

耦合旋转回流柱的Z箍缩动态轴向磁化模型 及其结构优化方法

姜志远, 卢元博, 王威, 王振宇, 赵一鸣, 吴坚

(西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了对Z箍缩等离子体轴向磁场调控致稳结构进行设计和改进,以基于旋转回流柱的Z箍缩动态磁化系统为研究对象,探究了轴向磁场的三维分布及其与等离子体的耦合过程。首先,构建了描述兆安级脉冲源耦合旋转回流柱放电过程的多物理场演化模型,系统研究回流柱结构参数对初始轴向磁场分布及负载电感值的影响;随后,建立了考虑轴向磁场的雪犁模型,探讨轴向磁场对等离子体内爆过程及不稳定性发展的调控规律;最后,针对旋转回流柱产生轴向磁场的不均匀性,提出通过耦合由螺旋臂构成的磁镜结构和旋转回流柱结构,从而提升轴向磁场幅值和轴向均匀度的优化方法。结果表明:在负载高度固定的情况下,旋转回流柱相较于直回流柱增加的额外电感值主要由回流柱匝数决定;轴向磁场幅值随旋转回流柱匝数的增加而增强,但电流上升时间也相应延长;当回流柱匝数从0.75增加至1.25时,同一时刻的内爆半径最大可增加约25%,滞止时间延迟约13%,且轴向磁场调控下不稳定性幅值最大可降低40%;在旋转回流柱耦合磁镜后,能够将轴向磁场的轴向不均匀度从67%降低至11%,并将内爆过程的轴向不均匀度从最大42%降低至9%。

关键词: Z箍缩;磁场调控;旋转回流柱;结构优化

中图分类号: TM836 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202505019 **文章编号:** 0253-987X(2025)05-0198-11

Z-Pinch Dynamic Axial Magnetization Model of Coupled Rotating Reflux Column and Its Structural Optimization Method

JIANG Zhiyuan, LU Yuanbo, WANG Wei, WANG Zhenyu, ZHAO Yiming, WU Jian

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to design and improve the axial magnetic field control structure for stabilizing Z-pinch plasmas, the Z-pinch dynamic magnetization system based on the rotating reflux column is taken as the research object, and three-dimensional distribution of the axial magnetic field and its coupling process with the plasma are explored. First, a multiphysics evolution model is constructed to describe the discharge process of mega-ampere-level pulse source coupled rotating reflux column, and the impact of structural parameters of the reflux column on the initial axial magnetic field distribution and the load inductance value is systematically investigated. Then, a snowplow model considering the axial magnetic field is established to explore the regulation of the axial magnetic field on the plasma implosion process and instability development. Finally, to address the inhomogeneity of the axial magnetic field generated by the rotating reflux column, a

收稿日期: 2024-11-27。 作者简介: 姜志远(1998—),男,博士生;吴坚(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项

目: 国家自然科学基金资助项目(523B2071)。

网络出版时间: 2025-02-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250210.0901.004>

method is proposed to enhance the axial magnetic field amplitude and uniformity by coupling a magnetic mirror structure composed of helical arms with the rotating reflux column. The results indicate that, with a fixed load height, the additional inductance value added by the rotating reflux column compared with the straight reflux column is primarily determined by the number of turns of the reflux column. The axial magnetic field amplitude increases with the number of turns of the rotating reflux column, but the current rise time also increases accordingly. When the number of turns increases from 0.75 to 1.25, the implosion radius can increase by up to 25% at the same moment, the stagnation time is delayed by approximately 13%, and the instability amplitude can be reduced by up to 40% under axial magnetic field control. After the rotating reflux column is coupled with the magnetic mirror, the axial magnetic field inhomogeneity is reduced from 67% to 11%, and the axial inhomogeneity of the implosion process is reduced from a maximum of 42% to 9%.

Keywords: Z-pinch; magnetic field control; rotating return posts; structural optimization

Z箍缩是指柱形负载(丝阵、套筒或喷气等)在脉冲轴向电流驱动下向轴线快速内爆的物理过程。利用超高功率电脉冲(1~100 TW, 100 ns)驱动Z箍缩负载,可以产生高温、高密、高压、高速及强磁场等极端环境。这种技术被认为是实验室产生强脉冲软X射线辐射环境的最有效手段^[1-3],同时也是实现聚变能源的一种具有潜力和竞争力的途径^[4-7]。然而,Z箍缩内爆过程受到磁瑞利-泰勒(MRT)不稳定性的显著影响,会导致内爆过程中轴向均匀性下降,同时降低内爆总动能和辐射能产额,严重限制了其在辐射科学和聚变能源方面的应用^[8-10]。

外施轴向磁场是抑制Z箍缩内爆不稳定性的的重要手段。在内爆过程中,轴向磁场会因磁流体动力学效应被冻结并压缩,可以使磁场幅值显著增强。高强度轴向磁场和轴向电流产生的角向磁场共同作用,形成磁剪切效应,可以有效抑制不稳定性的发展^[11-14]。研究高强度轴向磁场的产生方法是探索磁场动态演化和致稳机理的基础,目前外施轴向磁场主要分为稳态和动态两种类型,已有的实现方式包括亥姆霍兹线圈、螺旋形负载和旋转回流柱等。稳态轴向磁场通常由毫秒、千安级电流驱动亥姆霍兹线圈产生,由于脉冲持续时间较长(约ms级),亥姆霍兹线圈能够在Z箍缩内爆(约ns级)过程中产生幅值稳定且分布均匀的轴向磁场,其磁场幅值在Z箍缩发展期间基本保持恒定^[12,15-17]。针对磁化套筒惯性聚变(MagLIF)研究,美国圣地亚实验室Rovang等通过增加线圈匝数、结构加固以及线圈串联等方式,成功产生了磁场强度达10 T的轴向磁场^[18]。然而,由于负载尺寸和脉冲源参数的限制,基于亥姆霍兹线圈产生的轴向磁场幅值难以进一步提升^[19-20]。

在此背景下,基于旋转回流柱的动态轴向磁化

结构受到关注。这种方法是将Z箍缩负载的回流结构设计成螺旋形,直接利用主脉冲电流产生轴向磁场,以期进一步提升轴向磁场幅值^[21]。同时,轴向磁场和角向磁场均随脉冲电流的增加而同步增强,有助于产生更显著的磁剪切致稳效果^[22]。根据美国罗切斯特大学Gourdain等的模拟结果,通过主脉冲和旋转回流柱共同产生的轴向磁场,可以在60 ns内有效渗透至金属负载内部,适用于多种Z箍缩负载构型的精确调控^[23]。

