

科学技术报告汇编

(内部资料)

第三集下册



中国科学院近代物理研究所

一九七九年九月

目 录

Y—150回旋加速器调整 DH^+ 离子束流的工作总结	(1)
1.7米回旋加速器1:3模型磁铁实验	(13)
D电路谐振频率自动微调	(21)
1.5米回旋加速器运行时的辐射剂量场	(26)
180°大型重粒子磁谱仪的调测	(37)
一个转动密封的飞行时间靶室	(48)
一台快前放和恒分甄别器	(52)
一台积分电容—电荷泵型束流积分器	(60)
简易时间顺序仪	(67)
金单晶靶的制备	(71)
弗瑞曼型重离子源	(75)
50mm的离子注入Si探测器	(79)
同轴Ge(Li) γ 探测器	(82)
β 绝对测量和 γ 探测器效率的确定	(89)
^{68}Ge — ^{68}Ga 同位素发生器的研制	(96)
用阴离子交换法分离无载体放射性同位素 ^{109}Cd	(108)
Co^{57} 穆斯堡尔源的制备	(113)
纯化氚中 He^3 的光谱测定	(119)
用带电粒子活化法研究内燃机油抗磨损性能	(124)
14兆电子伏中子对氟里昂—113的辐射化学实验	(131)
甘肃省某地磷矿石、磷肥和某地区土壤、农家肥中微量铀的测定	(136)
某地区×终公社和×湖公社磷肥试验地的麦粒和麦秆中微量铀的分析	(140)

Y—150回旋加速器

调整 DH^+ 离子束流的工作总结

四室运行组 李学宽

前 言

一九七〇年以来,这台加速器的磁场、离子源和高频系统经过改进和调整,就逐步地实现了对碳、氮、氧 (C_{12}^{14} 、 N_{14}^{15} 、 O_{16}^{18}) 重离子的加速。加速 C_{12}^{14} 、 N_{14}^{15} 、 O_{16}^{18} 三种重粒子的能量分别为74.60、100.40、87.00兆电子伏,外靶(J_{78})束流强度分别为 $4 \times [5]$ 、 $0.2 \times [5]$ 、 $0.6 [5]$ 微安。在重离子核物理和核化学研究方面做了许多实验工作。

但是,随着国民经济的发展,在工业生产方面提出了用活化方法鉴定高级润滑油质量的应用研究的新课题,同时还提出了制备钴 57 (Co^{57}) 等同位素的生产任务。要完成这些应用方面的任务,必须使这台加速器加速氘核。

一九七五年开始对这台加速器如何实现加速氘核的工作进行了研究和调试。经过对实现加速氘核三种可能方案的研究,确定了加速氘氢(DH^+)的方案,并进行了三次调整后,终于实现了加速 DH^+ 离子的可行途径。 DH^+ 离子的能量为18.15兆电子伏,而氘核的能量是12.10兆电子伏。外靶(J_{78})束流强度为 $2.5 \times [5]$ 微安,内靶(J_{38}^{KK})束流强度为 $32 \times [5]$ 微安。多次做了活化部件及制备钴 57 (Co^{57}) 同位素的工作,已经取得了比原来预计还要好的满意结果。

一九七六年初,对加速 DH^+ 进行了提高束流强度的调整工作后,使内靶和外靶束流强度分别达到 $170 \times [5]$ 和 $13.5 \times [5]$ 微安。在照射内靶($R = 505$ 毫米)过程中束流强度可达 $450 \times [5]$ 微安以上。

二 加速氘核方案的考虑

在这台加速器上实现加速氘核有三种可能的方案。

第一种方案——复原一九七〇年以前加速轻离子时的工作状态。加速氘核是无问题的,但是这种方案的主要问题是工作量太大,需时间过多。该方案只能在迫不得已的情况下采用。

第二种方案——利用加速重离子的高磁场实现对氘核的加速。加速氘核所需的工作频率为 $f_r = 12.78$ 兆周,必须对高频谐振电路(馈线的耦合环位置由加速 C_{12}^{14} 离子时的第

四孔移至第二孔)及高频机进行调整。氘核能量为28.00兆电子伏。此方案的主要困难是束流引出存在比较难以解决的问题,需要引出束流时偏转板工作电压估计约在120仟伏,大大超过引出系统的最高允许工作电压(90仟伏),同时高压电源也是无法满足的。

第三种方案——加速氘氢离子 DH^+ 。经过考虑在维持加速 C_{12}^{+4} 重离子的工作状态下,实现对 DH^+ 离子的加速是比较适宜的。氘氢离子 DH^+ 是由氘核和氢原子形成的原子团, DH^+ 和 C_{12}^{+4} 两种离子荷质比(Z/A)是相同的($1/3$),所以用加速 C_{12}^{+4} 的条件加速 DH^+ 是完全可以实现的。 DH^+ 离子的能量是19.98兆电子伏,而氘核能量是12.67兆电子伏。该方案的根本优点是无须对这台加速器的工作状态进行大的更动,只须花费极少的时间更换离子源的送气成份,即可进行调束工作。

经过对以上三种方案进行了研究比较后,决定选用第三种方案。因为这种加速 DH^+ 的方案最简便,不大改变加速重离子的条件,花的时间不多,只须在加速器工作间隙就可进行调束工作,并不影响加速重离子的正常工作。

三 加速 DH^+ 离子的几个问题

活化部件和制备同位素 Co^{67} 对 DH^+ 离子束的技术指标是:氘氢的能量 $WD \geq 8$ 兆电子伏;外靶(J_{7A})束流强度在 $10 \times [5]$ 微安以上。

