

# Rod-pinch 二极管箍缩特性的数值模拟

高 屹<sup>1,2</sup> 邱爱慈<sup>2</sup> 吕 敏<sup>1</sup> 杨海亮<sup>2</sup> 张 众<sup>2</sup> 张鹏飞<sup>2</sup>

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (西北核技术研究所 西安 710024)

**摘要** 采用 UNIPIC 程序模拟 Rod-pinch 二极管(RPD)的工作过程, 重点研究阳极等离子体和二极管结构参数对电子束箍缩的影响。模拟结果表明, 在不考虑阳极离子流作用下, RPD 无法在较低电压下(<2 MV)实现箍缩; 当阳极离子流达到一定值后, 进一步增加阳极表面发射离子流密度对二极管总电流和阳极杆尖端电流密度影响很小; 阴极不同表面发射电子束的箍缩效果不同, 各表面同时发射电子时, 后表面发射的电子束箍缩效果最好, 其次是中间表面, 前表面最差; 增大阴极厚度不能显著缩短电子束实现箍缩的时间。给出了阳极杆伸出阴极平面距离和阴阳极半径比等参数的选取范围, 对模拟计算与实验结果间的偏差作出了解释。

**关键词** Rod-pinch 二极管, 箍缩特性, 电子束, 离子流, 等离子体

**中图分类号** TL501.5, TL503

Rod-pinch 二极管(RPD)结构简单, 聚焦特性稳定, 可产生高剂量率和较小焦斑的高能脉冲X射线, 可用于材料爆轰流体力学、高速运动物体闪光照相和辐射效应模拟等领域<sup>[1-6]</sup>。用 PIC (Particle-in-Cell) 程序模拟 RPD 的箍缩特性, 有助于理解其工作过程, 分析其结构和等离子体参数对电子束箍缩的影响, 为优化 RPD 输出特性提供指导。对于 RPD 的数值模拟, 各国作了大量工作, 主要包括建立数值模拟方法、研究 RPD 不同工作阶段电子束的箍缩状态及电流电压关系<sup>[2,7]</sup>、以及高电压下(>4 MV)负极性 RPD(negative-polarity RPD)的输出特性研究等。中国工程物理研究院也进行了相关研究<sup>[8]</sup>。

本文采用西北核技术研究所和西安交通大学联合开发的全电磁 2.5 维 PIC 粒子模拟软件 UNIPIC<sup>[9,10]</sup>, 模拟 RPD 的工作过程, 研究了阳极等离子体的近似模拟方法, 以及离子流和二极管结构等参数对输出特性的影响, 为优化 RPD 结构参数和输出特性, 开展进一步的二极管实验提供基础。

## 1 RPD 的结构和工作过程

RPD 的典型结构如图 1 所示<sup>[2]</sup>,  $r_C$  和  $r_A$  分别为阴极和阳极半径;  $D=r_C-r_A$  为阴阳极间距;  $L$  为阴极厚度;  $L_{eff}$  为考虑电子轨迹发散作用后的有效阴极厚度, 阴极发射的电子束到达阳极时, 束包络与阳极杆轴线方向成一定角度, 一般选取  $L_{eff}=L+2D$ , 对

应于束包络与轴线成  $45^\circ$  的情况<sup>[2]</sup>;  $L_{rod}$  是阳极杆伸出阴极平面的距离。

RPD 的工作过程可分为空间电荷限制阶段(space-charge limited, SCL)、弱箍缩阶段(weakly pinched, WP)和磁限制阶段(magnetically limited, ML)<sup>[2,7]</sup>。空间电荷限制阶段, 二极管工作电压较低, 电流较小, 阴极发射电子沿径向运动, 此时, 阴阳极间仅存在有限的空间电荷, 电子的运动主要受电场力影响; 随着电压和电流的增大, 空间电荷增多, 电子运动受束流自磁场力的影响越来越大, 运动轨迹发生偏转, 形成弱箍缩; 当电压和电流足够大时, 束流自磁场力开始占主导地位, 电子发生磁绝缘并沿阳极杆轴向运动, 最终轰击阳极杆尖端, 产生高能韧致辐射 X 射线, 属于磁限制阶段<sup>[8]</sup>。

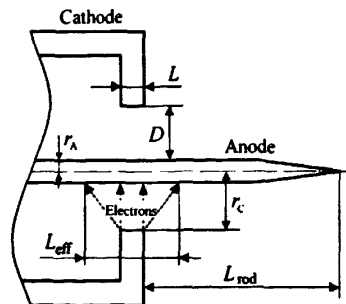


图 1 Rod-pinch 二极管结构示意图  
Fig.1 A schematic rod-pinch diode (RPD).

