

引用格式: 李金海. 一种内离子源惯性静电约束聚变技术 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 47-55. LI Jinhai. An inertial electrostatic confinement fusion with inner ion source [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 47-55. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.05.

一种内离子源惯性静电约束聚变技术

李金海[✉]

(东华理工大学核应用技术研究所, 江西南昌 344000)

摘要: [目的] 惯性静电约束聚变是一种小型聚变装置。文章目的是要解决惯性静电约束聚变装置目前存在阴极熔化和 Q 值低等问题。[方法] 首先分析了产生这些问题的原因, 然后提出一种内离子源惯性静电约束聚变技术, 以便降低离子在约束过程中的损失, 解决阴极熔化问题, 同时提高装置内的真空度, 以及提高装置的 Q 值。[结果] 最后通过估算的方法定性分析了中子产额的提高, 并通过数值仿真模拟计算, 模拟了内离子源惯性静电约束聚变装置内的非常复杂的离子运动情况, 得到了各向异性的离子运动轨迹。[结论] 根据估算和数值模拟计算结果, 确证了内离子源惯性静电约束聚变技术的可行性, 可以解决阴极熔化和 Q 值低的问题。

关键词: Q 值; 惯性静电约束; 聚变; 中子源; 内离子源; 仿真

中图分类号: TL6; TL99

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0047-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.05

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

An Inertial Electrostatic Confinement Fusion with Inner Ion Source

LI Jinhai[✉]

(Institute of Nuclear Technology Application, East China University of Technology, Nanchang 344000, Jiangxi, China)

Abstract: [Introduction] The inertial electrostatic confinement (IEC) fusion facility is a small fusion device. This paper aims to solve the problems of IEC fusion devices, such as the cathode melting, the very low Q value, and so on. [Method] This paper first analyzed the reasons for these problems, and then a new type of inner ion source IEC fusion was proposed to decrease the ion loss during the confinement process, solve the cathode melting, and increase the vacuum in the device and the Q value. [Result] At last, the improvement of neutron yield is qualitatively analyzed through the estimation, the very complex ion motion inside the fusion device is simulated through numerical simulation calculation, and anisotropic ion motion trajectories are obtained. [Conclusion] Based on estimation and numerical simulation results, the feasibility of the IEC with an inner ion source is confirmed, which can solve the problems of cathode melting and low Q value.

Key words: Q value; inertial electrostatic confinement; fusion; neutron source; inner ion source; simulation

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

聚变能是从根本上解决人类能源需求的途径之一。目前国内外的核聚变技术主要包括 3 类: 磁约束、激光惯性约束和 Z 箍缩, 这些技术各有优缺点,

其中磁约束的托卡马克是目前国内外的研究热点^[1]。

美日等国对聚变能的开发研究还有一种惯性静电约束聚变(Inertial Electrostatic Confinement, IEC)装置。IEC 装置结构很简单, 是在兼做阳极的直径数十厘米的真空容器(接地电位)中心, 安装外部加

收稿日期: 2024-01-10 修回日期: 2024-02-28

基金项目: 东华理工大学博士科研启动基金项目“惯性静电约束聚变研究”(1410002033)

载负电压(-200 ~ -30 kV)的高熔点金属(钨、钼、钽等)构成的中空球网阴极,输入 1 Pa 以下的氘气或其他聚变气体,在电极之间发生电离放电,产生大量的离子与电子。产生的离子被球网阴极加速,大部分离子穿过阴极并往复运动,会聚在球网中心进行核聚变反应。IEC 装置具有一系列固有的优点^[2]:(1)没有等离子体点火的瓶颈,没有复杂的等离子体约束问题;(2)易于获得较高的离子能量(30 ~ 200 keV,相当于 3 亿 ~ 20 亿 °C 的温度),从而可以提高聚变反应截面;(3)装置内的离子是静电约束会聚的,对离子的约束简单并容易实现;(4)装置内的离子能谱是非马克斯韦分布的,越靠近装置中心的离子能量越高;(5)多重势阱的形成使反应率与离子流呈非线性关系,聚变反应率与离子流平方成正比,将产生高反应功率密度,大大提高反应器效率;(6)装置体积小,结构紧凑,移动方便,造价非常低廉。除了聚变能的开发,IEC 还可进行各种近期、中期和远期的非电应用开发^[3-6]。

目前,IEC 氘氘聚变的最高稳态中子产额是 10^8 n/s^[7-8],其输入的高压约 160 kV,高压电流约 60 mA,即输入的电功率约为 10 kW。 10^8 n/s 的中子产额所对应的聚变能输出为毫瓦量级,所以,IEC 装置的能量增益因子(指聚变输出能量与装置总输入能量的比值) $Q \approx 10^{-7}$ 。当然,不同的机械参数和电参数所获得的中子产额和 Q 值会不同,文献 [9] 报道的 Q 值取值范围为 $10^{-9} \sim 10^{-5}$,因此极低的 Q 值是 IEC 用于聚变能开发的重大障碍之一。

IEC 是在上世纪五六十年代分别由美国的 Fransworth^[10] 和苏联的 Lavrentyev^[11] 提出的。但之后的研究发现,存在阴极腐蚀和熔化等问题,为此, Bussard^[12-13] 提出用准球型的磁场(Polywell)替代栅网, Barnes 等^[14-15] 提出采用潘宁阱(Penning trap)等方法。这两种方法都是采用俘获注入电子形成虚阴极,虽然可以从一定程度解决球网阴极的腐蚀和熔化问题,但其电子俘获与约束问题难以满足聚变要求,所获得的虚阴极电位不能足够低,乃至使其发生核聚变都变得很困难。因此,栅网阴极的腐蚀和熔化问题仍然是 IEC 用于聚变能开发的另一个重大障碍。

