



·粒子束及加速器技术·

氢原子束在大气长程传输中自剥离效应研究^{*}

沈 硕¹, 郝建红¹, 张 芳², 赵 强², 范杰清¹, 董志伟²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘 要: 氢原子束在大气传输时, 束流粒子与大气粒子碰撞电离形成的大气剥离效应, 以及和大气剥离产生次级粒子碰撞电离形成的自剥离效应, 是造成氢原子束能量损失的重要机制。考虑到自剥离效应成因复杂, 虽然目前已有一些理论方面的研究结果, 但对其发生机理和对束流损失效果尚未有实验或数值模拟方面的工作, 因此, 通过对自剥离效应的发生机理和对束流损失的影响进行分析, 进一步完善了自剥离效应理论, 在通过束流传输方程验证了粒子云网格-蒙特卡罗法对氢原子束大气传输仿真模拟适用的基础上, 将仿真结果与自剥离理论进行了对比, 验证了自剥离效应理论的适用性。模拟结果表明, 自剥离效应是由束流被大气电离产生的带电次级粒子团在地磁场的影响不停地穿越束流导致的, 且自剥离效应的强弱与原子束的密度有关, 束流密度越大, 自剥离效应越强, 对束流的影响越大。

关键词: 中性束; 大气长程传输; 自剥离效应; 蒙特卡罗方法

中图分类号: O46

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210481

Study on beam-induced-stripping effect of hydrogen atom beam in long distance propagation in atmosphere

Shen Shuo¹, Hao Jianhong¹, Zhang Fang², Zhao Qiang², Fan Jieqing¹, Dong Zhiwei²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: When the hydrogen atom beam is transmitted in the atmosphere, the atmospheric stripping effect formed by the collision ionization between the beam particles and the atmospheric particles and the self-stripping effect formed by the collision ionization with the atmospheric particles are the important mechanisms causing the energy loss of the hydrogen atom beam. Due to the complex causes of self-stripping effect, although there are some theoretical research results, there is no experimental or numerical simulation work on its occurrence mechanism and beam loss effect. Therefore, this paper further improves the theory of self-stripping effect by analyzing the occurrence mechanism of self-stripping effect and its influence on beam loss. On the basis of verifying the applicability of particle cloud grid Monte-Carlo method to the atmospheric transport simulation of hydrogen atom beam through the beam transport equation, the simulation results are compared with the self-stripping theory, which basically verifies the applicability of the self-stripping effect theory. The simulation results show that the self-stripping effect is caused by the charged secondary particle clusters produced by the beam ionization by the atmosphere constantly passing through the beam under the influence of the geomagnetic field, and the strength of the self-stripping effect is related to the density of the atomic beam. The greater the beam density, the stronger the self-stripping effect, and the greater the influence on the beam.

Key words: neutral beam, atmospheric long-range propagation, beam-induced stripping, Monte-Carlo method

由于人类的探空活动和太空碎片的 Kessler 效应^[1], 危险碎片的数量不断增长且已达到了百万量级^[2-3], 多种碎片清理方式已被提出, 包括机械抓捕、激光清理、粒子束清理^[4-5]等。考虑到未来原子束对近地轨道太空垃圾的清理作用和太空探索中潜在的应用价值^[6-8], 对大气环境下原子束长程传输的物理特性展开研究是十分必要

* 收稿日期: 2021-11-04; 修订日期: 2022-02-26

基金项目: 高功率微波技术重点实验室基金项目 (6142605200301); 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目 (U1730247)

联系方式: 沈 硕, 530802944@qq.com。

通信作者: 张 芳, zhang_fang@iapcm.ac.cn。

的。束流的几何弥散、束流与大气粒子的弹性散射和核相互作用,以及束流的高能辐射等是影响大气中原子束传输的几个重要因素。由于核相互作用和束流高能辐射仅在高能原子束的情况下发生,而几何弥散和弹性散射对束流能损影响较小,因此在研究低能原子束时,多数情况下主要考虑的束流能损机制是束流原子与粒子间的碰撞电离,且因原子束的电中性,地磁场对原子束大气传输的影响很少关注,相关的研究工作也较少。在实际传输中,地磁场虽然对束流原子本身不产生影响,但对束流与大气粒子相互作用产生的带电次级粒子会产生作用,由于这些次级粒子拥有较高的速度和较大的密度,在一定的条件下,将有可能与束流粒子发生碰撞电离,对束流传输造成较大的损耗。