要加速 DH^+ 离子,必须对有关氘氢离子的形成和调束工作中的问题进行必要的考虑研究,以便顺利地完 成加速 DH^+ 离子的任务。

1. 有关 DH^+ 离子的几个参数估算

DH^+ 离子的能量 $W_{KDH^+} = 18.98$ 兆电子伏;

氘核的能量 $W_{KD} = \frac{2}{3}W_{KDH^+} = 12.65$ 兆电子伏;

$W_{KD} > 8.00$ 兆电子伏;

高频加速工作电压

$U_F = 197.93$ 仟伏 < 210 仟伏;

高频加速工作电压的频率

$f_F = 8.58$ 兆周;

偏转板所需的工作电压

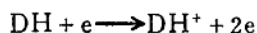
$U_{OTK} = 81.61$ 仟伏 < 90 仟伏。

2. 形成 DH^+ 离子的机制^[1]

当把($D_2 + H_2$)或($DH + D_2 + H_2$)混合气体送入离子源的过程中, D_2 和 H_2 两种气体分子会形成极小比例的 DH 气体分子。

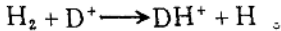
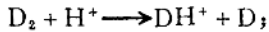
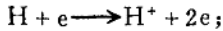
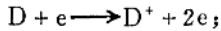
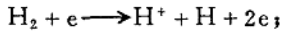
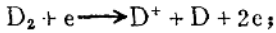
有两种形成 DH^+ 离子的机制:

第一种是混合气体中的 DH 分子送入离子源弧腔后,经过游离过程就产生了 DH^+ 离子。即:



这种机制就是由 DH 分子直接产生了 DH^+ 离子。

第二种是大部份的 $D_2 + H_2$ 混合气体进入离子源弧腔后,先游离产生了 D^+ 和 H^+ 两种离子,而弧腔内存在着 D^+ 、 H^+ 、 D_2 和 H_2 等离子和分子,这些离子、分子再进行离子交换,即:



在上述过程中产生了 DH^+ 离子。

DH^+ 离子是按上述两种机制形成的,在形成离子的过程中,与电子能量有很大关系。当电子能量为100电子伏左右时产生的分子离子或原子离子最多(其截面分别为 $\sigma = 10.5 \times 10^{-17}$ 和 2.8×10^{-17} 平方厘米/分子),而电子能量再高对产生分子离子和原子离子都是不利的。根据这一点,在调束过程中,离子源所使用的弧电压选在100伏左右为宜。

送入离子源弧腔内的混合气体有两种:

一种是分别电解重水和水产生的 D_2 和 H_2 ,再分别送入离子源的送气管道内。

另一种是电解按一定比例(由实验决定最佳比例)混合的重水和水,就产生了 $DH + H_2 + D_2$ 的混合气体。这种混合气体在电解过程中就形成了一定比例的 DH 分子,同时在混合气体中的 D_2 和 H_2 也会形成一些 DH 分子。这样就大大提高了 DH 分子的比例。

可能后一种比前一种混合气体中的 DH 分子比例要高些,而且在游离过程中形成的 DH^+ 离子也更多些。

3.对离子源弧腔内的气压估计

根据游离气体分子的碰撞理论^[1],可以算出游离气体分子的平均自由程,由此就可估计弧腔内的适宜气压。

这台加速器的离子源弧腔的内径为 $\phi 6.0$ 毫米,要确保游离效率最佳,必须使气体分子的平均自由程 $lm \geq 6$ 毫米。这样才能满足要求。从此条件估计腔内的气压约在 $1 \times 10^{-1} - 8 \times 10^{-2}$ 毫米汞柱的范围内。同时预计送气量要大(对重离子而言),约在10毫升/分左右。在这样大的送气量下,真空室内的气压估计要高于 $B_k < 2.5 \times 10^{-5}$ 毫米汞柱(在使用间热式离子源的条件)。

因真空室的气压增高,会造成在加速 DH^+ 离子过程中产生严重的电荷交换现象,同时也会引起高频加速工作电压的严重打火现象。这都将给加速 DH^+ 离子带来极不利的影响。

4.对外靶束流强度的估计

根据提出的束流指标:外靶束流 $J_{7A} \geq 10 \times [5]$ 微安的要求要在短时间内是比较难以达到的。如果使用间热式离子源可能困难更大,由于送气量太大,严重影响真空室内的气压,这点对提高束流强度是很不利的,估计在这种情况下是达不到要求的。

根据这台加速器的具体情况,加速 DH^+ 离子使用直热式离子源比较合适。可以保证真空室内的气压不升高,经过仔细调束后完全可以达到对束流强度要求的技术指标。初步估计外靶束流强度的水平可达到加速 C_{12}^{14} 离子时的外靶束流强度指标水平。

四 束流的调整工作

我们采用了第三种加速 DH^+ 离子的方案。基本上完全使用加速 C_{12}^{14} 离子的所有条件。只是把原来给离子源送二氧化碳(CO_2)气体改送 D_2 和 H_2 混合气体(分别用两只球胆装)。

离子源(间热式)起弧后,对离子源的位置和加速器的电气参数(在 C_{12}^{14} 离子时数值)做了微调后,就在终端半径 $R_K = 650$ 毫米处得到流强 $J_{3共}^{R_K} = 23 \times [5]$ 微安,外靶上无束流。此时在加速器大庭园门内口处中子剂量数值大于3500中子/厘米²秒,此值比加速 C_{12}^{14} 离子时大得多,同过去加速 D^+ 的数值差不多。另外,在 R_K 处用流强 $J_{3共}^{R_K} = 25 [5]$ 微安照射了两小时的铁靶,并对其活性做了检验,从以上情况初步判断是加速了 DH^+ 离子。

