

高密度Z箍缩等离子体物理学

Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas

■ M.A.Liberman

■ J.S.De Groot

■ A.Toor

■ R.B.Spielman

■ 孙承纬 译 胡熙静 校

国防工业出版社

高密度 Z 箍缩等离子体物理学

Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas

M. A. Liberman, J. S. De Groot,
A. Toor, R. B. Spielman 著

孙承纬 译
胡熙静 校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2001-022 号

图书在版编目(CIP)数据

高密度 Z 箍缩等离子体物理学/(俄罗斯)利伯曼等
著;孙承纬译.—北京:国防工业出版社,2003.1

ISBN 7-118-02944-0

I.高... II.①阿... ②孙... III.受控聚变—等离
子体物理学 IV.TL61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 068982 号

Translation from the English language edition:

Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas by Michael A. Liberman, John S. De
Groot, Arthur Toor and Rick B. Spielman

Copyright© 1999 Springer-Verlag New York, Inc.

Springer-Verlag is a company in the BertelsmannSpringer publishing group All
Rights Reserved

本书中文版由 Springer 出版社授予国防工业出版社独家出版发行。版
权所有,侵权必究。

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 $\frac{1}{8}$ 258 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

译者序

Z 箍缩是依靠轴向电流产生的电磁力使自身箍缩或向轴线内聚运动的柱对称等离子体构形。气体中轴向放电形式的平衡 Z 箍缩的研究始于 20 世纪 50 年代,是核聚变实验研究的一种探索。这种等离子体密度较低,其稳定性保持时间(阿尔芬波经过箍缩直径的渡越时间)很短,离开聚变点火劳逊判据的要求甚远。随着脉冲功率技术的发展,沿着这个方向人们于 20 世纪 80 年代进行了 250kA ~ 640kA、100ns 条件下单丝(主要是冻氙丝)放电形式的高密度 Z 箍缩的实验研究,得到了比较稠密的等离子体,并发现在一定电流限度之下,电流脉冲上升期间内等离子体保持稳定的时间比阿尔芬渡越时间高出几十至上百倍。目前对此现象的原因尚未完全明了。

稠密等离子体焦点(DPF)装置是一种高产额的脉冲中子发生器,依靠电流鞘向轴线会聚时驱动的内爆冲击波使氙气加速和加热,在最后压缩阶段以类似于通常柱形 Z 箍缩的方式,碰撞滞止形成剧烈发射电子束的稠密等离子体。

Z 箍缩研究及应用的主要构形和方向是 20 世纪 70 年代提出的电磁驱动套筒内爆,主要包括以气流、金属丝阵或箔筒为初始介质的等离子体套筒和金属(单质或复合)固体套筒两大类。依靠电磁力内聚驱动, $10^2\text{mg} \sim 10^{-1}\text{mg}$ 级质量的等离子体套筒可达到数百千米/秒至数千千米/秒的速度, $10^2\text{g} \sim 10^0\text{g}$ 级的固体套筒可达到几千米/秒至十几千米/秒的速度,而且内爆过程中其表面不发生气化,保持接近于固体的密度。高速内爆套筒在轴线附近的坍塌、滞止,造成的高能量密度状态约为 $10^0\text{MJ}/\text{cm}^3 \sim 10^1\text{MJ}/\text{cm}^3$ 。滞止等离子体中离子动能向热化状态转变,并产生 K 壳层甚至

L、M 壳层电子的复合辐射。通常这是光子能量为 $1\text{keV} \sim 3\text{keV}$ 的线谱 X 射线, 可用来模拟高空核爆炸的辐射效应, 也可用于材料改性、光刻等工业技术。为此, 美、俄两国在七八十年代发展了一系列以二极管和气体 Z 箍缩为基础的模拟辐射源设施。

