

引文格式: 刘林岳, 左从进, 许海鹰, 等. 宽幅矩形束斑冷阴极电子枪的研制[J]. 航空制造技术, 2025, 68(12): 75-81.

LIU Linyue, ZUO Congjin, XU Haiying, et al. Development of cold cathode electron gun with wide-rectangle beam spot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(12): 75-81.

宽幅矩形束斑冷阴极电子枪的研制*

刘林岳¹, 左从进¹, 许海鹰^{1,2}, 桑兴华¹, 石毅磊^{1,3}, 王 壮¹

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 南京理工大学材料科学与工程学院, 南京 210094;

3. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 为适用于大幅面材料的高效率镀膜, 设计了一种宽幅矩形束斑冷阴极电子枪, 对其关键参数进行了仿真, 分析了阴极和阳极关键参数对电子束流品质的影响规律, 获得了电子枪关键部件的最优尺寸。在组建的宽幅矩形束斑形貌检测平台上对所研制电子枪的关键参数进行了验证, 试验结果表明, 电子枪焦距为 200 mm, 电流密度达到 10.3 A/m^2 , 束斑长度为 650 mm, 宽度为 15 mm, 所设计的结构达到宽幅矩形束斑的发射要求。

关键词: 蒸发镀膜; 冷阴极电子枪; 宽幅矩形; 电子束流品质; 束斑形貌

中图分类号: V261.93; TG439.3 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.12.075

Development of Cold Cathode Electron Gun With Wide-Rectangle Beam Spot

LIU Linyue¹, ZUO Congjin¹, XU Haiying^{1,2}, SANG Xinghua¹, SHI Yilei^{1,3}, WANG Zhuang¹

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

2. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

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

[ABSTRACT] In order to be applicable to high-efficiency coating of large-format materials, a cold cathode electron gun with wide-rectangle beam spot was designed, the key parameters were simulated, effect of the cathode and anode key parameters on electron beam quality were analyzed, and the optimal dimensions of key components of the electron gun were obtained. Key parameters of the developed electron gun were verified on a morphology testing platform of wide-rectangle beam spot, the actual test results show that focal length of the electron gun is 200 mm, current density reaches 10.3 A/m^2 , beam spot length is 650 mm, width is 15 mm, and the designed structure meets the requirements of the wide-rectangle beam spot emission.

Keywords: Evaporation coating; Cold cathode electron gun; Wide rectangle; Electron beam quality; Beam spot morphology

镀膜技术已经在国内外军事和民用领域得到了广泛应用^[1-6], 传统镀膜方式(电镀、化学镀等)存在污染、镀膜种类少等局限性, 与之相比, 真空镀膜技术具有更多的膜材选择和更宽松的操作环境^[7-9]。对于先进工业化的真空镀膜方法, 通常的选择有电子束蒸发镀膜(蒸镀)和磁控溅射镀膜。磁控溅射法的特点是膜与基材结合度高, 但相比于电子束蒸镀的速率量级($10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$),

磁控溅射的速率量级仅为 $10^{-4} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ^[2], 因此其镀膜周期长, 难以进行大规模制备。而电子束能量密度极高, 使得高熔点材料(Pt、W、Mo、Ta、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 等)均可被轻易蒸发^[10-11], 极大拓宽了膜材的种类范围。

目前常用的电子束蒸镀多为偏转控制热阴极实心束斑的蒸镀方法。热电子的发射特性决定了热阴极电子枪在蒸镀大幅面材料时需要多电子枪、多坩埚的并联

* 基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4605000); 国家自然科学基金(51775527); 广东省重点领域研发计划项目(2018B090904004)。

排布结构,同步性要求较高,热阴极电子枪还存在阴极寿命短(小于 100 h),真空度要求高(小于 10^{-3} Pa)等优点。相比热阴极电子枪,冷阴极电子枪的真空度要求不高,在 10^{-2} ~ 10^{-1} Pa 的范围内均可正常工作,使用寿命可达 1000 h 以上,成本低,且冷阴极电子枪发射的电子束可通过阴极表面形状和阳极布置方式进行灵活调控,从而对束斑形貌进行调整,可发射预定形貌的电子束斑^[12]。

为了获得一种更高效率的镀膜技术,本研究设计了一种宽幅矩形束斑冷阴极电子枪,可发射宽幅矩形的电子束斑,从而实现大幅面材料的高效率镀膜。首先使用电磁场仿真软件 CST 进行模拟,探究阴、阳极主要参数对电子束流品质的影响规律,获得电子枪的最优尺寸;然后制得电子枪零部件,装配并组建宽幅矩形束斑形貌检测平台;最后通过试验获得宽幅矩形束斑冷阴极电子枪的束斑尺寸、工作焦距和电流密度,验证电子枪结构设计的可行性。

