

BEPC II 冲击磁铁的设计和样机研制

康文 郝耀斗 韩谦 陈锦晖

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 由于 BEPC II 储存环注入系统对冲击磁铁的设计要求比较高,国际上现有的两种低束流阻抗的冲击磁铁方案都不能完全满足其要求.本文提出的一种新型冲击磁铁方案解决了 BEPC II 冲击磁铁的设计难题,并且通过样机的成功研制,证明了这种方案对于 BEPC II 来说是可行的,结构和工艺设计是合理的.

关键词 冲击磁铁 束流阻抗 场均匀性

1 BEPC II 注入系统简介

BEPC II 的正电子环和负电子环各有一个注入系统,每个系统由两块冲击磁铁和一块铁切割磁铁组成.铁切割磁铁的出口安排在注入点上,来自输运线的注入束流从储存环的下方进入铁切割磁铁后在垂直方向偏转 8° 进入储存环的束流中心平面.在两块冲击磁铁和附近四极磁铁的共同作用下,循环束

流轨道向切割板方向产生 30mm 高的局部凸轨.注入束流在水平方向从储存环的内侧注入,每次注入两个束团,相邻两束团的距离为 56ns. BEPC 的铁切割磁铁切割板有效厚度 4mm,可用于 BEPC II 的注入系统,但需要重新研制低束流阻抗的冲击磁铁,其主要技术要求列于表 1.

2 BEPC II 冲击磁铁的设计

由于 BEPC II 储存环对注入冲击磁铁的设计要求比较高,场均匀性指标比较苛刻,目前在国际上常用的两种低束流阻抗的冲击磁铁方案都难以完全满足其设计要求,因此我们提出了一种新型冲击磁铁的设计方案,理论分析和计算机模拟的结果表明,场均匀性和束流阻抗均满足了设计要求^[1],从而解决了 BEPC II 冲击磁铁的设计难题.

在理论分析和计算机模拟的基础上,确定了磁铁的外形尺寸,并对其结构进行了设计.图 1 是冲击磁铁主体部分的三维结构图,磁铁放在直径为 305mm 的圆柱形真空箱内,通过两个吊挂组件以及两端的过渡件与真空箱连接固定在一起,真空箱总长为 1700mm.磁铁内孔径为 90mm × 44mm,其两端通过金属过渡件光滑过渡到常规真空盒的孔径 108mm × 52mm.上下两个陶瓷板的宽度与磁铁水平外孔径相同,这样可以将陶瓷板和励磁导体联成一

表 1 BEPC II 储存环注入冲击磁铁系统的设计要求

数量	4
可用空间长度/m	1.7
束流清晰区尺寸/(mm × mm)(H × V)	38 × 82
注入能量/GeV	1.89
偏转角/mrad	3
束流阻抗/ Ω	< 0.025
积分场强度/(T·m)	0.02
脉冲磁场波形	半正弦
脉冲磁场波形底宽/ns	600
双束团注入,束团间距/ns	56
双束团注入时间点的场误差	$< \pm 5\%$
好场区宽度/mm	± 20
磁场均匀度	
y = 0 平面	$\pm 1\%$
y = 5mm 平面	$\pm 2\%$
y = 10mm 平面	$\pm 5\%$
重复频率/Hz	50

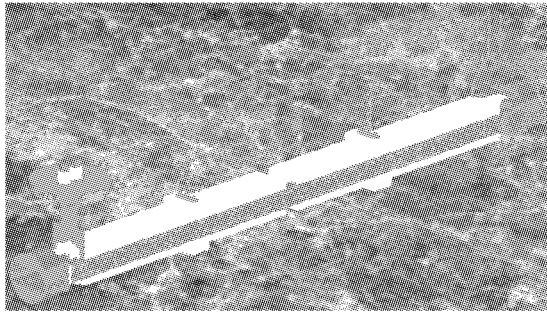


图 1 冲击磁铁主体部分

体,并对励磁导体起到定位支撑的作用.陶瓷板内壁中心镀有金属膜,宽度为 34mm,镀膜在磁铁的两端通过过渡件与常规真空盒相连并接地.两励磁导体板的一端与过渡件之间通过一段真空狭缝相隔离,并通过高压真空穿墙件与脉冲电源的正负高压相连,另一端则通过过渡件与真空箱相连并接地.励磁导体外侧镶嵌有冷却水管,它们不仅可以带走导体板上因同步光辐照和励磁电流以及涡流损耗产生的热量,而且也可以带走金属镀膜上因镜像电流和涡流损耗而产生的热量.