如果滞止等离子体的密度足够高, 可把 K 壳层电子复合的线谱辐射基本吸收, 则将形成一个高能量密度的连续谱黑体辐射源。固体套筒高速压缩其内部的气体也可达到很高的温度, 形成高温黑腔。最近十年来, Z 箍缩研究的主要方向就是这类软 X 射线黑体辐射源和高能量密度物理实验设施, 不但可用于模拟核爆 X 射线对结构物的损伤效应, 更是全面核禁试后核武器物理实验室模拟研究的重要手段, 例如美国洛斯阿拉莫斯国家实验室提出的地面实验(AGEX)计划。

与炸药爆轰驱动和激光烧蚀驱动方式比较, 电磁驱动内爆的显著优点是: 随着套筒半径的减小, 恒定电流下电磁驱动力越来越大; 套筒速度不受驱动介质声速的限制, 可达到很高的动能范围; 内爆的柱对称性易于保证, 抗高阶扰动模式的稳定性较好。电磁驱动的内爆靶的尺度、质量以及可达到的压力、温度和能量密度的量级, 都处于炸药爆轰和激光烧蚀内爆方式之间, 这三种手段彼此相辅相成, 形成较为全面的核武器物理实验室模拟体系。其中, 以 ATLAS 装置为驱动器的固体套筒内爆, 可达到每秒十几千米的速度和几百万兆帕量级的压力, 可实验模拟核武器初级的内爆动力学问题。在高达数十兆安电流驱动下, 这种套筒内部受压缩的氙氟气体也有可能达到聚变点火的条件。以 Z 装置为驱动器的(金属丝阵)等离子体套筒内爆, 其黑体温度已接近 200eV , 软 X 射线辐射总功率达到 290TW , 已用于辐射流体动力学实验, 并可在较小的黑腔内产生温度较低的底部辐射场, 用来校核激光惯性约束聚变的计算编码。

由于磁场在介质中的传播是由扩散方程控制的, 依靠磁场压缩介质的过程是等熵的, 利用磁压驱动宏观飞片可达到很高速度并能保持其完整性。上述两个装置的有关实验表明, 这种优点独

特的实验技术标志着动高压技术发展的新阶段,提供了实验研究极高压下特殊材料冲击压缩性质的崭新手段。

随着 Z 箍缩实验负载和应用需求的变更,脉冲功率驱动器的技术也在不断发展创新。与早期二极管为负载的电子加速器技术相适应的是,阻抗高、质量轻、内爆半径小、成分可变的气流套筒(puff)负载,构成硬 X 射线辐照效应实验的主要手段。为了满足软 X 射线对结构加载(热激波)试验,特别是核武器物理分解模拟实验(辐射流体力学、内爆动力学)以及非 Z 箍缩原理的高能密度动力学实验(等熵压缩、高速飞片等超高压加载手段)的需要,几十年来脉冲功率驱动器一直在朝低阻抗传输、多线低电感汇流、大电流输出、电流上升沿与负载动力学相匹配的方向发展,形成了两个主要类别:

(1) 快驱动器—电流上升沿为数十至上百纳秒,负载为轻质量的等离子体套筒,为了与内爆时间匹配,必须缩短电流上升沿,使用电容储能的水介质脉冲形成线;为了增大储能量,提高输出电流并降低阻抗,必须用数条至数十条传输线高精度同步汇流供电,并正在发展高储能的脉冲形成新技术。此类装置的典型代表是美国圣地亚实验室的 Z 装置。

(2) 慢驱动器—电流上升沿为若干微秒,负载为质量较大的金属固体套筒。为了尽可能降低驱动器的阻抗,要用 Marx 发生器与电感储能的传输线直接耦合,并作多线汇流。使用断路开关或直线变压器等新技术,还可把负载电流的上升沿压缩到数百纳秒量级。此类装置的典型代表是美国洛斯阿拉莫斯实验室的 ATLAS 装置。

由于大质量、大半径的多层密集金属丝阵构形或较厚的金属固体套筒构形可以有效地抑制瑞利-泰勒不稳定性的增长,并由于具有重要应用前景的非 Z 箍缩方式电磁驱动(高速飞片和动高压技术、反场构形磁化靶聚变研究等)的需求,今后脉冲功率驱动器技术研究的目标是:通过上述两类低阻抗套筒负载的电流上升沿为 300ns 左右、峰值大于 40MA ~ 50MA、输出阻抗为 0.01Ω ~

