

密封中子管氘-氘产额及二次电子抑制

刘国财, 张培旭, 刘志珍, 李玮瑛, 杨洪广*

中国原子能科学研究院 反应堆工程研究所, 北京 102413

摘要: 中子管的工作参数是影响中子产额的重要因素。为了更准确地调控 D-D 中子管的中子产额, 对中子管的工作参数与产额关系进行了研究, 同时为了提高中子管束流品质及寿命, 对中子管的二次电子抑制进行实验。采用控制参数变量的方法分别研究了 D-D 中子管的热子电流、阳极高压、靶极高压对中子产额的影响, 以及二次电子抑制电阻阻值与靶极电流之间的关系。结果表明: 中子产额随着热子电流的增加而增加, 当靶极高压为 -80 kV、阳极高压为 2.6 kV 时, 热子电流的最佳调控范围为 $290 \sim 305$ mA; 阳极高压与中子产额呈非线性关系, 最佳阳极高压需要高于 2.6 kV; 靶极高压升高, 中子产额随之增加, 而且高压越高产额增加越快, 靶极高压最佳工作范围为 $-120 \sim -100$ kV; D-D 中子管二次电子抑制电阻阻值为 8.7 M Ω 或者抑制电压为 403 V 时, 便可以完全抑制住二次电子。中子管的工作参数与中子产额的关系为今后中子管产额稳定性自调节可提供参考, 二次电子抑制实验为抑制二次电子电流的产生提供依据。

关键词: D-D 中子管; 热子电流; 阳极高压; 靶极高压; 二次电子抑制

中图分类号: TL58 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2021)03-0301-08

doi: 10.7538/hhx.2021.43.03.0301

D-D Yield and Secondary Electron Suppression in Sealed Neutron Tube

LIU Guo-cai, ZHANG Pei-xu, LIU Zhi-zhen, LI Wei-ying, YANG Hong-guang*

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(55), Beijing 102413, China

Abstract: The operating parameters of neutron tube are important factors for neutron yield. In order to control the neutron yield of D-D neutron tube more accurately, the relationship between the working parameters and the yield of neutron tube was tested. At the same time, in order to improve the current quality and life of neutron tube, the secondary electron suppression of neutron tube was tested. The influence of thermionic current, anode high voltage and target high voltage on neutron yield and the relationship between secondary electron suppression resistance and target current of D-D neutron tube are studied by controlling parameter variables. The results show that the neutron yield increases with the increase of thermionic current. When the target voltage is -80 kV and the anode voltage is 2.6 kV, the optimal control range of the thermionic current is $290 \sim 305$ mA. There is a nonlinear relationship between anode high voltage and neutron yield, and the optimal working voltage needs to be

收稿日期: 2021-03-15; 修订日期: 2021-04-06

基金项目: 科技部中子管项目(2017YFF0104201); 中核集团自主研发项目

* 通信联系人: 杨洪广

higher than 2.6 kV. The neutron yield increases with the increase of target high voltage, and the higher the high voltage is, the faster the neutron yield increases. The optimal working range of target negative high voltage is $-120\text{--}100\text{ kV}$. The secondary electron suppression resistance of D-D neutron tube is $8.7\text{ M}\Omega$ or the suppression voltage is 403 V, and the secondary electron can be completely suppressed. The relationship between working parameters and neutron yield can provide a reference for the self-regulation of yield stability of neutron tube in the future. The secondary electron suppression experiment provides a basis for controlling the generation of secondary electron current.

Key words: D-D neutron tube; thermionic current; anode high voltage; target high voltage; secondary electron suppression

中子管类似于加速器,它是把贮存器、离子源、加速系统和靶全部真空密封在陶瓷管内^[1],构成一支紧凑的真空器件(图 1(a))。其工作原理是氘贮存器(热子)的电流增大时氘气会释放到真空系统中。当离子源施加一定的阳极高压时,离子源阴极表面少量的电子逸出并增殖,在离子源内电场与磁场的的作用下电子与氘气碰撞产生大量的氘离子。带正电的氘离子通过加速电极轰击到靶上,当靶上吸附氘时会发生 $\text{D}(\text{T}, \text{n})^4\text{He}$ 反应,产生能量为 14.1 MeV 的中子;当靶上吸附氘时会发生 $\text{D}(\text{D}, \text{n})^3\text{He}$ 反应,产生能量为 2.44 MeV 的中子。与普通的同位素中子源相比,中子管中子产额高,能谱单色性好, γ 射线本底低,体积小、质量轻,可以随时控制中子产生,同时中子管可以产生脉冲中子。随着中子管技术的发展,它已经被广泛应用到中子测井、物料分析、中子照相、爆炸物检测、毒