再进一步微调电气参数后(特别是主磁场),在外靶上就得到了束流。其原始数值是:

$$J_{3共}^{R_K} = 25 \times [5] \text{ 微安};$$

$$J_0 = 0.28 = [5] \text{ 微安};$$

$$J_{7A} = 0.15 \times [5] \text{ 微安}$$

其引出效率为:

$$\eta_{3.6} = 1.10\%;$$

$$\eta_{6.7A} = 53.50\%。$$

从以上情况分析,引出效率太低。引出效率不高的原因估计是 DH^+ 离子占的比例很低引起的。这主要受送的混合气体和离子源的影响。用电解按一定比例混合的重水和水所产生的 $DH + D_2 + H_2$ 混合气体,并改用直热式离子源后, DH^+ 离子的束流强度就得到了提高。同时,也提高了引出效率。

1. 离子源的调整工作

(1) 气体的影响

我们使用两种气体,一种是分别电解重水和水产生的 D_2 和 H_2 气体;另一种是重水和水按1:1重量比混合后电解所产生的 $DH + H_2 + D_2$ 混合气体。两种气体的实验结果如下:

气体类别	$J_{3共}^{R_K} (\mu A)$	$J_0 (\mu A)$	$J_{7A} (\mu A)$	$\eta_{3.6} (\%)$	$\eta_{6.7A} (\%)$
$D_2 + H_2$	38	0.3	0.11	0.80	37
$DH + D^2 + H_2$	37	2.3	1.2	6.20	48

根据实验结果： $DH + D_2 + H_2$ 混合气体比较好。重水和水按重量比究竟何值最好，这要进一步由实验去决定。

(2) 两种类型离子源的比较

使用两种类型的离子源进行了实验，其结果如下：

类 别	$J_{3共}^{200} (\mu A)$	$J_{3共}^{Rk} (\mu A)$	$J_6 (\mu A)$	$J_{7A} (\mu A)$	$\eta_{\frac{Rk}{200}} (\%)$	$\eta_{3.6} (\%)$	$\eta_{6.7A} (\%)$
间热式	1150	37	2.3	1.1	3.2	6.2	48
直热式	360	36	5.2	2.4	10	14.5	46

根据实验结果，使用直热式离子源比较适宜。送气量约在4毫升/分，比间热式离子源的送气量小三倍多（约在15—25毫升/分）。

两种离子源工作时弧腔内的气压大致是相同的，其值估计约在 8×10^{-2} 毫米汞柱左右。但真空室内的气压却差别很大，分别为 1.5×10^{-5} 毫米汞柱（直热式）和 $(3-4.5) \times 10^{-5}$ 毫米汞柱（间热式）。

2. 调束工作

(1) 调整共振磁场

选用加速 C_{12}^+ 离子的共振加速频率 $f_r = 8.64$ 兆周和中心磁感应强度（共振场） $B_0 = 16.96$ 仟高斯的数值进行调束，内靶上有束流，而外靶上无束流。随后对磁场进行了微调后，其共振磁场 $B_0 = 17.06$ 仟高斯时，在外靶上 DH^+ 离子的流强达到最佳值。

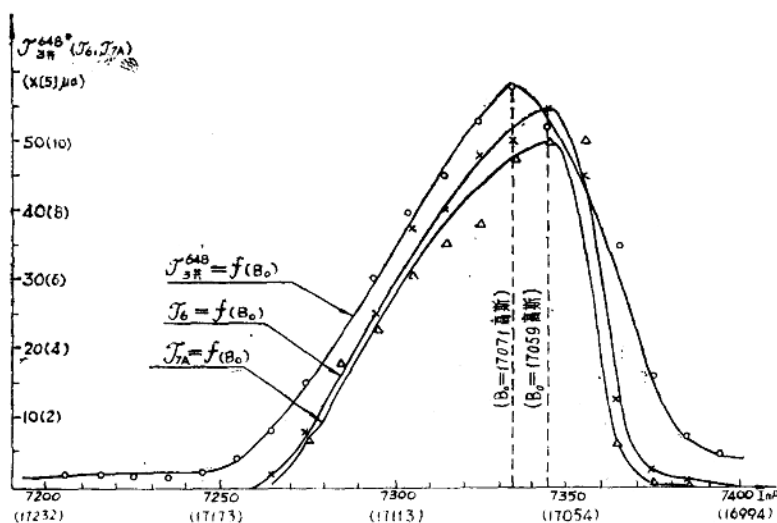


图1 内外靶束流与磁感应强度的关系

$J_{3共}^{Rk}, J_6, J_{7A} = f(B_0)$ 在 $V_{ff} = 107 + 107$ 仟伏， $V_{TK} = 85$ 仟伏， $I_{e.s} = -3.8$ 安培， $U_{BT} = 150$ 伏， $I_{BT} = 1.8$ 安， $I_H = 450$ 安， $1C\Pi = 1480$ 条件下。

