

CST 仿真技术在电子枪聚焦部件中的应用*

叶禹豪, 左从进, 许海鹰, 桑兴华

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;
2. 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 电子枪聚焦部件的结构和尺寸会直接决定最终电子束焦点处电流密度和束流半径, 影响电子束流品质。通过 CST 仿真软件对电子枪聚焦部件进行分析, 模拟得到电子枪聚焦部件不同的结构尺寸参数对电子束电流密度和束流半径的影响结果。仿真结果表明, 在其他参数不变的情况下, 聚焦线圈端面与电子发射面距离从 305mm 增加 345mm 时, 电子束流半径从 1.44mm 减小至 0.93mm; 聚焦线圈内半径从 30mm 增大至 40mm 时, 电子束流半径从 0.86mm 增至 1.38mm; 磁轭间隙从 28mm 增至 43mm 时, 电子束流半径先减小再增大, 在 34mm 处束流半径达到最小值 0.957mm。使用基于 CST 仿真优化参数制备聚焦线圈的电子枪对 1mm TC4 薄板进行焊接试验, 在相同焊接工艺参数的情况下, 新得到的焊缝宽度小于原有焊缝。

关键词: 电子枪; 电磁场; CST 仿真; 聚焦线圈; 电流密度

Application of CST Simulation Technology in Focusing Parts of Electron Beam Guns

YE Yuhao, ZUO Congjin, XU Haiying, SANG Xinghua

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Power Beam Processes, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The structure and size of the focusing parts will directly determine the current density and radius of the electron beam. They will also affect the quality of the electron beam. By using CST simulation software to analyze the focusing parts of electron beam guns, the effects of different structural dimension parameters on electron beam current density and beam radius are obtained. The simulation results show that when the other parameters are unchanged, the beam radius decreases from 1.44mm to 0.93mm with the distance between the upper surface of the focusing coil and the surface of electron emitting increasing from 305mm to 345mm. When the radius of the focusing coil increases from 30mm to 40mm, the beam radius increases from 0.86mm to 1.38mm. When the gap of magnetic yoke increases from 28mm to 43mm, the beam radius firstly decreases and then increases. The beam radius reaches a minimum point at 0.957mm when the gap of magnetic yoke is 34mm. We take welding test on 1mm TC4 thin-wall plate with the electron beam gun whose focusing parts has optimized by CST simulation. In the same welding process parameters, the width of weld seam by using optimized electron beam gun is lesser than that by original electron beam gun.

Keywords: Electron beam gun; Electromagnetic field; CST simulation; Focusing coil; Current density

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.078

电子束焊接由于其能量密度高、热效率高、焊缝质量好、焊接参数重复性和稳定性好等优点, 已广泛应用于精密零件加工工业、航空航天工业、原子能工业以及电子工业等^[1-2]。电子枪是电子束加工设备的核心部件, 其主要功能是产生高能量密度的电子束流, 并且根据不同的焊接需要汇聚成不同截面尺寸的束流。在电子枪中, 电子光学系统对束流起汇聚、合轴、偏转等作用, 其中对电子束起汇聚作用的包括静电透镜和电磁透镜两

个部分^[3]。当电子枪阴极被加热时, 表面会产生大量电子, 由于自由电子从阴极表面发射出来时有较大的发射角度, 并且电子间相互存在斥力, 不利于电子的加速和汇聚, 此时静电透镜对电子束进行汇聚形成静电汇聚点。在电子束通过阳极后, 受空间电荷的影响, 必然会再次发散, 为保证电子枪束源段真空度, 需在阳极下方合适位置安装分子泵, 而电子枪分子泵接口、聚焦及偏转线圈等部件的高度, 导致静电汇聚点到工件的距离进一步加大, 电子束进一步发散, 难以获得高能密度电子束流。因此, 需要聚焦部件对电子束进行聚焦, 使电子

* 基金项目: 工信部基金资助项目(XX-079); 中航工业技术创新基金项目(2013E62519)。

束在工件表面附近聚焦形成有高密度能量的焦点^[4-6]。焦点处的束斑直径、电流密度取决于聚焦部件的聚束能力,焦点处束斑半径越小,电流密度越大,电子束流品质越好,因此电子枪电磁聚焦部件的聚焦能力是影响电子束流品质的关键因素之一。