品检测等各个领域^[2-5]。

中子管产额稳定性是中子管面临的一项难题。国内中子管产额稳定性一般在 5% 左右。中子管产额不稳定对中子管的应用具有一定的影响。秦爱玲等^[6]表明采用闭环控制电路是中子管提高产额稳定性的普遍手段,即通过中子产额反馈调节中子管的工作参数使产额达到稳定。中子管工作参数会对产额有一定的影响。中子管的工作参数主要有热子电流、阳极高压及靶极高压。如 NT802 型自成靶陶瓷中子管给出热子电流与阳极电流关系^[1],热子电流微小变化,阳极电流会发生很大变化,因此热子电流对产额影响较大。徐绍曾^[7]也指出热子电流对中子管产额为单增函数。阳极高压通过影响阳极电流及质子比从而影响产额。质子比与阳极高压呈非规律性关系^[8-10],随着阳极高压升高,质子比有增加也有减小^[2]。靶极高压通过影响反应截面和靶流从而影

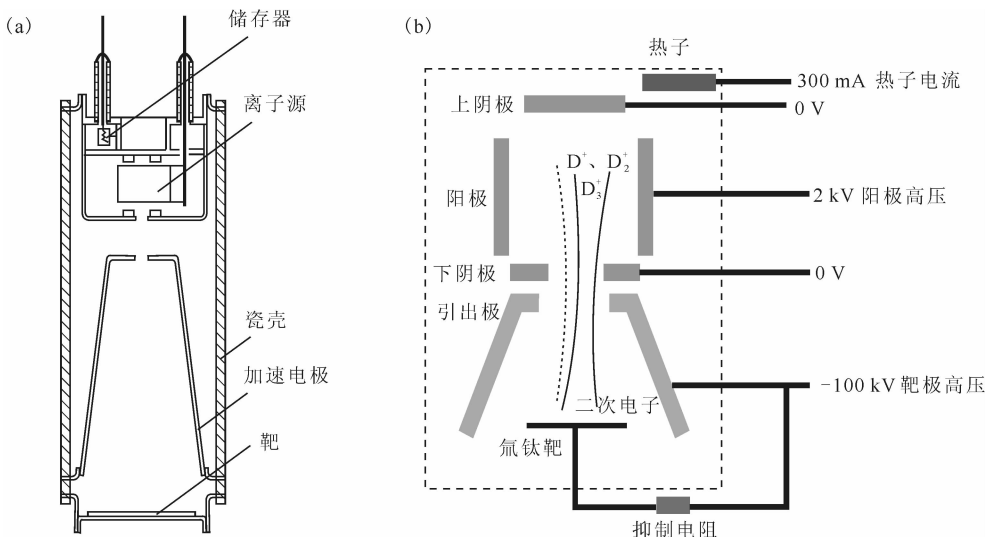


图 1 中子管结构(a)及内部控制参数(b)

Fig. 1 Neutron tube structure(a) and internal control parameters(b)

响中子产额,徐绍曾^[7]指出氙氡中子产额与靶极高压呈二次方关系,魏宝杰^[9]指出氙氡中子产额与靶极高压呈指数关系,这主要是中子管结构不同造成的。

中子管参数及结构差异造成中子管的工作参数与产额关系呈非固定性关系,本工作拟对自制的D-D中子管的工作参数与产额进行研究,以得到中子管最佳工作参数范围及其对产额的影响规律,为今后中子产额稳定性的反馈调节提供依据。此外,中子管工作时氙靶靶面会产生大量二次电子,二次电子虽然对中子产额影响很小但是对中子管寿命^[11]有一定的影响,因此本工作也进行中子管二次电子抑制实验,以得到二次电子抑制最小电阻及电压。

1 实验部分

1.1 仪器和材料

D-D中子管、高精度电流源、高精度电压源,自制;已标定完成的长硼计数管,10 m的高压控制线,10 m数据线,直流高压发生器(直高发),He-3管($\phi 25\text{ mm} \times 700\text{ mm}$),聚乙烯慢化筒,阻值分别为3.0、4.5、6.6、8.7、13.3 M Ω 的电阻,市售。

