

磁绝缘传输线中心汇流区电子能量沉积及温度变化的数值模拟研究*

刘腊群[†] 刘大刚 王学琼 杨超 夏蒙重 彭凯

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2011年11月21日收到; 2012年1月4日收到修改稿)

介绍了实现高能电子轰击阳极表面产生的能量沉积及温度变化的数值模拟理论及方法. 构建了一个简单的束发射模型, 初步验证了阳极表面电子能量沉积数值计算的准确性. 选取四层圆盘锥形磁绝缘传输线中心汇流区为模型, 对其工作过程中产生的阳极能量沉积及温度变化进行数值模拟, 并将模拟结果与国外相关文献的结论进行了对比, 进一步证明了模拟的准确性. 对模拟结果进行了分析, 探讨了模拟中结果产生的物理机理.

关键词: 高能电子, 能量沉积, 温度变化, 数值模拟

PACS: 29.27.-a

1 引言

高能电子轰击真空器件阳极表面将会产生相应的能量沉积, 这部分电子的动能将主要转化为热能, 从而导致阳极表面被加热. 在电子沉积密度大的地方将在短时间内产生高温, 对器件表面造成破坏. 同时, 当阳极表面温度超过 400 °C 时^[1-3], 原本吸附在其表面的杂质气体分子会产生剧烈的热运动, 脱离阳极表面, 并在阳极表面电离成带正电的离子, 对脉冲功率真空器件的工作效率产生负面影响. 因此, 近年来对高能电子沉积在阳极表面产生的温度变化的研究, 一直是人们感兴趣的课题. 但由于阳极各区域能量沉积量的计算需对各个时刻轰击该区域电子及其所具备的动能进行累加, 所以仅通过理论计算很难实现. 数值模拟则在各个时间步记录了空间每个粒子的动量、坐标等信息, 因此能准确计算出粒子在导体边界湮灭的位置及其所具有的动能, 进而计算阳极表面各个区域每个时刻的电子能量沉积量及温度升高情况.

本文从数值模拟计算的角度出发, 重点研究了高能电子在阳极表面的能量沉积及其导致的温度变化的计算在数值模拟中如何实现, 并选取了比较

有代表性的四层圆盘锥形磁绝缘传输线中汇流区作为模拟对象, 验证了模拟计算的正确性.

2 数值模拟的计算方法

2.1 阳极表面电子沉积能量面密度的计算

如图 1 所示, 阳极表面按照粒子 (PIC) 数值模拟方法划分网格, 任取其中一个网格面, 令该网格面的起始坐标为 (x_l, y_m, z_n) . 任取模拟中的一个时间步, 在该时间步中, 一个电子以速度 v 入射该网格所在的阳极表面. 对于非相对论电子, 其动能可表示为

$$E_i = \frac{1}{2} m_e v^2, \quad (1)$$

对于相对论电子, 其动能可表示为^[4]

$$E_i = m_e c^2 \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} - 1 \right) + m_e c^2, \quad (2)$$

其中, m_e 为电子质量, c 为光速, E_i 表示此时间步中第 i 个入射该网格面的电子所具备的动能.

同时, 由已知的该网格面的四个顶点坐标可求出其面积 S_{lmn} . 那么对于模拟中的任意一个时间步内, 其中一个网格面上沉积的能量面密度可表示

* 国家自然科学基金 (批准号: 11175040) 资助的课题.

[†] E-mail: liulaqun@yahoo.cn

为

$$\omega = \left(\sum_n E_i \right) / S_{lmn}, \quad (3)$$

其中, n 表示此时间步内该网格面上沉积的电子总数.

