

Z 箍缩等离子体电流分布实验研究*

周林[†] 薛飞彪 司粉妮 杨建伦 叶凡 徐荣昆 胡青元 甫跃成
蒋树庆 李林波 陈进川 徐泽平

(核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2011年6月2日收到; 2012年1月6日收到修改稿)

在“强光一号”装置上, 利用微型磁探针系统测量了钨丝阵列负载内部的消融等离子体携带的电流, 对比了有无泡沫柱两种负载条件下内部电流分布的差异, 获得了稳定可靠的实验数据. 实验中使用了由42根4.2 μm钨丝组成的直径12 mm的丝阵列负载, 脉冲电流峰值为1.34 MA, 上升时间约70 ns. 结果表明: 在电流放电开始约20 ns后, 半径3.2 mm处的磁探针有明显的信号输出, 随后的20 ns内, 内部等离子体分流比迅速上升至约20%, 并在30—40 ns内基本保持稳定. 丝阵列加载泡沫柱后, 内部电流值在Z箍缩前期没有明显变化.

关键词: 丝阵 Z 箍缩, 消融等离子体, 磁探针, 电流测量

PACS: 52.70.-m, 52.70.DS

1 引言

Z 箍缩 (Z-pinch) 是一种将电磁能高效地转化为 X 射线辐射能的技术途径, 在惯性约束聚变 (ICF)、高能量密度物理和武器物理等诸多研究领域有着广泛的应用前景. 近年来, 利用大电流脉冲功率装置驱动金属丝阵列内爆的研究取得了显著进步, 在 Z 装置 (美国 Sandia 实验室 20 MA) 的实验^[1]中, 利用金属丝阵列负载产生了峰值功率 280 TW、能量 18 MJ、持续时间 5—6 ns 的 X 射线脉冲, 能量转换效率达 15%. 然而, 尽管有大量的实验数据和理论模拟, 但人们对于柱形丝阵列内爆过程还未完全了解.

在 Z 装置、Angara5-1 (俄罗斯)、MAGPIE (英国帝国理工大学) 和“强光一号”装置 (西北核技术研究所) 上的实验^[2-5]均表明, 持续较长时间的消融阶段是丝阵列内爆的固有物理过程. 电流脉冲早期, 金属丝表面物质气化、电离并形成高电导率的等离子体, 而丝芯仍保持低温致密状态, 形成“芯晕” (corecoronal) 结构. 晕等离子体携带大部分电流, 并在洛伦兹力作用下向轴线漂移, 在轴线处形成先驱

等离子体柱, 同时丝芯不断消融产生新的等离子体. 当芯质量耗尽时, 消融过程结束, 主等离子体整体向轴心运动. 消融阶段占整个 Z 箍缩时间约 70%, 是制约丝阵列内爆的主要因素.

为更好地理解丝阵列内爆过程有必要对等离子体产生率、先驱等离子体的形成、“拖尾”质量 (trailing mass) 和电流密度的重新分配等物理过程进行深入研究, 其中一条重要的途径是测量丝阵列内部的磁场分布, 从而得到内爆过程中的电流和等离子体分布信息. 现有的测量手段主要有基于 Faraday 旋转效应的测量技术和微型探针技术. Sinars 等^[6]在 MAGPIE 装置上开展了 Faraday 旋转测量研究, 获得了多个时间点的磁场和电流分布信息, 但该方法受制于激光穿透极限和所采用的等离子体密度分布模型. 微型磁探针技术是另一种有效的技术途径, 俄罗斯的研究人员利用该技术在 Angara5-1 装置上进行了卓有成效的研究工作, Grabovski, Zukakishvili 和 Aleksandrov 等^[3-5]测量了消融等离子体的分流情况, 研究了金属丝材料对分流的影响, 测量了双层丝阵列负载的电流分布并提出丝阵列质量的优化, 其实验诊断与理论模拟相符. 国内, 薛飞彪等^[7]首次将磁探针技术用于 Z 箍缩

* 国家自然科学基金 (批准号: 10635050) 和中国工程物理研究院科技发展基金 (批准号: 2010B0102012) 资助的课题.