1 宽幅矩形束斑冷阴极电子枪结构及仿真模型参数优化

1.1 结构原理及设计

图 1 为宽幅矩形束斑冷阴极电子枪的横向剖面图,其中阴极和阳极为电子束主要发生及控制结构。阴极接几十 kV 的负高压电,阳极接地,壳体作为放电气体密封腔,在阴、阳极之间,通入的工作气体被电离形成等离子体,其中等离子体正离子在高压电场作用下轰击阴极表面,阴极表面发射二次电子,与等离子体的剩余电子构成电子束流。在阴、阳极构成的静电场作用下,电子束流通过阳极,在理想的工作距离下聚焦在靶材表面,生成宽幅矩形电子束蒸发束斑。利用三维建模软件设计电子枪,装配后整体长度为 920 mm,宽度为 330 mm,高度为 280 mm。阴极为长方体结构铝材,其电子束发射表面为弧形,用于辅助电子束流向中心位置汇聚。由于阴极接入了 -20 kV 高压电,壳体上端通过设计的尼龙绝缘子连接固定阴极,因此可实现阴极与壳体的高电压绝缘隔离作用。壳体下端与阳极密封连接,构成电子束流发射环境。端板用于和高电压阴极间引出电弧电离工作气体,达到阴极发射电子束流的目的。宽幅矩形束斑冷阴极电子枪还包括阴、阳极内部用于散热的水冷通道及用于通入工作气体的进气通道结构等。

根据试验要求,电子束流品质需达到如下设计目标:(1)获得长度 600 mm、宽度小于 10 mm 的宽幅矩形电子束斑;(2)工作焦距达到 200 mm 以上;(3)电流密度达到 150 A/m^2 。

1.2 仿真模型及关键参数优化

采用三维电磁场仿真软件 CST 中的粒子工作室功

能进行仿真工作,仿真模型如图 2 所示,主要结构包括阴极和阳极。其中, X 向为电子枪宽度方向, Y 向为其长度方向, Z 向为电子束的发射方向。图 2 (a)为电子枪 Y 向的正视图,初始阴极长度 L_1 为 610 mm,阳极长度 L_2 为 640 mm。图 2 (b)为 X 向的剖视图,其中主要仿真参数包括阴极弧面半径 R ,阳极通道宽度 d 、上倾角 α 、下倾角 β 。

设置阴极接入 -20 kV 的高压,阴、阳极间距为 50 mm,保证阴极与阳极之间有足够的耐压强度,初始主要仿真参数如表 1 所示。

以上述参数进行初步仿真,得到电子束在发射方向上电流密度随空间位置 D 的变化趋势,如图 3 所示,其

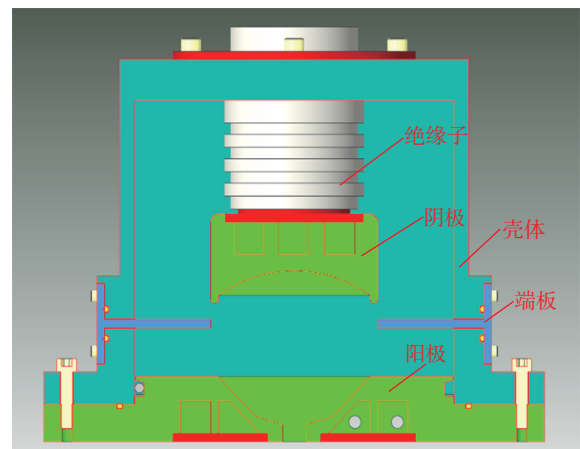


图 1 电子枪横向剖面图

Fig.1 Transverse sectional view of the electron gun

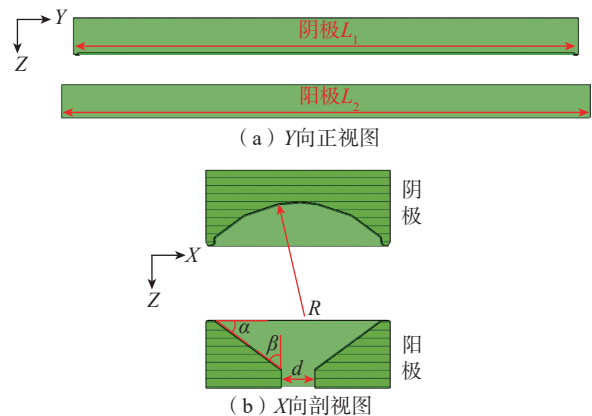


图 2 电子枪的仿真模型

Fig.2 Simulated model of the electron gun

表 1 初始仿真参数

Table 1 Initial simulation parameters

阴极弧面半径 R/mm	阳极通道宽度 d/mm	阳极上倾角 $\alpha/(\text{ }^\circ)$	阳极下倾角 $\beta/(\text{ }^\circ)$
70	20	37	53

