



·脉冲功率技术·

## 强流二极管阳极靶温度和热形变模拟\*

胡 杨, 蔡 丹, 孙 江, 张金海, 杨海亮, 孙剑锋, 尹佳辉, 呼义翔

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

**摘 要:** 以电子束在靶中的能量沉积剖面为桥梁, 建立了二极管阳极靶温度和热形变模拟方法。该方法可获知二极管不同工作状态下靶的温度分布和热形变情况, 为靶热-力学损伤研究提供基础数据, 为二极管构型设计和寿命提升提供技术支撑。将该方法应用于“强光一号”短 $\gamma$ 二极管, 计算结果显示: 当阳极离子密度大于 $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时(强箍缩), 靶表面温度最高可达 $5500 \sim 6000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 热形变量达约 $4.5 \text{ mm}$ ; 无离子流时(弱箍缩), 温度处在 $4500 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 形变为 $2.8 \sim 3.5 \text{ mm}$ 。

**关键词:** 强流二极管; 阳极靶; 温度; 热形变; 模拟

中图分类号: TL506;O462

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210442

## Simulation of the temperature and thermal deformation of anode targets in high-current diodes

Hu Yang, Cai Dan, Sun Jiang, Zhang Jinhai, Yang Hailiang, Sun Jianfeng, Yin Jiahui, Hu Yixiang

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

**Abstract:** The thermal-mechanical damage induced by high current pulsed electron beam striking on anode targets is a key factor affecting the stability and lifetime of high current diodes. This problem is mostly addressed by replacing the anode target and cleaning the cavity and cathode to ensure the normal operation of the diode. In this paper, a diode anode target temperature and thermal deformation simulation method is established using the energy deposition profile of the electron beam in the target as a bridge. The method can be used to determine the temperature distribution and thermal deformation of the target under various diode operating conditions, provide basic data for the investigation of thermal-mechanical damage to the target, and provide technical support for diode configuration design and life enhancement. With application of this method to the “Qiangguang-I” accelerator, the simulation results show that the surface temperature of the target can reach  $5500 \sim 6000 \text{ }^\circ\text{C}$  and the thermal deformation can reach about  $4.5 \text{ mm}$  when the ion density is more than  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (tight-pinched). The temperature is about  $4500 \text{ }^\circ\text{C}$  and the thermal deformation is  $2.8 \sim 3.2 \text{ mm}$  when there is no ion flow (weak-pinched).

**Key words:** high-current diode, anode target, temperature, thermal deformation, simulation

强流脉冲电子束轰击至阳极靶上会致使靶产生气化、熔融、溅射、断裂等极强的热-力学损伤效应<sup>[1-2]</sup>。该效应在破坏阳极靶的同时, 还污损二极管腔体和阴极, 使得大部分强流二极管每次工作后需要拆开真空, 清洁腔体和阴极, 并更换阳极靶, 这严重制约了二极管工程稳定性、寿命和实验频次的提升。这一问题尚待解决的主要难题包括: (1) 不同构型的强流二极管, 电子束对靶的热-力学损伤程度如何; (2) 同一构型, 不同工作条件(电压、离子流不同)电子束对靶的损伤情况; (3) 二极管设计阶段如何将靶的热-力学损伤纳入考量; (4) 工程运行中, 如何预估靶热-力学损伤和腔体、阴极的污损情况从而制定高效率的维护方案。通过在设计上采取耐烧蚀阴极和二极管腔体材料、在运行维护中进行定期清洁检修等措施<sup>[3]</sup>, 上述问题有了初步的应对方案。

随着脉冲功率技术的进步, 通过模拟计算强流二极管阳极靶的热-力学损伤有了一定进展, 但成果较为零散。朱隽等使用蒙卡程序计算了强流脉冲电子束在靶中的能量沉积分布并与实验后靶的热-力学损伤情况进行了比对

\* 收稿日期: 2021-10-19; 修订日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11705150)

联系方式: 胡 杨, [huyang@nint.ac.cn](mailto:huyang@nint.ac.cn)。

分析<sup>[4]</sup>; Ying Qin 等采用有限元方法计算了脉冲宽度为微秒量级的、能量为 10~100 keV 脉冲电子束轰击铝的热-应力<sup>[5]</sup>; 王刚等利用热弹性理论过解析计算得到由激光辐照半导体材料引起的温度场和应力场的瞬态分布<sup>[6]</sup>。脉冲电子束作用下靶的热-力学效应模拟研究也取得了诸多成果<sup>[7-9]</sup>。