然而,由于旋转回流柱的结构对磁场幅值及其动态演化过程具有重要影响,磁化过程变得更加复杂^[24]。同时,在增强磁场幅值的同时也会增加其负载电感,导致电流上升沿变慢。因此,如何建立旋转回流柱的动态磁化模型,并将其应用于结构设计与优化,成为当前亟待解决的关键问题。本文基于旋转回流柱结构与Z箍缩脉冲源的耦合过程,建立了电-磁-力多物理场演化的Comsol模型,系统研究了不同回流柱结构特征与初始轴向磁场幅值、负载电感及结构强度等宏微观物理参数之间的关联。同时,构建了耦合动态轴向磁场的雪耙模型,深入探讨了外加动态轴向磁场对等离子体内爆过程及不稳定性发展的调控效果,并针对调控效果的提升提出了磁化结构的设计和优化方法。

1 回流柱磁化模型及其结果分析

1.1 磁化结构模型

典型金属丝阵Z箍缩负载区的结构如图1(a)所示。在放电过程中,底部中心区域为高压结构,连接至Z箍缩负载后,再通过直回流柱后连接至地形成放电回路。为了引入轴向磁场,需要将传统的直回流柱结构替换为图1(b)所示的螺旋形回流柱。

本文设计的结构由 4 根均匀分布的螺旋形回流柱组成,螺旋线的高度为 27 mm,直径为 64 mm,匝数可调。图 1(b)显示了单根匝数为 0.5 的旋转回流柱结构的侧视图和三维视图。

在电磁场仿真中,引入直径为 4 mm 的圆柱结构作为短路负载,其底部连接圆台,分别作为阴极和阳

极,用于模拟 Z 箍缩脉冲源的汇流区域,如图 1(c)所示。在所有导电区域外部设置一个圆柱体壳层,其内部材料定义为真空,用于研究真空磁场分布;导流结构采用不锈钢材质。模拟采用磁场模块,并结合一个由电阻 R 、电感 L 、电容 C 组成的电路用于模拟脉冲源,电路参数如图 2(a)所示。

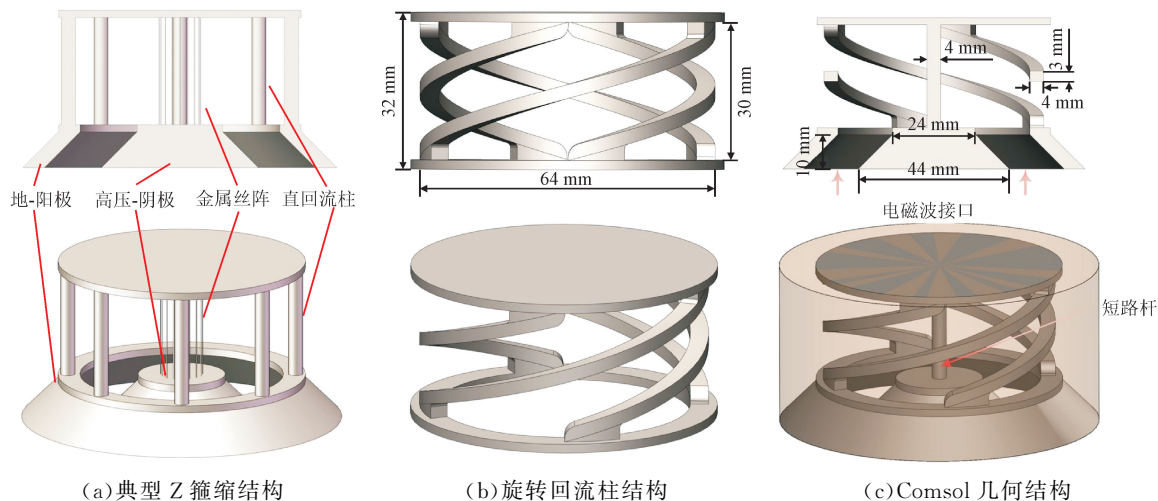
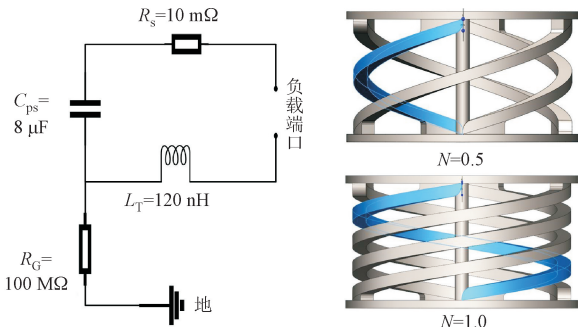


图 1 Z 箍缩结构及 Comsol 几何模型

Fig. 1 Z-pinch structure and Comsol geometric model

通过外接端口,将负载区域与脉冲源电路模型相连接,以研究整体回流结构连接后的放电过程。在求解模型时,电路中的电容初始电压设为 140 kV,并使用动态求解器进行计算,获得整个建模区域内的电流、电压、磁场及电磁能量等参数的动态演化过程。为研究旋转回流柱结构参数对轴向磁场及电感参数的影响,本文针对不同匝数(即螺旋度)的旋转回流柱进行了分析,结构总高度设置为 30 mm,匝数范围为 0.5~1.75,匝数为 0.5、1.0 的示例结构如图 2(b)所示。在拟合过程中,不同匝数结构的底部结构和负载半径均保持一致。



(a) 耦合脉冲源电路模型 (b) 不同匝数旋转回流柱结构

图 2 脉冲源电路设置及回流柱参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pulse source circuit setup and return post parameters

1.2 结构电感

根据模型计算结果,通过区域总电磁能和电流幅值计算出结构电感 L_m ,计算公式如下

$$L_m = \frac{2W_m}{I^2} \quad (1)$$

式中: W_m 为计算区域的总磁能; I 为总电流。

在 Z 箍缩内爆过程中,等离子体与回流柱会呈现同轴回流结构,且负载半径会随着内爆的进行逐渐减小。为了模拟内爆过程中旋转回流结构的电感参数演化,可通过改变中心负载柱的半径来实现。如图 3(a) 所示,在不同负载半径及回流柱匝数条件下,可计算结构的总电感。对于匝数 $N = 0$ 的情况,即对应直回流柱结构,其理论电感 L 为

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率,取值 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; l 为回流柱高度; R 为顶部外半径; r 为负载半径。从图 3(a) 可以看出,回流柱结构电感参数的 Comsol 计算值和理论值基本相符。随着匝数不断提升,总电感也不断提升,且上升速率也不断增大。

