

引文格式: 司青润, 董全林, 桑兴华. 100kV 焊接用电子枪的设计和优化 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(21): 96-100.
SI Qingrun, DONG Quanlin, SANG Xinghua. Design and optimization of 100kV electron gun for welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(21): 96-100.

100kV 焊接用电子枪的设计和优化*

司青润¹, 董全林¹, 桑兴华²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191;
2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 采用 LaB₆ 间接热式阴极, 运用综合迭代法, 设计了一款焊接用的大功率电子枪。在理论设计的基础上通过 Munro 软件中的 Source 模块对初始结构参数进行了优化调整, 最终达到了功率 36kW、加速电压 100kV、发射束流 360mA、束腰直径 300 μ m 的设计指标。采用单一变量法进行了大量仿真试验, 总结出了电子枪的栅极位置、栅极孔径、栅极电压、阳极位置、阳极孔径与电子束束流大小和束腰直径之间的关系, 这对于三极式电子枪的结构参数调整优化具有一定的指导意义。

关键词: 电子束焊接; 三极式电子枪; 综合迭代法; 发射束流; 束腰直径

Design and Optimization of 100kV Electron Gun for Welding

SI Qingrun¹, DONG Quanlin¹, SANG Xinghua²

(1. Beihang University, Beijing 100191, China;
2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] A high-power electron gun for welding was designed by using LaB₆ indirect thermal cathode and using the integrated iteration method. On the basis of theoretical design, the initial structural parameters were optimized and adjusted through the Source module in the Munro software. In the end, the design index of power 36kW, acceleration voltage 100kV, emission beam current 360mA, beam waist diameter 300 μ m was reached. A large number of simulation experiments were carried out using the single variable method. The relationship of the grid position, grid aperture, grid voltage, anode position, anode aperture of the electron gun and the size of the electron beam and the beam waist diameter was summarized. This has certain guiding significance for the adjustment and optimization of the structural parameters of the three-pole electron gun.

Keywords: Electron beam welding; Three-pole electron gun; Synthetic iteration; Emitted beam; Waist diameter

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.21.096

近年来,我国航空航天技术正飞速发展,越来越多的新材料开始应用于航空航天制造领域。在复合材料、C 纳米管、绝缘体等材料的焊接制造中,传统的焊接工艺已逐渐不能满足应用需求,这就需要用到新型焊接技术^[1]。在这些航空航天新材料的焊接中,电子束焊接技术有着绝对的优势。电子束焊接技术具有能量密度

大、热效率高、焊接精度高、对被焊零件的影响范围小等特点,而且其焊缝深宽比大,适合用于厚度较大的特种设备加工^[2]。在电子束焊接机中,电子枪是其关键组成部分,电子枪发射出的电子束的束流质量直接影响着电子束焊接机的性能。三极式电子枪结构是目前应用最为广泛的电子枪结构,但目前尚未有一套完整的三极

* 基金项目: 北京卫星环境工程研究所开放基金(CAST-BISEE2019-040)。

式电子枪的设计方法,大部分设计通过不断调整各种参数进行仿真,以得到最优结果^[3],而且在调整参数优化的过程中,各参数对电子束质量的影响也没有很明确的结论。在设计电子枪时,束腰直径和束流大小是很关键的两个参数^[4],束腰直径越小经过磁聚焦之后打到像面上的束斑就越小,束斑处的能量密度也就越高。因此,本研究给出了加速电压 100kV、束流 360mA、束腰直径 300 μm (根据束斑直径 150mm 的设计要求、磁透镜系统的长度和可实现性等要求确定)的大功率三极式电子枪的设计和仿真优化过程,并通过大量试验数据分析了栅极位置、栅极孔径、栅极电压、阳极位置、阳极孔径与电子束束流大小和束腰直径的关系,这对三极式电子枪的调整优化具有一定的指导意义。

