

DOI: 10.3901/JME.2022.07.276

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^{*}

许海鹰^{1,2} 王壮¹ 彭勇² 杨光¹ 桑兴华¹ 杨波¹

(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: 为了提高电子束熔丝增材制造的质量和效率,开展了丝束同轴冷阴极电子束源关键技术研究。在分析丝束同轴冷阴极电子束产生机理的基础之上,研究丝束同轴:冷阴极电子枪的结构特点;采用三级AC-DC拓扑结构、加速电源内环-外环闭环控制电路、基于气流量调节的束流闭环控制电路等,研制了丝束同轴冷阴极电子束逆变电源;基于上述技术成果研制出了丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造样机。对丝束同轴冷阴极电子束源的束流形貌特征、逆变电源输出特性、熔丝成形工艺进行了检测分析,结果表明:与轴侧送丝的热阴极电子束熔丝成形技术相比,采用丝束同轴冷阴极电子束源的熔丝成形设备所制备的试样微观组织得到明显改善,为大型金属结构的熔丝成形提供技术储备。

关键词: 电子束;熔丝增材制造;丝束同轴;电子枪;逆变电源

中图分类号: TM924; TG434; TM8

Development of Gas Discharge Electron Beam Source of Electron Beam Coaxial Wire and Fuse Additive Manufacturing Applicability

XU Haiying^{1,2} WANG Zhuang¹ PENG Yong² YANG Guang¹ SANG Xinghua¹ YANG Bo¹

(1. Science and Technology on Power Beam Generator Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute,

Beijing 100024;

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

Abstract: In order to improve the quality and efficiency of electron beam fuse additive manufacturing, the key technology of gas discharge electron beam source of electron beam coaxial wire has been studied. Based on the analysis of the generation mechanism of the gas discharge electron beam, the structure characteristics of the gas discharge electron beam gun of beam coaxial wire are studied. The inverter power supply for electron beam coaxial wire electron beam gun is developed by adopting three-stage AC-DC topology, inner loop and outer loop closed-loop control circuit of the accelerating power supply, and the beam closed-loop control circuit based on the gas flow regulation. Based on the above technical achievements, the electron beam fuse additive manufacturing equipment of electron beam coaxial wire is developed. The electron beam morphology characteristics, inverter power supply output characteristics and fuse forming process of the gas discharge electron beam source of electron beam coaxial wire are tested and analyzed. The results show that the microstructure of the sample prepared by the technology of electron beam coaxial wire is obviously improved compared with the hot cathode electron beam fuse forming technology, and it has necessary technical reserve for large-scale fuse additive manufacturing.

Key words: electron beam; fuse additive manufacturing; electron beam coaxial wire; electron beam gun; inverter power supply

0 前言

国内外一些著名研究机构针对电子束熔丝增材

制造技术(Electron beam fuse additive manufacturing technology, EBAM)开展了大量研究^[1-6],其中国外具有代表性的研究机构为美国航空航天局兰利研究中心(NASA Langley Research Center)、美国西亚基公司(Sciaky)、英国谢菲尔德大学的核技术先进制造研究中心(Nuclear AMRC)。国内于2006年开始进行电子

^{*} 国家自然科学基金(51775527)和国防基础科研计划(JCKY2017205 A002)资助项目。20210401收到初稿,20211105收到修改稿

束熔丝增材制造技术的研究,中国航空制造技术研究院设立了电子束熔丝增材制造专业研究方向,针对热阴极电子束熔丝增材制造装备、钛合金结构成形工艺、性能可靠性等方面进行了深入研究,并于 2012 年和 2016 年在某型飞机上首次实现了电子束熔丝增材制造钛合金次承力结构和主承力构件的装机应用。

而以上研究机构所研制的电子束熔丝增材制造设备均是基于热阴极电子束源的室外定枪或室内动枪的轴侧送丝技术。

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^[7-9]。

2017 年,乌克兰红波公司在世界上率先研制出“X-beam”丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造设备^[10-11]。

针对航空航天领域对大型金属构件低成本、高效、高质量快速制造的迫切需求,及电子束熔丝增材制造技术发展的新趋势,中国航空制造技术研究院项目团队通过深入研究环形束斑冷阴极电子束产生机理、丝束同轴实现方法、束流精密调控等关键技术,于 2019 年研制出国内首台丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造样机^[12-13]。

本文在介绍丝束同轴冷阴极电子束产生机理基础之上,对丝束同轴冷阴极电子枪结构、逆变电源拓扑及其控制电路进行了分析,在所研制的丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造样机上对其束源的束流形貌特征、逆变电源输出特性进行了检测,并开展了熔丝成形工艺试验,对熔丝成形效率、成形样件微观组织进行了检测分析,结果表明所研制丝束同轴冷阴极电子束源成形效率、微观组织质量较高,具备了开展大型金属结构熔丝成形技术条件,为航空航天等国防工业及民用工业领域大型金属结构快速制造提供了一种优质技术储备。

