

引文格式: 许海鹰, 桑兴华, 杨波, 等. 冷阴极气体放电电子束源系统研制 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(1/2): 98-105.

XU Haiying, SANG Xinghua, YANG Bo, et al. Development of gas discharger electron beam source[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(1/2): 98-105.

冷阴极气体放电电子束源系统研制*

许海鹰^{1,2}, 桑兴华¹, 杨波¹, 彭勇²

(1. 中国航空制造技术研究院高能束流发生器实验室, 北京 100024;

2. 南京理工大学材料科学与工程学院, 南京 210094)

[摘要] 基于冷阴极电子发射机理, 设计制造了冷阴极气体放电电子枪及其电子光学系统; 为了使其能够长期稳定工作, 采用三级 AC-DC 拓扑电路、功率变压器原边并联与输出端整流电路串联获取高压的电路、双闭环控制及放电保护技术等, 设计制造了冷阴极气体放电电子枪逆变电源; 基于上述技术研制的冷阴极气体放电电子束源实现了 -20kV/1500mA 束流输出。试验结果表明, 惰性气体作为放电气体, 长时间工作易出现束流减小现象; 以空气作为放电气体, 输出表现为低压大电流特性; 给定的 He、Ar、空气的气流量小于 0.03L/min, 输出束流随着加速电压增大而增大; 给定加速电压不变, He 气流量逐渐增大, 输出束流随着气流量增大而增大; 第 3 级 AC-DC 电路中的 IGBT 全桥逆变电路的输出电压、电流波形一致较好, 可以保障冷阴极气体放电电子束源长期稳定工作、大功率输出的需求。

关键词: 气体放电; 等离子体; 电子束; 电子枪; 逆变电源

Development of Gas Discharger Electron Beam Source

XU Haiying^{1,2}, SANG Xinghua¹, YANG Bo¹, PENG Yong²

(1. Science and Technology on Power Beam Generator Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

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

[ABSTRACT] Based on cold cathode electron emission mechanism, a gas discharge electron beam (EB) gun and its electron optics system had been designed. In order to meet long time work requirement, three-stage AC-DC topology circuit, the circuit of transformer primary side parallel connection and output rectifier circuit series connection to obtain high voltage, double closed-loop control and discharge protection had been adopted to manufacture a inverter power supply. The output beam current of gas discharge electron beam source, which adopted mentioned above technology, is up to -20kV/1500mA. The experimental results show that, when the inert gas is used as the discharge gas, the electron beam current of the gas discharge EB gun will decrease for a long time. When the air is used as the discharge gas, the output characteristic of low voltage and high current is shown. When airflow rate of He, Ar or air is less than 0.03L/min, the output electron beam current increases with acceleration voltage increased. When the constant acceleration voltage is given, the output beam current increases gradually with the He airflow rate increased. The voltage and current waveforms of IGBT bridges in the third stage AC-DC circuit are well accordance, which will meet the need of long time stable operation and high power output.

Keywords: Gas discharge; Plasma; Electron beam (EB); EB gun; Inverter power supply

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.01/02.098

基于等离子体阳极的冷阴极气体放电电子源在国外已经应用于真空冶炼、电子束物理气相沉积 (EB-PVD)、材料表面处理、增材制造等技术领域^[1-3]。国

外冷阴极气体放电电子源电压 -30kV 以上, 功率达到 600kW 以上^[4-5]。

国内工业领域应用的国产化电子束源主要为热阴

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775527); 国防基础科研计划(JCKY2017205A002); 航空科学基金(2018ZE25005)。

极束源,通过直接或间接加热阴极产生电子。由于电子发射机理的局限性,阴极寿命有限,国内商品化销售的热阴极电子束源电压一般为 $-30\sim-150\text{kV}$,功率大多小于 $200\text{kW}^{[6-9]}$ 。

国内在冷阴极气体放电电子束源技术研究方面,与国外先进技术相比还比较落后。与热阴极电子束源相比,冷阴极气体放电电子束源的电子枪阴极寿命长,经过清理后可重复使用;枪体结构简洁,在同等功率条件下,重量更轻、体积更小,做室内动枪的优势更加明显;可以产生圆形、环形、方形等多种束斑形貌^[10-12],在工业领域潜在应用优势显著。

近年来快速发展的大型结构电子束熔丝增材制造技术,由于受制于阴极寿命和功率,一直未能得到大规模推广应用。将冷阴极气体放电电子束源应用于电子束熔丝增材制造,利用其阴极寿命长、功率大、束斑形貌多样化的特点,将推动这项技术的发展。

目前,先进的冷阴极气体放电型电子束源技术几乎被国外所垄断,为了在国内发展这一优质电子束源技术,通过国际技术交流合作,中国航空制造技术研究院从乌克兰引进了 $30\text{kW}/20\text{kV}$ 冷阴极气体放电型电子枪,经过消化吸收,研制出了具有自主知识产权的冷阴极气体放电电子枪及其配套逆变电源,比较深入地研究了冷阴极气体放电电子枪结构特点及其逆变电源输出特性、束流控制规律,有利于加速该项技术在国内的推广应用。

本文重点介绍了冷阴极气体放电电子束源的电子枪结构及其电子光学系统设计、电源拓扑结构及其控制电路,对其束斑形貌及其束流调控规律进行了深入分析,所研制的冷阴极气体放电电子束源实现了 $20\text{kV}/1500\text{mA}$ 束流稳定输出。

1 束源系统构成

冷阴极气体放电电子束源主要包括冷阴极气体放电电子枪及其配套逆变电源、电子枪的电子光学驱动系统,为了实现不同的电子束加工工艺,还需要配备真空系统、冷却系统及运动机构,电子枪及其配套真空、运动系统,冷阴极气体放电电子束源的基本组成单元如图1所示。

