

“碰撞-辐射”模型在 Z 箍缩等离子体 K 壳层线 辐射谱分析中的应用*

李 晶^{1)2)†} 谢卫平¹⁾ 黄显宾¹⁾ 杨礼兵¹⁾ 蔡红春¹⁾ 蒲以康²⁾

1) (中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

2) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2010 年 1 月 29 日收到; 2010 年 3 月 28 日收到修改稿)

介绍了由 K 壳层谱线强度比估算等离子体状态参数的“碰撞-辐射”模型的基本原理. 详细描述了自行研制的基于该模型的 Z 箍缩等离子体 K 壳层线辐射谱分析程序——ZSPEC 的基本情况. 给出了氦等离子体的计算结果, 包括不同电离态离子的相对含量随电子温度的变化曲线和 K 壳层谱线强度比在“电子密度-电子温度”平面内的等高线分布图. 该程序已在“阳”加速器 Z 箍缩实验结果分析中得到应用, 将椭圆晶体谱仪测得的氦等离子体 K 壳层谱线强度比与 ZSPEC 程序计算结果相比较, 得出在该发实验 540 kA 峰值电流的驱动下, 产生 K 壳层辐射的等离子体的时空平均的电子温度和电子密度约为 240 eV 和 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

关键词: “碰撞-辐射”模型, K 壳层线辐射谱, 氦气喷气 Z 箍缩, “阳”加速器

PACC: 5270L, 5225P, 5225L

1. 引 言

Z 箍缩等离子体作为目前实验室内已知最强的软 X 射线辐射源, 具有高辐射强度、高转换效率和高效费比等诸多优点^[1]. 在 Z 箍缩研究中, 高 Z 元素负载(如 W 丝阵)放出的辐射以能量小于 1 keV 的 X 射线为主^[2], 而中低 Z 元素负载($Z = 10-36$)则会放出大量的 K 壳层辐射^[3]. K 壳层辐射的光子能量较高(除氦元素约为 0.9 keV 外, 其余均在 1 keV 以上), 主要由类氢和类氦离子的激发态通过自发辐射退激至基态放出的线谱辐射组成, 也包括裸核和类氢离子与自由电子复合时放出的连续谱辐射以及其他电离态离子的 K 壳层伴线辐射. K 壳层辐射以分立的线谱辐射为主, 其能谱结构与 L, M 壳层辐射相比简单很多, 非常适于等离子体光谱诊断方法的使用. 实际上, 对 K 壳层谱线的强度、展宽和线型等特征量进行细致分析已经成为目前 Z 箍缩研究中估计等离子体的电子温度、电子密度和平均电离度等特征参数的主要方法, 在 Z 箍缩物理、K 壳层辐射产额优化和等离子体辐射不透明度的研究

中有着重要应用^[4,5]. 在高 Z 元素负载 Z 箍缩和 Z 箍缩驱动 ICF 靶丸的实验中, 也可使用中低 Z 元素作为示踪剂通过其 K 壳层线谱来推断等离子体的状态参数^[6].

随着由中国工程物理研究院流体物理研究所建造的国内第一台大型 Z 箍缩装置——PTS 装置^[7]的即将建成, 其 8—10 MA 电流的驱动能力对 Z 箍缩诊断, 特别是 Z 箍缩等离子体状态参数的获取提出了迫切的需求, 而用于 Z 箍缩数值模拟的辐射磁流体力学计算编码^[8,9]也需要实验获取的等离子体参数对其进行校验. 在通过光谱诊断获取等离子体参数的诸多方法中, “碰撞-辐射”模型是分析 K 壳层线辐射谱最主要的特征量——谱线相对强度的有效的方法^[10]. 本文在介绍“碰撞-辐射”模型原理的基础上, 描述了自行研制的基于该模型的 ZSPEC 程序(Z-pinch SPEctra Code)的结构, 给出了氦等离子体的计算结果. 使用该结果对“阳”加速器氦气喷气 Z 箍缩实验中椭圆晶体谱仪测得的 K 壳层线辐射谱进行了分析, 得出了等离子体在空间和时间平均意义下的电子温度和电子密度.

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10635050), 中国工程物理研究院双百人才基金(批准号:2009R0103)资助的课题.

† E-mail: lijing2002@tsinghua.org.cn

2. “碰撞-辐射”模型和 ZSPEC 程序

2.1. 模型简述

在目前的等离子体理论中^[10-12],一般根据离子的碰撞跃迁速率和辐射跃迁速率的相对大小,将等离子体所处的平衡状态分为局域热平衡(LTE)和非局域热平衡(NLTE).局域热平衡描述等离子体密度非常高时的情况,此时离子的碰撞跃迁速率远大于辐射跃迁,不同能态离子的数密度分布由 Saha 方程和 Boltzman 方程决定,辐射过程的影响可以忽略.与之相对,非局域热平衡描述碰撞跃迁与辐射跃迁相比不占主导时的情况,又可分为两类:当等离子体密度很低时,离子的激发态主要由电子碰撞产生,退激则主要通过自发辐射,这种状态的等离子体由日冕模型(CM)描述,各能态离子数密度的求解较为简单;而当等离子体的密度不太低而温度不太高时,碰撞跃迁速率与辐射跃迁相当,此时要得到各能态离子数密度的分布,必须考虑多种跃迁过程并求解复杂的粒子数平衡方程.“碰撞-辐射”模型(CRM)描述的就是处于这种状态的等离子体.经简单估算^[13]可知在产生强 X 射线辐射的碰撞停滞阶段,Z 箍缩等离子体的状态参数(电子密度、电子温度和平均电离度等)处于局域热平衡模型和日冕模型描述的状态区域之间,必须使用“碰撞-辐射”模型.