[†] E-mail: zhoulin2003@gmail.com

负载电流的诊断, 黄俊等^[8]对消融等离子体的动力学行为进行了二维数值模拟研究, 但实验与理论计算还有一定的差距, 尤其是实验诊断的可靠性还需要提高.

在“强光一号”装置上 2010 年开展的 Z 箍缩实验中, 我们优化了微型磁探针系统的结构设计和标定方法, 成功测量了钨丝阵负载总电流和丝阵内部等离子体所携带的电流, 内部磁探针的测量时间持续至 X 辐射功率峰前 20—30 ns 获得了稳定可靠的实验数据. 测量对比了纯钨丝阵和丝阵加泡沫两种负载条件下的电流分布, 得到了泡沫柱对内部等离子体分流影响的准确实验结果. 实验数据可以很好地应用于理论计算的验证和校准.

2 实验设计

“强光一号”产生的脉冲电流峰值约 1.34 MA, 上升时间(峰值 10%至 90%)约 70 ns, 利用微型磁探针测量内爆过程中负载内外侧的角向磁场变化率, 可以得到磁场和电流分布信息.

令线圈面积为 S 产生的感应电动势为

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dB_{\theta}}{dt} S.$$

得到线圈所在位置的平均磁场为

$$\bar{B}_{\theta} = \int U dt / S.$$

在轴对称近似条件下, 线圈所处半径 r 以内的等离子体携带的总电流为

$$I_r \approx \frac{2\pi r \bar{B}_{\theta}}{\mu_0} = -\frac{2\pi r}{\mu_0 S} \int U dt = K \int U dt,$$

式中系数 K 通过标定实验得到.

探针结构如图 1 所示, 感应线圈使用 $90 \mu\text{m}$ 粗的铜线绕制, 位于负载内部时直径为 0.5 mm 或 0.6 mm 外部为 0.8 mm . 线圈引线紧密缠绕, 经屏蔽管和屏蔽转接盒后连接至同轴电缆. 每个探针由两个反极性线圈组成, 所输出的有效信号极性相反, 而电磁干扰极性相同, 该结构设计可以基本消除残余噪声, 同时也起到验证测量结果有效性的作用. 为兼顾测量的位置精度和信噪比, 在采用小尺寸线圈的同时, 每个线圈各绕 2—3 匝.

内层磁探针会对等离子体产生一定的扰动, 表现在两个方面: 一是改变局部磁场, 使测量结果偏离真实水平; 二是探针干扰等离子体内爆过程. 关于第一种影响, 由于探针尺寸小于周围等离子体的

趋肤深度, 对局部磁场的影响很小^[3], 可以忽略. 关于后者, 探针对内爆过程的影响包括阻挡局部等离子体和探针质量参与内爆两个方面. Z 箍缩早期, 向心运动的消融等离子体质量份额较小(理论计算值 $< 10\%$), 且仅有部分等离子体运动到探针上(探针线圈沿角向的截面宽度约 0.4 mm), 因此探针得以保持完好, 其质量不参与消融等离子体内爆过程, 对等离子体的影响主要表现为阻挡作用. 后期, 主体等离子体在较短的时间内穿过探针所在半径, 迅速烧毁探针线圈, 线圈质量混入主体等离子体中并影响内爆过程, 此一过程及之后的测量结果不反应真实的磁场水平. 从实验设计来看, 应尽量减少探针质量, 采用尽量细的金属丝和屏蔽管、减小探针安装深度等. 实验中探针安装深度约 3 mm , 屏蔽管外径为 0.5 mm , $90 \mu\text{m}$ 粗的铜线能够保证线圈存活至主等离子体到达其所在位置时.