1 电子束源组成及电子束产生机理

电子: 丝束同轴冷阴极电子束源由丝束同轴冷阴极枪、加速电源、气流量控制器及其他外围设备组成,其示意图如图 1 所示。

丝束同轴冷阴极电子束产生机理^[14]如下: 在零点几帕或几十帕的真空环境下,首先在阴极、阳极形成的放电腔体之间通入工作气体,再在阴极与阳极之间施加几千到数十千伏特的电压,使阴极、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阴-阳极构成的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-阳极之间的加速电压加速,并借助于特殊几何形状的阴极、阳极所建立起的电子光学系统,产生静电汇聚^[15],或经过电磁聚焦系统聚焦形成汇聚点可调的环形电子束。

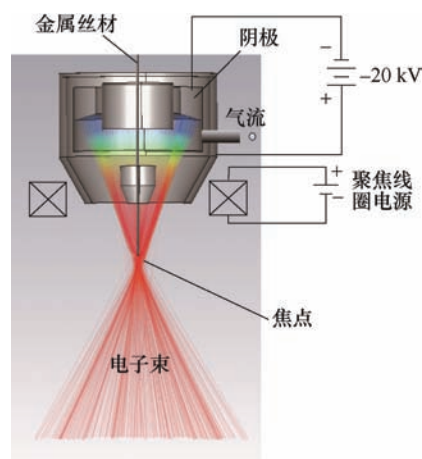


图 1 丝束同轴冷阴极电子束源示意图

金属丝材通过送丝机构沿电子枪轴线送入,在静电汇聚位置即焦点处熔化金属丝材,熔化的金属丝材按照预定轨迹层层堆积,即可形成一些与预设模型相一致的金属零件。

2 丝束同轴冷阴极电子枪结构设计

利用三维造型软件 Pro/E 设计的丝束同轴冷阴极电子枪剖面图如图 2a 所示。

丝束同轴冷阴极电子枪主要包括阴极、阳极、导丝管、丝嘴、电极、绝缘柱等,其中阴极、阳极导丝嘴以导丝管的轴线为轴对称中心进行同轴安装;绝缘柱均为空心管结构,电极通过其中一个绝缘柱的中心与阴极相连,绝缘柱保证了电极、阴极与外壳绝缘,并实现了阴极与外壳固定的作用。

如图 2b 所示的阴极为环形结构,电子发射面为弧形,保证电子能在丝端附近汇聚。阴极内部设置水冷通道,阴极中心嵌套陶瓷绝缘环,起到与丝嘴绝缘的作用,陶瓷绝缘环下段斜面结构,有助于放电气体均匀扩散。阴极内部通水冷却,延长阴极的使用寿命。

为了保障环形束斑冷阴极电子枪长期稳定工作,除了为阴极设置了水冷通道,阳极、导丝管内部也设计了水冷通道;由于阴极连接-20 kV 电压,其水冷系统需要与其他水冷相互独立;阳极在出束