此外,不同负载半径条件下的电感分布曲线基本平行。不同匝数与直回流柱结构的电感差如图 3(b) 所示。当负载半径小于 20 mm 时,旋转回流柱结构

引入的额外电感分布主要由回流柱匝数决定,而负载半径影响较小。同时,在改变回流柱总长度的情况下,电感差的变化趋势保持一致,即随着回流柱长度的增加,电感差也相应提升。因此,可以根据负载结构参数和回流柱匝数直接估算磁化结构的总电感。不同匝数和高度的旋转回流柱结构相对于同一高度直回流柱的额外引入电感列于表 1。

1.3 轴向磁场分布

在与电路耦合的放电过程中,由于电流呈动态变化,因此本文选取放电开始后 $t=500\text{ ns}$ 时刻的轴向磁场与电流幅值的比作为磁场结果,并将其统一标定至单位电流(1 MA)条件下,研究旋转回流柱结构产生的轴向磁场三维分布。匝数 $N=1$ 时的磁场分布如图 4 所示。

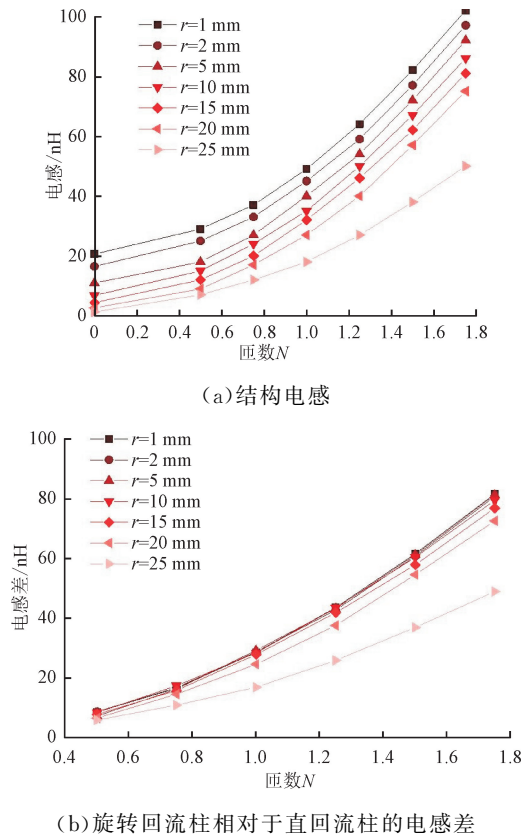


图 3 不同负载半径及回流柱匝数情况下的结构电感模拟结果

Fig. 3 The relationship between the inductance value and the number of turns and height of the rotating return post

表 1 旋转回流柱额外引入电感随匝数和高度的变化关系

Table 1 Variation relationship of the additional inductance introduced by the rotating return column with the number of turns and height

匝数	额外电感/nH	
	高度 30 mm	高度 54 mm
0.50	8.55	27.73
0.75	16.54	60.78
1.00	28.58	105.40
1.25	42.60	161.70
1.50	60.75	225.70

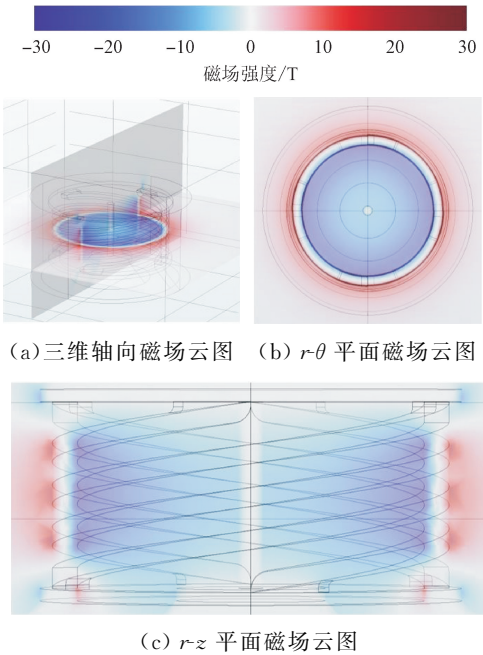


图 4 1 MA 电流情况下轴向磁场三维分布云图

Fig. 4 3D distribution contour map of axial magnetic field under 1 MA current

从 $r-\theta$ 平面云图可以看出,尽管仅有 4 根旋转回流柱作为导流路径,轴向磁场在不同角向位置的分布仍较为均匀,因此不会引起角向方向的非均匀调控。从 $r-z$ 平面云图可以观察到,回流柱内部区域的轴向磁场分布随径向与轴向位置的变化而变化,其中中间区域的磁场幅值显著高于顶端和底端。

由于角向均匀性较好,因此通过对同一半径位置不同角向位置的磁场进行平均,可以得到轴向磁场沿半径分布的一维曲线。由于负载半径为 2 mm,模拟过程中 $R<2\text{ mm}$ 区域的磁场强度无法获得,因此通过其余区域(2~25 mm)的曲线拟合从而补齐半径从 0~25 mm 区域内的完整数据,结果如图 5 所示。由图可见,轴向磁场强度(B_z)随半径变化显著;除底部区域($Z=-12\text{ mm}$)外,随着半径的增大,其他区域轴向磁场幅值逐渐增强,最大值约为中心位置的两倍。此外,不同轴向位置的磁场分布也存在明显的不均匀性,其中轴向

中心位置($Z=0$ mm)的磁场幅值最高,而远离轴向中心位置时,磁场幅值逐渐降低。在距离中心位置相同的区域,靠近顶端的轴向磁场幅值小于底端。由此可见,负载底部与顶部结构对轴向磁场分布产生显著影响,导致磁场分布呈现轴向不均匀现象。

同时,动态轴向磁场的调控效果与驱动场比例 $\varphi(\varphi = B_z/B_\theta)$ 有关,其中 B_θ 是磁场的角向分量,增大内爆过程的驱动场比例 φ 能有效提高对磁瑞利-泰勒不稳定性(MRTI)的抑制作用。一般而言,需要控制螺旋场初始 φ 在 $0.1 \sim 1.0$ 范围内^[22]。具体驱动场比例 φ 计算结果如图 5(b)所示,分析表明,在半径范围 $2.5 \sim 17.0$ mm 内,轴向场分量对总磁驱动压力具有显著贡献,表明该区域的磁场特性适用

于大多数传统 Z 箍缩负载。

在放电过程中,轴向磁场的幅值会受到回流柱匝数的显著影响。如图 6(a)所示,不同匝数条件下,负载轴向中心位置($Z=0$)在单位电流下的轴向磁场强度分布呈现明显差异。然而,如 1.2 节所述,随着匝数的增加,结构电感也会相应提升,导致电路上升速率减慢。在不同匝数结构耦合电路模型的计算中得到的电流波形如图 6(b)所示。以匝数为 1 为例,由于电感增大,电流幅值会降低 10%,而上升时间会增大 12%。在相同放电时刻(1 000 ns)下的实际轴向磁场分布如图 6(c)所示。可以观察到,随着匝数的增加,实际轴向磁场幅值的增长速率逐渐放缓。这表明,在当前电路配置下,最优的匝数范围为 $1 \sim 1.5$ 匝。

