

阴极偏心对坩埚内电子分布状态的影响分析

贾子朝 郭志伟 高学林

(核工业理化工程研究院 天津 300180)

摘要: 电子枪阴极与阳极的对中性会对电子束的流通率、束斑形态等产生影响。本文通过仿真分析了阴极偏心、倾斜两种典型工况下电子束的传输特性,初步得到了阴极偏心对电子束聚焦、偏转及坩埚内电子分布状态的影响规律,为后续生产制造阶段加工工艺的制定提供了必要的参考数据。

关键词: 阴极偏心; CST 仿真; 电子分布

0 引言

电子枪是一种能发出高能电子束的设备,一般包括阴极、阳极、电磁透镜和枪体等几个部分^[1-3]。其中,阴极是电子束的直接发射部件,阴极材料内部的电子在受热后获得足够的能量、并在阴阳极间高压场强的作用下,克服原子束缚后向外发射,并穿过阳极;穿过阳极的电子在电磁透镜的控制下进行聚焦、偏转,获得所需的束形,并最终作用在目标坩埚或靶材上^[4]。

受生产加工水平、装配水平的限制,以及使用过程中元器件受热、零件重力等的影响,电子枪阴极与阳极不可能完全对中,直接影响阴极发出的电子通过阳极的流通率,后续电子束传输过程中的聚焦特性、偏转以及在坩埚内的电子分布状态^[5,6]。考虑到加工制造水平及经济性的影响,不存在绝对同轴的阴阳极^[7]。为了在电子束可靠传输与经济性之间获得平衡,有必要研究阴极偏心状态对电子束传输的影响规律,更好地指导生产制造工艺的制定。

因此,本文采用 CST(三维电磁场仿真软件)对阴极块偏心状态进行仿真计算,结合实际工况,将阴极偏心设定为竖直向下坠偏移和倾角偏移两种状态,之后对

电子束的聚焦特性、偏转过程以及电子在熔池中的分布状态进行分析。

1 模型建立

根据现有电子枪装置、偏转线圈、坩埚熔池的物理结构和尺寸链关系,完成物理模型建立,进而加载电子枪阴极发射面、加速电压等基本模拟量,然后设置阴极调整电子枪聚焦透镜、坩埚偏转透镜负载,使电子束均匀分布在坩埚熔池中心位置。可得到电子束发射、传输、偏转总体示意图,如图 1 所示,电子束在阳极加速、经聚焦透镜聚焦汇聚状态示意图见图 2,电子在熔池中心分布状态示意图见图 3。