基于“热-力学效应多是由能量热沉积诱导而出”这一基本认识<sup>[10]</sup>, 在上述阳极靶热-力学损伤模拟研究成果基础上, 提出了二极管阳极靶温度和热形变模拟计算方法。该方法首先须通过二极管的粒子模拟(PIC)和 Monte Carlo(MC)模拟, 获得靶不同工作参数下的能量沉积剖面; 进而以能量沉积剖面为输入参数, 采用有限元算法(FEM)计算二极管不同工作参数下靶的温度分布和热形变。本文以“强光一号”短 $\gamma$ 二极管为应用对象, 获得了该二极管在不同阳极离子流影响下的阳极靶温升和热形变数据。结果显示: 靶热-力学损伤与二极管工作模式密切相关, 阳极离子密度增大, 二极管电子束流箍缩增强, 靶温升及热形变数值升高。

## 1 模拟方法

文献[10]指出: “阳极靶受强流电子束轰击后产生的系列热-力学现象大部分都是通过脉冲粒子束与靶材相互作用导致的能量沉积诱导出来的, 即能量沉积首先使材料的比内能增加, 进而引起其性质、状态变化及诸种热-力学效应”。因此, 获取不同二极管工作参数下阳极靶能量剖面是模拟计算靶温度分布和热形变的前提。如图 1 所示, 阳极靶能量沉积剖面的获取 PIC-MC 联合模拟进行。首先建立包含阳极离子流的可精确模拟二极管工作过程的 PIC 模型, 得到轰击到阳极靶上的电子束的能谱、入射角分布和落点分布; 再以此电子束参数为 MC 模型的源参数, 计算得电子束在靶中各深度的能量沉积值。

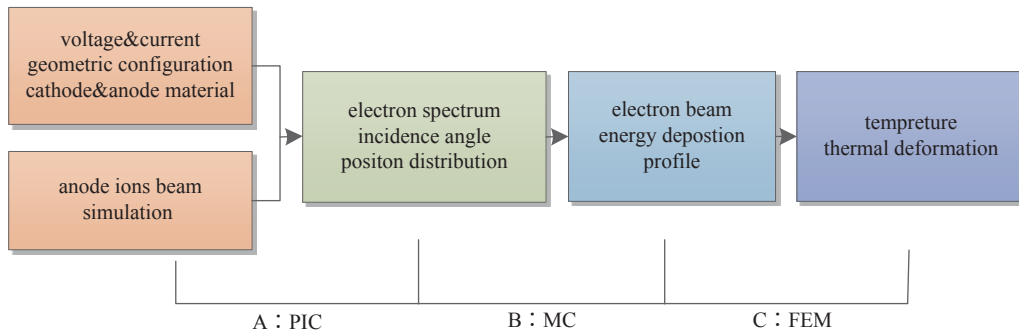


Fig. 1 Schematic of the method of anodes temperature and thermal deformation simulation

图 1 阳极靶温度和热应力模拟方法示意图

阳极离子流的模拟是 PIC 模型建立的关键。阳极等离子体主要来源为带电粒子在阴阳极上能量沉积引起的电极吸附气体逸出和电极材料电离<sup>[11]</sup>。基于这一认识, 采用电子与时域气体薄层碰撞和靶材直接电离发射 H<sup>+</sup>的方法分别模拟气体解吸附和电极材料发射这两种物理过程<sup>[12]</sup>。由此建立的 PIC 模型可较好地模拟不同离子流情形下的二极管工作过程<sup>[13]</sup>。在该项工作基础上, 通过以下步骤完成阳极靶温度和热形变的模拟计算。

(1) 利用建立好的二维轴对称二极管 PIC 模型, 馈入实测二极管间隙电压后进行模拟, 可记录轰击到阳极靶上的每个时间步长下电子 6 个柱坐标( $z, r, \theta$ )相空间参数, 其中,  $z, r, \theta, P_r, P_\theta, P_z$  以及对应步长的电荷量  $Q$ 。  $z, r, \theta$  为电子位置信息(二维模型  $\theta$  为 0),  $P_r, P_\theta, P_z$  为动量。