中横坐标代表电子束在发射方向 Z 上的空间位置 D , 以阳极下表面处作为 D 的 0 点坐标, $D > 0$ 时, 表示电子束从电子枪内部发射出而进入工作空间中。纵坐标为电子束电流密度 J , 表示对应空间位置 D 处的电子束能量大小。当电流密度 J 达到最高值时, 电子汇聚程度最高, 此时对应的横坐标 D 即为电子束的焦距 (f)。从图 3 可以看出, 电子束从阴极表面发射后, 电流密度在开始时逐渐升高, 表明电子束呈聚焦趋势, 电流密度达到最高点(焦点)后开始逐步降低, 即电子束开始发散。从图 3 还可知, 焦点处对应的电子束焦距为 24.565 mm, 远未达到 200 mm 焦距的设计要求。

1.2.1 阴极弧面半径 R 的仿真优化

根据仿真结果可知(图 3), 电流密度最高点为 212.25 A/m^2 , 远超过设计目标要求的 150 A/m^2 , 而此时的焦距 (24.565 mm) 过短, 出现该情况的原因是阴极弧面半径 R (70 mm) 过小, 导致电子束流聚焦过于集中, 在达到设计目标焦距之前提前聚焦, 因此要适当调节 R 。

对 R 为 80 mm、85 mm、90 mm、100 mm 的情况分别进行仿真, 得到不同 R 所对应的焦距和电流密度仿真结果, 如图 4 所示。可以看出, R 越大, 电子束聚焦程度越低, 电流密度降低, 焦距变大。当 R 为 85 mm 时, 电流密度 J 达到设计目标的临界值, 但焦距 f 仍然没有达到设计要求; 当 R 为 90 mm 时, 焦距 f (267.28 mm) 达到设计要求, 但由于电子束更加发散, 导致电流密度下降至 133.16 A/m^2 , 低于设计要求 (150 A/m^2)。除了对电子束流品质影响最大的阴极弧面半径 R 外, 阳极结构对电子束的电流密度也有影响, 因此保持 R 为 90 mm 不变, 对阳极结构进行调整。

1.2.2 阳极通道宽度 d 的仿真优化

阳极通道对电子束流的作用如图 5 所示, 阳极通道既可对电子束的多余部分束流起到阻隔作用, 又能产生静电汇聚作用。该通道越窄, 对电子束向中心静电汇聚的作用越强, 但通道变窄会阻隔更多的电子通过。因此, 需要确定合适的通道宽度 d , 使得当前通道既能通过足够数量的电子, 又能对电子束产生最佳的静电汇聚作用。

对阳极通道宽度 d 分别为 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 的情况进行仿真, 探究不同空间位置 D 处的电流密度 J 及焦距 f , 结果如表 2 所示。

$D = -50 \text{ mm}$ 为阳极通道截获电子束前的位置, 此时电流密度 J 随阳极通道宽度 d 的减小而增大, 表明阳极通道越窄, 对电子束的静电汇聚作用越强。 $D = 0 \text{ mm}$ 时, 阳极通道完成对电子束流的截获, $d = 15 \text{ mm}$ 时对应的电流密度 J 为 41.24 A/m^2 , $d = 20 \text{ mm}$ 时的电流密度 J 为 41.33 A/m^2 , 此时 d 的大小对电流密度 J 的影响趋势与

$D = -50 \text{ mm}$ 时不同, 电流密度 J 的大小开始受到阳极通道对电子束静电汇聚和截获作用的共同影响。随着 D 的增加, $d = 10 \text{ mm}$ 时的电流密度 J 最低, 这是因为最窄宽度的通道截获了最多的束流, 较少数量的电子限制了电流密度的上限。当 $d = 25 \text{ mm}$ 时, 通道内拥有最多的汇聚电子, 但由于 d 过宽, 使得阳极对电子束的汇聚作用变弱, 电流密度 J 未能进一步提高。当 $d = 20 \text{ mm}$ 时, 阳极通道的静电汇聚作用增强, 但阳极通道截获了较多电子, 使得 $d = 20 \text{ mm}$ 时的焦距处电流密度 J (133.16 A/m^2) 反而小于 $d = 25 \text{ mm}$ 时的值 (153.81 A/m^2)。