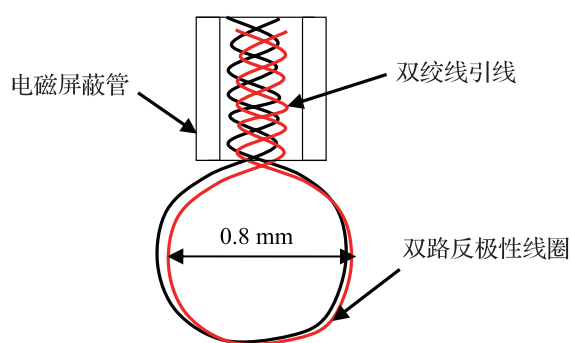


图 1 微型磁探针结构示意图

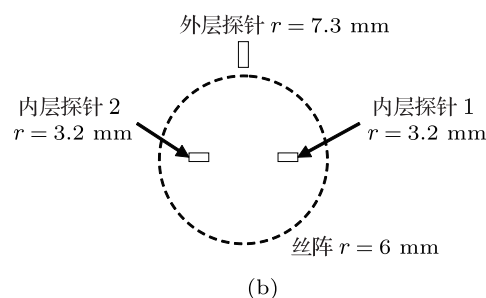


图 2 (a) 钨丝阵负载和微型磁探针; (b) 探针布置位置, r 为从轴心到丝阵或探针的距离

实验中,我们使用了由42根4.2 μm钨丝组成的金属丝阵负载,丝阵直径12 mm,高18 mm,总线质量为112.2 μg/cm.共进行的9发次有效实验中,5发次使用纯钨丝阵,4发次使用钨丝阵加泡沫柱负载.泡沫柱由低密度琼脂构成,直径3 mm,位于丝阵轴线上.丝阵和微型磁探针位置如图2所示,其中外层探针(图2正中)位于半径7.3 mm处,两个内层探针对称分布在半径3.2 mm处.

3 钨丝阵负载诊断结果

图3(a)和(b)显示了10345#实验(纯钨丝阵)的微型磁探针诊断结果,其中 I_R 为“强光一号”装置的电流监测值(罗氏线圈法测量), P_X 为X射线辐射功率测量值,曲线1和2为外层探针输出信号,曲线3和4为一个内层探针的输出信号.对各探针信号积分并乘以标定系数得到相应的电流值,其中曲线5为外层磁探针诊断结果,曲线6和7分别对应两个内层磁探针.各测量信号均以X射线辐射功率峰值为0时刻.

Z箍缩早期,消融等离子体在洛伦兹力作用下向轴心汇聚,当其进入内层探针所处半径以内时,所产生的角向磁场的变化使探针输出感应信号.实验结果表明:

1) 在电流放电约20 ns后,内层磁探针开始有明显的信号输出.忽略这部分等离子体的形成时间,初始位置为 $R_0 = 6$ mm,探针位置为 $R_p = 32$ mm,简单计算得到消融等离子体向轴运动的平均速度为 1.4×10^7 cm/s.

2) 在-80 ns至-30 ns范围内,装置放电电流近似线性增加,而内部等离子体携带的电流也稳定增长,其分流比例近似保持稳定.

3) -30 ns时刻,内部等离子体携带的电流约0.3 MA,占总电流的比例约20%.

4) 从-25 ns时刻开始,内层探针输出信号急剧增加,并很快变为同极性.可推测,此时主等离子体到达探针处,探针迅速烧毁.

实验中,外层磁探针的输出信号在时间上与装置监测电流同步,其诊断电流波形也与装置电流相似,但幅度偏高.事实上,所有9发次的实验中,外层磁探针测量得到的电流波形均一致,峰值为 1.61 ± 0.12 MA,比装置监测电流峰值(1.34 ± 0.07 MA)偏高20%.两种测量方法有整体性的偏差,可能存在的问题将在今后的实验中

继续研究.本文中我们将内层探针电流与对应的外层探针电流相比,可消除整体误差的影响.