(2) 步骤(1)中得到的相空间参数经处理后可得特定阴阳极构型下的轰击至阳极靶上的电子束能谱、入射角分布及落点分布。  $z$  为靶表面的轴向位置, 所有电子均相同, 可忽略;  $r$  为电子轰击靶时的径向位置, 经统计后可获得电子束的落点分布; 以垂直入射为  $0^\circ$ , 角度分布为

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{P_r^2 + P_\theta^2}}{P_z} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (1)$$

电子动能  $E_k$  由(2)、(3)两式确定

$$\gamma^2 = 1 + \left( \frac{P}{m_0 c} \right)^2 \quad (2)$$

$$E_k^2 = (\gamma - 1)m_0 c^2 \quad (3)$$

以上式中:  $\gamma$  为相对论因子,  $m_0$  为电子静止质量,  $P^2 = P_r^2 + P_\theta^2 + P_z^2$ 。 每一步长中的电荷数目  $N = Q/e$ ,  $e$  为单位电荷。

(3) 建立电子束轰击阳极靶的 MC 模型, 设靶半径为  $r$ , 分成  $n$  层, 每层厚度  $\Delta z$ 。将前述电子束参数作为 MC 模型中电子的初始参数, 计算得电子束在阳极靶中第  $i$  层 ( $i=1, \dots, n$ ) 中的归一化单位质量能量沉积值  $W_i$ , 单位为 J/g。

(4) 将各层能量沉积值  $W_i$  与二极管工作时间  $t_0$ 、电子数目  $N$ 、靶密度  $\rho$  相关联, 得各层热源功率密度  $p_i$ ; 将各层热源参数馈入有限元模型中靶的不同深度上, 即可开始计算靶的温度和热应力。

电子数目

$$N = \int_0^{t_0} I(t) dt / e \quad (4)$$

式中: 二极管电流为  $I(t)$ 。因为电子束轰击阳极靶的持续时间很短, 仅为几十 ns, 因此可以认为瞬时靶各层馈入了一个功率密度, 持续时间  $t_0$  后为 0。简化线性处理后的各层热功率源密度  $p_i$  为

$$p_i = NW_i \cdot (\rho \cdot \Delta z) / t_0, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为靶材密度。

## 2 模拟实例

### 2.1 平台介绍

以“强光一号”加速器短  $\gamma$  二极管为对象, 进行阳极靶温度和热形变模拟计算。如图 2 所示, “强光一号”加速器负载区域主要由磁绝缘传输线 (MITL), 等离子体断路器 (POS) 和二极管组成<sup>[14]</sup>。二极管阴极为双环形黄铜, 阳极为 0.6 mm 钽靶, 工作电压 3.0~3.5 MV, 电流 100~120 kA。靶面硅吸收剂量率可达  $7 \times 10^9$  Gy/s, 是当前国内重要的瞬时辐射效应模拟考核设备之一<sup>[15]</sup>。

“强光一号”短  $\gamma$  二极管为典型的强箍缩二极管, 电子束箍缩剧烈, 阳极靶的热-力学损伤效应强, 靶溅射物对二极管腔体和阴极的污损较为严重, 每次实验后须拆开二极管进行检查和清洁。进行该二极管阳极靶温度和热形变的模拟, 有助于了解不同束流箍缩情况下靶的热-力学损伤情况, 制定更高效的维护方案。

### 2.2 PIC 模拟

依照“强光一号”加速器短  $\gamma$  二极管实际尺寸建立了包含阳极离子流的 PIC 模型, 阴极为黄铜, 半径 60 mm, 爆炸发射阈值设置为 250 kV/cm; 阳极为钽, 半径 82.5 mm, 设置成 6 个发射块, 每块径向长度 16.5 mm, 靶材电离阈值设置为 458 °C<sup>[16]</sup>, 该发射块表层的气体薄层厚度设置为 0.1 mm, 其开始作用时刻与靶材电离时刻相同; 阴阳极间隙 28.8 mm。电子与气体电离碰撞产生的离子密度由输入的碰撞截面控制, 产生的离子设定为  $H^+$ 。馈入实测电压, 其底宽 51 ns, 峰值 3.2 MV, 峰值时刻 15 ns。

获得了不同阳极离子流密度影响下 ( $10^{12}/10^{14}/10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) 二极管束流箍缩情况。结果显示, 离子流的加入对二极管的工作过程产生了较大的影响, 电子在阴阳极间隙的输运特性发生了显著的改变。无离子流时电子束并未发生强箍缩 (图 3), 随着离子流的增大, 电子束箍缩逐渐增强。当离子密度大于  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时发生了强箍缩 (图 4)。实

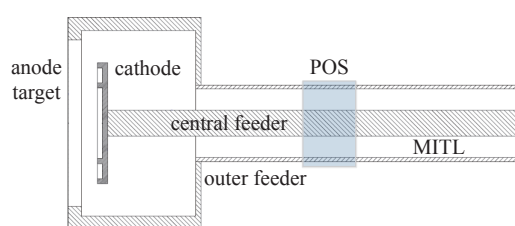


Fig. 2 Diagram of the load area of the “Qiangguang-1” accelerator

图 2 “强光一号”短  $\gamma$  状态负载区域示意图

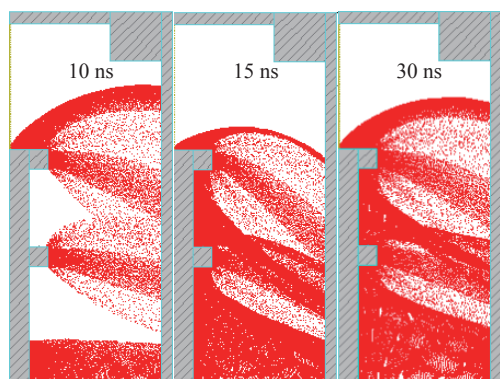


Fig. 3 Particle images at 10 ns, 15 ns and 30 ns without ions

图 3 无阳极离子流时不同时刻下电子空间分布图像

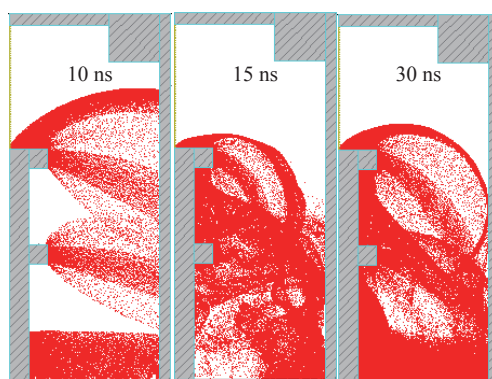


Fig. 4 Particle images at 10 ns, 15 ns and 30 ns with  $H^+$  ions ( $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )

图 4 存在阳极离子流 ( $H^+$ ,  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) 时的电子分布图像

际二极管工作时,由于阳极离子流的存在,二极管工作模式更接近于图4。

通过记录轰击到靶面上的电子的相空间参数,计算了不同离子流密度( $10^{12}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$ )下的轰击到阳极靶的电子束参数落点分布、入射角分布和能谱。如图5和图6所示,在无离子流和离子密度低于 $10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$ 的情况下,电子束箍缩程度较为轻微,电子落点集中在与阴极环半径相当的靶半径55~65 mm处,入射角度均小于 $40^\circ$ ;当电子束箍缩程度加剧后,电子束更多地向靶心漂移,以大于 $40^\circ$ 的角度轰击到靶上的电子数目占到了近一半。能谱分布的基本规律是电子束强箍缩出现会使得能谱稍变软,原因是阳极靶面等离子体鞘层的存在使得阳极靶面电势下降。

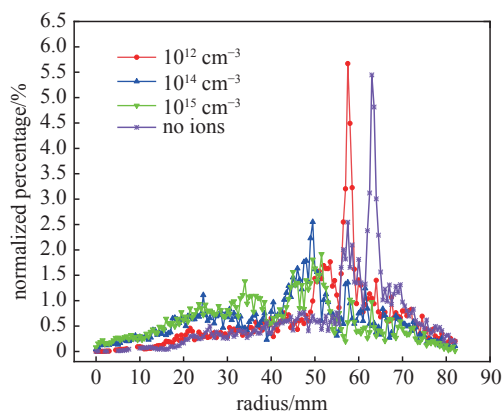


Fig. 5 Position distributions in  $r$  direction of the target with different ions densities

