

铝丝阵 Z 箍缩电子温度径向轮廓研究

鲁建¹ 肖沙里¹ 阳庆国² 刘利锋¹ 毋玉芬¹
(¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)
(²中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 利用均匀色散云母弯晶分析器,在“阳”加速器上测量了铝丝阵 Z 箍缩等离子体的时间积分 X 射线光谱。采用碰撞辐射模型,通过测量 Al 的 Ly- α /He- α 以及 Ly- β /He- ϵ 的强度比推断出平均电子温度,分别为 512 eV 和 489 eV。针对记录的连续辐射,由连续谱斜率拟合得到了等离子体核心电子温度为 1215 eV。对圆柱箍缩温度径向轮廓的研究表明,此次聚爆实验的电子温度从箍缩轴心向外缘近似线性降低。谱线强度比法是诊断平均电子温度的有效手段,而连续谱拟合法为诊断铝丝阵箍缩核心区等离子体电子温度提供了重要信息。

关键词 光谱学; X 射线光谱; 均匀色散; 电子温度; 温度轮廓

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0815001

Electron Temperature Radial Profile Research of Aluminum Wire-Array Z-Pinch

Lu Jian¹ Xiao Shali¹ Yang Qingguo² Liu Lifeng¹ Wu Yufen¹

(¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)
(²Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Time-integrated X-ray spectra produced by aluminum wire-array Z-pinch plasmas are measured with a novel mica uniform dispersion crystal spectrograph at Yang accelerator. By using the collisional-radiative equilibrium (CRE) model, the average electron temperature is estimated to be 500 eV from the intensity ratios of Ly- α /He- α line and Ly- β /He- ϵ line. The plasma core electron temperature is around 1215 eV derived from the continuum slope with linear fitting. The experimental result demonstrates that the electron temperature shows a nearly linear decrease from the axis to the outer edge of the pinch in this implosion. It is shown that the intensity ratio is an efficient tool for inferring electron temperature and the continuum slope provides essential information of core electron temperature of aluminum wire-array implosion.

Key words spectroscopy; X-ray spectroscopy; uniform dispersion; electron temperature; temperature profile

OCIS codes 300.6560; 300.2140; 340.7480; 350.5400

1 引言

丝阵 Z 箍缩是最有效的实验室 X 射线辐射源之一,内爆实验形成的高温等离子体辐射出大量类 H 及类 He 离子 X 射线,这些 X 射线中包含了大量

电子温度、电子密度和不透明度等状态参量信息^[1~3]。利用 K 壳层 X 射线发射谱的光谱学方法是诊断滞止 Z 箍缩等离子体的主要手段^[4~6],这种间接式测量手段可以避免对等离子体产生干扰,同

收稿日期: 2012-03-13; 收到修改稿日期: 2012-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(11005098)、国家自然科学基金委和中国工程物理研究院联合基金(10976033)和中央高校基本科研业务费(CDJXS11122219)资助课题。

作者简介: 鲁建(1988—),男,博士研究生,主要从事 X 射线探测及成像技术等方面的研究。

E-mail: 20100802020@cqu.edu.cn

导师简介: 肖沙里(1953—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事软 X 射线光谱诊断与分析等方面的研究。

E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn(通信联系人)