文章重点针对 IEC 的栅网阴极腐蚀和熔化以及 Q 值低的问题。

1 Q 值低和阴极熔化问题的分析

聚变能开发装置的最关键的参数是 Q 值,因此首先分析影响 IEC 的 Q 值提高的因素。

尽管 IEC 在结构上非常简单,但其工作过程中却有非常复杂的物理过程^[16],包括非常复杂的离子和电子的损失、离子和电子的热化过程、电离与电荷交换过程、韧致辐射、离子上散布(upscattering)逃逸损失等。

离子损失的原因是球网阴极的拦截,这是造成阴极熔化主要因素。电子损失的原因是图 1 中所示的 IEC 装置结构对自由电子没有约束功能。在球网阴极加载负高压后,电子一旦产生,就一直向阳极加速运动,即便过程中也会电离聚变气体,将部分能量传递给其他粒子,乃至与正离子复合,但其绝大多数最终轰击到阳极,从而形成占比巨大的高压功率损耗,这是导致 Q 值难以提高的根本原因之一。

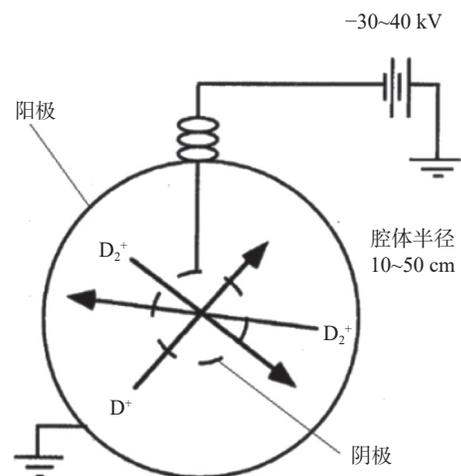


图 1 IEC 装置原理图

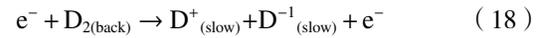
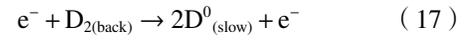
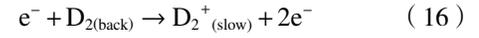
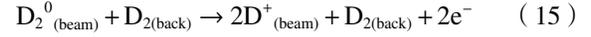
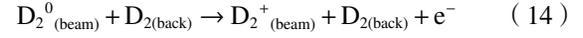
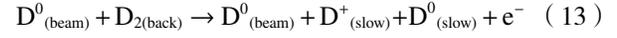
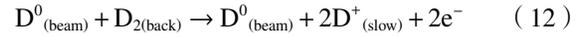
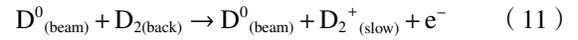
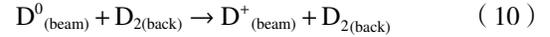
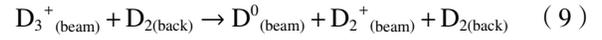
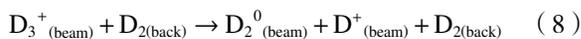
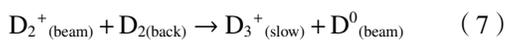
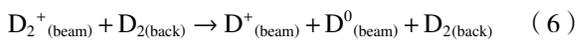
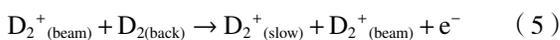
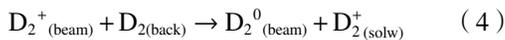
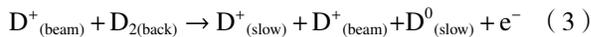
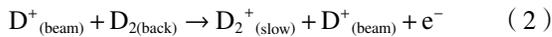
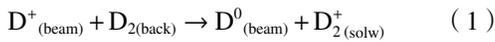
Fig. 1 The schematic diagram of IEC

离子和电子的热化过程是由于不同质量的粒子弹性碰撞导致的。如果弹性碰撞的粒子质量相同,只会发生粒子之间的速度交换,并不会改变粒子的能谱分布。如果弹性碰撞的粒子质量不同,则速度高的粒子会变成低的,而速度低的粒子会变成高的。粒子的速度由低变高,被称为热化。在 IEC 内存在原子离子和分子离子等不同种类的离子,如果原子离子和分子离子在同一个电位面上产生,原子离子在电场中加速所获得的速度是分子离子的 1.414 倍,因而原子离子进行聚变的概率更大。在二者第一次

弹性正碰之后,原子离子的速度变为原来的61%,分子离子的速度变为原来的127%,同时原子离子速度为碰撞前的分子离子速度的86%,分子离子速度为碰撞前的原子离子速度的90%,因而总的聚变发生概率只能降低。当然,如果弹性碰撞不是正碰,这种交换后的速度降低会小一些。

热化过程尽管也存在于离子和电子之间,但更多存在于氘离子和氘气分子之间。由于氘气分子密度比氘离子密度高3~4个数量级,聚变反应主要发生在带能氘离子和氘气分子之间以及带能离子轰击在阴极上^[17],而氘离子对氘气分子热化时间只有聚变时间的百分之一到千分之一^[16],这就使得聚变的 Q 值不可能大于1。其原因是绝大多数的带能氘离子会与氘气分子发生弹性散射而损失能量,使其从电场中获得的大部分能量不能用于聚变。因此,只有热化时间大于聚变时间时,即聚变大多数发生在带能离子之间,聚变 Q 值才有可能大于1。