目前,有关电子枪聚焦部件的设计主要采用逆设计方法,根据假设的结构参量和电参量,采用有限元法、有限差分法及边界元法等数值计算方法先求出聚焦部件的场分布,再求解轨迹,得出目标函数值,然后采用最优化方法改变系统参量,重新计算得到一个新的目标函数值,如此反复,直到目标函数达到要求值为止^[7-8],但是这种方法存在需要经验积累多,设计周期长,成本高等问题。本文拟采用 Computer Simulation Technology (CST) 仿真软件进行模拟来实现电子枪聚焦部件的优化设计。通过建立 1 : 1 的三维模型,选取电子枪聚焦部件关键尺寸进行模拟,研究关键参数变化对束流品质的影响规律,根据优化参数制作新的聚焦线圈并安装于电子枪进行焊接试验,验证通过 CST 仿真软件进行电子枪部件设计和优化改进的可行性。

1 模型建立和参数设置

1.1 建立模型

根据中国航空制造技术研究院自主研发的直热式 Q60A 电子枪,利用 Pro/E 软件建立电子枪中阴极、栅极、聚焦线圈和磁轭模型的 1 : 1 模型^[9],如图 1 所示。

将上述模型导入 CST 仿真软件中,并将各个组件按照在电子枪中的实际尺寸和位置在软件中放置,从左至右依次为阴极、栅极、阳极和聚焦线圈,所述各部件同轴,阴极位于栅极开孔处,阴极的右端面为电子发射面,电子

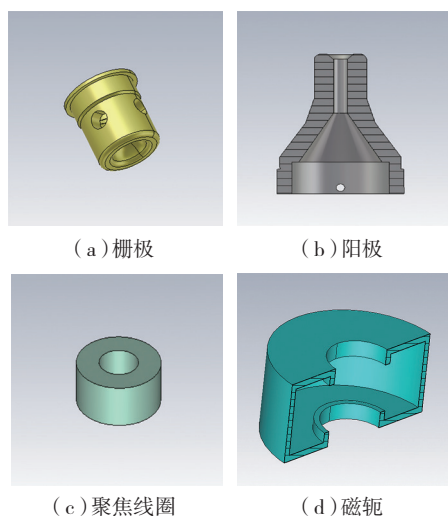


图1 部分束源部件和电子枪聚焦部件模型

Fig.1 Model of beam source components and focusing coil in electron gun

发射面与开孔处左端面平行,阳极左端面距离电子发射面距离为 h ,聚焦线圈被磁轭包裹,具体位置如图 2 所示。

1.2 基本参数设置

1.2.1 材料设置

此仿真主要是对聚束部件进行分析,所以设置阴极、栅极,阳极为理想导电材料 Perfect Electric Conductor (PEC),磁轭作用主要是对聚焦线圈进行屏蔽,所以设置磁轭材料为电工纯铁,牌号 DT4C,如表 1 所示。

1.2.2 单元选择及网格划分

图 3 所示为网格划分示意图。考虑到电子发射和运动模型较为复杂,网格类型选择 FPBA,因为 FPBA 网格能够处理更加复杂或材料有重叠的模型^[10]。网格划分采用自动划分网格和手动局部网格加密的办法,此模型主要对电子发射面和聚焦线圈附近网格进行加密。

1.2.3 边界条件及电子发射条件

设置环境背景条件为真空,由于束流最终聚焦位置距电子发射面较远,设置背景空间轴向最小值 y_{\min} 为 -1200mm 。设置阴极电势为 -60kV ,栅极电势 -60.2kV ,阳极电势 0V 。对于电子发射源,定义发射类型为温度限制发射,考虑阴极实际采用的是钨丝,所以设定加热温度为 2700K ,逸出功 4.54eV ^[11]。由于硬件限制,模拟过程耗时较长,为保证减少仿真时间的同时保证模拟准