时诊断结果精确。

电子温度是等离子体的基本状态参量,其准确测量对于 Z 箍缩动力学研究具有十分重要的意义。谱线强度比法广泛应用于电子温度的诊断, Apruzese 等^[7]利用该方法对氖、铝、氩和钛圆柱等离子的电子温度和密度进行了一系列研究。本文利用 Ly- α /He- α 以及 Ly- β /He- ϵ 两组谱线的强度比推断铝 Z 箍缩等离子体的温度,得到更为准确的诊断结果。值得注意的是谱线强度比法推断的电子温度是箍缩聚爆等离子体的平均电子温度,而对等离子体中心的温度诊断一直缺乏有效的手段。通过等离子体自身辐射出的 X 射线的连续谱推断核心电子温度不依赖于电子密度。Martínez^[8]针对 Cu 靶采用连续谱拟合方法对单丝、双丝以及四丝阵得到的电子温度范围为 1~7 keV。由于连续辐射获得的拟合数据点多,能有效剔除含线辐射的数据,减弱线辐射的影响,得到的电子温度更为可靠,本文利用均匀色散云母弯晶谱仪记录的 K 壳层 X 射线辐射连续谱推断箍缩中心电子温度。此外,在推断出平均电子温度和中心电子温度的基础上,研究了圆柱箍缩电子温度的空间轮廓,分析了电子温度在箍缩径向方向上的变化过程。

2 电子温度诊断原理

Z 箍缩等离子体中心的高温区产生线辐射和连续辐射,只有连续辐射能够直接逃离等离子体,且被周围环绕的低温区等离子体吸收的程度小,因此连续辐射的温度反映中心高温区的温度。而线辐射在低温区被强烈吸收和再辐射,直到箍缩膨胀,等离子体不透明度降低^[9]。所以谱线强度比推断的电子温度反映中心高温区与周围低温区的平均温度。

对于等离子体的两条跃迁谱线,可以将其谱线强度比表示为

$$R = \frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 N_1}{A_2 N_2}, \quad (1)$$

式中 I_1, I_2 为两条谱线的积分强度; A_1, A_2 为两条谱线的辐射跃迁几率; N_1, N_2 为相应的两谱线处于上能态的离子密度。由于共振线 Ly- α /He- α 和 Ly- β /He- ϵ 的强度比受辐射场的影响很小,因此它们对密度的依赖性很弱而对温度的依赖性较强,通常用(1)式诊断电子温度^[10]。

X 射线连续谱与等离子体温度具有强相关性,其强度分布为^[8]

$$I(E) \propto \exp(-E/T_e) \cdot g \cdot T_e^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $I(E)$ 为辐射强度, g 为平均 Gaunt 因子, T_e 为电子温度。当 X 射线能量较大时,在一定误差范围内可认为 g 是个固定值,可根据连续谱拟合得到的斜率来推断等离子体中心电子温度。

3 实验结果及讨论

根据均匀色散晶体线色散率为常数的特点和均匀色散原理^[11],合理地设计弯晶形状可以实现谱线在探测器上的均匀分布。均匀色散弯晶的优势在于它能相对简单准确地识别和处理光谱,这种优势对于复杂陌生光谱的分析尤为明显。

Z 箍缩的基本原理是利用脉冲高电压大电流放电产生等离子体,等离子体在大电流自磁场的作用下轴向箍缩,形成高温高密度等离子体,产生 X 射线脉冲。“阳”加速器是一台电容储能型快脉冲驱动 Z 箍缩装置,主要由 Marx 发生器、Blumlein 脉冲形成线、主开关、变阻抗传输线、真空磁绝缘传输线和负载构成^[12]。“阳”加速器装置提供给负载的主要参数为:峰值电压 $V_0 = 1.0 \sim 1.5$ MV,特征电阻 $Z_0 = 0.5 \sim 0.8 \Omega$,特征电感 $L_0 = 20 \sim 30$ nH,电压脉冲底宽 $t_p = 120 \sim 150$ ns,阴阳极之间负载长度 $l = 2$ cm^[13]。实验中“阳”加速器产生的负载电流峰值约为 858 kA,峰值电压为 65 kV,上升时间(10%~90%)约 110 ns,靶腔内的真空度为 1.21×10^{-2} Pa。针对 Z 箍缩 Al 等离子体 X 射线,利用云母(002)均匀色散弯曲晶体作为色散元件,X 射线胶片作为探测器,在“阳”加速器装置上进行了丝阵聚爆实验,得到了时间积分、空间平均的光谱。解谱处理之后的谱线如图 1(a)所示。由于云母晶体具有多个衍射阶,且实验的衍射角范围宽,因此光谱图像同时出现 2 阶谱和 3 阶谱,如图 1(b),(c)所示。