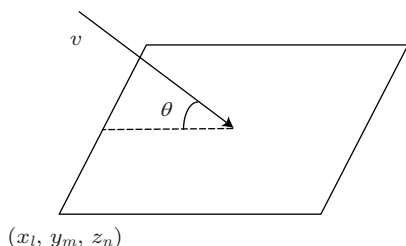


图1 电子入射阳极表面示意图

2.2 阳极表面温度变化的计算

如图2所示, 高能电子以初始动能 E 进入导体, 其与导体表面的夹角为 θ' . 由于高能电子在导体内可认为作直线运动, 因此当透入深度为 Δl 时, 其运动距离为 $\Delta l / \sin \theta$, 动能损失量为 ΔE . 同样, 设其所入射位置所处网格面的面积大小为 S_{lmn} , 则对于 $V_{lmn} = S_{lmn} \times \Delta l$ 这样一个体积大小的导体上, 该电子沉积了 ΔE 的能量, 并转化成了热能. 另外, 对于高功率脉冲器件, 由于其工作时间极短, 如磁绝缘传输线每次工作时间只有大约 200 ns^[1,2,5], 因此, 我们可以假设在其工作时间内, 沉积于阳极表面的热量未发生热传导, 那么对于任意一个时间步内, 大量的电子沉积在该网格上导致的温度升高量可表示为^[5]

$$\Delta T = \frac{q}{S_{lmn} \rho C_v \sin \theta'} \frac{dE}{dx}, \quad (4)$$

其中, q 为沉积的电荷面密度, S_{lmn} 为网格面的面积, ρ 为导体的密度, C_v 为导体的比热, dE/dx 为电子透射单位深度损失的能量 (stopping power). 对于高能电子, 通常取 $dE/dx = 11.5 \text{ MV/cm}$.

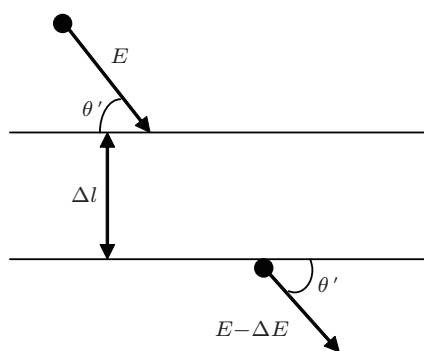


图2 电子进入导体产生的能量损失

3 模拟验证及结果分析

3.1 初步模拟验证

本文依据以上计算方法, 在 CHIPIC-3D 数值模拟软件中加入能量沉积与温度计算模块, 并采用如图3所示的数值模拟模型, 对能量沉积计算模块进行初步模拟验证. 图3模型中沿 Z 方向发射一束电子, 电子的动能为粒子束的动能, 为 10 keV, 发射时间为 0.02 ns, 电流大小为 $6.4 \times 10^{-4} \text{ A}$, 发射面积为 64 mm^2 . 由理论计算可知, 电子在收集极表面沉积的能量面密度为 $2 \times 10^{-6} \text{ J/m}^2$. 模拟计算的结果如图4所示, 收集极表面沉积的能量面密度为 $1.99 \times 10^{-6} \text{ J/m}^2$. 模拟结果与理论计算值一致, 证明了模拟的正确性.