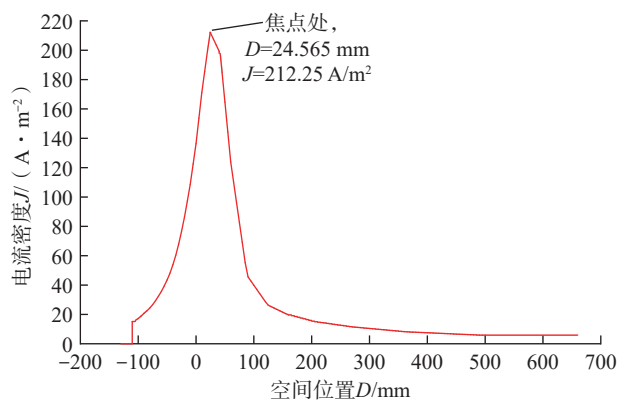


图 3 电子束电流密度随空间位置的变化

Fig.3 Electron beam current density changing with space position

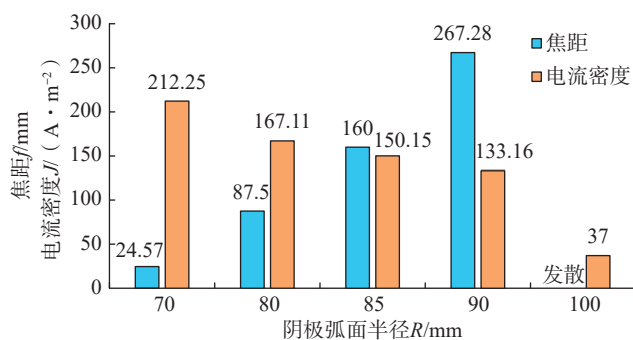


图 4 不同阴极弧面半径的仿真结果

Fig.4 Simulation results of different cathode arc radii

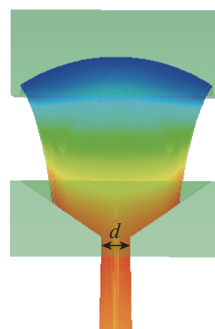


图 5 阳极通道的作用示意图

Fig.5 Schematic diagram for role of anode channel

表 2 通道宽度对焦距和电流密度的影响
Table 2 Effect of channel width on focal length and current density

阳极通道宽度 d/mm	电流密度 $J/(\text{A}/\text{m}^2)$						焦距处	焦距 f/mm
	$D=50\text{ mm}$	$D=0\text{ mm}$	$D=50\text{ mm}$	$D=100\text{ mm}$	$D=150\text{ mm}$	$D=200\text{ mm}$		
10	28.99	42.04	50.92	60.56	69.89	73.06	73.14	202.03
15	28.77	41.24	49.78	65.81	99.16	150.47	172.08	267.91
20	28.69	41.33	49.95	66.61	93.28	120.65	133.16	267.28
25	28.63	40.81	48.98	63.02	88.04	124.93	153.81	267.75

当 $d=15\text{ mm}$ 时,电子束的电流密度 J 随空间位置 D 的变化如图 6 所示,可以看出, D 在较宽范围(约 $200\sim 305\text{ mm}$) 内的电流密度 J 均超过了设计目标电流密度的要求,在 $D=267.91\text{ mm}$ 处达到最高电流密度 ($172.08\text{ A}/\text{m}^2$),此时阳极通道对电子束的静电汇聚和束流截获作用达到最佳平衡状态,因此确定阳极通道宽度 d 为 15 mm 。

1.2.3 阳极上下倾角 α 、 β 的仿真优化

本研究的阳极结构形状中,阳极宽度方向剖面为斜直面,此时 $\alpha=31^\circ$, $\beta=59^\circ$,如图 7(a)所示。对上下倾角 α 、 β 进行调整,采用不同角度两两组合的方式,排除使电子束明显发散的结构,同时考虑结构散热的合理性,对不同上下倾角 α 、 β 的组合进行了逐一仿真对比,如图 7(b)所示,仿真结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,上倾角 α 为 45° 时,与之组合后能保持高电流密度的倾角 β 结构最多,说明上倾角 α 在电流密度稳定方面起到主要作用,且 45° 为最佳角度。

研究下倾角 β 变化对电子束流品质的影响,固定 $\alpha=45^\circ$,由于 β 在 $60^\circ\sim 75^\circ$ 之间的电流密度相差不大,因此仅比较焦距处的束斑宽度,结果如表 4 所示。当 $\beta=75^\circ$ 时,宽幅矩形电子束斑的宽度最小,电子束流汇聚最集中。

1.2.4 阴极边缘优化对束斑形貌的影响

图 8 为 267.91 mm 焦距处的电子束斑形貌图,可以观察到在长度 Y 向靠近边缘处存在束斑形貌畸变,整体电子分布不均匀,使得边缘处的电子无法作用于实际材料的蒸镀过程,因此需要对边缘畸变进行修正。此外还观察到,电子束斑边缘处平整,沿宽度 X 向发散,此时电子束斑在长度 Y 向的整体长度约为 500 mm ,明显短于 600 mm 的阴极电子束发射弧面长度。说明电子束斑长度 Y 向的边缘处存在空间电场的影响,使得边缘电子汇聚轨迹发生偏差,电子束斑边缘呈现畸变。初步推断为长度 Y 向的阴极边缘对电子束产生了影响。