冷阴极电子束流发生的基本原理是:在零点几 Pa 或几十 Pa 的压力环境下,在阴极与阳极之间施加几千到 -20kV 的电压,达到放电气体的点火电压,则在阴极和阳极之间产生气体放电,形成等离子体;等离子体中的正离子在电场作用下轰击阴极表面,产生二次电子,等离子体中的电子和阴极发射出的二次电子经过阴极、阳极之间的加速电压加速,并借助于特殊几何形状的阴极、阳极所产生的等离子体“阳极透镜效应”^[13],使得所述电子产生静电汇聚,再经过电磁聚焦系统的聚焦形成

电子束。偏转线圈用于产生偏转磁场,控制电子束偏转角度,实现一些特殊的加工工艺。

与传统通过直接或间接加热灯丝的电子束源的阴极相比,冷阴极气体放电电子束源的阴极发射面积可以做得很大,采用电子发射率高的纯铝做阴极材料,功率可以达到数百 kW,阴极受到大量正离子轰击,产生的热量很大,需要单独为阴极提供水冷单元,冷却水采用去离子水,可以防止水中导电离子将阴极高电压传导到其他设备上而引起故障。

冷阴极气体放电电子枪的阳极及其与阴极组成的放电腔体也会受到电子或离子的轰击而产生很大热量,都需要加水冷,该水冷单元与阴极水冷单元分离。

2 冷阴极气体放电电子枪结构设计

2.1 电子枪结构

所研制的冷阴极电子枪结构如图2所示。阴极、阳

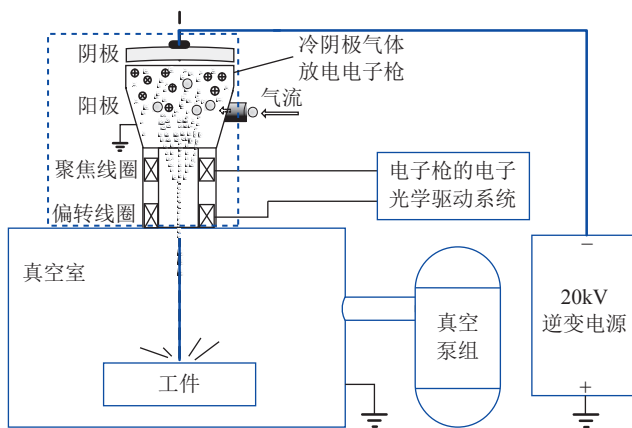


图1 冷阴极气体放电电子束源基本组成单元示意图

Fig.1 Schematic diagram of cold cathode gas discharge EB source construction

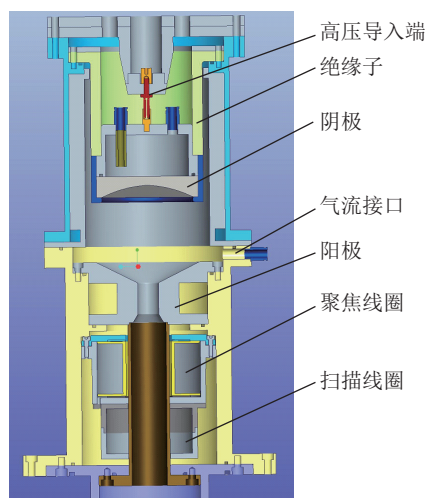


图2 冷阴极气体放电电子枪结构示意图

Fig.2 Structure diagram of cold cathode gas discharge EB gun

极、聚焦线圈、扫描线圈从上到下依次分布,且同轴。

阴极安装在绝缘子上,然后再通过绝缘子与电子枪壳体固定,绝缘子采用环氧树脂浇注而成,或采用其他耐高压、耐热的绝缘材料通过机械加工方式获得。

阴极内部设置水冷空腔,阴极顶部设置进水口和出水口,进水口的管道深入到水冷空腔的长度较大,出水口没有向水冷空腔延伸管道,这样便为阴极构成一个下进上出的水冷通道,带走阴极产生热量,保障阴极长期稳定工作。

阴极顶部设置高压导入端,通过高压导线与-20kV的逆变电源连接,阴极下表面为内凹的球面结构,当阴极施加高压,阳极接地时,在阴极与阳极之间便形成一个高压加速电场与静电汇聚场,高压加速电场使得阴极与阳极之间的电子加速;阴极下表面为内凹的球面结构与阳极的锥形上表面结构,将会在阴极与阳极之间场获得等离子体“阳极透镜效应”,使电子在阳极出束口位置汇聚,形成“注腰”^[14]。所设计的阴极直径90mm,阴极球面半径80mm。

阳极安装在阴极正下方,阳极上表面为内凹的锥形结构,内部设置水冷通道。阳极中心设置电子束流输出通道。阳极上表面为内凹的锥形结构的倾角与阳极孔的孔径都会影响电子束到达工件时的能量分布状态,经过仿真优化及试验验证,所设计电子枪阳极上表面锥形结构倾角为10°,阳极的孔径为20mm。

在阳极下方安装聚焦线圈,聚焦线圈内部为在中心开孔的“工”字型黄铜骨架上绕制的绕组,绕组由漆包线多层均匀密绕而成,外部包裹由DT4C材料制成的磁轭。

在聚焦线圈下方安装扫描线圈,扫描线圈设置X向和Y向线圈组,可以通过任意扫描电流波形使电子束在工件表面设定区域进行扫描,以便满足特殊的加工工艺需求。扫描线圈的结构在大量文献中均有论述,本文不再赘述。

