

# 750 kV 大气型高梯度加速管

陈监璞 郁庆长 马兴华 钱菊玲  
舒传玉 竺仁全 夏德红 邱宏

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

设计和建造了一根 750 kV 大气型高梯度加速管。采用钛合金电极组成的两隙准均匀场, 平均加速梯度为 30 kV/cm。脉冲质子束 50—200 nA 可以顺利加速通过此加速管。最后讨论了真空清洁度对退磁率的影响。

**关键词** 预注入器, 高梯度加速管, 退磁率。

## 一、前言

750 kV 预注入器原是质子高能加速器的一个组成部分。1978 年根据八七工程预制研究开始设计, 后来因任务的变化, 此预注入器和 35 MeV 质子直线加速器配套作应用工作。因此对加速管束流指标要求能适应较大范围的变化, 指标为 50—150 mA。小束流是模拟负氢离子流, 大束流则是作应用工作的需要。脉冲质子束宽度为 100  $\mu$ s, 重复频率为 10 Hz, 归一化发射度不大于  $2\pi$  mm·mrad。

这根加速管采用大气型双隙高梯度加速 (30 kV/cm) 结构。从 1982 年至今加速管一直工作正常, 50—200 mA 束流都可顺利通过, 经受了直线加速器及预注入器本身调试工作的长期运行考验。

在研制工作中积累起来的一些经验, 如这种加速管的结构设计、钛合金 (或纯钛) 电极的加工工艺、强流束的计算方法以及大直径加速管的封接工艺, 对今后强流加速器技术发展都是有用的。

## 二、加速管的设计考虑

从六十年代中期开始, 高能加速器中的预注入器为了适应束流强度的提高 (超过 50 mA), 开始发展加速梯度达 30—50 kV/cm 的高梯度加速管, 这就大大减少了束流的非线性空间电荷效应, 从而保证束具有良好的光学质量。根据 1976 年的统计材料, 各国高能实验室已建造的高梯度加速管如表 1<sup>[1]</sup>, 表内也列入我们的加速管, 作为比较。

这些加速管按加速场的形式来区分, 有 Pierce 加速场和单 (双) 隙准均匀场两大类。Pierce 场理论上是无象差加速, 但其前提是束流的发射面是平面, 束流密度是均匀的, 而且加速管工作的束流密度必须是设计值。大于或小于此设计值, 束流会有欠聚或过聚的问题。高能加速器的预注入器只要求工作在最大的束密度下, 有可能满足只使用一个束流密度的要求。但是我们的加速管要在 50—150 mA 范围内都适用, 用 Pierce 场就难以实现了。

双隙加速场有 CERN 和 KEK 的成功经验。这类加速管结构比较简单。而 CERN 作

表1 高能加速器预注入器高梯度加速管主要参数<sup>[1]</sup>

类型	大气型				高压型				
	高能所	CERN	BNL	KEK	ANL	Chalk River	FNL	LASL	Rutherford
加速电压, kV	750	750	750	750	750	750	750	750	665
出柱束流, mA	50-150	275	280	600	150	100 (设计)	590	35 (设计)	170
归化发射度, mm·mrd	(1.2-2.4)π	3π	2.5π	3π	3π		4π	(0.4-0.6)π	
加速管总长, cm	185.3	123.9	120	330	190 (柱)	158 (柱)	213 (柱)	300 (柱)	200 (柱)
加速管绝缘长, cm	166	121.4	114	306	81	63.6	51.4	50	44.4
环材料	高压瓷	高压瓷	94 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	高压瓷	85 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	96 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pyrex
环内径, cm	60	50	63	101	45.7	45.8	45.7	35	21.5
环数×高, cm	28×6	19×6.4	18×6.3	2×153	6×13.5	18×3.5	8×6.4	14×3.6	16×2.8
封胶	Polyvinyl Acetate	环氧 Araldite	环氧	无	环氧	Polyvinyl Acetate	Polyvinyl Acetate	Polycarbonate	Polyvinyl Acetate
真空密封	同上	In 丝	In 丝	Viton O 圈	In 丝	同上	同上	同上	同上
加速方式	准均匀	准均匀	Pierce	准均匀	准均匀	Pievce 至 200 kV, 以后准均匀	Pievce	Pievce	准均匀
加速隙数	2	2	6	2	6	8	8	16	16
加速长度, cm	25	14	18.7	22	18.4	27	22.9	36	44
电极孔径, cm	2,4,5	5	2.2-3.7	5-6	4.4	2.6	3.2	4	14
电极材料	TC 4	Ti	Ti	Ti	Ti	TC 4	Ti	Ti	Ti
分压电阻	金属膜	碳	碳	RuO <sub>2</sub> 电阻	水	碳膜	水	碳	碳径迹

