

聚变堆设计中的原子物理问题

姚锦章

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 原子物理信息对聚变堆设计是很重要的. 它决定了聚变堆点火条件的接近程度、等离子体燃烧的持续时间和反应堆的运行参数等. 本文概述了其中的一些原子物理过程, 它括粒子与表面相互作用.

关键词 聚变反应堆, 等离子体, 原子物理, 功率和粒子耗散, 加热, 诊断.

1 引言

聚变能是人类理想的能源. 1991年11月, 在英国欧洲联合环形聚变装置(JET)上进行的受控聚变, 第一次产生2MW的热功率, 持续时间2秒. 这是向获得安全、清洁和取之不尽的能源迈出的重要一步.

本文以国际热核实验性反应堆(International Thermonuclear Experimental Reactor 简称ITER)为例, 概要描述磁约束聚变堆设计中的原子物理问题.

2 功率和粒子的耗散物理

ITER的聚变功率设计为1000MW, 由聚变产生的 α 粒子灰烬带走200MW, 为了达到点火温度, 需将150MW热功率注入等离子体内, 所有这些功率应连续取得, 以保持等离子体的平衡温度. 同时, 应防止反应堆第一壁材料的过热负荷, 它可能导致材料离解, 使大量的杂质进入等离子体. 这就要求及时从反应堆中排放热量, 以避免壁材料的过热负荷. 在ITER中采用轴向捕集器. 在磁场作用下, 中心等离子体扩散进入剥离区的外侧, 并很快传向捕集器. 如果剥离区等离子体温度为200~300eV, 材料壁附近为50~80eV, 剥离区的热传导率可用辐射通量的指数衰减长度来表示, 为毫米数量级. 在ITER中剥离层为2~3mm. 因此, 在捕集器板上的热功率分布有强峰出现, 剥离区的等离子体热功率传向捕集器, 大大地保护了反应堆第一壁, 而

热问题转到捕集器板上. 但从工程设计观点看, 希望有热负荷的局部化. 捕集器可由两个捕集室构成, 在ITER, 在剥离区内侧的 α 粒子热功率, 40%以韧致辐射和同步辐射方式传递. 80%的非辐射功率进入剥离区, 在低约束方式下, 加在聚变堆第一壁上峰值热负荷约是0.5~1MW/m², 而加在捕集器板上(假定有两个对称的捕集室)的峰值热负荷为7MW/m². 对强约束方式, 捕集板上的峰值热负荷可达17MW/m², 对所选材料第一壁允许热负荷为10MW/m². 这就对捕集器板材料的选择提出了苛刻的要求, 即对捕集器材料的热力学和其他物理性能需严格挑选.

为减少流向捕集器热功率, 在等离子体边界, 剥离区的内侧形成一个强的辐射层, 称为冷等离子罩, 它是由慎重选择的注入原子Z冷杂质形成的. 冷等离子罩以无危险的各向同性辐射部分热功率, 其工作原理涉及到杂质的径向输运机制、原子的电子碰撞激发、电离、复合、电荷交换和辐射跃迁等过程.

等离子体边界辐射损失的另一种机制, 是边界的多面体非对称辐射. 这种辐射形式已在许多运行中的托卡马克装置中观察到, 通常是发生在等离子体“解体”之前. 多面体非对称辐射与低Z杂质温度有关, 它是由原子物理过程确定的. 在等离子体边界, 热功率耗散是依赖于边界等离子体与低Z(≤ 10)杂质的碰撞和辐射性质.