## 2 阳极等离子体对电子束箍缩的影响

### 2.1 不考虑阳极等离子体的 RPD 工作过程模拟

阳极等离子体是 RPD 中的离子源,发射离子并形成离子流,若不考虑离子流,则电子是 RPD 中唯一的带电粒子。我们采用 2D 轴对称模型,模拟这一情况下 RPD 的工作过程,看其能否发生箍缩现象。阴极盘厚度  $L=3.2\text{ mm}$ , 阴极孔半径  $r_c=8\text{ mm}$ , 阳极杆半径  $r_A=0.6\text{ mm}$ , 阳极杆伸出阴极平面的距离  $L_{\text{rod}}=18\text{ mm}$ 。由图 2, RPD 工作电压峰值 2.1 MV 时,电子束并未箍缩到阳极杆尖端。也即不考虑离子流作用,RPD 无法在较低电压下(1–2 MV)实现箍缩。根据空间电荷限制流模型,双向流条件下,离子流在一定程度上中和了空间的负电荷,电子电流和 RPD 总电流显著提高,以平板 RPD 为例,双向流条件下,RPD 电子流增大~2 倍<sup>[2]</sup>,使其在较低电压下迅速进入磁限制状态。

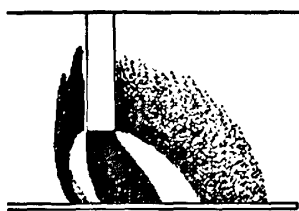


图 2 二极管工作电压为 2.1 MV 时,电子束空间分布状态  
Fig.2 Spatial distribution of electron beams in the RPD at 2.1 MV.

### 2.2 阳极等离子体近似模拟法

程序中直接引入稳定的阳极离子流进行束流动

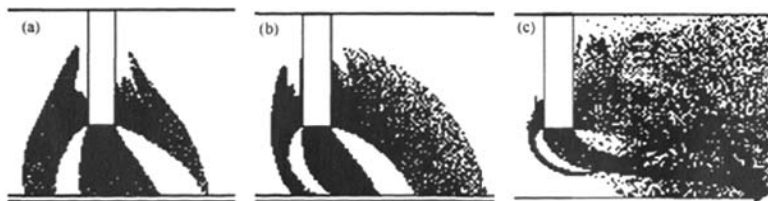


图 3 Rod-pinch 二极管不同阶段的电子束空间分布状态  
(a) 空间电荷限制阶段, (b) 弱箍缩阶段, (c) 磁限制阶段  
Fig.3 Schematic illustration of the RPD in (a) space-charge limited (SCL) phase, (b) weakly pinched (WP) phase and (c) magnetically limited (ML) phase.

## 3 阴极对电子束箍缩的影响

### 3.1 阴极电子发射位置的影响

磁限制阶段二极管临界流可由式(1)算得<sup>[2]</sup>:

$$I_{\text{crit}}(\text{kA}) = 8.5\alpha(\gamma^2 - 1)^{1/2} / \ln(r_c/r_A) \quad (1)$$

力学模拟,以近似阳极等离子体对电子束箍缩的影响。磁限制阶段,离子流占 RPD 总电流的 20%–40%, RPD 工作电压 1–2 MV、工作电流 30–70 kA 时<sup>[2]</sup>,阳极发射离子流~10 kA,阳极杆伸出阴极平面的部分设为离子发射区。该离子流由发射区表面均匀发射并沿径向运动,以此近似阳极等离子体的作用。输入梯形电压波,上升时间 2 ns,平顶宽度 30 ns,下降时间 20 ns,二极管工作电压幅值 2.0 MV。不同阶段的电子束空间分布状态如图 3 所示。

### 2.3 阳极发射离子流密度对电子束箍缩的影响

在不改变 RPD 结构和输入电压波形前提下,模拟阳极发射离子流密度对电子束空间分布状态、阳极杆尖端电流密度及 RPD 总电流的影响。由图 4,阳极发射离子流密度达一定值( $\sim 0.8 \times 10^8\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ )后,继续增大该密度值对 RPD 总电流及阳极杆尖端电流密度无显著影响;阳极发射的离子流并未全被阴极接收,未打到阴极的部分因空间电荷效应反射回阳极,降低了从发生器到 RPD 的能量耦合效率。实验中,由于阳极表面吸附杂质迅速汽化电离,阳极等离子体快速形成和运动导致 RPD 阴阳极间隙闭合及阻抗崩溃,增加了阳极附近的电子损失,降低了其 X 射线产生效率,因此,应尽可能抑制阳极等离子体的产生和运动速度。Hinshelwood 等<sup>[11]</sup>在 Gamble II 装置上,采用预加热阳极杆方式去除阳极吸附的低 Z 杂质,仅由阴极材料本身产生等离子体,有效降低了阳极等离子体的扩张速度,提高了 RPD 的 X 射线产生效率。

