

V2 质子静电加速器的改进与现状*

沙 因 刘柱华 李五桂 张彩霞
杨振军 龚建华 王 昕 罗 博

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

摘要 V2质子静电加速器(简称V2)在1958年建成,已运行40年.现在最高运行能量为2.4MeV;质子束流强度为微安量级(0.6—2.5 μ A).磁分析器磁铁励磁电流电源稳定度为 $\pm 0.01\%$,加速器能量分辨率可达1%.改变了输电带的分压装置,使更换输电带更为方便.添加了三岔管道,增加了外束.从70年代以来,V2主要用于核分析工作.最近开展了用离子感生发光法对斜长石中铁的不同化学价态 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 进行了分析, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 光谱峰分离,清晰可辨.

关键词 质子静电加速器 三岔管道 束流强度 能量稳定度 离子感生发光法

1 前言

1958年建成的我国第一台能量为2.5MeV的质子静电加速器(简称V2)^[1]曾在我国核科学研究和培养人才方面起到过重要作用.从V2建成到现在已有40年的历史,至今依然能够稳定运行,继续开展核技术的分析应用研究工作.

2 输电带内侧分压棍和保护棍的拆除

用绝缘材料制成的输电带是范德格喇夫型静电加速器的重要部件,它的性能好坏对加速器的电压特性起着决定性的作用.它不但为高压电极提供所需的电荷,而且为离子源提供所需的功率.输电带的安装方法有3种:(a)不装分压棍的情形,(b)在输电带内、外侧都装上分压棍的情形,(c)只在输电带外侧装分压棍的情形.其具体安装方法如图1所示^[2].V2静电加速器输电带的安装原来采用静电加速器上常用的(b)种方法.

输电带是静电加速器的一个比较薄弱的环节,它有一定的寿命.如果输电带沿面放电利害时,其寿命可短到数十小时.如果输电带的使用寿命到了,需要把旧输电带拆除,换上新的输电带.每次更换输电带,需拆掉所有分压片等部件,技术要求高,工作量大,十

1998-05-04收稿

* 中国科学院核分析技术开放研究实验室部分资助

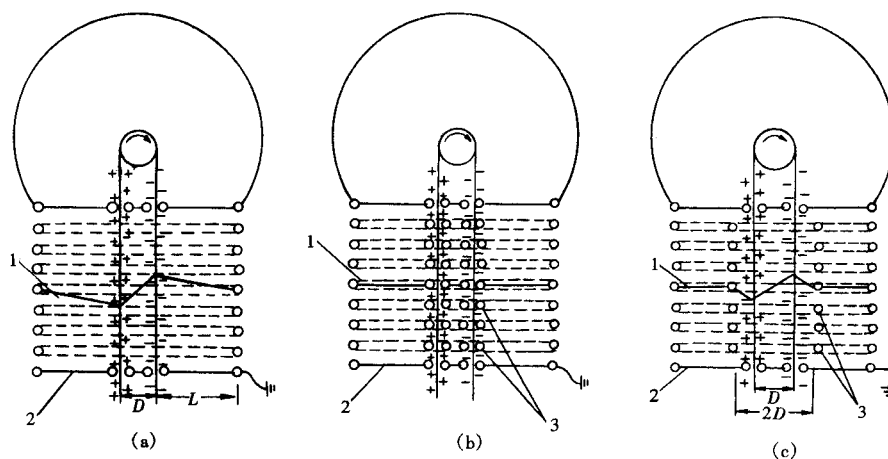


图 1 分压棍安装方法示意图

(a) 不装分压棍; (b) 有分压棍; (c) 只在输电带外侧装分压棍。

1: 等势面, 2: 底板, 3: 分压棍, D : 转轴直径, L : 输电带与分压环的距离。

分费时。我们把输电带内侧分压棍和保护棍全部予以拆除, 即变成只在输电带外侧装分压棍和保护棍的情形, 也就是把 (b) 种方法改变为 (c) 种方法, 使输电带的拆换变得简便得多, 只需要把输电带的上、下转轴拆、装一下, 再把输电带换装上去, 从而可免除分压片、保护棍、绝缘柱和分压电阻的拆换之劳, 不但大幅度提高了工作效率, 节省了大量时间和人力, 还避免了有关零部件的损坏, 延长了加速器寿命, 在实际运行中 V2 的最高能量仍达 2.4MeV。