0.1 Ω 。快、慢两种类型的驱动器正朝着取长补短、异途同归的技术途径发展。

一般说来,高密度 Z 箍缩等离子体的物理学应包括等离子体的形成和初始状态,内爆流体动力学,平衡箍缩、动力箍缩及内爆运动的稳定性,滞止等离子体的热化、辐射产生及输运过程等内容。第一个问题通常属于气体电离、绝缘介质电击穿及金属导体电爆炸等专著讨论范围,最后面的问题属于高温辐射物理和辐射流体动力学的范围,因为此过程只是 Z 箍缩过程短促的结尾,也可以分开来单独处理。所以本书的主要内容是脉冲功率驱动的高能密度动力学部分,即 Z 箍缩平衡等离子体或内爆等离子体的动力学和稳定性问题。由于内爆等离子体的密度高、温度低,惯性力和磁场的影响是主要的,适合用流体模型处理。本书的首尾两章分别介绍了脉冲功率驱动器概况和 Z 箍缩技术可能的应用。

鉴于本书篇幅及宗旨的限制, Z 箍缩方式电磁驱动内爆动力学的一些重要内容尚未能包括。例如:不同负载构形机理的探讨,回流罩内磁能的充分利用和功率流的调节问题,固体套筒内爆的动力屈曲和稳定性,电磁驱动的球对称内爆技术,反场构形(FRC)磁化靶的 Z 箍缩内爆等等。

达到高能量密度的主要方法是套筒或球壳内爆,影响套筒内爆质量(对称均匀地汇聚于很小的体积之内,达到高温、高密度状态)的主要障碍,是内爆过程中套筒或等离子体的流体动力学瑞利-泰勒(RT)不稳定性。因此本书的重点在于第五六章,这也是本书与以往出版的有关等离子体物理专著的主要不同之处。本书比较系统地论述了高密度 Z 箍缩动力学及稳定性问题,特别是总结了 20 世纪八九十年代以来的理论和实验研究工作,提供了这个学科领域的第一种专著。本书第一作者 M. A. Liberman 博士是俄罗斯科学院物理问题研究所和瑞典 Uppsala 大学物理系教授,是长期从事等离子体动力学和高密度 Z 箍缩理论研究的著名学者。另外三位作者也都是该领域的资深专家,其中 R. B. Spielman 在美国圣地亚实验室完成了一系列重要的 Z 箍缩金属丝阵内爆实验,

对提高 Z 装置软 X 射线辐射水平做出很大贡献。

阅读本书需要具备磁流体动力学和流体动力学不稳定性理论的基础知识,如果对等离子体动力学和脉冲功率技术有所了解,则对学习本书更有裨益。美国圣地亚实验室 Z 装置产生高额软 X 射线实验的进展,引起了多方面人士的重视。为了真正理解这种物理现象,恰当估计这项技术的关键和前景,培养从事高能密度动力学领域的研究人才,认真钻研本书是十分必要的。

本书的翻译出版将有助于国内从事 Z 箍缩等离子体物理、特别是电磁内爆等离子体研究的人员,较快地掌握这个重要技术科学领域的理论基础,理解有关工作进展的前沿、难点和潜在境界。本书也可作为磁流体力学、高能密度动力学和等离子体物理等专业研究生教育或进修的参考书。

本书英文版中存在的一些印刷错误,已由译者负责勘正。中国工程物理研究院流体物理研究所的胡熙静研究员认真校对了本书译稿。陶洁贞、陈林、文尚刚、李晓兰和赵剑衡等承担了书稿的打字和图形修改工作。国防工业出版社大力支持了本译著的出版。译者谨向他们表示由衷的谢意。

高密度 Z 箍缩和电磁内爆等离子体研究是一个涉及流体力学、等离子体物理和脉冲功率技术的交叉学科,译者知识范围有限,书中错误和不当之处在所难免,希望读者和有识之士指正。