1 三极式电子枪的理论设计

1.1 轴对称收敛型三极电子枪模型

三极式电子枪由阴极、栅极和阳极组成,其基本结构如图 1 所示。通过对阴极加热或施加电场可以使其发射出电子^[5],栅极在一定的偏压下可以对电子束的形状进行控制,阴极加负高压,阳极接地,这样在阴极和阳极之间就形成了加速电压,从而对电子进行加速。整个电子枪的工作原理是:阴极发射出的电子在栅极和阳极产生的静电场的作用下实现聚焦和加速,从而形成了电子束。

1.2 阴极发射方式和材料的选择

通常,电子枪的阴极发射方式可分为热发射、场发射两种。热发射稳定,结构简单,成本低,但其能耗高,发射体寿命较短。从理论层面上看,场发射电子枪的性能比其他类型的电子枪好很多,但是目前相关研究较少,其技术相对不成熟,场发射还不能被广泛应用^[6]。热发射又分为直热式和间热式两种,其中直热式的阴极一般为丝状,对阴极直接通电进行加热,这种方式的发射功率一般较小,不适合做大功率的电子枪,其束斑处能量密度较小,且束斑较大,采用这种阴极发射形式的大功率电子枪一般焊缝较宽^[7]。间热式的阴极一般为

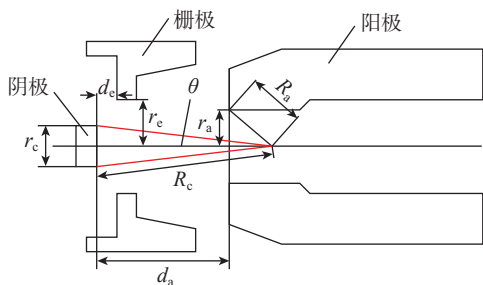


图 1 三极式电子枪结构图

Fig.1 Structure diagram of three-pole electron gun

块状,这就使得其寿命相对较长,发射功率更大。因此,考虑到此电子枪的发射功率为 36kW,故采用间热式阴极发射模型。

在阴极材料方面,W 和 LaB₆ 是应用比较多的两种材料,LaB₆ 的逸出功约为 W 的 1/2,而且其工作温度也比 W 要低很多。因此,LaB₆ 更适合用作间热式阴极的材料^[8-9]。

1.3 电子枪初始参数的确定

电子枪的初始参数确定方法一般有综合迭代法^[10]和非综合迭代法,本研究采用综合迭代法对电子枪的初始参数进行计算,下面介绍计算过程。

首先由加速电压 U 通过式(1)算出相对论修正电压 U_r :

$$U_r = U(1 + 10^{-6}U) \quad (1)$$

再通过式(2)计算出导流系数 P :

$$P = \frac{I}{U_r^{3/2}} \quad (2)$$

其中, I 为发射束流。

然后由发射电流和电流密度 J_k 根据式(3)计算出阴极截面半径 r_c :

$$r_c = \left(\frac{I}{(\pi J_k)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

根据 $\theta = 30P^{1/2}$ 假设一个迭代阴极半锥角 θ 的初始值。由假定的 θ 初始值根据皮尔斯理论由式(4)可以得到朗缪尔参数 $(-\delta)$:

$$(-\delta)^2 = \frac{14.67(1 - \cos\theta)}{P} \quad (4)$$

令

$$\gamma = (-\delta) - 0.275(-\delta)^2 + 0.06(-\delta)^3 - 0.006(-\delta)^4 \quad (5)$$

其中, γ 为中间量。

电子注从阴极发射进入阳孔时的倾角 ϕ_1 的正切值可由式(6)得出。

$$\tan\phi_1 = \sin[1 - (\Gamma / 3(1 + 0.6\gamma + 0.225\gamma^2 + 0.0573\gamma^3 + 0.0108\gamma^4 + 0.0021\gamma^5)) / (-\delta)] \quad (6)$$

其中, Γ 为修正因子,取值为 1.25。

电子注通过阳极孔后的电子注水平倾角记为 ϕ_2 ,其正切值可由式(7)算出。

$$\tan\phi_2 = 0.17409 \left(P \cdot \ln \frac{r_b}{r_w} \right)^{1/2} \quad (7)$$

