

光学学报

激光惯性约束聚变装置内复合环境的线缆耦合效应

张茂兴^{1,2*}, 孟萃^{1,2**}, 徐志谦^{1,2}, 吴平^{1,2}, 钟媚青^{1,2}

¹清华大学工程物理系, 北京 100084;

²粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084

摘要 激光惯性约束聚变(ICF)装置靶室内环境复杂,激光打靶产生的电离辐射和电磁辐射都会在靶室内线缆上产生耦合电流,从而对信号产生干扰。使用自主编写的仿真代码和 CST 软件对两种屏蔽线缆的辐射响应进行计算,并在神光-III 靶室内进行辐照实验,对实验结果进行初步分析比较,发现 RG142 线缆的电磁辐射响应小,电离辐射响应大,CERN SPA6 线缆正好相反。最后,根据耦合规律提出了一种线缆的复合屏蔽结构。

关键词 激光光学; 激光惯性约束聚变; 复合环境; 线缆耦合; 复合屏蔽

中图分类号 TN202; O434.14

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2314002

Cable Coupling Effect of Compound Chamber Environment in Laser Inertial Confinement Fusion Driver

Zhang Maoxing^{1,2*}, Meng Cui^{1,2**}, Xu Zhiqian^{1,2}, Wu Ping^{1,2}, Zhong Meiqing^{1,2}

¹Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging of Ministry of Education, Beijing 100084, China

Abstract The chamber environment of a laser inertial confinement fusion (ICF) driver is usually complex. Specifically, signals will be affected by the coupling currents induced by ionizing radiation and electromagnetic radiation during the laser shots. In this paper, radiation responses of two kinds of shielded cables are calculated by using the self-written code and CST software, respectively, and the irradiation experiment is carried out based on SG-III laser driver, with the results compared and analyzed. It is found that the electromagnetic radiation response of the RG142 cable is slight, but its ionizing radiation is strong, which is the opposite of the CERN SPA6 cable. Finally, according to the coupling law, a composite shielding structure of cable is proposed.

Key words laser optics; laser inertial confinement fusion; compound environment; cable coupling; composite shielding

1 引言

激光惯性约束聚变(ICF)是通过高能激光脉冲辐照黑腔转换为 X 光后辐照靶丸,或激光直接辐照靶丸的方式烧蚀靶丸,在惯性作用下使靶丸中的氘氚燃料达到极高的温度密度状态,从而引发核聚变的一种方法^[1]。全世界多个国家都已建立了 ICF 装置,比如美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳激光装置(LMJ)、日本 Gekko XII 和中国神光系列装置等。

ICF 装置靶室内环境复杂,既有激光打靶产生的电离辐射(X 射线、 γ 射线)、中子,又有带电粒子运动

激励的电磁辐射^[2]。当 X 射线照射到靶室内线缆、设备或靶室内壁的金属材料上时,光电效应会产生光电子,电子运动将产生电磁场,这种效应被称为系统电磁脉冲(SGEMP)效应^[3]。线缆的 SGEMP 效应会在芯线中产生耦合电流和耦合电压,这可能会对线缆信号造成干扰,严重时烧毁线缆所连接的设备。当电磁辐射照射到线缆上时也会在线缆上产生耦合响应。因此,研究 ICF 装置中的线缆耦合效应对提高复杂环境照射下的信号完整性和提高设备抗干扰能力有重要意义。

国内外对线缆电磁辐射的耦合作用已经进行了非

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-04-11; 录用日期: 2022-06-07

通信作者: *zhang-mx19@mails.tsinghua.edu.cn; **mengcui@mail.tsinghua.edu.cn

常细致的研究,已经建立了多种物理模型并开发了多种仿真软件^[4-7]。国外对线缆 SGEMP 效应的研究开始于 20 世纪 60 年代,目前已经建立了多种线缆 SGEMP 物理模型并开发了多种仿真软件,在各种辐射源下进行了线缆辐照实验,且建立了线缆 SGEMP 数据库^[8-12],而国内对线缆 SGEMP 效应的研究起步较晚,开始于 20 世纪 90 年代,目前也已编写了多种线缆 SGEMP 仿真代码,并进行了多次线缆辐照实验^[13-17]。然而,鲜有关于电磁辐射和电离辐射同时存在的复合环境下的线缆耦合效应的报道,因此本文针对 ICF 装置靶室内复合环境的线缆耦合进行了实验及分析,并初步提出了复合屏蔽的线缆设计思路,使电磁辐射和电离辐射的耦合均能得到降低。

2 线缆耦合物理过程及仿真方法

2.1 电离辐射耦合

当同轴线缆受到脉冲 X 射线辐照时,护套、屏蔽层、芯线和介质层会因光电效应发射光电子,一般情况下金属的光电产额会比介质大,因此金属向介质中发射的光电子比介质向金属中发射的光电子多,如图 1 所示,即整体表现为介质内的沉积电荷为负,金属导体内的沉积电荷为正。受到介质层负电荷作用的影响,芯线正电荷中仅有一部分用来产生瞬态电流,而另一部分用来产生静电场,逃逸到线缆外部空间中的电子对瞬态电流和静电场均无贡献^[18]。

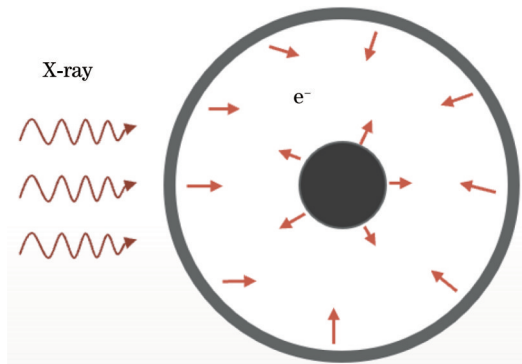


图 1 线缆模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cable model

本文建立有源传输线模型来计算线缆的 X 射线响应,即线缆 SGEMP 效应。传输线理论最早应用在通信领域,通过求解传输线方程来分析信号在传输过程中的规律。对于双导体传输线系统上的任意微分小段,在高频下可以看作由分布电阻、分布电感、分布电导和分布电容组成的网络,同轴线缆受 X 射线辐照时因电子发射与沉积,会产生分布电流源。假设同轴线缆为无损传输线,并且介质电导率为 0,可构建如图 2 所示的分布参数电路(R_s 和 R_L 为左右两端的终端负载)^[19]和建立传输线方程

$$\begin{cases} \frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = L \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = C \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} + I_0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $V(z,t)$ 和 $I(z,t)$ 为线缆位置 z 处在 t 时刻的电压和电流; I_0 为分布电流源; C 和 L 分别为分布电容和分布电感,相应的表达式为

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(R/r)}, \quad (2)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln(R/r), \quad (3)$$

式中: ϵ 和 μ 分别为介质层的介电常数和磁导率; R 为屏蔽层内径; r 为芯线外径。

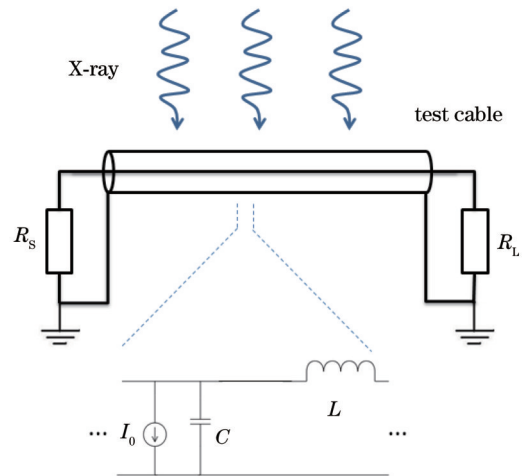


图 2 线缆 SGEMP 传输线模型

Fig. 2 Transmission line model of cable SGEMP

下面需要求解最重要的分布电流源项 I_0 , 也被称为诺顿电流源, 本研究中使用有限元法进行计算。根据线缆内部电子运输的物理过程, 诺顿等效电流源 I_0 由三部分组成^[20], 即芯线受透射 X 射线照射而发射的光电子引起的芯线发射电流 I_{em} 、介质中的沉积电荷在芯线中产生的感应电荷而引起的芯线感应电流 I_{in} 和介质中因电场强度分布产生的传导电流而引起的芯线传导电流 I_{co} 。因此, I_0 的表达式可写为

$$I_0 = I_{em} + I_{in} + I_{co}. \quad (4)$$

对于芯线发射电流 I_{em} , 利用 n 时刻芯线发射电子数除以时间间隔即可得到 n 时刻的发射电流, 相应的表达式为

$$I_{em}^{(n)} = k_e \frac{N^{(n)}}{\Delta t}, \quad (5)$$

式中: k_e 为芯线材料的光电发射系数; $N^{(n)}$ 为 n 时刻照射到线缆上的 X 射线光子总数; Δt 为时间间隔。

对于芯线感应电流 I_{in} , 根据格林函数互易性定理, 可得到介质层沉积电荷在芯线中的感应电荷为

$$Q_i = - \int \rho \cdot \Psi d^2 r, \quad (6)$$

式中: r 为介质层中任意一点与线缆中心的距离; ρ 为介质层沉积的电荷密度; Ψ 为芯线的格林函数, 其可通过求解 Laplace 方程得到。相应的 Laplace 方程为

$$\begin{cases} \nabla^2 \Psi = 0 \\ \Psi|_{S_j} = \delta_{ij}, j = 0, 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_0 为屏蔽层内表面; S_1 为芯线外表面; δ_{ij} 为 delta 函数。

综合式(6)和式(7), n 时刻芯线感应电流可表示为

$$I_{in}^{(n)} = - \int \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Psi d^2 r \quad (8)$$

对于芯线传导电流 I_{co} , 根据电流密度 J 与电场强度 E 和电导率 σ 的关系

$$J = \sigma E, \quad (9)$$

可得 n 时刻的芯线传导电流为

$$I_{co}^{(n)} = \oint \sigma E dS_1 \quad (10)$$

2.2 电磁辐射耦合

在 ICF 靶室中, 激光打靶产生超热电子, 超热电子逃逸后会激励电磁场^[21]。神光-III 靶室电场频率从几十 MHz 到 GHz 量级, 峰值可达 kV/m 至 MV/m 量级^[22]。

当线缆受到电磁辐射照射时, 电场与磁场的作用会导致等效分布电压源与电流源的产生, 从而在线缆上产生电流与电压响应^[5]。对于屏蔽线缆, 其耦合电流绝大部分在屏蔽层中流动, 而不进入芯线。然而, 受屏蔽层结构与屏蔽性能的限制, 电磁辐射仍可通过转移阻抗耦合进入芯线, 产生瞬态感应电流^[7]。

本文使用电磁仿真商业软件 CST 对线缆电磁辐射响应进行计算, 使用 CST 线缆工作室对两种实验线

缆建模, 如图 3 所示, 设置电磁辐射对线缆进行照射, 求解得到其终端负载的电压响应。

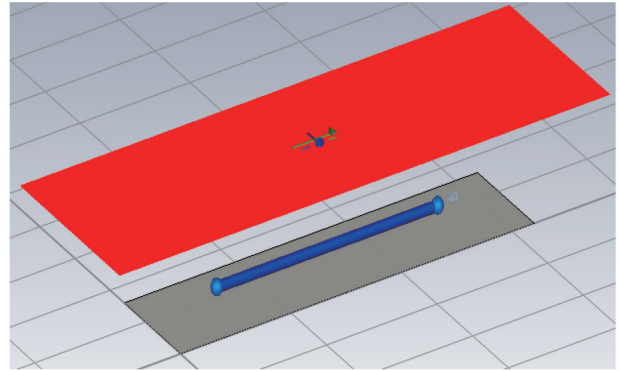


图 3 CST 中的线缆受电磁脉冲照射模型

Fig. 3 Model of cable exposed to electromagnetic pulse in CST

2.3 仿真结果与规律分析

使用 2.1 节与 2.2 节介绍的方法进行仿真分析, 对不同屏蔽结构的线缆进行建模, 以研究在同一辐射环境下的响应。

首先对线缆的电离辐射响应进行仿真, 针对 RG142 线缆(详细参数见 2.4 节)改变其铜屏蔽层厚度, 屏蔽层内径不变的情况下假设屏蔽层外半径分别为 1.7、1.8、1.9、2.0、2.1 mm, 假设入射 X 射线能量为 50 keV, X 射线时域波形为 10 ns 高斯脉冲, 辐照剂量为 0.42 J/cm², 仿真得到不同屏蔽层厚度下的光电产额与 SGEMP 响应, 如表 1 和图 4 所示。可以看出, 随着屏蔽层厚度的增加, 光电产额与 SGEMP 响应幅度均降低, 原因是屏蔽层对 X 射线有衰减作用, 屏蔽层增厚会导致照射到线缆内部的 X 射线减少, 仿真结果符合理论预期。

表 1 不同屏蔽层外半径下的光电产额

Table 1 Photoelectric yield under different outer radii of shielding layer

Photoelectric yield	1.7 mm	1.8 mm	1.9 mm	2.0 mm	2.1 mm
Core wire emission / 10 ⁻⁴	6.33	4.86	3.76	2.80	2.10
Dielectric layer deposition / 10 ⁻³	-3.34	-2.42	-1.79	-1.35	-0.978

改变入射 X 射线能量计算 RG142 线缆的 SGEMP 响应, 假设 X 射线能量分别为 30、35、40、45、50 keV, X 射线时域波形为 10 ns 高斯脉冲, 辐照剂量为 0.42 J/cm², 仿真得到不同 X 射线能量下的光电产额与 SGEMP 响应如表 2 和图 5 所示。可以看出, 随着 X 射线能量的增加, 光电产额与 SGEMP 响应幅度均增大, 原因是 X 射线能量增加而屏蔽层厚度不变, 屏蔽层

对 X 射线的衰减逐渐降低, 仿真结果符合理论预期。

然后, 对电磁辐射响应进行仿真。由于靶室内部电磁环境复杂, 电场频率为几十 MHz 甚至到 GHz 量级, 峰值可达 kV/m 至 MV/m 量级^[23], 并且电磁场会在靶室内部反射, 因此仿真时采用双指数脉冲平面波简化近似, 其电场强度在时域中的表达式为

$$E(t) = kE_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)], \quad (11)$$

表 2 不同 X 射线能量下的光电产额

Table 2 Photoelectric yield under different X-ray energies

Photoelectric yield	30 keV	35 keV	40 keV	45 keV	50 keV
Core wire emission	1.0 × 10 ⁻⁵	5.18 × 10 ⁻⁵	1.33 × 10 ⁻⁴	2.34 × 10 ⁻⁴	2.80 × 10 ⁻⁴
Dielectric layer deposition	-3.0 × 10 ⁻⁵	-1.94 × 10 ⁻⁴	-5.16 × 10 ⁻⁴	-9.48 × 10 ⁻⁴	-1.35 × 10 ⁻³

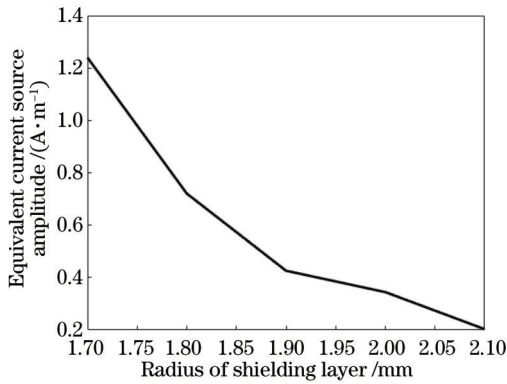


图 4 等效电流源幅度随屏蔽层半径变化

Fig. 4 Equivalent current source amplitude varying with radius of shielding layer

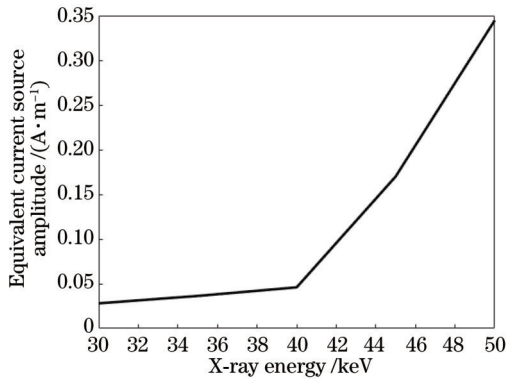


图 5 等效电流源幅度随 X 射线能量变化

Fig. 5 Equivalent current source amplitude varying with X-ray energy

式中： k 为修正系数； E_0 为峰值场强； α 和 β 为脉冲上升沿和下降沿参数。取上升时间为 0.3 ns，下降时间为 0.5 ns，峰值为 46 kV/m，入射电磁脉冲的时域波形和频域波形如图 6 和图 7 所示，其在峰值和频率范围内接近神光-III 靶室内的实测结果^[24]，电场极化方向与线缆放置方向一致。

最后，仿真屏蔽层层数对电磁辐射响应的影响。针对 RG142 线缆，将其屏蔽结构设置为无屏蔽、单层屏蔽和双层屏蔽，假设受辐照线缆长度为 1 m，芯线两

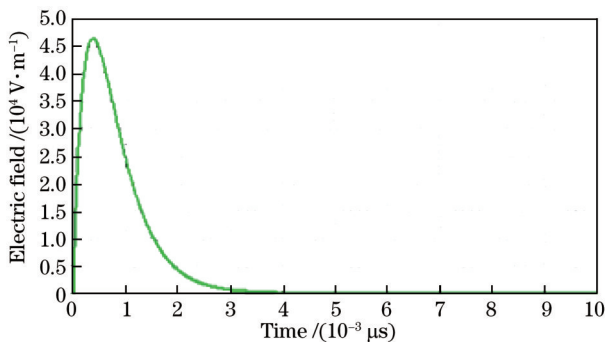


图 6 入射电磁脉冲的时域波形

Fig. 6 Time-domain waveform of incident electromagnetic pulse

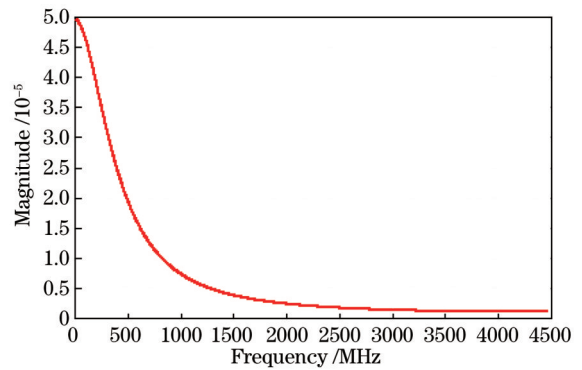


图 7 入射电磁脉冲频域波形

Fig. 7 Frequency-domain waveform of incident electromagnetic pulse

端接 50 Ω 负载接地，屏蔽层两端接地，电磁辐射为平面波垂直照射，得到的芯线耦合电流的时域波形如图 8 所示。可以看出，无屏蔽时线缆耦合电流最大，双层屏蔽时耦合电流最小，说明随着屏蔽层数的增加，电磁辐射响应幅值在降低，符合理论预期。

2.4 神光-III 线缆耦合仿真

用 2.3 节的仿真方法对神光-III 靶室内的线缆耦合响应进行建模分析。本次仿真针对两种线缆进行，即 CERN SPA6 和 RG142，其中：CERN SPA6 为 DRAKA 公司生产的 SPA6 型号的多芯线缆，由两个 HTC-50-1-1 同轴线和两个包含两个截面面积为 0.22 mm² 的单线线束组成，外部包裹外屏蔽层和护套；RG142 为双层编织屏蔽同轴线，其中 RG 是美国军用标准 MIL-C-17 对同轴射频线缆的总称，142 是序列编号，电磁屏蔽效能可在 0~6 GHz 频率范围内可达到 -85 dB。在实验中，将 CERN SPA6 中的一个 HTC-50-1-1 同轴线和 RG142 的一端连接至示波器，RG142 的另一端接开路负载，并包裹绝缘胶带与铜箔以实现电磁屏蔽。线缆示意图和结构参数如图 9、图 10 和表 3 所示。

首先，进行电离辐射响应仿真。神光-III 激光驱动的内爆靶通过轫致辐射过程可以产生覆盖 1~100 keV 能区的小尺寸、短脉冲和高亮度的光滑连续谱 X 光源^[25]，其能量主要集中在小于 30 keV 的软 X 射线能区内，在 30~100 keV 能区中也存在少量的连续谱 X 射线。靶室内的 X 射线不是单能的，但为了计算方便，本文假设电离辐射条件为单能 30 keV X 射线。由于内爆过程中产生的 X 射线为短脉冲 (<200 ps)^[25]，故假设 X 射线时域波形为脉冲宽度为 200 ps 的高斯波形。假设激光总能量为 27.7 kJ，激光照射内爆靶的辐射能量转换效率约为 1%^[25]，故射线总能量近似为 277 J，由此计算出 X 射线的光子数为 5.8×10^{16} ，将线缆放置在离靶 3 m 的位置处，计算出的等效电流源如图 11 所示。

由图 11 可知，CERN SPA6 的响应更小，这是因为其有更厚的护套和外层屏蔽结构 (CERN SPA6 内外

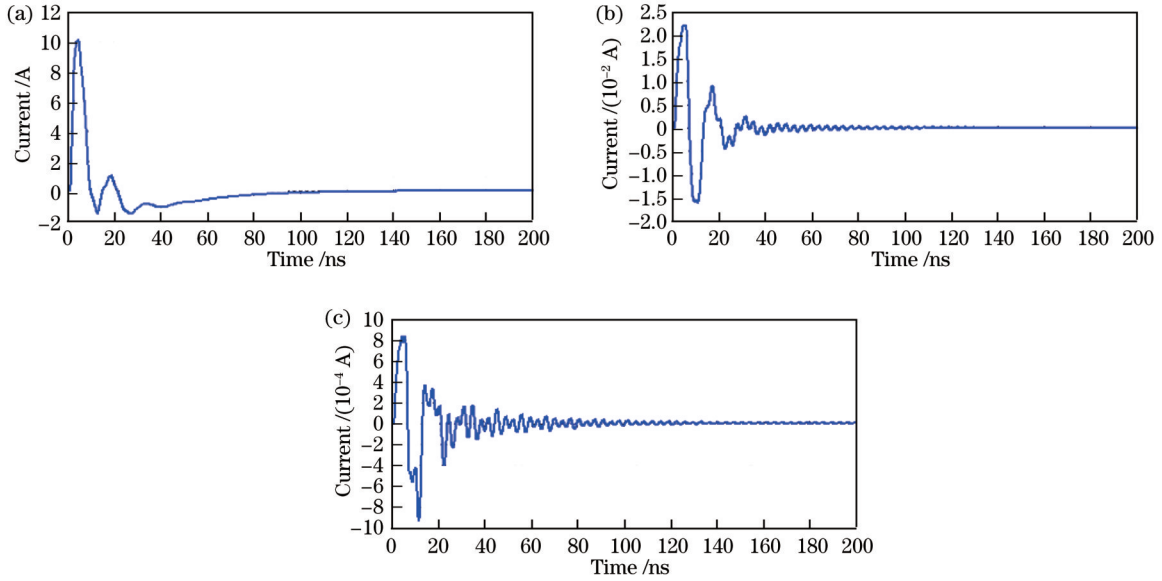


图 8 芯线耦合电流的时域波形。(a)无屏蔽;(b)单层屏蔽;(c)双层屏蔽

Fig. 8 Time-domain waveform of core-wire coupled current. (a) Unshielded; (b) monolayer shielded; (c) bilayer shielded

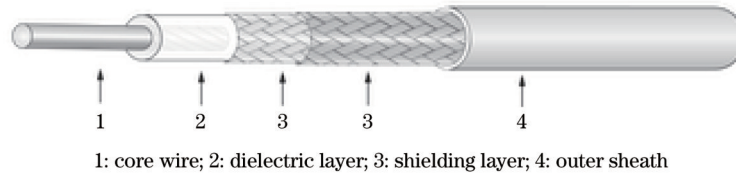


图 9 RG142线缆结构示意图

Fig. 9 Structural diagram of RG142 cable



图 10 CERN SPA6线缆结构示意图

Fig. 10 Structural diagram of CERN SPA6 cable

屏蔽层的厚度之和为 0.950 mm, RG142 屏蔽层的厚度为 0.505 mm), 对 X 射线有更大的衰减, 进而光电产额更小, 这与 2.3 节中 X 射线响应随屏蔽层厚度的增加而降低的规律一致。

将以上计算得到的等效电流源代入式(1)中, 可计算出线缆终端负载的电压波形, 如图 12 所示。可以发现, 终端电压脉冲宽度为 10 ns, 比入射 X 射线的脉冲宽度 (200 ps) 更宽, 原因是实验线缆长度为 1 m, 电流从线缆一端传播至另一端大概需要 5 ns, 远大于 X 射线的脉冲宽度 200 ps, 此时线缆不能再被视为“电短

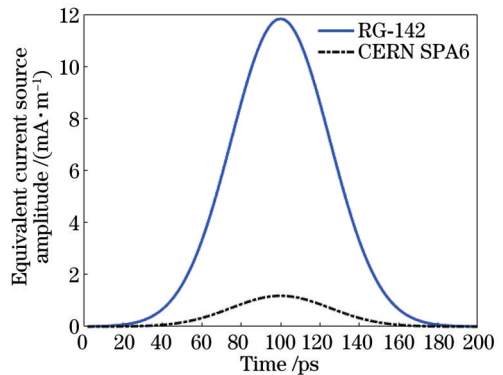


图 11 等效电流源计算结果

Fig. 11 Calculation results of equivalent current source

线”, 传输线效应明显。当 X 射线照射到线缆上时, 线缆的每个长度微元都会产生等效电流源, 每个电流源产生的电流都会向左右两边流动。假设图 2 示意图中线缆左端的负载为无穷大, 右端的负载为 50 Ω, 最右端的电流源产生的电流一部分流向右端负载, 一部分向左流动, 向左流动的部分传播至左端开路负载后全反射, 再向右流动至右端负载, 故右端负载电压的脉冲宽度会扩展至电流流过两次线缆的时间, 即 10 ns。

然后, 对电磁辐射耦合进行仿真, 入射电磁脉冲的

表 3 不同线缆的结构参数

Table 3 Structural parameters of different cables

Parameter	CERN SPA6	RG142
Core wire radius /mm	0.25	0.47
Core wire material	Copper	Silver plated copper clad steel
Dielectric layer radius /mm	0.850	1.475
Dielectric layer material	XPE	PTFE
Shielding layer radius /mm	1.10	1.98
Shielding layer material	Copper	Double layer silver plated copper braid
Sheath radius /mm	1.600	2.475
Sheath material	FRNC	FEP
Inner diameter of outer shielding layer /mm	3.2	
Outer diameter of outer shielding layer /mm	3.9	
Outer shielding layer material	Copper	
Outer sheath radius /mm	5.5	
Outer sheath material	FRNC	

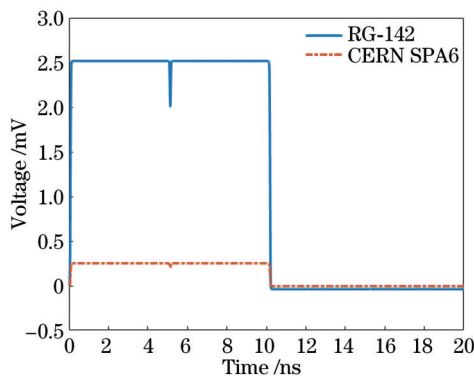


图 12 线缆终端负载的电压波形

Fig. 12 Voltage waveforms of cable termination loads

条件与 2.3 节一致, 线缆设置符合实际实验条件, 一端开路, 一端接 50Ω 负载后接地, 屏蔽层单端接地, 终端负载的电压仿真结果如图 13 所示。可以看出, 两种线缆的响应均为衰减振荡, 并且 RG142 的电磁屏蔽效能更好, 响应幅度比 CERN SPA6 低了一个数量级, 原因是 RG142 具有双层屏蔽结构, 而 CERN SPA6 的外屏蔽两端都没有接地, 相当于只有内屏蔽层起作用, 其电磁辐射响应更大, 这与 2.3 节中电磁辐射响应随屏蔽层层数的增加而降低的规律一致。

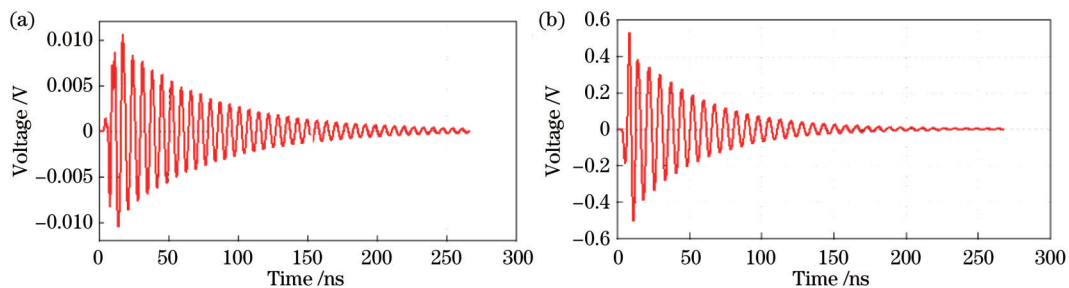


图 13 线缆电磁辐射耦合电压仿真结果。(a) RG142; (b) CERN SPA6

Fig. 13 Simulation results of cable electromagnetic radiation coupling voltage. (a) RG142; (b) CERN SPA6

3 线缆辐照实验及分析

3.1 实验设置

线缆辐照实验示意图如图 14 所示, 实验线缆采用 2.4 节中所述的两种线缆。神光-III 靶室的半径为 3 m, 打靶实验时靶室内部为真空状态, 将线缆固定在靶室内壁的法兰上, 一端接 50Ω 匹配阻抗, 一端通过法兰的接口将线缆信号引至靶室外, 通过传输线传至示波器的 50Ω 档进行采集, 此时对应图 2 示意图中 $R_L=50 \Omega, R_S=\infty$ 的情况。实验中线缆将同时受到 X 射线和电磁辐射照射, 故所测信号为 X 射线引起的 SGEMP 响应与电磁辐射 (EMP) 引起的耦合响应的叠加。

在本次实验中, 激光打靶条件为每束激光能量为 600 J, 激光波形为脉冲宽度为 600 ps 的方波脉冲, 共 48 束激光, 实际总能量为 27741 J, 靶类型为内爆靶, 中子产额为 7.8×10^{10} 。

3.2 实验结果及分析

将 CERN SPA6 与 RG-142 样品如图 14 所示放置在靶室内, 样品线缆长度为 1 m, 一端接开路负载, 并包裹绝缘胶带与铜箔以进行电磁屏蔽, 一端通过传输

