



空间用电子束焊枪电聚焦问题的研究

李春旭¹, 蒋彩云¹, 许启晋²

(1. 甘肃工业大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州物理研究所 甘肃 兰州 730000)

摘要:介绍了国内外空间焊接技术的研究状况,提出了我国空间电子束焊枪用等径三圆简单透镜作为主透镜的电聚焦系统设计方案和计算机辅助设计方法,利用计算机编程完成了聚焦系统的参数概算并取得了满意的结果,研究结果表明:电子束电流散焦小,工件上的束斑半径最小可达0.656 15 mm,可满足空间焊接和切割的需要,并证实了空间电子枪电聚焦系统的计算和设计方法是正确的。

关键词:空间焊接;等径三圆简单透镜;计算机辅助设计

中图分类号: TG439.3; TN101 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2003)05-0025-03

Design of electrostatic focusing system of the space electron beam gun

LI Chun-xu¹, JIANG Cai-yun¹, XU Qi-jin²

(1. College of Materials Science and Engineering, Gansu Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Lanzhou Physics Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: It introduces the developmental situation of space welding technology at home and abroad, puts forward the designing scheme and the computer aided design (CAD) of main focusing system of the domestic space electron beam gun with equi-diameter three-cylinder electrostatic unipotential lens. The parameters calculation of the focusing system is completed on the computer and the result shows that the main target and the design method of the electrostatic focusing system are reasonable and the calculation is correct.

Key words: space welding; equi-diameter three-cylinder electrostatic unipotential lens; CAD

空间有着无限的财富和能源,空间领域已成为高技术发展的热点区。随着航天技术、宇宙科学研究和空间工业的发展,为实现更大规模的空间利用,空间大国都十分重视发展在轨建造技术,以实现对大型空间站等长寿命飞行器的轨道组装。此外,长寿命航天飞行器在使用过程中,由于陨石和宇宙碎片的碰撞穿孔、太空射线辐射、空间温度急剧变化,以及空间材料本身的故障,空间飞行器的飞行超过2 000 昼夜就需要维修。随着飞行器飞行时间的增长和规模的不断扩大,故障率必然增大,所以空间维修(包括空间焊接和切割)将成为保障航天飞行器可靠而安全使用的必不可少的措施。未来航天飞行器的空间组装和维修均离不开焊接,发展适用于空

间环境的焊接技术十分必要^[1]。

从国外多年的研究成果看,电子束焊接是空间焊接的理想方法。而该项技术的核心是电子枪的设计问题。目前,美国和前苏联均已成功研制出空间便携式电子束焊枪。而国内在这方面的研究尚属空白,在此就空间电子束电聚焦系统项目进行了研究。

1 设计方案

空间站用手工电子束焊枪和地面用电子束焊枪在原理上没有区别。电子枪依靠阴极发射电子,电子在阳极与阴极之间的加速电压作用下被加速,同时在聚束极作用下被汇聚成束从阳极孔通过,通过阳极的电子束又在电荷作用下发散,利用电(或磁)透镜将电子束汇聚到工件上,撞击工件使金属熔化实现焊接。电子枪可分为2个区,一个是阴极和阳极之间的静电区,另一个是阳极以外的透镜区,原理如图1所示。

但空间环境是一个特殊的环境,它具有微重力

收稿日期:2003-04-01

基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(ZS022-A25-014)

作者简介:李春旭(1941—),女,辽宁鞍山人,教授,博士生导师,机械工业科学专家,主要从事焊接工程自动化及焊接质量控制研究工作,科研成果多次获奖并转化,在国内外学术刊物上发表论文50余篇。

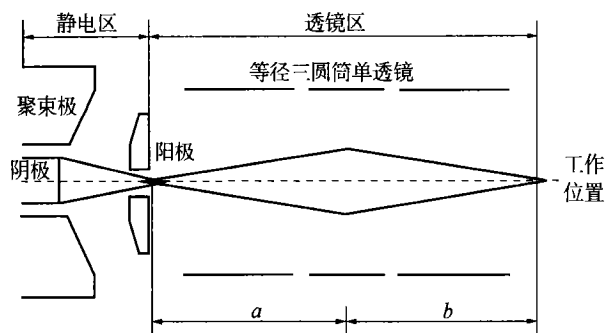


图 1 用等径三圆筒单透镜作主透镜的电子束焊枪原理图
($10^{-5} \sim 10^{-6}$ g)、空间真空(低于 $1.33 \times 10^{-4} \sim 10^{-7}$ Pa)、明暗界限的存在(急剧的温度变化 $-200 \sim +90$ °C)和强射线辐照等特点。这些因素必然对焊接过程带来深刻影响。空间用电子束焊机因必须运到空间去进行焊接操作,故需适应空间特殊环境,由于它靠火箭发射到空间,在空间由宇航员背负整套设备进行焊接操作,因此,质量轻、体积小这是最关键的指标之一。

