

引文格式:王壮,桑兴华,许海鹰,等.中压长焦大功率电子枪的研制[J].航空制造技术,2021,64(23/24):75-79.

WANG Zhuang, SANG Xinghua, XU Haiying, et al. Development of medium-voltage long focal distance high-power electron beam gun[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23/24): 75-79.

中压长焦大功率电子枪的研制*

王 壮¹,桑兴华¹,许海鹰¹,左从进¹,杨 波¹,彭 勇²

(1. 中国航空制造技术研究院,北京 100024;

2. 南京理工大学,南京 210094)

[摘要] 为了获得高品质的电子束源,在对电子枪结构进行深入分析的基础上,对影响束流品质的关键参数进行模拟仿真优化,利用优化后的参数设计制造了一套中压长焦大功率电子枪。在组建的束源品质试验平台上,对所研制的电子枪的最大工作距离、最大焊接深度进行了测试。试验结果表明,电子枪工作距离为 200~600mm,焊接 TC4-DT 钛合金的最大焊缝深度达到 60mm,焊缝深宽比可达到 10:1。

关键词: 电子束; 电子枪; 模拟仿真; 焊接; 钛合金

Development of Medium-Voltage Long Focal Distance High-Power Electron Beam Gun

WANG Zhuang¹, SANG Xinghua¹, XU Haiying¹, ZUO Congjin¹, YANG Bo¹, PENG Yong²

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[ABSTRACT] In order to obtain a high-quality electron beam source, based on the in-depth analysis of the electron beam gun structure, the key parameters affecting the beam quality were simulated and optimized, and a set of medium-voltage long focal distance high-power electron beam gun was designed and manufactured by using the optimized parameters. On the beam source quality test platform, the maximum working distance and maximum welding depth of the developed electron beam gun were tested. The test results show that the working distance of the developed electron beam gun is 200-600mm, the maximum weld depth for welding TC4-DT titanium alloy reaches 60mm, and the weld aspect ratio can reach 10:1.

Keywords: Electron beam; Electron beam gun; Simulation; Welding; Titanium alloy

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.075

真空电子束焊接技术在航空航天、兵器等国防工业领域及汽车、燃气轮机等民用工业领域得到了广泛应用^[1-3]。与高压电子束焊接设备相比,中压电子束设备电源及电子枪体积小、结构简单、维护方便,且中压电子束设备真空室和电子枪外壳不需额外的包铅来进行 X 射线防护,其设备制造成本大大降低。另外,中压电子枪可设计成动枪在真空室内运动,对于大型零部件的焊接,不但可以有效节约空间,而且可以实现定枪结构不能实现的一些工艺。中压大功率电子枪设计制造

技术主要被国外公司所垄断,如法国 Techmetar 和乌克兰 Paton 的中压电子枪功率可达到 60kW,最大束流可达到 1000mA;美国 Sciaky 公司的中压电子枪可达到 45kW^[4-6]。近年来,欧美发达国家对我国技术封锁日益严重,高端装备核心技术亟待实现完全“自主可控”^[7-10]。

目前,大功率电子枪设计尚未有一套较理想的计算方法。常用的逐次调整电子枪各结构参数进行试验的方法,设计周期长、成本高。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针对现有电子

* 基金项目:国家重点研发计划(2017YFB1103101)。

枪结构进行模拟仿真,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方便。电磁仿真粒子工作室的三维电磁场仿真软件(Computer simulation technology, CST),是求解电磁场和带电粒子相互作用的仿真软件。桑兴华等^[11]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,证明了优化参数的正确性。

为了获得高品质电子束源技术,本研究采用 CST 软件对影响束流品质的关键参数进行仿真模拟,针对一系列仿真参数进行对比分析,确定最终优化的电子枪结构参数,基于优化的参数设计了一套中压长焦大功率电子枪。在组建的束源品质试验平台上,对可表征束流品质的关键参数进行测试。