3 三岔管道安装与调试

V2 质子静电加速器在 1958 年建成时, 没有三岔管道。随着我所离子束分析技术的发展, 为了加速器束流调试的方便和提高束流利用效率, 在 1994 年把原来的单一管道改变为三岔管道。V2 三岔管道的结构和安装示意图如图 2 所示。

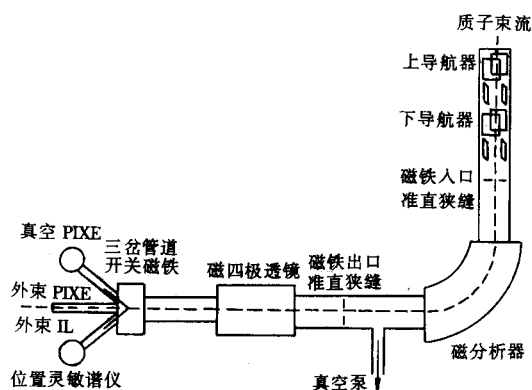


图 2 V2 静电加速器三岔管道示意图

如图 2 所示, 从质子束的具体运行路径来略述各主要部件的功能作用: 从 V2 质子静电加速器加速管底端引出的质子束流首先进入到导航器。导航器由上导航器和下导航器两部分组成。每个导航器都由两对平行金属板组成, 两对平行金属板之间互相垂直。每对平行金属板上加正、负 5000V 的静电压后, 在平行金属板之间产生静电场, 当质子束通过平行金属板时, 在静电场的作用下, 质子束流的运动方向会发生

生静电场, 当质子束通过平行金属板时, 在静电场的作用下, 质子束流的运动方向会发生

改变. 平行金属板上所加的正、负静电压在 0—5000V 之间连续可调. 由于导航器的使用, 质子束流的运动方向可以在东西南北四个方向连续可调, 把质子束调到加速器加速管道的几何中心位置上. 质子束斑的直径大小由准直狭缝的宽度决定. 改变处于几何中心位置上的准直狭缝的宽度大小, 就可以达到改变质子束斑直径大小的目的. 准直狭缝的宽度分别为 1mm, 2mm, 3mm, 4mm 和 5mm. 通过准直狭缝的质子束打到石英玻璃上会发出可见光. 从其附近的观察窗观测到的兰光或红光点直径大小确定质子束斑直径的大小; 根据质子束斑直径的大小和所在的位置来判别质子束流是否在几何中心位置和质子束流的聚焦情况. 当处于加速管道几何中心位置上的质子束流通过磁分析器时, 在磁分析器磁场的作用下质子束流偏转 90° 后变为水平方向. 在磁分析器人口、和出口(物点和像点)的准直狭缝可以用来观测质子束流的聚焦情况, 借以调试质子束流. 由磁分析器出口准直狭缝的上、下板得到的电信号经过负反馈电路的作用, 对质子束流的能量大小及其稳定度进行控制. 磁分析器能够把能量为 2.5MeV 的质子 (H_1^+), 氢分子 (H_2^+) 和氢三子 (H_3^+) 三种束流偏转 90° . 通过调节磁四极透镜的电流强度可对从磁分析器出口出来的质子束流进行聚焦和散焦调节, 以满足各种实验的要求. 当质子束流到达三岔管道头的位置时, 在三岔管道开关磁铁磁场的作用下, 质子束流可以分开为东管道、中间(正南方向)管道和西管道. 磁分析器和开关磁铁的电流均由高稳定度 (0.01%) 电源提供. 西管道与真空 PIXE 靶室联接, 用来进行常规宽束真空 PIXE 或 NRA 分析; 中间管道装了由我们自己研制的机械真空自动保护阀门, 用来进行外束离子感生发光 (IL) 研究和外束 PIXE 研究; 东管道为将来联接高分辨率的位置灵敏探测器预留位置, 以开展化学价态研究.

