第 30 卷第 2 期
2018 年 2 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 30, No. 2
Feb., 2018

完全稳定化 MRT 的可能性及应用于聚变的潜力*

段书超[1,2]， 谢卫平[1]， 王刚华[1]

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所，四川 绵阳 621999； 2. 中国科学技术大学 近代物理系，合肥 230026)

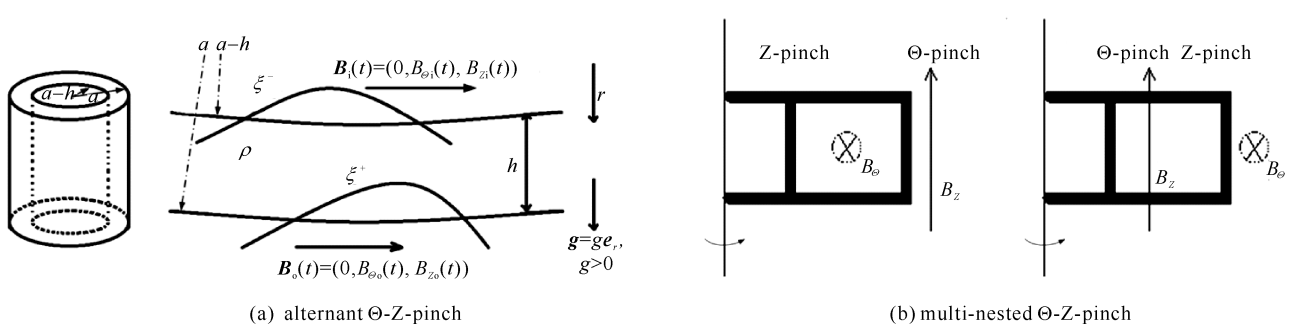
摘 要： 提出采用方向时变(旋转)的驱动磁场(交替 Θ-Z 箍缩构型)或者多级嵌套 Θ-Z 箍缩构型来抑制动态 Z 箍缩的 MRT 不稳定性的概念，介绍了对交替/嵌套 Θ-Z 箍缩 MRT 不稳定性的最新研究进展，结果表明适当优化的交替/嵌套 Θ-Z 箍缩的 MRT 不稳定性明显远低于标准 Θ 箍缩或者 Z 箍缩的，一定厚度时甚至被完全致稳，这表明交替/嵌套 Θ-Z 箍缩构型具有潜力应用于 Θ-Z 箍缩套筒惯性聚变。

关键词： 磁-瑞利-泰勒不稳定性； 动态 Z 箍缩； 磁场方向旋转； Θ-Z 箍缩套筒惯性聚变； 交替/嵌套 Θ-Z 箍缩； 惯性约束聚变； 磁惯性约束聚变

中图分类号： TL6； O534 **文献标志码：** A **doi:** 10.11884/HPLPB201830.170454

早期的聚变研究中的平衡 Z 箍缩，由于不可避免地要出现交换/准交换模不稳定性，难以成为一种可能的磁约束聚变系统。避免这种不稳定性的唯一途径是放弃柱形几何构型，这导致多年来聚变界对 Z 箍缩失去兴趣，而转向了托卡马克位形。近代随着脉冲功率技术的发展和动态 Z 箍缩的出现，聚变界对 Z 箍缩重新焕发了兴趣[1-2]。在动态 Z 箍缩系统中，等离子体在磁压的驱动下内爆，不可避免地要出现磁-瑞利-泰勒(MRT)不稳定性。MRT 不稳定模式与其他不稳定模式一起发展，但它的增长率要快得多，它是破坏箍缩对称性的最危险的不稳定性，因此研究 MRT 不稳定性对于动态 Z 箍缩的任何应用而言都是十分关键的。2014 年我们提出采用方向时变(旋转)的驱动磁场来抑制动态 Z 箍缩的 MRT 不稳定性的概念[3]，旋转驱动磁场等效于存在 Θ 和 Z 两个磁场分量并且它们此消彼长，因此称为交替 Θ-Z 箍缩构型。2016 年我们又提出采用多级嵌套 Θ-Z 箍缩构型来抑制动态 Z 箍缩的 MRT 不稳定性的概念[4]，基于对交替、嵌套两种构型的 MRT 不稳定性的初步研究结果，我们同时又提出交替/嵌套 Θ-Z 箍缩构型具有应用于 Θ-Z 箍缩套筒惯性聚变(Theta-Z-LIF)[4-8]的潜力。本文简要介绍我们对交替/嵌套 Θ-Z 箍缩 MRT 不稳定性的最新研究进展，文中结果通过半解析方法得出。