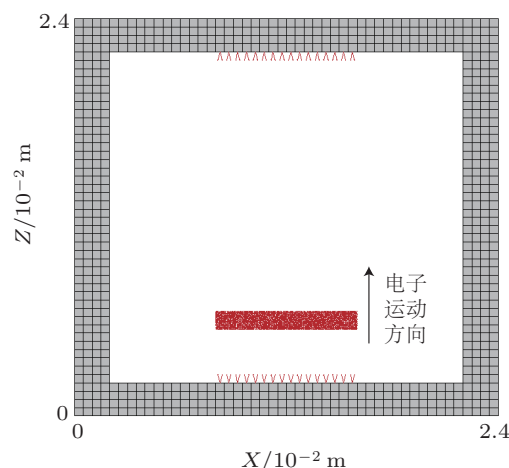


图3 初步验证模型

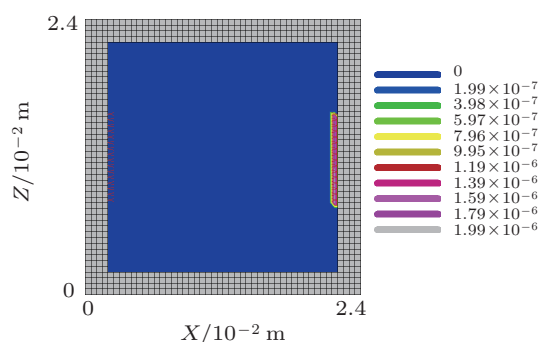


图4 能量沉积面密度等位图

3.2 磁绝缘传输线中心汇流区的模拟及结果分析

为了进一步验证模拟的可靠性, 本文选取结构较为复杂的磁绝缘传输线中心汇流区为对象, 对其

阳极表面电子能量沉积及温度变化情况进行了模拟, 具体模拟参数的设置参考了文献 [6], 并将模拟结果与文献 [6] 的结论进行了对比. 同时, 还对模拟结果进行了分析, 证明了模拟的准确性.

磁绝缘传输线中心汇流区的结构如图 5 所示, 选取模拟区域为 $R = 140 \text{ mm}$, $Z = 200 \text{ mm}$, 角向为一个周期, 即 $\varphi = 30^\circ$ [7]. 负载的电阻为 0.55Ω , 模拟设置当阴阳极电压达到固定值 9.3 MV 时, 开始发射电子. 电子发射后磁绝缘传输线传导总电流为 13.7 MA , 同时电压降到 7.5 MV [6]. 模拟采用了时偏算法滤除高频噪声 [8], 模拟计算了电子发射后阳极表面能量沉积及温度升高情况.

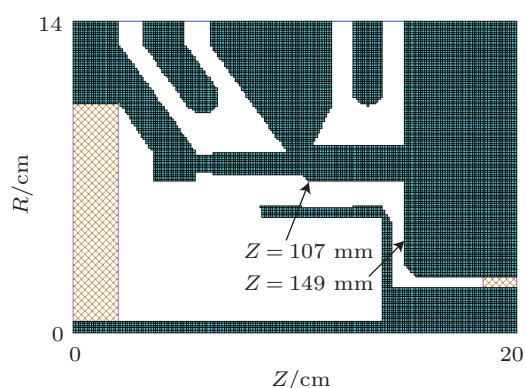


图 5 磁绝缘传输线模拟结构示意图

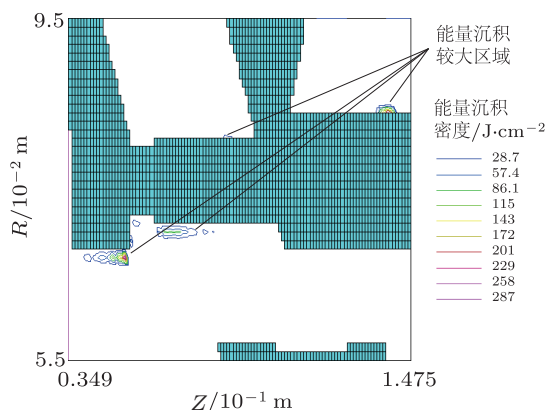


图 6 $\theta = 0^\circ$ 处电子能量沉积密度等位图

图 6 显示的是电子发射 6 ns 后, $\theta = 0^\circ$ 处阳极柱所在区间阳极表面电子能量沉积情况. 由于该区域存在三个磁场趋于零的‘零磁位区’ [1,2], 这些区域磁场均趋向于零. 因此, 大量的电子在‘零磁位区’及其临近区域, 将不受磁场力的约束沉积到阳极上, 从而导致‘零磁位区’附近的阳极表面电子能量沉积密度远大于其他阳极表面, 因此我们将

这些区域称之为‘热点’ [6]. 从图 6 可以看出, 在‘热点’所在的区域, 模拟计算所得的电子能量沉积密度也相应地升高了. 图 7 显示的是电子发射 6 ns 后, $\theta = 15^\circ$ 处阳极表面电子能量沉积情况. 从图 7 可以看出, 该区间‘热点’所在附近同样出现了较强的电子能量沉积.

