

4 MV/80 kA IVA 型脉冲 X 射线照相装置研制进展*

魏 浩, 尹佳辉, 张鹏飞, 孙凤举, 邱爱慈, 梁天学, 曾江涛,
姜晓峰, 王志国, 孙 江, 刘文元, 呼义翔

(西北核技术研究院 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 介绍了西北核技术研究院研制的 4 MV 脉冲 X 射线闪光照相装置(“剑光二号”)系统组成和实验结果。装置基于感应电压叠加器(IVA)驱动阳极杆箍缩二极管(RPD)技术,主要由前级脉冲功率源、感应电压叠加器和 RPD 等组成。前级脉冲功率源由两台 3.2 MV 低电感 Marx 发生器和四路同轴水介质线组成。每台 Marx 同时给两路脉冲形成线(特征阻抗 6 Ω 、电气长度 30 ns)充电,充电峰值时间约 370 ns。每路水介质线采用两级脉冲压缩,为感应腔馈入约 1 MV/160 kA/60 ns 电脉冲。电触发 SF₆ 气体开关、自击穿水开关分别用作主同步开关和脉冲陡化开关。感应电压叠加器采用四级 1.5 MV 感应腔串联,每级感应腔采用单点馈入结构。次级采用真空绝缘传输线实现电压叠加和功率传输,特征阻抗由 30 Ω 线性增大至 120 Ω 。采用 4 MV 电压下综合性能较优的 RPD 来产生强脉冲 X 射线。装置目前达到技术指标:输出电压 4.3 MV、脉冲前沿(10%~90%) 21 ns、半高宽约 70 ns、二极管电流 85 kA, X 射线半高宽约 55 ns, 整机延时(从 Marx 触发器输出到 X 射线产生)约 749 ns, 标准偏差约 7 ns。当 RPD 阳极采用直径 2 mm 钨针时,正前方 1 m 处剂量约 15.5 rad(LiF),正向焦斑约 1.4 mm。

关键词: X 射线照相; 感应电压叠加器; 阳极杆箍缩二极管; 感应腔; 脉冲形成线

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190331

Status of radiographic X-ray source driven by 4 MV, 80 kA induction voltage adder

Wei Hao, Yin Jiahui, Zhang Pengfei, Sun Fengju, Qiu Aici, Liang Tianxue, Zeng Jiangtao,
Jiang Xiaofeng, Wang Zhiguo, Sun Jiang, Liu Wenyuan, Hu Yixiang

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: This paper presents the design details and experiment results of a 4 MV facility developed for flash X-ray radiography in Northwest Institute of Nuclear Technology (NINT). The facility is based on the technology of an induction voltage adder (IVA) driving a rod pinch diode (RPD). The facility mainly consists of the prime power source, induction voltage adder, and RPD. The prime power source consists of two 3.2 MV low-inductance Marx generators and four deionized-water coaxial lines. Each Marx generator charges two 6 Ω , 30 ns pulse forming lines (PFLs) in less than 370 ns. There exist two-stage pulse compressions for each pulseline, providing four forward waves with peak voltages of 1 MV at current of 160 kA with a duration time of 60 ns. Four electrically-triggered SF₆ gas switches serve as energy transfer switches from PFLs to outlines, and then four self-breakdown water switch are used to sharpen the risetime and reduce the prepulse. The IVA consists of four-stage induction cavities stacked in series, each of which almost operates at 1.5 MV voltage. A vacuum insulated transmission line (without magnetic insulation) is used for power addition. The RPD is chosen to create X rays through bremsstrahlung. At present, the IVA could produce a 4.3 MV voltage with a risetime (10%—90%) of 21 ns and a FWHM time of 70 ns. The diode current is about 85 kA, and the FWHM time of X rays is about 55 ns. The delay time from Marx trigger to the X-ray output is about 749 ns, with a standard deviation of about 7 ns. With a 2-mm diameter tungsten rod used, the X-ray dose is about 15.5 rad (LiF) at 1 m straight ahead, and the spot size is about 1.4 mm.