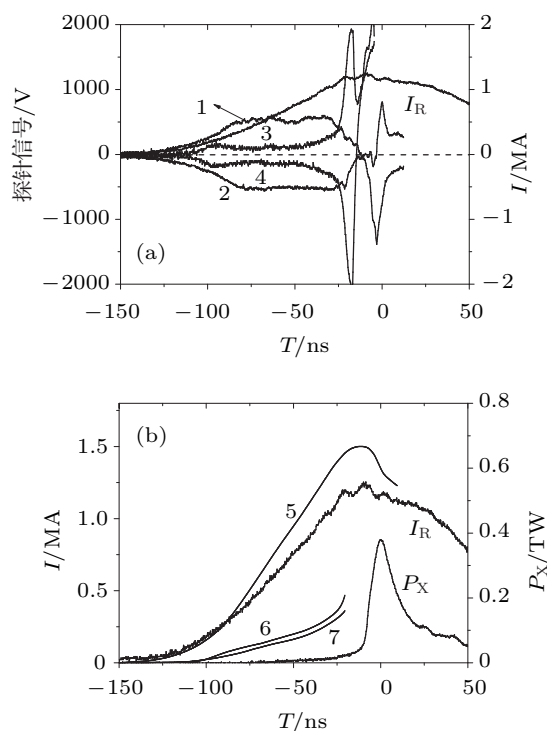


图3 钨丝阵负载的微型磁探针诊断结果 (shot No 10345) (a) 外层探针(曲线1和2)和内层探针(曲线3和4)的输出信号; (b) 负载总电流(曲线5)和半径32 mm以内电流(曲线6和7)的诊断结果. I_R 为装置电流监测值, P_X 为X射线辐射功率测量值

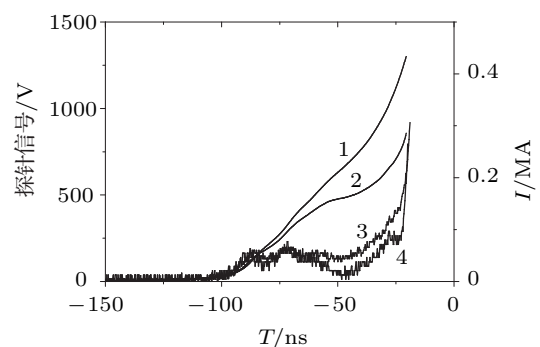


图4 内层探针诊断结果对比 (shot No 10344). 曲线1为一个探针的诊断电流,曲线3为该探针输出信号,曲线2和4对应另一个探针的诊断电流和输出信号

图3(b)中,两内层探针诊断电流非常一致.事实上,在更多发次的实验中,内层探针的诊断结果之间存在差异.图4为10344#实验中两内层探针的诊断结果,其中曲线3和1对应一个内层磁探针的输出信号和计算得到的电流,曲线4和2对应另一个内层探针.可以看出,在-60 ns时刻,两内层探针的输出信号之间已经有明显差异,这种差异一

直持续到探针烧毁, 诊断电流之间的偏差逐渐增加. 这一现象有探针装配的误差的影响 (监测得到 12 个有效内层探针的装配位置标准偏差为 0.16 mm), 但更重要的是纯钨丝阵内爆的不稳定性. 图 5 为另一发次 (10334#) 的 X 射线分幅像测量结果, 可以看出, 在 -51 ns 时刻, 内部等离子体已经出现了明显的非对称性. 由于磁探针的感应信号依赖于电流通道与探针位置的间距, 因此内爆的不稳定性必然造成探针诊断结果之间的偏差.

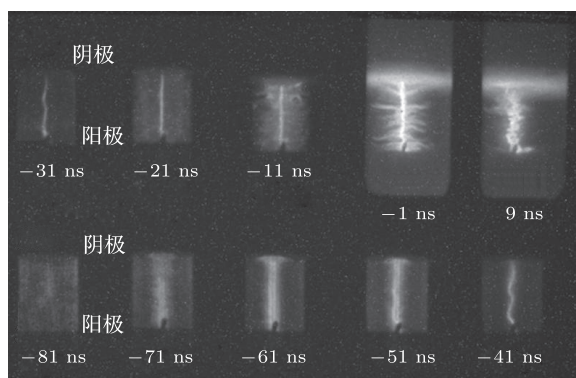


图 5 X 射线分幅像 (shot No. 10334) (阳极附近的黑点为外层磁探针)

