

文章编号: 1001-4322(2002)03-0459-06

2MeV 注入器绝缘支撑设计与实验*

王 勤¹, 邓建军¹, 戴光森¹, 王景生¹, 夏连胜¹, 黄海波²

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2 中国工程物理研究院 材料与工艺研究所, 四川 绵阳 621700)

摘 要: 针对更高能量注入器的技术要求, 在现有的 2MeV 注入器阴阳极头部分别设计出了尼龙材料的分层径向匀场环绝缘支撑结构。实验结果显示, 在保证可靠绝缘的基础上, 改善了阴阳极间的机械对中性能, 提高了束、场、机械三轴的同轴性, 为 2MeV 注入器实验平台各项技术指标的提高奠定了基础。

关键词: 注入器; 对中性; 匀场环; 绝缘支撑

中图分类号: TL 503.3 **文献标识码:** A

直线感应加速器的性能很大程度上取决于其注入器的性能。现有的 2MeV 注入器阴阳极杆采用的是悬臂结构, 由于自重引起的挠度使机械对中性能较差, 因此需要在阴阳极头部加上绝缘支撑以改善阴阳极之间的机械对中性能, 提高发射束流的品质, 减小束的 cork screw 运动幅度, 提高束流传输效率。在现有 2MeV 注入器的结构上设计绝缘支撑, 即是要在绝缘距离一定的情况下用绝缘结构替代真空间隙达到支撑和绝缘的效果。因此, 要增加一定距离下绝缘支撑的耐压水平, 就需要采用优化的绝缘结构, 才能满足要求。绝缘支撑的工作条件是: (1) 高真空(约为 10^{-3} Pa); (2) 脉冲高压(脉冲半高宽约为 90ns, 平顶约为 60ns); (3) 圆柱对称坐标系(对称轴为注入器的几何中轴线)。这些问题给绝缘支撑的设计带来了一定的难度, 特别是真空条件下绝缘介质所具有的特殊性质以及影响其绝缘强度的多种因素, 更加大了理论分析的难度。

对于更高能量的注入器设计来说, 由于其具有更高的注入电压, 阴阳极杆的长度更大。不可能再采用 2MeV 注入器阴阳极杆的悬臂结构, 必须在阴阳极头部加上绝缘支撑结构。

有两种方案可以考虑: 一是使用整体绝缘平板支撑, 并在支撑处加上按半径体电阻均匀增加的液体介质(如硫酸铜或硫代硫酸钠水溶液), 使场强在径向接近均匀分布, 达到较好的绝缘效果。该方法的特点是结构较为简单, 但绝缘效率并不是最佳。另一种方案采用匀场环绝缘支撑技术, 设计一种锯齿状、加均压环的分层 45° 绝缘结构, 并加上液体介质均压, 使匀场环得到确定的电位而成为均压环, 见图 1^[1]。以期达到更好的绝缘效果, 同时也作为一种新的绝缘结构设计的探索。

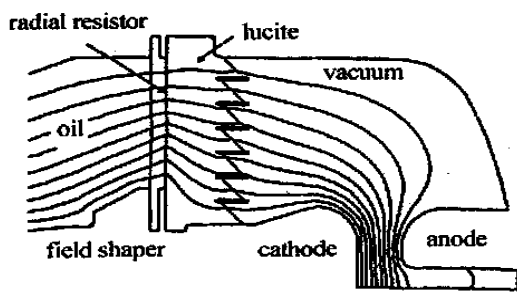


Fig 1 Scheme of radial graded insulation structure

图 1 径向匀场环绝缘结构示意图

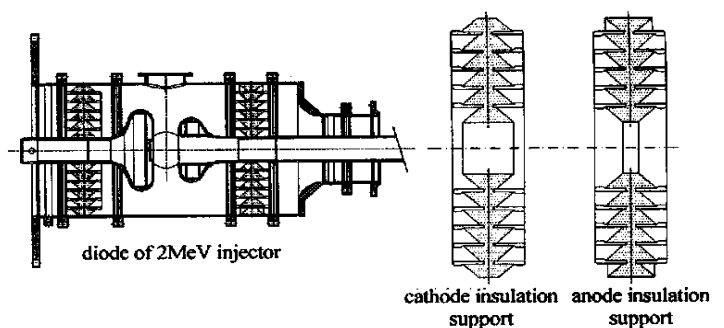


Fig 2 Diode and insulation support structure of 2MeV injector

图 2 2MeV 注入器二极管区及绝缘支撑结构图

本文采用第二种方案, 首先为现有的 2MeV 注入器的阴阳极设计绝缘支撑, 但支撑处没有加上液体介质均压, 而是都工作在真空条件下。在得到有效的基础实验数据与设计经验后, 推广应用到更高能量注入器的设计中去, 为使匀场环支撑结构改进为真正意义上的均压环支撑结构提供理论和实验依据。