其中, r_b 为阳极顶点处电子束的半径,其可由式(8)算出; r_w 为束腰的半径。

$$r_b = r_c e^{-\gamma} \quad (8)$$

式(6)和(7)中 $\tan\phi_1$ 与 $\tan\phi_2$ 均表示阳极顶点处电子轨迹的斜率,理论上应当相等, $\tan\phi_1$ 是考虑空间电荷效应后由阳极孔效应得出的结果, $\tan\phi_2$ 则是在等电位区域利用“通用电子注发散”曲线得出的结果。当两个 ϕ 值不相等时,利用公式

$$\theta_{\text{new}} = \theta \left(\frac{\tan\phi_2}{\tan\phi_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

来修正 θ 值,用得到的新 θ 值返回重新计算,直到满足条件 $|\tan\phi_2/\tan\phi_1-1|<0.005$ 时迭代结束,最后得到的 θ 值就作为最后设计的半锥角值。得到 θ 值后,电子枪的其他初始参数阳极曲率半径 R_a 、阳极孔半径 r_a 、阳极轴上焦点 Z_{ac} 、阳极顶点 Z 轴坐标 Z_a 可以由式(10)~(14)依次计算得出。

$$R_c = r_c \sin\theta \quad (10)$$

$$R_a = R_c e^{-\gamma} \quad (11)$$

$$r_a = 1.2r_b \quad (12)$$

$$d_a = \sqrt{R_c^2 - r_c^2} - \sqrt{R_a^2 - r_a^2} \quad (13)$$

经过迭代计算,最后得到的电子枪的初始设计参数如表1所示。

2 栅极和阳极对电子束的影响规律

在加速电压 100kV 的条件下利用 Munro 软件中的 Source 模块,根据初始参数搭建三极式电子枪模型,并采用单一变量法分别对栅极位置、栅极孔径、栅极电压、阳极位置、阳极孔径与电子束束流大小和束腰直径的关系进行探索研究。下面分别介绍这些因素对电子束的影响规律。

2.1 栅极位置对电子束的影响

以阴极所在平面为基准,将栅极与阴极的距离(栅

极左下顶点与阴极平面的距离)记为 d_c ,在栅极孔径为 3.6mm,栅极电压为 -40V,阳极与阴极的距离(阳极左顶点与阴极平面的水平距离)为 24mm,阳极孔径为 1.1mm 时,将 d_c 的值从 -1.5mm 开始,每次增加 0.1mm 进行一次仿真测试,并记录下束流大小和束腰直径,直至 d_c 的值达到 1.5mm 结束。共得到 31 组试验数据,试验结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, d_c 的值越大,电子束的束流越小,束腰直径也越小,但是当 d_c 的值达到一定大小后,再继续增加栅极与阴极的距离,所减小的束腰直径已经很微小,而束流还在明显减小。因此,在设计电子枪时可以适当增加栅极与阴极的距离,以获得较小的束腰直径,且这一距离不能过大。

2.2 栅极孔径对电子束的影响

将栅极孔径记为 r_c ,在栅极与阴极的距离为 0,栅极电压为 -40V,阳极与阴极的距离为 24mm,阳极孔径为 1.1mm 时,将 r_c 的值从 2.2mm 开始,每次增加 0.1mm 进行一次仿真测试,并记录下束流大小和束腰直径,直至 r_c 的值达到 5.1mm 结束。共得到 30 组试验数据,试验结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, r_c 的值越大,电子束的束流越大,但束腰直径在一定范围内基本不发生变化,直到 r_c 的值增大到某一临界值时束腰直径才会突然增大。因此,在设计电子枪时应尽量找到这一临界值,将栅极孔径设置在这一值附近,这样可以在保证束腰直径尽量小的前提下得到最大的束流,从而使束斑处达到最大的能量密度。

2.3 栅极电压对电子束的影响

将栅极电压记为 U_b ,在栅极与阴极的距离为 0,栅极孔径为 4.7mm,阳极与阴极的距离为 24mm,阳极孔径为 1.1mm 时,将 U_b 的值从 -10V 开始,每次增加 -10V 进行一次仿真测试,并记录下束流大小和束腰直径,直至 U_b 的值达到 -290V 结束。共得到 29 组试验数据,