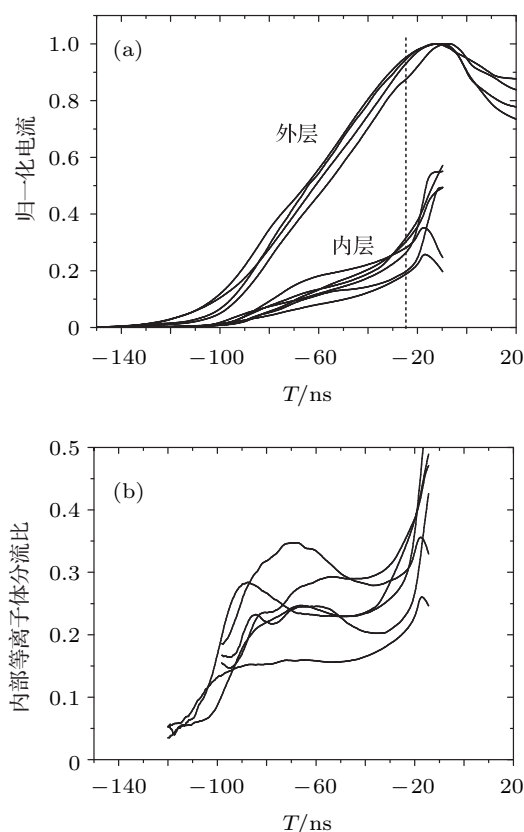


图 6 纯钨丝阵磁探针诊断结果对比 (a) 归一化后的内外层探针诊断电流; (b) 内层探针电流与相应的外层探针电流的比例关系

对比纯钨丝阵所有实验发次的诊断结果, 如图 6 所示. 各电流均按照相应的外层探针电流峰值进行归一化, 并给出了内外层探针电流的比例关系. 可以看出:

1) 内层磁探针均在放电开始 20—25 ns 后有明显的信号输出; 探针的烧毁时间一致, 诊断电流均在 -25 ns 附近开始急剧上升并出现畸变.

2) 在 -80 ns 至 -30 ns 范围内, 内部等离子体携带的电流稳定增长. -30 ns 时刻, 内部等离子体分流比约为 15%—30%. 由于探针标定时处于轴对称磁场中, 实验中等离子体分布的不对称性扩大了测量误差, 因此, 实际的电流波动应远小于该范围, 测量结果的平均值更能反映真实情况.

从图 6(a) 还可以看出, 负载总电流 (外层探针诊断结果) 的上升沿在时间上存在明显的差异, 由此可以推断, 功率峰与负载电流之间的时间间隔具有一定的晃动.

4 钨丝阵加泡沫负载诊断结果

使用低密度琼脂泡沫柱作为动态黑腔驱动 ICF 靶丸实现聚变点火是 Z 箍缩极为重要的应用方向. 泡沫柱加载后, 必然会改变丝阵内部环境, 影响丝阵内爆过程. 因此, 有必要研究泡沫柱加载后丝阵内部的等离子体分布情况, 尤其是内部等离子体分流的变化等.

图 7(a) 和 (b) 为钨丝阵加载泡沫后的微型磁探针诊断结果. 与纯钨丝阵 (图 3) 相比, 外层探针的输出信号相似, 积分得到的负载总电流一致, 二者的峰值均比装置监测结果高约 20%. 加载泡沫柱后, 主等离子体到达泡沫柱表面时先产生一定量的 X 射线辐射, 压缩泡沫柱到心后又产生更高的 X 射线辐射, X 功率监测曲线呈现双峰. 由于这一过程的持续时间比纯钨丝阵的长, 因此内层探针烧毁的相对时刻提前. 图中内层探针开始烧毁的时刻约为 -30 ns.

