



·脉冲功率技术·

基于 PFN-Marx 技术的 200 keV 脉冲 X 射线源设计与实验*

耿力东¹, 谢卫平¹, 羊 强², 袁建强¹, 刘宏伟¹, 曹龙博¹, 韩文辉¹

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 基于 PFN-Marx 技术路线研制了 200 kV 脉冲驱动源, 采用了超前触发技术, 实现了在 40 Ω 水电阻负载上输出电压约 200 kV、前沿约 25 ns、脉冲宽度约 62 ns 的脉冲高压。设计了工作电压为 200 kV 的“Washer-Needle”型二极管, 在二极管电压 210 kV、电流 5 kA 条件下, 输出 X 射线脉冲宽度约 40 ns, X 射线焦斑直径 1.2 mm, 1 m 处照射剂量约 15 mR。

关键词: 脉冲 X 射线源; 200 keV; PFN-Marx; 脉冲驱动源; 闪光照相

中图分类号: TN14

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210573

Design and experiments of the 200 keV pulse X-ray source based on PFN-Marx technology

Geng Lidong¹, Xie Weiping¹, Yang Qiang², Yuan Jianqiang¹, Liu Hongwei¹, Cao Longbo¹, Han Wenhui¹

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999)

Abstract: The 200 keV X-ray pulser has a good surface density resolution when being used in the imaging diagnosis of high speed and low density regions in ejecta. Hence it has become one of the important technical diagnostics methods of ejecta. This paper develops a 200 keV pulse driver based on the PFN-Marx technology. Using a pre-trigger method, the 200 kV pulse of a 62 ns width and a 25 ns rise time is produced on the 40 Ω water resistance, A “Washer-Needle” type diode which can work under 200 kV voltage is also designed. When the diode operating voltage is 210 kV, the pulser outputs the X-ray pulse of a 40 ns width, a 1.2 mm spot size and a 15 mR dose at 1 m distance.

Key words: pulse X-ray source, 200 keV, PFN-Marx, pulsed power, flash X-ray radiography

脉冲 X 光机在纳秒时间范围内提供了强度较大的 X 射线^[1-2], 是实现高速运动物体瞬态成像的理想工具, 被广泛应用于国防工业爆轰过程诊断、电力行业架空电缆断裂状态检测、材料科学、生物和医学研究等^[3-6]。在材料微喷射研究中^[7-9], 利用 X 射线的强穿透性可获取爆轰冲击加载下材料表面喷射物变化情况。然而由于喷射物密度沿喷射方向具有明显的梯度特征, 需要开展百 keV 级的低能 X 射线源研制, 以观测高速低密度区域喷射物密度分布状态。因低能 X 射线源装置工作电压在数百千伏, 其二极管工作机制受空间电荷限制, 所以要求脉冲驱动源能够输出较快前沿的电压脉冲; 同时, 为保证实验数据的获取效率, 要求其高可靠地输出低抖动的 X 射线脉冲。基于上述应用需求, 本文研制了 200 kV 脉冲 X 射线源装置。驱动源采用 PFN-Marx 技术路线, 有效减少了驱动源回路电感, 提升了脉冲前沿, 产生 200 kV 脉冲高电压, 驱动“Washer-Needle”型二极管产生脉冲 X 射线^[10-11]。脉冲驱动源采用超前触发技术, 并进行了模块化设计, 降低了驱动源输出抖动以及建立时间。当采用匹配水电阻负载时, 获得了前沿约 20 ns, 脉冲宽度约 62 ns, 峰值为约 200 kV 的电压脉冲。在二极管加载电压约 210 kV、前沿约 15 ns 情况下, 获得了 1 m 处 X 射线剂量约 15 mR, X 射线焦斑尺寸 1.2 mm。设计的脉冲 X 射线装置不仅可以应用于微喷射实验研究中, 还可以应用于其它工业无损检测领域。

* 收稿日期: 2021-12-24; 修订日期: 2022-04-07

基金项目: 中国工程物理研究院流体物理研究所规划发展项目(TCGH025210)

联系方式: 耿力东, glidong809@126.com。

1 脉冲驱动源设计与实验

1.1 脉冲驱动源物理设计

脉冲驱动源采用 PFN-Marx 技术路线, 并进行模块化设计。图 1 所示, 整机由 12 个模块组成, 每个模块的储能单元选用参数为 50 kV/1 nF 的陶瓷电容器, 组成环形固态脉冲形成网络, 单模块等效阻抗约为 3 Ω 。

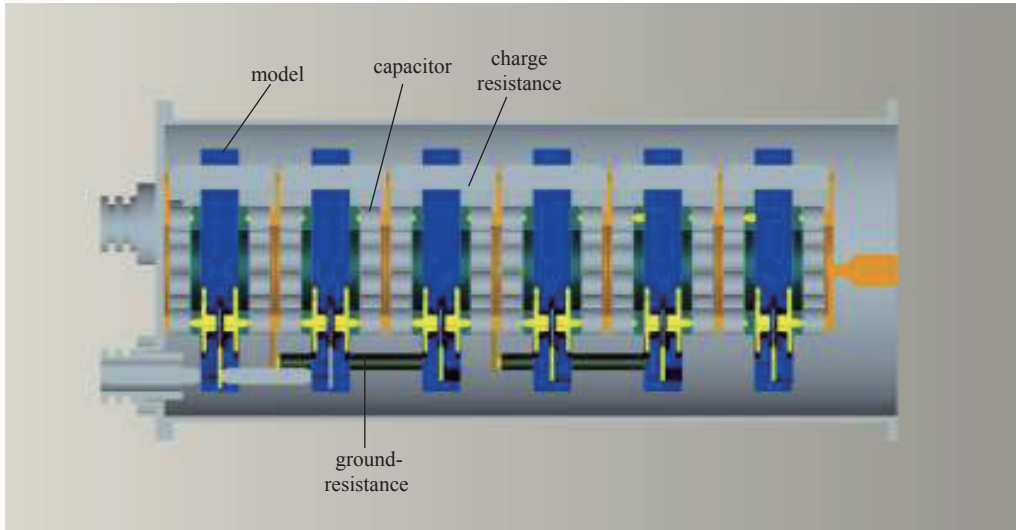


Fig. 1 Schematic of the pulsed power source

图 1 驱动源示意图

如图 2(a) 所示, 考虑脉冲 X 射线源二极管工作电压约为 200 kV, 设计建立 12 个模块的电路仿真模型。当模块充电电压为 ± 35 kV 时, 在 36 Ω 匹配电阻性负载上输出电压 210 kV, 脉冲宽度 68 ns, 上升前沿约 15 ns, 如图 2(b) 所示。

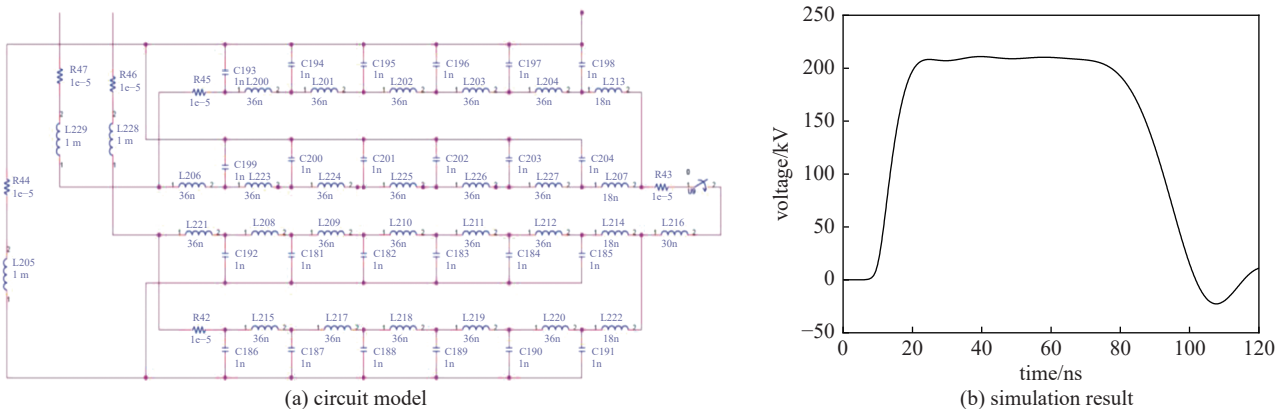


Fig. 2 The model and result of the simulation

图 2 仿真模型和结果

1.2 脉冲驱动源匹配负载实验

脉冲驱动源装置实物, 如图 3 所示。白色部分为绝缘支撑盘, 材质为超高分子量聚乙烯。一方面对两个模块之间进行高压隔离, 另外一方面为开关支撑结构。两个绝缘支撑盘采用三根绝缘拉杆交叉固定, 使得 6 个绝缘支撑板成为一体。超前触发连接采用 5 k Ω 陶瓷电阻, 且相邻两个绝缘板之间分别在开关左右两端馈入。

在 40 Ω 水电阻负载上开展功率源调试实验, 图 4(a) 所示。水电阻为有机玻璃封装氯化钾溶液, 经电感测量仪测试阻值为 40.5 Ω 。输出电压采用电阻分压器测量, 位于水电阻高压端, 采用小信号标定其灵敏度为 26.5 kV/V。电流测试采用 20 kA 标准线圈, 位于水电阻与后盖板连接轴上。典型的水电负载下电压和电流实验波形如图 4(b) 所示。

典型实验数据如表 1 所示。实验结果表明, 当充电电压为 ± 30 kV 时, 在 40 Ω 水电阻负载上输出电压在 190~225 kV, 脉冲前沿 19~20 ns, 脉冲宽度 60~65 ns。

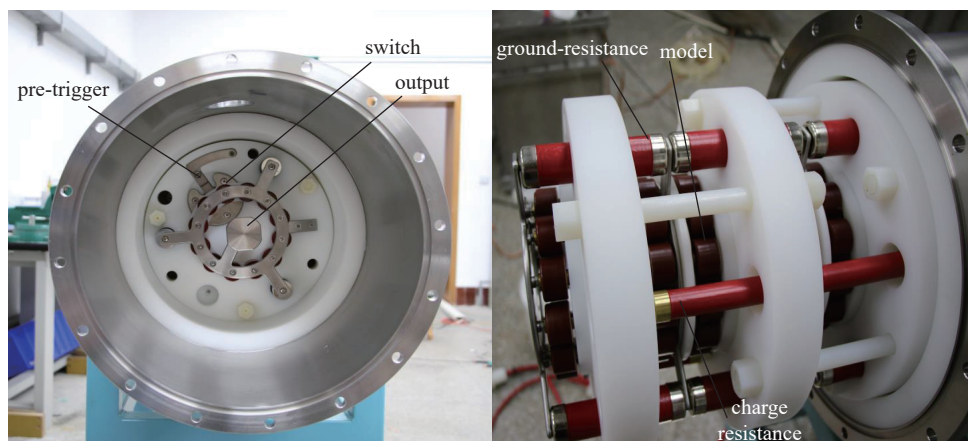


Fig. 3 The device for pulsed power

图 3 脉冲驱动源装置

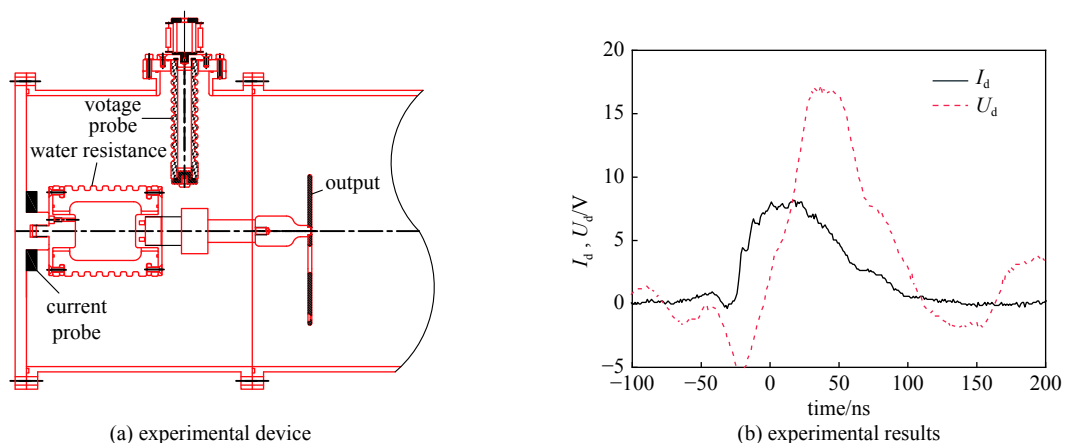


Fig. 4 The experimental results for the water resistance

图 4 水电负载实验结果

表 1 脉冲驱动源实验

Table 1 The experiment of the pulsed power source

shot	charge voltage/kV	load voltage/kV	rise time/ns	pulse width/ns
1	±31	205.6	21	65
2	±30	202.9	19	63
3	±30	191.7	21	61
4	±30	191.7	20	61
5	±31	224.3	20	60
6	±30	192.3	20	64
7	±31	203	19	64
8	±30	192.2	20	62