谱线强度比法的理论计算使用碰撞辐射模型,同时考虑不透明度效应。碰撞辐射模型不同于局域热动平衡模型,为了得到各离化态能级的稳态布居,需要系统地求解速率方程。求解过程中考虑自发辐射、碰撞激发和退激发、碰撞离化和三体复合、光电离和辐射复合以及双电子复合这些原子过程。计算得到的两组谱线强度比与电子温度的关系曲线如图 2 所示。根据实验光谱给出的 Ly- α 线与 He- α 线的强度比为 0.27,推断得到电子温度为 512 eV;Ly- β 线与 He- ϵ 线的强度比对应电子温度为 489 eV。

在稠密等离子体中,利用谱线强度比诊断电子温度时需要考虑谱线输运过程中谱线自吸收和再发射的影响^[14],这种影响对于光学厚度大的谱线尤为

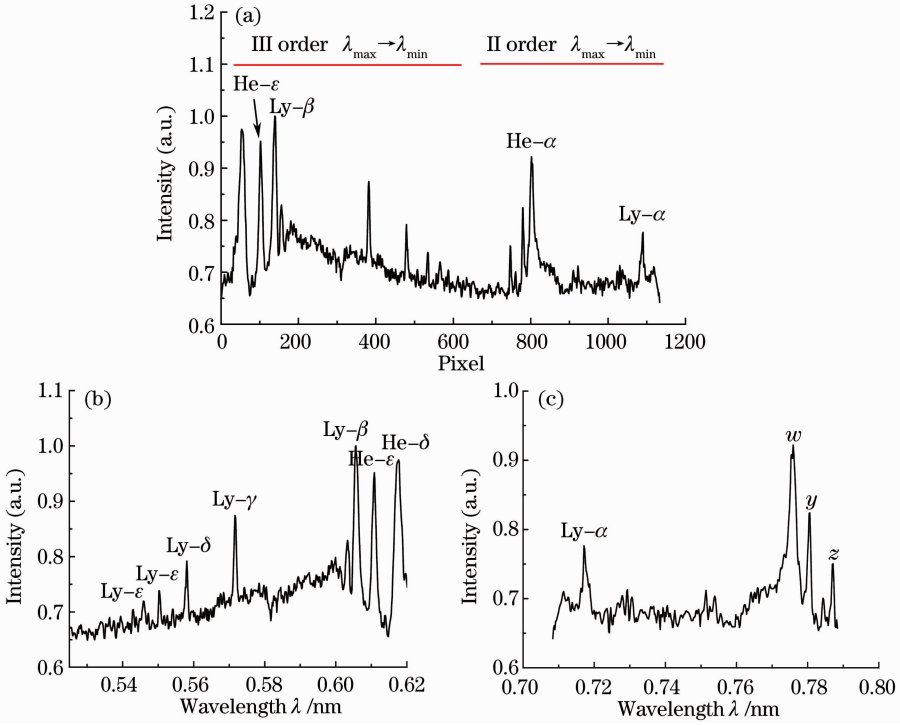


图1 (a) K壳层X射线能谱图;(b) 3阶光谱图;(c) 2阶光谱图

Fig. 1 (a) K-shell X-ray spectra from Al plasmas; (b) spectra in 3rd reflection order; (c) spectra in 2nd reflection order

