聚焦电流和阴极位置对束流品质影响的 CST 仿真

王亚丹 张伟^{*} 黄俊媛 李子硕 张贺栋 张字琦 霍玮 (北京航空航天大学机械工程及自动化学院北京100191)

CST Simulation on Effect of Focusing Current and Cathode Position on Beam Quality

WANG Yadan, ZHANG Wei^{*}, HUANG Junyuan, LI Zishuo, ZHANG Hedong, ZHANG Yuqi, HUO Wei (School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The cathode position and focusing current of the electron gun can affect the focal length and spot morphology of the electron beam, thereby affecting the quality of additive manufacturing parts. Firstly, based on the actual electron gun structure, a 1 : 1 three-dimensional electron gun physical model and finite element analysis model were established, and simulation was conducted using the particle studio module of CST software. The effects of focusing current and cathode position on the focal position and spot morphology of the electron beam were studied. The simulation results show that the current gathered is 460 mA, and when the distance between the cathode's lower surface and the gate's upper surface is 1.0 mm, the diameter of the electron beam spot at the working plane is 0.61 mm. The electron distribution is more uniform, and the shape is more circular. An electron beam selective melting experiment was conducted, and the preheating and melting forming of titanium alloy powder were successfully achieved. The experimental results show that simulation has a certain guiding role in the design of the electron gun; it can meet the requirements for molding at an 800 mm work plane.

Keywords CST electromagnetic simulation, Electron gun, Focusing current, Cathode position, Beam quality

摘要 电子枪的阴极位置和聚焦电流大小会影响电子束的焦距和束斑形貌,进而影响增材制造零件的质量。首先根据 实际的电子枪结构,建立了1:1三维电子枪物理模型和有限元分析模型,并采用 CST 软件的粒子工作室模块进行了仿真,研 究了聚焦电流大小和阴极位置对电子束的焦点位置和束斑形貌的影响。仿真结果表明:聚集电流为 460 mA,阴极下表面距 栅极上表面为 1.0 mm 时,电子束在工作平面处的束斑直径为 0.61 mm,电子分布较均匀且形状较圆。进行了电子束选区熔化 实验,成功实现了钛合金粉末的预热和熔化成型。试验结果表明模拟仿真对电子枪的设计具有一定的指导作用,可以实现 800 mm 工作平面处的成功成型的要求。

关键词 CST 仿真 电子枪 聚焦电流 阴极位置 束流品质 中图分类号: TG439.3 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202309005

电子束选区熔化技术(Electron Beam Selective Melting, EBSM)是在 20 世纪 90 年代发展的一种以 金属粉末为原料的电子束增材制造技术^[1-3]。它利 用阴极产生的电子束作为热源,扫描粉末床并选择 性的迅速熔化金属粉末,逐层叠加的形成致密冶金 零部件。与其他金属增材制造技术相比,由于具有

能量利用率高、成形速度快、零件残余应力小以及 适用粉末粒径范围广等特点,被广泛地应用在航空 航天、汽车、仪器生产、生物医疗等领域^[48]。

电子枪是电子束选区熔化设备的核心部件,主要功能是产生电子束流,包括栅极、阳极、阴极、聚 焦线圈等,其参数的变化会影响电子束流品质^[9]。

收稿日期:2023-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51975036);广东省重点研发计划项目(2018B090904004)

^{*}联系人: E-mail: zhangweibh@buaa.edu.cn

其中,电子枪的聚焦电流和阴极位置是影响电子束 流品质的重要因素^[10]。因此,研究聚焦电流大小和 阴极位置对电子束的焦点位置和束斑形貌的影响, 进而优化电子束流品质,获得更小、更圆、能量分布更 均匀的束斑,有利于提高增材制造零件的质量^[9,11-12]。