对上述基准设计进行仿真分析,可以发现当阴极、阳极、聚焦透镜完全同轴时,电子在阳极、聚焦透镜的分布状态较为理想,电子在熔池中的分布状态也较为对称,杂散和畸变较少。

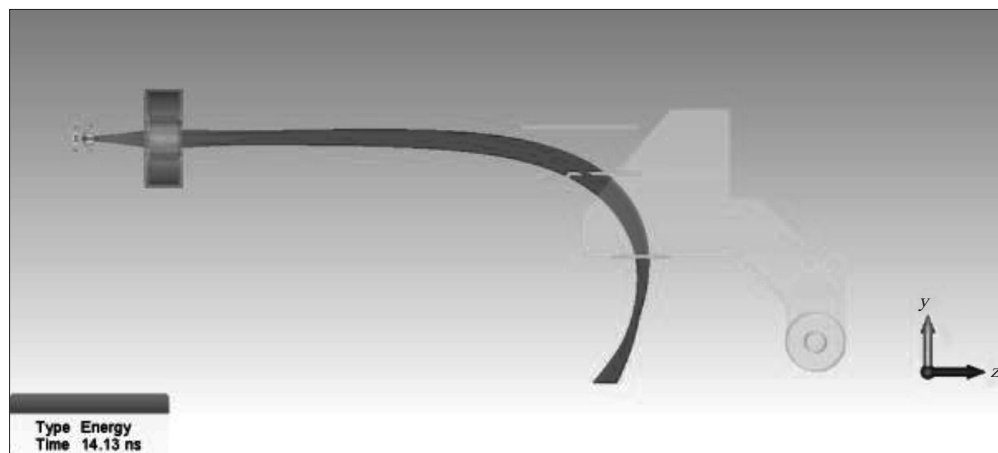


图 1 电子束发射、传输、偏转总体示意图

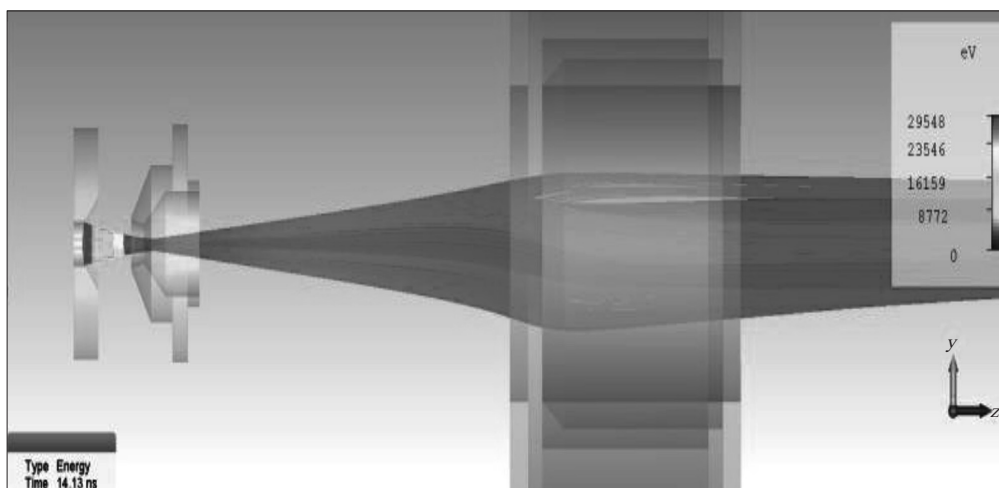


图2 电子束经阳极加速及聚焦透镜汇聚状态示意图

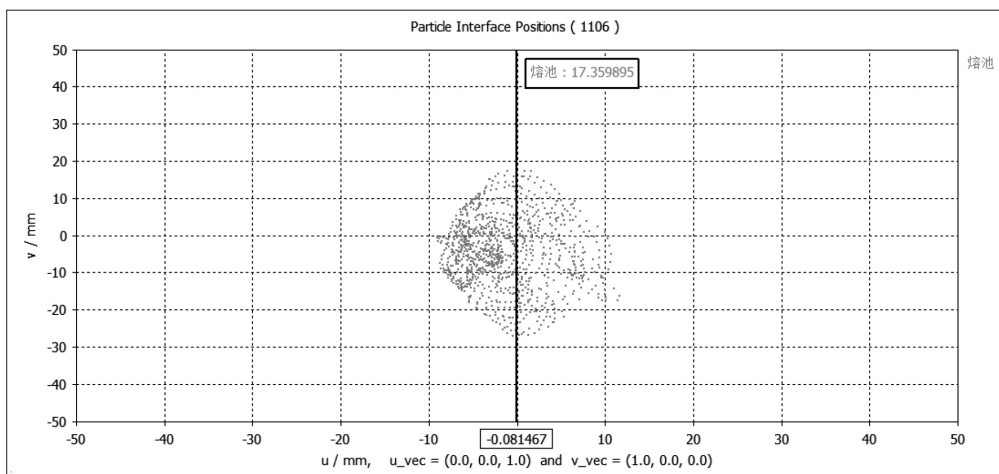


图3 电子在坩埚熔池中心分布状态示意图

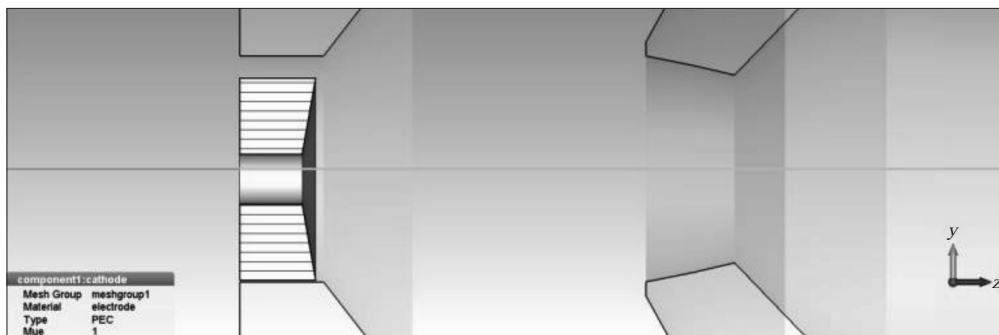


图4 阴极下坠偏移0.4mm结构模型示意图

2 下坠偏移分析

在上述基准设计基础上，将阴极块沿竖直方向向下偏移0.4mm，结构模型如图4所示，与理想状态进行对比分析，结果见图5、图6。

分析0.4mm偏移量仿真结果，可以发现：

(1) 阴极与阳极之间的电场发生变化，导致该区

域电子束加速形态变为非对称状态；

(2) 电子穿过阳极后并非沿轴心运动，而是发生了下坠偏移、相对靠近阳极内壁底端；

(3) 电子经过聚焦透镜汇聚后，对电子束轨迹进行了约束，电子基本恢复到沿轴线传输状态；

(4) 在长距离传输过程中，电子束略微有所上扬，与水平轴线具有微小的夹角。

同时观察到电子在坩埚内的分布形态发生了一定畸变（图7），导致电子在单位面积内密度增大、局部功率密度升高，且随阴极偏移量的增大，最大功率密度向后移动（远离电子枪），最大移动量约2mm。

3 倾角偏移

在基准设计基础上，将阴极块分别向竖直方向（Y轴）、水平方向（Z轴）偏移 1° ，阴极块外壁与聚束极内壁近乎接触状态。以向下倾斜 1° （Y轴负方向）阴极偏移状态为例进行对比分析，阴极偏移状态结构模型示意图见图8，电子加速聚焦、传输偏转仿真

结果见图9、图10。

分析仿真结果可以发现，电子束发射、加速、传输、偏转状态与阴极下坠偏移结果类似，具体如下：

(1) 阴极与阳极之间电子束加速形态变为非对称状态；

(2) 电子穿过阳极后，发生了下坠偏移、相对靠近阳极内壁底端；

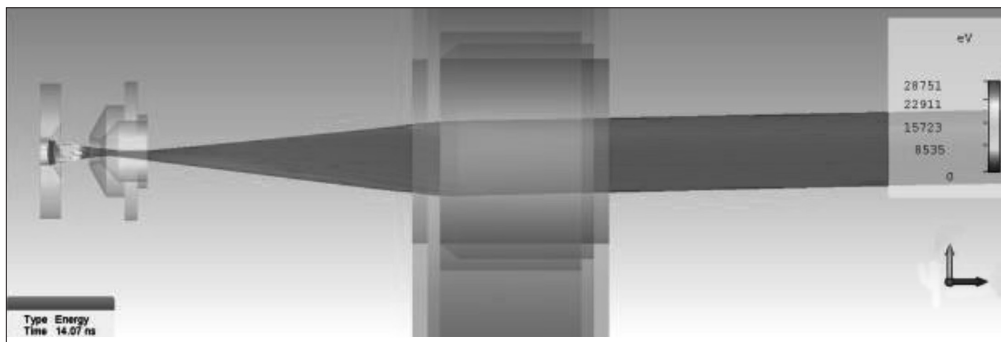


图5 阴极下坠偏移 0.4mm 后电子束经阳极加速及聚焦透镜汇聚状态示意图

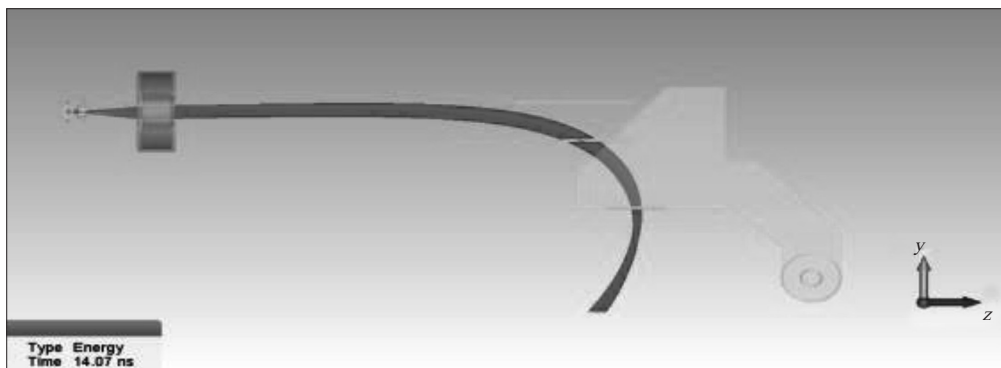


图6 阴极下坠偏移 0.4mm 后电子束传输示意图

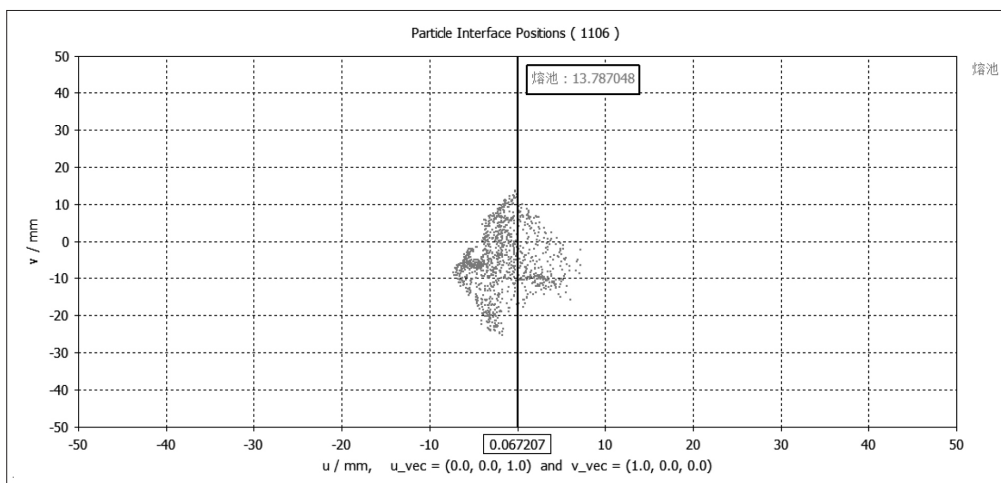


图7 阴极下坠偏移 0.4mm 后电子在熔池中心的分布形态

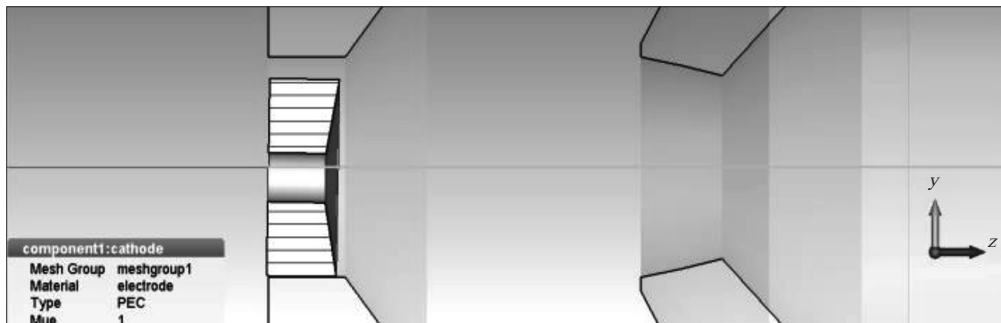


图8 阴极竖直方向向下倾斜 1° 结构模型示意图

(3) 经聚焦透镜汇聚整合后, 电子基本恢复到沿轴线传输状态;

(4) 在长距离传输过程中, 电子束略微有所上扬, 与水平轴线具有微小的夹角。

分析电子在熔池分布形态, 通过分析不同区域的功率密度, 得到束斑的形貌分布中心。阴极沿竖直方向 (Y 轴) 发生 $\pm 1^\circ$ 倾斜时, 束斑在熔池中心的偏移量为 3mm 以内 (2.05mm 和 0.44mm), 方向为向后远离电子枪 (图 11)。阴极沿水平方向 (Z 轴) 发生 $\pm 1^\circ$ 倾斜时, 束斑在熔池中心的偏移量为 4mm 以内 (3.4mm 和 0.85mm), 方向与阴极块倾斜方向相反 (图 12)。同时电子分布形态发生畸变, 电子在单位面积内密度增大、局部功率密度升高。阴极沿竖直方向 (Y 轴) 发生 $\pm 1^\circ$ 倾斜时, 最大功率密度均向后移动 (远离电子枪), 最大移动量约 2mm (+ 2.0mm 和 + 0.4mm)。阴极沿水平方向 (Z 轴) 发生 $\pm 1^\circ$ 倾斜时, 最大功率密度分别沿水平方向向左、向右移动, 最大移动量约 2mm。

4 结语

通过上述分析, 发现:

(1) 电子束运动状态方面, 阴极发生下坠偏移或倾角偏移时, 电子束在

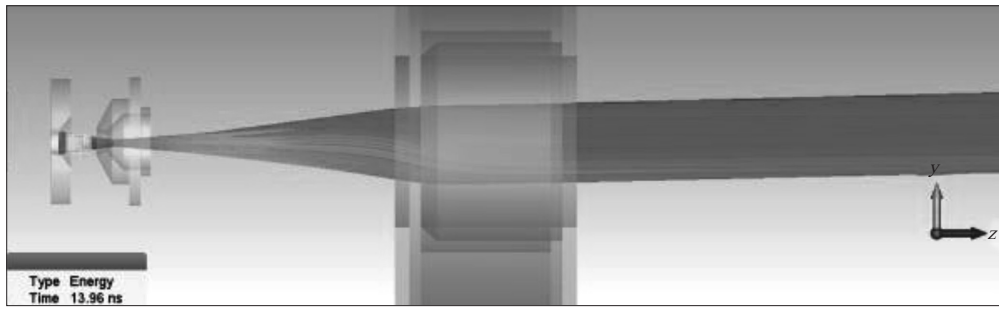


图9 阴极竖直方向向下倾斜1°后电子束经阳极加速及聚焦透镜汇聚状态示意图

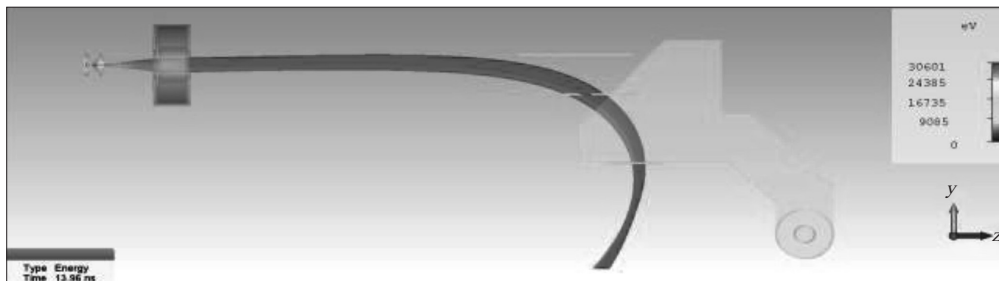


