

基于磁透镜结构参数的电子枪磁聚焦特性分析

常家玮¹ 李胜波^{1*} 林志树¹ 白凤民² 李国政² 白宗征²

(1. 厦门理工学院机械与汽车工程学院 厦门 361024; 2. 河北志成束源科技有限公司 廊坊 065399)

Characterization of Magnetic Focusing of Electron Gun Based on Structural Parameters of Magnetic Lens

CHANG Jiawei¹, LI Shengbo^{1*}, LIN Zhishu¹, BAI Fengmin², LI Guozheng², BAI Zongzheng²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Hebei Zhicheng High Energy Beam Technology Co., Ltd., Langfang 065399, China)

Abstract The magnetic lens, as a key component of the electron gun, greatly influences focusing performance, spot diameter, and welding quality through its structure. A physical model of the electron gun beam source and electromagnetic focusing structure is constructed based on the ZD-VEBW series high-voltage electron beam welding equipment. Utilizing the CST platform, simulations and analyses are performed to understand the effects of the inner diameter of the magnetic lenses' iron shells and the iron shell openings on the spot diameter. The ring baffle design facilitates adjustments to the inner diameter of the magnetic lens iron shell and the iron shell opening parameters. Welding experiments are conducted with varying focusing currents. These experiments show that optimal magnetic focusing characteristics, resulting in the smallest beam spot diameter and the largest weld depth-to-width ratio, can be achieved through a reasonable design of the magnetic lens structure parameters. The simulation results are validated by these experiments.

Keywords Electron gun, Magnetic focusing system, Focusing current, Weld seam aspect ratio, Beam spot diameter

摘要 磁透镜是电子枪的重要组成部分,其结构会影响磁聚焦性能,从而影响束斑直径与电子束焊接质量。文章以国产ZD-VEBW系列高压电子束焊接设备电子枪为研究对象,构建电子枪束源与电磁聚焦结构的物理模型,并借助CST平台,仿真分析了球差影响下的束斑形貌和不同聚焦电流下磁透镜铁壳内径、铁壳开口对束斑直径的影响。设计环形挡板实现了磁透镜铁壳内径、铁壳开口参数的调整,并进行聚焦电流变化下的焊接实验研究。实验结果表明:磁透镜结构参数的合理设计可以达到更优的磁聚焦特性、更小束斑直径与更大的焊缝深宽比,实验验证了仿真结果的正确性,文章的研究对国产ZD-VEBW系列高压电子枪磁透镜结构的设计和该系列电子枪焊接质量的提升提供了理论和实验指导。

关键词 电子枪 磁聚焦系统 聚焦电流 焊缝深宽比 束斑直径

中图分类号: TG439.3

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202401009

电子束焊接是一种使用电子束作为热源的特种焊接方式,具有不易氧化、热变形小、焊接深宽比大等诸多优点,因而广泛应用与航空航天、国防军工等重要领域^[1-2]。电子枪作为电子束焊接的核心部件具有重要的研究价值。

电子枪磁透镜是电子束形成焊接束斑的核心

部件,磁透镜结构对束斑的大小直接影响,电子束束斑越小,能量密度就越大,电子束的穿透能力就越强,焊接的质量也越高^[3]。从电子枪产生、发射电子,到电子束的聚焦,最终实现焊接是一个多因素影响的复杂过程和现象的集合,不同原理、不同结构、不同设计参数的电子枪难以使用统一的公式

进行描述和预测。因此针对于电子枪的研究主要集中于通过理论与仿真结合的方法,如使用 ANSYS 或 CST 等仿真探究不同的电子枪电磁参数、结构参数和工作参数对电场、磁场分布,束腰束斑直径及位置关系,束斑能量分布,像差等的影响及规律^[4-8],或通过 Matlab 等软件用算法预测更优秀的结构参数并在仿真中加以验证^[9-10],再辅以验证实验,旨在得到更优秀的电子枪电磁、结构、焊接参数,提升电子枪焊接性能^[11]。而通过计算或仿真的方法进行优化设计的电子枪不一定能够达到最优性能,这是由于影响电子束轨迹的因素较多^[12]。而焊接用电子枪的磁透镜磁场分布存在非均匀性,使透镜中心和边缘部分对电子束汇聚能力不同,导致电子束无法聚焦为一个点,而是形成一个束斑,这种现象称之为电子束聚焦系统的球差^[13-14]。由谢尔赤原理可知球差恒大于零,球差虽然无法消除,但可以减小,同时球差的大小是体现聚焦系统聚焦能力的指标。因此如何实现结构的合理设计,优化电子枪磁透镜结构参数,减小球差,对升电子枪的聚焦与焊接性能具有重要意义。本文以国产 ZD-VEBW 系列电子枪为研究对象,构建了电子枪物理模型,通过仿真分析与实验相结合的方法,研究了磁透镜结构参数对束斑直径与焊缝深宽比的影响,对优化现有的磁透镜结构、提升电子枪磁透镜聚焦性能与实际焊接质量具有指导意义。

1 电子枪磁透镜结构理论分析

电子枪磁透镜的工作原理如图 1 所示。电子在阴极 1 表面溢出并经过偏压杯 2 和阳极 3 的加速后形成电子束 6 并完成第一次聚焦,形成束腰,束腰直径为 D_w ,随后因空间电荷效应发散,经过距离 P 到达线圈 4 和铁壳 5 组成的磁透镜并完成第二次聚

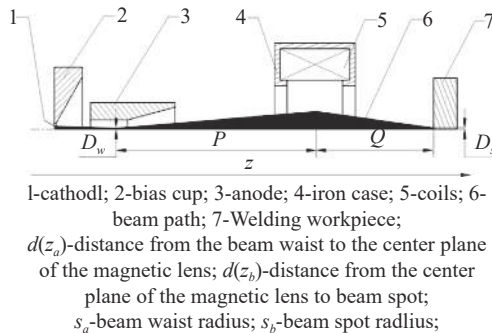


图1 电子枪与电子束结构简图

Fig. 1 Electron gun and electron beam structure diagram

焦,而后继续经过距离 Q 轰击在工件 7 表面形成束斑,束斑直径为 D_s 。

由高斯聚焦公式和经典开放式短磁透镜焦距公式可得:

$$\frac{1}{P} + \frac{1}{Q} = \frac{1}{f} \approx \frac{N^2 I^2}{97VR} \quad (1)$$

由高斯聚焦公式和经典屏蔽式短磁透镜焦距公式可得:

$$\frac{1}{P} + \frac{1}{Q} = \frac{1}{f} \approx \frac{N^2 I^2}{65VR} \quad (2)$$

又有磁透镜放大倍数:

$$M = \frac{Q}{P} = \frac{D_s}{D_w} \quad (3)$$

则可推导得到束斑直径与聚焦电流的关系式:

$$D_s = Q \cdot \frac{D_w}{P} = \frac{97VRPD_w}{(PN)^2 \cdot I^2 - 97VRP} \quad (4)$$

$$\text{或 } D_s = Q \cdot \frac{D_w}{P} = \frac{65VRPD_w}{(PN)^2 \cdot I^2 - 65VRP}$$

P 和 Q 分别为电子束发散和聚焦距离, f 为焦距, NI 为聚焦线圈安匝数, V 为加速电压, R 为聚焦线圈平均半径, D_w 和 D_s 分别为束腰与束斑直径。控制 P 、 V 、 R 、 N 、 D_w 不变,即可得到聚焦距离 Q 与聚焦电流 I 的关系和束斑直径 D_s 和聚焦电流 I 的关系均为二次反比例关系。基于此规律进行聚焦电流与束斑直径关系的仿真研究。

2 电子枪磁透镜聚焦性能仿真分析

2.1 仿真模型建立

基于国产 ZD-VEBW-150-15-10 电子枪,采用 SolidWorks 建立该电子枪电磁聚焦结构的三维模型, ZD-VEBW-150-15-10 电子枪相关参数为:额定加速电压 0–150 kV, 额定功率 0–30 kW, 额定灯丝电流 23 A, 150 kV 时最大焊接束流 200 mA, 额定工作距离 50–700 mm。如图 2 所示,阴极的灯丝型号为 2080, 偏压杯孔径 5 mm, 阳极孔径 10 mm, 铁壳开口为 60 mm。

