

强流脉冲束功率的测量

余增亮

(中国科学院等离子体物理所)

在强流离子源研究中,靶功率是表征引出束流大小的依据。一般离子源实验台上通常配备有测量束功率的量热计。本文论述绝热式量热计的测量原理、方法及在多种装置上应用的结果与分析。

关键词:束功率 绝热式量热计 回推法

一、原 理

为加热聚变等离子体而发展起来的脉冲强流离子源,引出流强一般为10—80A,能量为30—120keV,束靶功率达几百 kW甚至几 MW。由于束斑面积大($\phi 15\text{—}50\text{cm}$),无法抑制二次电子,几乎不可能用电测法测量束功率。因此,通常都是用热测法来测量束功率。热测法分传导式和绝热式两种。由于绝热式量热计结构简单,占空小,使用方便,在强流离子特别是中性粒子束注入器中得到广泛应用。

当离子束或中性束被金属靶截获时,靶自身的温度将升高。如果不考虑失热,由靶材的比热、质量和温升即可决定靶截获的束能。事实上,失热是不可避免的。另一方面,由于束流径向分布的不均匀性,靶上各点温度开始时是不平衡的。为了使靶的温度尽快达到平衡,

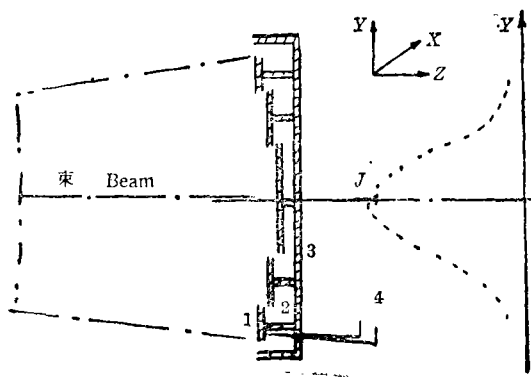


图1 绝热式量热靶

1. 子靶 2. 陶瓷管 3. 屏蔽罩 4. 热偶

Fig. 1 Adiabatic calorimeter

1. Partial target 2. Ceramic insulator
3. Screen 4. Thermocouple

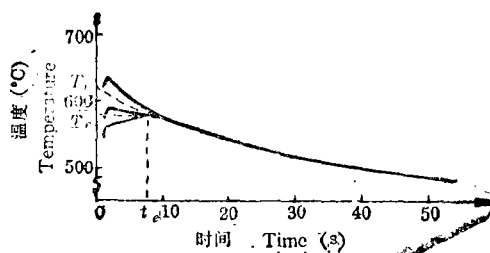


图2 中心子靶各点温度随时间的变化

Fig. 2 The temperature change of various measurement points with time on the central specific target

并且大致测量离子束的径向分布,常将量热靶分成相互绝缘的子靶(图1)。各子靶通过细陶瓷管与抛光的不锈钢屏蔽靶罩连接。由于陶瓷材料导热系数很小,又靶室的真空度较高($\sim 1.3\text{ mPa}$),固体导热和分子导热可以忽略,靶与外界的热传递主要通过辐射。

当一次束脉冲结束时,第 i 块子靶的温度从 T_{1i} 上升到 T_i ,则它所截获的束能为:

$$Q_i = CM_i(T_i - T_{1i}) \quad (1)$$

总的束能为各子靶截获能量的叠加:

$$Q = C \sum_{i=1}^n M_i(T_i - T_{1i}) \quad (2)$$

式中, C 为靶材的比热, M_i 为第 i 块子靶的质量。

如上所述,离子束径向分布的不均匀性将导致整个量热靶温度不平衡。即使单个子靶,各点温度在束脉冲结束后的一段时间内变化也是不相同的。图 2 是图 1 所示的量热计中心一块子靶不同点的温度随时间变化的实测曲线。同一块子靶,测量点不同,温度变化不同,给决定(1)式中的 T_i 带来了很大的困难。一种简单的想法是将靶无限细分。这不仅在工程上很难实现,也给数据采集及运算增加了工作量,因此是不可取的。

