第S38次学术讨论会·快Z箍缩科学前沿问题及关键技术

Z箍缩等离子体X射线产生及应用分析

杨海亮*, 邱爱慈*, 陈伟*, 王亮平, 李沫, 张金海, 孙凤举, 张鹏飞, 吴撼宇, 丛培天, 吴伟, 吴刚

西北核技术研究院强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024

* 联系人, E-mail: yanghailiang@nint.ac.cn; qiuai@nint.ac.cn; chenwei@nint.ac.cn

MA级脉冲大电流通过丝阵或气体等负载放电时, 负载被加热电离形成等离子体. 等离子体在流过自身的轴向大电流产生自磁场的洛伦兹力作用下, 向轴线作内聚运动发生自箍缩, 最终在对称轴附近停滞, 动能转换成等离子体内能, 提高了等离子体温度, 通过线辐射、复合辐射和韧致辐射产生脉冲强X射线^[1]. Z箍缩(Z-pinch)等离子体终态形状为沿轴线的线状流体; θ 箍缩是由角向电流引起的箍缩, 其等离子体终态形态为沿角向分布的流体.

Z箍缩作为一种等离子体辐射源, 可用于开展惯性约束聚变及X射线辐射效应等研究. 由于Z箍缩具有高能量转换效率、相对低成本的优点, 利用Z箍缩间接驱动惯性约束聚变研究一直为美国等国家重视. 基于丝阵负载的动力学黑腔及双端黑腔实验获得了令人满意的结果, 使Z箍缩成为一种新的惯性约束聚变方式. Z箍缩的另外一个重要用途为利用中低原子序数材料作为负载, 产生光子能量为keV级的X射线, 开展X射线热力学效应研究^[2~4]. 应用Z箍缩还可以开展实验室天体物理、高能密度物理、中子源等相关方面的研究^[5~8].

Z箍缩物理过程十分复杂, 如何获得驱动源与负载的最佳匹配状态, 达到高的辐射能量转换效率和辐射功率是目前Z箍缩物理研究的热点与难点问题.

1 X射线辐射效应

光子能量小于10 keV的软X射线主要引起材料和结构的热力学效应和外部系统电磁脉冲(external system-generated electromagnetic pulse, SGEMP)效应等, 光子能量在10~100 keV的硬X射线主要引起瞬态辐射效应和系统电磁脉冲效应, 光子能量大于100 keV的超硬X射线主要引起瞬态辐射效应、内电磁脉冲效应、源区电磁脉冲效应等.

X射线在材料中的热力学效应^[9~11]包括材料响应和结构响应. 强脉冲X射线在材料的表面层中沉积能量, 局部温升形成温度梯度, 产生内部热应力. 当X射线能注量足够高时, 表层材料熔融、汽化、喷射, 产生反冲压缩应力(图1), 形成应力波(热激波). 热应力和反冲压缩应力在材料中传播, 导致黏接面断裂、屈服区裂纹和自由面反射而拉

杨海亮 西北核技术研究院强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室研究员, 博士生导师. 主要从事核技术及应用研究, 研究方向为强流粒子束物理、Z箍缩等离子体物理、辐射效应等.

邱爱慈 中国工程院院士, 西北核技术研究院强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室研究员, 博士生导师. 主要从事高功率脉冲技术和强流粒子束加速器技术研究.

陈伟 西北核技术研究院强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室研究员, 博士生导师. 主要从事核技术及应用研究, 研究方向为辐射物理、电子元器件辐射效应与加固等.

伸层裂等毁伤现象. 表层材料喷射对整体结构产生反冲冲量, 反冲冲量产生的脉冲载荷引起结构弹/塑性变形、整体振动, 甚至结构屈曲或失效等毁伤现象. 这些效应的影响因素包括X射线能谱、能注量、作用时间、材料特性、熔化热、汽化热、拉伸强度等.