式中,  $\alpha$  为经验因子;  $\gamma = 1 + eV/m_e c^2$ ,  $e$  为电子电荷,  $V$  为二极管工作电压,  $m_e$  为电子静止质量,  $c$  为真空光速。式(1)表明,磁限制阶段 RPD 的总电流仅与管电压和阴阳极间隙有关,与阴极厚度及前后表面参数无关。但实际上,阴极前、后表面会因局部场增强而发射电子。

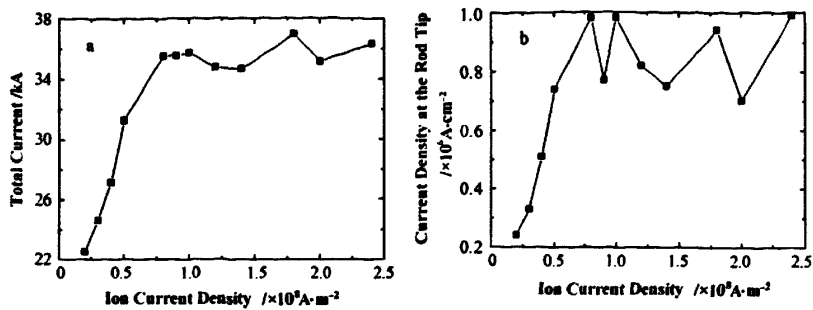


图 4 二极管总电流(a)和阳极杆尖端电流密度(b)随阳极发射离子流密度的变化曲线  
Fig.4 The RPD's total current (a) and rod-tip current density (b) vs current density of ions emitted from the anode.

由图 3 (c), 磁限制阶段, 电子束并未全部箍缩到阳极杆尖端, 阳极杆中部受电子束轰击较严重, 从而增大了射线源轴向焦斑尺寸, 不利于 RPD 在 X 射线闪光照相领域的应用。

在不改变 RPD 结构参数的情况下, 将其阴极发射面划分为后表面(背对杆尖的表面)、中间表面(同轴柱面)和前表面(朝向杆尖的表面), 模拟各表面同时发射电子时不同表面发射电子束的箍缩状态, 研

究阴极电子发射位置对电子束箍缩的影响, 结果见图 5。阴极不同表面发射的电子束轰击到阳极杆上的位置不同, 后表面出射的电子束箍缩效果最好, 电子束基本上聚焦于阳极杆尖端, 中间表面其次, 前表面出射电子束的箍缩效果最差。大量电子打到阳极杆中部, 增加了焦斑的轴向尺度, 图 3 (c)中轰击阳极杆中部的电子主要来自阴极前表面。



图 5 磁限制阶段阴极不同表面发射电子束的箍缩状态  
(a) 后表面, (b) 中间表面, (c) 前表面  
Fig.5 Pinching schemes of electrons emitted from different surfaces in ML phase.  
(a) Upstream, (b) Middle, (c) Downstream

3.2 阴极厚度的影响

调节阴极厚度, 模拟电子束运动和空间分布状态, 研究阴极厚度对电子束箍缩特性的影响。离子

流由整个阳极杆均匀发射, 密度  $0.8\times10^8\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ 。表 1 结果表明, 增加阴极厚度不能显著缩短电子束实现箍缩的时间。

表 1 阴极厚度对电子束箍缩的影响  
Table 1 Influence of cathode length  $L$  on electron pinching.

| 阴极厚度<br>Cathode length $L/\text{mm}$ | 阳极杆尖端电流密度<br>Rod-tip current density $/10^6\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ | 总电流<br>Total current /kA | 箍缩起始时刻<br>Pinch start /ns |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 3.2                                  | 1.11                                                                    | 46.4                     | 1.58                      |
| 6.0                                  | 1.17                                                                    | 47.7                     | 1.55                      |
| 10.0                                 | 1.09                                                                    | 46.9                     | 1.51                      |

同轴二极管空间电荷限制流公式如下<sup>[2,12]</sup>:

$$I_{\text{LB}} = I_a (2\sqrt{2}/9)(L_{\text{eff}}/r_A\kappa^2)U_0^{3/2} \tag{2}$$

式中,  $I_a=m_e c^3/e (\approx 17\text{ kA})$ ,  $U_0=eV/m_e c^2$ ,  $\kappa^2$  是  $r_C/r_A$