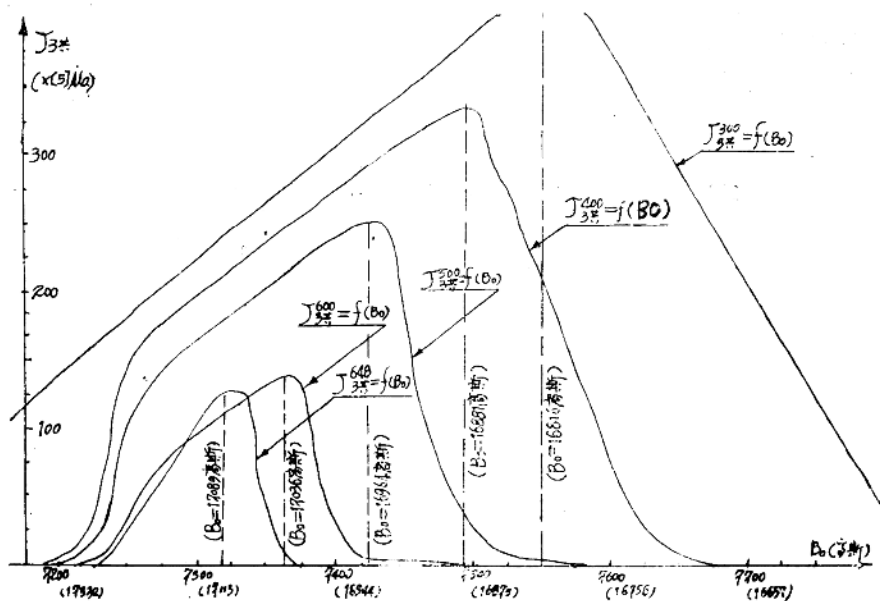


图2 不同半径上内靶束流与磁感应强度的关系 $J_{3共}^{200}, 300, 400, 500, 600, R_k = f(B_0)$ 。条件与图1相同。

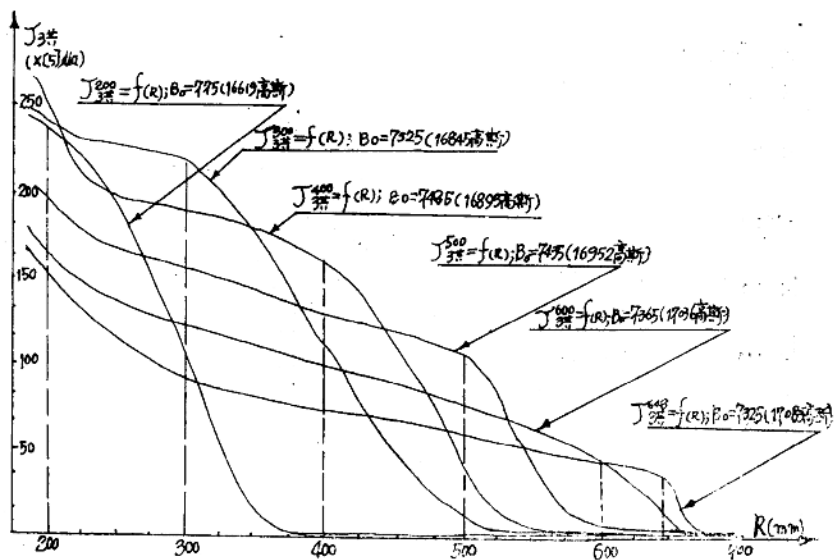


图3 在 $R=200, 300, 400, 500, 600, R_k$ 上调共振磁场下, 内靶束流沿径向分布 $J_{3共}^R = f(R)$ 。条件与图1相同。

图1、图2、图3表示内外靶束流的磁场共振曲线的实验结果。对这些曲线经过处理后就可做出图4的曲线。一条是共振磁场底宽(图4)

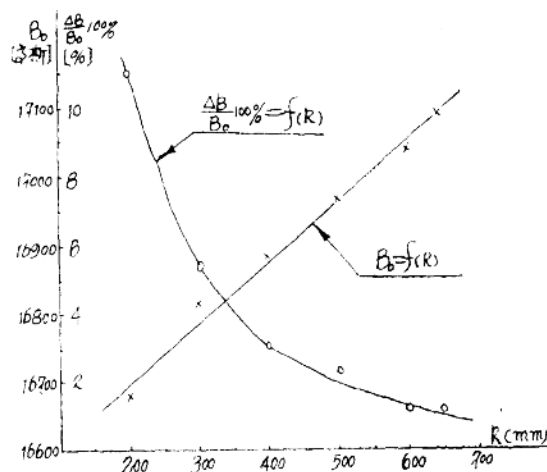


图4 共振磁场曲线底宽与径向半径关系用 $\frac{\Delta B}{B_0} 100\%$ 表示

与径向半径的关系曲线, 磁场共振曲线底宽随着半径的增大而减小; 另一条是共振磁场与径向半径的关系曲线, 是随半径增大而增加, 基本上是直线关系。从以上实验结果可以得出: 加速 DH^+ 离子所选用的共振磁场基本上保证磁聚焦和相移的要求, 因而就保证了足够的 DH^+ 离子的束流强度。

在终端半径和外靶上共振磁场曲线的底宽分别是1.11%和0.77%。由此可知, 在调束过程中要很耐心地认真地调整共振磁场, 在偏离共振磁场 $B_0 \pm 20$ 高斯时, 束流强度大致要减小一半。

(2) D电压和偏转板电压与束流的关系

图5和图6是D电压和偏转板电压与束流的关系实验曲线。D电压增高而内外靶束流也是增大的, 是一条比较陡的上升曲线。在内外靶处的阈电压分别为(60+60)、(70+70)、(75+75)千伏。高频电压愈高愈好, 内外靶流强都可达到最佳值。在工作时, 要确保D盒电压不打火的前提下, 尽可能的选用比较高的工作电压值, 这样能保证足够大的外靶束流。

外靶束流随偏转板电压的增高而增大。当偏转板电压 $U_{0TK} = 82$ 千伏以上, 外靶束流就增加很缓慢(基本上已饱和)。选用偏转板工作电压就在刚饱和时的数值为宜。