X射线作用在电子系统的表面或内部, 产生康普顿电子或光电子, 在空间激励出电磁场, 电缆上产生感应电流,

图1 X射线在材料中的能量沉积及热激波示意图

Figure 1 Schematic illustration of X-rays energy deposition and thermal shock wave in materials

导致系统电磁脉冲效应^[12,13]。这种效应由X射线直接作用于系统而产生,即使在断电状态下,电子系统仍然会产生效应。系统电磁脉冲效应随X射线能谱、入射方向变化很大,甚至会出现正负变化。

2 Z箍缩等离子体产生的X射线

利用脉冲功率技术产生数十MA脉冲大电流,通过导体负载(如金属丝阵列、带阵列、套筒、气体等),电流沿负载轴向(Z轴)流动时,Z箍缩驱动源的电能耦合至丝阵或气体负载,负载汽化为等离子体态。大电流产生强磁场的洛伦兹力使等离子体向心加速聚爆(implosion),电能转换为内爆动能,迅速获得约 10^7 cm s^{-1} 以上的速度。高速运动的等离子体在Z轴上滞止(stagnation),形成高温高密度等离子体,同时辐射出强X射线^[4],也可用于压缩和辐照位于靶室中央的氘氚靶丸,开展惯性约束聚变研究。图2是Z箍缩等离子体内爆和X射线产生示意图,图3是Z箍缩Al丝

图2 Z箍缩等离子体内爆和X射线产生示意图^[4]

Figure 2 Schematic illustration of the Z-pinch plasma implosion and X-ray production^[4]

图3 Z箍缩Al丝阵等离子体产生的特征X射线跃迁强度

Figure 3 Transition intensity of characteristic X rays from Z-pinch Al wire array plasma

阵等离子体产生的特征X射线跃迁强度。

2.1 利用Z箍缩等离子体产生的软X射线开展材料的热力学效应研究

温度为 $10^6 \sim 10^7 \text{ K}$ 的高温等离子体火球向外辐射产生软X射线,X射线能谱近似为黑体辐射谱^[9]。以1 keV黑体辐射为例,其产生软X射线的峰值能量为2.82 keV,与Z箍缩Ar气负载形成的等离子体产生的3 keV K壳层X射线接近。2 keV黑体辐射产生软X射线的峰值能量为5.64 keV,与Z箍缩Ti与Fe丝阵负载形成的等离子体产生的5~7 keV K壳层X射线接近。由此可见,Z箍缩产生的软X射线能谱与高温等离子体辐射的软X射线能谱相近,可以用于高温等离子体辐射的软X射线热力学效应模拟。图4是1, 2, 3 keV黑体辐射X射线能谱,表1是Z箍缩等离子体K层辐射X射线能量。

图4 1, 2, 3 keV黑体辐射X射线能谱

Figure 4 Energy spectrum of 1, 2, 3 keV black body radiation X-rays

表1 Z 箍缩等离子体 K 壳层辐射 X 射线能量
Table 1 Energy of K-shell radiation X-rays from Z-pinch plasma

材料	K 层辐射 X 射线能量(keV)
Ne	~1.0
Al	~1.7
Ar	~3.0
Ti	~5.0
Fe	~7.0
Ni	~8.0
Cu	~8.5
Kr	~13
Mo	~17
Ag	~22
In	~24
Sn	~25
W	~59.3

在 Angara-5-1 装置上, 俄罗斯科学家利用 W 丝阵负载 Z 箍缩等离子体产生软 X 射线, 研究 Al 箔在能注量 4~5 kJ cm^{-2} 的软 X 射线作用下的动力学行为^[3]. 图5 是实验研究布局, 两片铝箔分别放置在 Z 箍缩负载两侧 1.1 cm 处. Z 箍缩负载为 60 根 W 丝阵, 丝阵直径 10 mm、高度 16 mm、线质量 330 $\mu\text{g cm}^{-1}$. 该丝阵负载在驱动源大电流形成等离子体箍缩时辐射软 X 射线(soft X-ray, SXR), SXR 辐照铝箔, 铝箔迅速汽化形成等离子体. 实验测得, 铝箔等离子体电子温度为 $(1.4\sim3.0)\times10^5\text{ }^\circ\text{C}$, 背光面喷发速度为 60 km s^{-1} ,

迎光面喷发速度为 90 km s^{-1} (图6).