相对于以统计物理为基础的模拟方法和粒子 束的流体处理方法,粒子模拟方法(Particle-In-Cell, PIC)直接对完整的 Lorentz 方程与 Maxwell 方程组 进行求解,采用了较少的近似条件,得到粒子在电 磁场中的运动规律,可以更真切地反映实际的物理 过程。CST工作室套装(CST Studio Suite, CST)是 由德国 CST 股份有限公司基于 PIC 方法开发的一 款三维电磁场仿真软件[12-14],适用于自由带电粒子 与电磁场相互作用的仿真分析。在电子枪的模拟 仿真中,高精度的 PIC 求解器能够准确地描述带电 粒子与电磁场之间的相互作用,有助于优化电子枪 的设计,改善电子束的发射和聚焦特性,从而提高 电子束的质量和效率。通过仿真模拟,可以预测和 分析电子枪在不同工作条件下的性能优化电子枪 的参数和结构,降低研发生产成本,缩短研发生产 周期,进而提高增材制造零件的质量。本文使用 SolidWorks 软件建立1:1的电子枪三维模型,将其 导入 CST 的粒子工作室模块, 对电子枪的电子运动轨 迹进行模拟仿真。通过改变聚焦电流或阴极位置, 研究电子束流的焦点位置、电流密度以及 800 mm 处工作平面束斑形貌的变化规律。选取仿真的最 优参数,且选用栅极电压为-60 kV,电子束流为 7 mA 等参数对钛合金粉末进行电子束选区熔化实 验,实现了钛合金粉末的预热和熔化成型。证明了 本次仿真模拟对电子枪的设计具有指导作用。

1 电子枪有限元分析模型的建立

1.1 三维物理模型

根据选区熔化粉末预热和成形的工作平面在 800 mm 附近的要求,设计了相应的聚焦线圈,其中 聚焦线圈内径为 70 mm,外径为 140 mm,线圈匝数 为 1350 匝,高度为 75 mm,磁轭厚度为 10 mm,线圈 上表面距离原点 172 mm。按照 1:1 建立电子枪中 阳极、栅极、阴极、磁轭和聚焦线圈等模型,从上至 下依次为阴极、栅极、阳极、裙毯轭包裹的聚焦线 圈。栅极、阳极位置和结构优化的相关仿真已详细 讨论^[10],在此不再赘述。其中,电子束轴线为 Y轴, 竖直向下为正方向,栅极上表面与 Y轴的交点为原 点,如图 1 所示。所述各部件都以 Y轴为轴线呈轴 对称分布。



Fig. 1 Location of the model

1.2 有限元模型基本参数的设置

1.2.1 材料设置

为了简化分析,设置栅极、阳极为理想导电材料(Perfect Electric Conductor, PEC)。电子枪通常采 用钨作为阴极,因此将阴极材料设置为钨,具有较 高的熔点、较低的逸出功和足够可靠的机械强度与 化学稳定性。磁轭用于约束并增强聚焦线圈产生 的磁场,选取纯铁为磁轭材料。

1.2.2 网格划分

采用理想边界拟合 (Perfect Boundary Approximation, PBA) 来自动划分网格, 使用六面体网格来 计算静电场和静磁场。

1.2.3 边界及电子发射条件

设置 background 为真空。成型平面距电子发 射面为 800 mm,设置束流输出方向 Y 轴的范围为其 两倍,即 0-1600 mm。设置阴极和栅极电势为-60 kV, 阳极电势 0 V。由于在建立电子枪模型时未进行其 他屏蔽, X_{min} 、 X_{max} 、 Z_{min} 、 Z_{max} 的边界条件均设为 open 状态,仅 Y 向磁场分量设为 0。定义发射类型 为温度限制发射,逸出功 4.54 eV^[15-16],设定温度为 3000 K。为减少仿真时间的同时保证模拟准确度, 设置发射电子数为 1768 个。

1.2.4 变量设置

聚焦线圈电流 *I* 的改变会引起内部磁感应强度 大小变化,进而影响二次焦点的位置以及束斑形貌; 同样,改变阴极位置 *L*(其下表面距离原点的距离) 也会引起二次焦点位置和束斑形貌的变化。因此, 在保证阴极、栅极以及阳极等参数不变的情况下, 将聚焦线圈的电流大小 *I* 和阴极位置 *L* 设置为单一 变量,研究工作平面处束斑形貌的变化规律。

2 仿真模拟结果

2.1 聚焦电流对工作平面束斑形貌的影响

经过大量的仿真实验,所设计电子枪的聚焦电 流在 450-465 mA 范围变化时,电子束的焦点可以位 于 800 mm 附近。为了考察工作平面的束斑形貌的 变化,将电流参数进行进一步细化。设置步长为 5 mA,故 *I*取 450 mA、455 mA、460 mA、465 mA,4 组数据。