图5 不同阳极离子密度电子束靶面落点分布

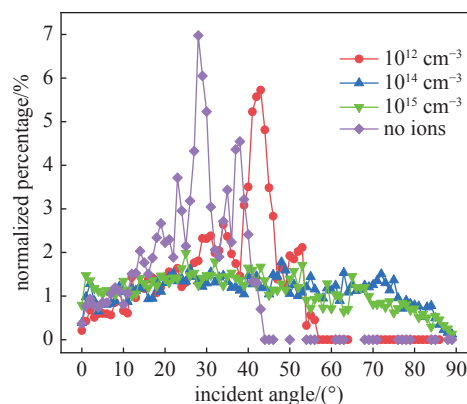


Fig. 6 Incident angle distributions with different ions densities

图6 不同阳极离子密度下电子束入射角分布

### 2.3 温度分布和热形变模拟

以2.2节获取的不同阳极离子密度影响下的电子束轰击阳极靶的入射角分布和落点分布为电子束源参数,进行了电子束与靶相互作用的MC计算。“强光一号”短 $\gamma$ 二极管不同阳极离子流状态下阳极靶的能量沉积如图7(a)所示,各深度能量沉积差异主要集中在靶表层(深度小于0.1 mm处);当阳极离子流密度小于等于 $10^{12}$   $\text{cm}^{-3}$ 时,能量沉积值随深度变化的曲线有一个“先上升、后下降”的过程;而离子密度增大至 $10^{14}$   $\text{cm}^{-3}$ 后,曲线单调下降。另外,该二极管为强箍缩二极管,轰击到靶心处( $r \leq 20$  mm)的电子多以大角度入射,能量主要沉积在靶表层,因此整体来看,整个靶的表层的能量沉积值主要由靶心处沉积的能量所贡献,电子束对阳极靶的热-力学破坏主要集中在靶心( $r \leq 20$  mm)处。如果继续按照上述方法进行靶整体的温度分布计算,将会掩盖靶不同半径处的温度差异。因此,为使温度的计算更贴近实际物理过程,同时也考虑到计算量的缩减,选择只计算靶心处的温度分布。靶心处的能量沉积剖面见图7(b),由该图数据可知,当离子密度较低(不高于 $10^{12}$   $\text{cm}^{-3}$ ),束流箍缩较弱时,电子束入射角度较小,轰击到靶心处的电子数目小于束流剧烈箍缩时,能量沉积峰值深度位于0.05 mm左右,靶面沉积值6~10 J/g;束流强箍缩时,靶心处的靶面能量沉积值达42~50 J/g,沉积峰值深度位于表面。

将0.6 mm钽靶分为10层,由图7(b)和靶心处电子束数目可计算得如表1中示出的 $r \leq 20$  mm各层的功率密

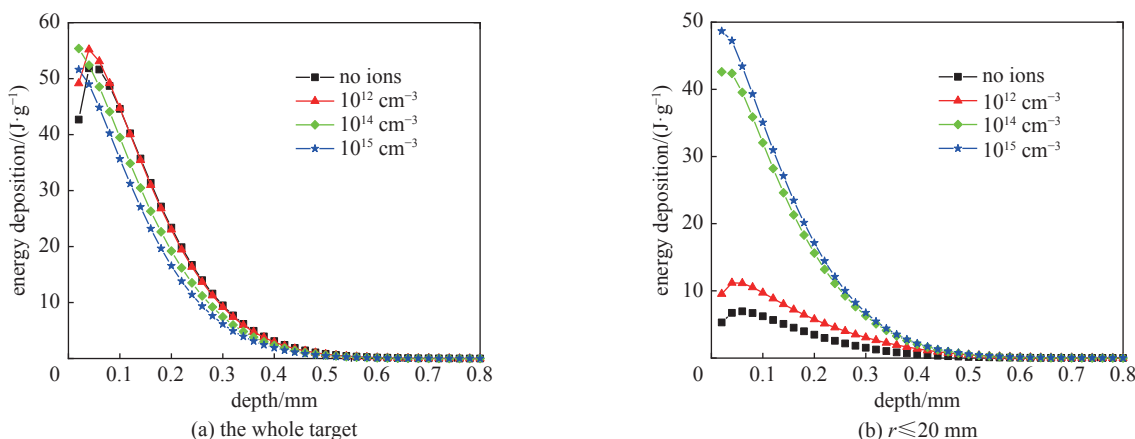


Fig. 7 Energy deposition profile on the anode target of electrons with different ions densities