2.2 电子枪的电子光学系统设计

冷阴极电子枪的电子光学系统包括阴极与阳极组成的静电汇聚系统和聚焦线圈产生的电磁聚焦系统,静电汇聚系统在冷阴极电子枪设计制造完成后,参数基本固定。通常采用电磁聚焦线圈产生的轴向磁场,为沿电子束流通道轴向向周边发散的电子提供一个指向轴心的力,使电子由直线运动转变成指向轴心的螺旋线运动,电子束到达工件表面,汇聚成能量达到MW/m²的束斑。

聚焦线圈在冷阴极电子枪中的工作原理类似电磁透镜,电磁透镜成像原理与普通光学透镜成像类似,其示意图如图3所示。

磁透镜是根据长螺线管内部产生均匀磁场具有聚焦能力的特点制作而成的外带磁轭的环形绕组结构。电磁透镜焦距的计算公式^[14-15]如式(1)所示。

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mU_A} \times \int_{-\infty}^{+\infty} B^2(z) dz \quad (1)$$

式中, f 为焦距; m 为电子质量, $m=9.10938215 \times 10^{-31}$ kg; U_A 为加速电压; $B(z)$ 为磁感应强度; e 为电子电荷量,等于 1.6×10^{-19} C。

磁感应强度 $B(z)$ 可由式(2)求得。

$$B(z) = B_0 (N \times I_1, S/D) \quad (2)$$

式中, N 为线圈匝数; B_0 为聚焦线圈中心最大磁感应强度; I_1 为线圈中流过电流; S 为聚焦线圈高度; D 为聚焦线圈内径。

对于外带磁轭聚焦线圈,磁场更加集中,轴向磁感应强度分布可用式(3)表示。

$$B(z) = B_0 \operatorname{sech}^2(2.63z/2R) \quad (3)$$

式中, z 为以电磁聚焦线圈为0点,沿 z 轴的距离; R 为电磁线圈平均半径。

将式(3)代入式(1),并考虑磁感应强度应该满足安培定律的需求,则焦距可表示为

$$\frac{1}{f} = \frac{0.44\mu_0^2 N^2 I_1^2 \eta}{7.89RU} \quad (4)$$

式中, U 为加速电压; η 为荷质比 $\frac{e}{m}$; μ_0 为真空磁导率;如果式中的各单位全部采用实用单位制,则

$$f = 65 \frac{UR}{(NI)^2} \quad (5)$$

式中, R 为电磁线圈平均半径; NI 为安匝数。

在图3中,将电子通过阳极孔后形成的电子“注腰”作为物点,“注腰”到聚焦线圈构成的电磁透镜中心距离作为物距 a ,经过电磁透镜后在工件上形成像点,像点至电磁透镜中心距离为像距 b ,光学透镜成像公式在此依然适用,则

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (6)$$

一般根据工作经验,可将电子“注腰”位置设置在阳极出束口的下端,则物距 a 为阳极出束口的下端至电磁透镜中心距离;根据电子枪最大工作距离(真空室内壁至工件距离) L ,及电磁透镜中心至电子枪最下端距离 L_0 ,可令像距 b 等于 $L+L_0$ 。再根据式(6)可得到焦距 f ,通过式(5)确定聚焦线圈的 NI ,电磁线圈磁轭、绕线匝数设计完成后,通过调整电流 I ,可以改变焦距 f 。

根据设计要求,电子枪的最大工作距离为500mm,而电磁透镜中心至电子枪最下端距离包括1/2聚焦线圈的厚度、50mm的偏转扫描线圈的厚度、30mm真空室壁厚等,则实际像距为(500+70+50+30)mm,物距是从阳极下表面到聚焦线圈形成的磁透镜中心距离约为127mm,根据式(6)可计算出焦距为106.2mm。进一步根据式(5)

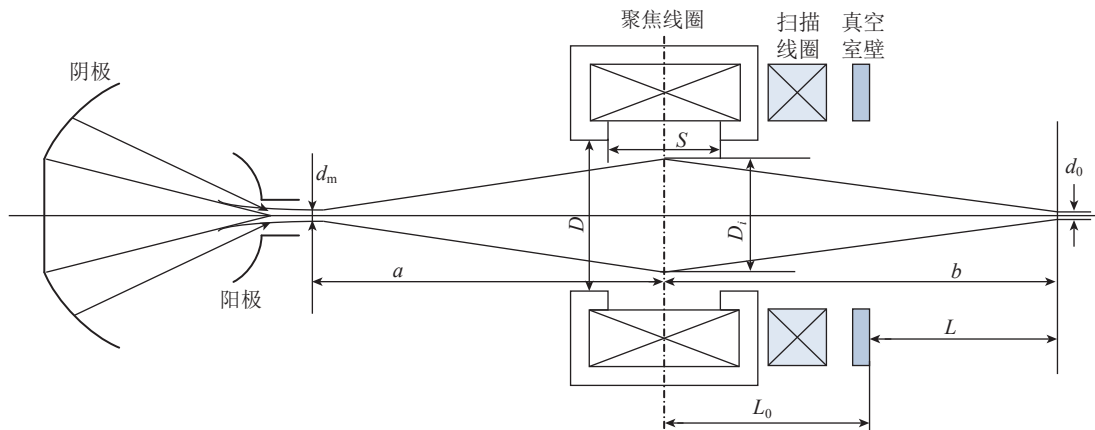


图3 冷阴极电子枪的电子光学系统示意图

Fig.3 Electron optical system of cold cathode gas discharge EB gun

可计算出 NI , 加速电压为 -20kV , 电磁线圈平均半径为 80mm , 可计算出 NI 等于 989.5 安匝, 根据设计经验, 一般实际使用 NI 参数是计算值的 $1.2\sim 1.5$ 倍, 实际取 1200 安匝, 采用 0.71mm 的漆包线绕制, 内阻 15Ω 左右。