我国在“强光一号”加速器上采用 Z 箍缩等离子体产生的平均能量为 0.21 keV(图7)、平均半高宽为 36 ns、平均能注量为 143 J cm^{-2} 的脉冲软 X 射线辐照材料, 测得的喷射冲量耦合系数为 0.70 $\text{Pa s J}^{-1} \text{cm}^2$ (图8)^[14]. 喷氩气负载产生的 X 射线能量分布为 0.1~1.2 keV、脉冲宽度为 34~63 ns、能注量为 48~156 J cm^{-2} 时, 辐照铝材料, 测得冲量耦合系数为 0.44~0.76 $\text{Pa s J}^{-1} \text{cm}^2$ ^[15].

Z 箍缩驱动源输出电流 30 MA、功率~100 TW、前沿~120 ns 的高功率电脉冲, 采用 3 层喷氩气负载, 产生~3 keV 特征 X 射线总产额约 607 kJ, 5 cm 处平均能注量 1933 J cm^{-2} , 10 cm 处平均能注量 483 J cm^{-2} , 20 cm 处平均能注量 103 J cm^{-2} , 辐照面积 300 cm^2 , 能注量均匀性 90%, 可以用于开展 X 射线的热力学效应研究.

2 keV 黑体辐射的 X 射线峰值能量为 5.64 keV, 3 keV 黑体辐射 X 射线的峰值能量为 8.46 keV. 为满足对 2~3 keV 黑体辐射 X 射线的模拟需求, 采用不锈钢丝阵负载, 产生 5~8 keV X 射线. 在驱动源电流为 30 MA 时, X 射线总产额为 130 kJ, 9.3 cm 处平均能注量为 101 J cm^{-2} , 辐照面积为 70 cm^2 , 能注量均匀性为 90%, 可以用于开展 X 射线热力学效应研究.

2.2 将 Z 箍缩等离子体产生的硬 X 射线用于电子构件的系统电磁脉冲效应研究

硬 X 射线与电子系统构件发生光电效应等相互作用, 从系统构件表面激发脉冲电磁场, 对电子学系统造成损伤, 引起系统电磁脉冲效应. 特别地, 由于 X 射线引起的系统

图5 放置在 Z 箍缩负载两边的铝箔前后表面等离子体的扩张速度和发光强度测量布局^[3]
Figure 5 The arrangement of two Al foils which are placed on both sides of the Z-pinch to study the expansion velocity of the foil plasma and the intensity of its glow^[3]

图 6 W 丝阵 Z 箍缩等离子体软 X 射线辐照 Al 箔的材料动力学实验结果^[3]. (a) 分幅相机曝光时刻与 Z 箍缩微分总电流(波形 1)、电压(波形 2)、 $h\nu > 100$ eV(绝对单位)和 $h\nu > 20$ eV(任意单位)软 X 射线功率(波形 3, 4)对应关系; (b) 铝箔等离子体爆炸过程 X 射线分幅图像, 同步对应(a)曲线中 t_1 ~ t_{10} 垂直箭头指示的时刻

Figure 6 Results of the expansion dynamics of a Al foil plasma under the action of Z-pinch W wire array plasma SXR^[3]. (a) Time dependences of the total current derivative (1), voltage (2), and SXR power in the spectral ranges of $h\nu > 100$ eV(in absolute units) and $h\nu > 20$ eV(in arbitrary units) (3, 4), respectively. (b) X-ray frame images of the explosion of the Al foil plasma synchronized with curves shown in panel (a), where the times of frames t_1 ~ t_{10} are indicated by vertical arrows

图 7 (网络版彩色)“强光一号”加速器 Z 箍缩等离子体产生的 X 射线能谱^[14]