等离子体边界条件, 对功率耗散和粒子耗散是至关重要的. 这些条件包括等离子体

密度、温度分布特性、杂质成分、等离子体与杂质的输运、边界附近的氢与杂质的循环以及边界的抽运能力。在等离子体边界, 杂质 A^{q+} 的电荷态 q 值, 比等离子体中心低得多。在 ITER 边界温度下, 典型的 q 值为: $Z \leq 10$, $q \leq 4$; $10 \leq Z \leq 26$, $q \leq 6$; $Z \geq 30$, $q \leq 10$ 。在边界等离子体中, 有关杂质的输运和辐射问题, 最重要的过程是电子碰撞, 包括在这些碰撞中的精细结构的跃迁。

在 ITER 中, 杂质输运模拟、辐射损失、中性氢体输运和循环, 与下列过程有关。

2.1 电子-杂质的碰撞

杂质 A^{q+} : $A = \text{Be, B, Si, Ti, Cr, Fe, Ni, Mo, Ta, W}$ $q \leq 10$

碰撞过程: 激发、电离(直接电离和自电离)、双电子复合、辐射复合和多次电离。亚稳态离子对激发和电离也有贡献。 $A = \text{C, O}$ 的数据, 已有评价的推荐值。

2.2 $A^{q+}-\text{H, H}_2, \text{He, BC}$ 的碰撞

A^{q+} 同 (2.1), $\text{BC} = \text{CO, CO}_2, \text{CH}_4, \text{C}_2\text{H, C}_6\text{H}_6, \text{H}_2\text{O}$

碰撞过程: 总的和选定态的电子俘获、电子激发、 H_2 的离解俘获。电子和振动俘获激发态也是要求的。对 $A = \text{C, O}$ 的总的电子俘获数据, 已有可用的推荐值。

2.3 $e-\text{H}_2, \text{H}_2^+, \text{Bc}^{(+)}$ 碰撞

Bc 同 2.2.

转动和振动激发, 离解激发和电离; 直接激发和电离。也需要振动激发分子的离解过程。特别急需 H_2 和 H_2^+ 的离解产物的能量分布和角分布信息。

2.4 $\text{H}^+, \text{H}-\text{Bc}^{(+)}$

Bc 同 2.3.

碰撞过程: 电荷交换、粒子交换和离解。

氢的输运和耗散, 在聚变反应堆中占有重要地位。在等离子体中心区, 热化 He 粒子的积累决定了反应堆的运行条件, 若 He 粒子的浓度从 5% 增加到 10%, 能量约束时间则将降低 40%。为了补偿, 等离子体电流应增加 5MA, He 在中心等离子体区和积累是

由芯部和边界等离子体的输运过程以及捕集器的抽运耗散能力决定的。若捕集器的抽运效率是足够的, 就没有中性 He 返回中心等离子体。在 ITER 芯部, 等离子体 He 的浓度为 10%, 十分希望减到 5%。这就要求 He 从等离子体芯部净化, 涉及到 He 与 H 的电荷交换过程, 其能量从几个 keV 到 3.5MeV。这里应该指出的是, He^{2+} 与 C 和 O 离子的双电子俘获是十分小的。进入低温剥离区的热化 He 粒子与 H 原子, 发生准共振电荷交换碰撞。He⁺ 离子中性化后, 又与边界的中性原子发生碰撞, He 可能保持在剥离区, 也可能返回等离子体芯部或沉积在壁中。因此, He^{2+} 、He⁺ 在剥离区的碰撞过程也是十分重要的。

在等离子体的芯部和边界 He 的耗散包含有重要的原子物理知识。主要包括:

(1) α 粒子输运和从等离子体芯部逃脱 $\text{He}^{2+}-A^{q+}$ 的单电荷和双电荷交换过程 $A = \text{Si, Ti, Cr, Fe, Ni, Mo, W}$