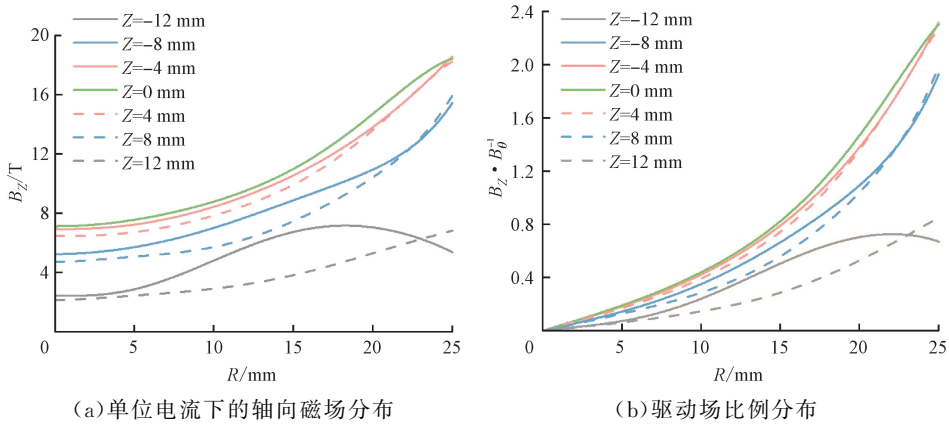


图 5 单位电流轴向磁场及驱动场比例分布计算结果
Fig. 5 Calculation results of axial magnetic field distribution and drive field ratio under 1 MA current

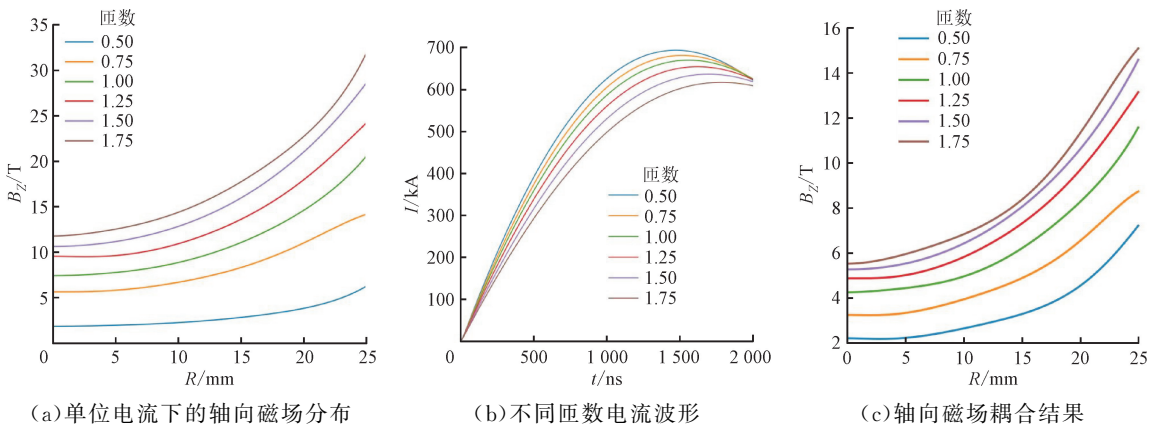


图 6 电流及轴向磁场计算结果
Fig. 6 Calculation results of current and axial magnetic field

2 单丝 Z 箍缩轴向磁化模型计算

为探究轴向磁场对等离子体内爆过程的影响,

本文采用考虑轴向磁场影响的雪耙模型对轴向磁化后的等离子体进行了模型计算。针对经过预脉冲调控后的芯晕结构,内爆过程的雪耙模型运动方程为

$$m(t) \frac{d^2 r}{dt^2} - 2\pi r \rho(r) \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = - \frac{\mu_0 I^2(t)}{4\pi r} \quad (3)$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = - 2\pi r \rho(r) \frac{dr}{dt} \quad (4)$$

式中： $m(t)$ 表示 t 时刻的雪耙壳层质量； r 表示内爆半径； $\rho(r)$ 表示在半径 r 处的质量密度； $I(t)$ 表示随时间变化的电流强度。

在外加轴向磁场的情况下，初始内爆过程中，磁场可以扩散至等离子体内部，并随着脉冲电流的增加而逐步增强。在等离子体壳层形成及发展过程中，壳层的温度和密度逐渐升高，最终进入磁冻结状态，拾取轴向磁通并不断压缩轴向磁场。假设轴向磁场在厚度 w 的等离子体壳层内均匀分布，内部未雪耙部分的轴向磁场保持磁冻结开始时刻的磁场分布，但 w 只影响轴向磁场的分布，并不影响无限薄的角向磁场导电层中密度 ρ (体密度) 的堆积过程 m (面密度)。在运动方程中，可以引入轴向磁场的抑制项，用以描述轴向磁场对不稳定性发展的调控作用^[25-26]。运动方程为

$$m(t) \frac{d^2 r}{dt^2} - 2\pi r \rho(r) \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = - \frac{\mu_0 I^2(t)}{4\pi r} + \frac{\pi r}{\mu_0} \delta B_z^2 \quad (5)$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = - 2\pi r \rho(r) \frac{dr}{dt} \quad (6)$$

$$B_z(t) = \frac{H(t)}{r^2(t) - (r(t) - w)^2} \quad (7)$$

式中： $B_z(t)$ 是等离子体外壳中的轴向磁场，随时间变化； δB_z 为轴向磁场变化量； $H(t)$ 是等离子体外壳中 t 时的总轴向磁通量； $r(t)$ 是 t 时刻的等离子体半径，随时间和内爆半径变化； w 是等离子体外壳的厚度。MRT 不稳定性的振幅 ξ 可以表示为