端设计成锥面结构,这种设计不但可以进一步提高电子束的汇聚效果,还可以防止大量金属蒸气侵入枪体内部,污染阴极表面。

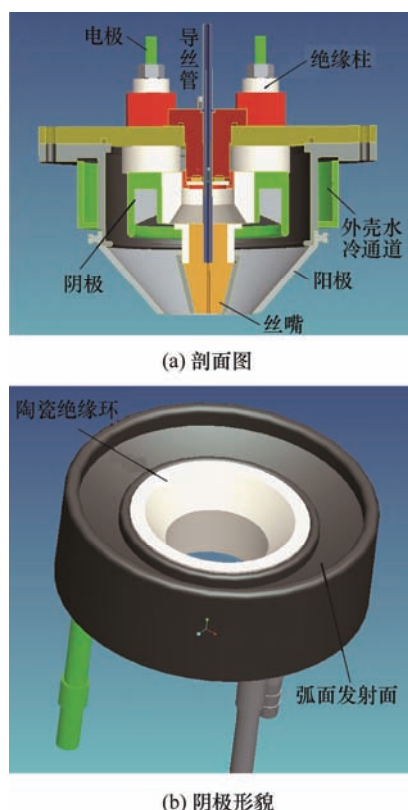


图 2 丝束同轴冷阴极电子枪结构

3 逆变电源拓扑及其控制电路设计

3.1 加速电源拓扑电路

加速电源由三级 AC-DC 电路串联而成,其拓扑电路如图 3 所示。

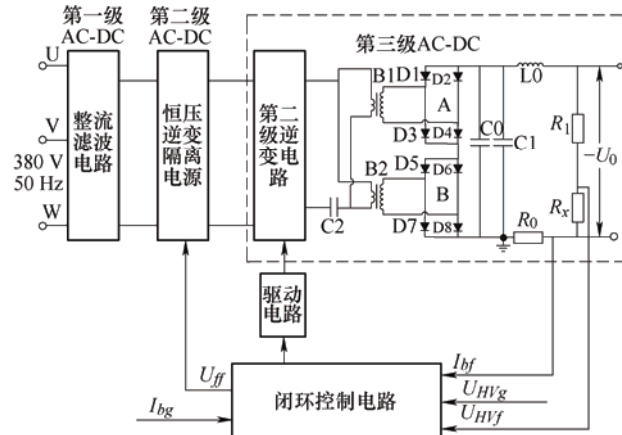


图 3 加速电源拓扑电路

三相全桥整流滤波电路组成第一级 AC-DC 电路,三相 380 V 交流电经第一级 AC-DC 电路后得到约 500 V 的直流电,输入到由恒压逆变隔离电源组

成的第二级 AC-DC 电路,第二级 AC-DC 电路由一个全桥逆变电路、1:1 隔离变压器、全波整流电路、LC 滤波电路组成,经过第二级 AC-DC 电路可得到电压稳定可调的直流电。该直流电作为第三级 AC-DC 电路中第二全桥逆变电路的输入,第二全桥逆变电路将所述直流电转化成 20 kHz 的交流电,作为变压器 B1、B2 的输入,其中电容 C2 为隔直电容。

第三级 AC-DC 的整流电路部分安装于高压油箱内部。D1、D2、D3、D4 组成的整流桥 A 的正端与 D5、D6、D7、D8 组成的整流桥 B 的负端联接,整流桥 B 的正端接地。变压器 B1、B2 的输出端分别与整流桥 A、整流桥 B 的输入端联接;每个变压器输出电压为 10 000 V,经过串联以后,整流桥 A 的负端输出 -20 000 V,变成负高压直流电,经过 L0 限流后,联接到丝束同轴冷阴极电子枪的阴极。

第三级 AC-DC 中的整流二极管均为 2CLG40KV/6A,滤波电容采用 2 μF/30 kV 的高压电容,这样既可保证在 20 kHz 的 PWM 脉冲周期内,电容被充满,输出电压、束流微波较小,又可以满足设备长期稳定工作的需求。

所研制加速电源的电压、电流变化经过三级 AC-DC 转化,第一、第二级 AC-DC 均为小于 500 V 的低压,第三级 AC-DC 既包括了 20 kHz 交流方波的低压,又包括远大于工频电压的 -20 kV 高压。低压与高压部分通过高压逆变功率变压器 B1、B2 隔离。

为了使束流实时可调,并增强加速电源工作的可靠性、稳定性,将束流给定信号 I_{bg} 、束流反馈信号 I_{bf} 、工作电压给定信号 U_{HVg} 、高压反馈信号 U_{HVf} 引入到闭环控制电路中,由闭环控制电路经过 PID 调节后,分别调整加速电源中功率开关管开通/关断时间,以及流量控制器输出气流量大小,以达到束流输出实时可调目的,并对加速电源进行快速保护。

3.2 控制电路

3.2.1 加速电源电压闭环控制电路

加速电源电压闭环控制电路如图 4 所示。

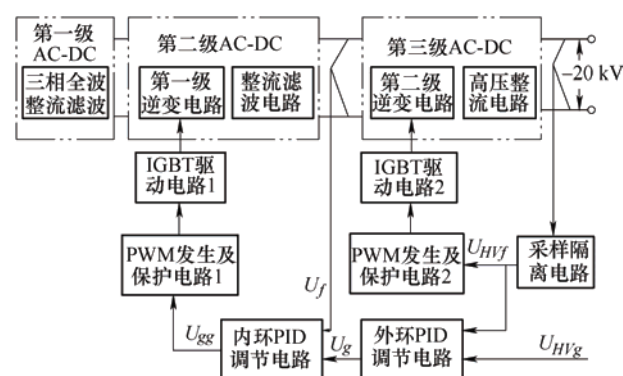


图 4 加速电源电压闭环控制电路框图

PLC 控制系统输出的加速电压给定信号 U_{HVg} 、高压反馈信号 U_{HVf} 作为外环 PID 调节电路的输入, 其输出值 U_g 与第二级 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, 从而改变第一级逆变电路中 IGBT 的开通时间, 继而使第二级 AC-DC 输出的直流电压相应变化, 从而使加速电压的输出得到调节。因此, 当闭环调节电路稳定工作时, 加速电压的输出电压就与设定值相等, 极大地提高了加速电压输出的稳定度。