Key words: flash X-ray radiography; induction voltage adders; rod pinch diode; induction cavity; pulse forming lines

* 收稿日期:2019-09-03; 修订日期:2019-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(11975186, 11875224, 51790524)

作者简介:魏 浩(1986—),男,博士,副研究员,从事脉冲功率技术研究; weihao@nint.ac.cn。

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,是爆轰流体力学实验等快速瞬变过程的重要诊断工具,广泛用于研究冲击加载下物质内部结构的瞬态现象^[1-2]。目前已建成的高能脉冲 X 射线照相装置主要采用直线感应加速器 (LIA) 和感应电压叠加器 (IVA) 两种技术路线^[3-5]。IVA 型脉冲 X 射线装置结构紧凑,适合空间受到限制的场合。进入新世纪以来,中、美、英等国均大力发展 IVA 型高能 X 射线照相装置^[6-12]。西北核技术研究所于 2007 年成功研制出国内首台 IVA 型闪光照相装置“剑光一号”^[13],输出指标与美国 Cygnus 装置相当。为了满足更高性能爆轰流体力学实验研究的需要,团队研制了指标更高的 4 MV 闪光照相装置“剑光二号”^[14],本文介绍了该装置组成、实验结果和运行情况。

1 装置组成

装置主要由前级脉冲功率源、感应腔、真空传输线和阳极杆箍缩二极管 (RPD) 等组成,如图 1 所示,装置主体尺寸约 $6\text{ m}\times 9\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 。

1.1 前级脉冲功率源

前级脉冲功率源主要由两台 Marx 发生器和四路水介质线组成。单台 Marx 发生器标称输出电压 3.2 MV,储能 80 kJ,等效电容为 15.6 nF,每台 Marx 同时给两路形成线充电,充电峰值时间约 370 ns。每路水线如图 2 所示,由脉冲形成线 (PFL)、脉冲传输线 (PTL)、输出线 (OL) 组成,其特征阻抗均为 $6\ \Omega$,PFL 和 PTL 电长度约 30 ns。为了便于与感应腔连接,OL 采用了活套法兰结构,其电长度可在 18~25 ns 范围内变化。每路水线采用两级脉冲压缩,电触发 SF_6 气体开关作为同步放电主开关,自击穿水开关用于陡化脉冲前沿和抑制预脉冲^[15]。

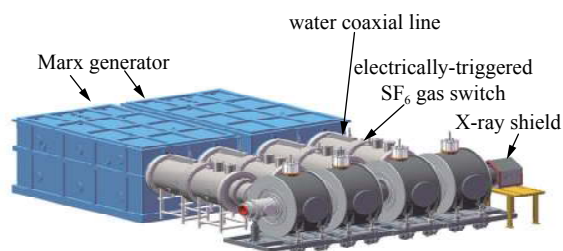


Fig. 1 4 MV IVA facility developed for flash X-ray radiography
图 1 4 MV 脉冲 X 射线闪光照相装置“剑光二号”

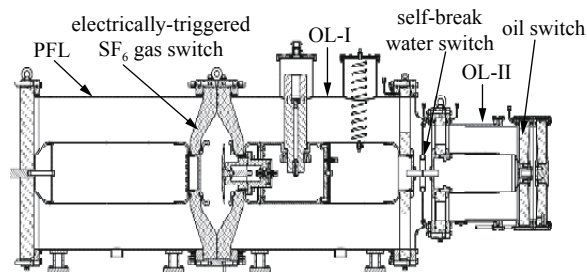


Fig. 2 Cutoff view of a deionized-water coaxial line
图 2 水介质传输线示意图

前级脉冲功率源的难点是四路脉冲的精确时间同步。为了提高同步精度,采取了两方面措施:(1)减小两台 Marx 建立时间的分散性,提高四路 PFL 充电电压一致性。这主要通过增加 Marx 触发级数、提高触发电压幅值等方法实现。连续 200 余次实验表明,两台 Marx 建立时间偏差小于 20 ns 的置信概率约 95%^[14]。(2)~2.6 MV 电触发 SF_6 气体开关性能提升。通过优化前级 Trigratron 开关结构、调整 V/n 开关各间隙分压比例,选取合适的触发时刻,四路馈入脉冲偏离理想 IVA 时序的总体方差通常小于 6 ns^[14]。

需要指出的是,前级脉冲源四路水线的串联叠加阻抗为 $6\ \Omega\times 4=24\ \Omega$,而 4 MV 电压下 RPD 阻抗约 40~60 Ω ^[9],因此,相对于前级脉冲源而言,负载近似为 2 倍过匹配。这种阻抗配置降低了装置的能量和功率传输效率,但有利于降低前级脉冲源 (Marx, PFL, MV 级主开关等) 的工作电压,从而提高装置可靠性。