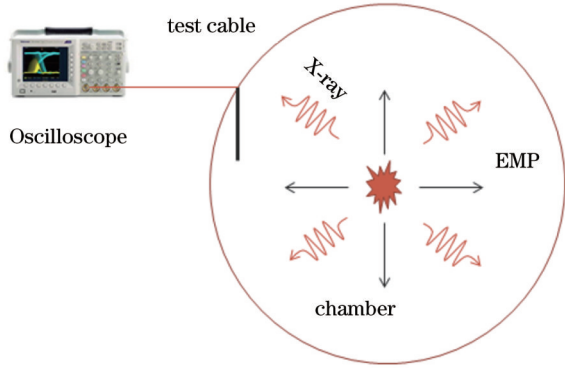


图 14 线缆辐照实验示意图

Fig. 14 Schematic diagram of cable irradiation experiment

线连接至示波器,测得的线缆的终端负载电压如图 15 所示。

由于两种线缆基本放置在同一位置,故所受到的辐射条件是一致的,同样是一端开路、一端匹配负载,线缆长度也相同,理论上二者的耦合响应应当波形一致,幅度可能有差别,但从图 15 可以看出,二者在 32 ns 之前的响应在时域上波形完全不一致,且 RG142 的电压峰值大于 CERN SPA6 的峰值,而在 32 ns 之后二者的时域波形近似一致,即在负载电压同一时刻增大或减小,并且 RG142 的电压幅值小于 CERN SPA6 的幅值。

首先,对靶室内部辐射环境进行进一步分析。48 路激光照射靶丸引发内爆,内爆产生中子、X 射线、 γ 射线和超热电子,由于内爆过程时间短,故可近似认为上述几种粒子与辐射同时产生并以靶丸为中心均匀地向外传播。内爆产生的中子的运动速度约为 5×10^7 m/s^[26],而 X 射线、 γ 射线和超热电子激励的电磁辐射传播速度约等于光速,故中子到达实验线缆所在位置(距离靶丸 3 m)的时刻比硬 X 射线、 γ 射线和电磁辐射晚约 60 ns。本实验中中子的产额为 7.8×10^{10} ,远低于 X 射线光子数 (5.8×10^{16})。由于单位时间内每个中子辐照线缆引起的电流响应不会比 X 射线所引起的响

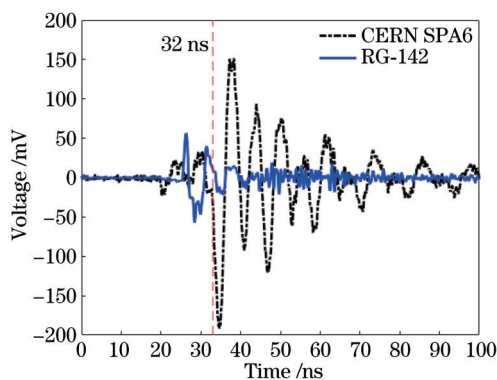


图 15 线缆终端负载电压的实验测量结果

Fig. 15 Experimental measurement results of cable terminal load voltage

应高 5~6 个数量级^[27],因此本实验中中子所引起的线缆耦合响应可以忽略不计。由于内爆产生的 γ 射线的产额为中子产额的 $1/10^{5[28]}$,故本实验中 γ 射线的产额近似为 7.8×10^5 ,同样远低于 X 射线光子数 (5.8×10^{16}),即本实验中 γ 射线所引起的线缆耦合响应也可以忽略不计^[27]。因此,实验线缆的响应可近似为只有 X 射线响应和电磁辐射响应的叠加。

由 2.4 节可知,CERN SPA6 线缆的电离辐射响应比 RG142 大概低一个量级,而电磁辐射响应比 RG142 高一个量级。电离辐射 X 射线主要在打靶瞬间产生,持续时间短,而电磁辐射会在靶室内不断反射,持续时间长。分析 32 ns 之后的响应,两种线缆响应波形基本一致,并且符合振荡衰减,由于靶室内部电离辐射持续时间长,电磁辐射持续时间长,故可知 32 ns 之后的信号为电磁辐射响应。由于 CERN SPA6 对电磁辐射更敏感,故从其信号来看 32 ns 前也存在电磁辐射,但比 32 ns 后的电磁场强度低,即 32 ns 前的低强度电磁场在 RG142 线缆上产生的耦合信号很小,此时 RG142 的耦合信号可近似认为是 X 射线响应。在同样的 X 射线辐照下 CERN SPA6 的响应应当低一个数量级,故 32 ns 前可认为 CERN SPA6 的耦合信号是电磁辐射响应。

由 2.4 节可知,内爆产生的 X 射线的时域波形近似为 200 ps 高斯脉冲,能量假设为单能 30 keV,仿真得到线缆终端负载响应时域波形为幅度为 2.5 mV、脉冲宽度为 10 ns 的单极性脉冲,实验测得 RG142 的 X 射线响应终端负载电压的脉冲宽度约为 10 ns,与 2.4 节中考虑传输线效应时的结果一致,符合预期。然而,实测信号表明 RG142 的终端负载电压幅度为 50 mV 左右,且先正后负,有双极性波形的特点,与仿真结果不吻合,故可推测实验情况与仿真时所假设的理想情况有区别。

由 2.4 节可知, RG142 线缆的 X 射线响应与入射 X 射线能量有关,当 X 射线在 30~50 keV 能量范围内变化时, X 射线响应可相差一个量级。由于实验条件有限,故本次实验无法获取激光打靶产生的 X 射线能谱,2.4 节中 X 射线响应的仿真条件均基于文献[25]的结果,但该文献所用打靶条件与本次实验有所区别,如激光脉冲宽度与中子产额均不同,故可能出现误差。若实际 X 射线的平均能量比 30 keV 高,或者实际 X 射线产额高于 1%,则 RG142 的 X 射线响应会更大,在幅度上会更接近实验结果。

实际线缆在生产过程中也可能存在绝缘掺杂、金属毛刺和裂纹气隙等缺陷^[29]。线缆在运输和使用中也可能因弯折盘卷而使得绝缘介质层与金属屏蔽层贴合不紧密,出现间隙^[20, 30],如图 16 所示,间隙普遍存在于编织屏蔽线缆中^[20],且间隙宽度有时可与线缆屏蔽层的厚度相当^[30]。

