

基于聚龙一号装置的超高速飞片发射实验 研究进展*

王贵林¹⁾²⁾ 郭帅²⁾ 沈兆武¹⁾ 张朝辉^{2)†} 刘仓理²⁾ 李军²⁾ 章征伟²⁾
贾月松²⁾ 赵小明²⁾ 陈宏²⁾ 丰树平²⁾ 计策²⁾ 夏明鹤²⁾ 卫兵²⁾
田青²⁾ 李勇²⁾ 丁瑜²⁾ 郭帆²⁾

1)(中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027)

2)(中国工程物理研究院流体物理研究所, 中物院脉冲功率科学与技术重点实验室, 绵阳 621900)

(2014年4月23日收到; 2014年6月4日收到修改稿)

磁驱动加载技术通过脉冲功率源将超大脉冲电流加载到实验负载区, 从而形成随时间平滑上升的磁压力, 实现对样品的准等熵压缩和超高速飞片发射. 本文基于聚龙一号装置的输出特性参数, 依次从负载结构、电极尺寸、电流波形和诊断系统等方面, 分别设计完成了两种负载构型的超高速飞片发射实验. 其中应用单侧带状负载发射尺寸 $\Phi 10 \text{ mm} \times 0.725 \text{ mm}$ 的 LY12 铝飞片速度达到 11.5 km/s , 磁驱动加载压力近 0.9 Mbar . 比较模拟计算与实验结果, 飞片发射过程和最终速度基本一致. 而进一步的模拟计算表明, 优化的负载结构尺寸和电流波形调节方案下, 将有望发射尺寸 $\Phi 8.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的铝飞片速度超过 15 km/s . 从模拟设计到实验开展, 已初步掌握了基于多支路脉冲功率发生器的超高速飞片发射实验技术.

关键词: 磁驱动加载, 超高速飞片发射, 单侧带状负载, 准等熵

PACS: 62.50.+p, 07.35.+k, 84.70.+p, 91.60.Gf

DOI: 10.7498/aps.63.196201

1 引言

材料冲击 Hugoniot 线作为重要的状态方程数据, 主要通过高速飞片撞击靶材料进行实验测量^[1]. 高速飞片发射除采用传统的轻气炮^[2]和爆炸^[3]等加载手段外, 激光^[4]、电炮^[5]和磁驱动等新兴加载手段也逐渐成熟. 随着近 20 年来脉冲功率技术的快速发展, 磁驱动平面加载实验技术发展和成果尤为显著, 逐渐成为材料高压物态方程和动力学响应特性研究的重要手段^[6,7].

已开展磁驱动高速飞片实验的脉冲功率装置主要有美国 Sandia 国家实验室的 Z/ZR 装置^[7-12], VELOCE^[13]、法国的 GEPI^[14]、流体物理研究所的小型电容器装置 CQ-1.5 和 CQ-4 装置^[15,16] 及水介

质传输线装置“阳”加速器^[17]和聚龙一号(PTS)装置^[18-22]等. 其中 Z/ZR 装置实验成果最为显著. 2008 年, Knudson 等^[8]应用磁驱动发射的大尺寸高速飞片, 获取金刚石冲击 Hugoniot 数据的密度不确定度低于 1%, 并观察到其他实验加载技术还无法辨认的约 8.5 Mbar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$) 压力下的三相点. 2011 年, Lemeke 等通过调节电流波形和优化负载结构, 成功发射 $25 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ 尺寸的铝飞片速度达到 45 km/s ^[9], 是至今为止有文献报道最高的宏观飞片速度. 通过峰化电容器调节电流波形, Wang 等^[15]应用 CQ-4 装置成功发射尺寸 $\Phi 5 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$ 的铝飞片速度到 10.7 km/s . Hereil 等^[14]在加载能力相近的 GEPI 装置上采用 6 mm 过流宽度的电极发射 0.4 mm 厚度飞片速度达到 10.27 km/s . Wang 等^[17]基于“阳”加速器的 ~ 1

* 中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金(批准号: SFZ20130203)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: johoney@sina.com

MA 峰值、~100 ns 上升沿的电流波形, 优化了负载结构参数, 成功发射 $8\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ 铝飞片到近 3 km/s . 高速飞片发射水平不仅受限于装置的驱动能力, 电流波形调节能力往往也是限制发射水平的重要瓶颈^[9,12].

PTS 装置^[18-22] 作为国内最强的脉冲功率源之一, 充电 70 kV 时, 储能 3.53 MJ, 瞬时输出功率可达数十 TW. 通过 24 支路汇流, 短脉冲模式下到达负载电流波形幅值 7—10 MA, 10%—90% 脉冲上升沿 80—120 ns. 结合电流波形调节技术, 可在长脉冲模式下向负载输出幅值 4—8 MA, 0—100% 上升时间 300—600 ns 的平缓电流. 本文基于装置特性, 设计开展了一系列超高速飞片发射实验, 发射 $\Phi 10\text{ mm} \times 0.725\text{ mm}$ 的 LY12 铝宏观飞片速度达到 11.5 km/s .

2 实验设计

磁驱动高速飞片实验中, 如图 1 (a) 所示, 脉冲电流沿相反方向流经两个平行电极板相对的表面, 一个电极板表面上电流产生的磁场与另外一个电

极板的电流相互作用产生平滑上升的磁压力, 从而驱动电极沉孔部分或背面的样品形成高速飞片. 丁宁^[19], Zhao^[20] 等分别基于 PTS 装置简化的电路方程^[19,20], 成功开展了 Z 箍缩丝阵负载设计. 夏明鹤等在 PTS 装置磨合运行后, 给出了波形调节时的装置电路参数^[21]. 本文将基于这些装置特性参数, 开展尺寸优化和电流波形设计, 并结合现有诊断能力确定诊断布置方案.

2.1 负载结构设计

为提高磁驱动高速飞片发射能力, 除提升装置输出能力外, 还可通过负载结构设计优化来实现. 带状结构负载^[9,10,15] 是一种新型的负载结构, 它相对于早期方形轴向对称负载能在样品表面产生更高的磁场强度. Seidel 等应用不同电磁场模型开展带状结构负载的电磁场分布模拟, 分析指出采用宽度变化的带状负载结构, 可保持良好的磁场分布均匀性, 从而大大提高了 ZR 装置的磁驱动加载能力. 本文采用新型带状负载结构, 开展了电磁场模拟分析和实验验证性工作.