1 中压长焦电子枪结构及关键参数仿真优化

1.1 电子枪整体结构设计

研制的电子枪的剖面如图 1 所示,可以看出,沿着电子枪轴线,从阳极出束口位置开始,从上到下,依次安装有合轴线圈、预聚焦线圈、消像线圈、主聚焦线圈,偏转扫描线圈。合轴线圈用于校准电子枪由于零件加工及装配带来的电子枪部件与电子束流不同轴的问题;预聚焦线圈与主聚焦线圈结构类似,预聚焦线圈产生磁场,用于压缩通过阳极孔的束流,电子束流通过预聚焦线圈产生的像点,作为主聚焦线圈的物点,双聚焦结构增加了电子枪工作焦点的调节范围和灵活性;消像线圈产生磁场减小电子束像差,使束斑更圆,能量分布更加均匀;主聚焦线圈使电子束在有效工作距离内汇聚;偏转扫描线圈用于调整电子束束斑在被焊工件上的位置,使束斑落在焊缝上,同时可使电子束按照一定的波形进行扫描,可改善焊缝形貌,减少焊缝缺陷,焊接过程中对焊缝熔池进行搅拌,避免产生如气孔、夹渣等缺陷,还可用于对某些有热处理要求的材料进行焊前或焊后的热处理。

1.2 关键参数的仿真及优化

在直热式电子枪中,对电子束起到汇聚作用的有电磁场和静电场两部分,电磁场对电子束的汇聚主要依靠在电子束流通道上同轴安装的聚焦线圈,聚焦线圈参数可通过经典光学公式^[12]或模拟仿真^[13]方法进行设计,相关研究报道较多,在此不再赘述;静电场主要是指阴极、阳极之间的静电场,在电子枪工作过程中,阴极接负高压,阳极接地,阴阳极之间会存在一个静电场,此静电场对束流有汇聚的作用。静电场汇聚效果直接影响到工件表面最终的束流品质,是束流品质优化的基础,本

研究将予以重点论述。影响静电汇聚效果的参数包括:偏压杯开口直径 D ,阳极孔径 d ,阳极斜面角度(通常称为阳极倾角) α 和阴阳极距离 L ,如图 2 所示。

1.2.1 阴极结构的仿真与优化

阴极结构是通过影响束源部分的静电场分布状态,从而影响电子束的初次汇聚,并影响最终的束流品质。对阴极结构中的偏压杯开口直径 D 进行模拟仿真,确定能获得最佳束流品质的偏压杯开口直径。 D 的取值分别为 12mm、13mm、14mm、15mm 和 16mm,同时保证每组试验其余参数不变。根据相关研究,参照国内外电子枪设计经验,在机械设计允许范围内取 $L=11\text{mm}$, $\alpha=135^\circ$, $d=3.5\text{mm}$ 。

模拟得到阴阳极之间静电场分布如图 3 所示,设阴极电子发射面为原点,中心轴线上各点到此发射面的距离为 L_s ,则此数据下电子束流密度与 L_s 的关系曲线如图 4 所示。电子在聚焦线圈下方某一点汇聚成电子束流密度最高的点是最终工作的焦点。