(3) 辅助绕组电流与束流的关系

图7是辅助绕组电流与内外靶束流的实验曲线。实验曲线类似于高斯曲线, 有一最佳值。说明 DH^+ 离子在加速过程中运动的几何平面偏低。

另外, 还加了两对方位角绕组(方位在 45° 和 225° 上), 起作用的是在方位角 45° 上

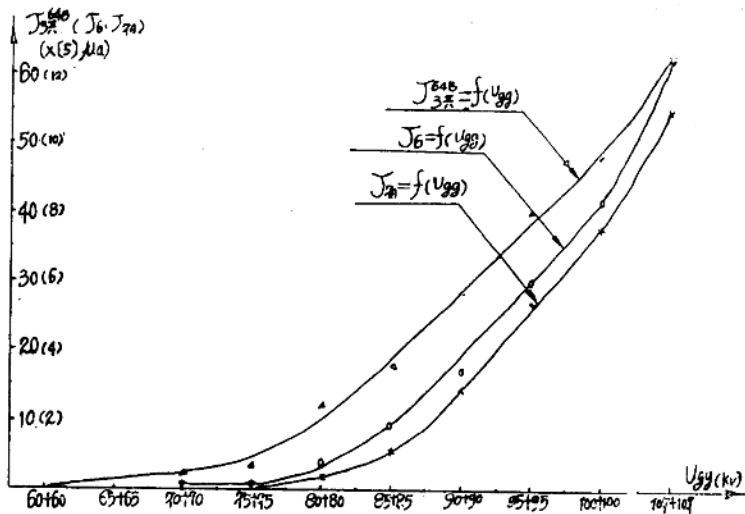


图5 内外靶束流与高频加速电压关系 $J_{3共}^{40}$ 、 J_6 、 $J_{7A} = f(U_{gg})$ 。在 $B_0 = 17.10$ 仟高斯， $I_{e0} = -3.8$ 安， $U_{0TK} = 85$ 仟伏； $I_H = 450$ 安， $I_{BT} = 1.2$ 安， $U_{BT} = 130$ 伏条件下。

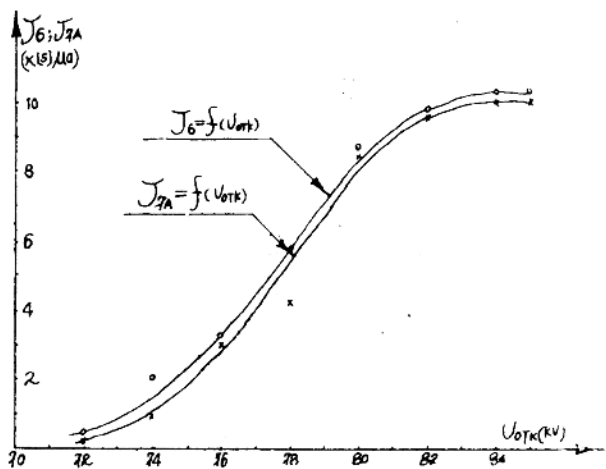


图6 外靶束流与偏转板电压的关系 J_6 、 $J_{7A} = f(U_{0TK})$ 。其条件与图5相同，仅 $U_{gg} = 105 + 105$ 仟伏。

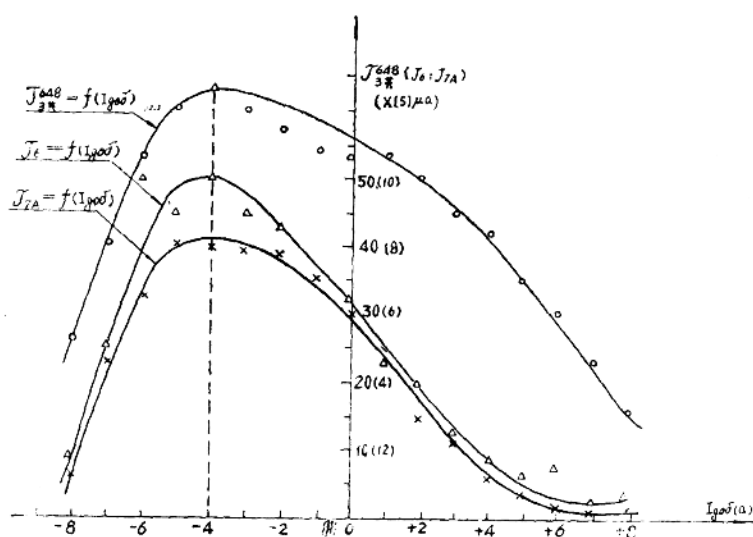


图7 内外靶束流与辅助绕组电流的关系

$J_{3共}^{\mu A}$ 、 J_6 、 $J_{7A} = f(I_{900})$ 在 $B_0 = 17.10$ 仟高斯； $U_{ee} = 107 + 107$ 仟伏； $U_{TK} = 85$ 仟伏条件下。

的一对绕组 ($I = 13$ 安)，其作用是能微弱地改变 DH^+ 离子进入引出系统的方向，使外靶束流略有增加。

(4) 弧功率和送气量对束流的影响

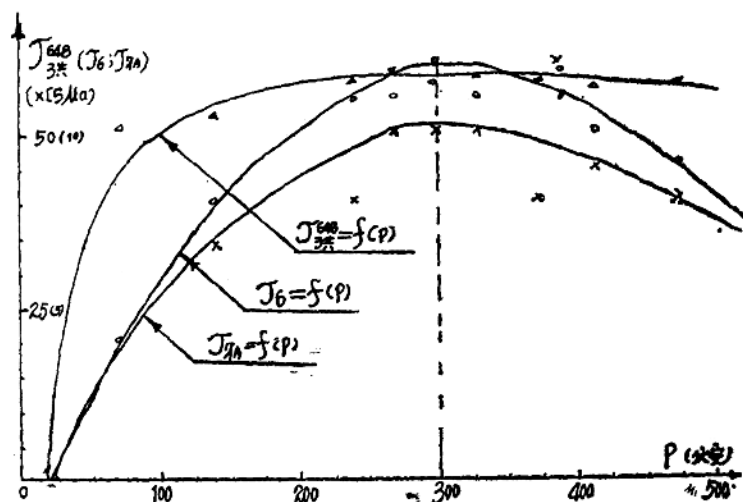


图8 离子源的弧功率对束流的影响

$J_{3共}^{\mu A}$ 、 J_6 、 $J_{7A} = f(P_{HT})$ 。在 $B_0 = 17.10$ 仟高斯； $I_{e.s} = -3.8$ 安； $U_{ee} = 105 + 105$ 仟伏； $U_{TK} = 85$ 仟伏条件下。