仔细分析图 2 可以看出,不管各点温度变化开始多么不同,一段时间后均趋于一致(金属靶自身有良好的导热性),靶温达到平衡温度 T_{ei} 。这时,测量点的位置已无关紧要。但是,以平衡温度 T_{ei} 代替(1)式中的 T_i 显然是不合理的,必须补偿靶达到平衡温度前一段时间内的热量损失(辐射损失)。如果知道靶达到平衡温度后温度随时间的变化关系,即可利用这一关系回推,求出 $t=0$ 时(即束脉冲结束时)子靶的等效平均温度 T_i ,能量

$$\Delta Q_i = CM_i(T_i - T_{ei})$$

就等于这段时间内的失热。

二、计算方法

如果只考虑辐射损失,第 i 块子靶达到平衡温度后靶温随时间的变化关系为^[1]:

$$\ln\left(\frac{T_i - T_0}{T_j - T_0}\right) - 2\operatorname{arctg}\left(\frac{T_j}{T_0}\right) = A_1 t + A_0 \quad (3)$$

式中, T_0 为环境温度; A_1 和 A_0 为待定系数。

由统计学方法可知,对一次函数 $y = a_1 x + a_0$,如果有数据对 (x_i, y_i) ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 与它对应,则:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i / n}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 / n}$$

$$a_0 = \bar{y}_i - a_1 \bar{x}_i,$$

其中, $\bar{y}_i = \sum_{i=1}^n y_i / n$, $\bar{x}_i = \sum_{i=1}^n x_i / n$,

权系数:

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \right]}$$

如果令(3)式左边为 $f(T_i)$, 则(3)式 $f(T_i) = A_1 t + A_0$ 是 t 的一次函数。实验中根据一定的时间步长测得 T_{ij} , 则由数据对 $[f(T_{ij}), t_i]$ 就可决定(3)式中的 A_1 和 A_0 。但(3)式表示的是靶达到平衡之后的温度变化关系。为了求得束脉冲结束时子靶等效平均温度 T_i , 必须将 $f(T_{ij}) = A_1 t + A_0$ 回推, 即求解 $t=0$ 时的方程

$$\ln\left(\frac{T_i - T_0}{T_i + T_0}\right) - 2\operatorname{arctg}\left(\frac{T_i}{T_0}\right) = A_0 \quad (4)$$

解得的 T_i 代入(1)式, 即可求出一次束脉冲中第 i 块子靶截获的束能。

假设离子束在垂直于束轴的截面上呈双高斯分布, 只要量热计在 X 方向和 Y 方向分布有三块以上的子靶, 利用上述结果将不难求出束的半角散和偏角(束轴与几何轴线夹角)。

三、测量结果与分析

测量系统由量热靶、测温元件(热偶)、数据采集和微处理机组成。热偶点焊或熔焊于各子靶的背面, 保证有好的热接触。选用的热偶热电势应尽可能大些, 以便省去中间放大环节。在束脉冲开始前 10ms, 对各子靶分别测温 10 次, 求平均子靶起始温度 T_{ij} 。然后, 按一定的时间步长(例如 2—6s)测一次温度 T_{ij} 存入数组 (T_{ij}, t_i) 。一般对各子靶分别测 100 个温度点就是足够精确了。指令计算机调用靶温达到平衡以后的数据对进行运算。结果, 计算机将显示如下测量参数(选自 IS-A 十厘米离子源的一次测试结果):

束流: 8.46A; 引出电压 30kV; 靶功率: 253.8kW; 导流系数: 2.06×10^{-6} ; 传输效率: 84%; 半角散: 1.4° (X 方向), 1.5° (Y 方向); 束中心坐标: (0.06, -0.24); 束型分布: (作图)。

