

电子枪静电透镜部件仿真与优化

杨震,刘方军,张伟

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191)

[摘要] 根据电磁透镜的原理可知,作用于工件上的工作束斑尺寸与电子束注腰的位置和尺寸相关。电子枪栅极出束孔直径与阳极位置的改变将会引起电场分布的变化,从而改变电子束注腰的位置与尺寸,最终影响工作束斑的大小。运用电磁场仿真软件 CST 仿真得到了电子枪静电透镜电场分布与束流轨迹。采用单一变量法,模拟得到 100mA 束流强度下栅极出束孔直径和阳极位置对电子束注腰位置与尺寸的影响规律。仿真结果表明,其他参数相同时,栅极出束孔直径 D 为 2mm、阳极上端面到栅极下端面距离 H 为 15mm 时,电子束注腰位置最高,半径最小。选取优化参数 $D=2\text{mm}$ 、 $H=15\text{mm}$ 进行焊接试验,获得了深宽比更大的焊缝,证明达到了减小工作束斑尺寸和优化束流品质的目的。

关键词: 电子束焊接;电子枪;CST 仿真;电场分布;电子束注腰

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.042



杨震
硕士研究生,主要研究方向为电子束设备与工艺。

电子束焊接因其具有能量密度高、焊接变形小、热影响区小、工艺适应性强等优点,在航空航天、国防军工、微纳制造等领域得到广泛应用^[1-2]。电子枪是电子束焊接的核心部件,按照阴极的加热方式,电子枪可分为直热式电子枪和间热式电子

枪。相比于间热式电子枪,直热式电子枪具有阴极结构简单、操作方便的优点,因而在电子束焊接中更加常用。在直热式电子枪中,阴极加热,其表面的电子获得足够的能量,从金属表面逸出,形成电子云^[3]。由于阴极与阳极之间存在高压电场,在电场力的作用下,电子从阴极向阳极高速运动,形成电子束流。束流经过由栅极与阳极组成的静电透镜和由聚焦线圈形成的电磁透镜两次会聚作用,最终在工件上获得小尺寸、高能量密度的束斑^[4]。

由于不同用途的电子枪具体结构不同,电子枪的设计尚未有一套完整、标准的理论计算方法。逐次调整电子枪各结构参数进行试验,此方法设计周期长、经济成本高,且电子束注腰位置、电子束注腰半径等参数很难直接测得,因此可行性也很低。有限积分法是一种数值解计算方法,利用基于有限积分法的软件在现有电子枪结构上进行模拟仿真,获得最佳

参数,并通过试验验证进行优化,这相对于其他方法更加经济有效。

桑兴华等^[5]采用仿真软件 CST 对中国航空制造技术研究院自主研发的直热式电子枪 Q60-A 的栅极球面半径、阳极孔直径及阳极位置等参数进行了仿真,得出了优化参数,并进行了试验验证,证明了优化的正确性。该文献中将栅极偏压设置为固定参数,当栅极出束孔直径、阳极与阴极的相对位置等结构参数变化时,若栅极偏压不变,束流强度将会发生改变。而在实际应用中,通常需要将束流强度作为常值,以达到定量的能量输入。

栅极出束孔直径和阳极与栅极的相对位置是电子枪静电透镜部分的两个关键尺寸。栅极出束孔直径的变化会改变阴极周围的电场分布,阳极位置的变化将改变栅极与阳极之间的电场分布。电场分布的改变将直接影响束流的汇聚状态,最终引起电子束注腰位置和尺寸的变化。

由电磁透镜对束流的作用原理可知,电子束注腰的位置与尺寸影响着工作束斑尺寸大小^[6],工作束斑即作用于工件上的束斑。电子束注腰位置越高,即距聚焦线圈距离越远、尺寸越小,工作束斑尺寸越小。在束流强度相同的情况下,工作束斑越小,束斑的平均能量密度越高。因此,通过改变栅极出束孔直径与阳极位置获得尺寸最小的工作束斑,可以改善束流品质。