电离与电荷交换的过程在IEC中非常复杂。一般的IEC装置内,球网阴极内的氘离子密度为 $10^{15} \sim 10^{16}/\text{m}^3$ ^[18-19],而0.1 Pa的氘气分子密度为 $10^{19}/\text{m}^3$,因而主要的电荷交换过程发生在氘离子与氘气分子之间。参与电荷交换的粒子种类主要包括原子离子、分子离子、 D_3^+ 、电子以及原子离子和分子离子中和后的中性粒子,如式子(1)~(18)所示,其中的下标beam表示从电场中获得能量的粒子,back表示没有在电场中获得加速的粒子,slow表示经过弹性碰撞后的低能粒子。负氘离子与负氘分子等其他离子的含量较少,故不考虑。在如此复杂的电荷交换过程中,必然使得大量的高压功率损失,部分高能中性粒子带走大量能量,从而降低了聚变效率。



值得注意的是,在某些IEC聚变装置中的三种氘离子的数量关系为^[16] $\text{D}_1^+ : \text{D}_2^+ : \text{D}_3^+ = 6 : 14 : 80$ 。

由于在相同电位产生的 D_3^+ 在电场的后续加速中获得的速度增量最低,但 D_3^+ 的含量却是最高的,因而这种电荷分布对聚变效率的提高是非常不利的。由于热化过程和电荷交换导致带电粒子能量分散,使得球网阴极附近的离子能谱如图2所示,对于160 kV阴极高压,离子的平均能量为60~70 keV,从而使得聚变效率降低。

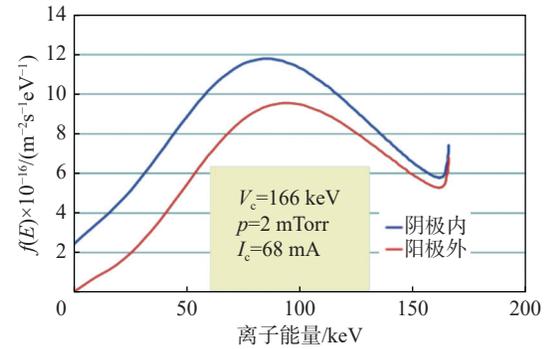


图2 球网阴极附近的离子能谱^[8]

Fig. 2 The ion energy spectrum near the cathode^[8]

离子上散布逃逸损失也是由于不同质量的粒子弹性碰撞导致的。如果原子离子和分子离子都在IEC阳极附近产生,则分子离子会在后续的热化过程中不断获得能量而从静电势阱中逃逸,碰撞到阳极而损失掉,这个过程就被称为上散布逃逸损失。这对聚变效率的影响非常不利,需要尽量避免。

对于韧致辐射,直接由高压电源加速产生的带电粒子能量大多只有数万电子伏特,其在IEC的真

空腔内产生的韧致辐射能量是非常有限的,因而韧致辐射主要产生于由聚变产生的高能粒子与电子之间。当然损失的电子和离子轰击电极会产生韧致辐射,但这些能量本来就会因为其失去约束的粒子而损失,影响 Q 值的主要因素不是由韧致辐射引起的。总之,韧致辐射对目前装置的聚变效率的影响不大。

2 内离子源 IEC 的提出

综上所述,IEC 的 Q 值和中子产额难以提高,以及球网阴极容易熔化的问题:(1)由于电子难以约束;(2)IEC 内复杂的热化和电荷交换过程;(3)离子在阴极上的拦截损失及其在阴极上的聚变放热^[17]。这些问题产生的根本原因在于,传统 IEC 将电离器和聚变器合二为一,只在阴阳极加载高压,直接将稀薄气体电离产生正离子和电子,即作为聚变器的 IEC 本身就是一个离子源,这就导致 3 个问题:(1)电离效率很低;(2)电子不能有效约束而损失造成巨大比例的功率损耗;(3)装置内产生非常复杂的物理过程而导致聚变效率难以提高。

对于第 1 个问题,电子电离氘分子最高的碰撞截面能量为 50 eV 左右,而 IEC 阴阳极加载的高压为数十千伏,因而其电离效率必然很低。对于第 2 个问题,在 IEC 阴阳极间运动的电子,一旦产生就向阳极运动,不能约束其在阴阳极间往复运动而造成相对巨大的高压功率损耗,从而导致 Q 值难以提高。对于第 3 个问题,由于 IEC 本身是个离子源,其真空度只能维持在 10^{-1} Pa 量级,其分子密度不能降低,这必然导致了复杂的电离与电荷交换过程、离子和电子的热化过程、离子上散布逃逸损失等难以降低或避免,从而导致了 Q 值难以提高,特别是中性分子相对于带能离子(在电场中获得能量的带电粒子)基本可以看作是静止的,使得带能离子对中性分子的热化过程从根本上限制了 Q 值的提高。

IEC 如果用于电能生产或用作强流中子源,由于其 Q 值很低,为了提高聚变功率或中子产额,必然需要加大装置内的离子流。离子流在装置内的分布基本上各向同性的,这就使得球网阴极上的粒子损失必相应增加,从而引起球网阴极的发热问题加剧,乃至熔化。