若要消除阴极边缘空间电场影响导致的束斑两端沿宽度 X 向发生畸变的问题,则需调整阴极边缘距离电子束发射表面的距离,使得阴极边缘空间电场对电子束

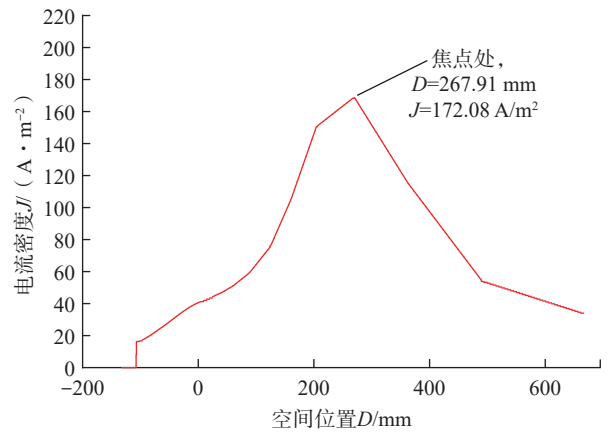


图 6 电子束电流密度随空间位置的变化 ($d=15\text{ mm}$)
Fig.6 Electron beam current density changing with space position ($d=15\text{ mm}$)

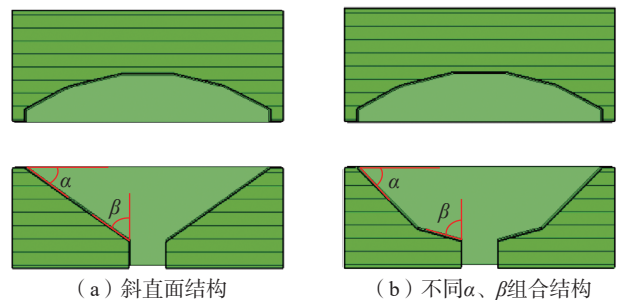


图 7 阳极的剖面图
Fig.7 Cross-section view of anode

表 3 不同 α 、 β 组合对电流密度的影响
Table 3 Effect of different α and β combinations on current density

$\beta/(\text{°})$	电流密度 $J/(\text{A}/\text{m}^2)$		
	$\alpha=40^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=50^\circ$
60	172.29	173.76	171.90
65	173.75	173.71	172.45
70	173.48	173.64	171.29
75	168.48	173.11	170.31
80	168.58	171.85	167.52

的影响得到削减。因此在长度 Y 向上, 阴极边缘与电子束发射表面之间需要设计一段阴极过渡区域, 控制阴极边缘对电子束的作用, 使得电子束在长度 Y 向边缘受到的影响尽可能最低。

设计了如图 9 所示的过渡区域用于削减阴极边缘对电子束的负面作用。过渡区域形状为沿边缘方向下凹的弧形斜面, 变量为阴极边缘到电子束发射表面的距离 L_3 。对 L_3 分别为 10 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm、50 mm 时的情况进行仿真, 发现从 $L_3=30$ mm 开始, 阴极边缘与电子束发射表面构成的电场基本均匀, 对电子束发射表面的影响基本消失, 调整后的电子束斑形貌如图 10 所示。可以观察到, 电子束斑仍然存在边缘畸变, 可知调整阴极边缘距电子束发射表面的距离对改善畸变的效果已不明显, 即通过阴极调节已无法改善束斑形貌。长度 Y 向的整体束斑长度超过 600 mm, 沿宽度 X 向呈极大的发散状态, 推测为阳极作用的影响, 因此需从阳极长度方向着手进行调整。

1.2.5 阳极长度优化对束斑形貌的影响

与电子束发射表面过近的阴极边缘空间电场造成了电子束斑边缘的畸变, 同理, 阳极在长度 Y 向的边缘与电子束距离过近, 产生的空间电场造成了影响, 使得电子束斑边缘形貌呈现畸变。因此需要增加阳极长度 L_2 , 削减阳极边缘形成的空间电场对电子束流边缘的影响, 同时与阴极构成在发射方向 Z 上呈均匀分布的电

场。在 $L_2=660$ mm 的基础上按每次增加 20 mm 的阳极长度进行仿真, 结果如表 5 所示。

可以看出, 随着阳极长度 L_2 增大, 边缘畸变现象逐渐得到改善, 阳极长度 L_2 超过 740 mm 后, 边缘畸变基本得到控制, 此时阳极边缘对于电子束流边缘的影响基本消失。然而当 L_2 超过 760 mm 后, 电子束流的汇聚程度逐渐变差, 开始呈现发散趋势, 阳极与阴极构成的静电场对电子束流的聚焦能力下降。因此, 综合考虑整体电子束流品质, 保证束斑形貌及聚焦程度, 选用 $L_2=750$ mm 的阳极最为合适。