电子束的电流密度与 Y 轴关系曲线以及焦点 位置如图2所示。在所选的聚焦电流范围内,随着 聚焦电流的增大,电子束的焦点由 1017 mm 移动到 了 788 mm。这是由于随着聚焦电流的增大,磁感应 强度变大,对电子束流的聚焦能力变强,因此焦点 上移。电子束在工作平面处电流密度和束斑直径 随聚焦电流变化的仿真结果如图 3 所示。一般地, 电子束斑直径是通过统计80%电子分布的等效圆 直径进行估算[17]。随着聚焦电流的增大,工作平面 处的电流密度从 21705 A/m² 逐渐增大到 40569 A/m², 而束斑直径从 1.42 mm 逐渐减小到 0.41 mm。由于 聚焦线圈为空心圆柱形,内部磁场成轴对称分布, 因此取线圈中心(Y=219.5 mm, Z=0 mm)处 X轴磁 感应强度分布来表征聚焦线圈内的磁场变化趋势, 如图4所示。由图4可知,聚焦电流增加,线圈内部 的磁感应强度增大,对电子的汇聚作用加强,从而 使束斑直径减小。电子相互间受到的互斥力和洛 伦兹力值均属同一数量级[18],不可忽略电子之间存 在空间电荷作用力,随着带电粒子的靠近空间电荷





Fig. 2 Curve about current density and *Y*-axis under different focusing currents



图3 工作平面处电流密度、束斑直径与聚焦电流关系曲线

Fig. 3 Curve about current density, beam spot diameter at the work plane and focusing currents



图4 聚焦线圈 X 轴磁感应强度分布曲线(Y=219.5 mm, Z= 0 mm)

Fig. 4 Distribution curve of magnetic induction intensity in the *X*-axis of the focusing coil(*Y*=219.5 mm, *Z*=0 mm)

作用力越来越大, 束斑减小的程度在不断减小。电 子束在工作平面处束斑形貌仿真结果如图 5 所示, 在 *I*=460 mA 时, 束斑形状最圆且电子分布最均匀, 直径大小在 0.61 mm, 且焦点在 800 mm 附近。

2.2 阴极位置对工作平面束斑形貌的影响

根据大量的仿真实验可知,当聚焦电流为 460 mA, 阴极位置位于 0.9-1.2 mm 时,电子束的焦 点位于 800 mm 附近。为了考察工作平面的束斑形 貌的变化,设置步长为 0.1 mm, 故 *L* 取 0.9 mm、1.0 mm、 1.1 mm、1.2 mm, 4 组数据。

电子束在工作平面处电流密度和直径仿真结 果如图 6 所示。随着 L 增大,电流密度从 34210 A/m² 逐渐增大到 37198 A/m²,再逐渐减小到 28802 A/m²。 如图 7 所示, 阴极位置为 0.9 mm、1.0 mm 及 1.1 mm 时,电子束的第二次聚焦点的位置为 788 mm, 而阴 极位置为 1.2 mm 焦点位于 1017 mm。这是由于经



图5 聚焦电流 (a)*I*=450 mA, (b)*I*=455 mA, (c)*I*=460 mA, (d)*I*=465 mA, 工作平面处束斑形貌

Fig. 5 Beam spot morphology at the working plane under different focusing currents, (a)I=450 mA, (b)I=455 mA, (c)I=460 mA, (d)I=465 mA





过聚焦线圈的电子束流进入磁透镜时的半径越小, 受到的磁场作用力越小^[18]。电子束在 172 mm 即聚 焦线圈上表面时的束斑形貌如图 8 所示, 阴极位置





Fig. 7 Curve about current density and *Y*-axis under different cathode positions

为 1.2 mm 时其半径明显小于其他三个, 磁场作用力 减小, 导致焦点下移。如图 6、图 9 所示, 工作平面 的电子束束斑直径从 0.51 mm 逐渐增加到 1.22 mm。 当 *L*=1.0 mm 时, 电子束束斑形状最圆且电子分布



图8 不同阴极位置下, (a)L=0.9、1.0、1.1、1.2 mm, (b)L=0.9 mm, (c)L=1.0 mm, (d)L=1.1 mm, (e)L=1.2 mm, 172 mm 处束斑形貌 Fig. 8 Beam spot morphology at 172 mm with cathode position of (a)L=0.9, 1.0, 1.1, 1.2 mm, (b)L=0.9 mm, (c)L=1.0 mm, (d)L= 1.1 mm, (e)L=1.2 mm