针对上述问题,有文献认为采用离子注入是将 IEC 用于聚变产能的唯一方法,然而目前的离子注

入都是采用常规的离子源,注入的离子只能一次运动通过 IEC 球网阴极后,就直接轰击到 IEC 阳极或真空器壁上损失掉了,不能实现离子的长时间约束^[2]。为此,文章提出一种新型内离子源 IEC 装置^[20]。所谓的内离子源是指,内离子源的阳极电位低于 IEC 装置的阳极电位,使得从内离子源引出注入到 IEC 的离子所具有的能量不能运动到高电位的 IEC 阳极,因此离子可以在 IEC 内长期约束往复运动,如图 3 所示。为避免高压引入支撑杆对离子运动的不利影响,可将离子源及离子运动初始轨道置于与高压引入支撑杆垂直的通过惯性静电约束装置中心的平面上,图 3 只是为了画图的方便而将高压引入支撑杆、内离子源和干扰器画在同一平面。

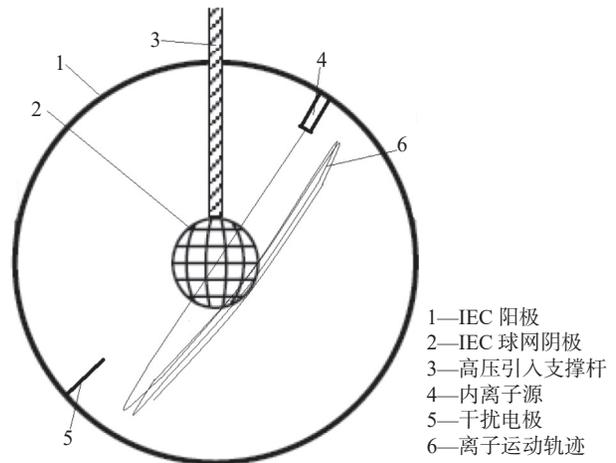


图 3 内离子源注入的 IEC 装置原理图

Fig. 3 The schematic diagram of IEC with inner ion source injection

标准的球形有心力场必然会使得注入的离子经过一次往复运动返回到离子源出口,或碰撞到离子源阳极上。为避免这种离子的快速损失,需要在 IEC 内设置离子运动轨迹的干扰装置,干扰装置可以采用电场或磁场,这里采用相对简单的电场干扰器 5。

首先,采用内离子源注入离子,必然带来离子运动分布的各向异性,因而可以通过优化设计球网结构,降低离子碰撞球网的机会,为改善高功率下球网的腐蚀与熔化问题提供了可能。

其次,采用内离子源直接注入离子技术,提高了粒子的电离效率,相应地可提高装置的 Q 值。潘宁离子源产生 0.1 mA 量级的流强的电离功率仅几瓦。

同时,采用离子源产生的 D^+ 离子的占比可以很高,降低了 D^{2+} 和 D^{3+} 的含量,从而降低了离子热化、电荷交换、上散布逃逸损失等不利因素的影响,可大幅提高 Q 值。

再者,由于采用内离子源提高了 IEC 装置中的真空度,从而降低了由氘气在 IEC 内电离产生的电子造成的高压电源的大功率损耗,也避免了复杂的电离与电荷交换过程、离子和电子的热化过程等,因而非常有利于提高装置的 Q 值和中子产额。对于 0.1 Pa 左右的真空度,离子的无碰撞往返运动一般只有 5 次,运动时间约为 $10 \mu s^{[21-22]}$,由于平均自由程与压强成反比,则真空为 10^{-4} Pa 的无碰撞往返运动次数和运动时间可提高 1 000 倍。最重要的是,真空度的提高和氘分子密度的降低,使得聚变主要发生于带能离子之间,避免了带能离子对中性分子的热化导致的 Q 值难以提高的根本问题。

最后,由于 IEC 内的离子是离子源注入的,其在球网阴极内的能量单色性远比图 2 所示的好,并且大部分离子能量集中在最高能量附近,因而可以大大提高聚变效率。对于磁约束聚变装置,要使得聚变 Q 值大于 1,等离子体必须处于热力学平衡状态,即离子能谱是马克斯韦分布的。如果离子能谱是非马克斯韦分布的,由于离子的核聚变反应截面远小于离子间的库仑碰撞截面,离子在产生核反应之前必定与其他离子进行充分的能量交换,使离子达到了热力学平衡状态。带能离子轰击固体靶,是不可能达到热力学平衡状态的,因为带能离子的大量能量传递给固体靶而不能参与聚变,使其 Q 值是不可能大于 1。传统 IEC 中的聚变有 3 种途径^[17]: (1)带能离子对撞;(2)带能离子与聚变气体聚变;(3)带能离子轰击阴极,与阴极内的聚变材料原子或分子聚变。这 3 种聚变中,第 2 和第 3 种在传统 IEC 中的聚变中占主要成分,第 1 种则非常少。第 2 和第 3 种聚变都是非热力学平衡状态,因而传统 IEC 的 Q 值是不可能大于 1 的。对于第 1 种聚变,虽然离子能谱是非马克斯韦分布的,但其不存在离子之间的热化的能量损失,即便存在能量交换,带能离子的能量也可基本全部用于聚变。因而传统 IEC 的 Q 值低的重要原因之一是带能离子的对撞聚变的几率远小于另外 2 种聚变途径。

3 内离子源 IEC 中子产额估算

为了计算 IEC 的中子产额,可假定注入束流 $I = 100 \mu A$ 。球网阴极的加载负高压为 -50 kV,则球网内的氘离子速度约为 $v = 2.1 \times 10^6$ m/s。计算球网阴极内的单次注入的离子密度的方法是,单位时间内注入的离子数除以单位时间的运动距离和束流截面。如果束流在球网内的束流半径为 $r = 1$ cm,则注入束流的氘离子密度为 $\rho = I/(\pi r^2 v e) = (1 \times 10^{-4}/1.6 \times 10^{-19})/(3.14 \times 10^{-2} \times 10^{-2} \times 2.1 \times 10^6) = 1.5 \times 10^{12}/m^3$,其中 e 是电子的电量。