为高梯度加速管最早的开发者之一，曾对钛电极的真空高压特性<sup>[2]</sup>、真空系统污染对高压的影响<sup>[3]</sup>都有详细的研究，这对我们的工作为极可贵的借鉴。

在结构形式上，我们采用大气型。高压型加速管虽然比较小、容易封接，但要多用一个高压罩筒。此罩筒外壁仍在大气下，总的绝缘长度是不变的。高压型加速管瓷环沿面梯度大，要用绝缘性能较好的 95 瓷作瓷环，而大气型加速管可以选用高压瓷作瓷环。我们的实践证明高压瓷是符合使用要求的。它的价值（包括磨加工费用）约为 95 瓷环的

$\frac{1}{10}$

大气型加速管管壁梯度一般在 4—7 kV/cm，瓷环高度大部份取 60—65 mm。个别的，

如 KEK<sup>[4]</sup>，采用不分段的筒式结构，梯度只有 3.5 kV/cm。我们选用 6 cm 高瓷环 28 个，每环工作电压 27 kV，相应的管壁梯度为 4.5 kV/cm，总电压可到 756 kV。

高梯度加速场一般在 30—50 kV/cm 之间选取。它决定于所加速的束密度。束密度大的要用较高的场强。由于我们的束密度与其它预注入器相比偏小，因此平均场强选用 30 kV/cm。750 kV 的总加速长度为 250 mm，两个间隙的分配是离子源至中间电极的第一间隙为 150 mm (梯度 25 kV/cm)，中间电极至地电极的第二间隙为 100 mm (37.5 kV/cm)。

上述电极系统用 JDQL 程序<sup>[6]</sup>在高能所 DJS-8 计算机上计算不同束密度下的束流轨迹，其束包络见图 1。计算时假设发射面是平面，束密度是均匀的。从计算结果看，最适合的束流是 125 mA，但在 40—250 mA 之间变化，过聚和欠聚都不大。实验证明此加速管在 50 至 200 mA 以内都可满意工作。计算是按纯质子束考虑的，由于束流中 H<sub>2</sub><sup>+</sup> 和 H<sub>3</sub><sup>+</sup> 的存在，空间电荷效应要更大一些，但这两项合计只占总束流 20% 左右，影响不大。

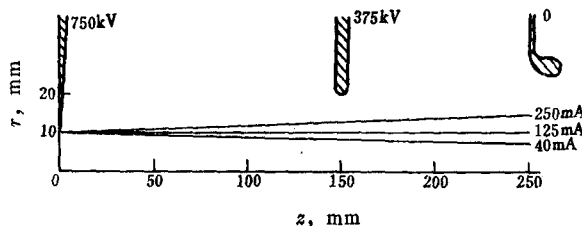


图 1 加速管内相应束流值的束包络

加速管径向尺寸主要决定于高压电极的直径，电极直径又决定于内部离子源的大小。我们的高压电极最大直径是 315 mm，地电极最大直径是 286 mm，都比 CERN 同类部件为大。径向间隙取 85 mm，因此屏蔽环最小内径为 485 mm。图 2 是计算的电场分布，最大电场分别是高压电极和地电极的拐角，它们为 70 kV/cm 和 75 kV/cm。