1 方案设计

参考美国的 DARHT 注入器^[2]和法国的 A R IX 注入器^[2]中绝缘支撑结构设计, 综合考虑加工及装配等具

* 四川省电子学会第二届高能电子学学术交流会优秀论文。

收稿日期: 2001-07-24; 修订日期: 2001-09-27

作者简介: 王 勤(1975-), 男, 硕士, 从事真空固体绝缘及 L A 注入器研究; 绵阳 919-106 分箱。

体工程需要, 决定 2M eV 注入器整体绝缘结构的材料选用尼龙, 采用等厚度的设计, 即每个绝缘层的厚度相等, 均为约 3cm, 且每一个绝缘单元表面与外加电场方向成 45 夹角。设计出的 2M eV 注入器二极管区及绝缘支撑结构如图 2 所示。

2 理论计算校验

针对上述设计的结构, 作者进行了详细的静电场数值模拟计算^[3]。在计算中各金属匀场环均作为相对介电常数 ϵ 无穷大(实际取为 $\epsilon=10^9$)的介质来处理的。计算所用的工具是大型有限元计算程序 ANSYS。图 3 显示了阴极绝缘支撑的剖分及部分场分布结果。其中, (a) 为场域剖分结果; (b) 为等位云图; (c) 为等位线图; (e) 为等场强线图; (d) 为绝缘支撑局部的等场强线图; (f) 为匀场环处的等场强线图。

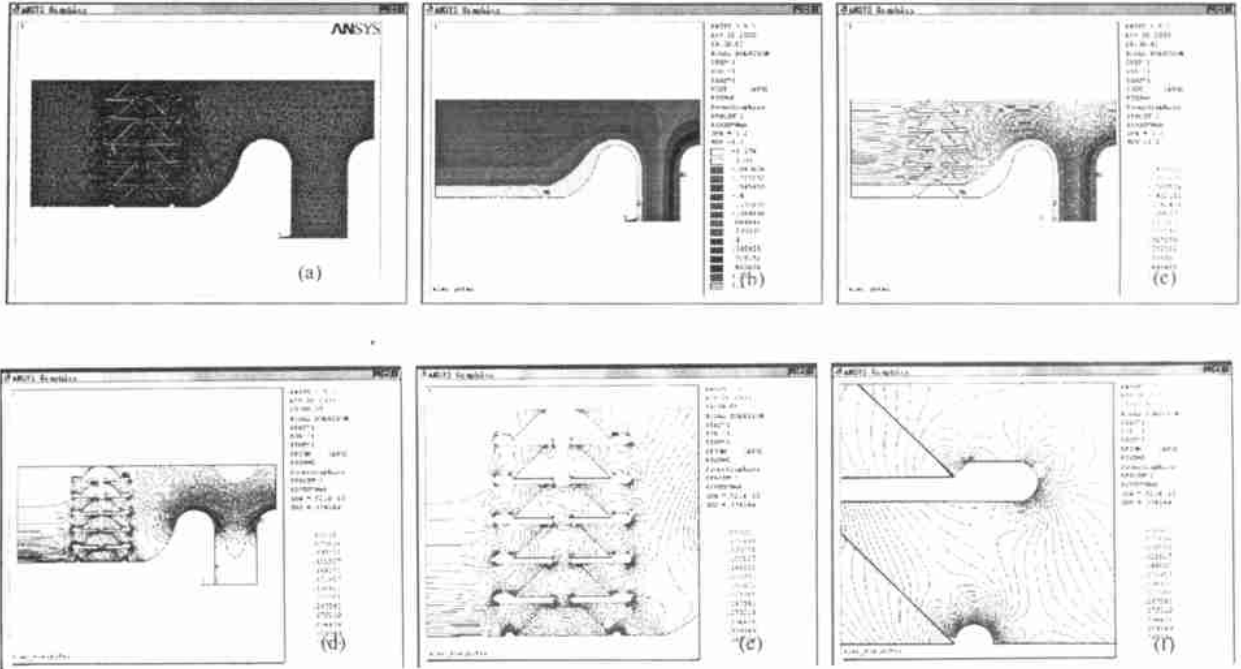


Fig 3 Theoretical simulation results
图 3 理论计算结果

在计算中只考虑了阴极绝缘支撑侧。对于此种等厚度结构, 由于轴对称结构的等位线箍缩效应(即越靠近中轴线等位线越密集), 又由于在计算模型中把匀场环当作介质处理而没有考虑其电容分压效应, 因此各匀场环间的电压不均匀。越靠近阴极, 匀场环间的电压越大。因此整个绝缘支撑的薄弱环节是最靠近中轴的一层, 只要这一层满足了临界击穿场强判据, 则整个结构就能耐受预定电压。