“碰撞-辐射”模型的出发点是如下的粒子数平衡方程(假设等离子体空间均匀分布):

$$\frac{dN_i}{dt} = -N_i \sum_{j(\neq i)} R_{ij} + \sum_{j(\neq i)} N_j R_{ji}, \quad i, j = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中 i 和 j 为能态序号, t 为时间, N_i 为 i 能态的粒子数密度, R_{ij} 为离子由能态 i 跃迁至能态 j 的速率系数.模型通常考虑的跃迁过程包括:电子碰撞电离及其逆过程、电子碰撞激发及其逆过程、自发辐射、复合辐射和自电离等.如果外加辐射场较强或辐射自吸收效应不能忽略,则还需要考虑光激发、光电离等过程.根据对能态的不同近似,模型又可分为平均原子模型、超组态模型、细致组态模型和细致谱项模型等.计算各能态离子间的跃迁速率系数需要大量的原子反应数据,这些数据一般用专门的程序计算^[14,15].(1)式描述了各能态离子数密度随时间的变化关系,根据研究需要可以选用系统达到稳态时的结果,也可以计算随时间演化的情况.对 Z 箍缩等离子体 K 壳层辐射源而言,其离子的碰撞和辐射跃迁过程的弛豫时间与等离子体运动的特征时间相比短很多,因此在研究 Z 箍缩 K 壳层线辐射谱时,一般采用粒子数平衡方程达到稳态时的计算结果^[16].另外还可将“碰撞-辐射”模型与辐射磁流体学方程相结合研究 Z 箍缩内爆过程中等离子体的空间不均匀性、流体不稳定性和辐射输运等因素对不同能态离子数密度分布和 K 壳层辐射的影响^[16].

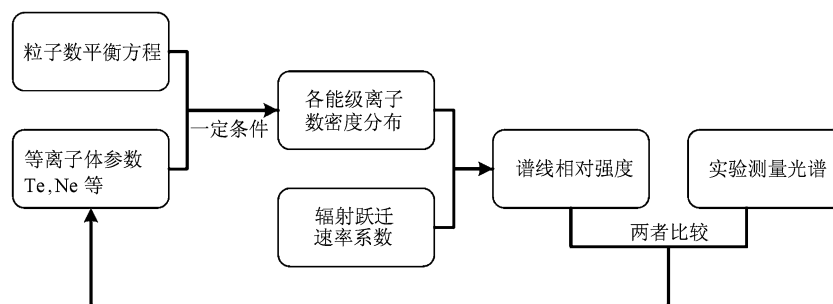


图1 “碰撞-辐射”模型估算等离子体状态参数流程图

由“碰撞-辐射”模型估算等离子体状态参数的过程由图1给出,具体步骤为:1)在给定的等离子体状态参数下(主要是电子温度和电子密度),计算离子间各跃迁过程的速率系数;2)在一定条件下求解粒子数平衡方程,得到各能态离子数密度分布;

3)将激发态离子的数密度乘以其自发辐射速率系数得到对应谱线的强度;4)把计算出的谱线强度与实验测量光谱相比较,估算出等离子体的状态参数.在最后一步中,比较的对象可以是某两条谱线的强度比^[4],也可以是测量得到的整段线谱^[6].

2.2. ZSPEC 程序

ZSPEC 程序基于细致谱项模型,目前忽略辐射自吸收和外辐射场的影响,考虑的跃迁过程包括电子碰撞电离和三体复合、电子碰撞激发和碰撞退激、辐射复合、自发辐射、直接电子俘获和自电离.程序所需的各能态离子的核外电子结构、能量和跃迁过程的截面或速率系数均使用考虑了相对论效应和多组态相互作用的 FAC (Flexible Atomic Code) 程序^[15]计算.考虑的能态包括裸核,类氢离子的基态和 $n=2-5$ 的激发态,类氦离子的基态、 $n=2-5$ 的单激发态和 $n=2$ 的双激发态,类锂离子基态、 $n=3-5$ 的单激发态和 $n=2$ 的双激发态,类铍离子的基态和 $n=3-5$ 的激发态,以及其余电离态的基态.对于电子碰撞电离和电子碰撞激发的速率系数,将 FAC 程序算出的截面数据用经验公式^[17]拟合后根据下式计算:

$$R_{ij} = N_e \int_{E_0}^{\infty} \sigma_{ij}(E) \sqrt{2E/m_e} f_e(E, T_e) dE, \quad (2)$$

其中 N_e 为电子密度, E 为碰撞前电子的能量, $\sigma_{ij}(E)$ 为能态 i 至能态 j 的跃迁截面, m_e 为电子质量, $f_e(E, T_e)$ 为电子能量分布函数(这里取为温度为 T_e 的 Maxwell 分布), E_0 为跃迁能量阈值.对于辐射复合,在使用 Einstein-Milne 公式^[18]将 FAC 算出的光电离截面转换为辐射复合截面并用样条曲线插值后使用(2)式计算.电子碰撞退激、三体复合和直接电子俘获的跃迁速率系数由精细平衡原理根据它们逆过程的速率系数算出.程序使用数值求解微分方程的方法算出系统达到稳态时各能态离子数密度分布.