3.2.2 束流闭环控制电路

将模数混合控制技术引入到束流闭环控制系统中, 将束流给定信号 I_{bg} 、束流反馈信号 I_{bf} 、高压反馈信号 U_{HVf} 引入到气流量控制系统中。由于在给定加速电压条件下, 束流大小与输入到冷阴极电子束源放电腔室内的气流量大小密切相关, 通过气流量的精确控制可使束流得到精确调节。束流闭环控制电路如图 5 所示。

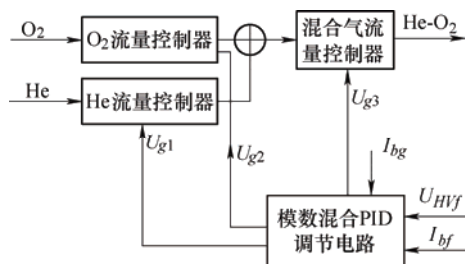


图 5 束流反馈控制电路框图

如图 5 所示, 束流反馈信号 I_{bf} 与束流给定信号 I_{bg} 作为模数混合 PID 调节电路的输入, 该 PID 调节电路的输出值 U_{g3} 作为混合气流量控制的输入, 改变 U_{g3} 的大小, 即可调节混合气流量控制器输出的氦-氧混合气体流量大小, 从而实现束流调节; 模数混合 PID 调节电路中采用 Microchip 公司单片机 PIC18F2423 作为主控芯片, 将常用的气流量与束流对应值以数据表形式予以存储, 再根据设定束流 I_{bg} 信号, 分别输出 U_{g1} 、 U_{g2} 给 He 流量控制器、O₂ 流量控制器。

将高压反馈信号 U_{HVf} 引入模数混合 PID 调节电路, 目的在于根据反馈加速电压、束流信号, 判断是否出现低压大束流电弧放电现象发生, 如果出现此类现象, 则向加速电源、PLC 控制系统输出高电平报警信号, 并快速减小混合气流量控制器的给定信号 U_{g3} , 减小放电束流, 以达到保护冷阴极电子束源的目的。

4 束源性能检测及熔丝成形工艺试验

将所研制的丝束同轴冷阴极电子枪、逆变电源、真空系统、控制系统等进行系统集成, 组成丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造设备样机, 如图 6 所示, 其电子束熔丝成形增材制造零件的范围为 400 mm×400 mm×500 mm, 丝束同轴冷阴极电子束源功率 20 kW, 工作电压 -10 kV~-20 kV, 最大束流 1 000 mA。在此设备上对丝束同轴冷阴极电子束流形貌、逆变电源输出特性进行检测分析; 并检测了成形效率、TC4 钛合金成形样件的微观组织, 通过以上试验结果分析所研制丝束同轴冷阴极电子束源的工艺适用性。

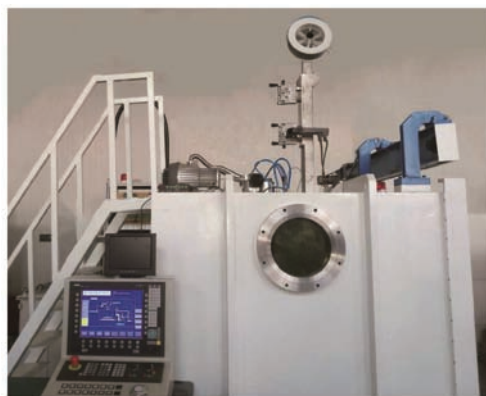


图 6 丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造设备: 样机

4.1 束流形貌特征

在真空度达到 10^{-2} Pa 以下, He 气流量 120 L/min, O₂ 气流量 3 mL/min, 工作电压 -12 kV, 束流 300 mA, 丝束同轴冷阴极电子束流形貌如图 7 所示。束流颜色会根据放电气体不同而有所差异, 放电气体的主体为氦气的电子束流对外表现为淡绿色。

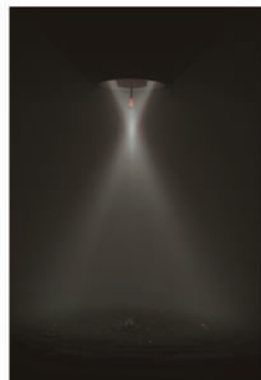


图 7 丝束同轴冷阴极电子束流形貌

从图 7 中可以看出, 环形电子束流以丝材为轴

对称中心按照一定角度向下输出,在距离丝端数十毫米处汇聚成一段高亮度电子束汇聚区域,表明在该区域电子高度集中,电子束能量很高,该区域即为丝束同轴冷阴极电子枪的静电汇焦点,通过该区域,电子束由于电荷的空间斥力作用,逐渐发散,到达工件表面呈现一个中空环形束斑。