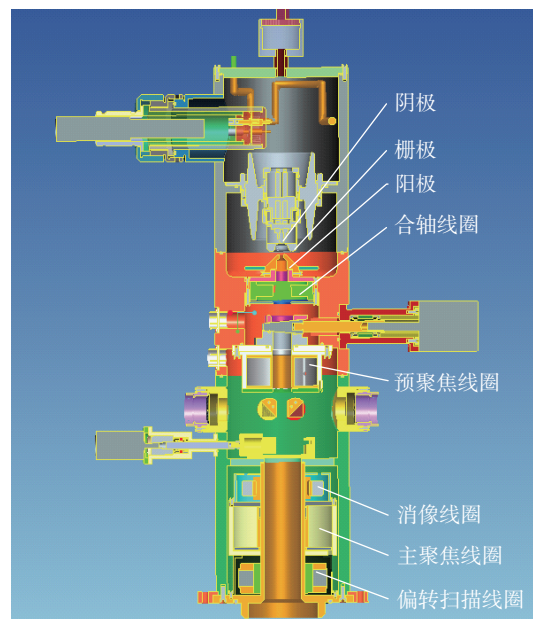


图 1 电子枪的剖面图

Fig.1 Profile of electron beam gun

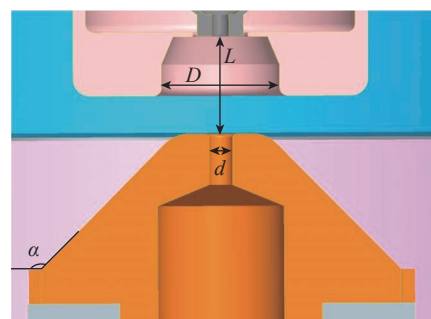


图 2 束源部件仿真参数

Fig.2 Simulation parameters of beam source components

利用这种方法,得到不同偏压杯开口直径下最终焦点处电子束流密度,其关系曲线如图5所示。可以看出,在12~16mm内,随着偏压杯开口直径 D 的增加,最终焦点处电子束流密度 J 先增加后减小,大约在14mm处达到最大值 $347222.22\text{A}/\text{m}^2$,故选取14mm作为最终设计的偏压杯开口直径尺寸。

1.2.2 阳极结构的仿真与优化

电子枪工作过程中,阳极接地,电势0V,阳极跟阴极之间形成对束流有初次汇聚作用的静电场,使电子以汇聚的趋势飞向阳极孔。阳极形貌同样影响着此静电场,从而影响着最终束流品质。对不同阳极结构下束流产生过程进行模拟仿真,每次模拟试验控制单一变量,最终得到束流品质最优的阳极结构。阳极结构两个关键参数是阳极孔径和阳极斜面角度,故选取这两个参数作为模拟变量。

第1组模拟试验以阳极孔径 d 作为变量, d 的取值分别为3mm、3.5mm、4mm、4.5mm、5mm、5.5mm和6mm。根据相关研究,在机械设计允许范围内,选取经验数据 $L=11\text{mm}$, $\alpha=135^\circ$, $D=14\text{mm}$ 。不同阳极孔径与焦点处电子束流密度关系曲线如图6所示。可以看出,在3~6mm范围内最终工作焦点处电子束流密度随着阳极孔径的增大,先增加后减小,在孔径约4.5mm处达到最大值 $378071.84\text{A}/\text{m}^2$,故选取4.5mm作为电子枪设计时阳极孔径的最终尺寸。

第2组模拟试验以阳极斜面角度 α 作为变量,选取

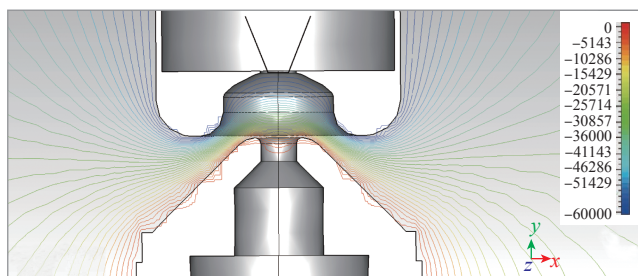


图3 阴阳极之间的等电位线

Fig.3 Equipotential line between anode and cathode

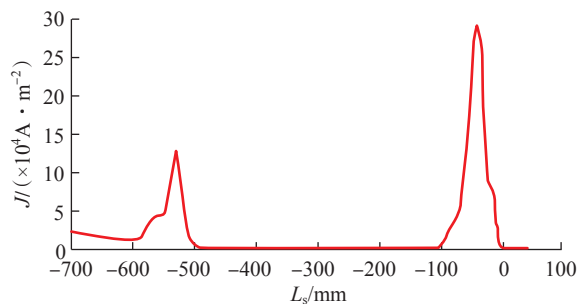


图4 电子束流密度随 L 变化示意图

Fig.4 Schematic diagram of electron beam density changing with L ,

$L=11\text{mm}$, $d=4.5\text{mm}$, $D=14\text{mm}$ 。焦点处电子束流密度随阳极斜面角度变化关系曲线如图7所示,在 $125^\circ\sim 155^\circ$ 变化范围内,最终焦点处电子束流密度随着阳极斜面角度的变化先增加后减小,在阳极斜面角度约为 135° 时达到最大值 $378071.84\text{A}/\text{m}^2$,故选取 135° 作为最终电子枪阳极斜面角度的设计尺寸。