4 性能测试

4.1 能量刻度

4.1.1 磁场和磁分析器励磁电流稳定度

我们在加速器未处于运行状态时, 在真空盒内部用 Tesla 计测定磁分析器的磁感应强度. 用两台 Tesla 计来测定, 这两台仪器并用, 互相校核. (1) Teslameter SG-3-A; (2) Teslameter PG-5. 用两台仪器所测的结果互相一致. 我们测量了不同磁分析器励磁电流 (10—177A) 时的磁感应强度 (0.06—0.90Tesla). 测量结果表明, 磁分析器励磁电流与磁感应强度之间接近于线性关系, 详见图 3.

由图 3 可见, 当励磁电流 $I < 100A$ 以内时, 磁分析器励磁电流与磁感应强度之间呈线性关系, 即 $B(\text{Tesla}) \propto 61.3 \times I(\text{安培})$, 式中 B 为磁分析器的磁感应强度 (Tesla), I 为磁分析器的励

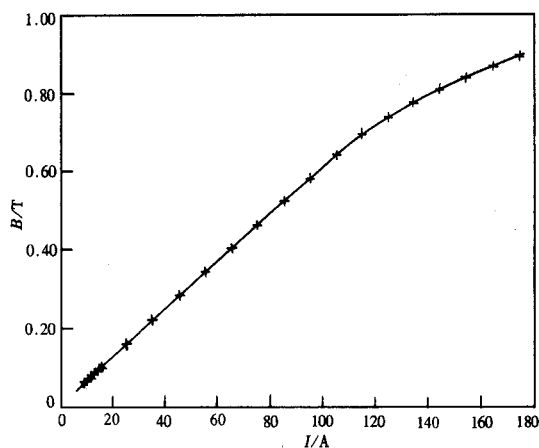


图 3 磁分析器励磁电流与磁感应强度关系图

磁电流强度(安培). 磁分析器的磁场稳定度由磁分析器的励磁电流的稳定度来推算. V2 质子静电加速器上用的磁分析器励磁电流电源是北京变压器厂的硅整流高稳定度稳流电源(型号 KGYS-300/180)其标称电流稳定度为 $\pm 0.01\%$. 我们对磁分析器励磁电流的稳定度进行了测定. 在测试过程中(约 10 小时), 磁分析器的励磁电流的稳定度为 $\pm 0.01\%$, 磁分析器磁场稳定度推算为 $\pm 0.01\%$.

磁分析器励磁电流的长时间稳定度的测定值, 其数据如表 1 所示.

表1 在10小时的长时间内磁分析器励磁电流强度的测定值

测量时刻	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	14:00	16:30	17:00	18:00
电流强度(A)	47.18	47.19	47.19	47.18	47.17	47.17	47.17	47.17	47.17

由表 1 可见, 在 10 小时时间内, 励磁电流强度为: 47.177 ± 0.009 , 其稳定度为: $\pm 0.02\%$. 由此推算的磁分析器的磁场长时间稳定度为: $\pm 0.02\%$.

4.1.2 $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)$ 共振核反应的测量

V2 质子静电加速器高压电极的电压, 也即质子束流的能量, 由感应电压(旋转伏特计)读数(mV)乘以能量刻度系数而得. 我们用核共振方法($^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)$ 反应)来测定加速器的能量刻度系数、能量分辨率. 核反应所用的核靶的物质为氟化钠(NaF), 靶厚 3mm. 用 NaI(Tl)- γ 能谱仪测定 $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)$ 反应激发函数. 实验条件如下: 质子能量 $E_p = 0.872\text{MeV}$, 感应电压(旋转伏特计)读数(V): 2.805, 2.808, 2.800, 2.801, 平均读数 2.8035 ± 0.0037 (V); 能量刻度系数: $0.872/2.8035 = 0.311$ (MeV/V).