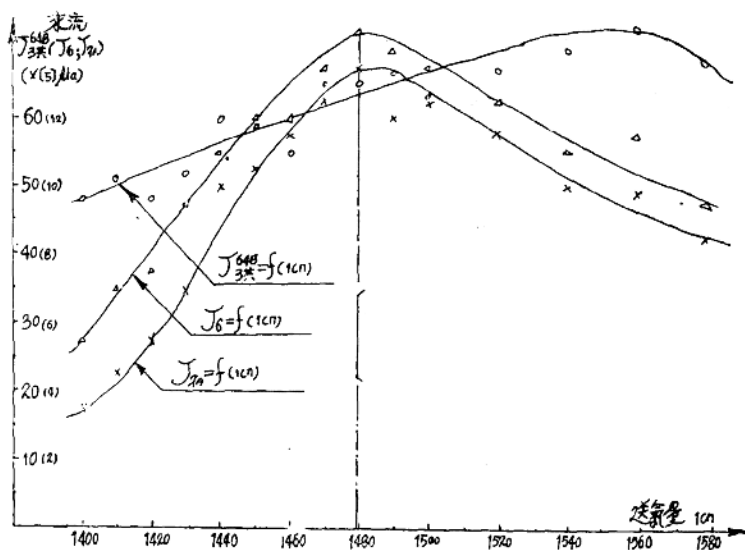


图9 送气量与束流的关系
 $J_{共}$ 、 J_6 、 $J_{7A} = f(\text{送气量})$ 。条件同图8。

图8和图9是弧功率和送气量与内外靶束流的实验曲线。弧功率对束流的影响比较显著，尤其是对外靶束流。所以在工作过程中要很好地选用合适的弧功率。

送气量对束流也有影响，工作过程中要选用最佳的送气量（约在2毫升/分左右），这样就能使 DH^+ 离子束流足够大。

（5）真空度对束流的影响

由实验结果可知（见下表），真空室的真空度对束流影响是很大的，这主要是由电荷交换引起的束流损失。真空度由 1×10^{-5} 毫米汞柱降至 3×10^{-5} 毫米汞柱时，束流几乎要减小一半，所以提高真空度对束流很有利。

真空度(毫米汞柱)	$J_{共}^{RH}(\mu A)$	$J_6(\mu A)$	$J_{7A}(\mu A)$	$\eta_{3.6}(\%)$	$\eta_{6.7A}(\%)$	
3×10^{-5}	35	4.0	3.5	11.4	87.5	接 地
	70	15	12	21.4	80	中 性
1×10^{-5}	80	12		15		接 地
	140	20		14.3		中 性

（6）离子源工作状态对束流的影响

从（5）中的表中说明离子源工作状态在中性时最好，束流可提高一倍到二倍（对接地状态而言）。

3.最佳的束流强度

加速器经过调束后, 选用最佳的几何参数和电气参数的情况下, 加速 DH^+ 离子获得的最佳束流和效率如下:

$$J_{3共}^{RK} = 65 \times [5] \text{ 微安}$$

$$J_0 = 14.5 \times [5] \text{ 微安};$$

$$J_{7A} = 13.5 [5] \text{ 微安};$$

$$\eta_{3.6} = 22.3\%;$$

$$\eta_{6.7A} = 93.1\%$$

内靶束流在 $R = 505$ 毫米上, $J_{3共}^{505} = 400 \times [5]$ 微安。最大可达 $800 \times [5]$ 微安。

$R_K = 648$ 毫米上的最大束流 $J_{3共}^{RK} = 170 \times [5]$ 微安

五 结 果 和 讨 论

1. DH^+ 离子的几个参数的估算值与实验值比较

	能量 (兆电子伏)	D电压 (仟伏)	偏转板电压 (仟伏)
估算值	18.98	197.93	81.60
实验值	18.15	210.00	82.00
误差	4.6%	-6.10%	-0.49%

从表中可以看出: 实验结果与估算值基本上是一致的, 其误差在百分之五左右。

2. 实验结果

(1) 活化实验结果

用 DH^+ 离子束去照射可以检验润滑油质量的活塞环。把活塞环装在实验大庭内离子管道上的靶室里, 活塞环是直径为105毫米的铁环。为了只照射活塞环的径向外侧面, 所以活塞环是装在一个可以在靶室里旋转的装置上, 使在照射过程中活塞环均速旋转, 其表面活化比较均匀。用外靶束流 $J_{7B} = 2 \times [5]$ 微安对活塞环照射了约175个小时, 一次照射了七只活塞环 (同时进行的), 在每只活塞环的外侧面上产生了约一毫居里的 Co^{67} 放射性同位素。用测量活塞环磨损下来的活性量对高级润滑油的质量进行了鉴定, 最后取得了比较满意的结果。

(2) 照射铁靶和银靶

用不同的内靶分别在半径 $R = 505$ 毫米和 $R_K = 648$ 毫米上照射了铁靶和银靶, 制备了钴 67 、锰 54 、镅 100 等放射性同位素, 同样也取得了很好的结果。