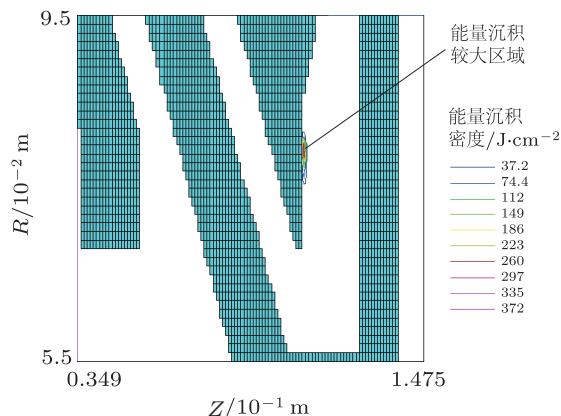


图 7 $\theta = 15^\circ$ 处电子能量沉积密度等位图

图 8 为电子发射 6 ns 后, $Z = 107 \text{ mm}$ 处电子能量沉积密度在‘ $R-\theta$ ’面上的分布情况. 从图 8 可以看出, 电子能量沉积密度以‘零磁位区’与中间阳极交点为峰值所在点, 其峰值为 401 J/cm^2 . 同时, 其相邻网格所沉积能量密度迅速减小到 281 J/cm^2 . 这表明电子主要沿‘零磁位线’运动到阳极, 并在此产生大量热量对其造成破坏.

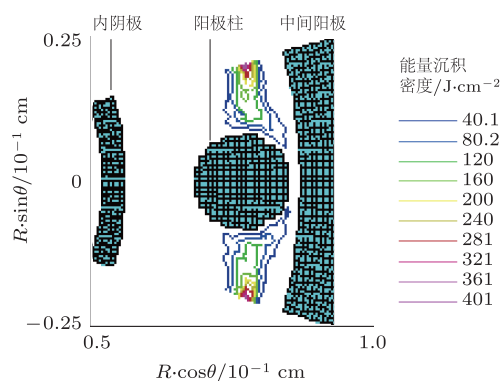


图 8 $Z = 107 \text{ mm}$ 处电子能量沉积密度等位图

图 9 为电子发射 6 ns 后, $Z = 149 \text{ mm}$ 处电子能量沉积密度在‘ $R-\theta$ ’面上的分布情况. 由于当 $R < 65 \text{ mm}$ 处阴阳极间隙变小, 电子在此处不能形成磁绝缘, 因此有大量电子沉积到阳极表面, 计算表明此处确实存在着较为严重的热沉积现象. 同时还可以发现, 随着半径的减小, 沉积的热量变得越大. 这主要是由以下两个原因引起: 首先, 在阴

极间距不变的情况下, 半径越小传输线的真空阻抗越大, 电子流产生的涡流现象越为严重^[9,10], 运动到阳极表面的电子也就越多; 其次, 随着半径的减小, 电子流的密度变得越来越大, 因此单位面积沉积的电子也就对应增多.