3 电源拓扑结构及其控制电路

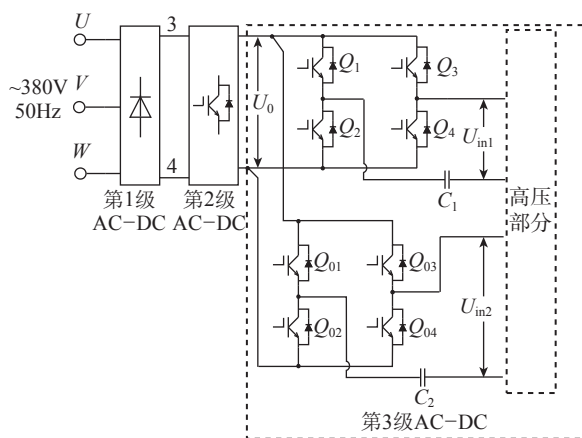
3.1 主电路拓扑

冷阴极气体放电电子枪的逆变电源主要由低压部分和高压部分组成, 其中低压部分又包括第 1 级 AC-DC 变换电路、第 2 级 AC-DC 变换电路、第 3 级 AC-DC 变换电路的全桥逆变电路部分; 高压部分主要由高压逆变功率变压器、高压整流滤波电路、限流电阻、高压采样电路等组成。所研制的冷阴极气体放电电子枪的逆变电源拓扑电路如图 4 所示。

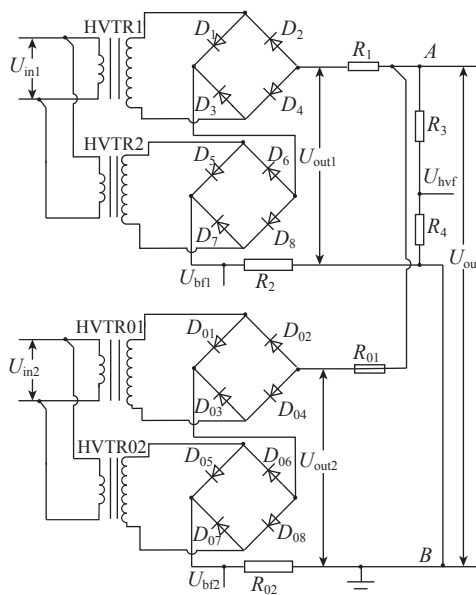
在图 4 (a) 中, 第 1 级 AC-DC 变换电路主要由三相全桥整流滤波电路组成; 第 2 级 AC-DC 变换电路由 4 只 IGBT 开关管全桥逆变电路、1:1 隔离变压器及整流滤波电路组成。三相 380V 交流电压经过第 1 级 AC-DC 变换电路转换成 500V 直流电压, 再经过第 2 级 AC-DC 变换, 转换成 $0\sim 500\text{V}$ 可调的直流电压 U_0 。这一可调直流电压 U_0 为 $Q_{01}\sim Q_{04}$ 、 $Q_{11}\sim Q_{14}$ 大功率 IGBT 模块组成的两组全桥逆变电路的输入, 两组全桥逆变电路分别将所述直流电压 U_0 转化成 20kHz 的交流电压 U_{in1} 、 U_{in2} , U_{in1} 、 U_{in2} 分别作为与之相连高压功率变压器的输入, 其中电容 C_1 、 C_2 为隔直电容。

考虑到冷阴极气体放电电子枪工作过程中经常出现放电现象, 第 3 级 AC-DC 变换电路的全桥逆变电路需要流过很大尖峰电流。为了满足冷阴极电子枪长期稳定工作要求, 通过提高这一级 IGBT 模块的裕量来满足要求, 所研制逆变器中的 $Q_{01}\sim Q_{04}$ 、 $Q_{11}\sim Q_{14}$ 大功率 IGBT 模块选择英飞凌的 FF300R12KS4, 电流保护点设置在 210A 。

高压部分是由两组同等功率、相同拓扑结构的整流



(a) 低压部分



(b) 高压部分

图4 电源拓扑电路

Fig.4 Circuit topology of power supply

滤波电路并联组成, 如图 4 (b) 所示。高压逆变功率变压器 HVTR1、HVTR2 的原边并联, 其输入为 IGBT 模

块 $Q_1 \sim Q_4$ 组成的全桥逆变电路输出的 20kHz 左右的交流方波 U_{in1} ; 高压逆变功率变压器 HVTR1、HVTR2 的原边输入为 IGBT 模块 $Q_{01} \sim Q_{04}$ 组成全桥逆变电路输出的 20kHz 左右的交流方波 U_{in2} ; 高压功率变压器 HVTR1、HVTR2 的输出端分别经过图 4 (b) 所示电路整流后, 再经限流电阻 R_1 连接冷阴极气体放电电子枪的阴极; $D_1 \sim D_4$ 组成的全桥整流电路与 $D_5 \sim D_8$ 组成的全桥整流电路串联; $D_5 \sim D_8$ 组成的全桥整流电路正端通过束流采样电阻 R_2 接地。

另外一组与 HVTR01、HVTR02 相连接的整流滤波电路各个器件之间连接如图 4 (b) 所示, 不再赘述。

通过两组高压逆变功率变压器原边并联, 副边整流后串联组成一个高压功率输出单元, 两个或多个高压功率输出单元并联的模式, 既可以满足冷阴极电子束源大功率输出需求, 又可以降低高压逆变功率变压器设计制造难度, 以及整流高压二极管、限流电阻等的选型难度。