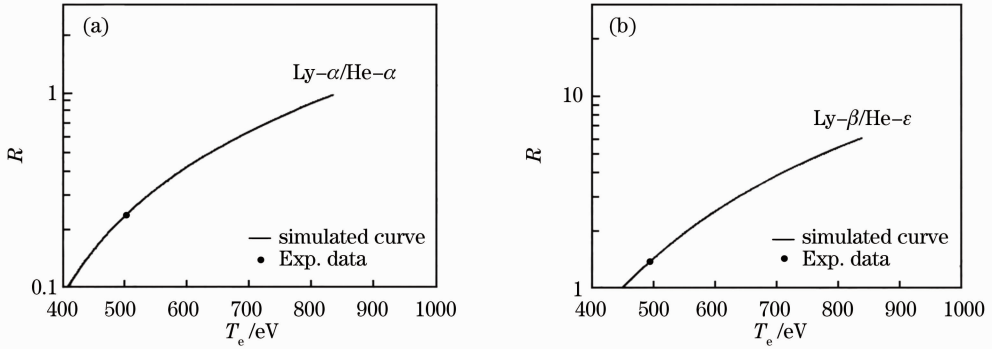


图2 (a) Ly- α /He- α 和(b) Ly- β /He- ϵ 的谱线强度比与电子温度的关系

Fig. 2 Intensity ratios of (a) Ly- α /He- α and (b) Ly- β /He- ϵ versus electron temperature

明显,而对光学厚度小的谱线影响较小。Ly- β 线和He- ϵ 线的光学厚度比Ly- α 线和He- α 线小很多,因此使用Ly- β /He- ϵ 强度比推断的平均电子温度更可靠,也更接近真实值。

根据连续辐射斜率法测量的基本原理,能量段2146~2555 eV[图1(a)中200~700 pixel区间]的线性度较好,去除线辐射附近的数据点进行线性拟合,如图3所示,拟合得到电子温度约为1215 eV。此外,由于数据量很大,拟合精度能够得到保证。

对于圆柱箍缩,温度从箍缩轴心($r=0$)向箍缩外缘($r=R$)降低^[15],其分布为

$$T_e(r) = T_e(0) - [T_e(0) - T_e(R)] \left(\frac{r}{R}\right)^n, \quad (3)$$

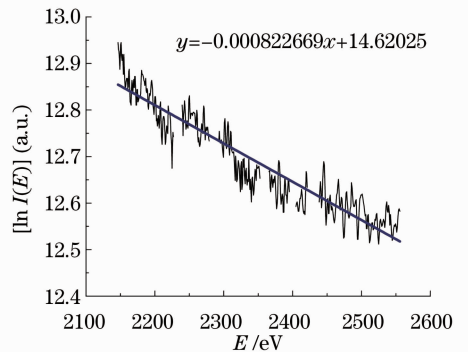


图3 2146~2555 eV 能量段的连续谱拟合结果

Fig. 3 Fitting result from the 2146~2555 eV energy band of continuum spectrum

式中 n 为正数。对于Al,等离子体温度低于100 eV

情况下不能辐射 K 壳层谱线^[15],因此将温度下限设置为 100 eV。而温度上限取由连续谱拟合得到的中心温度 1200 eV,温度轮廓曲线如图 4 所示。根据谱线强度比法诊断得到平均电子温度约为 500 eV,可以推知实验中 n 近似等于 1,温度从箍缩轴心向外缘近似线性降低。

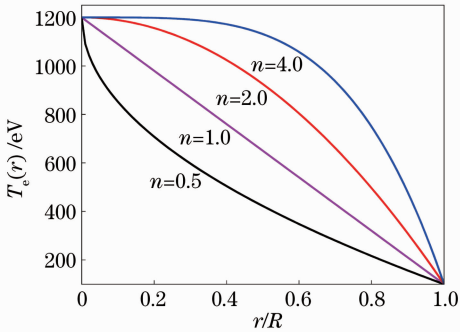


图 4 电子温度径向轮廓

Fig. 4 Properties of the electron temperature profile

4 结 论

采用 X 射线光谱学方法,对 Z 箍缩铝丝阵聚爆实验中的等离子体状态参数进行了实验诊断。基于碰撞辐射模型,模拟计算了谱线强度比与电子温度的函数关系,利用两组共振线强度比获得了等离子体的平均电子温度;利用能量范围为 2146~2555 eV 连续谱斜率拟合推断了等离子体核心电子温度。根据诊断得到的平均电子温度和核心电子温度,研究了圆柱箍缩温度的径向轮廓。分析结果表明,聚爆实验中电子温度从箍缩轴心向外缘近似线性降低。