由于电极直径和间隙都比 CERN 有所增大，加速管瓷环内径为 600 mm，比 CERN 的加速管整整大 100 mm，这样粗的加速管增加了封接工作的难度。

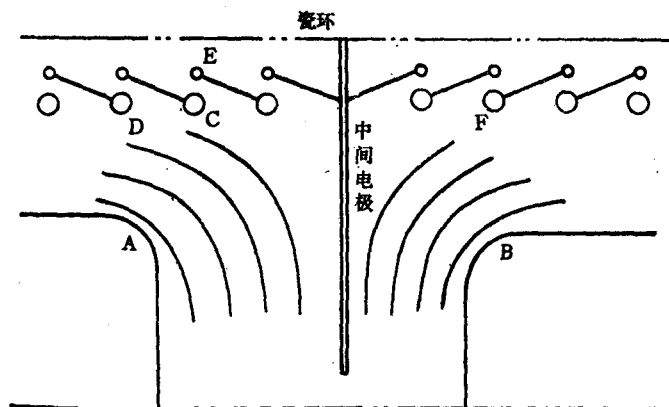


图 2 加速管内部电场分布

高压电极 A——70 kV/cm；地电极 B——75 kV/cm；C——30 kV/cm，  
D=E=40 kV/cm；F——35 kV/cm。

用 LAP 77 程序<sup>[6]</sup>计算

### 三、加速管的整体结构

加速管分成两段封接，每段有 14 个瓷环，其中和法兰相邻的两个瓷环是 95 瓷，其余 12 个都是高压瓷。瓷环高 60 mm，95 瓷环是直壁，高压瓷环外壁为波纹。瓷环与 2 mm 厚不锈钢片的封接电极用聚醋酸乙烯树脂粘接，每段长 929 mm，两段之间用橡胶 O 圈密封，加速管全长 1858 mm。总体示意图见图 3。

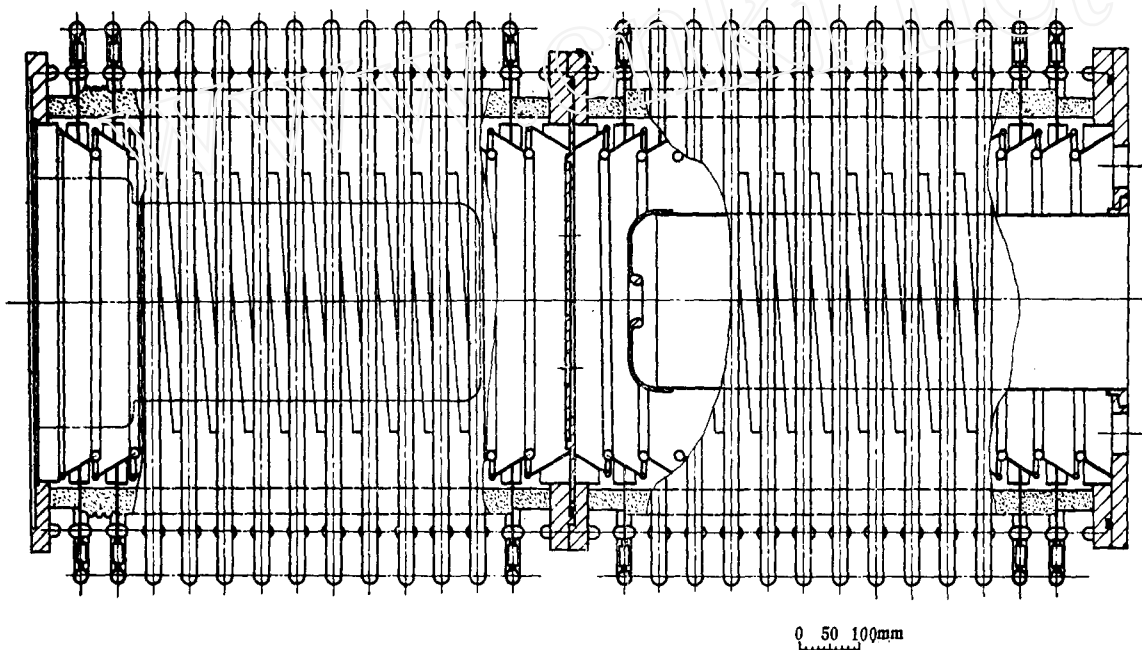


图 3 加速管瓷柱及内电极示意图

为了能测量流经地电极的微放电电流，地电极坐落的底部法兰并不直接接地，用 10 mm 厚瓷环与地绝缘，通过电表接地。高压电极、中间电极和地电极的材料是钛合金 (TC 4)，光洁度达到  $\nabla 10$ 。