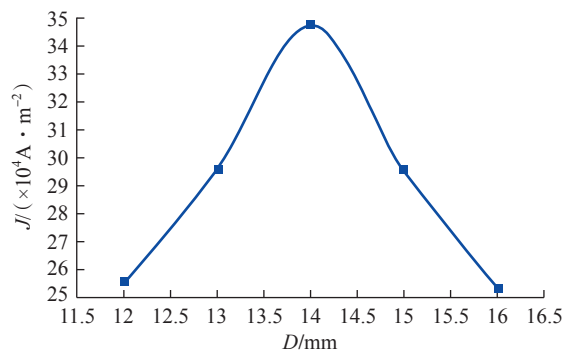


图5 偏压杯开口直径和焦点处电子束流密度关系

Fig.5 Relationship between opening diameter of bias cup and electron beam density at focus

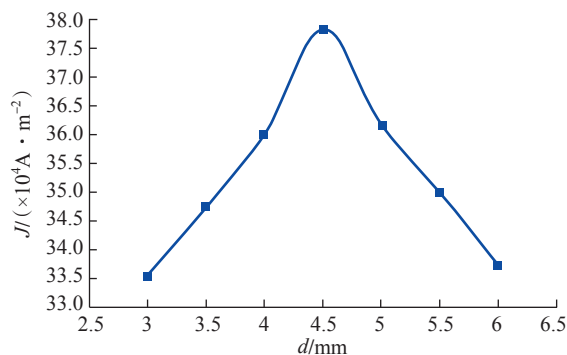


图6 阳极孔径和焦点处电子束流密度关系

Fig.6 Relationship between anode aperture and electron beam density at focus

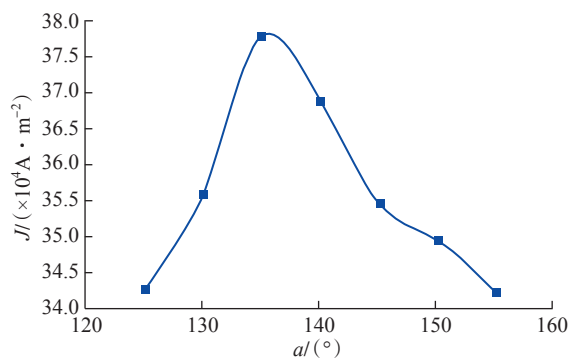


图7 焦点处电子束流密度随阳极斜面角度变化曲线

Fig.7 Curve of electron beam density at focus varying with angle of anodic inclined plane

1.2.3 阴阳极距离的仿真与优化

阴阳极距离同样是决定电子枪静电汇聚能力的关键参数,对不同阴阳极距离条件下电子枪工作过程进行模拟仿真,控制单一变量,得到束流品质最优的阴阳极距离尺寸。

阴阳极距离 L 取 10mm、10.5mm、11mm、11.5mm、12mm、12.5mm 和 13mm,选取 $D=14\text{mm}$, $\alpha=135^\circ$, $d=4.5\text{mm}$ 。模拟后得到不同阴阳极距离条件下,最终焦点处电子束流密度如图 8 所示。在 10~13mm 范围内,随着阴阳极距离的增大,最终工作焦点处电子束流密度逐渐减小,大约在 10.5mm 处达到最大值 $388756.39\text{A}/\text{m}^2$ 。故选取阴阳极距离 10.5mm 作为最佳参数。基于以上参数,完成电子枪的结构优化并完成相关研制工作。

2 结果与讨论

通过模拟仿真所获得电子枪束源段优化参数的应用效果,可通过检测最大工作距离、焊缝形貌、最大焊接深度等进行间接反映。将所研制的电子枪与高压逆变电源、真空系统、水冷系统、控制系统等进行集成,组成电子束源品质测试平台。该试验平台关键技术参数:工作电压 -60kV ,最大束流 500mA ,聚焦电流调节范围 $0\sim 500\text{mA}$, X 向行程 800mm , Y 向行程 400mm , X 和 Y 向运动速度为 $1\sim 50\text{mm}/\text{s}$,工作距离 $200\sim 600\text{mm}$,在此平台上对束流品质进行检测分析。平台实物如图 9 所示。