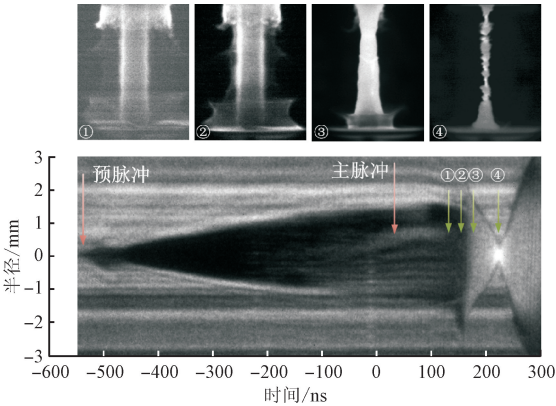
$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} = \Gamma^2(t) \xi \quad (8)$$

$$\Gamma^2 \approx Aak - k^2 w (B_z^2 + B_{z0}^2) / m\mu_0 \quad (9)$$

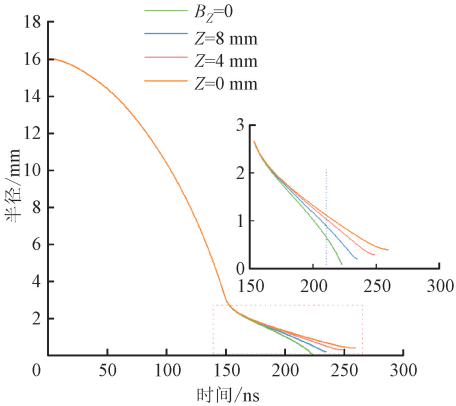
式中： A 为 Atwood 数； a 为界面加速度； k 为不稳定性波数； B_{z0} 为等离子体外壳所在位置的初始轴向磁场。在等离子体内爆过程中，可以通过此模型计算内爆边界和 MRT 不稳定性幅值的演化过程。通过将 Comsol 的轴向磁场计算结果代入雪耙模型中，得到轴向磁场幅值随时间动态变化，可以实现从磁化结构和等离子体内爆模型的耦合及对轴向磁场调控效果的研究。

以外加预脉冲的单丝 Z 箍缩等离子体为研究目标进行雪耙模型的计算。在无轴向磁场条件下，预脉冲调控银单丝内爆的图像如图 7(a) 所示。这里假定箍缩比为 10 的时候是滞止时刻，由于芯晕结

构中丝芯初始半径约为 2~3 mm，因此认为当壳层半径为 0.3 mm 时达到滞止时刻。在主脉冲施加以后，等离子体晕层快速内爆，约 150 ns 时晕层与丝芯发生碰撞，218 ns 时滞止。在实际计算中，等离子体的质量密度通过激光干涉诊断获得^[26]，模型具体计算结果如图 7(b) 所示。在无轴向磁场时的内爆曲线与条纹相机图像边界演化过程基本吻合，验证了雪耙模型在描述等离子体内爆动力学方面的准确性。



(a) 单丝内爆过程自发光图像及条纹相机图像



(b) 不同匝数结构雪耙内爆边界演化曲线对比

图 7 单丝内爆实验图像及轴向磁化雪耙模型计算结果
Fig. 7 Experimental image of the single wire implosion and calculation results of the axially magnetized snowplow model

在将旋转回流柱产生的轴向磁场代入计算后，不同匝数结构的雪耙内爆边界演化曲线显示出显著的调控效果。等离子体内爆速度减慢，滞止时间延长。在内爆的早期阶段，由于轴向磁场幅值较低，调控效果并不显著。然而，随着轴向磁场的逐渐累积和压缩，自 150 ns 起，对内爆的压缩作用产生了明显的抑制效果。同时，在不同匝数情况下，轴向磁场幅值的差异导致等离子体在同一时刻的内爆半径和滞止时间存在差异。例如，当匝数为 $N = 1.00$ 和

$N = 0.75$ 时,轴向磁场幅值分别比 $N = 1.25$ 的情况降低了 10% 和 30%。在 $t = 210\text{ ns}$ 时,相应的等离子体内爆半径分别降低了 5% 和 20%,滞止时间则分别提前了 15 ns 和 29 ns。

此外,不同磁化结构下,轴向磁场的压缩过程和不稳定性幅值受到显著影响。在壳层压缩轴向磁场之前,轴向磁场的幅值与匝数相关,并随电流上升而增加。压缩开始后,由于较大匝数结构在同一时刻的内爆边界更大,导致壳层扫过的总磁通略小,壳层内的轴向磁场幅值也略有降低。然而,由于匝数更大时角向磁场的幅值更小,驱动场比例 ($\varphi = B_z/B_\theta$) 随匝数增加而增大,因此对不稳定性幅值的抑制效果更为显著。如图 8(b) 所示,在轴向磁场为 0 时,早期磁瑞利-泰勒不稳定性幅值呈指数增长趋势。然而,从 140 ns 起,由于预脉冲调控形成的幂律次质量分布,不稳定性幅值的增长速率有所减缓,但随着内爆的进行,不稳定性仍继续发展。在施加轴向磁场后,不稳定性的增长被显著抑制。当匝数为 $N=1.25$ 时,不稳定性幅值的抑制率最高达到了 40%。

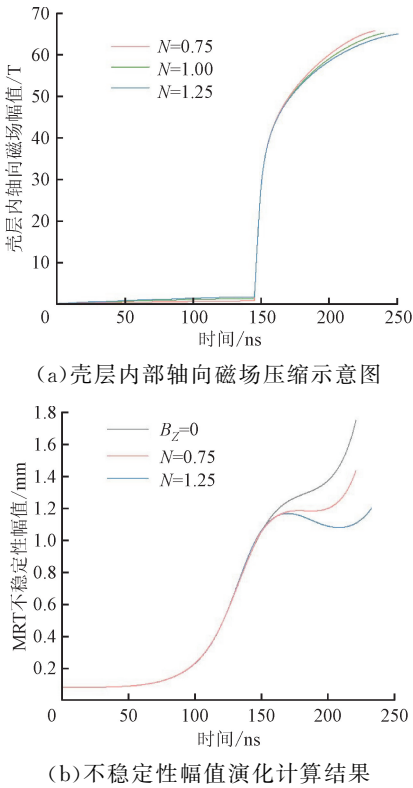


图 8 轴向磁场演化及不稳定性调控结果示意图
Fig. 8 Schematic diagram of axial magnetic field evolution and instability regulation results

3 轴向磁场强度及结构参数优化

根据旋转回流柱磁化模型的计算结果,结构电

感、轴向磁场分布及结构参数均会受到单位长度匝数和极板结构的显著影响。在磁化等离子体内爆过程中,轴向磁场经历扩散和压缩过程,其幅值逐渐增强,因此轴向磁场的轴向均匀性对调控效果具有重要影响。然而,当使用旋转回流柱产生轴向磁场时,高频磁场穿过底端和顶端极板时会在其内部产生涡流,导致反向磁场的出现,部分抵消了原始磁场^[27-28]。这种现象使得底部和顶部区域的轴向磁场幅值低于中心区域。为了评估磁场的轴向一致性,定义轴向磁场的轴向不均匀度 $U_a = (\max(B_z) - \min(B_z))/B_z$,式中 B_z 的径向位置为 $R = 3\text{ mm}$ 。经计算, $U_a = (7.25 - 2.26)/7.25 = 69\%$ 。 U_a 越低,说明轴向一致性越好。这种轴向磁场的轴向不一致会导致内爆速度在轴向上的不均匀,从而影响实际的调控效果。为了提升调控性能,需要以提升轴向磁场均匀度为目标对磁化结构进行优化。