(3) 存在问题讨论

根据放化处理同位素工作给出的同位素产额值为0.8微居里/微安小时, 这在一九七〇年前的同位素产额值2.5微居里/微安小时相比较, 产额值降低了约二倍。

产额值降低的原因可能是加速 DH^+ 离子的流强中含有用的氘核不高、束流测量误差 (二次电子引起的) 和加速器的运行状态等引起的, 特别是二次电子造成束流测量值偏

大的原因可能性最大。究竟如何？还待进一步实验研究。

六 结 束 语

一九七五年我们研究的调试 DH^+ 离子的加速工作取得了比较满意的结果。因而我们很好地完成了提出的活化部件和制备同位素的供束任务。

一九七五年加速器上的运行任务很重（主要是加速重离子），调整加速 DH^+ 离子束流只是在加速重离子工作的间隙时间进行的。我们共调整了三次，大约用了150小时的时间，就初步得到了比较满意的结果（ $J_{78} = 2 \times [5]$ 微安； $J_{306}^{506} \geq 200 \times [5]$ 微安）。在一九七六年初又进一步调试了一次，就达到了开始提出的束流指标 $J_{78} \geq 10 \times [5]$ 微安（实际达到 $13.5 \times [5]$ 微安）。

根据加速器的运行状况，流强还能进一步提高。其途径是：提高混合气体（ $DH + H_2 + D_2$ ）中的 DH 分子所占的比例；离子源喷口可再增大（用 2×20 毫米）；进一步调整加速器的几何参数；提高真空度等方面。经过以上研究和调试后，外靶束流一定可以得到大大改善，初步估计可达到 $J_{78} \geq 20 \times [5]$ 微安以上。

本工作过程中得到了杨澄中先生的指导，回旋加速器原运行组和维修组的全体同志都为此项工作做了不少工作，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] EARL W. MCDANIEL, COLLISION PHENOMENA IN IONIZED GASES, NEW YORK · LONDON · SYDNEY (1964)

1.7米回旋加速器1:3模型磁铁实验

四室 离子源组

一九七六年,经国家计委批准在我所建造分离扇重离子回旋加速器。第一期工程拟改装现有的1.5米回旋加速器作为注入器^[1],参考原子能所 的 改器 经验,^{[2]、[3]}根据近似估算,提出了1.5米回旋加速器的改器方案。这个方案的主要特点是:维持原来的磁极直径不变,将真空室盖板削薄,去掉外垫补间隙,加装适当形状的扇块,实现扇形聚焦等时性加速。七七年春天,按此方案进行了3:1模型实验,根据实验数据和磁路分析,预期到若把磁极扩大到1.7—1.8米有可能更充分地发挥设备潜力,参考了日本INS—176cm扇形聚焦回旋加速器的资料后,我们又进行了1.7米等B磁头模型实验,并测量了同轴线圈的贡献量。在此基础上,我们进一步修改了扇块边界形状,通过模型实验提出了原型磁铁设计。

从已有的实验结果看,我所1.5米回旋加速器改建为1.7米可变能量多种粒子的等时性扇形聚焦回旋加速器是现实可行的。由于采用了等B极头,使磁场的可变范围大大展宽,并为兼顾轻离子加速创造了条件。从选用的第8号实验扇块看,在8000—16000高斯的磁场范围内,场形符合要求。以此为依据开展了轨道性能和束流品质的分析研究。

一 设备、仪器和测磁方法

实验用的模型磁铁,主体结构和本所Y—150磁铁完全相似,仅尺寸缩小到1/3,配有模拟Y—150用的极头、极面和为改器研究工作所需的各种极头、极面和扇块。磁铁主激磁绕组由给出直流110V600A的二机组供电,配有BT—4稳流系统,稳定度大约是0.02—0.1%,主绕组由蒸馏水进行冷却。模型磁铁用国产A—3钢做成,其磁性能和Y—150磁铁(苏联CT—3钢做成)磁性能类似。模型磁铁和原型磁铁的激磁电流为1:24时,能得到相同的场强。这时激磁安匝为1:3。

在实验过程中,霍耳片是基本测磁工具。仪器支架由黄铜和紫铜做成,可以利用顶尖在辐角方向每隔6°定位,(必要时可改为3°)霍耳片能在径向作水平移动,由标尺定位。在实验过程中,霍耳片的位置移动是由手工操作的。测磁点的径向跨度是1cm,辐角方向的间隔是6°。

在测磁过程中,我们使用北京师范大学生产的硅霍耳片(6—SH—1型),事先用本所二室自制的核磁共振仪进行了校准,由于核磁共振仪的性能限制,校正范围是3000—16000高斯,更高磁场是靠外推求得的。由于霍耳片对温度敏感,且在高场时有明显的非线性效应,低场时有不对称电压的影响,为保证实验精度,我们采用霍耳片内阻—霍

耳电压方阵修正法 (V_1 — V_H 方阵修正。)^[6] 这种方法的出发点是：当霍耳片激励电流恒定时，霍耳片电压是磁场和温度的函数，而霍耳片的内阻也是温度和磁场的函数，（因为有磁阻效应存在）。一般地说，总可以由两个关系消去一个变量—温度，而得到磁场和霍耳电压及霍耳片内阻之间的函数关系。用 V_1 表示霍耳片两电流端之间的压降，当激励电流 I_H 保持恒定时，它正是霍耳片内阻 R_H 的表征 ($V_1 = I_H \times R_H$)，因此：

$$V_1 = V_1(B, T) | I_H = \text{常数}$$

其中 B 是磁感应强度， T 是霍耳片片芯的温度。

若用 V_H 表示霍耳电压，则有：

$$V_H = V_H(B, T) | I_H = \text{常数}$$

原则上说，二方程联立，总可以解出：

$$\begin{cases} T = T(V_H, V_1) | I_H = \text{常数} \\ B = B(V_H, V_1) | I_H = \text{常数} \end{cases}$$