在已报道的相关研究中,多数选择将束流与大气粒子相互作用所产生的带电次级粒子视为中性化等离子体,将其在地磁场中的运动规律^[9-13]与束流传输相结合,从理论上概述了带电次级粒子在地磁场的作用下对束流自身可能造成的碰撞电离,并将这种碰撞电离称为束流的自剥离效应^[13-15]。文献[14]认为,束流自剥离的发生需要满足两个基本条件:一是带电次级粒子在地磁场的作用下形成极化电场,二是该极化电场足以让带电次级粒子穿越磁力线运动。这些条件初步从理论上描述了自剥离效应的发生机理,但迄今对于原子束的自剥离效应的试验验证或者仿真模拟验证尚未见报道。因此,对中性原子束在大气环境传输过程中的自剥离效应而言,缺乏更为细致和清晰的物理机理及物理过程的图像描述。例如,中性化束在磁场环境传输中发现的极化电场,该场可以使得中性化束中的离子震荡传输,是中性束自剥离理论的基础。但是相较于中性化等离子体束而言,由中性原子产生的次级带电粒子的速度,无论是纵向速度或横向速度,均具有随机性,这样的带电粒子团能否产生同中性化束接近的效果,应该给出更加可靠的依据。

由于原子束大气传输的实物试验成本过高,理论研究也不够成熟,因此,本文使用粒子云网格-蒙特卡罗(PIC-MCC)的方法,以1 MeV的中性氢原子束为例,结合相关理论,对低能氢原子束大气长程传输的物理现象进行了仿真模拟。对模拟结果进行分析,并与束流传输方程的计算结果进行比较,验证了模拟方法和模型的可靠性,并给出自剥离效应更为细致的物理机理。通过大气环境下原子束长程传输时束流损失的仿真评估,为今后氢原子束长程传输的参数选取提供参考。

1 理论模型

1.1 自剥离理论模型的推导

当中性氢原子束垂直于地磁场传输时,考虑到束流被大气剥离产生的电子与氢离子(均称为次级粒子)具有约等于束速度的纵向速度,以及相对较小的横向速度,且这些次级粒子均在束流内产生。大气被束流电离的产物(如氮、氧离子)拥有较小的速度,可以忽略。因此,参照文献[13-15],由束流产生的带电次级粒子团可以视为中性化离子束,在地磁场的作用下,其受到磁力的作用,产生了一个垂直于磁场方向的极化电场,文献[15]已详细阐述,文献[13]和[14]分别做了PIC的仿真和实物实验,均验证了这一结论。带电次级粒子在地磁场的作用下形成的方向垂直于磁场的极化电场 E 的表达式为

$$\varepsilon_0 E_y = n_e e y_e \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 E_x = n_e e x_e \quad (2)$$

式中: ε_0 是真空介电常数; E_y, E_x 是 y 方向和 x 方向的电场; y_e, x_e 是次级电子在 y 方向和 x 方向的偏移距离; n_e 是次级电子的密度。

在极化电场和地磁场的影响下,中性化离子束中带电次级粒子的运动特性会有所变化。由于电子纵向速度远远大于横向速度,可忽略横向速度的影响,电子的洛伦兹力方程

$$m_e y_e'' = -q E_y + q v_x B_z \quad (3)$$

考虑电子的初始状态,边界条件为 $y_e|_{t=0} = 0, y_e'|_{t=0} = v_y$,求解方程可得

$$y_e = \frac{\Omega_e v_x}{\omega_{pe}^2} \cos \omega_{pe} t + \frac{v_y}{\omega_{pe}} \sin \omega_{pe} t - \frac{\Omega_e v_x}{\omega_{pe}^2} \quad (4)$$

式中: $\omega_{pe} = \frac{e}{\sqrt{m_e \varepsilon_0}} \sqrt{n_e}; \Omega_e = \frac{e B_z}{m_e}$ 。

由上述推导可以发现,束流被大气剥离产生的带电粒子先在地磁场的作用下,首先产生了一个方向与地磁场垂直且伴随着束流运动的极化电场,之后在地磁场和极化电场的共同作用下,以一定的振幅和频率在束流附近波

动前行,与束粒子发生碰撞,产生了自剥离效应,造成束流损失。由于自剥离效应同样会产生带电次级粒子,自剥离效应的发生会越来越强,直到地磁场和极化电场不能束缚更多的带电粒子为止。