Figure 7 (Color online) Energy spectrum of X-rays from Z-pinch plasma on Qiangguang I accelerator^[14]

电磁脉冲存在严重的非线性效应, 必须采用 X 射线进行实验考核。

以“阳”加速器(1 MA, 80 ns)驱动 Z 箍缩等离子体为 X

图 8 (网络版彩色)实测的 Z 箍缩等离子体产生 X 射线辐照材料的喷射冲量波形^[14]

Figure 8 (Color online) Measured waveforms of blow-off impulse on materials radiated by X-rays from Z-pinch plasma^[14]

射线源, 研究了 X 射线加载下金属表面出现的电荷分离现象. Z 箍缩负载为 16 根直径 $5 \mu\text{m}$ 的钨丝阵, 丝阵产生半径 3 mm、强度 10^7 W cm^{-2} 、半高宽 30 ns 的软 X 射线(光子能

量主要在 0.2 keV 附近). 脉冲通过直径 5 mm 的限光孔照射半径 30 mm、厚 3 mm 的铜盘中心, 在金属表面产生了脉宽相近, 幅值为 kV 的电势^[16].

驱动源电流为 30 MA 时, 采用喷氦气负载的 Z 箍缩等离子体产生 13 keV 的 X 射线, 总产额达到 11 kJ, 16 cm 处平均能注量 3 J cm^{-2} , 辐照面积 200 cm^2 , 能注量均匀性 90%, 可以用于开展系统电磁脉冲效应研究.

为了获得更硬的 X 射线, 可以采用 Mo, Ag, In, Sn, W 丝阵负载, 利用非热 X 射线发射机制^[17-20]产生 ~17, 22, 24, 25, 59.3 keV 的 X 射线. 驱动源电流为 30 MA, 采用 Mo 和 Ag 丝阵负载时, 17 和 22 keV X 射线总产额分别达到 3.7 和 2.4 kJ, 11 cm 处平均能注量 2.0 和 1.3 J cm^{-2} , 辐照面积 100 cm^2 , 能注量均匀性 90%, 可以用于开展较高能量硬 X 射线产生的系统电磁脉冲效应研究.

随着驱动源电流增加, Z 箍缩等离子体的温度升高, 产生的 X 射线能谱变硬, 辐射总产额增加, 可以获得高保真度的综合辐射环境, 提高模拟实验能力.

3 进一步提高 Z 箍缩 X 射线产额需要解决的科学问题

为进一步提高 Z 箍缩等离子体的 X 射线辐射转换效率, 增加 X 射线产额, 还有许多科学和技术问题亟待解决, 包括 Z 箍缩等离子体内爆不稳定性控制与利用、稠密等离子体中辐射输运等. 从应用角度出发, 研究重点是如何利用各种物理机制或技术手段有效提高辐射转换效率并且较精确地控制能谱. 近几年, 在软 X 射线产生技术方面, 美国深入开展了 Z 箍缩负载优化技术研究, 采用更为复杂、精细的多层嵌套负载, 将 keV 量级的软 X 射线辐射转换效率提高近 1 倍.

为进一步提高驱动源电能耦合至负载的效率, 在 Z 箍缩等离子体内爆动力学方面, 需要研究电磁场能量高效转换为内爆动能的机制与机理, 提高滞止时间的压缩比, 探索提高聚爆品质的理论; 分析导致滞止时刻磁流体力学不稳定的成因及减小不稳定性的理论; 提高离子温度, 获得高电离度 K 层辐射的理论.

在提高 Z 箍缩等离子体稳定性方面, 需要重点研究丝阵负载的丝间形成薄壳层式内爆等离子体与磁场向丝阵内部渗透的相互影响机制, 内爆过程中热斑和质量拖尾对等离子体不稳定性的影响机制, 提高 K 层辐射与低能辐射比值的理论. 研究“推进层、致稳层、辐射层”内爆过程对减轻不稳定性, 获得高压比稠密箍缩柱的影响机理, 内爆动力学与辐射输出轴向不均匀性以及“拉链”现象与“雪耙”致稳的形成机理; 磁致 RT 不稳定性发展导致的“空泡”和“钉刺”结构对内爆等离子体轴向与角向不均匀性的影响过程及抑制理论.