图 7(c) 和 (d) 为相同丝阵负载条件下的可见光条纹像和相应的内爆轨迹提取结果. 条纹相机使用柱面透镜对负载径向成像, 光线的轴向传播方向不变, 因此其测量结果反应了丝阵箍缩过程沿轴向的平均效果. 图中 -30 ns 时刻, 内爆轨迹边缘位置约为 3.5 mm, 与内层磁探针位置一致. 进入丝阵内部的等离子体沿泡沫柱表面分布, 泡沫柱位置持续均匀发光.

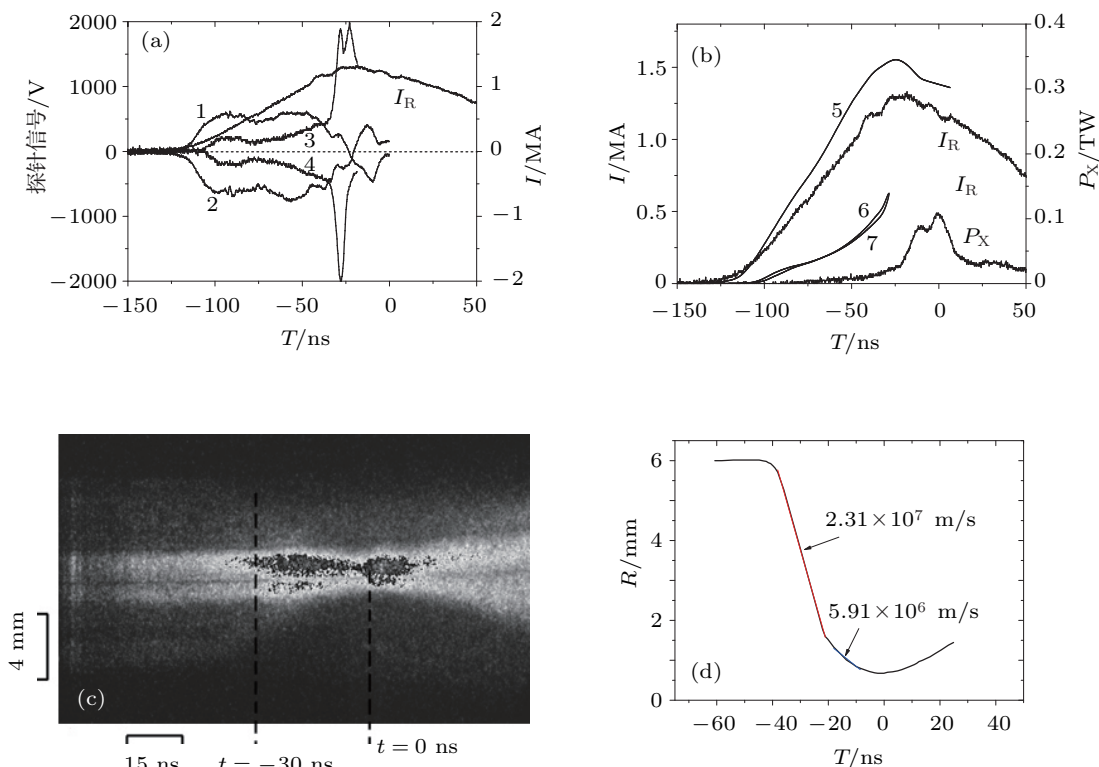


图7 钨丝阵加泡沫的微型磁探针诊断结果 (shot No. 10348) (a) 外层探针 (曲线 1 和 2) 和内层探针 (曲线 3 和 4) 输出信号; (b) 负载总电流 (曲线 5) 和半径 32 mm 以内电流 (曲线 6 和 7) 的诊断结果, I_R 为装置电流监测值, P_X 为 X 射线功率测量值; (c) 可见光条纹像测量结果 (shot No. 10190); (d) 条纹像内爆轨迹

由于消融等离子体到达泡沫柱后沿泡沫柱表面分布, 满足轴对称条件, 因而内层磁探针的诊断结果非常一致. 在丝阵加泡沫负载条件下共进行了 4 发次实验, 图 8(a) 为各实验的磁探针诊断结果, 各电流均按照相应的外层探针电流峰值进行归一化, 图 8(b) 为探针内部等离子体的分流比. 可以看出:

1) 内层磁探针均在放电开始约 20 ns 后有明显的信号输出; 探针的烧毁时间一致, 诊断电流均在 -30 ns 附近开始急剧上升并出现畸变.