使用 ZSPEC 程序对氦等离子体进行了计算,其中共包含 311 个能态.图 2(a) 给出了电子密度为 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,氦等离子体主要电离态离子(将同一电离态不同激发态数密度相加得出)的相对含量随电子温度的变化曲线,可以看出随着电子温度的逐渐升高,类锂、类铍离子所占比例迅速降低,当电子温度超过 100 eV 时,裸核、类氢和类氦离子就已经占据了离子总数的 99% 以上.图 2(b) 为相应的等离子体平均电离度随电子温度的变化曲线.作为比较,图 2 还给出了相同电子密度和计算条件(稳态,忽略辐射自吸收和外辐射场)下,FLYCHK 程序^[19]的计算结果.由图可见,ZSPEC 计算出的裸核、类氢和类氦离子的相对含量随电子温度的变化曲线与 FLYCHK 的结果较为符合,相对误差不超过

10%. 相同电子温度下,ZSPEC 给出的等离子体的平均电离度稍高,两者相对误差小于 2%.对于本算例而言,ZSPEC 和 FLYCHK 在其粒子数平衡方程中考虑的跃迁过程基本相同,但两者在计算跃迁截面时使用了不同的方法(ZSPEC 根据 FAC 的结果进行拟合而 FLYCHK 均使用经验公式),导致它们对同一跃迁过程给出的速率系数略有差异,这是造成图 2 中 ZSPEC 和 FLYCHK 的计算结果出现一定差别的主要原因.

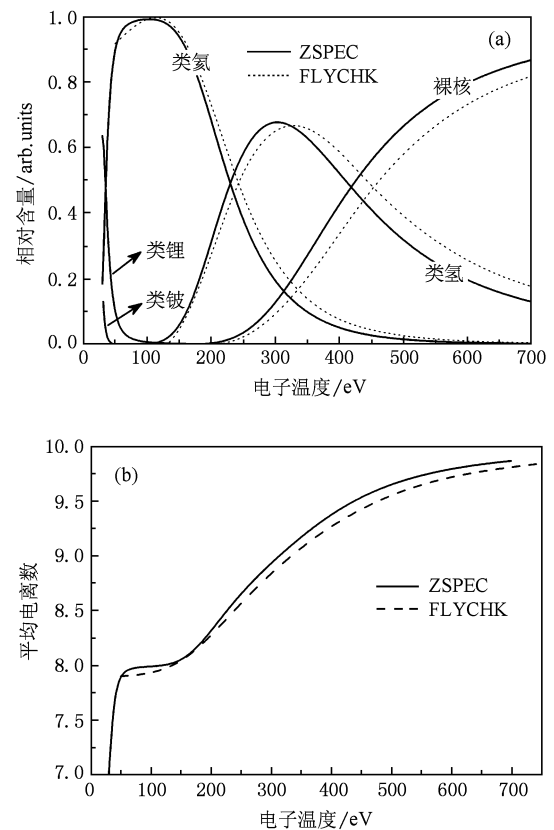


图 2 (a) 氦等离子体不同电离态离子数相对含量;(b) 平均电离度随电子温度的变化曲线,电子密度为 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

使用 FAC 程序计算出的氦等离子体主要 K 壳层谱线的详细信息由表 1 给出.图 3 画出了这些谱线的强度比在“电子密度-电子温度”平面内的等高线分布图.由图 3(a) 和图 3(b) 可以看出, H_{α}/He_{α} 与 H_{β}/He_{β} 的等高线在计算范围内呈现出近似水平分布的特点,表明这两组谱线的强度比主要是电子温度的函数,与电子密度关系不大.与之相对,图 3(c) 中 $I. C./He_{\alpha}$ 的等高线的斜率相对较大,尤其在电子密度和电子温度较高的区域(图中右上角),等高线几乎垂直分布,说明 $I. C./He_{\alpha}$ 对电子密度较为敏感.这告诉我们可以同时测量 H_{α}/He_{α} (或

表 1 氦元素主要 K 壳层谱线信息

谱线符号	跃迁能级	波长/ \AA	能量 / keV	自发辐射系数 / s^{-1}	备注
H_β	$3p^2P_{1/2,3/2} \rightarrow 1s^2S_{1/2}$	10.24	1.211	1.67×10^{12}	共振线
He_β	$1s3p^1P_1 \rightarrow 1s^2S_0$	11.55	1.074	2.61×10^{12}	共振线
H_α	$2p^2P_{1/2,3/2} \rightarrow 1s^2S_{1/2}$	12.13	1.022	6.27×10^{12}	共振线
He_α	$1s2p^1P_1 \rightarrow 1s^2S_0$	13.45	0.922	9.05×10^{12}	共振线
I. C.	$1s2p^3P_1 \rightarrow 1s^2S_0$	13.55	0.915	4.51×10^9	互组合线