实际上，只有后一个关系才是对我们有用的，我们尽可以不必管第一个方程是什么形式。后一个函数关系是用实验方法直接测定的，这就是所说的霍耳片校准。

校准霍耳片的实验方法是这样安排的：把霍耳片放在一个油槽内，用一个电阻进行加热，使油槽温度较室温升高 10°C — 20°C ，（一般地说，这个范围已复盖了工作过程中可能出现的温度变化范围）然后自然冷却。在温度变化过程中，外磁场始终维持恒定，并用核磁共振仪测出该磁场的数值。在 V_H — V_1 坐标上，得到一条变温等 B 曲线，改变磁场，重复上述实验，可以得到一个曲线组，通过数值处理，可以列出一个形式较规则的方阵，以便由实测 V_H ， V_1 的值，通过插值法求出相应的 B ；也可以用最小二乘法得到 $B(V_1, V_H)$ 的多项式表示。可以看出，在实验校准过程中，并不需测定温度值。

我们采用的方阵形式是：在 V_H — V_1 坐标中，做出 0 — $30,000$ 高斯间隔 1000 高斯的等 B 曲线，曲线的值是按 V_1 每隔 0.2 伏给定 V_H ，这是一些断开的点。处理测磁数据时，查找测量值的四个相邻点，进行内插。当然，所有这一切，都是由计算机进行的。

用 V_1 — V_H 方阵修正法，较之于恒温，外电路补偿等方法有一系列优点：①省去了复杂的非标准电子设备，节省了实验准备工作所需要的人力和时间；②在测调变场时，由于霍耳片磁阻效应，片芯热耗不断改变，要它和恒温槽取得温度平恒，就大大限制了测磁速度，且所用霍耳片的封装必须拆去，以免内外产生过大的温度差。而 V_1 — V_H 方阵修正法中 V_H ， V_1 是同时读的，不必过问片芯的温度如何变化。这就很适于沿方位角快速测调变场；③非线性，不对称电压的影响和温度影响是一揽子进行了修正的；④校准过程中不需对片芯温度进行精确测量，校准实验容易进行。当然，这种方法也有它的不便之处：①由于同时测 V_H ， V_1 ，数据量增加了一倍，使读数、记数、穿孔工作量增加，差错率也增大，在实现自动数据处理时，配用的接口线路也更加庞大；②所用的霍耳片性能要稳定，一般要经过仔细的老化，才能使实验结果重复。

二 等 B 型极头的设计和效果

为使回旋加速器能在宽范围磁场内工作，而主绕组产生的场形和我们期望的场形之

间,不致有过大的歧离以致于超出了电流垫补线圈的调补能力。比较有效的办法是,使磁极头各横断面内,磁场分布尽量均匀,而且沿轴向磁场密度相等。这样就可以减轻由于局部饱和造成的场形畸变,满足等B条件的极头外廓,可用下列公式近似估算:^[4]

$$\frac{x}{d} = \text{Ln} \left[\frac{Z}{d} + \sqrt{\left(\frac{Z}{d}\right)^2 - 1} \right]$$

其中各量的意义,见图2的说明。

在图2中,虚线是理论计算的外廓曲线,实线是考虑到工程加工方便而采用的直线段近似。也就是1.7米回旋加速器模拟实验时实际采用的极头形状。在不装扇块的情况下,我们测量了平头场的下降率,作为对比,又测了非等B方案(1.5米方案)的平头场下降率。这两组数据描绘成曲线,见图4。(注意两张曲线坐标差10倍),可以清楚地看到,采用1.7米等B型极头后,不仅引出半径扩大,(由660mm扩大到750mm),使磁刚度增加,而且在扩大了引出半径下,下降率反而小得多,下降曲线的离散也减轻了。这说明对我们原有加速器磁铁来说,改换等B极头是适应的,而且带来了显著的效果。

三 扇块的设计和场形

作为实验参考,我们曾按原子能所,日本INS—176cm扇形回旋加速器的扇块,设计了模型实验扇块。在这些扇块实验数据的基础上,考虑到我们要在宽范围内加速重离子,兼顾轻离子的需要,设计了我们所需的扇块(8号扇块)。其几何形状见图3,这组扇块的特点是:考虑到加速重离子时,不穿过 $v_r = \frac{1}{3}$ 的共振线,螺角取得较小(最大33°),螺角减小后,经向运动稳定区加大,减轻了由于重离子 $v_r \approx 1$ 对磁铁加工造成的困难。同时,简化了边界曲线,全部采用单圆弧,可以直接车削。不仅加工方便,也容易控制精度。

图5给出模型激磁电流350A时(相当于原型840A)不同半径上的场形分布。图6—6a给出不同激磁情况下园平头场沿半径的分布。图6—6b给出了等时场和实测场之间的差,也就是所需垫补量。在求垫补量时,是从 $3R = 720\text{mm}$ 开始算的。这是考虑到在原型实验时,外半径加有内环,会将边缘场进一步抬起。(约60高斯),从这些数据看出:①当原型磁铁激磁电流为1200a时,平均场强就有可能达到16000高斯。②从高场加速D,到低场加速Ze,最大垫补量约为±200高斯、垫补梯度最大为每厘米25高斯,③所需垫补量的分布大致对称,说明扇块展宽角基本合适。图7给出调变度的范围。这里所用的调变度f是按式定义的:

$$f = \sqrt{\sum_k (\epsilon_k)^2}$$

式中, ϵ_k 是对一个磁场调变周期来说,第k次谐波的相对幅值。由图7可以看出,8号扇块调变度沿径向升起较快,在主要加速区域内维持有较大的值,图8表明8号扇块的轴向聚焦力。聚焦频率 ν_r 可用下列公式近似估算: