

文章编号: 1001-4322(2010)04-0936-05

## 感应电压叠加器驱动阳极杆箍缩 二极管型脉冲 X 射线源\*

孙凤举, 邱爱慈, 杨海亮, 曾江涛, 盖同阳, 梁天学, 尹佳辉, 孙剑锋, 丛培天,  
黄建军, 苏兆峰, 高 屹, 刘志钢, 姜晓峰, 李静雅, 张 众, 宋顾舟, 裴明敬, 牛胜利

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要:** 介绍了自行研制的用于闪光照相且基于感应电压叠加器和阳极杆箍缩二极管的 X 射线源的组成、结构和主要参数。输出电压 3 MV 的 Marx 发生器给阻抗 7.8  $\Omega$  水介质脉冲形成线充电, 产生脉宽约 70 ns, 电压约 1 MV 的高功率脉冲, 经过峰化开关和预脉冲开关后分成 3 路馈入三级感应电压叠加器感应腔进行电压叠加, 感应电压叠加器次级采用真空绝缘传输线, 阻抗从 40  $\Omega$  变成 60  $\Omega$ , 驱动阳极杆箍缩二极管, 二极管阴极为石墨, 阳极为直径 1.2 mm 的钨杆, 石墨阴极产生的电子束在电流自磁场作用下发生箍缩, 轰击阳极, 产生小焦斑脉冲 X 射线。该装置在 Marx 充电电压为  $\pm 35$  kV 时, 二极管电压约 2.0 MV, 二极管电流约为 50 kA, 半高宽约 80 ns; X 射线半高宽约为 40 ns, 剂量约为 28 mGy, 焦斑约为 0.95 mm。利用该 X 射线源拍摄到了炸药爆炸产生的层裂碎片不同飞行时间的图像。

**关键词:** 感应电压叠加器; 阳极杆箍缩二极管; 闪光照相; 层裂碎片; 脉冲 X 射线

**中图分类号:** TM274 **文献标志码:** A **doi:** 10.3788/HPLPB20102204.0936

高能脉冲 X 射线闪光照相可以透视高速运动物质的结构、状态及演化过程, 是高性能爆炸流体力学试验诊断需求的关键技术, 可用于诊断材料在高温、高压下的流体力学特性<sup>[1-3]</sup>。感应电压叠加器(IVA)采用模块化结构, 增加串联级数可方便提高输出电压, 次级采用真空绝缘或磁绝缘同轴传输线, 很容易与强聚焦电子束二极管连接, 而其绝缘要求和电感比相同电压单级结构绝缘堆小<sup>[4]</sup>; 阳极杆箍缩二极管(RPD)可在单间隙同时完成电子束的产生、加速、聚焦及打靶, 获得焦斑直径小于 1 mm 的高能脉冲 X 射线<sup>[5]</sup>。IVA 驱动 RPD 型闪光照相加速器是国际上近年发展起来的一种新型脉冲 X 射线闪光照相技术, 代表性装置为美国 Cygnus 双轴 IVA 型加速器<sup>[6-8]</sup> 和英国原子能武器研究中心(AWE)正在研制的 HRF 加速器<sup>[9-10]</sup>。为了获得更高的 X 射线照射亮度和亚 mm 直径的 X 射线焦斑, 二极管电压要求达到 10~20 MV, 并需要研制新型高阻抗高效多脉冲二极管, 以实现爆炸区域多角度多脉冲照相。美国圣地亚国家实验室(SNL)、美国海军实验室(NRL), 英国 AWE 和法国国防部等积极开展 IVA 型闪光照相脉冲 X 射线装置研究。如美国 SNL 拟研制 12 个感应腔的综合闪光照相试验 RITS 装置, 指标为 16 MV, 70 ns, 150 kA, 目前已研制成功 6 个感应腔串联(RITS-6)装置<sup>[11]</sup>。英国 AWE 与美国 SNL 等研究机构合作, 制定了研制 14 MV, 140 kA, 60 ns 的三轴 IVA 型照相装置 HRF 研究计划<sup>[10]</sup>。本文给出了西北核技术研究所自行研制的三级感应腔串联输出电压 2 MV 的 IVA 及 RPD 型脉冲 X 射线源的组成、结构、主要参数和调试结果。

### 1 IVA/RPD 脉冲 X 射线源的组成

自行研制的感应电压叠加器驱动的阳极杆箍缩二极管(IVA/RPD)型脉冲 X 射线源照片和组成分别如图 1 和图 2 所示, 主要由低电感 Marx、水介质脉冲形成线(PFL)<sup>[12]</sup>、平板传输线、IVA 感应腔<sup>[13]</sup>、真空绝缘传输线(VITL)和 RPD 二极管组成。Marx 发生器标称输出电压 3.3 MV, 采用变压器油绝缘, 正负充电, 由 33 个火花开关和 66 个高压电容器(50 kV/0.44  $\mu$ F) 按 S 型排列串联构成。Marx 首排开关采用并联外触发, 开关为四电极紫外预电离-场畸变开关, 其余开关采用排间过电压触发。发生器串联等效电容 6.7 nF、电感 5.5  $\mu$ H、等效串联电路约为 6  $\Omega$ , 建立时间约 150 ns, 抖动约 2 ns, 脉冲形成线(PFL1)充电至峰值电压时间约 300

\* 收稿日期: 2009-11-06; 修订日期: 2010-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477019, 50637010, 10775112, 19975037)

作者简介: 孙凤举(1967—), 男, 山东济阳人, 博士, 副研究员, 主要从事脉冲功率技术应用研究; sun-feng-ju@126.com。

ns;PFL1,PFL2 为阻抗  $7.8 \Omega$ ,形成的电脉冲宽度为  $66 \text{ ns}$ ;WS 为圆管截面对平面电极的水介质开关,间隙长度为  $2\sim 13 \text{ cm}$  可调;PS 为水介质峰化开关,距离  $6\sim 8 \text{ mm}$  可调;PFL3 为从阻抗  $7.8 \Omega$  过渡到  $5.6 \Omega$ ,电气传输时间为  $35 \text{ ns}$ ;PFL4 为阻抗从  $5.6 \Omega$  过渡到  $4.5 \Omega$ ,以便与 IVA 感应腔阻抗匹配;预脉冲油开关位于阻抗  $4.5 \Omega$  平板传输线入口处,开关间隙距离约  $2 \text{ mm}$ ;VITL 为真空绝缘传输线。



Fig. 1 Photo of pulsed X-ray source based on IVA/RPD

图 1 IVA/RPD 脉冲 X 射线源照片

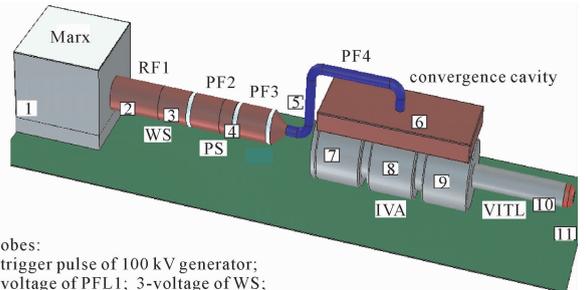


Fig. 2 Layout of the measuring probes and main parts of X-ray source  
 probes:  
 1-trigger pulse of 100 kV generator;  
 2-voltage of PFL1; 3-voltage of WS;  
 4-voltage of peaking switch; 5-voltage of PFL4; 6-voltage of Tri-plate TL;  
 7-current of No.1 cell; 8-current of No.2 cell; 9-current of No.3 cell;  
 10-voltage of RPD; 11-current of RPD

图 2 IVA/RPD 脉冲 X 射线源电气参数测量探头布局示意图

表 1 给出了脉冲源主要探头的灵敏度,表 2 给出了 RPD 二极管在 Marx 不同充电电压的调试结果。脉冲 X 射线源主要电气参数共 11 个,其对应物理量、探头类型和灵敏度列于表 1,剂量采用防化研究院生产的 GR-200A 热释光剂量片测量;X 射线脉宽采用 ST401 闪烁体+GD40 光电管测量。

表 1 IVA/RPD 脉冲 X 射线源电气参数测量探头

Table 1 Style and sensitivity of probes

| No. | probe style        | sensitivity         |
|-----|--------------------|---------------------|
| 1   | resistor divider   | $11.0 \times 10^3$  |
| 2   | capacitive divider | $11.0 \times 10^3$  |
| 3   | capacitive divider | $9.5 \times 10^3$   |
| 4   | capacitive divider | $7.7 \times 10^3$   |
| 5   | capacitive divider | $145.0 \times 10^3$ |
| 6   | capacitive divider | $134.0 \times 10^3$ |
| 7   | Rogoski coil       | $1.4 \times 10^3$   |
| 8   | Rogoski coil       | $1.4 \times 10^3$   |
| 9   | rogoski coil       | $1.4 \times 10^3$   |
| 10  | capacitive divider | $350.0 \times 10^3$ |
| 11  | Rogoski coil       | $1.2 \times 10^3$   |

表 2 不同 Marx 电压下 RPD 实验结果

Table 2 Experimental results of RPD

| shots | Marx voltage/kV | RPD current/kA | RPD voltage/MV | X-ray FWHM/ns | 1 m dose/mGy |
|-------|-----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|
| 008   | 20              | 29.0           | 1.2            | 55.4          | 6            |
| 009   | 25              | 35.6           | 1.5            | 55.0          | 11           |
| 029   | 30              | 44.2           | 1.8            | 44.2          | 19           |
| 036   | 35              | 51.2           | 2.1            | 41.6          | 27           |
| 039   | 35              | 52.2           | 2.0            | 40.2          | 28           |

## 2 IVA/RPD 脉冲 X 射线源主要参数

首先进行了 IVA 脉冲功率源连接  $60 \Omega$  电阻负载实验<sup>[14]</sup>,在 Marx 充电  $\pm 45 \text{ kV}$  时,PFL 形成线电压约  $2.6 \text{ MV}$ ,研究了圆管状阴极对平板状阳极水介质主开关的击穿特性,以及自击穿峰化水开关和预脉冲油开关合适的间隙距离<sup>[12]</sup>。在 Marx 充电电压分别为  $\pm 20, \pm 25, \pm 30, \pm 35 \text{ kV}$  时,通过改变 RPD 阴阳极结构、环状阴极直径、阳极杆及其支撑杆的直径和长度等诸多参数,调节脉冲功率源的开关状态,以 X 射线剂量、能量和焦斑尺寸为主要判据,寻找合适的 RPD 工作条件。不同 Marx 充电电压下 RPD 的电流波形如图 3 所示,可以看出,RPD 二极管电流基本按照 Marx 充电电压的比例线性增加。以 036 发为例,在 Marx 充电电压为  $\pm 35 \text{ kV}$

时的 IVA 加速器水线上的典型波形如图 4 所示,RPD 二极管电压、电流波形如图 5 所示,X 射线波形如图 6 所示。

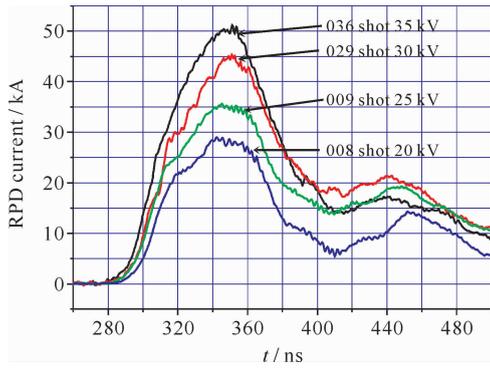


Fig. 3 Current of RPD at different charging voltage of Marx  
图 3 不同 Marx 电压下的二极管电流