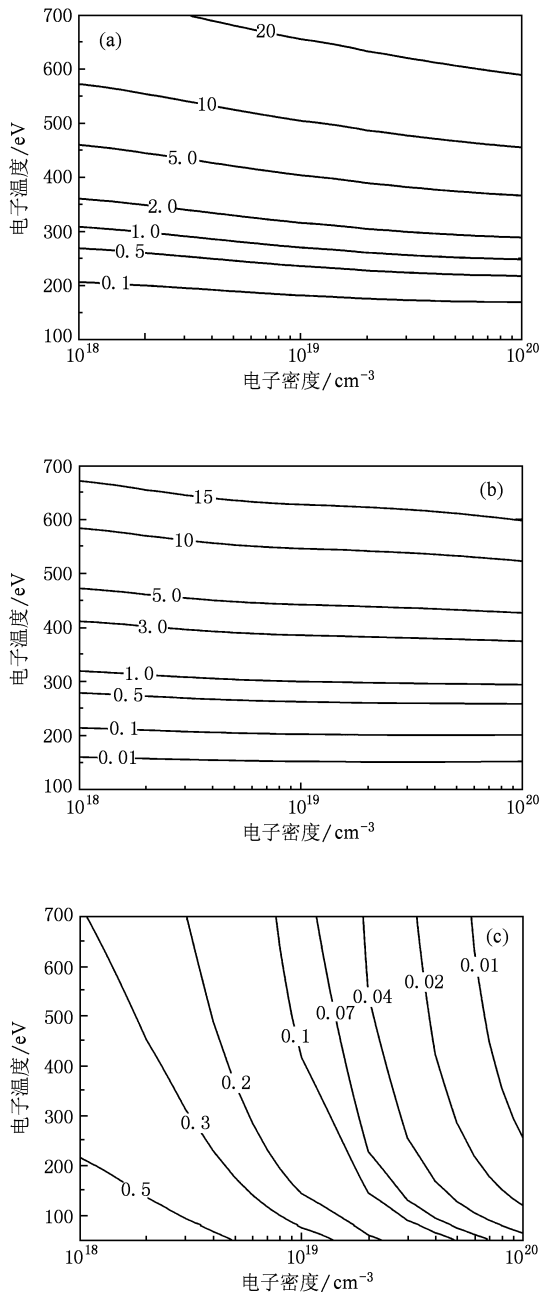


图 3 ZSPEC 计算出的氦等离子体 K 壳层谱线强度比在“电子密度-电子温度”平面内的等高线分布图 (a) H_α/He_α ; (b) H_β/He_β ; (c) I. C./ He_α

H_β/He_β) 和 I. C./ He_α 来确定等离子体的电子温度和电子密度。

谱线强度比在“电子密度-电子温度”平面内分布的特点可从粒子数平衡的角度来理解. 对于 H_α 线和 He_α 线, 其对应的激发态粒子 (数密度记为 N_{E1} 和 N_{E2}) 均主要由它们的基态粒子 (数密度记为 N_{G1} 和 N_{G2}) 经电子碰撞激发 (速率系数记为 R_{ce1} 和 R_{ce2}) 产生, 且大部分通过自发辐射 (速率系数记为 A_1 和 A_2) 而损失. 因此由粒子数平衡方程可推知

$$H_\alpha/He_\alpha = \frac{N_{E1}A_1}{N_{E2}A_2} \frac{N_{G1}R_{ce1}}{N_{G2}R_{ce2}}, \quad (3)$$

在“碰撞-辐射”模型适用的等离子体中, 各电离态基态的粒子数密度远高于其激发态, 体系的电离平衡主要由各电离态基态之间电子碰撞电离速率系数和复合辐射速率系数的比值决定, 三体复合的影响因电子密度相对较小而可以忽略. 由于电子碰撞电离和复合辐射的速率系数均正比于电子密度, 二者相比后在很大程度上抵消了电子密度的影响, 因此各电离态基态粒子数密度的分布 (如 N_{G1}/N_{G2}) 主要是电子温度的函数, 加之 R_{ce1} 与 R_{ce2} 的比值也仅与电子温度相关 (参见 (2) 式), 从而可知 H_α/He_α 主要是电子温度的函数. 同理, 可推知诸如 H_β/He_β 之类的类氢与类氦离子同级共振线的强度比均主要依赖于电子温度. 电子温度越高, 类氢粒子所占的比例也越高, 其线谱辐射也越强, 在图 3 (a) 和 (b) 中表现为 H_α/He_α 和 H_β/He_β 随着电子温度的升高而不断增加.