在 Z 箍缩驱动源能量高效转换 X 射线方面, 需要研究 Z 箍缩等离子体的能量转换机制与产生 X 射线的辐射机理, 辐射不透明度对辐射输出的影响; 提高轴线处形成的高温 K 层发射体与外围弥散低温冷等离子体的比例, 增强 K 层辐射份额.

为了获得更硬的 X 射线, 需剥离高 Z 原子至类 H、类 He 态, 要求馈入负载更高电压和更大电流. 探索利用非热激发方式产生 K 壳层 X 射线的理论; 探索在负载阴极刻槽、扭曲丝阵、引入等离子体断路开关机制、局部非均匀磁场, 以获得更多热电子的技术; 研究利用局部高温区、微二极管等理论, 提高 K 层辐射与低能辐射比值的理论; 研究 Z 箍缩等离子体韧致辐射、复合辐射获得硬 X 射线的技术.

4 小结

驱动源电流 30 MA 的 Z 箍缩等离子体产生的 X 射线能谱、能注量、辐照面积、均匀性等参数能够用于开展 X 射线热力学效应和系统电磁脉冲效应研究. 开展 X 射线在材料中沉积能量转换为内能与动能等物理过程研究, 获得 X 射线在不同结构复合材料中的冲量耦合机理与耦合系数, 研究 X 射线辐射输运物理及利用透镜、黑腔等技术提高输运效率; 开展基于 Z 箍缩 X 射线源的 X 射线热力学效应等有效性研究, 解决 Z 箍缩 X 射线热力学效应的评估问题; 开展电子构件的系统电磁脉冲效应实验研究, 验证理论模型, 重点解决 X 射线光电效应和康普顿效应产生的强脉冲电子与电磁场相互作用产生的非线性效应等物理问题.

致谢 感谢吕敏院士, 西安交通大学李盛涛教授、李兴文教授、吴坚教授, 北京应用物理与计算数学研究所丁宁研究员对本文提出修改建议.

推荐阅读文献

- 1 Chen W, Yang H L, Qiu A C, et al. Basic Scientific Problems in Radiation Physics Research (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018. 18-19 [陈伟, 杨海亮, 邱爱慈, 等. 辐射物理研究中的基础科学问题. 北京: 科学出版社, 2018. 18-19]
- 2 Jiao X J, Sun F J, Yang H L. Construction, utilization and development plan of American fast Z-pinch facility (in Chinese). Mod Appl Phys, 2018, 9: 010401 [焦晓静, 孙凤举, 杨海亮. 美国快 Z 箍缩装置的建设、应用与发展规划. 现代应用物理, 2018, 9: 010401]
- 3 Mitrofanov K N, Aleksandrov V V, Grabovski E V, et al. Study of the expansion dynamics of the plasma of a thin aluminum foil under the action of soft X-ray emission. Plasma Phys Rep, 2017, 43: 444-457