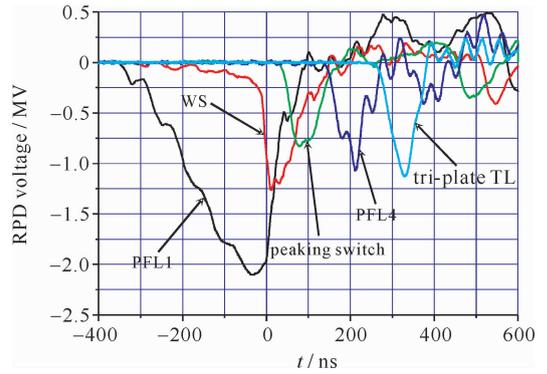


Fig. 4 Typical output waveforms at 35 kV charged Marx  
图 4 Marx 充电±35 kV 的 IVA 波形

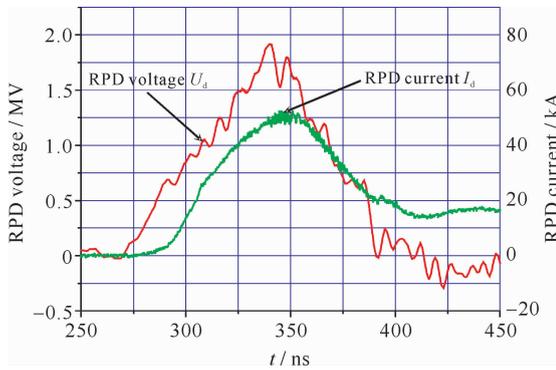


Fig. 5 Typical waveforms for RPD at Marx charging voltage of 35 kV  
图 5 RPD 二极管电压电流与 X 射线波形

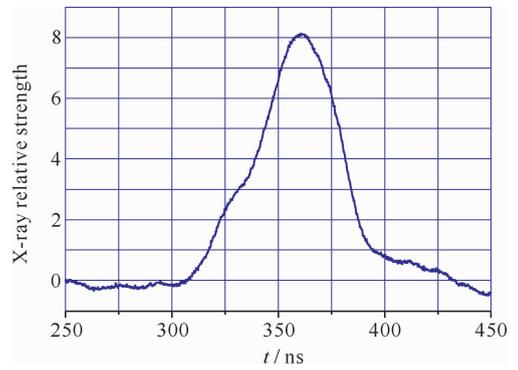


Fig. 6 Typical waveform of X-ray pulse  
图 6 X 射线波形

从 Marx 充电电压为±35 kV 的 036 发典型实验波形得到,二极管电压峰值 2.1 MV,二极管电流峰值 51 kA,半宽 74 ns,X 射线半宽 42 ns。热释光剂量片测得该炮 1 m 处剂量为 27.5 mGy。

在 Marx 充电电压为±35 kV,RPD 采用直径 1.2 mm 针尖,采用针孔成像法测得的典型焦斑图像如图 7 所示,图 7(a)为 CCD 相机记录原始图像,(b),(c),(d)分别为依次去除伽玛噪声、高斯噪声和背景噪声的图像,(e)为图(d)对应的两值图,不对称性<3%,X 射线焦斑直径约 0.95mm,(f)为图像(a)减去(d)的剩余噪声。利用铁、钨台阶测量对 X 射线的响应,钨台阶厚度 18 mm,均分为 6 个台阶,台阶高度 5 mm;铁台阶厚度 50 mm,均分为 11 个台阶,台阶高度 5 mm,图像灰度值可以反映射线透射后的强度。准直器后加 1.5 mm 钽片与 1mm 铁片,X 射线能谱经钽片、铁片以及爆炸罐窗口材料窄化,测试钨和铁台阶的 X 射线响应图像如图 8,计算出铁台阶对应的等效单能  $E_x=0.75$  MeV,钨台阶对应的等效单能  $E_x=0.743$  MeV。