为了解决这一问题,在旋转回流柱结构的阴极和阳极分别加装一个磁镜结构,从而增强顶部和底部轴向磁场,弥补磁场幅值的轴向差异。具体为将极板设计为径向螺旋导流结构,从而形成磁镜效应。这种结构能够在轴向上产生中间弱、两端强的磁场,与旋转回流柱产生的中间强、两端弱的磁场分布相互补充,实现整体轴向磁场分布的均匀化。匝数为 1 的旋转回流柱搭配磁镜的三维结构如图 9(b) 所示,一个圆弧起始位置为负载轴心,终点位置为外边界处。采用旋转角 θ (图 9(a)) 描述单一磁镜臂的螺旋程度,当 $\theta = 0$ 时,磁镜臂会产生直线的电流路径,当 $\theta \neq 0$ 时,电流路径为曲线,产生轴向磁场分量。磁镜由多条沿中心对称分布的螺旋臂构成:顶端螺旋臂 $\theta = 55^\circ$,匝数为 $n = 8$;底端螺旋臂 $\theta = 72^\circ$,匝数为 $n = 8$ 。由于顶部和底部螺旋臂的电流方向相反,为了使磁镜产生的轴向磁场方向与旋转回流柱一致,顶部的螺旋臂设计为从内向外顺时针排列,底部则为从内向外逆时针排列。根据上述设计,得到的轴向磁场分布如图 9(c) 所示。由于顶端螺旋臂具有较大的径向半径,磁化区域范围更广,因此在顶部区域的半径 10 mm 内维持了高强度且均匀的轴向磁场。与仅有回流柱的结构相比,螺旋臂的引入仅在负载顶端和底端的小半径区域增加了轴向磁场的幅值,对整体电感的影响较小,仅增加约 3.3 nH,占总电感的 8%。同时,轴向磁场中心区域的最大幅值从 7.2 T 提升至 9.8 T,轴向磁场的轴向不均匀度 U_a 从 69% 显著降低至 11%。

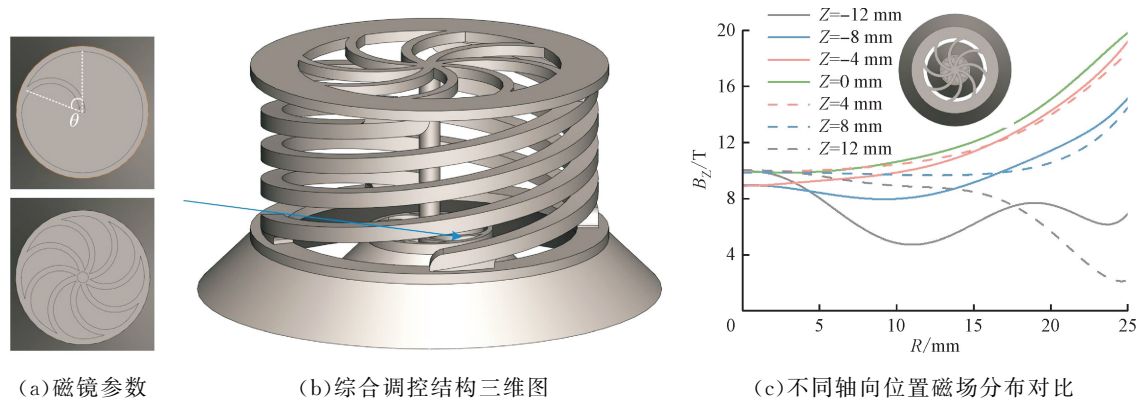


图 9 旋转回流柱耦合磁镜的结构示意图及轴向磁场计算结果

Fig. 9 Schematic structure of a rotating return post coupled with magnetic mirror and calculation results of axial magnetic field

在耦合磁镜后,轴向磁场由旋转回流柱和磁镜共同贡献。图 10(a)对比了 3 种情况下半径为 3 mm 的不同轴向位置处的轴向磁场分布。结果表明,单独磁镜和单独旋转回流柱结构的磁场叠加值均小于综合结构的磁场。这是因为磁镜的引入不仅贡献了额外的轴向磁场分量,而且其中空设计减少了涡流对轴向磁场扩散的影响,从而提升了整体磁场的强度和分布均匀性。在此基础上,通过雪耙模型计算

对比了不同磁化结构对等离子体调控效果的影响。以 $Z=0$ 位置的调控效果作为参照,分析 $Z=8$ mm 位置的内爆半径差异,结果如图 10(b) 所示。可以看出,在仅使用旋转回流柱的情况下,最大差异达 42%;而在耦合磁镜调控后,这一差异降低至 9%。由此可见,耦合磁镜的设计在提升磁场强度的同时,还能显著改善轴向磁场的均匀性及其对等离子体的调控效果。

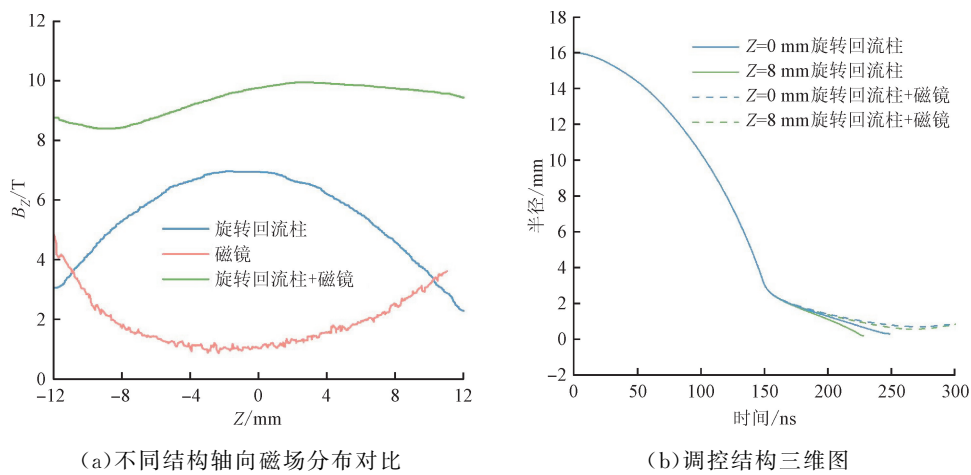


图 10 不同结构轴向磁场分布和调控效果对比

Fig. 10 Comparison of axial magnetic field distribution and regulation effect of different structures