由于所述静电汇焦点是一个十多毫米长的能量高度集中区域,丝材通过该区域,会经历丝材预热、熔化、熔滴过渡等过程,合理调节束源功率、送丝速度、工作台与丝端距离、工作台运动速度,不但能将热输入集中在丝材上,减少工件上额外热输入,而且能够实现金属液滴“搭桥过渡”模式,有利于减少飞溅,有效提高成形质量。

4.2 逆变电源输出特性检测分析

4.2.1 空载试验

当加速电源第二级全桥逆变电路输出 20 kHz、幅值 175 V 左右的交流方波时,高压采样电路采集信号达到 -9.07 V,表明所研制的丝束同轴冷阴极电子束源的空载电压达到 -20 kV,测试的波形如图 8 所示。图中 CH1 为高压反馈信号,CH2 为第二级全桥逆变电路输出电压波形。

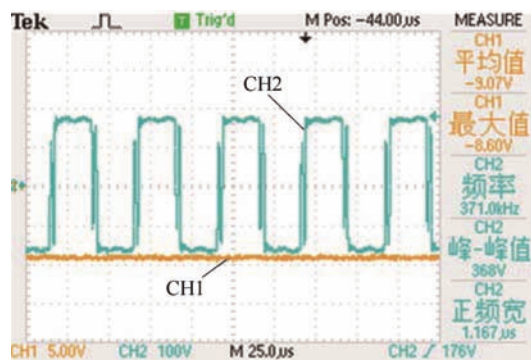


图 8 空载时逆变电路输出波形与反馈高压信号

图 9 是在气流量输入为零,空载时,高压加速电源的第二级 AC-DC 输出的直流电压对应加速电压输出的特性曲线,加速电压以正值表示。

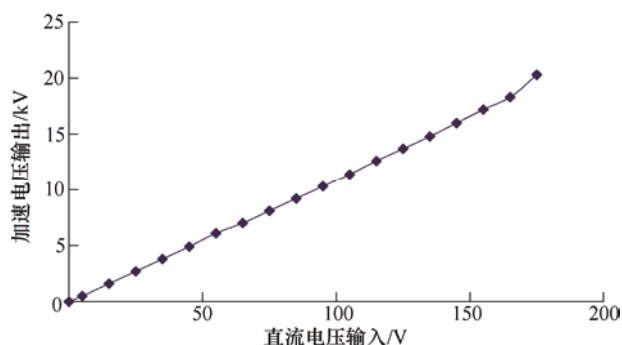


图 9 空载时高压电源输出特性

从图 9 中可以看出,输入电压从低向高逐渐增大时,加速电压逐渐增大,加速电源输出具有良好的线性度。

4.2.2 工作电压对束流输出的影响

真空达到 10^{-1} Pa 以下,采用氦-氧混合气体作为放电气体, O_2 气流量为 2 mL/min, He 气流量给定分别为 0.1 L/min、0.18 L/min、0.2 L/min、0.25 L/min,通过混气装置后再送入冷阴极电子枪放电腔室。调整第二级 AC-DC 输出电压,使高压反馈电压从 0 开始,每次增加 -0.3 V,即加速电压每次增加 -667 V,逐渐增加到最大,记录高压反馈电压 $|U_{hvf}|$ 对应的束流输出,检测结果绘制的曲线图如图 10 所示。