将各绝缘层的表面场强提取出来, 得到了图 4 所示的分布情况。其中 surface No. 6 是指最内层的绝缘表面, 其他随序号的递减依次沿径向向外分布。从计算结果来看, 各层间的三相点场强均可以满足临界三相点场强条件($E < 100\text{kV/cm}$), 只是最内一层的场强略大, 约为 130kV/cm 。由于计算中阴阳极所加电压为 2MV (阴极侧所加电压为 1.2MV) 而不是实际应用的 2MV, 所以计算出的各处电场均比实际情况偏大。根据真空固体绝缘直流和脉冲基础实验的结果^[4-6]以及美国 REX 注入器的绝缘支撑表面场强分布结果^[1], 可以合理地推断出该绝缘支撑结构可以耐受 $\pm 1\text{MV}$ 的脉冲电压而不会发生表面闪络现象。

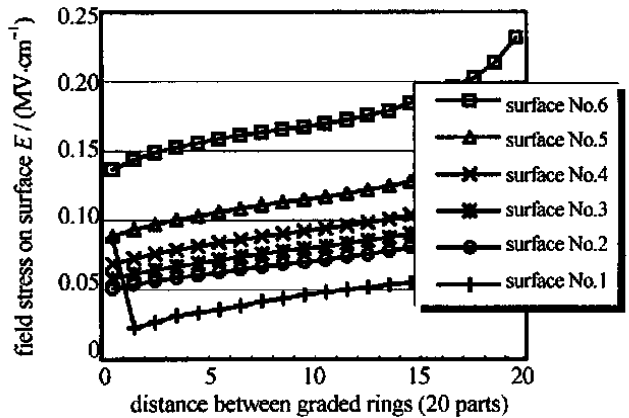


Fig 4 Distribution of electric field of insulator surfaces between rings
图 4 各匀场环间绝缘体表面场强值