译者 孙承伟

于中国工程物理研究院流体物理研究所

序 言

这是贡献给高密度 Z 箍缩的第一种教科书。我们的目的是为这个领域正在开展的研究提供实验推动和理论基础。许多问题与惯性约束聚变中遇到的相似,书中大部分分析普遍适用于一般的动态等离子体,包括激光和粒子束聚变所涉及的等离子体。同时,我们并不企图编写关于一般等离子体理论的另一种教材,因为早就有了关于这个题目很好的英、俄文导论性专著(见 Krall 和 Trivelpiece 1973;Chen 1984 和 Golant 等 1977)。

近年来,动力快速 Z 箍缩和内爆等离子体套筒的研究取得了很大进展。这些由几百万安培、100ns 驱动器给出的令人印象深刻的进步,为 Z 箍缩物理学领域注入了活力。1997 年 Sandia 国家实验室的研究者在 Z 机器上以 20MA 进行了轰动性的实验,钨丝阵列 Z 箍缩得到的 X 射线总功率超过了 200TW, X 射线能量为 1.8MJ。许多年来,快速 Z 箍缩内爆研究的重点是输出功率的优化,为印刷术、X 射线显微镜、核武器效应模拟、X 射线激光器等提供一种 1keV ~ 5keV 范围中的 X 射线源。新的 Z 箍缩实验能力确实拓广了 Z 箍缩的应用。这种应用的大多数依赖于与等离子体加速相关的不稳定性在多大程度上可得到控制。磁流体瑞利-泰勒不稳定性和柱形负载的对称性,是确定所能得到的等离子体聚集水平的关键性制约因素。因此本书主要致力于 Z 箍缩等离子体的动力学及其在内爆中的稳定性,冻结外部磁场等一些技术能非常有效地使动力 Z 箍缩稳定化。此外, Z 箍缩内爆中产生的超强磁场也有不少有意的应用。

虽然“高密度 Z 箍缩等离子体物理学”主要是理论性的,我们也讨论主要类型 Z 箍缩装置的运行原理,讨论近年来在 Sandia 国

家实验室 Saturn 和其他加速器上进行的实验及有关的结果。所有数学表达式都以便于实用的封闭解析形式给出。本书的内容对于整个脉冲功率研究群体都是有用的,包括理论家、实验家、工程师和学生。

在本书准备过程中,我们从与同事们的讨论中获益良多,在此谨向他们表示感谢,特别是 R. Baksht、A. Bud'ko、M. K. Matzen、J. Hammer、S. Golberg 和 A. I. Kleev 等博士,他们对我们的编写工作提供了有益的意见。我们感谢 H. Herold 教授和 N. V. Filippov 博士密切的合作,他们使原始形式的等离子体焦点装置得到了发展。

本书编写由来已久。一开始在 1989 年—1990 年, M. Liberman 和 A. Velikovich 打算写一本关于 Z 箍缩和等离子体套筒动力学及稳定性的书。后来 N. Rostoker 加入了这个工作,但很遗憾这个计划没有完成。然而在本书准备过程中,作者从 M. Liberman、A. Velikovich 和 N. Rostoker 1991 年—1992 年的第一部手稿中得到许多帮助,应当感谢 A. Velikovich 和 N. Rostoker 对第一部手稿所做的贡献。我们还要感谢 1992 年 N. Pereira 对第一部手稿所提出的意见。

在此我们向许多提供帮助、提出批评意见和进行有益讨论的同事们致谢。R. Baksht、A. Bud'ko、B. Kadomtsev、K. Matzen、J. Hammer、L. Jacquet、P. Arnault、S. Golberg、A. Kleev 和 C. Hartman 在本书编写中提出了有益的意见, H. Herold 教授和 N. V. Filippov 博士给予了密切的合作,使原始形式的等离子体焦点装置得到了发展,我们谨向他们表示深切的谢意。