- 4 Qiu A C. Application of Pulsed Power Technology (in Chinese). Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016. 123–224 [邱爱慈. 脉冲功率技术应用. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. 123–224]
- 5 Chen Q F, Gu Y J, Zheng J, et al. Review and progress in the study of the properties of warm dense matter (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 812–823 [陈其峰, 顾云军, 郑君, 等. 温密物质特性研究进展与评述. 科学通报, 2017, 62: 812–823]
- 6 Coverdale C A, Deeney C, Velikovich A L, et al. Neutron production and implosion characteristics of a deuterium gas-puff Z pinch. Phys Plasm, 2007, 14: 022706
- 7 Lebedev S V, Suzuki-Vidal F, Bland S N, et al. Laboratory astrophysics experiments with Z-pinchs. In: Proceeding of the 8th International Workshop on the Physics of Wire Array Z-pinchs. La Jolla, CA, 2009
- 8 Chittenden J P, Dunne A M, Zepf M, et al. The production of hypersonic radiatively cooled plasma projectiles of extremely high energy density in imploding Z-pinchs. In: The 5th International Conference on Dense Z-Pinchs. Albuquerque, NM, USA, 2002. 291–294
- 9 Zhou N, Qiao D J. Materials Dynamics under Pulse Beam Radiation (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 3–12 [周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学. 北京: 国防工业出版社, 2002. 3–12]
- 10 Yang H L, Qiu A C, He X P, et al. Simulation of X-ray thermal-mechanical effects of materials irradiated by high power ion beams (in Chinese). Nucl Tech, 2005, 28: 24–29 [杨海亮, 邱爱慈, 何小平, 等. 高功率离子束模拟材料的 X 射线热-力学效应研究. 核技术, 2005, 28: 24–29]
- 11 Qiu A C, Zhang J S, Peng J C, et al. Progress in studying high power pulsed ion-beams for simulating thermal-mechanical effects on the material to be irradiated by X-ray (in Chinese). Nucl Tech, 2002, 25: 714–719 [邱爱慈, 张嘉生, 彭建昌, 等. 用于模拟 X 射线热力学效应的高功率脉冲离子束研究进展. 核技术, 2002, 25: 714–719]
- 12 Wang T C, He Y H, Wang Y Z. Introduction to Electromagnetic Pulse (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2011. 55–97 [王泰春, 贺云汉, 王玉芝. 电磁脉冲导论. 北京: 国防工业出版社, 2011. 55–97]
- 13 Lash J. Capability Advances at the Sandia Z Machine. Report in Sandia National Laboratories (SAND2015-8338C), Albuquerque, NM (United States), 2015
- 14 Peng C X, Tan H M, Lin P, et al. Measurement of blow off impulse in materials radiated by pulsed soft X-ray with a pendulum target system (in Chinese). Chin J High Press Phys, 2005, 19: 80–85 [彭常贤, 谭红梅, 林鹏, 等. 采用靶摆式探头测量软 X 射线辐射材料产生的喷射冲量. 高压物理学报, 2005, 19: 80–85]
- 15 Lin P, Wang D W, Chen B. Vaporized blow-off impulse induced by pulse soft X-ray (in Chinese). Explosion Shock Waves, 2013, 33(Suppl): 111–115 [林鹏, 王等旺, 陈博. 脉冲软 X 射线汽化喷射冲量. 爆炸与冲击, 2013, 33(增刊): 111–115]
- 16 Dan J K, Li J F, Yang L B, et al. Experimental investigation on charge separation on metals irradiated by Z pinch produced X-ray (in Chinese). High Power Laser Part Beams, 2010, 22: 679–682 [但加坤, 李剑峰, 杨礼兵, 等. Z 箍缩 X 射线在金属表面产生电荷分离现象. 强激光与粒子束, 2010, 22: 679–682]
- 17 Ampleford D J, Hansen S B, Jennings C A, et al. Non-thermal X-ray Emission from Wire Array Z-pinchs. Sandia Report, SAND2015-10453, 1–70
- 18 Shrestha I K. The study of hard X-ray emission and electron beam generation in wire array Z-pinch and X-pinch plasmas at university-scale generators. Doctor Dissertation. Reno: University of Nevada, 2010
- 19 Ampleford D J, Loisel G P, Hansen S B, et al. Scaling of K α line emission in Z pinchs from 2–60 keV. In: 2016 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 2016
- 20 Gordeev A, Losseva T. X-ray emission of relativistic nonquasineutral current structures (nonthermal model of “hot spot”). In: Proceedings of the 17th International Conference on High-Power Particle Beams (Beams'08), 2000. 47–50

Summary for “Z 箍缩等离子体 X 射线产生及应用分析”

Analysis for generation and application of X-rays from Z-pinch plasma

Hailiang Yang^{*}, Aici Qiu^{*}, Wei Chen^{*}, Liangping Wang, Mo Li, Jinhai Zhang, Fengju Sun, Pengfei Zhang, Hanyu Wu, Peitian Cong, Wei Wu & Gang Wu