图 1 为交替/嵌套 Θ-Z 箍缩的示意图。对于交替 Θ-Z 箍缩，我们聚焦于只讨论对应于固定总电流驱动下最优轨迹的主导模式末态时的最大增长 e 倍数。图 2(a)给出的是交替分解情况下经过初步优化的交替 Θ-Z 箍缩的主导模式末态时的最大 e 倍数，图 2(b)给出的是固定分解情况下的结果，它们都明显远低于标准 Θ 箍缩或 Z 箍缩的，一定厚度(h)时甚至被完全致稳。



(a) alternant Θ-Z-pinch (b) multi-nested Θ-Z-pinch

Fig. 1 Schematic for alternant/nested Θ-Z-pinches

图 1 交替/嵌套 Θ-Z 箍缩示意图

对于嵌套 Θ-Z 箍缩，我们分析了两种嵌套构型在不同的初始内部磁场情况下的某个模式的 e 倍数的演化过程。图 3(a)是初级为 Z 箍缩的嵌套 Θ-Z 构型的($m=0$，$k=30$)模式的 e 倍数的演化过程，不同颜色对应于不同的初始内部磁场，红线对应于纯 Z 箍缩，图 3(b)是初级为 Θ 箍缩的嵌套 Θ-Z 构型的($k=0$，$m=30$)模式的 e

* **收稿日期：** 2017-11-10； **修订日期：** 2017-12-04
基金项目： 国家自然科学基金项目(11405167)
作者简介： 段书超(1980—)，男，主要从事等离子体物理数值模拟与磁流体力学程序开发；s.duan@163.com。

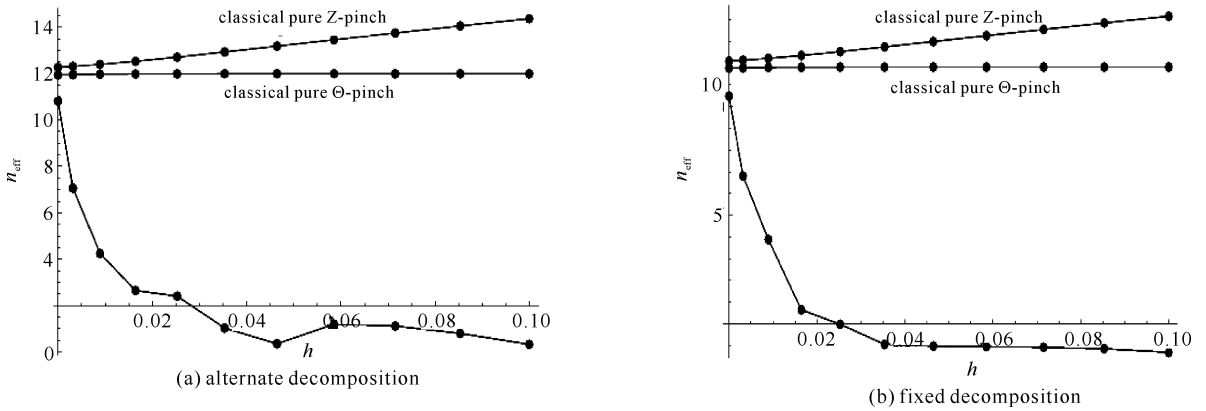


Fig. 2 Optimized maximum e-folding numbers at stagnation for dominant mode in two cases of drivings when $h\in[10^{-7}, 0.1]$

图 2 两种电流分解情况下经过初步优化的交替 Θ-Z 箍缩的主导模式末态时的最大 e 倍数

倍数的演化过程,红线对应于纯 Θ 箍缩。这些结果显示不管哪种嵌套 Θ-Z 箍缩都明显存在一个优化点,对于给定的压缩比($1/a$),优化的嵌套 Θ-Z 箍缩的 MRT 不稳定性的增长明显远低于标准 Θ 箍缩或 Z 箍缩的。由于交替/嵌套 Θ-Z 箍缩的 MRT 不稳定性经过优化能够得到前所未有的抑制,这两种构型均具有潜力应用于 Θ-Z 箍缩套筒惯性聚变(Θ-Z-LIF)。