在实际应用中,磁镜的参数设计也需要考虑对应旋转回流柱结构的参数,才能实现磁化轴向均匀度的优化。为了研究磁镜结构参数对轴向磁场的影响,采用多物理场模型分别分析了仅包含顶部和底部磁镜结构以及仅包含旋转回流柱结构的三维构型,重点研究不同磁镜结构对轴向磁场的增强效应,从而实现磁镜结构的量化分析与参数选择。如图 9 (c)所示,耦合磁镜结构后,顶部区域在 $Z=12$ mm

与 $Z=0$ 位置的磁场差异较大,因此,针对顶部磁镜,计算了 $Z=12$ mm 与 $Z=0$ 位置处不同半径下的轴向磁场幅值差,以探讨顶部磁镜对磁场的增强作用。同时,底部区域在 $Z=-8$ mm 与 $Z=0$ 位置的磁场差异也较为显著,因此,针对底部磁镜计算了 $Z=-8$ mm 与 $Z=0$ 位置处的轴向磁场幅值差。图 11(a)(b) 展示了不同螺旋度下端部磁镜结构的负载端部和中间位置的磁场差,结果表明,随着旋转

角 θ 的增加,轴向磁场差呈现增大趋势。

图 11(c)展示了不同匝数下旋转回流柱结构的负载端部和中间位置的磁场差。由于磁镜的引入导致顶部和底部金属导流面积的减小,因此轴向磁场幅值进一步提升。因此,计算过程中将旋转回流柱结构中的顶部和底部金属板替换为 $\theta=0$ 的磁镜臂。结果表明,轴向磁场幅值差也随回流柱匝数 N 的增大而显著增大。因此,针对不同的旋转回流柱匝数,

磁镜参数也需要进行对应的调节,从而使只有磁镜时的磁场差和只有旋转回流柱时磁场差互补,对应的参数匹配关系如表 2 所示。通过优化结构参数,可实现轴向磁场均匀性的最佳调控,并进一步提升磁场增强效果。但由于磁镜的旋转角存在上限,导致旋转回流柱匝数大于 1.25 时底部磁镜无法完全弥补轴向磁场差异,因此轴向一致性的调控效果略微降低,但仍大幅优于无磁镜时的磁化结构。

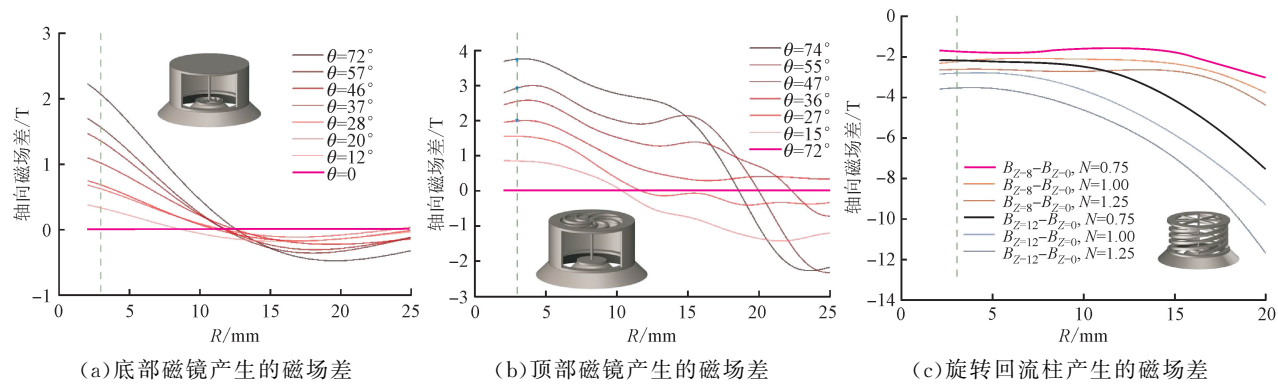


图 11 顶部、底部磁镜结构及旋转回流柱结构的轴向磁场分布

Fig. 11 Axial magnetic field distribution of top and bottom magnetic mirror structures and rotating return post

表 2 旋转回流柱及磁镜综合调控系统的参数优化

Table 2 Parameter optimization of the integrated regulation system of rotating return post and magnetic mirror

回流柱结构参数		磁镜结构参数		轴向磁场分布参数	
匝数	底部旋转角 $\theta_1/(^{\circ})$	顶部旋转角 $\theta_2/(^{\circ})$	匝数	轴向不均匀度 $U_a/\%$	中心位置幅值/T ($Z=0, r=3\text{ mm}$)
0.75	57	36	8	10	7.3
1.00	72	55	8	11	9.8
1.25	72	74	8	14	12.1

4 结 论

本文基于兆安级脉冲功率装置,通过建立旋转回流柱结构与脉冲源参数耦合的电-磁-力多物理场演化模型,系统研究了不同回流柱结构对初始轴向磁场幅值及负载电感等参数的影响。通过建立考虑外加轴向磁场的雪耙模型,研究了预脉冲调控下 Z 箍缩等离子体在旋转回流柱结构调控下的演化过程。针对旋转回流结构的轴向非均匀磁场分布,提出了旋转回流结构和磁镜耦合的综合磁化调控构型,实现了轴向磁场总体强度和轴向均匀度的提升,得到以下结论。

(1)单位电流对应轴向磁场的幅值会随回流柱匝数的提升而显著提升,但匝数的增加也会导致结构电感相应提升,导致电流上升速率降低,实际轴向

磁场幅值的增长逐渐放缓。在负载半径较小时,电感主要受回流柱匝数影响,而受负载半径影响较小。通过调整回流柱的匝数,可以实现轴向磁场幅与电感的优化匹配。

(2)轴向磁场会略微降低等离子体壳层的内爆速度,进而延长滞止时间。随着旋转回流柱匝数的增加,同一时刻轴向磁场幅值略有降低,但驱动场比例的提升显著增强了调控效果,使磁瑞利-泰勒不稳定性幅值最高降低 40%。

(3)耦合磁镜结构能够将轴向磁场的轴向不均匀度从 67%降低至 11%,并将轴向调控内爆不均匀度从最大 42%降低至 9%。在实际应用中,通过调整旋转回流柱的匝数及磁镜的旋转角大小,可以实现对轴向磁场的精细调控,从而进一步提升调控效果。

