

聚变中的某些物理问题*

杨治虎 景成祥

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 对核聚变中的某些物理问题进行了论述和探讨.

关键词 聚变 数据 等离子体

1 引言

开发核聚变能, 已是世界公认的解决人类未来能源紧缺问题的根本出路, 同时也是解决环境污染, 提高人民健康水平的一条重要途径. 因此, 核能的有效开发和利用, 势在必行, 对核聚变中有关问题的探索, 也有助于核能的开发和利用. 目前, 可将核聚变研究的原子分子有关物理问题大体归纳为下列四个方面: (1) 束注入加热过程中的物理问题的研究, (2) 等离子体高温区的放电与击穿问题的研究, (3) 等离子体与壁相互作用, (4) 等离子体诊断问题的研究.

1 束注入加热过程中的物理问题

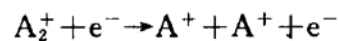
磁约束等离子体为了达到聚变堆判据所要求的高温, 单靠欧姆加热是不够的, 必须采用其它一些加热手段. 在各种加热机制的研究中, 较为成熟的方法就是中性束注入. 中性束注入是把经加速的离子束中性化后注入等离子体, 使其与等离子体的离子、电子碰撞, 且发生电荷交换和电离, 然后经磁场约束. 此过程是把能量输运给离子和电子, 从而加热等离子体的过程. 在这一过程中, 需要探索的是束的加热与俘获、离子束的中性化问题. 因此, 研究束注入加热过程时, 需精确知道电子与原子、分子碰撞的电离速率系数, 原子束与氦、氘碰撞的电荷交换截面, 以及束注入离子源中的有关分子振动激发态和其它系数. 所

以, 研究束注入的工作大都集中于测量原子、分子的这些数据. 在核聚变条件下, 实现中性原子束注入的能量为 100keV 至 1MeV. 在此能量范围内, 只有利用负离子束才能达到较高中性化的效率, 而能量范围在 5~100keV 的中性粒子最容易通过加速着的正离子. 加速后的中性化正离子可能发生重离子碰撞、电子碰撞和再电离等过程.

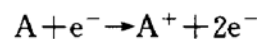
2 等离子体高温区的放电和击穿问题

在托卡马克等离子体放电和击穿过程中, 真空室内气体温度很低, 约为 1~100eV 的量级; 电离度也很低, 其中包括了中性原子、分子或离子等各种粒子成分, 尤其是杂质对放电过程的性质影响很大, 造成电离气体的输运性质和原子分子过程间存在复杂的相互作用. 要了解各种粒子的输运过程, 必须从理论和实验上研究与测定下列过程中从低 Z 到高 Z 的原子分子物理数据.

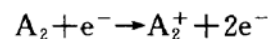
1) 电离分子 A_2^+ 的离解



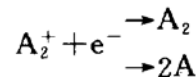
2) 原子 A 的电离



3) 分子 A_2 的电离

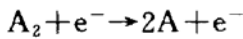


4) 复合

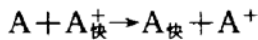


5) 分子 A_2 的离解

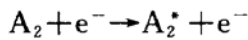
* 国家自然科学基金资助课题.
1994 - 12 - 20 收稿.



6) 快离子与中性原子间的电荷交换



7) 激发



通过对这些原子分子过程的研究, 可得到原子分子的重要谱线波长、跃迁几率、能级结构、电离能、激发截面、电离截面、辐射复合截面及双电子复合截面。

3 等离子体与壁相互作用

在磁约束中, 等离子体和固体表面存在多种作用过程. 尤其是在托卡马克装置和堆的运行中, 等离子体内壁或孔栏间的溅射、起弧和解吸等过程, 壁和孔栏上的能量损失, 杂质的起源和输运, 等离子体边界层过程, 以及壁的腐蚀都属于等离子体与壁的相互作用. 通常, 将等离子体与壁的相互作用大体分为下列几种.

1) 物理溅射 高能离子轰击金属表面, 与表面物质的原子或分子碰撞, 从而使其获得能量被激发. 当激发原子、分子的能量大于固体表面脱出功时, 它们就从表面发射出来, 通常称这一过程为物理溅射.

2) 化学溅射 对低 Z 材料壁和孔栏的使用, 一个十分重要的问题就是化学溅射. 它是入射粒子与表面区域的原子发生化学反应, 形成挥发性化合物. 等离子体中的碳、氧杂质主要来源于化学溅射, 化学溅射的产额主要与反应速率有关, 同时与入射粒子能量、金属表面温度和材料类型等有关.

3) 起泡 如果溶解度低的粒子轰击器壁时, 可置换其晶体中的原子. 随着沉积量的增加, 产生气泡. 当气泡压强增加到一定值时, 固体表面膨胀和凸起, 最后使金属表面剥落. 起泡的大小取决于入射粒子的能量和剂量, 以及靶温度和微观结构.