高压真空穿墙件是冲击磁铁的关键部件,双极性脉冲电源通过它的两个馈电端子给两个电流板馈电,馈电端子与真空箱法兰之间要用陶瓷进行绝缘隔离.对穿墙件的要求是,电感要小,电路参数对称性要好,否则会破坏电源参数的对称性.

图 2 为高压穿墙件结构图,两个穿墙电极沿轴向排列,使引线平面与脉冲场的磁力线平行,减少对磁场的屏蔽作用;用近而宽的平行板引线,以减小电感;两引线的结构形状和尺寸对称,保证正负引线的电感相同;用带弯的软铜皮作引线,安装时预置斜度,当电流板因热膨胀而伸长时,使穿墙件不受力.

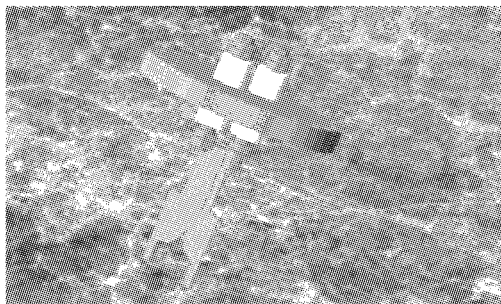


图 2 高压穿墙件结构图

正如穿墙件的设计必须要考虑电参数的对称性,冲击磁铁的总体设计同样也要考虑其结构的对称性,否则就会造成磁铁两导流板的等效电感不相

等,进而使得流经两导流板的电流不平衡,从而使得场分布出现不对称,影响场的均匀性.图 3 是 OPERA 程序模拟计算的结果,当流经两导流板的电流相差 2% 时,由于场的不对称性,场的不均匀性会增大 0.5%.

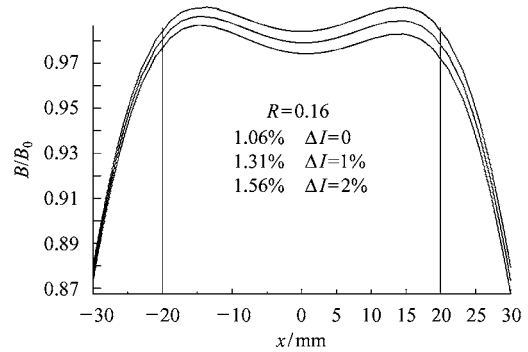


图 3 电流不平衡对场分布的影响

冲击磁铁这样的结构设计对于 BEPC II 来说具有下列优点:

(1)由于磁铁本身有水冷系统,允许同步光打到磁铁上,因此不再需要同步光挡块;(2)避开了难度大,工艺复杂,价格昂贵的陶瓷真空盒;(3)可靠性好;(4)原有 BEPC 冲击磁铁的真空箱主体可以再利用,节省了研制费用;(5)磁铁在不锈钢真空箱内工作,对电磁兼容设计有利.

3 BEPC II 冲击磁铁的研制

BEPC II 新型冲击磁铁研制的技术难点.

第一,陶瓷板的烧结和加工.由于陶瓷板尺寸比较大(长 781mm,宽 100mm,厚 20mm,材料为 99% Al_2O_3),结构比较复杂,因此陶瓷板的烧结和加具有相当大的难度.根据以往经验,首先选定由中科院上海硅酸盐研究所下属的硅佳陶瓷公司进行陶瓷板的烧结和加工.然而在成型、烧结和加工过程中,陶瓷出现多次开裂,经过我们和硅佳陶瓷公司的共同努力以及寻找二次加工协作单位,最终完成了陶瓷板的制造.

第二,陶瓷板镀膜.在实际的调研过程中,发现北京 718 厂友晟电子公司制作精细釉膜电阻的方法非常适合陶瓷板膜层的制作,这种方法是用丝网印刷术将电阻浆料图案印在陶瓷板适当的位置上,然后经过 650℃ 高温的隧道炉烧制,将电阻浆料和陶瓷板紧密地结合在一起.然而在具体制作过程中又多次发生陶瓷板开裂的现象,不过经过不懈的努力,

最终用这种方法完成了陶瓷板膜层的制备,如图 4 所示.