在 CST 仿真平台中导入上述模型并组装,控制阴阳极距离 30 mm, 灯丝缩进 0.7 mm, 线圈匝数 615, 线圈中心距离灯丝发射面 642.5 mm。阴极、偏压杯及阳极材料选择 PEC, 假定线圈为理想线圈, 线圈外壳材质为铁, 内挡板为铜。

仿真过程中固定高压–150 kV, 偏压杯偏压–1800 V, 阳极为 0 V, 仿真束流轨迹如图 3 所示。

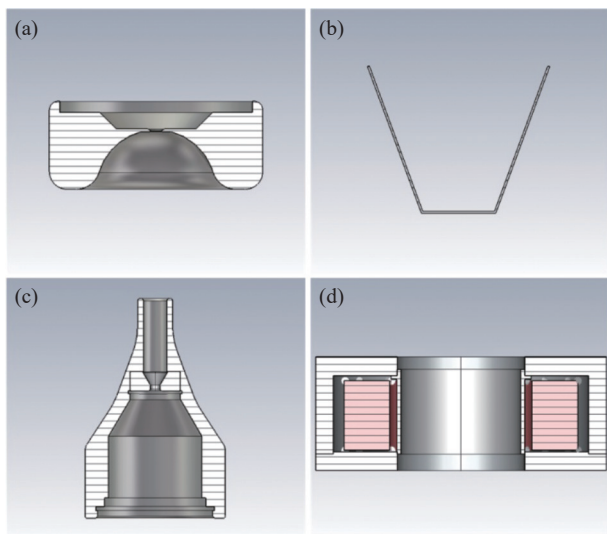


图2 电子枪束源和聚焦结构模型。(a)偏压杯,(b)灯丝,(c)阳极,(d)聚焦线圈

Fig. 2 Modeling of electron gun beam sources and focusing structures. (a) Bias cup, (b) anode, (c) cathode, (d) focusing coil



图3 CST 仿真束流轨迹图
Fig. 3 CST simulation beam trajectory diagram

2.2 磁透镜球差形成原理分析及对束斑影响

在仿真过程中,球差会对聚焦产生较为明显的影响,如图4所示。受球差影响,外层电子束聚焦时内层电子束尚未聚焦,如图4(1),而内层电子束聚焦时外层电子束已经发散,如图4(3),因此在确定束斑时选择前述二者中间束斑整体较小的位置,如图4(2),后续有关束斑直径的仿真,束斑位置的选择均采用此标准。由于仿真使用了与实际一致的方形发射面阴极,四角部分会被过度聚焦,因此在测量束斑直径时不计算四个尖角部分,只计算中间的圆形束斑。

为了与实际工况贴合,探究球差对仿真结果的影响,分别对磁场分布较为分散、球差较小的开放式磁透镜与磁场分布较为集中、球差较大的开放式线圈进行仿真研究,得到的束斑直径随聚焦电流的变化趋势如图5所示。

由图5可以得到,开放式磁透镜的束斑直径随

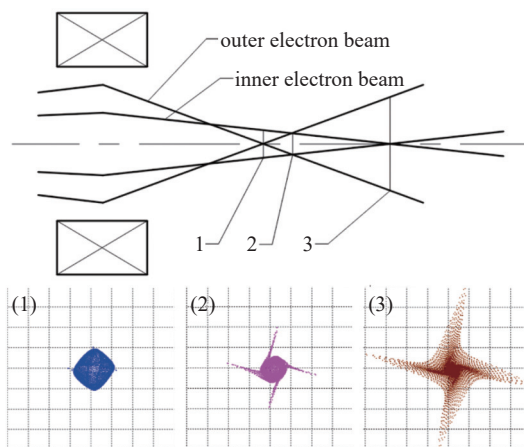


图4 球差形成机制及聚焦仿真

Fig. 4 Spherical aberration formation mechanism and focusing simulation

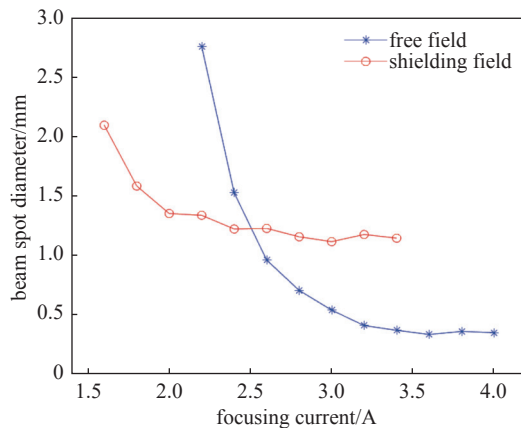


图5 聚焦电流对束斑直径的影响

Fig. 5 Influence of focusing current on focus distance

聚焦电流变化情况与式(4)吻合较好。封闭式磁透镜因其焦距更短,聚焦距离更近,相同聚焦电流下束斑直径应恒小于开放式磁透镜,而在聚焦电流大于等于2.6 A时,屏蔽式线圈束斑直径已经大于开放式线圈的束斑直径,并不能与公式很好地吻合。由此可以得出,球差会显著影响屏蔽式磁透镜的性能,使束斑直径增大。

2.3 电子枪磁透镜结构参数仿真分析

为探究磁透镜结构参数对球差与透镜聚焦性能的影响,选取对磁场分布影响较大的屏蔽铁壳内径 R_b 、屏蔽铁壳开口 I_b 作为研究变量进行仿真分析。

改变透镜中心面电子束直径 R_c 可以有效减小内外层电子束受到磁场力的差值,从而减小球差对束斑直径的影响。而直接改变 R_c 会改变束流的大

小,引入新的变量,因此用改变聚焦线圈铁壳内径 R_B 的方法间接代替改变 R_C 。如图6所示。

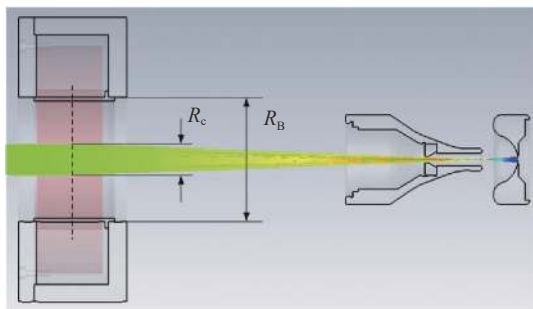


图6 R_C 与 R_B 示意图

Fig. 6 R_C and R_B diagram

聚焦线圈铁壳开口 l_B 的大小对磁场分布有着直接的影响。在线圈匝数 NI 不变的情况下,更平缓的磁场分布有利于缩小内外层电子束受到的磁场力的差距,从而减小球差对束斑直径的影响。因此选择合适的 l_B 大小能有效改善电子枪磁聚焦性能,如图7所示。

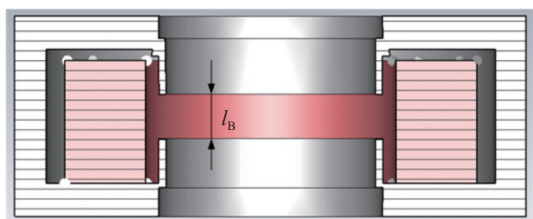


图7 铁壳开口 l_B 示意图

Fig. 7 l_B diagram

2.3.1 屏蔽铁壳内径 R_B

根据实际工况,控制其他结构参数不变,分别对内径为 70 mm, 80 mm, 90 mm 的线圈铁壳进行建模,对聚焦过程进行模拟仿真,并通过束斑直径随聚焦电流大小的变化来研究 R_B 对束斑直径的影响,仿真结果如图8。

由仿真结果可以得出,聚焦电流变化的过程中,铁壳内径为 80 mm 时束斑直径最小,其中 1.4 A 时束斑直径最大,为 2.30 mm; 3.0 A 时束斑直径最小,为 1.07 mm。铁壳内径为 70 mm 时束斑直径最大,其中 1.4 A 时束斑直径最大,为 2.65 mm; 为 3.2 A 时束斑直径最小,为 1.30 mm。仿真结果为 80 mm 时束斑直径最小,其次为 90 mm, 70 mm 时束斑直径最大。

2.3.2 屏蔽铁壳开口 l_B

根据实际工况,控制其他结构参数不变,分别对开口为 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm 的线圈铁

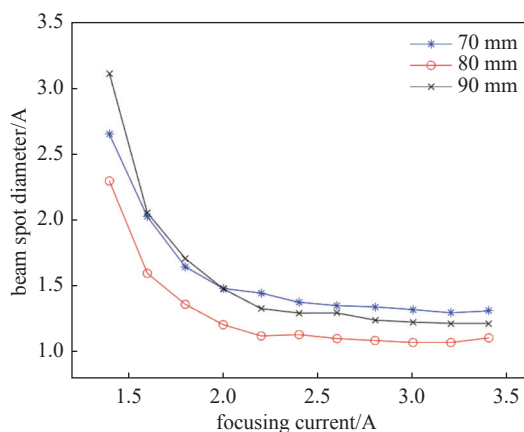


图8 不同 R_B 下束斑直径随聚焦电流的变化

Fig. 8 Variation of beam spot diameter with focusing current under different R_B

壳进行建模,对聚焦过程进行模拟仿真,并通过束斑直径随聚焦电流大小的变化来研究 l_B 对束斑直径的影响,仿真结果如图9。

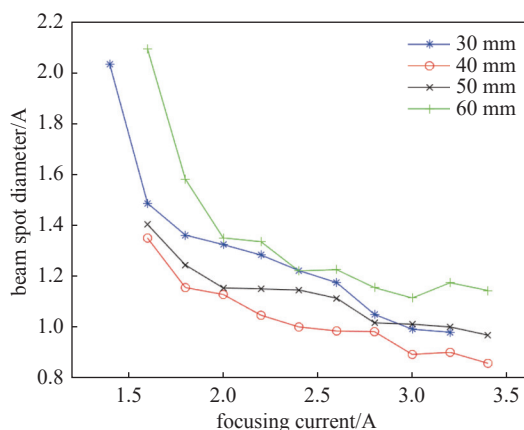


图9 不同 l_B 下束斑直径随聚焦电流的变化

Fig. 9 Variation of beam spot diameter with focusing current under different l_B

由仿真结果可以得出,聚焦电流变化的过程中,铁壳开口在 40 mm 时束斑直径最小,其中 1.8 A 时束斑直径最大,为 1.35 mm; 3.4 A 时束斑直径最小,为 0.86 mm。铁壳开口为 60 mm 时束斑直径最大,其中 1.8 A 时束斑直径最大,为 2.09 mm; 为 3.0 A 时束斑直径最小,为 1.11 mm。仿真结果为 40 mm 时束斑直径最小,其次为 50 mm,再次为 30 mm, 60 mm 时束斑直径最大。

3 实验研究

3.1 实验设计

实验平台为国产 ZD-VEBW-150-15-10 型真空

电子束焊接设备, 实验所选试板材料为 1Cr18Ni9Ti, 厚度 20 mm。分别控制工作距离为 50 mm, 150 mm, 250 mm, 350 mm, 450 mm, 550 mm, 650 mm。实验中令电子束在试板表面聚焦, 使聚焦距离与工作距离相等, 并记录聚焦电流 I_f 。加速电压选择为 120 kV, 束流大小选择确保不会焊透试板的最大焊接束流 40 mA, 焊接速度为 1000 mm/min。根据实际工况, 相同下散数值下, 改变工作距离会导致束斑偏移量改变, 因此不使用下散, 改用表面聚焦。

通过制作不同长度与厚度的聚焦线圈内部挡板来对 R_B 与 l_B 进行控制, 如图 10 所示。使用的挡板零件参数如表 1 所示, 挡板零件如图 11 所示, 组装后线圈如图 12 所示。

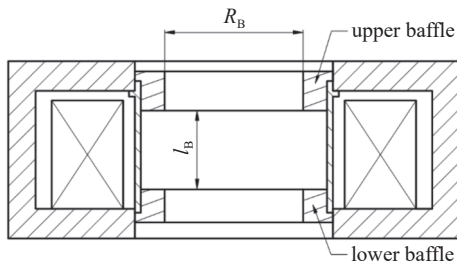


图10 线圈铁壳挡板与参数示意图

Fig. 10 Coil housing baffle and parameter diagram

表 1 挡板零件参数

Tab. 1 Baffle parts parameters

零件组号	R_B /mm	l_B /mm
1	70	40
2	80	40
3	90	30
4	90	40
5	90	50
6	90	60

使用焊缝横截面深度 l_b 与宽度 l_w 的比值作为束斑直径的间接衡量因素。在其他条件不变的情况下, 焊缝深宽比越大表示束斑能量越集中, 直径越小。以第 5 组零件的焊接结果为例, 随着工作距离从 650 mm 减小到 50 mm, 聚焦电流从 1.86 A 增加到 2.78 A, 焊缝形貌如图 13 所示。后续实验分析均基于焊缝深宽比随电流变化趋势进行。

3.2 实验结果分析

3.2.1 改变聚焦线圈铁壳内径 R_B 的实验结果分析

焊接结果经整理后, 不同铁壳内径的焊接深宽比随聚焦电流变化趋势如图 14 所示。

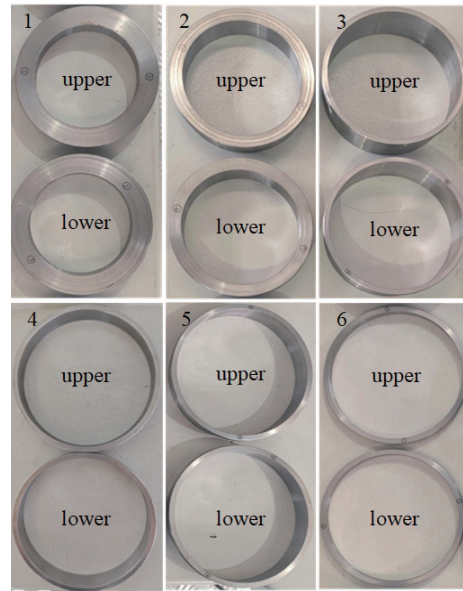


图11 挡板零件图

Fig. 11 Baffle parts diagram

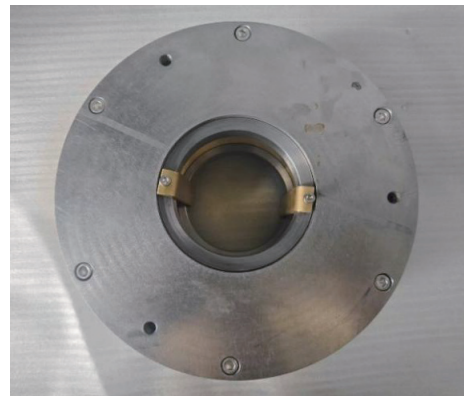


图12 聚焦线圈装配图

Fig. 12 Baffle parts installation diagram

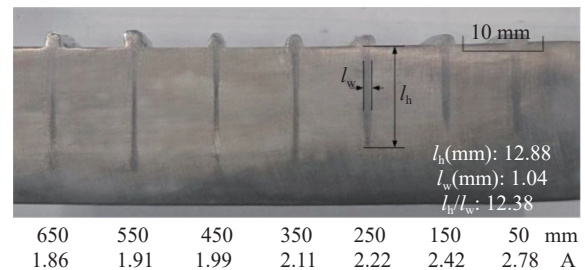


图13 焊接结果截面图

Fig. 13 Welding seam cross section diagram

由图 14 可以得出, 聚焦电流变化的过程中, 铁壳内径在 80 mm 时焊缝深宽比最大, 其中 2.7 A 时焊缝深宽比最大, 为 22.08; 1.7 A 时焊缝深宽比最小, 为 4.71。铁壳内径为 70 mm 时焊缝深宽比最小, 其中 2.6 A 时焊缝深宽比最大, 为 17.52, 1.7 A 时焊