图 4 (b) 中所示高压逆变功率变压器的原副边变比均为 1:22, 分别将输入的 0~500V 变化的低压交流电压转化成 0~11000V, 频率相同的高压交流电压; HVTR1、HVTR2 的副边分别连接的两组整流电路串联, 将输入的 U_{in1} 变成负高压直流电压; HVTR01、HVTR02 的副边分别连接的两组整流电路串联, 将输入的 U_{in2} 变成负高压直流电压; 当第 2 级 AC-DC 输出电压在 0~500V 范围内变化时, 第 3 级 AC-DC 在 A 点与 B 点之间输出高压直流电压的变化范围为 0~-22000V。

图 4 (b) 全桥整流电路中每个二极管承受电压需要达到 5000V 以上, 且所研制电源最大输出功率要达到 30kW, 需要至少 1500mA 束流输出, 因此选择参数为 40kV/3A 的高压二极管以满足设计要求。

同时为了降低放电尖峰, 将放电尖峰电流限制在高压二极管的承载范围内, 分别采用限流电阻 R_1 、 R_{01} 进行限流, R_1 与 R_{01} 均由 68Ω/17W 的功率电阻 4 只并联后共串联 100 次组成 1.7kΩ 电阻, 当电子枪工作过程中发生放电现象, 最大尖峰电流能够被限制在 11.8A, 所选高压二极管的最大正向浪涌电流达到 60A, 可以满足设计要求。在正常束流输出时, 最大束流输出, 每只电阻流过 187.5mA 电流, 每只电阻功率仅有 2.3W, 可以满足电源长期工作的要求。

高压采样电路由电阻 R_3 、 R_4 串联而成, 其中分压电阻 R_3 由 12 只 50MΩ/50kV 的高压电阻串联组成, R_4 的阻值均为 270kΩ, 相对于 R_3 而言, R_4 的阻值极小, 高压采样电压 U_{hvf} 可以采用下式计算:

$$U_{hvf} = \frac{R_4}{R_3} \times U_{out} \quad (7)$$

当电源输出电压 U_{out} 均为 -20000V 时, 采样电压

U_{hvf} 为 -9V。

束流采样电阻 R_2 、 R_{02} 分别由两只 12Ω/50W 电阻并联而成, 通过检测 R_2 、 R_{02} 两端电压 U_{bf1} 和 U_{bf2} , 可以计算出束流 I_b 大小。

$$I_b = \frac{U_{bf1}}{R_2} + \frac{U_{bf2}}{R_{02}} \quad (8)$$

当束流采样电阻 R_2 、 R_{02} 两端采样电压之和达到 9V 时, 束流达到 1500mA。

3.2 控制电路

所设计电源低压部分电路中第 2 级 AC-DC 电路中的 IGBT 全桥逆变电路与第 3 级 AC-DC 电路中的 IGBT 全桥逆变电路采用不同的控制模式, 第 3 级 AC-DC 电路中的 IGBT 全桥逆变电路采用定频满脉宽的控制模式, 驱动两组 IGBT 全桥电路的 PWM 信号来自同一个 SG3525A, 且 PWM 信号同步。

所设计冷阴极气体放电电子枪逆变电源的输出电压可通过改变第 2 级 AC-DC 电路的输出电压来调节。这种控制方式可有效提高电源工作的稳定性, 第 2 级 AC-DC 电路的 IGBT 全桥电路采用了内、外环控制相结合的方式。

由于所设计的逆变电源既要用于冷阴极气体放电电子枪中气体电离, 又要加速电子, 在冷阴极气体放电电子枪的放电腔室内, 极易出现电弧放电现象。电弧放电表现为低压大电流, 极易破坏冷阴极气体放电电子枪稳定工作的条件, 因此设置放电脉冲尖峰进行监测。当发生电弧放电时, 将第 2 级 AC-DC 电路中的 IGBT 全桥逆变电路与第 3 级 AC-DC 电路中的 IGBT 全桥逆变电路中所有 IGBT 模块关闭数 ms, 电弧放电消失后, 则重新恢复各个 IGBT 模块正常工作, 以保证电子束流的稳定输出。所设计电源的闭环控制电路原理框图如图 5 所示。

高压采样电路采集的高压反馈 U_{hvf} 与外部高压给定

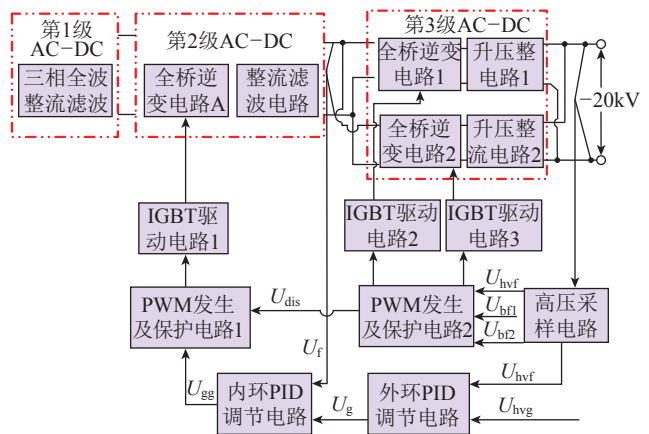


图 5 电源控制电路框图

Fig.5 Schematic diagram of control circuit in power supply

信号 U_{hvg} 作为外环 PID 调节电路的输入,其输出值 U_g 与第 2 级 AC-DC 输出电压的反馈信号 U_f 作为内环 PID 调节电路的输入,内环 PID 调节电路输出 U_{gg} 再调节 PWM 发生及保护电路 1 所产生的 PWM 脉冲宽度,从而改变全桥逆变电路 A 中 IGBT 的开通时间,继而导致第 3 级 AC-DC 输入的直流电压改变,从而使电源输出电压得到调节。因此,当闭环调节电路稳定时,所设计逆变电源的输出电压就与设定值相等,大大提高了电源输出的稳定度。