2) 内部等离子体增加的同时, 其携带的电流份额在 20 ns 内迅速上升至总电流的 17%—20%. 在 -80 ns 至 -50 ns 时间段内, 内部等离子体分流比缓慢上升至 20%—24%. -50 ns 之后, 分流比上升速度加快, -30 ns 时刻的分流比约为 28%—34%.

3) 负载总电流在时间上非常一致, 即 X 辐射功率峰与放电电流的时间间隔保持稳定. 可合理推测, 加载泡沫柱后 Z 箍缩内爆的不稳定性得到有效抑制, 主等离子体的形成时间和向轴运动过程均较为一致.

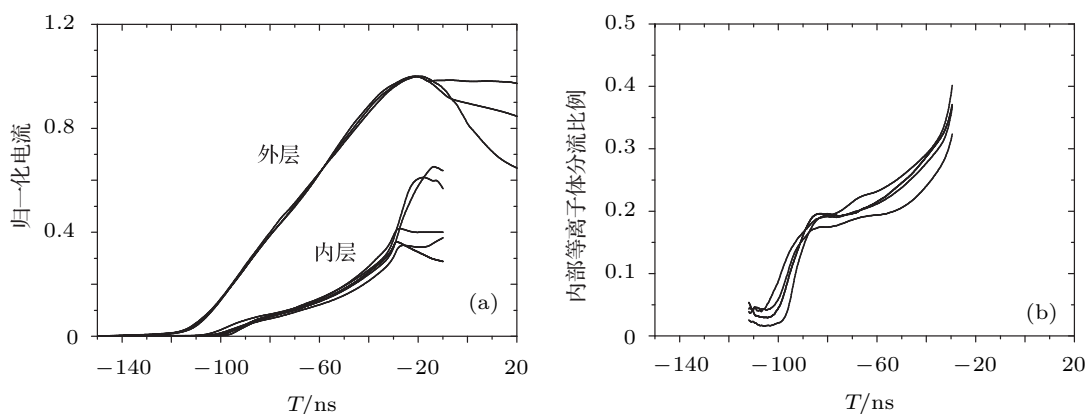


图8 钨丝阵加泡沫后的磁探针诊断结果对比 (a) 归一化后的内外层探针诊断电流; (b) 内层探针电流与相应的外层探针电流的比例关系

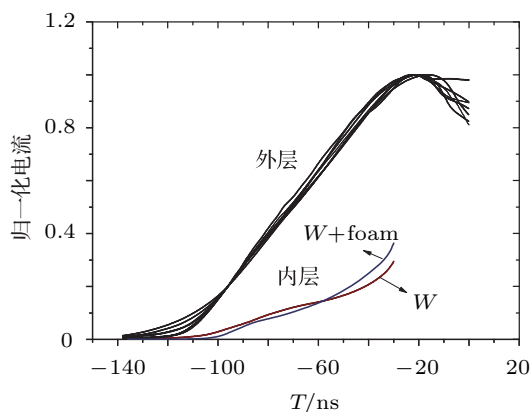


图9 两种负载的磁探针诊断结果对比

对两种负载的电流诊断结果按照负载总电流波形进行时间关联,并将内层探针诊断结果求平均,结果如图9所示.对于纯钨丝阵,认为测量结果的平均值能反映真实的内部电流水平.可以看出:

- 1) Z箍缩前期(放电开始约70 ns以前),泡沫柱对内部电流大小没有明显影响,分流比约为20%.
- 2) Z箍缩后期,加载泡沫柱条件下内部电流上升速度增加,探针烧毁前内部等离子体的分流比上

升至约30%.