为了防止反向电子或次级粒子轰击瓷环内壁，我们使用碟式屏蔽电极，由纯钛 (TA1) 制成，光洁度  $\nabla 9$ ，屏蔽电极是可拆卸的，在加速管封接完成后才装上。

高压电极、中间电极和地电极的中心孔分别为  $\phi 20$ ，40 和 50 mm。中间电极上还有 8 个  $\phi 50$  mm 的旁侧抽气孔。

加速管外每个封接电极上用 4 个顶杆支起一个电晕环，此环是用 25 mm 不锈钢管制成，直径为 875 mm，加速管外每一封接电极片上还装有 2 个分压电阻和 2 对放电球隙，分压电阻是金属膜电阻，用 6010 环氧树脂加 1—2% 氮化硼粉末真空浇铸成香蕉形电阻板，每个阻值为  $108 \pm 2 \text{ M}\Omega$ 。在 27 kV 时电流为  $250 \mu\text{A}$ ，因此总分压电流为  $500 \mu\text{A}$ 。这些电阻在长期高压锻炼及运行过程中工作可靠。保护球隙为 2 cm，约 60 kV 下击穿。

我们曾对每节加速管瓷环用直流高压测量，在 30 kV 下长期不打火，因此瓷管本身的耐压至少可达 840 kV。

#### 四、加速管封接工艺<sup>[6]</sup>

我们的加速管直径与其他国家预注入器加速管相比是属于最大之列的，因此封接难度很大。困难之一是封接件大，其表面平整度不容易保证，特别是金属电极加工后会变形（从加工完成到具体封接总有一段时间），往往加工达到了 0.03mm 平整度要求，但到封接前测量又超过了。在 Argonne 实验室，我们了解到他们对电极加工工艺有特殊要求，很费工时。而我们是设计方面来加以解决，不采用刚性结构，而是用 2mm 不锈钢片作封接电极（内径 586mm，外径 755mm），在  $\sim 5 \text{ kg/cm}^2$  封接压力下此薄片是没有刚性的。实践证明效果很好。

设计中还需要采取措施的是解决封接件因热膨胀系数不同而产生的应力问题，特别是和法兰相邻的瓷环，受到的应力最大。不锈钢的热膨胀系数  $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，而瓷约  $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。由于钛在  $15^\circ\text{C}$  时热膨胀系数为  $8.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，与瓷很接近。国外有的高压型加速管采用全钛金属结构（包括法兰）。但钛是昂贵金属，我们的法兰和封接电极仍用不锈钢，只是在和法兰封接处采用钛垫片过渡作为夹层。封接后加速管经常处于  $9^\circ\text{C}$  低温下，搬运过程中有 1h 在零下气温，都未发生问题。

在封接工艺中，针对工件很大这一特点，在下列三方面作了改进：（1）用 205 型工业洗涤剂超声波清洗代替三氯乙烯清洗；（2）用喷枪涂胶（工件放在转盘上）代替毛笔涂胶；（3）用远红外干燥器烘干胶液代替烘箱烘干。

胶液为聚醋酸乙烯脂树脂，封接时加温至  $165^\circ\text{C}$  恒温 2h，降温速度要慢，对消除封接应力很重要。

加速管封接后经氦质谱仪检漏（灵敏度约  $10^{-9} \text{ Torr}\cdot\text{l/s}$ ），无漏。并经自重强度悬吊试验，出夹具前悬吊 5 分钟，未发现问题。

#### 五、加速管高压运行特性及其分析

高梯度加速管有两个特点：其一是它的电极采用钛或钛合金，这些材料比不锈钢更容易溅射，所以要在高压锻炼时限制放电功率；其二是它对真空中有机蒸汽含量极为敏感，根据 CERN 的经验，此分压应控制在  $1 \times 10^{-10}$  托以下，加速管才有良好的高压特性（比  $10^{-8}$  托分压时的耐压几乎高一倍）。