$$6 \leq q \leq (Z-2)$$

能量范围: $1\text{keV} \leq E \leq 5\text{MeV}$

$\text{He}^{2+}-\text{H, H}_2$ 碰撞中的电子俘获

$$1\text{keV} \leq E \leq 3.5\text{MeV}$$

(2) He 离子在等离子体边界的输运

$\text{He}^{2+}, \text{He}^+-\text{H, H}_2, A^{q+}$ 的电子碰撞俘获, 激发电离过程。

$A^{q+} = \text{B, C, O, Si, Ti, Cr, Fe, Ni, Mo, W}$

$$q \leq 3 \quad E \leq 5\text{keV}$$

$e-\text{He}^+$ 的碰撞激发和电离

$$E \leq 5\text{keV}$$

(3) He 在边界等离子体中的输运

电子与 He 碰撞的全部非弹过程, 激发态的跃迁, $20\text{eV} \leq E \leq 2\text{keV}$

$\text{He}-\text{H}^+, A^{q+}$ 碰撞。 A^{q+} 同(2)。

电子俘获、激发、电离以及双电子过程

$$20\text{eV} \leq E \leq 2\text{keV}$$

3 等离子加热和电流驱动

在聚变堆中, 加热和电流驱动是使聚变

装置达到点火条件所必需的. 在 ITER 中, 功率倍增因子 $Q \approx 10$, 要求不断地输入 100~130MW 的热功率, 最有效的加热方法是 H 或 D 中性束注入、射频电磁功率注入和低混频共振加热. 在 ITER 设计中, 使用三种不同的加热和电流驱动方法. 中性氘束加热功率应为 80~100MW, 如果切向注入, 束流应穿过 5~6m 路程到达磁轴. 在这一过程中, 中性束原子被电离和电荷交换. 若束流能量足够, 大部分束流粒子能达到中心等离子区, 但太高的束流能量可能产生辉光, 因此对等离子体壁产生显著的腐蚀, 束流能量选择依赖于等离子体的有效阻止截面. 对 ITER 而言, 束流能量约为 1 ± 0.3 MeV. 实际值是由许多因素决定的. 在束流运输的动力学中, 涉及到最重要的原子截面. 高束流能量时, 束流粒子与等离子体粒子 ($n \approx 10^{20}/\text{m}^3$) 的碰撞时间与受激束原子的辐射衰变时间可比拟. 描述束流动力学就需有一碰撞辐射模型. 有效束流阻止截面对某些原子截面值的灵敏度十分高. 束流阻止截面不仅依赖于束流穿透路程而且依赖于束流功率的沉积率, 束流功率沉积率的径向分布对原子截面也是很敏感的.

中性束注入分三个阶段, 即负离子源生成, 离子加速和中性化. 这涉及到原子分子物理问题. 负离子源 H^- 是由离解电子吸附在高振动态的受激 H_2 分子上而形成的. 负离子源的反应动力学是复杂的, 包括电子、 H^+ 、 H 、 H^- 、 $\text{H}(\text{V})$ 、 $\text{H}_2^+(\text{V})$ 之间的全部碰撞过程, 以及 H^+ 、 H 、 H_2^+ 、 H_2 与固体表面相互作用等.

中性束加热所需的原子分子数据包括大体有以下方面.

3.1 负离子源产生过程

(1) 电子、离子、原子分子碰撞中形成负离子 D^- 及其空间分布、基态和转动、振动激发态.

(2) 固体表面产生的原子分子电荷和量子态变化的原子过程. D_2^+ 、 D_2 和 D^- 的密度及表面温度变化.

(3) 用于诊断的原子过程.

3.2 中性束输运

(1) 0.5~1MeV/u D^- 离子与 Ar、Kr、Xe 中性原子及其不同离化度的原子碰撞过程.

(2) 负离子束和中性束之间的碰撞.

(3) 0.5~1MeV/u 的 D^+ 和 D^- 离子与铜表面, 在不同入射角时的电荷转移过程.

3.3 0.5~1MeV/u 的 D^0 原子与等离子体碰撞的原子过程

在聚变堆设计中, 特别急需杂质离子的激发和跃迁过程的数据.