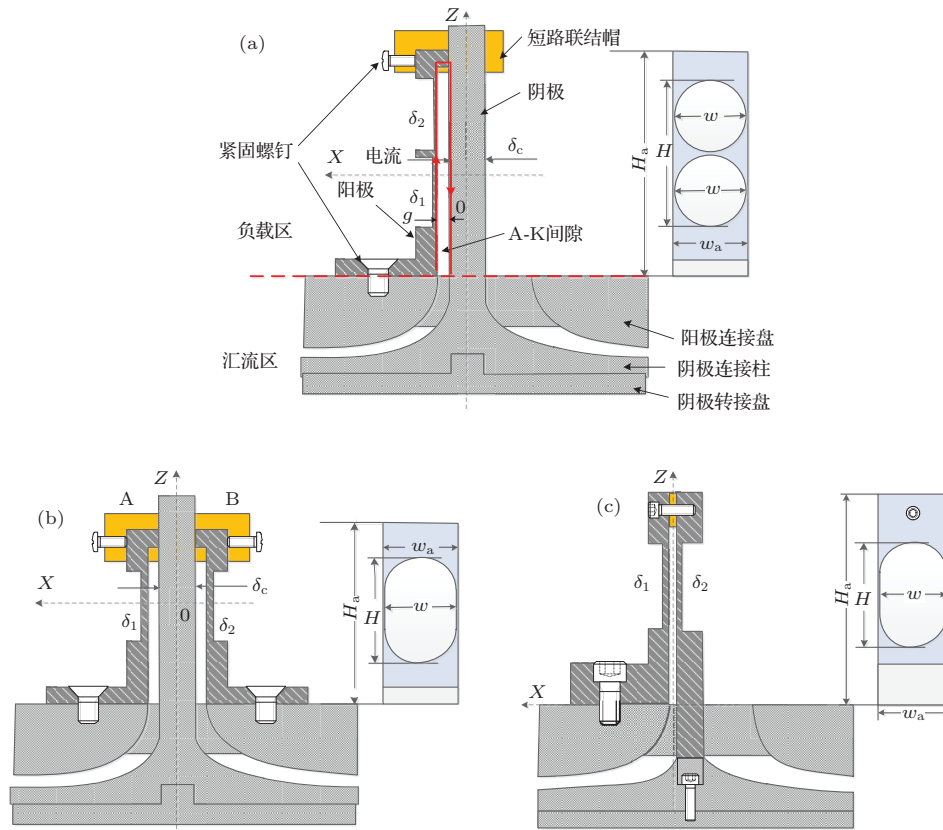


图 1 典型的三种负载结构 (a) 用于 PTS 装置的单侧带状负载结构; (b) 用于 PTS 装置的对称带状负载结构; (c) 用于“阳”加速器的双侧带状负载结构

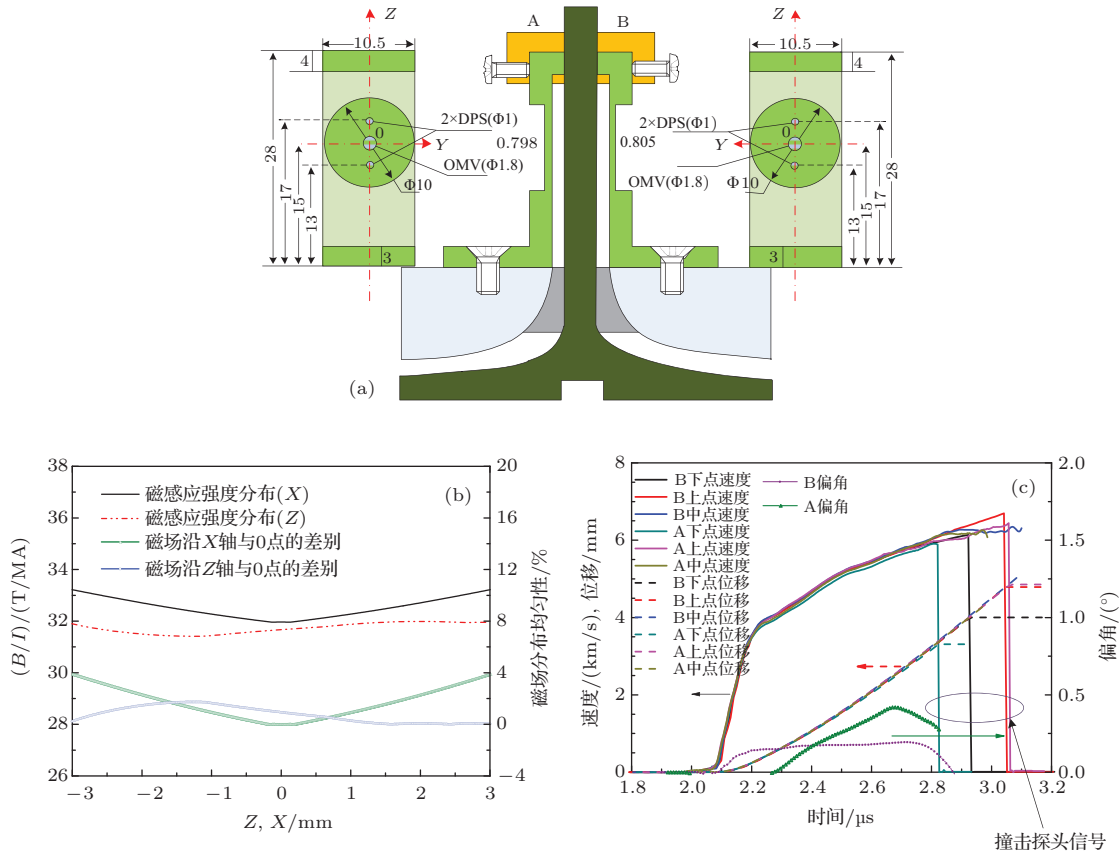


图2 (网刊彩色) PTS0062 实验的设计、电磁场模拟和诊断结果 (a) 实验负载结构尺寸及速度诊断探头布置 (尺寸单位: mm); (b) 沿 Z 和 X 轴的三维静态模拟磁场分布结果; (c) A 侧和 B 侧飞片各点的速度、位移历史及平面性

在“阳”加速器和 PTS 装置开展了一系列不同负载结构类型的磁驱动平面加载实验, 定标负载结构的驱动效率. 典型负载结构分别如图 1 所示, $\delta_{1,2}$ 分别为不同飞片厚度, δ_c 为阴极柱厚度, g 为阴阳极间隙, w 为飞片宽度, w_a 为电极过流宽度, H 为飞片区高度, H_a 为负载总高度. 实验通过 DPS (Doppler pins system) 和 OMV (optic-microwave mixing velocimeter) 速度测量系统获得了大量的磁加载均匀性、同步性和平面性数据. PTS0062 实验采用对称带状负载结构, 分别采用四路 DPS 探头和两路 OMV 探头同时测量了两侧直径 10 mm 的铝飞片速度历史. 负载结构和诊断探头位置分布如图 2(a) 所示, 飞片中心位于 ZX 平面的原点 0, 两路 OMV 探头分别对准飞片的中心, 四路 DPS 探头分别沿 Z 轴偏离中心 2 mm. 另外, 应用 Ansoft 软件开展对应负载结构三维静态磁场模拟, 磁感应强度分布如图 2(b) 所示, 沿 Z 轴从 $Z = -3$ mm 到 $Z = 3$ mm 的磁场均匀性在 2% 以内, 沿 X 轴从 $X = -3$ mm 到 $X = 3$ mm 磁场均匀性在 4% 以内. 实验中飞片各位置的速度历史如图 2(c) 所示, 分析

可知 A, B 两侧飞片在飞出超过 5 mm 后的倾角都在 0.5° 以内.

由三维静态磁场模拟分析和前期实验结果验证, 图 2(a) 所示负载结构发射飞片在 5 mm 内冲击靶样品实验时, 有效宽度 w_e 可达 4—6 mm. 此外, 结合电极材料的电导率、爆炸电作用量、密度和声速等性质分析同样驱动电流下发射飞片冲击样品形成的冲击压力, 铝或铜等材料效果很好 [13], 本文电极材料选用 LY-12 铝.