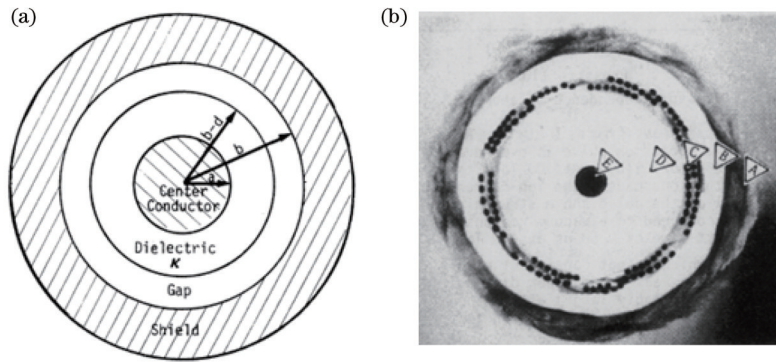


图 16 线缆内部示意图和截面显微照片^[30]。(a)线缆内部存在间隙示意图;(b)线缆截面显微照片

Fig. 16 Internal schematic diagram and cross-sectional micrograph of cable^[30]. (a) Schematic diagram of existence of gap inside cable; (b) micrograph of cable cross-section

根据文献[11],上述几种意外出现的情况会造成线缆 X 射线响应非线性变化。线缆中出现间隙会使得光电子射程变大,从而增强线缆 X 射线响应^[11, 20, 30]。如果间隙中有残存的空气未被释放(存在气隙),在辐照过程中空气电离会产生空气电导率,使得线缆 X 射线响应波形由单极性变为双极性^[11],如图 17 所示。因此,推测 RG142 线缆内部可能存在气隙,导致其 X 射线响应增大且波形改变,但由于实验条件有限,故无法检测气隙的大小。

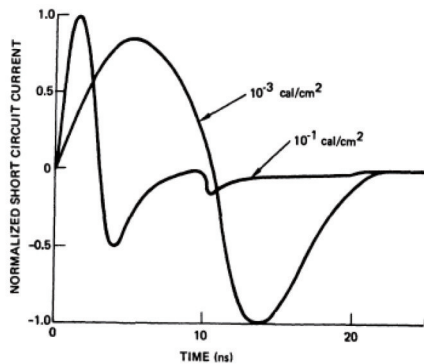


图 17 线缆存在气隙时的归一化 X 射线响应^[11]

Fig. 17 Normalized X-ray response with air gap in cable^[11]

3.3 复合屏蔽设计

神光-III 靶室内电磁辐射与电离辐射环境十分复杂,实验结果表明在打靶过程中靶室内部线缆会有高达 150 mV 的耦合电压响应。如果只屏蔽电磁辐射,而忽略电离辐射屏蔽,如本研究中的 RG142 线缆,其电磁屏蔽效能良好,但 X 射线响应较大,则也会对信号造成耦合干扰,故需要对电磁辐射和电离辐射进行复合屏蔽,下面初步提出一种复合屏蔽设计。

首先需保证良好的电磁屏蔽效能,如本实验中 RG142 的双层屏蔽结构,屏蔽材料选用电导率更高的铜,并让屏蔽层保持良好接地,在允许的情况下尽可能地增加屏蔽层数与屏蔽层厚度。线缆芯线和介质层尽可能选取光电产额较低的材料,以减少光电子发射,降

低线缆 SGEMP 响应。线缆外包装对 X 射线衰减率较大的护套,以降低照射到线缆内部的 X 射线通量。同时,应当避免线缆绝缘介质与屏蔽层之间出现间隙,这样可降低 X 射线响应^[31]。

4 结 论

结合靶室内辐射环境和不同线缆耦合规律,提供了一种定性分析复合环境下线缆耦合响应的思路。对 CERN SPA6 和 RG142 两种线缆在神光-III 靶室内进行了辐照实验,并对电磁辐射和电离辐射下的响应进行了仿真分析,发现双层屏蔽的 RG142 对电磁辐射的耦合响应比单层屏蔽 CERN SPA6 低,但其电离辐射耦合更高,说明 ICF 靶室内的线缆不可以仅仅通过提高电磁屏蔽效能来实现辐射加固。结合电磁辐射和电离辐射的耦合机制,初步给出了复合屏蔽线缆的设计思路。

实际实验中神光靶室内辐射环境复杂,电磁辐射可能从各个方向入射,极化方向多变,并且电离辐射不是单能 X 射线。由于实验条件所限,无法精确获取 X 射线的能谱和产额,以及电磁辐射的频谱和时域波形,故仿真中将辐射环境简化为平面波入射和单能 X 射线入射,辐射条件均来自已有文献,可能与实际辐射条件有区别。同时,仿真时建立的线缆模型为理想条件下的模型,而实际情况下线缆中可能出现气隙等影响 X 射线响应的结构,因此仿真结果与实验结果之间存在误差。

由于本实验未能测得靶室内辐射环境,并且实验线缆也可能存在气隙,故在未来需要对辐射环境进行精确测量,对线缆可能存在的缺陷情况进行准确预测,并建立更精确的计算模型,即在 X 射线仿真程序中将气隙等影响考虑进来,开展更深入的研究来实现定量分析。

参 考 文 献

- [1] Wang F, Jiang S E, Ding Y K, et al. Recent diagnostic developments at the 100 kJ-level laser facility in China[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2020, 5(3): 035201.