Michael A. Liberman

John S. De Groot

Arthur Toor

Rick B. Spielman

目 录

第一章 绪论	1
1.1 历史展望	3
1.2 近代 Z 箍缩系统的特点	5
1.3 Z 箍缩的各种类型	7
1.3.1 动力 Z 箍缩	8
1.3.2 平衡 Z 箍缩	18
1.3.3 稠密等离子体焦点	21
1.3.4 等离子体电弧	23
1.4 脉冲功率驱动器	24
1.4.1 初级储能装置	25
1.4.2 慢脉冲功率驱动器(微秒量级)	25
1.4.3 快脉冲功率系统(10ns ~ 100ns 量级)	26
1.4.4 电开关	31
1.4.5 磁绝缘真空传输线(MITL)	32
第二章 Z 箍缩等离子体的平衡	33
2.1 Z 箍缩等离子体的定态平衡	33
2.1.1 Z 箍缩的 MHD 平衡——Bennett 平衡	33
2.1.2 非各向同性 Z 箍缩的平衡	37
2.2 辐射 Z 箍缩的平衡	38
2.2.1 Pease - Braginskii 平衡	38
2.2.2 辐射损失与辐射坍塌	40
2.3 亮斑	45
第三章 Z 箍缩等离子体的动力学	48
3.1 Z 箍缩等离子体形成的理论模拟	48

3.2 动力 Z 箍缩的零维模型	49
3.2.1 薄壳模型	49
3.2.2 雪耙模型	55
3.2.3 辐射 Z 箍缩与时间有关的平衡	60
3.2.4 辐射坍塌	62
3.3 Z 箍缩等离子体的流体模型	65
3.3.1 单流体 MHD 模型	65
3.3.2 理想单流体 MHD 模型	67
3.4 理想磁流体力学 Z 箍缩的自相似动力学	72
3.4.1 自相似性分析的基本方程组	73
3.4.2 均匀变形假定下的自相似解	77
3.4.3 存在能量损失时的自相似解	80
3.4.4 第二类自相似解	82
3.5 与时间有关的 Z 箍缩平衡的自相似解	87
3.5.1 自相似亚声速耗散流动	87
3.5.2 非磁化等离子体的自相似解	90
3.5.3 完全磁化等离子体的自相似解	94
3.5.4 耗散螺旋箍缩问题	97
3.5.5 自相似解描述的亚声速 Z 箍缩流动 的渐近状态	101
3.5.6 Z 箍缩流动的二维数值模拟	106
第四章 Z 箍缩等离子体的稳定性	109
4.1 定态 Z 箍缩的稳定性	112
4.1.1 理想 MHD 稳定性理论——线性化方程组	112
4.1.2 理想 MHD 稳定性理论——能量原理	115
4.1.3 理想 MHD 不稳定性——不稳定性 的本征模式	120
4.1.4 理想 MHD 不稳定性——增长率的谱	124
4.2 欧姆加热和辐射损失的影响——过热不稳定性 和成丝现象	131

4.3	电阻和粘性对 Z 箍缩稳定性的影响——热导率	135
4.4	有限的和很大的离子拉摩半径的影响——Hall 效应	140
4.5	动力论效应	144
4.6	$m = 0$ 模式的非线性演化	146
第五章 磁压驱动的等离子体的瑞利-泰勒(RT)不稳定性		
5.1	动力等离子体的瑞利-泰勒(RT)不稳定性	153
5.2	理想 MHD 模型——瑞利-泰勒(RT)不稳定性模式	155
5.3	理想 MHD 模型——等离子体可压缩性和磁剪切的影响	161
5.4	磁剪切的影响	167
5.5	耗散效应	168
5.6	大拉摩半径效应	171
5.7	瑞利-泰勒(RT)不稳定性的非线性演化	176
第六章 动力 Z 箍缩和套筒的稳定性		
6.1	薄壳模型	187
6.1.1	坍塌柱壳的不稳定性	187
6.1.2	WKB 近似	192
6.2	有限厚度层内瑞利-泰勒(RT)不稳定性的增长	195
6.3	内爆 Z 箍缩中的瑞利-泰勒(RT)不稳定性——雪耙模型	198
6.3.1	雪耙模型——质量聚集的影响	199
6.3.2	雪耙模型——冲击波的影响	202
6.4	内爆金属丝阵列	204
6.4.1	内爆金属丝阵列的动力学	211
6.4.2	内爆金属丝阵列——稳定性分析	212
6.4.3	位移不稳定性	215
6.4.4	$k \neq 0$ 的不稳定性	217