1.2 实验方法

1.2.1 中子产额标定实验 首先采用已标定的长硼计数管对未标定的He-3管进行相对标定,得到He-3计数与中子产额关系曲线,其次移走长硼计数管利用已相对标定的He-3管的计数对中子管的产额进行测量,建立中子产额与He-3管计数关系曲线。

1.2.2 中子管工作参数对中子产额的影响实验

中子管工作参数控制如图1(b)所示,采用电流源给中子管提供热子电流,热子电流控制在0~900 mA;采用直流高压发生器(直高发)控制靶极高压输出,负高压输出范围在0~-120 kV;采用高精度电压源控制阳极高压输出,输出范围在0~3.0 kV。实验测量装置示于图2,He-3管距离中子管0.75 m,He-3管外嵌套20 mm厚的聚乙烯慢化体。中子管置于 $\phi 70\text{ mm}$ 的聚四氟乙烯桶内,桶内充入500 kPa的SF₆绝缘气体。桶下方与直流高压发生器相连,控制靶极高压输出;桶的上方与热子电流源及阳极高压源相连,分别控制热子电流及阳极高压。采用控制变量方法分别研究不同工作参数下的中子管产额,建立工作参数与中子产额的关系曲线。

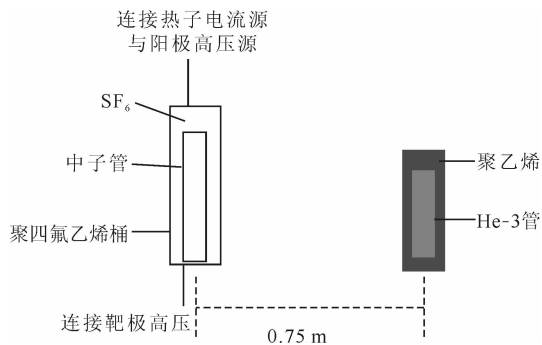


图2 实验装置

Fig. 2 Experimental device

1.2.3 二次电子抑制实验 二次电子抑制实验装置示于图3。在加速电极与靶极之间加入一个抑制电阻,靶极电流(I)可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1)$$

式中: I_1 为氙离子轰击加速电极产生的电流, μA ; I_2 为氙离子轰击氙靶产生的电流, μA ; I_3 为氙离子轰击氙靶时产生的二次电子电流, μA 。中子管工作参数一定时, I_1 与 I_2 总和保持不变,改变二次电子抑制电阻的阻值,靶极电流会随着阻值改变而改变,靶极电流 I 的变化值等于二次电子电流 I_3 的变化值。通过测量靶极电流的变化值,计算二次电子电流的变化值(ΔI_3)。当 ΔI_3 不随二次电子抑制电阻改变而变化时,表明此时二次电子完全被抑制。实验时采用的二次电子抑制电阻分别为3.0、4.5、6.6、8.7、13.3 M Ω 。

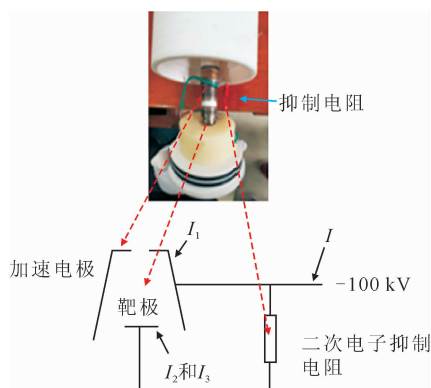


图3 二次电子抑制装置

Fig. 3 Secondary electron suppression device

2 结果与讨论

2.1 中子产额的标定

研究中子管工作参数对产额影响前,需要对

中子产额测量装置 He-3 管进行标定实验。已标定了 BF₃ 中子探测器在距离中子源 1.2 m 处的产额, BF₃ 计数率与中子产额关系如式(2)。

$$Y = 1 \times 10^5 N \quad (2)$$

式中: Y 为中子产额, s^{-1} ; N 为 BF₃ 计数率, s^{-1} 。

中子管在相同的工作参数下, 同时对 He-3 管和 BF₃ 探测器进行计数, 得到图 4(a) 所示的 BF₃ 计数与 He-3 管计数关系曲线。根据式(2)将 BF₃ 计数转化为中子产额, 得到如图 4(b) 所示的 He-3 管计数率与中子产额关系(式(3))。