图7 不同离子流情况下阳极靶能量沉积剖面

表 1 靶心区域 ( $r \leq 20$  mm) 各层热功率密度  
Table 1 Power density of every 0.06 mm depth in the  $r \leq 20$  mm region

depth/mm	thermal power density/(TW/m <sup>2</sup> )			
	no ions	10 <sup>12</sup> ion/cm <sup>3</sup>	10 <sup>14</sup> ion/cm <sup>3</sup>	10 <sup>15</sup> ion/cm <sup>3</sup>
0.06	1.32	2.22	8.67	9.71
0.12	1.29	2.03	6.70	7.34
0.18	0.95	1.51	4.47	4.93
0.24	0.63	1.07	2.78	3.04
0.30	0.38	0.74	1.62	1.74
0.36	0.22	0.48	0.87	0.93
0.42	0.12	0.29	0.44	0.46
0.48	0.06	0.16	0.20	0.22
0.54	0.03	0.08	0.08	0.09
0.60	0.01	0.03	0.03	0.03

度。功率密度数据分布大致与能量沉积趋势相同。

建立如图 8 所示的阳极靶靶心区域有限元模型,靶直径 40 mm,共 10 层,每层厚度 0.06 mm,靶材料为钽,其材料参数见表 2<sup>[17]</sup>。整个靶的初始温度设置为室温 22 °C,将上述功率密度数据分层添加至每层靶表面上,持续时间为 50 ns。利用有限元软件 FELAC 瞬态热分析模块进行靶的瞬态温升计算<sup>[18]</sup>。然后将温度场计算结果作为热应力分析的初始温度体载荷,在靶边沿添加固定约束,进行瞬态热应力的计算。

靶表层温度变化结果于图 9 和图 10 中给出。结果显示,不同阳极离子流情况下,靶表面最高温度均超过钽靶熔点 3000 °C。当离子密度大于 10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup> 时,靶表面温度可达 5500~6000 °C;无离子流时,温度处在 4500 °C 左右。

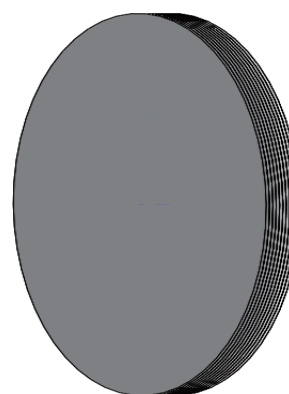


Fig. 8 FEM model of the Ta target  
图 8 阳极靶有限元模型

表 2 钽材料参数  
Table 2 Properties of Ta

density/(kg/m <sup>3</sup> )	coefficient of thermal expansion/C <sup>-1</sup>	Young's modulus/Pa	Poisson's ratio	bulk modulus/Pa	shear modulus/Pa	thermal conductivity (25 °C)/(W·m <sup>-1</sup> ·C <sup>-1</sup> )	specific heat (26 °C)/(J·g <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
16690	6.5×10 <sup>-6</sup>	1.86×10 <sup>11</sup>	0.35	2.0667×10 <sup>11</sup>	6.8889×10 <sup>10</sup>	54	0.135

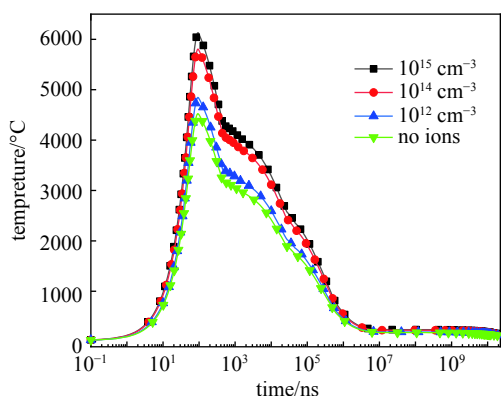


Fig. 9 Max temperature as functions of time of the target surface with  $r \leq 20$  mm (0.1 ns~20 s, logarithmic)  
图 9 靶心表面温度变化图(0.1 ns~20 s)