表 1 迭代得到的电子枪初始设计参数

Table 1 Initial design parameters of electron gun obtained by iteration

参数	参数值
阴极截面半径 r_c /mm	2.10
导流系数 $P/\mu\text{P}$	0.009868
迭代阴极半锥角 $\theta/(\circ)$	2.93
$ \tan\phi_2/\tan\phi_1-1 $	0.0019
阴极曲率半径 R_c /mm	41.14
阳极曲率半径 R_a /mm	15.16
阳极孔半径 r_a /mm	0.93
阳极与阴极距离 d_a /mm	25.96

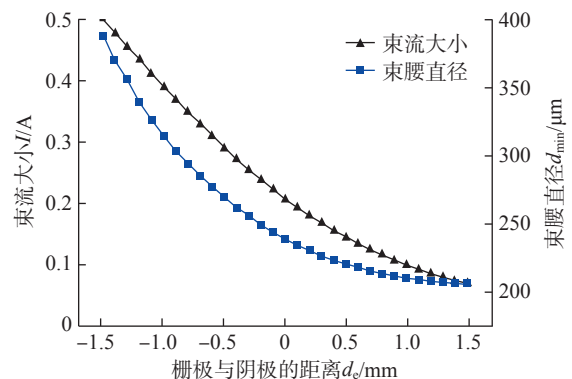


图 2 栅极位置与束流大小和束腰直径的关系

Fig.2 Relationship of grid position, beam current and beam waist diameter

试验结果如图4所示。

从图4中可以看出,栅极电压对束流大小的影响基本是线性的,随着栅极电压的增加,束流逐渐减小,同时束腰直径也呈减小的趋势,但其减小的速度越来越慢,这就要求设计电子枪时栅极电压不宜过大。

2.4 阳极位置对电子束的影响

将阳极与阴极为的距离记为 d_a ,在栅极与阴极为0,栅极孔径为4mm,栅极电压为-40V,阳极孔径为1.1mm时,将 d_a 的值从14mm开始,每次增加0.5mm进行一次仿真测试,并记录下束流大小和束腰直径,直至 d_a 的值达到24mm结束。共得到21组试验数据,试验结果如图5所示。

从图5中可以看出,阳极离阴极越近,电子枪发射出的束流越大,束腰直径越小,因此减小阳极与阴极之间的距离可以很好地提升电子枪的性能,但是实际设计中要考虑高压放电问题,因此阳极离阴极不能过近,避免场强过大产生高压放电。