图10 阴极竖直方向向下倾斜1°后电子束传输示意图

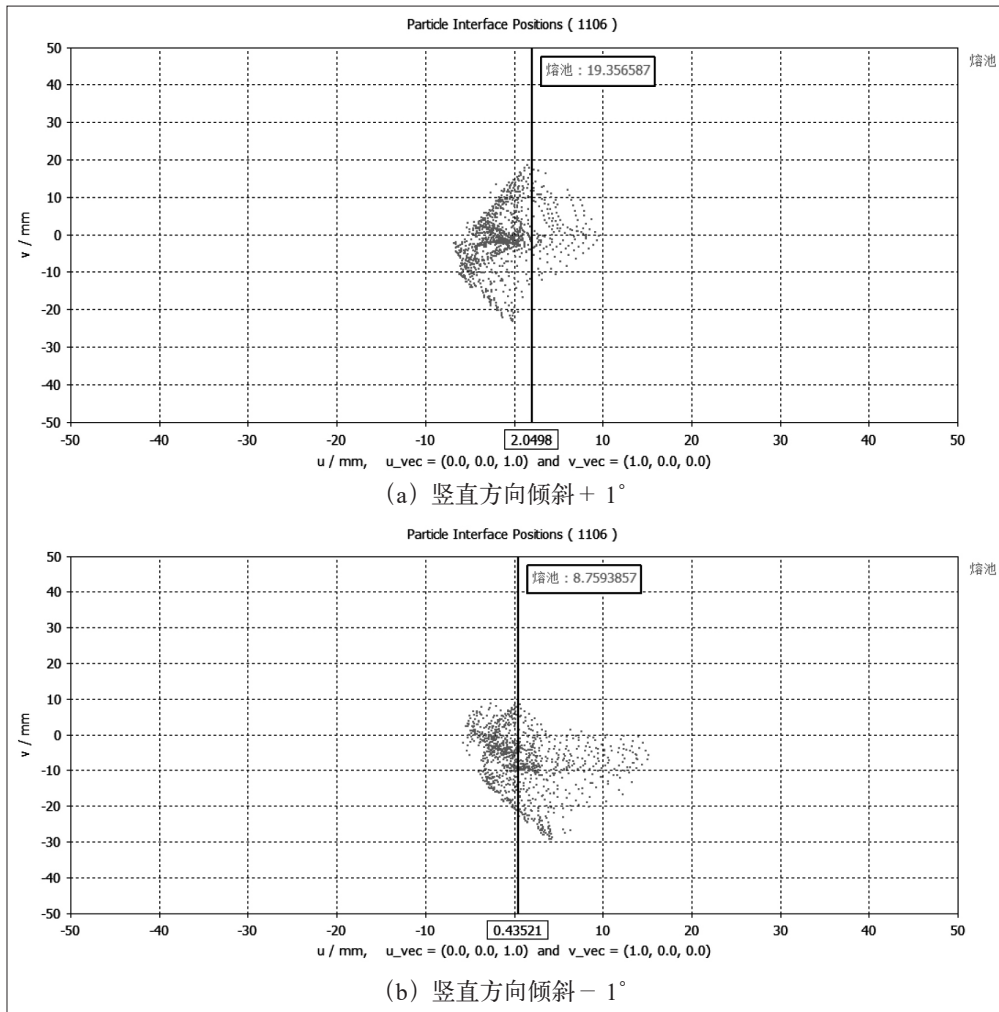


图11 竖直方向(Y轴)倾斜±1°后电子在熔池中心的分布形态

阴阳极之间、穿过阳极后的畸变较为明显，但基本都可通过聚焦透镜进行再次约束、整合，之后电子束以微小的倾角进行远距离传输及偏转。

(2) 束斑整体位置方面，下坠偏移引起束斑整体位置在熔池中心的偏移量约1.2mm以内，倾角偏移引起束斑整体位置在熔池中心的偏移量约2mm以内。

(3) 内部电子分布方面，电子分布形态发生了一定畸变，导致电子在单位面积内密度增大、局部功率密度升高。竖直方向(Y轴)的下坠或倾角偏移，会造成最大功率密度向后移动(远离电子枪)，最大移动量约2mm；水平方向(Z轴)倾角偏移引起的最大功率密度在水平方向的最大移动量约2mm。

参考文献:

[1] SHEN GGANG LI U, PING ZHANG, WEIHAO LIU, et al. Surface polariton Cherenkov light radiation source[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(15): 153902. 1-153902. 5.

[2] 姜万顺, 邓建钦. 太赫兹测试测量技术与仪器研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(5): 20-23.

