

低能氘团簇离子(d_3^+)诱发固体靶内 D-D 核聚变过程中的团簇效应研究*

王铁山

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

落合谦太郎 丸田胜彦 饭田敏行 高桥亮人

(日本国大阪大学原子力工学系, 大阪 565, 日本)

(1998 年 1 月 25 日收到; 1998 年 4 月 13 日收到修改稿)

通过对由三个氘原子组成的氘团簇离子(d_3^+)与三个分立的氘核($3d^+$)在轰击吸氘固体靶时所发生的 D-D 聚变反应率的差别的研究, 进而揭示氘团簇离子在与固体靶中的氘核发生聚变反应时所体现出的团簇效应. 实验结果显示, 在 10—40 keV/d 能区, 每个氘团簇中的氘核($d_3^+/3$)所产生的聚变反应率高于具有相同速度的独立氘核(d^+)所产生的聚变反应率. 反之, 在 50—100 keV/d 能区, 独立氘核比之于氘团簇中的单个氘核所产生的聚变反应率要高. 两者之间的比值具有非常明显的能量相关性. 这种团簇特性与团簇离子本身特性及固体靶环境等多方面因素有关. 对其作用过程和实验中观测到的现象的实质做了具体讨论.

PACC: 2140; 3640; 2550; 2160

1 引 言

关于团簇粒子的物理性质的研究是当前世界上前沿科学领域之一, 并已逐步形成了团簇物理学这一新兴交叉学科^[1-4]. 它涉及到原子分子物理和核物理的基本规律, 并可应用于材料科学、化学和物理学等极其广泛的自然与工程科学领域. 然而, 对于团簇粒子的基本性质及其物理的和化学的行为, 依旧缺乏深入系统的研究. 甚至存在一些亟待研究的空白课题.

原子团簇是由多个原子结合而成的集团, 由于其内部的原子间距远小于分立原子, 因此其在与靶核相互作用中具有与数目相同的多个分立原子核不同的特性^[1-3].

固体内部的原了按一定的规律在三维系空间呈有序地分布, 固体内的原了间距是物质通常的三种形态中最小的, 原子间的结合能却最大, 因此, 对于轰击到固体内的粒子, 它既提供了一个极端的反应环境, 又产生了较强的相互作用. 在这样的极端复杂的反应环境下, 入射粒子受环境因素的影响, 会产生一些与通常状态下有较大差别的特殊效应^[1,2].

氘团簇广泛存在并被应用于聚变中子物理学和等离子体物理研究中, 且直接与聚变

* 国家自然科学基金(批准号:19845004)资助的课题.

堆(Tokamak 装置)第一壁材料的辐射损伤有关,因此针对其性质和行为的研究意义十分重大^[1,4,5]。

有关氘原子团簇轰击固体靶时呈现的团簇效应的研究涉及到上述诸多方面的研究和应用.尤其是关于氘原子团簇在固体中行为的研究尚是关系到聚变堆材料性质、储氢材料性能和聚变中子学等一系列重大学术领域的全新研究方向。

基于上述科学依据、特殊的客观需要和现有的实验条件,本工作重点研究了三个氘原子组成的氘团簇离子(d_3^+)在注入金属钯(Pd)箔过程中,与靶中氘核发生 D-D 聚变反应中体现出的团簇特性.通过对氘团簇离子与单原子氘离子在注入吸氘钯靶时所发生的 D-D 聚变反应产物产额的比较,进而揭示氘原子团簇在与氘固体靶相互作用中所体现出的团簇特性.实验结果显示,在 10—40 keV/d 能区,每个氘团簇中的氘核($d_3^+/3$)所产生的聚变反应率高于具有相同速度的独立氘核(d^+)所产生的聚变反应率.反之,在 50—100 keV/d 能区,独立氘核比之于原子团簇离子中的单个氘核所产生的聚变反应率要高.两者之间的比值具有非常明显的能量相关性.文中提出了原子团簇离子与靶核相互作用的简单模型.并对其作用过程和实验中观测到的团簇现象的实质做了较详细的讨论。

2 实验装置、方法与实验结果

2.1 实验装置及方法描述

实验是在日本国大阪大学的强流中子发生器(OKTAVIAN)上进行的.双等离子源产生的氘等离子体是包含单原子离子和多原子团簇离子的混合物,该等离子体被引出后经加速器的前分析磁铁加以分析,可将不同的离子种类束流分离出来.经分析后加速的 d_3^+ 离子束纯度可达 99% 以上.离子束经聚焦后直接打到靶上.实验所用靶室及测量系统见实验装置示意图(图 1).