在氘离子密度较低的时候,可只考虑氘离子弹性散射作用(因为球网经过优化设计,如果离子源的注入离子没有弹性散射是不会损失的)。对于 50 kV 的高压,阳极直径 $D = 0.5$ m,根据下一节的模拟计算,氘离子往复运动一次的时间约为 $1.4 \mu s$,其平均速度约为 3.8×10^5 m/s,平均能量为 1.5 keV,平均弹性散射截面不超过 10^7 barn。如果采用内离子源技术,不需要像传统 IEC 中持续通入氘气,IEC 内的真空度可控制为 10^{-4} Pa 量级,相应的氘分子密度约为 $\rho_D = 2.7 \times 10^{16}/m^3$ 。入射氘离子每次往复运动的弹性散射损失率为 $\sigma_D 2D = 10^7 \times 10^{-28} \times 2.7 \times 10^{16} \times 1.0 = 0.0027\%$,弹性散射后单次往返运动有 3% 的氘离子被球网拦截(球网 97% 的通透率容易实现),即入射氘离子单次往返运动损失率为 $0.0027\% \times 3\% = 0.000081\%$,叠加后的氘离子的饱和密度约为入射的 120 万倍(饱和密度与初始密度的比值是单次往返运动的损失率的倒数),即氘离子密度约为 $1.8 \times 10^{18}/m^3$ 。

IEC 正常的工作气压为 0.1 Pa,其氘气分子密度约为 $2.7 \times 10^{19}/m^3$ 。文献中给出的聚变放能的功率如式(19)所示^[15],由于同样的高压电源下,内离子源 IEC 的氘离子动能高于传统 IEC 的,因而碰撞截面 σ 和离子速度 v 也高;传统 IEC 的聚变主要发生于 $10^{16}/m^3$ 的氘离子和 $10^{19}/m^3$ 氘气分子之间的碰撞,二者乘积为 10^{35} 。内离子源 IEC 的聚变主要发生于氘离子对撞,因而 $10^{18}/m^3$ 的氘离子对撞的乘积为 10^{36} ,因此中子产额可以提高为传统 IEC 的 10 倍,从而有望获得高于 10^9 n/s 的氘氘中子产额。当然,上述估算都是采用了非常保守的计算,实际中子产额应该还要高的,因为内离子源技术从物理原理上是可以获得更高的中子产额的。

$$\frac{P_{\text{fus}}}{V} = \langle \sigma v \rangle E_{\text{fus}} n_{i1} n_{i2} \quad (19)$$

如果能够获得 10^9 n/s 的氘氚中子产额, 相应的聚变释能约为 1 mW, $100 \mu\text{A}$ 的氘离子的潘宁离子源的电离和加速功率不超过 10 W, 因而 Q 值可提高到 10^{-4} 以上。

上述计算未考虑空间电荷力的影响。阴极内的空间电荷力或离子密度过高时, 会形成多层势阱的电势分布^[23-25], 如图 4 所示。其产生的过程是, 阴极内过高的离子会俘获大量电子, 在阴极中心形成虚阴极, 电子密度过高时, 又会在虚阴极内再次形成虚阳极, 依次反复而形成多层势阱。多层势阱会大大增强阴极内的离子密度, 因而 $10^{18}/\text{m}^3$ 乃至更高的离子密度是在阴极内可以获得的。此外, 需要说明两个问题, 一是不管阴极球网内外的离子密度多高, 球网的电位是固定的, 离子密度只会影响阴极与阳极之间的电位分布, 以及阴极内的电位分布。由于球网电位的固定, 阴极与阳极之间的电位分布, 不会阻碍离子从阴极外入射阴极内, 但阴极内的电位分布会影响离子射入阴极内之后的能量, 乃至被空间电荷力反弹。

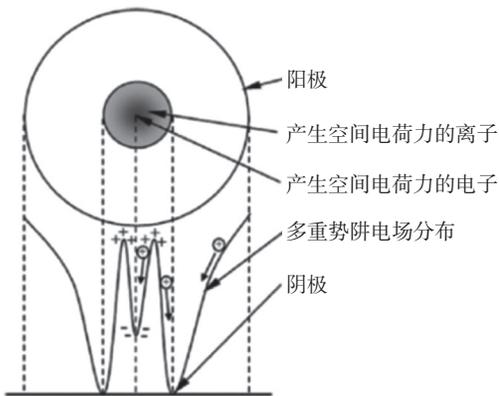


图 4 IEC 内的多重势阱^[25]

Fig. 4 The multiple potential well in IEC^[25]

上述计算也为考虑第 2 节中提到的离子能谱单色性变好的影响, 也未考虑复杂的电离与电荷交换过程、离子和电子的热化过程等各种其他的影响, 这些影响都可以在一定程度上抵消空间电荷力的不利影响, 从而可以获得更高的中子产额。总之, 上述计算是非常粗略的估算, 由于影响中子产额的因素很多, 目前还难以对其进行精确计算, 只能通过实验进行测量验证。

4 离子的各向异性

文章采用 CST 进行了初步的模拟计算。图 5 是 CST 程序建立的仿真计算模型, 其经圈为 1 个。计算参数如表 1 所示。为了屏蔽高压杆对离子运动的不利影响, 在高压杆外套一个电场屏蔽筒, 所形成的电场分布如图 6 所示。图 7~图 8 显示了单个离子短时间运动的视图, 其中不同颜色代表不同离子动能。图 9~图 10 显示了多个离子的长时间运动视图。图 7~图 10 中的离子都是从左侧入射。