$$Y = 6\,384.62N_1 + 5\,179.89 \quad (3)$$

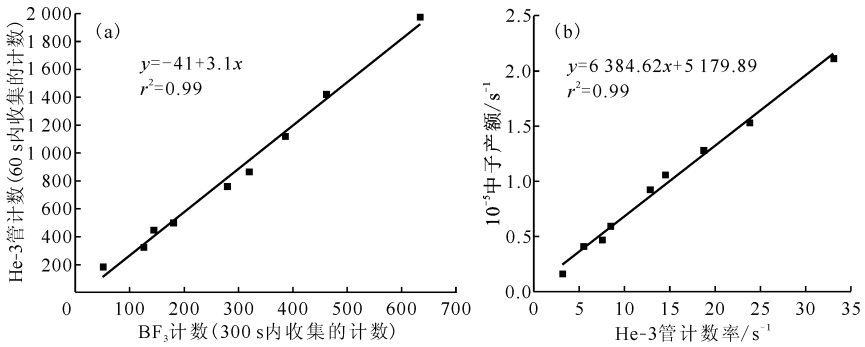
式中: N_1 为 He-3 管计数率, s^{-1} 。

2.2 工作参数对中子产额的影响

(1) 热子电流对中子产额的影响

研究热子电流对中子产额的影响时, 需要控制阳极高压和靶极高压恒定。控制阳极高压分别为 2.2、2.3、2.6 kV, 靶极高压设置为 -80 kV。

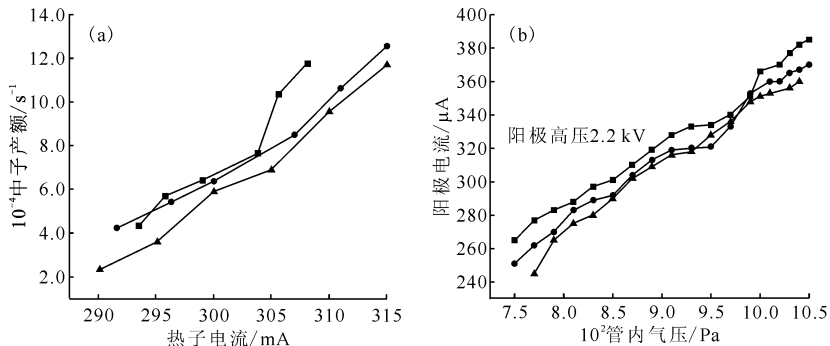
逐步升高中子管的热子电流, 同时记录 He-3 管的计数, 得到 He-3 管计数与热子电流关系。然后采用式(3)将 He-3 管计数转换为中子产额, 热子电流与中子产额关系曲线示于图 5(a)。由图 5(a)可知: 中子管热子电流在 290~315 mA 工作时, 热子电流与中子产额呈单增关系。这主要是由于热子电流增加导致管内气压变大, 管内气压影响阳极电流与质子比($D^+ : D_2^+$)进而影响中子产额。中子管管内气压与阳极电流成正比关系由中子管封装前期实验获得(图 5(b))。由图 5(b)可知: 控制阳极高压为 2.2 kV, 随着管内气压增加, 阳极电流也随之增加。气压变化也会影响质子比, 质子比越高, 产额越高。但是与阳极电流相比, 质子比受到的影响可以忽略不计, 因此热子电流对中子产额影响主要受阳极电流影响。阳极高压增加时, 整体中子产额增加, 阳极高压在 2.2 kV 和 2.3 kV 时, 中子



(a)——BF₃ 计数与 He-3 管计数关系, (b)——He-3 管计数率与中子产额关系

图 4 中子产额标定结果

Fig. 4 Neutron yield calibration results



(a): 阳极高压, kV: ■——2.6, ●——2.3, ▲——2.2;

(b): ■——第一次实验, ●——第二次实验, ▲——第三次实验

图 5 热子电流与中子产额关系(a)及管内气压与阳极电流关系(b)

Fig. 5 Relationship between thermionic current and neutron yield(a), and relationship between gas pressure in tube and anode current(b)

产额随热子电流增加而增加,基本趋向于线性增加。当阳极高压为 2.6 kV、热子电流大于 305 mA 时,中子产额会出现快速升高。因此在采用热子电流调节中子产额时,热子电流应控制在 290~305 mA。继续增加热子电流,中子产额会随之增加,但是增加幅度较大,不利于中子产额的精确控制。