图 11 为阳极优化后的电子束斑整体形貌, 可以看出, 束斑边缘畸变已得到极大控制, 发散的电子数量已经处于极低状态, 束斑整体长度约 640 mm, 宽度 1.5 mm, 达到设计目标要求。

2 试验结果

如图 12 所示, 将宽幅矩形束斑冷阴极电子枪置于真空室内, 与高压逆变电源、水冷系统、送气系统、真空系统、控制系统等组成宽幅矩形束斑形貌检测平台。采用不锈钢板作为蒸发镀膜靶材, 验证所研制电子枪结构的合理性。

在工作电压 -20 kV、最大束流 100 mA、氦气流量

表 4 下倾角对束斑宽度的影响

Table 4 Effect of down-inclination angle on beam spot width

下倾角 $\beta/ (^{\circ})$	束斑宽度 /mm
60	5.93
65	5.86
70	5.84
75	5.79

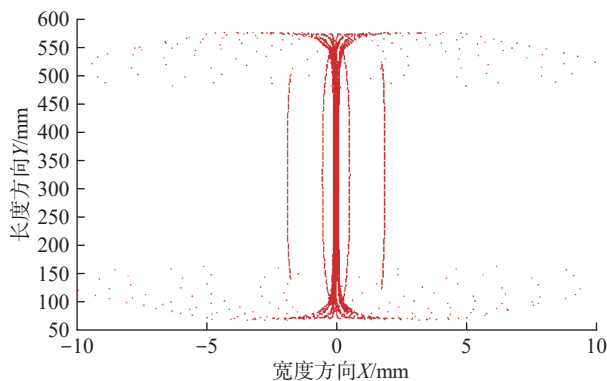


图 8 电子束斑形貌

Fig.8 Morphology of electron beam spot

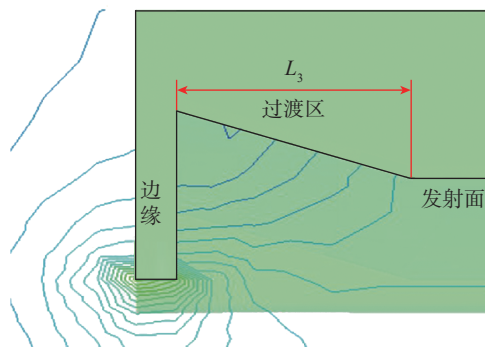


图 9 阴极过渡区结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of cathode transition zone

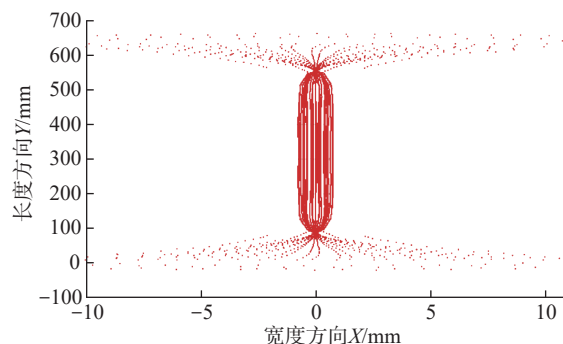


图 10 调整后的电子束斑形貌 ($L_3=30$ mm)

Fig.10 Morphology of electron beam spot after adjustment ($L_3=30$ mm)

表 5 阳极长度对电子束斑形貌的影响

Table 5 Effect of anode length on electron beam spot morphology

阳极长度 L_2 /mm	边缘形状	束流集中程度
660	差	集中
680	差	集中
700	差	集中
720	一般	集中
740	较好	集中
760	较好	集中
780	较好	略微发散
800	较好	略微发散
820	较好	有些发散

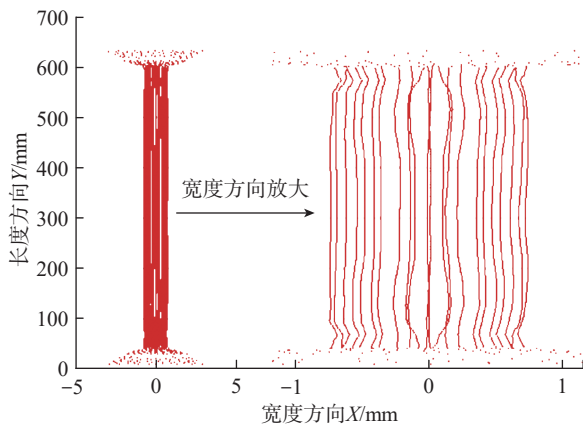


图 11 阳极优化后的电子束斑形貌

Fig.11 Morphology of electron beam spot after anode optimization

0.9 L/min 的技术参数下进行电子枪试验工作。图 13 为电子枪工作时的束流发射图像,工作室内气体在高压下电离发光,电子束流穿过阳极通道聚焦在不锈钢靶材表面生成电子束蒸发亮斑,束斑形貌呈宽幅矩形,整体宽度均匀性较好,无边缘畸变。经检测,电子枪的工作焦距为 200 mm,束斑长度为 650 mm,电子束斑宽度为 15 mm。