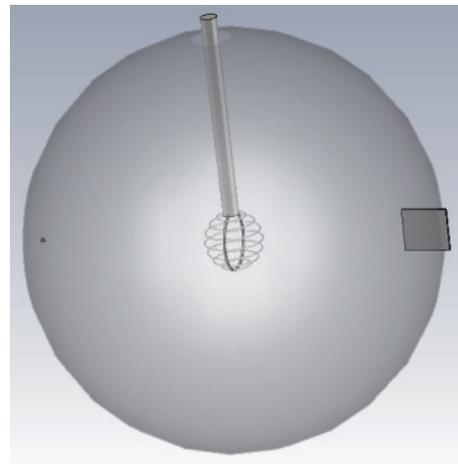


图 5 CST 的 IEC 建模

Fig. 5 The modeling of IEC by CST

表 1 内离子源 IEC 模拟计算参数

Tab. 1 The simulation calculation parameters of inner ion source IEC

参数	数值
阴极高压/kV	50
离子流强/mA	0.1
阳极直径/m	0.5
阴极直径/m	0.01
离子枪直径/mm	1

图 7~图 8 计算结果显示, 离子受干扰电极和离子源电位的影响, 以及阴极丝的畸变场分布影响, 离子运动轨迹为非闭合的, 且为复杂的三维结构, 这与常规的有心力场内的圆锥运动曲线是不同的。但这种三维运动大多处于通过球心垂直于高压引入支撑

杆的平面(简称垂杆球心平面)附近,因而离子的运动方向具有明显的各向异性,即离子的空间分布在球坐标的仰角 θ 方向是不均匀的,这在图 9 ~ 图 10 中显示非常明显,这就为球网阴极的优化设计提供了可能,从而可以降低球网阴极的发热和腐蚀。图 9 ~ 图 10 中,其平均效果是,离子基本平均分布于垂杆球心平面附近,当然在离子源、干扰电极和阴极经圈的左右上下 4 个方向,由于电场畸变的影响和阴极经圈对离子的拦截使得其离子分布相对偏少。此外,有少量离子会大幅偏离垂杆球心平面,但在有心力场的作用下,仍然可以约束其往复运动。

受软件功能限制,上述计算未考虑离子之间相互碰撞及空间电荷力的影响,但由于离子碰撞几率很低,而空间电荷力是各向同性的,不会从根本上改变上述离子各向异性分布的特点。上述计算未研究不同阴极丝的空间分布变化对离子运动轨迹的影响,