对于 I. C. 线和 He_α 线, 由于 I. C. 线的自发辐射系数远小于 He_α 线 (见表 1), 因此与 He_α 线激发态 ($1s2p^1P_1$) 主要通过自发辐射损失不同, 电子碰撞退激和电子碰撞电离对 I. C. 线激发态 ($1s2p^3P_1$) 粒子数损失的贡献已经接近甚至超过自发辐射. 由于电子碰撞退激和电子碰撞电离的速率系数均正比于电子密度, 因此 IC/ He_α 受电子密度的影响较为明显, 且随着电子密度的升高, 自发辐射在 $1s2p^3P_1$ 态

粒子数损失中所占的份额不断降低,导致 $I. C./He_{\alpha}$ 不断减小(图 3(c)).

3. 实验装置

实验在“阳”加速器上进行.“阳”加速器是一台电容储能型快脉冲驱动装置,其结构如图 4 所示. Marx 发生器由 3 路共 156 个电容器组成,等效电容约 92 nF,等效电感约 4 μ H. 与 Marx 相连的是水介

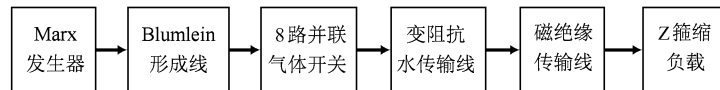


图 4 “阳”加速器结构框图

在“阳”加速器上开展了氩气喷气 Z 箍缩产生 K 壳层辐射的实验. 作为负载的超音速气流由储气室、快速电磁阀和拉瓦尔喷嘴组成的喷气系统产生. 储气室压力为 0.5 MPa, 拉瓦尔喷嘴位于阴极, 出口外直径 15 mm, 内直径 9 mm, 喉部尺寸 0.4 mm. 负载区阴阳极间距约为 15 mm, 使用铜网阳极减少对喷气流场的扰动.

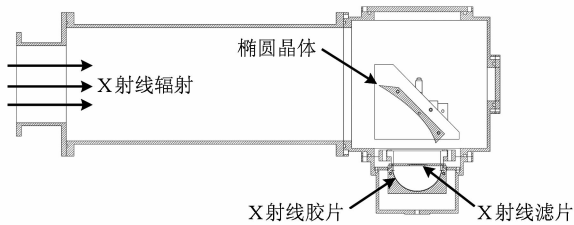


图 5 椭圆晶体谱仪结构示意图

实验使用椭圆晶体谱仪^[20]测量氩等离子体的 K 壳层线辐射谱. 谱仪结构如图 5 所示, 入射 X 射线经椭圆晶体色散后由胶片记录其时间积分强度, 胶片放在半圆形底片盒中, 前面放有 X 射线滤片阻挡杂散光. 谱仪使用云母晶体分光(点阵面 002, $2d = 19.84 \text{ \AA}$, 厚度 0.2 mm), 其一阶衍射的测谱范围 (9.92—17.18 \AA) 包含了氩主要的 K 壳层谱线. 胶片选用国产天津 III X 射线胶片. X 射线滤片由两片镀铝的 Mylar 膜叠加而成, 每片 Mylar 膜的厚度为 2.0 μm , 铝镀层的厚度为 0.4 μm . 实验中还使用了 X 射线功率计和 X 射线针孔相机. X 射线功率计由闪烁体和光电管组成, 测量 X 光辐射强度随时间的变化^[21]. X 射线针孔相机前放有 8 μm 厚的铝滤片, 成像 X 射线能段为 0.85—1.5 keV, 用于获取氩等

质 Blumlein 脉冲形成线, 等效电容 77 nF. 主开关为 8 个并联的场畸变开关, 工作气体为 SF_6 , 触发时序由同步机控制. 水介质传输线采用 2 Ω 至 0.5 Ω 的变阻抗结构以提高耦合效率. 真空锥形磁绝缘传输线实现脉冲的空间压缩, 等效电感约 32 nH. 当 Marx 发生器充电 70 kV 时, 加速器对短路负载的输出电流可达 1.3 MA, 上升时间约 85 ns (10%—90%), 可以开展喷气 Z 箍缩、丝阵 Z 箍缩、X 箍缩和磁驱动飞片等多种研究.

离子体 K 壳层辐射的自发光图像.

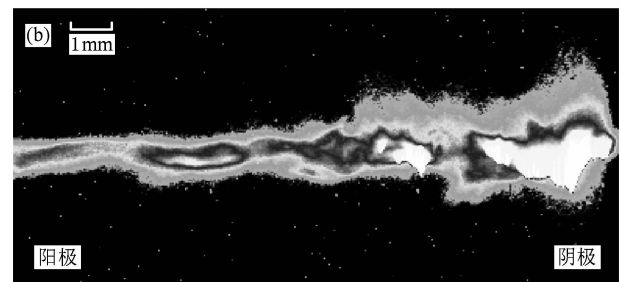
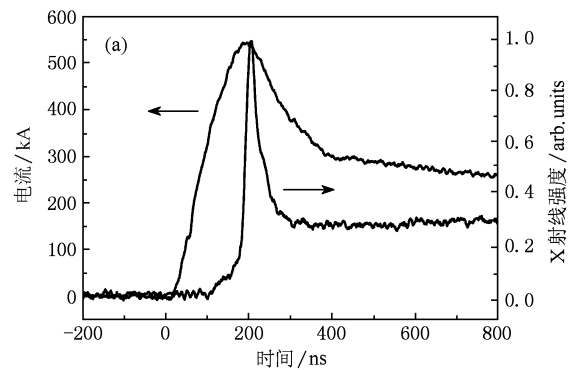