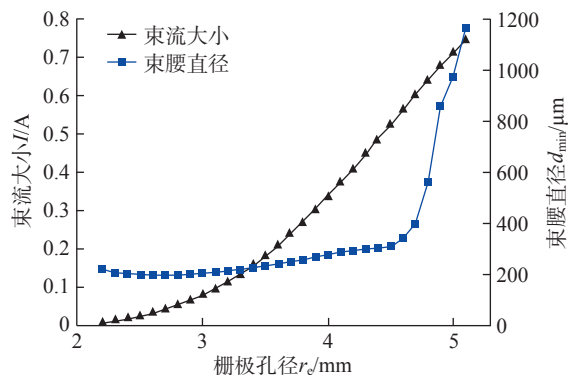


图3 栅极孔径与束流大小和束腰直径的关系

Fig.3 Relationship of grid aperture, beam current and beam waist diameter

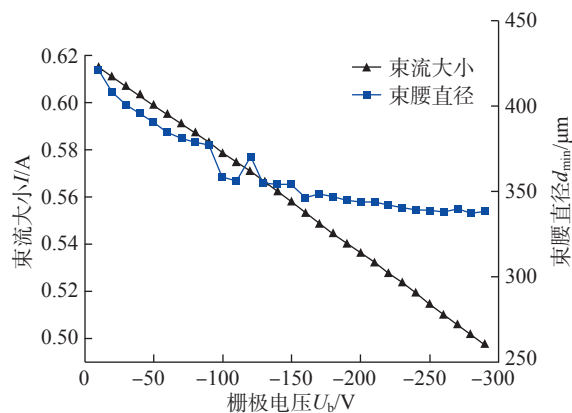


图4 栅极电压与束流大小和束腰直径的关系

Fig.4 Relationship of grid voltage, beam current and beam waist diameter

2.5 阳极孔径对电子束的影响

将阳极孔径记为 r_a ,在栅极与阴极为0,栅极孔径为4mm,栅极电压为-40V,阳极与阴极为24mm时,将 r_a 的值从0.7mm开始,每次增加0.1mm进行一次仿真测试,并记录下束流大小和束腰直径,直至 r_a 的值达到2.5mm结束。共得到19组试验数据,试验结果如图6所示。

从阳极孔径为0.7mm时开始试验是因为此时电子束恰好可以完全通过阳极,如果阳极孔径更小时会有一部分电子束打在阳极内壁上。从图6中可以看出,阳极孔径对束流大小和束腰直径基本没有影响。因此在设计电子枪时无需对阳极孔径做过多调整,只需保证全部的电子束都能通过阳极就可以。

3 三极式电子枪的参数优化

根据综合迭代法得到的初始参数只是理论计算上的参数,其仿真得到的束流大小、束腰直径等指标与设

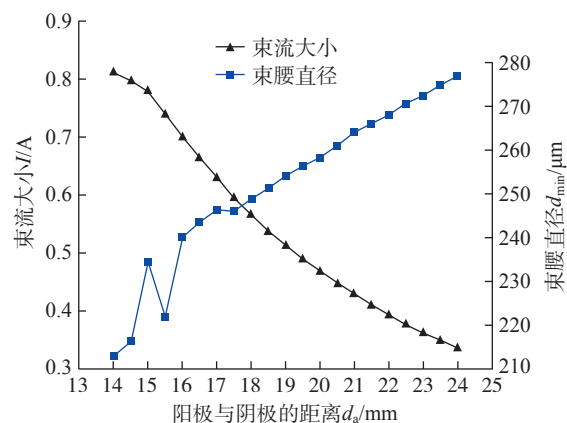


图5 阳极位置与束流大小和束腰直径的关系

Fig.5 Relationship of anode position, beam current and beam waist diameter

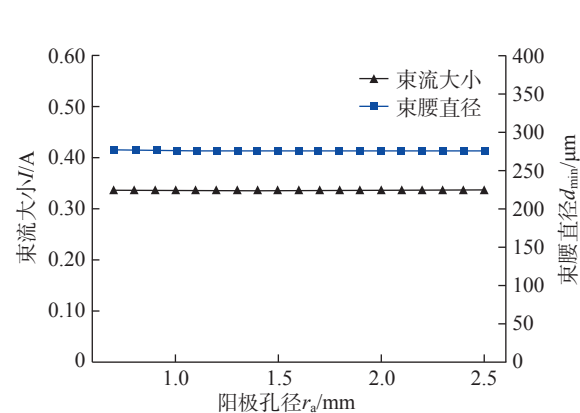


图6 阳极孔径与束流大小和束腰直径的关系

Fig.6 Relationship of anode aperture, beam current and beam waist diameter

计指标还有一定差距。因此,需要根据第2节中得到的栅极位置、栅极孔径、栅极电压、阳极位置、阳极孔径与电子束束流大小和束腰直径的关系规律对电子枪的结构参数进一步优化调整,以达到设计指标。经不断优化调整后得到的电子枪结构的主要参数如表2所示。

优化调整后的电子枪束流达到了360mA,束腰直径为300.14 μm ,产生的电子束轨迹如图7所示。

4 结论

(1)通过对比分析选取了间热式LaB₆阴极发射方案,通过综合迭代法完成了三极式电子枪的理论设计。

(2)运用单一变量法分别分析了栅极位置、栅极孔径、栅极电压、阳极位置、阳极孔径与电子束束流大小和束腰直径的关系。这对于三极式电子枪的结构参数优化具有一定的指导意义。在设计电子枪时适当增加栅极与阴极的距离,适当减小阳极与阴极的距离,使栅极孔径在其对应的束腰直径突变的值附近,同时栅极电压不宜过大,这样往往可以得到较小的束腰直径和较大的发射束流。此外,阳极孔径对束流大小和束腰直径基本没有影响。