- [2] de Cervens, Gomme D R, Raimbourg J C, et al. EMC protections for high voltage and high power on a wide facility: the mégajoule laser[C]//2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 17-21, 2009, Austin, TX, USA. New York: IEEE Press, 2009: 109-114.
- [3] Clement D M, Lowell R A. The hardening of satellite cables to X-rays[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978, 25(6): 1391-1398.
- [4] 张云峰, 姜光兴, 曹伟. 矩量法分析屏蔽导体内的多层介质多导体传输线[J]. 南京邮电学院学报, 2005, 25(1): 51-54.
Zhang Y F, Jiang G X, Cao W. MoM analysis of shielded multiconductor transmission lines in multilayered dielectric media[J]. Journal of Nanjing Institute of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2005, 25(1): 51-54.
- [5] Chilan M, Pirhadi A, Asadi S, et al. Analysis of multiconductor transmission lines using the time domain method of lines[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2021, 138: 153863.
- [6] 廖亮. 基于 FDTD 的不等长有损耗传输线的瞬态分析[J]. 数字通信世界, 2011(3): 56-59.
Liao L. Transient analysis of unequal length lossy multiconductor transmission lines based on FDTD[J]. Digital Communication World, 2011(3): 56-59.
- [7] 陈旭. 强电磁脉冲作用下地面附近的场线耦合研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Chen X. Study of field line coupling effect near the ground under the action of strong electromagnetic pulse [D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [8] van Lint V A J. Radiation-induced currents in coaxial cables[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1970, 17(6): 210-216.
- [9] Bernstein M J. Radiation induced currents in subminiature coaxial cables[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1973, 20(6): 58-63.
- [10] Trybus P R, Chodorow A M. MLTRANS: a time domain solution of the response of transmission lines in a photon environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1976, 23(6): 1997-2001.
- [11] Wuller C E, Nielsen L C, Clement D M. Definition of the linear region of X-ray-induced cable response[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978, 25(4): 1061-1067.
- [12] Chivington E P, Shaw L E, Alston T E. Radiation induced common mode and individual wire current response of shielded twisted pair cables[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1976, 23(6): 1952-1957.
- [13] 钟玉芬, 周辉, 李宝忠, 等. DPF X 光源中编织屏蔽电缆的辐照效应研究[C]//第 9 届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 北京: 中国电子学会, 1998: 247-250, 236.
Zhong Y F, Zhou H, Li B Z, et al. Study on radiation effect of braided shielded cable in DPF X light source [C]//Proceedings of the 9th National Annual Conference on Nuclear Electronics and nuclear detection technology. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 1998: 247-250, 236.
- [14] 李进玺, 程引会, 周辉, 等. 用传输线和时域有限差分法计算电缆 X 射线响应[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(12): 2079-2082.
Li J X, Cheng Y H, Zhou H, et al. Calculation of coaxial line X-ray responses by transmission line method and finite difference time domain method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 2079-2082.
- [15] 马良, 周辉, 程引会, 等. 直流 X 射线模拟电缆 X 射线响应的可行性[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(3): 500-505.
Ma L, Zhou H, Cheng Y H, et al. Feasibility of using continuous X-ray to simulate cable response under X-ray environment[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(3): 500-505.
- [16] 马良, 周辉, 郭景海, 等. 屏蔽电缆 X 射线辐照非线性效应模拟[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(3): 561-566.
Ma L, Zhou H, Guo J H, et al. Simulation of nonlinear effect of shielded cable irradiated by X-ray[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(3): 561-566.
- [17] 周开明, 王艳, 邓建红. 线缆系统电磁脉冲效应测量系统研制和试验[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 175-179.
Zhou K M, Wang Y, Deng J H. Development and test of measurement system for cable system generated electromagnetic pulse effects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7): 175-179.
- [18] Xu Z Q, Meng C. Evaluation of cable SGEMP response using Monte Carlo and finite-difference time-domain methods[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017, 64(11): 2829-2836.
- [19] Beers B L. Radiation-induced signals in cables-II[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1977, 24(6): 2429-2434.
- [20] 马良, 周辉, 吴伟, 等. 屏蔽电缆 X 射线辐照响应的有限元求解[J]. 现代应用物理, 2017, 8(3): 30-37.
Ma L, Zhou H, Wu W, et al. Finite element method for the response of shielded cable irradiated by X-ray[J]. Modern Applied Physics, 2017, 8(3): 30-37.
- [21] 金哈冰. 强激光-靶作用激励电磁脉冲粒子模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2018: 9-13.
Jin H B. Particle simulation of electromagnetic pulse excited by intense laser-target interaction[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018: 9-13.
- [22] 杨进文, 杨鸣, 李廷帅, 等. 基于神光 III 主机装置激光打靶产生电磁脉冲特性研究[J]. 电气技术, 2016(11): 21-24.
Yang J W, Yang M, Li T S, et al. Investigation of electromagnetic pulses generated by the laser shooting based on SG-III facility[J]. Electrical Engineering, 2016(11): 21-24.
- [23] 杨进文, 易涛, 李廷帅, 等. 激光打靶过程中的电磁脉冲特性[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(10): 122-127.
Yang J W, Yi T, Li T S, et al. Electromagnetic pulse characteristic in process of laser shooting[J]. High Power

- Laser and Particle Beams, 2015, 27(10): 122-127.
- [24] 易涛, 景峰, 王新彬, 等. 神光 III 装置电磁脉冲测量[J]. 安全与电磁兼容, 2017(6): 83-85.
Yi T, Jing F, Wang X B, et al. Electromagnetic pulse measurement at ShenGuang III laser facility[J]. Safety & EMC, 2017(6): 83-85.
- [25] 王雅琴, 胡广月, 赵斌, 等. 神光 III 激光装置直接驱动内爆靶产生的连续谱 X 光源[J]. 物理学报, 2017, 66(11): 115202.
Wang Y Q, Hu G Y, Zhao B, et al. Spectrally smooth X-ray source produced by laser direct driven DT implosion target on SG-III laser facility[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(11): 115202.
- [26] Laboratory for Laser Energetics. LLE review, Quarterly Report[R]. Rochester: University of Rochester, 2003(96): 285.
- [27] Stathis P. Radiation and EMI effects in the NIF environment[R]. San Francisco: Lawrence Livermore National Lab, 1994.
- [28] Malone R M, Frogget B C, Kaufman M I, et al. Overview of the gamma reaction history diagnostic for the national ignition facility (NIF) [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7652: 76520Z.
- [29] 夏荣, 杨帆, 刘恒, 等. 绝缘气隙放电对高压电缆的电气和热学性能的影响研究[J]. 智能电网, 2019, 9(2): 88-96.
Xia R, Yang F, Liu H, et al. Study on the influence of insulation air gap discharge on electrical and thermal performance of high voltage cable[J]. Smart Grid, 2019, 9(2): 88-96.
- [30] Chervenak J, van Lint V A J, Price M L, et al. Photon-induced anomalous cable currents[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1979, 26(6): 4927-4935.
- [31] Tasca D M, Raylman E T, Beers B L, et al. SGEMP response of large, multiwire satellite cables[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978, 25(6): 1382-1390.