1.2 感应腔

“剑光二号”感应腔正常工作电压约 1.5 MV,较“剑光一号”提高了约 50%,同时感应腔结构更加紧凑,因此难点是高电压下绝缘可靠性,特别是真空绝缘堆和非晶磁芯的绝缘安全。“剑光二号”感应腔如图 3 所示,与“剑光一号”相比,感应腔主要作了以下优化:(1)绝缘堆采用自行研制的交联聚苯乙烯代替有机玻璃,以提高抗电子和负载碎片的轰击性能。根据 1/4.5 缩比绝缘堆耐压考核结果,考虑面积效应后,估算绝缘堆耐受电压约 1.9 MV。(2)感应腔内非晶磁芯数目由 8 只减小至 6 只,感应腔轴向长度进一步缩短。6 只磁芯提供伏秒数约 114 mV·s,满足使用要求 ($>90\text{ mV}\cdot\text{s}$)。(3)角向传输线采用四点均布结构^[16]。该结构显著降低了感应腔特征阻抗(由“剑光一号”感应腔 32.6 Ω 降低至 12.5 Ω),同时兼顾了双端口脉冲馈入(为今后提高输出电流预留),也便于机械加工。(4)优化了阴极体弧形段结构,缩小了真空馈入间隙距离,进一步减小了感应腔电感。上述优化措施 (3) 和 (4) 有助于感应腔输出更快脉冲前沿,从而提高二极管工作稳定性。末级感应腔电势分布如图 4 所示,其中阴极体电压设定为 -1.5 MV、次级内筒电压设定为 +4 MV,可以看到,最外侧两个磁芯(靠近接地盖板)端部场强较大。

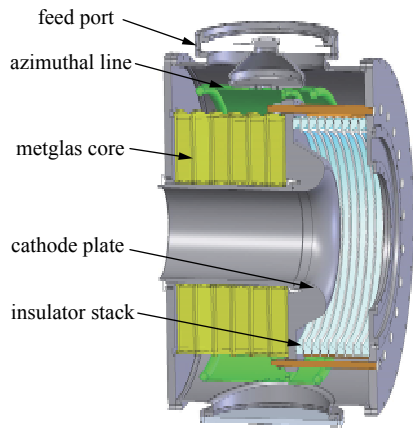


Fig. 3 Illustration of cavity used in Jianguang-II
图 3 “剑光二号”感应腔

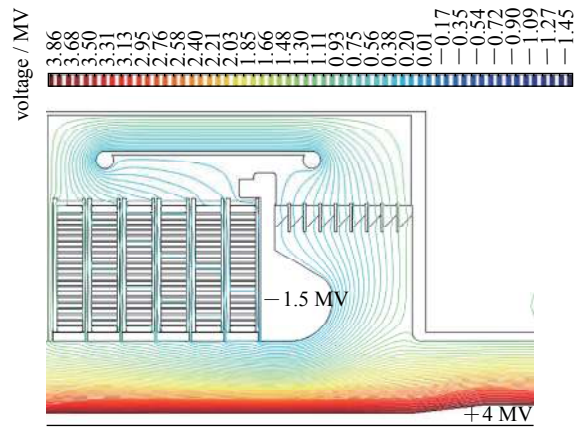


Fig. 4 Potential distribution in the last cavity
图 4 末级感应腔电势分布

1.3 真空传输线

“剑光二号”次级采用真空绝缘传输线 (Vacuum Insulated Transmission Line, VITL) 实现电压叠加和功率传输。为了避免强电场作用下金属阴极表面电子发射, VITL 阴-阳间距 (决定了特征阻抗) 通常较大。为了确保 VITL 在大于 4 MV 电压下可靠工作, 1~4 级感应腔对应次级 VITL 阻抗分别约为 30, 60, 90 和 120 Ω , 如图 5 所示。VITL 外筒 (阴极) 选用 6061 铝, 表面经硬质氧化工艺处理提高电子发射阈值。VITL 中心内筒 (阳极杆) 选用不锈钢, 其总长度约 5 m, 为了便于运输和加工, 分为前后两段。中心内筒采用悬臂梁结构, 仅在接地端进行固定支撑。