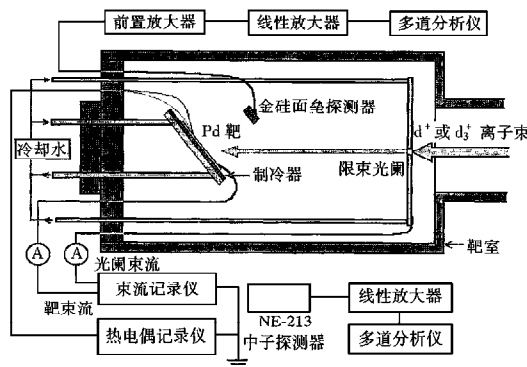


图 1 实验装置及测量系统示意图

图 1 中利用厚度为 $5 \mu\text{m}$ 的纯金属钯箔做氘的自吸收靶.靶子由半导体制冷元件冷却至常温以下.靶面电流(束流)和限束光阑电流由束流记录仪自动记录并存储.离子束轰击

氘-靶产生的中子和带电粒子分别被 NE-213 中子探测器和带电粒子探测器(Si(Au))测量,两探测器的位置如图 1 中所示.测得的中子和带电粒子能谱分别由多道分析仪记录并存储.

实验中具有相同速度的 d_3^+ 和 d^+ 离子束被交替注入氘自吸收靶.测得的中子和带电粒子能谱和离子束束流被同时测量记录.离子束能量按每次 5 keV/d 幅度在 10—100 keV/d 能区逐次上调,并在交换 d_3^+ 和 d^+ 的注入的先后次序后逐次返回至最低能量(10 keV/d).最终实验结果取在同一能量点的两次测量结果的平均值.

实验中采用对带电粒子能谱中的质子峰计数积分的办法,将该积分计数对入射氘原子总数归一之后,进行比较.同样,对中子能谱也做全能区计数的积分,并做对应的比较.入射氘核总数是通过入射到靶子的束流积分后获得.最终通过对用团簇离子束时,每个氘核轰击靶原子产生的带电粒子和中子产额,与相同条件下,单原子离子束注入时,每个氘核在靶中产生的带电粒子和中子产额做比较,进而确定团簇离子与单原子离子的差别,并反映出氘原子团簇在 D-D 聚变反应中的团簇效应.

2.2 实验结果

实验测得的带电粒子能谱如图 2 所示.

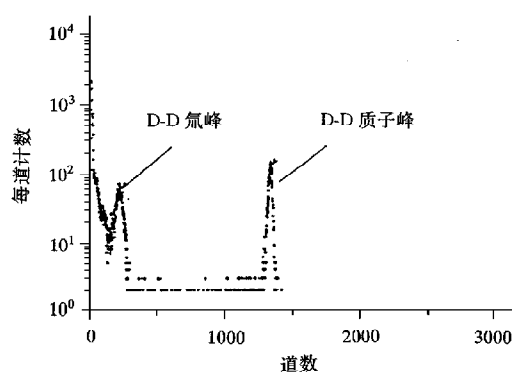


图 2 实验测得的 $D(d, p)T$ 和 $D(d, n)^3He$ 反应放出的带电粒子能谱

由于 D-D 聚变存在 $D(d, p)T$, $D(d, n)^3He$ 两个反应道,且两个反应道之间保持近乎于常数的比例关系.故此,实验测得的分别来自不同的反应道的带电粒子产额和中子产额之间也保持一定的比例关系,同时,从两个反应道获得的实验结果应该能够自洽.两种离子束的单位氘核激发的质子与单位氘核能量的关系如图 3 所示.

实验结果显示,在 10—40 keV/d 能区,每个原子团簇中的氘核($d_3^+/3$)所产生的聚变反应率高于具有同速度的独立氘核(d^+)所产生的聚变反应率.反之,在 50—100 keV/d 能区,独立的氘核比之于原子团簇中的单个氘核所产生的聚变反应率要高(见图 3),40—50 keV/d 能区为过度区,两者的差别在误差范围内难以区分.由质子和中子数据给出的结果反应了相同的规律性.

两种离子束的单位氘核产生的质子产额比值(Y_{d_3}/Y_{d_1})与能量的关系曲线如图 4 所

示. 该曲线呈明显的能量相关性(见图 4 中拟合曲线), 该曲线反应的规律性与图 3 完全一致.