(2) 阳极高压对中子产额的影响

研究阳极高压对中子产额影响时需要控制热子电流和靶极高压恒定。控制靶极高压为 -80 kV,热子电流为 305 mA。改变中子管阳极高压的值,得到阳极高压与 He-3 管计数(产额相对计数)的时间曲线示于图 6(a)。由图 6(a)可知:随着阳极高压的增加,中子产额并非线性增加,当阳极高压稳定时,中子管中子产额会出现产额下降的情况。同样采用式(3)将 He-3 管计数(产额相对计数)转换为中子管的产额,得到图 6(b)所示曲

线。由图 6(b)可知:中子产额与靶极电流变化趋势一致。阳极高压从 1.0 kV 升高到 2.6 kV 时,中子产额先增加后趋于稳定然后再升高。造成阳极高压与中子产额非线性的原因主要是阳极高压对阳极电流的影响是非线性的。根据中子管封装前期实验数据可得,阳极高压与阳极电流关系曲线示于图 7。由图 7 可知:阳极高压主要通过阳极电流影响中子产额,而质子比也会随着阳极高压变化而变化,但是影响不大。因为从图 6(b)结果可知:阳极高压在 1.2~2.4 kV 时,中子产额基本在 $6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 上下范围波动,而图 7 中第三次实验数据显示阳极电流也是在 $50 \mu\text{A}$ 左右波动;当阳极高压升高到 2.6 kV 时,图 6(b)中的中子产额增加将近 2 倍,图 7 中的阳极电流也增加 2 倍。因此从整体来看,实验所用中子管的阳极高压对产额影响主要通过阳极电流影响中子产额,而质子比影响较小。

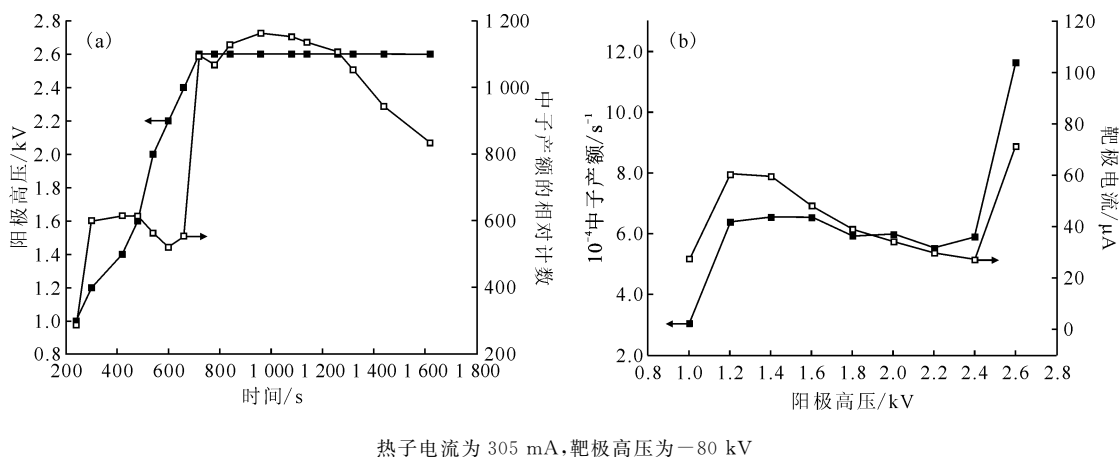


图 6 阳极高压及中子产额的相对计数-时间曲线(a)和阳极高压与中子产额关系曲线(b)
 Fig. 6 Relative counting time curves of anode high voltage and neutron yield(a) and relationship curves of anode high voltage and neutron yield(b)

中子管需要较高产额时阳极高压需要超过 2.2~2.6 kV(取决于热子电流大小)。由于阳极高压与中子产额的非线性关系,因此对中子产额稳定性调节时应避免调节阳极高压。

(3) 靶极高压对中子产额的影响

研究靶极高压对中子产额影响时,需要控制热子电流和阳极高压恒定。控制阳极高压为 2.6 kV、热子电流为 300 mA 及 306 mA 时,逐渐升高靶极高压(从 -50 kV 升高到 -90 kV)。当靶极高压稳定后得到 He-3 管的计数,同样根据式(3)将 He-3 管计数转换为中子产额,得到结果