致谢 感谢中国工程物理研究院流体物理研究所 108 室及“阳”加速器运行组成员对本文工作的协助。

参 考 文 献

1 V. V. Ivanov, P. Hakel, R. C. Mancini *et al.*. Measurement of the ionization state and electron temperature of plasma during the ablation stage of a wire-array Z pinch using absorption spectroscopy[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **106**(22): 225005

2 L. Gregorian, E. Kroupp, G. Davara *et al.*. Electron density and ionization dynamics in an imploding z-pinch plasma[J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**(9): 092704

3 D. A. Haynes, Jr., D. T. Garber *et al.*. Effects of ion dynamics and opacity on Stark-broadened argon line profiles[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **53**(1): 1042~1050

4 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. Elliptically bent crystal spectrometer for Z-pinch plasma X-ray[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 115~118
王洪建,肖沙里,施军等. Z 箍缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 115~118

5 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. Elliptical crystal spectrometer researched for Z-pinch plasma X-ray by using Au-wire array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 685~688
王洪建,肖沙里,施军等. 金丝 Z 箍缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 685~688

6 B. Jones, C. Deeneya, C. A. Coverdale *et al.*. K-shell radiation physics in low-to moderate-atomic-number z-pinch plasmas on the Z accelerator[J]. *J. QS & RT.*, 2006, **99**: 341~348

7 J. P. Apruzese, K. G. Whitney, J. Davis *et al.*. K-shell line ratios and powers for diagnosing cylindrical plasmas of neon, aluminum, argon, and titanium[J]. *J. QS & RT.*, 1997, **57**(1): 41~61

8 A. R. Martínez. Time-resolved electron temperature measurement in a multiwire Z-pinch plasma[J]. *Rev. Mex. Fis.*, 2005, **51**(3): 294~298

9 K. G. Whitney, J. W. Thornhill, P. E. Pulsifer *et al.*. Analyzing time-resolved spectroscopic data from an azimuthally symmetric, aluminum-wire array, z-pinch implosion[J]. *Phys. Rev. E*, 1997, **56**(3): 3540~3557

10 M. Gersten, W. Clark, J. E. Rauch *et al.*. Scaling of plasma temperature, density, size, and X-ray emission above 1 keV with array diameter and mass for aluminum imploding-wire plasmas [J]. *Phys. Rev. A*, 1986, **33**(1): 477~484

11 Lu Jian, Yang Qingguo, Xiao Shali *et al.*. Z-pinch plasma spectral imaging with uniform dispersion crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(2): 357~360
鲁建,阳庆国,肖沙里等. Z 箍缩等离子体均匀色散晶体光谱成像[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(2): 357~360

12 Huang Xianbin, Deng Jianjun, Yang Libing *et al.*. Diagnostics on Yang accelerator for Z-pinch experiment [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(4): 870~874
黄显宾,邓建军,杨礼兵等. “阳”加速器上的 Z 箍缩诊断技术 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(4): 870~874

13 Yang Zhenhua. Theoretical analysis of Z-pinch load design on anode accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2): 209~212
杨震华. “阳”加速器 Z-pinch 实验中负载方案的分析[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(2): 209~212

14 B. A. Hammel, C. J. Keane, M. D. Cable *et al.*. X-ray spectroscopic measurements of high densities and temperatures from indirectly driven inertial confinement fusion capsules[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(9): 1263~1266

15 J. P. Apruzese, J. W. Thornhill, K. G. Whitney *et al.*. Spectroscopic diagnosis of the temperature profile of an Al-Mg Z pinch[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1998, **26**(4): 1185~1191