图 6 氩气喷气 Z 箍缩实验结果 (a) 驱动电流和 X 射线辐射强度; (b) K 壳层辐射图像, 阴极附近部分饱和

4. 实验结果与分析

实验时 Marx 发生器充电 50 kV, 负载电流峰值约 540 kA, 上升时间约 110 ns (10%—90%), X 射线辐射在电流峰值附近达到最高, 其半高宽约为 37 ns (图 6 (a)). 针孔相机记录到的时间积分图像见图 6 (b), 可以看出较亮区域均位于轴线附近, 表明

K 壳层辐射主要在内爆后期的碰轴停滞阶段放出. 由于 K 壳层辐射的产生需要等离子体达到较高的温度, 图 6 (b) 中辐射区域沿轴线分布极不均匀反映出内爆动能转换为等离子体内能的过程中不稳定性的发展非常显著.

椭圆晶体谱仪中的 X 射线胶片在实验结束后被迅速取出, 在暗室中依照标准程序冲洗并晾干, 得到的测量结果如图 7 (a) 所示. 胶片图像必须经进一步处理才能得到等离子体的 X 射线辐射谱, 具体步骤为: 1) 用黑密度计对胶片逐行连续扫描后取平均, 得到沿色散方向的平均黑密度曲线; 2) 使用文献^[22]给出的天津 III X 射线胶片在 1 keV 能点的标定结果, 将黑密度曲线转化为 X 射线强度曲线; 3) 根据已知谱线的能量和扫描点序号, 通过线性拟合的方法求出扫描点序号与 X 射线能量之间的对应关系; 4) 使用 Henke 给出的公式^[23]修正非线性色散效应、晶体积分反射率和滤片透过率对 X 射线强度的影响.

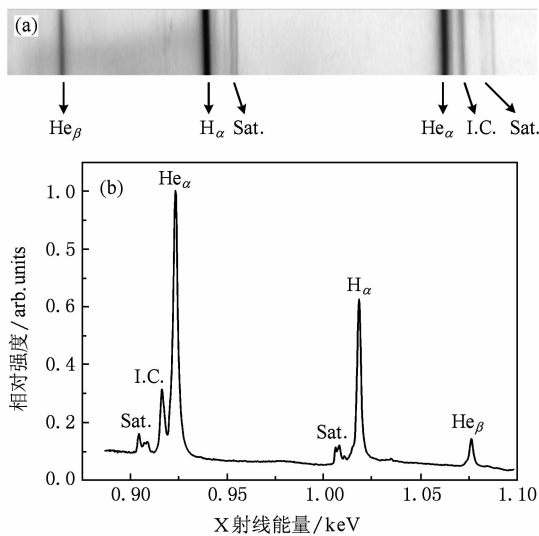


图 7 椭圆晶体谱仪测量结果 (a) X 射线胶片图像; (b) K 壳层线辐射谱, 其中 Sat. 表示伴线辐射

经上述步骤处理后得到的氦等离子体 K 壳层线辐射谱如图 7 (b) 所示, 将该能谱减去本底后使用 Lorentz 线型函数对谱线轮廓进行拟合, 得到的各条谱线的相对强度见表 2, 进而求出 H_{α} 线和 I. C. 线与 He_{α} 线的强度比分别为 0.53 和 0.15. 图 8 画出了 ZSPEC 计算出的在上述两组谱线强度比约束下等离子体电子密度和电子温度分别需满足的关系, 两条曲线交于一点, 确定出等离子体的电子温度和电子密度分别为 240 eV 和 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. 由于谱

线强度比是从时间积分和空间平均的 K 壳层线辐射谱 (图 7 (b)) 求出的, 因此这里得到的等离子体的电子密度和电子温度等参数只反映了这些参数在整个内爆过程中 (主要是碰轴停滞阶段) 的时空的平均值, 并且只对应于产生 K 壳层辐射的等离子体. 下面的讨论将看到, 这部分等离子体只占有参与内爆的等离子体的一小部分.

表 2 氦等离子体 K 壳层谱线相对强度

谱线	相对强度/ 10^{-3}
He_{β}	0.354
H_{α}	2.15
He_{α}	4.06
I. C.	0.615

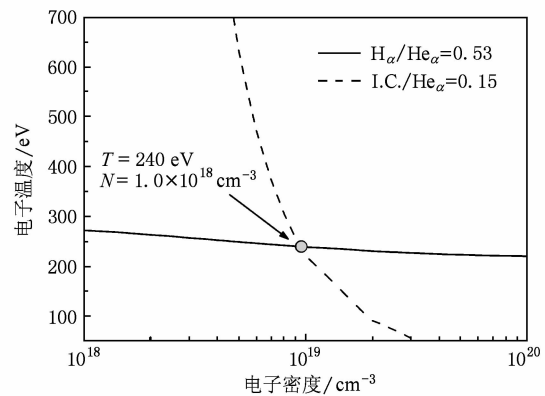


图 8 氦等离子体 H_{α} 线和 I. C. 线与 He_{α} 线的强度比分别为 0.53 和 0.15 时电子密度和电子温度的关系曲线 (ZSPEC 计算)