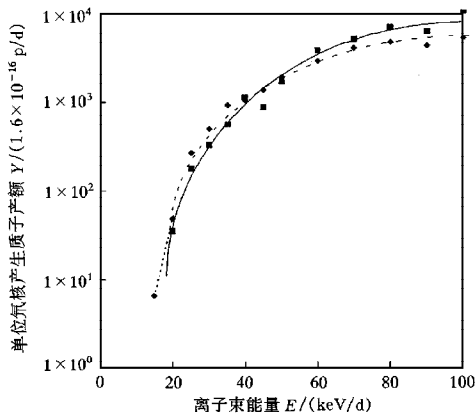


图 3 d_3^+ , d^+ 离子束诱发的 D-D 质子产额与能量的关系曲线 ◆ 团簇离子束; ■ 单原子离子束

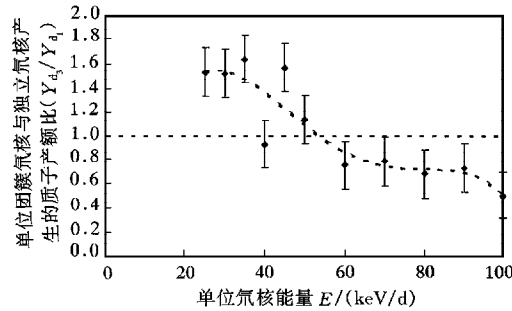


图 4 原子团簇离子束和单原子离子束的单位氘核诱发质子产额比值与能量的关系曲线

3 结果分析与讨论

实验结果显示了氘团簇离子在诱发固体靶中的 D-D 聚变时, 具有明显的团簇效应. 在 10—40 keV/d 能区, 每个原子团簇中的氘核($d_3^+/3$)所产生的聚变反应率高于具有同样速度的独立氘核(d^+)所产生的聚变反应率. 这一现象可能与团簇本身的特性有关. 然而, 在 50—100 keV/d 能区, 独立氘核比之于原子团簇离子中的单个氘核所产生的聚变反应率要高. 这一结果则与理论上的推论相悖. 究其原因, 可能与固体靶这一特殊的反映环境有关, 因为团簇离子与单原子离子在固体中的能量亏损具有相当大的差别.

3.1 团簇离子与靶核相互作用过程的分析

由于团簇离子(d_3^+)内的原子核间距约为 0.7 nm, 远小于固体中的原子核间距, 因此, 在团簇离子与靶核的碰撞过程中, 由于团簇离子结合为一整体, 其与靶核发生的库仑相互作用强度高于单个氘核^[6,7]. 因此, 其引起的靶核形变也较大.

在团簇离子中最终与靶核发生碰撞的氘核与靶核逐渐接近的过程中, 参加反应的氘核同时受到团簇中的另外两个氘核和靶核的相反方向的两个排斥力. 使得团簇中的另外两个氘核的能量借助发生碰撞的核, 间接地作用到靶核上. 因此, 其发生聚变反应的截面可能产生一定的增益.

当团簇中某一氘核与靶核发生碰撞的同时(或之前), 团簇将会解体. 未发生直接碰撞的两个氘核会散去. 在其被散射的过程中, 也会传递一部分能量参与到反应之中. 对聚变反应会产生一定的影响.

上述假想模型是基于团簇离子只发生平动. 而实际的作用过程中, 团簇离子本身可能

会处于旋转状态,或曰其具有自旋.在这种情况下,团簇离子与靶核发生的库仑相互作用会更复杂,不参与最终核聚变的两个氘核的贡献也会增大.同时,这一作用效应将带有明显的能量相关性.

综上所述,团簇离子诱发的核聚变截面会有所增强,同时可能会具有一定的能量相关性.但上述模型是基于真空中的团簇离子与靶核的碰撞,而考虑到实验中使用的是固体靶.团簇离子在固体中的能量亏损与单原子离子存在较大的差别,实验中测得的结果可能会与上述分析存在差距.

3.2 固体靶中的团簇离子的能量亏损效应

固体靶中的原子处于物质三种状态中最为密集的状态,其晶格间距仅为原子尺度^[8],因此晶格上的原子也会通过库仑相互作用影响到与氘靶核的相互作用.Ray 等^[9]的研究表明,氢团簇在固体中能量亏损具有一定的特点,即:当能量低于 50 keV/p 时,氢团簇离子在固体中的能量亏损小于独立氢核的能量亏损,反之,在能量高于 50 keV/p 时,氢团簇离子在固体中的能量亏损则大于独立氢核的能量亏损^[1].由于氘和氢在原子过程中具有近乎全同的物理性质,因此上述规律可以被借用于氘团簇与固体的相互作用中.

3.3 实验结果分析

结合对团簇离子与吸氘固体靶相互作用的分析,由于能量高于 50 keV/p 的氘团簇在固体中的能量亏损比原子离子大,而当能量亏损因素的影响高于团簇效应产生的增益时,就会在实验中观测到团簇离子产生的 D-D 聚变反应率变低的现象.同样,实验测得的到团簇离子在低能区产生的增益,也应是氘团簇整体能量亏损减少和在与靶核的相互作用中的集团优势的双重效应的叠加.