最均匀,直径大小在 0.61 mm。当 L=0.9 mm 时,束 斑的电子分布比较均匀但形状不圆,四个边角形状 比较明显。

3 电子枪仿真参数优化以及实验

选取聚焦电流 *I*=460 mA, *L*=1.0 mm 的最优参数进行分析。电子束的电流密度与 *Y* 轴关系曲线如图 10 所示。

如图 10 所示,电子束流呈现先汇聚然后发散 再聚焦再发散的过程。电子枪阴极发射出大量电 子,经过栅极的聚焦和阳极的加速作用,在 62 mm 附近(阳极孔内)电子束流被第一次聚焦,即电流密 度达到第一个峰值,一般被称为束腰。电子会沿着 束流的轨迹方向继续运动,但由于加速后电子速度 不同且电子自身的空间电荷排斥力会使电子在各 个方向上发散运动,电流密度减小,束流直径增大; 当电子束再经过聚焦线圈时,在聚焦线圈电磁力的 作用下电子束再次聚焦,在 788 mm 处电流密度再 次达到峰值,一般被称为焦点。在实际工作中,需 要调节聚焦电流,使该焦点位于工作平面上,以获 得最大的电流密度。此后,由于空间电荷的斥力和 惯性,电子束再次发散。

根据上述仿真结果,在实际的电子枪设计时将 阴极位置设置为 1.0 mm,并采用上述聚焦线圈结构, 然后在 460 mA 聚焦电流附近微调时,可以将电子 束的焦点可以调节到 800 mm 处的工作平面,且具 有较好的束斑形貌。选用电子束加速电压为-60 kV, 扫描速率为 2000 mm/s,扫描间隔为 0.1 mm,电子束 流为 7 mA 等参数进行了电子束选区熔化试验。可 以实现钛合金粉末的预热和熔化成型,钛合金粉试



图9 阴极位置为 (a)L=0.9 mm, (b)L=1.0 mm, (c)L=1.1 mm, (d)L=1.2 mm, 工作平面处束斑形貌 Fig. 9 Beam spot morphology at the working plane with cathode position of (a)L=0.9 mm, (b)L=1.0 mm, (c)L=1.1 mm, (d)L=1.2 mm



Fig. 10 Curve about current density and *Y*-axis

验样件如图 11 所示,尺寸为 20 mm×20 mm×40 mm, 从侧面看无明显开裂、分层和孔隙等缺陷。通过背 散射电子成像系统在线监测加工区域的表面形貌, 加工到第 100 层获取的表面形貌如图 12 所示。从 图中可以看到,表面不存在未熔化颗粒,熔化比较



图11 试验样件 Fig. 11 Test sample

均匀、无明显熔池的扰动痕迹,可以满足电子束选 区熔化零件成形的要求。

4 结论

基于所设计的电子枪结构及工作参数,采用



图12 背散射成像图 Fig. 12 Backscatter image

CST 软件研究了聚焦电流和阴极位置对电子束流 品质的影响,得到以下结论:

(1)聚焦电流从 450 mA 增大到 465 mA 时,工 作平面的电子束电流密度逐渐增大,从 21705 A/m² 增大到 40569 A/m²;束斑直径逐渐减小,从 1.42 mm 减小到 0.41 mm。

(2) 阴极的位置从 0.9 mm 移动到 1.2 mm 时, 工 作平面的电子束电流密度先逐渐增大再减小, 从 34210 A/m² 增大到 37198 A/m², 再减小到 28802 A/m²; 束斑直径逐渐增大, 从 0.51 mm 增加到 1.22 mm。

(3) 通过仿真结果获取了最优的聚焦线圈电流 和阴极位置参数:聚焦电流为460 mA, 阴极位置是 其下表面距原点的距离是1.0 mm; 依据上述参数指 导电子枪设计, 可以将电子束的焦点可以调节到 800 mm 处的工作平面, 实现了电子束选取熔化粉 末的预热和成型。