从上文得出的电子温度和电子密度出发, 参考图 2 计算结果可知产生 K 壳层辐射的氦等离子体主要由裸核、类氢和类氦离子组成, 所占比例分别约为 2.6%、54.1% 和 43.3%, 平均电离度为 8.6, 再由电荷守恒求出离子密度为 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 从图 6 (b) 图像得到 K 壳层辐射等离子体柱的平均直径 D_K 约为 1.6 mm, 利用公式

$$m_K \approx n_i / N_A \cdot A \cdot \pi / 4 \cdot D_K^2 \quad (4)$$

即可估算出产生 K 壳层辐射的等离子体的线质量密度 m_K , 式中 n_i 为离子密度, N_A 为阿佛加德罗常数, A 为氦的原子量. 使用 (4) 式算出的实验中参与 K 壳层辐射的等离子体的线质量密度为 $0.81 \mu\text{g}/\text{cm}$. 同时, 将图 6 (a) 中的电流波形、X 射线峰时间以及喷气负载的初始半径等参数代入零维模型^[24] 给出喷气流场的线质量密度 m_A 在 20—40 $\mu\text{g}/\text{cm}$ 之间. 由此可计算出实验中参与 K 壳层辐射

的粒子数占参与内爆的总粒子数的份额 η ($= m_K/m_A$) $\approx 2\%—4\%$. 对 Z 箍缩产生 K 壳层辐射实验而言, 箍缩较好的发次的 η 在 10% 至 60% 之间^[25]. 与之相比, 考虑到我们实验中等离子体的不稳定性发展较为严重, 光谱诊断给出的 2%—4% 的 η 是合理的. 参考其他 Z 箍缩实验结果^[26], 我们猜测与高 Z 元素负载类似, 中低 Z 元素负载 Z 箍缩时, 占内爆总粒子数一小部分的产生 K 壳层辐射的粒子形成了一个温度较高的中心区域, 而大部分粒子的温度较低, 分布在中心区域的周围, 没有 K 壳层辐射放出. 以上讨论只是对单次实验结果初步分析, 深入研究还需要更多实验数据的支持.

5. 结 论

“碰撞-辐射”模型是分析 Z 箍缩等离子体 K 壳层线辐射谱的有力工具. 本文介绍了自行研制的基于“碰撞-辐射”模型的 K 壳层线辐射谱分析

程序 ZSPEC 的基本情况, 给出了氦等离子体的计算结果, 包括各电离态离子数相对含量随电子温度的变化曲线和 K 壳层谱线强度比在“电子密度-电子温度”平面上等的高线分布图. 利用这些结果对“阳”加速器氦气喷气 Z 箍缩的实验数据进行了分析, 得出了产生 K 壳层辐射的等离子体的时空平均的电子密度、电子温度、平均电离度、离子密度等参数.

下一步工作将从三方面展开: 一是研究辐射自吸收过程对 K 壳层线辐射谱的影响; 二是对椭圆晶体谱仪中各器件进行更为精确的标定, 减小测谱误差; 三是积累更多的 Z 箍缩产生 K 壳层辐射的实验数据, 包括 K 壳层线辐射谱、图像和强度等, 为 Z 箍缩产生 K 壳层辐射物理过程的深入理解和 K 壳层辐射的应用研究打好基础.

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所 108 室高能密度物理组的各位同志.