本文拟采用仿真软件 CST 在固定束流强度下对电子枪静电透镜部分结构尺寸进行仿真模拟。通过建立电子枪部件的 1 : 1 模型,在 100mA 束流强度下,研究不同栅极出束孔直径和不同阳极位置下的电场分布及对电子束注腰位置与大小的影响,获得使工作束斑最小的栅极出束孔直径与阳极位置。最后,对优化前后的参数进行焊接试验对比,证明优化的正确性与可行性。

模型建立和参数设置

CST 公司是德国一家专注于三维电磁仿真的国际化软件公司。CST 工作室是 CST 公司开发的基于有限积分法的三维通用电磁场仿真软件。CST 工作室具有集成化程度高、网格划分技术强大、算法完备、结果后处理功能丰富等特点^[7]。CST 仿真流程一般包括建立 / 导入仿真模型、划分网格、设置仿真环境、设置边界条件、施加激励源、设置求解器、求解、后处理等过程^[8]。

1 建立模型

根据中国航空制造技术研究院自主研制的直热式 Q60-A 型电子枪各部件尺寸,在三维 CAD 软件 CATIA 中按 1 : 1 比例建立栅极、阳极、阴极模型,如图 1 所示。为了减少网格划分的数量,减少运算工作量,将阴极等效成下底面面积相等的圆盘状阴极。因电子只从阴极表面发射,因此将带状阴极等效成圆盘灯

丝,这不会对仿真结果造成影响。

图 1 (a) 中 D_g 为栅极球面直径,值为 22mm; 图 1 (b) 中 D_a 为阳极孔直径,值为 5mm; 图 1 (c) 中 D_c 为阴极厚度,值为 0.5mm。将模型导入到 CST 中,模型相对位置及模型坐标系如图 2 所示。阴极放置在栅极出束孔内,其轴线与栅极轴线相重合,阳极放置在栅极圆形球面下方,阳极孔轴线与栅极轴线重合。以栅极下端面两相互垂直直线为 X 轴和 Y 轴,以栅极轴线为 Z 轴,向上为正。

2 参数设置

2.1 网格划分

CST 中的 PBA (Perfect Boundary Approximation) 网格划分运用理想边界拟合技术,用于物体的空间

离散,即使物体结构细节比理论上要低,PBA 仍有很好的近似^[9]。FPBA (New Fast Perfect Boundary Approximation) 是具有更高性能和鲁棒性的快速 PBA 网格划分类型,用于划分大尺寸、复杂的模型^[9]。由于此仿真的模型较为复杂,故采用 FPBA 进行全局网格划分,全局网格划分效果如图 3 所示。

阴极尺寸相对于栅极和阳极很小,如果只进行全局网格划分,网格无法对阴极进行分辨。对阴极进行边缘加密和体加密,加密因子均设为 5。将阴极 X 、 Y 方向的局部网格的最大步长设置为 0.1mm,由于阴极厚度只有 0.5mm,故将 Z 方向的局部网格最大步长设置为 0.01mm。阴极加

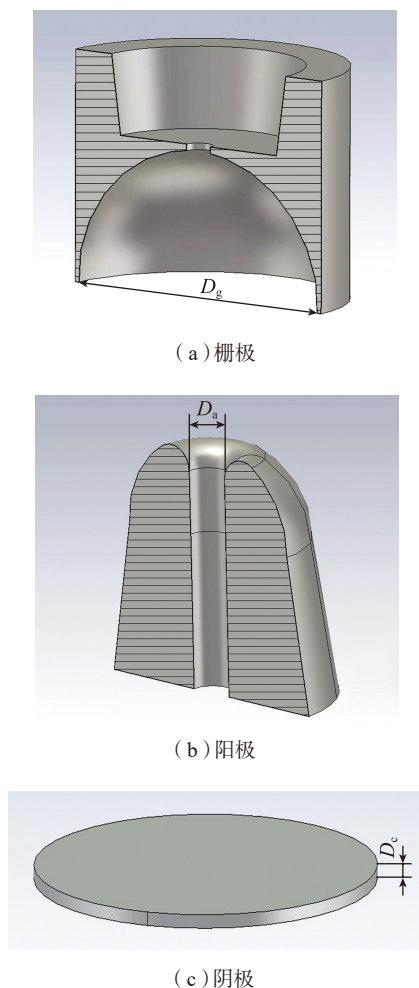


图1 静电透镜部件与阴极模型
Fig.1 Model of electrostatic lens component and cathode

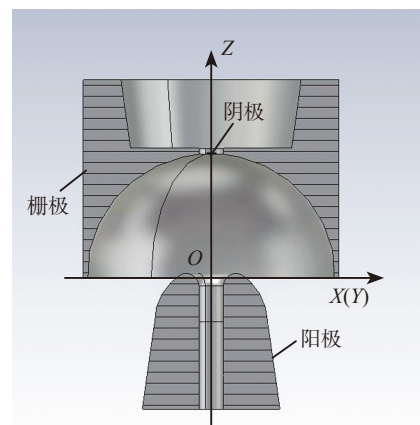


图2 模型坐标系
Fig.2 Coordinate system of model

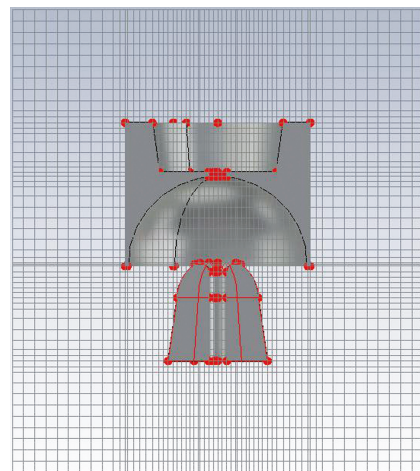


图3 全局网格
Fig.3 Global mesh

密后,局部网格划分如图4所示。

2.2 仿真环境与边界条件设置

电子枪的工作环境为真空,则仿真环境需设置为真空。仿真空间设置为 X 正向与负向偏离栅极边沿各25mm, Y 正向与负向偏离栅极边沿各25mm, Z 正向偏离栅极上边沿25mm, Z 负向偏离阳极底面300mm。由于电子枪工作在真空室内,因此边界条件选择为tangential,以达到屏蔽外部电场的目的。

2.3 激励源与求解器设置

激励源为施加在阴极下表面的电子发射源,为了提高仿真效率、减少计算量,在保证仿真精度的前提下,设置发射电子数目为640。电子发射机制选择温度限制发射,电子发射点设置为在灯丝下表面均匀分布,初始运动方向为垂直灯丝下表面向下。为了得到足够大的束流强度,阴极温度设置为3000K。阴极材料为钨,因此逸出功设置为4.54eV。此仿真中所有求解都采用了Gun Iteration求解器,求解原理是对电子发射进行迭代,前一次迭代形成的电场会对后来迭代发射的电子产生影响。求解器将持续运行,直到达到预设的迭代精度或迭代次数为止,本文中的迭代精度设置为-10dB。

2.4 变量设置

在电子枪中,栅极出束孔直径 D

是一个很重要的参数,出束孔直径的变化将改变阴极周围的电场分布,影响电子的发射,从而影响束流行为。在保证其他各参数一致的前提下,根据栅极的设计经验及加工限制,分别对出束孔直径为2mm、3mm、4mm、5mm、6mm这5种情况进行电场仿真。

当阴极与阳极的电位确定,改变阳极的位置即改变电场的分布,从而影响束流的行为。在保证其他各参数一致的前提下,分别对阳极上端面到栅极出束孔下端面距离 H 为22mm、21mm、20mm、19.5mm、19mm、18.5mm、18mm、17.5mm、17mm、16.5mm、16mm、15.5mm、15mm这13种情况进行电场仿真。选择此参数范围是由于当阳极与栅极距离过近,会引起高压放电,距离过远会妨碍阳极下方部件的安装。

仿真参数示意结果如图5所示,在每次改变栅极与阳极结构尺寸后,均调整栅极偏压,使束流强度为100mA。

仿真结果

1 电场分布及束流轨迹

由于各种情况下的电场分布与束流轨迹大致相同,只有少许差异。因此只取 $D=2\text{mm}$ 、 $H=19\text{mm}$ 时的情况进行分析。电子枪电场分布和束

流轨迹如图6所示。

由图6(a)可见,栅极和阳极之间形成聚焦电场,受到栅极形状的影响,电势线呈圆弧状,在接近阳极的位置处,电势线较密。由于阳极开孔的原因,阳极孔端面处的电场发生畸变,电势线呈现向下凹的形状,形成阳孔效应^[10-11]。在束流强度为100mA时,阴极周围的等势线如图6(b)所示。阴极电位为-60000V,其下方大于-60000V的等势线相当于电子束的通道,为了便于观察,图6(b)只显示了小于-60000V的等势线,可以看出,阴极下方没有小于-60000V的等势线。当需要更小束流的时候,可增大栅极偏压,小于-60000V的电势线将向中间移动,封住部分电子运动的通道。

阴极和阳极之间存在高压电场,使电子由阴极向阳极方向高速运动,形成如图6(c)所示的束流轨迹。图6(d)为束斑半径随 Z 轴坐标变化的轨迹图,可以看出,自灯丝向下至 $Z \geq 9\text{mm}$ 范围内,束斑先变大,这是由于电子自灯丝刚刚发射出来时电子密度大,电子相互间的斥力大于栅极和阳极之间使电子会聚的电场力。 Z 在0~9mm的范围内,由于束斑较大,电子相互间的斥力小于使电子会聚的电场力,束斑半径逐渐变小。当束流到达注腰位置并继续向下运动时,由于此时束流已经进入阳极孔,没有电场力的会聚作用,电子间的相互斥力使得束流发散。

2 不同栅极出束孔直径 D 仿真结果

在不同栅极出束孔直径下,为保证束流强度保持在100mA,需要调整栅极偏压。当栅极偏压改变,栅极和阳极之间的电场分布及阳孔效应将发生变化,从而造成电子束注腰的位置和半径的改变。当 H 为19mm时,不同栅极出束孔直径 D 下电子束注腰的位置与半径如图7所示。

由图7(a)中可以看出,随着 D 变大,电子束注腰的位置逐渐降低,

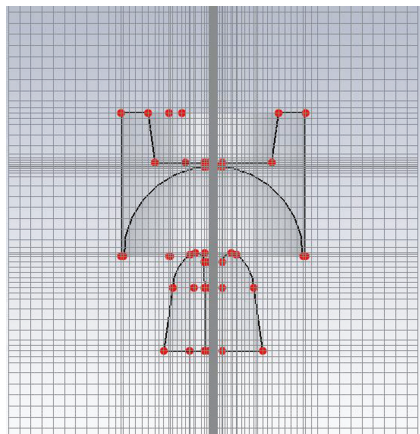


图4 加密后的网格
Fig.4 Refined mesh

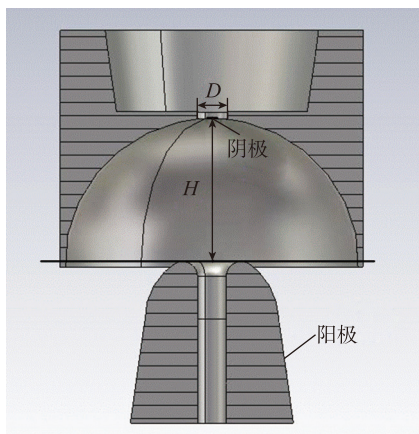


图5 仿真参数
Fig.5 Selected parameters

这是由于电场分布变化,阳极孔对束流的发散作用减弱,束流可获得更低位置的电子束注腰。由图 7 (b) 可以看出栅极出束孔直径为 2mm 时,电子束注腰的半径最小,直径 3mm 时电子束注腰半径最大,随后电子束注腰半径随着 D 变大而变小。

3 不同阳极位置 H 仿真结果

当 D 为 4mm 时,不同阳极位置

H 下电子束注腰位置与半径如图 8 所示。

从图 8 (a) 中可以看到,随着 H 的增大,电子束注腰位置降低。一方面,是由于阳极与栅极距离变大,阳极与栅极之间的电场强度变弱,电场强度越弱,则聚焦作用越弱,导致电子束注腰位置偏下。另一方面, H 越大,即阳极位置越低,由阳孔效应可

知,束流总是在进入阳极孔后发散,则电子束注腰位置随着阳极孔位置降低而降低。

由图 8 (b) 可以看出,电子束注腰半径随着 H 的增大而增大。这是因为当阳极位置降低时,阳极和栅极之间的聚焦电场将变弱,聚焦作用变弱,电子束注腰半径因此而变大。

根据图 8 可知,当 $H=15\text{mm}$ 时,电子束注腰位置最高,电子束注腰半径最小。

4 D 和 H 对工作束斑的影响

根据电磁透镜对束流的作用原理,可得公式 (1) 所示的工作束斑半径关于电子束注腰半径的函数关系及公式 (2) 所示的电磁透镜焦点关于电子束注腰位置的函数关系 [6]。

$$R_w = \frac{b}{a} R_e \quad (1)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (2)$$

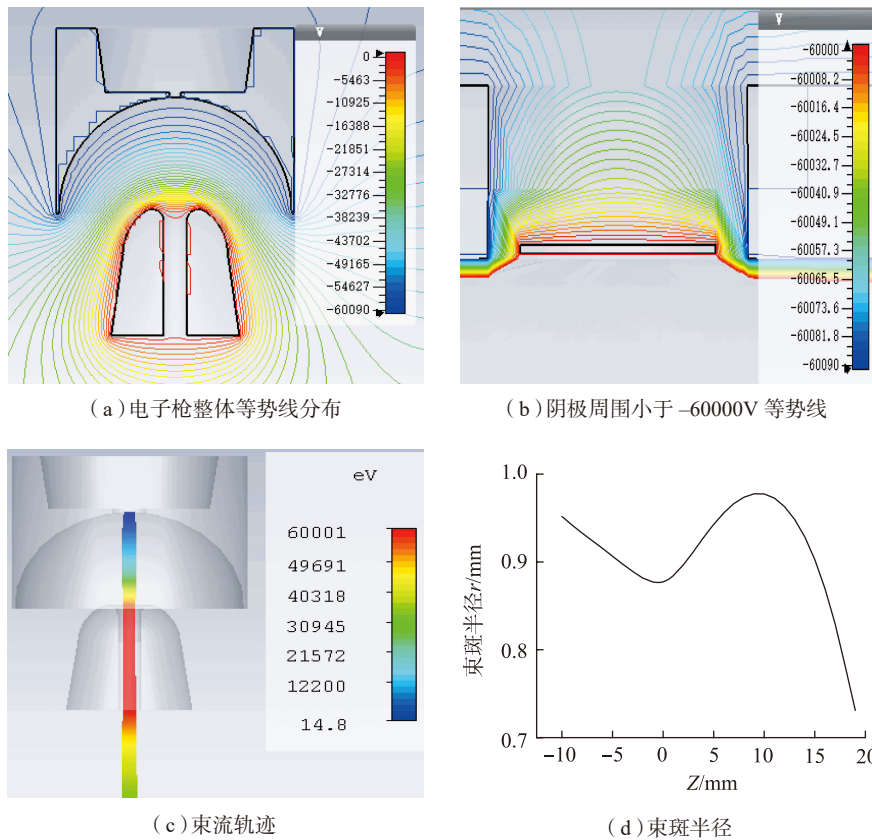


图6 $D=2\text{mm}$, $H=19\text{mm}$ 时电场分布与束流轨迹

Fig.6 Electric field distribution and beam trajectory at $D=2\text{mm}$, $H=19\text{mm}$