本文提出的旋转回流柱设计方法,为Z箍缩等离子体的动态轴向磁化结构优化奠定了理论基础。后续研究将通过实验验证确保其在实际应用中的可靠性和精确性,并进一步探索模型改进及应用拓展的方法。

参考文献:

- [1] KLIR D, SHISHLOV A V, KOKSHENEV V A, et al. K-shell radiation and neutron emission from Z-pinch plasmas generated by hybrid gas-puff implosions onto on-axis wires [J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28(6): 062708.
- [2] 龚振洲,魏浩,范思源,等. 大型Z箍缩装置中心汇流区电感计算 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(6): 1-8.
GONG Zhenzhou, WEI Hao, FAN Siyuan, et al. Inductance calculation of the central converging region of high current Z-pinch driver [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(6): 1-8.
- [3] 石琦,邱爱慈,王志国,等. 内置触发方式下单级FLTD触发脉冲参数及影响因素 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(6): 51-57.
SHI Qi, QIU Aici, WANG Zhiguo, et al. Characteristics and influencing factors of one-stage FLTD trigger pulse with internal trigger brick mode [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(6): 51-57.
- [4] MENG Shijian, HU Qingyuan, NING Jiaming, et al. Measurement of axial radiation properties in Z-pinch dynamic hohlraum at Julong-1 [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(1): 014505.
- [5] 宁成,丰志兴,薛创. Z箍缩驱动动态黑腔中的基本能量转移特征 [J]. *物理学报*, 2014, 63(12): 125208.
NING Cheng, FENG Zhixing, XUE Chuang. Basic characteristics of kinetic energy transfer in the dynamic hohlraums of Z-pinch [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(12): 125208.
- [6] 肖德龙,戴自换,孙顺凯,等. Z箍缩动态黑腔驱动靶丸内爆动力学 [J]. *物理学报*, 2018, 67(2): 025203.
XIAO Delong, DAI Zihuan, SUN Shunkai, et al. Numerical studies on dynamics of Z-pinch dynamic hohlraum driven target implosion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2): 025203.
- [7] ZHANG Daoyuan, WU Jian, CHEN Ziwei, et al. Ablated precursor plasma and evolution of magnetic field of exploding cylindrical thin liner [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2021, 63(3): 035029.
- [8] WOOLSTRUM J M, SEYLER C E, MCBRIDE R D. Hall instability driven seeding of helical magneto-Rayleigh-Taylor instabilities in axially premagnetized thin-foil liner Z-pinch implosions [J]. *Physics of Plasmas*, 2022, 29(12): 122701.
- [9] RUIZ D E, YAGER-ELORRIAGA D A, PETERSON K J, et al. Harmonic generation and inverse cascade in the Z-pinch driven, preseeded multimode, magneto-Rayleigh-Taylor instability [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(25): 255001.
- [10] 刘永棠,盛亮,李阳,等. 周期调制结构平面薄膜电爆炸实验研究 [J]. *物理学报*, 2021, 70(6): 065203.
LIU Yongtang, SHENG Liang, LI Yang, et al. Explosion of thin flat foils with periodical modified structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(6): 065203.
- [11] RAHMAN H U, RUSKOV E, NEY P, et al. Ar and Kr on deuterium gas-puff staged Z-pinch implosions on a 1-MA driver: experiment and simulation [J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(5): 052706.
- [12] CVEJIĆ M, MIKITCHUK D, KROUPP E, et al. Self-generated plasma rotation in a Z-pinch implosion with preembedded axial magnetic field [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(1): 015001.
- [13] SOLYAKOV D G, VOLKOVA Y Y, LADYGINA M S, et al. Distributions of magnetic field and current in pinching plasma flows: effect of axial magnetic field [J]. *The European Physical Journal Plus*, 2021, 136(5): 566.
- [14] MARON Y, DORON R, CVEJIĆ M, et al. Spectroscopic determination of magnetic fields in pulsed-power and high-energy-density plasmas [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2023, 51(11): 3407-3425.
- [15] MIKITCHUK D, CVEJIĆ M, DORON R, et al. Effects of a preembedded axial magnetic field on the current distribution in a Z-pinch implosion [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(4): 045001.
- [16] ROUSSIKH A G, ZHIGALIN A S, ORESHKIN V I, et al. Magnetic field effect on the initial parameters of an imploding Z-pinch [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(11): 3849-3854.
- [17] AYBAR N, DOZIERES M, REISMAN D B, et al. Azimuthal magnetic field distribution in gas-puff Z-pinch implosions with and without external magnetic stabilization [J]. *Physical Review E*, 2021, 103(5): 053205.
- [18] ROVANG D C, LAMPPA D C, CUNEO M E, et al. Pulsed-coil magnet systems for applying uniform 10-30 T fields to centimeter-scale targets on Sandia's Z facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(12): 124701.
- [19] ROUSSIKH A G, ZHIGALIN A S, ORESHKIN V I, et al. Measuring the compression velocity of a Z

pinch in an axial magnetic field [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(6): 063519.

[20] SLUTZ S A, JENNINGS C A, AWE T J, et al. Auto-magnetizing liners for magnetized inertial fusion [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(1): 012704.

[21] CAMPBELL P C, JONES T M, WOOLSTRUM J M, et al. Stabilization of liner implosions via a dynamic screw pinch [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(3): 035001.

[22] SHIPLEY G A, JENNINGS C A, SCHMIT P F. Design of dynamic screw pinch experiments for magnetized liner inertial fusion [J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(10): 102702.

[23] GOURDAIN P A, ADAMS M B, DAVIES J R, et al. Axial magnetic field injection in magnetized liner inertial fusion [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(10): 102712.

[24] 邱爱慈, 吴坚, 孙凤举, 等. Z 箍缩动力学行为及其直接驱动型脉冲源研究进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(17): 7007-7023.

QIU Aici, WU Jian, SUN Fengju, et al. Research progress on Z-pinch dynamics and its direct-driven pulsed power technology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(17): 7007-7023.

[25] LAVINE E S, ROCCO S V, BANASEK J T, et al. Implosion dynamics of triple-nozzle gas-puff z pinches on COBRA [J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28(2): 022703.

[26] JIANG Zhiyuan, WU Jian, WANG Wei, et al. Effect of a dynamic axial magnetic field on a preconditioned single-wire Z-pinch [J]. *Nuclear Fusion*, 2023, 63(10): 106014.

[27] ATOYAN L, HAMMER D A, KUSSE B R, et al. Helical plasma striations in liners in the presence of an external axial magnetic field [J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(2): 022708.

[28] SOROKIN S A. Gas-puff liner implosion in the configuration with helical current return rods [J]. *Plasma Physics Reports*, 2013, 39(2): 139-143.

(编辑 亢列梅)