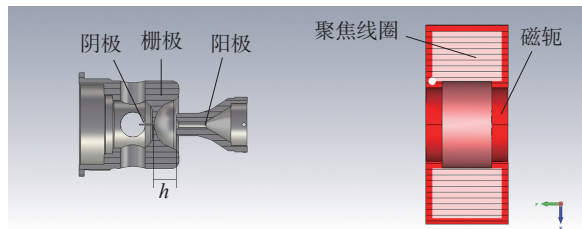


图2 模型位置

Fig.2 Model placement

表1 材料选择

部件名称	材料
阴极	PEC
栅极	PEC
阳极	PEC
磁轭	DT4C

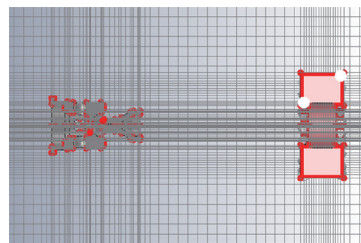


图3 网格划分示意图

Fig.3 Mesh generation

确度,故设置发射电子数为 1034 个。

1.2.4 变量设置

本文设置的可变参数为聚焦线圈左端面与电子发射面之间距离 H , 聚焦线圈内半径 r , 磁轭间隙宽度 S , 如图 4 所示。在保证其他参数不变的情况下, 每次仅改变一个参数进行试验, 研究其影响规律, 为符合电子枪实际工作情况, 通过控制通过聚焦线圈电流大小, 控制最终电流聚焦焦点距电子发射面 600mm。

2 仿真模拟结果

2.1 束流轨迹仿真结果

选取一组参数, 聚焦线圈左端面与电子发射面之间距离 H 取 325mm, 聚焦线圈内半径 r 取 35mm, 磁轭间隙 S 取 40mm, 进行仿真试验, 定义电子发射面为初始面, 向轴负方向发射电子。仿真结果如图 5 所示。

图 5 (a) 是电子束流运动的轨迹形貌图, 从电子发射出来到最终边界, 电子束流呈现先汇聚然后发散再聚焦再发散的过程。图 5 (b) 是聚焦线圈产生的磁场场强在轴向上的分布情况, 这是一种典型的钟形磁场, 峰值高, 范围小。图 5 (c) 和 (d) 分别是电子束电流密度和半径随轴向距离变化的曲线, 从中可以很直观地看出电子束产生到焦点甚至更远的距离上电流密度分布与半径变化情况。电子束从原点开始产生, 经过静电透镜的聚焦, 大概在 $-23\sim-22\text{mm}$ 处电流密度达到一个的峰值, 半径也达到一个最小值, 在经过静电透镜的聚焦后, 受空间电荷影响, 电子束流以一定的角度发散运动, 束流半径增大, 电流密度减小, 在接近 -325mm 处的聚焦线圈位置时, 受磁场影响, 电子束再次聚焦, 并最终在 -600mm 处束流半径达到一个极小值 1.1mm, 由于仿真软件是以电子数总数 90% 的电子分布计算半径, 所以模拟出的电流密度的极大值与束流半径的极小值所在的位置有微小的差别。在经过电子枪聚焦部件后, 由于惯性和空间电荷斥力, 束流再次发散。由此可见, 在模拟范围内, 电子束电流密度有先增大后减小再增大最后再减小的趋势, 而电子束流半径则与之相反, 有先减小后增大再减小最后增大的趋势。

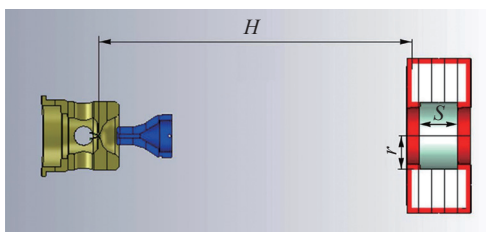
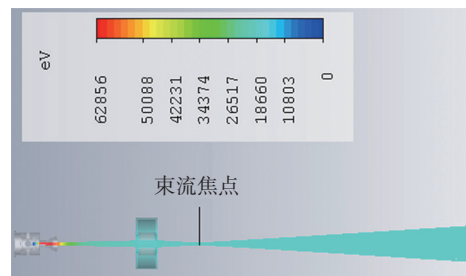