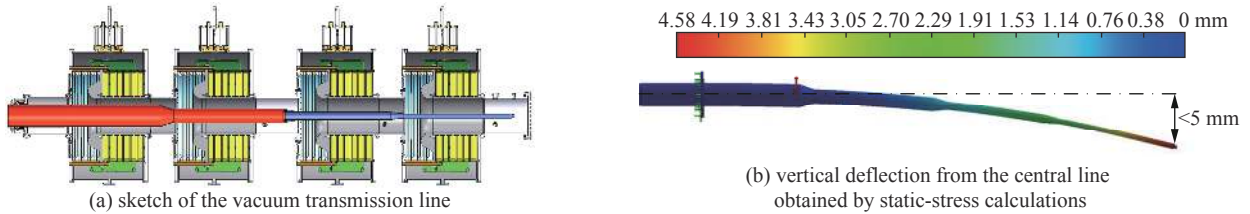


Fig. 5 Sketch of the vacuum transmission line for the Jianguang-II facility
图 5 “剑光二号”真空传输线示意图

VITL 难点在于长距离中心内筒的变形和精确对中调节。采用静应力分析方法, 中心内筒在自身重力作用下的形变如图 5(b) 所示, 末端偏离轴线约 5 mm。采用首端设计的二维调节机构, 能够实现内筒末端在 ± 20 mm 偏差范围内调节, 以确保 RPD 钨针位于阴极盘中心。

2 装置实验结果

2.1 前级脉冲源

Marx 充电 ± 60 kV 时, 前级脉冲源主要参数如图 6 所示。图 6(a) 给出了单路水线脉冲压缩过程的典型波形 (shot 2019-026)。PFL 充电电压约 2.15 MV, 充电时间约 330 ns; PTL 电压 (即主开关后电压) 峰值约 956 kV, 脉冲前

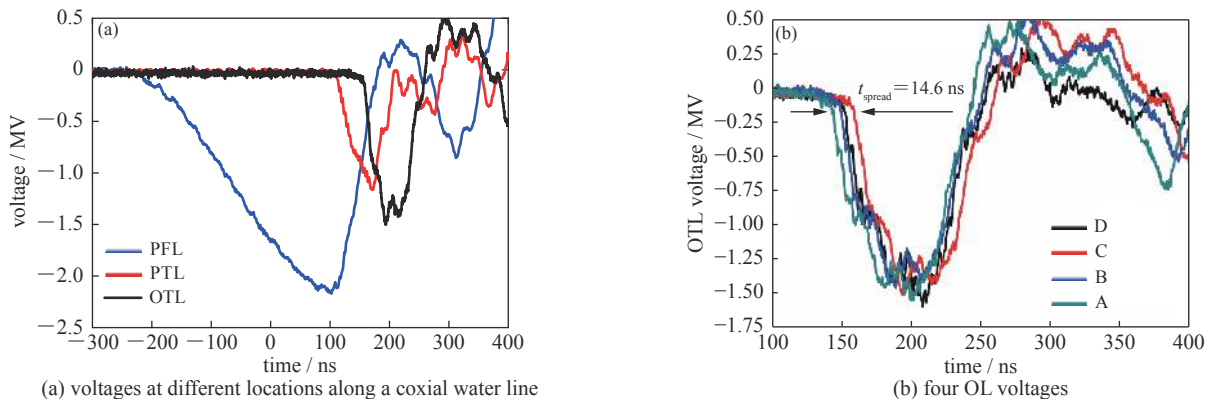


Fig. 6 Measured outputs of the prime power source
图 6 实测前级脉冲源输出波形

沿约 25 ns(此处指前行电压波前沿, 不包括反射波引起的尖峰); OL 电压(即峰化开关后电压)幅值约 1.5 MV, 脉冲前沿约 32 ns(包括前行波和反射波)。需要指出的是, 由于 OL 电压测点靠近感应腔馈入端口(电长度约 18 ns), ~ 1 MV/15 ns 的前行电压波在感应腔入口发射折反射, 电压幅值增高至约 1.5 MV。图 6(b) 给出了同一发次实验 A、B、C、D 四路水线 OL 电压, 四路馈入脉冲的时间极差 t_{spread} 为 14.6 ns(理想 IVA 时序四路馈入时刻为 -5.6, -2.1, +2.1、+5.6 ns), 本发次实验偏离理想 IVA 时序的偏差为 3.4 ns, 小于相邻感应腔之间的电长度($\tau \approx 4$ ns)。