的函数, 空间电荷限制流大小与有效阴极厚度  $L_{\text{eff}}$  成正比, 而磁限制流大小与  $L_{\text{eff}}$  无关, 因此, 可通过增加阴极厚度来增大空间电荷限制流, 使 RPD 在较低电压下快速进入磁限制状态<sup>[13]</sup>, 缩短电子束实

现箍缩的时间。该结论与此处的模拟结果相矛盾，这是因为，空间电荷限制流是针对理想同轴结构的 RPD 推导而来的<sup>[12]</sup>，电子发射面仅限于同轴柱面，实际上，与轴线垂直的阴极表面发射的电子流在 RPD 总电子流中占据相当大的比例，增加阴极厚度只增加阴极中间表面面积，总的发射面积没有显著增加，起不到决定性作用。

4  $L_{rod}$  对电子束箍缩的影响

离子流由整个阳极杆均匀发射，密度为  $0.8 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ ，调节阳极杆伸出阴极平面的距离  $L_{rod}$  进行模拟，结果见表 2。可见  $L_{rod}$  对能否箍缩无影响，即使极端情况下，即阳极杆在阴极平面处截断 ( $L_{rod}=0$ )，或  $L_{rod}=50 \text{ mm}$ ，仍可形成稳定的箍缩电子流。

表 2 阳极杆伸出阴极平面的距离对电子束箍缩的影响  
Table 2 Influence of  $L_{rod}$  on electron pinching.

| 阳极杆伸出阴极平面距离<br>Distance beyond the cathode $L_{rod}/\text{mm}$ | 阳极杆尖端电流密度<br>Rod-tip current density $/10^6 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ | 总电流<br>Total current $/\text{kA}$ | 是否箍缩<br>Pinch or not |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 0                                                              | 0.93                                                                      | 42.1                              | Yes                  |
| 12                                                             | 1.14                                                                      | 45.9                              | Yes                  |
| 18                                                             | 1.11                                                                      | 46.4                              | Yes                  |
| 30                                                             | 0.86                                                                      | 43.9                              | Yes                  |
| 50                                                             | 0.75                                                                      | 41.7                              | Yes                  |

实际上， $L_{rod}$  取决于 RPD 分布参数的设计要求，并且要尽可能提高 X 射线产生效率和抑制阻抗崩溃现象。若  $L_{rod}$  过长，增大了 RPD 的分布参数，阳极杆尖端以外的部分对输入电压波的分压作用增强，从而降低了阳极杆尖端电压<sup>[2]</sup>。离子电流计算公式为：

$$I_i \approx J_i L_i 2\pi r_A \tag{3}$$

式中， $J_i$  为阳极表面发射离子流密度； $L_i$  为阳极表面离子发射区域的轴向尺度<sup>[14]</sup>，阳极杆伸出阴极平面距离较远时， $L_i$  可由  $L_{rod}$  近似。由式(2)， $L_{rod}$  过长，增大了阳极发射离子流，提高了离子流在 RPD 总电流中的比例，而离子流对韧致辐射无意义，因而降低了 X 射线产生效率。实验中发现， $L_{rod}$  过短，容易引起阻抗崩溃现象<sup>[2]</sup>。一般取  $10 \text{ mm} \leq L_{rod} \leq 25 \text{ mm}$ 。

上述模拟程序中采用带电粒子束近似等离子体的作用，对于阴阳极等离子体的相向漂移<sup>[15,16]</sup>没有充分考虑，是一种近似的描述方法，在  $L_{rod}$  大于阴阳极间隙距离  $D$  的情况下，这种近似是合理的，如果  $L_{rod}$  过短(例如  $L_{rod}=0 \text{ mm}$  的情况)，即阳极杆尖端与阴极发射面的距离过短，阴阳极等离子体的膨胀和相向漂移运动容易引起二极管间隙闭合，引起阻抗崩溃现象，这种情况下，程序中的近似描述不成立，导致模拟与实验和经验结果间的偏差，同时也反映出模拟计算的局限性。

5 结论

数值模拟 RPD 的工作过程，研究了阳极等离子

体和二极管结构等参数对电子束箍缩的影响，以及阴极不同位置发射电子束的箍缩特性。模拟结果表明，阳极离子流的存在对电子束箍缩起到至关重要的作用，在不考虑离子流情况下，RPD 无法在较低电压下(1–2 MV)实现箍缩。阳极表面发射离子流密度达到一定值后，进一步增大该密度值对二极管总电流和阳极杆尖端电流密度无显著影响。为提高韧致辐射 X 射线产生效率，应尽可能抑制阳极等离子体的产生和扩散，降低阳极发射离子流密度。阴极各表面同时发射电子时，不同表面发射的电子束箍缩效果不同，后表面电子束箍缩效果最好，其次是中间表面，前表面最差。模拟结果还显示，增加阴极厚度不能显著缩短电子束实现箍缩的时间。对比数值模拟结果和经验取值，分析阳极杆伸出阴极平面距离对电子束箍缩的影响，对二者之间的偏差进行了解释，说明数值模拟的适用条件和局限性。