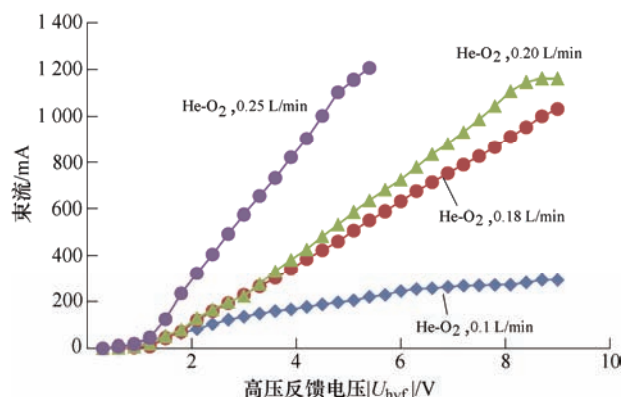


图 10 加速电压对应束流输出的关系曲线图

从图 10 中可以看出,加速电压较小,高压反馈电压 $|U_{hvf}|$ 小于 1 V 时,即使有气流量输入,也几乎没有束流;氦-氧混合气体中的 He 气流量为 0.1 L/min,当 $|U_{hvf}|$ 大于 6 V 时,随着加速电压增大,束流增加比较缓慢,这与工作气体流量给定后所能激发的二次电子数量受到限制有关;当氦-氧混合气体中的 He 气流量为 0.18 L/min,当 $|U_{hvf}|$ 大于 1 V 后,随着加速电压增大,束流输出线性增大,当 $|U_{hvf}|$ 达到 8 V 以上,束流反馈达到 1 000 mA;当氦-氧混合气体中的 He 气流量为 0.2 L/min,随着加速电压增大,束流增加的变化曲线与 He 气流量为 0.18 L/min 的相似,但同等加速电压条件下,其束流值较大;当氦-氧混合气体中的 He 气流量增大到 0.25 L/min,随着加速电压增大,束流快速增加,当 $|U_{hvf}|$ 达到 5 V 以上时,束流即能达到 1 200 mA,表明气流量大,可提供电离的正离子多,相应产生二次电子数量增大,束流相应较大,但是加速电压继续增加易引起电源保护,无法获得较高加速电压。以上试验现象表明, O_2 气流量为 2 mL/min 不变时,氦-氧混合气体中的 He 气流量在 0.18~0.2 L/min 范围内,能够获得较高加速电压与较大束流输出效果。

4.2.3 气流量对束流输出的影响

加速电压给定不变, 反馈电压为 -8.2 V , 氢-氧混合气流量从 0 逐渐增加到 0.2 L/min , 每次增大 0.01 L/min , 记录给定气流量对应的束流输出大小, 检测结果如图 11 所示。为了避免氢-氧混合气流量中氧气含量过高, 超过 5% 以后引起丝束同轴冷阴极电子枪剧烈放电现象发生, 氢-氧混合气流量中氧气始终按照 2% 的比例混入。

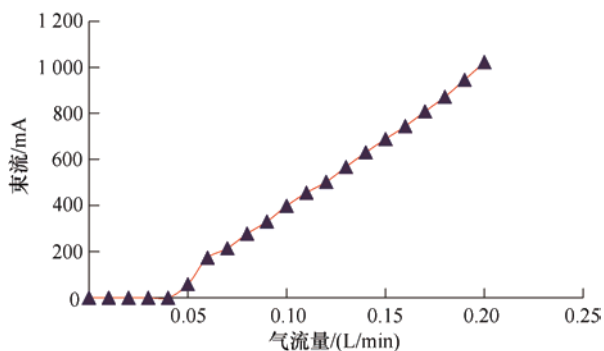


图 11 氢-氧混合气流量与束流输出对应关系曲线图

从图 11 中可以看出, 氢-氧混合气流量 $<0.05\text{ L/min}$ 的时候, 几乎没有束流输出, 气流量 $\geq 0.05\text{ L/min}$, 才开始有束流输出, 束流大小随着氢-氧混合气流量的增大而增大, 且线性度较好。

4.3 熔丝成形工艺试验

4.3.1 熔丝成形效率检测

分别采用所研制束源以不同功率、送丝速度进行熔丝成形, 检测直径 2 mm 的 TC4 钛合金丝材 10 min 时间内使钛合金基板增加的重量, 再计算出成形效率。

在试验过程中, 采用氢-氧混合气体, 氧气流量保持为 3 mL/min 不变, 同时保持工作电压 -14 kV 不变, 调整氢-氧混合气流量, 调节束流输出, 不同气流量给定及束流输出对应的熔丝成形效率如表 1 所示。在表 1 中, 还给出了气流量为 0 的常规热阴极电子束熔丝成形参数, 热阴极电子束熔丝成形工作电压 -60 kV 。

表 1 不同束流功率对应的熔丝成形效率

氢-氧气流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	束流 I_b/mA	送丝速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	增加重量 G/g	成形效率 kg/h
0.1	253	20	172	1.03
0.12	341	50	437	2.62
0.15	470	80	701	4.21
0.2	779	100	876	5.23
0	190	100	850	5.1

给定电压保持不变时, 随着氢-氧混合气流量增大, 束流输出逐渐增加, 相应增加送丝速度, TC4

丝材在 10 min 内沉积到基板上的重量逐渐增大, 成形效率相应随着束流功率和送丝速度增大而增大。

此外, 从表 1 中还可以看出, 成形效率是与束源功率、送丝速度密切相关的函数。

在氢-氧气流量为 0.2 L/min , 束流 779 mA , 送丝速度为 100 mm/s , 采用搭桥过渡模式, 在 10 min 内检测基板上沉积金属重量增加了 876 g , 熔丝成形效率达到 5.23 kg/h , 比用总熔化丝材体积计算的重量少了几克, 这与熔丝成形过程金属蒸气挥发、元素烧损有关。

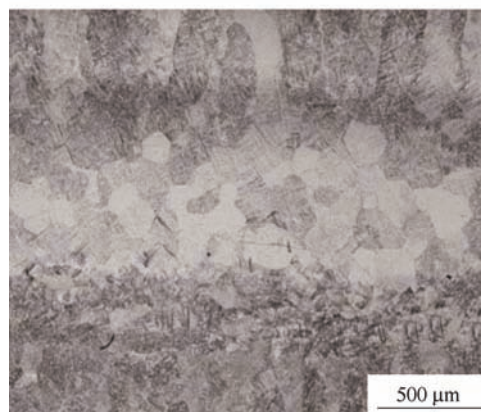
从表 1 中还可以看出, 熔丝成形效率达到 5 kg/h 以上, 丝束同轴冷阴极电子束源需要功率为 9 kW 左右, 而常规热阴极电子束源需要的功率至少需要达到 11 kW , 由此可见, 与常规热阴极电子束相比, 在同等功率条件下, 丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形效率更高。

4.3.2 熔丝成形微观组织

采用所研制的丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形设备在 8 mm 厚的钛合金基板上, 采用 $\phi 2\text{ mm}$ 的 TC4 钛合金丝材熔丝成形出 $100\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的试验样件, 分别沿平行于熔丝成形方向、垂直于熔丝成形方向截取金相试样, 不同方向的成形组织分别如图 12、图 13 所示。



(a) 平行于熔丝成形方向低倍组织



(b) 平行于熔丝成形方向的层与层之间组织

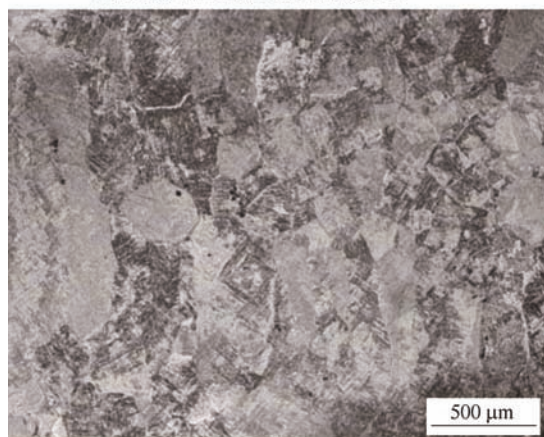
图 12 平行于熔丝成形方向

如图 12a 所示, 平行于熔丝成形方向熔丝成形组织宏观表现为层层堆叠结构, 层与层之间边界清晰; 层与层之间的组织由等轴晶层和柱状晶层交替组成, 如图 12b 所示, 柱状晶高度为 $1\sim 2\text{ mm}$, 等轴晶层的宽度为 $500\sim 800\text{ }\mu\text{m}$, 等轴晶尺寸约为 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 。

如图 13a 所示, 垂直于熔丝成形方向上的成形试验样件的组织在宏观上表现为按照成形高度方向搭接的鱼鳞状结构, 而微观条件下仍表现为柱状晶-等轴晶交替出现组织, 如图 13b 所示。



(a) 垂直于熔丝成形方向的低倍组织



(b) 垂直于熔丝成形方向的层与层之间

图 13 垂直于熔丝成形方向

与轴侧送丝电子束熔丝成形 TC4 试样的组织相比, 丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形的钛合金组织得到明显改善, 轴侧送丝成形的组织, 仅在其基板和过渡区出现等轴晶, 其他成形区几乎完全为柱状晶, 柱状晶宽度可达到 5 mm 以上, 高度可达到 4 cm ; 而丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形得到的柱状晶尺寸远小于轴侧送丝^[16], 这是因为丝束同轴熔丝成形过程中, 电子束的能量几乎都集中在丝材上, 基板及成形件上没有大量额外热输入, 使成形件的冷却速率快, 不会引起已成形层的熔化, 避免了外延生长。

熔丝成形工艺试验结果表明, 所研制的丝束同轴冷阴极电子束源具有良好的熔丝成形工艺适用性, 为大型金属结构的制备提供了一种优质束源技术。但是, 该项技术在国内研究还处于实验室阶段, 为了促进该项技术在国内的发展, 涉及丝束同轴冷阴极电子枪的静电汇聚焦点灵活调节方法、电子枪结构的小型化设计, 以及气流分布状态对束斑形貌的影响, 都需要进行深入研究。

