部虚部 (a) 和阻抗的模 (b) 加时域门处理

Fig.7 The real part and virtual part of impedance (a) and the model of impedance (b) of RF shield bellows for SSRF

图 7 中(a)为阻抗的实部和虚部, (b)为阻抗的幅度。该波纹管阻抗在 1.7 GHz 附近有一个 78Ω 的阻抗, 对照阻抗的实部和虚部图, 该阻抗主要为虚部产生, 但其中也有实部成分。此外, 该波纹管在测试频段内有约 40Ω 的实部阻抗。由此估算 $\text{Im}(Z/n)|_{n \rightarrow 0} = 0.034\Omega$ 。综合各种误差来源, 测量的相对误差为 29%。

致谢 衷心感谢日本 KEK Dr. Y.Suetsugu 和方志高博士以及清华大学王刚博士对测试工作的重要贡

献。

参考文献

- 1 Suetsugu Y, Ohshima K, Rev Sci Instrum, 1996, **67**(8): 2796—2811
- 2 HUANG Gang, ZHENG Shuxin, ZHAO Zhentang, Longitudinal broadband impedance measurement system, IEEE proceeding of 2001 PAC Chicago, 2001, 3206—3208

Development of bellows with RF shield for SSRF storage ring

JIANG Dikui JIANG Xiaoli

(Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract SSRF storage ring must use the bellows with RF shield which contain a high frequency shield structure inside. The RF shield structure is called “double finger shield structure” which consists of contact fingers and spring fingers. The key design parameters of an RF shield structure are the contact force between a pair of fingers and the width and length of the slit between adjacent fingers, while the former is decided by the wall beam current and wall electric field, the latter is depended on HOM. RF shield bellows have experienced a heat test and an impedance test. The test results show that the contact force, slit and impedance of the bellows are suitable for the actual operating conditions on SSRF.

Key words Beam, Bellows, RF shield structure, Contact force, Slit, Impedance

CLC TB754⁺.9