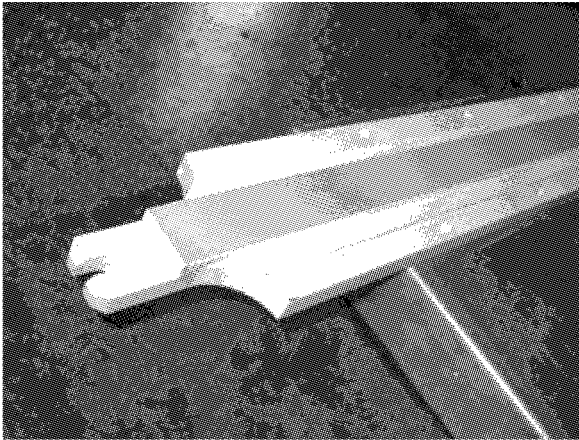


图 4 完成导电膜层的陶瓷板

第三,电流板的加工及其冷却水管的焊接.由于电流板尺寸比较长,在加工和焊接过程中容易变形,然而公差要求又比较严格,同时还必须考虑在超高真空中工作的要求,因此电流板的加工及其冷却水管的焊接用的工期比较长,耗费的资源成本也比较高.

第四,过渡件的加工.由于过渡件内孔径要从 90mm × 44mm 过渡到 108mm × 52mm,形状不很规则,因此加工也有一定的难度.

第五,冲击磁铁的装配.由于加工公差比较严格,冲击磁铁装配的每一步都必须到位,否则下一步工作就无法进行,而且也将影响冲击磁铁最终的性能,装配的步骤主要有:

- 1) 零部件的真空清洗;
- 2) 电流板和陶瓷板的组装;

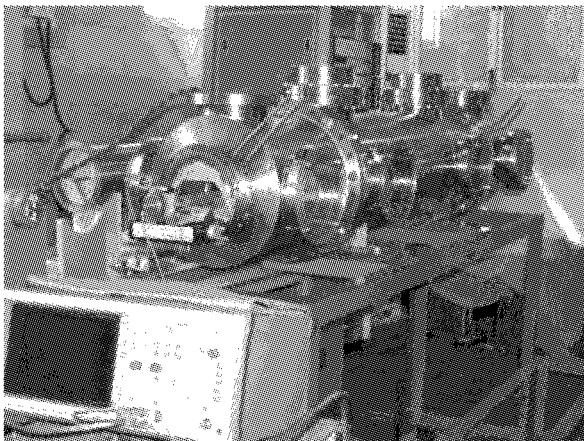


图 5 BEPC II 冲击磁铁样机

- 3) 过渡件与真空箱端盖的热套装配;
- 4) 磁铁主体进入真空箱中间段吊装;
- 5) 真空箱端盖与中间段组装;
- 6) 高压真空穿墙件和水管真空穿墙件的安装.

图 5 是完成装配的 BEPC II 冲击磁铁样机,磁铁两端装有测磁装置,孔径内放置有测磁线圈.

4 BEPC II 冲击磁铁样机的磁场测量结果

BEPC II 冲击磁铁样机完成装配后,对其磁场进行了初步的测量.图 6 是励磁电流波形和磁场波形,脉冲底宽大约为 578ns,由图可见磁场波形和电流波形基本吻合,说明磁场穿过陶瓷板导电膜后基本没有发生畸变,与 OPERA 程序模拟的结果相一致.

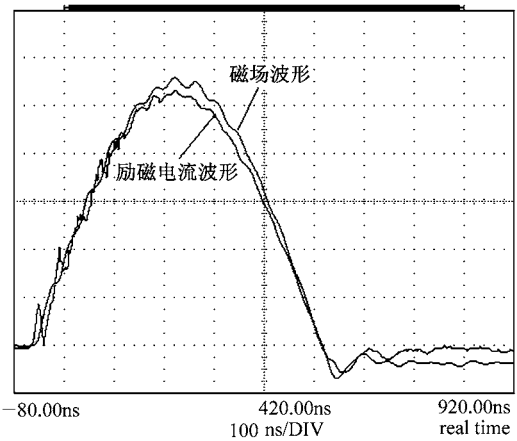


图 6 励磁电流波形和磁场波形

图 7 是冲击磁铁中心平面上的磁场分布曲线,在 $\Delta x = \pm 20\text{mm}$ 范围内,场的均匀性大约为 $\pm 1.35\%$,略超出设计要求的 $\pm 1\%$.从图上可以看出,实验结果与理论设计之所以出现偏差,是因为磁场分布出现不对称.引起磁场不对称的原因主要有 3 个.