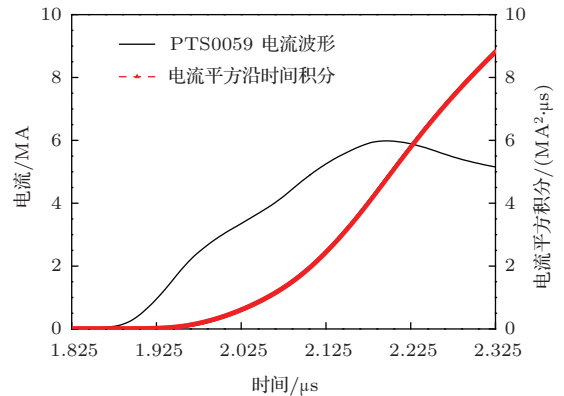


图3 PTS0059 的电流波形和电流平方积分

2.2 电极初始尺寸设计

PTS装置的超高速飞片发射实验中,为在电极中产生平滑上升的磁压力,将采用各支路分时放电模式.电容器充电60 kV时,典型的负载电流波形(PTS0059)如图3所示,0—100%上升时间约0.36 μs,峰值6.01 MA,在电流起始后0.5 μs的电流平方积分约为8.8 MA²·μs.下面将以此电流波形的特性参数设计电极初始尺寸.

电极尺寸主要有过流宽度 w_a 和厚度 δ , t 时刻通过电极的电作用量 $Q(t)$ 为

$$Q(t) = \int_0^t j^2(\tau) d\tau = \int_0^t \left(\frac{I(\tau)}{\delta \cdot w_a} \right)^2 d\tau = \left(\frac{1}{\delta \cdot w_a} \right)^2 \int_0^t I^2(\tau) d\tau, \quad (1)$$

式中 $j(\tau)$ 为面电流密度, $I(\tau)$ 为加载电流, $\int_0^t I^2(\tau) d\tau$ 为电流平方积分.在设计电极初始尺寸时,为保证发射飞片的有效性,令飞片脱离时 t_f 的电作用量 $Q(t_f)/Q_b = k$.其中 Q_b 为电极材料爆炸电作用量, k 为自定义常数.则近似预估飞片速度 $u(t_f)$ 为

$$u(t_f) \approx \int_0^{t_f} \frac{p(\tau)}{\rho_0 \delta} d\tau \approx \int_0^{t_f} \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{I(\tau)}{w_a} \right)^2 \frac{1}{\rho_0 \delta} d\tau = \frac{\mu_0 \delta}{2\rho_0} \int_0^{t_f} \left(\frac{I(\tau)}{\delta w_a} \right)^2 d\tau = \frac{\mu_0 \delta}{2\rho_0} Q(t_f)$$

表1 电极初始尺寸设计参数

负载结构	$\int_0^t I^2(\tau) d\tau / \text{MA}^2 \cdot \mu\text{s}$	电极	$t_f / \mu\text{s}$	w_a / cm	δ / cm	$Q_b / \mu\text{s} \cdot \text{MA}^2 \cdot \text{cm}^{-4}$	k
PTS-1S	8.8	LY12铝	0.50	1.19	0.08	658	1.5
PTS-2S	2.2	LY12铝	0.50	0.81	0.058	658	1.5

2.3 加载电流波形设计

确定电极初始尺寸后,先计算对应的理想加载电流波形,再开展装置全电路模拟,设计相应的波形调节方案.

2.3.1 理想加载电流波形计算

大多数材料的拉格朗日声速随压力增加而增加,平滑上升的磁压力波将在电极和样品内逐渐会聚.为防止超高速飞片发射过程中形成冲击波,加快飞片内部温升,必须控制加载电流波形.2005年,Davis等^[12]在Z装置上开展电流波形调节时,假设电极加载面的压力波都同时到达冲击波形成的拉

$$= \frac{\mu_0 k Q_b}{2\rho_0} \delta, \quad (2)$$

式中 $p(\tau)$ 为加载压力, μ_0 为真空磁导率,文中电极材料LY12铝的初始密度 ρ_0 为2.784 g/cm³,初始纵波声速 C_0 为0.632 cm/μs.如要满足一维平面加载条件,则电极的宽度 w_a 应满足^[6]

$$w_a \geq (1-3)\delta + 2C_0 t_f. \quad (3)$$

参考式(1),对于确定的电流波形(电流平方积分为常数),电作用量一定时,厚度 δ 与宽度 w_a 成反比.再参考式(2),电作用量一定时,要提高发射飞片速度,则应增加电极厚度 δ ,降低过流宽度 w_a .然而,考虑到(3)式提出的一维平面加载限制,设计中不同负载结构的裕量不同.分别取单侧带状负载 $w_a = 3\delta + 3C_0 t_f$,对称带状负载 $w_a = 3\delta + 2C_0 t_f$.代入(1)式可得 $Q(t_f)$ 与厚度 δ 关系式分别为

$$Q(t_f) = \left(\frac{1}{\delta \cdot (3\delta + 3C_0 t_f)} \right)^2 \int_0^{t_f} I^2(\tau) d\tau, \quad (4)$$

$$Q(t_f) = \left(\frac{1}{\delta \cdot (3\delta + 2C_0 t_f)} \right)^2 \int_0^{t_f} I^2(\tau) d\tau. \quad (5)$$

再结合电极材料参数、电流特性和自定义常数可分别计算的电极初始尺寸如表1所示,其中认为对称带状负载的电流完全对称分布.

格朗日坐标位置 x_L .再结合材料等熵压缩参考线确定的压力-拉格朗日声速关系 $p(C_L)$ 反推理想的电极加载压力波形 $p(t)$,最后由负载结构参数 $S(t)$ 计算加载电流波形 $I(t)$.

根据前文所述负载结构和电极尺寸,可从电极材料的电导率和状态方程数据反演计算对应的理想加载电流波形.计算中为考虑磁扩散对磁压力波分布的影响,引入磁扩散深度 $d_{\text{diff}}(t)$.其由电极材料的电导率 σ 决定,具体计算方法很多,本文引用文献^[23]的相关实验数据开展计算.此外,考虑到其他未引入计算的因素,为保证无冲击形成,使到达样品的加载压力波形更平缓,引入延缓系数 f_s .

可由下式计算加载压力波形 $p(t)$ 对应的拉格朗日声速随时间的变化 $C_L(t)$

$$\begin{aligned} \frac{t}{f_s} + \frac{x_L - d_{\text{diff}}(t)}{C_L(t)} &= \frac{x_L}{C_{L0}} \\ \Rightarrow C_L(t) &= \frac{x_L - d_{\text{diff}}(t)}{x_L/C_{L0} - t/f_s}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 C_{L0} 为初始拉格朗日声速, 将 $C_L(t)$ 代入材料等熵参考线给出的压力-拉格朗日速度关系 $p(C_L)$ 可得加载压力波形 $p(t)$. 分析 (6) 式, 令其一阶导数为零, 得到峰值拉格朗日声速时对应的磁扩散速度 $v_{\text{diff}}(t)$ 和磁扩散深度 $d_{\text{diff}}(t)$ 的关系式 (7). 可知加载压力峰值由电导率方程和状态方程决定, 随 x_L 和 f_s 取值的选择而变化.