示于图 8。由图 8 可知:随着靶极高压的增加,中子产额逐渐增大。靶极高压与中子产额关系曲线呈非线性增长趋势。随后采用厚靶产额计算方程研究靶极高压对中子产额关系曲线,并与实验数据进行对比。

对于氦氡中子管,氦靶厚度为 $2 \mu\text{m}$,需要采用厚靶中子产额计算公式(4)。

$$Y(E_0) = N_D \int_0^{E_0} \frac{\sigma_{D,D}(E)}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{TID}_{1.8}}(E)} dE \quad (4)$$

式中: $Y(E_0)$ 为每个氦离子的中子产额, s^{-1} ; E_0 为入射氦离子初始能量, MeV; N_D 为氦靶中氦的体

密度, cm^{-3} ; $\sigma_{\text{D-D}}$ 为氘氘反应截面, bar (1 bar = 100 kPa); $(dE/dx)_{\text{TiD}_{1.8}}$ 为氘离子在氘钛摩尔比为 1.8 的膜中的能量损失, $\text{keV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 。靶极高压会影响式(4)中的 E_0 , 即入射氘离子初始能量。本工作考虑入射氘离子初始能量 = 靶极高压 \times 电荷 (e)。

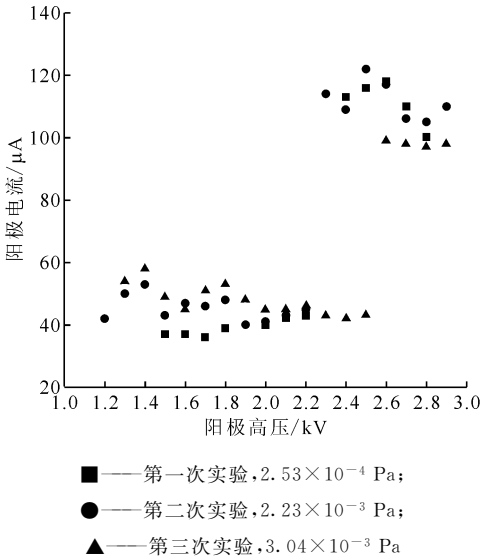


图 7 阳极高压与阳极电流关系
Fig. 7 Relationship between anode high voltage and anode current

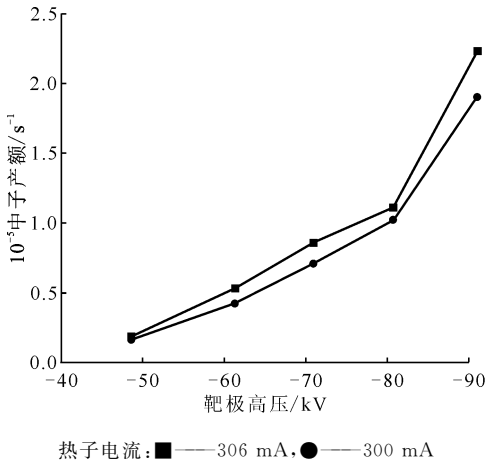


图 8 靶极高压与中子产额关系曲线
Fig. 8 Relation curves between target high voltage and neutron yield

式(4)中的氘氘反应截面可以在核数据中心^[12]得到。氘离子在氘钛比为 1.8 的膜中的能量损失可以采用 SRIM (stopping and range of ions in matter) 计算得到。不同氘离子初始入射能量与能量损失关系示于图 9。图 9 为不同的氘

束流轰击厚度为 2 μm 钛膜、氘气以及氘钛比为 1.8 的氘钛膜的能量损失结果。因此式(4)中的积分项可以采用反应截面数据除以图 9 中的数据并做积分。初始假设靶极高压与束流密度成线性关系, 与式(4)中的积分项相乘, 得到中子产额的相对计数随靶极高压 (入射氘离子初始能量) 的变化趋势, 结果示于图 10, 实验得到的中子产额和靶极高压的关系也示于图 10。由图 10 可知, 拟合数据的变化趋势与实验结果不符。因为靶极高压与束流密度大小不是简单的线性关系, 又采用指数关系拟合, 得到结果也不理想。由于靶极高压与束流密度呈现复杂关系, 很难精确得到中子产额与靶极高压的关系式。因此对于不同结构的中子管, 其中子产额与靶极高压具体关系需要依靠实验数据拟合。对于中子产额稳定性反馈调节时, 理论上可以通过改变靶极高压调节中子管中子产额。