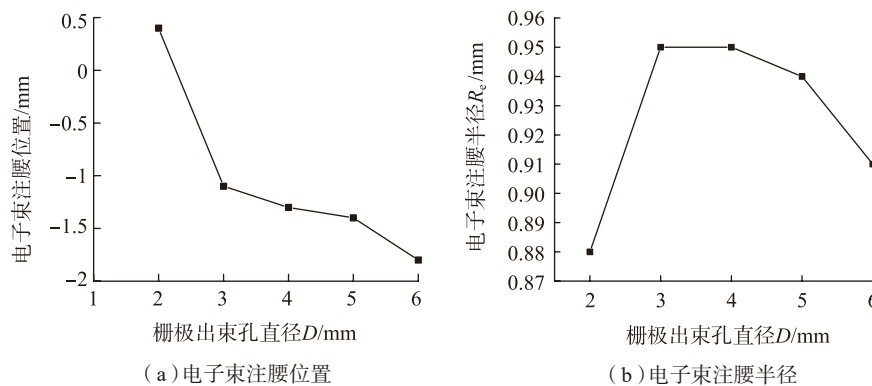


图7 不同栅极出束孔直径下电子束注腰位置及半径

Fig.7 Position and radius of electron beam waist with different diameter of grid hole

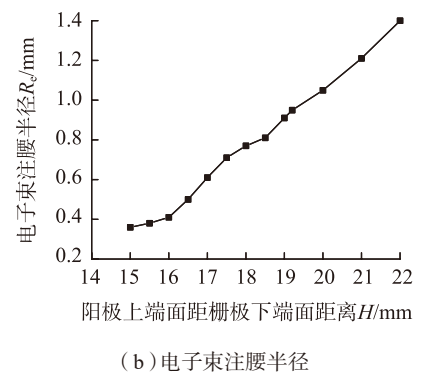
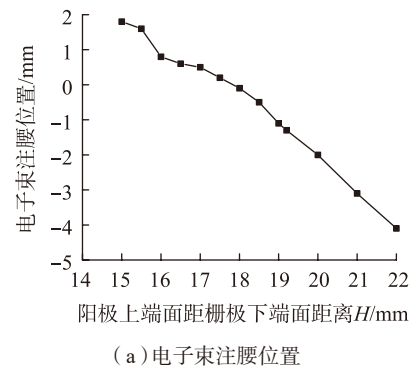


图8 不同阳极位置下电子束注腰位置及半径

Fig.8 Position and radius of Electron beam waist with different position of anode

式中, a 为电子束注腰到聚焦线圈中心面的距离, b 为工作束斑到聚焦线圈中心面的距离, f 为电磁透镜的焦距, R_e 为电子束注腰的半径, R_w 为工作束斑的束斑半径。

由式(1)可知,当电子枪各参数确定后,工作束斑的尺寸取决于电子束注腰的尺寸及 b 与 a 的比值。当聚焦线圈的各参数确定后,其焦距 f 便已确定。联立式(1)与式(2),可得:

$$R_w = \frac{f}{a-f} R_e \quad (3)$$

由式(3)可知,当电子枪其他参数不变时,电子束注腰半径 R_e 越小、 a 越大,则工作束斑尺寸越小,束斑平均能量密度越大。由图 7 与图 8 可知,当栅极出束孔直径 D 为 2mm 时, H 为 15mm 时,电子束注腰位置最高,即 a 最大,同时电子束注腰半径最小。