电子束的聚焦方案可分为电聚焦和磁聚焦 2 大类。任何聚焦问题,都能用磁场聚焦来解决,在理论上和实践上对磁聚焦的方法已作了透彻的研究。用磁透镜作主透镜的优点:线圈(或永磁铁)套在管颈外面,场截面直径大,进入透镜的电子束容易满足旁轴条件,球差比较小。但磁透镜也有缺点:大尺寸磁装置导致较大的净重量;磁聚焦线圈要消耗功率,整机必须有可调的稳流电源,结构复杂,不经济;采用永久磁铁较笨重,且机械调聚焦比较困难;另外,调磁透镜与管轴重合麻烦^[2]。电透镜和磁透镜比较,电透镜质量轻且没有功率损耗,它由 2 个或 3 个金属薄壁圆筒构成,与普通示波管不同,需考虑在金属蒸汽环境下的绝缘问题。当然,电透镜也有缺点:只能把特殊的真空工业材料用于真空中;在具有较高电压的系统中,各电极的形状和位置不能任意选择;装配时必须严格实现电子枪和聚焦系统的对中。通过对比分析后,我们选定电聚焦方案。电子枪的静电主聚焦透镜通常可分为双电位式(浸透透镜)和单电位式(单透镜)2 类。主聚焦透镜采用单透镜的电子枪有如下优点:**a.** 电流散焦小;**b.** 由于会聚角小,在偏转磁场中束截面较小;**c.** 对电压的稳定性要求不高;**d.** 可采用较低的聚焦电压;**e.** 结构可做成封闭式,对杂散场屏蔽较好^[3]。

单透镜一般由 3 个电极组成,2 个外电极的电压相等,故透镜两边是电位相同的等位区,中间极

电位可以低于或高于外电极电位,前者用得较多。单透镜的电极和等位面形状一般是左右对称的,又名对称透镜^[4]。常用的单透镜由三膜片或三圆筒组成,由于等径三圆筒结构相对简单,在本研究中,我们决定选择等径三圆筒单透镜作为主聚焦透镜(见图 1)。单透镜最简单的供电方法是将两边的电极均接地,中间电极处于负高压,称为单电压透镜。由于中间电极上是负高压,因此中间电极不截获电子,由这种聚焦系统构成的电子枪通常称为零电流电子枪^[5]。考虑到空间电子束焊枪的结构应尽可能简化,所以我们设计的电子枪是由单电压透镜构成的零电流电子枪。

国内外对等径三圆筒对称单透镜进行过大量的计算机模拟计算,但所有这些计算都没考虑空间电荷效应的影响。由于电子束焊接时束流很大($I_a = 100$ mA),所以电聚焦系统的设计必须考虑空间电荷效应,这里空间电荷的影响是起主导作用的物理因素,主要表现在以下 3 个方面。

- 由电子产生的负空间电荷会引起电子束区域内电位的跌落;
- 电子之间的排斥力引起电子束的扩张;
- 电子束电流受空间电荷的限制^[6]。

通常用导流系数 P 来表征和度量空间电荷的效应, $P = I_a / U_a^{3/2}$ (单位: $\text{A} \cdot \text{V}^{-3/2}$), 空间电荷的全部作用都与导流系数有关。如果考虑空间电荷效应,静电透镜的分析计算将是一个非常复杂的问题。

2 计算机辅助设计方法

经过反复论证,并参考国外的研究成果,在设计我国的空间电子束电聚焦系统时,我们选定的初始条件是:电子枪加速电压 $U_a = 10$ kV, 功率 1 kW (束流 $I_a = 100$ mA), 物距 $a = 50$ mm, 像距 $b = 50$ mm。其中物距指电子束从阳极孔出来的最小束腰位置到透镜中心平面的距离,像距指透镜中心平面到工件的距离。本研究结合上述的具体参数研究静电聚焦系统的光学性能和计算方法,确定满足空间焊接要求的最佳透镜结构、几何尺寸以及电参数,并通过实验来验证理论计算的正确性。

80 年代以来,电子计算机辅助设计一直广泛地应用于电子光学问题的设计中,这就使经典的电子光学理论与研制器件、仪器和装置的实际技术两者结合起来了,并取得了很大的进展。运用计算



机辅助设计,可以求解在考虑空间电荷效应情况下的运动方程和轨迹方程、计算电子束在电场中运动的轨迹包络、计算聚焦系统的光学参量、计算工件上的束斑半径、计算像差等,最后得到工件上有最小束斑半径时对应的电聚焦系统的几何参数和电参数。