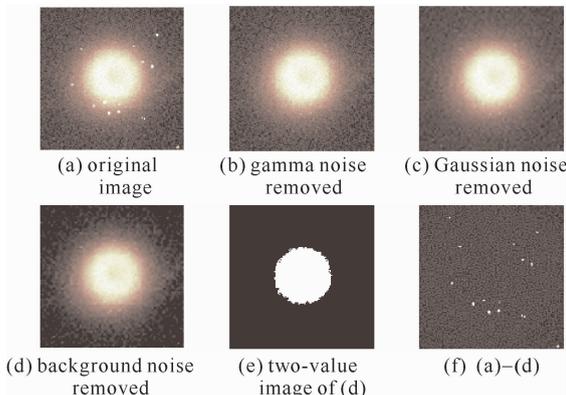


Fig. 7 Focus spot of X-ray with 1.2 mm rod and image process  
图 7 1.2 mm 针尖焦斑图像及处理过程图像

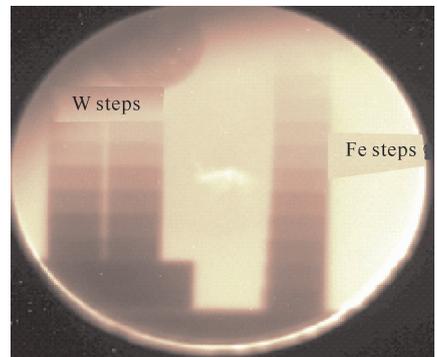


Fig. 8 Radiography of Fe and W Steps  
图 8 070042 炮 Fe,W 台阶 X 射线透射图像

### 3 层裂碎片闪光照相

闪光照相实验总体布局如图 9 所示,主要由调节平台、屏蔽体、准直系统和二极管爆室成像记录系统、爆炸罐等组成。

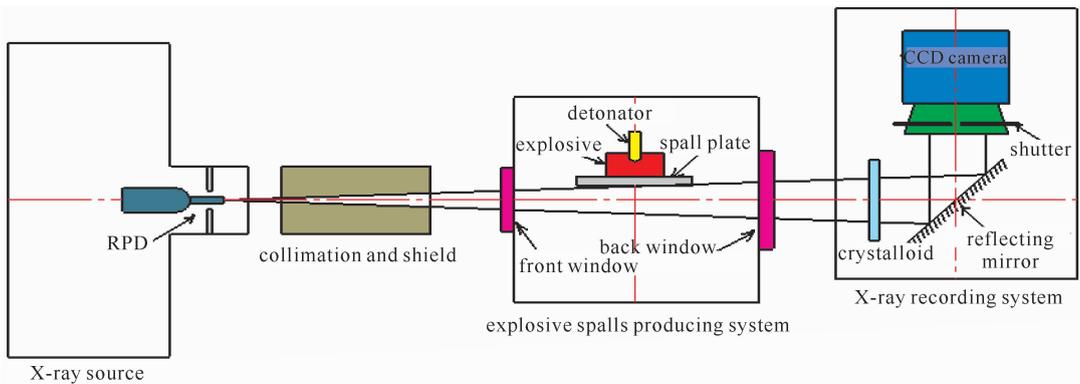


Fig. 9 Experimental setup of spalls radiography

图 9 层裂碎片照相实验总体布局

在 RPD 调节对中、X 射线光路准直、调节成像记录系统后,安装雷管、炸药,解除雷管起爆锁。启动控制台电源,依次给 100 kV 触发器和雷管起爆器通电,Marx 升压到设定值,按触发按钮,一路信号启动 X 射线成像记录系统,打开相机快门;另一路信号延迟 0.5 s 启动雷管起爆器、雷管起爆引爆炸药,从炸药爆炸探针取得信号,经过整形处理,启动延时器(DG535),依次触发 100 kV 触发器、Marx 发生器,脉冲形成线(PFL)水线开关依次击穿,IVA 产生高电压脉冲到 RPD 二极管,产生小焦斑脉冲 X 射线,经过爆炸罐窗口到成像记录系统。从炸药爆炸信号产生到 100 kV 触发信号系统固有的延迟时间目前约为  $8 \mu\text{s}$ ,抖动约  $0.5 \mu\text{s}$ 。Marx 充电  $\pm 30 \text{ kV}$  时连续运行 16 发,脉冲 X 射线源从触发器 100 kV 输出到 X 射线出射的总体延迟时间约 896 ns,标准偏差为 12 ns;充电  $\pm 35 \text{ kV}$  时连续运行 10 发,脉冲 X 射线源从触发器 100 kV 输出到 X 射线出射的总体延迟时间约 910 ns,标准偏差为 27 ns。通过设置 DG535 延迟时间可以拍摄层裂碎片不同飞行时间的图像,不同延时时间碎片典型图像如图 10 所示,从图像上可以计算钨层裂碎片的平均飞行速度约 350 m/s,质量约 3.9 g。