对仿真与试验的各项数据进行对比,结果如表 6 所示。可以看出,试验的电子束流小于仿真结果,电子束斑宽度尺寸偏大,焦距偏短,电流密度较小,但长度尺寸与仿真结果相近。推测产生上述结果的原因主要有:(1)气体放电密封腔过大,输入的工作气体分布不均匀,电离后有效轰击阴极表面的正电荷离子减少,导致阴极实际发射的二次电子少于仿真模型;(2)试验中输入的工作气体流量较大,较高电离度气体中的正电荷离子又中和了相当部分的发射电子束流,相比理想化真空环境的仿真模型,电子束流量进一步减少。两方面原因的共同影响,致使试验中传输的电子束斑品质相比仿真模型

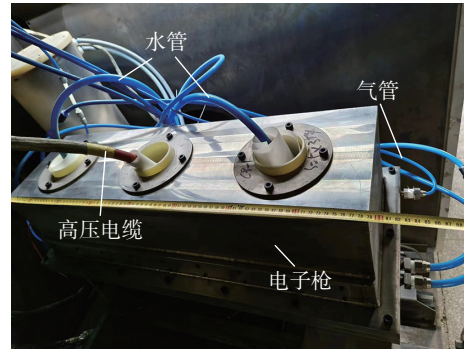


图 12 电子枪及束斑形貌检测平台

Fig.12 Electron gun and beam spot morphology testing platform

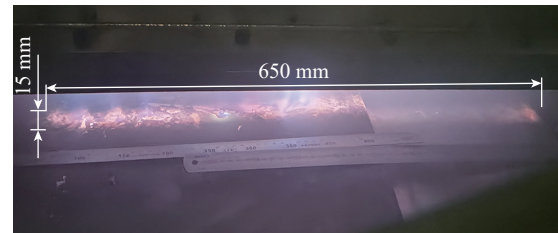


图 13 电子枪束流图像

Fig.13 Image of electron gun beam

表 6 仿真与试验数据对比

Table 6 Comparison of simulation and experimental data

对比项	焦距/mm	长度/mm	宽度/mm	电流密度/(A/m ²)	束流大小/mA
仿真	267.91	640	1.5	172.08	165
试验	200	650	15	10.3	100

的结果较差。因此对于试验电子枪结构,需设计更为合理的输气通道布局,使工作气体均匀分布,同时降低工作气体流量以改善真空条件;对于仿真模型,应考虑工作气体带来的影响,需对其真空条件进行一定程度的修正。

3 结论

(1)采用三维电磁场仿真软件 CST 完成了阴极和阳极主要参数对电子束流品质的影响规律研究,确定主要参数为阴极弧面半径 $R=90$ mm,阳极宽度 $d=15$ mm,上倾角 $\alpha=45^\circ$,下倾角 $\beta=75^\circ$ 。针对电子束斑边缘形貌的畸变情况,设计了阴极边缘到电子束发射表面距离 $L_3=30$ mm 的阴极过渡区域,确定了阳极长度 $L_2=750$ mm 的最优尺寸。

(2)对宽幅矩形束斑冷阴极电子枪的设计目标参数进行检测,得到电子束斑长度为 650 mm,宽度为 15 mm,工作焦距为 200 mm,电流密度为 10.3 A/m²,所设计结构达到宽幅矩形束斑的发射要求。