由电动力学方程,我们可以得到柱坐标系下,电子束在主透镜电场中运动的自治性方程组:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{\rho(r, z)}{\epsilon_0} \quad r > 0, \quad (1)$$

$$2 \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{\rho(0, z)}{\epsilon_0} \quad r = 0, \quad (2)$$

$$\ddot{r} = \eta \sigma \left[\frac{\partial u}{\partial r} \left(1 - \frac{r^2}{c^2} \right) - \frac{\partial u}{\partial z} \frac{r \dot{z}}{c^2} \right], \quad (3)$$

$$\ddot{z} = \eta \sigma \left[\frac{\partial u}{\partial r} \left(1 - \frac{z^2}{c^2} \right) - \frac{\partial u}{\partial r} \frac{r \dot{z}}{c^2} \right], \quad (4)$$

式中 u 为电场电位(单位:V); r 为 r 轴向的位移(单位:m); z 为 z 轴向的位移(单位:m); $\rho(r, z)$ 为空间电荷密度(单位:C/m³); ϵ_0 为真空介电常数($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m); c 为光速($c = 2.998 \times 10^8$ m/s); σ 为相对论修正系数

[$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{\eta}{c^2} u}$, 其中 $\eta = \frac{e}{m_0}$ (静止电荷的荷质比)], $\eta = 1.758 8 \times 10^{11}$ C/kg]。

对此方程组,需用数值分析的方法来求解。本研究采用 Fortran 语言编程计算^[7],这样可有效提高运算速度,编程与 Origin 软件配合可将大量计算数据快速形成直观的曲线,从而迅速完成对电子光学系统的整体分析。计算程序主要包括主程序、电位子程序、电子运动方程子程序、空间电荷密度子程序4个部分。用循环迭代法解电位方程(1)、(2),采用非均匀网格有限差分方法,对主透镜电场部分进行网络剖分。采用流管法计算空间电荷,采用欧拉(Euler)法计算电子运动方程(3)、(4)。主程序框图如图2所示。

3 结论

通过对电子光学系统的理论分析,并用数值分析方法求解了电子束在主透镜电场中运动的自治性方程,并用 Fortran 语言编程计算,其结果表明电子束电流散焦小,会聚角小,在偏转磁场中束截面较小,较低的聚焦电压,工件上的束斑半径最小可达到 0.656 15 mm,能满足空间焊接和切割的需要。证明了所设计的等径三圆简单透镜作为主聚焦透镜的电聚焦方案是切实可行的。

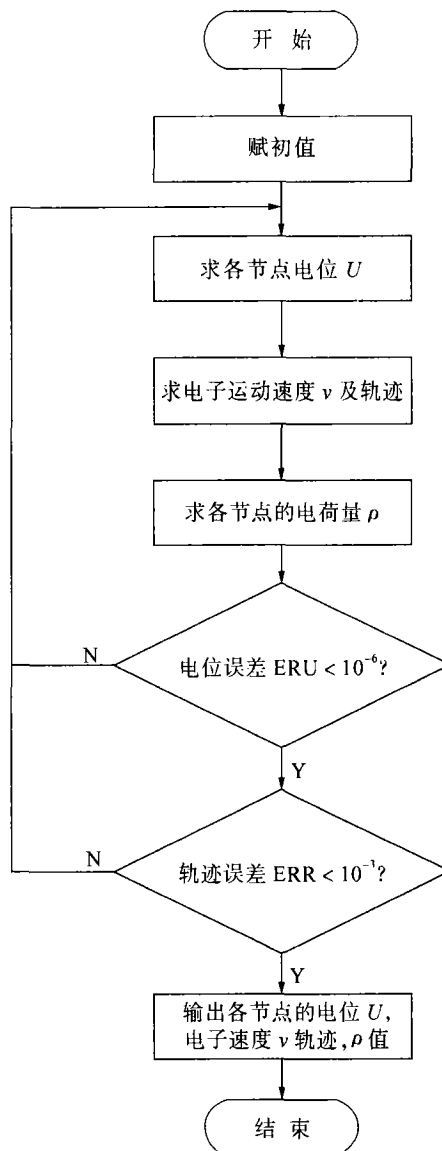


图2 主程序计算流程图

参考文献:

- [1] 李志远,钱乙余,张九海.先进连接方法[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 唐传尧.电子束管[M].北京:国防工业出版社,1979.
- [3] 童林凤,西门继业,丁守谦.电子光学计算机辅助设计[M].北京:国防工业出版社,1990.
- [4] 赵国骏,于毓麟,院宝崧.电子光学[M].北京:国防工业出版社,1980.
- [5] 应根裕,刘敏文,孙伯尧.电子光学[M].北京:清华大学出版社,1984.
- [6] 纳吉 G A,西拉支 M.空间电荷光学导论[M].莫元龙,刘世程,候文秀译.北京:科学出版社,1983.
- [7] 桂良进,王 军,董 波.Fortran Power Station 4.0 使用与编程[M].北京:北京航空航天大学出版社,1999.