6.4.5 数值模拟	223
6.5 理想 MHD 模型	226
6.5.1 WKB 近似	226
6.5.2 理想 MHD 模型——动力 Z 箍缩的成丝不 稳定性	235
6.5.3 WKB 近似的不变量和精确度	240
6.6 气流 Z 箍缩内爆的稳定性	244
6.6.1 利用轴向磁场致稳气流 Z 箍缩内爆	248
6.6.2 多层壳内爆的稳定性	254
6.7 依靠径向振荡使 Z 箍缩的长波长腊肠型 和扭曲型模式致稳	257
6.8 单丝引发的 Z 箍缩	262
6.9 柱筒 Z 箍缩中磁驱动的瑞利-泰勒(RT)不稳定性的 二维数值模拟	266
第七章 Z 箍缩的应用	271
7.1 受控核聚变	271
7.2 Z 箍缩作为 X 射线和中子的辐射源	275
7.3 X 射线激光器	278
7.4 超强脉冲磁场的产生	280
7.5 加速器中高能粒子的聚焦	282
结束语	283
参考文献	285

第一章 绪 论

“高密度 Z 箍缩等离子体物理学”是对 Z 箍缩研究领域提出深入、全面看法的第一种教科书。近来由于脉冲功率技术、计算和模拟能力以及对等离子体物理理解的巨大进展,给这个已有较长历史的领域注入了新的活力。

简单地说, Z 箍缩是一个等离子体柱,电源提供的电流沿其轴(Z)向流过,产生一个角向磁场约束了等离子体。初看起来 Z 箍缩等离子体对作用电流的响应是十分简单的,但再详细思考一下却是难以置信地复杂。整个 Z 箍缩现象很快变为非线性流体力学的性态,与 Z 箍缩内爆相关的原子、电离和辐射物理增加了另一层次的复杂性。物理学中几乎没有别的领域像等离子体物理那样,相对说来较普通的几个物理规律的简单集合导致定性上很难理解的结果,更不用说定量上了。

Z 箍缩有着广泛的应用,因为它是高效率和高费比的技术,可以把小质量加热到很高的温度。 Z 箍缩被广泛地用于产生 X 射线的源(爆炸丝,1959 年—1968 年;Burtsev 等,1990 年)。近来人们对 Z 箍缩装置应用于受控热核聚变反应器的可能又重新有了兴趣,令人惊讶的是,对于 Z 箍缩理论的理解落后于其实际应用。

我们的目的是给出关于 Z 箍缩研究的概貌,并提出对这个重要过程的物理解,即对于被约束于 Z 箍缩几何构形中、通过大电流的稠密等离子体行为的理解。我们的方法是对大量 Z 箍缩文献进行综述(包括那些散布不广的文章),比较理论、计算和实验结果,提出简单的模型以帮助读者理解。《高密度 Z 箍缩等离子体物理学》一书可以作为这个领域中高年级大学生、研究生、研究