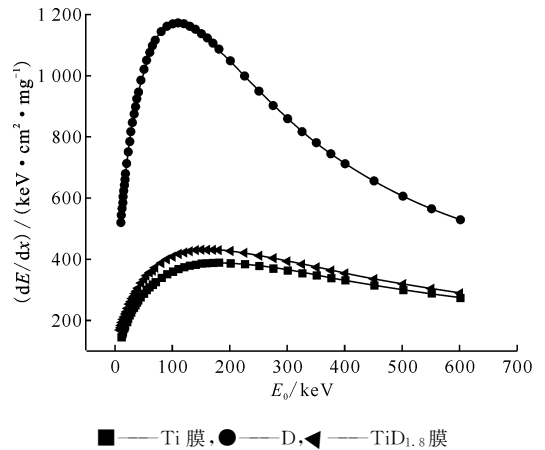


图 9 氘束流入射初始能量与能量损失关系曲线
Fig. 9 Relationship between energy loss and incident deuterium beam energy

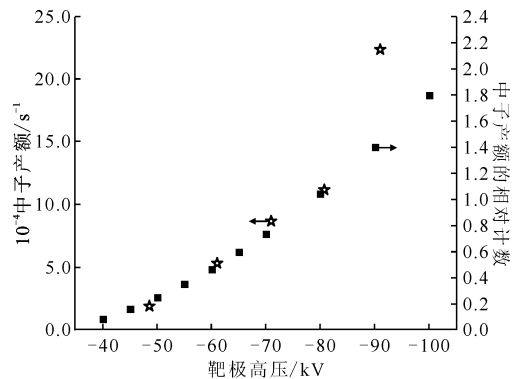


图 10 中子产额实验数据与拟合数据对比结果
Fig. 10 Comparison of experimental data and fitting data of neutron yield

2.3 二次电子抑制实验

中子管工作时,离子源产生的氘离子被加速电极引出,带正电的氘离子在 -100 kV 的高压电场下加速轰击到氘靶上产生中子。离子束流轰击到氘靶时会产生大量的二次电子,一部分二次电子会进入加速空间形成电子电流,电子电流叠加在离子束流形成总的靶流,电子电流不产生中子,但是消耗总功率,增加电源负载^[13-15]。产生的二次电子在加速电场作用下会撞击中子管内壁结构材料,同时间接影响靶极氘束流品质^[16]。因此对于中子管的二次电子抑制不仅可以减少中子发生器的总功率,同时能适当提高束流品质提高中子管寿命。

目前中子管采用最多的抑制方法为电场抑制。如图3所示在氘靶与靶极高压增加一个抑制电阻,通过控制阳极高压为 2 kV 、靶极高压为 -100 kV 、热子电流为 305 mA 、阳极电流为 $300\text{ }\mu\text{A}$,得到不同二次电子抑制电阻下的靶流情况示于图11。将未添加抑制电阻作为对照组,与其他5组抑制电阻进行实验对比。结果表明:随着抑制电阻增加,总靶流减少,根据实验方法中介绍总靶流减少量等于二次电子电流被抑制量。图11中抑制率计算如式(5)。

$$\text{抑制率} = \frac{\text{对照组靶流} - \text{实验组靶流}}{\text{对照组靶流}} \quad (5)$$

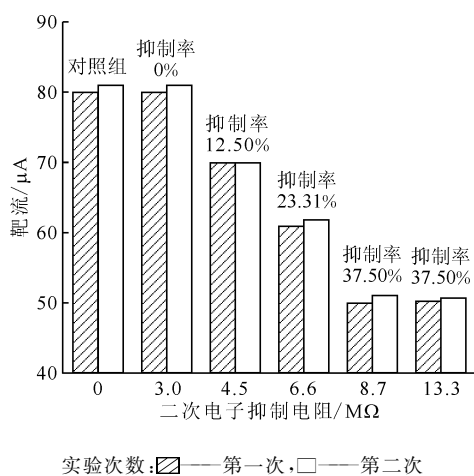


图11 二次电子抑制电阻与靶流关系

Fig. 11 Relationship between secondary electron suppression resistance and target current