[3] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科

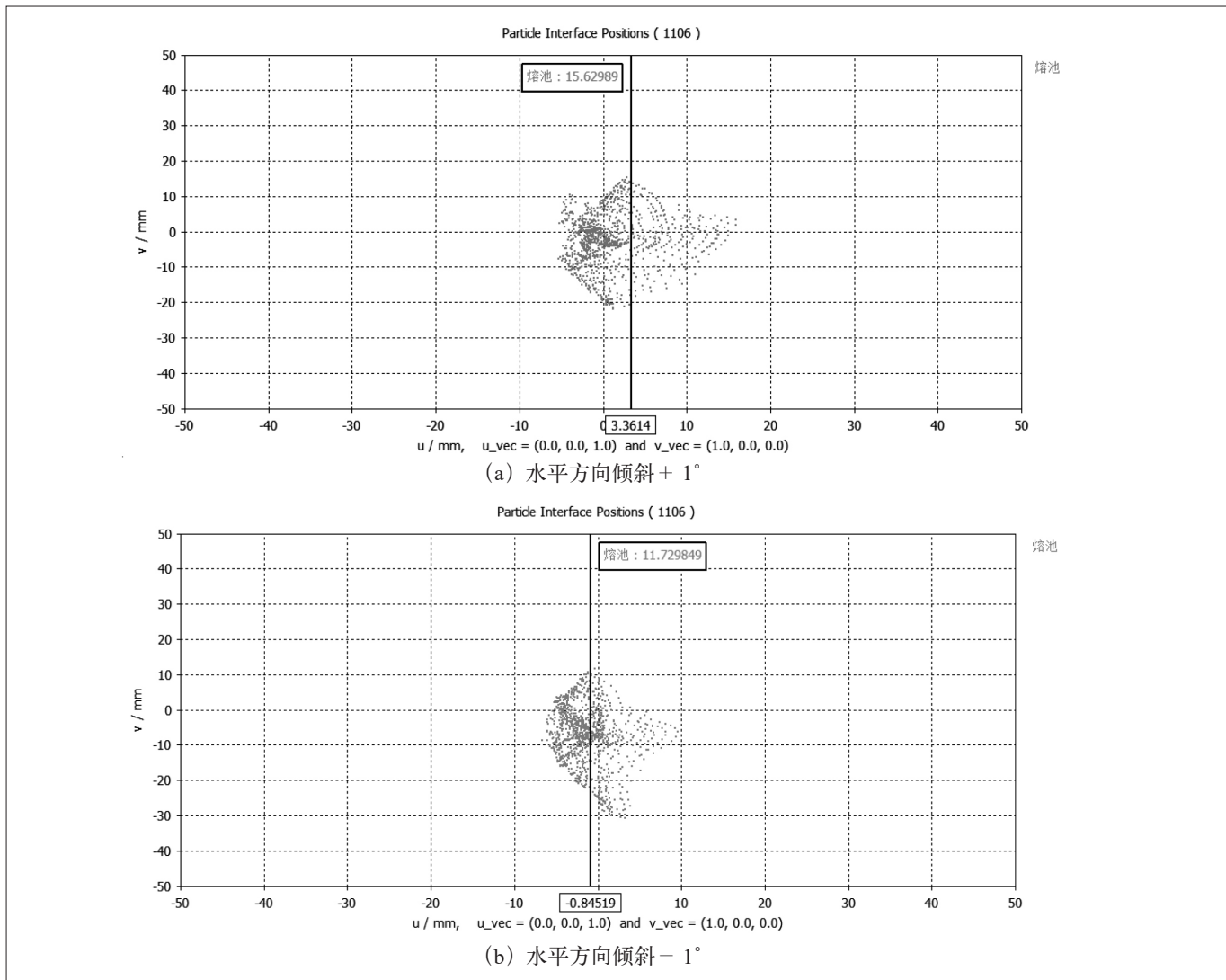


图 12 水平方向 (Z 轴) 倾斜 $\pm 1^\circ$ 后电子在熔池中心的分布形态

学, 2006, 8(1): 7-12.

[4] 周俊, 刘盛纲. 太赫兹生物医学应用的研究进展 [J]. 现代应用物理, 2014(2): 85-97.

[5] 王康年, 刘红云, 卢明伦, 等. 太赫兹通信技术发展现状及其军事应用展望 [J]. 无线电通信技术, 2014, 40(5): 1-5.

[6] 薛增泉, 吴全德. 电子发射与电子能谱 [M]. 北京: 北京

大学出版社, 1993: 66-78.

[7] 程福懋. 电子枪的结构设计 [J]. 真空电子技术, 1995(2): 7-11.

作者简介: 贾子朝 (1992.09-), 男, 汉族, 内蒙古赤峰人, 本科, 工程师, 研究方向: 电子枪研制应用及高压电传输。