人员和工程师的参考资料。

Z 箍缩表面上看来简单,但同时又极其复杂。第二章提出了利用静态理想磁流体力学模型研究平衡结构。在第三章~第六章研究了 Z 箍缩等离子体的动态演化。动力学性态十分关键,这不仅因为简单的 Z 箍缩等离子体在动力学上总是不稳定的,而且因为 Z 箍缩等离子体运动的动能可以相当、甚至超过其热内能。从而这些等离子体可以很快变为湍流状态,简单的柱对称性被破坏,引入三维动力学成为必需。了解这种向不稳定形态的转变,对 Z 箍缩的实际应用极为重要。一般等离子体物理教科书中很少讨论的与较高序数 Z 等离子体有关的物理问题,本书也有论述,并且讨论了对简单平衡形态有严重影响的辐射产生和输运问题。第三章充分讨论了磁流体力学近似,全磁流体力学近似之所以需要,是因为 Z 箍缩过程中等离子体密度、温度的时空变化达几个数量级。在 Z 箍缩过程中,初始冷的物质发生电离、加热和压缩,形成稠密热等离子体。本书提出了若干自相似模型,以加深对这些复杂装置的理解。最后我们指出, Z 箍缩等离子体的某些特色需要超出磁流体力学近似之外的模型。

第四章研究拟定态 Z 箍缩等离子体的稳定性。这个领域对于 Z 箍缩在受控热核聚变中的应用是很重要的。

许多 Z 箍缩应用需要通过内爆把初始冷等离子体变为热的压缩等离子体。如第五章和第六章所讨论的那样,被加速的等离子体对于磁流体力学或磁 Rayleigh-Taylor 不稳定性来说,是不稳定的。当前许多 Z 箍缩研究课题目的在于减小这种不稳定性。第五章中发展了一个简单的平面模型,以推进对这个困难问题的理解。第六章介绍了柱形等离子体内爆 RT 不稳定性的若干模型。为了理解和描述这种不稳定的内爆等离子体的非线性演化,计算机模拟是必需的。目前这方面研究的丰富内容将在 6.9 节中介绍。

最后在第七章中讨论了 Z 箍缩的许多应用,包括稠密 Z 箍缩等离子体作为 X 射线刻板印刷和 X 射线显微术的唯一辐射源,用

于材料物态方程、惯性约束聚变、泵浦 X 射线激光器、产生中子等研究。再者,内爆 Z 箍缩可产生超强磁场,利用 Z 箍缩中形成的磁场分布作为磁透镜,可以使高能粒子束聚焦。

实验数据的引用贯穿全书,这样可把这种等离子体物理的许多论题与真实世界中发现的问题联系起来。

1.1 历史展望

18 世纪后期,静电发生器被用来在空气中造成电击穿,从而产生了最早类型的 Z 箍缩。M. Van Marum 于 1784 年(Turner 和 Levere, 1973)制作了一个大的发生器,可以储存 30kJ 的能量,在空气中打出 60cm 长的电火花(Finn, 1971)。Van Marum 的发生器现在展览于荷兰的 Teyler 博物馆,可在如下网址找到它的照片:<http://www.teylersmuseum.nl/engels/ruimtes/instrument/start.html>。

20 世纪中最早的大电流箍缩工作与爆炸丝有关,这种装置被用作为软 X 射线源(Exploding Wires, 1959—1968, Burtsev 等, 1990)。典型数据是一个充好电的电容器把数万伏的电压加载于直径约 $10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 的细金属丝。放电开始时金属丝汽化,电流下降(“浸泡”间歇)。之后由于电场增强和蒸汽膨胀,发生击穿,形成低电阻的等离子体,通过大电流并使等离子体发生箍缩。通过欧姆加热和压缩加热,等离子体温度达到 $10\text{eV} \sim 100\text{eV}$,其辐射为黑体谱,这是由于等离子体吸收辐射的平均自由程远小于其直径的结果。箍缩后等离子体的电子密度通常达到 $10^{21}/\text{cm}^3$ 。

早期的受控聚变研究计划曾致力于微秒时间尺度、强电流、氩等离子体的 Z 箍缩,其压缩后的密度是 $10^{18}/\text{cm}^3$ 。基于等离子体的拟静态磁约束,这些箍缩被认为是可能的聚变系统。人们提出的 Z 箍缩等离子体平衡的解析模型认为,在合理的约束时间内聚变的温度和密度是可能达到的,并在 1952 年—1960 年期间研究了直线(Tuck, 1958)和环面(Butt 等, 1958)两种系统。但是实验