在束流水平传输、大气环境不变的条件下,对式(4)中的变量影响分析如下:在束速度不变的情况下,除 ω_{pe} 外,式中其他的物理量基本保持不变,束密度增大,次级带电粒子密度增大, ω_{pe} 增大,即频率增大,且 y_e 减小,自剥离效应的强度随之增大。

对于氢离子,虽然方程的解类似,且在式(4)中第1、第3项的系数与质量无关,但第2项系数增大了 $\sqrt{m_p/m_e}$ 。因此,氢离子的振幅和周期都会远远大于电子。因此,在自剥离的过程中,电子的参与度会远远超过氢离子。只有在束密度大到一定程度时,才需要考虑氢离子的影响,但这一密度就目前来看是难以实现的,因此暂时不考虑。

1.2 束流传输方程

考虑束流与大气的相互作用,给出束密度随传输距离的方程^[16]

$$b = \frac{N[A + B(N - b)]}{A} \exp[-(A + BN)x] \quad (5)$$

式中: $A = \sum_{i=1}^n \sigma_i n_i$ 是大气对束流造成的损失参数; $B = \sum_{j=1}^2 \gamma_j \sigma_j$ 是自剥离效应造成的束流损失参数; x 是传播距离; b 是束流密度; σ_i, σ_j 是剥离截面; n_i 是大气成分粒子的密度; n_j 是束流经大气剥离后的产物粒子密度; γ_j 是几何因子。

当不考虑自剥离效应时,式(5)简化为

$$b/N = \exp(-Ax) \quad (6)$$

当考虑自剥离效应,且自剥离效应不强时,即 $B(N - b) \ll A$,式(5)可以简化为

$$b/N = \exp[-(A + BN)x] \quad (7)$$

2 模拟结果

2.1 PIC-MCC 模拟法验证

使用PIC-MCC模拟法,对不同密度的束流在海拔110 km处垂直于地磁场水平传输时的情况进行仿真,并与1.2节所给出的束流传输方程进行对比,结果如图1所示。参考式(6),对束密度归一化后的结果与初始束密度无关,因此不考虑初始束密度的影响。由图1可知,PIC-MCC的结果与束流传输方程基本一致,可以说明PIC-MCC在不考虑自剥离效应时,对氢原子束大气长程传输的模拟是可信的。

参考式(7),束密度归一化后的结果与初始束密度有关,因此给出两种不同初始束密度下的结果,如图2所示。仿真结果显示,PIC-MCC模拟氢原子束自剥离效应的结果与束流

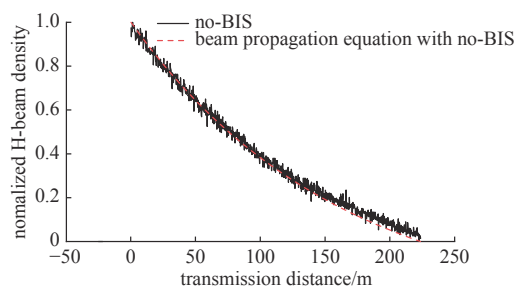


Fig. 1 Comparison between PIC-MCC simulation results and beam propagation equation without considering self-stripping

图1 在不考虑自剥离时PIC-MCC模拟结果与束流传输方程对比

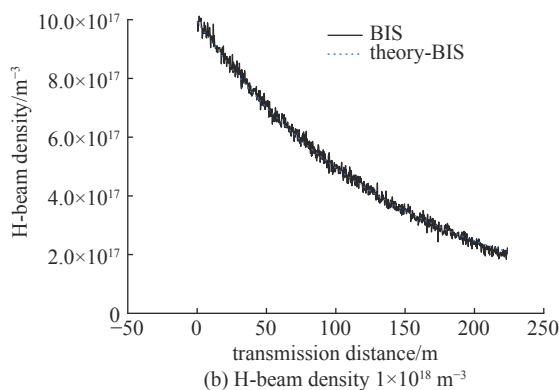
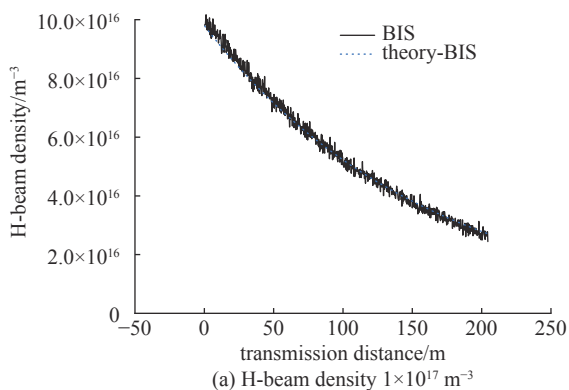


Fig. 2 Comparison between PIC-MCC simulation results and beam propagation equation with considering self-stripping

图2 考虑自剥离时PIC-MCC模拟结果与束流传输方程对比

传输方程的结果拟合得很好,验证了 PIC-MCC 模拟自剥离效应的正确性。

2.2 自剥离效应模拟

为验证 1.1 节所推出的自剥离理论的适用性,在此通过 PIC-MCC 模拟法建立束流在大气环境下垂直与地磁场平行传输的模型,并给出仿真结果,主要包括对极化电场、次级带电粒子随束流波动传输以及自剥离效应发生的验证。模型大气环境由密度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 的氮气近似组成,地磁场强度为 $2.6 \times 10^{-5} \text{ T}$,方向为垂直于束流传输方向,具体的模型示意如图 3 所示。

图 4 为 E_y 的径向分布,横坐标为 y 方向的距离坐标,束流中心在 15 m 处,束半径为 0.1 m。由 1.2 节理论可得,就本文仿真条件而言,在氢原子束附近很大范围内,极化电场与电子的偏移距离 y_e 近似呈正比,且斜率与式(1)由电子密度求出的值相差不大,与文献 [11] 的模拟结果一致。因此可以认为,由氢原子束大气长程传输中产生的带电次级粒子在地磁场的作用下,可以形成极化电场。

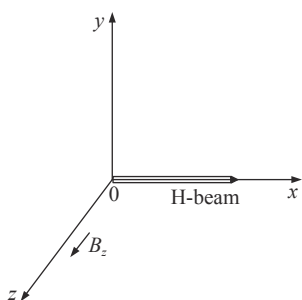


Fig. 3 Schematic diagram of atmospheric transport model of hydrogen atom beam

图 3 氢原子束大气传输模型示意

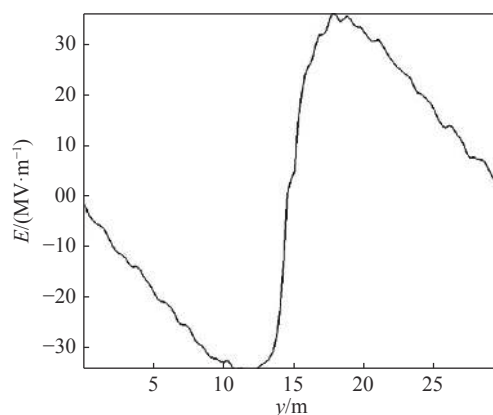


Fig. 4 Polarization electric field of hydrogen atom beam

图 4 氢原子束极化电场

如图 5、图 6 所示,绿色点为氢原子束被大气剥离产生的次级电子的位置分布,红色点为自剥离生成电子的位置分布。由于氢原子呈电中性,不受电磁力的影响,而粒子碰撞在传输距离较短时(小于 km 量级)不会导致束流明显发散,因此图中氢原子束的分布合理。在图 5、图 6 中可以明显看到,无论哪种剥离方式产生的电子,均沿着氢原子束波动传输,因此必然会导致电子与氢原子的碰撞电离。首先,证明了大气剥离产生的电子在地磁场的作用下又会导致自剥离效应的发生;其次,自剥离电子和大气剥离电子相似分布说明自剥离产生的电子同样会加入到之后的自剥离活动去中,使得自剥离效应进一步加强。对比图 5 和图 6 还可以发现,束流密度增大,自剥离产生的粒子数量也会增多,这与 1.1 节中的理论推断一致。

如图 7 所示,横坐标为传输时间,纵坐标为电子自剥离产生的次级粒子(E-BIS)和氢离子自剥离产生的次级粒子(H ion-BIS)的数量比。由图 7 可知,电子自剥离与氢离子自剥离次级粒子数量之比稳定在 22 附近,二者之比在 $0.25 \mu\text{s}$ 后出现比值,这说明氢离子自剥离产物在 $0.25 \mu\text{s}$ 后才存在,图中比值开始在 60 附近,这是由于电子自剥离

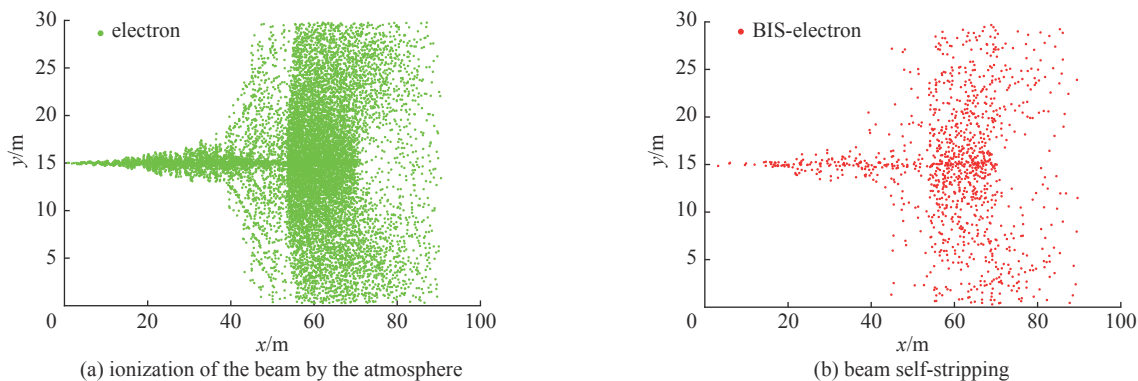


Fig. 5 Beam-induced stripping (BIS) products of hydrogen atomic beam (H -beam density $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$) propagating in atmosphere under the influence of geomagnetic field

图 5 密度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 氢原子束大气传输时部分粒子的位置分布

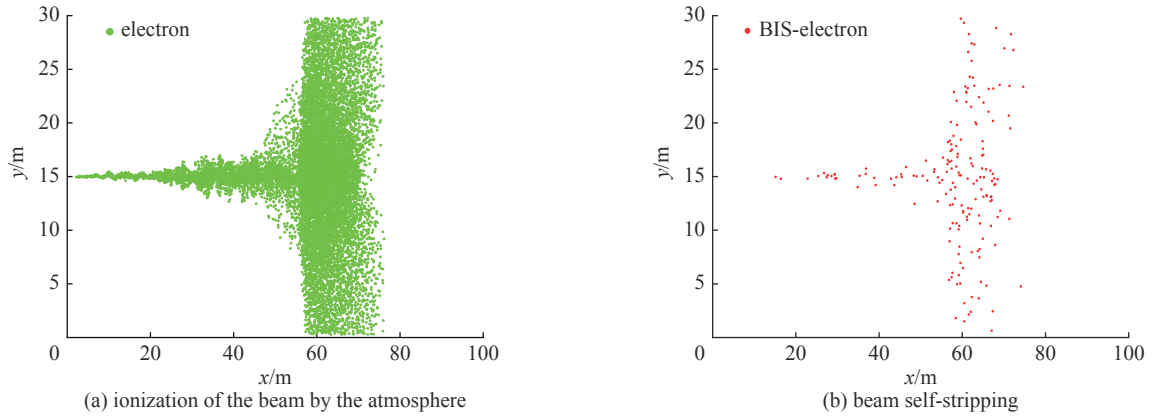


Fig. 6 BIS products of hydrogen atomic beam (H -beam density $1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$) propagating in atmosphere under the influence of geomagnetic field

图 6 密度为 $1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 氢原子束大气传输时部分粒子的位置分布

发生较快,在 $0.25 \mu\text{s}$ 有了大量的积累,开始的比值异常。这可以说明,电子导致的自剥离的强度远远大于氢离子导致的自剥离的强度,并且电子自剥离的发生相较氢离子更加迅速,同时也验证了在 1.1 节中理论推导得出的氢离子过重自剥离效果较弱的结论。

对次级粒子自剥离效果本身进行分析,取传输时间为横坐标,取次级粒子自剥离产物的数量和次级粒子的数量之比为纵坐标,具体结果如下:

由图 8(a)可知,比值在 $0.1 \mu\text{s}$ 后迅速从 0 升到 0.22,这说明电子自剥离效应的发生需要一定的准备时间,即需一定强度的极化电场的产生。由于在此次仿真中,并未考虑粒子碰撞级联的情况,即未考虑电子自剥离产物的自剥离效果,但在实际上由电子产生的自剥离的效果会比图中所示更强一些。由图 8(b)可知,氢离子自剥离的发生要比电子晚一些,在 $0.25 \mu\text{s}$ 之后,氢离子自剥离的比值远远小于的电子自剥离的比值,氢离子自剥离效果基本为 0。但二者曲线的形式是类似的,均为随模拟时间迅速上升后平稳,曲线尾部的下降则是由于仿真区域过小导致的粒子丢失问题引起的。