State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

^{*} Corresponding authors, E-mail: yanghailiang@nint.ac.cn; qiuaici@nint.ac.cn; chenwei@nint.ac.cn

The Z-pinch plasma radiation sources have recently provided the most powerful and energetic laboratory sources of multi-keV photons. The X-ray produced by Z-pinch plasma can be used to study the thermodynamic effect and the system-generated electromagnetic pulse effect, and to study the physical processes such as the conversion of X-ray deposition energy into internal energy and kinetic energy in the material. The impulse coupling mechanism and coupling coefficient of X-ray in different structure composites were obtained, the electromagnetic pulse effect of electronic components was studied experimentally, and the physical problems such as the non-linear interaction between strong pulse electron and electromagnetic field caused by X-ray photoelectric effect and Compton effect were analyzed. The parameters of X-ray for the study of thermodynamic effect of materials and electromagnetic pulse effect of electronic component system are presented, and the typical results of the study of radiation effect using Z-pinch plasma X-ray are introduced. The average energy produced by Z-pinch plasma is 0.21 keV, the average half-width is 36 ns and the average energy flux is 143 J cm^{-2} on Qiangguang I accelerator. The measured coupling coefficient of injection impulse is $0.70 \text{ Pa s J}^{-1} \text{ cm}^2$. When the energy distribution of X-ray is 0.1–1.2 keV, the pulse width is 34–63 ns and the energy flux is $48\text{--}156 \text{ J cm}^{-2}$, the impulse coupling coefficient is $0.44\text{--}0.76 \text{ Pa s J}^{-1} \text{ cm}^2$ in Al material. The parameters such as energy spectrum, yield, irradiated area and uniformity of X-ray produced by Z-pinch load of different materials and structures driven by 30 MA current are given. The total output of characteristic X-ray of $\sim 3 \text{ keV}$ is about 607 kJ with an average energy fluence of 103 J cm^{-2} at 20 cm and an irradiation area of 300 cm^2 , the uniformity of energy fluence is 90%. In order to obtain harder X-ray, Mo, Ag, In, Sn, W wire array loads can be used to generate $\sim 17, 22, 24, 25, 59.3 \text{ keV}$ X-ray using non-thermal X-ray emission mechanism. In order to improve the efficiency of X-ray radiation of Z-pinch plasma, increase the yield of X-ray, some scientific questions that need further study have been put forward. In order to improve the efficiency of power coupling to load, it is necessary to study the mechanism of energy conversion from electromagnetic field to internal explosion kinetic energy in Z-pinch plasma. The causes of the instability of magnetic fluid dynamics and the theory of reducing the instability in internal explosion plasma should be analyzed. In order to improve the stability of Z-pinch plasma, it is important to study the interaction mechanism between thin shell-layer implosion plasma and magnetic field permeating into the wire array, and the influence of thermal spot and mass tugging in the process of implosion. The dynamics of implosion and axial inhomogeneity of radiation output, and the formation mechanism of “zippered” phenomenon and “snow harrow” stability should be studied. The energy conversion mechanism of Z-pinch plasma and the radiation mechanism of producing X-ray should be studied. In order to obtain harder X-rays, high Z atoms are stripped to H-like, He-like states, requiring higher voltages and higher currents to be fed into the load. The theory of producing K-shell X-ray by non-thermal excitation should be explored. In order to obtain more hot electrons, the technique of cathode slot, twisted wire array, plasma circuit breaker mechanism and local non-uniform magnetic field should be explored. The theory of increasing the ratio of K-shell radiation to low energy radiation should be studied by using the theory of local high temperature zone and microdiode. The technique for obtaining hard X-ray from the composite radiation of Z-pinch plasma should be studied.

Z-pinch plasma, X-ray thermodynamics effect, system electromagnetic pulse, radiation effects, K shell X-ray, black radiation

doi: 10.1360/TB-2019-0363