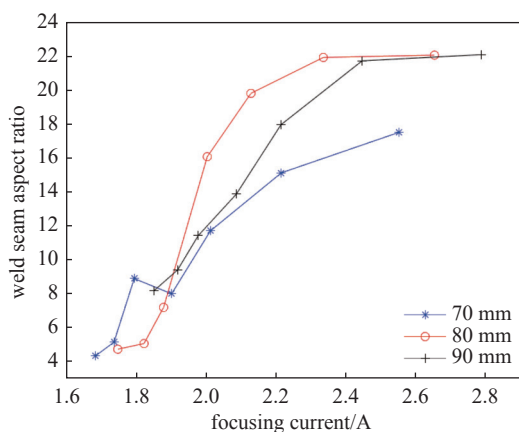


图14 不同 R_b 下焊缝深宽比随电流的变化

Fig. 14 Variation of weld seam aspect ratio with current under different R_b

缝深宽比最小, 为 4.32。焊接结果为 80 mm 时最好, 其次为 90 mm, 70 mm 时最差, 与仿真结论一致。

3.2.2 改变聚焦线圈铁壳开口 l_b 的实验结果分析

焊接结果经整理后, 不同铁壳开口的焊缝深宽比随聚焦电流变化趋势如图 15 所示。

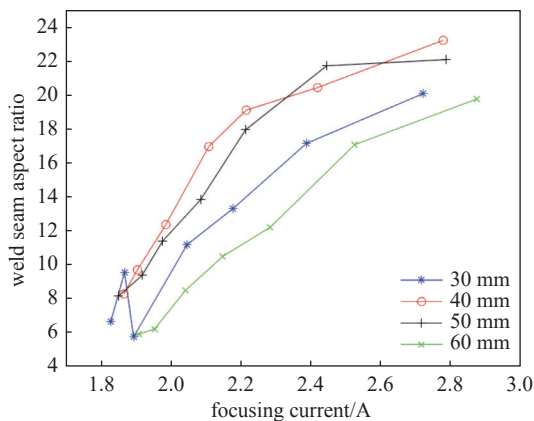


图15 不同 l_b 下焊缝深宽比随电流的变化

Fig. 15 Variation of weld seam aspect ratio with current under different l_b

由图 15 可以得出, 聚焦电流变化的过程中, 铁壳内径在 40 mm 时焊缝深宽比最大, 其中 2.8 A 时焊缝深宽比最大, 为 23.25; 1.8 A 时焊缝深宽比最小, 为 8.30。铁壳内径为 60 mm 时焊缝深宽比最小, 其中 2.9 A 时焊缝深宽比最大, 为 19.79; 1.9 A 时焊缝深宽比最小, 为 5.92。焊接结果为 40 mm 时最好, 其次为 50 mm, 再次为 30 mm, 60 mm 时最差, 与仿真结论一致。

4 结论

基于国产 ZD-VEBW-150-15-10 电子枪, 通过理

论仿真与实验结合的方法对磁透镜结构对磁聚焦性能的影响进行了研究, 得到以下结论:

(1) 选择合适的磁透镜结构参数可以影响磁场分布情况, 进而能够在不改变电子枪焊接束流大小的情况下减小磁聚焦系统的球差, 获得更小的束斑直径和更好的焊接质量。

(2) 使用 CST 对不同的铁壳开口与铁壳内径进行了束斑直径随聚焦电流变化的仿真研究, 获得了开口 40 mm、内径 80 mm 的最优结构参数。

(3) 设计焊接试验件对不同的铁壳开口与铁壳内径进行了焊接深宽比随聚焦电流变化的实验研究, 获得了开口 40 mm、内径 80 mm 的最优结构参数, 实验与仿真结果一致。