2.1 最大工作距离

不同工作距离时所需的聚焦电流不同,当输出电压为 -60kV 、束流为 500mA 时,在 $200\sim 600\text{mm}$ 工作距离范围内,调整预聚焦、聚焦电流,获得面焦点,根据测试结果,记录的预聚焦、聚焦电流值如表 1 所示。

在工作距离为 600mm ,输出电压为 -60kV 、束流为 89mA 、预聚焦电流为 70mA 、聚焦电流为 105mA 、焊接速度为 $800\text{mm}/\text{min}$ 时,焊接 5A06 铝合金的焊缝截面

如图 10 所示,获得的焊缝深宽比较好,焊缝深宽比达到 $11:1$ 。

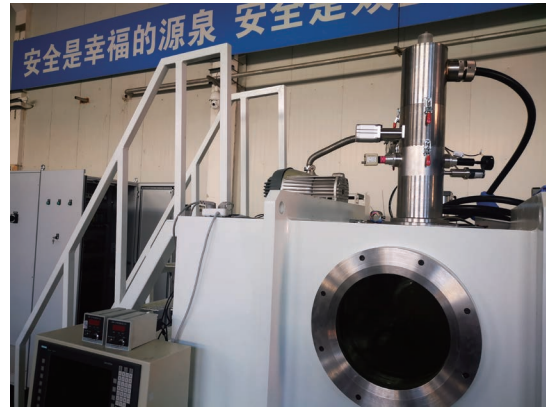


图 9 中压长焦大功率电子枪实物
Fig.9 Medium-voltage long focal distance high power electron beam gun

表 1 不同工作距离获得的面焦点电子枪聚焦电流
Table 1 Focusing current of electron beam gun obtained at different working distances

工作距离/mm	预聚焦电流/mA	聚焦电流/mA
200	44.1	77.5
250	46.2	81.3
300	48.2	85.2
350	50.1	88.5
400	52.1	92.6
450	54.2	96.1
500	56.3	100
550	58.2	103.8
600	60.1	107.5

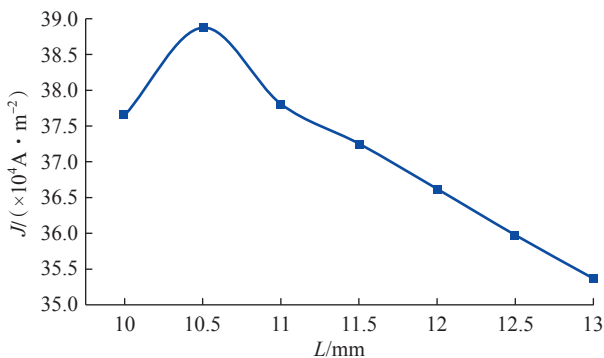


图 8 最终焦点处电子束流密度随阴阳极距离变化
Fig.8 Electron beam density at final focal point varying with distance between anode and cathode

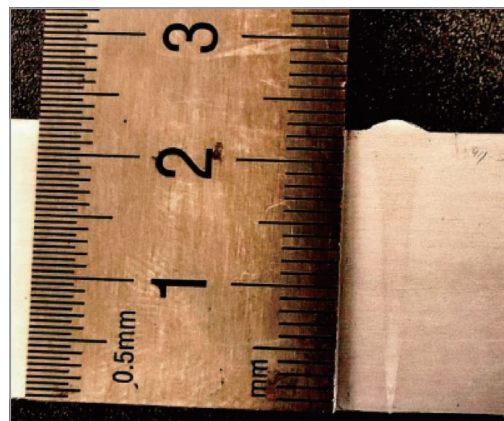


图 10 5A06 铝合金焊缝横截面
Fig.10 Weld cross section of 5A06 aluminum alloy

2.2 最大焊接深度

为了检测所研制电子枪输出电子束的穿透能力,设预聚焦电流为 48.2mA、工作电压为 -60kV、灯丝加热电流 40A、焊接速度 500mm/min、聚焦电流 100mA、工作距离 300mm,分别采用最大束流 427mA、466mA 焊接 60mm 厚的 TC4-DT 钛合金,所获得的焊缝外观及其焊缝横截面如图 11(a)和(b)所示。可以看出,所研制的电子枪可以焊透厚 60mm 的 TC4-DT 钛合金,且焊缝外观形貌较好,焊缝深宽比可达到 10:1。