图4 所选参数示意图
Fig.4 Selected parameters

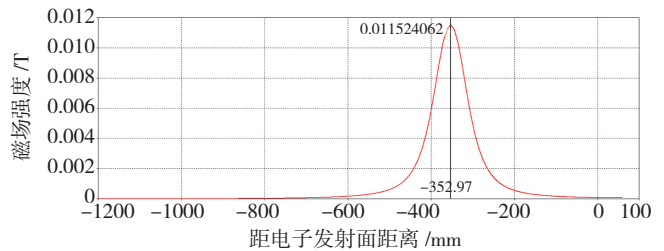
2.2 聚焦线圈左端面与电子发射面距离 H 为变量时仿真结果

电子枪聚焦部件的实质是一个电磁透镜, 与光学透镜一样, 存在物距与像距, 因为电子发射部分汇聚位置和电子束工作位置不变, 调节聚焦线圈左端面与电子发射面之间的距离的实质就是调节电磁透镜中的物距与像距。受电子枪内部结构限制, 聚焦线圈左端面与电子发射面距离最小为 305mm, 故 H 取 305mm、315mm、325mm、335mm、345mm, 5 组数据。聚焦线圈内半径 r 取 35mm, 磁轭间隙 S 取 40mm, 焦点位置距电子发射面 600mm。焦点处电流密度和束流半径仿真结果如图 6 所示。

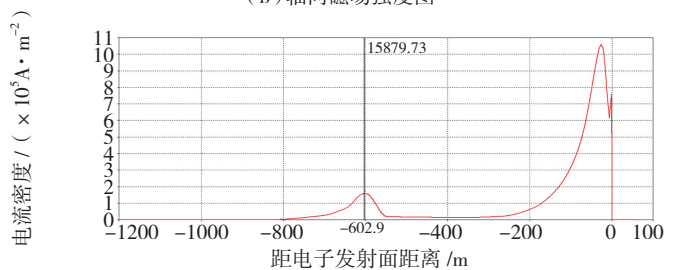
从图 6 中可以看出, 在所选聚焦线圈左端面与电子发射面距离范围内, 随着阴极与聚焦线圈距离增加, 在



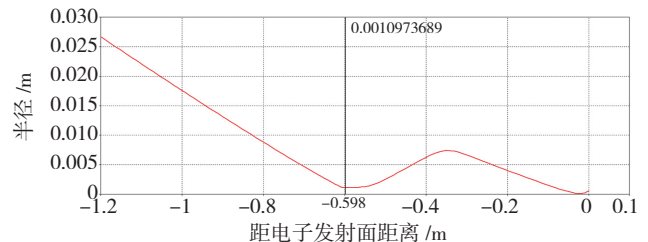
(a) 束流运动轨迹形貌图



(b) 轴向磁场强度图



(c) 电子束电流密度随轴向距离变化图



(d) 电子束半径随轴向距离变化图

图5 仿真结果

Fig.5 Simulation result

焦点位置等其他参数不变的情况下,焦点处束流半径从1.44mm逐渐减小至0.93mm,而电流密度从 $9473\text{A}/\text{m}^2$ 逐渐增加至 $21040\text{A}/\text{m}^2$ 。

2.3 聚焦线圈内半径 r 为变量时仿真结果

因为聚焦线圈内半径过小会出现干涉枪照明的情况,所以聚焦线圈内半径 r 根据经验选取30mm、32.5mm、35mm、37.5mm和40mm 5个参数, H 选取325mm, S 取40mm,焦点位置距电子发射面600mm。在其他参数不变的情况下,焦点处电流密度和束流半径仿真结果如图7所示。

从图7中可以看出,在聚焦线圈内半径 r 取30~40mm,随着聚焦线圈内半径的增加,焦点处电子束电流密度随聚焦线圈内半径的增大从 $22721\text{A}/\text{m}^2$ 减小至 $10206\text{A}/\text{m}^2$,呈现出一种接近线性减弱的趋势,而电子束流半径则随着聚焦线圈内半径的增大从0.86mm增至1.38mm,呈现出接近线性增大的趋势。

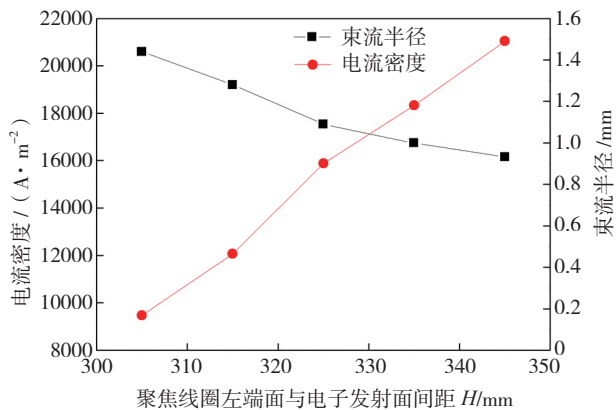


图6 焦点处电流密度和半径与聚焦线圈左端面和电子发射面间距关系曲线

Fig.6 Curves of current density and beam radius at different distance between the upper surface of focusing coil and surface of electron emitting