参数优化与试验验证

优化前后的结构参数如表 1 所示,其中编号 3 为优化前参数,编号 4 为优化后参数。由 CST 仿真得到的优化前后电子束注腰截面处电子分布如图 9 所示。

由图 9 可以看出,优化前注腰的半径约为 1mm,优化后注腰的半径约为 0.4mm。优化后注腰的半径显著小于优化前的束斑半径。

选择如表 2 所示的焊接参数,在 25mm 厚的 Cr18Ni9Ti 不锈钢上进行焊接试验,焊缝 3 选用优化前的结构参数,焊缝 4 选用优化后的结构参数。焊缝外观与焊缝截面如图 10 所示。

表1 优化前后参数

编号	栅极出束孔直径 D/mm	阳极上端面距栅极出束孔下端面距离 H/mm
3	4	19
4	2	15

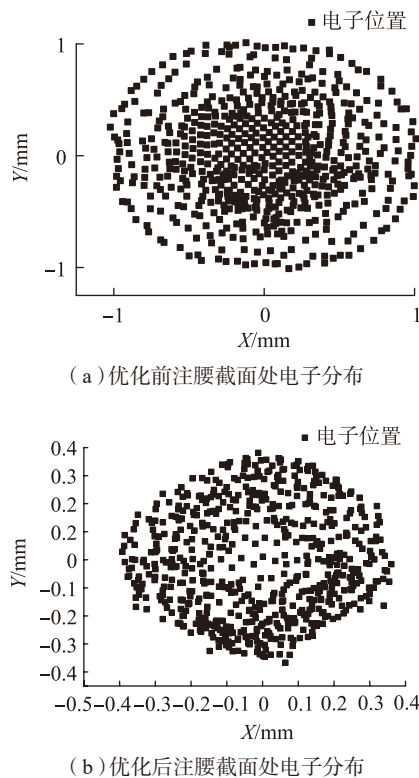
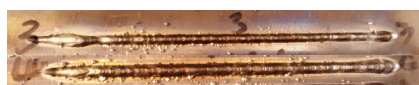


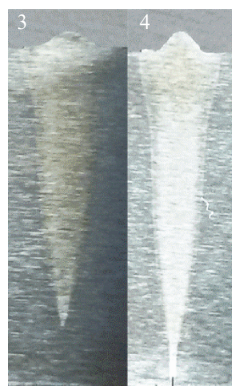
图9 优化前后注腰截面处电子分布
Fig.9 Electron distribution at section of waist before and after optimization

表2 焊接参数

加速电压 U/kV	聚焦电流 I_f/mA	束流强度 I/mA	焊接速度 $V/(mm \cdot s^{-1})$
60	510	100	5



(a) 焊缝



(b) 焊缝截面

图10 焊缝及焊缝截面
Fig.10 Welding seam and cross section of welding seam

焊缝 3 和 4 的深宽比分别为 3.05 和 3.85,焊缝 4 的深宽比大于焊缝 3 的深宽比,从而证明在束流强度相同的情况下,作用于焊缝 4 的束斑尺寸更小,平均能量密度更高,达到了优化束流品质的目的。

结论

(1) 在三维电磁场仿真软件中建立了电子枪的仿真模型,对不同栅极出束孔直径及不同阳极位置进行了仿真。电子束注腰位置越高、尺寸越小,则工作束斑的尺寸越小。根据仿真结果,100mA 束流强度下,在其他参数相同时,栅极出束孔直径为 2mm,阳极上端面距栅极下端面距离为 15mm 时,电子束注腰的位置最高,尺寸最小。

(2) 根据优化后的参数,设计了验证试验,结果与仿真的结果相符合,证明了利用 CST 仿真进行优化的可行性。

参考文献

[1] 余志彪,黄以平,刘海浪,等. 铝合金电子束焊接技术的研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(9): 14-17.
YU Zhibiao, HUANG Yiping, LIU Hailang, et al. Study on electron beam welding technology of aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(9): 14-17.