$$\begin{aligned} \frac{dC_L(t)}{dt} &= \frac{x_L - d_{\text{diff}}(t)}{x_L/C_{L0} - t/f_s} \\ &= \frac{-v_{\text{diff}}(t)(x_L/C_{L0} - t/f_s) + (x_L - d_{\text{diff}}(t))/f_s}{(x_L/C_{L0} - t/f_s)^2} \\ &= 0 \\ \Rightarrow v_{\text{diff}}(t)f_s &= \frac{x_L - d_{\text{diff}}(t)}{x_L/C_{L0} - t/f_s} \\ &= [C_L(t)]_{\text{max}}. \end{aligned} \quad (7)$$

对于不同电极尺寸的带状负载, 负载结构系数 $S(t)$ 引用文献 [17] 中的估算公式, 其随电极位移 $d_f(t)$ 和磁扩散深度 $d_{\text{diff}}(t)$ 变化, 可分别采用 (8), (9) 式计算 $S(t)$ 和理想电流加载波形. 式中 $B_Z(t)$

为电极表面磁感应强度历史, f 为电流表面分布系数, 不同负载结构和电极尺寸有差异, 可通过实验标定或三维动态电磁场模拟给出.

$$\begin{aligned} S(t) &= \sqrt{w + g + [d_f(t) + d_{\text{diff}}(t)]} \\ &\quad \times \{w_a g + (w_a - w)[d_f(t) + d_{\text{diff}}(t)]\} \\ &\quad \times \{\sqrt{w} \cdot f \cdot g\}^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$B_Z(t) = \sqrt{2\mu_0 p(t)}, \quad I(t) = S(t) \frac{B_Z(t)}{\mu_0}. \quad (9)$$

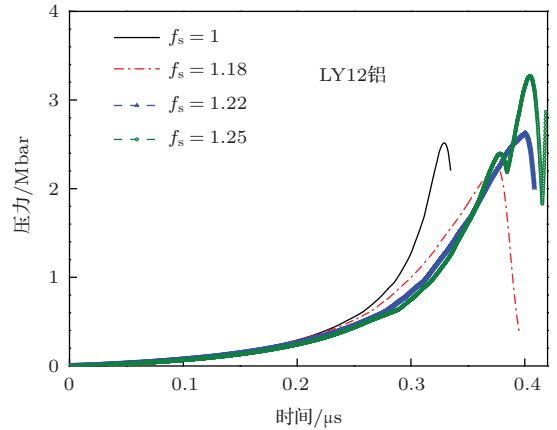


图4 不同时间延迟系数 f_s 对应的理想加载压力波形计算结果 ($x_L = 0.18$ cm)

假设形成冲击波的拉格朗日位置 x_L 为 0.18 cm, 采用电极材料 LY12 铝相关数据计算得到不同延缓系数 f_s 对应的理想加载压力波形如图 4 所示. 其中 $f_s = 1.18$ 对应的加载压力波形相对平滑, 容易实现, 可选用其计算理想加载电流波形.

表2 理想加载电流计算输入负载结构尺寸及其他参数

负载结构	w_a / cm	w / cm	H / cm	H_a / cm	$\delta_{1,2}$ / μm	x_L / cm	f_s	g / cm	f
PTS-1S	1.20	1.00	2.10	3.30	800/1100	0.18	1.18	0.12	0.846
PTS-2S	0.75	0.70	1.20	2.80	550/800	0.18	1.18	0.12	0.826

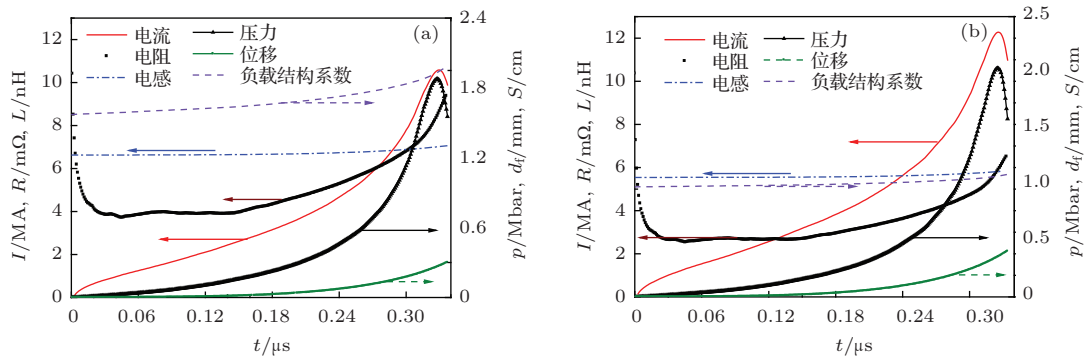


图5 理想电流波形计算结果 (a) PTS-1S 负载结构的理想加载电波形和其他主要参量计算结果 (R, L 分别为负载区电阻和电感); (b) PTS-2S 负载结构相关计算结果

表 2 给出了图 1 (a), (b) 两种 PTS 装置负载结构尺寸和其他输入参数, 理想加载电流波形计算结果分别如图 5 所示, 两种负载结构电极的加载压力峰值都在 2 Mbar 左右. 限于装置驱动电流和波形调节能力, 计算相对保守, 与 Davis 等计算结果 [12] 有差别. 单侧带状负载和对称带状负载的电流峰值分别为 10 MA 和 12 MA, 0—100% 上升时间~0.34 μs , 高于装置现在的加载水平, 在波形调节方案设计中, 还应有进一步调整.

2.3.2 波形调节方案

PTS 装置是典型的多支路汇流脉冲功率装置, 共 24 个电流支路, 经真空磁绝缘传输线后汇入负载, 电流波形调节主要依赖各支路分时放电. 对于

不同的电流波形需求, 将开展装置全电路模拟, 以设计合理的分时放电方案. 全电路模拟可采用装置全电路模型 [21] 或简化的电路方程 [19,20]. 装置各电流支路相互影响, 能量传输效率与负载电参数息息相关, 模拟中必须考虑负载电参数随加载电流的变化. 负载电阻的变化对整个电流回路的影响相对较小, 本文只考虑电感变化的影响.

负载的初始电感和电阻主要由图 1 (a) 所示汇流区和负载区两部分组成, 可分别由 Ansys 静态模拟分析给出. 负载电感变化 ΔL 主要由电极位移 $d_f(t)$ 引起, 电感增量 [17] 可采用下式估算:

$$\Delta L(t) \approx \frac{\mu_0 \cdot k \cdot H \cdot g \cdot w \cdot d_f(t)}{w_a(w_a g + (w_a - w)d_f(t))}. \quad (10)$$

表 3 全电路模拟中各路激光器出光时序

激光器编号	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
PTS-1S 触发时间	1620	1740	1620	1740	1620	1740	1620	1740	1620	1740	1620	1740
PTS-2S 触发时间	1620	1780	1740	1780	1690	1670	1620	1780	1750	1780	1680	1680
控制电流支路	1/23	4/6	3/5	8/10	7/9	12/14	11/13	16/18	15/17	20/22	19/23	2/24