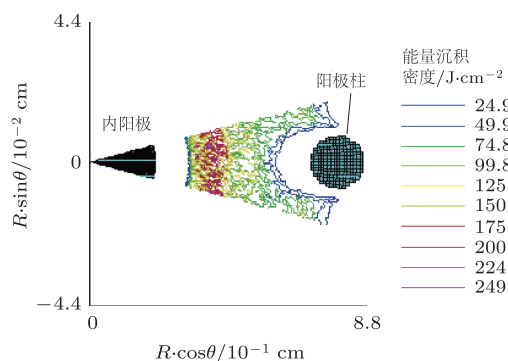


图9 $Z = 149$ mm 处电子能量沉积密度等位图

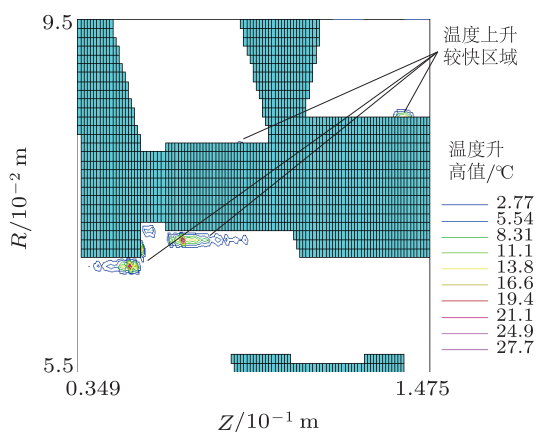


图10 $\theta = 0^\circ$ 处阳极表面温度升高量等位图

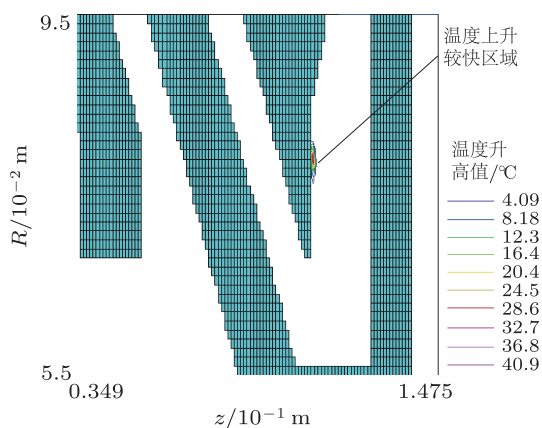


图11 $\theta = 15^\circ$ 处阳极表面温度升高量等位图

图10—13 分别表示电子发射 6 ns 后, $\theta = 0^\circ$,

$\theta = 15^\circ$, $Z = 107$ mm, $Z = 149$ mm 处阳极表面的温度升高等位图. 从四个图中可以看出, 温度最高处大约升高了 44.3°C . 其分布趋势与显示电子能量沉积密度图6—9 基本一致, 但二者之间还是存在一定的差别. 这可通过对比(3)式和(4)式得知. 首先, 在计算温度变化时, 考虑了电子的入射方向与导体的夹角 θ' 对电子透入导体后能量损失的影响; 其次, 由(4)式可知温度变化的计算只与电荷的沉积密度有关, 与该网格上总的能量沉积大小没有关系. 因此, 并不是电子能量沉积密度大的地方温度就一定要高.