2.2 感应电压叠加器

装置典型输出电压和二极管电流如图 7 所示。装置输出电压采用自积分式电容分压器在末级感应腔出口测量。装置输出电压峰值为 4.3 MV, 脉冲前沿约 21 ns, 半高宽约 74 ns; 二极管电流峰值约 82.5 kA。由于中心内筒电感引起电压降落, 导致二极管间隙电压与 IVA 输出电压存在差别。基于电感项修正得到二极管阴阳间隙电压如图 8 所示, 二极管电压幅值与 IVA 输出电压基本相同, 但脉冲前沿延缓至 30 ns。

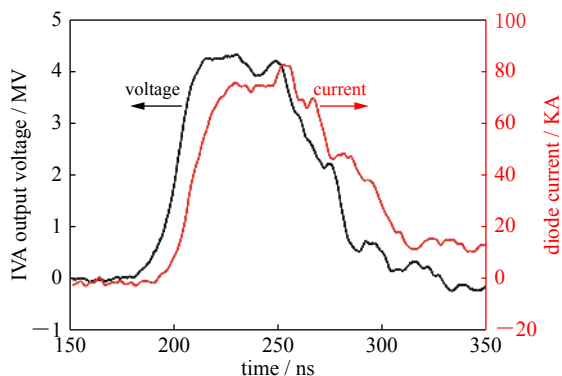


Fig. 7 Measured IVA output voltage and diode current

图 7 装置输出电压和二极管电流

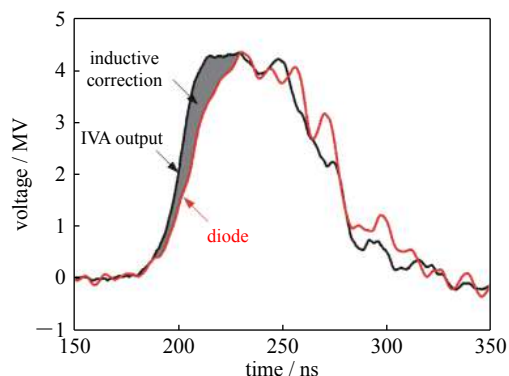


Fig. 8 Diode voltage based on the inductive correction

图 8 基于电感修正方法获得二极管电压

2.3 RPD 二极管

Shot 2019-026 发次实验二极管结构参数如下: 阳极钨针半径 $r_a = 1.0$ mm, 钨针末端 5 mm 磨成锥状, 锥角约 30° , 阴极石墨盘中心孔半径 $r_c = 10$ mm。根据 RPD 阻抗解析公式, 估算其阻抗约 51Ω 。基于实测二极管电流和电感修正后得到的二极管电压, 计算得到二极管动态阻抗如图 9 所示, RPD 稳态阻抗约 55Ω 。图 8 同时给出了 X 射线波形, 采用康普顿探测器在偏离轴向 90° 位置监测, X 射线半高宽约 52 ns, 正前方 1 m 处 X 射线辐射剂量为 15.4 rad(LiF)。

2.4 X 射线焦斑

采用针孔成像法进行 X 射线焦斑诊断分析^[7]。采用 2.0 mm 直径钨针时, 测量 X 射线焦斑原始图像如图 10(a)

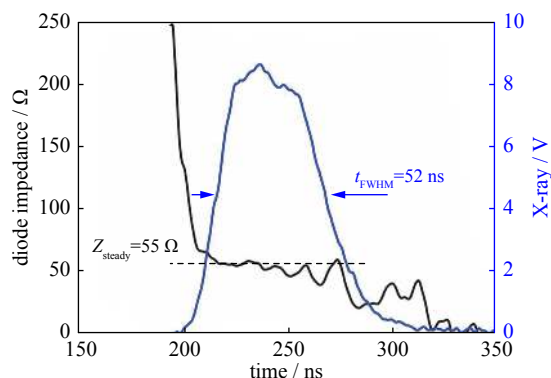
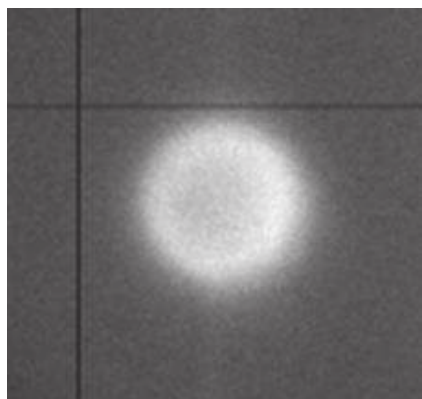
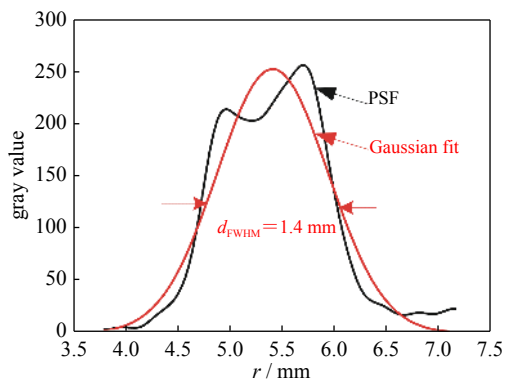