参考文献

1 刘锡三. 高功率脉冲技术. 北京: 国防工业出版社, 2005. 5–26  
LIU Xisan. High power pulse technology. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. 5–26  
2 Cooperstein G, Boller J R, Commisso R J, et al. Phys Plasmas, 2001, 8(10): 4618–4636  
3 邱爱慈, 孙凤举. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 1937–1946  
QIU Aici, SUN Fengju. High Power Laser Part Beams, 2008, 20(12): 1937–1946  
4 Weber B V, Allen R J, Commisso R J, et al. IEEE Trans Plasma Sci, 2008, 36(2): 443–456

- 5 Commisso R J, Cooperstein G, Hinshelwood D D, *et al.* IEEE Trans Plasma Sci, 2002, 30(1): 338–351
- 6 陈 林, 谢卫平, 邓建军. 强激光与粒子束, 2006, 18(4): 643–647  
CHEN Lin, XIE Weiping, DENG Jianjun. High Power Laser Part Beams, 2006, 18(4): 643–647
- 7 Swanekamp S B, Commisso R J, Cooperstein G, *et al.* Phys Plasmas, 2000, 7(12): 5214–5222
- 8 马成刚, 邓建军, 谢 敏. 强激光与粒子束, 2007, 19(2): 348–352  
MA Chenggang, DENG Jianjun, XIE Min. High Power Laser Part Beams, 2007, 19(2): 348–352
- 9 李小泽, 王建国, 童长江, 等. 物理学报, 2008, 57(7): 4613–4622  
LI Xiaozhe, WANG Jianguo, TONG Changjiang, *et al.* Acta Phys Sin, 2008, 57(7): 4613–4622
- 10 WANG Jianguo, WANG Yue, ZHANG Dianhui. IEEE Trans Plasma Sci, 2006, 34(3): 681–690
- 11 Hinshelwood D D, Cooperstein G, Mosher D, *et al.* Improvement in rod-pinch diode performance with anode heating, Digests of the 29<sup>th</sup> IEEE International Conference on Plasma Science, 2002, 250
- 12 Langmuir I, Blodgett K. Phys Rev, 1923, 22(4): 347–356
- 13 Cooperstein G, Boller J R, Commisso R J, *et al.* Rod-pinch diode development for short-pulse radiography using extended-length cathodes, Proceedings of the IEEE International Conference on Pulsed Power Plasma Science, 2001, 438–441
- 14 Oliver B V, Genoni T C, Rose D V, *et al.* The impedance characteristics of a rod-pinch diode, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Pulsed Power Conference, Las Vegas, NV, 2001, 458–461
- 15 彭建昌. 强激光与粒子束, 2001, 13(5): 654–656  
PENG Jianchang. High Power Laser Part Beams, 2001, 13(5): 654–656
- 16 夏连胜, 王 勐, 黄子平, 等. 物理学报, 2004, 53(10): 3435–3439  
XIA Liansheng, WANG Meng, HUANG Ziping, *et al.* Acta Phys Sin, 2004, 53(10): 3435–3439

## Numerical simulations of beam-pinching characteristics in a rod-pinch diode

GAO Yi<sup>1,2</sup> QIU Aici<sup>2</sup> LV Min<sup>1</sup> YANG Hailiang<sup>2</sup> ZHANG Zhong<sup>2</sup> ZHANG Pengfei<sup>2</sup>

1 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract** The UNIPIC code is used to simulate working process of a rod-pinch diode. The influences of anode plasmas and diode structural parameters on electron pinching are investigated. The electron beams don't pinch to the rod tip at 1–2 MV without the ion effect. When the ions emitted from the anode surface reach a current of certain value, further increase of the ion current does not have a significant influence on the diode total current and the current density at the rod tip. With all the three surfaces of the cathode emitting electrons, the pinching quality of the electron beam emitted from the upstream surface is the best of all surfaces. Increasing the cathode length does not have an obvious effect in accelerating the process to achieve strong pinching. Influence of the distance from the anode tip to the cathode surface is analyzed, too. The differences between numerical simulations and experimental results are explained.

**Key words** Rod-pinch diode, Pinching characteristics, Electron beam, Ion current, Plasma

**CLC** TL501.5, TL503