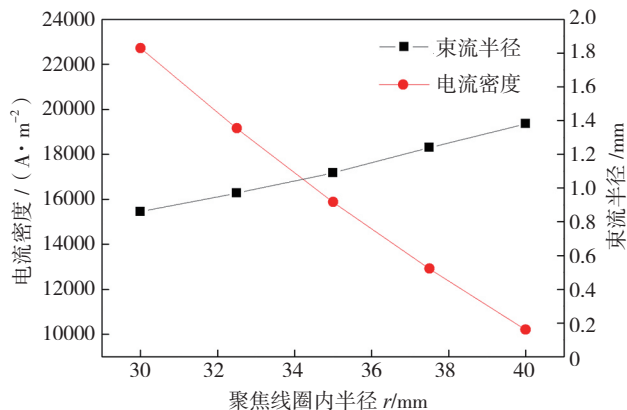


图7 焦点处电流密度和半径与聚焦线圈内半径关系曲线

Fig.7 Curves of current density and beam radius at different radius of focusing coil

2.4 磁轭间隙宽度 S 为变量时仿真结果

聚焦线圈实质是电子光学中的屏蔽式短磁透镜,相较于其他磁透镜,屏蔽式短磁透镜的磁场更加集中,而且峰值磁场更强,达到相同的聚焦效果所需的安匝数更少^[12]。在其他参数不变的情况下,磁轭间隙宽度 S 根据以往的设计经验选取43mm、40mm、37mm、34mm、31mm和28mm 6组数据, H 选取325mm, r 选取30mm,焦点位置距电子发射面600mm。焦点处电流密度和束流半径仿真结果如图8所示。

从图8中可知,在其他条件不变的情况下,磁轭间隙 S 在28~43mm范围内,焦点处电子束电流密度随着磁轭间隙的增大呈现一种先增加后减少的趋势,在34mm左右达到最大值 $16660.88\text{A}/\text{m}^2$;电子束流半径则随着磁轭间隙的增大呈现一种先减小后增大的趋势,在34mm左右达到最小值0.957mm。这是由于增加磁轭间隙宽度,会降低屏蔽式短磁透镜的磁场强度峰值和增大磁场分布范围,影响电子束流的聚焦,从而影响电子束流的品质。

3 电子枪聚焦部件结构参数选择和试验

根据模拟结果对电子枪聚焦部件关键参数进行优化:由于电子枪长度限制,聚焦线圈左端面与电子发射面距离 H 取325mm,聚焦线圈内半径 r 取30mm,磁轭间隙宽度 S 取34mm。设计制作出来的电子枪聚焦部件如图9所示。

为了验证经过仿真优化的聚焦线圈性能,将优化后的电子枪聚焦部件装入中国航空制造技术研究院自主研制的Q60A电子枪中进行试验,通过控制聚焦电流大小控制焦点位置不变,焊接试验参数如表2所示,所得焊缝如图10所示,原有聚焦部件焊接所得焊缝编号为①,新电子枪聚焦部件焊接所得焊缝为②。

经过测量,①焊缝宽度约为3.3mm,②焊缝宽度约

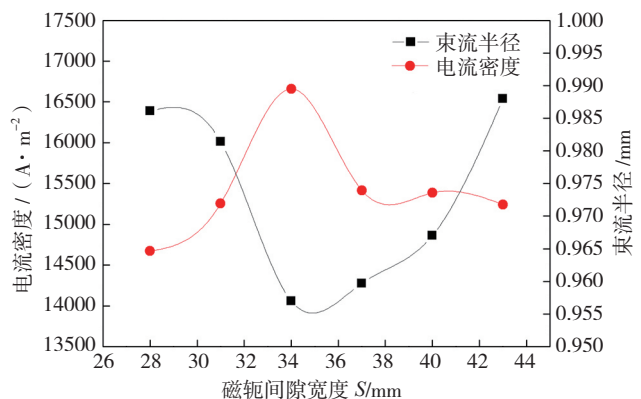


图8 焦点处电流密度和半径与磁轭间隙宽度关系曲线

Fig.8 Curves of current density and beam radius at different gaps of magnetic yoke