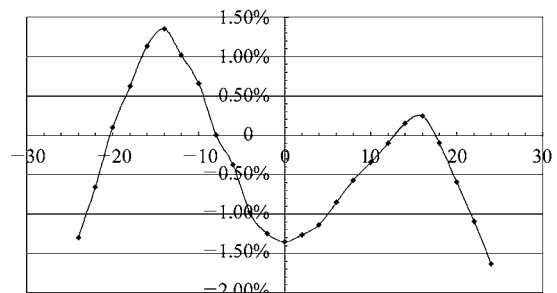


图 7 冲击磁铁中心平面的场分布

1) 磁铁结构左右不对称. 在磁铁设计、加工和装配过程中对此比较重视, 这个原因可以排除;

2) 实验用的脉冲电源供给两导流板的电流不平衡. 由于磁铁两导流板在中心接地, 所需电源是双极性脉冲电源, 如果设计不好, 容易出现两导流板的电流不平衡. 实验中交换了两导流板的电源极性, 但是磁场的不对称性依然存在, 因此这个原因也可以排除;

3) 陶瓷板导电膜横向不均匀. 冲击磁铁共用了 4 块陶瓷板, 两两相对, 然后再在磁铁中间对接, 如果其中有陶瓷板导电膜横向不均匀, 那么每半长的冲击磁铁的积分场均匀性就会有差异. 实验中的确发现两半冲击磁铁的场分布不同, 因此可以断定是陶瓷板导电膜横向不均匀导致了冲击磁铁磁场的不对称, 从而也使场均匀性超出了设计预期.

实际上, 在陶瓷板导电膜制作的过程中多次强调膜层横向均匀的重要性, 现在看来这方面的工作还需要进一步的改进. 另外从场分布曲线上还可以看出, 膜层的方块电阻偏小也是影响场均匀性的因素之一, 不过这方面的问题在以后的工作中能够得

到解决.

5 结论

鉴于两种在国际上常用的低束流阻抗的冲击磁铁方案都难以满足 BEPC II 对冲击磁铁的设计要求, 我们提出了一种新型冲击磁铁的设计思想, 从而使 BEPC II 冲击磁铁的设计难题基本得到了解决, 根据这种新的方案设计的冲击磁铁能够同时满足 BEPC II 储存环对其场均匀性和束流阻抗的设计要求. 在冲击磁铁研制过程中, 克服了种种困难, 特别是在陶瓷板成形、烧结、加工和镀膜的过程中, 出现了一系列的问题, 然而在我们和协作单位有关人员的共同努力下——得到了解决. BEPC II 冲击磁铁样机磁场测量的结果表明磁场波形与电流波形相吻合, 与 OPERA 程序模拟的结果相一致; 由于陶瓷板导电膜横向不均匀以及方块电阻偏小, 造成磁铁中心平面上的场均匀性略超出了设计指标, 不过还是与理论分析的结果相吻合, 其中存在的问题在以后其他几台冲击磁铁的制作过程中都会得到解决或改进. 总之对 BEPC II 来说, 这种新型的冲击磁铁方案是可行的, 设计是合理的, 样机研制也是比较成功的.

参考文献 (References)

1 KANG Wen, HAN Qian, HAO Yao-Dou. HEP & NP, 2003, 27(3):

263—267 (in Chinese)

(康文, 韩谦, 郝耀斗. 高能物理与核物理, 2003, 27(3): 263—267)

Design and Construction of a New Type Kicker Magnet for Injection of BEPC II Storage Ring

KANG Wen HAO Yao-Dou HAN Qian CHEN Jin-Hui

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract For the severe requirements of BEPC II injecting kicker magnets, the two schemes of low impedance kicker magnets used in other accelerator labs in the world are not adaptive to the BEPC II storage ring. A new scheme of kicker magnets proposed in this article solves the difficult problem of BEPC II kicker magnet design. And the successful construction of a prototype has demonstrated that the new scheme of kicker magnets is viable and the design of the kicker magnet structure is reasonable.

Key words kicker magnet, beam impedance, field uniformity