然而,不论是能量亏损效应还是反应中的集团效应均是团簇离子与固体氘靶相互作用中的团簇效应的体现.只是能量亏损效应是原子过程的团簇效应,而反应中集团优势则是核过程的团簇效应^[7].如果利用气体靶做上述实验,则会大大减少因团簇离子在靶中能量亏损的差异引起的反应率的变化,进而突出体现团簇离子与靶核相互作用中的集团优势.

4 结 论

实验结果显示,在原子团簇轰击固体靶(Pd)引起 D-D 聚变反应时,体现出明显的团簇效应.这种团簇效应具有明显的能量相关性.对结果的分析表明,该效应是由团簇离子在反应中的集团优势和在注入固体靶时的团簇能量亏损效应产生的复合效应.这种现象的产生与存在,正是团簇离子所具有的特性.上述实验结果与理论分析是自洽的.进而,证明了该实验现象的产生是有较充分的科学依据的.团簇离子在低能区所具有明显团簇优势,可应用于聚变中子学的研究,也有助于对超低能核聚变的一些异常现象的解释^[7,9].氘团簇在固体中的团簇特性对研究聚变堆第一壁材料中引起的辐射损伤、固体中的氢行为和开发氘储氢技术均有重要的学术价值和应用意义.

日本国大阪大学原子力工学系的伊达道淳和杉本技官在实验中密切配合实验要求,提供了良好的实验用束流和其他条件.中国科学院近代物理研究所自动控制研究室为本工作的数据处理提供了便利.在此一并表示感谢.

- [1] E. Ray, R. Kirsch, H. H. Mikkelsen *et al.*, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res.*, **B69**(1992), 133.
- [2] R. J. D. Beuhler, G. Friedlander and L. Friedman, *Phys. Rev. Lett.*, **63**(1989), 1292.
- [3] J. D. Callen *et al.*, *Phys. Today*, (January, 1992), 34.
- [4] M. Faliavier, J. Kemmler, R. Kirsch *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 621.
- [5] R. J. D. Beuhler, Y. Y. Chu, G. Friedlander *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991), 473.
- [6] T. Wang *et al.*, *J. Atom. & Mole. Phys.* (submitted) (in Chinese).
- [7] T. Wang, K. Ochiai, K. Maruta *et al.*, The Measurement for Atomic and Nuclear Reactions in Metal by Deuterium Atomic and Molecular Ion Beam, Proc. of 1997 Fall Conference of the Nuclear Energy Society of Japan (Oct. 1997), Okonawa, Japan.
- [8] C. Kittel, *Instruction of Solid State Physics* (John Wiley & Sons, Inc. 1976), p. 202.
- [9] T. Wang, K. Ochiai, K. Maruta *et al.*, The Measurement of Fusion Rates in Metal by Atomic and Molecular Ion Beam Implantation. Proc. of Symposium on Nuclear Transmutation in Solid, June 1997, Iwate University Japan, Proc. of Symposium of Nuclear Transmutation (June 1997), Japan.

NUCLEAR CLUSTER EFFECT IN THE INTERACTION OF DEUTERIUM CLUSTER ION (d_3^+) AND SOLID (PdD_x)^{*}

WANG TIE-SHAN

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

KENTARO OCHIAI KATHUHIKO MARUTA TOSHIYUKI IIDA AKITO TAKAHASHI

(Department of Nuclear Engineering, Osaka University, Osaka 565, Japan)

(Received 25 January 1998; revised manuscript received 13 April 1998)

ABSTRACT

The deuterium cluster-ion, which consists of three deuterons, was used to study the cluster effect in the D-D fusion reaction in solids. The cluster-ion beam (deuteron-cluster d_3^+) and isolated deuteron (single deuteron d^+), whose energies were adjusted as from 10 to 100 keV per deuteron, were alternatively implanted into deuterium-palladium target. The differences of the fusion reaction rates were obtained by comparing the radiation yields of charged particles and neutrons that were induced by two kinds of beams with the same velocity. Experimental results are as follows:

Each deuteron of cluster-ion (cluster deuteron) induced higher D-D fusion rate, compared with an isolated deuteron, when the deuteron energy was lower than 40 keV per deuteron; while the cluster deuteron induced lower fusion rate when its energy was higher than 50 keV per deuteron. The ratio of fusion rate induced by cluster deuteron to that induced by isolated deuteron decreased with the increase of deuteron energy. Some interpretations have been discussed.

PACC: 2140; 3640; 2550; 2160

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19845004).