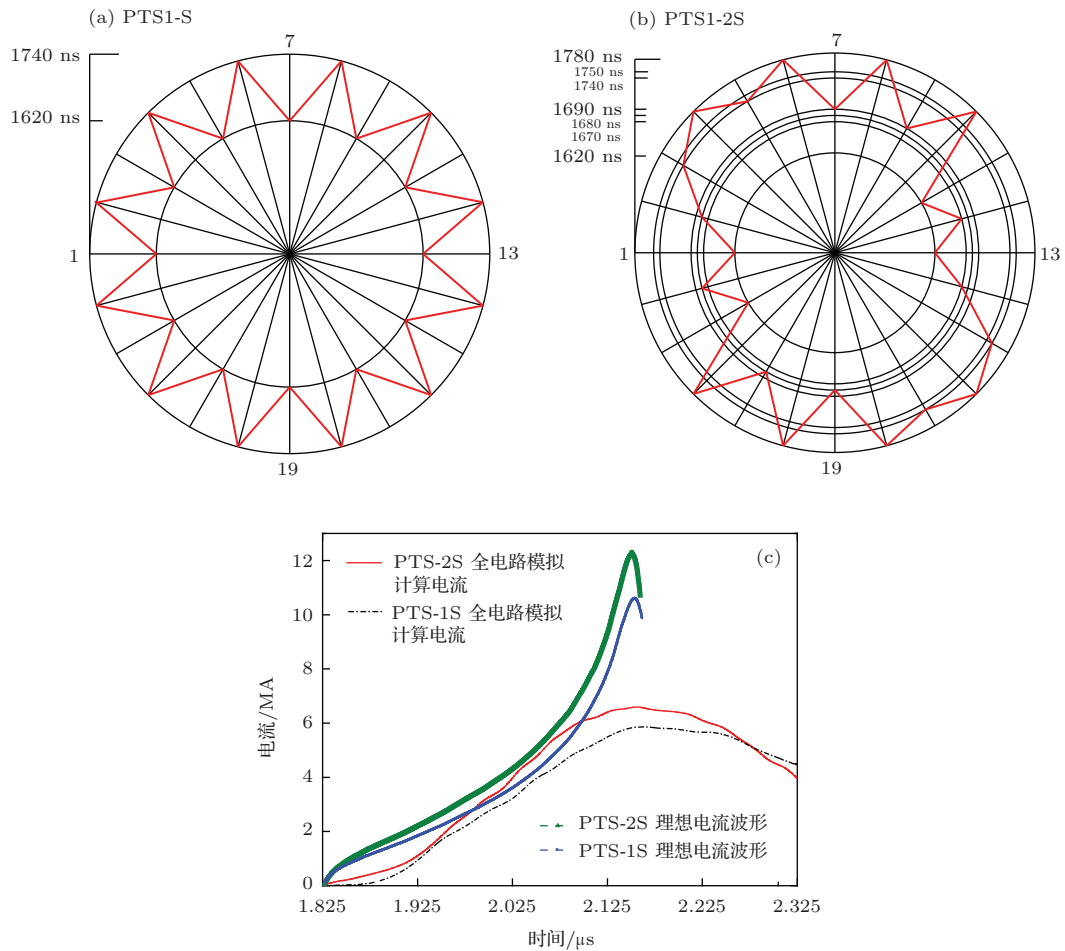


图 6 (网刊彩色) 装置全电路模拟支路放电时序和计算电流 (a), (b) 分别为两种负载结构时序的 24 个支路触发时序分布图, 便于分辨相邻和相对电流支路的触发时间差; (c) 全电路模拟计算电流波形与理想电流波形比较

参考图5给出的两种理想电流波形,设计了相应的波形调整方案.如表3所示,每2路电流支路激光触发开关由1个激光器触发控制,激光器出光时序分别为2组和7组.全电路模拟计算电流波形如图6所示,限于装置运行状态,与理想电流波形还有较大差距,能否用于开展实验,还需进行实验加载状态预估分析.

2.4 实验加载状态预估分析

按照前面所述负载结构、电极尺寸和电流波形开展实验加载状态预估分析,计算结果分别如图7所示.在对应的全电路模拟计算电流加载下,PTS-1S负载结构1100 μm厚飞片中的磁压力近0.9 Mbar,几乎形成冲击波;800 μm厚飞片速度可达近10 km/s,位移2.4 mm后的剩余固态厚度在200 μm以上.PTS-2S负载结构800 μm厚飞片不会形成冲击波,550 μm厚飞片的最高速度和剩余

固态厚度也达到10 km/s和200 μm以上,实验将参照上述设计开展.

2.5 诊断布置

如图8所示,超高速飞片发射实验中测量状态量主要有飞片不同位置的速度历史和负载电流波形.速度历史测量同时采用DPS和OMV^[24]两种全光纤位移干涉测速系统,受光学元件和数据采集器带宽的限制,DPS测速范围小于9.3 km/s.为满足超过10 km/s的飞片速度测量需求,OMV采用光波-微波混频技术降低了数据信号频率,测速范围超过20 km/s.另外,采用4点对称的B-dot磁探针^[25]开展负载电流波形测量.为关联测量数据之间的时序关系,PTS-1S负载结构实验中采用图8(c)所示触发时序控制系统,基于不同的信号电缆、光纤长度和发生时间设置触发时间,并采用高分辨示波器同时记录相关数据.

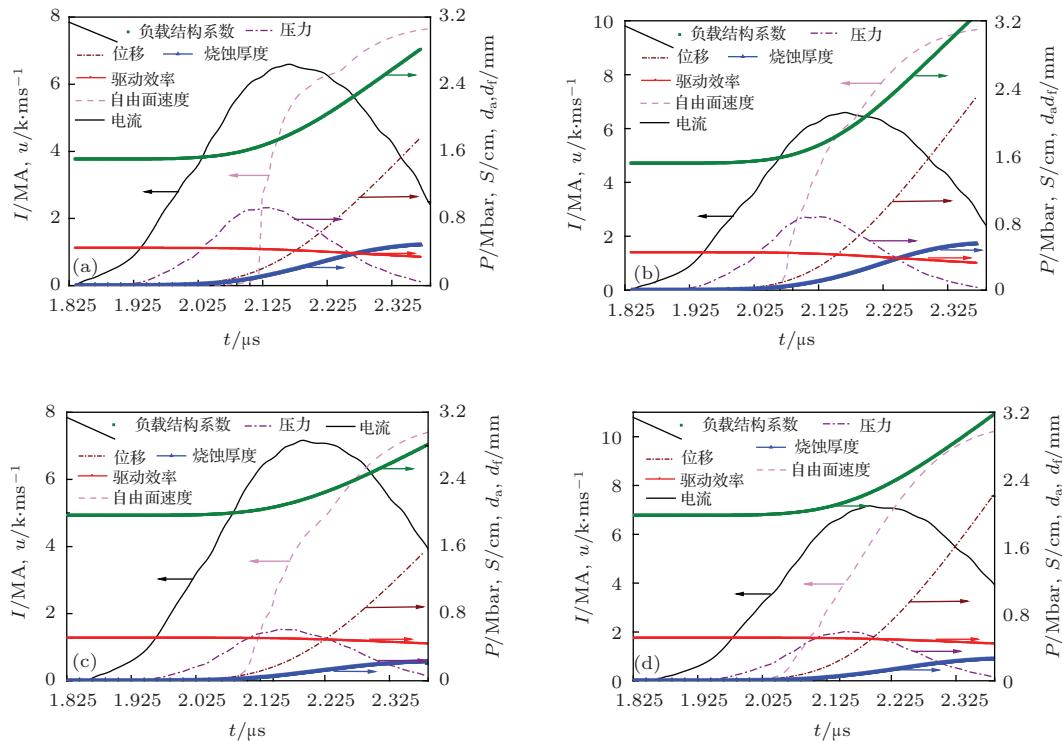


图7 (网刊彩色) 全电路模拟计算电流加载下的实验加载状态计算结果 (a) PTS-1S负载构型1100 μm厚飞片; (b) PTS-1S负载构型800 μm厚飞片; (c) PTS-2S负载构型800 μm厚飞片; (d) PTS-2S负载构型550 μm厚飞片

本文实验设计按以下步骤开展: 1) 首先根据装置负载电流波形基本特征确定负载初始电极尺寸; 2) 再根据负载结构、电极尺寸和实验需求等设计理想电流波形, 并开展装置全电路模拟确定波形调节

方案; 3) 然后开展实验加载状态预估分析验证实验方案可行性; 4) 验证可行则按照方案开展实验, 否则需重复步骤1—3) 优化实验方案; 5) 最后根据实验测量需求布置诊断系统.