Fig. 9 Calculated dynamic impedance of RPD and measured X-ray waveforms

图 9 二极管动态阻抗和 X 射线波形



(a) original image



(b) PSF

Fig. 10 Original image of the X-ray spot obtained by pinhole imaging technique

图 10 针孔成像法测量 X 射线焦斑

所示,经图像处理得到焦斑图像的点传递函数(PSF)曲线如图 10(b)所示。对 PSF 曲线进行高斯拟合,取其半高宽 d_{FWHM} 为 X 射线焦斑尺寸,约 1.4 mm。

3 装置运行情况

目前“剑光二号”已累计运行 120 发次,初步开展了典型客体闪光照相实验和核探测器系统标定实验。当 Marx 充电 ± 60 kV 时,连续 10 发次实验装置主要输出指标见表 1。装置输出电压 4.3 MV、二极管电流 85 kA, X 射线半高宽约 55 ns,正前方 1 m 处剂量约 15.5 rad(LiF),装置整机延时(从 Marx 触发器输出到 X 射线)的延时时间约 749 ns,标准偏差为 7 ns。表 2 给出了“剑光二号”和“剑光一号”两台脉冲 X 射线照相装置输出参数的对比。

表 1 装置连续 10 发次实验主要输出指标

Table 1 Key output parameters of the Jianguang-II facility over a ten shot sequence

| shot | output voltage/MV | risetime/ns | diode current/kA | X-ray FWHM time/ns | dose@1 m/rad(LiF) | delay time/ns |
|----------|-------------------|--------------|------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| 2019-017 | 4.3 | 22 | 85.3 | 58 | 14.8 | 748 |
| 2019-018 | 4.6 | 24 | 84.1 | 54 | 15.7 | 749 |
| 2019-019 | 4.5 | 20 | 85.6 | 56 | 16.0 | 748 |
| 2019-020 | 4.5 | 20 | 80.5 | 54 | 14.5 | 745 |
| 2019-021 | 4.4 | 24 | 86.2 | 56 | 16.1 | 740 |
| 2019-022 | 3.9 | 20 | 84.9 | 58 | 14.2 | 741 |
| 2019-023 | 4.5 | 21 | 84.2 | 53 | 15.6 | 748 |
| 2019-024 | 4.2 | 19 | 87.0 | 52 | 15.4 | 756 |
| 2019-025 | 4.3 | 17 | 88.0 | 52 | 16.9 | 756 |
| 2019-026 | 4.2 | 21 | 82.5 | 52 | 15.4 | 762 |
| average | 4.3 \pm 0.2 | 21 \pm 2.1 | 84.8 \pm 2.2 | 55 \pm 2.4 | 15.5 \pm 0.8 | 749 \pm 7 |

表 2 剑光一号和剑光二号装置输出指标的比较

Table 2 Comparison of output parameters between the Jianguang-I and Jianguang-II facilities

| | output voltage/MV | diode current/kA | X-ray FWHM time/ns | radiated dose @1 m/rad(LiF) | spot diameter/mm |
|-----------------------|-------------------|------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|
| Jianguang-I facility | 2.4 | 51 | 46 | 3.7 | 1 |
| Jianguang-II facility | 4.3 | 85 | 55 | 15.5 | 1.4 |