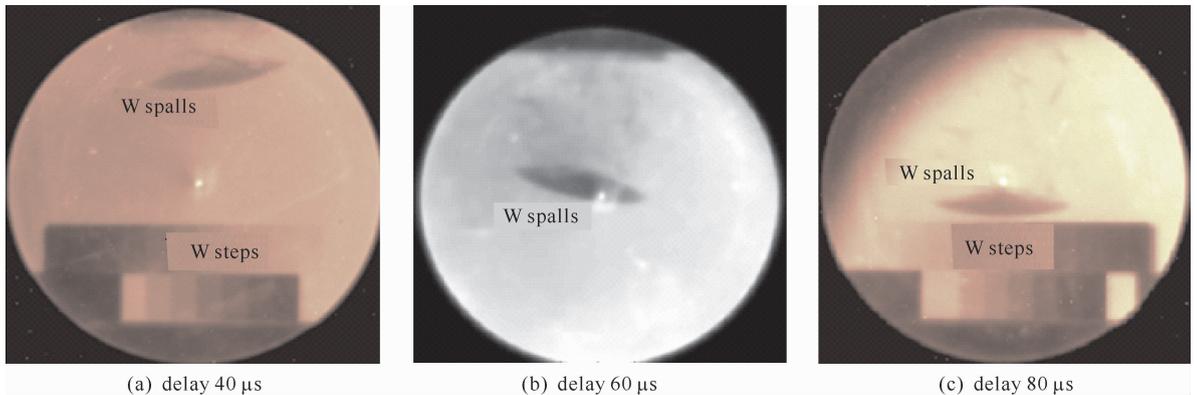


Fig. 10 Radiographic images of W spalls at different delay time from explosion to pulsed X-ray emission

图 10 不同延迟时间钨层裂片

### 4 结 论

IVA/RPD 脉冲 X 射线源累计运行约 200 发,脉冲 X 射线源、同步控制系统、爆炸模拟源、爆炸罐和 X 射线成像记录系统实现良好同步。IVA/RPD 型脉冲 X 射线源在 Marx 充电电压为  $\pm 35 \text{ kV}$  时,RPD 二极管电压约 2.1 MV,二极管电流约为 50 kA,半高宽约 80 ns;X 射线半高宽(FWHM)约为 40 ns,剂量为 28 mGy,焦斑约为 0.95 mm;装置充电  $\pm 35 \text{ kV}$  时连续运行 10 发,脉冲 X 射线源触发 Marx 发生器到 X 射线出光的总延迟时间约 910 ns,标准偏差为 27 ns,从雷管起爆到炸药产生层裂碎片的时间约  $10 \mu\text{s}$ ,调节延时器设置时间可以拍摄碎片不同飞行时间图像,从图像得到碎片质量和平均飞行速度。