随着抑制电阻阻值增加,二次电子产生的电流逐渐减少,当阻值达到某一值时,靶流不再减少,表明二次电子全被抑制住。当抑制电阻为

$3.0\text{ M}\Omega$ 时,抑制效果不明显。当抑制电阻为 $4.5\text{ M}\Omega$ 时,抑制率为 12.50% 。但是当电阻阻值增加至 $8.7\text{ M}\Omega$ 时,二次电子抑制率达到 37.50% ,继续增加抑制电阻为 $13.3\text{ M}\Omega$,抑制率仍为 37.50% ,说明抑制电阻为 $8.7\text{ M}\Omega$ (抑制电压 403 V)时,二次电子完全被抑制,继续增加抑制电压(抑制电阻)抑制率不变。因此中子管二次电子最小抑制电阻为 $8.7\text{ M}\Omega$,抑制电压为 403 V 。

3 结论

研究了中子管的工作参数与中子产额的关系,为今后中子管中子产额稳定性反馈调节提供依据。并通过实验得到中子管二次电子抑制电阻与二次电子抑制率关系,得到以下结论。

(1) 中子产额随着热子电流增加而增加。在靶极高压为 -80 kV 、阳极高压为 2.6 kV 时,热子电流最佳调控范围为 $290\sim 305\text{ mA}$ 。

(2) 阳极高压对中子产额影响呈非线性关系。靶极高压为 -80 kV 、热子电流为 305 mA 时,随着阳极高压升高,中子产额先在 $6\times 10^4\text{ s}^{-1}$ 范围波动,当阳极高压升高到 2.6 kV 时,中子产额迅速升高。阳极高压主要通过阳极电流影响中子产额。当中子管需要高产额时,需要调节阳极高压高于 2.6 kV 。

(3) 靶极高压越高,氘氚中子管中子产额越高,但是受到管体绝缘性要求,一般靶极高压控制在 $-120\sim -100\text{ kV}$ 。

(4) 自制D-D中子管二次电子抑制电阻为 $8.7\text{ M}\Omega$ 或抑制电压在 403 V 时,二次电子能被完全抑制。

参考文献:

- [1] 魏保国,卢洪波.中子管及其应用技术[M].长春:东北师范大学出版社,1997.
- [2] 肖坤祥.小型石油测井中子管的参数测试[J].中国测井技术,2004,30(4):66-68.
- [3] Li C, Jing S W, Gao Y D, et al. MCNP optimization of fast neutron beam thermalization device based on D-T neutron generator[J]. Fusion Eng Des, 2020, 151: 732-736.
- [4] 乔华亚.中子管研究进展及应用[J].核电子学与探测技术,2008,28(6):1134-1139.
- [5] 刘炯,骆庆峰,鲁宁,等.影响中子管产额因素分析[J].石油仪器,2010,24(6):22-23.
- [6] 秦爱玲,邓景珊.中子发生器产额稳定性[J].核电子

- 学与探测技术,2007,27(4):783-785.
- [7] 徐绍曾. 中子管特性及其工作状态的调整[J]. 原子能科学技术,1986,20(2):192-195.
- [8] 朴春龙,苏桂芬,姚安居. 关于低气压小电流 Penning 离子源质子比的研究[J]. 核技术,1983(4):35-37.
- [9] 魏宝杰. 自成靶陶瓷中子管及其应用[J]. 核技术,1993,16(12):726-729.
- [10] Verbeke J M, Leung K N, Vujic J. Development of a scaled accelerator-tube neutron generator[J]. Appl Radiat Isot, 2000, 53(4-5): 801-809.
- [11] 王静,段萍. 中子管靶面二次电子抑制[J]. 长安大学学报,2003,23(2):108-110.
- [12] Hale G M. Evaluated nuclear data file (ENDF)-VIII.0[DB]. <https://www.nndc.bnl.gov>. 2021-05-10.
- [13] 金大志,杨中海,戴晶怡. 中子发生器中二次电子抑制的数值模拟[J]. 电子科技大学学报,2009,38(1):84-86.
- [14] 金斗英. 密封中子管中电子电流形成过程[J]. 吉林大学自然科学大学学报,1998,36(1):40-44.
- [15] Reijonen J, Gicquel F, Hahto S K, et al. D-D neutron generator development at LBNL[J]. Appl Radiat Isot, 2005, 63: 757-760.
- [16] 孟晓慧,董志伟. 二次电子对离子束流品质影响的动态研究[J]. 强激光与粒子束,2018,30(11):114005-1-114005-5.