[2] 陈国庆,树西,柳峻鹏,等. 真空电子束焊接技术应用研究现状[J]. 精密成形工程, 2018, 10(1): 31-39.
CHEN Guoqing, SHU Xi, LIU Junpeng, et al. Research on the application of vacuum electron beam welding technology [J]. Netshape Forming Engineering, 2018, 10(1): 31-39.

[3] 陶振凯. 15kW/60kV 电子枪的研制[D]. 北京: 北方工业大学, 2015.
TAO Zhenkai, Development of 15kW/60kV electron gun[D]. Beijing: North China University of Technology, 2015.

[4] 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.
WANG Yongjie, Design and study of (下转第56页)

vious interface inside, and the composition and performance graded distribution along thickness. Among the manufacturing method of FGM, LMD not only relieves the stress between different materials, but also ensures the excellent formability of the material, and controls the change and distribution of the microstructure and properties of the formed parts through flexible design. This paper introduces the technical characteristics of LMD, the characteristic and application of FGM, the research progress in manufacturing FGM by LMD at home and abroad, the current research status of team in this field, and the development prospects of the LMD technology for the manufacture of FGM.

Keywords: Laser melting deposition; Additive Manufacturing; Rapid prototyping; Functionally gradient material; Manufacturing method

(责编 逸飞)

(上接第46页)

electron beam forming system for high power electron gun[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.

[5] 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, 60(9): 60-64.

SANG Xinghua, XU Haiying, ZUO Congjin, et al. CST simulation on effect of beam source component structure size on beam quality in electron guns[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 60-64.

[6] 王之康, 高永华. 真空电子束焊接设备及工艺 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990.

WANG Zhikang, GAO Yonghua. Vacuum electron beam welding equipment and technology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.

[7] 刘兵. 电磁仿真软件 CST 和 HFSS 模型接口软件的设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

LIU Bing. Design of model interface software for CST and HFSS[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.

[8] 刘海涛. 强流皮尔斯电子枪电子束聚焦系统模拟设计研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.

LIU Haitao. Simulation design of electron beam focusing system for strong current Pearce electron gun[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.

[9] CST China. CST 粒子工作室基础入门: 三维带电粒子动力学仿真 [M]. 上海: 上海软波工程软件有限公司, 2006.

CST China. CST particle studio basic

introduction: three dimensional charged particle dynamics simulation[M]. Shanghai: CST China Ltd., 2006.

[10] 杜秉初, 汪健如. 电子光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

DU Bingchu, WANG Jianru. Electron optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[11] 李骥. 高性能电子枪的设计与研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.

LI Ji. Design and research of high performance electronic gun[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.

通讯作者: 刘方军, 教授, 研究方向为电子束焊接、电子束钎焊等, E-mail: liufangjun@buaa.edu.cn。

Simulation and Optimization of Electrostatic Lens Components of Electron Gun

YANG Zhen, LIU Fangjun, ZHANG Wei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] According to the principle of electromagnetic lens, the size of the beam spot on the workpiece is related to the position and size of the electron beam waist. The change of the diameter of the grid hole and the position of the anode will cause the change of the electric field distribution, which will change the position and size of the electron beam waist, and eventually influence the size of the working beam spot. The electric field distribution and beam trajectory of the electron gun electrostatic lens are obtained by using the EMF simulation software CST. A single variable method was used to simulate the influence of the diameter of the grid hole and the position of anode on the position and size of the electron beam waist, while the intensity of beam was set to 100mA. The simulation results show that when the diameter of the grid hole is 2mm and the distance between the upper surface of anode and the lower end face is 15mm, the position of electron beam waist is highest and the radius is the smallest in the situation of that other parameters are the same. The welding test was carried out by the optimization parameter $D=2\text{mm}$ and $H=15\text{mm}$. The welding seam with greater depth to width ratio was obtained. It is proved that the purpose of reducing the size of the working beam spot and optimizing the beam quality is reached.

Keywords: Electron beam welding; Electron beam gun; CST simulation; Electric field distribution; Electron beam waist

(责编 逸飞)