在验证了自剥离理论的适用性后,对 PIC-MCC 模拟的自剥离效应对束流损失造成的影响进行分析。从图 9 所示的自剥离效应来看,在束密度逐渐增大的过程中,自剥离效应的影响逐渐变大。在初始束密度的数量级为 10^{16} 与 10^{17} 时,二者造成的束密度曲线相差不大,但略有增长;对比初始束密度的数量级为 10^{17} 与 10^{18} 时,二者造成的束密度曲线相差较大,束流损失增长明显。这说明随初始束密度增大,自剥离效应的增强是非线性的,这与束流

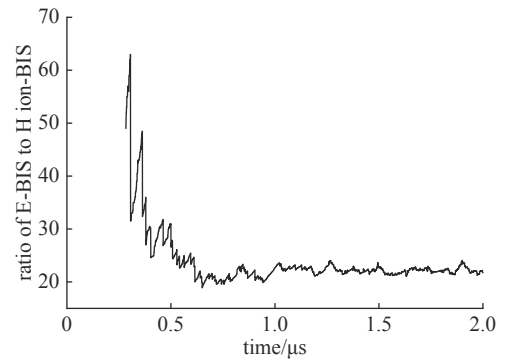


Fig. 7 The ratio of the number of secondary particles produced by electron self-stripping to that produced by hydrogen ion self-stripping

图 7 电子自剥离产生的次级粒子与氢离子自剥离产生的次级粒子的数量比

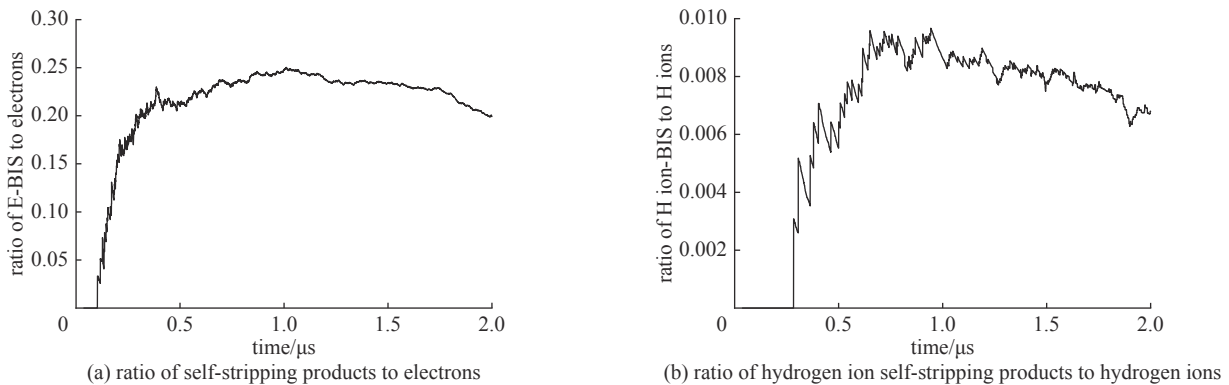


Fig. 8 Comparison of BIS effect of different kinds of secondary particles

图 8 不同种类次级粒子自剥离效果对比

方程理论得出的结论是一致的^[16],也与自剥离理论给出的结论一致,进一步说明自剥离理论的适用性。

3 结论

研究了氢原子束在大气环境下长程传输中的自剥离效应,对自剥离效应发生的机制、氢原子束的作用过程以及作用结果,均进行了较为深入研究。

(1)自剥离的发生是由地磁场作用在剥离氢原子产生的带电次级粒子所导致的,整个过程分为两步:第一步是这些带电次级粒子在地磁场的作用下,产生了一个与地磁场方向垂直的、伴随束流一起运动的极化电场;第二步是带电次级粒子在极化电场和地磁场的共同作用下围绕束流运动,与束原子碰撞导致了自剥离的发生。

(2)由于在第二步的过程中,质子的质量相对电子较大,导致质子在束流内的波动周期远远大于电子的波动周期。在自剥离过程中,参与电子更多,参与的质子较少,因而自剥离效应主要来源于次级粒子中的电子对氢原子束的剥离。