## 参考文献:

- [1] Oliver B V. Recent advances in radiographic X-ray source development at Sandia[C]//Proc of the 17th International Conference on High-Power Particle Beams. 2008;1-5.
- [2] John M, Gerald C, Ian S, et al. Advances in pulsed power-driven radiography systems[J]. *Proceeding of the IEEE*, 2004, **92**(7):1021-1042.
- [3] 邱爱慈, 孙凤举. Z 箍缩和闪光照相用脉冲功率源技术的发展[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(12):1937-1946. (Qiu Aici, Sun Fengju. Development of pulsed power driver for Z pinch and radiography. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12):1937-1946)
- [4] Smith I D. Induction voltage adders and the induction accelerator family[J]. *Physical Review Special Topics- Accelerator and Beams*, 2004, **7**:064801.
- [5] Cooperstein G, Boller J R, Comisso R J, et al. Theoretical modeling and experimental characterization of a rod-pinch diode[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, **8**(10):4618-4635.
- [6] Smith J, Nelson D, Corrow G, et al. Cygnus performance in subcritical experiments[C]//Proc of the 16th IEEE International Pulsed Power Conference. 2007;1089-1094.
- [7] Smith J, Carlson R, Fulton R, et al. Cygnus dual beam radiography source[C]//Proc of the 16th IEEE International Pulsed Power Conference. 2007;334-337.
- [8] Ormond E C, Cordova S R, Molina I, et al. Cygnus diverter switch analysis[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2008, **36**(5):2554-2559.
- [9] Thomas K J. Pulsed power drivers and diodes for X-ray radiography[C]//Proc of 2005 Particle Accelerator Conference. 2005;510-514.
- [10] Corcoran P, Carboni V, Smith I, et al. Design of an induction voltage adder based on gas-switched pulse forming line[C]//Proc of the 15th IEEE International Pulsed Power Conference. 2005;308-313.
- [11] Johnson D, Bailey V, Altes R, et al. Status of the 10 MV, 120 kA RITS-6 inductive voltage adder[C]//Proc of 2005 Particle Accelerator conference. 2005;314-317.
- [12] 尹佳辉, 孙凤举, 邱爱慈, 等. 感应电压叠加器中水介质开关脉冲自击穿特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(1):147-151. (Yin Jiahui, Sun Fengju, Qiu Aici, et al. Pulsed self-breaking down properties of water switches in the inductive voltage adder. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(1):147-151)
- [13] Sun Fengju, Qiu Aici, Zeng Jiangtao, et al. Relationship of pulsed permeability of magnetic cores with annealing metglass and inter-bedded insulation films to applied voltage slope[C]//Proc of the 17th International Conference on High-power Particle Beams. 2008;599-603.
- [14] 高屹, 杨海亮, 孙凤举, 等. 用于脉冲功率装置调试的高功率电阻分压器型负载[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2):301-306. (Gao Yi, Yang Hailiang, Sun Fengju, et al. Resistance-voltage-dividing load for testing of pulsed power equipment. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2):301-306)

## Pulsed X-ray source based on inductive voltage adder and rod pinch diode for radiography

Sun Fengju, Qiu Aici, Yang Hailiang, Zeng Jiangtao, Gai Tongyang, Liang Tianxue,

Yin Jiahui, Sun Jianfeng, Cong Peitian, Huang Jianjun, Su Zhaofeng, Gao Yi,

Liu Zhigang, Jiang Xiaofeng, Li Jingya, Zhang Zhong, Song Guzhou, Pei Mingjing, Niu Shengli

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** The pulsed X-ray source based on the inductive voltage adder(IVA) and rod pinch diode(RPD) is developed, and its configuration and main parts and output parameters are introduced in detail. The Marx generator with 3.3 MV charges the water pulsed forming lines with  $7.8 \Omega$  and produces the high power pulse of 70 ns width with about 1 MV feeding the three IVA cells in parallel through the peaking water switch and the pre-pulse oil switch. The secondary of IVA adopts the vacuum insulation transmission line(VITL) with the impedance from  $40 \Omega$  up to  $60 \Omega$ , driving the RPD isolated from the output terminal of IVA for 2 m VITL. The diameter of the graphite cathode of RPD is 12 mm, and the diameter of the tungsten anode rod is 1.2 mm. The electron beam from the cathode is pinched to the tip of the anode rod by the electric-magnetic force of the current and emits the pulsed X-ray with small focus spot. When the Marx generator is charged positive/negative 35 kV, typical parameters of RPD are voltage of about 2.0 MV, current of about 50 kA and full width of half magnitude(FWHM) of 80 ns, and the X-ray parameters are FWHM of about 40 ns, dose of 28 mGy and focus spot diameter of 1 mm. The radiographic images of the spalls of Fe and W material produced by explosion are obtained with the developed X-ray source.

**Key words:** inductive voltage adder; rod pinch diode; radiography; spall; pulsed X-ray source