3 实验进程

根据上述设计思路和设计方案,加工出了阴阳极绝缘支撑结构,并将其安装在 2M eV 注入器上。实物照片见图 5 和图 6。

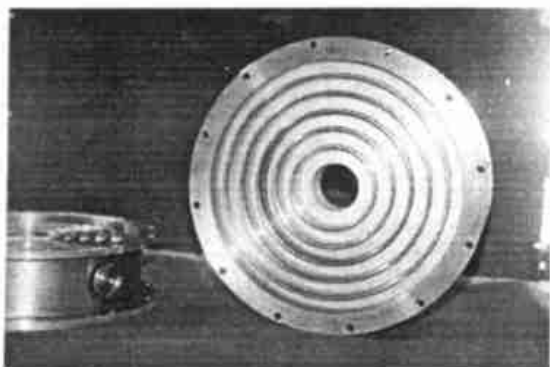


Fig 5 Photograph of insulation supports

图 5 阴阳极绝缘支撑照片

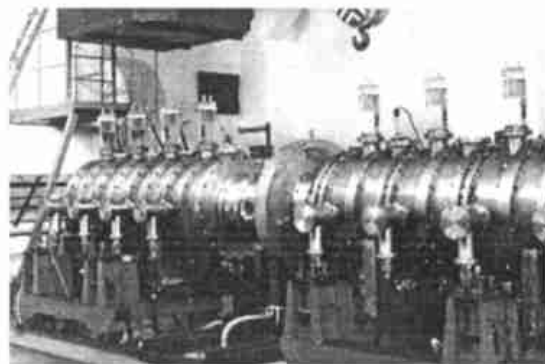


Fig 6 Photograph of 2M eV injector

图 6 2M eV 注入器整体照片

把设计出的阴阳极绝缘支撑组元安装在 2M eV 注入器上,进行了实际加压测试。在实验中注意以下几个方面: (1) 监测量的选择。在实验中监测以下几个量: 阴极发射电流 I_b , 阴阳极单腔电压 $U_{c_1} \sim U_{c_3}$, 阴极四个腔电压平均值 $U_{cathode}$, 阳极四个腔电压平均值 U_{anode} , 阳极尾部电阻环测出束流的四个分量 $I_{X^+}, I_{X^-}, I_{Y^+}, I_{Y^-}$, 以及它们各自的波形; (2) 实验中,先不加磁场(包括二极管段的引出线圈、反向线圈和桥接线圈磁场,以及阳极组元内部线圈磁场),单纯做绝缘支撑的耐压试验。在绝缘支撑达到预定的电压水平后,再加上线圈的磁场,监测束流波形; (3) 加压时,应考虑到绝缘支撑的锻炼过程,即从较低的电压开始,逐渐升高电压,直至达到预计的耐压水平。

4 实验结果及分析

初次实验在 2000 年 9 月至 10 月期间进行。在进行了一定次数的实验后,发现了外磁场对阳极腔电压的影响: 外加磁场使腔电压半高宽变窄,且使其幅值降低。在该现象重复若干次后,阳极绝缘支撑产生了不可恢复性的损坏,将其拆卸下来后进行解剖,得到图 7 的图像。



Fig 7 Photograph of dilapidated insulation support on anode (on three different incision position)

图 7 阳极绝缘支撑击穿损坏解剖照片(三个不同的切割位置)

从图中可以看出,阳极绝缘支撑的损坏是由于在绝缘体内部出现了树枝状的放电通道,而且这些通道的起始位置均在匀场环嵌入绝缘体内部的尖端位置。此现象与美国 DARHT 注入器的绝缘支撑损坏现象一样^[2]。对此,作者认为有两方面的原因: (1) 对于加磁场后阳极腔电压变窄的现象,是由于阴极发射的电子在磁场作用下绕过阳极面打到阳极支撑上(2M eV 能量的电子在尼龙材料中的穿透距离约为 2cm),造成了不利于绝缘的匀场环上电荷积累,甚至于产生了某一层绝缘之间的表面闪络(但不是整体击穿)。对于这一猜想,作者进行了定性的验证计算。从图 8 中可以看出,由于外加反向磁场的影响,使得阴极头边沿发射的杂散电子运动轨迹改变,更易于绕过阳极头而直接打到阳极支撑表面。这部分电子使得匀场环上的电荷积累现象加剧,从而产生一

系列不利于绝缘的因素。这是绝缘支撑损坏的原因之一；(2) 至于阳极绝缘支撑的整体损坏，是由于匀场环嵌入绝缘体的结构设计不合理，匀场环根部存在的棱角使此处的场强变大，加上在装配时这些地方可能有空气间隙存在，在脉冲电压的作用下产生局部放电现象。每一次放电均产生一定程度的损坏。在多次放电后，积累效应使绝缘体内部产生了树枝状的体击穿通道。

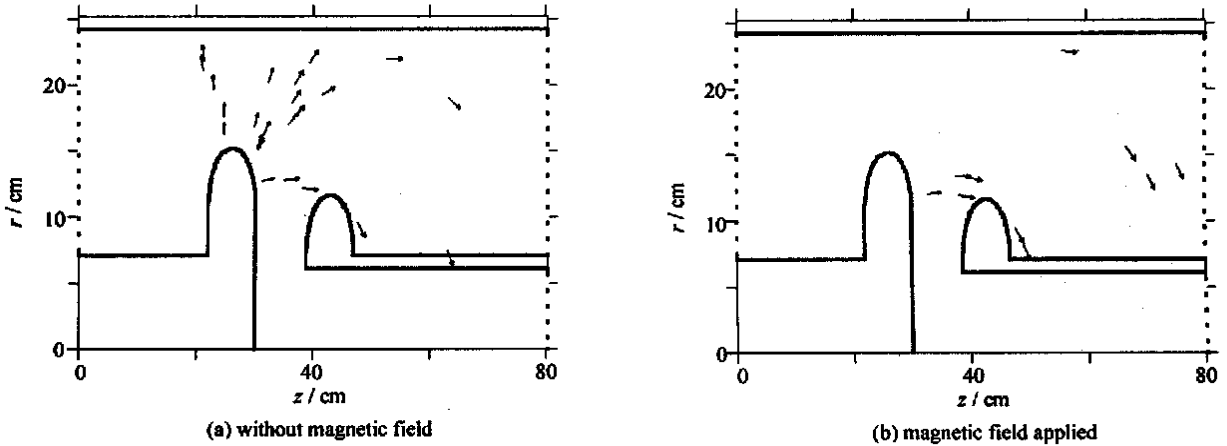


Fig 8 Influence of magnetic field on fly track of electrons emitted from cathode edge