3 结论

(1) 利用 CST 仿真软件对束流产生过程进行模拟,结合模拟数据优化影响束流品质的关键参数,优化后的阳极孔径为 4.5mm,阳极斜面倾角为 135°,偏压杯开口直径为 14mm,阴阳极距离为 10.5mm。

(2) 对优化后的电子枪进行了最大工作距离、最大焊接深度测试,结果表明,所研制的电子枪工作距离为 200~600mm,焊接 TC4-DT 钛合金的最大焊缝深度达到 60mm,焊缝深宽比可达到 10:1。

参考文献

- [1] 王之康. 真空电子束焊接设备及工艺 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
- [2] WANG Zhikang. Vacuum electron beam welding equipment and technology [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.
- [3] 李晓红, 毛唯, 熊华平. 先进航空材料和复杂构件的加工技术 [J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 276-282.
- [4] LI Xiaohong, MAO Wei, XIONG Huaping. Processing technology of advanced aviation materials and complex components [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 276-282.
- [5] 闫晓峰. 真空电子束焊在我国航空机载设备上的应用及发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2005, 48(9): 90-102.
- [6] YAN Xiaofeng. Application and development trend of the vacuum EB welding in airborne equipment in China [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(9): 90-102.
- [7] 王亚军. 电子束加工技术的现状与发展 [J]. 航空制造技术, 1995, 38(1): 28-31.
- [8] WANG Yajun. Current status and development of electron beam processing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1995, 38(1): 28-31.
- [9] 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.
- [10] CHEN Guoqing, SHU Xi, LIU Junpeng, et al. Research status of vacuum electron beam welding technology application [J]. Precision Forming Engineering, 2018, 10(1): 31-39.
- [11] 万松林. 电子束焊接与加工技术现状及其在国内船舶领域的应用进展 [J]. 材料开发与应用, 2018, 33(5): 112-120.
- [12] WAN Songlin. Current status of electron beam welding and processing technology and its application progress in domestic shipping [J]. Material

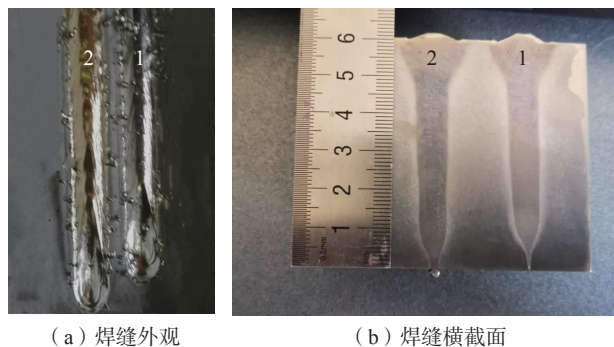


图 11 厚 60mm 的 TC4-DT 钛合金焊缝形貌及横截面
Fig.11 Weld morphology and cross section of 60mm thick TC4-DT titanium alloy

Development and Application, 2018, 33(5): 112-120.

[7] 高奇, 廖志谦, 蒋鹏, 等. 大厚度钛合金的电子束焊接技术研究现状 [J]. 材料开发与应用, 2018, 33(2): 118-129.

GAO Qi, LIAO Zhiqian, JIANG Peng, et al. Research status of electron beam welding technology for large thickness titanium alloys [J]. Material Development and Application, 2018, 33(2): 118-129.

[8] 张秉刚. 国内外电子束焊接技术研究现状 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.

ZHANG Binggang. Research status of electron beam welding technology at home and abroad [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.

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

[10] 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.

[11] 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.

[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.

[13] 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(9): 78-82.

YE Yuhao, ZUO Congjin, XU Haiying, et al. Application of CST simulation technology in focusing parts of electron gun [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(9): 78-82.

通讯作者: 许海鹰, 研究员, 博士, 主要研究方向为高能束流加工技术。

(责编 七七)