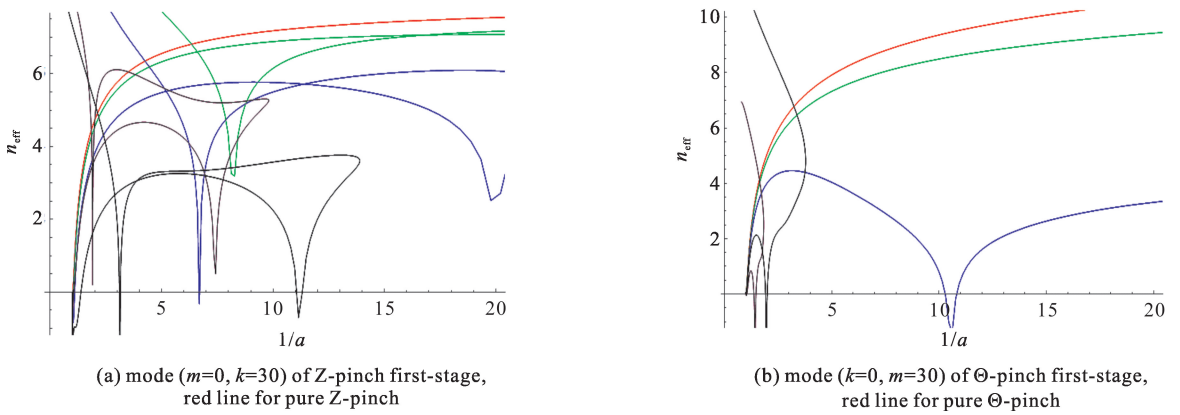


Fig. 3 E-folding numbers' evolving with different initial internal magnetic fields for two kinds of nested Θ-Z-pinches

图 3 两种嵌套 Θ-Z 箍缩在不同的初始内部磁场情况下的某个模式的 e 倍数的演化过程

参考文献:

[1] Ryutov D D, Derzon M S, Matzen M K. The physics of fast Z-pinches[J]. *Rev Mod Phys*, 2000, **72**:167.

[2] Slutz S A, Vesey R A. High-gain magnetized inertial fusion[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, **108**:**025003**.

[3] 段书超. 动态 Z 箍缩中的磁-瑞利-泰勒不稳定性研究[R]. 国家自然科学基金委, 2014. (Duan Shuchao. A research on magneto-Rayleigh-Taylor instability in dynamic Z-pinches. National Natural Science Foundation of China, 2014)

[4] 段书超. 多级嵌套 Θ-Z 箍缩套筒的 MRT 不稳定性[C]//第九届全国流体力学会议. 2016. (Duan Shuchao. Magneto-Rayleigh-Taylor instability of the multi-nested theta-Z-pinch liners//Proc of 9th Chinese Fluid Mechanics Conference. 2016)

[5] Duan Shuchao. Magneto-Rayleigh-Taylor instability driven by a rotating magnetic field[DB/OL]. eprint arXiv:1704.01241.

[6] Duan Shuchao. Magneto-Rayleigh-Taylor instability driven by a rotating magnetic field[C]//Proc 2nd International Conference on Matter and Radiation at Extremes. 2017.

[7] 段书超,李定,谢卫平. 磁场方向时变对 MRT 不稳定性的抑制作用[C]//第十八届全国等离子体科学技术会议. 2017. (Duan Shuchao, Li Ding, Xie Weiping. The suppressing effect of the directional time-varying of magnetic field on magneto-Rayleigh-Taylor instability//Proc of 18th National Conference on Plasma Science and Technology. 2017)

[8] 段书超,谢卫平,李定. 交替/嵌套 Θ-Z 箍缩套筒惯性聚变概念[C]//第五届全国脉冲功率会议. 2017. (Duan Shuchao, Xie Weiping, Li Ding. The concept of alternant/nested theta-Z-pinch Liner Inertial Fusion (Theta-Z-LIF)//Proc of 5th Chinese Pulsed Power Conference. 2017)

Possibility of complete stabilization of magneto-Rayleigh-Taylor instabilities and potential for fusion

Duan Shuchao[1,2]， Xie Weiping[1]， Wang Ganghua[1]

(1. *Institute of Fluid Physics*, *CAEP*, *P. O. Box* 919-105, *Mianyang* 621999, *China*;

2. *Department of Modern Physics*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026, *China*)

Abstract: The idea of using a directional time-varying(rotating) driving magnetic field (the alternant theta-Z-pinch configuration) or the multi-nested theta-Z-pinch configuration to suppress magneto-Rayleigh-Taylor instabilities in a dynamic Z-pinch was proposed between 2014 and 2016. This paper reports the latest research progress on magneto-Rayleigh-Taylor instabilities in alternant/nested theta-Z-pinches. The magneto-Rayleigh-Taylor instability growth of a properly optimized alternant/nested theta-Z-pinch is significantly lower than that of a pure theta-pinch or Z-pinch. The instability is completely stabilized at a certain thickness of the liner. These show the bright potential of alternant/nested theta-Z-pinch for theta-Z-pinch liner inertial fusion.

Key words: magneto-Rayleigh-Taylor instability; dynamic Z-pinch; rotating magnetic field; theta-Z liner inertial fusion; alternant/nested theta-Z-pinch; inertial confinement fusion; magneto-inertial fusion

PACS: 52.35.Py; 52.57.Fg; 52.58.Lq; 52.59.Dk; 52.58.-c