厚靶核共振方法 $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)$ 反应测量的核反应产额实验结果表明, 在质子能量 $E_p = 0.872\text{MeV}$ 时, 对应的磁分析器的曲率半径为 450mm, 励磁电流强度为 50.20A, 分析磁铁的相应磁场强度为 0.3105T, 由此算出的 K 值为 $0.09192\text{MeV}/10^{-2}\text{T}$ ($K = E_p/B^2$, 式中 E_p 为质子能量(单位: MeV), B 为分析磁铁的磁场强度(单位: T)), 实验测定值与理论计算值在 5.5% 内符合.

在三岔管道情况下, 当物、象缝宽度 W 为 1mm, 曲率半径 $a = 450\text{mm}$, 物点至磁铁边缘的距离 $l = 900\text{mm}$ 时, 能量分辨率的理论计算值为 1.1% ^[2]. 在通常情况下, 能量分辨率的实验测定值往往好于能量分辨率的理论计算值^[3]. 因此, V2 质子静电加速器在安装三岔管道以后, 把物、象缝宽度置为 1mm 时, 其能量分辨率可达到 $\sim 1\%$.

表2 在不同高压条件下, 各种离子束流强度的测定

高压指示 (MV)	离子 种类	磁场强度 (Tesla)	励磁电流 强度(A)	准直狭缝 宽度(mm)	靶上束流强度(μA)		
					东管道	中管道	西管道
0.87	H_1^+	0.3105	50.20	2	0.5	0.5	0.6
				5	2.5	2.5	
1.5	H_1^+	0.3930	63.59	2		1.5	
1.5	H_2^+	0.5430	87.72	2		3.8	
1.5	H_3^+	0.6860	110.94	2		45	
2.4	H_1^+	0.5015	81.11	2	0.60	0.60	0.70
2.4	H_2^+	0.7320	118.35	2		2.0	
2.4	H_3^+	0.9820	158.77	2		15~18	

4.2 束流强度测量

用中国科学院上海原子核研究所制造的束流积分仪测量法拉第筒收集的电流。紫铜材料制成的法拉第筒内径 20mm, 深度 50mm。

在各种能量下, 各种离子束流强度如表 2 所示。

根据 $E_p = 0.872\text{MeV}$ 时刻度的 K 值和磁场强度的读数计算出的各种离子 H_1^+ , H_2^+ , H_3^+ 的能量值与由感应电压(旋转伏特计)读数推算出的这 3 种离子的能量在 7% 误差范围内符合。

5 斜长石中铁的化学价态

在三岔管道安装调试以后, 我们在研制成功机械真空自动保护阀门的基础上, 开展外束质子激发 X 荧光(PIXE)分析和外束离子感生发光(IL)相结合的分析实验。外束离子感生发光(IL)实验结果如图 4 所示。我们用外束离子感生发光法对地质样品斜长石中元素铁的价态进行了直接测定分析。用 Si(Li) 探测器测到的外束质子所经途中空气中 Ar 的 X 射线峰面积作监视归一来代表外束质子电荷的归一。外束离子感生发光法测定: 当质子外束轰击地质样品斜长石(钙长石)时产生了各种波长的荧光, 用 16 个滤色分光片分光, 用光电倍增管对通过某一个滤色片的波长的光进行测定。对从光电倍增管测到的计数进行数据处理, 得到各个波长的实验点, 实验数据拟合结果如图 4 中的拟合曲线所示。

在波长为 553nm(2.241eV)和 682nm(1.817eV)附近出现了两个峰(波长间隔 129nm, 能量间隔 0.424eV), 即为铁元素二价和三价(Fe^{2+} , Fe^{3+})光谱峰, 其中 Fe^{3+} 光谱峰清晰突出, Fe^{2+} 光谱峰也可确认。 Fe^{2+} , Fe^{3+} 两能峰的能量间隔只有 0.424eV。本法灵敏度好, 分辨率高(半高宽 $FWHM$ 约为 0.15eV), 详见参考文献[4]。