(3)自剥离的强度随束密度的增加而增加,这是由于束密度的增加会导致带电次级粒子密度的增加,导致更快地产生强度足够的极化电场、更多的参与自剥离的次级粒子以及更高的等离子体频率,这些都会加剧自剥离效应对束流的影响。

(4)数值模拟结果进一步验证了束流传输方程的可靠性,在束密度不会远远超过大气密度的情况下,束流传输方程可以用来计算束流传输距离。对于更高海拔的数值模拟工作,由于高度越高空气密度越小束流传输距离越长,在300 km处束流可以传输几十 km。对于PIC-MCC模拟法而言,这一距离对计算资源的消耗极大,现在的实验室难以满足,同样仿真区域过小将导致较长时间后仿真结果出现误差。

参考文献:

- [1] Kessler D J, Cour-Palais B G. Collision frequency of artificial satellites: the creation of a debris belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, 83(A6): 2637-2646.
- [2] ESA. Space debris by the numbers[EB/OL]. [2022-01-15]. https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers.
- [3] Tarran B. Prepare for impact: space debris and statistics[J]. *Significance*, 2021, 18(3): 18-23.
- [4] Levchenko I, Baranov O, Fang Jinghua, et al. Focusing plasma jets to achieve high current density: feasibility and opportunities for applications in debris removal and space exploration[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 108: 106343.
- [5] Obukhov V A, Kirillov V A, Petukhov V G, et al. Problematic issues of spacecraft development for contactless removal of space debris by ion beam[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 181: 569-578.
- [6] Li Bin, Sang Jizhang. Efficient and accurate error propagation in the semi-analytic orbit dynamics system for space debris[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(1): 285-296.
- [7] Cordelli E, Vananti A, Schildknecht T. Analysis of laser ranges and angular measurements data fusion for space debris orbit determination[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(1): 419-434.
- [8] Hossein S H, Acernese M, Cardona T, et al. Sapienza Space debris Observatory Network (SSON): a high coverage infrastructure for space debris monitoring[J]. *Journal of Space Safety Engineering*, 2020, 7(1): 30-37.
- [9] Li T, Kalman G, Pulsifer P. Neutral beam propagation effects in the upper atmosphere[R]. AFGL-TR-86-0192, 1986: 3-1.
- [10] Kalman G J, Li T. Neutral beam propagation through the atmosphere[R]. AFGL-TR-87-0267, 1987: 7-15.
- [11] Okuda H, Hiroe S. Neutral beam injection and plasma convection in a magnetic field[J]. *The Physics of Fluids*, 1988, 31(11): 3312-3321.
- [12] Price J C. Kinetic theory of plasma in a magnetic field[J]. *The Physics of Fluids*, 1971, 14(6): 1152-1157.
- [13] Wessel F, Robertson S. Polarization of an intense space-charge-neutral ion beam incident upon a magnetic field[J]. *The Physics of Fluids*, 1981, 24(4): 739-745.
- [14] Ishizuka H, Robertson S. Propagation of an intense charge-neutralized ion beam transverse to a magnetic field[J]. *The Physics of Fluids*, 1982, 25(12): 2353-2358.
- [15] Robertson S. Magnetic guiding, focusing and compression of an intense charge-neutral ion beam[J]. *The Physics of Fluids*, 1983, 26(4): 1129-1138.
- [16] 沈硕,张芳,郝建红,等.氢原子束在大气长程传输中的剥离效应[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 104002. (Shen Shuo, Zhang Fang, Hao Jianhong, et al. Stripping effect of hydrogen atom beam in long-range atmospheric propagation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 104002)

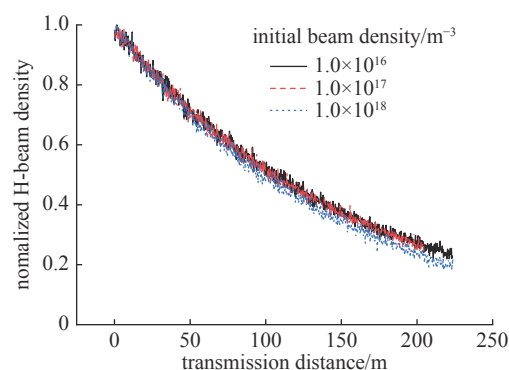


Fig. 9 Variation of beam density with transmission distance at different initial beam density

图9 不同初始束密度时束密度随传输距离的变化