4) 吸解 由于固体和气体分子间的作用, 固体吸收气体, 或气体被吸附在固体表

面. 当入射粒子进入固体时, 由于碰撞使吸附或吸收的气体原子分子释放出来. 在受控聚变中, 入射粒子主要是氢、氦、杂质离子、电子及光子等. 目前, 人们对吸解过程研究的甚少, 要弄清固体与气体间的作用机制, 需要在理论和实验上做更深入的研究.

5) 气化 在大的托卡马克装置和堆的运行中, 气化起着重要的作用. 因等离子体辐射能量会在壁的局部地方沉积, 使表面气化污染等离子体. 一般在一定的反应堆条件下, 挥发性化合物比纯金属蒸发速率高.

就等离子体与壁相互作用而言, 要弄清其作用机理, 就应侧重于下列方面的工作.

(1) 物理溅射是与入射粒子、出射粒子的质量、固体表面的束缚能、清洁度和其它一些条件有关, 这时就需研究某些粒子轰击一定固体表面溅射产额. (2) 化学溅射, 需研究不同温度下的热解石墨和不同能量的氢离子轰击下形成 CH 的溅射产额. (3) 起泡, 需研究和测定不同温度下的材料表面和不同粒子能量下二次粒子发射率和注入量的关系. (4) 吸解, 需精确测定和研究吸解产额. (5) 气化, 需确定化合物和蒸发率.

4 等离子体诊断

等离子体诊断的目的就是确定与聚变等离子体有关的一些参数, 如测定等离子体的温度、密度、局部电场及磁场等, 其中光谱测量是很有效的方法之一. 高温等离子体发射光谱范围宽, 从 X 射线延伸到远红外光谱区, 人们通过等离子体发射的光谱研究等离子体的性质, 诊断和研究等离子体的诸多参数, 如光谱测量, 可研究等离子体中杂质浓度、有效电荷 Z_{eff} 、辐射功率损失、电子温度与密度分布、离子温度分布及电荷交换复合. 目前, 为诊断目的而开展的原子物理研究大致有:

1) 研究和确定 $Z \geq 28$ 的壁或孔栏材料元素 V、Nb、Mo、W 和镍合金等不同电离度的能级跃迁波长和高电离态杂质元素的能级跃

迁光谱与 K 和 L 层 X 射线跃迁波长、双电子复合伴线的波长.

2)研究和确定能级跃迁几率:(1)C、O、N、Al、Si、Fe、Cr、Ni、W、Nb 及 V 等元素的原子跃迁几率;(2)高电离离子的禁戒谱线的原子跃迁几率.

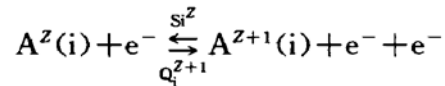
3)谱线的形状参数:(1)谱线的分布、斯塔克增宽;(2)强磁场和边缘电场对多普勒加宽的谱线分布影响.

4)辐射激发、电离和复合过程的研究:(1)探索和描述辐射场对原子结构、光子激发和电离过程的影响;(2)研究辐射复合、双电子复合及碰撞辐射复合的机制.

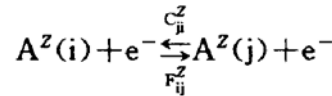
5 等离子体杂质问题

等离子体的杂质主要是由壁和孔栏等表面上产生的溅射、起弧和起泡等引起的.当杂质经过边界层进入等离子体时,杂质物的辐射能量严重损失,此时极大地影响了聚变等离子体的性质,所以对等离子体产生的杂质进行研究和控制.杂质的控制,一要防止杂质的产生,二要迅速地对其清除.实现对等离子体杂质的控制,必进行下列方面的研究.

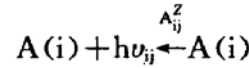
1)电子离子和三体碰撞复合



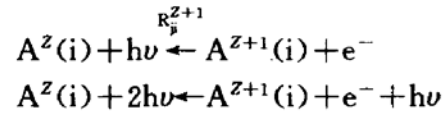
2)电子激发和退激发



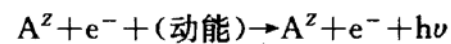
3)自发与感应发射和辐射吸收光激发



4)辐射复合、受激复合和光电离



5)韧致辐射



6 结 论

聚变研究的诸多方面,都涉及到原子分子物理问题,文中介绍的与聚变等离子体的有关问题,是目前需要在理论和实验上进行研究的问题.过去对这些问题的研究仅以原子物理学的角度进行探索和测定,而且受各种因素的制约,使得有些原子分子数据不能真正用于聚变研究.所以,为适应对聚变研究的需要,应着手对上述问题进行探索,精确测定原子分子数据,以满足聚变研究需求.

Some Physical Issues in Fusion

Yang Zhihu Jing Chengxiang

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract Some physical issues in nuclear fusion are discussed and studied here.

Key Words fusion data plasma