我所先后有三十多人三岔管道工作付出了辛勤劳动, 其中有范景云、肖意轩、胡力东、蔡志国、徐建铭以及原 V2 质子静电加速器组的许多同志。在三岔管道的安装调试过程中得到高能物理所核技术应用研究部工厂朱兆玺等同志的大力配合。在北京大学重离子物理研究所巩玲华教授、王建勇教授、沈定予教授和北京师范大学低能核物理研究所李桥教授的帮助下完成了三岔管道有关性能指标的验收测试工作。叶铭汉院士自始至终对本项目给予了指导、关怀和支持。张天保研究员为三岔管道的有关问题与我们进行了有益的讨论。对他们的工作和支持一并表示衷心感谢。

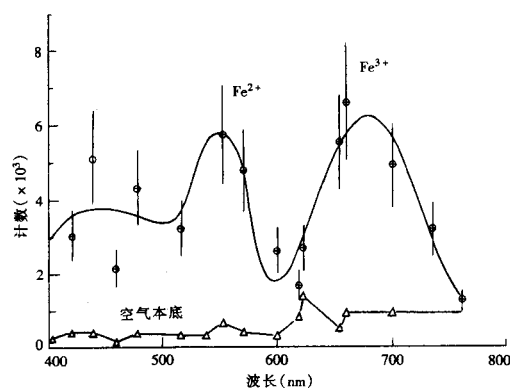


图 4 斜长石中 Fe^{2+} , Fe^{3+} 的离子感生发光光谱图

参 考 文 献

- 1 Ye Minghan, Sun Liangfang, Xu Jianming et al. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 1963, **19**(1):60—69
(叶铭汉, 孙良方, 徐建铭等. 物理学报, 1963, **19**(1):60—69)
- 2 Ye Minghan, Chen Jianpu et al. *Electrostatic Accelerator* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1965. 144
(叶铭汉, 陈鉴璞等. 静电加速器. 北京: 科学出版社, 1965. 144)
- 3 Ye Minghan, Chen Jianpu et al. *Electrostatic Accelerator* (in Chinese). Science Press, Peking, 1965. 211
(叶铭汉, 陈鉴璞等. 静电加速器. 北京: 科学出版社, 1965. 211)
- 4 Sha Yin, Liu Zhuhua, Wang Guangming et al. *Rock and Mineral Analysis* (in Chinese), 1996, **15**(4):274—278
(沙因, 刘柱华, 王观明等. 岩矿测试, 1996, **15**(4):274—278)

Improvements and Status of the Proton Electrostatic Accelerator, V2 *

Sha Yin Liu Zhuhua Li Wugui Zhang Caixia Yang Zhenjun
Gong Jianhua Wang Xin Luo Bo

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract The proton electrostatic accelerator, V2 completed in 1958 has been operated for 40 years. At present, the highest energy is 2.4 MeV. The intensity of the proton beam is 0.6—2.5 μ A. The stability of the power supply for the magnetic analyzer is $\pm 0.01\%$. The energy resolution of the proton beam is 0.1%. The arrangement of the equipotential rod along the charging belt was changed from the original design, the dismantling and installing of the belt takes much less time and labor. A three forked vacuum pipe was installed, which can be used to extract external proton beams. This accelerator is mainly used for nuclear analysis since the seventies. Recently the ionoluminescence (IL) method was used to study the chemical states of iron in a plagioclase sample with the external proton beam, both ferrous and ferric iron peaks (Fe^{2+} , Fe^{3+}) from the plagioclase sample were detected in the IL emission spectrum.

Key words proton electrostatic accelerator, three forked pipe, intensity of ion beam, energy stability, Ionoluminescence

Received 4 May 1998

* Project Was Partly Supported by Laboratory of Nuclear Analysis Techniques, Academia Sinica