5 结论

利用微型磁探针系统测量了钨丝阵负载的角向磁场变化率,获得了Z箍缩过程中的负载总电流和内部电流随时间的演变行为,实验数据稳定可靠.丝阵由42根 $4.2\ \mu\text{m}$ 钨丝组成,直径12mm,高18mm.研究了有无泡沫柱两种负载条件下的内部等离子体分流的差异,确定了泡沫柱对负载电流分布的影响程度.实验获得的主要结论如下:

1. 在电流放电约20 ns后,消融等离子体进入半径3.2 mm以内区域,内层磁探针开始有明显的信号输出.在随后的20 ns内,内部等离子体分流比迅速上升至约20%,并在30—40 ns内基本保持稳定.
2. Z箍缩前期(放电开始约70 ns以前),泡沫柱对内部电流大小没有明显影响.后期,加载泡沫柱条件下内部电流上升速度增加,探针烧毁(主体等离子体到达探针位置)前分流比上升至约30%.

- [1] Spielman R B, Deeney C, Channler G A, Douglas M R, Matzen M K, McDaniel D H, Nash T J, Porter J L, Sanfor T W L, Seamen J F, Stygar W A, Struve K W, Breeze S P, McGurn J S, Torres J A, Zagar D M 1998 *Phys. Plasmas* **5** 2105
- [2] Ryutov D D, Derzon M S, Matzen M K 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 167
- [3] Zukakishvili G G, Mitrofanov K N, Aleksandrov V V, Grabovskii E V, Oleinik G M, Porofeev I Y, Sasorov P V, Frolov I N 2005 *Plasma Phy. Rep.* **31** 908
- [4] Grabovskii E V, Zukakishvili G G, Mitrofanov K N, Oleinik G M, Frolov I N, Sasorov P V 2006 *Plasma Phy. Rep.* **32** 32
- [5] Aleksandrov V V, Barsuka V A, Grabovskii E V, Gritsuk A N, Zukakishvili G G, Medovshchikov S F, Mitrofanov K N, Oleinik G M, Sasorov P V 2009 *Plasma Phy. Rep.* **35** 200
- [6] Sinar D B, Cuneo M E, Yu E P, Bliss D E, Nash T J, Porter J L, Deeney C, Mazarakis M G, Sarkisov G S, Wenger D F 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 145002
- [7] Xue F B, Yang J L, Xu R K 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 2055 (in Chinese) [薛飞彪, 杨建伦, 徐荣昆 2010 强激光与粒子束 **22** 2055]
- [8] Huang J, Sun S K, Xiao D L, Ding N, Ning C, Zhang Y, Xue C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6351 (in Chinese) [黄俊, 孙顺凯, 肖德龙, 丁宁, 宁成, 张扬, 薛创 2010 物理学报 **59** 6351]

Experimental study of current distribution in wirearray Zpinch plasma*

Zhou Lin[†] Xue Fei-Biao Si Fen-Ni Yang Jian-Lun Ye Fan Xu Rong-Kun

Hu Qing-Yuan Fu Yue-Cheng Jiang Shu-Qiang Li Lin-Bo

Chen Jin-Chuan Xu Ze-Ping

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900 China*)

(Received 2 June 2011; revised manuscript received 6 January 2012)

Abstract

The current within imploding multiwire tungsten arrays is measured using micro magnetic probes in the Qiangguang-1 facility at a current of 1.3 MA and rise time of about 70 ns. Difference in current distribution in multiwire arrays between with and without foam cylinder on the array axis is studied. Stable and reliable results are obtained for tungsten wire array Z-pinch with a wire diameter of 4.2 μm and an annular diameter of 12 mm. The results shows that the output of magnetic probe at a radius of 3.2 mm lags about 20 ns behind the discharge current pulse. After that, the ratio of inside current to the total current increases 20% within 20 ns and keeps steady for 30–40 ns. It is found that the foam cylinder has no appreciable influence on the inside current value in the initial stage of implosion.

Keywords: wire-array Z-pinch, ablated plasma, magnetic probe, current measurements

PACS: 52.70.–m, 52.70.DS

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No 10635050), and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2010B0102012)

[†] E-mail: zhoulin2003@gmail.com