(3)根据栅极和阳极对电子束的影响规律对电子枪的结构进行了调整优化,最终达到了加速电压100kV、束流360mA、束腰直径300 μm 的设计指标。

参考文献

[1] 李兵. 电子束焊接技术应用新方向[J]. 南方农机, 2020, 51(12): 176.
 LI Bing. New application direction of electron beam welding technology[J]. Nanfang Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 176.
 [2] 王评. 现代焊接技术的发展现状及前景[J]. 内燃机与配件, 2020(18): 183-184.
 WANG Ping. The development status and prospect of modern welding technology[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(18): 183-184.
 [3] 杨震, 刘方军, 张伟. 电子枪静电透镜部件仿真与优化[J]. 航空制造技术, 2018, 61(17): 42-46, 56.
 YANG Zhen, LIU Fangjun, ZHANG Wei. Simulation and optimization of electrostatic lens components of electron gun[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(17): 42-46, 56.
 [4] 陶振凯. 15kW/60k电子枪的研制[D]. 北京: 北方工业大学, 2015.
 TAO Zhenkai. Research and development of the15kW/60k electron gun[D]. Beijing: North China University of Technology, 2015.
 [5] 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].

表2 优化调整后的电子枪结构主要参数
 Table 2 Main parameters of optimized structure of electron gun

参数	参数值
栅极与阴极距离 d_c/mm	-0.85
栅极孔径 r_c/mm	3.6
栅极电压 U_c/V	-40
阳极与阴极距离 d_a/mm	24.00
阳极孔径 r_a/mm	1.10

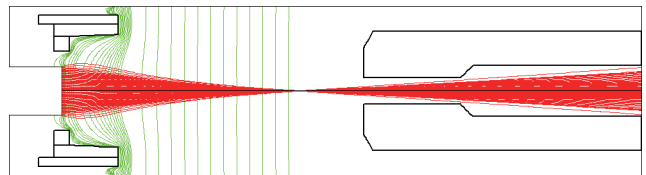


图7 仿真得到的电子束轨迹
 Fig.7 Simulated electron beam trajectory

Machine Building & Automation, 2017, 46(4): 9-11, 26.
 [6] ZHU C H, ZHENG D G, WANG H, et al. Development of analytical ultrafast transmission electron microscopy based on laser-driven Schottky field emission[J]. Ultramicroscopy, 2020, 209: 112887.
 [7] 张冉, 牛彩雯. 高精密焊接激光加热阴极电子枪设计[J]. 电焊机, 2015, 45(3): 24-28.
 ZHANG Ran, NIU Caiwen. Design of high precision welding laser heating cathode electron gun[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(3): 24-28.
 [8] 林祖伦, 王小菊, 祁康成, 等. 静电自会聚六硼化镧电子枪的研究[J]. 原子核物理评论, 2015(z1): 38-42.
 LIN Zulun, WANG Xiaojun, QI Kangcheng, et al. Research on electrostatic self-focusing lanthanum hexaboride electron gun[J]. Nuclear Physics Review, 2015(z1): 38-42.
 [9] 贾艳辉, 张天平. 空间用六硼化镧空心阴极最新研究进展及发展趋势[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(6): 690-698.
 JIA Yanhui, ZHANG Tianping. Latest development of spaceborne LaB₆ hollow cathode[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(6): 690-698.
 [10] 杨赤如, 贾宝富, 朱兆君. 对皮尔斯电子枪综合法的改进[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1544-1548.
 YANG Chiru, JIA Baofu, ZHU Zhaojun. Improvement in the synthesis method of the Pierce electron gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1544-1548.

通讯作者: 董全林, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子束技术、惯性导航与制导等。

(责编 阳光)