参考文献

- Zhang Y, Fang X, Zhang W, et al. Molten pool flow behavior and influencing factors in electron beam selective melting of IN738 superalloy[J]. Frontiers in Materials, 2023, 10: 1211648
- [2] Liu Min, Guo Yu, Zhen Zhen, et al.Research progress on Ti-6Al-4V alloy prepared by selective electron beam melting[J]. Powder metallurgy industry, 2022, 32(02): 84-89 (刘敏, 郭瑜, 甄珍, 等. 电子束选区熔化技术制 备 Ti-6Al-4V 合金的研究进展 [J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(02): 84-89(in chinese))
- [3] Liu Z, Wang Z, Gao C, et al. Enhanced rolling contact fatigue behavior of selective electron beam melted Ti6Al4V using the ultrasonic surface rolling process[J]. Materials Science and Engineering:A, 2022, 833; 142352
- [4] Yilmaz F, Şahin M, Ercan G. Weight reduction of an un-

manned aerial vehicle pylon fitting by topology optimization and additive manufacturing with electron beam melting[J]. Journal of Additive Manufacturing Technologies, 2021, 1(2): 553–553

- [5] Yang X, Lai Y, Zhang Z, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of H13 steel produced by selective electron beam melting[J]. Materials Characterization, 2023, 203: 113053
- [6] Galati M. Electron beam melting process: A general overview[J]. Additive Manufacturing, 2021; 277–301
- [7] Jia Y, Mehta ST, Li R, et al. Additive manufacturing of ZrB2–ZrSi2 ultra-high temperature ceramic composites using an electron beam melting process[J]. Ceramics International, 2021, 47(2): 2397–2405
- [8] Li Y, Liang X, Yu Y, et al. Microstructures and mechanical properties evolution of IN939 alloy during electron beam selective melting process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 883: 160934
- [9] Wu Fan, Lin Bochao, Quan Yinzhu, et al. Review on Equipment and Application of Electron-beam Based Additive Manufacturing[J]. Vacuum, 2022, 59(01): 79-85(吴 凡, 林博超, 权银洙,等. 电子束增材制造设备及应用进 展 [J]. 真空, 2022, 59(01): 79-85(in chinese))
- [10] Sang Xinghua, Xu Haiying, Zuo Congjin, et al. CST Simulation on Effect of Beam Source Component Struture size onBeam Quality in Electron Guns[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(09): 60-64 (桑兴华, 许海鹰, 左从进, 等. 电子枪束源部件结构尺寸对束流 品质影响的 CST 仿真 [J]. 航空制造技术, 2017(09): 60-64(in chinese))
- [11] Wang Yongjie, Design and study of beam forming system of high power electron beam gun[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011 (王永杰. 大功率电子枪电 子束形成系统的设计研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011 (in chinese))
- [12] Wang Yifan, Simulation optimization design of dynamic focusing with broad-width scanning electron beam[D]. Harbin Institute of Technology, 2021 (王一帆. 宽幅扫描 电子束动态聚焦仿真优化设计 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021(in chinese))
- [13] Fan J, Zhang J, Xu H, et al. Influence of the cathode position on beam current characteristics in the thermionic electron gun[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2022, 6(3): 401–408
- [14] Qiu Yufan. Analysis and experimental study of focusing characteristics of high voltage electron gun effect[D]. Xi-

amen University of Technology, 2022 (邱宇帆. 高压电 子枪聚焦特性分析与试验研究 [D]. 厦门理工学院, 2022(in chinese))

- [15] Wang Zhaoman. Simulation Research and Integration of Laser Heating Precision Electron Gun[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021 (王昭漫.激光加热精密电子枪仿真研究与集成 [D]. 武 汉: 华中科技大学, 2021(in chinese))
- [16] Polishchuk VP. The energy balance and the mechanism of discharge transport on the surface of a thermionic cathode in an arc discharge[J]. High temperature:English translation of teplofizika vysokikh temperatur, 2005,

43(1)**:** 8–18

- [17] Ye Yuhao, Zuo Congjin, Xu Haiying, et al. Application of CST Simulation Technology in Focusing Parts of Electron Beam Guns[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(09): 78-82 (叶禹豪, 左从进, 许海鹰, 等. CST 仿真技术在电子枪聚焦部件中的应用 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(09): 78-82(in chinese))
- [18] Liu Mingliang. Research on electron beam deflection technique and dynamic focusing of industrial electron gun[D]. Guilin University of Electronic Technology, 2021 (刘明亮. 工业电子枪电子束偏转技术与动态聚焦的研 究 [D]. 桂林电子科技大学, 2021(in chinese))