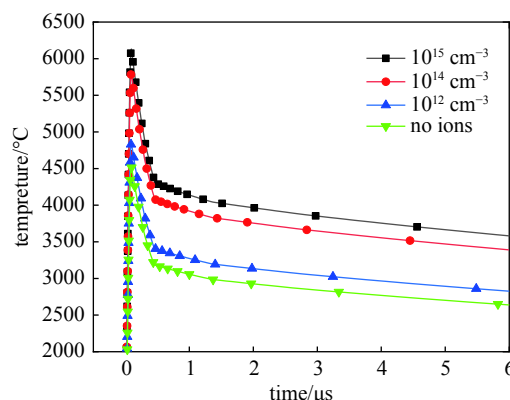


Fig. 10 Max temperature as functions of time of the target surface with  $r \leq 20$  mm (0~6 μs)  
图 10 靶心表面温度变化图(0~6 μs)

图 11 给出了不同离子流情形下靶的最终热形变情况。注意到红色标记为形变大于 3.2 mm 的位置。0,  $10^{12}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$  四种阳极离子流密度下形变最大量分别为 2.8, 3.5, 4.5 和 4.6 mm。此处需要注意的是, 由于钽的熔点为 3000  $^{\circ}\text{C}$ , 因此实际上对于“强光一号”短  $\gamma$  二极管来说, 即使在无离子流时, 阳极靶表面也会存在融化现象, 这与实验结果一致。另一方面, 考虑到有限元算法未包含相变, 图 11 中的标红位置也可以大致认为是融化、破孔位置。

### 3 结 论

通过采用“PIC-MC-FEM”联合模拟, 本文较为系统地给出了强流二极管阳极靶温度和热形变模拟计算方法。以“强光一号”短  $\gamma$  二极管为例, 计算了 0,  $10^{12}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$  四种阳极离子流密度影响下二极管靶面温度和热形变数值。结果显示抑制离子流可显著减轻阳极靶的热-力学损伤, 为评估不同工作状态二极管寿命提供了理论工具。后续工作包括: ①利用时域的不同位置处的能量沉积数值计算阳极靶不同时刻、不同位置处的温度和热形变<sup>[9]</sup>, 进一步提升该方法的适用性; ②将材料的相变纳入有限元算法; ③热-力学损伤中的热激波过程的模拟研究。