高压采样信号 U_{hvf} 与束流反馈信号 U_{bf1} 、 U_{bf2} 输入到 PWM 发生及保护电路 2,在此控制电路中,如果检测到反馈高压信号很低且反馈束流很大,持续时间超过 $10\mu\text{s}$,则控制系统将关断全桥逆变电路 1、全桥逆变电路 2 中的所有 IGBT 模块,并且 PWM 发生及保护电路 2 将放电保护信号 U_{dis} 输入到 PWM 发生及保护电路 1,使全桥逆变电路 A 中的 IGBT 模块关闭,在数 ms 后重新开通第 3 级 AC-DC 变换电路中全桥逆变电路 1、全桥逆变电路 2 中的 IGBT 模块, PWM 发生及保护电路 2 正常输出满脉宽 PWM 信号; PWM 发生及保护电路 1 按照软启动方式使全桥逆变电路 A 中的 IGBT 模块的驱动 PWM 信号脉宽逐渐达到 U_{gg} 设置脉冲宽度。

4 束源输出特性分析

将所研制的冷阴极气体放电电子束源系统与真空系统、水冷系统、气流量控制系统等进行集成,组成一套冷阴极电子束流品质检测分析试验平台。对束流形貌特征、加速电压对束流输出的影响、气流种类及气流量对束流输出的影响、最大束流等进行了检测分析。

4.1 束流形貌特征分析

冷阴极气体放电电子束源是基于气体放电产生等离子体的一种电子束源。所采用的放电气体不同,束流呈现颜色和输出稳定性差异较大。在采用纯铝做阴极时,常用氢气、氧气混合气体或氦气、氧气混合气体作为放电气体。图 6 是采用纯氦气作为放电气体时的束流形貌,可以看出,束流呈现淡绿色光柱,在冷阴极气体放电电子枪束流输出口束流直径较大,到工件表面,汇聚成直径 5mm 左右圆形束斑,可使金属材料熔化。

4.2 气体种类及加速电压对束流输出的影响

真空达到 0.1Pa 以下,采用纯氦气、纯氩气、空气作为放电气体,氦气流量给定分别为 $0.1\text{L}/\text{min}$ 、 $0.15\text{L}/\text{min}$; 氩气流量给定分别为 $0.01\text{L}/\text{min}$ 、 $0.03\text{L}/\text{min}$; 空气流量给定分别为 $0.01\text{L}/\text{min}$ 、 $0.03\text{L}/\text{min}$ 。调整第 2 级 AC-DC 输出电压,使高压反馈电压从 0 开始,每次增加 -0.3V ,即加速电压每次增加 -667V ,逐渐增加到最大,记录高压反馈电压对应的束流输出,检测结果如图 7 所示。可以看出,加速电压较小时,即使有气流量输入,也无法检

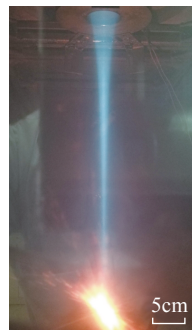


图 6 氦气为工作气体的冷阴极气体放电电子束流
Fig.6 Cold cathode gas discharge EB current of He gas

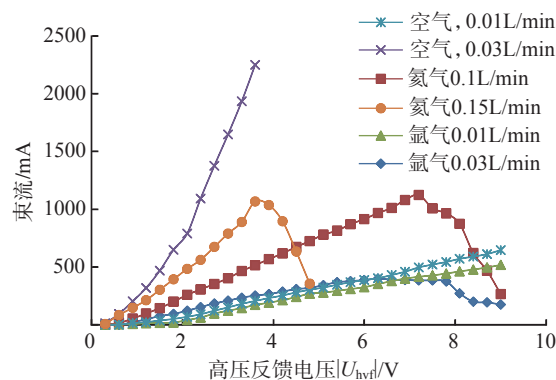


图 7 加速电压对应束流输出的关系曲线
Fig.7 Relational curves between accelerating voltage and electron beam current

测到束流;采用氦气、氩气作为放电气体,给定气流量 $\geq 0.03\text{L}/\text{min}$ 时,在加速电压大于一定值,较长时间工作后,出现束流逐渐下降现象。这种现象的发生与测试条件和工作时间有关,由于逐点检测耗费时间较长,纯铝阴极表面的氧化膜被正离子轰击而大量消耗,而所采用的放电气体为纯度 99.99% 的纯氦或纯氩气,无法使纯铝阴极表面的氧化膜得到补充,由于纯铝的电子发射能力远小于氧化铝,所以采用纯氦气或纯氩气工作时间较长后,束流会逐渐下降,最终会达到数百 mA 的稳定值;采用空气、氩气作为放电气体,给定气流量 $\leq 0.01\text{L}/\text{min}$ 时,束流输出随着加速电压增大而增大;空气气流量达到 $0.03\text{L}/\text{min}$ 时,随着加速电压增大,束流快速增大,在反馈电压达到 -3.6V 时,反馈束流达到了 2000mA 以上,束源输出表现为低压大电流,这与空气中富含大量氧气,可以使纯铝阴极表面的氧化膜得到快速修复有关。

4.3 气流量对束流输出的影响

加速电压给定不变,高压反馈电压为 -9V ,氦气气流量从 0 逐渐增加到 $0.2\text{L}/\text{min}$,每次增大 $0.01\text{L}/\text{min}$,快速记录给定气流量对应的束流输出,检测结果如图 8 所示。可以看出,气流量 $< 0.05\text{L}/\text{min}$ 的时候,没有束流输出,气流量 $\geq 0.05\text{L}/\text{min}$,才开始有束流输出,束流大小随着