4 结论

研制了一台 IVA 型脉冲 X 射线闪光照相装置(“剑光二号”),前级脉冲功率源 Marx 充电 ± 60 kV 时,装置输出电压 4.3 MV、二极管电流 85 kA, X 射线半高宽约 55 ns,正前方 1 m 处剂量约 15.5 rad,正向焦斑约 1.4 mm。装置整机触发延时(Marx 触发器输出到 X 射线)约 749 ns,标准偏差约 7 ns。

致谢 衷心感谢强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室丛培天研究员、杨海亮研究员、孙剑锋副研究员、任书庆高级实验师,西安交通大学丁卫东教授等同志对本文工作的大力支持。

参考文献:

- [1] 马勋,邓建军,姜莘,等.流体动力学实验用闪光X光机研究进展[J].强激光与粒子束,2014,26:010201.(Ma Xun, Deng Jianjun, Jiang Ping, et al. Review of flash X-ray generator applied to hydrokinetical experiments[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 010201)
- [2] 陈林,谢卫平,邓建军. X射线闪光照相杆箍缩二极管技术最新进展[J].强激光与粒子束,2006,17(4):643-647.(Chen Lin, Xie Weiping, Deng Jianjun. Development of rod-pinch diode for flash X-ray radiography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 17(4): 643-647)
- [3] 石金水,邓建军,章林文,等.神龙二号加速器及其关键技术[J].强激光与粒子束,2016,28:020201.(Shi Jinshui, Deng Jianjun, Zhang Linwen. Dragon-II accelerator and its key technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 020201)
- [4] Ekdahl C. Modern electron accelerators for radiography[C]//Proc of 13th IEEE International Pulsed Power Conference. 2001: 1-6.
- [5] Smith I D. Induction voltage adders and the induction accelerator family[J]. Physical Review Special Topics: Accelerator and Beams, 2004: 064801.
- [6] Xie Weiping. The introduction of flash X-ray sources for radiography in Institute of Fluid Physics[C]//Proc of 7th Europe-Asia Pulsed Power Conference and High Power Particle Beams Conference. 2018.
- [7] Oliver B V. Recent advances in radiographic X-ray source development at Sandia[C]//Proc of 17th IEEE International High Power Particle Beams Conference.

- 2008.
- [8] Smith I D, Bailey V L, Fockler J J, et al. Design of a radiographic integrated test stand (RITS) based on a voltage adder, to drive a diode immersed in a high magnetic field[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2000, 28(5): 1653-1659.
- [9] Bayol F, Charre P, Garrigues A, et al. Evaluation of the rod-pinch diode as a high-resolution source for flash radiography at 2 to 4 MV[C]//Proc of 13th IEEE International Pulsed Power Conference. 2001: 450-453.
- [10] Ormond E C, Garcia M R, Smith J R, et al. Cygnus precision dosimetry—calibration and measurements[C]//Proc of 21th IEEE International Pulsed Power Conference. 2017: 569-573.
- [11] Thomas K, Beech P, Brown S, et al. Status of the AWE Hydrus IVA fabrication[C]//Proc of 18th IEEE International Pulsed Power Conference. 2011: 1042-1047.
- [12] Thomas K. The MERLIN flash radiographic accelerator[C]//Proc of IEEE Pulsed Power Symposium, 2014: 1-29.
- [13] 孙凤举, 邱爱慈, 杨海亮, 等. 感应电压叠加器驱动阳极杆箍缩二极管型脉冲X射线源[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 936-940. (Sun Fengju, Qiu Aici, Yang Hailing, et al. Pulsed X-ray source based on inductive voltage adder and rod pinch diode for radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 936-940)
- [14] Wei Hao, Yin Jiahui, Zhang Pengfei, et al. Development of a 4-MV, 80-kA induction voltage adder for flash X-ray radiography[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2019, 47(11): 5030-5036.
- [15] Yin Jiahui, Sun Fengju, Qiu Aici, et al. 2.8-MV low-inductance low-jitter electrical-triggered gas switch[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2014, 44(10): 2045-2052.
- [16] Wei Hao, Sun Fengju, Liang Tianxue, et al. Low voltage pulse injection test of a single-stage 1 MV prototype induction voltage adder cell[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2014, 85: 064801.
- [17] 宋顾周, 朱宏权, 韩长材, 等. 杆箍缩二极管X射线焦斑的成像法测量[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 531-535. (Song Guzhuo, Zhu hongquan, Han Changcai, et al. Imaging measurement of X-ray spot of rod-pinch diode radiographic source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(2): 531-535)