图 8 磁场对阴极边沿发射的杂散电子运动轨迹的影响

针对出现的实验现象及可能的原因，作者提出了改进的绝缘支撑结构方案。作出的改进主要有以下几点：(1) 增大阳极头外径，改进阴阳极间电场分布，并有效地阻挡阴极头边沿发射的杂散电子的行程，避免直接打到绝缘支撑表面；(2) 匀场环厚度增加；匀场环端部不再嵌入绝缘体中，而是离开绝缘体一段距离；各匀场环端部均倒成圆角，以降低该处的表面场强值。

2000 年 12 月至 2001 年 5 月期间将改进后的阳极绝缘支撑安装在 2M eV 注入器上进行实验。共进行了约 500 次的放电实验。实验布局图见图 9。

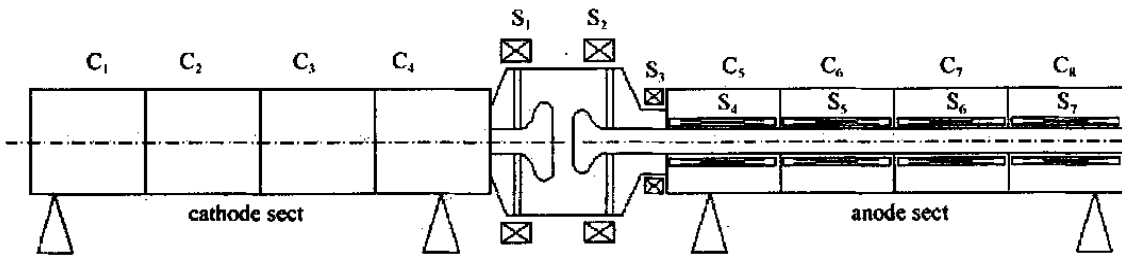


Fig 9 Layout of 2M eV injector experimentation

图 9 2M eV 注入器实验布局图

实验数据显示：阳极绝缘支撑最高耐压达到 1 045.4kV，阴极绝缘支撑最高耐压达到 1 021.8kV，发射电流最高达到 3.42kA。而且在该电压下，阴阳极绝缘支撑长时间正常运行。部分实验数据见表 1。与表 1 相对应的部分实验波形如图 10 和图 11 所示。

从上述实验结果可以看出：通过对阳极绝缘支撑的改进，使其结构优化，解决了原绝缘结构在实验中出现的的问题，达到了预定的耐压水平，且工作稳定可靠。

5 结 论

在此之前，2M eV 注入器的磁场配置与束流调节大多是依靠实验经验来完成的。该绝缘结构的设计成功，使二极管区阴阳极间机械、束、场三者的精确调节成为可能。优化的磁场配置以及更好的阴阳极对中性能会使 2M eV 注入器的输出束流品质有大的提高。在该实验平台上可进行诸如：二极管区高精度磁场位形配置、阴阳极头结构优化、阴极发射体研究、束流调节、束流诊断和测量等等一系列基础研究。

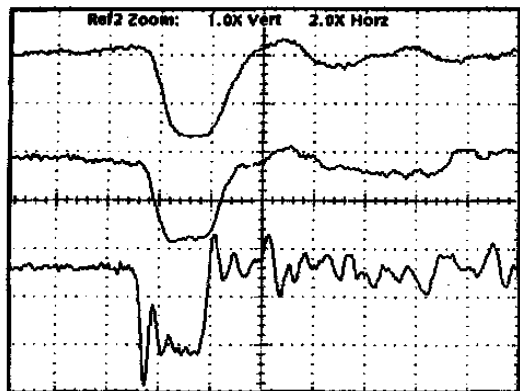


Fig 10 Waveform No. 54

图 10 波形记录 54(阴阳极叠加腔电压及发射电流波形)

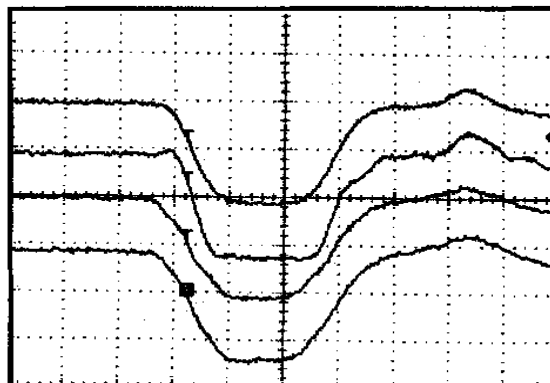


Fig 11 Waveform No. 66

图 11 波形记录 66(阳极四个腔电压波形)