参 考 文 献

- [1] Wang Haiyang, Dong Quanlin, Zhao Ran, et al. Design and research of a space electron gun for 60 kV welding[J]. Design and Research of a Space Electron Gun for 60 kV Welding, 2023, 66(3): 119-124 (王海洋, 董全林, 赵然, 等. 一种 60 kV 焊接用太空电子枪的设计研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 119-124(in Chinese))
- [2] Yang Tingting, Wang Xiaobo, Xie Zhiqiang, et al. Study on the effect of electron beam focusing characteristics on beam quality[J]. Welding Technology, 2017, 46(5): 34-38 (杨婷婷, 王晓波, 谢志强, 等. 电子束聚焦特性对束流品质的影响研究[J]. 焊接技术, 2017, 46(5): 34-38(in Chinese))
- [3] Luo Jing, Ni Shiyong. Design of important parameters of magnetic focusing system for 30 kW/150 kV high-voltage electronic welder[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(1): 39-41 (罗静, 倪士勇. 30 kW/150 kV 高压电子束焊机磁聚焦系统重要参数设计[J]. 机电工程技术, 2017, 46(1): 39-41(in Chinese))
- [4] Shi Xiaoqian, Chen Xueying, Liu Jiahui, et al. Simulation and optimization of low energy electron gun[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2023, 44(5): 115-120 (石晓倩, 陈雪颖, 刘佳辉, 等. 低能量电子枪的仿真与优化[J]. 大连交通大学学报, 2023, 44(5): 115-120(in Chinese))
- [5] 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(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))
- [6] 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))
- [7] Qiu Yufan, Li Shengbo, Zheng Xinjian, et al. Electrostatic focusing characteristic of electron gun with multi-parameter coupling[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(11): 1094–1100 (邱宇帆, 李胜波, 郑新建, 等. 多参数耦合下电子枪静电聚焦特性分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(11): 1094–1100(in Chinese))
- [8] 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 (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(in Chinese))
- [9] Zhao Weixia, Dong Quanlin, Ding Ying, et al. Analytic research on accelerating electrodes' influence on the space electric field of electron gun[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2015, 37(1): 62–72 (赵伟霞, 董全林, 丁莹, 等. 电子枪加速极对空间电场影响的解析研究 [J]. 云南大学学报(自然科学), 2015, 37(1): 62–72(in Chinese))
- [10] Shi Lina, Liu Junbiao, Li Wenping, et al. Calculation and optimization analysis of magnetic lens field distribution based on Matlab[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2020, 39(3): 250–255 (史丽娜, 刘俊标, 李文萍, 等. 基于 Matlab 的磁透镜场分布计算与优化分析 [J]. 电子显微学报, 2020, 39(3): 250–255(in Chinese))
- [11] Wang Yadan, Zhang Wei, Huang Junyuan, et al. CST simulation on effect of focusing current and cathode position on beam quality[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2023: 1–8 (王亚丹, 张伟, 黄俊媛, 等. 聚焦电流和阴极位置对束流品质影响的 CST 仿真 [J/OL]. 真空科学与技术学报, 2023: 1–8(in Chinese))
- [12] Tang Tengfei, Liu Hailang, Yue Gao, et al. Research progress of electron beam focusing and deflection techniques[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(11): 719–725 (唐腾飞, 刘海浪, 岳高, 等. 高能电子束电磁透镜的研究进展 [J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(11): 719–725(in Chinese))
- [13] Helmut Schultz. Electron beam welding technology[M]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology Press, 2020: Helmut Schultz. 电子束焊接技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020(in Chinese)
- [14] Li Shaolin, Zhang Kanglong, Li Bolin, et al. Electromagnetic focusing simulation of a CST-based strong-flow electron gun[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(05): 22–27 (李少林, 张康龙, 李伯林, 等. 基于 CST 的强流电子枪的电磁聚焦模拟 [J]. 装备制造技术, 2023(05): 22–27(in Chinese))