我们的实际情况在这两方面都是不利的，高压锻炼时放电功率过大，后来采用加速管前后半段分开锻炼能较快达到锻炼效果，就说明了这一点。分段锻炼电压只是总电压的一半，放电功率也减小一半。对我们的真空系统，虽然真空度可达到  $10^{-7}$  托，但测得的有机蒸汽分压是  $10^{-8}$  托，大大高于 CERN 规定的值。这表现在加速管经过锻炼后，不能长时间保持锻炼的效果。退锻率（deconditioning rate）约为  $20 \text{ kV/h}$ ，这是衡量真空系统清洁程度的一个指标。在清洁的真空系统，此值只有  $1 \text{ kV/h}$ ，说明我们的真空系统不够干净。

在目前的真空条件下，要使加速管长期保持 750 kV，只有提高加速管工作气压，这是 KEK 的经验<sup>[4]</sup>，我们在充氢后，加速管气压从  $10^{-6}$  托提高到  $(0.6-2) \times 10^{-4}$  托，

750 kV 可长期运行, 放电次数每 4—5 h 1 次, 这是因为碳氢化合物分压是由系统污染情况决定的, 对一定的系统, 它是一个不变量。氢气气压提高后,  $2 \times 10^{-4}$  托时平均自由路程将从  $1 \times 10^{-6}$  托的 50 m 下降为 25 cm, 可有效地干扰有机分子自由淀积在电极表面。

加速管在 750 kV 下, 50—200 mA 束流都可顺利通过, 说明原来的设计思想是正确的。

## 六、结 论

实践证明, 高梯度加速管对于强流加速器是必不可少的, 它保证了强流束加速后具有良好的束流品质。但要求有极为干净的真空系统, 有机蒸汽分压应小于  $10^{-10}$  托, 并注意控制高压锻炼时放电功率尽量小。

双隙加速场证明可以适应较大的束流变化 50—200 mA, 此加速管在真空系统不够干净条件下, 采用提高工作气压至  $(0.5-2) \times 10^{-4}$  托, 可长期工作在 750 kV 下。从 1982 年 7 月至今已正常运行 3 年多。

机械设计得到 CERN 750 kV 加速管设计图纸作参考。核工业部第二设计院李建国、左民同志承担了图纸设计工作。机械工业部电器院王大明, 本所丛沿炳, 特别是先锋厂王顺发同志参加了结构的讨论。先锋厂周金华同志对钛电极加工工艺作出了贡献。机械加工是上海先锋电机厂。95 瓷瓷环由上海硅酸盐所红星工厂, 高压瓷瓷环由抚顺电瓷厂, 聚醋酸乙烯树脂由上海合金成树脂研究所提供, 在此一併致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Curtis, C.D, Proc. of the 1976 Proton Linear Accel. Conf. Sept. 14—17, 1976, Chalk River. p. 179.
- [2] Huguenin J. et al., CERN 65-23, PS/4856, June 1965.
- [3] Huguenin J. et al., Paper presented at 1966 Linac Conf. at LASL, p. 355.
- [4] Fukumoto, S. et al, KEK-PREPRINT-10, Sept. 1976.
- [5] 郁庆长、夏德红编, JDQL 和 LAP 77 程序, 高能所内部资料
- [6] 陈鉴璞等, 750 kV 大型高梯度加速管的封接, 待发表。

## A 750 kV OPEN-STRUCTURE HIGH-GRADIENT ACCELERATING TUBE

CHEN JIANPU YU QINGCHANG MA XINGHUA QIAN JULING  
SHU CHUANYU ZHU RENQUAN XIA DEHONG QIU HONG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

### ABSTRACT

A open-structure high-gradient accelerating tube was designed and constructed. This operates at 750 kV across two quasi-constant field accelerating gaps which were made of titanium alloy electrodes, corresponding to an average gradient of 30 kV/cm. Pulsed proton beam currents of 50-200 mA was accelerated through the tube. It has been operating in the 750 kV pre-injector since 1982. The effect of vacuum cleanliness on deconditioning rate was also discussed.

**Key words** Pre-injector, High-gradient accelerating tube, Deconditioning rate.