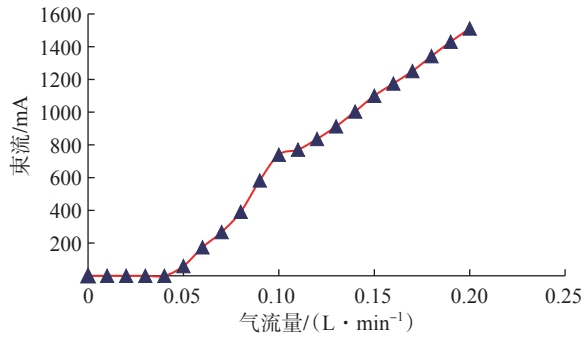


图8 氦气气流量与束流输出对应关系曲线

Fig.8 Relational curve between He gas flow and EB current

气流量的增大而增大,且线性度较好。

图9(a)是高压反馈电压 $-9V$ 不变时,检测束流达到 $1500mA$ 时,利用TPS2024示波器分别检测的束流 I_b 波形, I_b 为 $(U_{bf1}/R_2+U_{bf2}/R_{02})$ 的值。

图9(b)和(c)分别为第3级AC-DC电路中的一个IGBT全桥逆变电路的电压 U_{in1} 与电流 U_{in1} 的波形。可以看出,当 U_{in1} 为最大幅值 $400V$ 左右的交流方波, U_{in1} 峰值电流仅有 $50A$,第3级AC-DC电路中的IGBT全桥逆变电路的IGBT均采用FF300R12KS4模块,其工作电压 $1200V$,最大工作电流 $300A$,所选择功率器件的裕量足够大,完全能够满足大尖峰电流经常出现的工作环境。

此外,在最大束流输出时,分别采用TPS2024示波器对第3级AC-DC电路中的两个IGBT全桥逆变电路的 U_{in1} 、 U_{in2} 及电流进行检测,发现第3级AC-DC电路中的两个IGBT全桥逆变电路的输出电压 U_{in1} 与 U_{in2} ,以及电流波形基本一致,表明采用两组全桥逆变电路并联模式能够同步工作,输出功率基本一致,可以保障冷阴极气体放电电子束源长期稳定工作、大功率输出的需求。

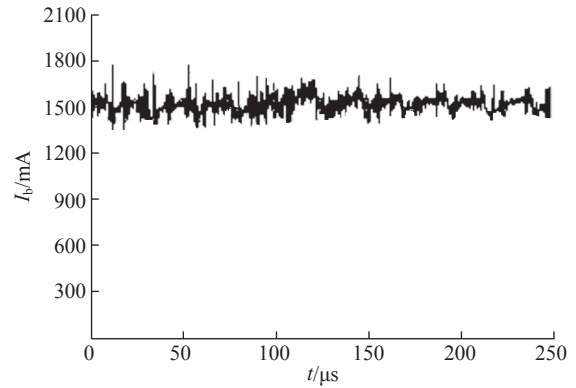
5 结论

(1) 基于冷阴极电子发射机理与理论计算方法,设计制造出冷阴极气体放电电子枪及其电子光学系统。

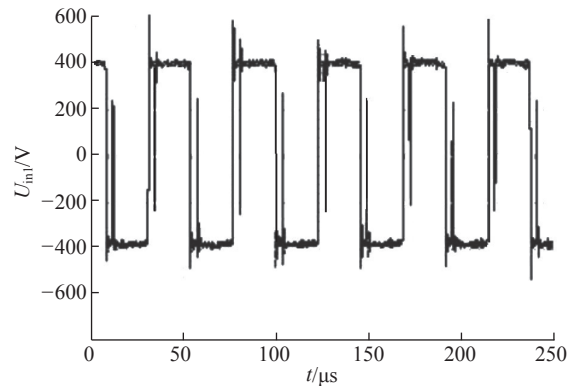
(2) 采用三级AC-DC拓扑电路结构、功率变压器原边并联与输出端整流电路串联获取高压的电路、双闭环控制技术及放电保护策略等,设计制造了冷阴极气体放电电子枪逆变电源。

(3) 基于所研制冷阴极气体放电电子枪及其逆变电源等组成的冷阴极气体放电电子束源,采用惰性气体易出现束流降低现象,采用富含氧气的空气可获得低压大束流的输出特性,在加速电压 $-20kV$,纯氦气流量 $0.2L/min$ 的可实现最大 $1500mA$ 束流输出。

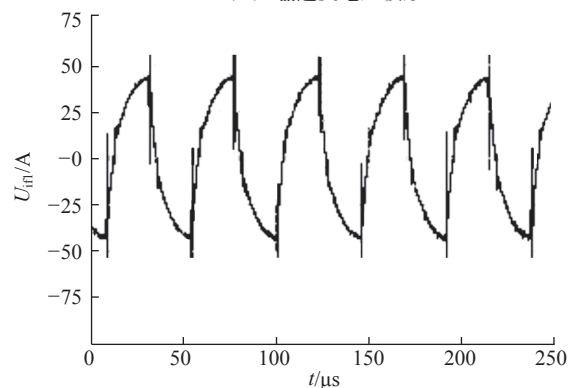
(4) 第3级AC-DC电路中两组IGBT全桥逆变电路的电流、电压基本一致,可以保障冷阴极气体放电电子束源长期稳定工作、大功率输出的需求。



(a) 束流反馈信号波形



(b) U_{in1} 逆变电压波形



(c) U_{in1} 逆变电流波形

图9 束流反馈与第3级AC-DC电路中全桥逆变电路电压电流波形

Fig.9 Feedback signal of electron beam and output waveform of the third AC-DC circuit of inverter power supply

参考文献

- [1] FELBA J, FRIEDEL K, PRZYBECKI K. Application of glow discharge electron gun to surface modification[J]. Vacuum, 1990, 41(7-9): 2177-2180.
- [2] TUTYK V A, GASIK M I. Energy parameters of gas-discharge electron guns used to melt product surfaces[J]. Russian Metallurgy (Metally), 2008(7): 597-602.
- [3] DENBNOVETSKY S V, MELNYK V G, MELNYK I V. High-voltage, glow-discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realizing different technological operations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 987-993.
- [4] KOVALCHUK D, MELNYK V, MELNYK I, et al. Prospects

of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing [J]. *Elektrotechnica and Electronica*, 2016, 5-6: 36-42.