表 1 阳极绝缘支撑改进后的部分实验数据

Table 1 Part of experiment data after anode insulation support was improved

serial number	voltage of host Marx generator U_M/kV	voltage of anode U_a/kV	voltage of cathode U_c/kV	emission current I_e/kA	waveform number
10	21	929.3	882.9	2.93	23, 24, 25
11	21	971.5	902.7	3.23	26, 27, 28
12	21	918.7	902.7	2.86	-
28	23	1 024.3	942.4	3.20	53
29	23	1 003.2	902.7	3.17	54
30	23	992.6	912.6	3.17	55
31	23	992.6	902.7	3.17	56
32	23	992.6	912.6	3.14	57
33	23	992.6	912.6	3.14	58
34	23	1 003.2	902.7	3.14	59
35	24	1 045.4	932.5	3.30	60
36	24	1 034.9	932.5	3.30	61
37	24	1 034.9	932.5	3.42	62
38*	24	982.1	912.6	3.20	63
39*	24	982.1	942.4	3.20	64, 65
40*	24	982.1	942.4	3.17	66

[注] 实验条件: 真空度(二极管区 $1.8 \times 10^{-3} Pa$, 阳极区 $2.5 \times 10^{-3} Pa$)、水阻 $> 7M \Omega$ 。表中波形记录内的数字表示对应的波形编号; 表中标有*的序号是不加阳极段所有磁场(即 $S_4 \sim S_7$ 线圈不通电)时进行的实验。

通过本文的研究, 得到了匀场环绝缘支撑设计的一整套方法。并第一次将匀场环绝缘支撑结构应用到直线感应加速器注入器的二极管区, 在可靠绝缘的基础上, 很好的改善了阴阳极间机械、场、束三者的同轴性, 填补了我国在该领域的技术空白。在 2MeV 注入器上取得较好实验结果的基础上, 为更高能量注入器的研制及 Z-pinch 装置的类似绝缘结构设计提供了很好的技术保障。

致 谢 感谢 2MeV 运行组全体同志在实验过程中的帮助及 7 所同志在机械加工上给予的协助。

参考文献

[1] Carlson R L., Allison P W., Kauppilla T J., et al. Electron-beam generation, transport, and transverse oscillation experiments using the REX injector[A]. Proceedings of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference[C]. San Francisco, California, 1991. 3192—3194
 [2] Launspach J., Bonnafond C., Allison P., et al. Recent results on the DARHT and A RIX 4MV $\pm 1\%$, 3.5kA electron beam injectors[A]. Tenth International Conference on High-Power Particle Beams[C]. Kobe, Japan, 1994. 515

- [3] 胡熙静. 3 MV 注入器的设计计算[A]. 第一届高能电子学学术交流会议文集[C]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1999. 1. (Hu X J. Designing and calculation of 3 MV injector. 1st conference on high-power electronics, Mianyang: CAEP, 1999. 1)
- [4] Wetzer J M. Vacuum insulation flashover mechanism, diagnostics and design implications[J]. *IEEE Trans Electr Insul*, 1997, **4**(4): 349.
- [5] Arnold P A, Thompson J E. 45 degree insulator surface flashover[J]. *IEEE Trans Electr Insul*, 1988, **23**(1): 17.
- [6] Milton O. Pulse flashover of insulators in vacuum [J]. *IEEE Trans Electr Insul*, 1972, **EI-7**(1): 9.

Design and experiment of insulation support of 2 MeV injector

WANG Meng¹, DENG Jian-jun¹, DAI Guang-sen¹,

WANG Jing-sheng¹, XIA Lian-sheng¹, HUANG Hai-bo²

(1. *Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box. 919-106, Mianyang 621900, China;*

2. *Institute of Material and Technics, CAEP, Mianyang 621700, China*)

Abstract Aiming at the technical request of high power injector, we designed two Nylon radial graded insulation supports on the heads of cathode and anode of the existing 2 MeV injector. The experiment results showed that, on the basis of credible insulation, the supports improved the quality of coaxiality between the cathode and the anode, ameliorated the identity of the three axes of beams, magnetic field and mechanism, and settled the groundwork for advancing each technical performances of the 2 MeV injector.

Key words injector; quality of coaxiality; graded ring; insulation support