参考文献

- [1] KHALED K, BERARDI U. Current and future coating technologies for architectural glazing applications[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 244: 111022.
- [2] MAVUKKANDY M O, MCBRIDE S A, WARSINGER D M, et al. Thin film deposition techniques for polymeric membranes—A review[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 610: 118258.
- [3] 杨立红, 方园, 卢金雄. 钢铁工业表面产品与技术面临的挑战与对策[J]. *钢铁*, 2008, 43(8): 1–6.
- YANG Lihong, FANG Yuan, LU Jinxiong. Challenges faced by steel strip coating industry and corresponding strategies[J]. *Iron & Steel*, 2008, 43(8): 1–6.
- [4] 白秀琴, 李健, 严新平, 等. 真空镀膜技术在塑料表面金属化上的应用[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2005, 29(6): 947–950.
- BAI Xiuqin, LI Jian, YAN Xinping, et al. Application of vacuum coating technology to metallization of plastics[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2005, 29(6): 947–950.
- [5] 冯利利, 刘一曼, 姚琳, 等. 基于红外隐身及多波段兼容隐身材料[J]. *化学进展*, 2021, 33(6): 1044–1058.
- FENG Lili, LIU Yiman, YAO Lin, et al. Infrared stealth and multi-band compatible stealth materials[J]. *Progress in Chemistry*, 2021, 33(6): 1044–1058.
- [6] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 新型高温/超高温热障涂层及制备技术研究进展[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2722–2732.
- GUO Hongbo, GONG Shengkai, XU Huibin. Research progress on new high/ultra-high temperature thermal barrier coatings and processing technologies[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2722–2732.
- [7] 吴国松, 曾小勤, 郭兴伍, 等. 气相沉积膜层在镁合金表面改性中的应用[J]. *材料工程*, 2006, 34(1): 61–65.
- WU Guosong, ZENG Xiaoqin, GUO Xingwu, et al. Application of vapor-deposition coatings on magnesium alloys surface modification[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2006, 34(1): 61–65.
- [8] 杨立红, 张健, 傅建钦, 等. 新一代连续带钢真空镀膜技术的发展现状与展望[J]. *钢铁*, 2007, 42(4): 1–4.
- YANG Lihong, ZHANG Jian, FU Jianqin, et al. Present status and prospect of vacuum strip coating processes[J]. *Iron & Steel*, 2007, 42(4): 1–4.
- [9] 江强, 周细应, 毛秀娟, 等. 柔性基底沉积金属薄膜及其应用[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(8): 18–20, 23.
- JIANG Qiang, ZHOU Xiying, MAO Xiujuan, et al. Preparation and application research on metal film deposited on flexible substrate[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(8): 18–20, 23.
- [10] 贾国斌, 尹中荣. 电子束技术在难熔金属行业的应用[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(S2): 113–117.
- JIA Guobin, YIN Zhongrong. Application of electron beam in the refractory metals field[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(S2): 113–117.
- [11] 谭毅, 游小刚, 李佳艳, 等. 电子束技术在高温合金中的应用[J]. *材料工程*, 2015, 43(12): 101–112.
- TAN Yi, YOU Xiaogang, LI Jiayan, et al. Application of electron beam technology in superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(12): 101–112.
- [12] 许海鹰, 王壮, 彭勇, 等. 丝束同轴冷阴极电子束源研制及其熔丝增材制造适用性研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(7): 276–283.
- XU Haiying, WANG Zhuang, PENG Yong, et al. Development of gas discharge electron beam source of electron beam coaxial wire and fuse additive manufacturing applicability[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(7): 276–283.
- 通信作者: 许海鹰, 博士, 研究员, 主要研究方向为高能束流加工技术。
(责编 向阳)
- (上接第 74 页)
- [10] SAADABAD N A, MORADI H, VOSSOUGH G. Global optimization and design of dynamic absorbers for chatter suppression in milling process with tool wear and process damping[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 21: 360–366.
- [11] ZUO L, NAYFEH S A. Minimax optimization of multi-degree-of-freedom tuned-mass dampers[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 272(3–5): 893–908.
- [12] YANG Y Q, DAI W, LIU Q. Design and implementation of two-degree-of-freedom tuned mass damper in milling vibration mitigation[J]. *Journal of Sound Vibration*, 2015, 335: 78–88.
- [13] MA W S, YANG Y Q, JIN X L. Chatter suppression in micro-milling using shank-mounted two-DOF tuned mass damper[J]. *Precision Engineering*, 2021, 72: 144–157.
- [14] MA W S, JIN X L, YU J J, et al. Oppositely oriented series multiple tuned mass dampers and application on a parallel machine tool[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 163: 108196.
- [15] WU S Q, LI H X. A data-driven design method of distributed dynamic vibration absorber for broadband vibration suppression of thin-walled structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 182: 110264.
- [16] WANG M, QIN P, ZAN T, et al. Improving optimal chatter control of slender cutting tool through more accurate tuned mass damper modeling[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 513: 116393.
- [17] QIN P, LIU Y N, WANG M, et al. Milling vibration control of semiconical shell workpiece with multiple distribution tuned mass dampers[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(7): 2175–2190.
- [18] YUAN H, WAN M, YANG Y. Design of a tunable mass damper for mitigating vibrations in milling of cylindrical parts[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(3): 748–758.
- 通信作者: 杨毅青, 副教授, 主要研究方向为新型减振与吸能技术、先进数控加工技术与装备。
(责编 向阳)