4 等离子体边界

聚变堆的第一壁和捕集器材料必须经受高的热负荷, 对这些材料的要求是极其苛刻的, 这关系到它们的寿命. 若经常更换, 会造成工程上的困难, 减少反应堆的有效运行时间. 等离子体放电过程是极快的, 其为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ s, 在这样短的时间里, 等离子体的热能达到 600~900MJ, 并沉积于壁上, 同时, 在材料壁附近造成了高压, 将等离子体电子加速到相对论能量 100~300MeV, 这些逃脱的电子能量沉积在周围的材料中, 使材料融化和蒸发. 在等离子体启动期间也喷射逃脱电子, 但这些电子的能量比较低.

聚变堆的第一壁材料不仅要经受巨大的热负荷和压力, 而且杂质浓度应是可以被接受的. 若低 Z ($Z \leq 10$) 杂质的相对浓度超过 (5~10)%, 或中 Z ($12 \leq Z \leq 26$) 杂质的相对浓度高于 1%, 或高 Z ($Z \geq 30$) 杂质的相对浓度大于 0.1%, 等离子体不可能达到点火条件. 杂质, 是等离子体与壁相互作用过程中的物理溅射、化学腐蚀、辐射升华、蒸发以及 He 在材料中的积累而引起的发泡等过程所产生的. 高温石墨、碳-碳、碳纤维化合物等的碳基材料具有良好的热力学特性, 但也有腐蚀的严重缺陷, 对于通量为 $(1 \sim 2) \times 10^{23} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的 D 和 T 离子, 在 ITER 捕集器中碰撞能量为 200~500eV, 碳基材料组成的捕集器的总腐蚀为 2~3m/a. 为了降低材料的物理溅射产额, 可以通过降低捕集器中等离子体温度,

减少表面势能,或选用高溅射阈的高 Z 材料等措施来实现. 采用 B、Si 或 Ti 的碳基材料可降低腐蚀率. 城一般运行条件下,第一壁附近的温度为 $10\sim 30\text{eV}$, 低于物理溅射阈能. 在 ITER 中,用碳基材料作第一壁或捕集器板的涂层材料,SS-316L 奥氏钢被推荐作第一壁材料. 捕集器板材料也推荐用 Cu、Mo 和 V 合金. 从 ITER 的工艺要求出发,捕集器的腐蚀应降到最小,选用 W、Ta、和 Mo 等高 Z 材料是有利的. 等离子体与壁相互作用过程的原子分子数据目前十分缺乏.

5 等离子体诊断

中性束方法广泛用作等离子体边界的约束状态、功率和粒子耗散、等离子体密度、温度和杂质的 Z_{eff} 诊断. 普遍采用的中性束有: 氘束, 锂束和氦束. 有关原子物理问题如下.

5.1 氘束诊断

能量为 $10\sim 30\text{keV}$ 的氢中性束,对正在运行的托克马克装置是一个标准的诊断技术,可测定离子温度、杂质离子的径向分布、 Z_{eff} 、等离子体转动和其他放电参数. 该方法是基于低能原子与多电荷离子碰撞,产生高选定态电子的俘获. 在大托克马克装置中,能量 $20\sim 30\text{keV}$ 的束流完全可以到达中心等离子体区而无明显衰减. 但对聚变堆,其尺寸和密度要大得多,往往要求几百 keV 的中性束流才能穿过等离子体芯部. 在聚变堆时,电荷交换碰撞截面小,而且随着碰撞能量增加迅速降低. 过程的态选定性也明显减少. 因此中性氢对聚变堆的诊断并不合适. 但对电荷交换复合谱学的研究表明,可用能量为 $300\pm 100\text{keV/u}$ 的中性氢束诊断 $q\geq 10$ 的中心等离子体及 $q\geq 5$ 的等离子体边界的杂质特性.