### 参考文献:

- [1] 牛锦超. 材料在脉冲X射线辐照下热-力学效应的SPH数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006: 8-9. (Niu Jinchao. SPH simulation of thermo-mechanical effects in materials under pulse X-rays radiation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 8-9)
- [2] 刘学. 脉冲电子束模拟X射线热—力学效应的优化研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016: 2-3. (Liu Xue. Optimization study on pulsed electron beam in simulating thermo-mechanical effects of X-ray[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016: 2-3)
- [3] 任书庆, 黄建军, 张永民, 等. “闪光二号”加速器运行状态分析及维护[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 703-705. (Ren Shuqing, Huang Jianjun, Zhang Yongmin, et al. Operation analysis and maintenance of Flash-II accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 703-705)
- [4] 朱隽, 章林文, 龙继东, 等. 高能通量脉冲电子束作用下钽靶破坏初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10): 1581-1584. (Zhu Jun, Zhang Linwen, Long Jidong, et al. Basic study on destruction of tantalum target bombarded by high energy flux pulse electron beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(10): 1581-1584)
- [5] Qin Ying, Zou Jianxin, Dong Chuang, et al. Temperature-stress fields and related phenomena induced by a high current pulsed electron beam[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 225(4): 544-554.
- [6] 王刚, 徐强, 刘洋, 等. 激光辐照引起的材料温度场和热应力场的瞬态分布[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 801-805. (Wang Gang, Xu Qiang, Liu Yang, et al. Transient distributions of temperature field and thermal stress field induced by laser irradiation[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4): 801-805)
- [7] 石磊. 脉冲离子束轰击靶的热效应数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(s1): 572-575. (Shi Lei. Simulation on thermal effect of target irradiated by pulsed ion beam[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(s1): 572-575)
- [8] Dennett C A, Buller D L, Hattar K, et al. Real-time thermomechanical property monitoring during ion beam irradiation using *in situ* transient grating spectroscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, 440: 126-138.
- [9] 言杰, 刘猛, 林菊芳, 等. 脉冲离子束作用下的靶温度场-应力场耦合分析[J]. 核技术, 2013, 36: 050203. (Yan Jie, Liu Meng, Lin Jufang, et al. Coupling analysis of the target temperature and thermal stress due to pulsed ion beam[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36: 050203)
- [10] 乔登江. 脉冲X射线热-力学效应及加固技术基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 99. (Qiao Dengjiang. Pulsed X-ray thermal-mechanical effects and fundament of nuclear hardening techniques[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 99)
- [11] Kelly J G, Goldstein S A, Swain D W. Influence of anode composition on the electrical properties of relativistic electron-beam diodes[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(11): 4726-4729.
- [12] Cai Dan, Liu Lie, Ju Jinchuan, et al. Simulative research on the anode plasma dynamics in the high-power electron beam diode[J]. Physics of Plasmas, 2015, 22: 073108.
- [13] 胡杨. 伽马辐照二极管复合阳极等离子体物理特性研究[R]. 西安: 西北核技术研究所, 2021. (Hu Yang. Physical characteristics of composite anode plasma in gamma-irradiation diode[R]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2021)
- [14] 蒯斌, 邱爱慈, 曾正中, 等. 短脉冲高剂量率 $\gamma$ 射线源技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 595-598. (Kuai Bin, Qiu Aici, Zeng Zhengzhong, et al. Research on source of high dose rate gamma-ray with short pulse duration[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 595-598)
- [15] 陈伟, 杨海亮, 邱爱慈, 等. 辐射物理研究中的基础科学问题[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 10-11. (Chen Wei, Yang Hailiang, Qiu Aici, et al. Basic science

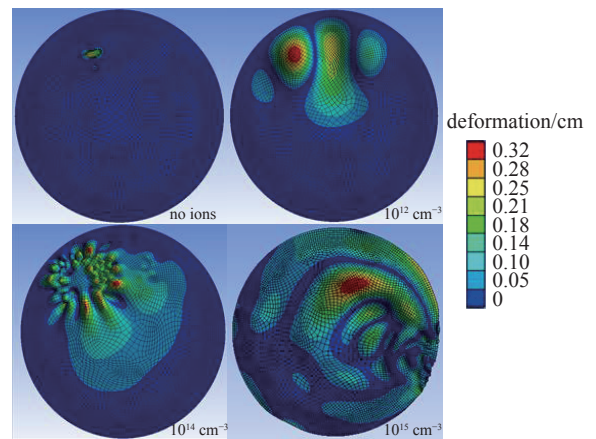


Fig. 11 Simulation results of the thermal deformation of the target ( $r \leq 20$  mm) with different ions densities

图 11 不同阳极离子密度影响下阳极靶靶心 ( $r \leq 20$  mm) 热形变模拟结果

- issues in radiation physics research[M]. Beijing: Science Press, 2018: 10-11)
- [16] Sanford T W L, Halbleib J A, Poukey J W, et al. Measurement of electron energy deposition necessary to form an anode plasma in Ta, Ti, and C for coaxial bremsstrahlung diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(1): 10-22.
- [17] 吴迪. 强流脉冲离子束与靶材相互作用的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 38-39. (Wu Di. Numerical study on interaction of intense pulsed ion beam and target[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006: 38-39)
- [18] 元计算. FELAC. MECH结构仿真分析软件[EB/OL]. [2022-01-10]. <http://www.yuanjisuan.cn/mech/#>. (Element Calculating Technology Co., Ltd. Structure simulation analysis software FELAC. MECH. <http://www.yuanjisuan.cn/mech/#>.)
- [19] 胡杨,杨海亮,张鹏飞,等. 强流二极管阳极电子束时域能量沉积特性模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 026001. (Hu Yang, Yang Hailiang, Zhang Pengfei, et al. Simulation of intense electron beam time-dependent energy deposition on anode target of high-current diode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 026001)