[5] 孙照富, 尹中荣. 一种 600kW 气体放电电子枪及其使用方法: CN103887131A[P]. 2014-06-25.

SUN Zhaofu, YIN Zhongrong. A 600kW gas discharge electron gun and its application method: CN103887131A[P]. 2014-06-25.

[6] 刘春飞, 张益坤. 电子束焊接技术发展历史、现状及展望(V) [J]. *航天制造技术*, 2003(5): 48-52.

LIU Chunfei, ZHANG Yikun. Development history, status and tendency of electron beam welding technology(V)[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2003(5): 48-52.

[7] 韦寿祺, 莫金海, 何少佳. 电子束轰击炉高压电源故障分析及对策 [J]. *高电压技术*, 2009, 35(9): 2197-2201.

WEI Shouqi, MO Jinhai, HE Shaojia. Fault analysis and countermeasures for high voltage source of electron beam bombarding furnace[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(9): 2197-2201.

[8] 张伟, 杜慧聪, 齐铂金, 等. 150kV/30kW 逆变式电子束焊接高压电源设计 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(11): 1531-1536.

ZHANG Wei, DU Huicong, QI Bojin, et al. 150kV/30kW inverter for electron beam welding power supply design[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(11): 1531-1536.

[9] 许海鹰, 余伟, 左从进. 高压脉冲电子束的控制及其对焊缝形貌影响 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(8): 1044-1048.

XU Haiying, YU Wei, ZUO Congjin. High voltage pulse electron beam control strategy and influence on weld bead shape[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(8): 1044-1048.

[10] DENBNOVETSKY S V, MELNYK I V, MELNYK V G, et al. High voltage glow discharge electron guns and its advanced application examples in electronic industry[C]//2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo). Kiev: IEEE, 2016.

[11] DENBNOVETSKY S V, MELNYK V I, MELNYK I V. High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its technological application[C]//20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Piscataway: IEEE, 2002: 111-114.

[12] FEINAUGLE P, MATTAUSCH G, SCHMIDT S, et al. A new generation of plasma-based electron beam sources with high power density as a novel tool for high-rate PVD[C]//Society of Vacuum Coaters 54th Annual Technical Conference Proceedings. Chicago, 2011.

[13] KRAUZE A, VIRBULIS J, KRAVTSOV A. Modeling electron beam parameters and plasma interface position in an anode plasma electron gun with hydrogen atmosphere[J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, 355(1): 012008.

[14] 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.

[15] 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.

(上接第 97 页)

[7] LI T, LOCKETT H. An investigation into the interrelationship between aircraft systems and final assembly process design[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 60: 62-67.

[8] FRANKENBERGER E. Concurrent design and realization of aircraft production flow lines—Process challenges and successful[C]//International Conference on Engineering Design 2007. Paris, 2007.

[9] GERTLER J. F-35 joint strike fighter (JSF) program[R/OL]. (2014-04-29)[2020-12-10]. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc306493/m1/1/high_res_d/RL30563_2014Apr29.pdf.

[10] 龚孝懿. 飞控系统区域安全性检查方法研究 [J]. *科技资讯*, 2011, 9(29): 34-35.

GONG Xiaoyi. Research on regional security inspection method of flight control system [J]. *Science & Technology Information*, 2011, 9(29): 34-35.

[11] MAS F, RÍOS J, MENÉNDEZ J L, et al. A process-oriented approach to modeling the conceptual design of aircraft assembly lines[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(1-4): 771-784.

[12] 李晓磊, 田瑾, 赵廷弟. 改进的区域安全性分析方法 [J]. *航空学报*, 2008, 29(3): 622-626.

LI Xiaolei, TIAN Jin, ZHAO Tingdi. Improved zonal safety analysis method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(3): 622-626.

[13] CHIESA S, CORPINO S, FIORITI M, et al. Zonal safety analysis in aircraft conceptual design: Application to save aircraft[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 227(4): 714-733.

[14] HASSON J, CROTTY D. Boeing's safety assessment processes for commercial airplane designs[C]//16th DASC. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Reflections to the Future. Irvine: IEEE, 1997.

[15] ALTFELD H H. Commercial aircraft projects: Managing the development of highly complex products[M]. London: Routledge, 2010.

[16] 李爱军, 武坚, 王长青. 飞机系统安全评估技术的发展 [J]. *航空制造技术*, 2012, 55(22): 26-29.

LI Aijun, WU Jian, WANG Changqing. Overview of aircraft system safety assessment technique[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(22): 26-29.

[17] 严拴航, 薛海红. 飞机区域安全性分析流程优化与实施方法 [J]. *航空科学技术*, 2014, 25(4): 36-41.

YAN Shuanhang, XUE Haihong. Aircraft zonal safety analysis diagram optimization and performing method[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2014, 25(4): 36-41.

[18] 李思宁, 张世炯, 李涛. 基于系统工程模型的飞机总装数字化集成工艺设计方法浅析 [J]. *航空制造技术*, 2015, 58(21): 73-76.

LI Sining, ZHANG Shijiong, LI Tao. Preliminary research of digital aircraft final assembly process design integration method based on system engineering model[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(21): 73-76.

通讯作者: 许海鹰, 研究员, 博士, 研究方向为高能束流加工技术。

(责编 阳光)

通讯作者: 李涛, 高工, 博士。

(责编 阳光)