- [1] Sanford T W L, Allshouse G O, Marder B M, Nash T J, Mock R C, Spielman R B, Seaman J F, McGurn J S, Jobe D, Gilliland T L, Vargas M, Struve K W, Stygar W A, Douglas M R, Matzen M K 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 5063
- [2] Chandler G A, Deeney C, Cuneo M, Fehl D L, McGurn J S, Spielman R B, Torres J A, McKenney J L, Mills J, Struve K W 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 561
- [3] Coverdale C A, Deeney C, Jones B, Thornhill J W, Whitney K G, Velikovich A L, Clark R W, Chong Y K, Apruzese J P, Davis J, LePell P D 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 582
- [4] Apruzese J P, Whitney K G, Davis J, Kepple P C 1997 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **57** 41
- [5] Bailey J E, Chandler G A, Cohen D, Cuneo M E, Foord M E, Heeter R F, Jobe D, Lake P W, MacFarlane J J, Nash T J, Nielson D S, Smelser R, Torres J 2002 *Phys. Plasma.* **9** 2186
- [6] Bailey J E, Chandler G A, Slutz S A, Golovkin I, Lake P W, MacFarlane J J, Mancini R C, Burris-Mog T J, Cooper G, Leeper R J, Mehlhorn T A, Moore T C, Nash T J, Nielsen D S, Ruiz C L, Schroen D G, Varnum W A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 085002
- [7] Deng J J, Xie W P, Feng S P, Li H T, Song S Y, Wang M, Gu Y C, Xia M H, Guan Y C, Cao W B, Tian Q 2007 *IEEE Conference Record-Abstract* p671 (IEEE Pulsed Power and Plasma Conference, 2007 June 17—22, Albuquerque, USA)
- [8] Ning C, Yang Z H, Ding N 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1650 (in Chinese) [宁成、杨震华、丁宁 2003 物理学报 **52** 1650]
- [9] Duan Y Y, Guo Y H, Wang W S, Qiu A C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2655 (in Chinese) [段耀勇、郭永辉、王文生、邱爱慈 2004 物理学报 **53** 2655]
- [10] Davis J, Clark R, Blaha M, Giuliani J R 2001 *Laser Part. Beams.* **19** 557
- [11] Hutchinson I H 2002 *Principles of Plasma Diagnostics* (Cambridge University Press, 2nd Edition) p217
- [12] Griem H R 1964 *Plasma Spectroscopy* (McGraw-Hill Book, Inc.) p129, p267
- [13] Jones B, Deeney C, Coverdale C A, LePell P D, McKenney J L, Apruzese J P, Thornhill J W, Whitney K G, Clark R W, Velikovich A L, Davis J, Maron Y, Kantsyrev V, Safronova A, Oreshkin V I 2006 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **99** 341
- [14] Bar-Shalom A, Klapisch M, Oreg J 2001 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **71** 169
- [15] Gu M F 2003 *ApJ.* **582** 1241
- [16] Thornhill J W, Apruzese J P, Davis J, Clark R W, Velikovich A L, Giuliani Jr J L, Chong Y K, Whitney K G, Deeney C, Coverdale C A, Cochran F L 2001 *Phys. Plasma.* **7** 3480
- [17] Li J, Huang X B, Yang L B, Gu Y C, Xie W P, Zhang S Q, Cai H C, Xiao S L, Shi J, Pu Y K 2008 *Proceedings of the 17th International Conference on High-Power Particle Beams* (July 6—11, 2008, Xi'An China) p494
- [18] Oxenius J 1986 *Kinetic Theory of Particles and Photons* (Springer-Verlag, Berlin) p21
- [19] Chung H K, Morgan W L, Lee R W 2003 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **81** 107

- [20] Shi J, Xiao S L, Wang H J, Huang X B, Yang L B, Liu S Y 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 622
- [21] Ning Jiamin, Jiang Shilun, Xu Rongkun 2006 *High Power Laser and Particle Beams Atomic Energy Science and Technology* **40** 96 (in Chinese) [蒋世伦、宁加敏、徐荣昆 2006 原子能科学与技术 **40** 96]
- [22] Zhao Y, Yang J M, Zhang J Y, Yi R Q, Zhang W H, Liu J S, Yuan X, Cui M Q, Gan S X 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 419 (in Chinese) [赵 阳、杨家敏、张继彦、易荣清、张文海、刘劲松、袁 孝、崔明启、甘式新 2008 强激光与粒子束 **20** 419]
- [23] Henke B L, Yamada H T and Tanaka T J 1983 *Rev. Sci. Instrum.* **54** 1311
- [24] Ren X D, Huang X B, Zhou S T, Zhang S Q, Li J, Yang L B, Li P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7067 (in Chinese) [任晓东、黄显宾、周少彤、张思群、李 晶、杨礼兵、李 平 2009 物理学报 **58** 7067]
- [25] Apruzese J P, Davis J, Whitney K G, Yadlowsky E J, Carlson E P, Niemel J, Barakat F, Hazelton R C, Klepper C C, Moschella J J, Failor B H, Levine J S, Riordan J C, Song Y, Whitton B L 2000 *Phys. Plasma.* **8** 3399
- [26] Cuneo M E, Waisman E M, Levdev S V, Chittenden J P, Stygar W A, Chandler G A, Vesey R A 2005 *Phys. Rev. E* **71** 046406

Application of a collisional-radiative model for the analysis of K-shell line spectra emitted by Z-pinch plasma *

Li Jing^{1)2)†} Xie Wei-Ping¹⁾ Huang Xian-Bin¹⁾ Yang Li-Bing¹⁾ Cai Hong-Chun¹⁾ Pu Yi-Kang²⁾

1) (Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 29 January 2010; revised manuscript received 28 March 2010)

Abstract

In this paper, the principle of the collisional-radiative model for the estimation of plasma parameters from the ratios of K-shell spectral lines was introduced. The structure of a computer program, ZSPEC, developed for the analysis of K-shell line spectra emitted by Z-pinch plasma based on the collisional-radiative model was described in detail. The calculation for neon plasma were presented, including the number fractions of major ionization stages at different electron temperature and the contours of K-shell line ratios in the plane defined by electron density and electron temperature. ZSPEC had been used to analyze the measured results of neon gas-puff Z-pinch experiment performed on Yang accelerator. By comparing the K-shell line ratios of neon plasma obtained by an elliptical crystal spectrometer with the results calculated by ZSPEC, the time and space averaged electron temperature and electron density of the K-shell plasma for the shot with 540 kA peaking current were determined to be 240 eV and $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, respectively.

Keywords: Collisional-radiative model, K-shell line spectra, neon gas-puff Z-pinch, Yang accelerator

PACC: 5270L, 5225P, 5225L

* Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10635050), the Foundation of Double-hundred Person of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2009R0103).

† E-mail: lijing2002@tsinghua.org.cn