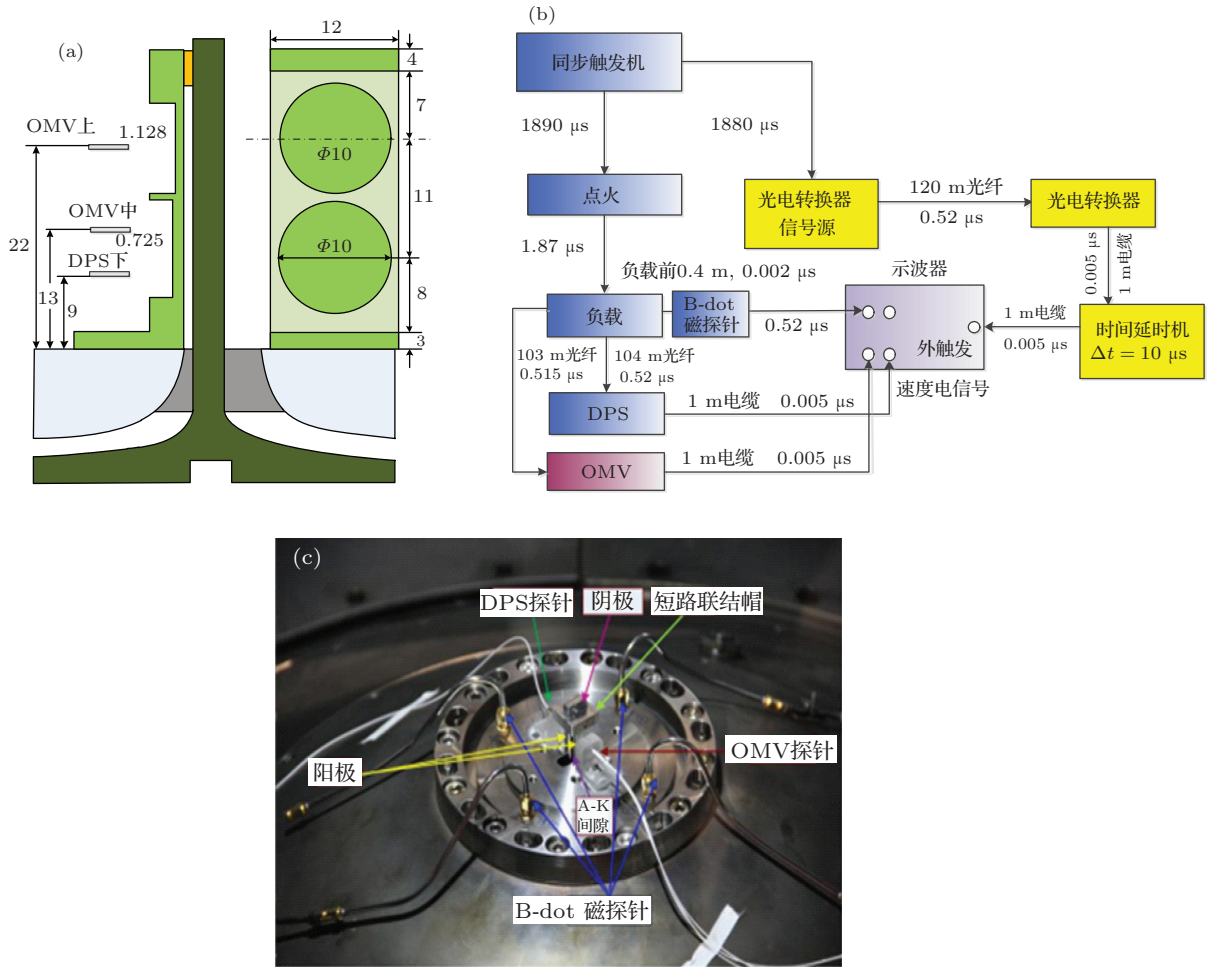


图8 PTS-1S负载结构实验的诊断系统 (a) 负载构型和电极尺寸及诊断探头安装位置(单位: mm); (b) 触发时序控制系统; (c) 负载和诊断布置实物图

3 实验测量结果验证分析及讨论

PTS0060和PTS0063实验分别按照上述两发实验设计方案开展,具体负载结构尺寸如表4所示.其中飞片加工厚度相对有偏差,间隙 g 也因其他实验需求有一定调整.

表4 实验负载结构尺寸及计算参数

实验发次	负载结构	w_a / cm	w / cm	H / cm	H_a / cm	$\delta / \mu\text{m}$	g / cm	f
PTS0060	PTS-1S	1.20	1.00	2.10	3.30	725/1128	0.10	0.802
PTS0063	PTS-2S	0.75	0.70	1.20	2.80	513/778	0.20	0.75

PTS0060实验中,尺寸 $\Phi 10 \text{ mm} \times 0.725 \text{ mm}$ 的LY12铝飞片速度在有加载电流后 $0.8 \mu\text{s}$ 达到 11.5 km/s ,整个发射速度历史与由实际测量电流开展的实验加载状态计算结果趋势基本相符.但在发生第一次反射附近的速度历程有较大差别,可能来源

两发实验电流和速度历史的测量结果分别如图9所示,其中时间坐标通过触发时序控制系统进行校正.实验测量电流波形与预测电流波形上升段基本一致,但由于全电路模拟中电感变化模型无法准确计算加载后期回路破坏、电感急剧增加的实际情况,实验测量到的缓慢降低电流波形模拟预测中并未出现.

主要有电流测量、速度测量及计算程序和引用数据本身等三个方面.而PTS0063实验中,厚度 0.513 mm 的飞片在初始反射后可能就完全脱离并整体加速,整个历程的速度历史与计算结果符合较好.另外,PTS0060实验加载电流波形比计算电流上升更

快, 在 1.128 mm 厚度飞片中形成了初始冲击波. 由此可知, 现在的电流波形调节能力还有限, 在实验设计中应留有裕量. 要提高装置驱动水平, 进一步提高电流波形调节能力是现阶段亟待解决的关键问题.