5.2 锂束诊断

锂束目前广泛用作边界等离子体参数的测定,优点是在能量 $20\sim 30\text{keV}$ 时,能俘获 $2s$ 价电子而进入高激发态;电子碰撞引起的 $2s-2p$ 激发,在此碰撞能量时,仍然很高,可根据共振辐射谱线作谱学分析. 锂束诊断,目前

限于边界等离子体密度 $n_e\sim 10^{18}\sim 10^{19}/\text{m}^3$. 聚变堆的边界等离子体密度将高一个量级,要求锂束能量为 $100\sim 200\text{keV/u}$,这时,重离子碰撞激发和电子转移是重要的,其多步过程比氢束重要. 此外,内壳层激发电离也起重要作用. 所有这些过程的截面数据是急需的.

5.3 氦束诊断

用高能 He 束诊断聚变 α 粒子的速度分布,是根据双电子共振俘获过程;但在 $1.0\sim 3.5\text{MeV}$ 能区,该反应截面很小. 目前,有人正在研究产生强 ^3He 束的可能性. 它涉及到束流线的最佳参数和正确的 ^3He 束穿透性质的知识. ^3He 束与等离子体的质子和杂质的碰撞,给出了束流衰减动力学信息. 对于束流能量为 $0.5\sim 1.5\text{MeV/u}$ 、离子密度为 $(0.5\sim 1)\times 10^{20}/\text{m}^3$ 的 ^3He 束,多步过程使束流阻止截面提高 $(150\sim 200)\%$,作束流阻止本领计算所需要的激发和电子转移过程数据,要求量子数 $n=6$,束流参数的最佳选择也要求有关 H_2/He 离子源和 $^3\text{HeH}^+$ 离解的知识. He 束诊断的能量范围要求从 $(100\text{keV}\sim 1.5\text{MeV})/\text{u}$. 能量 $50\sim 100\text{keV/u}$ 的 He 束,可用来测定聚变堆边界的 He^{2+} 和 He^+ 离子浓度,相应的原子数据很缺.

6 结束语

我们概要讨论了聚变堆研究的某些领域,这些问题在聚变堆-ITER 设计中是极重要的. 我们仅仅讨论了碰撞方面的课题,还需要有关原子能级、跃迁几率等原子结构数据,特别是对高 Z 杂质的高电荷态离子的谱数据;对碳-氢化合物类似的信息也需要.

所要求的大部分数据,目前尚无有用的推荐值,或缺乏足够的精度. 聚变堆计划的时间表是相当豪迈的: ITER 的工程设计将于 1995 年完成,2005 年建成世界上功率最大的热核聚变实验性反应堆,2025 年建造一座示范性核聚变发电厂,2040 年建造一座商业性发电厂. 为该计划提供满意的原子分子数据,是一个具有挑战性的任务.

Atomic Physics Issues in Fusion Reactor Design

Yao Jinzhang

(*Institute of Atomic Energy of China, Beijing 102413*)

Abstract Atomic physics information is of great importance to fusion reactor design, which define the accessibility of the ignition regime, plasma burn duration and operational parametric space of the reactor. We discuss the role of atomic physics in several of the most critical reactor design areas and specify the required atomic physics information including interaction of plasma particles with solid surfaces.

Key Words fusion reactor, plasma, atomic physics, power and particle exhaust, heating, diagnostic.

(上接 59 页)

为了节省煤和石油等化石燃料、减轻煤炭运输压力和改善大气环境,我国需要发展核能供热.就经济效益、设备利用率和用户需求而言,核能热电联供比单纯供热更为有利.

出于安全因素,现行压水堆,甚至正在开发中的改进型压水堆(如 AP 600),都必须远离大城市或人口稠密地区,这些堆型都不宜建在热用户附近.而 PIUS 型固有安全动力堆,可建在城市附近或人口稠密的地区.

Design Features and Developing Status of PIUS 600

Hou Zhongsong

(*Beijing Institute of Nuclear Engineering, Beijing 100840*)

Abstract This paper introduced the main design features and R & D status of the inherently safe power reactor—PIUS 600. A proposal concerning PIUS type power reactor is put forward.

Key Words inherently safe, power reactor, natural circulation, density lock.