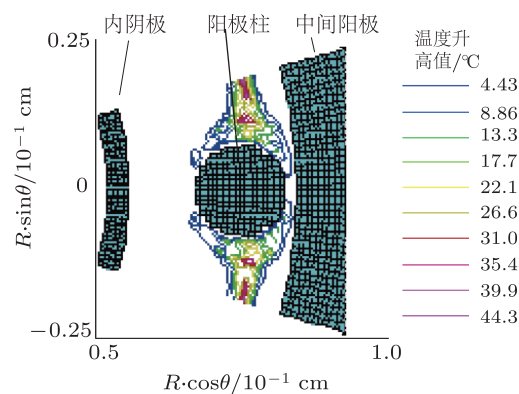


图12 $Z = 107$ mm 处阳极表面温度升高量等位图

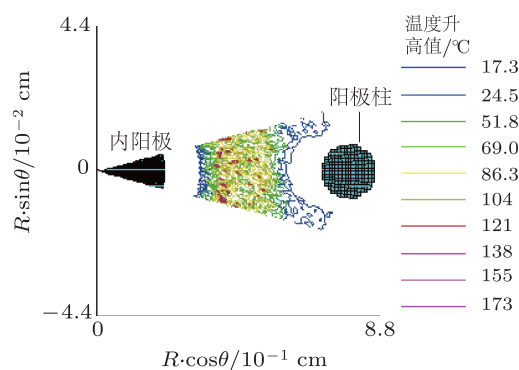


图13 $Z = 149$ mm 处阳极表面温度升高量等位图

4 结论

本文从数值模拟的角度出发, 对高能电子轰击阳极表面产生的能量沉积及阳极温度变化进行了数值模拟研究, 并通过对四层圆盘锥形磁绝缘传输线中心汇流区的模拟, 验证了数值模拟的准确性. 模拟研究表明, 电子能量主要沉积在磁感应强度较弱的“零磁位区”与阳极表面的交界处附近.

- [1] Rose D V, Welch D R, Hughes T P, Clark R E 2008 *Phys. Rev. Spec. Top.: Accel. Beams* **11** 06401
- [2] Pointon T D, Stygar W A, Spielman R B, Lves H C, Struve K W 2011 *Phys. Rev. Spec. Top.: Phys. Plasmas* **8** 4534
- [3] Pointon T D, Langston W L, Savage M E 2007 *Proceedings of the 16th IEEE Pulsed Power Conference* Albuquerque, USA, June 17–22, 2007 p165
- [4] Guo S H 1997 *Electrodynamics* (Beijing: Higher Education Press) p276 (in Chinese) [郭硕鸿 1997 电动力学 (北京: 高等教育出版社) 第 276 页]
- [5] Song S Y 2004 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: Institute of Fluid Physics) p4 (in Chinese) [宋盛义 2004 博士学位论文 (绵阳: 流体物理研究所) 第 4 页]
- [6] Hughes T P, Clark R E 1998 *Sandia National Laboratories Technical Report* MRC/ABQ-R-1875
- [7] Liu L Q, Meng L, Deng J J, Song S Y, Zou W K, Liu D G, Liu S G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1643 (in Chinese) [刘腊群, 蒙林, 邓建军, 宋盛义, 邹文康, 刘大刚, 刘盛纲 2010 物理学报 **59** 1643]
- [8] Zhou J, Zhu D J, Liu D G, Liu S G 2007 *Chin. J. Comput. Phys.* **24** 566 (in Chinese) [周俊, 祝大军, 刘大刚, 刘盛纲 2007 计算物理 **24** 566]
- [9] Pointon T D, Savage M E 2005 *Proceedings of IEEE Pulsed Power Conference* Monterey, USA, June 13–17, 2005 p151
- [10] Hughes T P, Clark R E, Oliver B V, Pointon T D, Stygar W A 2003 *Proceedings of the 14th IEEE Pulsed Power Conference* Dallas, USA, June 15–18, 2003 p622

The numerical simulation of the electronic energy deposition and temperature variation in post-hole convolute of magnetically insulated transmission lines*

Liu La-Qun[†] Liu Da-Gang Wang Xue-Qiong Yang Chao
Xia Meng-Zhong Peng Kai

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 21 November 2011; revised manuscript received 14 January 2012)

Abstract

In this paper, we introduce the numerical simulation theory and method to achieve the energy deposition and temperature variation produced by the high-energy electron bombarding the anode surface. A simple beam launch model is developed. The accuracy of the numerical calculation of the anode surface electronic energy deposition is primarily validated. Then, selecting the magnetically insulated transmission line in post-hole convolute as a model, the energy deposition and the temperature variation in the anode produced in the process are simulated. Also by comparing the simulation results with the results given in the literature, the simulation accuracy is further proved. Finally, the simulation results are analyzed and the physical mechanism produced by the simulation results is also discussed.

Keywords: high-energy electron, energy deposition, temperature variation, numerical simulation

PACS: 29.27.–a

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11175040).

[†] E-mail: liulaqun@yahoo.cn