两发实验都是在电容器充电 60 kV 运行模式下开展的, 负载电流波形 0—100% 上升时间在 300—400 ns 之间调节时, 峰值可达 5—7 MA, 可发

射 10 mm 直径的铝飞片超过 10 km/s. 另外, 比较实验测量速度、负载电流历史和实验加载状态计算结果, 可推测 PTS0060 实验中单侧带状负载电极的加载压力峰值近 0.9 Mbar. 后续实验中电容器充电电压将提高到 65 kV, 负载电流有望进一步提升. 同时, 在提高电流波形可预测性的基础上, 可开展进一步的实验设计, 提高发射飞片速度, 下面简单作一下相关分析计算.

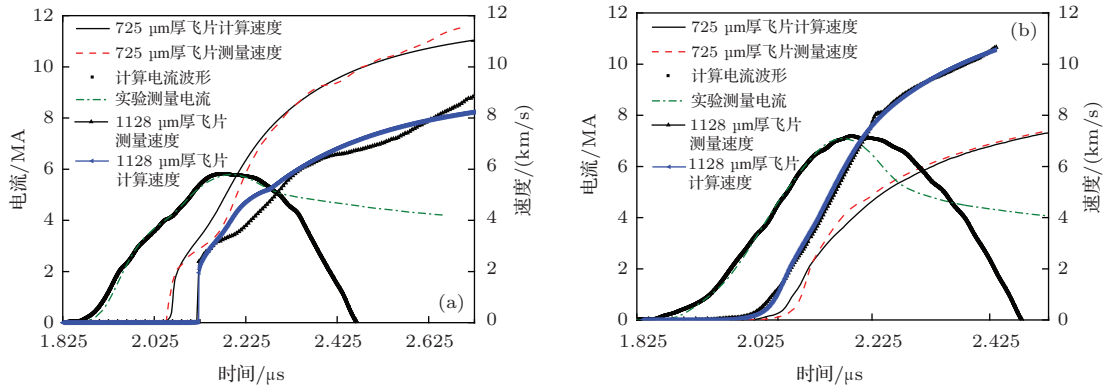


图 9 (网刊彩色) 两发实验与计算结果比较 (a) PTS0060 实验电流波形和不同厚度飞片的自由面速度历史与全电路模拟计算和实验加载状态计算结果比较, 基本相符; (b) PTS0063 相关实验测量结果与计算模拟结果也基本相符

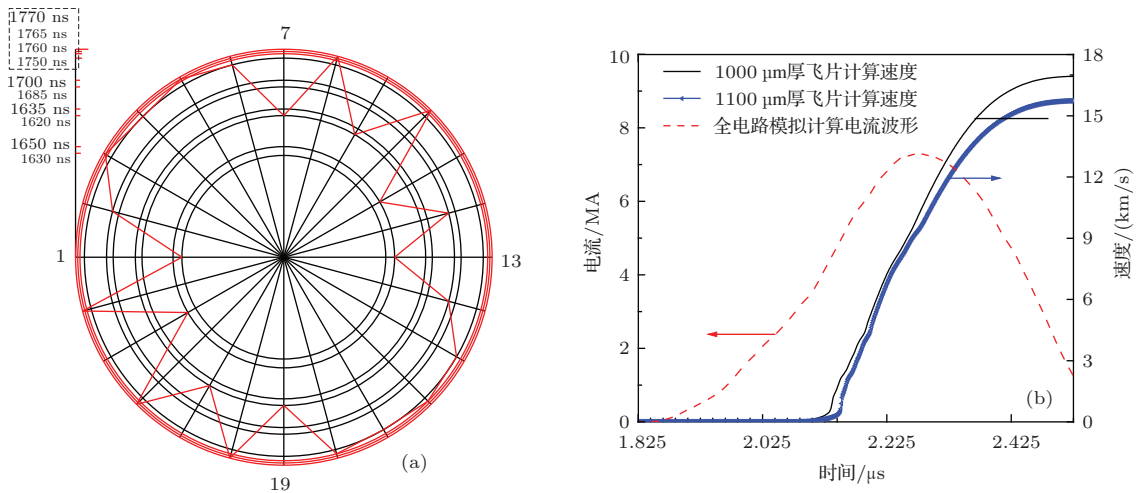


图 10 (网刊彩色) 充电电压 65 kV 下超高速飞片发射的激光触发时序优化方案和模拟计算结果 (a) 各电流支路触发时序; (b) 全电路模型计算电流波形和加载状态模拟预估飞片速度历史

表 5 电容器充电 65 kV 下的超高速飞片发射实验初始电极尺寸设计和负载结构尺寸等参数

负载	$\int_0^t I^2(\tau) d\tau / \text{MA}^2 \cdot \mu\text{s}$	电极材料	$t_f / \mu\text{s}$	w / cm	δ / cm	$Q_b / \mu\text{s} \cdot \text{MA}^2 \cdot \text{cm}^{-4}$	k
PTS-1S	10.33	LY12 铝	0.50	0.85	0.105	658	2
w_a / cm	w / cm	H / cm	H_a / cm	$\delta_{1,2} / \mu\text{m}$	g / cm	f_s	f
0.90	0.85	1.70	3.00	1000/1100	0.12	1.18	0.80

假设负载电流随充电电压增加线性增加, 估算电容器充电电压 65 kV 时电的流平方积分为 10.33 $\text{MA}^2 \cdot \mu\text{s}$. 在提高电流波形可靠性的前提下, 可取

PTS-1S 单侧带状负载过流宽度 $w_a = 2\delta + 2C_0T$, k 由 1.5 提升到 2, 计算得到初始电极尺寸如表 5 所示. 为防止形成类似 PTS0060 实验的初始冲击, 设

计加载电流波形更加平滑, 将激光触发时序分成10组, 优化的时序触发方案如图10(a). 全电路模拟计算负载电流波形和按照表5负载结构尺寸等参数预估的不同厚度飞片速度历史分别如图10(b)所示, 将有望发射尺寸 $\Phi 8.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的宏观铝飞片速度超过15 km/s.

4 结论及展望

本文主要介绍了基于聚龙一号装置的超高速飞片发射实验设计方法及相关实验结果. PTS0060和PTS0063两发实验都成功发射宏观固态铝飞片速度超过10 km/s, 测量速度历史与基于测量电流的预估趋势基本相符, 实验电流波形与全电路模拟设计波形在最重要的上升段基本一致, 从而验证了本文实验设计方法的可行性. 装置负载电流波形0—100%上升沿调节范围可从300 ns到600 ns, 结合波形调节方案设计, 在PTS0063实验中采用单侧带状结构负载成功发射尺寸 $\Phi 10 \text{ mm} \times 0.725 \text{ mm}$ 的LY12铝飞片速度达到11.5 km/s, 初步验证了聚龙一号装置开展超高速飞片发射实验的能力. 但电流波形的可预测性仍是现阶段实验的重要挑战, 实验设计中必须保持足够裕量. 如能提高电流波形可预测性, 进一步实验设计表明, 装置电容器充电65 kV时, 将有望发射尺寸 $\Phi 8.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的铝飞片速度超过15 km/s, 以开展更高压力水平下的材料状态方程研究.

感谢中物院脉冲功率科学与技术重点实验室PTS装置运行组成员的配合与帮助, 感谢中物院流体物理研究所102室翁继东博士、王翔研究员在诊断测量方面的帮助和指导.