5 结论

(1) 环形阴极、阳极、导丝嘴及导丝管以丝材为轴心的同轴安装方式, 保证了环形束流在丝端高度汇聚, 获得丝束同轴熔丝成形的必备条件。

(2) 基于三级 AC-DC 转换主电路拓扑、加速电源电压闭环控制电路、束流闭环控制电路研制的逆变电源, 不但其电压输出具有良好线性度, 而且, 在气流量给定条件下, 随着加速电压增大, 丝束同轴冷阴极电子束源输出束流逐渐增大。

(3) 加速电压给定不变时, 在氮-氧混合气流量 $\geq 0.05\text{ L/min}$, 束流随着气流量增大而增大; 在氮-氧混合气流量达到 0.2 L/min , 送丝速度 100 mm/s , 束源工作电压 -14 kV , 束流 779 mA , 熔丝成形效率达到 5 kg/h 以上。

(4) 丝束同轴熔丝增材制造样件的微观组织, 在平行于熔丝成形方向与垂直于熔丝成形方向上均出现大量的柱状晶-等轴晶交替出现组织, 且柱状晶尺寸远小于热阴极电子束轴侧送丝技术。

参 考 文 献

- [1] 李绍伟, 郜庆伟, 赵健, 等. 电子束熔丝增材制造研究进展及展望[J]. 中国材料进展, 2021, 40(2): 130-138. LI Shaowei, GAO Qingwei, ZHAO Jian, et al. Research progress and prospect of electron beam freeform fabrication[J]. Materials China, 2021, 40(2): 130-138.
- [2] 王钰, 王凯, 丁东红, 等. 金属熔丝增材制造技术的研究现状与展望[J]. 电焊机, 2019, 49(1): 69-77, 123. WANG Yu, WANG Kai, DING Donghong, et al. Research status and prospect of metal wire additive manufacturing technology[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(1): 69-77, 123.
- [3] 陈国庆, 树西, 张秉刚, 等. 国内外电子束熔丝沉积增材制造技术发展现状[J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 123-128.

- CHEN Guoqing, SHU Xi, ZHANG Binggang, etc. State-of-arts of electron beam freeform fabrication technology [J]. Transactions of the china welding institution. 2018, 39(8): 123-128.
- [4] 付贝贝. 电子束送丝系统及增材制造工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- FU beibei. Research on the electron beam wire feeding system and the processing of material additive manufacture[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [5] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013(13): 66-71.
- GONG Shuili, SUO Hongbo, LI Huanxue. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technolog, 2013(13): 66-71.
- [6] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
- LU Bengheng. The present and the future of additive manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19-23.
- [7] 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", September 11-16, 2016, Kiev, Ukraine, 1-4.
- [8] DENBNOVETSKY S V, MELNYK V I, MELNYK I V. High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its technology application[C]// International Symposium on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum, 2002: 111-114.
- [9] FEINAEUGLE 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, 202-209.
- [10] DENBNOVETSKY S V, MELNYK V G, MELNYK I V. High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realizing of different technological operations [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5), 987-993.
- [11] BALACEANU M, DINU L, POPOVICI C. The space distribution of the electron beam in a glow discharge electron gun and its correlation with the cathode geometry [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1985, 18, 835-841.
- [12] 许海鹰, 左从进. 一种丝束同轴的熔丝增材制造电子枪装置: 中国, 201810235235.7[P]. 2018-03-21.
- XU haiying, ZUO congjin. A type of electron beam gun of electron beam coaxial wire for fuse additive manufacturing: China, 201810235235.7[P]. 2018-03-21.
- [13] 许海鹰, 巩水利, 桑兴华, 等. 一种丝束同轴的电子束熔丝增材制造设备: 中国, 201910505687.7[P]. 2019-06-12.
- XU haiying, GONG shuili, SANG xinghua, etc. A type of fuse additive manufacturing equipment of electron beam coaxial wire: China, 201910505687.7 [P]. 2019-06-12.
- [14] DENBNOVETSKIY S V, MELNYK V G, MELNYK I V, et al. Generation of electron beams in high voltage glow discharge in pulse regime[C]// Electronics and Nanotechnology. Proceedings of the XXXII International Scientific Conference ELNANO 2012. April, 10-12, 2012. Kiev. Ukraine, 40-41.
- [15] 杜秉初. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- Du Bingchu. Electron Optics[M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 2002.
- [16] ZHANG Jiahua, YANG Yi, CAO Sheng, et al. Fine equiaxed β grains and superior tensile property in Ti - 6Al - 4V alloy deposited by coaxial electron beam wire feeding additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 33(10): 1311-1320.

作者简介: 许海鹰(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为高能束源技术开发及其应用研究工作, 获得 40 余项发明专利授权, 发表论文 60 余篇。

E-mail: xhyxy@126.com