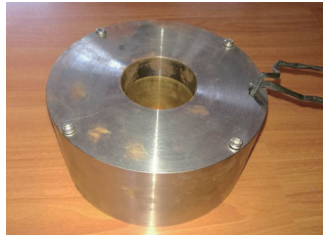


图9 优化后电子枪聚焦部件
Fig.9 Optimized focus coil assembly

表2 1mm厚TC4薄板焊接参数

电压 / kV	电流 / mA	焊接速度 / (mm·s ⁻¹)	工作距离 / mm
60	7.5	25	600

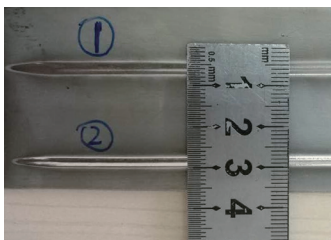


图10 1mm厚TC4薄板焊缝
Fig.10 1mm TC4 thin-wall plate weld seams

为2.5mm,证明新电子枪聚焦部件在其他条件相同时所形成的束流半径更小,同时在相同功率下,束流半径越小,电子束电流密度越大,从而表明 CST 仿真技术对电子枪聚焦部件的优化完全可行。

4 结论

通过建立模型并运用 CST 仿真软件对电子束流产生和运动进行模拟,在其他参数不变的情况下:

(1) 聚焦线圈左端面与电子发射面距离从 305mm 增加 345mm 时,电子束电流密度从 9473A/m² 增加至 21040A/m²,束流半径从 1.44mm 减小至 0.93mm;

(2) 聚焦线圈内半径从 30mm 增大至 40mm 时,电子束电流密度从 22721A/m² 减小至 10206A/m²,束流半径从 0.86mm 增至 1.38mm;

(3) 磁轭间隙从 28mm 增至 43mm 时,电子束电流密度先增大再减小,束流半径先减小再增大,在 34mm 处电流密度达到最大值 16660.88 A/m²,束流半径达到最小值 0.957mm。

通过模拟得到新的电子枪聚焦部分关键尺寸分别是聚焦线圈至阴极距离 325mm,磁轭间隙 34mm,聚焦线圈内径 30mm。

参考文献

[1] WEI Y X, HUANG M G, LIU S Q, et al. Numerical simulation of

TWT electron gun[J]. Vacuum, 2013, 92: 90-94.

[2] 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.

[3] 何成旦,李鹤岐,李春旭,等.电子束焊接电子枪电子光学系统设计[J].兰州理工大学学报,2004,30(5):5-8.

HE Chengdan, LI Heqi, LI Chunxu, et al. Design of electron optical system for electron gun for electron beam welding[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004, 30(5): 5-8.

[4] 胡志阳,柏松,霍淑兰.真空电子束焊机工作原理及典型故障分析[J].中国设备工程,2011(5):32-35.

HU Zhiyang, BO Song, HUO Shulan. Working principle of vacuum electron beam welding machine and typical failure analysis[J]. China Plant Engineering, 2011(5): 32-35.

[5] 樊生文,王泽庭,李正熙.基于移相全桥的电子束焊机高压电源的研制[J].电力电子技术,2010,44(12):62-63.

FAN Shengwen, WANG Zeting, LI Zhengxi. Development of high voltage source for electronic beam welder based on phase shift control[J]. Power Electronics, 2010, 44(12): 62-63.

[6] 张业成,周琦,彭勇.焊接用三极电子枪设计及电磁聚焦系统研究[J].机械制造与自动化,2017,46(4):9-11,26.

ZHANG Yecheng, ZHOU Qi, PENG Yong. Design of three poles electron gun for welding and electromagnetic focusing system research[J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(4): 9-11, 26.

[7] 张以忱.电子枪与离子束技术[M].北京:冶金工业出版社,2004.

ZHANG Yichen. Electron gun and ion beam technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.

[8] 殷勇,刘海敬,陈玲,等.高电流密度实心电子束均匀磁场聚焦电子枪的设计[J].真空科学与技术学报,2014(2):10-12.

YIN Yong, LIU Haijing, CHEN Ling, et al. Design of high-current-density, pencil-beam electron gun with uniform magnetic field focusing[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014(2): 10-12.

[9] 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.

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

[11] 达道安.真空设计手册[M].北京:国防工业出版社,1995.

DA Daoan. Vacuum design manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.

[12] 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.

通讯作者:许海鹰,博士、研究员,主要研究方向为电子束源技术, E-mail: xhyxy@126.com

(责编 大漠)