参考文献

- [1] Liu H F 2009 *Physics*. **38** 920 (in Chinese) [刘海风 2009 物理 **38** 920]
- [2] Yu Y Y, Tan Y, Dai C D, Li X M, Li Y H, Tan H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 026202 (in Chinese) [俞宇颖, 谭叶, 戴诚达, 李雪梅, 李英华, 谭华 2014 物理学报 **63** 026202]
- [3] Tan Y, Yu Y Y, Dai C D, Yu J D, Wang Q S, Tan H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 036401 (in Chinese) [谭叶, 俞宇颖, 戴诚达, 于继东, 王青松, 谭华 2013 物理学报 **62** 036401]
- [4] Zhao X H, Zhao X, Gao Y, Xi S W, Su W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 118204 (in Chinese) [赵兴海, 赵翔, 高杨, 席仕伟, 苏伟 2011 物理学报 **60** 118204]
- [5] Luo B Q, Zhao J H, Sun C W, Mo J J, Huo J, Zhang X W, Wang G J, Tan F L 2012 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **26** 251 (in Chinese) [罗斌强, 赵剑衡,

- 孙承伟, 莫建军, 贺佳, 张兴卫, 王桂吉, 谭福利 2012 高压物理学报 **26** 251]
- [6] Sun C W, Zhao J H, Wang G J, Zhang H P, Tan F L, Wang G H 2012 *Advances in Mechanics* **42** 206
- [7] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, Stygar W A, Spielman R B, Pointon T D, Reisman D B, Toor A, Cauble R C 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 3587
- [8] Knudson M D, Desjarlais M P, Dolan D H 2008 *Science* **322** 1822
- [9] Lemke R W, Knudson M D, Davis J P 2011 *International Journal of Impact Engineering* **38** 480
- [10] Seidel D B, Langston W L, Coats R S, Knudson M D, Lemke R W, Davis J P, Pointon T D 2009 *Proceedings of IEEE Pulsed Power conference* Washington, USA, June 28–July 2, 2009 p1165
- [11] Ao T 2009 *Sandia National Laboratory Report No.* SAND 2009–0970
- [12] Davis J P, Deeney C, Knudson M D, Lemke R W, Pointon T D, Bliss D E 2005 *Phys. Plasma*. **12** 056310
- [13] Ao T, Asay J R, Chantrenne S, Baer M R, Hall C A 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 013903
- [14] Hereil P L, Lassalle F, Avriilaud G 2004 *AIP Conf. Proc.* Portland, USA, July 20–25, 2003 706 p1209
- [15] Wang G J, Luo B Q, Zhang X P, Zhao J H, Sun C W, Tan F L, Chong T, Mo J J, Wu G, Tao Y H 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 015117
- [16] Wang G H, Wang G J, Kan M X, Zhang H P, Zhao J H, Tan F L 2013 *Chinese Journal of Applied Mechanics* **30** 932 (in Chinese) [王刚华, 王桂吉, 阚明先, 张红平, 赵剑衡, 谭福利 2013 应用力学学报 **30** 932]
- [17] Wang G L, Li J, Zhang Z H, Wang G H, Zhou R G, Ou Y K, Yang L, Wang X, Zhang Z W 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **26** 015101 (in Chinese) [王贵林, 李军, 张朝辉, 王刚华, 周荣国, 欧阳凯, 杨亮, 王雄, 章征伟 2014 强激光与粒子束 **26** 015101]
- [18] Wang M, Guan Y C, Xia M H, Ji C, Liu Q N, Zou W K, Yang Z, Xie W P 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 777 (in Chinese) [王勳, 关永超, 宋盛义, 夏明鹤, 计策, 刘其能, 邹文康, 杨尊, 谢卫平 2010 强激光与粒子束 **22** 777]
- [19] Ding N, Zhang Y, Ning C, Shu X J, Xiao D L 2008 *Acta Phys. Sci.* **57** 3027 (in Chinese) [丁宁, 张扬, 宁成, 王勳, 束小建, 肖德龙 2008 物理学报 **57** 3027]
- [20] Zhao H L, Deng J J, Wang G H, Zou W K 2011 *Chin. Phys. B* **20** 105201
- [21] Xia M H, Ji C, Wang Y J, Wang M, Li F, Feng S P, Xie W P 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 2768 (in Chinese) [夏明鹤, 计策, 王玉娟, 王勳, 李逢, 丰树平, 谢卫平 2012 强激光与粒子束 **24** 2768]
- [22] Dan J K, Huang X B, Zhang S Q, Zhou S T, Ren X D, Duan S C, Ouyang K, Cai H C, Wang M, Feng S P, Xie W P, Deng J J 2013 *Proceedings of IEEE Pulsed Power conference* San Francisco, USA, June 16–21, 2013 p9 67
- [23] Sharp G T 2003 *Sandia National Laboratory Report No.* SAND 2002–3477
- [24] Weng J D, Wang X, Tao T J, Liu C L, Tan H 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 123114
- [25] Wei B, Gu Y C, Zhou R G, Yang L, Wang X 2007 *High Voltage Engineering* **33** 188 (in Chinese) [卫兵, 顾元朝, 周荣国, 杨亮, 王雄 2007 高电压技术 **33** 188]

Recent advances in hyper-velocity flyer launch experiments on PTS*

Wang Gui-Lin¹⁾²⁾ Guo Shuai²⁾ Shen Zhao-Wu¹⁾ Zhang Zhao-Hui^{2)†} Liu Cang-Li²⁾
Li Jun²⁾ Zhang Zheng-Wei²⁾ Jia Yue-Song²⁾ Zhao Xiao-Ming²⁾ Chen Hong²⁾
Feng Shu-Ping²⁾ Ji Ce²⁾ Xia Ming-He²⁾ Wei Bing²⁾ Tian Qing²⁾ Li Yong²⁾
Ding Yu²⁾ Guo Fan²⁾

1) (*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

2) (*Key laboratory of pulsed power, Institute of Fluid physics, CAEP, P.O.Box 919-108 Mianyang 621900, China*)

(Received 23 April 2014; revised manuscript received 4 June 2014)

Abstract

Magnetically driven loading technology is to load the large pulse current to the test area through the pulsed power, which forms a smooth magnetic pressure rising over time to achieve a quasi-isentropic compression of sample and hyper-velocity flyer launch. Based on the output characteristics and parameters of PTS accelerator, two types of hyper-velocity flyer launch experiments with different load configurations, such as the load, flyer plates size, current waveform and diagnostic systems, etc, are designed and tested. LY12 aluminum flyer plates with dimensions of $\Phi 10 \text{ mm} \times 0.725 \text{ mm}$ was launched by single-sided stripline load configuration to 11.5 km/s while the magnetic drive load pressure is near $0.9 \times 10^5 \text{ MPa}$. Simulation and experimental results agrees well with those of in the flyer launch process and the ultimate velocity. Further simulation shows that the launch velocity of aluminum flyer plates with dimensions of $\Phi 8.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ is expected to exceed 15 km/s under the program of optimizing the structural parameters and regulation. The design and experiment technology of hyper-velocity flyer launch based on multi-branch pulsed power generator has been mastered during the designs and experiments.

Keywords: magnetically driven loading, hyper-velocity flyer launch, single-sided stripline load, quasi-isentropic

PACS: 62.50.+p, 07.35.+k, 84.70.+p, 91.60.Gf

DOI: 10.7498/aps.63.196201

* Project supported by the Science Foundation of Institute of Fluid physics of CAEP, China (Grant No. SFZ20130203).

† Corresponding author. E-mail: johoney@sina.com