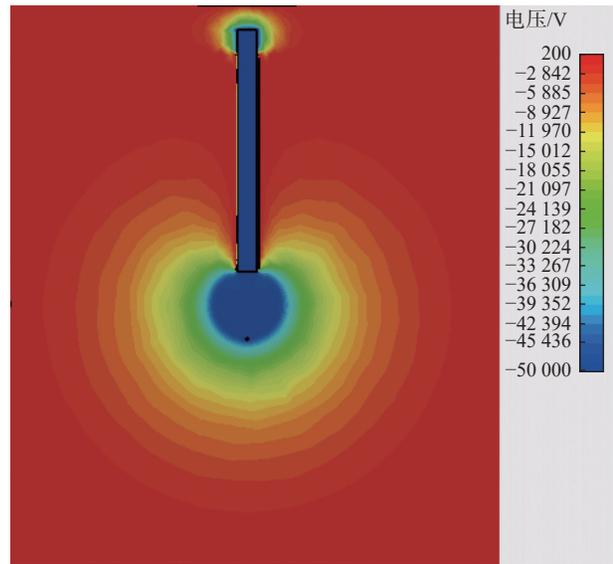


图 6 高压杆引起的场分布畸变

Fig. 6 Field distribution distortion caused by high-pressure rods

需要进一步详细研究,文章在此不做进一步讨论。

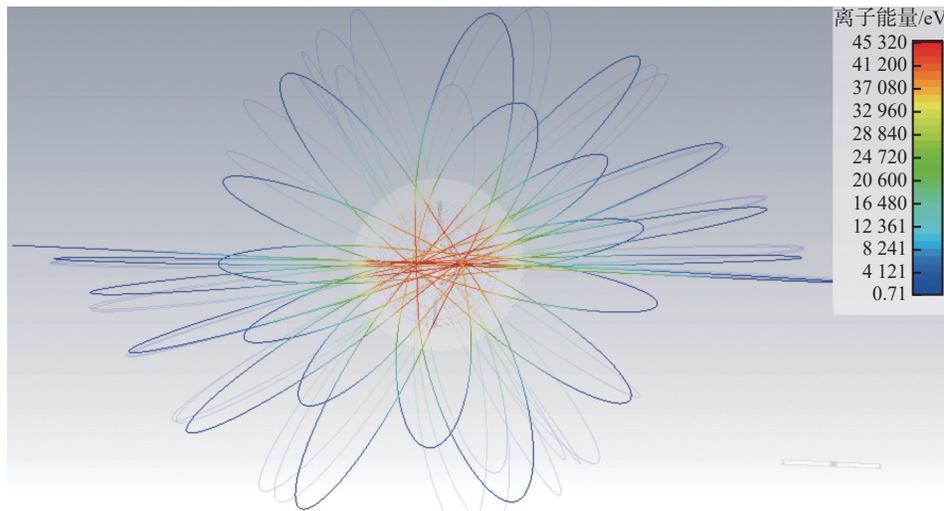


图 7 单个离子运动俯视图

Fig. 7 Top view of individual ion movement

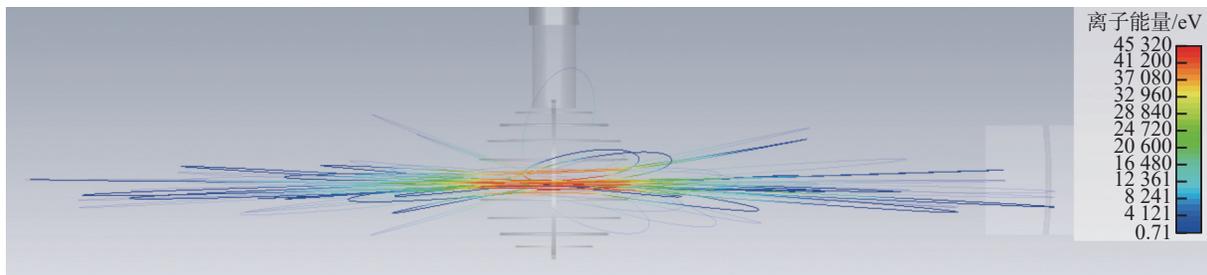


图 8 单个离子运动侧视图

Fig. 8 Side view of individual ion movement

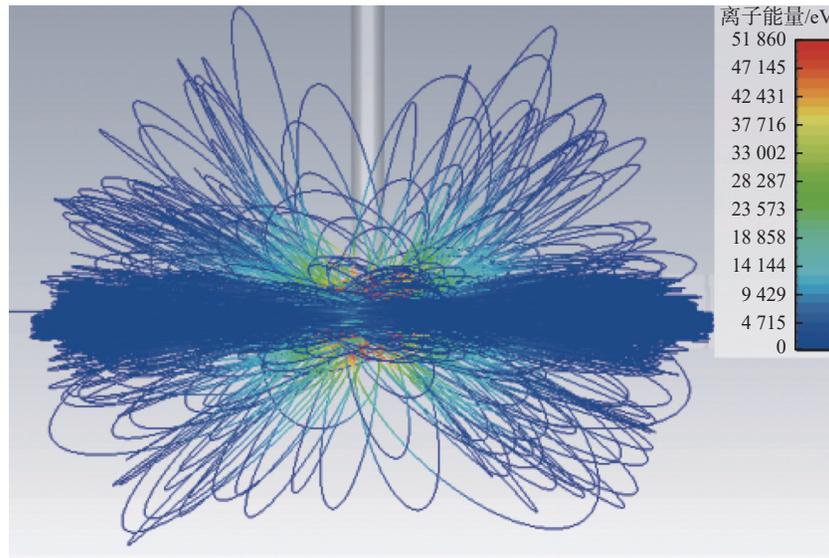


图 9 多个离子长时间运动侧视图

Fig. 9 Side view of multiple ions moving for a long time

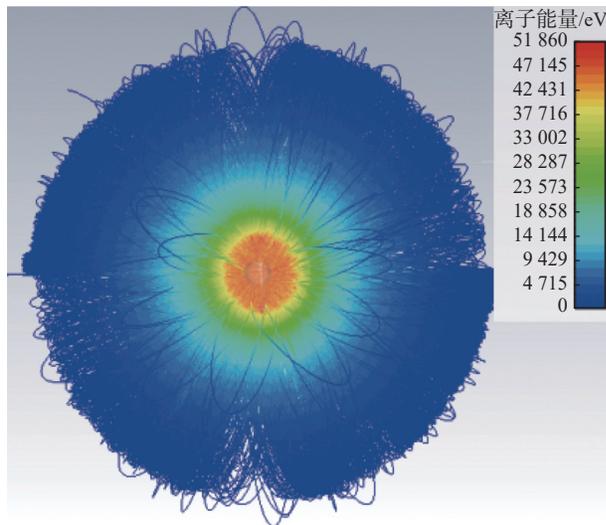


图 10 多个离子长时间运动俯视图

Fig. 10 Top view of multiple ions moving for a long time

5 结论

通过对传统 IEC 的分析,发现 IEC 的 Q 值难以提高的原因是聚变器与电离器合二为一,采用离子源注入的方法,可以将聚变器与电离器的功能分开。但这需要解决注入离子的长期约束问题,为此提出内离子源和离子运动干扰装置,同时提高 IEC 内的真空度。因此,内离子源 IEC 中,由于电荷交换导致的离子损失可大幅降低,离子热化导致的离子损失也可以忽略,主要的离子损伤还是发生在离子与阴极的碰撞。通过对离子运动轨迹进行了初步模拟计

算,得到明显的各向异性的离子运动分布,这对离子损失的降低有非常大的帮助,从而有望提高 IEC 的 Q 值和解决球网阴极的熔化腐蚀问题。

参考文献:

- [1] 胡星光, 宋执权, 高格, 等. ITER 聚变装置及其电源系统 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 19-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002.
HU X G, SONG Z Q, GAO G, et al. ITER fusion device and its power supply system [J]. Southern energy construction, 2022, 9(2): 19-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002.
- [2] MILEY H G, MURALI S K. Inertial electrostatic confinement (IEC) fusion: fundamentals and applications [M]. New York: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-1-4614-9338-9.
- [3] KULCINSKI G L, SANTARIUS J F. Non-electric applications of the inertial electrostatic confinement fusion concept [J]. Fusion science and technology, 2013, 64(2): 365-372. DOI: 10.13182/FST13-A18104.
- [4] KULCINSKI G L. Non-electric applications of fusion energy - an important precursor to commercial electric power [J]. Fusion technology, 1998, 34(3P2): 477-783. DOI: 10.13182/FST98-A11963658.
- [5] KULCINSKI G L, SANTARIUS J F. New opportunities for fusion in the 21st century - advanced fuels [J]. Fusion technology, 2001, 39(2P2): 480-485. DOI: 10.13182/FST01-A11963282.
- [6] MCCARTHY K, BAKER C, CHENG E, et al. Nonelectric applications of fusion [J]. Journal of fusion energy, 2002, 21(3/4): 121-153. DOI: 10.1023/A:1026281007353.
- [7] HIRSCH R L. Inertial-electrostatic confinement of ionized fusion gases [J]. Journal of applied physics, 1967, 38(11): 4522-4534. DOI: 10.1063/1.1709162.

- [8] SANTARIUS J F, EMMERT G A. Atomic physics effects on convergent, spherically symmetric ion flow [C]//Presented at the 8th US-Japan IEC Workshop, May 10-12, 2006. Osaka, 2006.
- [9] DOBSON C C, HRBUD I. Electron density and two-channel neutron emission measurements in steady-state spherical inertial-electrostatically confined plasmas, with review of the one-dimensional kinetic model [J]. *Journal of applied physics*, 2004, 96(1): 94-108. DOI: [10.1063/1.1755854](https://doi.org/10.1063/1.1755854).
- [10] FARNSWORTH P T. Electric discharge device for producing interactions between nuclei: 3258402 [P]. 1966-06-28.
- [11] LAVRENTYEV O A. Investigation of plasma containment by a magnetic field layer [J]. *Ukr. Fiz. Zh.*, 1963, 8: 446.
- [12] BUSSARD R W. Method and apparatus for controlling charged particles: 4826646 [P]. 1989-05-02.
- [13] BUSSARD R W. Some physics considerations of magnetic inertial-electrostatic confinement: a new concept for spherical converging-flow fusion [J]. *Fusion technology*, 1991, 19(2): 273-293. DOI: [10.13182/FST91-A29364](https://doi.org/10.13182/FST91-A29364).
- [14] BARNES D C, NEBEL R A, TURNER L. Production and application of dense Penning trap plasmas [J]. *Physics of fluids B: plasma physics*, 1993, 5(10): 3651-3660. DOI: [10.1063/1.860837](https://doi.org/10.1063/1.860837).
- [15] BARNES D C, MITCHELL T B, SCHAUER M M. Beyond the Brillouin limit with the Penning fusion experiment [J]. *Physics of plasmas*, 1997, 4(5): 1745-1751. DOI: [10.1063/1.872276](https://doi.org/10.1063/1.872276).
- [16] RIDER T H. A general critique of inertial-electrostatic confinement fusion systems [J]. *Physics of plasmas*, 1995, 2(6): 1853-1872. DOI: [10.1063/1.871273](https://doi.org/10.1063/1.871273).
- [17] BAKR M, WULFKÜHLER J P, MUKAI K, et al. Evaluation of 3D printed buckyball-shaped cathodes of titanium and stainless-steel for IEC fusion system [J]. *Physics of plasmas*, 2021, 28(1): 012706. DOI: [10.1063/5.0033342](https://doi.org/10.1063/5.0033342).
- [18] TOLEDO G E B. Analysis of fast neutral particles in inertial electrostatic confinement fusion devices [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2014.
- [19] KIPRITIDIS J, KHACHAN J, FITZGERALD M, et al. Absolute densities of energetic hydrogen ion species in an abnormal hollow cathode discharge [J]. *Physical review E*, 2008, 77(6): 066405. DOI: [10.1103/PhysRevE.77.066405](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.066405).
- [20] 李金海, 刘丹. 一种内离子源惯性静电约束聚变装置: 202010138339.3 [P]. 2020-06-05.
- LI J H, LIU D. One kind of IEC with inner ion source: 202010138339.3 [P]. 2020-06-05.
- [21] GHAMMAS H, NASRABADI M N. Investigating the effect of changing parameters in the IEC device in comparative study [J]. *Nuclear engineering and technology*, 2024, 56(1): 292-300. DOI: [10.1016/j.net.2023.09.038](https://doi.org/10.1016/j.net.2023.09.038).
- [22] BAKR M, SAKABE T, WULFKÜHLER J P, et al. Influence of electrodes' geometrical properties on the neutron production rate of a discharge fusion neutron source [J]. *Physical of plasmas*, 2023, 30(3): 032701. DOI: [10.1063/5.0134631](https://doi.org/10.1063/5.0134631).
- [23] MILEY G H. A portable neutron/tunable X-ray source based on inertial electrostatic confinement [J]. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, 1999, 422(1/3): 16-20. DOI: [10.1016/S0168-9002\(98\)01108-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01108-5).
- [24] GU Y B, MILEY G H. Experimental study of potential structure in a spherical IEC fusion device [J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2000, 28(1): 331-346. DOI: [10.1109/27.842929](https://doi.org/10.1109/27.842929).
- [25] MURALI S K, SANTARIUS J F, KULCINSKI G L. Effects of the cathode grid wires on fusion proton measurements in inertial-electrostatic confinement devices [J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2011, 39(2): 749-755. DOI: [10.1109/TPS.2010.2090542](https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2090542).

作者简介:



李金海

李金海(第一作者, 通信作者)

1974-, 男, 东华理工大学研究员, 博士, 主要从事核技术应用专业研究工作(e-mail) 13661338455@163.com。

(编辑 徐嘉铨)