2 二极管设计与脉冲 X 射线源实验

2.1 二极管物理设计

二极管采用“Washer-Needle”结构，图 5 所示。该结构的二极管物理工作机制受空间电荷效应限制，电子运动轨迹沿径向电位运动。在非相对论条件下，圆柱结构二极管空间电荷限制电流近似由 Langmuir 空间电子流 I_{SCL} 决定，关系为

$$I_{SCL} = 14.7(L/k^2 r_a)V^{3/2}(\text{kA}) \quad (1)$$

式中： L 为阴极发射面长度， k 为与二极管结构相关的参数，

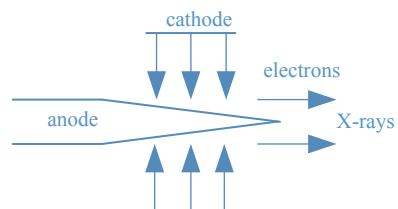


Fig. 5 Schematic of the “Washer-Needle” structure

图 5 “Washer-Needle 二极管结构”

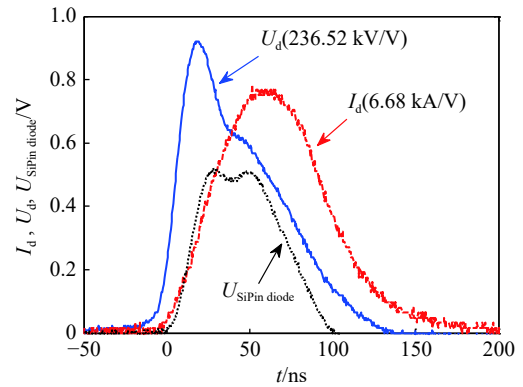
r_a 为阳极半径, V 为二极管工作电压。事实上, 由于电子在阳极杆上能量沉积产生阳极等离子体, 阳极离子发射进入阴阳极间隙, 增大了二极管工作电流。该增加系数在类似的同轴二极管中约为 1.86 倍。因此, 可以用式(1)近似估算阴阳极电流^[12], 进而确定初步的二极管几何结构尺寸。阳极杆采用 $r_a=0.8$ mm 的钨杆。阴极发射体采用不锈钢材质的刀口型阴极, 发射面长度 $L=0.8$ mm, 内孔 $r_c=1.5$ mm。其 1/4 圆弧段为聚焦电极, 使得大部分电子沉积在削尖的阳极杆段。

2.2 脉冲 X 射线源实验结果

脉冲 X 射线源实验装置如图 6(a) 所示, 实验中二极管电压电流分别采用 D-dot 和 B-dot 测试, 其小信号标定灵敏度分别为 236.52 kV/V 和 6.68 kA/V。X 射线照射剂量测试采用 LiF 探测器, 放置在 30 cm 位置处。X 射线脉冲宽度采用 Si-Pin 二极管测试, 位置距离光源点 2 m, Si-PIN 二极管加载偏压为 400 V; X 射线焦斑采用小孔成像法测试, 孔尺寸为 0.2 mm。典型的二极管电压、二极管电流和 X 射线脉冲宽度如图 6(b) 所示。二极管输出电压约 210 kV, 前沿约 15 ns, 电流约 5 kA, X 射线脉冲宽度约 40 ns。



(a) experimental device



(b) experimental results

Fig. 6 The experimental device and the experimental results of soft X-ray

图 6 200 keV 脉冲 X 射线源装置及实验结果

采用小孔成像法测试的 X 射线焦斑如图 7 所示。其有效直径为 1.2 mm。照射剂量测试外推至 1 m 处为 15 mR。

为了测试阳极杆烧蚀对输出稳定性的影响, 对单个阳极杆开展了 10 次实验, 测试二极管稳定性及抖动。其结果如图 8 所示。实验结果表明, 二极管电压极差抖动约 35 ns, 此时对应的二极管电压幅值在 195~210 kV 之间。