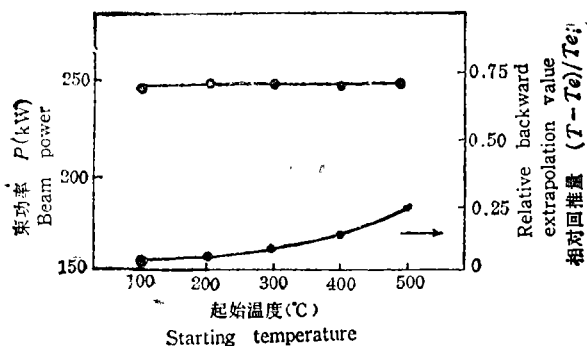


图3 靶起始温度与功率测量的关系

Fig.3 The initial temperature of the target vs. power measurement results

上述参数的显示对调试离子源及束光学系统是非常有用的。人们可以调整外回路使引出束流处于最佳状况。束中心坐标反映了束的准直性。对中性粒子束注入器来说, 要求有好的准直束, 可通过波纹管连接机构使束中心坐标接近(0, 0)。

这一测量方法曾用于 ASDEX 中性粒子束注入器(2MW, 400ms)、5A 注入器(80kW, 25ms)、十厘米离子源(250kW, 30ms)上作束功率测量, 结果令人满意^[1-3]。在 5A 中性束注入器鉴定会上曾用传导式量热计与上述

方法作印证测试, 其相对误差不超过 2%, 证实了本测试方法的可靠性。

在实际测量时, 某些物理量对结果的影响是不敏感的。

1. 公式(3)中的环境温度 T_0 对测量结果没有影响。但仔细选择 T_0 , 可使权系数更接近于 1。

2. 靶的初始温度 T_{ij} 不影响功率测量结果, 只影响回推量 ΔQ 的大小。例如, 在做十厘米离子源引出实验时, 总的靶功率为 250kW, 脉宽 30ms, 间隔一分钟引出一块。当靶的本底

温度达到500°C时,一次引出使靶温上升到600°C,一分钟后温度下降到500°C,然后,下次引出开始。这样,靶的起始温度基本上维持在500°C左右。相对回推量大约为25%。保持引出参数不变,拉长脉冲间隔,使靶的起始温度下降到400°C、300°C、200°C,测得的束功率和相对回推量如图3所示。可见,靶的起始温度 T_{i1} 不影响测量结果,只影响回推量 ΔQ 的大小。

值得注意的是,由于某些材料的比热 C 与温度有关,(1)式中的 C 应以 C' 代替。设 $\delta(T)$ 为靶材比热修正系数,则

$$C' = C[1 + \delta(T)]$$

3. 利用统计学方法决定(3)式中的待定常数 A_1 、 A_0 时,只要调用数组 (T_{ji}, t_i) ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 中的数据对的确是靶温达到平衡之后的那些数据对,对测量结果没有影响。例如在数组 (T_{ji}, t_i) 中取一数对 (T_{jm}, t_m) 作为代入公式的起始数据对,然后再依次取它之后的数对作起点,如果算得的束功率不再变化,则可认为 (T_{jm}, t_m) 与靶平衡温度 (T_{je}, t_e) 等效。在以后的测量中,只要选取 $t_i > t_e$ 的那些数对进行运算就可以了。

A. 施塔伯勒博士、O. 富尔麦博士、陈国梁同志等对本工作给予很多支持与帮助,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] Yu Zengliang et al., IPP 4/208, Garching, 1982, p1401.
- [2] 余增亮等,核科学与工程,6(1986)2:167.
- [3] 余增亮等,核科学与工程,7(1987),3/4:318.

Power measurements of heavy current pulsed ion beam

Yu Zengliang

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica)

Abstract

The target power is an essential parameter for the extracting beam in the heavy current ion source test. Generally, the test device of the ion source is equipped with a calorimeter to measure ion beam power. In this paper the principle, measurement method and analysis of results for adiabatic calorimeters are described.

Keywords: Beam power Adiabatic calorimeter Backward extrapolation

(1987年10月30日收到)