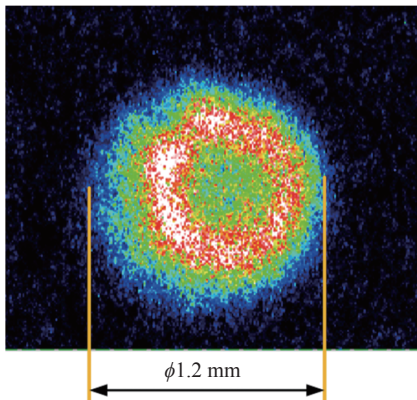


Fig. 7 The result of the X-ray spot size

图 7 焦斑测试结果

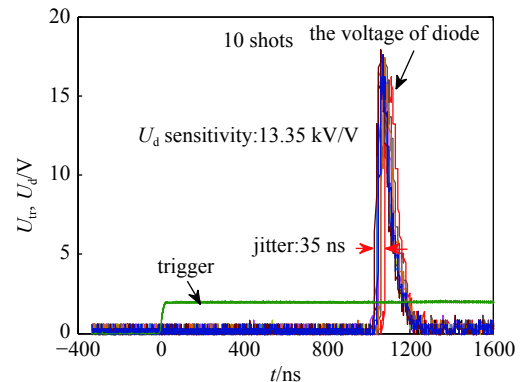


Fig. 8 The experimental result of the jitter

图 8 抖动实验结果

3 结论

本文针对材料微喷射高速低密度区域 X 射线成像需求, 研究了 200 keV 脉冲 X 射线源脉冲功率源与二极管关键技术。脉冲驱动源采用模块化设计的 PFN-Marx 技术路线, 并采用超前触发技术, 满足了脉冲驱动源低抖动输出要求。在 40Ω 负载、模块充电电压为 ± 30 kV 条件下, 脉冲驱动源输出电压约 200 kV, 脉冲前沿约 20 ns, 脉冲宽度约 62 ns。在此基础上, 设计了 200 keV 二极管, 并开展了 X 射线产生实验。在模块充电电压 ± 30 kV 下, 二极管电压达 210 kV, 电流约 5 kA, 产生的 X 射线脉冲宽度约 40 ns, X 射线焦斑直径 1.2 mm, 在距离 X 射线光源点 1 m 处

X 射线剂量约 15 mR。该项研究成果将为材料在冲击加载下高速低密度区域喷射物密度分布提供有效的诊断技术,在工业检测领域也有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 吴红光, 曹科峰, 梁川, 等. 150 kV 脉冲 X 光机[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 941-944. (Wu Hongguang, Cao Kefeng, Liang Chuan, et al. 150 kV pulsed X-ray system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 941-944)
- [2] 梁川, 席璐璐, 周林, 等. 便携式 150 kV 闪光 X 光源研制及应用[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 045033. (Liang Chuan, Xi Lulin, Zhou Lin, et al. Investigation and application of a portable 150 kV flash X-ray system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 045033)
- [3] Morgan D V, Grover M, Macy D, et al. Observations of shock-loaded tin and zirconium surfaces with single-pulse X-ray diffraction[J]. *Powder Diffraction*, 2010, 25(2): 138-142.
- [4] Gupta Y M, Zimmerman K A, Rigg P A, et al. Experimental developments to obtain real-time X-ray diffraction measurements in plate impact experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(10): 4008-4014.
- [5] 田慧, 栗保明. 用于弹道研究的脉冲 X 射线诊断系统[J]. *试验技术与试验机*, 2008, 48(2): 62-66. (Tian Hui, Li Baoming. A flash X-ray diagnosis system for ballistics study[J]. *Test Technology and Testing Machine*, 2008, 48(2): 62-66)
- [6] 张小强, 赵光义, 周林, 等. 500 kV 亚纳秒脉冲 X 光机研制[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 025004. (Zhang Xiaoqiang, Zhao Guangyi, Zhou Lin, et al. Design of 500 kV sub-nanosecond pulsed X-ray generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 025004)
- [7] Zellner M B, Grover M, Hammerberg J E, et al. Effects of shock-breakout pressure on ejection of micron-scale material from shocked tin surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102: 013522.
- [8] Zellner M B, McNeil W V, Hammerberg J E, et al. Probing the underlying physics of ejecta production from shocked Sn samples[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: 123502.
- [9] Monfared S K, Buttler W T, Frayer D K, et al. Ejected particle size measurement using Mie scattering in high explosive driven shockwave experiments[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117: 223105.
- [10] Morgan D V, Macy D, Stevens G. Real-time X-ray diffraction measurements of shocked polycrystalline tin and aluminum[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79: 113904.
- [11] Johnson Q, Mitchell A C. Flash X-ray tube for diffraction studies on a two-stage light-gas gun[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1980, 51(6): 741-749.
- [12] Boyer C N, Holland G E, Seely J F. Intense source of nanosecond duration 10-keV to 250 keV X rays[C]//Proceedings of SPIE 4781, Advances in Laboratory-Based X-Ray Sources and Optics III. 2002: 42-53.